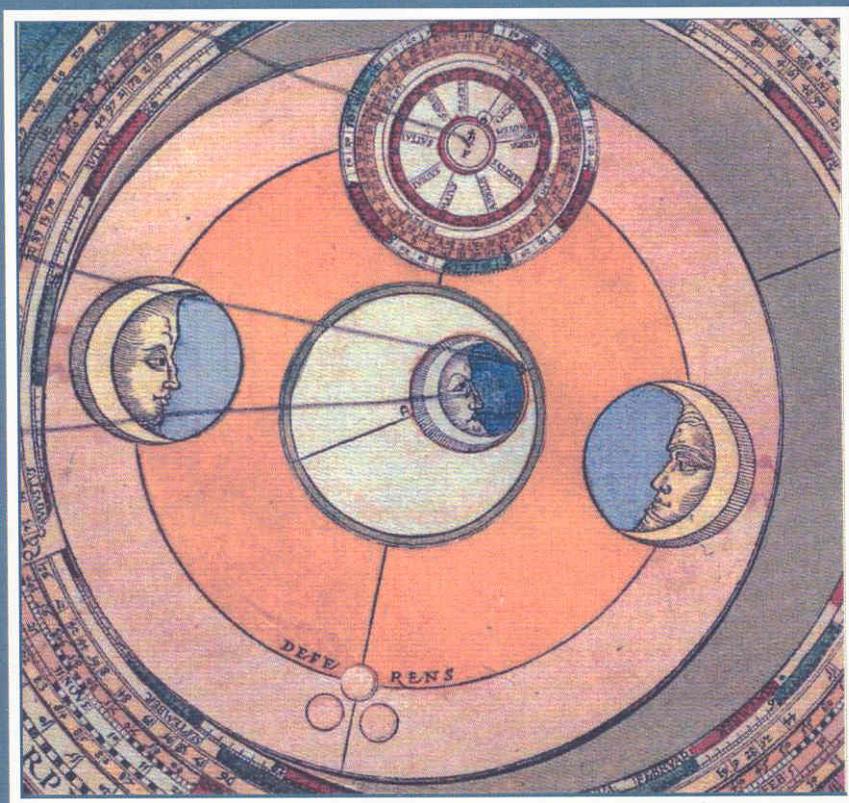




ACCADEMIA MONTALTINA DEGLI INCULTI

ANGELO ANGELETTI - MANLIO BELLESI



APPUNTI DI ASTRONOMIA

QUINTA EDIZIONE

ANGELO ANGELETTI
MANLIO BELLESI

***APPUNTI
DI ASTRONOMIA***

PUBBLICAZIONE REALIZZATA
DALL'ACCADEMIA MONTALTINA DEGLI INCULTI
NELL'AMBITO DELLA 5^a EDIZIONE DELLA SCUOLA DI ASTRONOMIA
E METEOROLOGIA "PAOLO ANTONIO FOSCARINI" IN COLLABORAZIONE
CON IL COMUNE DI MONTALTO UFFUGO
E L'ASSOCIAZIONE ASTRONOMICA HELIOS

Prefazione

La scuola estiva di astronomia e meteorologia “P. A. Foscarini”, giunta alla quinta edizione, rappresenta uno dei migliori servizi culturali offerti dall’Accademia Montaltina degli Inculti al comprensorio cosentino.

Essa ha come obiettivo la formazione dei giovani negli indirizzi fisico, matematico e soprattutto astronomico (senza peraltro trascurare l’aspetto filosofico-letterario), in modo da avvicinarli sempre di più alla scienza e al metodo scientifico.

La scuola estiva si articola nel corso dell’anno in due fasi distinte ma integrate.

Il primo ciclo si tiene di regola verso gli inizi del mese di settembre di ogni anno e ha come tema l’astronomia e le scienze affini: nel corso degli ultimi anni il principale oggetto di studio è stato il Sistema Solare. Nell’ambito di questa programmazione sono previste anche esercitazioni pratiche sull’osservazione del cielo stellato (a occhio nudo, con binocoli e con telescopi), con l’intento di fornire agli allievi nozioni di base sull’astronomia osservativa e strumenti per comprendere alcune scoperte fondamentali dell’astronomia antica, troppo spesso sottovalutate dal punto di vista “moderno”..

La seconda parte, che si tiene di regola a ridosso delle festività natalizie, concentra la sua attenzione sui protagonisti delle scoperte astronomiche, discutendo la loro importanza per l’avanzamento della comprensione della scienza, anche attraverso l’interazione interdisciplinare con la storia, la filosofia ed altri campi del sapere.

Il progetto si attua in collaborazione con le istituzioni locali e nazionali: la regione Calabria, la Provincia di Cosenza, il Ministero dei Beni e le Attività Culturali, il

Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, il Comune di Montalto Uffugo, l'Associazione Astronomica Helios, e i Comuni associati all'Accademia (San Vincenzo la Costa, Rota Greca, Torano Castello, Aprigliano, Lattarico e San Benedetto Ullano) unitamente alla partecipazione della BCC di San Vincenzo la Costa, dell'Università della Calabria e di altri Atenei, come pure delle riviste più rinomate del settore scientifico, che con la loro adesione danno supporto costruttivo al progetto.

L'iniziativa ha valenza nazionale, anche se il suo bacino di utenza sono gli istituti superiori della provincia di Cosenza, da dove proviene la maggior parte degli iscritti.

Nell'ambito della scuola vengono pubblicate delle dispense, unitamente alla preparazione di alcuni cd-rom che fungono da adeguato supporto alle finalità del progetto.

Si specifica, infine, che nelle ultime edizioni la scuola ha avuto una presenza media di cinquanta corsisti l'anno.

Montalto Uffugo, luglio 2006

Dott. Luciano Romeo



Associazione Helios - Montalto Uffugo



SCUOLA ESTIVA DI ASTRONOMIA E METEREOLOGIA

P. ANTONIO FOSCARINI

MONTALTO UFFUGO (Cs)

Ministero dell'Istruzione, dell'Università della Ricerca

Ministero per i beni e le attività culturali

Amministrazione Comunale di Montalto Uffugo (Cs)

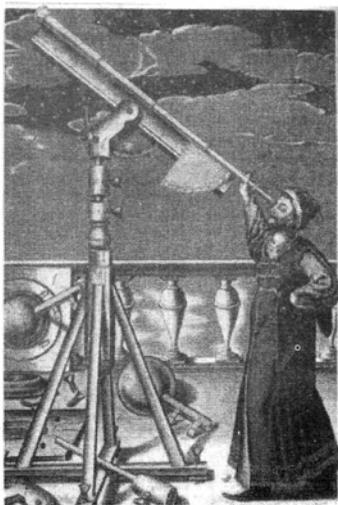
Agenzia Spaziale Italiana

Amministrazione Provinciale di Cosenza

Regione Calabria

Società Astronomica Italiana - Sezione Calabrese

Distretto Scolastico n. 22 Montalto Uffugo



PIANO INTEGRATO DI SVILUPPO DELLE SCIENZE ASTRONOMICHE, FISICHE E METEREOLOGICHE

Anno Accademico 2002-2003

Accademia Montaltina
degli Incolti



Sezione
Calabrese



Associazione
Astronomica HELIOS



**SCUOLA ESTIVA DI ASTRONOMIA
E METEOROLOGIA**

P. ANTONIO FOSCARINI

I° CICLO DEL CORSO
ANNO ACCADEMICO 2003 - 2004

MARTE
IL PIANETA ROSSO

25 - 29 AGOSTO 2003

Montalto Uffugo Centro (CS)
Istituto Magistrale S. Rita da Cascia

Orario del Seminario
Parte Teorica

9.30 - 12.30 • 15.30 - 18.30

Parte Osservativa 21.00 - 23.00

Accademia Montaltina
degli Inculti



Associazione
Astronomica HELIOS



SCUOLA ESTIVA DI ASTRONOMIA E METEOROLOGIA

P. ANTONIO FOSCARINI
III Edizione

1° CICLO DEL CORSO
ANNO ACCADEMICO 2004-2005

I pianeti interni
del sistema solare
**VENERE
e MERCURIO**

30 AGOSTO - 3 SETTEMBRE 2004
Montalto Uffugo Centro (Cs)
Istituto Magistrale S. Rita da Cascia

ORARIO DEL SEMINARIO
Parte Teorica 9.30 - 12.30 * 15.30 - 18.30
Parte Osservativa 21.00 - 23.00



Accademia
Montaltina
degli Inculti



Comune di Montalto Uffugo
Assessorati alla Cultura e Pubbl. Istr.
Turismo e Spettacolo



Associazione
Astronomica
HELIOS

SCUOLA ESTIVA DI ASTRONOMIA E METEOROLOGIA

P. ANTONIO FOSCARINI
IV Edizione

1° CICLO DEL CORSO
ANNO ACCADEMICO 2005-2006

GAIÀ

IL PIANETA DELLA VITA

29 AGOSTO - 2 SETTEMBRE 2005
Montalto Uffugo Centro (Cs)
Istituto Magistrale S. Rita da Cascia

ORARIO DEL SEMINARIO
Parte Teorica 9.30 - 12.30 • 15.30 - 18.30
Parte Osservativa 21.00 - 23.00



Accademia
Montaltina
degli Inculti



Comune di Montalto Uffugo
Assessorati alla Cultura e Pubbl. Istr.
Turismo e Spettacolo



Associazione
Astronomica
HELIOS

SCUOLA ESTIVA DI ASTRONOMIA E METEOROLOGIA

P. ANTONIO FOSCARINI
1ª Edizione

1º CICLO DEL CORSO
ANNO ACCADEMICO 2006-2007

ASTEROIDI, COMETE E METEORITI

28 AGOSTO - 1 SETTEMBRE 2006
Montalto Uffugo Centro (CS)
Istituto S. Rita da Cascia



ORARIO DEL SEMINARIO

Parte Teorica 9.30 - 12.30 • 15.30 - 18.30
Parte Osservativa 21.00 - 23.00

Presentazione

Questo materiale è frutto delle attività da noi svolte in tanti anni di divulgazione dell'Astronomia.

In qualità di docenti di fisica presso le scuole superiori (Liceo Scientifico di Macerata) e di astrofili (Associazione Astrofili "Crab Nebula" di Tolentino), molte volte ci è stato richiesto di parlare dei temi principali dell'Astronomia; l'appuntamento della Scuola di Montalto Uffugo è stato senz'altro uno dei più importanti (Angeletti è stato presente fin dalla prima edizione del 2002, Bellesi dalla seconda).

I testi non sono ovviamente del tutto originali; molto materiale deriva da articoli, pagine di libri, siti internet da noi letti e studiati in questi anni e più o meno rielaborati. Se qualcuno dovesse riconoscere in queste pagine immagini e testi non debitamente citati, non ce ne voglia e ce lo comunichi: provvederemo a correggere l'omissione in eventuali altre edizioni. Si sappia comunque che il presente materiale viene diffuso gratuitamente, ed esclusivamente ai partecipanti alla Scuola di Astronomia e Meteorologia di Montalto Uffugo. **Non sono consentite altre forme di diffusione al di fuori dell'ambito scolastico.** Teniamo inoltre a precisare che per questa pubblicazione non abbiamo percepito alcun compenso.

Abbiamo ripreso i temi trattati nei vari anni della Scuola e li abbiamo sistemati in una sequenza che a noi sembra logica. Il filo conduttore delle varie edizioni è il Sistema Solare, che quindi occupa la maggior parte del testo. I primi due capitoli sono dedicati agli aspetti più generali dell'Astronomia. Nel capitolo 1 si parla dell'Universo, della sua origine ed evoluzione; nel capitolo 2 del Sole e delle stelle. Negli altri sette capitoli ci occupiamo dei pia-

neti: nel capitolo 3 di Mercurio, nel 4 di Venere, nel 5 della Terra, nel 6 della Luna, nel 7 di Marte, nell'8 dei pianeti esterni (Giove, Saturno, Urano, Nettuno e Plutone) e infine nel capitolo 9 accenniamo ai corpi minori, che è il tema di questa edizione della scuola. Gli ultimi due capitoli non sono stati ancora affrontati nella scuola e per forza di cose sono meno ricchi.

Si è cercato di essere il più possibile semplici, sia nel linguaggio, sia nei concetti; si è evitata, per quanto possibile, qualunque trattazione matematica. Nel testo sono quasi del tutto assenti equazioni; per chi volesse approfondire, nella bibliografia sono riportati diversi testi di carattere universitario in italiano e in inglese.

Come si usa fare in queste occasioni, anche noi vogliamo ringraziare qualcuno. Gli amici dalla nostra Associazione Astrofili vanno ricordati per le notti che abbiamo passato insieme all'Osservatorio Astronomico "Padre Francesco De Vico" a riprendere gli oggetti celesti. Giorgio Di Iorio perché ci ha fornito parte del materiale utilizzato per il capitolo sulla Luna che lui aveva proposto nella prima edizione della scuola. Infine un riconoscimento speciale al dott. Luciano Romeo che ha voluto tutto questo.

Ci scusiamo per i refusi che saranno presenti, nonostante il nostro impegno nell'eliminarli.

Macerata, luglio 2006

Angelo Angeletti
Manlio Bellesi

L'UNIVERSO: STRUTTURA ED EVOLUZIONE

1.1 – LE GALASSIE

Con il termine galassia i greci designavano la Via Lattea, cioè quella striscia lattescente che attraversa il nostro cielo notturno e ben visibile sotto cieli sufficientemente bui, specie d'estate. Oggi, con questo termine, indichiamo degli immensi sistemi composti da gas, polveri, stelle, pianeti, ..., tenuti insieme dalla forza di gravità. Il Sole fa parte di una galassia chiamata Galassia (con l'iniziale maiuscola); la Via Lattea è una parte della Galassia, quella visibile dalla Terra. La scoperta delle galassie ha una storia lunga e travagliata, basti pensare che agli inizi del '900 non era ancora chiaro se le varie nebulose visibili nel cielo fossero oggetti appartenenti alla nostra galassia o esterni ad essa.

Le galassie possono contenere da qualche miliardo di stelle (quelle più piccole) fino a circa mille miliardi (quelle più grandi). Esse non hanno un bordo netto, ma le stelle diminuiscono andando dal centro verso la periferia; per tale motivo, quando si parla di diametro di una galassia si intende il diametro di una circonferenza di centro coincidente con quello della galassia e contenente metà dello splendore totale. Il diametro delle galassie va da alcune decine di migliaia fino a qualche centinaio di migliaia di anni luce^[1].

[1] L'anno luce è una unità di misura della distanza ed è lo spazio che la luce, che viaggia a circa 300.000 km/s, percorre in un anno. Un anno luce è circa 9500 miliardi di km.

Le stelle che compongono le galassie hanno un moto di rotazione intorno al centro con velocità variabili che sono determinabili con opportune tecniche di misura. La massa associata alla materia visibile non è però sufficiente a render conto di queste velocità: è necessaria molta più materia di quella che si vede (chiamata *materia oscura*). Uno dei problemi più importanti dell'Astrofisica moderna è appunto determinare la natura di questa massa mancante.

1.1.1 – La classificazione delle galassie

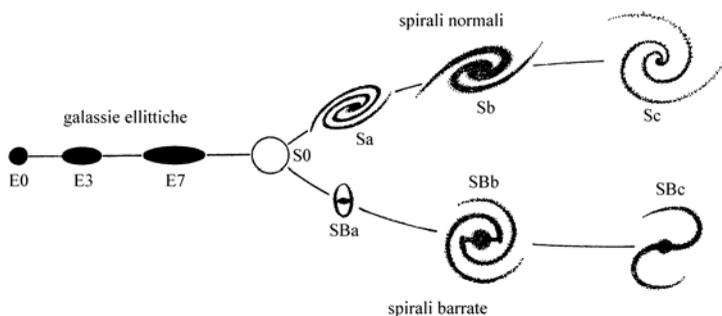


Fig. 1.1 – Classificazione delle galassie secondo Hubble.

Tra il 1924 e il 1926 l'astronomo americano Edwin Hubble, con il telescopio Hooker di 2,54 m installato nel 1918 a Mount Wilson in California, ottenne delle foto della nebulosa di Andromeda nelle quali erano evidenti le stelle che formano i bracci di una spirale. Successivamente altre nebulose furono risolte in stelle simili a quelle della Galassia ed anche esse presero il nome di galassie. Hubble propose quindi una classificazione in tre tipi fondamentali: galassie *ellittiche*, indicate con la lettera E; a *spirale*, indicate con la lettera S; *irregolari*, indicate con I.

Le galassie ellittiche sono così chiamate per la loro forma e sono composte da stelle di Popolazione II, cioè da stelle giganti rosse o gialle, nane rosse o gialle e da una quantità di stelle bianche di luminosità non troppo alta; mancano le giganti e le supergiganti bianco-blu e non vi sono polveri. Non si notano in genere, regioni di formazione stellare. Dall'esterno le galassie ellittiche differiscono solo per il loro maggiore o minore appiattimento. Hubble definì come *indice di ellitticità* la quantità $10 \cdot (a - b) / a$, dove a è il semiasse maggiore e b quello minore. Il valore che si ottiene è generalmente un numero frazionario, Hubble propose di approssimarlo all'unità, per cui i valori possibili per tale parametro sono gli interi da 0 a 10; in realtà non si osservano galassie ellittiche con indici di appiattimento superiori a 7.

Le galassie a spirale sono molto difformi, ma tutte presentano un nucleo centrale e dei bracci che partono da posizioni diametralmente opposte. Con le sue osservazioni, Hubble riuscì a cogliere la possibilità di dividerle in sottoclassi: come misura vennero usati il grado di sviluppo dei bracci e le dimensioni del nucleo della galassia. Si indicano allora con **Sa** le galassie a spirale i cui bracci sono poco sviluppati o appena accennati. Il nucleo di queste galassie è sempre grande: spesso è circa la metà delle dimensioni osservate della galassia stessa. Le meno sviluppate delle galassie Sa hanno l'aspetto di galassie ellittiche. Di regola i bracci a spirale sono due e fuoriescono da punti diametralmente opposti del nucleo: essi si sviluppano in modo simile e simmetricamente si perdono in due regioni opposte alla periferia della galassia. Sono comunque noti esempi di galassie con un numero maggiore di bracci a spirale. Nella sottoclasse **Sb** i bracci a spirale sono sensibilmente sviluppati, ma non hanno ricche ramificazioni. Il

nucleo è minore che in Sa. La galassia di Andromeda è di tipo Sb.



Fig. 1.2 – La galassie NGC4565 è una tipica galassia a spirale vista di lato; è evidente la fascia di gas e polveri del disco. Ripresa dall'Osservatorio Astronomico "Padre Francesco De Vico", Serrapetrona (MC)

Le galassie con bracci fortemente sviluppati, a loro volta suddivisi in molti altri, con nuclei piccoli in confronto a questi, appartengono al tipo **Sc**. In tutte le galassie a spirale viste di profilo è visibile una sottile regione oscura che sembra dividere la galassia in due parti; vicino al piano di simmetria si concentrano infatti polveri e gas. La Galassia appartiene al tipo Sb o Sc. L'appiattimento delle galassie a spirale, dato dalla relazione di cui sopra, dà valori prossimi a 8 per le galassie Sa, tra 8,5 e 9 per le galassie Sb e

maggiori di 9 per le Sc. I bracci delle spirali sono formati dalle stelle di Popolazione I, cioè da stelle calde giganti; nei bracci si trovano ampie regioni di formazione stellare.

Nelle comuni galassie a spirale i bracci fuoriescono direttamente dal nucleo; esistono però delle galassie in cui il nucleo è situato nel mezzo di una “barra” di stelle ed i bracci a spirale iniziano proprio dagli estremi di queste barre. Come quelle normali, le spirali barrate si suddividono in tre sottoclassi indicate con **SBa**, **SBb**, **SBc** a seconda del grado di sviluppo dei bracci. Non è ancora chiara la ragione dell’esistenza della barra.

Le galassie dei tipi finora menzionati sono caratterizzate da una forma simmetrica; esistono però numerose galassie di forma irregolare: ne sono un esempio le Nubi di Magellano, galassie satelliti della Via Lattea.

1.1.2 – La struttura della Galassia

La Galassia è costituita da circa duecento miliardi di stelle disposte a formare un disco; è circondata da un alone sferico costituito da ammassi globulari (ammassi compatti di stelle) ed è immersa in un alone ancora più ampio di materia oscura rilevabile solo per i suoi effetti gravitazionali.

Nella Via Lattea, come già detto la parte della Galassia visibile da Terra, sono presenti delle nubi di polveri e gas freddi^[2] che oscurano la visuale delle parti retrostanti (osservazioni al telescopio mostrano la presenza anche di nubi di gas caldi all’interno delle quali si stanno formando

^[2] Si ricordi che per temperatura di un gas si intende una quantità legata all’energia cinetica media delle particelle che lo compongono: in altre parole in un gas freddo le particelle si muovono a basse velocità, mentre in un gas caldo le particelle sono molto veloci.

nuove stelle); lo studio delle onde radio emesse da queste nubi, hanno permesso di stabilire che la Galassia può essere classificata probabilmente Sb o Sc. Si è potuto inoltre dedurre che la Galassia ha un diametro di circa 30 kpc^[3] (circa 100.000 anni luce) e il Sole si trova a 9 kpc (circa 30000 anni luce) dal centro. Nelle regioni esterne lo spessore è di 300 pc (circa 1000 anni luce) mentre al centro c'è un rigonfiamento, un bulbo di stelle (è più usato il termine inglese *bulge*) che ha un diametro di 7 kpc (circa 20000 anni luce) e uno spessore di 1 kpc (circa 3000 anni luce). Visto dalla Terra il centro della Galassia si trova nella costellazione del Sagittario.

Nella Galassia si osservano stelle di tutte le età: stelle molto vecchie sono distribuite nel bulge e nell'alone (stelle di Popolazione II) e si ritiene siano quanto rimane del primo periodo di grande formazione stellare all'epoca della formazione della Galassia stessa; stelle giovani (di Popolazione I) concentrate in uno strato di circa 500 pc (1500 anni luce) di spessore medio sul piano del disco, in cui la formazione delle stelle è ancora in atto; stelle di età intermedia, tra i 2 e 5 miliardi di anni (tra le quali il Sole), che sono distribuite sull'intero disco.

Le stelle del disco orbitano intorno al centro della Galassia: il Sole ha una velocità di 250 km/s e impiega circa 225 milioni di anni a compiere un giro completo. Lo studio del moto delle stelle permette di determinare la massa complessiva della Galassia (valutata in circa 1000 miliardi di masse solari) ossia circa 10 volte la massa de-

³ kpc = kiloparsec = 1000 parsec. Un parsec (pc) è la distanza a cui bisogna porsi per vedere il raggio dell'orbita terrestre (circa 150 milioni di chilometri) sotto l'angolo di 1" (in secondo di grado); equivale a circa $3,086 \cdot 10^{16}$ m, ovvero a 3,26 anni luce.

dotta dalla materia visibile. Questa è una prova dell'esistenza della materia oscura.

1.1.3 – Origine ed evoluzione delle galassie

È comunemente accettato che le galassie si siano formate dal raffreddamento di immense nubi di gas primordiale, le quali, per la conseguente contrazione e frammentazione in stelle, hanno dato origine alle strutture che osserviamo oggi. I meccanismi di differenziazione in ellittiche e spirali non sono ancora chiari; esistono infatti due punti di vista: 1) le galassie ellittiche e quelle a spirale nascono indipendentemente come tipi diversi, 2) sono l'uno evoluzione dell'altro.

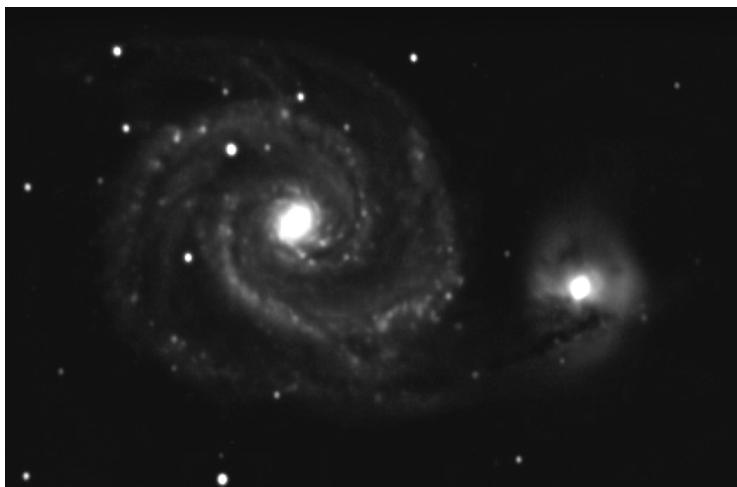


Fig. 1.3 – Scontro tra galassie (M51 e NGC5195) a oltre 20 milioni di anni luce. Ripresa dall'Osservatorio Astronomico "Padre Francesco De Vico", Serrapetrona (MC)

Nel primo caso le galassie ellittiche si sarebbero formate per prime a seguito di un processo di formazione

stellare più rapido del successivo collasso. Le spirali nascerebbero a seguito di processi di frammentazione molto più lenti nei quali prima la nube collaserebbe a formare un disco e poi si frazionerebbe a formare le stelle.

Nel secondo caso, poiché per motivi dinamici non è possibile che le galassie a spirale si formino dall'evoluzione di galassie ellittiche, si suppone che l'Universo inizialmente fosse formato da galassie a spirale che fondendosi a seguito di "scontri" hanno dato origine alle galassie ellittiche.

Il problema dell'origine del materiale di cui sono costituite le galassie sembra invece risolto nei modelli che descrivono l'origine dell'Universo.

1.2 – LA STRUTTURA DELL'UNIVERSO

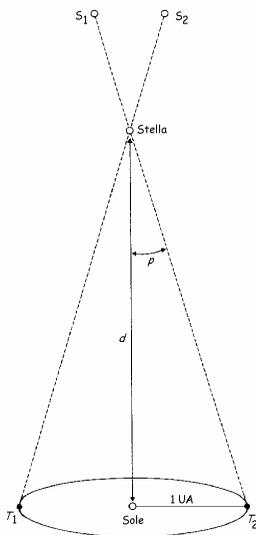
Per conoscere la struttura dell'Universo è fondamentale misurare la distanza degli oggetti cosmici. I primi tentativi di valutare le dimensioni dell'Universo risalgono al mondo greco: Eratostene misurò il diametro della Terra, Aristarco e Ipparco proposero dei metodi per determinare la distanza del Sole e della Luna. Conoscendo la distanza del Sole se ne può determinare la massa: quindi con la terza legge di Keplero è possibile calcolare la distanza dei pianeti del Sistema Solare.

Per la determinazione della distanza delle stelle più vicine si fa uso della cosiddetta *parallasse annua* (vedi figura 1.4), in virtù della quale le stelle vicine appaiono spostarsi rispetto a quelle più lontane a causa del moto della Terra attorno al Sole. Lo spostamento massimo è dato dal

diametro dell'orbita terrestre (circa $3 \cdot 10^{11}$ m = 2 UA^[4]). Il fenomeno della parallasse annua è in realtà talmente piccolo che solo strumenti di notevole precisione permisero di metterlo in evidenza (Bessel, 1837). Se si misura l'angolo di parallasse p in secondi di grado, la distanza d di una stella, in parsec, si ricava dalla semplice relazione:

$$d = 1/p$$

Fig. 1.4 – La parallasse annua



L'utilizzo di tecniche fotografiche, agli inizi del '900, permisero di misurare angoli di parallasse con un errore dell'ordine di 0,01". Fu così possibile determinare con

[4] L'Unità Astronomica (UA) è una unità di misura delle distanza planetarie e corrisponde alla distanza media Terra-Sole: 149.598.706,1 km

buona precisione la distanza delle stelle comprese entro qualche decina di parsec. La stella più vicina al Sole è Proxima Centauri, la cui parallasse è $p = 0,762''$, che corrisponde ad una distanza $d = 1,3 \text{ pc} = 4,3 \text{ a.l.}$.

Per poter ottenere misure di parallasse sempre più precise, l'8 agosto 1989, l'ESA (*European Space Administration*, l'Agenzia Spaziale Europea) ha lanciato il satellite Hipparcos (sigla di *High Precision PARallax Collecting Satellite*). Portata a termine il 15 agosto 1993, la missione ha permesso di ottenere la posizione di circa 100.000 stelle con la precisione di $0,001''$. In teoria ciò permetterebbe di misurare la distanza delle stelle fino a 1000 parsec (3260 anni luce), in pratica si è arrivati solo a 1000 anni luce, che è comunque una distanza molto maggiore del limite precedente.

Attualmente è allo studio dell'ESA la missione GAIA (*Global Astrometric Interferometer for Astrophysics*), con lo scopo di misurare le parallassi di ben 50 milioni di oggetti con la precisione di 10 microsecondi d'arco ($0,00001''$!), 100 volte superiore a quella di Hipparcos. Questo in teoria permetterebbe di misurare le distanze di tutte le stelle della Via Lattea (usando come sfondo le altre galassie).

In metodo della parallasse non è applicabile alla misura della distanza delle galassie. Un ruolo fondamentale in questa direzione lo ebbero ancora una volta il telescopio di Mount Wilson e Hubble. Egli utilizzò una scoperta fatta da Henrietta Swan Leavitt (una delle poche donne che si sono occupate di Astronomia) secondo la quale esiste una relazione tra il periodo e la luminosità delle stelle variabili cefeidi^[5].

^[5] Le variabili cefeidi sono stelle molto luminose che hanno delle variazioni periodiche molto regolari.

I metodi per la determinazione della distanza delle galassie si basano sulla individuazione di oggetti celesti, appartenenti alle galassie stesse, per i quali si ritiene di conoscere con discreta precisione la magnitudine assoluta $M^{[6]}$. Da Terra è sempre possibile misurare la magnitudine relativa m , cioè la quantità di luce che arriva dall'oggetto; da questi due valori, applicando la relazione

$$d = 10^{\frac{(m-M+5)}{5}},$$

si può determinare la distanza d . Gli oggetti celesti utilizzati in queste misure sono detti *indicatori di distanza cosmologici* o *candele standard*. Si usa classificare gli indicatori in tre fasce: indicatori primari, secondari e terziari. Gli indicatori primari vengono utilizzati per misurare le distanze degli oggetti fuori della nostra galassia, la cui magnitudine può essere fissata (ovvero che possono essere calibrati) attraverso l'osservazione degli oggetti della nostra galassia. I secondari sono quelli che per la calibrazione dipendono dalla conoscenza della distanza di galassie vicine misurata attraverso gli indicatori primari. I terziari sono quelli che per la calibrazione dipendono dalla conoscenza della distanza di oggetti (galassie) misurata attraverso gli indicatori secondari.

Gli indicatori primari permettono stime di distanza fino a circa 30 Mpc (megaparsec = milioni di parsec), quelli secondari e terziari fino a oltre 1000 Mpc.

Tra gli indicatori primari più significativi e affidabili ci sono le già citate stelle variabili cefeidi: determinato il periodo è possibile risalire alla magnitudine assoluta media della stella e quindi alla sua distanza. Il telescopio

^[6] La magnitudine assoluta è la luminosità che avrebbe un corpo celeste se fosse posto a 10 pc (32,6 anni luce) dalla Terra; è un indice della effettiva luminosità della stella.

spaziale Hubble ha consentito di stimare distanze fino a 30 Mpc (circa 100 milioni di anni luce). Tra gli altri indicatori primari molto utilizzati ci sono le supernovae. Esse raggiungono luminosità assolute maggiori di quelle delle cefeidi e quindi possono essere viste da grandissime distanze.

Gli indicatori secondari più utilizzati sono: la luminosità delle stelle più brillanti delle galassie, le più brillanti regioni di idrogeno ionizzato (regioni HII), la distribuzione di luminosità degli ammassi globulari, la relazione di Tully-Fisher (viene sfruttata la relazione tra l'intensità della riga a 21 cm emessa dall'idrogeno neutro e la magnitudine assoluta della galassia), correlazione tra colore e luminosità delle galassie.

Gli indicatori terziari sono: la luminosità delle galassie spirali, la dimensione delle galassie spirali e la correlazione con la luminosità, la luminosità totale delle galassie più brillanti.

La misura degli oggetti celesti, anche se vicini, presenta sempre un'incertezza^[7], è quindi ovvio che man mano che si cerca di misurare la distanza di oggetti sempre più lontani le incertezze siano sempre maggiori. Un altro problema è la determinazione della quantità di radiazione che viene assorbita dal mezzo intergalattico. In questo caso le idee sono contrastanti tanto da rendere le misure fatte da vari astronomi anche molto diverse.

1.2.1 – La legge di Hubble

Nel 1912 si scoprì che le galassie presentano uno

^[7] Già nella misura della distanza della Grande Nube di Magellano, a seconda degli indicatori utilizzati, si ottengono valori compresi tra 44 kpc e 55 kpc; la stima attuale più condivisa è 51 ± 1 pc.

spostamento dello spettro verso il rosso^[8]. Intorno al 1920 Hubble riuscì a distinguere stelle Cefeidi di alcune galassie e ne determinò la distanza scoprendo che erano extragalattiche. Nel 1929 propose di interpretare lo spostamento verso il rosso come effetto Doppler per cui misurare tale spostamento equivale a misurare la velocità radiale della sorgente luminosa. Mettendo in relazione la distanza d (determinata col metodo delle Cefeidi) e la velocità radiale v (determinata con lo spostamento verso il rosso), trovò la seguente legge (*Legge di Hubble*):

$$v = H_0 \cdot d,$$

dove H_0 è una costante detta *costante di Hubble*.

Una prima conseguenza della legge di Hubble è che è possibile costruire un modello in scala dell'Universo. Anche se non si conosce il valore esatto della costante di Hubble, che rappresenta solo il “fattore di scala”, la forma sarà comunque definita. Il valore attuale di H_0 , dedotto agli inizi del 2003 dai dati del satellite della

[8] È l'analogo dell'effetto Doppler noto per il suono che consiste nel fatto che se una sorgente sonora si avvicina ad un osservatore, il suono diventa più acuto, mentre diventa più basso quando si allontana. Per la luce vale un effetto analogo: le onde luminose che pervengono da una sorgente luminosa in moto sono spostate verso il violetto (piccole lunghezze d'onda) se la sorgente si avvicina, verso il rosso (grandi lunghezze d'onda) se la sorgente si allontana. La teoria della relatività fornisce le formule pertinenti a descrivere il fenomeno: se un raggio di luce di lunghezza d'onda λ viene inviato da una sorgente che si muove alla velocità v verso un osservatore fermo, la lunghezza d'onda ricevuta λ' è maggiore. Il redshift z è definito dalla relazione $z = \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda}$ dalla quale si può ricavare la velocità della sorgente. Se v è molto minore della velocità della luce c , le relazioni si semplificano: $z = v/c$ e quindi $v = z \cdot c$.

NASA WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*)
è di 71 km/s per Mpc ($= 2,30 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$)

Una seconda e fondamentale conseguenza della legge di Hubble è che l'Universo si espande.

1.2.2 – La distribuzione delle galassie

Dall'osservazione di centinaia di migliaia di galassie risulta evidente che la loro distribuzione non è uniforme e che esistono strutture molto estese. Uno dei problemi principali della cosmologia è quello di spiegare la formazione di queste strutture.

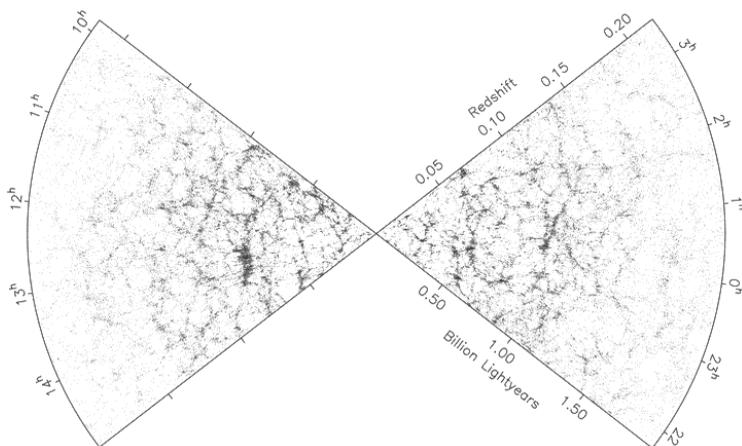


Fig. 1.5 – Distribuzione delle galassie: questa mappa dell'Universo vicino, nella quale ogni punto rappresenta una galassia, è stata ottenuta da un gruppo anglo-australiano e include più di 140.000 galassie.

Le galassie si presentano in genere riunite in *gruppi* di alcune decine, in *ammassi* con migliaia di componenti i quali fanno parte di strutture ancora più grandi, dette *superammassi*, composte da dozzine di ammassi e disposte a formare lunghi filamenti. Le ultime ricerche danno per

l'Universo una struttura a “schiuma” formata da bolle vuote sulle cui pareti si dispongono i filamenti dei superammassi.

La Galassia appartiene al cosiddetto Gruppo Locale di cui fanno parte la galassia di Andromeda (una spirale un po' più grande della Galassia), la galassia M33 nel Triangolo (anch'essa è una spirale, ma è più piccola delle altre due) e una trentina di galassie nane ellittiche o irregolari (tra cui le due Nubi di Magellano, visibili nei cieli dell'emisfero meridionale). Tutto il gruppo è contenuto in una sfera di circa 1 Mpc di diametro. Il Gruppo Locale si trova alla periferia dell'Ammasso della Vergine (una struttura ricca di un migliaio di galassie) e presenta un moto rilevabile in direzione del suo centro; moti su grande scala come questo sono stati rilevati in molti ammassi vicini.



Fig. 1.6 – La Galassia di Andromeda. Foto di Alfredo Trombetta dall'Osservatorio Astronomico “Padre Francesco De Vico” di Serrapetrona (MC)

Esistono diversi tipi di ammassi: i più ricchi e densi hanno forma tondeggiante, quelli meno numerosi hanno forma appiattita ed irregolare. Regioni a densa popolazione, come i nuclei degli ammassi, sono gremite di ellittiche e di tipo S0 e prive di gas e stelle in fase di formazione. Regioni meno affollate possono ospitare spirali ed irregolari. Ciò porta ad una vecchia questione ancora irrisolta: nelle regioni ricche degli ammassi le spirali non si sono mai formate o si sono in qualche modo distrutte o trasformate? Il dibattito è ancora aperto nonostante siano molte le prove che in alcuni ammassi le spirali, un tempo numerose, sono state trasformate da fattori esterni in ellittiche o S0. Un meccanismo di trasformazione è quello della fusione tra galassie e, sebbene sia raro, alle alte velocità rilevate negli ammassi potrebbe essere stato, un tempo, più rilevante. Un secondo meccanismo di trasformazione potrebbe intervenire se gli ammassi contenessero una qualche specie di mezzo intergalattico. Qualcosa del genere è stato scoperto dai primi satelliti per raggi X ed è noto come si trovi ovunque negli ammassi e persino nei gruppi di galassie. Moti casuali nell'ammasso riscaldano questi gas a temperature di 10 milioni di kelvin^[9] rendendoli visibili solo per l'emissione X che producono. Questo gas, generalmente, ha una massa pari a quella delle stelle nelle galassie osservabili e, come queste si muovono nella sua direzione, forma una sorta di vento esterno. In principio potrebbe essere sufficientemente forte da trascinare all'esterno il gas contenuto nella galassia a spirale. Una spirale

^[9] Il kelvin è una unità di misura della temperatura (simbolo: K); la scala kelvin ha lo zero che coincide con lo zero assoluto (-273°C), la temperatura più bassa raggiungibile. In kelvin la temperatura del ghiaccio che fonde (0°C) corrisponde a 273 K, quella dell'acqua che bolle (100°C) a 373 K,

privata in questo modo del gas, cesserebbe la formazione stellare ed in breve tempo assomiglierebbe ad una di tipo S0. Approfondite osservazioni in ammassi come quello della Vergine hanno provato infatti che le spirali prossime al nucleo hanno perso le regioni di gas più esterne.

Studi dettagliati della distanza e del redshift di galassie vicine hanno aggiunto un altro aspetto nella comprensione della dinamica degli ammassi: essi sono ancora nella fase di accrescimento! Maggiore è la distanza, maggiore è il tempo impiegato dalla gravità dell'ammasso per esercitare la sua influenza sulle galassie circostanti cosicché quelle lontanissime vanno in direzione opposta rispetto all'espansione dell'Universo e cadono nell'ammasso.

1.3 – L'ORIGINE E L'EVOLUZIONE DELL'UNIVERSO

Le osservazioni e gli studi fin qui svolti ci portano a pensare che l'Universo è tenuto insieme dalla forza di gravità; è quindi ovvio che per costruire modelli matematici per descrivere l'Universo si faccia uso delle teorie che descrivono questa interazione. Attualmente i più completi e attendibili sono forniti dalla teoria della relatività generale. Non manca però chi ritiene che nella determinazione della struttura e dell'evoluzione dell'Universo la forza elettromagnetica sia molto più importante di quanto si pensi.^[10]

1.3.1 – I principi cosmologici

La Teoria della Relatività Generale (TRG) fu idea-

^[10] vedi Lerner E.J. – *Il Big Bang non c'è mai stato*, DEDALO, 1994

ta da Albert Einstein nel 1916; in una memoria pubblicata nel 1917 egli applicò la TRG all'Universo nel suo insieme cercando di dedurne lo stato come soluzione dalle sue equazioni; non essendo ancora nota la legge di Hubble e quindi l'espansione dell'Universo, egli impose che questa soluzione doveva descrivere la distribuzione media della materia nell'Universo ed inoltre tale distribuzione doveva essere *omogenea e isotropa sia nello spazio che nel tempo* (l'Universo non doveva evolversi). Le soluzioni erano però in disaccordo con la convinzione dell'epoca di un Universo statico ed egli modificò le sue equazioni; in seguito ritenne ciò il suo più grande errore.

Alla base di tutte le teorie sull'evoluzione dell'Universo c'è un assunto noto come principio cosmologico. Esistono due versioni di tale principio: 1) su grandi scale l'Universo è con buona approssimazione l'Universo è omogeneo ed isotropo, non vi sono cioè posizioni o direzioni privilegiate; 2) su grandi scale l'Universo è con buona approssimazione omogeneo ed isotropo in ogni istante ovvero, l'omogeneità e l'isotropia siano le stesse anche nel tempo.

Nella storia, queste due formulazioni hanno dato luogo a due modelli di Universo contrapposti. Oggi si assume, in quasi tutti i modelli, il primo; si accetta che l'Universo abbia un'evoluzione.

1.3.2 - Modelli di Friedman

Nel 1929 Alexander Alexandrovich Friedman dimostrò che se si adottava il principio cosmologico esistevano delle soluzioni delle equazioni della Relatività Generale che presentavano un nuovo aspetto: l'Universo non poteva essere stazionario ma doveva evolversi nel tempo.

L'Universo deve: o avere avuto un'origine da una singolarità (uno stato di densità e temperatura infinite); o collassare verso una singolarità; o soddisfare entrambe le situazioni.

I modelli di Friedman descrivono quindi tre possibili scenari di evoluzione dell'Universo. In essi gioca un ruolo fondamentale il valore attuale della densità della materia nell'Universo (ρ) e la cosiddetta densità critica

$$\left(\rho_C = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 9,5 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \right)$$
 la cui espressione deriva

dalla teoria. Queste definiscono il *parametro di densità* $\Omega = \rho/\rho_C$. Dalla teoria della relatività generale derivano tre possibili scenari.

- Se $\Omega > 1$, l'Universo si espanderà fino a raggiungere un raggio massimo, quindi il moto si inverte fino a riportare tutta la materia in un unico punto: il Big Crunc. Con questo modello è compatibile un *Universo oscillante*. La geometria dell'Universo è sferica e l'Universo è aperto.
- Se $\Omega = 1$, l'Universo si espanderà per un tempo infinito, ma con una velocità che tende a 0. La geometria dell'Universo è piatta (geometria euclidea) e l'Universo è aperto.
- Se $\Omega < 1$, le galassie tenderanno ad allontanarsi sempre più, anche quando l'Universo sarà infinitamente grande e diluito. La geometria dell'Universo è iperbolica e l'Universo è aperto.

Le misure attuali sembrano dare $\Omega = 1$.

Una delle cose più difficili da comprendere è rispetto a quale punto l'Universo si espande. Facciamo un'analogia: consideriamo lo spazio come un elastico sul quale sono fissati, a varie distanze, dei segni a simulare la

posizione delle galassie. Tendendo l'elastico per gli estremi, le distanze tra questi segni aumentano, infatti, se ne prendiamo in considerazione uno allora le distanze degli altri aumentano. Se cambiamo il punto di riferimento si ha ancora che le distanze dei segni dal nuovo riferimento aumentano. In conclusione non esiste un segno privilegiato rispetto al quale gli altri si muovono, ma tutti vedono gli altri segni allontanarsi. Si può dimostrare che ognuno vede gli altri segni muoversi con la stessa legge^[11]. Nel nostro Universo, quindi, non solo le galassie (i segni) si muovono nello spazio (l'elastico), ma lo spazio stesso si espande (o si contrae a seconda del modello).

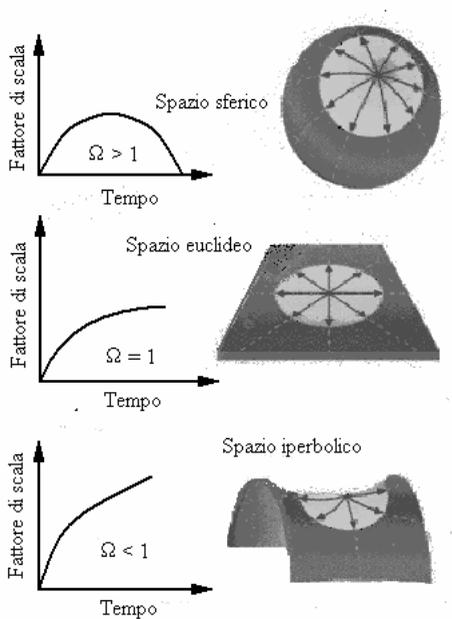


Fig. 1.7 – Modelli di Friedman.

[11] L'analogia non funziona, ovviamente, se consideriamo gli estremi, l'Universo dobbiamo pensarlo infinito, senza bordo.

Nei modelli di Friedmann l'Universo ha avuto una origine; la costante di Hubble ha le dimensioni del reciproco di un tempo e quindi $\tau = 1/H_0$ ha le dimensioni di un tempo che viene detto *tempo di Hubble* e rappresenta l'età che avrebbe ora l'Universo se si fosse sempre espanso con la stessa rapidità. Il valore attuale è $\tau = 4,35 \cdot 10^{17} \text{ s} = 1,38 \cdot 10^{10} \text{ anni}$.

1.3.3 – Il modello del Big Bang

Intorno al 1940 George Gamow pose le basi per quello che oggi viene chiamato *Big Bang* (grande botto), che sta ad indicare l'inizio dell'Universo. Egli stava ricercando i luoghi dell'Universo che fossero sufficientemente caldi perché potessero aver luogo quelle reazioni nucleari che portano alla formazione degli elementi chimici. Egli comprese che queste condizioni si potevano realizzare quando la materia era molto più compressa di oggi e cioè, andando indietro nel tempo, all'origine dell'Universo. I suoi calcoli portarono però alla conclusione che, a partire dall'idrogeno, si sarebbe potuto formare solo l'elio, non gli altri elementi. Successivamente Fred Hoyle scoprì che gli elementi chimici “pesanti” si potevano formare all'interno delle stelle.

Le odierne teorie sulle particelle elementari ci permettono di descrivere i primi istanti di vita dell'Universo. La teoria del Big Bang però non è in grado di spiegare l'istante iniziale, ma solo in che modo l'Universo si è evoluto fino alla forma che oggi osserviamo; la relatività generale non è idonea a descriverlo quando le sue dimensioni negli istanti iniziali, quando la scala dell'Universo era confrontabile con le dimensioni delle particelle elementari, alla cosiddetta lunghezza di Planck (10^{-33} cm),

ovvero quando l'Universo aveva un'età di 10^{-43} secondi. Non disponiamo ancora di una teoria in grado di eliminare questa difficoltà, la miglior candidata è la teoria delle stringhe, ma è difficile al momento attuale prevederne gli sviluppi.

Il successo più importante della teoria del Big Bang è la capacità di spiegare le abbondanze degli elementi: una frazione di secondo dopo il Big Bang, l'Universo era un "brodo" di quark, leptoni e fotoni, ma già dopo un secondo di vita si erano formati protoni e neutroni (costituiti dai quark). Per qualche minuto, finché la temperatura e la densità furono abbastanza elevate, una serie di reazioni nucleari portò alla formazione di nuclei di elio e, in misura molto minore, di altri elementi leggeri. Le abbondanze previste dalla teoria del Big Bang sono in buon accordo con le osservazioni, che mostrano come l'elemento più diffuso nell'Universo sia l'idrogeno (75%), seguito dall'elio (25%), mentre gli elementi più pesanti rappresentano soltanto una frazione trascurabile della densità totale. Con il procedere dell'espansione, e la conseguente diminuzione di densità e temperatura, la nucleosintesi primordiale si è arrestata: gli elementi più pesanti che ritroviamo in abbondanza sulla Terra sono stati prodotti dalla fusione nucleare all'interno delle stelle. Le prime stelle erano molto massicce e consumavano il loro combustibile nucleare molto in fretta diffondendo nello spazio interstellare gli elementi pesanti da loro sintetizzati quando esplosevano come supernovae; questi elementi sono poi finiti nel gas che, per contrazione gravitazionale, ha dato origine ad altre stelle, come il nostro Sole.

Dopo la nucleosintesi, vi è stato un altro evento importante che costituisce un'ulteriore conferma della validità del Big Bang. Circa 300.000 anni dopo l'istante ini-

ziale, la temperatura si abbassò fino a poche migliaia di gradi, permettendo ad elettroni e protoni di legarsi in modo stabile, formando atomi di idrogeno; soltanto allora i fotoni cominciarono a propagarsi liberamente nello spazio e l'Universo divenne "trasparente": è il cosiddetto istante del *disaccoppiamento*. Con l'espansione, la lunghezza d'onda di quei fotoni è via via aumentata, e la loro energia diminuita: noi oggi ci ritroviamo ancora immersi in un oceano cosmico di fotoni, la cui temperatura equivale soltanto a 2,73 gradi sopra lo zero assoluto. Si tratta della cosiddetta radiazione cosmica di fondo, osservata per la prima volta nel 1965 da Penzias e Wilson; le osservazioni successive, in particolare quelle del satellite della NASA COBE (*COsmic Background Explorer*), hanno confermato che essa ha le caratteristiche previste dalla teoria del Big Bang. Anche recenti osservazioni telescopiche di lontane nubi di gas (quindi molto antiche) mostrando che, quando l'Universo aveva un'età di pochi miliardi di anni, la temperatura della radiazione di fondo era più elevata di quella attuale, come previsto dalla teoria del Big Bang.

1.3.4 – Oltre il Big Bang

Nonostante i numerosi successi, la teoria del Big Bang lascia senza risposta alcuni interrogativi fondamentali. Non spiega per esempio qual è la causa delle fluttuazioni di densità che hanno dato origine alle galassie; perché la temperatura della radiazione di fondo proveniente da regioni di cielo situate in direzioni opposte è così simile, visto che tali regioni non hanno mai potuto comunicare tra di loro; perché la densità è così vicina (se non uguale) alla densità critica ($\Omega = 1$).

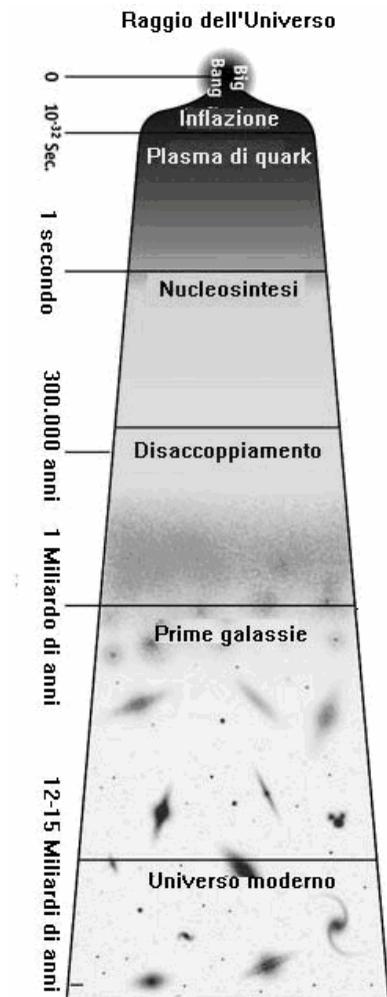


Fig. 1.8 – Le principali tappe dell'evoluzione dell'Universo.

Queste ed altre domande trovano una risposta se la rapidità di espansione dell'Universo non è stata costante nel tempo; in particolare nelle prime fasi di vita, e per un brevissimo periodo di tempo, l'espansione è stata enormemente più rapida di quella attuale, in modo esponenziale: è questa l'ipotesi dell'*inflazione*. In tal caso, una regione mi-

croscopica di spazio si sarebbe gonfiata sino ad assumere la scala attuale dell'Universo. Le fluttuazioni presenti su scale microscopiche avrebbero così assunto dimensioni macroscopiche originando le disomogeneità che hanno dato origine alle galassie. Le diverse regioni dell'Universo osservabile sarebbero state in contatto nel passato, e questo spiegherebbe l'alto grado di omogeneità della radiazione cosmica di fondo. Inoltre, l'espansione rapidissima ha reso piatta la geometria dell'Universo. Questo fenomeno può essere chiarito con una analogia: consideriamo la superficie di un pallone, ci appare evidentemente curva, ma se immaginiamo di gonfiare il pallone fino a fargli assumere le dimensioni della Terra, la sua curvatura non è più immediatamente percepibile (non a caso l'umanità per lungo tempo ha creduto che la Terra fosse piatta). Ci si aspetta inoltre che in origine vi fosse soltanto un'unica forza fondamentale; col diminuire della temperatura, l'Universo sarebbe passato attraverso delle transizioni in corrispondenza delle quali si sarebbe separata prima la forza di gravità, poi quella forte, infine l'elettromagnetismo e la forza debole. Nella figura 1.8 sono sintetizzate le fasi principali dell'evoluzione dell'Universo.

Anche se non è perfettamente chiaro il meccanismo che ha portato all'inflazione, oggi si è d'accordo nel ritenere che essa è più che una teoria e che l'Universo osservabile è compatibile con essa.

1.3.5 – Materia oscura ed energia oscura

Come abbiamo detto la temperatura della radiazione di fondo risulta essere fortemente isotropa, ovvero il suo valore rimane quasi costante in qualunque direzione la si misuri. Ciò costituisce una conferma dell'ipotesi che la materia nell'Universo sia distribuita uniformemente: altri-

menti, se all'epoca del disaccoppiamento la materia fosse stata molto disomogenea, avrebbe dovuto causare delle significative fluttuazioni di temperatura nella radiazione di fondo.

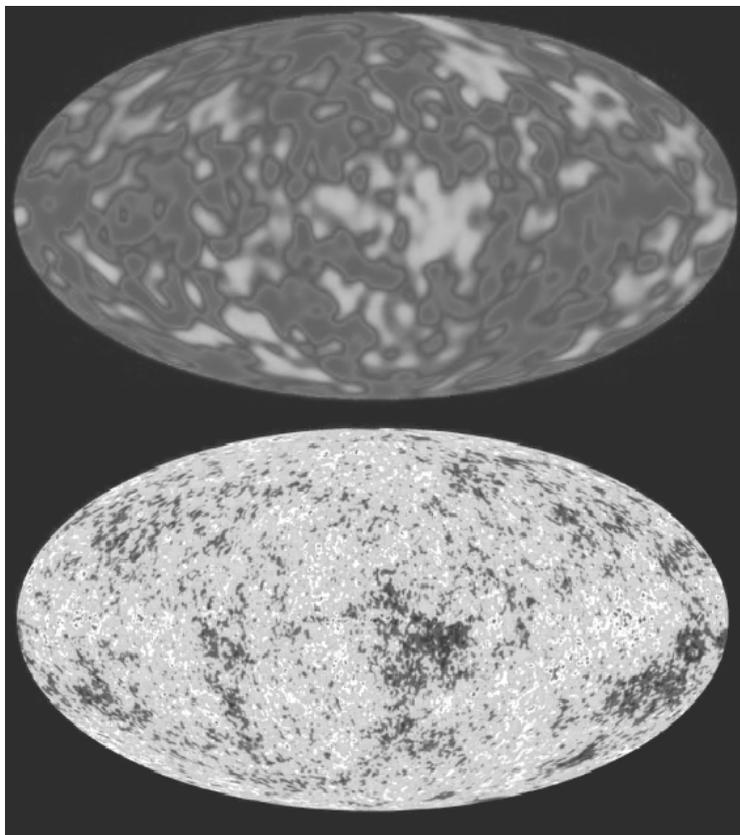


Fig. 1.9 – Le mappe del cielo mostrano le variazioni di temperatura nella radiazione cosmica di fondo, misurate dai satelliti dalla NASA COBE nel 1992 (sopra) e WMAP nel 2003 (sotto).

Come è stato già detto, l'Universo che osserviamo non appare però affatto omogeneo: le galassie si trovano in gruppi ed ammassi; inoltre sono state osservate strutture

ancora più grandi e complesse, come enormi vuoti, filamenti e "muraglie" di galassie, su scale dell'ordine di 100 milioni di anni-luce. È inevitabile supporre che, all'epoca del disaccoppiamento, vi fossero piccole fluttuazioni di densità nel gas primordiale. Queste erano zone in cui la densità era un po' più alta ed esercitando un'attrazione gravitazionale superiore hanno progressivamente inglobato la materia circostante sino a formare stelle e galassie, in un processo durato alcune centinaia di milioni di anni. Le fluttuazioni di densità, a loro volta, hanno generato piccole fluttuazioni nella temperatura della radiazione di fondo, che sono state effettivamente rivelate dal satellite COBE dal satellite WMAP (vedi figura 1.9). Le variazioni sono però di appena un centomillesimo rispetto alla temperatura media, e anche 15 miliardi di anni non sarebbero apparentemente bastati per formare le galassie e le altre strutture osservate. Si tenga presente che la gravità è in competizione con l'espansione, la quale rallenta il processo di accrescimento gravitazionale della materia.

Le fluttuazioni di densità della materia oscura che esistevano nell'Universo giovane, potevano essere sufficientemente grandi da permettere la formazione delle strutture oggi osservate senza alterare l'isotropia della temperatura della radiazione cosmica di fondo. La presenza di materia oscura inoltre influisce sulla geometria dello spazio e sul destino dell'Universo. Infatti, come abbiamo visto, più alta è la densità di materia nell'Universo, tanto più è forte l'attrazione gravitazionale che rallenta l'espansione.

Gli studi e le osservazioni più recenti mostrano che la densità di materia (sia oscura che ordinaria) è di molto inferiore alla densità critica. Le analisi dei risultati dell'esperimento italo-americano *Boomerang* (osservazioni ef-

fettuate da un telescopio a bordo di un pallone che ha volato ad un'altezza di 38 km sull'Antartico) e ancora del satellite WMAP, mostrano in modo convincente che le fluttuazioni nella radiazione di fondo hanno le caratteristiche che ci si aspetta nel caso di un Universo con densità uguale a quella critica, vale a dire con geometria piatta. Ma se la densità di materia (sia quella luminosa che quella oscura) è poco più di un quarto della densità critica, che cos'è che contribuisce ai rimanenti 3/4 della densità dell'Universo?

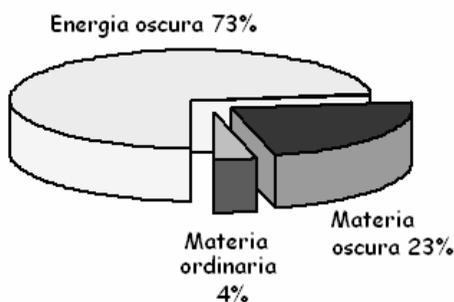


Fig. 1.10 - La composizione dell'Universo secondo i risultati della sonda WMAP

Un'informazione utile per rispondere a questo interrogativo ci viene dalle osservazioni di supernovae lontane, le quali indicano che l'espansione dell'Universo sta accelerando, e non rallentando. Questa accelerazione è dovuta ad una forza repulsiva (che alcuni cosmologi chiamano costante cosmologica, altri quintessenza) che contribuisce con la sua densità di energia alla densità totale dell'Universo (ricordiamo che in relatività materia ed energia sono equivalenti). Da un punto di vista fisico, si ritiene che questo effetto sia riconducibile all'energia del vuoto. Nella fisica moderna, infatti, lo spazio vuoto non corrisponde affatto al "nulla" filosofico; in esso, grazie al principio di indeterminazione di Heisenberg, appaiono e scompaiono

coppie di particelle-antiparticelle che sono virtuali, ma che hanno effetti tangibili: è proprio grazie a loro, infatti, che il vuoto può avere una densità di energia non nulla ed esercitare un effetto gravitazionale. Il risultato sorprendente di queste ricerche (ancora in fase di svolgimento) è che l'Universo non è dominato dalla materia, neppure da una materia oscura sotto forme a noi ancora ignote, ma dall'energia dello spazio vuoto! Oggi le percentuali sono: energia oscura 73%, materia oscura 23% e solo il 4% di materia ordinaria; il destino del nostro Universo sembra essere, a questo punto, quello di un'espansione senza fine.

1.3.6 - Il Principio antropico

Negli ultimi anni si è andata affermando l'idea che il solo fatto della nostra esistenza implica che le costanti fondamentali della natura non possono avere dei valori molto diversi da quelli misurati. Se ad esempio la costante di gravitazione G fosse appena più grande la gravità sarebbe più forte, e nelle stelle non ci potrebbe essere equilibrio tra la gravità e la pressione delle reazioni nucleari: esse collasrebbero fino a formare dei buchi neri. Se, al contrario, G fosse più piccola, non sarebbe stata possibile l'aggregazione della materia primordiale per formare le galassie. Per ognuna delle costanti della natura si potrebbe ripetere un ragionamento analogo e il risultato sarebbe sempre che l'Universo quale noi lo conosciamo, e che ha permesso l'origine delle stelle, dei pianeti e della vita, dipende in maniera estremamente sensibile dall'esatto valore di queste costanti. Quanto detto prende il nome di *principio antropico*. Per spiegare il problema del valore delle costanti fisiche, di recente sono state proposte tre soluzioni. 1) La natura ha scelto i valori delle costanti delle leggi

fisiche per puro caso; avrebbe potuto scegliere altri, ma è capitato che fossero proprio quelli giusti per lo sviluppo di forme di vita intelligenti. 2) C'è un dio che ha deliberatamente scelto questi valori e non altri in modo da permettere lo sviluppo della vita. 3) Il nostro Universo non è unico, esistono infiniti altri Universi in cui le costanti sono diverse; nella stragrande maggioranza di essi non esistono le condizioni adatte allo sviluppo della vita.

È evidente la difficoltà nell'accettare una a l'altra delle soluzioni; in questi ultimi anni sono state molte le teorie proposte, finora non ce n'è nessuna soddisfacente. Nonostante tutte le nostre conoscenze rimangono ancora molte domande alle quali la scienza non sa rispondere scientificamente.

IL SOLE E LE STELLE

2.1– IL SOLE

Il Sole è di gran lunga la stella più vicina alla Terra; la seconda in ordine di distanza, Alfa Centauri, è oltre 200.000 volte più lontana.

Anche se favorito dalla vicinanza, lo studio quantitativo dei parametri fisici del Sole è iniziato solo ai primi dell'800, con l'avvento della spettroscopia.

I dati raccolti in questi ultimi anni, sia con osservazioni da Terra, sia con strumenti posti in orbita al di fuori dell'atmosfera terrestre, hanno consentito di delineare la struttura esterna del Sole. Le leggi della Fisica hanno poi permesso di ricostruire anche la struttura interna.

La composizione chimica del Sole è complessa, ma esso è sostanzialmente costituito da idrogeno ed elio. Il peso dell'idrogeno che forma il Sole produce una pressione sempre più elevata man mano che ci si avvicina al centro. Si stima che nel nucleo ci sia una pressione di $3 \cdot 10^{11}$ atm, che diminuisce prima lentamente, poi, in prossimità della superficie, più rapidamente.

Si ritiene che la temperatura all'interno del Sole sia di $1,5 \cdot 10^7$ K. Essa diminuisce lentamente nella parte più interna, a $0,7R_S$ è dell'ordine di 10^6 K, mentre tra $0,9R_S$ e $1R_S$ diminuisce di 100 volte fino ad arrivare a 5800 K. La struttura può essere suddivisa per comodità in una serie di involucri concentrici, tenendo però presente che non esiste un limite netto tra un involucro e l'altro. Abbiamo allora l'interno (con quasi tutta la massa del Sole), costituito da un nucleo centrale, una zona radiativa e una zona convettiva; vi è poi la superficie visibile, detta fotosfera, e

l'atmosfera del Sole, in cui si distingue tra cromosfera e corona.

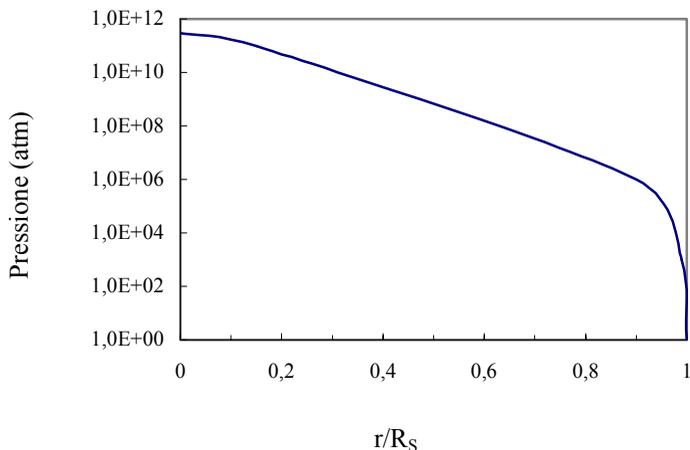


Fig. 2.1 - Andamento della pressione all'interno del Sole in funzione della distanza dal centro.

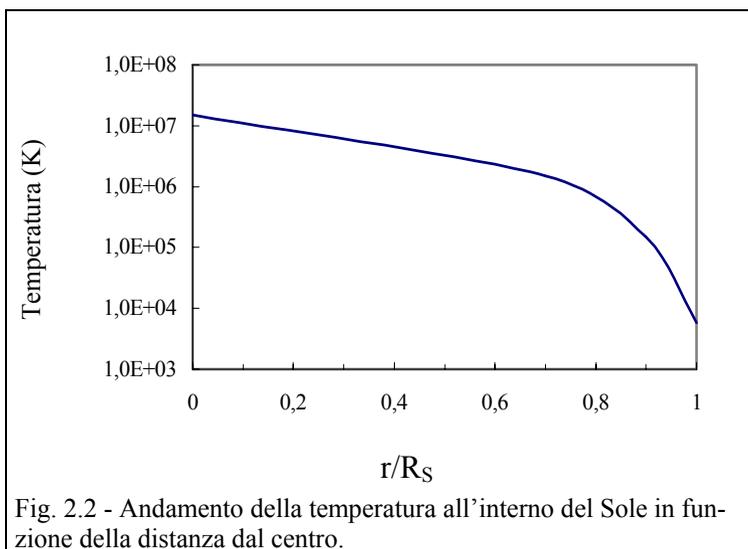
L'energia del Sole deriva dalla fusione nucleare^[1], che ha luogo esclusivamente all'interno del nucleo. I nuclei di quattro atomi di idrogeno (cioè quattro protoni) si fondono per formare un nucleo dell'atomo di elio (composto da due protoni e due neutroni). La somma della massa dei quattro protoni ($4 \cdot 1,00797 = 4,03188$ u^[2]) è maggiore della massa del nucleo di elio (4,002 u). La massa in eccesso (0,02988 u) viene convertita in energia secondo l'equazione di Einstein $E=mc^2$ ($= 4,4656 \cdot 10^{-12}$ J). Questo

[1] Serie di processi nei quali nuclei atomici leggeri si fondono per formare elementi più pesanti.

[2] u = unità di massa atomica = 1/12 massa dell'isotopo 12 del Carbonio = $1,66057 \cdot 10^{-27}$ kg

avviene miliardi di miliardi di volte ogni secondo: l'energia complessiva emessa dalla nostra stella è colossale. Essa viene irradiata dal Sole a tutte le lunghezze d'onda, dalle onde radio ai raggi gamma: la maggior parte di essa, comunque, è radiazione visibile ed infrarossa.

Se studiamo la fotosfera, lo strato visibile esterno, potremo notare delle macchie più scure, le macchie solari, causate da fenomeni magnetici sulla superficie solare e spesso visibili in gruppi (detti gruppi di macchie solari). Il loro numero varia secondo un ciclo di circa 11 anni (ciclo solare), causato dalla periodica inversione del campo magnetico della nostra stella. Le macchie constano di una zona interna più scura (ombra), con una temperatura di circa 4000 °C, ed una esterna più chiara (penombra), con una temperatura di circa 5000 °C.



In realtà le macchie emettono luce, ma appaiono scure per contrasto con la brillantissima superficie circo-

stante, più calda. Le loro dimensioni variano da quelle di una macchia singola grande circa un migliaio di km (che in questo caso viene detta *poro*) alla dimensione dei gruppi di macchie, larghi centinaia di migliaia di km. Esse si formano e spariscono sotto l'azione del campo magnetico solare e possono persistere per alcune settimane. Le più longeve durano anche un paio di mesi e, ricordando che il Sole ruota attorno al proprio asse in circa un mese, possono essere riviste al bordo opposto da quello dove sono scomparse.

Grazie ad esse è possibile seguire la rotazione del Sole su se stesso, che si compie in maniera diversa a seconda della latitudine solare: in 25 giorni all'equatore ed in 30 presso i poli. Questo accade perché il Sole è una sfera di gas e non ruota rigidamente come la Terra, ma in maniera differenziata. In questi anni il ciclo undecennale è appena passato per il suo minimo e le macchie stanno appearing in piccoli gruppetti, destinati ad accrescersi con il tempo.

Le caratteristiche più appariscenti del Sole, purtroppo, non sono visibili in condizioni normali: bisogna infatti utilizzare strumenti appositi (coronografi o filtri a banda stretta), oppure attendere un'eclisse. Solo allora potremo scoprire che il Sole è circondato da un ampio alone luminoso (corona): esso cambia forma in concomitanza con il ciclo delle macchie ed è costituito da pennacchi e filamenti di gas rarefatto che si disperdono nello spazio. Una curiosità è che la loro temperatura si aggira attorno a uno-due milioni di kelvin, quindi sono notevolmente più caldi della fotosfera visibile.

Appena sopra quest'ultima c'è un sottile strato di colore rosato, la cromosfera, visibile durante le eclissi. Da qui si staccano le protuberanze, formate da getti di gas che

si disperdono nella corona o ricadono sulla superficie solare. Spesso raggiungono dimensioni di decine di migliaia di chilometri e solitamente si estinguono nel giro di poche ore. Un caso eccezionale è avvenuto nella prima metà degli anni Settanta, con una protuberanza alta circa 400.000 km; un caso analogo è avvenuto poco tempo fa, quando si è prodotta una gigantesca bolla di gas ionizzato, la quale successivamente si è dispersa nello spazio interplanetario.

Dalla corona viene emesso costantemente un gran numero di particelle cariche, che formano il cosiddetto vento solare, il quale si allontana ad una velocità di alcune centinaia di chilometri al secondo. Il suo effetto più vistoso è quello di formare la coda delle comete, respingendo i gas ionizzati e le polveri che queste emettono. Dalla Terra si segue costantemente la nostra stella, anche perché di tanto in tanto avvengono delle enormi esplosioni dette brillamenti, le quali provocano, circa tre giorni dopo, delle tempeste magnetiche, interferenze radio o bellissime aurore. Ma la sua influenza non si esaurisce qui: il vento solare deforma le magnetosfere dei pianeti dotati di campo magnetico, come la Terra. L'atmosfera che ci protegge da queste particelle letali per la vita viene compressa dal lato rivolto al Sole e stirata a forma di goccia nel lato opposto.

Un altro effetto prodotto dal vento solare è quello di interferire con la ionosfera terrestre, disturbando o addirittura interrompendo le comunicazioni radio, soprattutto nella banda delle onde corte. Ma esso disturba pure le comunicazioni con i satelliti in orbita attorno alla Terra, producendo talvolta veri e propri *blackout* delle comunicazioni.

Il fenomeno più vistoso (raro alle nostre latitudini) è comunque quello della generazione delle aurore (boreali ed australi), le quali possono essere viste in aree vastissi-

me. Esse hanno luogo quando le particelle cariche elettricamente vengono indirizzate verso i poli magnetici terrestri.

Un altro fenomeno non visibile, ma causato dal Sole, è quello del “gonfiarsi” o “ridursi” degli strati più esterni dell'atmosfera terrestre; a seconda del punto raggiunto nel periodo del ciclo undecennale, gli atomi o le molecole dell'atmosfera rarefatta della zona esterna, espandendosi, possono creare un maggiore attrito nel moto dei satelliti in orbita bassa. Un esempio del loro effetto è stata la progressiva caduta della stazione spaziale Skylab, della NASA, la quale per l'attrito residuo degli strati esterni, dovuto all'eccezionale attività del ciclo solare degli anni Settanta, è ricaduta sulla Terra provocando un notevole allarme nelle zone soggette a “possibile impatto” (aveva una massa di varie tonnellate).

La nostra stella è composta attualmente dal 73% di idrogeno e dal 25% di elio: il resto se lo dividono – in percentuali molto varie - tutti gli altri 89 elementi. Ricordiamo che il materiale che compone tutto il Sistema Solare (ad eccezione dell'idrogeno e dell'elio) venne prodotto da una supernova, la cui esplosione arricchì la nebulosa che contraendosi lo generò (e forse fu proprio l'esplosione a innescarne il collasso, circa 4,55 miliardi d'anni fa).

2.2 – LA FORMAZIONE DEL SISTEMA SOLARE

A lungo l'uomo si è interrogato sui processi che hanno portato alla nascita del Sistema Solare. Tralasciando le idee più fantasiose (che hanno dato origine a numerosi miti in tutte le culture), nel corso del tempo si sono sviluppate ipotesi scientifiche vere e proprie. I primi modelli di

formazione del Sistema Solare cercarono innanzitutto di rendere conto, in modo qualitativo, dei principali dati osservativi riguardanti le orbite dei pianeti, le cui caratteristiche principali si possono così riassumere:

- a) si trovano approssimativamente nello stesso piano;
- b) sono praticamente circolari (esclusa l'orbita di Plutone, scoperto nel 1930);
- c) i pianeti ruotano nello stesso senso, che è pure quello di rotazione del Sole;
- d) le distanze eliocentriche obbediscono alla legge empirica di Titius-Bode.

Inoltre, verso la fine del XIX secolo, i fisici teorici dedicarono particolare attenzione al problema del cosiddetto *momento angolare*. Il Sole contiene il 99% della massa del Sistema Solare, ma possiede solo il 3% del momento angolare totale. Dalla metà del XX secolo le nuove teorie riguardanti la formazione stellare, insieme alla determinazione delle età dei vari corpi minori (come le meteoriti), fornirono nuovi elementi di riflessione per le nuove e più moderne teorie cosmogoniche. Questo insieme di conoscenze portò a costruire diversi modelli, riassumibili in quattro teorie principali: quella della formazione turbolenta, quella mareale, quella di cattura e infine la teoria nebulare.

I modelli basati sulla turbolenza

René Descartes (1596-1650) fu il primo che cercò di dare una spiegazione scientifica dell'esistenza del Sistema Solare e che introdusse l'idea di evoluzione. Nella sua opera *Teoria dei vortici*, pubblicata nel 1644, Descartes avanza l'ipotesi che l'Universo sia costituito da materia ed etere e sia pieno di vortici di diverse dimensioni. Non è però chiaro il meccanismo fisico tramite il quale dai "vor-

tici” si siano poi prodotti i pianeti. Infatti, il modello è soltanto qualitativo ed uno dei suoi maggiori difetti è che non spiega la complanarità delle orbite planetarie: esso venne abbandonato dopo la scoperta delle leggi della gravità di Newton. Il concetto di turbolenza fu però ripreso e riconsiderato da numerosi autori nel XX secolo (von Weizsäcker, ter Haar, Kuiper, Whipple e McCrea).

Le teorie mareali

La prima versione della teoria si deve al conte di Buffon, uno dei compilatori della famosa Enciclopedia illuministica. Egli ipotizzò che il materiale che ha formato i pianeti fosse stato “strappato” al Sole da una cometa entrata in collisione con esso, circa 70000 anni fa. La credibilità di questa teoria era legata al fatto che, a quei tempi, la natura delle comete era completamente sconosciuta e che non si avevano criteri attendibili per una stima delle età dei corpi celesti.

Bickerton (1880) e Chamberlain (1901) sostituirono la cometa con una stella massiccia, rendendo l’ipotesi fisicamente verosimile. Avvicinandosi al Sole la stella avrebbe strappato parte del suo materiale producendo filamenti con elevato momento angolare, che poi si sarebbero condensati sul piano dell’eclittica. Rimane però difficile spiegare con questo meccanismo la formazione dei pianeti giganti esterni, anche se vengono risolte due delle maggiori obiezioni che hanno a lungo reso la vita difficile al modello originale di Kant e Laplace: il problema del momento angolare e la diversa composizione chimica dei pianeti rispetto al Sole.

Le teorie di cattura

Nel 1964 M. Woolfson presentò una variante

dell'ipotesi mareale, detta teoria della cattura. Il materiale che ha formato i pianeti sarebbe il risultato dell'interazione mareale tra il Sole e una protostella, di massa ridotta e ancora in contrazione, che passò vicino alla nostra stella.

Neppure questa teoria gode di largo credito. Le obiezioni più importanti (che mettono in difficoltà anche le teorie mareali) sono:

- a) il materiale caldo strappato al Sole si disperderebbe con grande facilità nello spazio anziché formare pianeti;
- b) incontri ravvicinati con stelle massicce sono rarissimi (e i sistemi planetari, a quanto pare, *no*);
- c) non si riesce a spiegare la presenza della nube di Oort e della fascia di Edgeworth-Kuiper;
- d) il fatto che Sole e pianeti abbiano la stessa età ($4,55 \pm 0,05$ miliardi di anni) costituirebbe una coincidenza troppo speciale.

L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace

Nel 1755 il filosofo Immanuel Kant suggerì che il Sistema Solare si fosse formato dal collasso di una nube di gas. Nel 1796 il matematico P. S. de Laplace riprese l'idea dal punto di vista matematico, includendo anche l'effetto della rotazione. Nel 1854, poi, R. Roche discusse il problema del momento angolare (non ancora del tutto risolto). La rotazione fa appiattire la nube e si forma un disco, nel quale poi condensano i futuri pianeti.

La teoria spiegava tutti i dati osservativi conosciuti al suo tempo, e per questo ebbe da subito successo: nell'Ottocento conobbe un periodo di crisi, perché non riusciva (nella sua forma originale) a spiegare la distribuzione di momento angolare e le differenze di composizione chimica tra il Sole e i pianeti. Quest'ultima obiezione è

ormai pienamente superata; per quanto riguarda il momento angolare, è ormai stato compreso il meccanismo fisico che consentito il suo trasferimento dal Sole verso l'esterno. I dettagli del processo, tuttavia, non sono stati completamente chiariti a causa della sua enorme complessità.

Riassumiamo i dettagli più significativi ipotizzati per il processo di formazione del Sistema Solare. Il Sole si forma al centro del disco, con quasi tutta la massa; i pianeti nascono attraverso un processo molto complicato, in un'area estesa a gran parte del disco e su un periodo di tempo piuttosto lungo (da migliaia a milioni di anni, a seconda del pianeta). Dapprima grani solidi di "polvere" si condensano dal gas nebulare, con un meccanismo chimico complesso: poi i grani si accrescono progressivamente dando vita ai *planetesimi* attraverso un processo ugualmente complicato, ma di tipo dinamico-collisionale. Infine anche i planetesimi si urtano in modo catastrofico e si fondono: nascono i *protopianeti*, che inglobando il materiale residuo formano i pianeti.

Tutta la successione di questi eventi è di tale complessità da escludere ogni possibile determinismo. Il parametro fondamentale per la condensazione è la temperatura: essa è naturalmente più alta verso il centro del disco, dove la protostella si sta formando, mentre diminuisce progressivamente andando verso l'esterno. Dalla temperatura dipende il tipo di composti chimici che possono condensare dal gas: la tabella riporta le temperature di condensazione per alcuni composti che sicuramente esistevano nella nebulosa protosolare. Più in generale, possiamo dire che sotto i 2000 K circa condensano silicati e ossidi metallici: per la condensazione di composti organici e di ghiacci di vario tipo – di acqua, di metano, di ammoniaca,

di azoto – bisogna scendere sotto i 270 K, fino verso lo zero assoluto. Questa differenziazione chimica è alla base della dicotomia esistente tra i pianeti *interni* (o terrestri) e pianeti *esterni* (o gassosi). I primi sono caratterizzati da: dimensioni ridotte (la Terra è il più grande), nuclei ferrosi, mantelli rocciosi, grande densità, crosta rocciosa solida e atmosfere sottili: i secondi hanno invece nucleo misto (roccia e ghiaccio), grandi dimensioni, densità bassa e atmosfere molto estese. Il secondo gruppo si può ulteriormente suddividere: da una parte Giove e Saturno (più massicci), dall'altra Urano e Nettuno.

Composto o Minerale	Temperatura (K)
Al ₂ O ₃	1743
Fe - Si	1458
FeS (troilite)	703
Composti di carbonio	373 - 473
Ghiacci di vario tipo	< 273

Tabella 2.1 – Temperatura di condensazione di alcuni composti nella nebulosa protostellare

Si può scrivere un'equazione approssimata per l'andamento della temperatura, al variare della distanza, nella nebulosa protosolare:

$$T(K) \approx 631 / R^{0.77}$$

dove R è espresso in unità astronomiche.

La zona della nebulosa dove il vapore acqueo può solidificare ($T \leq 273$ K, cioè 0 °C) si trova a circa 3 UA dal Sole (*linea del ghiaccio*), nella regione oggi occupata dalla fascia degli asteroidi. A distanze maggiori i nuclei planetari si accrescono rapidamente (perché aumenta il materiale disponibile) e possono catturare anche il gas della nebulosa; ciò spiega le atmosfere di idrogeno ed elio dei pianeti gassosi - infatti il gas nebulare è composto quasi al

98% di questi gas.

La tabella 2.2 riporta, per i pianeti fino a Giove, le distanze dal Sole e la presumibile temperatura che regnava nella regione corrispondente durante la formazione del Sistema Solare. Il processo di condensazione accresce la propria efficacia grazie ai grani di polvere. La “polvere” doveva probabilmente essere un insieme di silicati molto refrattari, grafite, composti metallici e - forse - altri composti organici complessi.

Pianeta	Distanza (UA)	Temperatura (K)
Mercurio	0.387	1400
Venere	0.723	900
Terra	1.000	600
Marte	1.524	400
Giove	5.203	200

Tabella 2.2 – Temperature presumibili della nebulosa protosolare alle distanze cui si formarono in seguito i pianeti interni e Giove.

La fase successiva alla condensazione, detta *accrescimento*, è caratterizzata dalle collisioni tra grani, che aderiscono l'uno all'altro ingrandendosi progressivamente. I meccanismi fisici sono due: collisione geometrica e collisione gravitazionale. Nella prima l'accrescimento riguarda soltanto i grani che possono scontrarsi direttamente (il concetto portante è quello di *sezione d'urto*, cioè la superficie disponibile per un impatto: per un grano sferico di raggio r essa è l'area del cerchio massimo, πr^2), mentre nella seconda l'influenza gravitazionale esercitata dalla particella è in grado di attirare anche del materiale che non le sarebbe finito direttamente addosso. Poiché la gravità di un oggetto dipende dalla sua massa, si comprende facilmente che la collisione gravitazionale è all'inizio trascura-

bile, ma non appena la massa dei grani cresce fino ad un certo valore critico di soglia, il meccanismo di cattura gravitazionale diventa dominante. Una discussione matematica del modello mostra che, se abbiamo a che fare con particelle di raggio r , l'efficienza della collisione geometrica dipende da r^2 , mentre quella della collisione gravitazionale dipende da r^4 . Questo è un modo più complicato, ma più preciso, di dire che a partire da certe dimensioni minime i grani l'accrescimento è quasi esclusivamente gravitazionale, e accelera sempre di più. Il processo, chiamato *crescita esponenziale*, porta in brevissimo tempo le dimensioni degli oggetti all'interno della nebulosa protosolare da un metro ad alcuni km. A questo punto non sono più dei semplici grani, ed è giusto chiamarli con un altro nome: *planetesimi*. Naturalmente essi continuano ad accrescersi, sia per mutue collisioni sia per cattura di particelle più piccole. I planetesimi si ingrandiscono ulteriormente e raggiungono dimensioni paragonabili a quelli della Luna o a anche di Marte: a questo punto sono diventati *protopianeti*.

Per i pianeti di tipo terrestre gli stadi finali dell'accrescimento devono essere violenti e drammatici. I protopianeti hanno collisioni più rare rispetto agli stadi precedenti, ma catastrofiche: è solo attraverso tale processo che si possono formare pianeti come Venere o la Terra. Si ritiene che esistano alcune testimonianze residue di questa fase: secondo gli studiosi esse sono

a) *formazione della Luna*. Un impatto di un protopianeta grande come Marte contro la Terra appena formata ha causato la perdita del mantello esterno del nostro pianeta, nonché l'accelerazione della sua rotazione;

b) *rotazione retrograda di Venere*. L'asse di rotazione di

questo pianeta è inclinato di $177,4^\circ$ sul piano orbitale, e il periodo di rotazione (243 giorni!) è più lungo del periodo di rivoluzione attorno al Sole (225 giorni). L'ipotesi più attendibile è che un impatto abbia rallentato la rotazione iniziale di Venere. Il differente risultato rispetto alla Terra dipende ovviamente dai parametri iniziali di collisione: per esempio l'impatto sulla Terra non deve essere stato centrale, ma radente;

c) anomalie nel sistema di Urano. L'asse di rotazione è inclinato di $97,9^\circ$ sul piano orbitale e questo potrebbe essere spiegato da un altro impatto: il processo deve aver coinvolto anche uno dei satelliti di Urano, Mirando, il cui aspetto molto tormentato da un lato e le piccole dimensioni (meno di 500 km) dall'altro testimoniano un'enorme energia che ha trasformato in passato il satellite. Tale energia non può essere endogena (Miranda è troppo piccolo), ma deve essere giunta dall'esterno;

d) "sottigliezza" del mantello di Mercurio. Le misure di densità e del campo magnetico indicano che il nucleo di questo pianeta è sproporzionatamente grande, occupando il $3/4$ del raggio del pianeta e i $2/3$ della massa. Anche per questo fatto si ipotizza una causa da impatto, che avrebbe rimosso parte del mantello roccioso esterno di Mercurio.

La descrizione che abbiamo illustrato sembra ricostruire piuttosto bene la formazione dei pianeti interni: vediamo che cosa può essere successo nelle regioni più lontane dal Sole.

La fascia degli asteroidi comprende un enorme numero di corpi le cui dimensioni sono tipiche dei planetesimi: la loro evoluzione si è infatti arrestata allo stadio

dell'accrescimento, perché Giove si è formato con grande rapidità (le grandi masse hanno un'evoluzione molto accelerata, perché catturano con maggiore efficacia) e ha perturbato le traiettorie dei planetesimi vicini ad esso, accelerandoli e innescando un meccanismo distruttivo di collisioni che ha frantumato gli asteroidi anziché aggregarli insieme. Il processo continua ancora oggi: la massa totale della fascia è stimata in circa $5 \cdot 10^{21}$ kg, ovvero circa un quindicesimo della massa della Luna (rispetto all'inizio la fascia ha perso una parte notevole della sua massa). Il maggiore degli asteroidi, Cerere, ha un diametro di 940 km e una massa di $\sim 10^{21}$ kg (più di un quinto dell'intera fascia!); il numero di corpi aumenta rapidamente al diminuire delle dimensioni.

I pianeti esterni devono essersi formati in maniera più semplice rispetto a quelli interni. Le massicce quantità di ghiaccio disponibili oltre le 3 UA di distanza dal Sole si sono unite ai grani preesistenti in grandi nuclei misti (roccia + ghiaccio), capaci di catturare e trattenere grandi involucri di gas della nebulosa protosolare. Per Giove sono stati stimati i seguenti dati: massa del nucleo di roccia/ghiaccio: ~ 35 masse terrestri, massa totale del pianeta ~ 318 masse terrestri. Dunque la maggior parte della massa di Giove è nell'involucro di idrogeno ed elio, e lo stesso vale per Saturno, Urano e Nettuno.

Pianeta	Tempi di formazione
Pianeti terrestri	$10^6 - 10^7$ anni
Giove	$10^3 - 10^6$ anni
Urano - Nettuno	$10^7 - 10^8$ anni

Tabella 2.3 – Tempi caratteristici di formazione per i corpi del Sistema Solare

La tabella 2.3 riporta i tempi caratteristici di for-

mazione per alcuni corpi del Sistema Solare. Si noti la rapidità di formazione di Giove (alle cui cause abbiamo già accennato) e, all'opposto, la lentezza del processo di formazione di Urano e Nettuno, causata dalla grande distanza dal Sole e dalla presenza dei giganti Giove e Saturno. Ognestamente va detto che questo resta un punto debole del modello che abbiamo illustrato, perché il Sole all'inizio della sua vita ha attraversato una fase detta *fase T-Tauri* (dal nome della stella capostipite, la variabile T nella costellazione del Toro), caratterizzata da un vento stellare molto intenso e da una forte emissione ultravioletta; in tale situazione tutto il materiale non ancora aggregato nei pianeti doveva essere spazzato via dal Sistema Solare. Il problema è che i modelli di evoluzione stellare prevedono che per il Sole la fase T-Tauri debba iniziare al massimo dieci milioni di anni dopo la sua formazione: come hanno fatto a formarsi Urano e Nettuno? La domanda non ha ancora ottenuto una risposta convincente.

Abbiamo così visto, sia pure in modo molto sommario, come potrebbero essere andate le cose all'inizio della formazione del Sistema Solare. Una cosa che colpisce è questa: il processo di formazione dei pianeti è davvero inefficiente. La massa del Sistema Solare attuale (Sole escluso) è circa 0,0013 masse solari, mentre lo studio dei dischi attorno a giovani stelle in formazione indicano che la massa "tipica" per un disco varia tra 0,01 e 0,1 masse solari. Quindi il rapporto tra la massa iniziale e quella finale varia tra 8 e 80 circa: tutto il resto viene disperso nello spazio. Questa non vuole essere una considerazione di carattere economico, ma piuttosto segnala un fatto importante: se il processo di formazione dovesse essere ripetuto molte volte, è molto probabile che salterebbero fuori pianeti molto diversi da quelli che abbiamo. Per esempio, di-

versi sistemi planetari scoperti di recente (per esempio, Upsilon Andromedae) hanno molti pianeti come Giove, tutti molto vicini alla stella “madre”.

Chiudiamo con alcune considerazioni sul sistema Terra-Luna. Esso è davvero particolare nell’ambito del Sistema Solare, perché il rapporto di massa satellite/pianeta è eccezionalmente elevato (unico altro esempio: Plutone e il suo satellite Caronte). Nella tabella 2.4 vengono riportati alcuni esempi.

Ganimede / Giove	$8 \cdot 10^{-5}$
Titano / Saturno	$2 \cdot 10^{-4}$
Titania / Urano	$8 \cdot 10^{-5}$
Tritone / Nettuno	$4 \cdot 10^{-5}$
Luna / Terra	0,01
Caronte /Plutone	0,08

Tabella 2.4 – Rapporto di massa satellite/pianeta

Dunque la Luna è un satellite molto massiccio, troppo “di lusso” per il nostro pianeta! Ma non basta: ha anche una composizione chimica inusuale. La superficie è basaltica e molto povera di ferro, e la densità media è più bassa rispetto a un tipico pianeta terrestre.

Oggetto	Densità (kg/m ³)
Mercurio	5420
Venere	5250
Terra	5520
Luna	3340
Marte	3960

Tabella 2.5 – Densità medie dei pianeti interni

La teoria nebulare suggerisce che i satelliti dei pianeti esterni si formino con un processo simile a quello che ha dato origine ai pianeti: attorno al pianeta gigante si po-

teva formare un disco, ripetendo il meccanismo “in miniatura”. La Terra, però, era troppo vicina al Sole e troppo piccola per avere il suo disco. Come si è formata allora la Luna? Tra le teorie che si sono succedute (fissione, cattura, impatto gigante) ha ultimamente ricevuto grande impulso la teoria dell’impatto gigante. Infatti la fissione richiede che la Terra all’inizio dovesse ruotare troppo rapidamente (circa 6 ore!), né spiega la scarsità di ferro della Luna. La cattura è improbabile dal punto di vista dinamico e non spiega le particolarità chimica della composizione del nostro satellite.

Se la teoria dell’impatto è vera, allora un corpo delle dimensioni di Marte deve aver colpito la Terra subito dopo la sua formazione: l’impatto, laterale, dovette essere violentissimo, vaporizzando sia il proiettile sia il mantello esterno terrestre. Il materiale vaporizzato era impoverito in ferro rispetto alla Terra (il cui ferro è quasi tutto nel nucleo) e si è posto in un disco orbitante attorno al nostro pianeta; simulazioni numeriche mostrano che la Luna si accresce molto rapidamente all’interno del disco. L’ipotesi dell’impatto non spiega solo l’origine della Luna, ma potrebbe anche render conto di due cose: la rotazione piuttosto rapida (24 h) della Terra e l’inclinazione dell’asse terrestre. Infatti le simulazioni mostrano che, in assenza della Luna, l’angolo dell’asse varierebbe in modo caotico, oscillando abbastanza da riflettersi inevitabilmente sulla stabilità del clima terrestre. La Luna è dunque davvero importante per la nostra vita, dopotutto!

Siamo ora giunti a parlare delle stelle. Ne discuteremo alcuni aspetti generali: misure di distanza, classificazione, struttura ed evoluzione.

2.3 – GLI SPETTRI E LA CLASSIFICAZIONE STELLARE. IL DIAGRAMMA H-R

Nel 1814 Fraunhofer scoprì che nello spettro della luce bianca (compresa quella proveniente dal Sole), ottenuto facendo passare un fascio di luce attraverso un prisma di vetro, sono presenti delle righe scure. Nello spettro del Sole egli contò ben 574 righe (oggi dette *righe di Fraunhofer*). Pochi anni prima Wollaston aveva già notato lo stesso fenomeno, senza però coglierne il profondo significato.

Una spiegazione delle righe di Fraunhofer come dovute all'assorbimento della luce di quella particolare frequenza da parte degli elementi chimici presenti nell'atmosfera solare fu data da Kirchhoff nel 1859. I principi della spettroscopia (la scienza che studia la natura delle stelle e degli altri oggetti attraverso l'analisi della luce o di altra radiazione da essi prodotta, cioè del loro spettro) furono formulati dallo stesso Kirchhoff insieme con Bunsen.

Per una spiegazione completa degli spettri è necessario introdurre dei concetti di meccanica quantistica. Per una comprensione qualitativa del fenomeno si può utilizzare il modello di atomo costituito da un nucleo centrale con degli elettroni che gli “girano” attorno, come tanti pianeti, ma su orbite ben determinate (tale modello è inconsistente, ma ha il pregio di essere intuitivamente comprensibile). Finché un elettrone si muove su una di queste orbite non assorbe né cede energia, ma per saltare da un'orbita ad un'altra deve scambiare energia (acquistarne, se salta da un'orbita più vicina al nucleo ad una più lontana; cederne, se accade l'opposto). Questa energia viene in genere fornita da fotoni (radiazione elettromagnetica). La

relazione di Planck: $\varepsilon = hv = h \frac{c}{\lambda}$ ci dà il valore del “quanto” di energia, ovvero *la più piccola* quantità di energia che è possibile scambiare: $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s è il valore della costante di Planck e c è la velocità della luce nel vuoto.

Poiché ogni atomo ha delle orbite caratteristiche (diverse da quelle di qualunque altro) anche le energie per saltare da un’orbita all’altra variano da atomo ad atomo: queste energie sono appunto quelle che ne definiscono lo spettro. Gli spettri delle stelle o di altri corpi celesti vengono ottenuti applicando dei prismi (o analoghi dispositivi disperdenti) ai telescopi, in modo che la luce venga scomposta nelle sue componenti cromatiche: l’immagine così prodotta viene poi fotografata. Gli spettri possono presentare molte righe brillanti (righe di *emissione*), corrispondenti all’emissione di luce da parte di atomi in una regione caldissima della superficie di una stella, e anche righe scure (righe di *assorbimento*), che corrispondono invece all’assorbimento da parte di atomi situati nelle regioni fredde, più lontane dalla superficie della stella, o anche in nubi di gas e polvere nello spazio.

Classe spettrale	Temperatura superficiale	Colore	Magnitudine assoluta
O5	40.000 K	Blu intenso	-5,8
B0	28.000 K	Blu	-4,1
A0	9.900 K	Blu-bianco	+0,7
F0	7.400 K	Bianco	+2,6
GO (Sole =G2)	6.030 K	Giallo	+4,4
K0	4.900 K	Arancione	+5,9
M0	3.480 K	Rosso-arancio	+9,0
R, N	3.000 K	Rosso	
S	3.000 K	Rosso	

Tabella 2.6 – Classificazione spettrale delle stelle

Confrontando le righe con gli spettri ottenuti in laboratorio si può stabilire quali sono gli elementi che producono l'assorbimento o l'emissione, e quindi sapere quali elementi sono presenti negli oggetti che si stanno studiando.

Le righe spettrali possono anche presentare uno spostamento verso la parte rossa (redshift) o verso la parte violetta dello spettro (blueshift). Interpretando questo fenomeno come effetto Doppler si ha che nel primo caso l'oggetto si allontana, nel secondo caso si avvicina; conoscendo lo spostamento delle righe spettrali è possibile misurarne la velocità radiale (cioè lungo la congiungente osservatore-oggetto).

Dopo il lavoro pionieristico dell'italiano Piazzi, all'inizio dell'800, lo sviluppo della spettroscopia portò verso la fine dello stesso secolo ad una classificazione spettrale vera e propria. Con il tempo essa ha subito qualche modifica, ma ha conservato lo schema di base.

Con il migliorare delle tecniche fu possibile suddividere ulteriormente le classi (originariamente le prime 7). Le classi da O a M sono state suddivise in 9 sottoclassi, da 0 (le più calde) a 9 (le più fredde).

La classe O inizia da O3 ed ha la sottoclasse O9,5. La classe M possiede la sottoclasse M10.

Si possono fornire altre informazioni aggiungendo delle lettere o altri simboli. Per esempio, un numero romano serve a indicare la luminosità.

- I Ipergiganti
- II Supergiganti
- III Giganti
- IV Sub-giganti
- V Nane (stelle di sequenza principale). Il Sole è G2V
- VI Sottonane o sub-nane
- VII Nane bianche

Nel 1913 il danese Hertzsprung e l'americano Russell notarono che, costruendo un grafico dove l'ascissa riportava l'*indice di colore* (una grandezza legata alla temperatura superficiale di una stella) e l'ordinata la magnitudine assoluta delle stelle di distanza nota, i punti che rappresentavano le stelle non si distribuivano a caso, ma apparivano raggruppati su due fasce molto strette, che non cambiavano mai di forma anche scegliendo stelle diverse come campione.

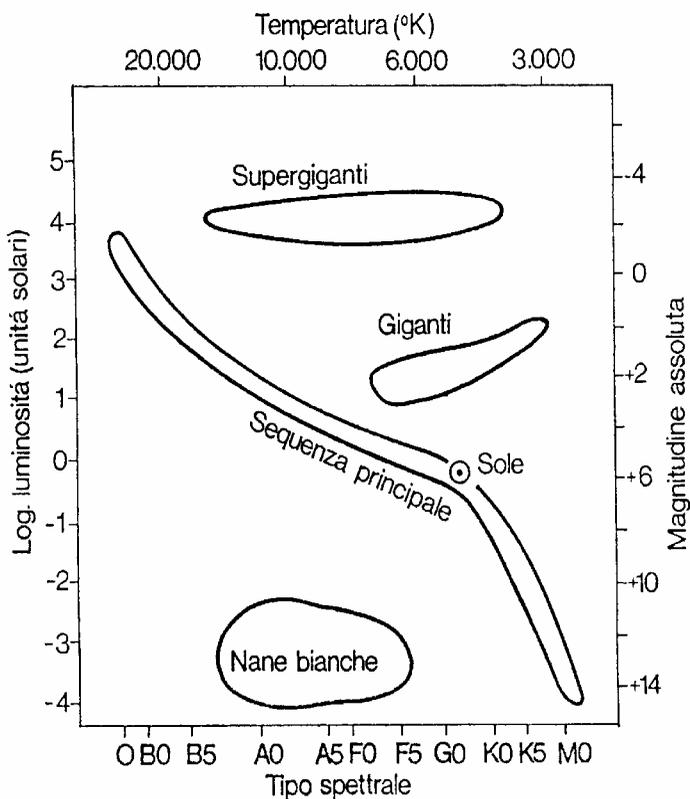


Fig. 2.3 – Il diagramma di Hertzsprung e Russell

Queste due fasce furono denominate *sequenza principale e ramo delle giganti*; il grafico è oggi noto come diagramma H-R (diagramma di Hertzsprung e Russell).

In base a questo diagramma, ogni stella di sequenza principale avente un certo indice di colore - e quindi una data temperatura superficiale - è caratterizzata da una precisa magnitudine assoluta.

Il diagramma H-R può essere usato per determinare la distanza delle stelle. Prendiamo in considerazione un ammasso di stelle posto a distanza non misurabile con il metodo della parallasse trigonometrica. Possiamo essere ragionevolmente certi che tutte le stelle dell'ammasso siano più o meno alla stessa distanza da noi. Tracciamo ora il diagramma H-R con in ordinata la magnitudine apparente delle stelle dell'ammasso: se vediamo che ha la stessa forma di un tratto di sequenza principale del diagramma H-R di stelle poste a distanza nota (e che quindi riporta in ordinata la magnitudine assoluta), allora per ogni stella dell'ammasso possiamo facilmente risalire alla magnitudine assoluta, essendo questa la stessa di ogni stella con lo stesso indice di colore posta sulla sequenza principale. In tal modo possiamo misurare la distanza delle stelle della Galassia e anche degli ammassi globulari. L'applicazione del metodo può presentare delle difficoltà pratiche, ma è in questo modo che è stata determinata la distanza di molti ammassi stellari.

2.4 – STRUTTURA STELLARE ED EQUAZIONI DI EQUILIBRIO

L'osservazione della grande varietà di stelle e il calcolo della enorme quantità di energia emessa hanno molto presto indotto gli studiosi a chiedersi come esse cambino

nel corso del tempo. In questo paragrafo verranno esposte le fasi principali dell'evoluzione stellare.

Una "tipica" stella appena formata è composta (in peso) per circa 3/4 di idrogeno, 1/4 di elio e tracce (da un minimo dello 0,01% fino a un massimo del 4%) di elementi più pesanti (ossigeno, carbonio, neon, silicio, ferro e zolfo i più abbondanti). Come vedremo nel seguito, la percentuale di elementi "pesanti" (così gli astrofisici chiamano – impropriamente – tutti gli elementi più pesanti dell'idrogeno e dell'elio) risulta tanto più bassa quanto più vecchio è il gas che ha formato la struttura.

La stella è una nube di gas più o meno sferica, con temperature superficiali che possono variare da 2000 a più di 100.000 gradi e temperature centrali da circa 6-7 milioni fino a qualche miliardo di gradi. Le dimensioni delle stelle vanno da una decina di km (stelle di neutroni) fino a oltre un miliardo di km (supergiganti rosse).

Il termine "stella" si applica solo a strutture in grado di sostenere reazioni di fusione nucleare prolungate. Il gas costituente si presenta allo stato ionizzato nella grande maggioranza dei casi. Le strutture stellari costituiscono un caso particolare dell'analisi della dinamica dei fluidi: in generale non esistono soluzioni esatte, quindi si fa ricorso a metodi ormai classici di analisi numerica. Descriviamo brevemente le equazioni di equilibrio.

1) Equazione di conservazione della massa

Consideriamo una quantità di massa dM , posta a distanza r dal centro. Se lo spessore dello strato dr è sufficientemente piccolo da poter considerare come costante la densità ρ al suo interno, vale la relazione:

$$dM = \rho dV = \rho(4\pi r^2 dr) = 4\pi \rho r^2 dr$$

L'equazione rappresenta la conservazione della massa ed è valida solo a condizione che si possa trascurare la massa convertita in energia secondo l'equazione $E = mc^2$. Si ricordi che per il Sole, come abbiamo visto, questa perdita equivale a circa 4,3 miliardi di kg al secondo, che corrisponde a un centomillesimo della massa solare in un miliardo di anni!

2) Equazione dell'equilibrio idrostatico

Consideriamo la solita quantità di massa dM a una distanza dal centro compresa tra r e $r+dr$. La pressione in r sarà maggiore che in $r+dr$, questo perché essa deve diminuire andando verso l'esterno. La forza agente su dM è la forza di gravità:

$$dF = -\frac{GM(r)dM}{r^2},$$

dove $M(r)$ è la massa all'interno della superficie sferica di raggio r . Inoltre sappiamo che $dM = \rho dV = \rho(4\pi r^2 dr)$, e per la pressione abbiamo $dP = \frac{dF}{S}$ (dove S è la superficie di una sfera di raggio r).

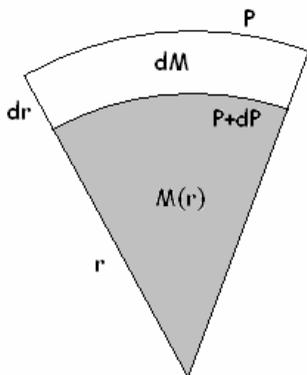


Fig. 2.4 - L'equilibrio idrostatico

Ricaviamo così:

$$dP = - \frac{\frac{GM(r)dM}{r^2}}{4\pi r^2} = - \frac{GM(r)\rho dr}{r^2}$$

Questa formula di solito si scrive come:

$$\frac{dP}{dr} = - \frac{GM(r)\rho}{r^2},$$

che rappresenta l'equazione dell'equilibrio idrostatico. Naturalmente anche la densità ρ dipende dal raggio r , poiché in generale essa varia con la scelta dell'elemento dM .

3) Equazione di stato per il gas della stella

Generalmente si può assumere che il gas costituente la struttura stellare si comporti come un gas perfetto. Questo può sembrare strano - viste le elevate temperature in gioco - ma è un'approssimazione ottima per le stelle "medie" (quelle che compongono la sequenza principale): è invece meno buona per le giganti rosse e decisamente cattiva per le nane bianche (per non parlare delle stelle di neutroni). Ad ogni modo, la schematizzazione classica è quella di scrivere la pressione P all'interno della stella come somma di due termini, uno per il gas perfetto (P_G) e uno dovuto alla pressione di radiazione (P_R), quest'ultimo certamente presente perché la stella senza esso non potrebbe trovarsi in equilibrio.

Discutiamo prima la forma di P_G . L'equazione di stato per n moli di gas è $P_G V = nRT$. Per la pressione P_R dovuta alla radiazione si può invece scrivere:

$$P_R = \frac{1}{3} a T^4$$

dove a è una costante. La dimostrazione di questa formula poggia sul calcolo della pressione dei fotoni in una scatola e sulla legge di Stefan per il corpo nero. Notiamo che la pressione di radiazione cresce più rapidamente della pressione di gas perfetto con l'aumentare della temperatura ($P_G \propto T$, mentre $P_R \propto T^4$); quindi la radiazione sarà il termine dominante nelle stelle più azzurre e calde, quelle dei tipi spettrali O e B. Questo pone un limite superiore per le masse stellari, perché al crescere della massa cresce anche la temperatura, e la pressione di radiazione finisce per destabilizzare le stelle troppo massicce.

4) L'equazione del gradiente termico

Con questo termine si indica la variazione della temperatura al variare della distanza dal centro, dT/dr . Il gradiente termico dipende dal tipo di trasporto energetico attivo all'interno della stella: un basso valore per dT/dr indica un trasporto di energia puramente *radiativo*, (e, in piccola parte, anche per conduzione), ma non c'è convezione. Viceversa, un dT/dr elevato rende necessario anche lo spostamento di materia per riequilibrare le grandi differenze di temperatura tra strati adiacenti. Nel bilancio energetico la convezione può a volte giungere a dominare completamente la struttura, con conseguenze importanti per l'evoluzione della stella.

La composizione chimica e il grado di ionizzazione della materia stellare svolgono un ruolo fondamentale nell'equazione del gradiente attraverso il cosiddetto *coefficiente di opacità*, che (molto grossolanamente) indica la capacità del gas stellare di assorbire la radiazione prodotta nelle combustioni nucleari. Essa può variare moltissimo

con la composizione chimica. Gli elementi più pesanti sono i meno trasparenti: le stelle di formazione più recente (popolazione I), che ne sono più ricche, risultano in media più opache delle stelle più antiche (popolazione II). Anche il grado di ionizzazione influenza l'opacità, perché gli elettroni liberi diminuiscono drasticamente la trasparenza della struttura. Per esempio, un fotone prodotto al centro del Sole impiega in media *un milione di anni* per giungere alla superficie. Naturalmente questo ritardo non può essere avvertito: il numero di fotoni prodotti dalle reazioni nucleari è enorme. Possiamo distinguere tre possibili casi per l'andamento del gradiente termico:

dT/dr	Tipo di trasporto	Situazioni associate
Basso	radiativo	Nuclei di stelle non massicce / involucri di stelle massicce
Medio	convezione "adiabatica"	Nuclei delle stelle di alta sequenza (ciclo CNO)
Alto	convezione "superadiabatica"	Involucri delle stelle di bassa sequenza e di giganti rosse

Tabella 2.7 – Meccanismi di trasporto del calore in dipendenza del gradiente termico dT/dr

5) Produzione di energia

All'interno della stella possono operare diversi meccanismi: i più importanti sono le reazioni di fusione nucleare e, subito dopo in ordine di importanza, la contrazione gravitazionale.

Sia ε l'energia prodotta per unità di massa e per unità di tempo dalla stella, E l'energia totale prodotta dalla stella. Definendo come la *luminosità totale* la derivata dell'energia totale rispetto al tempo, vale a dire $L = \frac{dE}{dt}$, nell'unità di tempo si ottiene:

$$dL = \varepsilon(r)dM = 4\pi r^2 \varepsilon(r) \rho(r) dr$$

o anche
$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \varepsilon(r) \rho(r)$$

Questa equazione in sostanza esprime la conservazione dell'energia.

La struttura della stella varia con l'evoluzione, ma può essere rappresentata come una serie ideale di gusci concentrici. La distinzione più importante è quella tra il nucleo centrale, dove avvengono le reazioni nucleari, e il resto della stella, detto involucro.

2.5 – EVOLUZIONE STELLARE

Nel corso della sua vita una stella può attraversare varie fasi:

- 1) *Protostella*: collasso iniziale e innesco delle reazioni nucleari
- 2) *Sequenza principale*: fase di combustione dell'idrogeno
- 3) *Gigante rossa*: esaurimento dell'idrogeno centrale e combustione a *shell*
- 4) *Ramo orizzontale*: combustione dell'elio centrale
- 5) *Ramo asintotico*: combustione in doppio *shell* e nebulosa planetaria
- 6) *Combustione del carbonio* (e successive)
- 7) *Fasi finali*: nane bianche, supernovae, stelle di neutroni, buchi neri.

L'evoluzione di una stella può variare in dipendenza di due parametri fondamentali: la massa (il più importante nel differenziare il percorso evolutivo) e la composizione chimica.

2.5.1 – Fasi iniziali e formazione della protostella

Secondo la teoria del Big Bang le prime fasi di vita dell'Universo hanno visto la formazione di idrogeno ed elio, più o meno nelle percentuali del 75% e del 25%, rispettivamente: questo gas ha contribuito alla nascita delle prime stelle e via via si è arricchito di elementi più pesanti, anche sotto forma di grani di polvere, nel corso di successive generazioni stellari. Per i (meno numerosi) fautori delle moderne versioni della teoria dello stato stazionario il gas è da sempre presente nell'Universo, in continua, lentissima nascita dal vuoto dello spazio-tempo in espansione. Qualunque teoria si preferisca, l'esistenza di gas e polveri, materiale grezzo delle stelle, non è certamente in discussione.

I luoghi più favorevoli per la formazione stellare sono le galassie molto ricche di gas e polveri, ovvero le spirali come la nostra Via Lattea, che ne presenta notevoli concentrazioni lungo i bracci (non a caso composti di stelle per lo più giovani). Le galassie ellittiche, invece, sono di solito molto povere di gas e polveri. Il gas interstellare è osservabile sotto forma di regioni HI (nubi di idrogeno neutro, a temperatura ~ 10 K) e regioni HII (dove l'idrogeno è ionizzato e la temperatura può raggiungere anche i 10^4 K). Fin dagli anni Cinquanta è stata inoltre scoperta nelle nubi di gas interstellare una grande quantità di molecole, organiche e non organiche. Lo studio delle specie chimiche e delle loro interazioni in ambiente interstellare è uno dei campi di studio attualmente più interessanti, per le connessioni con la formazione del Sistema Solare e per il problema della diffusione e dell'abbondanza delle forme viventi nel Cosmo.

Le nubi osservate hanno una massa molto variabi-

le, da circa $0,1 M_{\odot}$ fino a valori dell'ordine di $10^6 M_{\odot}$. Vi è evidenza di moti turbolenti all'interno di molte di esse, come pure di rotazione (e questo è di importanza fondamentale per la dinamica della futura stella). Le nubi più grandi all'interno delle regioni HI sono le più promettenti per la formazione stellare, perché dominate dalla propria gravità; piccole instabilità possono essere sufficienti all'innescò del collasso. Per quest'ultimo sono stati proposti vari meccanismi (instabilità termica, fronti di shock da compressione ad opera di vicine *supernovae* o di associazioni stellari O-B, campi magnetici locali o galattici), ma solo oggi si comincia a intravedere la possibilità di osservare direttamente tali processi in azione, e questo grazie soprattutto al Telescopio Spaziale Hubble.

Nel collasso di una nube si possono distinguere due momenti ben distinti:

Fase isoterma. La temperatura della nube rimane stabile intorno ai 10 K, perché l'energia generata dalla contrazione gravitazionale viene irradiata all'esterno: la nube è inizialmente trasparente alla radiazione. Col passare del tempo le cose cambiano, perché la densità al centro comincia a salire, aumentando l'opacità della struttura e quindi favorendo l'aumento della temperatura. A circa 2000 K l'idrogeno molecolare H_2 si dissocia nei suoi atomi: ciò fa raddoppiare il numero di particelle disponibili e incrementa l'instabilità gravitazionale, accelerando il collasso della struttura. Si entra così nella fase successiva.

Fase adiabatica.

Tale fase è caratterizzata da una rapida crescita della temperatura e della densità centrale della nube. Quando la temperatura centrale supera i 6000 K il numero di elettroni liberi cresce (gli atomi di H cominciano a ionizzarsi): essi fanno salire ancor di più l'opacità del gas. Una caratteristi-

ca interessante è la continua accelerazione del collasso; col procedere della contrazione, infatti, la densità deve per forza aumentare e questo fa diminuire ancor più il tempo di caduta del gas verso il centro, accelerando sempre di più l'intero processo.

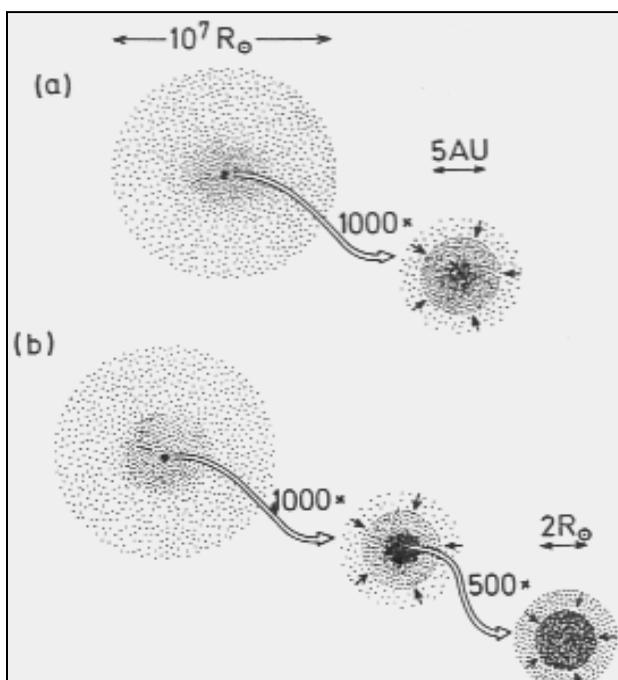


Fig. 2.5 – Contrazione di una nube: a) fase isoterma b) fase adiabatica. Il raggio solare R_{\odot} è 700000 km e AU indica l'Unità Astronomica (150 milioni di km)

La contrazione a questo punto non può più arrestarsi: il risultato è una struttura molto disomogenea, dove si distinguono una condensazione centrale - la protostella, caratterizzata da alti valori di densità, temperatura ($\sim 30000 \text{ K}$) e pressione - e un involucro, che comprende le zone esterne molto meno dense e calde fino al limite del-

la nube, che è rimasto ancora alla temperatura iniziale di 10 K. In questa fase la protostella emette una grande quantità di energia, non derivante da reazioni nucleari ma dalla conversione dell'energia cinetica del gas in energia termica; il picco di emissione è però situato nell'infrarosso lontano e quindi è osservabile solo fuori dell'atmosfera terrestre.

Durante la contrazione è certamente possibile il frazionamento della struttura in due o più parti, che poi daranno origine a sistemi doppi o multipli: deve trattarsi di un fenomeno piuttosto frequente, visto che quelle singole costituiscono solo la metà, o forse anche meno, di tutte le stelle che osserviamo.

Durante le stesse fasi si può formare un disco equatoriale di gas e polveri attorno alla protostella, che potrà in futuro dare origine a corpi quali pianeti, asteroidi o comete. Affinché ciò possa accadere la protostella deve in qualche modo trasferire quasi tutto il momento angolare dalla condensazione centrale verso l'esterno: non ci soffermeremo su quali possano essere tali meccanismi. L'evidenza osservativa dell'efficacia di tali processi diventa ovvia se consideriamo che il 97% del momento angolare totale (una quantità fisica che misura il grado di rotazione) del Sistema Solare appartiene ai pianeti, Giove in testa, mentre al tempo della formazione del disco primordiale doveva succedere proprio il contrario (come si può dedurre dalle analisi dinamiche dei modelli). Oggi il periodo medio di rotazione del Sole - circa 27 giorni - risulta molto inferiore a quello delle stelle più luminose (alcune stelle del tipo spettrale *B* hanno velocità di rotazione vicine al limite di rottura per l'azione di forze centrifughe, cioè circa 300-400 km/s). In generale si trova che la transizione tra rotazione rapida e lenta avviene in corrispondenza del tipo spettrale

F. Dunque le stelle di alta sequenza sembrano poco propense a formare sistemi planetari? Ciò resta ancora da chiarire.

La fase protostellare (dischi compresi) è stata osservata in diverse regioni del cielo, come la nebulosa M42 in Orione e quella Aquila (M16) nel Serpente; i dati sperimentali a disposizione (grazie a Hubble) si stanno moltiplicando e confermano il quadro generale qui descritto.



Fig. 2.6 – La Nebulosa di Orione. La ripresa è di Angelo Angeletti e Alfredo Trombetta ed è stata effettuata dall’Osservatorio Astronomico “Padre Francesco De Vico” di Serrapetrona (MC)

La protostella cessa di essere tale quando la tempe-

ratura nelle regioni centrali raggiunge i 6-7 milioni di kelvin, che corrispondono all'inizio della combustione dell'idrogeno. A quel punto l'involupto esterno viene progressivamente dissolto dalla radiazione stellare, divenuta più intensa ed energetica, e la stella appare visibile: questa è la fase T-Tauri, dal nome della stella che per prima è stata osservata in questa fase.



Fig. 2.7 – Le Pleiadi, un ammasso di stelle giovani; attorno ad alcune sono ancora visibili i resti della nube da cui hanno avuto origine. La ripresa è di Angelo Angeletti e Alfredo Trombetta ed è stata effettuata dall'Osservatorio Astronomico "Padre Francesco De Vico" di Serrapetrona (MC)

L'evoluzione della nube in protostella è rintracciabile nel diagramma $H-R$ come una curva caratteristica, dipendente dalla massa della struttura. Durante il periodo di emissione infrarossa la protostella si trova nella parte destra del diagramma $H-R$, tanto più in alto quanto maggiore è la sua massa. L'ultima fase di contrazione è lenta e graduale, e la stella si attesta infine sulla sequenza principale, dove rimarrà per la maggior parte della propria esistenza.

2.5.2 – La sequenza principale: combustione dell'idrogeno

Le reazioni nucleari che la sorreggono sono le catene $p-p$ (per le stelle di bassa sequenza) o il ciclo CNO (per le stelle di alta sequenza): questo determina notevoli differenze di struttura interna dando luogo ad una biforcazione evidentissima nel tempo di permanenza in sequenza principale. In ogni caso l'idrogeno brucia soprattutto nel centro della struttura, dove i valori della temperatura sono più elevati e maggiore è l'efficienza delle reazioni nucleari.

Man mano che il combustibile si esaurisce i cicli di fusione nucleare tendono a perdere di efficienza: la gravità allora prende il sopravvento e la stella si contrae leggermente. Questo però fa salire la temperatura centrale e ripristina l'efficienza delle reazioni nucleari; difatti l'energia disponibile per superare la repulsione elettrostatica tra i protoni cresce con l'aumento di temperatura. Questo ragionamento fa capire che le stelle sono sistemi dotati di un notevole grado di stabilità, almeno finché all'interno funzionano le sorgenti di energia nucleari.

Un'altra conseguenza di quanto detto è che durante la permanenza in sequenza principale la stella aumenta gradatamente di temperatura e luminosità, perché il processo descritto è estremamente efficace: si giunge dunque al paradosso che l'impoverimento di idrogeno al centro non fa diminuire la luminosità totale - anzi, succede il contrario! NON sono le reazioni nucleari a determinare lo splendore di una stella, ma accade piuttosto il viceversa: la luminosità di una stella, che resta determinata dalla massa della struttura, decide quali reazioni nucleari possono soddisfare il suo fabbisogno energetico (perché al centro si raggiungono le temperature sufficienti all'innesco di tali

reazioni).

Qualche numero per il Sole: al suo arrivo in sequenza principale, circa 5 miliardi di anni fa, la sua luminosità era ridotta del 25-30% circa rispetto a quella odierna (questo dato si ricava dai modelli teorici). L'aumento di temperatura, inoltre, incrementa gradatamente l'efficienza del ciclo *CNO* all'interno della nostra stella, che per ora (e per nostra fortuna) contribuisce solo per l'1,5% della luminosità totale: il Sole è una stella di bassa sequenza, anche se è vicina al limite di transizione.

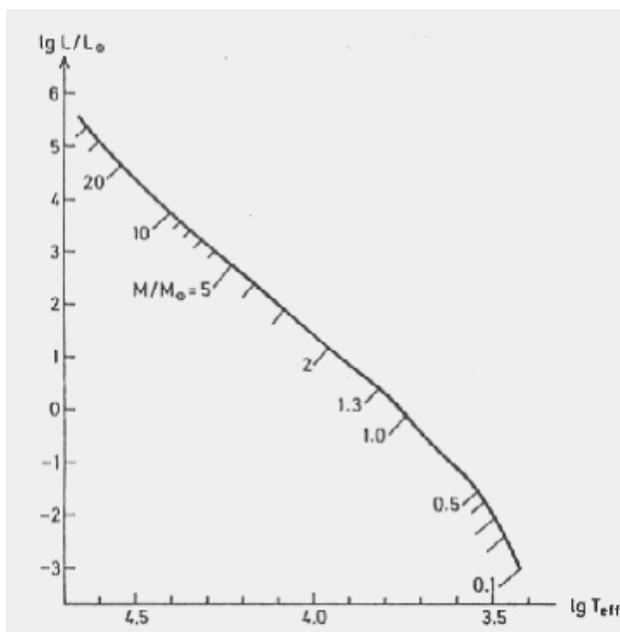


Fig. 2.8 – Posizione iniziale nel diagramma H-R per stelle di massa compresa tra 0,1 e 22 masse solari. La composizione chimica iniziale è 68,5% H, 29,4% He, più il 2,1% di elementi più pesanti

Con il completo esaurimento dell'idrogeno nelle

zone centrali termina la fase di sequenza principale, e con essa il periodo più lungo di stabilità sperimentato dalla stella durante la propria esistenza.

2.5.3 – L'esaurimento dell'idrogeno centrale e le giganti rosse. Il flash dell'elio

La fine della combustione dell'idrogeno viene vissuta in modo diverso dalla stella, a seconda della sua massa. Per le strutture di bassa sequenza ($M \lesssim 1,3 M_{\odot}$, se la composizione chimica è di tipo solare) il nucleo non è convettivo, non si rimescola e la sua composizione non è quindi omogenea: l'idrogeno si consuma più rapidamente al centro, dove la temperatura più alta accresce l'efficacia delle reazioni nucleari. All'esaurirsi del combustibile centrale la zona di massima produzione dell'energia si sposta progressivamente in uno strato (*shell*) sempre più esterno, all'interno del quale il ciclo dominante è ormai il CNO; il risultato nel diagramma *H-R* è un graduale aumento di luminosità della stella, insieme con uno spostamento verso destra (vale a dire, un arrossamento): il nucleo di elio, alimentato dal bruciamento dello *shell* ai suoi confini esterni, aumenta progressivamente di massa, pur restando per il momento inerte.

Le cose vanno diversamente per le stelle di alta sequenza. Essendo infatti il nucleo centrale convettivo, esso è omogeneo e quindi l'esaurimento dell'idrogeno è un fenomeno che interessa una parte non trascurabile della struttura. La momentanea interruzione delle reazioni nucleari provoca quindi una rapida contrazione e soltanto dopo ciò si attiva il meccanismo di combustione nello *shell*.

Stelle molto massicce ($M \gtrsim 20 M_{\odot}$) possono non

evidenziare all'esterno alcun arrossamento, perché l'evoluzione è così rapida che l'involuppo non riesce a tener dietro ai cambiamenti di combustibile all'interno della struttura: la stella rimane "ferma" nel diagramma $H-R$ fino alle fasi conclusive, che a ritmo rapidissimo conducono all'esplosione di supernova. Tutta la storia evolutiva dell'astro si consuma nel giro di alcuni milioni di anni.

Stelle con masse minori, ma sempre elevate, si spostano in modo molto rapido verso destra nel diagramma $H-R$, causando la formazione di una "lacuna" quasi del tutto priva di stelle tra sequenza principale e ramo delle giganti rosse (*gap* o *lacuna di Hertzsprung*). Naturalmente l'aggettivo "rapido" va inteso in senso relativo. Gli strati esterni allo *shell*, se già non lo erano, divengono rapidamente e largamente convettivi. La stella è ora divenuta una gigante rossa. Si calcola che quando il Sole raggiungerà tale fase esso aumenterà di circa 100 volte il proprio raggio, ingoiando nel processo almeno Mercurio.

La luminosità aumenterà di migliaia di volte, non per l'aumento di efficacia delle reazioni nucleari ma per l'accrescimento della superficie di emissione, che varia con il quadrato del raggio. Le simulazioni numeriche al computer per le giganti rosse mostrano, tra le altre cose, due caratteristiche fondamentali:

- 1) la luminosità cresce con la massa del nucleo di elio;
- 2) il colore dipende dall'involuppo di idrogeno: più è spesso, più rossa appare la stella.

La durata della fase di gigante rossa dipende dalla massa della stella, ma è comunque molto minore del tempo trascorso sulla sequenza principale. Per masse paragonabili al Sole siamo sui 500 milioni di anni: per stelle molto massicce, come già detto, è una fase inosservabile. Questo è stato chiaramente confermato dalla supernova 1987A

nella Grande Nube di Magellano. Essa presentava tutte le caratteristiche apparenti di una supergigante blu di tipo spettrale B3 e di massa $M \sim 20 M_{\odot}$, mentre invece al suo interno si era già consumato tutto il ciclo di reazioni che porta alla formazione del ferro e successivamente all'esplosione.

Fenomeni di enorme rilevanza avvengono in questo periodo, come le perdite di massa per espulsione di materia dalla superficie o per vento stellare (emissione intensa di particelle altamente energetiche) e instabilità dinamiche di vario tipo, che sono alla base del comportamento di molte stelle variabili irregolari e semiregolari. Tali eventi influenzano in modo determinante l'evoluzione successiva, ma i relativi dettagli restano ancora abbastanza oscuri (per la mancanza di un campione di osservazioni statisticamente significativo) e questo implica un grosso margine di errore nello studio dei modelli successivi.

La temperatura all'interno continua a salire: la fase successiva è l'accensione della reazione 3α , ovvero la fusione dell'elio nel nucleo centrale, con conseguente produzione di carbonio e ossigeno. Anche in questo caso è necessario fare una casistica in base alla massa della struttura.

Tanto per cominciare, le stelle con massa minore di $0,5 M_{\odot}$ non raggiungono mai la fase di innesco dell'elio centrale. Occorre infatti una temperatura di almeno 10^8 K, che stelle troppo piccole non riescono ad ottenere neppure attraverso la contrazione gravitazionale. Lo *shell* di combustione dell'idrogeno cessa allora progressivamente di funzionare e la stella comincia a contrarsi, evolvendo verso lo stadio di nana bianca (i cui costituenti principali sono idrogeno ed elio).

Nell'intervallo di massa $0,5 M_{\odot} \div 2,3 M_{\odot}$ la stella

riesce a passare allo stadio di combustione dell'He, ma per farlo deve contrarsi fino a che il gas nel nucleo non può più essere considerato perfetto e diventa *degenere*. Tale termine è quello usato quando le distanze medie tra le particelle del gas (elettroni e nuclei atomici) sono talmente piccole che le interazioni quantistiche divengono preponderanti. La statistica classica (Boltzmann) allora non è più valida e per i calcoli occorre la statistica quantistica (Fermi-Dirac). Si può avere una rozza idea di quel che succede al gas se si pensa alla struttura di un metallo.

Senza approfondire il discorso, il fatto importante è che la pressione di un gas degenere aumenta con la temperatura in modo *più lento* rispetto a un gas perfetto. Questo significa che, quando al centro della stella si raggiunge finalmente il valore critico di $\sim 10^8$ K, l'aumento di temperatura causato dal riaccendersi delle reazioni nucleari non è prontamente bilanciato da un'espansione del nucleo, come invece si avrebbe se il gas fosse perfetto (il gas è degenere: in corrispondenza di una forte crescita di T non si ha un equivalente incremento della pressione, che farebbe immediatamente espandere la struttura ristabilendo un equilibrio). Se l'espansione tarda a verificarsi la temperatura può crescere rapidamente: ciò incrementa l'efficienza del ciclo 3α , aumentando ancora la temperatura e così via.

Questo fenomeno, piuttosto violento, prende il nome di *flash dell'elio* (*helium flash*). La stella trova una via d'uscita quando la temperatura raggiunge valori tanto alti da "rimuovere" la degenerazione del gas. Il flash dell'elio non arriva a compromettere la stabilità della struttura (come invece si riteneva nel passato), ma resta comunque un evento di notevole importanza che accadrà anche al Sole.

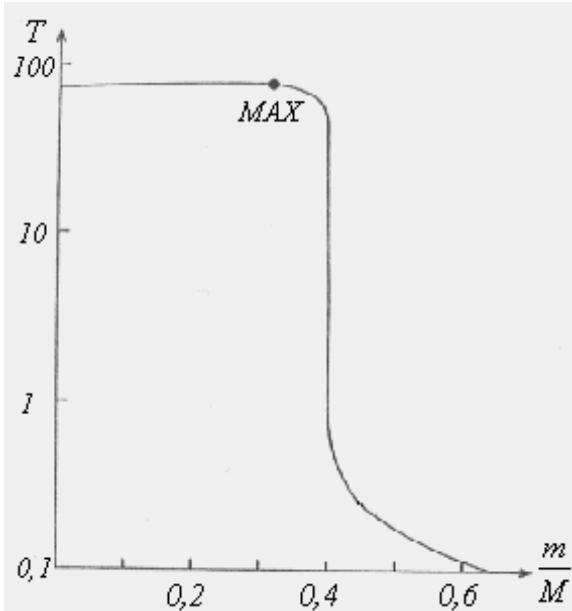


Fig. 2.9 – Temperatura interna di una stella di 1,3 masse solari subito prima dell'*helium flash*. In ascissa è riportata la frazione della massa totale a partire dal centro; in ordinata, la temperatura in milioni di kelvin. Notare come il massimo di temperatura NON si trovi al centro, a causa delle perdite di energia dovute all'emissione di neutrini.

Stelle con $M > \sim 2,3 M_{\text{S}}$ innescano invece la combustione dell'elio in modo quiescente, perché il loro nucleo non è ancora degenere: per esse non si può quindi parlare di flash.

L'accensione di una nuova sorgente di energia al centro tende a riportare la stella verso sinistra nel diagramma, in accordo con una regola empirica dedotta dallo studio esaustivo dei modelli stellari al computer e descritta dalla tabella 2.8.

Zona di combustione	Temperatura superficiale	Tendenza nel diagramma H-R	Tendenza del colore
centrale	alta	verso sinistra	→ blu
a <i>shell</i>	bassa	verso destra	→ rosso

Tabella 2.8 – Relazione tra zona di combustione, colore e posizione nel diagramma $H-R$ per i modelli stellari

2.5.4 – Le stelle di piccola massa e la fase di ramo orizzontale

Le stelle che innescano l'elio senza il flash ($M > \sim 2,3 M_{\odot}$) hanno tempi evolutivi molto accelerati: uscite dalla sequenza principale raggiungono rapidamente la zona delle giganti rosse, muovendosi poi nuovamente verso sinistra nel diagramma $H-R$ quando la combustione centrale diventa predominante, e infine ancora verso destra quando l'elio al centro si esaurisce e si instaura una fase a doppio *shell* (quello esterno brucia idrogeno, l'interno l'elio). Tutte queste fasi si susseguono in tempi non superiori ai dieci milioni di anni.

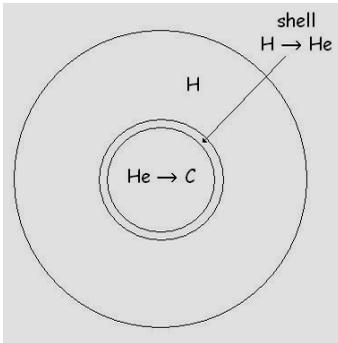


Fig. 2.10 - Struttura di una stella di ramo orizzontale

Molto interesse riveste l'evoluzione post-gigante delle stelle di piccola massa ($0,5 M_{\odot} - 2,3 M_{\odot}$), poiché per esse, eccezionalmente, abbiamo a disposizione un campione statistico numeroso e significativo: tali stelle costi-

tuiscono infatti gli oggetti più comuni negli ammassi globulari.

Descriveremo brevemente la loro evoluzione sul diagramma $H-R$. Al momento del flash di elio la stella si trova spostata molto a destra, ma l'incremento di efficienza della combustione centrale tende a riportarla verso sinistra. La configurazione finale di equilibrio è una struttura a doppia combustione (elio al centro, idrogeno nello *shell* - vedi figura 2.10) che si colloca in una zona a luminosità minori e temperature superficiali maggiori rispetto a quella delle giganti rosse. Le stelle in questa fase (*ramo o braccio orizzontale*) si dispongono lungo una sequenza, spingendosi talvolta molto a sinistra del diagramma, fino al tipo spettrale B ; ma, al contrario delle stelle della sequenza principale con lo stesso tipo spettrale, esse sono stelle "vecchie", già piuttosto evolute. I due tipi di stelle si distinguono perché quelle appartenenti al braccio orizzontale sono molto meno brillanti (cento volte o anche meno) e bruciano elio anziché idrogeno.

Fissata la composizione chimica, i modelli teorici di queste stelle sono caratterizzati da due parametri: la massa totale e la massa del nucleo di elio. I risultati forniscono alcune regole generali:

1) Fissata la massa del nucleo, le stelle si dispongono su di una sequenza orizzontale. Al diminuire della massa totale esse si spostano sempre più a sinistra (più sottile è l'involuppo, più la stella è blu). Una sequenza a massa totale variabile, ma con massa del nucleo costante, prende il nome di *braccio (o ramo) orizzontale di età zero*, o *ZAHB (Zero Age Horizontal Branch)*;

2) La luminosità della sequenza aumenta regolarmente, e sensibilmente, con la massa del nucleo; ciò corrisponde a un ramo orizzontale più alto nel diagramma $H-R$.

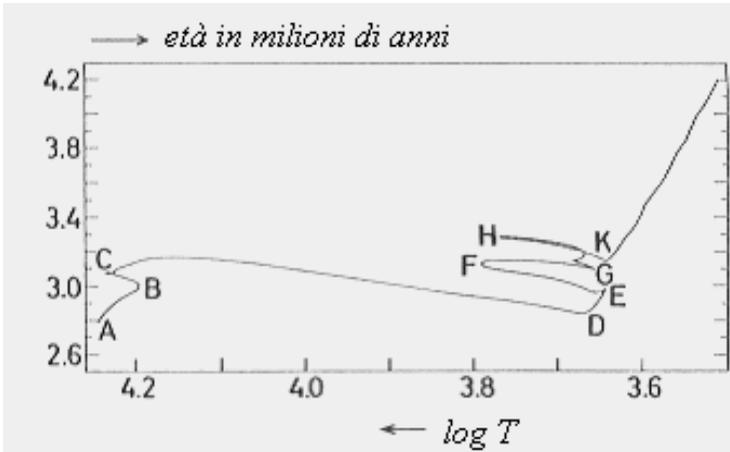


Fig. 2.11 – Evoluzione post-sequenza di una stella di 5 masse solari secondo i modelli. Il punto A è sulla sequenza principale, mentre da C a D si ha il gap di Hertzsprung. Dopo il punto K la stella si avvia lungo il ramo asintotico. La durata complessiva da A a K è 10-15 milioni di anni. In ascissa: logaritmo della temperatura superficiale. In ordinata: logaritmo della luminosità rispetto a quella solare

Un fatto molto importante da segnalare è che, se non vi fosse espulsione di materiale durante le fasi precedenti (gigante rossa, soprattutto), lo *ZAHB* non potrebbe sviluppare la lunghezza osservata, perché tutti gli involucri resterebbero tanto massicci da non poter formare stelle blu. Questa è una delle evidenze indirette più importanti per l'esistenza dei fenomeni di perdita di massa.

Il tempo trascorso sul braccio orizzontale è di circa cento milioni di anni, più o meno valido per tutte le masse, perché esso dipende dalla massa del nucleo di elio (che varia poco da stella a stella). Nel corso di questa fase si forma e cresce progressivamente un nucleo di carbonio e ossigeno. Quando anche l'elio nelle zone centrali si esaurisce l'evoluzione della stella accelera ulteriormente.

2.5.5 – Instabilità, pulsazioni, ramo asintotico; combustioni post-elio e fasi finali

Al termine della combustione dell'elio nelle zone centrali si attiva un secondo *shell* - più interno rispetto al primo *shell*, dove l'idrogeno si trasforma in elio - nel quale l'elio continua a bruciare incrementando le dimensioni del nucleo di carbonio. A questo punto la stella si trova a dover raggiungere la temperatura necessaria per l'innesco del carbonio (circa 800 milioni di kelvin) prima che gli effetti dovuti alla degenerazione quantistica degli elettroni blocchino la contrazione gravitazionale. Anche in queste fasi il parametro fondamentale è la massa: ci limiteremo a descrivere solo i risultati più importanti degli studi teorici e osservativi, perché una trattazione matematica di questi problemi condurrebbe davvero troppo lontano.

a) $0,5 M_{\odot} < M < 8M_{\odot}$

La stella non riesce a raggiungere la temperatura necessaria per innescare la fusione del carbonio, neppure contraendosi fino alla degenerazione quantistica. Il nucleo di carbonio resta dunque inerte, mentre la struttura è sostenuta dalla combustione degli *shell*, che possono essere attivi anche contemporaneamente. La traiettoria nel diagramma *H-R* vira a destra, la temperatura superficiale si abbassa e la stella appare nuovamente come gigante rossa: questa è la fase di *ramo asintotico*.

La situazione è simile alla fase che precede l'accensione del nucleo di elio, con la differenza che le temperature interne sono molto più alte e la stella appare più brillante: questa volta, però, non riuscirà ad innescare la combustione nel nucleo. Per il momento la temperatura interna continua a salire, accrescendo l'efficienza della combustione

dello *shell* di elio. I rimescolamenti convettivi e l'espansione dell'involuppo contribuiscono invece all'instabilità dell'altro *shell*, quello di idrogeno: il risultato è la variabilità dell'emissione, con pulsazioni che possono assumere diverse connotazioni a seconda del grado di rimescolamento e della temperatura. Si verificano consistenti perdite di massa, al punto che la stella finisce per espellere una parte o addirittura tutto l'involuppo, apparendo come *nebulosa planetaria*. In tali oggetti l'astro centrale appare caldissimo, e in effetti non è altro che il nucleo di carbonio e di elio, messo a nudo per la prima volta dalla sua formazione grazie alla dissoluzione dell'involuppo esterno, che va a costituire un involucro di gas intorno alla stella, assumendo le forme più varie. Con il passare del tempo anche la combustione nello *shell* di elio si esaurisce: il sopravvento della gravità fa proseguire il collasso del nucleo finché la completa degenerazione del gas non blocca il processo, quando la densità centrale raggiunge e supera i 10^6 g/cm³. Un centimetro cubo di materia in queste condizioni "peserebbe" sulla Terra una tonnellata.

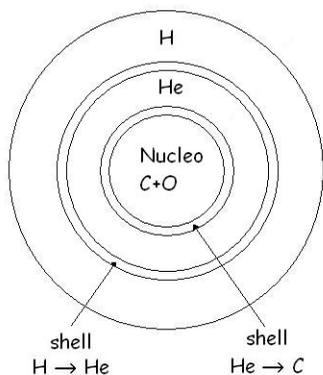


Fig. 2.12 - Struttura di una stella di ramo asintotico prima del collasso finale in nana bianca

L'equilibrio raggiunto è dovuto al principio di e-

sclusione di Pauli, secondo il quale in una configurazione atomica non si possono avere più di due elettroni nello stesso livello energetico. A livello quantistico, questa riluttanza degli elettroni ad ammucciarsi l'uno sull'altro dipende dalle proprietà della funzione d'onda che descrive il loro stato.

La stella è ora diventata una *nana bianca* e il suo diametro è paragonabile a quello terrestre. Il nucleo è un miscuglio di carbonio e ossigeno, con uno strato più esterno di elio che rappresenta il residuo incombusto dello *shell*: il resto dell'involuppo è di idrogeno. Le stelle che invece sono diventate nane bianche prima di innescare la combustione centrale dell'elio hanno un nucleo composto da questo elemento e un involuppo residuo di idrogeno.

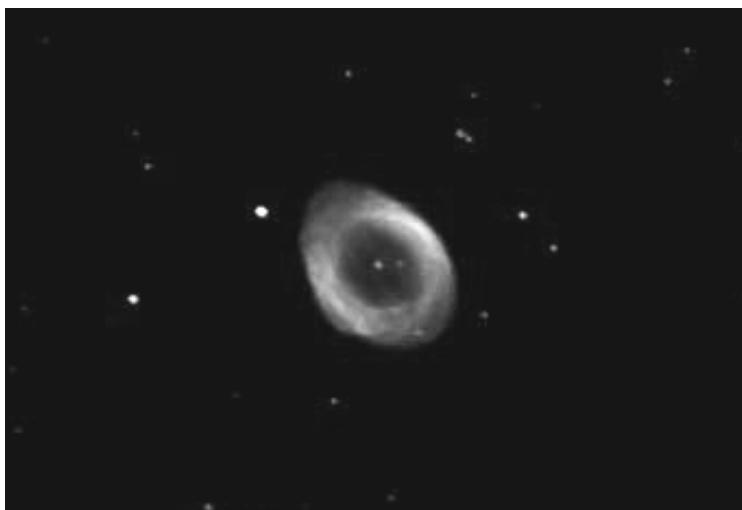


Fig. 2.13 – La nebulosa planetaria M57 (Ring Nebula). Al centro è visibile la nana bianca. La ripresa è di Fabiano e Francesco Barabucci ed è stata effettuata dall'Osservatorio Astronomico “Padre Francesco De Vico” di Serrapetrona (MC)

All'interno della struttura le reazioni nucleari sono ormai cessate e l'energia emessa (tutta per irraggiamento termico) è scarsa, con una luminosità risultante molto debole. Il colore della stella è sul bianco, il tipo spettrale A oppure F . La luminosità diminuisce in tempi scala estremamente lunghi, e con la sua diminuzione il tipo spettrale diventa progressivamente più avanzato: la stella si arrossa. Sul diagramma $H-R$ la regione delle nane bianche si trova in basso a sinistra, sotto della sequenza principale.

Il quadro che abbiamo descritto riguarda anche la sorte futura del nostro Sole, che dovrebbe diventare una nana bianca di carbonio/ossigeno, elio ed idrogeno. Le stelle di massa iniziale prossima al limite di $8 M_{\odot}$ (che va inteso come un valore indicativo) aggiungono a questa composizione anche il neon, come ulteriore prodotto della combustione nucleare.

Se la massa residua della stella in contrazione è troppo grande neppure il principio di esclusione di Pauli ha il potere di arrestare il collasso. Le nane bianche hanno quindi una massa limite (*limite di Chandrasekhar*), il cui valore teorico è $1,44 M_{\odot}$. Eventuali correzioni di tipo relativistico possono modificare leggermente questo limite, senza però cambiarlo in maniera sostanziale.

b) $4 M_{\odot} < M < \sim 8 M_{\odot}$

La stella non riesce a raggiungere la temperatura di innesco del carbonio a causa delle copiose perdite di massa. Iniziate in modo sensibile con la fase di gigante rossa (ma anche in sequenza principale una stella può perdere massa se la sua emissione è abbastanza energetica), le perdite di massa diventano successivamente più grandi, mentre la stella attraversa la fase di variabile regolare/semiregolare, il ramo asintotico e la fase di nebulosa

planetaria. Se la massa residua della configurazione è sotto il limite di Chandrasekhar l'evoluzione procede in modo del tutto analogo al caso a). Se questo limite viene superato il collasso prosegue, fino a stravolgere la struttura degli atomi che compongono la stella: protoni ed elettroni vengono talmente compressi da perdere la loro individualità, in un processo di neutronizzazione della materia che ha termine solo quando interviene l'interazione nucleare forte ad arrestare la spinta della gravità (*N.B.*: questa descrizione è forse suggestiva, ma sicuramente inadeguata dal punto di vista quantistico, che è il più indicato per trattare simili situazioni).



Fig. 2.14 – La Crab Nebula (nebulosa del Granchio). È il resto di una supernova esplosa nel 1054. Fonte VLT-ESO

Il nuovo equilibrio viene raggiunto quando la stella ha dimensioni di circa 10 km e una densità inimmaginabile: 10^{15} g/cm³. Questo valore è più o meno dell'ordine della densità di un protone o di un neutrone: non è troppo assurdo vedere tali stelle come dei giganteschi neutroni. Per la conservazione del momento angolare, inoltre, la velocità di rotazione è altissima, e così pure l'intensità del campo magnetico associato: la combinazione delle due caratteristiche fa sì che la stella emetta, ad intervalli rapidissimi e regolari (di millisecondi o anche meno), impulsi radio che si possono captare da Terra. Strutture del genere sono dette *pulsar* (dall'inglese *pulsating star*, stella pulsante), o anche stelle di neutroni. Un esempio di questi oggetti è la *pulsar* all'interno della Nebulosa del Granchio (nella costellazione del Toro), che ruota su se stessa dieci volte al secondo: considerando il suo diametro pari a 10 km, la velocità di rotazione alla superficie è circa 628 km/s! Col tempo il periodo di rotazione delle stelle di neutroni si allunga e gli impulsi radio rallentano.

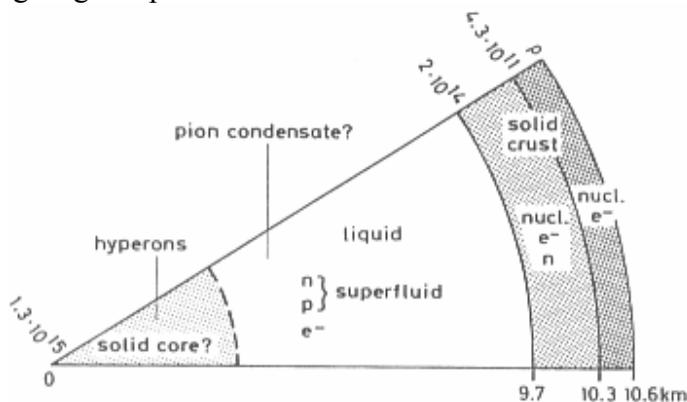


Fig. 2.15 – Ipotetica struttura interna di una pulsar di 1,4 masse solari. I numeri sul margine sinistro obliquo indicano la densità in g/cm³: i valori sono elevatissimi. In basso a destra, le dimensioni in km

Se questa situazione sembra incredibile, non è tuttavia la più estrema. Esiste infatti una massa limite anche per le *pulsar*, il cui esatto valore è ancora controverso perché molto sensibile al grado di comprimibilità della materia nucleare in condizioni relativistiche, ma comunque compreso tra $1,5 M_{\odot}$ e $3,2 M_{\odot}$. Se il nucleo stellare in contrazione supera tale massa, non esiste più alcuna configurazione di equilibrio possibile: nessuna forza conosciuta potrà allora arrestare il collasso gravitazionale.

c) $\sim 8 M_{\odot} \leq M \leq \sim 10 M_{\odot}$

La stella può riuscire a raggiungere la temperatura minima necessaria per innescare il carbonio, ma in un nucleo ormai completamente degenerare. Secondo i modelli teorici questa accensione (*flash del carbonio*) ricalca il flash dell'elio, ma con risultati catastrofici: la stella esplosa come supernova e non lascia dietro di sé alcun residuo, all'infuori di una nube di materia in rapida espansione.

Questa situazione è realizzabile solo per un ristretto intervallo di masse. Non essendo possibile valutare in modo attendibile la quantità di materiale espulso nelle fasi avanzate dell'evoluzione, c'è da aspettarsi che ben poche stelle si trovino nelle condizioni adatte per il flash del carbonio, e finora non sembra che esso sia mai stato osservato. Tuttavia è logico supporre che in qualche caso esplodano *supernovae* di questo tipo (detto I $\frac{1}{2}$, perché intermedio tra le tipologie I e II: la classificazione delle supernovae è piuttosto articolata e non la riportiamo per esteso).

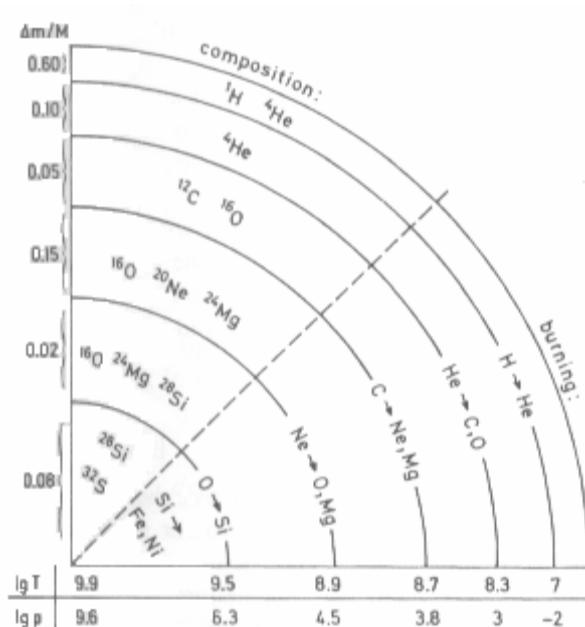


Fig. 2.16 – struttura interna di una stella di 25 masse solari al termine delle reazioni di fusione nucleare. In basso, i valori per la temperatura e la pressione in vari punti della struttura (riportati in scala logaritmica). Al centro si superano i 7 miliardi di kelvin.

d) $M \gg 10 M_S$ (e fino al limite superiore di massa per le stelle: 100-150 M_S)

La stella innesca senza problemi la fusione del carbonio in un nucleo non degenere e, all'esaurimento nelle zone centrali di quest'ultimo elemento, procede attraverso le successive combustioni del neon, dell'ossigeno e del silicio, sino a formare un nucleo di ferro. Col procedere di queste reazioni una frazione sempre maggiore dell'energia viene emessa sotto forma di neutrini, che essendo molto penetranti abbandonano facilmente la stella raffreddandola in modo assai efficiente; la contrazione e l'evoluzione ne risultano così accelerate. Le ultime fasi sono molto rapide,

praticamente inosservabili. Prima della fine della catena di nucleosintesi la stella massiccia ha una struttura a cipolla. La catena di reazioni nucleari non può procedere oltre, perché i nuclei di ferro si fotodisintegrano in elio e neutroni, assorbendo energia invece di produrla: la stella rimane così senza alcun sostegno contro la gravità. Ne risulta un collasso catastrofico della regione centrale.

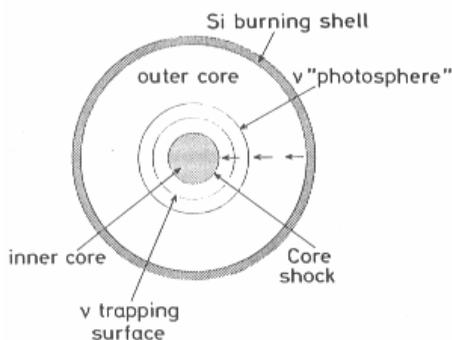


Fig. 2.17 – Il meccanismo di rimbalzo che porta all'espulsione dell'involuppo esterno, nello stadio di supernova. La densità è così alta che perfino i neutroni (forse le particelle più penetranti che si conoscano) rimangono intrappolati.

Attraverso processi estremamente complessi, non ancora ben conosciuti, la stella riesce a produrre elementi più pesanti del ferro, fino all'uranio e oltre. L'involuppo esterno "rimbalza" sul nucleo in collasso e viene espulso a grandissima velocità (fino anche a 1000 km/s). La stella brilla luminosissima fino a eguagliare, per qualche settimana o qualche mese, lo splendore della galassia che la ospita: abbiamo ancora una *supernova*, questa volta di tipo II. Mentre l'involuppo sfugge il destino del nucleo centrale viene deciso in frazioni di secondo. Se la massa in esso contenuta non supera il valore di $1,5 - 3,2 M_{\odot}$, detto *limite di Schönberg-Chandrasekhar* (il valore non è esatto a causa delle incertezze teoriche sul comportamento della materia a densità così estreme) si forma una stella di neutroni. Se la massa è superiore la contrazione non si arresta e la

velocità di fuga alla superficie della stella raggiunge la velocità della luce. A questo punto l'oggetto diventa inosservabile: nulla può lasciare il suo campo gravitazionale, neppure la luce. L'analisi matematica del buco nero (questo è quello che la stella diventa) è estremamente complessa, poiché in tali condizioni di gravità lo spazio-tempo è talmente incurvato che le uniche equazioni valide sono quelle della Relatività generale. Per fortuna si può ricavare l'ordine di grandezza di alcuni risultati utilizzando le vecchie, care leggi della meccanica newtoniana. Da esse sappiamo che la velocità di fuga da una configurazione di

massa M e di raggio R è $v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$ (valido anche nel

caso relativistico con qualche correzione numerica). R è detto *raggio di Schwarzschild* o raggio critico. Per una stella di massa pari a quella del Sole (che non potrebbe mai diventare un buco nero) si avrebbe $R \sim 3$ km : per un buco nero "possibile" $R \sim 10$ km.

A differenza di nane bianche e stelle di neutroni, non esiste ancora la certezza dell'esistenza dei buchi neri; nondimeno, gli indizi a favore si stanno moltiplicando. Del resto, negare la loro presenza significherebbe ammettere che, da una certa massa in poi, *tutte* le stelle siano costrette ad espellere quantità enormi di materia solo per rientrare nei limiti di massa consentiti a nane bianche e stelle di neutroni. Anche se è vero che i fenomeni di perdita di massa sono molto comuni, sembra un po' troppo artificioso postulare un meccanismo che faccia "dimagrire" le stelle proprio della quantità giusta solo perché l'idea dei buchi neri dà fastidio!

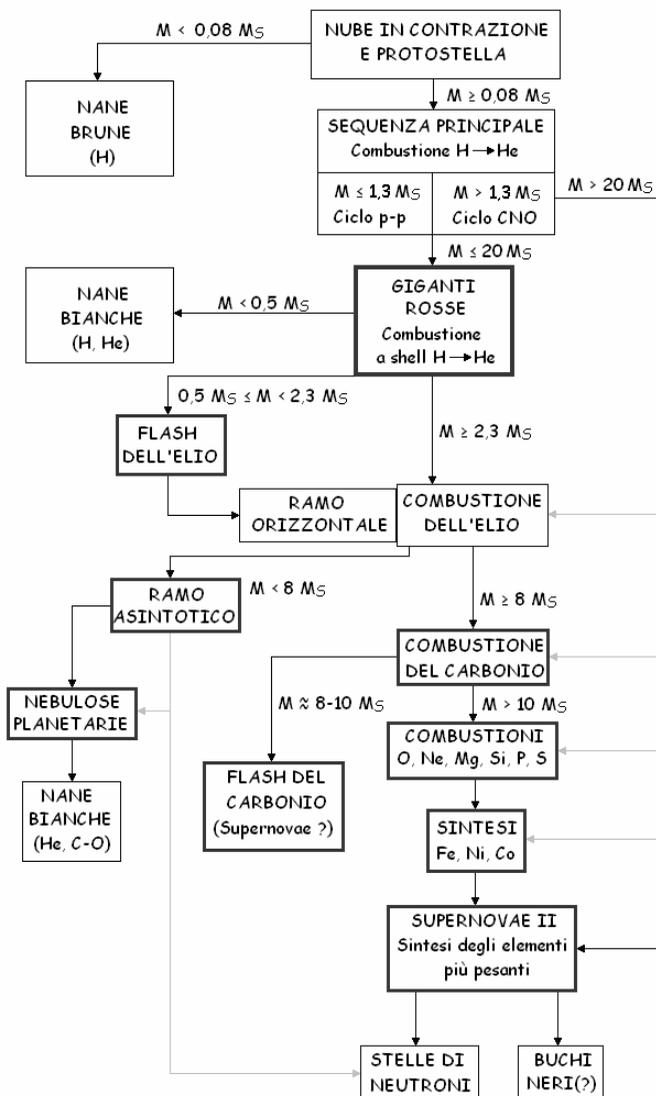


Fig. 2.18 – Schema riassuntivo dell'evoluzione stellare

MERCURIO

3.1 - I NUMERI DI MERCURIO

Mercurio è il pianeta più vicino al Sole; ha un'orbita decisamente ellittica (eccentricità = 0,2056) che lo porta all'afelio ad una distanza dal Sole (69,7 milioni di km) maggiore di più del 50% della distanza al perielio (45,9 milioni di km).

L'elevato valore dell'ellitticità dell'orbita è stato attribuito ad impatti molto violenti tra il pianeta in formazione e corpi molto massicci deviati verso il Sistema Solare interno dal campo gravitazionale di Giove. Secondo Giuseppe (Bepi) Colombo (astronomo e matematico italiano 1920-1984) tale fatto può essere invece imputato all'azione gravitazionale di Venere che, nel corso dei frequenti passaggi ravvicinati, avrebbe perturbato l'orbita di Mercurio fino a farle assumere la forma attuale.

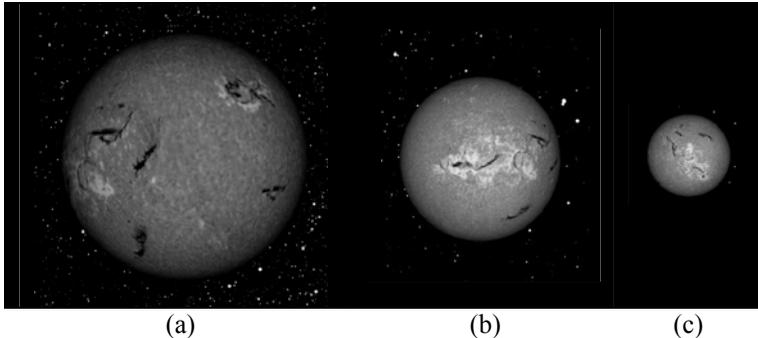


Fig. 3.1 – Il Sole visto da Mercurio: (a) al perielio, (b) all'afelio. (c) Il Sole visto dalla Terra

Anche l'inclinazione della sua orbita, $7,25^\circ$ sull'eclittica, sarebbe stata causata da Venere e non

dall'originaria inclinazione dell'equatore del Sole.

Il Sole visto da Mercurio ha un diametro apparente di $1,7^\circ$ quando si trova al perielio e di $1,1^\circ$ quando si trova all'afelio. Il sole visto dalla Terra è di circa $0,5^\circ$, per cui, da Mercurio sarebbe da più di 2 volte a 3,5 volte più grande.

Il raggio equatoriale di Mercurio è di 2437,6 km pari a 0,3826 volte il raggio della Terra. Ciò comporta che la superficie di Mercurio è 0,1464 volte quella della Terra (pari cioè alla metà delle terre emerse sulla Terra) e il volume è 0,056 volte quello della Terra (ci vogliono 17,86 Mercurio per fare una Terra). Mercurio è anche più piccolo di alcune lune: Ganimede (luna di Giove) e Titano (luna di Saturno) sono più grandi.



Fig. 3.2 - Confronto tra Mercurio e la Terra

Mercurio ha una massa di $0,3302 \cdot 10^{24}$ kg pari a 0,05528 volte la massa della Terra, cioè, se fosse possibile metterli sui piatti di una bilancia ci vorrebbero 18,09 Mercurio per uguagliare il peso della Terra.

Mercurio ha una densità di $5,43 \text{ g/cm}^3$.

L'accelerazione di gravità sulla superficie di Mercurio è di $3,701 \text{ m/s}^2$ (0,38 volte quella sulla Terra). Un oggetto sulla Terra impiega circa un secondo a cadere da un'altezza di 5 m, mentre su Mercurio, per cadere dalla stessa altezza, impiega 1,64 s.

La velocità di fuga dalla superficie del pianeta (quella necessaria per sfuggire per sempre alla sua attrazione) è di 4,25 km/s, sulla Terra è di 11,2 km/s.

Mercurio è una sfera pressoché perfetta, non pre-

senta rilevante schiacciamento ai poli.

Il periodo di rivoluzione intorno al Sole è di 87,9694 giorni terrestri, mentre il pianeta ruota su se stesso in 58,6462 giorni terrestri. Ciò porta una coincidenza molto particolare, infatti:

$$\frac{\text{periodo di rivoluzione}}{\text{periodo di rotazione}} = \frac{87,9694}{58,6462} \approx \frac{3}{2},$$

cioè ogni due giri intorno al Sole, Mercurio ruota tre volte su se stesso.

Questa “risonanza 3:2” ha delle importanti conseguenze sul clima di Mercurio.

Sulla superficie del pianeta esistono solo due punti in cui può essere mezzogiorno quando esso è al perielio; uno di essi (A nella posizione 1 della figura 3.3) è stato scelto come punto di coordinate Latitudine 0°, Longitudine 0°; il punto diametralmente opposto (B nella figura), avrà coordinate (0°, 180°).

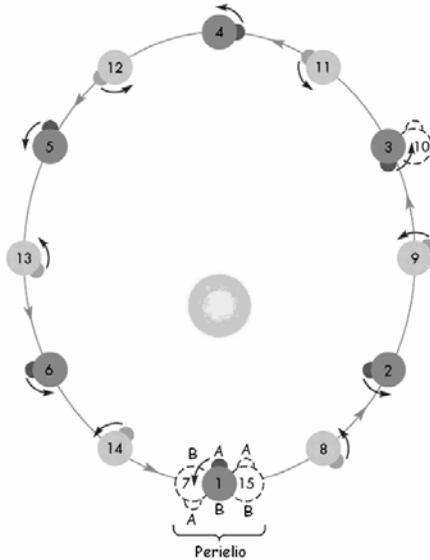


Fig. 3.3 - Risonanza 3:2

In conseguenza di questa risonanza il Sole tramonterà in A quando Mercurio si troverà all’afelio (posizione 4), mentre in B sarà l’alba; sarà mezzanotte in A quando il

pianeta si troverà di nuovo al perielio (posizione 7) e in B sarà mezzogiorno; il Sole sorgerà in A (tramonterà in B) con Mercurio di nuovo all'afelio (posizione 4, ma con A dalla parte opposta); infine con il Sole di nuovo al perielio sarà di nuovo mezzogiorno in A e mezzanotte in B (posizione 15).

Nei punti A e B sarà quindi alternativamente mezzogiorno o mezzanotte quando Mercurio si trova al perielio. Tenendo conto che in questa posizione Mercurio è molto più vicino al Sole che non all'afelio, questi punti della superficie sono molto più caldi che non altri. I punti A e B sono detti Poli Caldi, mentre i punti che si trovano a 90° a est e 90° a ovest sono detti Poli Freddi (in essi il mezzogiorno o la mezzanotte si hanno sempre quando Mercurio si trova all'afelio).

Un'altra particolarità che si verifica su Mercurio è l'inversione del moto del Sole nel cielo. Questo fenomeno è dovuto al fatto che la velocità orbitale in prossimità del perielio diventa maggiore della velocità di rotazione. La rotazione di Mercurio sul suo asse è tale che nel cielo il Sole si muove da est verso ovest, ma in prossimità del perielio il Sole appare rallentare, tornare indietro di un po' muovendosi da ovest verso est, rallentare di nuovo e poi riprendere il suo moto normale da est verso ovest. Nei Poli Caldi questo fenomeno si ha sempre a mezzogiorno, nei Poli Freddi all'alba e al tramonto.

La combinazione delle durate di questi moti fa sì che il giorno (l'intervallo tra due istanti successivi in cui il Sole si trova al meridiano) duri su Mercurio 175,9388 giorni. Vista la mancanza quasi totale di inclinazione dell'asse rispetto al piano orbitale (che implica assenza di stagioni) ne risulta che il dì e la notte hanno la stessa durata. Tenendo conto anche dell'assenza di atmosfera su

Mercurio si hanno temperature massime intorno a $+450^{\circ}\text{C}$ e minime fino a -170°C .

Un altro strano fenomeno che ha creato non poche difficoltà di interpretazione è la cosiddetta precessione del perielio di Mercurio.



Fig. 3.4 - Precessione del perielio di Mercurio

L'orbita percorsa da un pianeta intorno al Sole non è rigorosamente fissa nello spazio, ma a causa di perturbazioni indotte dagli altri pianeti, a ciascun passaggio vicino al perielio corrisponde una rotazione dell'asse maggiore dell'orbita e il moto planetario che ne risulta è una figura a rosetta (figura 3.4).

Nel 1849 Le Verrier scoprì che il perielio di Mercurio si postava di $574''$ al secolo. Di questi, $531''$ erano giustificabili attraverso la teoria della gravitazione di Newton; i rimanenti $43''$ avevano una causa sconosciuta. Dopo 10 anni di lavoro, Le Verrier ipotizzò la presenza di un altro pianeta interno all'orbita di Mercurio (in seguito chiamato Vulcano) e si organizzarono campagne osservative. Furono diverse le comunicazioni di avvistamento di tale pianeta, in alcuni casi si calcolarono anche l'orbita e la massa e ne furono previsti i transiti sul Sole che nessuno ha però mai osservato. L'avvento della fotografia astrono-

mica, alla fine del XIX secolo, non portò niente di nuovo nella ricerca di Vulcano. Solo nel 1916 arrivò una spiegazione razionale del fenomeno per opera di Einstein e della sua teoria della Relatività Generale. Egli dimostrò che l'enorme massa del Sole creava un effetto gravitazionale capace di curvare lo spazio e di far avanzare il perielio di Mercurio.

Rimane da dire che Vulcano qualche volta torna a far capolino nelle osservazioni degli astronomi. Verso la fine degli anni '70 del secolo scorso H. C. Courten e Don Albert della Adelphi University (New York) asserirono di aver trovato le tracce di detriti "intermercuriali" su lastre ad alta risoluzione prese durante una eclisse di Sole.

3.2 - L'OSSERVAZIONE DI MERCURIO

Essendo un pianeta interno (nel senso che la sua orbita è più vicina al Sole di quella terrestre) Mercurio può essere visto dalla Terra sempre a poca distanza angolare dal Sole (vedi la figura 3.5); ci sono pertanto dei momenti in cui si trova tra la Terra e il Sole (congiunzione inferiore), degli altri in cui è dalla parte opposta (congiunzione superiore) e dei punti in cui si trova alla massima distanza angolare da Sole (massima elongazione orientale e massima elongazione occidentale) che non supera mai i 28°.

La durata di un ciclo (per esempio il tempo che scorre tra due congiunzioni inferiori) viene detto periodo sinodico ed è di 115,88 giorni terrestri.

Mercurio presenta le fasi come la Luna e le sue dimensioni, viste dalla Terra, variano notevolmente.

Dopo la congiunzione superiore Mercurio diventa visibile come oggetto serale che nelle seguenti sei settimane gradualmente sale nel cielo. La sua fase decresce da pieno a

gibboso durante questo periodo e le dimensioni del disco aumentano. Alla massima elongazione est, mostra una mezza fase, e poi comincia ad abbassarsi nel cielo. Rimane brillante anche se la sua fase ora è di mezzaluna, perché si sta ancora avvicinando alla Terra. Meno di un mese dopo la massima elongazione arriva in congiunzione inferiore.

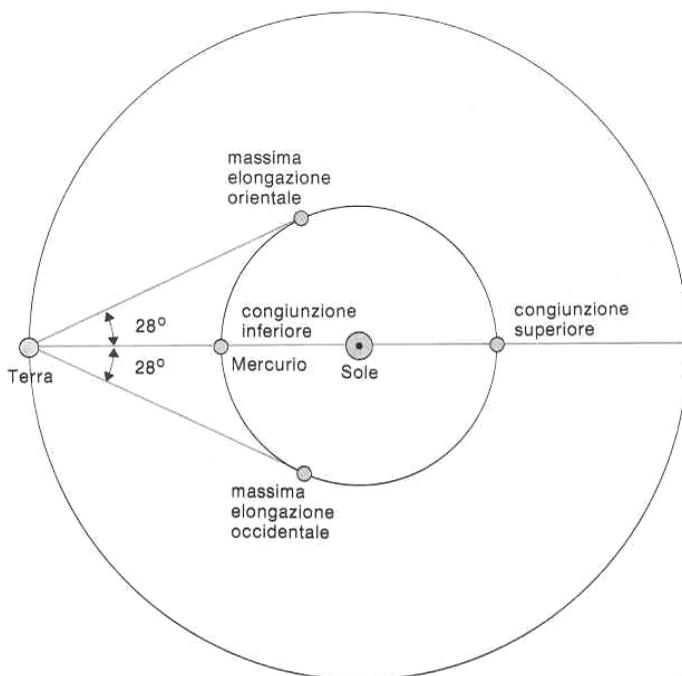


Fig 3.5 - Mercurio visto dalla Terra

Durante una congiunzione inferiore potrebbe transitare sul disco del Sole, ma ciò non avviene sempre a causa dell'inclinazione dell'orbita di Mercurio rispetto al piano dell'orbita terrestre. I transiti avvengono di solito intor-

no al 9 novembre o al 7 maggio; la tabella 1 contiene le date dei transiti di Mercurio dal 1999 al 2049.



Fig. 3.6 a) – Dimensioni di Mercurio in congiunzione inferiore. La minima distanza dalla Terra si ha quando la congiunzione avviene con la Terra al perielio e Mercurio all’afelio (77 milioni di km); mediamente la distanza è di 92 milioni di km con un diametro angolare di 12,9”



Fig. 3.6 b) – Dimensioni di Mercurio in congiunzione superiore. La massima distanza dalla Terra si ha quando la congiunzione avviene con la Terra all’afelio e Mercurio al perielio (222 milioni di km); mediamente la distanza è di 208 milioni di km con un diametro angolare di 4,5”

Il primo transitò fu previsto da Keplero e osservato da Gassendi il 7 novembre 1637. L’ultimo visibile in Italia è stato il 7 maggio 2003, il prossimo il 9 maggio 2016. Il transitò dell’8 novembre 2006 non sar  visibile dalla nostra penisola.

Il ciclo e le fasi si ripetono a rovescio per le apparizioni del mattino.

Le prime osservazioni di Mercurio, citate da Tolomeo nell’Almagesto, risalgono al 265 a.C. e furono opera del filosofo Timocharis. Gli antichi greci credevano che le elongazioni est ed ovest del pianeta rappresentassero due corpi distinti: Hermes (stella della sera) ed Apollo (stella

del mattino). Più tardi compresero che era un unico oggetto e lo indicarono come Hermes, il messaggero degli dei e dio del crepuscolo.

Data	Ora della fase centrale (TU ^[1])	Data	Ora della fase centrale (TU)
15.11.1999	21h 43m	11.11.2019	15h 22m
07.05.2003	07h 53m	13.11.2032	08h 54m
08.11.2006	21h 42m	07.11.2039	08h 46m
09.05.2016	15h 00m	07.05.2049	14h 24m

Tabella 3.1 – Transiti di Mercurio

Si ritiene che furono gli Egizi a scoprire che Mercurio orbitava attorno al Sole. Per i Teutoni era noto come Woden e la parola inglese che indica mercoledì, “wednesday”, vuol dire “giorno di Woden”, Woden's day. Il nome attuale deriva dal latino “Mercurius”, dio che corrispondeva al greco Hermes.

Anche Copernico che fu più un astronomo matematico che osservativo lo vide: “*con molti sotterfugi e molta fatica*” (capitolo XXX del V libro del “De revolutionibus”).

Le osservazioni telescopiche di Mercurio rappresentano uno dei capitoli più controversi della storia dell'astronomia. Secondo W. Sandner il primo ad osservare le fasi di Mercurio fu l'astronomo italiano Zupius nel 1639. Per Antoniadi il primo sarebbe stato Hevelius, nel 1644, ma c'è chi ritiene che anche Galileo nel 1610 possa averlo osservato. Le difficoltà di osservazione fecero sì che per lungo tempo gli astronomi si dedicassero ad altri corpi celesti.

Nel 1800 il tedesco Schröter e il suo assistente

^[1] TU = Tempo Universale, cioè l'ora di Greenwich

mappe. Attraverso i suoi dati poté dedurre, per il periodo di rotazione attorno al proprio asse, il valore di 88 giorni, uguale al periodo di rivoluzione.

Un ulteriore progresso si ebbe col lavoro dell'astronomo greco Antoniadi che dal 1924 al 1929 osservò Mercurio di giorno poco prima della congiunzione superiore, quando Mercurio, più lontano dalla Terra, mostra per intero la superficie. Egli compose il miglior planisfero dell'era telescopica, battezzandone le zone con termini della mitologia egizia. Confermò la rotazione sincrona con la rivoluzione e ipotizzò la presenza di una atmosfera, anche se meno densa di quanto credesse Schiaparelli. Ancora negli anni '50 molte osservazioni confermavano i risultati di Antoniadi.

Nel 1965 le misurazioni radar della Cornell University stabiliscono che l'orbita eccentrica di Mercurio ha un perielio di 46.375.000 chilometri e un afelio di 70.310.000 chilometri. La longeva teoria che Mercurio voltasse al Sole la stessa faccia si rivela errata: viene calcolato un tempo di rotazione di 59 giorni (2/3 del periodo di rivoluzione), periodo che verrà confermato dalla sonda Mariner 10.

Oggi Mercurio è l'unico pianeta per cui l'osservazione telescopica non ha più nessuna utilità scientifica, se non fosse che la ricerca del pianeta e lo scorgervi deboli tracce è un buon allenamento per l'osservatore amatoriale.

3.3 - L'ESPLORAZIONE DI MERCURIO

Solo l'esplorazione spaziale potrà permettere di avere un quadro più completo della superficie di Mercurio. Fino ad oggi la sola missione spaziale è stata quella della sonda americana Mariner 10 del 1974 -1975.

Una seconda missione (Messenger della NASA) è partita il 3 agosto 2004 e arriverà nel 2011, mentre una terza missione (BepiColombo dell'ESA) partirà nel 2011-2012 e arriverà circa 4 anni dopo. Quest'ultima porta il nome del Prof. Giuseppe (Bepi) Colombo dell'Università di Padova che fu il primo a vedere la risonanza 3:2 e che suggerì di usare la gravità di Venere per mettere il Mariner 10 in un'orbita solare che gli permettesse di sorvolare Mercurio tre volte.

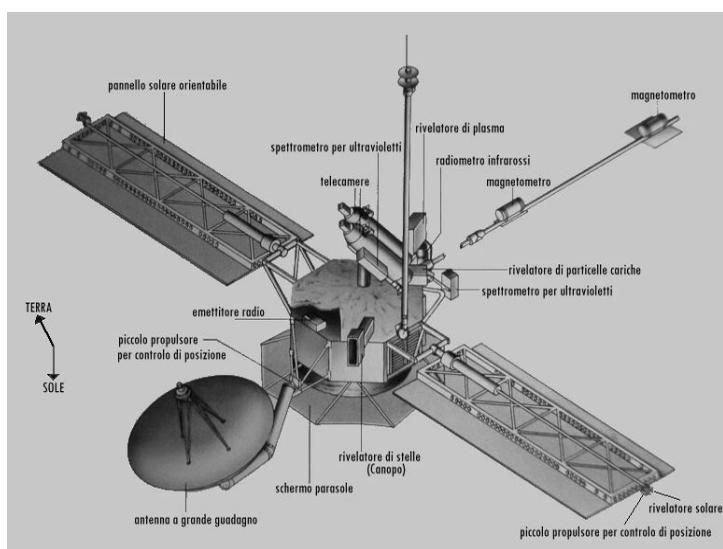


Fig. 3.9 - La struttura del Mariner 10

Mariner 10 fu il settimo lancio riuscito della serie Mariner e per primo usò l'attrazione gravitazionale di un pianeta (Venere) per arrivare ad un altro (Mercurio). Gli strumenti a bordo dell'astronave erano concepiti per misurare l'atmosfera, la superficie e le caratteristiche fisiche di Mercurio e di Venere. Fu lanciato con un razzo Centauro il 3 novembre 1973 e messo in un'orbita di parcheggio in-

torno alla Terra per circa 25 minuti; successivamente in orbita solare in rotta verso Venere. La direzione dell'orbita era opposta a quella della Terra. Sorvolò Venere il 5 febbraio 1974 a una distanza di 4200 chilometri scattando più di 4000 fotografie.

Mercurio fu raggiunto il 29 marzo 1974: la sonda passò a 705 km dalla superficie del pianeta. Un secondo incontro con Mercurio avvenne il 21 settembre 1974 ad un'altezza di circa 47.000 km: furono fotografati la parte illuminata del pianeta e la regione del polo sud. Il terzo e ultimo passaggio, ad un'altezza di 327 km, avvenne il 16 marzo 1975; furono prese circa altre 300 fotografie (per un totale complessivo di circa 4000 immagini) e venne misurato il campo magnetico.

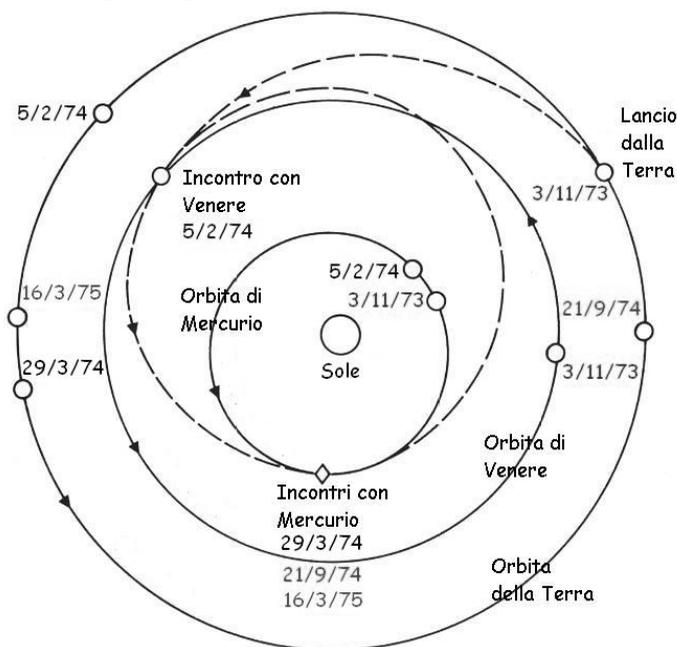


Fig. 3.10 - L'orbita del Mariner 10

Mariner 10 è stata la prima sonda a muoversi spinta dal vento solare. Tale tecnica fu utilizzata per piccole correzioni di rotta.

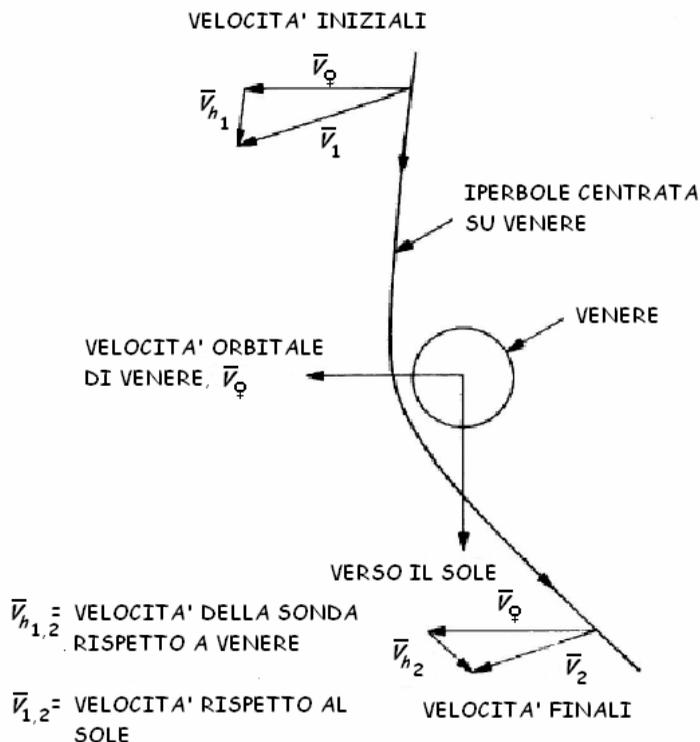


Fig. 3.11 - La traiettoria del Mariner 10 in prossimità di Venere. La sonda si è avvicinata al pianeta, che si muove nella sua orbita intorno al Sole con velocità V_ϕ , lungo una traiettoria iperbolica di velocità V_{h1} , quindi con una velocità V_1 rispetto al Sole. Dopo il passaggio ravvicinato con Venere, la velocità rispetto al pianeta V_{h2} è cambiata (solo in direzione) e quindi la velocità rispetto al Sole, V_2 , è diminuita. Ciò ha portato la sonda su una traiettoria più bassa, più vicina al Sole e verso Mercurio.

I test pianificati continuarono fino al 24 marzo

1975 quando terminò la riserva di carburante per i motori di controllo dell'assetto. Attualmente il Mariner 10 è in un'orbita solare. Mariner 10 pesava 503 kg, inclusi 29 kg di combustibile e 30 kg dell'adattatore tra l'astronave e il razzo Centauro. Il suo corpo era una struttura ottagonale che misurava 1,39 m in diagonale e 0,457 m di profondità. Due pannelli solari, ciascuno lungo 2,7 m e largo 97 cm, erano attaccati alla sommità e sostenevano 5,1 m² di celle solari. Il motore del razzo era alimentato a propellente liquido e due insiemi di motori a reazione potevano emettere getti per stabilizzare la sonda su tre assi. Portava un'antenna unidirezionale di diametro 1,37 m. L'astronave puntava la stella Canopo ed era provvista di sensori per l'acquisizione della posizione del Sole. L'interno era isolato con coperture termiche e dopo il lancio fu aperto un ombrello per proteggere l'astronave sul lato diretto verso il Sole.

3.4 - I NOMI DELLE STRUTTURE SUPERFICIALI DI MERCURIO

Sono state stabilite convenzioni internazionali per l'assegnazione dei nomi delle strutture di Mercurio.

- Crater = cratere. I crateri più larghi portano i nomi di autori, artisti e musicisti. Nomi tipici sono: Omero, Renoir e Bach. Ci sono due eccezioni: Kuiper e Hun Kal. Kuiper era un astronomo del gruppo della Mariner 10 che è morto nel 1973. Hun Kal è stato scelto per un piccolo cratere nel cui centro passa il 20° meridiano che è utilizzato alla stregua del meridiano di Greenwich sulla Terra. Hun Kal significa appunto 20 nel linguaggio degli antichi Maya.

- Dorsum = crinale. I crinali non hanno il nome di un gruppo specifico; sono esempi Antoniadi e Schiaparelli.
- Montes = montagne. I nomi delle montagne non hanno categorie; spesso vengono presi i nomi delle pianure associate, vedi per esempio Caloris Montes.
- Planitia = bassa pianura. Le basse pianure portano i nomi usati dagli antichi popoli per indicare il pianeta Mercurio e i nomi per indicare il dio che nelle antiche culture corrispondeva al Mercurio romano. Nomi tipici sono: Tir, Budh, Odino e Suisei. Fanno eccezione Planitia Borealis e Planitia Caloris.
- Rupes = dirupo, scarpata. Le scarpate sono associate ai nomi delle navi usate per l'esplorazione e la ricerca scientifica sulla Terra; per esempio: Discovery, Victoria, Vostok, Hero e Astrolabio.
- Valles = valli sinuose. Le valli sono chiamate con i nomi di radio-osservatori; nomi tipici sono: Arecibo, Goldstone, Haystack e Simeiz.

Le immagini della sonda Mariner 10 hanno permesso di realizzare una mappa parziale della superficie di Mercurio (circa il 45%).

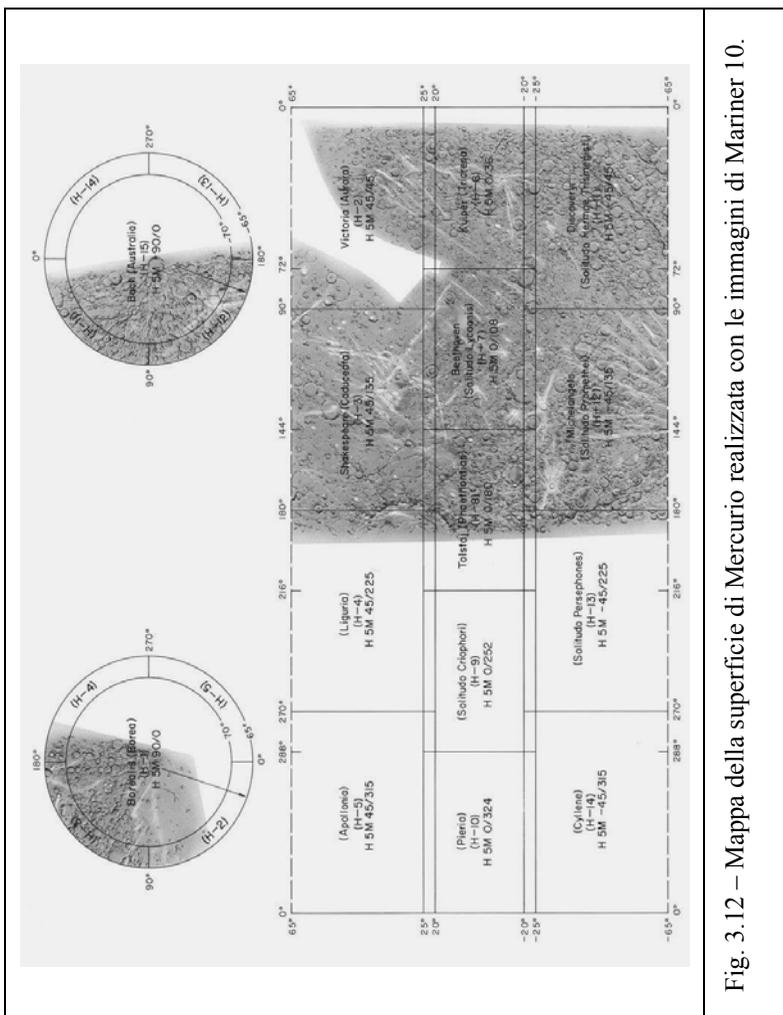


Fig. 3.12 – Mappa della superficie di Mercurio realizzata con le immagini di Mariner 10.

3.5 - MERCURIO NELLA CULTURA

Nella mitologia greca il suo nome era Hermes ed era il figlio di Zeus e della ninfa Maia, una delle Pleiadi; nacque in Arcadia in una grotta del monte Cillene. Dopo poche ore dalla nascita ha una delle sue geniali idee: sull'uscio della grotta trova una tartaruga, la uccide, la vuota, la copre di pelle di bue, aggiunge due bracci fatti con corna d'ariete, tende su tutto delle corde fatte di budella di pecora ed ecco inventata la lira. Poco dopo ruba al fratellastro Apollo una mandria di buoi; scoperto, fu portato davanti a Zeus per rendere conto del suo operato. Pentito, ottenne il perdono di Apollo in cambio della lira. I due in seguito furono sempre molto solidali ed effettuarono un altro scambio: la verga d'oro di Apollo (nota in seguito come il caduceo) con il flauto inventato da Hermes.

Hermes era astuto, intraprendente, operoso e con uno spiccato senso pratico. Il suo ruolo tra le divinità era quello di messaggero degli dei, specie di Zeus. Ebbe numerosissime amanti e molti figli ed era venerato come protettore dei viandanti, dei mercanti, di chi faceva dell'eloquenza una professione e di chi stimava e praticava l'educazione fisica. Tra gli altri ruoli, Hermes era anche il portatore dei sogni ai viventi e, come Psicopompo, il conduttore delle anime dei morti negli inferi.

Molti sono i miti che vedono coinvolto Hermes. È lui che consegna a Paride il pomo con il quale deve designare la dea più bella e che fa scatenare la guerra di Troia. Nell'Odissea Hermes consegna ad Ulisse l'erba moli, utilizzata solo dagli dei, che consente a questi di liberare i propri compagni dagli incantesimi della maga Circe. È sempre Hermes che porta alla ninfa Calipso l'ordine di Zeus di lasciar partire Ulisse.

L'uccisione del pastore Argo è uno degli episodi più noti della mitologia greco-romana in cui interviene Mercurio; narrato da Ovidio nelle *Metamorfosi*, è legato al mito dell'amore di Giove per la Ninfa Io. Per nascondere questa ai sospetti di Giunone, il padre degli dèi l'aveva trasformata in una giovenca, negando a Giunone l'interesse per lei. Io era stata quindi affidata alla custodia del pastore Argo dai cento occhi, metà dei quali sempre aperti. Quando Giove ordinò a Mercurio di liberarla, questi addormentò con la verga magica gli occhi ancora aperti di Argo e lo uccise. A eterna memoria di Argo, i suoi occhi diverranno l'ornamento delle piume del pavone, l'animale sacro a Giunone.

Nella mitologia romana Mercurio rappresenta il dio degli scambi, del profitto e del commercio. Il suo nome latino probabilmente deriva dal termine *merx* o *mercator*, che significa mercante. In un ex-voto il dio è ricordato come *lucrorum potens et conservator* = “che favorisce i guadagni e li conserva”. Talvolta i commercianti aggiungono nel proprio larario un Mercurio portaborse, cioè portafortuna. Il suo culto ufficiale fu stabilito dal 495 a.C, an-



Fig. 3.13 – Il Mercurio del Giambologna (1529 - 1608). Statua in bronzo alta cm 180. Firenze, Museo Nazionale del Bargello

no in cui M. Letorio gli avrebbe dedicato un tempio ai piedi dell'Aventino, presso il lato occidentale del Circo Massimo. I mercanti gli rivolgevano preghiere bruciando incensi; il mercante vestito di tunica andava alla fonte di Mercurio vicino Porta Capena (forse nel sito di Villa Mattei), e purificato, attingeva quell'acqua portandola in casa. Ivi bagnava con essa un ramo di alloro e aspergeva le mercanzie e i suoi capelli recitando la preghiera a Mercurio^[2]

*Ablue praeteriti periuria temporis,
ablue praeteritae perfida verba die.
Sive ego te feci testem falsove citavi
Non audituri numina magna Iovis,
sive deum prudens alium divamve fefelli,
abstulerint celeres improba verba Noti,
et pateant veniente die periuria nobis,
nec curent superi si qua locutus ero.
Da modo lucra mihi, de facto gaudia lucro,
et fac, ut empori verba dedisse iuвет.*

Nelle rappresentazioni artistiche Hermes-Mercurio viene spesso riprodotto con elmo, calzari alati e caduceo. Viene rappresentato nelle più svariate forme artistiche. Famosa è una statua del Giambologna e alcuni quadri del Rinascimento: di Rubens *Mercurio e Argo* e *Il giudizio di*

[2] Lava gli spergiuri del tempo passato,
e lava anche le parole perfide dette ieri.
Sia che abbia evocato te a testimone, o invocato
Falsamente il grande nume di Giove sperando che non mi udisse,
sia che, astuto, abbia ingannato alcun altro degli dei o delle dee,
i rapidi venti disperdano le mie sacrileghe parole:
e domani mi si schiuda la liceità di nuovi spergiuri,
né badino i Celesti se neavrò pronunciato qualcuno.
Concedimi solo guadagni, concedimi di godere di essi,
e fa che mi giovi l'aver gabbato l'acquirente.

Paride; di Velasquez *Mercurio e Argo*; di Donato Creti *Mercurio reca a Giunone la testa di Argo e Mercurio consegna il pomo a Paride*.

Nelle rappresentazioni moderne Mercurio è presente nel logo delle Poste Greche e nella cartamoneta da 500 lire di qualche anno fa.

3.6 - LE CARATTERISTICHE FISICHE DI MERCURIO

Il pianeta più vicino al Sole è un mondo di estremi per dimensioni, densità, temperature e composizione chimica. I dati disponibili sono pochi: la prima e ultima sonda che l'abbia mai esplorato è il Mariner 10 nel 1974... e si trattò solo di passaggio ravvicinato, non di un atterraggio. Le fotografie della superficie mostrano un'apparente somiglianza con la Luna. Ciò può forse considerarsi una sfortuna, perché rafforza l'erronea impressione di un corpo privo di interesse. È vero l'esatto contrario: Mercurio rappresenta quasi sempre il test di attendibilità più impegnativo per le teorie sulla nascita del Sistema Solare, che devono riprodurre la formazione del pianeta con tutte le sue peculiari caratteristiche.

I fatti fisicamente importanti che i numeri di Mercurio ci forniscono:

- Mercurio è, ad eccezione di Plutone (che ormai non viene più considerato un pianeta vero e proprio), il più piccolo pianeta del Sistema Solare;
- tuttavia la sua densità è seconda solo a quella della Terra; anzi, tolto l'effetto di compressione dovuto alla gravità, Mercurio risulta il pianeta più denso;
- il periodo di rivoluzione e quello di rotazione sono sincronizzati nel rapporto 3:2;

- Mercurio non ha satelliti, né possiede un'atmosfera vera e propria; è presente solo un "velo" di gas, che viene continuamente distrutto e ricostituito dall'azione del vento solare;
- il campo magnetico del pianeta, benché pari a circa 1/80 di quello terrestre, è comunque più intenso di quello di Venere e Marte. Questo fornisce informazioni preziose sulla costituzione interna del nucleo;
- gli estremi di temperatura sono tali che Mercurio sperimenta l'escursione termica più grande fra tutti i pianeti;
- morfologia e composizione chimica della superficie rivelano una storia passata singolarmente complessa, più di quello che ci si aspetterebbe da un corpo di così piccole dimensioni.

3.6.1 - La superficie

Come quella della Luna, la superficie di Mercurio è butterata da crateri da impatto di tutte le dimensioni: tuttavia mancano le distese basaltiche (mari) caratteristiche della topografia lunare, e anche i crateri non sono proprio uguali. L'assenza di acqua e l'inconsistenza del-

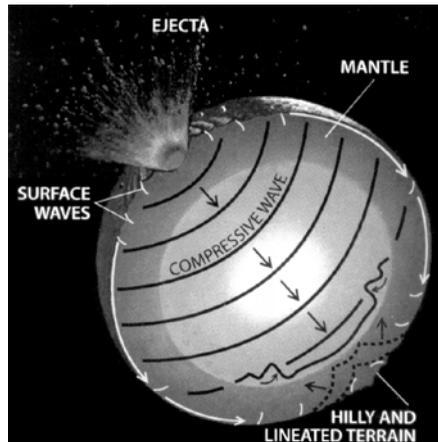


Fig. 3.14 – La formazione della Planitia Caloris

l'atmosfera rendono i processi di erosione praticamente inesistenti, mentre non esistono tracce di attività vulcanica

attuale (possibile invece nel passato): Mercurio è considerato un corpo geologicamente inattivo, per questo aspetto effettivamente simile alla Luna.

La struttura superficiale più appariscente è il bacino *Planitia Caloris*, uno dei più vasti crateri del Sistema Solare, dal diametro di circa 1300 Km. L'urto, terribile, del meteorite che lo creò circa 3,6 miliardi di anni fa ha sollevato catene di montagne alte circa 2 Km, generando un sistema di valli e fratture che si irradiano dal bacino per 1000 km. Per questo Caloris è circondato da una serie concentrica di altopiani che si irradiano a partire dal cratere vero e proprio. Esistono persino morfologie collinari proprio agli antipodi di Caloris, che sono state create dalle onde di compressione successive a quest'impatto, che deve essere stato certamente catastrofico.

La superficie esterna è composta da una crosta di silicati a bassa densità e da ossidi refrattari con alta temperatura di fusione. Curiosamente, non è stata riscontrata la presenza di composti di ferro nella crosta, mentre il nucleo deve invece contenerne moltissimo: ciò rappresenta ancora un enigma. Forse il pianeta è rimasto allo stato fuso così a lungo da permettere la caduta di tutti gli elementi più pesanti verso il centro.

Solo di recente, attraverso misurazioni col radar, sono state scoperte ai due poli Nord e Sud due zone con elevato potere riflettente, compatibile con la presenza di ghiaccio d'acqua. Più che di acqua "indigena" dovrebbe trattarsi di materiale portato da comete e meteoriti, forse accumulato in crateri e crepacci dove la temperatura resta sempre sotto -150 °C. Uno strato superficiale di regolite^[3]

^[3] Materiale incoerente granulare che ricopre ampie zone della Luna, di Marte, di Mercurio e di alcuni asteroidi. È costituita in parte da frammenti di substrato frantumato da fenomeni di impatto, in parte da

potrebbe aver consentito a questo “ghiaccio” di resistere all'azione dei raggi cosmici ed ultravioletti. Tuttavia la situazione è ancora controversa: anche lo zolfo, per esempio, potrebbe dare una riflettività simile a quella osservata.

Per le morfologie superficiali si possono distinguere alcune caratteristiche di base.

Altipiani craterizzati

Sono regioni molto antiche (fino a 4,2 miliardi di anni), costellate di crateri di tutte le dimensioni e con un notevole tasso di sovrapposizione: non è infrequente vedere numerosi crateri uno sopra l'altro. L'assenza di erosione ha preservato ogni traccia degli impatti e in alcune zone la morfologia ha assunto carattere caotico. La presenza di un così elevato numero di crateri non è una sorpresa, perché è un'eredità del bombardamento operato da corpi provenienti dalla fascia degli asteroidi e dall'esterno del Sistema Solare, che fino a circa 3,8 miliardi di anni fa ha segnato le superfici dei pianeti.

L'abbondanza degli impatti è una prova dell'antichità della superficie di Mercurio, che non ha sperimentato processi di rinnovamento geologico della crosta come la Terra. Gli urti dei corpi di maggiori dimensioni hanno provocato la fuoriuscita di lava, creando zone pianeggianti che mostrano le tracce di impatti successivi: un esempio è proprio il bacino del Mare Caloris.

Sono molti i crateri di grandi dimensioni, fino a 500 km e oltre. Il loro aspetto è simile, almeno in prima approssimazione, a quello dei crateri lunari e di alcuni crateri marziani: le dimensioni sono però in media più grandi,

materiali meteoritici e da vetro formatosi in conseguenza del calore sviluppato dagli impatti o prodotto dall'attività vulcanica. La grana della regolite può essere anche molto fine, come dimostra la profondità delle impronte lasciate dagli astronauti sulla Luna.

e una possibile spiegazione è che i “proiettili” che li hanno generati avessero orbite ellittiche, più veloci nella zona di Mercurio (che corrispondeva al loro perielio) che nelle regioni esterne (dove raggiungevano l’afelio). La zona più probabile di origine è la fascia degli asteroidi, dove ancor oggi troviamo un gruppo di oggetti che presentano orbite come quelle descritte. Mercurio ha in questo una storia comune a tutti i pianeti interni, Marte compreso: nei satelliti del sistema gioviano i crateri da impatto provengono invece da una popolazione di oggetti diversa.

Il più grande bacino di impatto del pianeta è il Mare Caloris.

Pianure “lisce”

Sembra plausibile, anche se non sicura, l’origine vulcanica. Non si sa se Mercurio abbia vissuto, in seguito a una serie di catastrofici impatti, una fase di “oceano di lava” con la sua crosta completamente fusa, come in passato è accaduto alla Luna.

Osservazioni spettroscopiche e radar indicano una crosta quasi priva di ferro, che invece deve costituire quasi tutto l’interno del pianeta. L’oceano di lava fornirebbe una spiegazione della situazione osservata.

Un aiuto inaspettato per chiarire la questione è venuto da una rilettura dei vecchi dati raccolti dalla sonda Mariner. Di recente le immagini del 1974 sono state rielaborate usando tecniche moderne, trasformando le originali 256 tonalità di grigio in combinazioni dei tre colori rosso verde, blu. Il risultato di questa elaborazione dà indicazioni sulla composizione chimica delle rocce superficiali del pianeta. Si può osservare una certa presenza di un ossido di ferro (FeO) e di materiale risultante dal bombardamento di micro-meteoriti; è probabile una certa attività vulcanica nel passato, mentre sono scarsi i minerali opachi come

l'ossido di titanio.

Scarpate e faglie

Sono visibili sulla crosta del pianeta numerose spaccature, lunghe anche oltre 500 km e di altezza variabile tra 1 e 2 km. Per lo più si tratta di faglie di scorrimento, causate probabilmente dal restringimento della crosta conseguente alla parziale solidificazione del nucleo interno del pianeta causata dal progressivo raffreddamento.

La superficie è anche segnata da una serie di linee di frattura, orientate prevalentemente in direzione nord-sud. Una possibile spiegazione è questa: la crosta si è solidificata prima dell'interno, quando Mercurio ruotava molto più rapidamente di oggi (forse il giorno durava addirittura 20 ore invece degli attuali 176 giorni) e possedeva un rigonfiamento equatoriale simile a quello terrestre. Mentre le forze mareali esercitate dal Sole rallentavano la rotazione, sgonfiando la "pancia" del pianeta, il raffreddamento del pianeta permise la solidificazione delle regioni esterne del nucleo: la diminuzione di volume dovuta ai due effetti descritti fece restringere la crosta, producendo una rete di fratture con direzione preferenziale lungo i meridiani. È interessante notare che queste linee non attraversano la regione di Planitia Caloris e quindi devono essere più antiche di quell'impatto... il che porta la loro età molto indietro, fino ai primordi della storia del pianeta.

3.6.2 - L'interno di Mercurio

La composizione chimica di Mercurio è quella dei pianeti rocciosi: poco più grande della Luna, il pianeta ha però una densità tipica di un corpo molto più massiccio quale la Terra, e in questo costituisce una notevole eccezione alla regola del "più piccolo, meno denso" altrimenti

valida per i pianeti di tipo terrestre (figura 3.15). Tali caratteristiche, unite alla presenza del campo magnetico più intenso fra i pianeti interni (Terra a parte), fanno pensare ad un nucleo fluido a bassa viscosità di ferro e nickel, che costituisce i 2/3 della massa totale e il 50% del volume complessivo, dal centro fino a 1800-1900 km di raggio: i restanti 500-600 km sembrano costituiti da un mantello esterno di silicati.

Il campo magnetico è un aspetto molto interessante del pianeta. Non è impossibile che si tratti di un residuo fossile dell'epoca in cui il nucleo era certamente fuso, ma la notevole intensità e la possibile presenza di una vera e propria magnetosfera in miniatura, simile a quella terrestre, rendono l'ipotesi improbabile.

È invece assai più plausibile che il campo sia tuttora generato da una parte del nucleo rimasta ancora fluida. Le piccole dimensioni di Mercurio non gli hanno certamente permesso di conservare sufficiente calore interno per mantenere fuso il ferro (1539 °C), ma questo problema può essere superato ipotizzando la presenza di solfuri, probabilmente di ferro (FeS), che sono in grado di abbassare il punto di solidificazione fino a poco più di 1000 °C, valore compatibile con i modelli teorici.

Non bisogna pensare, comunque, che la teoria sia in grado di spiegare tutti i fenomeni osservati. Un problema sorge dallo studio delle faglie osservate sulla crosta.

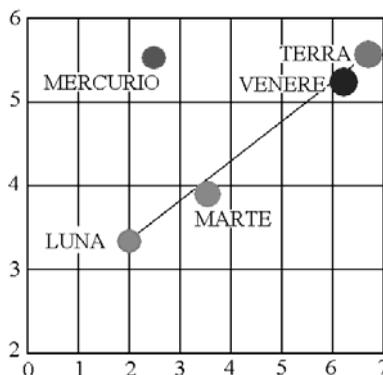


Fig. 3.15 – “Più piccolo, meno denso”

Nell'ipotesi, già illustrata, che esse siano dovute al restringimento del nucleo per il suo progressivo raffreddamento, i calcoli mostrano che le sue dimensioni dovrebbero essere molto più piccole di quelle indicate: circa il 5% del volume totale! Questo dato è inaccettabile, perché non permette di spiegare l'esistenza del campo magnetico, né l'alta densità del pianeta. Potrebbe darsi che esistano più faglie di quelle rilevate, situate nella parte ancora inesplorata; può anche darsi che non siano state individuate alcune faglie perché di dimensioni troppo grandi per risultare facilmente visibili.

Il nucleo del pianeta deve essere comunque di grandi dimensioni. Quale potrebbe essere il meccanismo che lo ha prodotto? Ecco alcune possibili risposte:

- a) La composizione del disco che 4,55 miliardi di anni fa ha formato i pianeti potrebbe essere stata differente dai modelli teorici attuali (che però funzionano bene per il resto del sistema solare...), oppure qualche altro effetto di selezione ha incrementato la dotazione primitiva di metalli ferrosi per il pianeta;
- b) Potrebbe darsi che il nucleo sia rimasto allo stato fuso più a lungo, o in altre parole che le dimensioni originali del pianeta fossero maggiori di quelle attuali: se così fosse, Mercurio avrebbe perduto una parte consistente della sua massa. Nelle prime fasi della sua esistenza il Sole emetteva molta più radiazione UV e più vento stellare rispetto ad oggi (fase T Tauri), e forse è stato in grado di "sbucciare" Mercurio fino a lasciare la sottile crosta odierna;
- c) Il pianeta potrebbe aver sperimentato nel passato più impatti catastrofici come quello che ha generato Planitia Caloris, perdendo così parte del suo mantello esterno.

3.6.3 - Il “velo” atmosferico

Non si tratta di vera atmosfera, ma piuttosto un’*esosfera*: atomi e molecole hanno cioè scarse collisioni tra loro, più frequentemente urtano invece la superficie.

Idrogeno, elio (dal vento solare, 10 volte più intenso su Mercurio rispetto a quello sulla Terra), calcio, sodio, potassio (dalle rocce superficiali), ossigeno (provenienza mista), forse anche zolfo (dalle rocce) concorrono al ciclo di creazione e distruzione dell’*esosfera* mercuriana; possibile, anche se non troppo probabile, è l’esistenza di un certo degassamento residuo dall’interno del pianeta.

Gli elementi più abbondanti sono elio e sodio, ma la pressione resta comunque non superiore a 10^{-12} atmosfere (mille miliardi di volte più piccola della pressione atmosferica terrestre!).

La bassa gravità del pianeta e le alte temperature diurne fanno sfuggire i gas nello spazio: il velo atmosferico viene continuamente distrutto e ricostituito.

Con riguardo all’atmosfera, torniamo per un momento alla questione del presunto “ghiaccio” rilevato ai poli. Osservazioni radar eseguite da Terra (Arecibo, VLA) sui poli di Mercurio hanno fornito misure compatibili con la presenza di ghiaccio nei crateri polari più profondi. La mappa radar ha risoluzione fino a 1,5 km e mostra 20 aree ad alta riflettività, non polarizzate, di forma circolare. Notevole è la coincidenza con i crateri più rilevanti, soprattutto al polo Sud (figura 3.16).

La riflettività del materiale appare più bassa rispetto a quelle delle lune ghiacciate di Giove (Europa, Ganimede), ma superiore ai tipici (?) silicati della superficie di Mercurio. Nel fondo dei crateri polari la luce del Sole non

arriva quasi mai e il ghiaccio potrebbe resistere per lunghi periodi.

Una possibile provenienza è quella da impatti cometari accumulatisi nel corso del tempo (qualcosa del genere è forse presente anche sulla Luna) o degassamento interno del pianeta (però i poli dovrebbero essere stati eccezionalmente stabili per tutto questo tempo... in barba a catastrofi come gli impatti che hanno generato il bacino di Caloris).

Il ghiaccio potrebbe scambiare idrogeno e ossigeno col velo atmosferico del pianeta... però occorre osservare che (come per la Luna) c'è la possibilità che le zone "chiare" al radar siano invece ricoperte da solfuri metallici o zolfo allo stato elementare, le cui riflettività sono simili a quella del ghiaccio. Sarebbe allora lo zolfo a interagire con l'atmosfera. Un'altra ipotesi è la precipitazione al suolo di ioni metallici (sodio?), generati dall'interazione tra vento solare, magnetosfera e superficie di Mercurio.

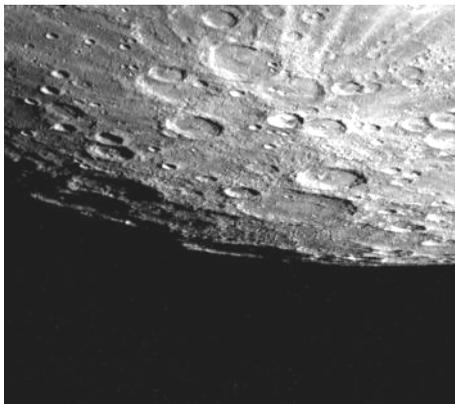


Fig 3.16 – Il polo Sud di Mercurio

Nel caso vi fosse davvero del ghiaccio, la sonda Messenger rileverebbe idrogeno (con lo spettrometro a neutroni e raggi γ); eventuali vapori di zolfo sarebbero invece individuati dallo spettrometro UV.

3.6.4 - Origine ed evoluzione di Mercurio

La formazione di Mercurio risale a circa 4,5 miliardi di anni fa, quasi contemporaneamente con gli altri pianeti del sistema solare. I planetesimi che hanno costituito il pianeta provenivano da una zona più vasta rispetto all'attuale orbita.

Il bombardamento primordiale ha sicuramente distrutto la crosta originaria, producendo forse un oceano di lava che ha permesso la differenziazione chimica e la conseguente stratificazione nucleo-mantello. Il degassamento dall'interno ha creato un'atmosfera primitiva piuttosto densa, ma temporanea (la gravità di Mercurio è troppo debole per consentirne la stabilità).

L'attività vulcanica formò probabilmente larghe zone della crosta, successivamente craterizzate da numerosi impatti meteoritici. La rotazione del pianeta doveva essere molto più rapida di quella odierna.

Le rocce superficiali più antiche hanno intorno a 4,2 miliardi di anni. L'impatto catastrofico del Mare Caloris, circa 3,6 miliardi di anni fa, segna la fine delle grandi piogge di meteoriti e l'inizio di una fase più tranquilla da 3,5 miliardi di anni fa ad oggi.

Il nucleo di ferro-nickel (con intrusioni di altri elementi, soprattutto zolfo) è solidificato lentamente, mentre la parte ancora liquida genera ancor oggi il campo magnetico del pianeta (si tenga presente la discussione svolta in precedenza).

Il progressivo passaggio del ferro-nickel allo stato solido ha diminuito il volume del nucleo, che restringendosi spaccò la crosta soprastante creando le odierne faglie di scorrimento. Si stima un restringimento del raggio del pianeta di circa 1-2 km.

Col rallentamento della rotazione scomparve il rigonfiamento equatoriale, generando così la "griglia" mer-

curiana.

Col cessare dell'attività vulcanica (non più sostenuta dal calore interno in dissipazione) l'aspetto della superficie viene mutato solo dagli occasionali impatti, che formano i crateri più recenti e/o forniscono ghiaccio e altri elementi volatili a un pianeta sempre più asciutto.

3.6.5 - Il promemoria della sonda MESSENGER

- Cartografare l'intera superficie del pianeta, in veduta stereo e con risoluzione molto maggiore dell'attuale
- Analizzare la composizione delle rocce della crosta (spettrometro a raggi X e gamma) per cercare di spiegare le grandi dimensioni del nucleo
- Cercare le tracce di ghiaccio, o zolfo, o altro nel fondo dei crateri polari (spettrometro a neutroni, UV, a particelle energetiche)
- Determinare (spettrometro visibile-infrarosso) i minerali che compongono le rocce superficiali
- Ricavare una mappa dettagliata del campo gravitazionale del pianeta con le sue anomalie (misurando le accelerazioni anomale della sonda nella sua orbita)
- Utilizzare l'altimetro laser per:
 - ricavare la topografia completa dell'emisfero Nord
 - misurare lo spessore della crosta (incrociando con i dati gravitazionali)
 - misurare la librazione del globo, stabilendo finalmente quanto è effettivamente grande il nucleo e quanta parte di esso è liquida
- Ottenere con il magnetometro una mappa tridimensionale dettagliata del campo magnetico intorno al pianeta
- Misurare (con lo spettrometro a plasma) l'impatto del vento solare sulla magnetosfera

- Determinare con precisione la composizione dell'esosfera (spettrometro UV e a particelle energetiche)

Come si può vedere, il lavoro certo non manca. Aspettiamo dunque con impazienza il 2011!

VENERE

4.1 - I NUMERI DI VENERE

Venere è il secondo pianeta dal Sole; ha un'orbita pressoché circolare (eccentricità = 0,0068). All'afelio dista dal Sole 109 milioni di km, al perielio 107,4.

Il Sole visto da Venere ha un diametro apparente di 44', circa una volta e mezza più grande di come si vede dalla Terra.

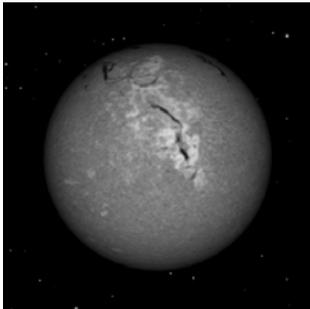


Fig. 4.1 a) - Il Sole da Venere

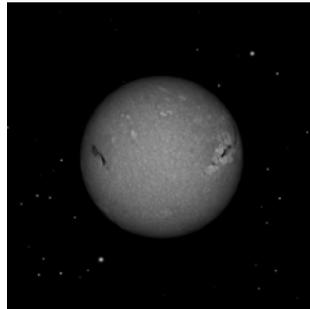


Fig. 4.1 b) - Il Sole dalla Terra

Il raggio equatoriale di Venere è di 6051,84 km, pari a 0,9499 volte il raggio della Terra. Venere ha una superficie 0,902 volte quella della Terra, un volume che è 0,857 volte quello della Terra e una massa di $4,8685 \cdot 10^{24}$ kg, pari a 0,815 volte quella della Terra. Ha una densità di $5,243 \text{ g/cm}^3$.

L'accelerazione di gravità è di $8,870 \text{ m/s}^2$ (0,90 volte quella terrestre). Questo significa che, trascurando la resistenza opposta dalle atmosfere, un oggetto che sulla Terra impiega circa un secondo per cadere da un'altezza di 5 m, su Venere impiegherebbe circa 5 centesimi di secondo in più.

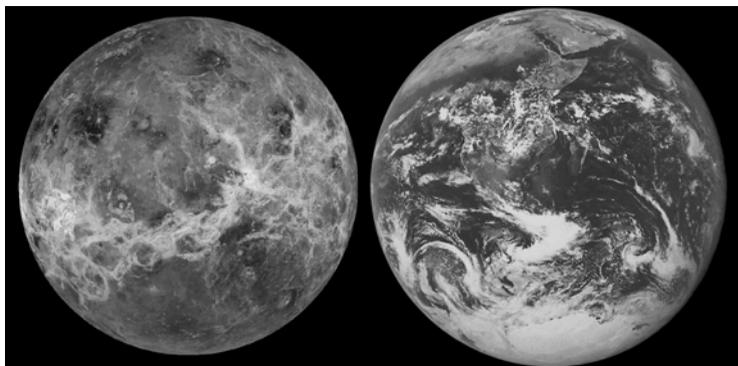


Fig. 4.2 - Confronto tra Venere e la Terra

La velocità di fuga dalla superficie (sempre trascurando l'atmosfera) è 10,4 km/s contro 11,2 km/s della Terra.

Questi numeri dicono che Venere e la Terra sono molto simili.

Venere non ha praticamente schiacciamento ai poli, ruota intorno al Sole in 224,695 giorni terrestri (periodo di rivoluzione) e ruota su se stesso in 243,0187 giorni. Questi due movimenti fanno sì che il giorno su Venere duri circa 116 giorni terrestri. Inoltre ha moto retrogrado, cioè ruota in senso opposto alla Terra: il Sole sorge a ovest e tramonta ad est.

Il periodo sinodico, il tempo medio che intercorre tra due successive congiunzioni (superiore o inferiore), è di 583,92 giorni. Questo ciclo di circa 584 giorni si combina con i 365 giorni del periodo di rotazione della Terra in un rapporto semplice di 5 a 8; ciò significa che circa ogni 8 anni (2920 giorni) l'aspetto e la posizione di Venere nel cielo si ripetono identiche.

La temperatura sulla superficie di Venere è di circa +480 °C, mentre sopra le nuvole che la circondano perpe-

tuamente è di $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

L'asse di rotazione è inclinato di soli $2,6^{\circ}$ rispetto al piano orbitale, che a sua volta è inclinato di circa $3,4^{\circ}$ rispetto al piano dell'orbita terrestre.

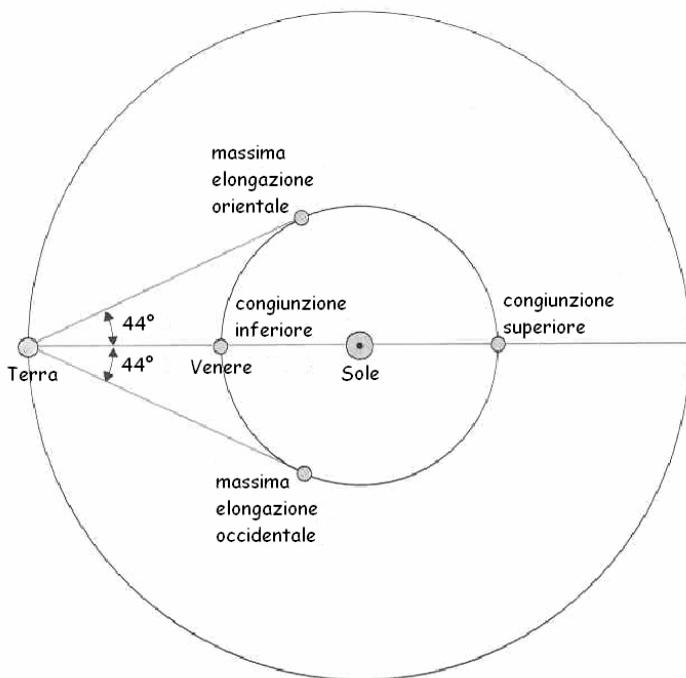


Fig. 4.3 - Posizioni relative Terra-Venere

Siccome Venere si trova tra il Sole e la Terra, talvolta può transitare sul disco solare producendo una piccola eclisse.

Il fenomeno è molto raro a causa della combinazione dei moti orbitali dei due pianeti e dell'inclinazione delle loro orbite. Esistono delle relazioni che permettono di calcolare il periodo di questi transiti; indicativamente

possiamo dire che in un periodo di 243 anni si hanno 4 transiti: dopo 8 anni, dopo 121,5, dopo 8 e dopo 105,5. Nella tabella 4.1 sono riportati i transiti che nel passato sono stati osservati dagli astronomi e quelli del prossimo secolo che evidenziano questa periodicità.

diff		Data	Durata
	1631	6 dicembre	3h 10min
8	1639	4 dicembre	3h 10min
121,5	1761	5 giugno	6h 16min
8	1769	3 giugno	4h 00min
105,5	1874	8 dicembre	4h 11min
8	1882	6 dicembre	5h 17min
121,5	2004	7 giugno	5h 30min
8	2012	5 giugno	6h 42min
105,5	2117	10 dicembre	4h 46min
8	2125	8 dicembre	5h 37

Tabella 4.1 – Date dei transiti di Venere sul disco del Sole.

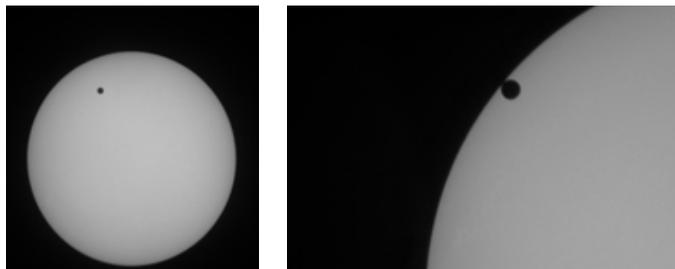


Fig. 4.4 - Transito di Venere sul disco del Sole il 7 giugno 2004. A sinistra: una fase intermedia, a destra: l'uscita dal disco del Sole. Foto A. Angeletti

Le osservazioni dei transiti, specie quelle del 1700 e del 1800, sono state delle vere e proprie avventure ed hanno permesso la misura della parallasse solare, cioè l'angolo con il quale dal centro del Sole si vedrebbe il raggio equatoriale della Terra quando questa si trova alla

distanza media. Tale misura è alla base della determinazione dell'Unità Astronomica^[1], cioè la distanza media Terra-Sole, che a sua volta è fondamentale per la misura della distanza degli oggetti del Sistema Solare.

4.2 - L'OSSERVAZIONE DI VENERE

Essendo un pianeta interno, Venere può essere osservato solo prima dell'alba o subito dopo il tramonto; infatti si scosta dal Sole al massimo per 44°.

Era conosciuta fin dalla preistoria, come testimoniano i petroglifi, dove appaiono simboli che rappresentano gli astri osservabili ad occhio nudo: tra questi Venere che, dopo il Sole e la Luna, è l'astro più luminoso del cielo.

Uno dei più antichi documenti astronomici è una registrazione di 21 anni di apparizioni di Venere (chiamata dai primi babilonesi Nindaranna) risalente circa al 1600 a.C. I testi dei Sumeri e dei Babilonesi parlavano di due astri distinti, Inanna e Istar.

Le tradizioni della Mesopotamia passarono ai Greci e ai Romani: anche presso queste civiltà, che rappresentarono Venere come una splendida fanciulla, inizialmente non ci si era resi conto che in realtà si trattava dello stesso oggetto. I Greci lo chiamavano Espero, quando appariva nel crepuscolo serale; e Fosforo (apportatore di luce), quando era visibile al mattino; per i Romani era Vespero e Lucifero.

Si ritiene che sia stato Pitagora a riconoscerne l'unicità. Nel IV secolo a.C., Eraclide Pontico propose

^[1] Oggi con misure radar fatte dalla NASA nel 1990 si è determinato che il valore dell'Unità Astronomica (AU dall'inglese Astronomical Unit) è di 149 597 836,257 km

che Venere e Mercurio orbitassero intorno al Sole piuttosto che intorno alla Terra.

I Maya (circa 300 a.C. – 900 d.C.) osservarono Venere accuratamente in quanto lo ritenevano più importante addirittura del Sole. Conoscevano il periodo sinodico di 584



Fig. 4.5 - Tavoletta con le osservazioni di Venere - VII secolo a.C. da Ninive. Il testo è una copia di osservazioni risalenti al regno di Ammisaduqa di circa 1000 anni prima. Lunghezza: 17,14 cm; Ampiezza: 9,2 cm; Spessore: 2,22 cm

giorni e sapevano che gli allineamenti Terra-Venere-Sole rispetto alle stelle si ripetevano ogni 2920 giorni. È stato dimostrato che le loro campagne di guerra erano condizionate dagli stazionamenti di Venere e Giove e così pure i sacrifici umani.

Il denso strato di nuvole dell'atmosfera di Venere ha impedito per secoli l'osservazione della superficie del pianeta. Le prime mappe, tracciate con l'aiuto di telescopi da terra, delineavano soltanto qualche tratto indistinto.

Uno dei primi disegni risale al 1645 ed è opera di Francesco Fontana, convinto di aver scoperto oceani e continenti, in realtà illusioni ottiche.

Nel 1667 a Bologna Gian Domenico Cassini notò un gran numero di macchie indistinte molto luminose dalla cui analisi determinò il periodo di rotazione in 23 giorni; il figlio Giacomo misurò invece 24 ore.

Per un certo periodo si credette che Venere possedesse una luna, Neith (dal nome di una divinità egizia le-

gata alla guerra) i cui presunti avvistamenti continuarono fino al 1892.

Francesco Bianchini (1662-1729) credette di aver scoperto continenti e oceani e con i dati delle osservazioni, nel 1727, realizzò un globo in legno di 19 cm (conservato nel museo della Specola di Bologna). Nel 1728 determinò il periodo di rotazione di Venere in 24 giorni e 8 ore, innescando una polemica che si sarebbe protratta fino alla seconda metà del 1900.

Sempre nel XVIII secolo i famosi astronomi Herschel e Schröter, dopo una lunga polemica, convennero che la superficie visibile era costituita soltanto da un involucro di nuvole.

Anche il gesuita Padre Francesco de Vico (Macerata 1805 – Londra 1848), direttore dell'osservatorio del Collegio Romano, venne coinvolto nella disputa sulla durata del periodo di rotazione di Venere; dopo circa 4 anni e decine di migliaia di osservazioni (solo nel 1839 ne vennero fatte più di 11.000) determinò il periodo in 23h 21m 21,93s con l'inclinazione del piano equatoriale sull'eclittica di $53^{\circ} 11' 26''$.

Nell'ottobre del 1894, Percival Lowell, usando un rifrattore di 24 pollici (61 cm) a Flagstaff, credette di scoprire delle forme scure sulla superficie di Venere che identificò come canali, successivamente da altri associate a instabilità atmosferica. Nel 1896 disegnò la sua personale



Fig. 4.6 - Globo in legno rappresentante la superficie di Venere del Bianchini

mappa e rifiutò l'idea di un'atmosfera opaca.

Con l'introduzione della fotografia nella ricerca astronomica si fecero molte scoperte. La speranza di riuscire a vedere la misteriosa superficie rimase delusa. Le prime immagini valide furono realizzate nel 1923 da F.E. Rossi al Mount Wilson Observatory. Nell'ultravioletto si evidenziarono alcuni tratti, che erano però solamente formazioni nuvolose. Immagini di qualità migliore furono prodotte negli anni '50 da G. P. Kuiper al McDonald Observatory in Texas, da N.A. Kozyrev in Unione Sovietica e da R.S. Richardson a Mount Wilson. Le fotografie di Kuiper e Richardson mostravano alcuni segni indistinti di forma allungata. I francesi Boyer e Guérin osservarono dei tratti scuri a forma di epsilon e calcolarono un periodo di rotazione retrograda di quattro giorni, in seguito confermato per la parte più esterna delle nuvole.

Molte scoperte sulla topografia di Venere si devono ai radiotelescopi basati sulla Terra, che combinate con quelle ottenute dalle sonde spaziali, di cui si dirà nel prossimo paragrafo, hanno consentito di disegnare le mappe di quasi il 95% della superficie. Le mappe più complete sono: una mappa altimetrica a colori in scala 1:10.000.000 e la mappa radar della Magellano in scala 1:5.000.000. Entrambi sono reperibili in internet nei siti, rispettivamente:
<http://planetarynames.wr.usgs.gov/altimetry.html>
<http://planetarynames.wr.usgs.gov/vgrid.html>.

4.3 - L'ESPLORAZIONE DI VENERE

Venere è il primo pianeta verso cui è stata inviata una sonda dalla Terra. Fino ad oggi ci sono state 26 missioni: 19 russe, 6 americane e una europea.

Venera 1 - URSS. Fu lanciata il 12 febbraio 1961 verso Venere che sorvolò il 19 maggio ad una distanza di circa 100.000 km. Non inviò a Terra alcun segnale in quanto si persero i contatti 7 giorni dopo il lancio.

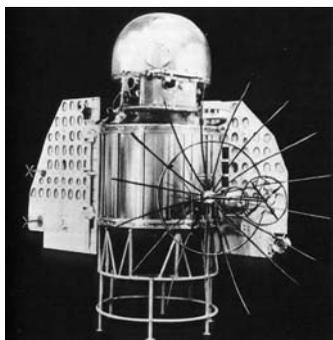


Fig. 4.7 - Venera 1

Mariner 2 - USA. Fu lanciata il 27 agosto 1962. Il Mariner 2 era di riserva per il Mariner 1 la cui missione fallì subito dopo lancio. L'obiettivo del Mariner 2 era di sorvolare Venere inviando dati sull'atmosfera del pianeta, sul campo magnetico, sulle particelle dello spazio interplanetario e sulla massa del pianeta. Dopo un volo abbastanza accidentato, il 14 dicembre passò alla minima distanza dal pianeta, a 34.773 km. L'ultima trasmissione da Mariner 2 fu ricevuta il 3 gennaio 1963, ora è in orbita eliocentrica. Le principali scoperte scientifiche di Mariner 2 sono: la determinazione della velocità della rotazione retrograda di Venere, la misura della temperatura e la pressione della superficie, la scoperta che l'atmosfera di Venere è composta da CO₂, la scoperta che fino ad un'altezza di 60 km c'è una copertura continua di nubi. Fu inoltre dimostrato che nello spazio interplanetario il vento solare e la polvere cosmica hanno una densità minore che vicino alla Terra. Furono fatte migliori stime della massa di Venere e del valo-

re dell'unità astronomica.

Zond 1 - URSS. Fu lanciata il 2 aprile 1964 con l'obiettivo di sorvolare Venere; il 14 maggio si persero le comunicazioni. Secondo i calcoli ha sorvolato Venere il 19 luglio a circa 100.000 km. È tuttora in orbita attorno al Sole.

Venera 2 - URSS. Fu lanciata il 12 novembre 1965 con l'obiettivo di sorvolare il pianeta, doveva riprendere immagini e fare misurazioni con vari strumenti scientifici. Il 27 febbraio 1966 passò a 24.000 km da Venere, ma ancora una volta il sistema di comunicazione non funzionò e non ci furono trasmissioni di dati. Ora è in orbita solare.

Venera 3 - URSS. Fu lanciata il 16 novembre 1965 e doveva colpire la superficie del pianeta dopo aver attraversato la sua atmosfera. Il sistema di comunicazione non funzionò e la sonda si schiantò il primo marzo 1966 senza inviare alcun segnale.

Venera 4 - URSS. Fu lanciata il 12 giugno 1967 con il compito di studiare l'atmosfera dei Venere. Il 18 ottobre 1967 entrò in orbita intorno al pianeta e rilasciò: due termometri, un barometro, un altimetro radio, un apparecchio per misurare la densità atmosferica, 11 analizzatori di gas e due trasmettenti radio. Inviò dati sulla composizione dell'atmosfera e venne distrutta dalla pressione di Venere a circa 25 km dalla superficie.

Mariner 5 - USA. Fu lanciata il 14 luglio 1967 e doveva sorvolare Venere. Il Mariner 5 era l'astronave di riserva della missione verso Marte Mariner 4 e dopo il successo di quest'ultima fu convertito per una missione su Venere. Il

19 ottobre 1967 passò a 4.000 km da Venere; gli strumenti dell'astronave misurarono sia il campo magnetico interplanetario sia quello di Venere, particelle cariche e plasmi, la rifrattività radio e ultravioletta dell'atmosfera di Venere.

Venera 5 - URSS. Fu lanciata il 5 gennaio 1969 e doveva ottenere dati atmosferici; l'astronave era molto simile a Venera 4. Il 16 maggio 1969, quando fu abbastanza vicina all'atmosfera di Venere, fu lasciata una capsula contenente strumenti scientifici. Durante la discesa verso la superficie si aprì un paracadute e per 53 minuti furono trasmessi dati sull'atmosfera, fino ad un'altezza di 11 km. L'astronave portava anche un bassorilievo di Lenin. Bruciò nell'atmosfera.

Venera 6 – URSS. Fu lanciata verso Venere il 10 gennaio 1969 per ottenere dati atmosferici; era gemella di Venera 5. Compì una missione identica, inviò dati sull'atmosfera di Venere per 51 minuti. Anch'essa portava un'immagine di Lenin e anch'essa bruciò nell'atmosfera.

Venera 7 – URSS. Lanciata il 17 agosto 1970 doveva atterrare sulla superficie. Raggiunse l'atmosfera del pianeta il 15 dicembre e una capsula, frenata da un paracadute, fu rilasciata per l'atterraggio. Durante la discesa la capsula mandò dati per 35 minuti prima di essere schiacciata dalla pressione di Venere e per altri 23 minuti furono ricevuti segnali molto deboli dalla superficie dai quali si determinarono la temperatura (475°C) e la pressione (90 atm). Fu il primo oggetto artificiale a rimandare dati dalla superficie di un altro pianeta.

Venera 8 – URSS. Fu lanciata il 27 marzo 1972 ed aveva

il doppio compito di studiare l'atmosfera e di atterrare: due sonde si separano il 22 luglio 1972. La velocità di discesa fu ridotta prima dall'attrito con l'atmosfera, poi da un paracadute di 2,5 m di diametro che si aprì ad un'altezza di 60 km. Durante la discesa Venera 8 rilevò un notevole calo di illuminazione ad un'altezza tra 35 e 30 km e una velocità del vento minore di 1 km/s sotto i 10 km. Atterrò alle 09:32 UT (tempo universale = tempo di Greenwich) e trasmise dati per 50 minuti e 11 secondi. La sonda confermò i dati di Venera 7 su temperatura e pressione superficiali; misurò il livello luminoso sulla superficie trovando che è simile alla luce che si ha sulla Terra durante un giorno coperto con visibilità di circa 1 km.

Mariner 10 – USA. Lanciata il 3 novembre 1973 aveva come obiettivo primario Mercurio, ma durante il viaggio doveva sorvolare Venere che sorvolò il 5 febbraio 1974 a 5.700 km di altezza rimandando a Terra circa 4.000 immagini in primo piano delle nubi e alcuni dati sull'atmosfera.



ВЕНЕРА-9 22.10.1975 ОБРАБОТКА ИППИ АН СССР 28.2.1976

Fig. 4.8 – Il panorama di Venere ripreso dalla Venera 9

Venera 9 – URSS. Fu lanciata l'8 giugno 1975 era costituita da due parti: una doveva rimanere in orbita attorno al pianeta e studiarne l'atmosfera, l'altra doveva atterrare per studiare la superficie. Il 20 ottobre si staccò quindi una sonda che il 22 ottobre venne immessa in orbita per fotografare le nubi e osservare l'alta atmosfera. Un'altra sonda

atterrò con il sole vicino allo zenit il 22 ottobre; durante la discesa la dissipazione del calore e la decelerazione furono completate con guscio emisferico protettivo, tre paracadute, un ulteriore disco e un massiccio cuscino comprimibile. Trasmise dati per circa 53 minuti e i risultati indicarono: una copertura di nuvole spesse 30-40 km con base a 30-35 km di altezza; che tra i componenti dell'atmosfera c'erano acido cloridrico, acido fluoridrico, bromo e iodio; una pressione superficiale di circa 90 atm e una temperatura superficiale di 485° C; un livello di luce simile a quello delle medie latitudini terrestri in un giorno estivo nuvoloso. Le immagini mostrano ombre, niente polvere nell'aria e rocce di 30-40 cm non erose.

Venera 10 – URSS. Lanciata il 14 giugno 1975 era gemella a Venera 9. Rilasciò la sonda di atterraggio il 23 ottobre 1975 e venne inserita in orbita il 25 ottobre 1975. La sonda in orbita fotografò le nubi e osservò l'alta atmosfera. La sonda che atterrò il 25 ottobre a circa 2.200 km da Venera 9, trasmise per 65 minuti; le immagini mostravano grandi pietre e in mezzo pietre laviche o erose. Misurò un vento di superficie a 3,5 m/s (circa 13 km/h) e durante la discesa misurò pressione e temperatura a varie quote.

altezza (km)	pressione (atm)	temperatura (°C)
42	3,3	158
15	37	363
0	92	465

Tabella 4.2 – Dati della Venera 10

Pioneer Venus 1 (Pioneer 12) – USA. Lanciata il 20 maggio 1978 fu inserita in un'orbita ellittica il 4 dicembre 1978. Uno dei suoi compiti principali fu quello di realizza-

re mappe radar della superficie per determinare la topografia. Dall'immissione nell'orbita di Venere al luglio 1980, il periastro (punto di minima distanza dal pianeta) fu tenuto tra i 142 e i 253 km (a 17° latitudine nord) per facilitare la mappatura radar e le misurazioni della ionosfera; la sonda era su un'orbita di 24 h con un apoastro (punto di massima distanza dal pianeta) a 66.900 km. Nel 1991 il mappatore radar fu riattivato per investigare sulle zone meridionali del pianeta e nel maggio del 1992 iniziò la finale fase della missione finché non venne fatta entrare nell'atmosfera disintegrandosi nell'agosto seguente.

Pioneer Venus 2 (Pioneer 13) – USA. Fu lanciata l'8 agosto 1978. La Venus 2 consisteva in bus che conteneva 4 sonde atmosferiche: una grande e tre piccole. La sonda grande fu rilasciata il 16 novembre 1978 e le tre piccole il 20; tutte e quattro entrarono nell'atmosfera di Venere il 9 dicembre, seguite dal bus. La sonda grande della Venus 2 portava 7 strumenti contenuti in recipiente sferico dal diametro di 1,5 m, pressurizzato e sigillato; a 47 km di altezza si aprì un paracadute che ne rallentò la caduta. Le tre sonde piccole erano identiche ed avevano un diametro di 80 cm. Avevano dei paracadute e ciascuna sonda piccola portò uno strumento per misurare le particelle delle nuvole e sensori di temperatura, di pressione e di accelerazione. I segnali radio delle quattro sonde furono anche usati per studiare i venti e la turbolenza atmosferici. Le sonde piccole avevano obiettivi diversi e furono chiamate di conseguenza: la sonda Nord che registrò l'atmosfera a circa 60° latitudine di nord sul lato giorno; la sonda Notte che entrò sul lato buio; la sonda Giorno che entrò nel lato a giorno e fu l'unica che continuò a trasmettere per un'ora dopo l'impatto. Il bus della Venus 2 portava due strumenti per

studiare la composizione dell'atmosfera. Senza scudo termico e paracadute sopravvisse e fece misurazioni fino a circa 110 km di altezza prima di bruciare.

Venera 11 – URSS. Lanciata il 9 settembre 1978 era composta di due parti: una piattaforma di volo e una sonda di atterraggio. La piattaforma di volo aveva strumenti per studiare lo spazio interplanetario in prossimità di Venere; la sonda di atterraggio portava strumenti per studiare le caratteristiche e composizione dell'atmosfera. Raggiunse il pianeta il 25 dicembre 1978 e dalla piattaforma si staccò il modulo di discesa che trasmise dati a Terra (tramite questa) per 95 minuti. La piattaforma continuò il suo viaggio e le proprie misurazioni sullo spazio interplanetario. Il sistema per la ripresa delle immagini non funzionò.

Venera 12 – URSS. Lanciata il 14 settembre 1978 era la gemella di Venera 11. La piattaforma passò a circa 34.000 km da Venere il 21 dicembre 1978, rilasciò la sonda di atterraggio e trasmise i dati rilevati durante la discesa per circa 110 minuti. Durante la discesa vennero registrate scariche elettriche.

Venera 13 – URSS. Fu lanciata il 30 ottobre 1981. Le Venera 13 e 14 erano due astronavi identiche lanciate a 5 giorni di distanza l'una dall'altra. La missione Venera 13 consisteva in un bus e una sonda di discesa; era simile ai precedenti Venera 9-12. Portava strumenti per misure chimiche ed isotopiche per esaminare lo spettro solare. Durante la discesa osservò scariche elettriche. L'astronave utilizzò un dispositivo per acquisizione di immagini, uno spettrometro a raggi X, un trapano e altri strumenti per esaminare la superficie del pianeta. Il veicolo di discesa si

separò dal bus e si immerse nell'atmosfera di Venere il 1 marzo 1982; la discesa fu rallentata da un paracadute. Venera 13 prese terra in una regione oggi nota come Phoebe Regio; l'area era composta da affioramenti di roccia circondati terreno ricoperto da granito scuro. Dopo essere atterrato riprese delle immagini del panorama e un braccio meccanico prelevò un campione di terreno, lo depose in una camera sigillata ermeticamente mantenuto a 30°C e ad una pressione di circa 0,05 atmosfere e fu analizzato con uno spettrometro a raggi X per determinarne la composizione chimica. La sonda sopravvisse per 127 minuti (era stato progettato per funzionare solo 32 minuti) in un ambiente con una temperatura di 457°C e una pressione di 84 atmosfere.

Venera 14 – URSS. Lanciata il 4 novembre 1981 aveva una missione del tutto identica alla Venera 13. Il veicolo di discesa si separò dal bus ed entrò nell'atmosfera di Venere il 5 marzo 1982, atterrò a circa 950 km a sud ovest da Venera 13 su un pianoro basaltico. Dopo l'atterraggio furono prese delle immagini del panorama e campioni di terreno analizzato successivamente con gli strumenti di bordo. Sopravvisse per 57 minuti e rilevò una temperatura di 465°C e una pressione di 94 atm.

Venera 15 – URSS. Fu lanciata il 2 giugno 1983

Venera 16 – URSS. Fu lanciata il 7 giugno 1983

Venera 15 e Venera 16 sono altre due missioni gemelle destinate a realizzare una mappa radar della superficie di Venere. Immesse in orbita intorno a Venere a pochi giorni di distanza (Venera 15 il 10 ottobre 1983, Venera 16 il 14 ottobre) le loro orbite erano spostate di 4° in modo da riprendere la stessa area. Ogni astronave era in orbita polare

e durante gli otto mesi di missione realizzarono una mappa della regione del polo Nord fino a circa 30° N. Le Venera 15 e 16, basate sugli schemi delle precedenti sonde, consistevano in un cilindro lungo 5 m con un diametro di 6 m. Su una delle basi del cilindro erano installate un'antenna parabolica di 1,4 m di diametro ed un'altra di 1 m di diametro per il radio-altimetro. Le immagini radar della superficie avevano una risoluzione di 1-2 km.

Venera 17 – URSS (VEGA 1). Lanciata il 15 dicembre 1984, portava con sé un pallone atmosferico e una sonda per atterrare su Venere. Come la sua gemella Venera 18, aveva una missione combinata: sorvolo di Venere e della cometa di Halley. Assunsero il nome VEGA 1 e VEGA 2. Dopo aver lasciato in prossimità di Venere le sonde per l'analisi del pianeta, usando la spinta gravitazionale di Venere, furono spinte verso la cometa, che hanno intercettato nel marzo del 1986. Circa metà degli strumenti era dedicata all'incontro con Halley, l'altra metà per l'atterraggio su Venere. La strumentazione per lo studio del pianeta era contenuta in una sfera di 240 cm di diametro che si staccò due giorni prima dell'arrivo su Venere, aveva due obiettivi: lo studio dell'atmosfera e della crosta del pianeta. Tra gli altri strumenti ce n'era uno per la misura dei componenti minori dell'atmosfera e uno dedicato alla misura della concentrazione di acqua. Dopo l'atterraggio vennero effettuate misurazioni sulla natura del terreno. In aggiunta alla sonda di atterraggio, a 54 km di altezza, venne rilasciato un pallone di 3,4 m di diametro al quale erano fissati 25 kg di strumentazione. Il moto del pallone venne osservato da Terra per mezzo di 6 stazioni nel territorio dell'Unione Sovietica e 12 nel resto del mondo (organizzate dalla Francia e dalla NASA). Due

giorni più tardi, dopo aver percorso 9000 km, il pallone entrò nel lato di Venere esposto al sole e scoppiò. La sonda sorvolò la cometa di Halley il 6 marzo 1986. Ora si trova in orbita solare.

Venera 18 – URSS (VEGA 2). Fu lanciata il 21 dicembre 1984. La sonda di atterraggio era identica a quella delle precedenti sonde Venera e aveva gli stessi due obiettivi: lo studio dell'atmosfera e della superficie. Dopo la separazione dalla sonda madre (che proseguì il suo viaggio verso la cometa di Halley) entrò nell'atmosfera di Venere il 15 giugno 1985 e toccò il suolo alle 03:00:50 UT del 15 giugno 1985 nella regione denominata Aphrodite Terra. Nel sito di atterraggio la pressione era di 91 atm e la temperatura di 463°C. Come Vega 1 anche la 2 rilasciò un pallone che misurò una corrente verticale di 1 m/s e venti orizzontali di 240 km/h. Il 9 marzo 1986 la sonda sorvolò la cometa di Halley. Ora è in orbita solare.

Galileo – USA & Europa. Lanciata il 18 ottobre 1989 la sonda era destinata all'esplorazione di Giove e delle sue lune, sorvolò Venere il 10 febbraio 1990 riprendendo immagini nel visibile e nel vicino infrarosso delle nubi.

Magellano – USA. Lanciata dallo shuttle Atlantis il 4 maggio 1989, arrivò su Venere il 10 agosto 1990. Aveva inizialmente un'orbita polare che veniva completata in 3 h e 15 min. Durante la parte dell'orbita più vicina al pianeta la Magellano fece una mappa radar lungo strisce larghe dai 17 ai 28 km che alla fine di ogni orbita inviava a Terra; tra settembre 1990 e maggio 1991 aveva ottenuto immagini dell'80% della superficie del pianeta. Dopo altri due cicli di otto mesi, tra maggio 1991 e settembre 1992, si ebbe

una mappa radar del 98% della superficie di Venere. Il quarto ciclo, dal settembre 1992 al maggio 1993, fu usato dagli scienziati per osservare cambiamenti sulla superficie e per acquisire dati sul campo gravitazionale. Tra un ciclo e l'altro l'angolo di vista del radar era leggermente differente, ciò rese possibile costruire delle mappe tridimensionali della superficie. Alla fine del quarto ciclo, nel maggio 1993, l'orbita della Magellano fu abbassata fin entro gli strati alti dell'atmosfera venusiana; la nuova orbita veniva completata in 94 minuti. Nell'aprile del 1994 aveva concluso il quinto ciclo di orbite avendo acquisito dati sulla gravità del 95% della superficie del pianeta. Durante il periodo successivo, mentre l'orbita si abbassava ulteriormente, vennero eseguiti altri test fino a quando la Magellano entrò negli strati più densi dove gran parte vaporizzò; ci si aspetta che qualche sezione sia caduta intatta sulla superficie. Per effettuare la mappa radar l'antenna spediva milioni di impulsi di microonde al secondo verso il pianeta. La stessa antenna rilevava l'eco prodotto dall'incontro con la superficie determinandone la distanza. Questo stesso sistema viene utilizzato dalla sonda Cassini per mappare la superficie di Titano.

Messenger - USA. Lanciata il 3 agosto 2004 con destinazione Mercurio, sorvolerà Venere il 24 ottobre 2006 e il 6 giugno 2007 riprendendo immagini delle nubi e altri dati.

Venus Express - ESA. Lanciata il novembre 2005 è entrata nell'orbita di Venere nell'aprile del 2006.

4.4 - VENERE NELLA CULTURA

4.4.1 – Il mito

Per i Sumeri Venere era *Colei che mostra la via alle stelle*. Dea della sera, favoriva l'amore e la voluttà; dea del mattino, presiedeva alle operazioni di guerra e alle stragi. Era figlia della Luna e sorella del Sole. Mostrandosi all'alba e al crepuscolo, si presentava come un legame fra le divinità del giorno e quelle della notte. Perciò suo fratello era il Sole e sua sorella la dea degli inferi. Dalla parentela con il Sole provenivano le sue qualità guerriere: era detta *la valorosa* o *la Signora delle battaglie*. In quanto stella della sera, era influenzata da sua madre, la Luna, e ciò faceva di lei la divinità dell'amore e del piacere. In quanto dea dell'amore, regina dei desideri o anche colei che anima il godimento e la gioia, il suo culto si associava alla prostituzione sacra.

Fra i suoi attributi figurano l'arco e la freccia.

Il pianeta Venere è stato estremamente importante per le antiche civiltà del Centro America (Maya, Aztechi, ...), sia per l'organizzazione del calendario sia per la loro cosmogonia, intimamente legate.

Gli Aztechi contavano gli anni venusiani a gruppi di 5, corrispondenti a 8 anni solari. Venere rappresentava Quetzalcoatl (il Serpente Piumato), risuscitato all'est dopo la sua morte all'ovest. Il ciclo diurno del pianeta, che appare alternativamente a est e ovest (stella del mattino e stella della sera) ne fa un simbolo di morte e di rinascita.

L'associazione con il Sole lo rende talvolta suo messaggero del dio Sole, intermediario fra questo e gli uomini. Nella mitologia Inca il pianeta Venere era noto come Chasca, il *giovane dai lunghi e ricci capelli*: era a-

dorato come paggio del Sole e lo assisteva nel suo sorgere e tramontare.

Venere è presente anche nei miti dei Nativi Americani. La mitologia dei Pawnee contiene molti riferimenti al cielo, al quale affidano un ruolo di primo piano nella creazione del mondo. Tirawahat, dio supremo, padre e signore dell'universo che comanda i movimenti degli astri, ha imposto il matrimonio fra la *Stella del Mattino* e la *Stella della Sera* (il pianeta Venere era da loro erroneamente distinto in due corpi), unione dalla quale è nata la donna. L'uomo era nato dall'unione di Sole e Luna. Alla *Stella del Mattino* era dedicato un rito che prevedeva il sacrificio di una giovane prigioniera, la quale, dipinta di rosso e di nero ad indicare il confine tra giorno e notte, viene trafitta con le frecce che la invieranno verso la *Stella del Mattino*, suo sposo celeste.

Tra gli Anasazi si racconta di Cacciatore di Cervi e di Fanciulla Grano Bianco, due giovani bellissimi che non avevano occhi che l'uno per l'altra. Un giorno la fanciulla morì, ma il giovane non volle lasciarla partire sola ed insieme sono stati trasportati in cielo, Cacciatore di Cervi come Venere (per la prima volta in senso maschile) e Fanciulla Grano Bianco come Mercurio.

In Asia i Buriati, popolo di pastori nomadi, vedono nel pianeta lo spirito tutelare dei loro cavalli, il pastore celeste che guida il suo gregge di stelle; il ratto rituale della fidanzata si ricollega al suo culto. Per i kirghisi, come per gli antichi popoli dell'Asia Minore, Venere è figlia della Luna, in quanto stella della sera.

Gli antichi Turchi la chiamavano *Arlig* (il guerriero, il maschio) o anche la *Stella di luce* e *Coholban* (il brillante, lo splendente).

In Australia Venere, come stella del mattino (Barnumbir per gli aborigeni), era un importante segno per un popolo che si levava all'alba per cacciare. Secondo una tradizione della terra di Arnhem Land (penisola a nord dell'Australia), Barnumbir aveva paura di annegare, così fu legata con un lungo laccio tenuto da due vecchie donne. La corda le impediva di salire troppo alta nel cielo e di annegare nel fiume della Via Lattea. All'alba le donne più vecchie la portavano in salvo in un cesto intrecciato. Barnumbir è anche identificata con Bralgu, l'isola della morte dove, quando una persona muore, il suo spirito è condotto.



Fig. 4.9 - La Venere di Milo (Museo del Louvre, Parigi) è stata scolpita nel IV secolo a.C. e scoperta nel 1820.

Nella Grecia classica era nota col nome di Afrodite; appare in ogni mito come il prototipo della bellezza

femminile. Nell'antica Roma assunse il nome di Venere e rappresentava il fascino ed il desiderio sensuale; a lei era dedicata la primavera.

Nell'Iliade di Omero Afrodite è figlia di Zeus e Dione, ma Esiodo, nella sua Teogonia, narra che nacque dalla schiuma del mare fecondata dal seme di Urano in una serena giornata di primavera e su una conchiglia fu trasferita a Pafo nell'isola di Cipro. Il nome Afrodite deriva da *aphrs*, schiuma e il suo soprannome Anadyomene significa *colei che emerge dal mare*. Venere divenne la moglie, spesso infedele, di Vulcano, dio del fuoco e della lavorazione dei metalli. Tra i suoi molti amanti ebbe Marte, Anchise, padre di Enea, Adone, un bellissimo pastore per il cui amore rivaleggiò con Persefone, regina del mondo sotterraneo. Venere generò anche Cupido, dio dell'amore.



Fig. 4.10 - Sandro Botticelli, La nascita di Venere,
Galleria degli Uffizi, Firenze

Il mito più conosciuto è quello che la vede in gara

con Era e Atena; il troiano Paride, giudice della gara, le assegnò il pomo della vittoria ottenendo in cambio la donna più bella del mondo, Elena, moglie di Menelao, re di Sparta; così ebbe inizio la guerra di Troia, che la vide proteggere la città (in particolare il figlio Enea). Nonostante la distruzione della città, la stirpe troiana sopravvisse per dare origine alla città di Roma, che la onorò come particolare protettrice.

Molti autori greci e latini le dedicarono sonetti e poesie: tra questi Saffo e Lucrezio.

4.4.2 - Venere nella fantascienza

La presenza di vita sugli altri mondi, in particolare su quelli del Sistema Solare, è un tema fondamentale discusso da filosofi e scienziati ma oggetto di numerose storie e romanzi.

Secondo l'astronomo francese Pierre Gassendi (1592-1655) la quantità variabile di radiazione solare che raggiungeva i pianeti ne avrebbe caratterizzato le condizioni di vita, determinando così la natura dei relativi abitanti: per esempio gli abitanti di Mercurio avrebbero dovuto essere molto più piccoli ed imperfetti rispetto ai venusiani, i quali, a loro volta, sarebbero stati più piccoli dei terrestri.

Anche Bernard de Bovier de Fontenelle (1657-1757) nel suo *Entretiens sur la Pluralité des Monde* (Interviste sulla pluralità dei mondi) del 1686 credeva che Venere fosse abitato: l'autore narra della presenza di civiltà su Mercurio, Venere e Saturno e la sua opera rimase la più popolare del genere fino alla fine del XVIII secolo.

Venere vide la luce come tema di romanzi di fantascienza negli anni '30. Il pianeta veniva dipinto come un

mondo incontaminato con una flora e una fauna simili a quelle che esistevano sulla Terra nel Carbonifero e nel Permiano: giungle, deserti, oceani, vulcani e dinosauri. Le storie narrate riflettevano le avventure coloniali dell'Africa e dell'America occidentale. Tuttavia, Venere ottenne un numero inferiore di recensioni rispetto ai racconti su Marte.

Tra i romanzi più famosi ricordiamo: *Fury* (Furia) di Henry Kuttner del 1947 e *The Space Merchants* (I mercanti dello spazio) di Frederik Pohl e M. C. Kornbluth del 1952 e il ciclo dei romanzi di Edgar Rice Burroughs (l'autore di Tarzan): *Pirates of Venus* (I pirati di Venere) del 1934, *Lost on Venus* (Sperduti su Venere) del 1935, *Carson of Venus* (Carson di Venere) del 1939, *Escape on Venus* (Fuga su Venere) del 1946, *The Wizard of Venus* (il Mago di Venere) postumo, del 1970.

Lo scrittore polacco Stanislaw Lem (l'autore di *Solaris*) fu uno dei primi a creare un'immagine di Venere che riflette le attuali conoscenze delle condizioni della superficie del pianeta. Nel suo romanzo *The Astronauts* (Gli astronauti) del 1951, descrive la superficie del pianeta come un luogo infernale.

Venere era il luogo di un secondo giardino dell'Eden nella novella di C. S. Lewis *Perelandra*. Nel poema epico di Olaf Stapledon *Ultimo e Primo Uomo* Venere è un idilliaco oceano dove le creature umane acquistano la capacità di volare. Nell'universo di Star Trek Venere è la sede dell'Accademia Starfleet dove si studia terraforming. Venere è menzionato brevemente in *3001: L'Odissea Finale* di Artur C. Clarke. Anche Isaac Asimov ambienta su Venere uno dei racconti di Lucky Starr (*Lucy Starr and the Ocean of Venus* – 1954).

I primi sorvoli a breve distanza dei mezzi spaziali sovietici e americani ed i dati da essi trasmessi posero fine ai romanzi di fantascienza classici su Venere. Tali dati infatti rivelarono che Venere era il luogo meno adatto ad avventure di colonizzazione.

4.5 - LA STRUTTURA FISICA DI VENERE

È difficile parlare di Venere senza tirare in ballo la Terra. I due pianeti presentano infatti forti somiglianze e, allo stesso tempo, enormi differenze tra loro. Il contrasto rende lo studio affascinante e fornisce indicazioni per una possibile evoluzione del clima terrestre nel futuro.

4.5.1 – La superficie

Le forze che hanno plasmato il volto di Venere sono, come per la Terra, di origine vulcanica e tettonica: ma i risultati, tanto dissimili, testimoniano come gli stessi meccanismi possano operare diversamente quando le condizioni iniziali differiscono anche solo per pochi e (apparentemente) trascurabili dettagli. Il fatto che Venere non possieda attualmente degli oceani e che, anzi, l'acqua sia molto scarsa può essere conseguenza di uno di questi "dettagli".

La classificazione in uso per la superficie individua tre tipologie di terreno:

- Altipiani (circa 2 km o più al di sopra del livello medio del pianeta)
- Bassopiani o pianure (al di sotto del livello medio del pianeta)
- Mesoterre (da 0 a circa 2 km sopra il livello medio del pianeta)

(è inevitabile riferirsi a un livello medio “artificiale” quando i mari non esistono, come nel caso di Venere). Gli altipiani coprono circa il 20% della superficie di Venere, mentre bassopiani e mesoterre si dividono equamente il resto. Il pianeta ha distese di territorio più vaste della Terra, la cui superficie complessiva è maggiore, ma per gran parte occupata da oceani.

La distribuzione di livello della superficie (ipsometria), ha un notevole grado di uniformità: i tre quinti di Venere si trovano a una quota entro i 500 m rispetto al livello medio del pianeta. In questo la Terra è molto diversa, perché esiste una netta biforcazione di livello tra oceani e terre emerse.

All'interno della classificazione generale esistono morfologie tipiche di ogni territorio, di solito molto diverse dalle analoghe terrestri; alcune poi non hanno alcun equivalente sulla Terra (né su altri pianeti, a quanto sembra). Tra le morfologie tipicamente venusiane segnaliamo i *Chasmata* (profondi crepacci), le *Planitiae* (zone pianeggianti create dall'attività vulcanica), le *Coronae* e le *Novae* (strutture approssimativamente circolari) e le *Tesserae* (terreno a creste, di andamento quasi caotico).

Le morfologie più comuni sugli altipiani sono i vulcani e le spianate cristalline; un caso a parte è poi la regione più elevata del pianeta, *Ishtar Terra*.

Le morfologie dei bassopiani sono linee e archi di creste di corrugamento e di frattura.

Per le morfologie delle mesoterre abbiamo infine coronae, novae e chasmata.

Analizzeremo ora le caratteristiche più importanti dei territori venusiani.

4.5.1.1 – Gli altipiani

I vulcani. Si ritiene che gli edifici vulcanici si trovino in corrispondenza di zone di fuoriuscita del magma dal mantello sottostante la crosta di Venere. In questo caso esiste un'analogia terrestre, quella dei cosiddetti punti caldi; un esempio di queste strutture è quella che ha dato origine all'arcipelago delle isole Hawaii. Un'altra analogia è la forma delle strutture venusiane, identica ai vulcani a scudo della Terra: mancano invece vulcani dalla classica forma a cono (stratoconi) come il Vesuvio.

L'insistenza sulla forma dell'edificio vulcanico non è una questione estetica. I vulcani a scudo (ne sono esempi l'Etna e i vulcani delle Hawaii) possiedono lave più fluide, di composizione principalmente basaltica, mentre gli stratoconi hanno lave più acide e ricche di silicati, la cui maggiore viscosità favorisce l'accumulo in pendenze più accentuate (da cui la tipica forma) e la tendenza all'ostruzione del camino vulcanico, con conseguenti eruzioni esplosive. Questo rende gli stratoconi molto più pericolosi per gli insediamenti umani rispetto ai vulcani a scudo, le cui effusioni sono più abbondanti ma più fluide.

Non sono stati finora individuati stratoconi nel Sistema Solare fuori dalla Terra; questo fatto appare legato al fenomeno della tettonica a placche, che sembra essere una peculiarità tutta terrestre.

La posizione degli edifici vulcanici di Venere coincide con marcate anomalie positive di gravità e con spessori di crosta più sottili; il materiale del mantello, infatti, è sempre più denso di quello che compone la crosta.

Accanto ai vulcani si osservano spesso spaccature della crosta e le morfologie note come tesserae: si tratterebbe del più antico terreno di Venere.

Le altezze dei rilievi possono essere notevoli. Il culmine è toccato dai Maxwell Montes, le cui cime raggiungono i 13 km sopra le pianure circostanti. Non esistono su Venere catene montuose sul tipo di quelle terrestri (che nascono dalla tettonica a placche) e tali elevazioni vengono raggiunte molto gradualmente, secondo le pendenze tipiche dei vulcani a scudo. Le dimensioni sono quindi maggiori rispetto alle analoghe morfologie terrestri, come nel caso di Marte.

Può sembrare un paradosso, ma nonostante innumerevoli indizi e segnali di intensa attività vulcanica, che certamente deve aver plasmato gran parte della superficie, non è stata ancora direttamente osservata un'eruzione vulcanica su Venere.

Le spianate crostali. Sono regioni con bordi ripidi che raggiungono altezze di 2-4 km sulle pianure circostanti, con le massime quote proprio sui margini. La topografia è piuttosto accidentata, su scale dell'ordine dei 10 km. Morfologie irregolari come le tesserae occupano larga parte delle spianate crostali. Le deformazioni fanno assumere al terreno un aspetto caratteristico a pieghe allineate, che in corrispondenza dei margini diventa estremamente irregolare.

A differenza degli edifici vulcanici, in queste regioni le anomalie di gravità sono scarse o assenti.

Ishtar Terra. È la regione mediamente più elevata di Venere e comprende anche i Maxwell Montes. Creste a pieghe si estendono per centinaia di km, a quanto pare il risultato di una contrazione della crosta; esse restano però confinate ai margini, mentre la zona più interna di Ishtar (Lakshmi Planum) non mostra alcuna deformazione di rilievo. Non si osservano novae o coronae in questa regione.

Insieme alle spianate crostali, Ishtar Terra viene interpretata come una zona di flusso di magma semisolido in risalita dal mantello verso l'esterno del pianeta: i corrugamenti sui margini corrisponderebbero al flusso di ritorno dello stesso magma verso l'interno. Questo è solo un esempio di come lo stesso meccanismo fisico, in principio simile a quello delle celle convettive nel mantello terrestre, dia luogo su Venere a morfologie completamente inconsuete (per noi).

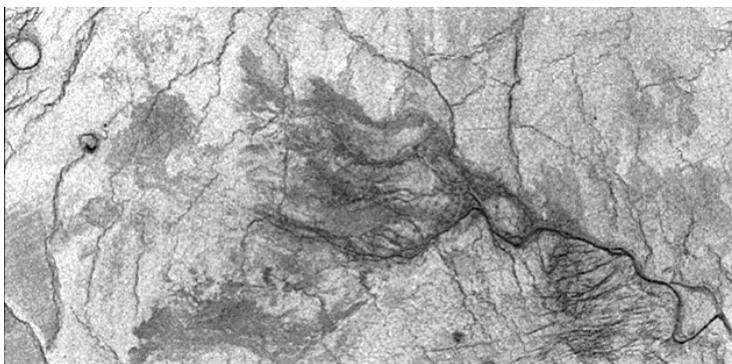


Fig. 4.11 – Formazioni create da lava ad altissima temperatura

4.5.1.2 - Pianure e bassopiani

Tali regioni appaiono molto oscure al rilevamento radar (che permette di vedere oltre la coltre di nubi che avvolge Venere); ciò suggerisce che si siano formate in seguito a vaste eruzioni di lava (con canali ancora ben visibili) in epoche diverse, sovrapposte l'una all'altra e con deformazioni della crosta. Forse la composizione della lava ha subito variazioni nel tempo: alcune zone (vedi figura 4.) mostrano tracce di lava più ricca in carbonati e solfati, che indica temperature di quasi 100 °C superiori a quelle odierne in alcuni periodi della storia passata di Venere.

Sono presenti archi di creste e di fratture, creste di corrugamento (simili a strutture marziane, terrestri e lunari) e fratture di estensione. Alcune morfologie si estendono su zone vaste migliaia di km² e le loro dimensioni suggeriscono un'azione dinamica operata dal mantello convettivo sottostante su ampie zone della superficie.

Venere non ha una litosfera frazionata in placche come la Terra, dove le deformazioni restano limitate ai confini tra una placca e l'altra. Gli archi di creste e fratture hanno elevazione media di 500 m sopra le pianure circostanti e possono superare i 1000 km di lunghezza.

Le creste di corrugamento sono alte 1-2 km, lunghe decine o anche centinaia di km; le fratture di estensione sono anche più larghe e mostrano un andamento più rettilineo.

4.5.1.3 – Mesoterre

Coronae e novae. Si tratta di strutture circolari (oltre 360), esistenti solo su Venere; si trovano spesso vicine ai chasmata o alle creste. Le dimensioni variano dai 100 km ai 2600 km per le coronae (valori tipici: 200-300 km), mentre per le novae l'estensione è inferiore ai 100 km. Le coronae mostrano reti di fratture radiali e concentriche; le novae hanno solo fratture radiali, e forse potrebbero rappresentare coronae nello stadio iniziale di formazione. Si ritiene che entrambe le strutture possano crescere per le sollecitazioni del mantello convettivo sottostante: tuttavia esse non risultano direttamente correlate a punti caldi, né ad anomalie di gravità. Morfologie di questo tipo si spiegano come il risultato di attività vulcanica moderata o anche intensa. Caratteristica è l'elevazione centrale a cupola, con bordi rialzati e fossato esterno. Al cessare dell'attività vulcanica il centro della cupola crolla: questo spieghereb-

be le fratture concentriche nelle coronae (che rappresenterebbero lo stadio morfologico più maturo).

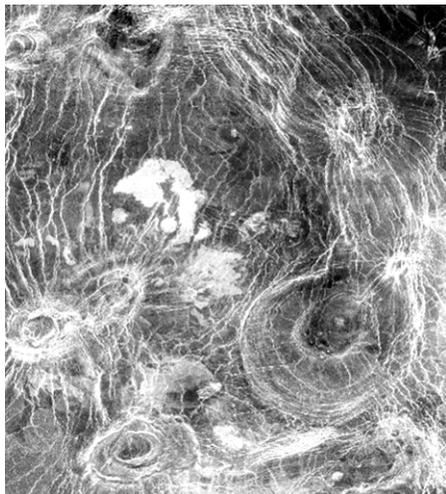


Fig. 4.12 – Coronae e novae

I chasmata. Sono spaccature, anche molto profonde, della crosta del pianeta. Si distinguono in simmetrici e asimmetrici, con andamento che può essere lineare o ad arco. I chasmata asimmetrici sono affiancati su un lato da una cresta, la cui altezza è pari alla profondità della fossa: si osservano anche fratture secondarie, con andamento parallelo. La differenza di quota tra la cima e il fondo può arrivare a 7 km, su distanze orizzontali di circa 30 km. I chasmata simmetrici, molto meno profondi, hanno larghezze comprese fra 50 e 150 km. Anche se non è ancora stato accertato, potrebbe trattarsi di vere e proprie fosse tettoniche.

4.5.1.4 - I crateri da impatto

Un discorso speciale meritano gli impatti meteoritici. La densa atmosfera venusiana frena, più di quella ter-

restre, i corpi in arrivo dallo spazio (fino a ~ 1 km di diametro); i più grandi riescono però a lasciare crateri, anche di grandi dimensioni, sulla superficie. Non mancano quelli a fondo piatto e provvisti di picco centrale. Gli impatti maggiori mostrano notevoli depositi di detriti (anche se l'atmosfera frena gli impatti secondari) e flussi di materiale lavico in uscita dal cratere, che creano solchi e valli nel loro cammino (in figura 4.13, un impatto in Aphrodite Terra: le dimensioni in orizzontale sono di 370 km).

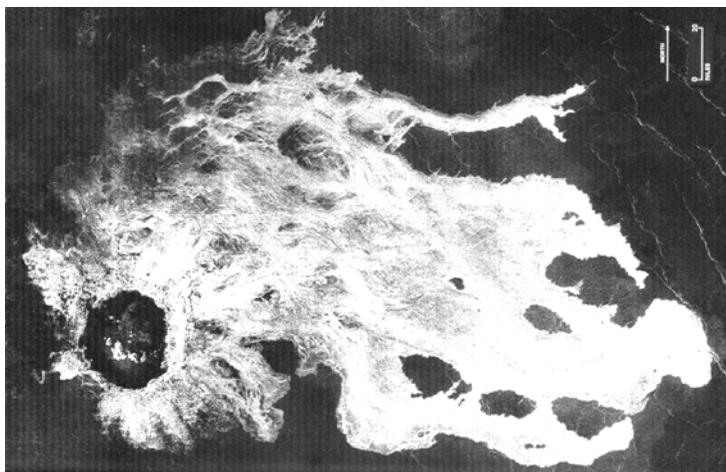


Fig. 4.13 – Cratere da impatto con ejecta in Aphrodite Terra

I meteoroidi più piccoli esplodono nell'atmosfera, lasciando macchie circolari ben riconoscibili.

I rilevamenti della sonda Magellan (1990) hanno catalogato 963 crateri da impatto, il cui studio ha permesso la stima d'età dell'attuale superficie: da 300 a 600 milioni di anni. I crateri sono disposti in modo casuale sulla superficie: almeno l'80% ha morfologie giovani, con flussi di lava e detriti non interrotti o cancellati da eventi tettonici e/o vulcanici successivi.

L'assenza di acque superficiali e di forti venti concorre a preservare le morfologie superficiali fino a quando non vengono cancellate da nuovi episodi (vulcanici, tettonici o da impatto). Vulcanesimo e tettonica hanno agito, sembra, molto di frequente: l'età della crosta di Venere indica che il pianeta è ancora molto attivo dal punto di vista geologico.

La giovinezza della superficie spiega l'assenza di crateri antichi, ma c'è un problema. In un ambiente privo di erosione la loro distruzione può essere stata solo opera di meccanismi vulcanici e tettonici, le cui tracce appaiono solo sul 20% dei crateri attuali. Questa percentuale è troppo bassa: in un pianeta così attivo i processi di rimodellamento devono essere stati molto più intensi.

Una spiegazione alternativa è che i crateri siano stati letteralmente cancellati da flussi lavici molto estesi. La casualità della disposizione attuale dei crateri impone però che tali flussi abbiano percorso tutta la superficie del pianeta e non solo alcune aree limitate. Una distruzione completa della crosta di Venere, a partire da 800 e fino a 500 milioni di anni fa, non ha paragoni nella storia della Terra ed è un'ipotesi che incontra molte critiche. Spiegazioni più "digeribili" (che non mettono in questione il tasso di craterizzazione osservato per il pianeta, visto che è compatibile con le morfologie degli altri pianeti interni) "addolciscono" la portata di un simile evento, diluendone gli effetti in un processo di rinnovamento della superficie che continua fino ad oggi. Un tale scenario deve comunque preservare, in ogni sua fase, la casualità nella distribuzione dei crateri.

4.5.2 – La struttura interna

Il motore dell'attività vulcanica è lo stesso di quello che opera sulla Terra: il calore interno generato dal decadimento degli elementi radioattivi fonde le rocce, creando grandi sacche di magma. Le proprietà di quest'ultimo (composizione chimica, temperatura, contenuto in gas e volatili) ne definiscono la viscosità, che a sua volta determina la morfologia vulcanica risultante. Come già sottolineato più volte, i risultati sono nettamente diversi dalle morfologie terrestri.

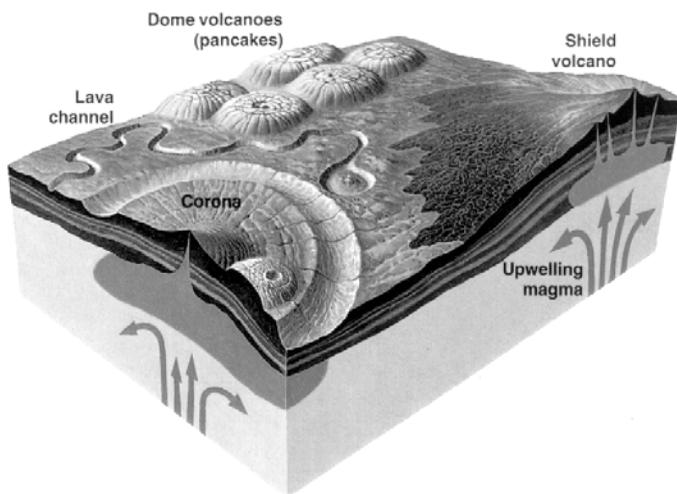


Fig. 4.14 – Possibili meccanismi endogeni

L'attività eruttiva si esplica nei vulcani a scudo, nelle caldere e nelle spaccature della crosta; oggi non esistono stratoconi come il Vesuvio, ma potrebbero esservene stati in passato.

Il vulcanesimo è attivo nelle mesoterre e sugli edifici vulcanici degli altipiani, anche se tracce di passata attività si trovano praticamente ovunque sul pianeta: canali sinuosi, pianure laviche, cupole, eccetera. Le dimensioni tipiche per i vulcani e le caldere vanno da 20 km fino a oltre 100 km.

Le morfologie vulcaniche sembrano per la maggior parte il risultato dell'effusione di lave di tipo basaltico, come quelle dei vulcani a scudo terrestri. Possibili eccezioni – tutte, comunque, relegate al passato - sono forse le cupole (create da lave molto viscoso e ricche di silicati come quella del Vesuvio) e alcune reti di canali (dovute all'azione di lave carbonatiche molto fluide).

Venere e la Terra si distinguono nettamente per la dinamica della crosta. I movimenti sono in prevalenza orizzontali per la Terra, verticali per Venere; quest'ultimo non ha (più) acqua sufficiente per sostenere il movimento di placche litosferiche. Nelle zone di risalita del materiale dal mantello si trovano vulcani a scudo e pianure crostali degli altipiani; in quelle di discesa si formano archi montuosi (diversi dalle catene terrestri) prodotti dall'ispessimento e dalla compressione della crosta.

Venere e Terra hanno densità medie comparabili; anche l'interno è simile e diviso in nucleo, mantello e litosfera. Venere non ha però campo magnetico apprezzabile, forse a causa della lentissima rotazione che non ha permesso l'innescò dell'"effetto dinamo" in un nucleo che, per dimensioni e composizione, è abbastanza simile a quello terrestre.

La viscosità del mantello venusiano non sembra troppo diversa dai valori terrestri, nonostante Venere sia molto più asciutto della Terra; la riserva di calore interno (proporzionale al volume, a parità di composizioni chimi-

che) è comparabile per i due pianeti, e così anche le riserve di magma.

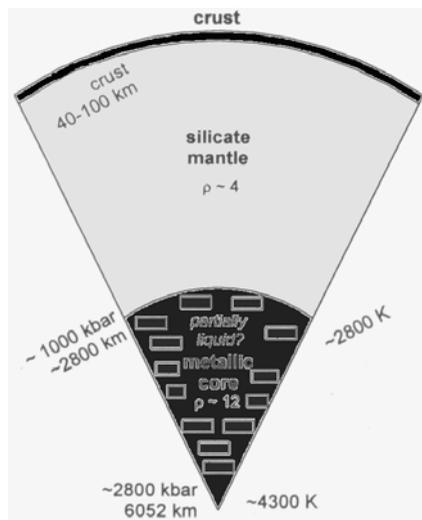


Fig. 4.15 – Modello della struttura interna di Venere

Una netta differenza, però, è l'assenza su Venere della parte superiore del mantello (*astenosfera*), ricca d'acqua, che sulla Terra lubrifica le placche permettendo loro di muoversi. La litosfera venusiana è a diretto contatto col mantello interno, i cui moti convettivi si ripercuotono sulla tettonica della superficie.

Tutto il processo sembra aver perduto vigore nel corso del tempo e la formazione di nuove morfologie (creste di corrugamento, flussi lavici) è rallentata progressivamente; esistono infatti, come già accennato, indicazioni dell'esistenza nel passato di lave con punto di fusione più elevato rispetto quelle odierne.

4.5.3 – L'atmosfera

La composizione è già di per sé eloquente: 96,5% anidride carbonica (CO₂), 3,5% azoto (N₂) più tracce di altri gas, tra i quali ricordiamo l'anidride solforosa (SO₂), il vapore acqueo (H₂O, meno di 100 parti per milione), OCS, l'ossido di carbonio (CO) e gli acidi cloridrico (HCl), fluoridrico (HF) e solforico (H₂SO₄). L'ossigeno è praticamente assente (meno di 0,1 parti per milione).

La pressione è di 95,6 atmosfere, ovvero quella che esiste negli oceani terrestri a circa 1000 m di profondità; la densità è 64,79 kg/m³, cinquanta volte il valore dell'atmosfera terrestre. La temperatura, infine, si aggira intorno ai 480°C, rendendo il pianeta persino più caldo di Mercurio. Non vi sono differenze rilevanti tra equatore e poli.

Esiste uno strato permanente di nubi tra i 50 e 65 km di quota, e foschie più sottili possono estendersi fino a 80-90 km: tali formazioni sono composte essenzialmente di acido solforico concentrato (lo zolfo dà il colore giallastro osservabile visualmente).

Su Venere l'effetto serra è infernale; il 70% della radiazione solare in arrivo è assorbita dalle sole nubi sopra i 50 km di quota, che la riemettono poi nell'infrarosso, dove viene però catturata dai gas serra atmosferici (CO₂ e anche la scarsa H₂O).

Gli altissimi valori di temperatura e pressione mantengono le rocce superficiali in uno stato semiplastico: ciò facilita il ciclo di scambio dell'anidride solforosa (SO₂) tra atmosfera e superficie.

All'inizio della storia del pianeta l'acqua doveva essere presente in quantità simili a quelle terrestri, come suggeriscono i modelli di formazione del Sistema Solare

per la regione che comprende Venere e la Terra. Nel corso del tempo, però, essa è stata dissociata in H e O nell'alta atmosfera dalle radiazioni ultraviolette provenienti dal Sole. L'idrogeno, più leggero, è progressivamente sfuggito nello spazio (facilitato in questo dalle alte temperature del pianeta), mentre l'ossigeno si è combinato con lo zolfo. Un indizio di questo processo è il valore del rapporto tra il deuterio (D), che è un isotopo dell'idrogeno (ma più pesante di quest'ultimo), e l'idrogeno, misurabile nell'atmosfera di Venere: si ha $[D/H]_{\text{VENERE}} = 150 [D/H]_{\text{TERRA}}$. Dunque da Venere è sfuggito molto più idrogeno che dalla Terra (salvata dalla maggiore lontananza dal Sole e dalle temperature più basse).

La mancanza d'acqua ha impedito che la CO_2 formasse, come sulla Terra, rocce carbonatiche (come per esempio il calcare CaCO_3); tutta l'anidride carbonica si è così riversata nell'atmosfera.

Il vero motivo della scomparsa dell'acqua (oggi 100000 volte meno abbondante rispetto ai valori terrestri) è la maggior quantità di energia in arrivo dal Sole: più del doppio rispetto a quella che raggiunge la Terra. L'acqua è così potuta passare allo stato di vapore, rinforzando l'effetto serra e aumentando ulteriormente la temperatura in un circolo vizioso. La scomparsa dell'acqua ha anche modificato i meccanismi di dissipazione di calore interno, impedendo ogni possibilità di sviluppo di una tettonica a placche su Venere.

L'atmosfera di Venere è attiva dal punto di vista dinamico (l'energia non manca, perché le nubi ne assorbono molta): tuttavia le forze di Coriolis responsabili dei vortici atmosferici sono trascurabili, perché la lentissima rotazione del pianeta le rende influenti. Sono stati misurati venti alla superficie piuttosto deboli, anche se a quote

comprese tra i 40 e i 60 km le Venera hanno registrato venti fino a 60 m/s. L'alta atmosfera ruota molto più velocemente della superficie del pianeta (circa in 4 giorni, e con moto retrogrado rispetto ad essa), in un processo che non è ancora stato compreso nei dettagli, anche se sembra governato dal Sole; recentissima è la scoperta, da parte della sonda europea Venus Express (giunta nei pressi di Venere nella primavera 2006), di un vortice di nubi centrato sul il polo Sud.

La situazione atmosferica attuale è di blocco. I gas responsabili dell'effetto serra hanno azione complementare: ciascuno di essi assorbe radiazioni a lunghezze d'onda differenti, rendendo assai difficile smaltire il calore in eccesso. Il fatto che i diversi picchi di assorbimento non coincidano garantisce un'efficace cattura dell'energia e mantiene stabile l'effetto serra.

4.5.4 – Origine ed evoluzione

Venere nasce insieme agli altri pianeti del sistema solare – circa 4,55 miliardi di anni fa – dai residui della nube di gas che aveva appena formato il Sole.

Le zone dove si trovano Venere e la Terra hanno composizione chimica molto simile, giustificando l'idea che i due pianeti nascano effettivamente come gemelli.

Secondo il modello oggi più accreditato, anche Venere in questo stadio possiede degli oceani primordiali: forse avvia anche un processo di tettonica a placche.

La differenza cruciale tra i due pianeti in questa fase è l'intensità dell'irraggiamento solare. Il Sole è circa del 30% meno brillante rispetto a oggi, ma riversa comunque su Venere più del doppio dell'energia ricevuta dalla Terra – e con maggiori dosi di radiazioni ultraviolette.

Durante il periodo che va da 4,5 a 3,9 miliardi di anni fa Venere ha una litosfera più sottile e un'attività vulcanica più intensa rispetto a oggi. I gas serra (sempre SO₂, CO₂ e vapore acqueo) vengono immessi dall'interno del pianeta nell'atmosfera, che diventa densissima anche grazie all'intensa radiazione solare. La temperatura è perfino superiore a quella attuale. Si formano dense nubi che, se da un lato tendono ad accrescere l'effetto serra, contribuiscono però a lungo andare al raffreddamento dell'atmosfera. Verso la fine del periodo questo effetto prevale e la temperatura scende, anche se non fino al punto da condensare in acqua il vapore. Le molecole di quest'ultimo vengono dissociate nell'alta atmosfera dalla radiazione ultravioletta del Sole: l'idrogeno sfugge così gradualmente nello spazio.

Prima che il bombardamento meteoritico primordiale cessi (intorno a 3,9 miliardi di anni fa) un grosso asteroide colpisce lateralmente il pianeta, inclinandone l'asse di rotazione fino a 177°.

L'assenza di acqua impedisce un efficace assorbimento e riciclaggio di CO₂ e SO₂ nelle rocce superficiali. L'effetto serra riprende allora il sopravvento: tuttavia non si raggiungono le temperature precedenti, perché l'attività vulcanica diminuisce (pur rimanendo abbastanza alta da rinnovare periodicamente la superficie).

L'astenosfera di tipo terrestre scompare e la litosfera aumenta di spessore, rispondendo alle sollecitazioni del mantello convettivo interno con la costruzione di edifici vulcanici (nei punti caldi di risalita del magma) o generando corrugamenti (nelle zone di discesa del magma).

Si verifica un nuovo aumento dell'attività vulcanica, innescato forse da un incremento della convezione all'interno del mantello; la superficie viene rimodellata

completamente (questo processo è ancora oggetto di discussione).

Tutte le morfologie preesistenti vengono cancellate, ma circa 500 milioni di anni fa il parossismo vulcanico lascia il posto a un'attività più tranquilla.

L'aspetto del pianeta è determinato dai successivi impatti e dall'attività vulcanica e tettonica residua, fino a oggi. Non ci si attendono grosse novità per i prossimi cinquecento milioni di anni; Venere sembra destinato a rimanere un inferno, almeno secondo gli standard terrestri.

Quello che invece cambierà sicuramente è l'aspetto della Terra. Indipendentemente dall'effetto serra di origine antropica, il destino del nostro pianeta è segnato; invecchiando, il Sole diventa sempre più brillante, quindi finiremo per subire presto o tardi la stessa sorte di Venere. Per fortuna non succederà tanto presto: tra circa un miliardo di anni si prevede per la temperatura terrestre un aumento sufficiente a far evaporare tutti gli oceani. Le fasi successive dovrebbero essere abbastanza simili a quelle che Venere ha già sperimentato molto tempo fa.

Siamo giunti alla fine del capitolo. Questa è la storia di due pianeti nati come gemelli e resi poi radicalmente diversi dalla loro evoluzione... che finirà per renderli nuovamente simili.

TERRA

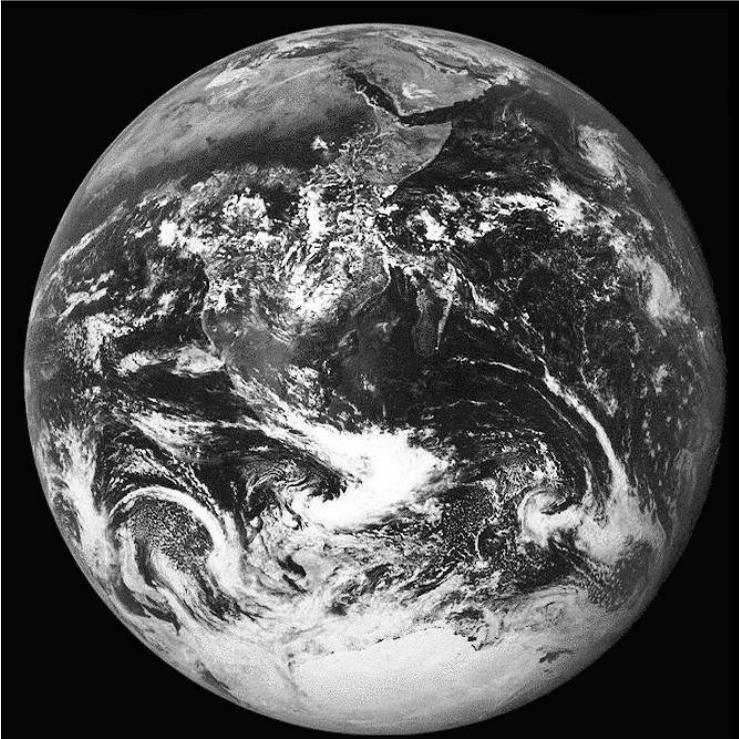


Fig. 5.1 - La Terra dallo spazio ripresa dall'Apollo 17 nel 1972

5.1 – PARAMETRI FISICI

La Terra è il terzo pianeta a partire dal Sole ed è il più grande dei pianeti rocciosi. Ha la forma di una sfera leggermente schiacciata ai poli: il raggio all'equatore è di 6378,136 km e ai poli è di 6356,753 km, con una differenza di 21,383 km.

Lo schiacciamento (definito come raggio massimo meno raggio minimo diviso raggio massimo) è quindi 0,003353.

In molti calcoli la Terra viene considerata come una sfera di raggio 6371,010 km (questo valore è in effetti il raggio medio).

La superficie totale della Terra è di 510.000.000 km² dei quali 361.000.000 km² (circa il 70,8%) sono ricoperti dai mari, il restante (29,2%), pari a 149.000.000 km², è invece la superficie delle terre emerse. La profondità media degli oceani è di 3794 m, con un massimo di 11020 m nella Fossa delle Marianne. L'altezza media dei continenti, sul livello del mare, è di 874 m, il massimo è il Monte Everest altro 8848 m.

Il volume totale della Terra è di $1,0832 \cdot 10^{12}$ km³, di cui gli oceani occupano solo $1,37 \cdot 10^9$ km³ pari allo 0,126%

La massa della Terra è di $5,9736 \cdot 10^{24}$ kg, quindi la densità media è di 5,52 g/cm³.

L'accelerazione di gravità media è $g_0 = 9,82022$ m/s²; poiché questa dipende dal raggio della Terra, essa assume un valore minimo all'equatore: $g_E = 9,78033$ m/s² e un valore massimo ai poli: $g_P = 9,83219$ m/s².

La velocità di fuga all'equatore è $v_F = 11,18$ km/s = 40248 km/h.

La temperatura superficiale media è di 15°C con valori estremi che possono raggiungere +60°C e -90°C.

La Terra ha un unico satellite naturale: la Luna. La conquista dello spazio ha creato attorno alla Terra un anello costituito da manufatti grandi e piccoli, in buona parte privi di utilità: sono stati catalogati e vengono continuamente monitorati circa 9000 oggetti con dimensioni superiori a 10 cm, ma si stima che ci possano essere circa 100.000 oggetti di dimensioni comprese tra 1 e 10 cm e un numero imprecisato con dimensioni minori. La maggior parte si trova in orbite comprese tra 500 e 800 km e forma

un guscio sferico; alla distanza di 36000 km si trovano i satelliti geostazionari (la loro rotazione intorno alla Terra è di 24 ore e quindi si trovano sempre sulla verticale di un punto) che sono concentrati sul piano equatoriale a formare un vero e proprio anello.

5.2 – CENNI SULLA STRUTTURA INTERNA

Una prima suddivisione della Terra può essere fatta tra il globo terracqueo e l'atmosfera (vedi figura 5.2). Il globo terracqueo è suddiviso in vari strati ciascuno dei quali ha una distintiva conformazione chimica.

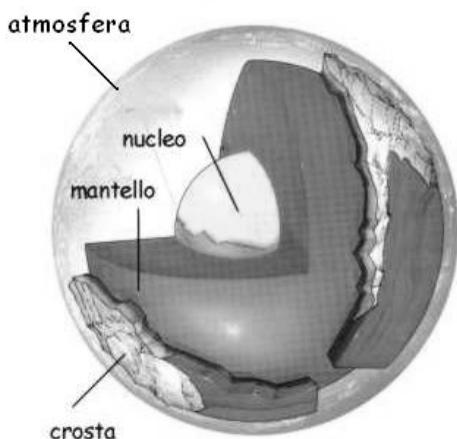


Fig. 5.2 – Struttura della Terra

La *crosta* è la parte più esterna del pianeta, un involucro rigido e sottile il cui spessore varia da una media di 35 km sotto i continenti (con massimi di 60-70 km in corrispondenza delle grandi catene montuose) a una media di 6 km sotto i fondi oceanici. Alla base della crosta vi è una discontinuità sismica, nota come *superficie di Mohorovicic* o *Moho*.

Il *mantello* rappresenta circa i 4/5 del volume della Terra e si estende dalla Moho fino a 2900 km di profondità; un'altra discontinuità, detta *superficie di Gutenberg* (o *di Wiechert-Gutenberg*), lo separa dal nucleo. La temperatura sale da poche centinaia di gradi in prossimità della crosta fino a circa 3000°C in prossimità del nucleo; parallelamente la pressione sale da 9 atm fino a 1,4 milioni di atmosfere e la densità da 3,3 g/cm³ a 5,6 g/cm³. La combinazione di temperatura e pressione fa sì che il materiale del mantello sia solido: in base alla omogeneità della struttura si distinguono un *mantello superiore* (fino a 700 km di profondità) e un *mantello inferiore*.

Il *nucleo* è la parte più interna ed ha un raggio di circa 3470 km. La temperatura supera i 4000 °C e la pressione i 3,6 milioni di atmosfere. La densità, che in prossimità della discontinuità di Gutenberg è di 9,7 g/cm³, nel centro della Terra arriva fino ai 13 g/cm³. L'analisi delle onde sismiche ha evidenziato che la parte più esterna del nucleo (fino a 5170 km di profondità) ha le caratteristiche di un fluido e un'ulteriore discontinuità (*superficie di Lehmann*) indica il passaggio a una regione solida fino al centro della Terra. Si ritiene che il nucleo sia principalmente composto da ferro e da nichel e che costituisca circa 1/3 della massa del pianeta (vedi tabella 5.1).

	Massa · 10 ²⁴ kg
atmosfera	0,0000051
oceani	0,0014
crosta	0,026
mantello	4,043
nucleo esterno	0,09675
nucleo interno	1,835

Tabella 5.1 - Massa delle diverse componenti della Terra

5.3 – CENNI SULLA STRUTTURA DELL'ATMOSFERA

L'atmosfera terrestre è un involucro di gas che si assottiglia man mano che ci si allontana dalla superficie; può essere divisa in varie parti sovrapposte (“sfere”) poste a quote variabili con la latitudine e con le stagioni; queste parti sono separate da zone di transizione (“pause”).

Dalla superficie terrestre fino ad un'altezza variabile tra 10 e 12 km (circa 8 km sui poli e 17 km sull'equatore) c'è la *troposfera*, il cui limite superiore viene detto *tropopausa*. È la parte più bassa e quindi più densa dell'atmosfera e contiene circa i 3/4 della massa gassosa e quasi tutto il vapore acqueo. La troposfera viene riscaldata dal calore emesso dalla superficie terrestre, perciò la temperatura media diminuisce con l'altezza nella ragione di circa 0,6 °C ogni 100 m. Dato il diverso spessore, al limite superiore, le temperature sono di -45 °C sopra i poli e di -70 °C sopra l'equatore.

Sopra la tropopausa si trova la *stratosfera*, spessa circa 40 km, dove l'aria è sempre più rarefatta (il 99% dell'intera atmosfera si trova entro i primi 30 km di altezza); molto secca e quasi priva di pulviscolo, come unica attività meteorologica mostra delle nubi madreperlacee, probabilmente composte da cristalli di ghiaccio. Nella stratosfera è presente l'ozono, che raggiunge la massima concentrazione tra i 30 e i 40 km di altezza ed è fondamentale per l'assorbimento delle radiazioni ultraviolette. La temperatura rimane costante fino a 20 km poi aumenta fino a raggiungere il massimo intorno ai 50 km. La *stratopausa* la separa dalla *mesosfera*, sempre meno densa, dove la temperatura riprende a diminuire fino a raggiungere, intorno agli 80 km, un minimo variabile tra i -70°C e i -

90°C. A questa quota si osservano le nubi *nottilucenti*, costituite probabilmente da particelle di ghiaccio e polveri molto sottili, che evidenziano l'esistenza di correnti con velocità anche di 300 km/h. La *menopausa* costituisce il limite con la *termosfera* che si estende dagli 80-90 km fino a 400-450 km e che termina verso l'alto con la *termopausa*. Questa regione è caratterizzata da un continuo aumento della temperatura con l'altezza; secondo i calcoli, tra i 110 e i 120 km dovrebbe essere intorno a 0°C, a 150 km dovrebbe già essere di qualche centinaio di gradi e al limite superiore, vicino alla termopausa, supererebbe il migliaio di gradi. Una caratteristica molto importante dell'atmosfera al di sopra di 50 - 70 km è la sua *ionizzazione*, cioè la presenza di un grandissimo numero di particelle elettricamente cariche (ioni) prodotte dai raggi X e ultravioletti provenienti dal Sole e dai raggi cosmici. Per questo motivo la termosfera viene anche detta *ionosfera*. Nella ionosfera si manifestano le aurore polari.

Oltre la termopausa ha inizio la *esosfera* che si estende fino a circa 2000 - 2500 km. In effetti il limite dell'atmosfera dovrebbe coincidere con le zone in cui la densità del gas uguaglia la densità della corona solare, ma essendo questa molto variabile, anche il limite dell'atmosfera è variabile.

L'atmosfera terrestre è composta per il 78% da Azoto (N), per il 21% da Ossigeno (O); il rimanente 1% è costituito da Argon (Ar), tracce di anidride carbonica (biossido di carbonio CO₂), vapore acqueo (H₂O) e da altri gas. L'atmosfera primordiale con tutta probabilità aveva una composizione sostanzialmente diversa da quella attuale.

5.4 – I MOTI DELLA TERRA

Il nostro pianeta è dotato di diversi movimenti simultanei che ne fanno variare la posizione nello spazio rispetto agli altri corpi celesti, producendo conseguenze molto importanti su numerosi fenomeni che hanno luogo sulla superficie terrestre.

5.4.1 – Moto di rotazione

Uno dei principali moti della Terra è il moto di rotazione che essa compie intorno al proprio asse, da ovest verso est, cioè in senso inverso all'apparente moto diurno della Sfera Celeste e del Sole. La durata di questo movimento rispetto alle stelle è di 23,9344726 ore = 23h 56min 4,1s.

Ogni punto della Terra compie in un giorno un intero giro di 360° , quindi, qualunque sia la lunghezza del parallelo da esso descritto, la velocità angolare di rotazione è identica a tutte le latitudini ed è pari a 15° ogni ora. La velocità periferica (ossia la distanza percorsa da un punto della superficie, nell'unità di tempo) varia invece con la latitudine: essa è massima all'Equatore, dove raggiunge il valore di circa 465 m/s (= 1674 km/h), e va diminuendo verso i poli, dove diventa nulla.

Il movimento di rotazione della Terra non è perfettamente uniforme: misure eseguite con orologi atomici hanno dimostrato l'esistenza di piccolissime variazioni. Le osservazioni astronomiche moderne e antiche, ed alcune prove paleontologiche, hanno evidenziato un graduale rallentamento della velocità di rotazione per cui la durata del movimento si allunga di circa un secondo ogni 50000 anni. Questo rallentamento è dovuto all'attrito delle maree;

essendo la velocità angolare di rotazione della Terra maggiore della velocità angolare di rivoluzione della Luna, quest'ultima esercita un'azione frenante e la Terra tende a trascinarsi dietro i rigonfiamenti delle maree. È questo che produce il rallentamento della rotazione terrestre. Per reazione la Luna tende ad allontanarsi dalla Terra. Ciò si verificherà fino a che la durata della rivoluzione della Luna attorno alla Terra non diverrà uguale alla durata della rotazione terrestre: in quel momento la Terra presenterà alla Luna sempre la stessa faccia e terminerà l'azione di frenamento.

Anche se in pratica possono essere considerate trascurabili, queste variazioni non consentono di fissare l'unità di misura del tempo basandosi sulla effettiva durata della rotazione terrestre^[1].

Già in antichità alcuni filosofi ritenevano che la Terra ruotasse su se stessa, ma solo in tempi recenti questa idea si è solidamente affermata; in effetti non è possibile rendersi conto in modo diretto di questa rotazione. Oggi disponiamo però di molte prove.

Per prima cosa, se osserviamo il moto apparente dei corpi celesti da est verso ovest, possiamo fare questa considerazione. Se non fosse la Terra a ruotare su se stessa, le stelle, le cui posizioni relative rimangono invariate nel cielo, dovrebbero avere velocità direttamente proporzionali alla loro distanza dall'asse di rotazione terrestre; ciò sarebbe alquanto singolare (perché ci troveremmo al

[1] Nel passato l'unità di misura del tempo, il secondo (simbolo s) veniva definito come la 86400-esima parte del giorno solare medio (che era appunto di 24 ore). Oggi, il Sistema Internazionale di Unità di misura adotta per il secondo la seguente definizione: il secondo è la durata di 9.192.631.770 oscillazioni della radiazione emessa dall'atomo di cesio 133 (¹³³Cs) nello stato fondamentale ²s_{1/2} nella transizione dal livello F=4, M=0 al livello iperfine F=3, M=0 (XIII CGPM, 1967).

centro dell'Universo) e comunque le più lontane dovrebbero avere velocità maggiori di quella della luce.

Un'altra prova indiretta della rotazione terrestre si deduce dall'analogia con gli altri pianeti: tutti ruotano su se stessi e non ci sono motivi credere che il nostro sia speciale.

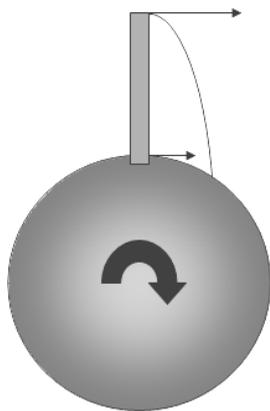


Fig. 5.3 – L'esperimento di Guglielmini.

Esperimenti di fisica ci permettono di avere altre evidenze. Il più famoso è l'esperimento eseguito da G.B. Guglielmini, tra il 1791 e il 1792. Egli lasciò cadere numerosi oggetti dalla Torre degli Asinelli in Bologna, osservando uno spostamento orizzontale di circa 17 mm per una altezza di caduta di circa 100 m. Questo fatto può essere spiegato se si tiene conto che un corpo posto in cima della torre, essendo leggermente più distante dall'asse di rotazione della Terra, ha una velocità tangenziale maggiore rispetto a quella che ha la base della torre. Ciò comporta che, rispetto alla torre, il moto di caduta sia una parabola e quindi il corpo cada leggermente spostato rispetto alla verticale.

Un'altra prova del moto di rotazione della Terra fu fornita dall'esperienza di Foucault, che misurò la variazio-

ne del piano di oscillazione di un pendolo rispetto al suolo. Questo esperimento è facilmente realizzabile a livello qualitativo; per la prima volta fu eseguito all'Osservatorio di Parigi e nel 1851 pubblicamente nel Panthéon di Parigi.

La conseguenza più immediata del moto di rotazione è l'alternarsi del dì e della notte. I raggi solari, che giungono sulla Terra quasi paralleli tra loro, illuminano in ogni istante solo la parte della superficie terrestre che è rivolta verso il Sole; poiché la rotazione si compie in un tempo molto più breve della intera rivoluzione intorno al Sole, sulla superficie terrestre si alternano un periodo di illuminazione, il dì, e uno di oscurità, la notte. Il termine giorno indica l'insieme del dì e della notte.

L'emisfero illuminato è diviso da quello in ombra da una circonferenza massima (circolo di illuminazione) che si sposta con continuità sulla superficie terrestre. In realtà non si tratta di una linea netta, ma di una fascia dove il passaggio dal dì alla notte è graduale; ciò dipende dalla presenza dell'atmosfera.

5.4.2 – Il moto di rivoluzione

La Terra, come gli altri pianeti del Sistema Solare, descrive un'orbita ellittica intorno al Sole: si trova all'afelio (punto più distante a circa 152.100.000 km) fra il 6 e il 7 luglio di ogni anno, al perielio (punto più vicino a circa 147.100.000 km) tra il 5 e il 6 gennaio. La linea che unisce l'afelio e il perielio si chiama *linea degli apsidi*.

L'orbita è poco schiacciata, tanto da poterla considerare quasi circolare; la sua eccentricità (il rapporto tra la distanza del Sole dal centro dell'ellisse e la lunghezza del semiasse maggiore) è 0,0167 (per una circonferenza il valore dell'eccentricità è uguale a zero).

L'intera ellisse orbitale ha una lunghezza di circa 940 milioni di chilometri; essa viene percorso ad una velocità variabile (II legge di Keplero) compresa tra 29,3 km/s all'afelio ed i 30,3 km/s al perielio: la velocità media è di circa 29,8 km/s. Il tempo che la Terra impiega a compiere un'orbita completa è 365,25636 d = 365d 6h 9min 9,5s e viene chiamato anno sidereo^[2].

Tra le prove del moto di rivoluzione possiamo considerare ancora l'analogia con gli altri pianeti del Sistema Solare; anche la periodicità annua di alcuni gruppi di stelle cadenti è un indicatore del fatto che la Terra si muove nello spazio.

La prova più evidente del moto orbitale della Terra fu fornita dall'aberrazione della luce delle stelle scoperta nel 1727 da J. Bradley dell'Osservatorio astronomico di Greenwich. Per osservare un astro con il telescopio bisogna inclinare lo strumento leggermente in avanti, nel senso del moto di rivoluzione della Terra. Ciò perché la luce proveniente dall'astro impiega un certo tempo a percorrere l'asse ottico del telescopio e ad arrivare al nostro occhio: nel frattempo la Terra si è spostata sulla sua orbita. Essendo la velocità di rivoluzione della Terra molto piccola rispetto a quella della luce, l'inclinazione dello strumento è piccola, ma apprezzabile: per una stella la cui direzione

^[2] Il sistema Terra-Sole in realtà si muove attorno al centro di massa comune, cioè attorno al punto che divide la congiungente i due corpi in due parti inversamente proporzionali alle loro masse (con la parte più corta vicina al corpo di massa più grande e quella più lunga vicina al corpo di massa più piccola). Dato che la massa del Sole è molto maggiore (circa 333.000 volte) di quella della Terra, il centro di massa si trova tanto prossimo al Sole da potersi ritenere praticamente coincidente con il suo centro (è mediamente a 450 km da esso); senza commettere grossi errori si può considerare la Terra in movimento intorno al centro del Sole.

vera sia perpendicolare alla direzione del moto dell'osservatore, l'angolo di aberrazione raggiunge un massimo che al perielio è di $20,50''$ ^[3].

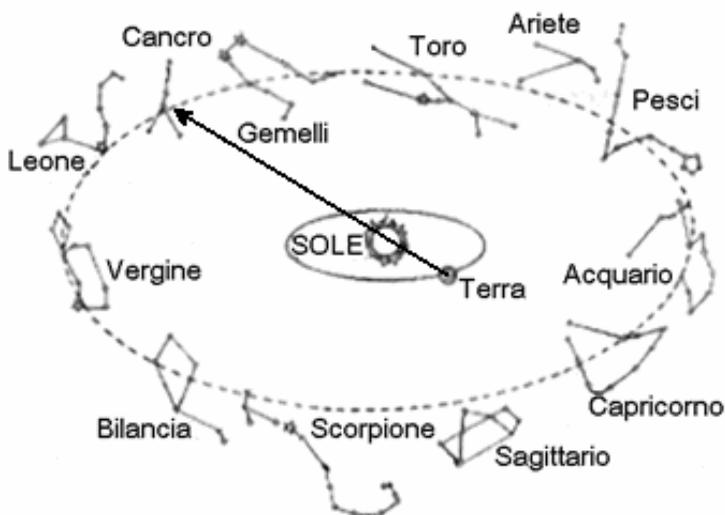


Fig. 5.4 – Moto del Sole sullo Zodiaco

La rivoluzione della Terra intorno al Sole causa il moto apparente di quest'ultimo sullo sfondo delle stelle fisse, lungo una linea detta *eclittica*, che attraversa un insieme di costellazioni disposte su una fascia nota già nell'antichità e che viene chiamata *fascia dello zodiaco* (vedi figura 5.4). Rispetto ai tradizionali segni zodiacali usati e abusati in astrologia, il Sole passa anche nella costellazione di Ophiuco. Nella tabella 5.2 vengono riportate le date in cui il Sole entra in ognuna delle costellazioni dello zodiaco.

[3] Oltre all'aberrazione annua, esiste anche una aberrazione diurna dovuta alla rotazione della Terra; l'angolo che ne deriva è però molto più piccolo, al massimo $0,32''$.

Come ulteriore prova del moto orbitale della Terra intorno al Sole c'è l'alternarsi delle stagioni con variazioni della durata del dì e della notte. Queste sono dovute alla inclinazione dell'asse di rotazione terrestre sul piano orbitale. Un'altra conseguenza è che, lo stesso giorno, la durata del dì e della notte non è identica in tutti i punti della Terra.

Costellazione	data di entrata	
	giorno	ora
Vergine	16 settembre 2005	12
Bilancia	31 ottobre 2005	1
Scorpione	22 novembre 2005	9
Ophiuco	29 novembre 2005	16
Sagittario	18 dicembre 2005	0
Capricorno	19 gennaio 2006	19
Acquario	16 febbraio 2006	5
Pesci	11 marzo 2006	21
Ariete	18 aprile 2006	19
Toro	14 maggio 2006	6
Gemelli	21 giugno 2006	14
Cancro	20 luglio 2006	19
Leone	10 agosto 2006	18
Vergine	16 settembre 2006	19

Tabella 5.2 - Data e ora dell'entrata del Sole nelle costellazioni dello Zodiaco.

L'inclinazione dell'asse di rotazione terrestre di $23^{\circ} 27'$ rispetto alla perpendicolare al piano orbitale fa sì che i raggi del Sole siano perpendicolari ad alcune regioni della Terra comprese tra i $23^{\circ}27'$ a sud dell'equatore e i $23^{\circ}27'$ a nord. Tali latitudini sono dette tropici (rispettivamente del Capricorno e del Cancro). I raggi del Sole sono perpendicolari al Tropico del Capricorno il 21-22 dicembre (solstizio d'inverno), al tropico del Cancro il 21 giugno (solstizio d'estate). Il 21 marzo e il 23 settembre il Sole è allo zenit sull'equatore (equinozi di primavera e

d'autunno). Astronomicamente in questi due giorni il Sole si trova in un punto della volta celeste all'intersezione tra l'eclittica e l'equatore celeste (proiezione dell'equatore terrestre nel cielo). La posizione occupata il 21 marzo si chiama punto γ , quella occupata il 23 settembre punto Ω .

Nei giorni dell'equinozio la durata del dì è uguale a quella della notte in tutti i punti della Terra. Il giorno del solstizio d'estate il circolo di illuminazione è tangente al parallelo $66^{\circ} 33'$ sud (circolo polare antartico), il giorno del solstizio d'inverno è tangente al parallelo $66^{\circ} 33'$ nord (circolo polare artico). Al Polo Nord il dì dura dall'equinozio di primavera all'equinozio d'autunno, viceversa al Polo Sud.

Sull'orbita terrestre possiamo quindi individuare le posizioni occupate nei giorni dei solstizi e degli equinozi. La linea che congiunge i punti degli equinozi è detta *linea degli equinozi*; la linea che unisce i solstizi è perpendicolare ad essa. La linea degli equinozi non coincide con la linea degli apsi: attualmente formano un angolo di circa 12° .

Nei periodi tra le quattro posizioni indicate sopra si hanno condizioni intermedie di illuminazione che variano progressivamente dall'una all'altra. Poiché il calore ricevuto dalla superficie terrestre dipende dalla durata del dì e dall'inclinazione dei raggi solari, si ha l'alternarsi delle stagioni che sono definite nella tabella 5.3.

Emisfero Boreale	Emisfero Australe	dal - al	Durata
Primavera	Autunno	21 mar - 21 giu	92d 21h
Estate	Inverno	21 giu - 23 set	93d 9h
Autunno	Primavera	23 set - 22 dic	90d circa
Inverno	Estate	22 dic - 21 mar	89d circa

Tabella 5.3 - Durata delle stagioni

La diversa velocità della Terra sull'orbita determina una diversa durata delle stagioni. È da notare anche che le stagioni astronomiche non coincidono del tutto con le stagioni meteorologiche a causa di un diverso riscaldamento delle superfici terrestri (l'atmosfera, l'acqua e il suolo immagazzinano e cedono il calore con un certo ritardo); si è stabilito che le stagioni meteorologiche incominciano col primo giorno del mese in cui cade l'equinozio o il solstizio di quelle astronomiche corrispondenti.

I circoli polari e i tropici definiscono anche le cosiddette *zone astronomiche* della superficie terrestre: la *zona polare artica* tra il Polo Nord e il circolo polare artico, la *zona temperata boreale* tra il circolo polare e il tropico del Cancro, la *zona torrida* tra i due tropici, la *zona temperata australe* tra il tropico del Capricorno e il circolo polare antartico e la *zona polare antartica* tra il circolo polare e il Polo Sud.

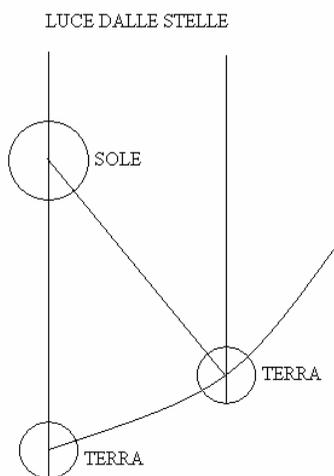


Fig. 5.5 – Giorno solare e giorno siderale

Un'altra conseguenza del moto di rivoluzione della

Terra è la diversa durata del giorno solare e del giorno sidereo. Comunemente per giorno si intende il tempo che la terra impiega a fare un giro su se stessa; però questo periodo è diverso se viene conteggiato rispetto al Sole o rispetto alle stelle. Si distingue quindi tra giorno solare, cioè il tempo che intercorre tra due passaggi successivi del Sole alla massima altezza sul piano dell'orizzonte di un certo luogo, la cui durata è di 24 ore, e giorno sidereo, cioè il tempo che intercorre tra due passaggi consecutivi di una stella su un determinato meridiano della superficie terrestre, la cui durata è di 0,9972697 giorni solari ovvero 23,9344726h. Questa differenza di circa 4 minuti sta nel fatto che mentre la Terra compie una rotazione si muove anche di circa 7030 km lungo la sua orbita e perciò, per rivedere il Sole nella stessa direzione dopo che la Terra ha fatto un giro completo intorno al proprio asse, essa deve descrivere un ulteriore angolo di circa un grado.

5.4.3 – Moti secondari

La Terra è soggetta ad altri movimenti, meno appariscenti di quelli di rotazione e di rivoluzione, ma comunque importanti per la vita. Essi sono la precessione luni-solare, lo spostamento della linea degli apsidi, la variazione dell'eccentricità dell'orbita e il mutamento dell'inclinazione dell'asse terrestre: tutti hanno periodi di millenni. La loro lentezza ne impedisce l'osservazione diretta; accurati studi astronomici (vedi quelli di Milankovitch, sviluppati successivamente da altri ricercatori) e la testimonianza data dalle tracce glaciali rinvenute in zone della Terra che oggi hanno tutt'altro clima, ne dimostrano l'esistenza.

Come parte del Sistema Solare, della Galassia e dell'Universo, la Terra partecipa anche ad altri moti.

5.4.3.1. – Il moto biconico

L'asse di rotazione della Terra non si mantiene sempre parallelo a se stesso; l'attrazione combinata esercitata dal Sole e dalla Luna sull'equatore tende a portare il piano equatoriale a coincidere con il piano dell'orbita, cioè rendere verticale l'asse terrestre. Ne consegue un lento moto a trottola che fa descrivere all'asse terrestre due coni con il vertice al centro della Terra. Questo moto biconico, detto anche di precessione lunisolare, avviene in senso contrario a quello di rotazione terrestre e si compie in 25700 anni circa; lo spostamento è di circa 50" l'anno.

5.4.3.2 – Nutazione

L'azione attrattiva della Luna e del Sole sull'equatore terrestre dipende dalle distanze Sole-Terra e Luna-Terra; la loro variazione nel tempo dà luogo alla *regressione della linea dei nodi*^[4], che provoca delle perturbazioni periodiche nel moto di biconico che si manifestano come oscillazioni con ampiezza massima di 18,4" in un periodo di circa 18,6 anni. Tali oscillazioni vengono dette nutazioni e per effetto di questi movimenti l'asse terrestre, invece di descrivere due coni circolari, si muove secondo coni leggermente ondulati.

5.4.3.3 - Variazione dell'inclinazione

L'asse terrestre, nell'arco di circa 40000 anni, varia la sua inclinazione rispetto alla perpendicolare dell'orbita della Terra, da un minimo di circa 21°55' ad un massimo di circa 24°20' e ritorno al minimo di 21°55'. Questa oscil-

[4] La linea di intersezione fra il piano dell'orbita lunare e il piano dell'orbita terrestre non rimane fissa nello spazio, ma si sposta continuamente, ruotando con un periodo di circa 18,6 anni.

lazione non è regolare ed ha come primo effetto lo spostamento delle latitudini dei Circoli Polari e dei Tropici, e di conseguenza dell'ampiezza delle fasce tropicali e delle calotte polari. Attualmente l'inclinazione di circa $23^{\circ}27'$ sta diminuendo, cioè la Terra si sta "raddrizzando" e si stanno restringendo sia le fasce tropicali, sia quelle polari.

5.4.3.4 – Polodia

L'asse di rotazione terrestre, per diverse cause, tra cui lo spostamento interno delle masse terrestri, non mantiene una direzione costante, ma si sposta lungo una linea irregolare (polodia), approssimativamente entro un quadrato con lato di 20 metri. Questo non significa che la direzione dell'asse può cambiare per via di tale fenomeno: cambiano solo i punti in cui l'asse "esce" dalla Terra, ovvero i punti sulla superficie del globo terrestre dove si trovano il Polo Nord e il Polo Sud geografici. È quanto è avvenuto con il terremoto del dicembre 2004 nell'Oceano Indiano.

5.4.3.5 – Rotazione della linea degli apsidi

A causa dell'attrazione degli altri pianeti del Sistema Solare, la linea degli apsidi presenta un movimento in senso antiorario con una velocità angolare di $11''$ ogni anno, in modo da compiere un giro completo in 117.000 anni. Questo fa sì che l'istante del passaggio del Sole al perielio vari nel tempo (rispetto all'anno sidereo). L'intervallo di tempo che intercorre tra due successivi passaggi del Sole al perielio viene detto *anno anomalistico*; la sua durata è di $365,25964 \text{ d} = 365 \text{ d } 6 \text{ h } 13 \text{ min } 52,9 \text{ s}$.

5.4.3.6 – Precessione degli equinozi

Lo spostamento della linea degli apsidi va "incon-

tro" allo spostamento della linea degli equinozi e ne abbrevia il periodo da circa 25700 a 21000 anni; conseguentemente gli equinozi ed i solstizi cadono ogni anno circa 1'01" in anticipo: è questa la *precessione degli equinozi*. Da ciò segue che l'intervallo di tempo che intercorre tra due solstizi dello stesso nome (o anche tra due equinozi dello stesso nome), che viene detto *anno tropico*, è diverso dal tempo che la Terra impiega a ruotare intorno al Sole (anno sidereo); la durata dell'anno tropico è di 365,2421897 d = 365d 5h 48min 45,2s, cioè circa 20min 24,3s in meno dell'anno sidereo.

La precessione degli equinozi è quindi il risultato della combinazione del moto biconico e dello spostamento della linea degli apsidi. Una conseguenza notevole del moto di precessione è che il prolungamento ideale dell'asse terrestre non va a cadere sempre in corrispondenza della Stella polare. Quest'ultima, che è attualmente assai vicina al Polo Nord Celeste (ne dista poco più di mezzo grado), ne sarà distante circa 47° quando l'asse terrestre avrà percorso metà del suo giro conico, cioè fra circa 13.000 anni; allora la posizione del Nord sarà indicata dalla stella Vega della costellazione della Lira (vedi figura 5.6).

Un'altra conseguenza è gli equinozi non avvengono con il Sole nello stesso punto del cielo; mentre nel IV secolo a.C. il giorno dell'equinozio di primavera il Sole si trovava nella costellazione dell'Ariete, attualmente nello stesso giorno si trova nella costellazione dei Pesci. È come se lo Zodiaco si fosse spostato di una costellazione, ruotando di circa 30° verso oriente.

5.4.3.7 - Variazione della distanza tra i fuochi

La forza di gravità che i corpi del Sistema Solare esercitano sulla Terra produce perturbazioni che col tempo

5.4.3.8 – Moto di traslazione

Il moto di traslazione comprende l'insieme dei moti che la Terra compie a seguito del Sole e della Galassia. Si possono individuare i seguenti moti: il moto del Sole rispetto al centro della Galassia che, secondo le attuali conoscenze, si compie in 225.000.000 di anni, alla velocità di 230 km/s; il moto di avvicinamento della Via Lattea alla galassia di Andromeda alla velocità di circa 40 km/s; il moto dell'intero Gruppo Locale che si sta spostando alla velocità di 600 km/s e che è dovuto sia all'attrazione delle galassie dell'ammasso della Vergine (che può spiegare una delle componenti del moto), sia all'attrazione dovuta al superammasso di galassie in Idracentauro, che a sua volta è in movimento. Alcuni risultati inducono a credere che il Gruppo Locale, l'ammasso della Vergine e il superammasso in Idracentauro (e molte altre galassie) siano sottoposti all'attrazione gravitazionale di una vasta concentrazione di galassie, il Grande Attrattore, posta a distanza ancora maggiore.

Citiamo infine il moto di espansione dell'Universo.

5.4.4 – Conseguenze dei moti millenari della Terra

Ormai è comunemente accettata l'idea proposta da M. Milankovitch nella prima metà del Novecento, secondo la quale i periodi glaciali e interglaciali che si sono susseguiti durante la storia della Terra sono strettamente connessi con i principali moti millenari della Terra. Come si è detto, il clima terrestre è molto sensibile alle variazioni astronomiche, in quanto queste modificano la distribuzione dell'insolazione sul nostro pianeta.

La durata delle stagioni astronomiche dipende dalla velocità con cui la Terra percorre i vari tratti della sua

orbita; a causa della precessione degli equinozi le stagioni non hanno inizio nello stesso punto dell'orbita. Attualmente l'estate nell'emisfero nord inizia quando la Terra è quasi giunta all'afelio, ma tra 10500 anni la situazione sarà opposta; viceversa per l'emisfero sud. È evidente che attualmente le nostre estati sono un po' meno calde e i nostri inverni meno freddi rispetto a quelli dell'emisfero meridionale. La differenza di riscaldamento fra estate e inverno viene detta *escursione calorica annua*. Questa grandezza varia con il ciclo di 21000 anni della precessione degli equinozi, ma è sensibile anche alla variazione dell'eccentricità dell'orbita terrestre. Quando l'eccentricità dell'orbita è massima, è massima anche la differenza delle distanze Sole-afelio e Sole-perielio, cioè il perielio risulta alla minima distanza da Sole, mentre l'afelio è alla massima distanza. In questo caso l'escursione calorica viene amplificata (inverno ancor meno freddo e l'estate ancor più fresca). Quando invece si verifica l'inverno all'afelio e l'estate al perielio l'escursione calorica è ancora maggiore. Se l'eccentricità è minima si riduce la differenza tra le distanze Sole-afelio e Sole-perielio; l'afelio è più vicino ed il perielio è più lontano. In questo caso l'oscillazione dell'escursione calorica è meno evidente.

Mutamenti climatici sono dovuti anche alla variazione dell'inclinazione dell'asse terrestre: per valori più grandi il contrasto tra le stagioni è più accentato.

Si potrebbe pensare che le piccole variazioni indotte da questi moti siano trascurabili ai fini delle mutazioni climatiche terrestri; secondo la teoria di Milankovitch, invece, i moti millenari sono da considerare una delle cause principali delle cinque glaciazioni che si sono verificate nel corso dell'ultima Era (il Quaternario, iniziato circa 2 milioni di anni fa). L'effetto principale è una variazione,

anche fino al 20%, dell'insolazione estiva alle alte latitudini. In queste zone la neve che cade anche durante gli inverni più miti (Terra al perielio), a causa della scarsa insolazione estiva non si scioglie completamente e si accumula anno dopo anno, aumentando il volume dei ghiacciai. Le calotte polari si estendono e si ha un'era glaciale. Viceversa, se l'insolazione estiva è maggiore (estate al perielio) si scioglie, oltre alla neve caduta d'inverno, anche quella accumulatasi negli anni precedenti; i ghiacciai tendono a ritirarsi e sulla Terra si instaura un clima più caldo.

Da qualche secolo la presenza dell'uomo ha modificato questi cicli millenari: non sappiamo cosa potrà succedere in futuro, ma confidiamo nell'intelligenza e, soprattutto, nell'istinto di conservazione della nostra specie.

5.5 – L'ORIGINE DELLA VITA SULLA TERRA

5.5.1 – Introduzione

Prima di cominciare è necessario cercare di chiarire il concetto di “vita”. Certamente una volta o l'altra ci abbiamo pensato tutti: che cos'è la vita? Conosciamo soltanto la vita terrestre e dobbiamo tener presente che questa potrebbe essere una limitazione enorme, tale da condizionarci in maniera decisiva. D'altra parte non abbiamo scelta: è impossibile cercare di immaginare quello che non abbiamo mai visto (e che non sappiamo neppure se esista).

Scartando una dopo l'altra le definizioni suggerite dall'esperienza (qualcosa “che si muove”, “che respira”, “che si riproduce”, ...) arriveremo presto o tardi a concludere che una determinazione sintetica ed esatta del concetto di vita è estremamente difficile. Se cerchiamo ispirazio-

ne dal lavoro degli esperti troviamo per esempio questa definizione di vita fornita dalla commissione NASA del programma di Esobiologia:

“Vita = Sistema chimico autosufficiente, soggetto a evoluzione darwiniana”

Azzardiamo una traduzione in italiano più colloquiale: per “vita” si intende un qualsiasi sistema capace di regolarsi in modo autonomo attraverso reazioni chimiche, in grado di riprodursi, evolversi e anche morire.

Sembra una buona soluzione, ma è facile metterla in crisi. Pensiamo ad un mulo: esso non è “vivo”, perché sterile e quindi non in grado di riprodursi! Chi avesse voglia di cimentarsi nel dare una definizione esatta e sintetica del concetto di vita si accorgerà che la sintesi va invariabilmente a scapito dell’esattezza, e viceversa. Per non chiudere la discussione subito dopo averla cominciata possiamo accettare la definizione data sopra, con l’avvertenza che esistono sempre delle eccezioni alla regola (in questo caso, il mulo e tutti gli altri ibridi sterili).

Poniamoci un’altra domanda: che cosa serve alla vita per esistere? L’elenco, almeno per la vita terrestre, non è lungo:

- a) Molecole con un certo grado minimo di complessità
- b) Una sorgente sfruttabile di energia
- c) Un sistema di gestione delle reazioni chimiche
- d) Un mezzo solvente per le molecole interagenti.

Tali requisiti implicano, con scarse (o nulle?) possibilità di alternative, la necessità di acqua allo stato liquido e di carbonio. L’acqua è infatti un solvente quasi universale e come composto è molto comune nell’Universo; essa fornisce alle molecole della vita un ambiente liquido nel quale esse possono dissolversi e reagire tra loro. Inoltre l’acqua è allo stato liquido in un intervallo di tempera-

ture che può definirsi “giusto”: non tanto basse da bloccare i processi chimici fondamentali, non tanto alte da spezzare i legami chimici tra le molecole.

La necessità del carbonio sta invece nella sua enorme versatilità nel formare legami chimici, più di qualsiasi altro elemento. Le molecole che forma possono essere di grandi dimensioni e di struttura articolata: caratteristiche ideali per svolgere funzioni complesse come quelle richieste dai processi vitali. I legami formati dal carbonio si dissolvono facilmente nell’acqua. Infine, esso è uno degli elementi più abbondanti dell’Universo: il sesto dopo idrogeno, elio, ossigeno, neon e azoto. La sua formazione è quasi inevitabile man mano che le stelle, invecchiando, diventano giganti rosse e stelle di ramo asintotico.

Ci si può chiedere se in qualche altro posto dell’Universo si siano sviluppate forme di vita basate su una chimica diversa da quella del carbonio e con un solvente che non sia l’acqua. Non sappiamo ancora la risposta, ma lo studio della tavola periodica degli elementi ci dice che altri due elementi hanno la possibilità di formare legami chimici abbastanza complessi: si tratta del silicio e del germanio, appartenenti, non a caso, allo stesso gruppo del carbonio. Una ipotetica “vita” a base di silicio avrebbe come solvente naturale l’ammoniaca (NH_3) liquida, e questo composto è comune nel Cosmo quanto l’acqua. Esistono però tre grossi ostacoli: 1) la versatilità chimica del silicio e del germanio è molto inferiore a quella del carbonio 2) silicio e germanio sono molto più rari nell’Universo 3) l’ammoniaca è liquida a temperature così basse (sotto i $-78\text{ }^\circ\text{C}$) che molti processi vitali si bloccherebbero, o sarebbero lentissimi.

Chiudiamo la parentesi delle alternative alla coppia “acqua + carbonio” segnalando l’esistenza di alcuni mi-

croorganismi che riescono ad avere una certa attività biologica nel ghiaccio solido: si tratta di organismi elementari, come le alghe rosa e alcuni nematodi. Anche se questo è un fatto incontestabile, resta limitato alla mera sopravvivenza (questi organismi resistono nel ghiaccio, ma nell'acqua stanno molto meglio!) e non cambia la sostanza della conclusione: allo stato delle conoscenze attuali sembra inevitabile che una forma di vita degna di questo nome sia costituita di molecole a base di carbonio e possa prosperare soltanto in presenza di acqua liquida. Resta inteso, comunque, che dobbiamo essere pronti a modificare le nostre opinioni se dovessero verificarsi delle novità... ma questo vale in ogni ramo della scienza.

TIPO DI COMPOSTO	FUNZIONI SVOLTE	METEORITE MURCHISON
acqua	solvente	SÌ
lipidi	membrane, riserve energia	SÌ
zuccheri	supporto, riserve energia	SÌ
polisaccaridi	” ” ”	NO
amminoacidi	supporto, catalizzatori	SÌ
proteine	” ” ”	NO
fosfati	informazione genetica	SÌ
basi azotate	” ”	SÌ
acidi nucleici	” ”	NO

Tabella 5.4 – Confronto tra i composti necessari alla vita terrestre e quelli rinvenuti nella meteorite di Murchison

5.5.2 – La chimica dell'Universo e il suo ruolo nella nascita della vita

In questo paragrafo cercheremo di farci un'idea delle risorse che l'Universo rende disponibili per la nascita

e lo sviluppo della vita. La tabella 5.4 riporta i composti più importanti nella chimica di un organismo vivente, le funzioni che tali composti svolgono e la loro presenza (o assenza) all'interno di una delle meteoriti più famose: quella caduta nel 1969 nei pressi della cittadina di Murchison, situata nel sud-est dell'Australia. Essa è un esempio di condrite carboniosa (o carbonacea, come si trova spesso tradotto il termine inglese *carbonaceous*), una classe di meteoriti tra le più interessanti perché molto ricche di composti organici ("organico" significa che il composto contiene carbonio: non necessariamente esso è di origine biologica). Tutte le meteoriti provengono dallo spazio esterno, ma sono sempre nate nel nostro Sistema Solare: si tratta di residui del materiale originario che componeva la nebulosa protosolare, ovvero la nube di gas e polveri dalla quale sono nati il Sole e tutti i pianeti. Una parte del materiale condensato dalla nebulosa non si è aggregato in oggetti di grandi dimensioni, ma è rimasto in orbita dando vita agli asteroidi e alle comete (i cosiddetti corpi minori del Sistema Solare): da questa classe di oggetti provengono quasi tutte le meteoriti che giungono sulla Terra.

La tabella 5.5 riporta le abbondanze degli elementi più comuni, rispettivamente, nell'Universo, nella Terra (tutta intera), nella crosta terrestre, negli oceani e nel corpo umano. In parentesi si trova il numero di atomi dell'elemento su un totale di 100.000 atomi (N.B. per le abbondanze in peso i numeri cambiano! Un atomo di ferro, per esempio, pesa 56 volte più di un atomo di idrogeno).

Come sono venuti fuori proprio questi valori di abbondanze? La schiacciante predominanza di idrogeno ed elio nella prima colonna è di origine cosmologica ed è dovuta alla nucleosintesi primordiale nei primi istanti dopo

il Big Bang: gli altri elementi si sono invece formati nel corso dell'evoluzione di varie generazioni di stelle.

Le abbondanze della seconda colonna rispecchiano la composizione della nebulosa protosolare e le condizioni fisiche della zona dove si è formata la Terra: idrogeno ed elio sono scarsi o assenti perché in quella regione la temperatura era troppo elevata per farli condensare.

UNIVERSO	TERRA	CROSTA TERRESTRE	OCEANI	CORPO UMANO
H (92714)	O (48880)	O (60425)	H (66200)	H (60563)
He (7185)	Fe (18870)	Si (20475)	O (33100)	O (25670)
O (50)	Si (14000)	Al (6251)	Cl (340)	C (10680)
Ne (20)	Mg (12500)	H (2882)	Na (290)	N (2440)
N (15)	S (11400)	Na (2155)	Mg (34)	Ca (230)
C (8)	Ni (1400)	Ca (1878)	S (17)	P (130)
Si (2,3)	Al (1300)	Fe (1858)	Ca (6)	S (130)
Mg (2,1)	Na (640)	Mg (1784)	K (6)	Na (75)
Fe (1,4)	Ca (460)	K (1374)	C (1,4)	K (37)
S (0,9)	P (140)	Ti (191)	Si -	Cl (33)

Tabella 5.5 – Abbondanze (in numero di atomi su un totale di 100.000) degli elementi più comuni in vari ambienti

Le differenze tra seconda e terza colonna si spiegano col fatto che il nostro pianeta nelle prime fasi della sua esistenza è stato completamente fuso: gli elementi più pesanti come il ferro sono quindi precipitati per gravità

verso il centro della Terra, lasciando sulla crosta quantità molto piccole (le uniche, comunque, accessibili all'uomo nel corso dei millenni). La quarta colonna non è certo sorprendente: acqua più sali minerali disciolti (soprattutto cloruri di sodio e magnesio). La quinta colonna risente del fatto che il corpo umano – discendente di organismi acquatici - è acqua per circa due terzi: insieme al carbonio si raggiunge il 95% del totale.

Data la sterminata disponibilità di spazio e di materie prime, non sarebbe sorprendente trovare forme di vita in moltissimi posti dell'Universo. Nella comunità degli scienziati si possono individuare tre posizioni: c'è chi ritiene che la Terra sia l'unico luogo dove la vita si è sviluppata, chi all'opposto è convinto che la vita sia diffusa quasi ovunque (con molte civiltà tecnologicamente avanzate) e chi, infine, pensa che la vita sia nata in molti luoghi, ma che la vita intelligente sia rarissima se non addirittura unica. Oggi non è possibile dare una risposta definitiva. Le analisi spettroscopiche delle grandi nubi interstellari (come M42 nella costellazione di Orione), concentrate nei bracci a spirale della nostra galassia, ci hanno permesso di scoprire una quantità incredibile di molecole complesse, molte delle quali organiche: anzi, nella Via Lattea la maggior quantità di composti organici si trova nelle nubi, non qui sulla Terra.

Non conosciamo con precisione i meccanismi che portano alla formazione di molecole complesse nello spazio interstellare: sappiamo che l'interno di una nube abbastanza densa contiene tutti gli elementi necessari a costruire tali molecole, e in più scherma le radiazioni ultraviolette, che con la loro energia tendono a spezzare i legami chimici. Sembra che i grani di polvere fungano da nuclei di condensazione per le specie chimiche del gas, permet-

tendo nel tempo l'aggregazione di molecole molto elaborate.

Nel 1953 Stanley Miller effettuò un esperimento rimasto celebre nella letteratura scientifica. Seguendo le ipotesi dell'epoca sulla composizione dell'atmosfera primitiva, egli pose in un contenitore idrogeno, metano ed ammoniaca in contatto con vapore acqueo in ebollizione: al miscuglio venivano somministrate scariche elettriche, a simulare i fulmini. Analizzando i depositi formatisi dopo alcuni giorni nel recipiente furono rintracciati composti organici complessi, addirittura alcuni amminoacidi (che sono i mattoni delle proteine, fondamentali per ogni organismo vivente); molti di essi furono ritrovati in concentrazioni più o meno simili nella meteorite Murchison.

Negli anni successivi l'esperimento di Miller è stato ripetuto diverse volte, variando le condizioni per adattarle alle nuove ipotesi: per esempio, oggi non si ritiene più che l'idrogeno fosse presente nell'atmosfera primitiva terrestre, mentre si dà per certa la presenza dell'anidride carbonica (CO₂). L'esperimento dimostra in modo evidente la facilità di ottenere molecole organiche complesse da composti chimici semplici, come quelli presenti sulla Terra e anche nelle grandi nubi interstellari della Via Lattea.

Una domanda fondamentale, alla quale non sappiamo ancora rispondere, è questa: se la vita si può davvero sviluppare in molte parti del Cosmo, quella terrestre è nata proprio qui oppure viene dall'esterno? L'ipotesi di una colonizzazione del nostro pianeta da organismi provenienti dallo spazio, detta panspermia, ha avuto alterne fortune nel corso dei secoli, godendo del sostegno di grandi scienziati come il chimico svedese Svante Arrhenius negli anni Venti e, ai giorni nostri, di astrofisici del calibro di sir Fred Hoyle. Una possibilità è, per esempio, che all'interno

delle comete si siano sviluppati dei microorganismi elementari, poi giunti negli oceani terrestri dopo la caduta di questi corpi sul nostro pianeta (un fenomeno piuttosto frequente, soprattutto all'inizio della storia del Sistema Solare). Per qualche novità su questo fronte sarà necessario aspettare il completamento della missione Rosetta, tra circa dieci anni.

5.5.3 – La Terra alle origini: conoscenze acquisite e problemi non risolti

La nascita del Sistema Solare e la formazione della Terra risalgono a 4,55 miliardi di anni fa, con un'incertezza di circa 50 milioni di anni. Possiamo essere così precisi grazie alle datazioni fornite dal decadimento di alcuni elementi radioattivi come l'uranio-235, l'uranio-238, il potassio-40 e il rubidio-87, le cui abbondanze sono state misurate nelle rocce terrestri e lunari e nei meteoriti caduti sulla Terra. Sul nostro pianeta non esistono più rocce originarie, perché l'intensa attività geologica terrestre le ha distrutte o trasformate; quelle più antiche risalgono a circa 4,2 miliardi di anni e mostrano già le tracce di trasformazioni precedenti (metamorfismo). Le conclusioni che è possibile trarre dallo studio dei minerali più antichi sono di grande interesse:

- a) l'evidenza di contatto con acqua allo stato liquido ci dice che, circa 4 miliardi di anni fa, esistevano distese di acqua (forse oceani veri e propri) e alcuni scudi continentali, che dettero origine ai primi continenti;
- b) si avevano temperature tra 0 °C e 100 °C, almeno nei luoghi di formazione delle rocce che sono state a contatto con l'acqua;
- c) il nostro pianeta aveva già subito una differenziazione

strutturale in nucleo, mantello e crosta;

- d) erano all'opera processi di erosione e sedimentazione molto simili a quelli odierni, come anche un'intensa attività tettonica (placche)
- e) l'ossigeno nell'atmosfera doveva essere scarso, perché mancano ossidi metallici nelle rocce più vecchie. Questa situazione cambiò gradualmente, fino probabilmente a capovolgersi circa 2,3 miliardi di anni fa.

I risultati appena esposti sono attendibili, ma lasciano aperte questioni che è necessario risolvere. Ne possiamo individuare quattro:

- 1) La teoria dell'evoluzione stellare (che ha conseguito grandi successi) prevede che il Sole appena formato fosse del 25-30% meno brillante rispetto a oggi: questo porterebbe sotto zero la temperatura superficiale della Terra. Come poteva esserci acqua allo stato liquido?
- 2) Da dove è venuta l'acqua della Terra? È arrivata insieme con il materiale che ha formato il nostro pianeta, oppure è venuta in un secondo tempo dall'esterno? E in tal caso, da dove?
- 3) Qual era la composizione dell'atmosfera primitiva e come si è arricchita di ossigeno al passare del tempo?
- 4) Quando e come si sono formati i primi organismi viventi?

Ecco le migliori risposte di cui per ora disponiamo:

- 1) L'effetto serra, dovuto al metano (CH_4) e soprattutto all'anidride carbonica (CO_2) presenti nell'atmosfera, può aver mantenuto sulla Terra temperature sufficientemente alte da preservare l'acqua allo stato liquido. Il ruolo svolto dall'anidride carbonica sul nostro pianeta è fondamentale almeno quanto quello dell'ossigeno: essa deve trovarsi in atmosfera per mitigare la temperatura, ma non oltre certi limiti. Semplificando in modo un po' brutale, possiamo

dire che i regolatori della concentrazione atmosferica di questo gas sono da un lato i vulcani, che dall'interno della Terra immettono CO₂ nell'atmosfera, e dall'altro gli oceani, che la assorbono fissandola nei sedimenti sotto forma di rocce carbonatiche (come il calcare CaCO₃). Inoltre il riciclaggio della crosta attraverso il meccanismo della tettonica a placche contribuisce al riassorbimento di CO₂ all'interno del pianeta. Senza gli oceani l'anidride carbonica tende ad accumularsi in atmosfera fino a diventarne il costituente principale: proprio questo è accaduto ai pianeti nostri vicini, Venere e Marte. La Terra è riuscita a mantenere una sufficiente riserva di acqua (perché più lontana di Venere dal Sole e di dimensioni maggiori rispetto a Marte); entro certi limiti il meccanismo è stabile, perché un innalzamento delle temperature accresce anche il tasso di assorbimento di CO₂ da parte degli oceani. Ma non si può certo contare su questo per mantenere sotto controllo l'aumento dovuto all'attività umana. Recentemente sono emersi indizi che indicano in passato qualche intoppo nel ciclo della CO₂. Si sono scoperte tracce di depositi glaciali risalenti a quattro periodi diversi dell'Era Proterozoica, (da 2,5 miliardi a 580 milioni di anni fa). Tali depositi si trovavano al livello del mare e a latitudini corrispondenti per quell'epoca a regioni equatoriali. Ciò si può spiegare con un'anomala inclinazione orbitale dell'asse terrestre (più di 54°!), oppure con calotte di ghiaccio estese a tutto il pianeta: questa è l'ipotesi che appare più plausibile, perché non sono documentate nell'"archivio" geologico e geomagnetico variazioni molto grandi dell'asse di rotazione: la presenza della Luna ha sempre avuto un effetto stabilizzatore sulla sua inclinazione (per esempio l'asse di rotazione di Marte è variato nel passato tra 15° e 35°, molto più di quello terrestre). Gli strati di questi depositi glaciali con-

tengono anche rocce ricche di ossidi di ferro, e ciò suggerisce che già 2,3 miliardi di anni or sono l'atmosfera contenesse una buona percentuale di ossigeno. Sopra i depositi si possono poi osservare rocce carbonatiche formatesi in tempi molto rapidi (poche centinaia, o addirittura decine, di anni): questo fa pensare a uno scioglimento repentino del ghiaccio, con un ritorno dell'oceano. In conclusione, sembra emergere un quadro inaspettato di brusche variazioni climatiche governate da oscillazioni molto marcate del livello atmosferico di CO_2 .

2) La distribuzione dell'acqua nel Sistema Solare primitivo è in generale legata a quella dei cosiddetti elementi volatili: H_2O , N_2 , CO_2 , CH_4 , i gas nobili Ne, Ar, Kr, Xe, più molti altri composti ed elementi (l'attributo "volatile" è un po' tirato per i capelli, visto che persino un metallo densissimo come l'iridio è considerato parte della categoria!). Le abbondanze attuali di volatili sulla Terra non sono certo uguali a quelle primitive, ma è comunque possibile rintracciare una correlazione tra passato e presente: questo ci permette di dire che c'era poca acqua nella zona del Sistema Solare dove si è formato il nostro pianeta, perché le temperature piuttosto alte non ne permisero la condensazione. Se allora inizialmente non c'era acqua a sufficienza per gli oceani, si possono considerare due possibilità:

- a) minerali ad alto grado di idratazione sono stati incorporati nella proto-Terra in formazione
- b) numerosi impatti di comete hanno arricchito la Terra di acqua (e composti organici).

Non si può ancora scegliere con certezza tra le due ipotesi, ma una risposta potrebbe venire dallo studio diretto dei nuclei cometari. Finora le nostre sonde hanno potuto analizzare le comete Hyakutake e Halley. Come è possibile distinguere campioni di acqua provenienti da diverse parti

del Sistema Solare? Uno dei metodi più efficaci è la misura dell'abbondanza di deuterio (D): con questo nome si indica un nucleo di idrogeno che contiene, insieme al protone, anche un neutrone (e questo lo rende ovviamente più pesante). Una piccola percentuale di D₂O (detta anche acqua pesante) è contenuta in ogni campione di H₂O, ma il valore cambia a seconda della provenienza: dunque il rapporto delle concentrazioni deuterio/idrogeno [D/H] è una "firma" che permette di individuare acque formatesi in zone diverse. La tabella 5.6 riassume i risultati delle analisi finora effettuate. I dati sono ancora molto parziali, ma vanno contro l'ipotesi che la maggior parte dell'acqua degli oceani terrestri provenga dalle comete; tuttavia un certo contributo resta comunque plausibile e non può essere escluso.

Corpo analizzato	Rapporto [D/H]
Terra	$1,5 \cdot 10^{-4}$
C. Halley	$3,16 \cdot 10^{-4}$
C. Hyakutake	$2,82 \cdot 10^{-4}$

Tabella 5.6 – Confronto del rapporto [D/H] per la Terra e per due comete

3) La Terra in formazione non era in grado, anche per l'alta temperatura, di trattenere i gas più leggeri come l'idrogeno e l'elio. La prima atmosfera "durevole" venne dall'interno del pianeta per degassamento, attraverso le eruzioni vulcaniche e gli impatti meteoritici (molto più frequenti rispetto ad oggi): i suoi componenti erano vapore acqueo, azoto (N₂), anidride carbonica (CO₂), anidride solforosa (SO₂) e metano (CH₄). L'ossigeno era assente o molto scarso: se ne poteva produrre una piccola quantità per dissociazione delle molecole di vapore acqueo operata dall'intensa radiazione ultravioletta solare (il giovane So-

le, benché meno brillante di oggi, emetteva una maggiore quantità di radiazione UV). Mancano comunque nelle rocce più antiche gli ossidi come FeO e Fe₂O₃, e al loro posto compare l'FeS.

Gli impatti di asteroidi e comete avevano una duplice conseguenza: arricchivano il pianeta di elementi volatili, ma quelli più catastrofici potevano far disperdere di nuovo i gas nello spazio. Però i processi di degassamento ricostituivano sempre l'atmosfera.

Circa 3,9 miliardi di anni fa il bombardamento cessò quasi completamente in tutto il Sistema Solare interno, come confermato dalla datazione dei crateri su Mercurio, Venere, Marte e la Luna.

Una grossa differenza rispetto ad oggi è che mancava lo strato di ozono perché era assente l'ossigeno, la specie chimica sua progenitrice. Poiché le radiazioni ultraviolette sono estremamente nocive per le molecole organiche complesse, è facile supporre che i primi organismi viventi siano nati in ambienti dove l'irraggiamento non poteva arrivare, probabilmente il fondo degli oceani o l'interno dei sedimenti rocciosi. Col tempo l'atmosfera si arricchì progressivamente di ossigeno, grazie al processo di chemiosintesi operato da organismi simili ai cianobatteri (alghe azzurre) durante l'era Archeana, da 3,9 a 2,5 miliardi di anni fa. La chemiosintesi produce sostanze nutritive utilizzando come sorgente di energia una successione di reazioni chimiche e non la radiazione solare. L'ossigeno attuale è dunque il prodotto dell'attività biologica dei primi organismi terrestri. Un indizio dell'aumento della sua concentrazione si trova nelle formazioni di ferro a strati dette BIF (dall'inglese *Banded Iron Formations*), rocce ricche di ossidi di ferro che compaiono a partire da circa 3,9 miliardi di anni fa e contengono enormi quantità di ossidi, come

limonite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ed ematite (Fe_2O_3); spesse pochi millimetri, si estendono per decine di km. Non hanno analoghi moderni e la loro origine è incerta, ma si ritiene che l'ossigeno per la loro formazione provenisse dall'attività chemiosintetica di organismi che vivevano sul fondo marino, in corrispondenza di punti caldi della crosta terrestre. Questi ambienti esistono ancora oggi e ne riparleremo più avanti: dunque potrebbe darsi che il ferro sia stato utilizzato per chemiosintesi da microorganismi che vivevano sul fondale oceanico e che lo arricchirono di ossigeno. Successivamente le colonie batteriche sarebbero state trasportate dalle correnti in tratti di mare poco profondi, ambienti adatti alla sedimentazione degli organismi. Col tempo il materiale organico sarebbe stato riciclato nella catena alimentare, lasciando sul posto solo gli ossidi di ferro visibili oggi nella roccia.



Fig. 5.7 – Stromatoliti moderne (Baia degli Squali, Australia Occidentale)

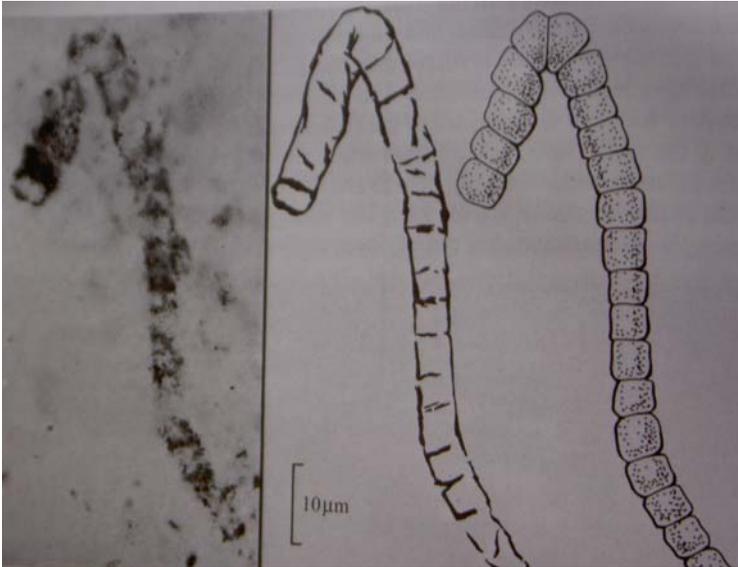


Fig. 5.8 – Sezione di stromatolite fossile. Da sinistra a destra: microfotografia, disegno e possibile ricostruzione

4) Non abbiamo traccia di questi antichi microorganismi e possiamo solo immaginarli simili a quelli che ancora oggi utilizzano la chemiosintesi. Però forse possediamo qualcosa dei loro discendenti fotosintetici, che già sfruttavano l'energia del Sole: le stromatoliti. Si tratta di sedimenti di origine organica; le alghe verdi-azzurre e i cianobatteri odierni fissano l'azoto e producono ossigeno, formando sedimenti dello stesso tipo. Le più antiche rocce simili alle stromatoliti risalgono a 3,46 miliardi di anni fa. È plausibile che le abbiano formate organismi simili ai cianobatteri, liberando ossigeno nell'oceano e poi in atmosfera. Sezioni di queste antiche "stromatoliti" contengono strutture filamentose molto simili ai cianobatteri (vedi figura 5.8). Per onestà di informazione bisogna anche dire che di recente (Brasier, 2002) si è ipotizzata per tali strutture un'origine

non biologica, ma chimica: esse risulterebbero da deposizione di carbonio operata da fluidi a temperatura molto alta, filtrati attraverso i sedimenti. I filamenti sono molto più grandi dei cianobatteri odierni e, secondo questa ipotesi, avrebbero anche dovuto sopportare valori di temperatura compresi tra 250°C e 350 °C. Il problema resta tuttora aperto.

Un diverso approccio alla ricerca delle prime forme di vita terrestri ci viene fornito dalle abbondanze isotopiche del carbonio. L'isotopo di un elemento è un atomo che ha lo stesso numero di protoni, ma un differente numero di neutroni: le proprietà chimiche dell'elemento restano le stesse, ma cambiano alcune proprietà fisiche come la massa e la stabilità. Molti isotopi sono instabili e decadono emettendo radiazione. Il deuterio, di cui abbiamo già parlato, è un isotopo dell'idrogeno. Il carbonio-12 (^{12}C) ha un nucleo composto da 6 protoni e 6 neutroni; il carbonio-13 (^{13}C) ha 6 protoni e 7 neutroni; il carbonio-14 (^{14}C) ha 6 protoni e 8 neutroni: è un nucleo instabile, soggetto a decadimento radioattivo.

Sulla Terra il rapporto $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ è 1/9, e questo significa che il carbonio-12 è nove volte più abbondante del carbonio-13: ma nelle reazioni chimiche che formano o distruggono legami di carbonio (C—C) si consuma meno energia usando carbonio-12 perché più leggero. Per questo motivo gli organismi viventi esibiscono un valore del rapporto $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ più basso.

Il rapporto isotopico $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ha un valore standard pari a 1/9 per gli organismi autotrofi terrestri che metabolizzano e trasformano il carbonio, e cambia se il carbonio esaminato è di origine non biologica. Variazioni di questo stesso rapporto sono state rilevate anche nelle rocce di Isua (Groenlandia Occidentale), vecchie di circa 3,8 mi-

liardi di anni. L'interpretazione non è univoca, però molti studiosi ritengono che organismi fissatori di carbonio fossero già presenti sul nostro pianeta 3,8 miliardi di anni fa. In tal caso la vita sulla Terra risalirebbe a circa 4 miliardi di anni fa e in più sarebbe autotrofa, cioè gli organismi sarebbero in grado di sintetizzare da soli il proprio nutrimento senza dover consumare molecole organiche di altri esseri viventi. Entrambe queste affermazioni sarebbero state bollate come inverosimili anche solo pochi anni fa, quando si pensava che i primi organismi fossero nati meno di un miliardo di anni fa e che fossero eterotrofi, consumatori cioè di altre molecole organiche. Ma come è possibile che i primi organismi si producessero da soli il proprio cibo, una capacità questa che richiede alti livelli di complessità (troppi forse per forme di vita primitive)?

Il discorso importante è quello della quantità di energia e risorse disponibili: abbiamo visto che le radiazioni ultraviolette sono molto energetiche, ma proprio per questo molto dannose. È fondamentale disporre di energia sufficiente, ma “a bassa potenza”, per poterla sfruttare con mezzi molto semplici. L'energia del Sole, per esempio, è quasi illimitata, ma per utilizzarla occorre un procedimento complesso come la fotosintesi clorofilliana.

Dove potevano le prime forme di vita terrestri prendere l'energia necessaria per fabbricare il proprio nutrimento? La risposta, senz'altro inattesa, si trova sul fondo dell'oceano: si tratta dei camini sottomarini. Scoperti negli ultimi decenni in corrispondenza delle dorsali medio-oceaniche, sono vere e proprie oasi di vita in un ambiente deserto e ostile, e la loro fonte di energia è il calorinterno della Terra: si sono misurate temperature fino a 400°C (l'acqua non bolle perché la pressione a quelle profondità è enorme). Dai camini fuoriescono anche dei sali

minerali che possono reagire con altre specie alimentando un intero ecosistema attraverso la chemiosintesi. Sono state finora individuate e classificate più di 50 specie di batteri ed altri organismi, tutti ben adattati a temperature e pressioni molto elevate: il *Pyrolobus fumarii*, per esempio, prospera a valori superiori ai 100°C sulle pareti dei camini sottomarini. Altre specie di batteri producono zolfo, sfruttando per il loro metabolismo l'energia ricavata dalla reazione $n\text{CO}_2 + n\text{H}_2\text{S} \leftrightarrow (\text{CH}_2\text{O})_n + n\text{H}_2\text{O} + n\text{S}$, mentre ancora altri batteri emettono invece metano.

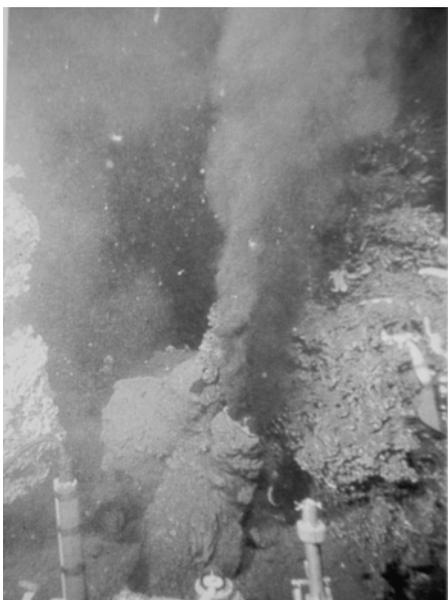


Fig. 5.9 – Camini sottomarini scoperti dal sommergibile automatico ALVIN al largo delle isole Galapagos nel 1977

La scoperta dei camini sottomarini e degli incredibili ecosistemi che essi ospitano è di grande interesse biologico, ma la sua importanza va molto oltre la semplice individuazione di nuove specie: i batteri più primitivi, infatti, sono termofili e ipertermofili, cioè prosperano a tem-

perature molto alte (per gli ipertermofili sopra 80°C). Il già citato *Pyrolobus fumarii* trova il suo ambiente ideale a 105°C e non riesce a riprodursi al di sotto dei 90°C.

Se gli organismi più primitivi sono amanti delle alte temperature, possiamo dedurre che le prime forme di vita fossero anch'esse organismi termofili e ipertermofili. L'ipotesi più affascinante, e anche la più ragionevole sulla base dei fatti che conosciamo, è che i camini sottomarini abbiano assistito alla nascita della vita sul nostro pianeta, poi diffusasi in tutti gli altri ambienti.

A questo punto possiamo tentare di tracciare un quadro ipotetico della nascita della vita sul nostro pianeta, alla luce delle conoscenze attuali.

5.5.4 – Una possibile ricostruzione della storia della Terra

L'ambiente della Terra primitiva, benché privo di ossigeno, conteneva i mattoni essenziali della vita - varie molecole complesse a base di carbonio. Queste, forse, erano in parte eredità della nube progenitrice, ma anche sintetizzate sul posto in modo simile a quanto visto per l'esperimento di Miller; non dovevano mancare apporti esterni ad opera di asteroidi e comete. C'erano inoltre acqua liquida, sorgenti di energia (il Sole e il calore interno terrestre) e un ciclo del carbonio già attivo (rocce ↔ CO₂ ↔ atmosfera).

L'energia del Sole non venne utilizzata subito, per la forte componente nociva ultravioletta e anche perché il suo sfruttamento richiede organismi altamente evoluti. La prima fonte energetica fu probabilmente geotermica: nei camini sottomarini ad alta temperatura (> 100 °C) poteva avvenire la sintesi di carboidrati basata sulla chimica dello zolfo. I primi organismi furono quindi batteri autotrofi (i-

per)termofili in grado di ricavare composti organici ed energia per chemiosintesi. L'ipotesi dell'origine della vita terrestre presso i camini sottomarini spiegherebbe il fatto che tutti gli organismi alla radice dell'albero della vita siano termofili o ipertermofili: l'ipotesi di glaciazioni globali, avvenute a più riprese durante l'Era Proterozoica, spiega invece la lunghezza del ramo degli Eucarioti, gli organismi più evoluti. Le avverse e mutevoli condizioni climatiche avrebbero operato una forte selezione, "potando" altri rami che oggi sono estinti. Questi cicli ripetuti di glaciazione e riscaldamento potrebbero anche spiegare come mai l'evoluzione della vita sia stata molto lenta fino al termine del Proterozoico (580 milioni di anni fa), con una successiva "esplosione" nel periodo Cambriano dell'Era Paleozoica.

Nella tabella 5.7 riportiamo in sintesi le ere e i periodi nei quali i paleontologi hanno convenzionalmente suddiviso il passato della Terra. Circa 550 milioni di anni fa la vita conobbe uno sviluppo mai visto in precedenza, diversificandosi in un numero incredibile di specie (di cui solo una piccola frazione si conserva nell'archivio dei fossili). Col tempo alcuni organismi uscirono fuori dall'acqua, colonizzando la terraferma e sviluppando forme animali (anfibi, rettili) e vegetali (fotosintesi clorofilliana). Gli insetti furono i primi inventori del volo. Crebbero progressivamente anche le dimensioni degli organismi viventi, fino ai maggiori dinosauri e agli odierni mammiferi.

Nonostante oscillazioni climatiche ed estinzioni di massa, dovute a possibili impatti di asteroidi (date ipotizzate: 439, 367, 251, 206 e 65 milioni di anni fa) la vita ha prosperato sul nostro pianeta, trasformandolo con la sua attività e, stupidità umana permettendo, continuerà a farlo.

ERA	PERIODO	ETÀ (milioni di anni)	EVOLUZIONE DELLA VITA
Arche- ana		3600	Filamenti, possibili ciano- batteri
Proterozoica		2500	Cianobatteri; aumenta l'O ₂ in atmosfera
		1600	Primi Eucarioti, alghe mul- ticellulari
		900	Alghe verdi, impronte di animali fossili
		670	Fauna di Ediacara
Paleozoica (Primaria)	Cambriano	580	Simmetria bilaterale, artro- podi acquatici
	Ordoviciano	490	Primi pesci, prime piante terrestri
	Siluriano	439	Primi anfibi
	Devoniano	409	Foreste di felci ed equiseti
	Carbonifero	354	Primi insetti
	Permiano	290	Primi rettili
Mesozoica (Secondaria)	Triassico	251	Primi dinosauri, primi mammiferi
	Giurassico	206	Primi uccelli
	Cretaceo	144	Gimnosperme - Angio- sperme
Cenozoica (Terziaria)	Eocene	65	Estinzione dinosauri, esplo- sione mammiferi
	Oligocene	45	
	Miocene	25	Primati più antichi
	Pliocene	10	Varie specie Australopithe- cus
Quate- rnaria	Pleistocene	1,8	Varie specie HOMO
	Olocene	...	

Tabella 5.7 – Prospetto delle ere geologiche e dello sviluppo della vita

LA LUNA



Fig. 6.1 – La Luna piena

6.1 – GENERALITA'

6.1.1 – La rotazione della Luna

La Luna è l'unico satellite naturale della Terra. Come si può osservare facilmente anche ad occhio nudo, la Luna rivolge alla Terra sempre la stessa faccia, ma le fasi lunari, di cui si dirà in seguito, sono testimonianza che, rispetto al Sole, la Luna si sposta. Per riacquistare esattamente la sua posizione rispetto ad una stella di riferi-

mento la Luna impiega 27,321661 giorni (periodo siderale = 27 giorni 7 ore 43 minuti 11,51 secondi), mentre per tornare alla stessa posizione rispetto al Sole, e quindi avere la stessa fase, impiega 29,503589 giorni (periodo sinodico = 29 giorni 12 ore 5 minuti 10,09 secondi).

Proprietà	Valore	Proprietà	Valore
Raggio medio (km)	1737,103 ± 0,015	Periodo di rotazione siderale, mese siderale (giorni terrestri)	27,321661
Raggio equatoriale medio (km)	1738,139 ± 0,065	Mese sinodico. Da luna nuova a luna nuova (giorni terrestri)	29,503589
Raggio polare medio (km)	1735,972 ± 0,200	Eccentricità dell'orbita	0,05490
Massa (kg)	7,349·10 ²²	Inclinazione dell'orbita sull'eclittica	5,145°
Accelerazione di gravità (m/s ²)	1,624	Velocità orbitale media (km/s)	1,023
Velocità di fuga (km/s)	2,376	Inclinazione dell'equatore sull'orbita	6,68°
Distanza media dalla Terra (km)	384.401	Temperatura superficiale	Min -150° Max +120°

Tabella 6.1 – I parametri fisici della Luna

L'orbita che la Luna descrive intorno al Sole è alquanto complessa. La Terra e la Luna infatti orbitano l'una attorno all'altra, intorno ad un punto (il baricentro del sistema Terra-Luna) che si trova a circa 4670 km dal centro della Terra e che a sua volta descrive un'ellisse intorno al Sole; questo fa sì che il percorso della Luna intorno al Sole sia una linea sinusoidale che interseca ripetutamente l'orbita della Terra (anch'essa sinusoidale, ma meno ac-

centuata) 24 o 25 volte l'anno, in occasione del primo e dell'ultimo quarto. Il valore si deduce a partire dal rapporto tra periodo di rotazione della Terra (365,25 gg) e la metà del periodo sinodico della Luna (14,75 gg), che dà 24,76. Rispetto alla Terra, la Luna descrive un'ellisse: la minima distanza (il perigeo) è a 356.371 km, mentre la massima distanza (l'apogeo) è a 406.720 km. Queste distanze variano nel tempo a causa della conservazione del momento angolare^[1]; conseguenza di ciò è che la velocità di rotazione della Terra diminuisce (la durata del giorno cresce di 0,002 s ogni secolo) e la distanza Terra-Luna aumenta mediamente di alcuni centimetri l'anno^[2] a causa dell'effetto di frenamento prodotto dalle maree.

L'esistenza di diversi altri moti periodici della Luna meno appariscenti (oscillazioni dell'eccentricità dell'orbita, oscillazioni della velocità di rivoluzione intorno alla Terra dovute alla diversa forza di attrazione del Sole, variazione dell'inclinazione dell'orbita, precessione, nutazione) fa sì che anche la faccia a noi rivolta cambi leggermente: in effetti dalla Terra si riesce a vedere il 59% della superficie lunare (fenomeno delle librazioni).

Il piano dell'orbita lunare è inclinato $5,145^\circ = 5^\circ 8' 42''$ rispetto a quello dell'orbita terrestre; inoltre la Luna ruota intorno ad un asse inclinato di $6,68^\circ = 6^\circ 40' 48''$ ri-

^[1] Il momento angolare è una quantità che in prima approssimazione è data dal prodotto della massa per la distanza per la velocità di rotazione della Luna. Uno dei principi fondamentali della fisica asserisce che, in assenza di forze esterne, deve rimanere invariato nel tempo. A causa delle maree la velocità di rotazione della Luna diminuisce, quindi, non potendo variare la massa del satellite, deve aumentare la distanza dalla Terra.

^[2] Utilizzando degli impulsi laser che vengono fatti riflettere da degli specchi lasciati sulla Luna da sonde inviate nel passato, è oggi possibile misurare la distanza Terra-Luna con la precisione del centimetro.

spetto al piano della sua orbita.

6.1.2 – Le fasi lunari

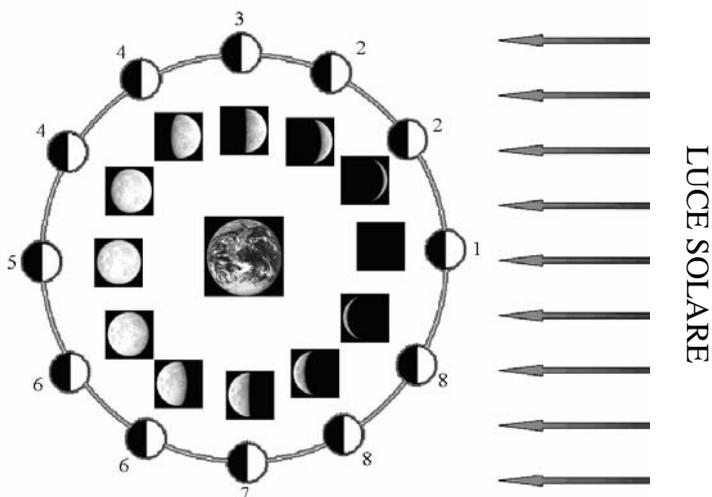


Fig. 6.2 – Le fasi lunari

La posizione reciproca di Luna, Terra e Sole e la capacità che ha la superficie della Luna di riflettere la luce solare producono il fenomeno delle fasi lunari. Quando si trova allineata tra il Sole e la Terra, rivolge il lato buio verso di noi ed è quindi invisibile: è la fase di “Luna nuova” o “novilunio” (posizione 1 nella figura 6.2). In questo giorno la Luna e il Sole sorgono e tramontano praticamente insieme. Quando invece i tre corpi celesti sono allineati, ma con la Terra al centro, abbiamo la fase di “Luna piena” o “plenilunio” (posizione 5 nella figura): in questo caso il Sole illumina interamente l’emisfero lunare rivolto verso la Terra e la Luna sorge al tramonto e tramonta all’alba, culminando al meridiano a mezzanotte. Quando l’angolo Sole-Terra-Luna è di 90° , vediamo soltanto metà

dell'emisfero lunare illuminato e siamo nelle fasi di primo (posizione 3) ed ultimo quarto (posizione 7); queste posizioni sono dette anche quadrature.

Tra novilunio e plenilunio la quantità di superficie lunare illuminata dal Sole e visibile dalla Terra aumenta progressivamente (posizioni 2, 3, 4): si ha la fase di Luna crescente. Inizialmente appare subito dopo il tramonto del Sole, come una piccola falce rivolta verso ovest; via via che passano i giorni si rende sempre più visibile e si allontana dal Sole (nel senso che tramonta sempre più tardi).

Dopo il plenilunio la quantità illuminata visibile da Terra si riduce al passare dei giorni (posizioni 6, 7, 8: Luna calante): ora sorge sempre più tardi durante la notte finché, pochi giorni prima del novilunio, la vediamo come una piccola falce rivolta verso est, verso il Sole che sta per sorgere.

Quando la Luna presenta la falce (posizioni 2 e 8) non è difficile osservare che la parte non illuminata dal Sole non è del tutto buia; si tratta del fenomeno della *luce cinerea*, cioè la luce ricevuta dalla Terra che, vista dalla superficie della Luna, è quasi piena. Il fenomeno della luce cinerea può essere osservato anche durante una eclisse totale di Sole; alcune immagini riprese durante quella del 29 marzo 2006 evidenziano questo fenomeno.

La durata di una fase completa è il mese sinodico; da ciò si ricava che ogni quarto dura circa 7 giorni, da cui è nata la settimana. Molti popoli nell'antichità facevano uso di un calendario lunare (che anche oggi non è scomparso del tutto).

La differente durata del periodo siderale e del periodo sinodico fanno sì che le varie fasi avvengano in posizioni diverse del cielo.

6.1.3 – Le eclissi di Luna e di Sole

Quando la Luna si trova al novilunio può dar luogo a una eclisse di Sole, essa cioè può coprire tutto o parte del disco solare. Quando invece si trova al plenilunio può aver luogo una eclisse di Luna: il disco lunare può essere coperto, tutto o in parte, dalla Terra.

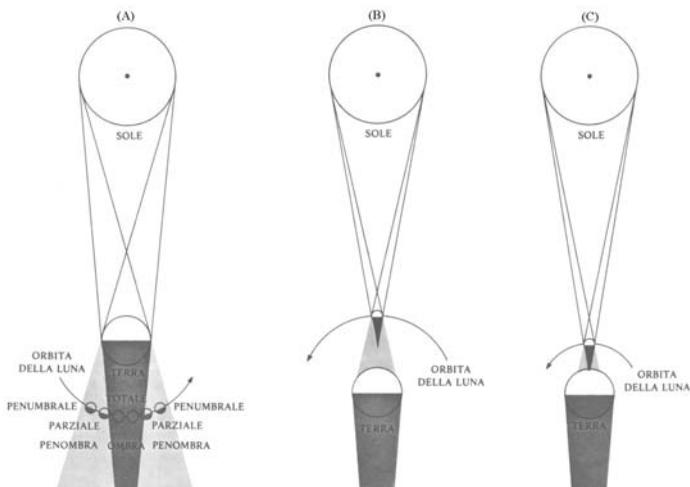


Fig. 6.3 - Eclissi di Luna e di Sole

L'ombra della Terra si estende nello spazio per una distanza media di 1.382.000 km, ma a causa dell'ellittica dell'orbita terrestre questa distanza presenta una variazione di 22500 km fra i suoi valori massimo e minimo. Poiché la lunghezza dell'ombra è più di tre volte maggiore della distanza Terra-Luna, se il cono d'ombra è orientato nella direzione giusta (cioè se Luna, Terra e Sole si trovano allineati) si ha una eclisse di Luna. Una tale eclisse ha inizio quando la Luna entra nella penombra (figura 6.3A);

questa fase è difficile da osservare perché la variazione di luminosità della Luna è poco accentuata. La fase parziale più cospicua inizia quando la Luna entra nell'ombra e l'eclisse è totale quando l'intero disco della Luna è in ombra. Terminata la fase di totalità le fasi si ripetono al contrario: eclisse parziale e eclisse di penombra. Durante la totalità la Luna non è completamente buia perché i raggi del Sole che attraversano l'atmosfera terrestre, senza colpire la superficie, vengono rifratti e leggermente diffusi, cosicché una parte della luce (quella rossa) arriva lo stesso sulla Luna e la illumina facendole assumere una tonalità rosso-ramata. Il colore esatto e l'intensità di questa luce dipendono dalle condizioni dell'atmosfera della Terra e gli astronomi parlano di eclissi buie o di eclissi chiare.

L'ombra della Luna si estende nello spazio, mediamente, per 375.000 km. Questa lunghezza è variabile e dipende dalla distanza Sole-Luna: si ha la massima lunghezza dell'ombra, 377.780 km, quando la Luna è più vicina al Sole (Terra al perielio e Luna all'apogeo; circa 151.733.000 km), mentre la minima lunghezza dell'ombra, 365.240 km, si ha quando la Luna è alla massima distanza dal Sole (Terra all'afelio e Luna al perigeo; circa 146.694.000 km). Confrontando questi valori con la distanza Terra-Luna, si può rilevare che in alcuni casi il vertice del cono d'ombra della Luna cade dentro la superficie terrestre: è questo il caso in cui si verifica una eclisse totale di Sole (figura 6.3C). In altri casi il vertice del cono d'ombra rimane fuori dalla superficie della Terra: in questo caso si ha un'eclisse anulare (figura 6.3B).

Un'eclisse totale di Sole è visibile in una striscia della superficie della Terra larga non più di 300 km e lunga anche alcune migliaia.

Se il piano dell'orbita lunare fosse coincidente con

quello dell'orbita terrestre si avrebbe un'eclisse di Sole ad ogni Luna Nuova, mentre in corrispondenza della Luna Piena si avrebbe sempre un'eclisse di Luna. L'esperienza comune ci dice che questo non accade; anzi le eclissi sia di Sole che di Luna sono piuttosto rare proprio perché il piano dell'orbita lunare non è complanare con quello della Terra. Il valore è piccolo, ma più che sufficiente a far sì che la maggior parte delle volte, al novilunio, la Luna passi più in alto o più in basso rispetto al Sole senza minimamente oscurarlo. Lo stesso vale per il plenilunio e per le eclissi di Luna.

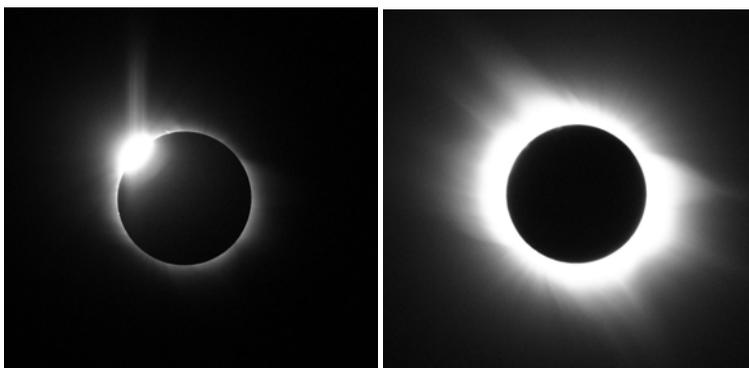


Fig. 6.4 – Eclisse totale di Sole del 29 marzo 2006: l'anello di diamante (sinistra), la corona (destra). Foto scattate da A. Angeletti da El Saloum (Egitto)

La condizione necessaria affinché si verifichi una eclisse di Sole è che la Luna Nuova si abbia in corrispondenza di un nodo^[3], cioè uno dei due punti in cui l'orbita lunare interseca il piano orbitale della Terra. La linea che congiunge i due nodi si chiama *linea dei nodi* e non è

³ La Luna taglia il piano dell'orbita della Terra passando da sud verso nord (nodo ascendente) o da nord verso sud (nodo discendente).

sempre allineata con il Sole; l'allineamento si ha almeno due volte l'anno. La linea dei nodi, oltre al moto di traslazione dovuto allo spostamento della Terra, è dotata di un moto proprio; essa ruota in senso orario (andando incontro pertanto alla Luna) all'incirca di 20° ogni anno solare. Per questo motivo i due allineamenti annuali della linea dei nodi non si succedono ad intervalli esatti di sei mesi, bensì un poco meno e più precisamente ogni 172 giorni (il periodo di 354 giorni per riportare uno stesso nodo in direzione del Sole viene chiamato anche *anno delle eclissi*); se ne deduce che la linea dei nodi ruota di un po' meno di 1° al giorno. In un anno si hanno quindi due occasioni favorevoli per il verificarsi di una eclisse di Sole.

Non sempre, quando la Luna si trova al nodo, è Luna nuova. Ciò però non pregiudica del tutto la possibilità che si verifichi l'eclisse di Sole: esiste un margine dovuto alle dimensioni del Sole e della Luna. È sufficiente che la Luna sia Nuova entro una distanza angolare di circa 15° dal nodo affinché una parte di essa riesca comunque a coprire una parte del disco solare. Con dei calcoli, neanche troppo complessi, si può dimostrare che, qualunque sia la fase che presenta la Luna quando un Nodo è in prossimità del Sole, essa fa in tempo comunque a produrre una eclisse, anche se non sempre totale. In situazioni favorevoli si possono avere le condizioni per una coppia di eclissi di Sole a distanza di un mese l'una dall'altra.

Un qualsiasi almanacco astronomico ci permette di verificare che le eclissi possono presentarsi anche a gruppi di tre; se le condizioni sono favorevoli per le eclissi di Sole, lo sono altrettanto per le eclissi di Luna e se si hanno due consecutive Lune Nuove che occultano il Sole, tra di loro ci sarà una eclisse di Luna.

Tenendo presente che la durata dell'anno delle e-

clissi (354 giorni) è inferiore ad un anno solare (365 giorni), può capitare che le occasioni per una eclisse, in un anno, non siano solo due ma addirittura tre. Infatti se una eclisse di Sole (o una coppia di eclissi) si verifica i primissimi giorni di gennaio la successiva cadrà intorno al 20 giugno, e poi ancora un'altra opportunità la avremmo verso il 10 dicembre. Anche quest'ultima circostanza potrebbe dare origine ad una coppia di eclissi, ma la seconda slitterebbe all'anno successivo. Il numero minimo di eclissi di Sole che si possono verificare in un anno è due (una sola eclisse per ogni allineamento della linea dei nodi con il Sole), mentre il numero massimo è cinque (due coppie per i primi due allineamenti ed una sola per il terzo allineamento).

A causa del complesso moto della Luna e della Terra, ad ogni allineamento della linea dei nodi con il Sole, le posizioni reciproche non si ripropongono con la stessa precisione. Ogni volta si ha un tipo di eclisse diversa. I 354 giorni di cui si è parlato sopra non sono sufficienti a riallineare esattamente i tre corpi: occorrono 18 anni, per la precisione 6585,32157 giorni, perché questo avvenga. Tale periodo, già noto nell'antichità, viene chiamato Saros e nasce dalla combinazione del periodo sinodico e del periodo draconico^[4]. Dopo 223 rivoluzioni sinodiche la Luna ha compiuto 242 rivoluzioni draconitiche, riportandosi quasi nelle stesse condizioni di partenza.

In un Saros ci sono anche 239 rivoluzioni anomalistiche^[5], quindi il fenomeno si ripete con la Luna più o

^[4] È l'intervallo di tempo tra due passaggi ad uno stesso nodo ed è di 27,212222 giorni (27d 5h 5min 36s)

^[5] Il periodo anomalistico è il tempo che intercorre tra due passaggi della Luna al perigeo (o all'apogeo) ed è di 27,554595 giorni (27d 13h 18min 37s)

meno alla stessa distanza dalla Terra.

Le differenze che fin qui abbiamo trascurato fanno sì che si verifichi una sequenza di eclissi uguali a se stesse abbastanza lunga, ma non infinita.

Un Saros è costituito da un numero intero di giorni (6585) più un po' meno di un terzo (0,3 giorni); ciò comporta che due eclissi successive di una stessa sequenza, pur avendo le stesse caratteristiche, sono osservabili da zone della Terra che distano 120° in longitudine (verso ovest) e leggermente anche in latitudine. Dopo tre Saros c'è la compensazione dello scarto in longitudine, ma non di quello in latitudine. Questo origina un periodo molto più lungo detto stagione-Saros, che per convenzione inizia con una eclisse parziale visibile ad un polo geografico. Le eclissi successive scendono lentamente in latitudine, aumentando di grandezza e diventando totali (o anulari); quindi, superata la fascia equatoriale e avvicinandosi al polo geografico opposto, tornano ad essere parziali e, dopo l'ultima osservabile, la stagione-Saros finisce. Non tutte le stagioni-Saros sono uguali: mediamente contengono circa 80 eclissi e durano dai 1200 ai 1500 anni.

Oltre al Saros vi sono altri periodi per i quali le corrispondenze tra mese sinodico e draconitico sono maggiormente precisi. Van Den Bergh (uno dei massimi studiosi del periodo delle eclissi) ne ha individuati diversi: il Tritos di 3986,62965 giorni (11 anni e 1 mese), l'Inex di 10571,95122 giorni (19 anni e 345 giorni e che è anche 1 Saros + 1 Tritos) e l'Egxeimos, visto sopra, pari a 3 Saros.

Le più vistose eclissi di Sole visibili dall'Italia si avranno alle seguenti date: il 4 gennaio 2011, il 20 marzo 2015, il 12 agosto 2026, il 2 agosto 2027, l'1 giugno 2030 e il 3 settembre 2081 (sarà la prima totale sul territorio ita-

liano dopo quella del 15 febbraio 1961). Per il sud Italia le migliori saranno quelle del 2027 e del 2030, in quanto quasi totali.

6.1.3 – Le maree

La forza di gravità che si esercita tra Sole, Terra e Luna produce delle deformazioni di questi corpi (in particolare della Terra e della Luna): le maree sono il fenomeno più evidente. La forza di gravità è inversamente proporzionale al quadrato delle distanze, quindi, per un corpo esteso come la Terra, punti diametralmente opposti risentono in maniera diversa dell'attrazione del Sole e della Luna; particolarmente sensibile è la massa fluida degli oceani.

Al novilunio ed al plenilunio si hanno le maree più alte, al primo ed all'ultimo quarto quelle più basse. Non esistono solo le maree dei mari, ma anche quelle atmosferiche, che non turbano più di tanto la pressione, e quelle della crosta terrestre.

Alcune recenti teorie considerano le maree della crosta terrestre come una possibile causa scatenante dei terremoti, una specie di innesco che fa scaricare le tensioni accumulate per effetto della dinamica delle placche continentali in cui è divisa la crosta del pianeta Terra.

È comunque accertato che le maree sono legate all'aumento del periodo di rotazione della Terra (si stima che circa 365 milioni di anni fa il giorno durasse meno di 22 ore, ossia in un anno c'erano circa 400 giorni)

6.2 – GEOLOGIA LUNARE

Gli astronauti delle varie missioni Apollo hanno portato a Terra 382 kg di rocce; queste, insieme ai dati acquisiti per mezzo dei telescopi (che permettono di distinguere oggetti fino a 40 metri di dimensione) e alle migliaia di immagini fotografiche prese durante le diverse decine di missioni spaziali, hanno permesso di ottenere un quadro abbastanza plausibile della geologia lunare.

6.2.1 – Origine della Luna

L'origine della Luna non è ancora del tutto chiara; nel passato ci sono state molte teorie sulla sua origine che hanno ancora diversi sostenitori. Quel che è certo è che le rocce lunari hanno un'età di almeno 4 miliardi di anni e che quindi questa deve essere l'età minima della Luna. Quattro sono le teorie sulle quali ancora oggi si discute.

Teoria Planetaria: la Luna sarebbe un corpo celeste catturato dal campo gravitazionale terrestre; ciò implicherebbe un'origine lontana dal Sistema Solare. La teoria non convince perché l'analisi degli isotopi di alcuni elementi evidenzia che la Terra e la Luna debbono aver avuto origine nella stessa regione del Sistema Solare.

Teoria Mareale o della fissione: proposta per la prima volta da George H. Darwin (figlio del famoso Charles, fondatore della teoria dell'evoluzione) nel 1878, ipotizza che la Luna si sia staccata, a causa della rapida rotazione della Terra, quando questa era ancora fluida (le fosse dell'Oceano Pacifico erano una prova), o per l'attrazione gravitazionale di un grosso corpo celeste di passaggio nelle vicinanze della Terra in formazione; le prove a sostegno vengono dall'analisi chimica delle rocce lunari. Calcoli

numerici e simulazioni al computer dimostrano però che la rotazione della Terra avrebbe dovuto essere molto maggiore di quella che si ipotizza 4 miliardi di anni fa; e un passaggio ravvicinato di un altro corpo celeste, nell'epoca e con le dimensioni giuste, era abbastanza improbabile.

Teoria Nebulare o planetesimale: la Luna si sarebbe formata, insieme alla Terra, dal materiale in raffreddamento della nebulosa in cui si è formato tutto il Sistema Solare. Questa teoria ha difficoltà a spiegare perché la Terra ha un nucleo di ferro-nichel, mentre la Luna no; inoltre in base all'attuale ritmo di allontanamento, i due corpi celesti, nel passato, avrebbero dovuto essere molto più vicini di quanto risulta.

Teoria Meteoritica: il nostro satellite avrebbe avuto origine dal materiale scagliato in orbita intorno alla Terra a seguito di un urto tra il nostro pianeta e un meteorite della grandezza di Marte. Nell'urto sarebbe rimasta coinvolta l'ancora sottile crosta terrestre e parte del mantello; circa 12 minuti dopo la collisione si sarebbero formati due pennacchi di materiale vaporizzato dall'enorme calore e appena 10 ore dopo il materiale espulso cominciava a condensare in orbita attorno alla Terra. 23 ore dopo la proto-Luna aveva già preso forma. Proposta nel 1986, oggi sembra la teoria più accreditata a rendere meglio conto dei dati osservativi di questi ultimi anni.

6.2.2. – La superficie lunare

La superficie della Luna, nel suo formarsi, subì un bombardamento meteoritico che produsse i crateri di tutte le dimensioni e uno strato di polvere e detriti che ricopre tutto il satellite detto *regolite*. La regolite ha un colore tra il cemento ed il bitume, possiede una struttura molto varia

che va da quella di una sabbia fine a ciottoli di grosse dimensioni. Il suo spessore è maggiore negli altipiani (almeno 10 metri con punte di 30) e minore nei mari (5 metri). Circa l'un per cento della regolite è materiale meteoritico.

L'interno ancora fluido e le fratture che il bombardamento meteorico produceva permisero lo scorrimento dei flussi di lava che colmarono i bacini lunari. Tale attività lasciò, come vedremo, una serie di tracce sulla superficie lunare (faglie, dorsali, solchi sinuosi e domi).

Come è noto le rocce terrestri si dividono in tre grandi categorie:

- rocce ignee o vulcaniche, formatesi direttamente per cristallizzazione di silicati fusi;
- rocce sedimentarie, frutto dell'accumulo di detriti inorganici ed organici, spesso in ambiente fluviale o marino;
- rocce metamorfiche, che sono quelle di origine ignea o sedimentaria, modificatasi a seguito di pressione e riscaldamento.

Ovviamente, essendo la Luna priva di atmosfera, di acqua e di forme di vita, non è possibile che vi siano rocce sedimentarie. Le rocce lunari possono essere classificate in tre tipi fondamentali:

i basalti più frequenti nei mari, abbondanti in ossido di ferro e con una bassa quantità di ossido di alluminio e di ossido di calcio;

la norite di cui sono ricchi gli altipiani, con una quantità media di ossido di alluminio e di calcio. La norite è anche indicata con la sigla KREEP perché contiene potassio (K), terre rare (REE) e fosforo (P), in essa si trovano anche tracce di uranio e torio (sostanze radioattive);

le anortositi, molto abbondanti perché formano la maggior parte delle montagne e degli altipiani, contengono grande

quantità di ossido di alluminio (da qui anche la colorazione più chiara) e di ossido di calcio, con una densità molto bassa che consente loro di risalire nella roccia fusa e galleggiare sulla lava.

Anche un solo sguardo alla Luna ci permette di constatare l'esistenza di zone più chiare (detti altipiani) e di zone più scure (detti mari, che non hanno però nulla a che vedere con l'acqua).

6.2.2.1 – Le Pianure (i mari)

Le pianure lunari sono delle enormi distese di magma solidificato che noi chiamiamo Mari o Oceani; si sono formati per una serie di emissioni di lava molto rapide a seguito di impatti di grossi meteoriti caduti quando la crosta lunare era poco spessa. Ondulazioni presenti sui mari rendono plausibile l'idea che questi episodi di fuoriuscita di lava possano essere avvenuti anche a distanza di tempo l'uno dall'altro.

La superficie lunare ricoperta dai mari è circa il 16% del totale, ovvero circa 6.100.000 km².

6.2.2.2 – Gli altipiani e le catene montuose

Gli altipiani, cioè le regioni più chiare e craterizzate, costituiscono la maggior parte della superficie lunare, circa l'84%; la faccia visibile ne è meno ricca (il 70%).

L'addensarsi dei crateri costituisce un ottimo strumento per la datazione delle strutture; inoltre la deformazione dei sistemi montuosi e del terreno, le fratture e i crepacci possono fornire altre utili informazioni. Nonostante ciò la geologia degli altipiani resta ancora poco compresa. Quello che si sa è che gli altipiani sono quello che resta della crosta primitiva della Luna e quindi sono le parti più vecchie; i crateri ivi presenti raccontano quindi la storia

degli impatti lunari.

Le densità del materiale degli altipiani è minore di quella dei mari. La crosta degli altipiani risulta così in equilibrio isostatico: la pressione esercitata dalla crosta lunare sul mantello sottostante è cioè uguale dappertutto, sia sotto gli altipiani (più alti ma meno densi), sia sotto i mari (più bassi, ma anche più pesanti).

La dinamica che ha sollevato le catene montuose lunari non è la stessa di quella terrestre. Sul nostro pianeta le catene montuose sono il prodotto dello scontro delle “zolle” che compongono la crosta e che sono in continuo movimento; nello scontro una zolla può conficcarsi sotto l’altra provocandone il sollevamento.

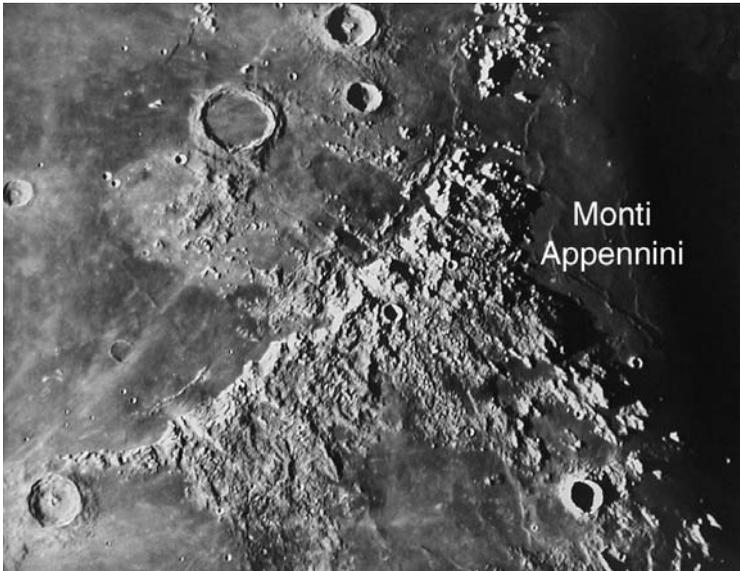


Fig. 6.5 – Gli Appennini lunari

Sulla Luna non esiste una tettonica a zolle; il nostro satellite è, oggi, geologicamente morto. L’origine del-

le montagne lunari va ancora una volta ricercata nel bombardamento di planetesimi che ha dato origine alle strutture lunari. Le catene montuose sorgono infatti intorno ai grandi bacini ed hanno una forma ad arco come gli Appennini, le Alpi ed i Monti Caucaso (vedi figura 6.5).

La minor gravità lunare ha favorito il sorgere di montagne proporzionalmente più alte di quelle terrestri. Le catene montuose che circondano il Mar Imbrium hanno altezze rispetto al fondo attuale del bacino che superano i 7 km (si pensa che al momento della formazione il cratere originale abbia avuto una profondità fino 100 km, diminuita di diverse decine di km a causa del rimbalzo della crosta lunare).

6.2.2.3 – Crateri e circhi



Fig. 6.6 – (1) Il cratere Copernico – (2) Il cratere Eratostene

La craterizzazione lunare avvenne nei primi 800 milioni di anni di vita del nostro satellite, cioè circa 3,9 - 4 miliardi di anni fa.

La conformazione dei crateri è estremamente varia: alcuni hanno un picco centrale, altri hanno un fondo liscio e piatto (in questo caso si chiamano circhi). La forma in genere è circolare, ma ne esistono di ellittici e di irregolari. Alcuni hanno il fondo o anche le pareti ricchi di crepacci, altri sono riempiti di lava; soprattutto vi sono crateri di tutte le dimensioni, da centinaia di chilometri a frazioni di millimetro (vedi figura 6.6).

I crateri lunari sono stati prodotti quasi esclusivamente dagli impatti meteorici. La sovrapposizione che frequentemente si nota ne è la testimonianza.



Fig. 6.7 – (1) il cratere Keplero e la sua raggiera; (2) il cratere Copernico.

Lo studio dei crateri terrestri è stato molto utile per comprendere quelli Lunari. I crateri da impatto sono associati a materiale meteoritico, hanno pianta circolare, presentano gli strati del bordo montuoso sollevati e rovesciati nella stratigrafia, al centro hanno delle brecce o un picco (a volte alto anche qualche km), intorno si trovano degli “ejecta”, cioè materiale che è stato schizzato via con violenza nell’impatto e che spesso ha formato anche crateri secondari allineati o, quanto meno, distribuiti con una certa regolarità.

I grandi crateri hanno un bordo rialzato nel quale si riconoscono terrazze e fratture concentriche. Sulla parete esterna dell’anello montuoso, nel caso di crateri giovani e isolati, si distinguono nettamente flussi di materiale fuso nell’impatto e poi consolidato, una corona di “ejecta” continui, una seconda corona di “ejecta” discontinui e di materiale più fine che forma la raggiera chiara.

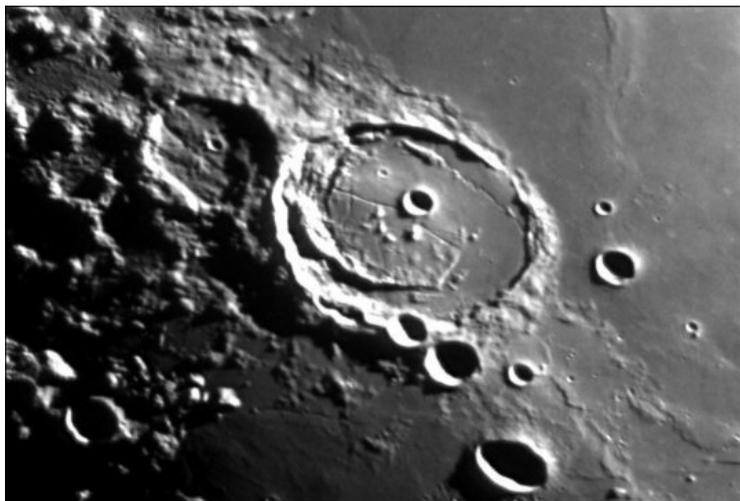


Fig. 6.8 – Il cratere Posidonius e le sue fratture interne

I piccoli crateri secondari hanno una forma diversa dai primari; questi ultimi hanno forma circolare e un bordo rialzato ben definito e di altezza uniforme. Quanto più piccolo è il diametro, tanto più perfetta è la forma circolare.

Fino a 5 km di diametro la forma generalmente è a scodella, ma esistono anche piccoli crateri a imbuto che possono derivare, oltre che da impatto, da attività endogena, come il collasso di una crosta ancora malleabile. Certi allineamenti di piccoli crateri, poi, difficilmente possono essere formazioni secondarie ad un impatto principale: sono infatti senza bordi e uno a contatto dell'altro. Si ritiene che la loro formazione sia dovuta a un "tubo" di lava in parte collassato.

Crateri fantasma, osservabili solo a luce radente, sono crateri completamente ricoperti di lava ma la cui conformazione circolare è ancora distinguibile.

6.2.2.4 – Solchi (valli), Crepacci (rimae) e Faglie lunari (rupes)

La Luna ha una grande quantità di solchi e crepacci, alcuni dei quali visibili anche con telescopi amatoriali.

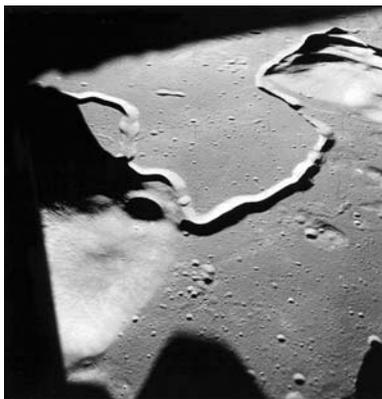


Fig. 6.9 – La rima Hadley ripresa dagli astronauti dell'Apollo 15

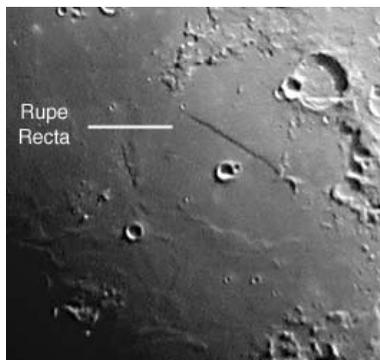


Fig. 6.10 – La Rupe Recta (tipico esempio di scoscendimento lunare)

Non tutti hanno la stessa origine. Alcuni (quelli che si vedono sui fondi dei crateri) sembrano dovuti ad una fessurazione di assestamento o di sollevamento della crosta lunare per effetto della spinta del magma verso l'alto. Altri (situati nei mari o ai loro confini) hanno una lunga forma tortuosa che nasce da una cavità priva di bordo. Questi ultimi si sono sicuramente formati dallo scorrimento della lava che ha formato i bacini stessi. Altri ancora hanno la stessa caratteristica dei tubi di lava terrestri privi di tetto, ma mentre sulla Terra questi sono larghi al massimo poche decine di metri, sulla Luna possono raggiungere anche una profondità di parecchie centinaia di metri.

Se ne deduce che anche se alcuni canali sinuosi possono sembrare canali lavici, in effetti altro non sono tubi di lava la cui sommità è stata distrutta da lunamoti o dalla caduta di piccoli meteoriti.

Le valli lunari sono una larga spaccatura, con altezza fino a 1000 m, in mezzo alla quale scorre un piccolo e sottile solco; sembra che si siano formate dallo scorrimento della lava eruttata da crateri limitrofi, quindi sono probabilmente di natura vulcanica.

Un altro fenomeno da ricollegarsi al raffreddamento delle distese laviche è rappresentato dalle faglie origina-

tesi, nella maggior parte dei casi, dalle deformazioni della crosta lunare seguite al deflusso delle lave e che appaiono come scarpate che separano due zone poste a quote diverse. Queste Rupi possono essersi formate probabilmente anche dall'indebolimento e successivo sfaldamento della crosta lunare..

Anche alcune fratture concentriche ai bordi dei mari possono essersi generate per il peso della lava sul suolo sottostante.

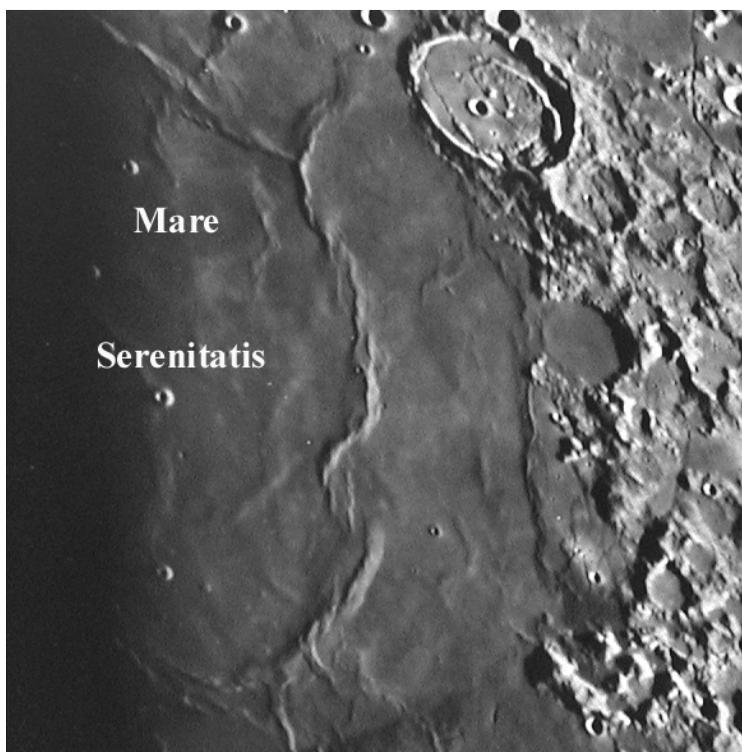


Fig. 6.11 – Corrugamento o dorsa di un “Mare” lunare

6.2.2.5 - Corrugamenti

All'interno dei mari ed ai margini di alcuni bacini è possibile osservare dei corrugamenti del suolo formati per lo scontro di masse laviche solidificatesi. Altri possono anche rappresentare gli anelli di enormi crateri che sono stati ricoperti di lava successivamente solidificata.

6.2.2.6 – I domi

Nonostante il fatto che il vulcanismo sul nostro satellite sia essenzialmente generato dalla frattura della crosta lunare, alcuni tipici rilievi a cupola, chiamati domi, potrebbero rappresentare dei veri e propri apparati vulcanici, più precisamente dei laccoliti. Geologicamente parlando i laccoliti sono dei rigonfiamenti originatisi dal magma sottostante in grado di sollevare le rocce più superficiali senza fonderle.

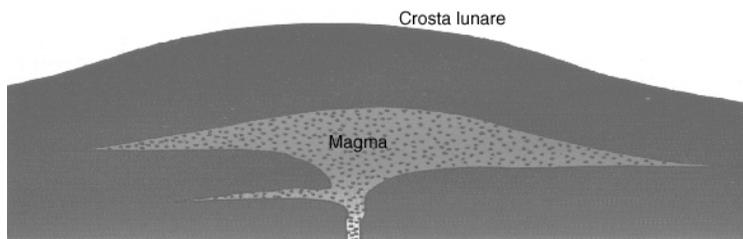


Fig. 6.12 – Teoria sulla formazione di un domo (o cupola) lunare

Questi si presentano con una larga varietà di forme e dimensioni e si pensa si siano formati per infiltrazione di magma tra due strati rocciosi in zone prossime alla superficie; quando il magma solidifica fa incurvare verso l'alto gli strati sovrastanti. Tali rilievi a forma di cupola, che si rendono visibili in condizioni di luce radente, rappresentano uno degli aspetti più interessanti dell'osservazione della Luna. A causa delle piccole dimensioni di queste for-

mazioni (che raggiungono i 20-30 km di diametro e i 200-300 m di altezza) non se ne possono osservare i particolari più minuti.

6.2.3 – Le ere lunari

Gli studiosi hanno individuato delle ere anche per la Luna. Gli eventi che le caratterizzano coincidono con la formazione delle principali strutture lunari (mari, bacini, crateri).

Pre-Nectariano – inizia 4,6 miliardi di anni fa; le strutture superficiali di quell'epoca sono state cancellate dal successivo bombardamento di meteoriti. Si formano nell'ordine i bacini: Nubium, Tranquillitatis, Smythii e Serenitatis.

Nectariana – inizia 4,1 miliardi di anni fa; si formano i bacini: Nectaris, Fecunditatis, Humorum, Moscoviense (sulla faccia nascosta) e Crisium.

Imbriana – inizia 3,9 miliardi di anni fa con la formazione del bacino Imbrium e successivamente del bacino Orientale; viene emessa quasi tutta la lava dei mari.

Eratosteniana – inizia 3,4 miliardi di anni fa. Vengono emesse le ultime lave e si formano crateri simili a Copernicus. Le loro raggere sono però ormai del tutto cancellate dai successivi eventi meteoritici. Sul finire dell'era si forma il cratere Eratostene.

Copernicana – iniziata 3 miliardi di anni fa, è l'era attuale. Si sono formati i grandi crateri Copernicus (circa un miliardo di anni fa) e Aristarchus (250 milioni) e numerosi altri più piccoli di cui ancora oggi vediamo la raggiera di ejecta.

6.3 – L'ESPLORAZIONE DELLA LUNA

Con le ultime missioni lunari si è ormai superata quota 100. Dal primo fallimento americano della Pioneer 0 del 17 agosto 1958 sono passati quasi 50 anni, c'è stato lo sbarco dell'uomo, ma il fascino della Luna non è mai diminuito.

La prima sonda verso la Luna fu il Pioneer 0 degli americani; fu lanciato il 17 agosto 1958 con l'obiettivo dichiarato di sorvolarla, ma il lancio fallì.

Falliscono anche i successivi tentativi (3 sovietici e 3 americani). Il primo a riuscire è dell'URSS: il LUNA 1 che, lanciato il 2 gennaio 1959, sorvolò la Luna.

Due mesi dopo, il 3 marzo, il nostro satellite fu sorvolato anche dall'americano Pioneer 4.

Inizia la corsa verso la Luna. Decine di missioni con esiti più o meno positivi si susseguono nei successivi dieci anni. Tra le tante ricordiamo le americane RANGER (9 missioni: la 4 fu la prima sonda americana ad impattare con il suolo lunare), SURVEYOR (7 missioni: la 1 fu la prima sonda americana ad effettuare un atterraggio morbido sulla Luna e la 6, nel novembre 1967, la prima a decollare dal nostro satellite), LUNAR ORBITER (5 missioni). Anche l'URSS, con le missioni LUNA, una sequenza di 24 missioni riuscite (più 17 non riuscite di cui solo dopo la caduta dell'impero sovietico si è venuti a conoscenza), ha svolto un importante compito nell'esplorazione lunare. Le missioni LUNA detengono vari record: la 2 (settembre 1959) è la prima in assoluto a schiantarsi sulla superficie lunare, la 3 (ottobre 1959) invia a Terra la prima immagine della faccia nascosta della Luna, la 9 (gennaio 1966) è la prima sonda automatica ad effettuare un allunaggio morbido, la 16 (settembre 1970) è la prima sonda automa-

tica a ripartire dal suolo lunare e a riportare a Terra dei campioni di suolo lunare (Mare Fecunditatis), la 17 (novembre 1970) è la prima a portare un veicolo semovente sulla Luna (LunoKhod 1).

Almeno altre 20 missioni sovietiche, designate con vari nomi, hanno partecipato alla conquista della Luna; circa la metà sono fallite, ma alcune hanno ottenuto risultati importanti, come per esempio la ZOND 5 che nel settembre del 1968 riuscì a sorvolare la Luna e ritornare a Terra.

Dall'agosto del 1976 (ultima missione della serie LUNA) il successivo incontro con la Luna è stato ad opera della sonda NASA-ESA Galileo che, nel 1989, in rotta verso Giove, ha usato il campo gravitazionale della Terra per un'ulteriore spinta.

La successiva missione diretta verso la Luna è la Giapponese Muses A; partita il 24 gennaio 1990, non è mai arrivata e se ne sono persi i contatti. Finalmente, dopo 18 anni, riesce una missione: il 25 gennaio 1994 viene lanciata la sonda americana Clementine con compiti topografici. L'americana Lunar Prospector e l'europea SMART 1 completano il quadro delle missioni lunari . . . in attesa di quelle indiane e cinesi previste per i prossimi anni e che potrebbero dar luogo ad una nuova corsa verso la Luna, ora con lo scopo di impiantare delle basi permanenti.

Un discorso a parte meritano le missioni Apollo che hanno portato il primo uomo sulla Luna.

L'inizio è stato drammatico: il 27 gennaio 1967 l'Apollo 1 si incendiò sulla rampa di lancio causando la morte dei tre astronauti. Un banale contatto elettrico produsse il disastro e il programma subì un ritardo di un anno; saltarono le missioni Apollo 2 e 3.

L'Apollo 4 partì il 9 novembre 1967 senza equipaggio a bordo e servì per valutare la potenza del razzo Saturno 1B.

L'Apollo 5, il 22 gennaio 1968, sperimentò il modulo lunare (L.E.M.); era ancora senza equipaggio.

L'Apollo 6, lanciata il 4 aprile 1968 sempre senza equipaggio, ebbe dei problemi: ma l'Apollo 7, tra l'11 e il 22 ottobre 1968, fu un grande successo. Venne infatti sperimentato dagli astronauti, in orbita terrestre, il meccanismo di aggancio.

L'Apollo 8, lanciata il 21 dicembre 1968, con i suoi astronauti a bordo, circumnavigò la Luna. Fu la prima volta che un occhio umano poté vedere direttamente la faccia nascosta della Luna da un'altezza di soli 112 km. La missione rientrò a Terra il 27 dicembre.

L'Apollo 9 iniziò la sua missione il 3 marzo 1969 e orbitando attorno alla Terra testò ancora il modulo lunare.

L'Apollo 10 decollò il 18 maggio 1969 con il compito di circumnavigare la Luna e di provare ancora le manovre di sganciamento e di attracco del modulo lunare. La missione era identica a quella che svolsero due mesi dopo Armstrong, Aldrin e Collins, tranne che per la discesa sulla Luna.

Il 16 luglio 1969 partì la missione Apollo 11 che portò il primo uomo sulla Luna.

	Apollo 11	Apollo 12	Apollo 14	Apollo 15	Apollo 16	Apollo 17
inizio e fine missione	16.07.69 24.07.69	14.11.69 24.11.69	31.01.71 09.02.71	26.07.71 07.08.71	16.04.72 27.04.72	07.12.72 19.12.72
Modulo lunare	Eagle	Intrepid	Antares	Falcon	Orion	Challenger
Astronave madre	Columbia	Yankee Clipper	Kitty Hawk	Endeavour	Casper	America
Durata della missione	8gg 3h 18min	10gg 4h 36min	9gg 0h 2min	12gg 7h 2min	11gg 1h 51min	12gg 16h 31min
Costo milioni di \$	355	357	400	445	450	450
Sosta sulla Luna	21h 36min	31h 31min	33h 30min	66h 5min	71h 2min	75h 1min
Zona al-lunaggio	Mare della Tranquillità	Oceano delle Tempeste	Fra Mauro	Appennini-Hadley	Cartesio-Cayley	Taurus-Littrow
Astronauti	Armstrong Aldrin Collins	Conrad Bean Gordon	Shepard Mitchell Roosa	Scott Irwin Wonder	Mattingly Young Duke	Cernan Schmitt Evans

Tabella 6.3 – Le missioni Apollo sulla Luna. Gli astronauti dell' Apollo 13, Lowell, Haise e Swigert, dovettero rientrare a Terra senza raggiungere la Luna per un guasto al modulo di servizio durante il viaggio di andata.

Il Saturno-V

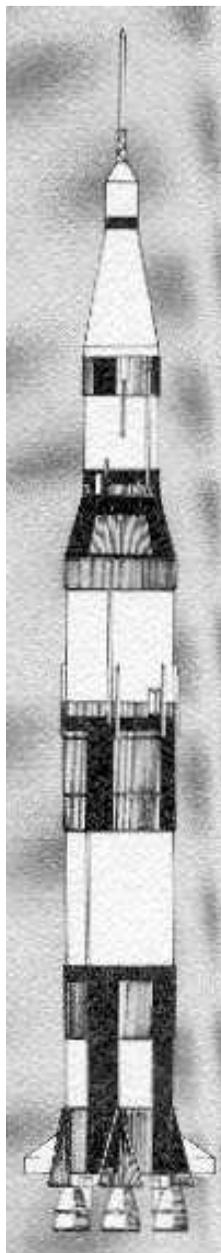
Tutte le missioni Apollo verso la Luna sono state lanciate da un razzo Saturno-V.

Alto 85 metri, poteva trasferire 137 tonnellate in orbite basse oppure 46 tonnellate in orbita lunare.

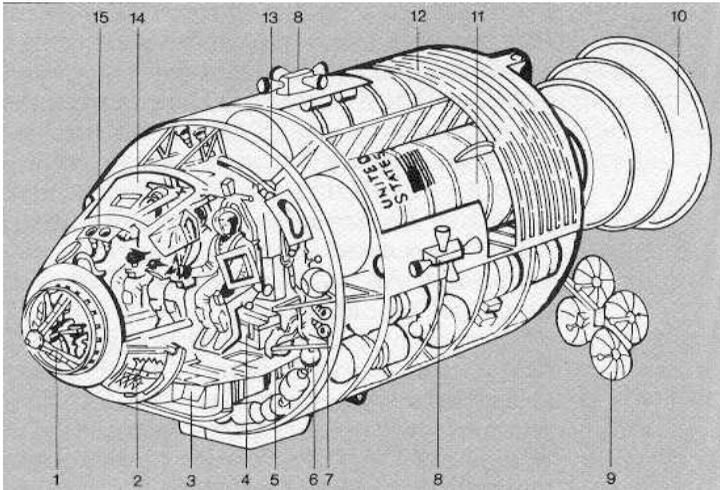
Durante il programma Apollo poteva raggiungere l'altezza di 110 metri per l'aggiunta dei moduli di comando, di servizio e di sbarco sulla Luna.

Il suo peso era poco meno di 3000 tonnellate e i motori gli fornivano una spinta di 4016 tonnellate.

Era costituito di tre stadi. Il terzo stadio, dava all'astronave la velocità di 39270 km/h necessaria per sfuggire alla gravità terrestre.



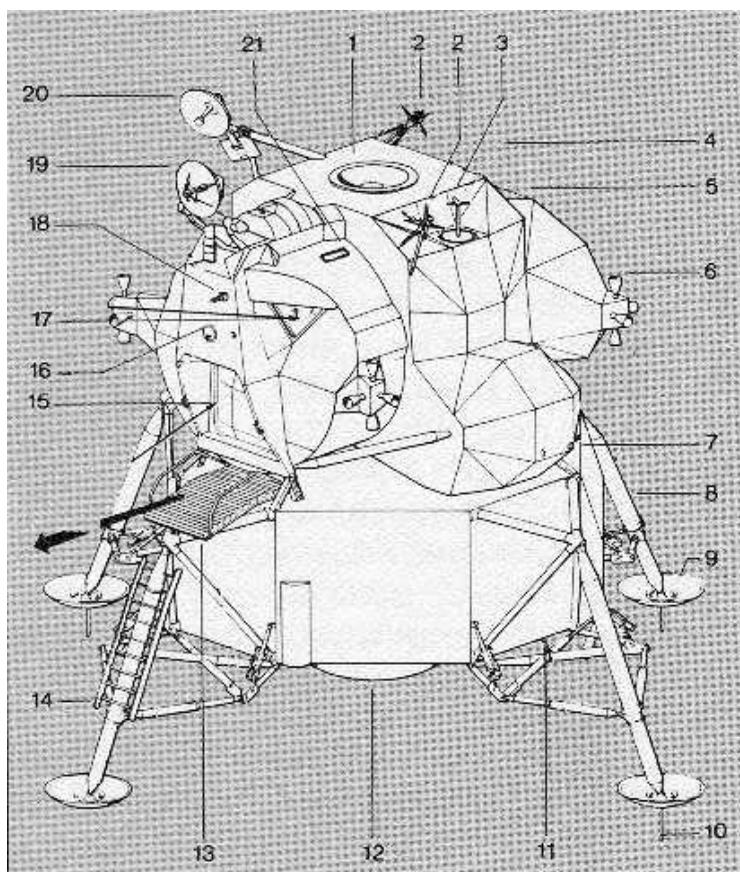
Modulo di servizio e modulo di comando



Il modulo di comando (dove vivevano i tre astronauti) era un cono con un diametro alla base di 3,9 metri e un'altezza di 3,2 metri.
Il modulo di servizio (inaccessibile agli astronauti) era un cilindro con un diametro alla base di 3,9 metri e un'altezza di 7 metri.

- 1 - sistema di aggancio;
- 2 - paracadute;
- 3 - apparati di guida e navigazione;
- 4 - apparati di comunicazione;
- 5 - batterie;
- 6 - serbatoi propellente motori modulo di comando;
- 7 - propulsori di beccheggio;
- 8 - propulsori d'assetto;
- 9 - antenne per le comunicazioni con la Terra;
- 10 - ugello di scarico del propulsore principale;
- 11 - serbatoi propellente propulsore principale;
- 12 - sistemi di controllo ambientale e per la potenza elettrica;
- 13 - propulsori rollio;
- 14 - portellone d'uscita e d'entrata dal modulo di comando;
- 15 - propulsori di beccheggio.

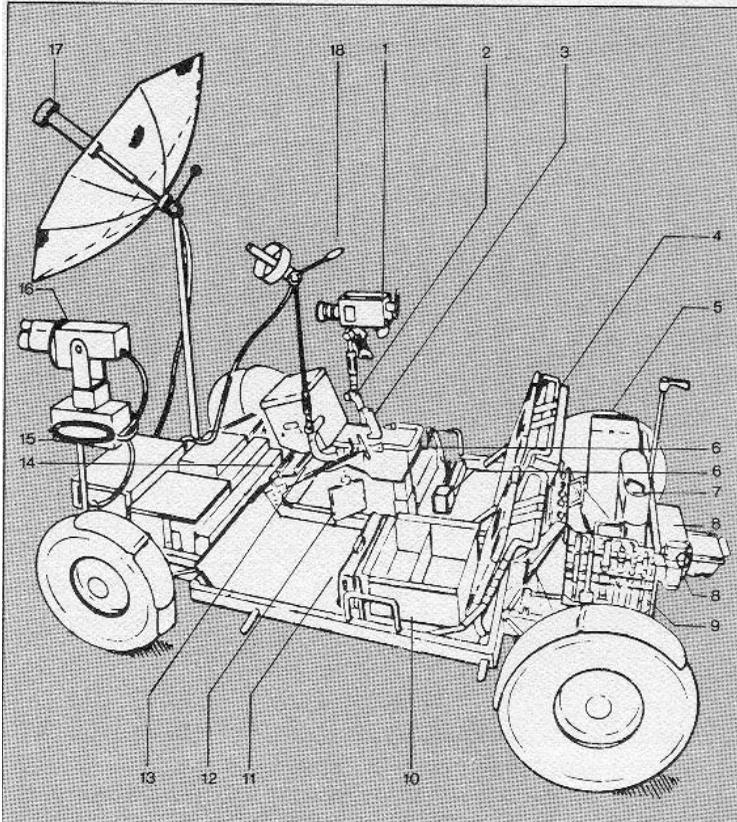
Il modulo per lo sbarco sulla Luna LEM (Lunar Excursion Module)



Il LEM era alto 7 metri e pesava 15 tonnellate. Due dei tre astronauti della missione scendevano sulla Luna con questo veicolo che poi usava la parte inferiore come rampa di lancio per riagganciarsi in orbita con la nave madre.

- 1 – Sistema aggancio orbitale
- 2 – antenna UHF
- 3 – riferimento per aggancio in orbita
- 4 – antenna per i collegamenti durante l'escursione lunare
- 5 alloggiamento strumenti
- 6 – propulsori di assetto
- 7 – luci di posizione
- 8 – gambe per l'allunaggio
- 9 – piattaforma di base
- 10 – sonda per rilevare il contatto con il suolo
- 11 – antenna radar per l'allunaggio
- 12 – protezione del motore per l'allunaggio
- 13 – piattaforma d'uscita
- 14 – scala
- 15 – portello d'uscita
- 16 – luce di posizione
- 17 – finestrelle
- 18 – antenna per comunicazioni in volo
- 19 – antenna radar per il rendez-vous nello spazio
- 20 – antenna per le comunicazioni
- 21 – visore per il controllo dell'aggancio in orbita

II Lunar Rover



La Lunar Rover, costruita dalla Boeing, è l'automobile lunare usata nelle missioni dell'Apollo-15, 16, 17. Era lunga 310 cm, pesava sulla Terra 209 kg e poteva raggiungere la velocità di 17 km/h. Aveva un raggio d'azione di 10 km dal punto dell'allunaggio. Ogni ruota era azionata da un motore elettrico autonomo e aveva un'autonomia di 78 ore. Poteva trasportare un carico utile di 490 kg.

- 1 – cinepresa 16 mm;
- 2 – impugnatura;
- 3 – controllo a mano;
- 4 – sistema per lo scambio di ossigeno tra le tute lunari degli astronauti;
- 5 – perforatrice;
- 6 – caricatori cinepresa
- 7 - fotocamera spettroscopica;
- 8 – ripostigli per il magnetometro;
- 9 – porta attrezzi;
- 10 – cassetta per la raccolta dei campioni lunari;
- 11 – spazzola lunare;
- 12 - distributore;
- 13 – pinze per raccogliere i campioni;
- 14 – fotocamera da 70 mm;
- 15 – ripetitore per le comunicazioni radio con la Terra;
- 16 - telecamera;
- 17 – antenna ad alto guadagno per le comunicazioni con la Terra;
- 18 - antenna a basso guadagno.

MARTE

7.1 - I NUMERI DI MARTE

7.1.1 - Parametri fisici

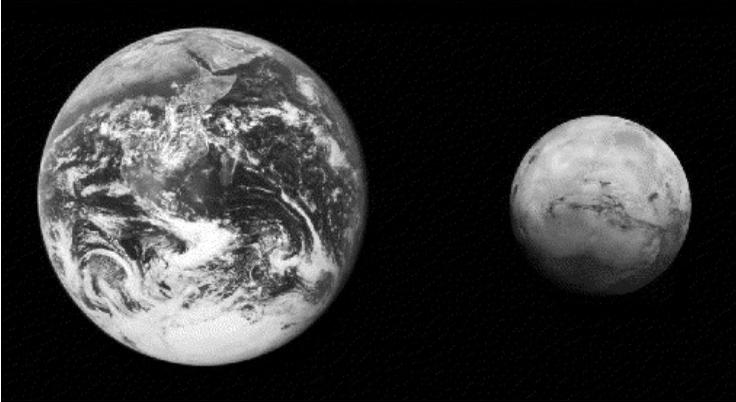


Fig. 7.1 - Confronto dei diametri tra Marte e la Terra

Marte è il quarto pianeta del Sistema Solare; ha un diametro di 6779 km e un volume 0,15 volte quello della Terra. Presenta uno schiacciamento di 0,009, quindi il diametro polare è di 6726 km.

La sua massa è $6,42 \cdot 10^{23}$ kg (0,1075 volte quella della Terra) e una densità di $3,94 \text{ g/cm}^3$, contro i $5,52 \text{ g/cm}^3$ del nostro pianeta.

Marte ha una gravità superficiale di $3,72 \text{ m/s}^2$ (la Terra $9,80 \text{ m/s}^2$).

Ruota su se stesso rispetto alle stelle in 24h 37m 23s (giorno *siderale*) e rispetto al sole in 24h 39m 37s (giorno *solare*, chiamato anche *sol*). In 24 ore il pianeta ruota pertanto di 351° : osservandolo ogni giorno alla stes-

sa ora terrestre lo si vede ruotato ogni volta di 9° in senso opposto a quello della rotazione. Con questa frequenza osservativa, e supponendo di stare al telescopio ogni sera per un'ora circa (durante la quale il pianeta ruota di quasi 15°), in una trentina di giorni ci appare tutta la superficie del pianeta.

L'orbita di Marte ($e = 0,09337$) è molto più ellittica di quella della Terra ($e = 0,0167$), per cui al perielio è significativamente più vicino al Sole ($d_p = 206700000$ km) che non all'afelio ($d_f = 249100000$ km). L'orbita viene percorsa quasi 686,98 giorni terrestri (= 668,60 giorni marziani).

L'asse di rotazione, diretto all'incirca verso α Cygni, è inclinato di $23^\circ 59'$ sul suo piano della sua orbita, per cui anche Marte ha le stagioni con una durata circa doppia e più marcate (a causa dell'orbita ellittica) rispetto alla Terra. Le forti variazioni di distanza dal Sole, unite alla totale mancanza di mari, influenzano le condizioni climatiche del pianeta; le temperature variano da un minimo di -140°C a un massimo di $+21^\circ\text{C}$.

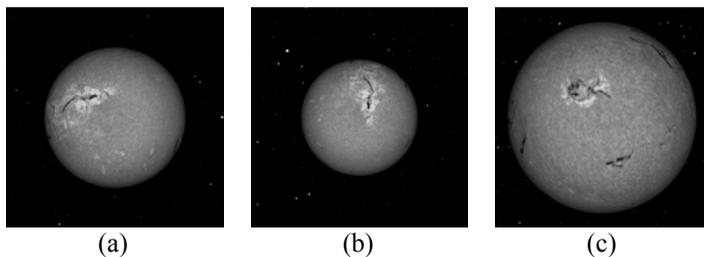


Fig. 7.2 - Le dimensioni del Sole visto da Marte: (a) al perielio a 207 milioni di km, (b) all'afelio a 250 milioni di km. (c) Il Sole come viene visto mediamente dalla Terra a 150 milioni di km

7.1.2 - I satelliti di Marte

Due piccoli satelliti gravitano intorno a Marte e molto probabilmente sono due asteroidi catturati dalla sua attrazione gravitazionale, nelle fasi iniziali della formazione del Sistema Solare. Scoperti nel 1877 dall'astronomo Asaph Hall, sono stati chiamati Phobos e Deimos. Il moto orbitale di Phobos è tale che nel giro di un centinaio di milioni di anni potrebbe cadere su Marte oppure frammentarsi prima di giungere sulla superficie del pianeta. Deimos si sta allontanando progressivamente.

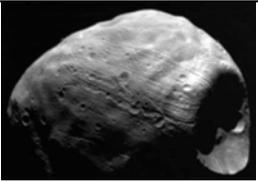
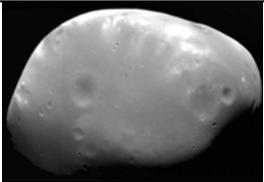
		
	PHOBOS	DEIMOS
Dimensioni (km)	27x18,8	15x11
Massa (kg)	$10,6 \cdot 10^{15}$	$2,4 \cdot 10^{15}$
Densità (kg/m ³)	1900	1750
Albedo	0,071	0,068
Distanza media (km)	9380	23460
Eccentricità	0,0151	0,0002
Inclinazione	1,075°	1,973°
Periodo orbitale (ore)	7,65384	30,29856
Rotazione (ore)	7,65384	30,29856

Tabella 7.1 – I parametri fisici dei satelliti di Marte

7.1.3 - Altri numeri di Marte

Quando nelle loro orbite la Terra e Marte si trovano dalla stessa parte del Sole, si parla di opposizione; in tale situazione la distanza di Marte dalla Terra può variare tra 56 milioni di km (opposizione perielica, ossia Marte al perielio e la Terra all'afelio) e 99 milioni di km (opposizione afelica, ossia Marte all'afelio e la Terra al perielio). Quando invece Marte si trova dalla parte opposta del Sole si parla di congiunzione: una congiunzione afelica (sia Marte che la Terra all'afelio) porta i due pianeti ad una distanza superiore ai 400 milioni di km e il diametro angolare di Marte va da un massimo di $25,7''$ (all'opposizione perielica), fino ad un minimo di $3,5''$ (alla congiunzione afelica).

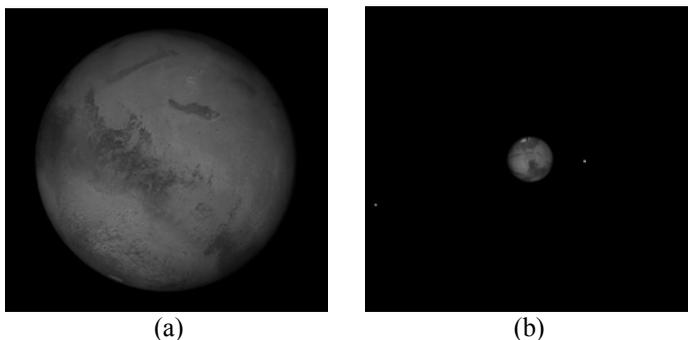


Fig. 7.3 - Le dimensioni di Marte dalla Terra: (a) il 30 ottobre 2005 quando si troverà a 69,6 milioni di km con diametro angolare di $20''$, (b) il 7 settembre 2004 a 400 milioni di km con diametro angolare di $3,5''$

La velocità orbitale di Marte all'afelio è di 21,95 km/s e al perielio di 26,97 km/s.

Nel 2003 si è avuta una Grande Opposizione di Marte, ovvero una opposizione perielica: il 27 agosto 2003

alle ore 9.51 UT (= tempo universale = ora di Greenwich) Marte si è trovato alla minima distanza dalla Terra (0,37271 UA = 55.758.000 km), il 28 agosto è stato all'opposizione e il 29 al perielio.

Dopo circa due mesi dalla congiunzione, Marte si separa abbastanza dal Sole da rendersi visibile prima dell'alba: inizia la cosiddetta apparizione, il periodo durante il quale il pianeta è osservabile in cielo. In questa prima fase lo vediamo muoversi fra le stelle di moto diretto, cioè verso est, e progressivamente si allontana dal Sole sorgendo sempre più presto. Circa dodici mesi dopo la congiunzione si rende visibile già di sera e inverte il suo moto, diventa cioè retrogrado (si muove verso ovest). Dopo un altro mese (13 dalla congiunzione) il pianeta passa all'opposizione, cioè sorge quando il Sole tramonta). Infine riprende il suo moto diretto verso un'altra congiunzione, restando visibile per altri 10 mesi e invisibile per 2 mesi. Un'apparizione di Marte interessa quindi circa 22 mesi (11 prima e 11 dopo l'opposizione) dei circa 26 mesi che intercorrono fra una congiunzione e la successiva; questo arco di tempo è chiamato *periodo sinodico* e vale 779,94 giorni terrestri.

Tenendo conto dei periodi di rivoluzione di Marte e della Terra, si può dimostrare che circa ogni 15 anni abbiamo una grande opposizione, ma l'allineamento dei due pianeti non sarà mai identico al precedente, ci sarà sempre una piccola differenza (anticipo o ritardo). In occasione dell'opposizione del 2003 molti astronomi hanno fatto calcoli in merito: secondo Jeffrey Beish e James DeYoung della Association of Lunar and Planetary Observers (ALPO) Marte fu più prossimo alla Terra nel 57537 a.C. Aldo Vitagliano (esperto in Meccanica Celeste dell'Università di Napoli) ha confermato un "incontro ravvicinato" nel 57538 a.C., ma più "largo" di quello calcolato per il 2003,

delle opposizioni e descrive come da esse si possano derivare i parametri orbitali di Marte. I parametri servirono all'astronomo alessandrino per affinare la sua teoria sul moto di Marte.

In seguito si passò alle cosiddette “Tabulae”, tabelle generali per il calcolo posizionale, completate da “Canones”, ossia manuali per l'uso. Un ruolo fondamentale ebbero le “Tabulae Toledanae” e le “Tabulae Alphonsinae”, dette così perché volute da Alfonso X, re di Castiglia, basate sulla teoria tolemaica. La precisione di queste tavole era di circa 5° per la longitudine di Marte. Da esse ne derivarono molte altre, elaborate sia in Europa che altrove.

Nel calcolo delle effemeridi di Marte, sino a Keplero, si riscontrano spesso errori nella longitudine del pianeta nei mesi prossimi alle opposizioni. Tali errori sono attribuibili alla vicinanza Terra-Marte che aumenta le perturbazioni, fenomeno sconosciuto agli astronomi prima di Newton.

Anche nel Purgatorio di Dante Alighieri c'è una citazione a Marte: nel II canto, ai versi 13-15 si legge;

*Ed ecco, qual sul presso del mattino
per li grossi vapor Marte rosseggia
giù nel ponente sopra il suol marino*

Inoltre l'Alighieri era solito osservare il pianeta tramontare al mattino verso il mare e nel Convito (II, XIII, 21) descrive Marte:

esso Marte, sì come dice Tolomeo nel Quadripartito, dissecca e arde le cose perché lo suo calore è simile a quello del fuoco; e questo è quello perché esso pare affocato di colore, quando più e quando meno, secondo la spessezza e raritate dei vapori che 'l seguono: li quali per lor mede-

*simi molte volte s'accendono sì
come nel primo della Metaura è
determinato.*

I calcoli di Regiomontano, nel XV secolo, evidenziarono discordanze e le osservazioni e le previsioni delle “Tavole Alfonsine”. Questo è un problema che ricorre spesso nella storia dell'astronomia di quel tempo, almeno sino a quando Keplero non ebbe posto le basi moderne dei moti celesti. Nel “De Motu Stellae Martis” egli utilizzò i dati (molto precisi) relativi alle dieci opposizioni osservate da Tycho Brahe per determinare l'orbita del pianeta: giunse così a dimostrare che l'orbita era un'ellisse.



Fig. 7.5 – Tre disegni eseguiti da Huygens; sono i primi che si conoscano che mostrano segni evidenti della superficie del pianeta.

Galileo Galilei (1564–1642) osservò per la prima volta Marte nel 1610; il suo piccolo strumento non gli permise d'apprezzare dettagli della superficie, ma nonostante ciò scoprì le fasi del pianeta rosso, come risulta da un suo scritto inviato a padre Domenico Castelli il 30 dicembre del 1619.

Francesco Fontana (1585–1656), napoletano, avvocato di professione. Tra le altre cose sono giunti a noi due disegni di Marte (eseguiti nel 1633 e nel 1638) che riportano al centro una macchia dovuta a difetti del suo stru-

strumento.

Christiaan Huygens (1629–1695), astronomo e fisico olandese, fu il primo a scorgere segni (reali) su Marte; ecco come descriveva il pianeta rosso che considerava abitato da esseri intelligenti:

Marte ... presenta zone più scure delle altre; il cui periodico apparire ha permesso di stabilire che i suoi giorni durano all'incirca quanto ai nostri. I suoi abitanti, però non noteranno apprezzabili differenze fra estate ed inverno, perché, come è stato dimostrato dal movimento delle macchie, l'asse di rotazione è pochissimo o per niente inclinato sul piano dell'orbita^[1]. La Terra deve apparire ai marziani suppergiù come a noi appare Venere e, con l'aiuto di un telescopio mostrerebbe le fasi come la Luna; essa non si discosta mai dal Sole di più di 48° per cui la vedrebbero come Mercurio e Venere, passare talvolta davanti al disco solare. Essi possono anche osservare Venere ad intervalli, come noi Mercurio. Sono incline a ritenere che il suolo di Marte sia di colore più scuro di quello di Giove o della Luna, il che causa la colorazione rossastra e la riflessione di una luce più debole di quanto dovrebbe essere a quella distanza dal Sole. Marte, come ho già notato, per quanto sia più lontano dal Sole è più piccolo di Venere e non ha lune che gli ruotano attorno^[2], e anche sotto questo aspetto come Mercurio e Venere deve essere ritenuto inferiore alla Terra. La luce e il calore che gli giungono sono la metà e talvolta tre volte minori dei nostri, ma ritengo gli abitanti si siano adattati a queste condizioni.

Gian Domenico Cassini (1625–1712) nel 1666 riuscì a disegnare ottime mappe del pianeta utilizzando un cannocchiale di soli 61 mm di diametro, determinò il pe-

^[1] Fu poi dimostrato che il suo asse era in realtà leggermente più inclinato di quello della Terra

^[2] I suoi due piccoli satelliti saranno scoperti solo nel 1877 da Hall Asaph

riodo di rotazione del pianeta (24h 40m) ed osservò per primo le sue calotte polari. Alcuni storici attribuiscono la scoperta delle calotte polari a Huygens nel 1656, ma i disegni a noi arrivati non consentono di determinare se ciò è vero. Gli schizzi del Cassini mostrano anche le tracce di quelli che due secoli dopo verranno chiamati canali.

Friederich Wilhelm Herschel (1738–1822) seguì le calotte polari mentre si riducevano con l'avanzare dell'estate, ipotizzando che, come quelle terrestri, fossero composte da ghiaccio. Dimostrò inoltre l'esistenza di un'atmosfera dopo aver osservato l'occultazione di una stella da parte del disco del pianeta. Misurò la rotazione del pianeta rosso ottenendo 24h 37min 23,7s.

Il gesuita Padre Angelo Secchi (1818–1878), oggi riconosciuto come uno dei grandi pionieri della spettroscopia stellare e planetaria, osservò Marte dal Collegio Romano e fu il primo ad individuare con certezza canali e nubi bianche su Marte; disegnò valide mappe.

Richard Antony Proctor (1837–1888) nel 1867 elaborò una mappa di Marte raccogliendo ed unificando i migliori disegni al tempo disponibili; essa sollevò un'ondata di critiche non solo perché si trattava di un lavoro limitato ma soprattutto perché egli aveva assegnato solo nomi di astronomi inglesi alle strutture visibili del pianeta.

Nel 1873 Camille Flammarion (1842–1925), divulgatore francese, in un articolo afferma:

Possiamo attribuire al colore dell'erba e delle piante, che senza dubbio rivestono le pianure di Marte, il caratteristico colore del pianeta...

Il colore rosso di Marte veniva così erroneamente attribuito alla vegetazione.

accettata dalla comunità scientifica e solo di recente è stata in parte modificata per meglio adattarla ai nuovi particolari rivelati dalle sonde spaziali.

Il 18 agosto 1877 l'americano Asaph Hall (1829–1907) annunciò la scoperta delle lune marziane Phobos (paura) e Deimos (terrore), che nella mitologia romana sono i cavalli che tirano il carro da guerra di Marte.

Percival Lowell (1855–1916), affascinato dal mistero dei canali di Marte, abbandonò la carriera diplomatica per dedicarsi allo studio dei pianeti. Trovò i finanziamenti necessari e costruì un eccellente osservatorio vicino a Flagstaff. Da quel momento Marte venne sottoposto a rigorose e sistematiche osservazioni, e le carte ottenute diventarono fra le migliori in circolazione. Dalle osservazioni dei canali, Lowell si persuase d'essere di fronte ad una gigantesca opera d'irrigazione, costruita dai marziani su un pianeta morente, per incanalare l'acqua che stagionalmente si produceva dallo scioglimento dei ghiacci delle calotte polari. Le sue osservazioni non erano sbagliate: semplicemente si basavano su presupposti errati. Le carte riportano in maniera esatta tutti quei particolari che gli strumenti disponibili gli consentivano di vedere. I meriti di Lowell tuttavia si estendono ben oltre l'erronea interpretazione delle osservazioni di Marte; egli creò una vera e propria scuola e molti suoi collaboratori ottennero risultati di rilevanza mondiale in vari campi dell'astronomia.

Vincenzo Cerulli nel 1890 costruì, su una delle colline che circondano Teramo, l'osservatorio di Collurania. Utilizzando uno strumento di 40 cm di apertura, iniziò a studiare il cielo ed in modo particolare Marte. Le relazioni pubblicate dopo le opposizioni del 1896 e del 1899 suscitavano grande clamore nell'ambiente scientifico perché non contenevano i canali. Egli partì dal fatto che la visione

che abbiamo di Marte, con ingrandimento massimo di 600 volte, era paragonabile a quella della Luna osservata ad occhio nudo. Quindi si chiese cosa saremmo in grado di capire della topografia lunare senza l'ausilio dei telescopi. Esaminando i canali di Marte, Cerulli notò che se fossero delle linee reali tracciate sul pianeta avrebbero dovuto vedersi meglio quando esso era più vicino, cosa che non accadeva. Inoltre i canali avrebbero dovuto vedersi meglio al centro del disco, mentre al contrario si vedevano meglio ai bordi. Cerulli concluse che erano gli occhi, o meglio i cervelli, degli osservatori che costruivano arbitrariamente i canali, dove elementi piccoli, tenui e confusi del pianeta erano impossibili da distinguere e separare. I fatti diedero ragione al Cerulli, non appena telescopi più potenti permisero di determinare che i canali di Marte erano una miriade di piccoli particolari.

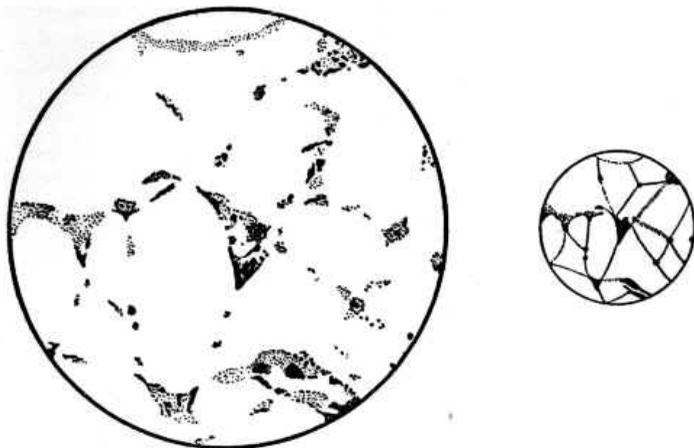


Fig. 7.7 - Se ci poniamo il disegno di sinistra ad alcuni metri di distanza possiamo verificare che l'immagine ci appare come nel disegno di destra e dimostrare che Cerulli aveva ragione

Il francese di origine greca Eugenios Antoniadi (1870–1944) ottenne delle mappe di Marte che furono utilizzate praticamente fino all'avvento dei primi satelliti artificiali negli anni '60. Avendo a disposizione strumenti adeguati riuscì a confermare l'idea di Cerulli sui canali. Ecco come Antoniadi scriveva il suo punto di vista:

Nessuno ha mai visto su Marte un canale vero, e così i canali più o meno rettilinei, semplici o doppi, di Schiaparelli non esistono né come canali, né come tracciati geometrici. Essi hanno però una base di realtà perché, al loro posto la superficie del pianeta presenta sia delle strisce irregolari più o meno continue e macchiettate, sia bordi frastagliati di regioni cupe, sia ancora laghi isolati e complessi. Così i dettagli del pianeta Marte presentano dovunque queste strutture irregolari e naturali, una caratteristica delle macchie di tutti i corpi del sistema del mondo.

A seguito dell' esplorazione ravvicinata da parte delle sonde spaziali è emersa la reale struttura della superficie marziana, e le mappe realizzate sono drammaticamente diverse da quelle foto-visuali. L'osservazione visuale di Marte viene ancora effettuata per lo più a livello amatoriale con notevoli risultati.

7.3 – L'ESPLORAZIONE SPAZIALE

7.3.1 - Il volo

I lanci delle sonde verso Marte vengono generalmente effettuati alcuni mesi prima dell'opposizione in modo che la sonda debba percorrere la minor quantità di strada possibile. Viene scelta un'orbita intorno al Sole che intersechi quella di Marte nel momento esatto in cui il pianeta passa in quella posizione.

Nazione	Missioni	Successi totali	Successi parziali	Insuccessi
URSS	18	-	4	14
USA	17	12	-	5
Russia	1	-	-	1
Giappone	1	-	-	1
Europa	1	-	1	-
Totali	38	12	5	21

Tabella 7.2 – Le missioni spaziali su Marte

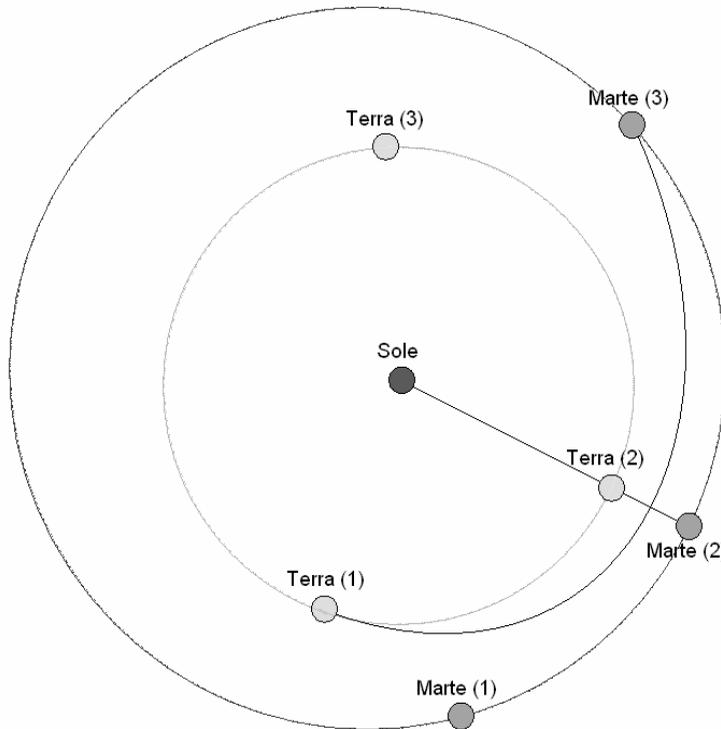


Fig. 7.8 - Posizioni di Terra e Marte durante il viaggio della sonda dell'ESA Mars Express; (1) il 2 giugno 2003, la data del lancio; (2) il 28 agosto 2003 il giorno dell'opposizione di Marte; (3) il 25 dicembre 2003 il giorno dell'arrivo della sonda su Marte.

Dal 1960 ha avuto inizio la corsa alla conquista di Marte; si sono avute 38 missioni con 17 successi e 21 insuccessi. La tabella 2 riassume gli esiti delle missioni. Come si può constatare l'Unione Sovietica ha effettuato più lanci di tutti, ma nessuna delle missioni ha portato a termine i compiti per i quali erano state concepite.

7.3.2 - Le missioni

Marsnik 1 (Mars 1960A) – URSS. Lanciata il 10 ottobre 1960, la missione fallì per il mancato inserimento in orbita terrestre. Il motore del terzo stadio cessò di funzionare dopo 13 secondi; circa 300 secondi dopo il lancio si perse il controllo e ne fu ordinata la distruzione.

Marsnik 2 (Mars 1960B) – URSS. Lanciata il 14 ottobre 1960, fallì per il mancato inserimento in orbita terrestre. Il motore del terzo stadio non si accese a causa di un problema di alimentazione dell'ossigeno liquido.

Sputnik 22 – URSS. Lanciata il 24 ottobre 1962, fallì per l'esplosione dell'ultimo stadio del lanciatore.

Mars 1 – URSS. Lanciata con successo il 1 novembre 1962 iniziò il volo verso Marte, ma il 21 marzo 1963, ad una distanza di 106 milioni di chilometri dalla Terra, si perse il contatto. Secondo i calcoli il 19 giugno 1963 sfiorò il pianeta rosso.

Sputnik 24 – URSS. Lanciata il 4 novembre 1962, era destinata al primo atterraggio su Marte. Non riuscì ad abbandonare l'orbita terrestre a causa dell'esplosione del terzo stadio del vettore. Ricadde sulla Terra due mesi dopo il decollo.

Mariner 3 – USA. Lanciata il 5 novembre 1964, fu la prima sonda americana lanciata verso Marte. Lo schermo di protezione non si staccò ed appesantì la sonda che non riuscì a lasciare l'orbita terrestre. Le comunicazioni cessarono il giorno dopo il lancio.

Mariner 4 – USA. Lanciata il 28 novembre 1964, fu la prima sonda a sorvolare Marte il 15 luglio 1965 ad una distanza minima di 9846 km. Inviò a terra le prime 22 fotografie della superficie marziana.

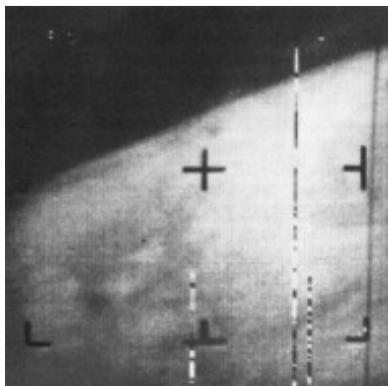


Fig .7.9 – La prima immagine di Marte inviata a Terra dalla sonda Mariner 4

Zond 2 – URSS. Lanciata con successo il 30 novembre 1964, si interruppero le comunicazioni all'inizio di maggio 1965 a causa di un guasto al sistema di alimentazione elettrica. Passò a qualche migliaio di km dalla superficie del pianeta nel mese di agosto 1965.

Zond 3 – URSS. Fu lanciata il 18 luglio 1965, sorvolò la Luna il 20 luglio 1965 inviando ottime immagini e continuò su un'orbita eliocentrica verso Marte come piattaforma di test per telecomunicazioni.

Mariner 6 – USA. Lanciata il 24 febbraio 1969, sorvolò

Marte a una distanza minima di 3431 km, inviando a terra 49 immagini d'insieme del pianeta e 26 immagini dettagliate della superficie. Permise di migliorare le conoscenze sull'atmosfera e sulla costituzione interna del pianeta.

Mariner 7 – USA. Lanciata il 27 marzo 1969 con un programma quasi identico a quello di Mariner 6, sorvolò il pianeta il 5 agosto 1969 a 3430 km dalla calotta polare sud. Inviò a terra 93 immagini del globo marziano e 23 immagini dettagliate della superficie.

Mars 1969A – URSS. Lanciata il 27 marzo 1969, non fu mai annunciata ufficialmente come missione verso Marte. Il terzo stadio del lanciatore esplose 438 secondi dopo il lancio.

Mars 1969B – URSS. Fu lanciata il 2 aprile 1969 e neanche questa fu annunciata ufficialmente. Un guasto pressoché immediato al primo stadio del lanciatore fece schiantare il razzo a poca distanza dal punto di lancio.

Mariner 8 – USA. Fu lanciata l'8 maggio 1971 e a causa del malfunzionamento del secondo stadio non raggiunse l'orbita terrestre, finendo nell'Atlantico a 250 km da Portorico.

Kosmos 419 – URSS. Lanciata il 10 maggio 1971, fallì perché il motore del terzo stadio non si accese a causa di un errore nella sequenza dei comandi.

Mars 2 – URSS. Lanciata il 19 maggio 1971, fu un successo parziale. Il veicolo orbitale entrò regolarmente in orbita attorno a Marte il 27 novembre 1971, continuando

ad inviare dati fino ad aprile 1972. Il modulo di atterraggio invece si schiantò al suolo a causa della perdita di contatto al momento dell'ingresso nell'atmosfera.

Mars 3 – URSS. Fu lanciata il 28 maggio 1971. Il veicolo orbitale entrò regolarmente nell'orbita di Marte il 2 dicembre 1971; anche il modulo di atterraggio si posò regolarmente sul suolo marziano, perdendo però il contatto dopo 20 secondi.

Mariner 9 – USA. Fu lanciata il 30 maggio 1971 ed entrò in orbita attorno a Marte il 14 novembre 1971. Fornì il primo studio dettagliato della superficie di Marte; venne disattivata, il 27 ottobre 1972, a causa dell'esaurimento del propellente del sistema di controllo dell'assetto. La missione del Mariner 9 è stata il primo grande successo dell'esplorazione di Marte. In meno di un anno di operatività è riuscita a fotografare tutta la superficie di Marte con una risoluzione di circa 1 km, rilevando gigantesche montagne di origine vulcanica, depressioni, tracce di attività tettonica e valli sinuose che assomigliano a letti asciutti di fiumi terrestri. Fu confermata anche la presenza di molti crateri da impatto come sulla Luna. Anche se non fu trovata acqua allo stato liquido in superficie, furono rilevate chiare tracce di processi idrologici.

Mars 4 – URSS. Lanciata il 21 luglio 1973, la sonda entrò in orbita marziana il 10 febbraio 1974, ma venne perso il contatto. La quantità di dati inviati a terra fu del tutto trascurabile.

Mars 5 – URSS. Lanciata il 25 luglio 1973, entrò con successo in orbita attorno a Marte il 12 febbraio 1974. Dopo

una ventina di orbite fu perso il contatto. Furono inviate a terra 108 fotografie.

Mars 6 – URSS. Lanciata il 5 agosto 1973, arrivò su Marte il 12 marzo 1974 liberando un modulo di discesa col quale si perse il contatto poco prima dell'atterraggio.

Mars 7 – URSS. Lanciata il 9 agosto 1973, fallì perché il modulo di discesa, sganciato dalla sonda il 9 marzo 1974, a causa di un guasto mancò la superficie di 1300 km.

Viking 1 – USA. Lanciata il 20 agosto 1975, prevedeva lo studio di Marte sia dall'orbita che dal suolo. Sito prescelto era la regione di Chryse Planitia. Fu un successo completo: sia l'orbiter che il lander compirono al meglio la loro missione. L'orbiter fu disattivato il 7 agosto 1980 a causa dell'esaurimento del propellente nel sistema di controllo dell'assetto. Il lander cessò di trasmettere l'11 novembre 1982 a causa di una falsa manovra.

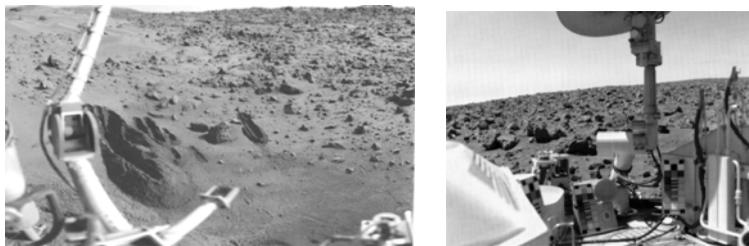


Fig. 7.10 – Prime immagini del suolo di Marte riprese dalle sonde Viking.

Viking 2 – USA. Missione gemella della precedente, fu lanciata il 9 settembre 1975 ottenendo anch'essa un completo successo. L'orbiter fu disattivato il 25 luglio 1978 per l'esaurimento del propellente nel sistema di controllo del-

l'assetto. Dopo aver esplorato la zona di atterraggio (Utopia Planitia), il lander fu spento l'11 aprile 1980, quando le batterie smisero di funzionare.

Dopo l'insuccesso della flottiglia sovietica lanciata nel 1973 (con queste sono 16 lanci con scarsi risultati), l'attenzione dell'Unione Sovietica si spostò su Venere, dove invece riuscirono ad ottenere maggiori successi. Rimase quindi il campo libero agli americani che nel 1975 dettero il via alle missioni Viking destinate all'atterraggio sul pianeta rosso. Subito dopo l'atterraggio i due moduli misurarono la composizione dell'atmosfera e analizzarono il suolo marziano, raccolto con una specie di "paletta". Il principale obiettivo era quello di cercare composti organici e segni di attività biologica a livello microbico; effettivamente uno degli strumenti destinati a questo scopo registrò una reazione, ma si ritenne che fosse dovuta ad un ossidante inconsueto presente sul suolo di Marte. Nonostante la conclusione dell'assenza di forme di vita, le missioni Viking furono tra quelle che ottennero maggior successo, tanto che per avere un'altra missione verso Marte bisognò aspettare 13 anni, quando l'URSS, appagata dai risultati ottenuti su Venere, si interessò di nuovo allo studio del pianeta rosso. Siamo ormai vicini alla fine dell'impero sovietico, fatto testimoniato dal contributo che la comunità scientifica mondiale diede allo sviluppo delle missioni Phobos 1 e 2.

Phobos 1 – URSS. Fu lanciata il 7 luglio 1988 e se ne perse il contatto fra il 31 agosto e il 2 settembre 1988, a causa di un errore umano.

Phobos 2 – URSS. Lanciata il 12 luglio 1988, entrò in or-

bita intorno a Marte il 29 gennaio 1989, ma si perse il contatto il 27 marzo dello stesso anno mentre la sonda si apprestava ad effettuare il primo appuntamento con il satellite Phobos. Ha effettuato 59 orbite.

Mars Observer – USA. Lanciata il 25 settembre 1992, dopo un viaggio impeccabile si sono persi i contatti il 21 agosto 1993 immediatamente prima dell'inserimento in orbita.

Mars Global Surveyor – USA. Lanciata il 7 novembre 1996, è entrata in orbita il 12 settembre 1997, ma a causa di un guasto ha ritardato la fase di presa dati di un anno. È ancora in attività.

Mars 96 - RUSSIA. Lanciata il 16 novembre 1996, fallì mentre era ancora in orbita terrestre. Rientrò nell'atmosfera il 18 novembre 1996. Era costituita da tre unità: un orbiter, due piccole stazioni autonome che dovevano atterrare sulla superficie e due penetratori che si dovevano conficcare nel suolo marziano.

Mars Pathfinder – USA. Lanciata il 2 dicembre 1996 atterrò sul suolo marziano il 4 luglio 1997 nella Ares Vallis. Consisteva in un veicolo semovente contenente strumenti per lo studio del suolo. La missione terminò il 27 settembre 1997, dopo 83 giorni di funzionamento.

Nozomi – GIAPPONE. Fu lanciata il 4 luglio 1998, ma per una manovra sbagliata in prossimità della Terra, il viaggio verso Marte si prolungò di 4 anni. Perso il contatto vicino a Marte alla fine del 2003, venne dichiarata persa il 9 dicembre dello stesso anno.

Mars Climate Orbiter – USA. fu lanciata il 11 dicembre 1998, ma per un incredibile errore di navigazione la sonda venne distrutta durante la manovra di inserimento in orbita marziana.

Mars Polar Lander – USA. Fu lanciata il 3 gennaio 1999 e scomparve durante la manovra di atterraggio il 3 dicembre 1999. Nonostante numerosi tentativi non si riuscì a ristabilire il contatto; la NASA abbandonò ufficialmente le ricerche il 17 gennaio 2000. La missione prevedeva l'atterraggio di un lander al limite della calotta polare sud e il rilascio di due microsonde di circa 3 kg ognuna che dovevano conficcarsi nel suolo marziano e studiarne la struttura. Questi due ultimi insuccessi, insieme a quello della Mars Observer, dimostrarono che la politica spaziale americana basata su piccole sonde poco costose non pagava. Diversamente dai tre decenni precedenti, gli anni '90 furono fallimentari per l'esplorazione di Marte.

Mars Odyssey – USA. lanciata il 7 aprile 2001, entrò in orbita intorno a Marte il 12 settembre 2001, ma a causa di un guasto ha ritardato la fase di presa dati di un anno. È ancora in attività.

Mars Express – ESA. È la prima sonda europea verso Marte. Lanciata il 2 giugno 2003, era composta da un orbiter (Mars Express) e da un lander (Beagle 2). Entrata in orbita il 25 dicembre 2003, non si è mai riusciti ad avere segnali da Beagle 2. Nonostante il non perfetto funzionamento di una parte della strumentazione è ancora in orbita, in piena attività.

Spirit & Opportunity – USA. Lanciati il 10 giugno e il 7 luglio 2003, sono due robot destinati all'esplorazione del suolo di Marte. Spirit è atterrata il 4 gennaio 2004 all'interno del cratere Gusev; Opportunity è atterrata il 25 gennaio 2004 in una regione chiamata Meridiani Planum in prossimità dell'equatore marziano. Programmati entrambi per funzionare tre mesi, sono ancora oggi in attività.

Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) – USA. Lanciata il 12 agosto 2005 è entrata in orbita il 10 marzo 2006. Frenata dall'atmosfera di Marte, entro novembre 2006, verrà immessa in un'orbita circolare polare molto bassa: avrà un periodo di 112 minuti e passerà a 320 km sopra il polo nord e ad appena 255 da quello sud. Il programma principale, che sarà svolto nei primi due anni, è quello di esaminare, di concerto con Mars Global Surveyor, Mars Odyssey e Mars Express, la superficie, l'atmosfera e l'interno del pianeta per conoscere la distribuzione del ghiaccio e per individuare i migliori siti per le future missioni sul pianeta, sia automatiche che umane. MRO servirà anche da stazione ripetitrice per le future missioni in superficie in corso di preparazione. Secondo le stime dovrebbe essere utilizzabile per questo scopo almeno fino al 2015.

7.4 – MARTE NELLA CULTURA POPOLARE

Marte è conosciuto ed osservato da più di cinquemila anni, un punto rosso nel cielo che, durante le opposizioni, appare come un occhio color brace e che certamente intimoriva le prime civiltà. Il nome che i vari popoli hanno attribuito al pianeta evoca questo aspetto.

Gli Egizi lo identificarono col dio Horus rosso, il

falco ad ali spiegate, come si vede nel cosiddetto zodiaco di Athribis. I Babilonesi lo chiamarono “an”, “salbatanu”, sacro al dio del fuoco “gibil”. Secondo il Lexikon di Esichio (V sec. d.C.) il nome fu trasmesso ai Greci come “pyròs astèr” e “zelébatos”, l'astro di fuoco, attributo che si ritrova nelle denominazioni indiana “lohita” e cinese “ying huo”. Per i Maya era il dio dal naso lungo. Le popolazioni indiane lo chiamarono Angaraka (carbone ardente) e Lohitanga (corpo rosso). I Sumeri associarono la sua colorazione rossastra col sangue e lo chiamarono Nergal, loro Dio della guerra.

Forse l'attributo migliore dei Babilonesi fu “kakkab la minati”, la stella imprevedibile, a causa del moto difficilmente calcolabile, concetto ripreso da Plinio (*Naturalis Historia* 2, 15, 7): “cuius est maxime inobservabilis cursus”.

In Grecia i nomi variarono da “pyroeis”, di fuoco, a “thouros”, bellicoso, e “Ares”, il dio della guerra, figlio di Zeus e di Era.

Nell'Italia antica si ebbe l'umbro “marthi”, l'etrusco “mamers”, i latini “mavors”, “mamers”, “marspiter”.

Omero nell'Iliade ci racconta che il dio Marte non era molto amato dagli altri dei dell'Olimpo, e anche tra i mortali non riscuoteva molte simpatie. Solo a Sparta, nelle origini, gli venivano sacrificati dei prigionieri di guerra.

I satelliti di Marte, Phobos (Paura) e Deimos (Volo, o meglio Terrore o Panico) erano gli attendenti del dio Marte. Il XV libro dell'Iliade riferisce:

*Egli parlò, e chiamò la Paura e il Volo per aggiogare i suoi destrieri,
e per aiutare Marte ad indossare la sua gloriosa armatura.*

Il dio greco e romano è una delle dodici divinità che abitano il monte Olimpo. Inizialmente identificato

come il dio della primavera, in seguito prese la connotazione di dio della guerra a causa della sua indole aggressiva che rendeva difficili i rapporti con le altre divinità. Fra queste, l'unica in armonia con lui era Afrodite/Venere, il cui amore per l'impetuoso dio diede origine alle storie narrate nell'*Odissea* e nelle *Metamorfosi* di Ovidio. Il mito riferisce che Venere, sposa di Efesto/Vulcano, si innamorò perdutamente di Marte e tradì il legittimo consorte; il marito, avvertito da Elio/Sole, forgiò delle catene magiche che avvinsero i due amanti all'alcova, sorprendendoli così in flagrante.

Per gli antichi Romani Mars era il padre di Romolo e Remo, secondo come importanza solo a Iuppiter. Col tempo divenne supremo protettore di Roma, al quale offrire sacrifici prima di ogni campagna militare e parte del bottino ricavato da ogni conquista.

Il simbolo che si usa ancora oggi in astronomia per indicare Marte evoca uno scudo rotondo ed una lancia e risale al dio greco della guerra.

Anche il nome della stella più luminosa della costellazione dello Scorpione, la supergigante rossa Antares, si riallaccia a questa tradizione: essa “rivaleggia” nel cielo con Ares per luminosità e colore.

Il mese di marzo è così chiamato in suo onore, come pure il terreno dedicato alle esercitazioni militari a Roma, che prende il nome di Campo Marzio, o Campo di Marte.

In tutte le epoche si hanno raffigurazioni del dio che, con alcune varianti, è un guerriero con un elmo e uno scudo quali attributi.

Agli inizi della storia, non trovando altre possibili spiegazioni, s'interpretavano e si raffiguravano le meraviglie del cielo come fenomeni di manifestazioni degli dei,

ma con l'evolversi delle conoscenze astronomiche le raffigurazioni divennero sempre più soggette alla razionalità scientifica.

Negli anni '50 del secolo scorso, parallelamente allo sviluppo dell'astronomia nacque la Space Art, di cui Chesley Bonestell è certamente il massimo esponente.

Il matrimonio tra Marte e la cultura popolare del XX secolo si deve soprattutto all'impatto che le idee di Percival Lowell hanno avuto su intere generazioni di sognatori. Abile conferenziere e straordinario divulgatore, Lowell pubblicò alcuni libri di grande successo ed eccezionale influenza, *Mars* (1895), *Mars and Its Canals* (1906) e *Mars as the Abode of Life* (1908), nei quali sosteneva l'origine artificiale dei canali marziani.

Un altro influente sostenitore dell'esistenza dei canali fu l'astronomo francese Camille Flammarion che nel 1884 pubblicò il libro divulgativo *Les Terres du Ciel*, con diverse illustrazioni che riproducevano i paesaggi possibili in diversi mondi del Sistema Solare. Per Marte è evidente l'influenza di Schiaparelli.

In quest'epoca maturò uno dei capolavori della letteratura di fantascienza di tutti i tempi, *La Guerra dei Mondi*, di Herbert G. Wells (1866–1946). Apparso a puntate sulla stampa periodica nel 1897 e pubblicato come libro l'anno seguente, il romanzo racconta di un'invasione della Terra da parte di Marziani tecnologicamente molto più sviluppati di noi. Abbandonando un pianeta morente, il loro obiettivo è quello di impadronirsi della Terra - senza molto interesse e rispetto per i suoi abitanti - per sfruttarne le risorse, tema successivamente copiato più volte. La conclusione, che vede i Marziani soccombere ai germi terrestri, stupisce per la sua lungimirante attualità.

Nel 1911 Edgar Rice Burroughs (1875–1950) pub-

blica *Storie Marziane*; pubblicò ben 11 romanzi dedicati alle avventure di John Carter che, trasportato su Marte, deve adattarsi rapidamente alla cultura e alle vicende politiche di quel pianeta. Anche il Marte di Burroughs è un pianeta morente, con gli oceani in fase di progressivo prosciugamento, l'atmosfera sempre più tenue e un'ostilità ininterrotta tra i regni che si dividono il pianeta. Egli usò nei romanzi la nomenclatura proposta da Schiaparelli. I racconti di Burroughs su Marte sono stati pubblicati in Italia dalla Casa Editrice Nord.

Il 30 ottobre 1938 Orson Welles (1915–1985) mandò in onda un adattamento de *La Guerra dei Mondi*; i Marziani atterravano nel New Jersey avanzando in modo inarrestabile attraverso gli Stati Uniti orientali. La trasmissione radiofonica, progressivamente drammatizzata da dispacci di agenzia e collegamenti in diretta dalla linea del fronte, fu seguita da sei milioni di ascoltatori e, nonostante i ripetuti annunci che si trattasse di una messinscena, si calcola che circa un milione di persone abbiano creduto all'invasione marziana.

Nel 1950 Ray Bradbury pubblicò la raccolta delle celeberrime *Cronache Marziane*, nelle quali, con una serie di brevi racconti (il primo era apparso nel 1946), narrò la conquista umana del Pianeta Rosso. Questa volta erano gli esseri umani, con tutti i loro pregi e i loro difetti, a invadere un mondo popolato da una civiltà antica, saggia e affascinante.

Di indole completamente diversa fu *Le Sabbie di Marte* del 1951, romanzo di Arthur C. Clarke che racconta la colonizzazione del pianeta, la costruzione delle prime città e il processo di "terraforming" per renderlo abitabile. Profondamente ancorato alle conoscenze scientifiche dell'epoca, molti dettagli del racconto sono oggi superati dalle

acquisizioni dell'era spaziale, ma diverse intuizioni sono ancora attuali.

Allo stesso filone appartiene il racconto breve di Isaac Asimov *Alla Maniera Marziana* (1952), che narra dei problemi tra la colonia su Marte e la Terra per l'approvvigionamento d'acqua. Un influente uomo politico terrestre scatena una campagna affinché la costosissima spedizione su Marte della preziosa sostanza venga interrotta e i coloni decidono così di procurarsela con una missione agli anelli di Saturno.

Nel 1957, con il lancio della prima sonda, lo spazio divenne una realtà quotidiana descritta dai cronisti e cessò di essere dominio esclusivo della scienza e dell'immaginazione. Da allora solo una manciata di autori è stata in grado di realizzare storie credibili. Uno di questi è stato senz'altro Robert A. Heinlein (1907–1988), che nel 1961 pubblicò *Straniero in Terra Straniera*. Il romanzo racconta di un bambino, unico superstite della prima missione umana sul Pianeta Rosso, allevato e educato dai Marziani; ritornato sulla Terra, deve contrapporre il suo istinto umano e la sua educazione marziana ad un mondo dominato dal denaro e dalla corruzione.

Il primo film ad occuparsi di Marte fu l'inglese *A Message from Mars* del 1913, film muto di J. Wellett Walzer. Ramiel, il marziano, è inviato sulla Terra per redimere un terrestre dissoluto.

Il successivo fu *Aelita*, pellicola muta del 1924 diretto da Jakov Protazanov. Lungometraggio sovietico di carattere propagandistico, ritrae Marte come un mondo dominato dal capitalismo: due ingegneri russi, raggiunto il pianeta con un razzo di loro costruzione, innescano una rivoluzione contro la dispotica regina Aelita.

Del 1938 è l'americano *Flash Gordon: Mars At-*

tacks the World, diretto da Ford Beebe e Robert Hill e ricavato da una miniserie di 15 episodi intitolata *Flash Gordon's Trip to Mars*.

Negli anni '50 diverse furono le pellicole dedicate a Marte; la più significativa è sicuramente *The War of the Worlds (La Guerra dei Mondi)* del 1953, trasposizione moderna del romanzo di Wells diretta da Byron Haskin.

Il numero di film sull'argomento si moltiplica negli anni '60 e '70; da menzionare è *Capricorn One* di Peter Hyams del 1977, in cui i responsabili della prima missione umana verso Marte, certi dell'insuccesso, simulano tutto il viaggio per non affrontare le conseguenze negative della verità. Segue la corrente di pensiero (e di sospetto), secondo la quale l'uomo non avrebbe mai messo piede sulla Luna.

La rinascita dell'interesse del cinema per le storie "classiche" di fantascienza ambientate su Marte si ebbe nel 1990 con *Total Recall (Atto di Forza)*, di Paul Verhoeven; il film è ispirato a un racconto di una ventina di pagine di Philip K. Dick. Altro film godibilissimo fu *Mars Attacks!* di Tim Burton, del 1996; in questa ironica parodia dei film di "invasione" degli Anni Cinquanta i marziani invadono la Terra con dei dischi volanti cogliendo tutti di sorpresa. Una vecchia signora scoprirà per caso l'arma per sconfiggerli.

Il secolo si è infine concluso con due pellicole, entrambe del 2000, che rivisitano il tema delle prime spedizioni umane su Marte, con le incognite del volo spaziale e l'ambientazione marziana iperrealista (almeno sulla base delle conoscenze attuali): *Mission to Mars*, di Brian De Palma, e *Red Planet*, di Anthony Hoffman.

7.5 – L'ATMOSFERA, I VENTI E IL CLIMA

Esistono notevoli somiglianze tra l'atmosfera di Marte e quella terrestre. Sono presenti variazioni meteorologiche che dipendono dalle zone del pianeta e dalle stagioni, nonché regimi di venti periodici come sulla Terra. Ma esistono anche differenze fondamentali, dovute alla diversa composizione chimica e alla bassissima densità dell'atmosfera marziana (la pressione media alla superficie è di circa 7 hPa^[3], contro il valore tipico terrestre di 1013 hPa). Il calore latente dovuto ai passaggi di stato dell'acqua, importante per l'atmosfera terrestre, è praticamente assente in quella marziana. La bassa pressione rende trascurabile l'effetto serra; l'atmosfera si riscalda in virtù dell'assorbimento da parte del pulviscolo in sospensione.

Un altro aspetto peculiare di Marte è la migrazione di circa il 25% dell'intera atmosfera dalle calotte polari alla circolazione aerea – e viceversa – al variare delle stagioni.

L'anidride carbonica, il maggiore costituente dell'atmosfera del pianeta, era stata individuata attraverso analisi spettroscopiche già alla fine degli anni '40 del secolo scorso (Kuiper, 1952), ma la sua grande abbondanza fu riconosciuta soltanto a metà degli anni Sessanta, quando si comprese quanto fosse tenue l'atmosfera marziana. Le prime stime di pressione erano infatti basate sulla diffusione della luce solare da parte dei gas atmosferici, e l'effetto del pulviscolo in sospensione (allora molto sotto-

^[3] L'unità di misura della pressione nel Sistema Internazionale è il Pascal (Pa), pari a 1 Newton/m². L'*ettopascal* (hPa) corrisponde a 100 Pascal ed è un'unità equivalente al vecchio millibar, precedentemente usato in meteorologia.

valutato) forniva valori largamente superiori a quelli reali. L'errore fu corretto misurando la larghezza della banda molecolare di assorbimento del CO₂ e i nuovi risultati vennero confermati in modo indipendente dal decadimento dei segnali radio emessi dalle sonde Mariner 6 e 7 quando Marte si frapponeva tra esse e la Terra^[4]. Conseguenza importante della bassa pressione è che l'acqua allo stato liquido non può esistere in forma stabile sulla superficie del pianeta (esclusa, al limite, la regione del bacino Hellas).

Gas	Abbondanza (volume % o parti per milione)
Anidride carbonica (CO ₂)	95,3%
Azoto (N ₂)	2,7%
Argon (Ar)	1,6%
Ossigeno (O ₂)	0,13%
Monossido di carbonio (CO)	0,07% (700 ppm)
Vapore acqueo (H ₂ O)	0,03% (300 ppm)
Idrogeno (H ₂)	10 ppm
Ossido di azoto (NO)	3 ppm
Neon (Ne)	1,5 ppm
Kriptone (Kr)	0,3 ppm
Xeno (Xe)	0,08 ppm
Ozono (O ₃)	0,03 ppm

Tabella 7.3 – Composizione dell'atmosfera marziana

La temperatura superficiale è largamente influenzata dal terreno e dalla quantità di polvere in sospensione nell'aria. Quando l'atmosfera è pulita le escursioni termi-

^[4] La curva caratteristica di decadimento del segnale radio dipende dalla variazione con l'altezza dell'indice di rifrazione dell'atmosfera attraversata dal segnale, e quest'indice dipende dalla pressione atmosferica.

che tra giorno e notte sono piuttosto accentuate, raggiungendo e superando anche i 60°; in presenza di polvere la differenza tra giorno e notte si riducono, fino anche a soli 10° durante le tempeste globali. Le temperature nei siti di atterraggio delle Viking 1 (Chryse Planitia, latitudine 22,5° N) non superavano mai i -20 °C: si possono tuttavia registrare temperature anche oltre i 20 °C in zone più prossime all'equatore e intorno al mezzogiorno (ma al calar della notte si ritorna ovunque ben sotto allo zero).

La pressione superficiale varia anche con la quota e quest'effetto è molto marcato su Marte, dove il rilievo è più esagerato rispetto alla Terra: il fondo del bacino di impatto Hellas è a 5 km sotto il livello medio di riferimento marziano (non esiste un «livello del mare» vero e proprio, ovviamente), mentre la sommità del vulcano Olympus Mons è a 27 km al disopra di questo livello. La diminuzione della pressione con la quota è in generale espressa dalla cosiddetta *legge barometrica* $P(h) = P_0 e^{-h/\tau}$ dove h è la quota rispetto alla superficie, P_0 la pressione al livello del suolo e τ è detta *altezza di scala*, nel caso di Marte circa 8 km (più o meno il valore terrestre). Tra i due estremi di quota citati la pressione varia quasi di un fattore dieci.

Interessanti sono le variazioni stagionali, che erano state addirittura previste in anticipo dai modelli teorici. Durante l'inverno una quota consistente di CO₂ dell'emisfero più freddo solidifica passando dall'atmosfera alla calotta polare, situazione che si inverte nel corso dell'estate. La notevole eccentricità dell'orbita marziana causa una sensibile asimmetria delle stagioni tra i due emisferi: l'inverno australe è più lungo e più freddo (cade quando Marte è all'afelio) e l'estate più breve e più calda (cade con Marte al perielio) rispetto alle analoghe stagioni boreali: l'emisfero australe riceve quindi in estate

ben il 45% di energia in più di quella che raggiunge il pianeta durante l'estate boreale. Il risultato di questa situazione è duplice:

- 1) La calotta polare australe raggiunge una maggiore estensione rispetto alla calotta polare boreale, sottraendo all'atmosfera una quantità superiore di CO₂;
- 2) La calotta polare australe è sottoposta durante l'estate a un'insolazione più intensa e sublima in modo più completo, rilasciando maggiori quantità di CO₂ nell'atmosfera marziana.

Le variazioni stagionali dell'emisfero australe sono quindi più marcate e finiscono per dominare il ciclo globale della pressione. Ciò è in accordo con i dati delle sonde Viking. A questo quadro semplificato si dovrebbe aggiungere l'anidride carbonica intrappolata nel terreno marziano, una quantità probabilmente notevole che potrebbe interagire con l'atmosfera, anche se su tempi scala molto più lunghi di una singola stagione.

Non mancano infine variazioni di pressione di minore entità, i cui periodi possono andare da qualche ora a qualche giorno. Quelle più rapide sono probabilmente dovute a venti di caduta (movimento di masse d'aria causato dalla topografia) o anche a vere e proprie «maree» atmosferiche generate dalle variazioni della temperatura. Queste ultime diventano più sensibili all'aumentare dell'opacità atmosferica, fenomeno che si verifica quando si innesca una tempesta di polvere.

I venti di caduta e le maree atmosferiche non raggiungono grandi velocità, attestandosi tra i 2 m/s e i 7 m/s (dati Viking, tutti relativi all'emisfero Nord). La situazione comincia a cambiare all'inizio dell'autunno, che per le medie latitudini settentrionali è contraddistinto dal passaggio di perturbazioni locali (visibili come vortici nelle im-

magini del pianeta), generate dall'allargamento della calotta polare: le velocità tipiche del vento si attestano sui 5 m/s con punte fino a 10 m/s. Per avere venti più forti è necessario aspettare le tempeste di polvere. Queste si originano di solito a cadenze annuali (anni marziani) nell'emisfero meridionale, in corrispondenza del passaggio al perielio: spesso assumono carattere globale, giungendo a coprire quasi tutta la superficie del pianeta. Sono frequenti anche tempeste più localizzate, che si dissolvono nel giro di alcuni giorni. Gli eventi più importanti possono durare anche diverse settimane.

La formazione delle tempeste è più probabile nelle zone ad elevato gradiente termico, dove è possibile lo sviluppo di venti sufficientemente intensi. Luoghi d'elezione sono il bordo della calotta polare meridionale (in dissolvimento con l'arrivo dell'estate australe) e le regioni con topografia maggiormente accentuata (Argyre, Hellas o anche la regione di Claritas Fossae).

Sono state proposte diverse teorie per spiegare come le tempeste possano nascere e propagarsi, talvolta su tutto il pianeta: la questione non è del tutto chiarita, ma il processo più plausibile sembra l'innescò di un meccanismo di feedback tra le tempeste di polvere e le maree atmosferiche diurne. Secondo questo modello, inizialmente la polvere viene sollevata nell'atmosfera da venti di caduta o di gradiente (termico). L'aumento della quantità di pulviscolo nell'aria accresce poi l'opacità dell'atmosfera e quindi anche la sua capacità di assorbire il calore solare; questo accentua le escursioni di temperatura giornaliera nello strato d'aria al di sopra della polvere, intensificando ulteriormente le maree atmosferiche. In condizioni favorevoli esse riescono a sollevare maggiori quantità di polvere e a rafforzarsi nel corso del processo, generando il meccanismo di

retroazione necessario a sollevare enormi quantità di polvere in zone vastissime. La tempesta comincia a spegnersi quando la polvere in sospensione nell'atmosfera raggiunge quantità tali da abbassare drasticamente il gradiente termico alla superficie; la crescita delle maree atmosferiche non è più alimentata e la velocità del vento si smorza fino al punto in cui esso non riesce più a sollevare polvere.

Il contenuto di umidità dell'atmosfera varia in maniera considerevole con la latitudine e la stagione, meno con la quota: le analisi delle Viking mostrano che è distribuito abbastanza uniformemente ad ogni quota e non risulta concentrato vicino alla superficie.

Generalmente l'emisfero invernale ha un'atmosfera molto secca (quasi tutto il vapore acqueo è solidificato nella calotta polare), mentre al polo opposto l'aria è addirittura vicina alla saturazione (100% di umidità!). La netta asimmetria tra le calotte polari dipende, oltre che dall'ellitticità dell'orbita, dalla maggiore altitudine media dell'emisfero meridionale. La calotta residua al polo nord è con tutta probabilità composta di ghiaccio d'acqua, mentre al polo sud prevale il ghiaccio secco (CO₂ congelata), anche se i due composti sono presenti in entrambe le calotte: più di quella meridionale, la calotta settentrionale contiene grandi quantità di pulviscolo imprigionato nel ghiaccio. L'effetto delle tempeste di polvere è di sottrarre umidità dall'atmosfera, trasferendola nelle calotte polari insieme a particelle di pulviscolo: in questo modo si spiegano le morfologie visibili soprattutto in prossimità della calotta polare settentrionale, che mostrano depositi di ghiaccio "sporco" stratificatosi nel corso di innumerevoli cicli di sublimazione e risolidificazione.

Poiché le tempeste di polvere si propagano da sud a nord, c'è chi ipotizza un trasporto netto di vapore acqueo

dall'emisfero australe a quello boreale attraverso la loro azione: questa idea è in accordo con l'abbondanza di ghiaccio d'acqua nella calotta polare nord.

Anche se il vapore acqueo nell'atmosfera marziana è decisamente scarso (corrispondente ad uno strato di 0,01 mm di spessore medio se precipitasse alla superficie sotto forma di acqua!), basta comunque per formare delle nubi, perché il valore di saturazione dell'atmosfera è molto basso. Siamo lontani dai valori di copertura del cielo della Terra (circa il 50% della superficie), ma su Marte è sempre possibile osservare delle nuvole in qualche luogo. Riportiamo una classificazione^[5] dei diversi tipi:

1) "Cappuccio" della calotta. Si forma sopra le calotte polari in periodi diversi dell'anno marziano:

- in autunno, sopra il polo nord: è una estesa coltre di vapore acqueo e, probabilmente, anidride carbonica. Può scendere anche fino alla latitudine di 50°. Con l'arrivo dell'inverno il vapore acqueo solidifica e l'atmosfera ritorna limpida;
- all'inizio della primavera, sopra il polo sud. In questo caso è probabile una maggiore abbondanza di anidride carbonica.

In autunno la calotta polare australe mostra nubi isolate e bande di foschia al posto di un cappuccio ben sviluppato: a nord manca invece il cappuccio primaverile. Tali differenze sembrano riflettere la diversa composizione chimica delle due calotte (più H₂O nella nord, più CO₂ nella sud).

2) Nubi di onda. Si formano in corrispondenza di ostacoli (non necessariamente elevati) al movimento delle masse d'aria, quali per esempio i crateri; sono particolarmente

[5] Vedi: Michael H. Carr, *The surface of Mars*, 1981 Yale University Press

frequenti sui bordi della calotta polare quando è presente il cappuccio. Il meccanismo che le origina è abbastanza semplice: il raffreddamento dei bassi strati dell'atmosfera instaura un gradiente verticale stabile di temperatura. Il vento in arrivo è disturbato dalla presenza dell'ostacolo: si crea un'oscillazione ondosa nel movimento dell'aria. Sulla cresta dell'onda si ha la condensazione di H₂O e/o CO₂. Come risultato si forma un treno regolare di nubi allineate grosso modo ad angolo retto con la direzione prevalente del vento.

3) Nubi convettive. Generalmente si originano in aree elevate intorno al mezzogiorno locale, quando il forte riscaldamento del terreno crea instabilità atmosferica. La loro altezza è intorno ai 4-6 km.

4) Nubi orografiche. Sono generate dal sollevamento di masse d'aria al di sopra di elevazioni topografiche di grandi dimensioni, come i vulcani della regione di Tharsis o lo stesso Olympus Mons. Sono più frequenti in primavera e in estate, in corrispondenza del picco stagionale di concentrazione del vapore acqueo nell'atmosfera. Si sviluppano lentamente a partire dal mattino e raggiungono la massima estensione durante il pomeriggio, quando sono più forti i venti di caduta. Possono apparire sopra o sotto vento, a seconda dell'intensità dei venti prevalenti.

5) Foschie del terreno. Visibili nelle depressioni (fondo dei canyon e dei crateri) all'alba e al tramonto, consistono probabilmente di ghiaccio d'acqua.

6) Nubi di alta quota. Occasionalmente si possono osservare come filamenti nella parte oscura del terminatore^[6] marziano mentre intercettano brevemente la luce solare subito dopo il tramonto o prima dell'alba. Un'altra mani-

[6] È il nome della linea di separazione tra la parte del disco illuminata dal Sole e quella in oscurità.

festazione sono le foschie visibili al bordo del disco del pianeta: l'altezza è di alcune decine di km e la composizione è probabilmente mista (vapore acqueo più anidride carbonica).

L'attuale atmosfera rappresenta probabilmente soltanto una frazione di quella che nel passato deve aver circondato il pianeta. Come Venere e la Terra, Marte ha un'atmosfera secondaria, cioè fuoriuscita per degassamento dal pianeta dopo che l'atmosfera primitiva (primaria) si è dispersa nello spazio. Le ragioni per questa convinzione sono molteplici: la nebulosa protoplanetaria conteneva idrogeno ed elio come elementi più abbondanti, e questi devono essere entrati nella composizione atmosferica dei pianeti appena formati. I corpi maggiori (Giove, Saturno, Urano e Nettuno) avevano gravità sufficiente per trattene- re molto gas, mentre i pianeti interni non sono riusciti a evitarne la dispersione nello spazio. I gas originari sono poi stati rimpiazzati dalla fuoriuscita di elementi volatili (H, C, N, O, S, Cl) dal mantello attraverso l'attività vulcanica: ad essi si sono aggiunti i processi erosivi che hanno formato la crosta superficiale, con elementi quali Si, Al, Fe, Ca. Si spiega così la diversa composizione chimica dei pianeti interni rispetto a quella del Sole.

Non è ancora possibile stabilire con precisione quale sia stata l'entità del degassamento per Marte. L'orientamento più comune tra gli esperti è che la quantità dei gas fuoriusciti sia stata minore rispetto alla Terra e a Venere, data la loro maggiore massa. L'evaporazione dei gas nello spazio avviene in moltissimi modi, alcuni dei quali molto complessi; la bassa gravità marziana sembra comunque aver consentito la fuga nello spazio anche di una parte consistente dell'atmosfera secondaria. Ancora incerta resta la quantità di elementi volatili intrappolata nel

terreno o sotto la superficie, soprattutto CO₂ e H₂O: quest'ultima, in particolare, è di importanza fondamentale per ricostruire la storia del clima marziano.

In attesa di dati sicuri sulla presenza di ghiaccio sotto la superficie (*permafrost*), qualche indizio utile viene fornito dalle abbondanze isotopiche per l'ossigeno e l'azoto. Entrambi questi elementi possono sfuggire grazie a processi fotochimici che hanno luogo nell'esosfera marziana. È ragionevole aspettarsi che in prossimità della superficie del pianeta si registri una maggiore abbondanza degli isotopi più pesanti (¹⁵N e ¹⁸O) rispetto a quelli più leggeri (¹⁴N e ¹⁶O). Dunque i rapporti ¹⁵N/¹⁴N e ¹⁸O/¹⁶O possono fornire indicazioni sull'evoluzione dell'atmosfera marziana.

Confrontandola con quella terrestre, l'attuale atmosfera marziana è molto arricchita in ¹⁵N rispetto a ¹⁴N, e questo suggerisce che Marte abbia perduto notevoli quantità di azoto. Ipotizzando per il rapporto H/N (idrogeno/azoto) un valore simile a quello terrestre, si arriverebbe alla conclusione che il pianeta abbia lasciato sfuggire negli ultimi quattro miliardi di anni tanta H₂O da ricoprire la superficie con uno strato di 130 m, una quantità davvero enorme.

A differenza dell'azoto, non si riscontra per l'ossigeno un arricchimento dell'abbondanza dell'isotopo più pesante (¹⁸O) rispetto al più leggero (¹⁶O). Questo non può significare che l'ossigeno non sfugge: esso dovrebbe comportarsi esattamente come l'azoto. Potrebbe però esistere una riserva di ossigeno sotto la superficie che interagisce con l'atmosfera in un ciclo di scambio, mantenendo costante il rapporto ¹⁸O/¹⁶O anche su tempi molto lunghi. I candidati più probabili per la riserva di ossigeno sono ancora CO₂ e H₂O, sotto forma gassosa o solida: per l'H₂O,

le stime basate sulla costanza del rapporto di abbondanze isotopiche $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ conducono a una quantità di acqua compatibile con gli ipotetici 130 m che Marte avrebbe degassato (il condizionale è d'obbligo!) nel corso della sua storia. Un'ulteriore discussione sulla riserva di volatili immagazzinata nel suolo marziano viene svolta nel paragrafo dedicato ai minerali e alla chimica superficiale.

I dati sull'azoto e sull'ossigeno, dunque, pur essendo opposti tra loro, concordano su un ipotetico scenario di evaporazione dell'acqua originaria. Si attendono i dati radar delle ultime sonde per informazioni quantitative dal sottosuolo.

L'evaporazione dell' H_2O dall'atmosfera marziana è ovviamente legata a quella dei suoi due componenti, l'ossigeno e l'idrogeno. Quest'ultimo, molto più volatile, tende prima della fuga definitiva dal pianeta ad accumularsi alla base dell'esosfera marziana sotto entrambe le forme, atomica (H) e molecolare (H_2). È ragionevole ipotizzare che il tasso di evaporazione dell'idrogeno nello spazio dipenda dalla sua densità nella regione di accumulo: in tal caso si può dimostrare che la perdita di idrogeno è regolata da quella di ossigeno^[7]. Risultato che alla fuga di un atomo di ossigeno O corrisponde la perdita di due atomi H di idrogeno: in altre parole una molecola di H_2O evapora nello spazio anche se i suoi componenti non sfuggono tutti insieme contemporaneamente.

Sull'evidenza del processo di evaporazione per i componenti dell'atmosfera si è tentato di ricostruire le sue caratteristiche originarie subito dopo l'evaporazione dell'atmosfera primaria di tipo "solare" e la fuoriuscita di quella secondaria dall'interno del pianeta. Non esistono

[7] Per i dettagli del processo si veda J. W. Chamberlain e D. M. Hunten, *Theory of planetary atmospheres*, 1987 Academic Press

ancora modelli affidabili, ma le stime più attendibili descrivono un'atmosfera di CO₂ e H₂O con pressione alla superficie pari a 1-3 atmosfere terrestri e acqua allo stato liquido in quantità sufficiente a formare bacini di raccolta – anche un oceano, forse. Questo quadro, che dovrebbe risalire al più tardi a 3,5 miliardi di anni fa, è in accordo con la morfologia del suolo; molte strutture (canali di deflusso, reti “idrografiche”, eccetera) mostrano la passata azione erosiva dell'acqua, che a più riprese ha avuto la possibilità di scorrere alla superficie di Marte – e, a quanto pare, anche in periodi di tempo distanti tra loro.

7.6 – LE MORFOLOGIE DELLA SUPERFICIE

La topografia di Marte, varia e complessa, testimonia un passato geologico attivo e sorprendente: in confronto, la situazione attuale è assai poco dinamica. Ricostruire la storia del pianeta è compito davvero difficile, e le questioni ancora irrisolte sono più numerose dei fatti accertati.

La prima cosa che salta all'occhio quando si guarda una mappa del pianeta è la dicotomia tra i due emisferi. Più di metà del pianeta, con quasi tutto l'emisfero meridionale, è costituita da terreno densamente craterizzato (quindi molto antico), dalla morfologia largamente degradata, dove numerosissimi sono i crateri di dimensioni superiori ai 20 km. Queste zone del pianeta hanno un'altitudine media ben superiore all'altra regione di Marte, caratterizzata invece da pianure che occupano l'emisfero settentrionale, interrotte nella zona di Tharsis da imponenti formazioni vulcaniche isolate e, con distribuzione irregolare, da superfici molto antiche. Il confine tra le due zone, costituito da una scarpata di 1-2 km di altezza, non corre esattamente lungo l'equatore, ma registra

“sconfinamenti” che non alterano comunque l’impressione di insieme. Non esistono lungo il confine anomalie di gravità, e questo fa pensare che la divisione del pianeta sia ben compensata a livello di struttura interna. Entrambe le regioni del pianeta mostrano evidenza di processi erosivi continui (eolici e di deposizione) e transienti (attività fluviale e vulcanesimo, quest’ultimo più attivo nelle pianure settentrionali). Sicuramente la crosta dell’emisfero boreale è più recente, ma è ignoto il processo che ne ha operato il ringiovanimento.

Nome	Latitudine ; Longitudine	Diametro in km
Liu Hsin	- 54°,5 ; 171°,5	135
Gale	- 5°,3 ; 222°,0	150
Nr. Columbus	- 25°,2 ; 164°,5	145
Ptolemaeus	- 46°,2 ; 157°,5	150
Phillips	- 66°,5 ; 44°,5	175
Molesworth	- 27°,7 ; 210°,5	180
Lowell	- 52°,5 ; 81°,3	190
Lytot	+ 50°,0 ; 330°,5	200
Kaiser	- 46°,4 ; 340°,5	200
Kepler	- 47°,0 ; 218°,5	210
Galle	- 51°,0 ; 31°,0	220
Herschel	- 14°,6 ; 230°,2	290
Antoniadi	+ 21°,7 ; 299°,1	400
Huygens	- 14°,0 ; 304°,2	460
Schiaparelli	- 3°,2 ; 343°,6	470
Polo Sud (<i>incerto</i>)	- 82°,5 ; 267°,0	850
Argyre	- 49°,5 ; 42°,0	1200
Isidis	+ 16°,0 ; 272°,0	1900
Hellas	- 43°,0 ; 291°,0	2000

Tabella 7.4 – I maggiori bacini da impatto su Marte (da Wood e Head, 1976)

La formazione dei crateri è dovuta all’impatto di

corpi provenienti dallo spazio, anch'essi in orbita attorno al Sole come i pianeti: può trattarsi di asteroidi oppure di nuclei cometari. La datazione di una superficie planetaria può essere accertata, sia pure in modo relativo, misurando la densità dei crateri che la ricoprono. Il calcolo non è semplice, perché l'intensità del bombardamento nel Sistema Solare ha registrato variazioni nel corso del tempo; inoltre processi endogeni (fuoriuscita di lava o altro materiale dall'interno del pianeta, movimenti tettonici) o erosivi (vento, acqua o altro) possono cancellare le tracce degli impatti.

Il tasso di collisioni è oggi (fortunatamente per noi terrestri) piuttosto basso e dipende in modo caratteristico dalle dimensioni del corpo "proiettile": grosso modo, per un aumento delle dimensioni di 10 volte il numero dei possibili proiettili in arrivo diminuisce di circa 100 volte. Per la Terra si stima che un cratere con diametro maggiore di 1 km dovrebbe formarsi, in media, una volta ogni 300000 anni su una superficie grande come l'Europa. Un cratere più grande di 10 km dovrebbe formarsi ogni 10-20 milioni di anni, e uno maggiore di 100 km circa ogni miliardo di anni: è importante ricordare che le dimensioni di un cratere sono molto maggiori di quelle del "proiettile" che lo genera.

La presenza di un cratere di grandi dimensioni fissa quindi l'età di una superficie su valori molto antichi. Poiché questo è il caso di Marte (vedi la tabella 7.4), almeno una parte della crosta superficiale deve essere estremamente antica.

A prima vista i crateri marziani sembrano assolutamente simili a quelli lunari, ma esistono notevoli differenze ben percepibili a un occhio più esperto. Le formazioni ben preservate sono rare: i processi erosivi e di riem-

pimento hanno operato efficacemente su Marte, e la loro dinamica non è stata ancora compresa del tutto.

La profondità dei crateri è inferiore a quella lunare, anche se superiore a quella terrestre. Esiste infatti una relazione precisa, a parità di tutte le altre condizioni (dimensioni del proiettile, consistenza delle rocce superficiali, densità dell'atmosfera), tra profondità del cratere scavato e campo gravitazionale del pianeta "bersaglio". Se il campo gravitazionale è più intenso, infatti, l'escavazione del cratere e l'espulsione di materiale sono più difficoltosi. Inoltre il collasso della cavità appena formata è più rapido e completo.

Le differenze più importanti tra Luna e Marte riguardano la morfologia secondaria del cratere, cioè quella creata dai materiali (*ejecta*) scagliati in aria dalla collisione e poi ricaduti al suolo. I crateri lunari hanno *ejecta* di tipo "balistico": il materiale scagliato via dall'impatto segue traiettorie più o meno ampie a seconda dell'energia iniziale. Le morfologie secondarie di molti crateri marziani consistono invece di strutture a lobi separati che si estendono fino a distanze di diversi raggi dal bordo esterno (il raggio è quello del cratere) e appaiono formati dallo scorrimento di materiale liquido sulla superficie.

Tutto questo suggerisce la presenza di elementi volatili (ghiaccio o anche acqua liquida) nel sottosuolo, a scarsa profondità: ipotesi molto attraente, anche se non ancora dimostrata. Essa spiegherebbe altre due caratteristiche dei crateri di Marte:

- i crateri di dimensioni inferiori ai 5 km non hanno *ejecta* "fluidi" e sono molto simili ai loro equivalenti lunari (spiegazione: non raggiungono la profondità a cui si trovano gli elementi volatili);
- solo alcuni dei crateri di diametro superiore hanno un

aspetto “lunare”, e la maggior parte di essi è concentrata in una fascia di 20° a nord e a sud dell’equatore marziano (spiegazione: nelle zone più fredde gli elementi volatili si trovano più vicino alla superficie e sono più abbondanti).

Persino il modellamento successivo dei crateri ha caratteristiche peculiari rispetto agli altri pianeti interni, con una notevole varietà di forme che sembrano dipendere anche dalla latitudine e dall’altitudine del sito di impatto: un altro richiamo alla presenza di *permafrost*. A latitudini superiori a 40° il processo più evidente è la ripetuta deposizione e rimozione di strati di detriti superficiali ad opera del vento, nel corso di continui cambiamenti nel regime della circolazione atmosferica verificatisi nel passato. Tutto ciò sembra legato a cambiamenti climatici di lungo periodo.

Il processo descritto non sembra operare a latitudini più basse, dove sono comuni crateri di aspetto giovane e le modifiche superficiali seguono i tempi più lunghi di processi come l’erosione eolica e, in varie epoche del passato, inondazioni di tipo catastrofico (molto antiche) e processi di vulcanesimo, che più recentemente hanno rimodellato vaste regioni del pianeta (Tharsis, soprattutto).

Per riassumere la situazione, la maggior parte della superficie marziana è molto antica ed evidenzia scarsa attività geologica: non mancano però regioni più recenti, alcune delle quali “ringiovanite” dall’attività vulcanica che ha avuto luogo nell’ultimo miliardo di anni.

Gli altopiani craterizzati dell’emisfero meridionale sono i più antichi (almeno 3,9 miliardi di anni), con crateri spesso sovrapposti l’uno sull’altro. Notevole è la somiglianza con le zone craterizzate della Luna e di Mercurio: tipicamente marziana è però la presenza di due popolazioni di crateri distinte. La prima, molto degradata, è rappre-

sentata da crateri di dimensioni superiori ai 20 km; la seconda è costituita da oggetti più piccoli e di aspetto più giovane. L'interpretazione più diretta delle due diverse tipologie di crateri è che i primi siano il residuo di un periodo molto antico di intenso bombardamento, con un elevato tasso di erosione che ha cancellato i crateri di minori dimensioni e degradato quelli più grandi. La seconda tipologia di crateri si sarebbe formata in tempi successivi, con impatti più rari ed erosione moderata. Una classificazione più razionale (Carr, 1981) degli altopiani meridionali individua quattro tipologie di terreno:

1) Massicci. Sono colline di forma aspra, con dimensioni dell'ordine dei 20 km, che si possono trovare attorno ai grandi bacini di impatto come Isidis, Hellas e Argyre, più raramente altrove (Thaumasia, Memnonia). Il meccanismo di formazione più probabile, almeno per le morfologie più comuni, è l'impatto che ha generato il bacino corrispondente.

2) Altopiani "accidentati". Costituiscono il terreno tra un cratere e l'altro e rappresentano probabilmente la vecchia superficie preesistente al bombardamento che ha creato i grandi crateri. Il rilievo del terreno a scale dell'ordine dei 100 m è grossolano, e in molti punti sezionato da numerosi piccoli canali più o meno degradati dall'erosione: a risoluzione più elevata (10 m circa) si individuano piccoli crateri sparsi, più creste e valli a spaziatura ravvicinata.

3) Altopiani corrugati. Molto diversi dalla tipologia precedente, alla scala di 100 m sono visibili come pianure lisce, dove l'unico rilievo sono dei corrugamenti molto spazati tra loro, che rassomigliano a quelli dei mari lunari. I canali sono presenti, ma più rari; anche i crateri sono scarsi, di piccole dimensioni e dall'aspetto recente. Questo tipo di terreno costituisce approssimativamente il 36% di tutti gli

altopiani meridionali.

4) Pavimento dei crateri. Il fondo dei crateri di grandi dimensioni assomiglia agli altopiani corrugati, con un minor numero di corrugamenti. Ad alta risoluzione alcuni di essi mostrano moltissimi piccoli crateri, disposti in linea o a cerchio e di forma spesso non regolare: la loro probabile origine è quindi secondaria (formati, cioè, da detriti sollevati da un primo e più distruttivo impatto).

I massicci costituiscono probabilmente la tipologia più antica, perché appare circondata e spesso parzialmente sepolta dalle altre morfologie: parte degli altopiani accidentati, comunque, deve essere di età comparabile.

Una distinzione importante fra le tipologie 2) e 3) sta nell'intensità del sezionamento ad opera dei canali. Gli altopiani accidentati ne presentano un numero molto maggiore: i piccoli canali sono anche stretti (< 1 km) e lunghi al più alcune decine di km, con reti di tributari complete ed integrate. Tali morfologie sono anche chiamate canali di scorrimento e sono molto diverse, per origine e per età, dai grandi canali di deflusso alluvionale, che raramente possiedono tributari e "nascono" improvvisamente in zone a morfologia caotica, partendo già dall'inizio con grandi dimensioni. Mentre sull'origine di queste ultime formazioni vi è ancora del dibattito, tutti gli studiosi sono convinti che i canali di scorrimento siano stati scavati dall'acqua.

Gli altopiani craterizzati dell'emisfero meridionale sembrano dunque aver sperimentato nel passato un lungo processo di erosione fluviale. Il minor grado di sezionamento degli altopiani corrugati potrebbe spiegarsi con una ridotta attività erosiva dall'epoca della loro formazione, oppure semplicemente con una maggiore resistenza agli agenti erosivi da parte delle rocce che li costituiscono.

L'evoluzione degli altopiani craterizzati meridionali potrebbe essere descritta dal seguente scenario. In tempi anteriori a circa 3,9 miliardi di anni fa l'intensità del bombardamento ad opera di comete/meteoriti era molto elevata, e così anche l'attività erosiva superficiale; a quest'ultima contribuivano sia il bombardamento stesso, sia l'erosione fluviale ed eolica, che in quell'epoca dovevano essere molto più attive per la presenza di un'atmosfera ben più densa di quella attuale. È anche possibile che fossero molto abbondanti in sospensione particelle solide di pulviscolo, contribuendo così a un più efficace effetto serra e anche a una deposizione di sedimenti su tutta la superficie del pianeta.

Doveva essere intensa anche l'attività vulcanica, endogena e secondaria (causata cioè dai numerosi impatti): tuttavia le testimonianze di essa sono andate quasi del tutto perdute nel rimodellamento della superficie.

L'intensità del bombardamento era tale che le rocce superficiali vennero distrutte e frantumate fino a diversi km di profondità; in questo il processo fu simile alla formazione degli "altopiani" lunari (anche se per la Luna si ha un numero maggiore di grandi bacini da impatto). Grazie alla presenza dell'atmosfera, gli *ejecta* più leggeri potevano restare in sospensione abbastanza a lungo da giungere a notevoli distanze dal luogo dell'impatto: in questo modo si sarebbero formati i massicci di Thaumasia e Memnonia.

Circa 3,9 miliardi di anni fa l'intensità del bombardamento sul pianeta diminuì rapidamente. Le superfici formatesi appena prima (100-200 milioni di anni, forse) di questo cambiamento sarebbero oggi gli altopiani accidentati (tipologia 2). L'attività erosiva atmosferica e dell'acqua superficiale continuarono anche dopo la fine

del bombardamento più intenso, come mostra il tasso di craterizzazione caratteristico di queste superfici: ciò spiega l'aspetto molto eroso dei crateri più grandi e la scomparsa di quelli più piccoli. Non esistono indizi di attività vulcanica, anche se alcuni crateri potrebbero essere stati riempiti e sepolti proprio da emissioni di lava.

Dopo la rarefazione degli impatti si formarono gli altopiani corrugati – non si sa esattamente quando, ma dal tasso di craterizzazione è possibile stimare un'epoca risalente a qualche centinaio di milioni di anni più tardi. La loro origine è probabilmente vulcanica, a giudicare dalla loro somiglianza con i mari lunari. Nello stesso periodo diminuì anche l'attività erosiva sul pianeta.

Una naturale conseguenza di questo scenario, se esso è corretto, è che le morfologie degli altopiani craterizzati dell'emisfero meridionale testimoniano differenti meccanismi di formazione, ma per età devono essere molto simili tra loro.

La zona di confine tra altipiani e pianure ha caratteristiche variabili a seconda della sua posizione sul pianeta. In molti luoghi il confine è netto e si osserva un semplice ricoprimento delle morfologie più antiche da parte di quelle più recenti, tipiche delle pianure settentrionali (ne sono esempi il bordo orientale di Lunae Planum o i confini sud-ovest ed est di Chryse Planitia). In altre zone la transizione è molto più sfumata e occupa una superficie maggiore (per esempio, ad est e a sud-est di Sinai Planum).

Particolarmente interessante è la sezione di confine che si trova tra 30° e 45° di latitudine Nord e tra 280° e 350° di longitudine Ovest, tipico esempio di terreno "caotico". Esso consiste di due componenti: zone più elevate, che costituiscono il residuo dell'antico altopiano craterizzato, e bassopiani poveri di crateri. I due tipi di terreno so-

no generalmente connessi da una ripida scarpata di altezza compresa fra uno e due km. Il risultato è una morfologia molto complessa, che con i suoi bassopiani forma canali larghi, sinuosi e dal fondo piatto penetra profondamente in mezzo alla regione più elevata degli altopiani craterizzati, lasciando delle “isole” di terreno più antico.

Quasi ovunque nella zona di terreno caotico è possibile osservare dei con di deiezione, formati da materiale rotolato o scivolato in basso lungo il pendio delle scarpate. Su tali depositi di detriti non c'è quasi nessun cratere, e ciò indica che si sono formati molto recentemente, per arretramento delle scarpate erose ai fianchi. Tale processo erosivo sembra molto più efficace di quello che opera alla sommità delle “isole” di altopiano craterizzato. Secondo alcuni studiosi il ghiaccio potrebbe svolgere un ruolo importante nella formazione dei depositi di detriti: la profondità costante (1-2 km) dell'erosione, indipendente dall'età della superficie e dalla quota reale a cui si trova la sommità della scarpata, corrisponderebbe alla base del *permafrost*. L'acqua potrebbe esistere allo stato liquido solo sotto questo livello, contribuendo alla cementazione del suolo che così potrebbe resistere all'erosione: invece nella zona soprastante il ghiaccio, soggetto alla sublimazione, renderebbe il terreno poco compatto e vulnerabile ai crolli.

I processi che hanno condotto nell'emisfero settentrionale alla distruzione dell'antica crosta, e alla formazione di quelle che, per semplicità, chiameremo pianure, restano ancora un mistero. La sola erosione non può rendere conto di quanto è accaduto: per citare un solo problema, non si capisce dove potrebbe essere finita l'enorme massa di detriti che un simile evento produrrebbe. Alcuni autori hanno provato a costruire un modello in cui il mantello del pianeta, attraverso processi convettivi o una transizione di

fase causata dal progressivo raffreddamento del nucleo, avrebbe provocato la completa distruzione della crosta settentrionale. Sebbene si tratti di semplici ipotesi, esse hanno il pregio di ricercare meccanismi su scala planetaria, gli unici in grado di spiegare un evento del genere.

Le pianure mostrano zone diverse per età e formazione. Le parti più antiche risalgono quasi certamente all'epoca in cui il bombardamento meteoritico subì una brusca diminuzione; le zone più recenti (Olympus Mons, Tharsis) hanno soltanto qualche centinaio di milioni di anni o anche meno (questa affermazione è valida se si suppone per Marte un tasso di craterizzazione simile a quello lunare).

Nelle regioni tropicali del pianeta (entro 30°– 40° dall'equatore) la topografia delle pianure è incisa e delineata e le morfologie (fronti di flusso, *graben*^[8], creste di corrugamento, crateri, canali) sono ben riconoscibili e familiari, anche se non sono altrettanto chiari i meccanismi della loro formazione: la base di questa zona delle pianure sembra comunque avere origine vulcanica. A latitudini più alte, invece, la topografia diventa molto più complessa, con morfologie diverse da ogni altra zona di Marte e da qualsiasi altro pianeta: detriti a grana fine depositati a strisce suggeriscono l'azione di venti dominanti circumpolari, ma soprattutto l'azione del ghiaccio sembra sia stata determinante nel modificare una superficie che forse ha avuto anch'essa origine vulcanica. Le zone pianeggianti degli altopiani craterizzati meridionali, come i bacini Hellas e Argyre, mostrano una topografia altrettanto complessa.

Si può tentare una classificazione generale delle pianure, tenendo però presente che le morfologie tendono a confondersi e che la validità fisica di quanto esporremo

[8] Con questo termine in geologia si indica una fossa tettonica.

non è ancora stabilita con certezza. L'elenco delle regioni corrispondenti a ogni tipologia non è completo, ma riporta solo degli esempi.

1) Pianure con flussi lavici (Tharsis, Elysium, Alba Patera). Il flusso delle lave è la caratteristica dominante di queste zone: si tratta generalmente di flussi irregolari, la cui forma ricorda le dita di una mano, e i fronti di flusso presentano molti lobi rivolti verso l'esterno. Lo spessore delle lave varia tra 10 e 80 m, e più spesso è sui 20-30 m. I flussi sono sovrapposti l'uno sull'altro e quindi è assai difficile risalire alla sorgente della lava: solo nel caso di Tharsis sembra certo che la lava sia fuoriuscita dal vasto sistema di fratture radiali che costituiscono la morfologia tipica della regione. La quantità di materiale emesso in questo modo sembra maggiore della lava eruttata dai grandi vulcani a scudo presenti nei dintorni (Olympus, Arsia, Ascraeus, Pavonis Montes) e la si ritiene collegata al processo di formazione del rigonfiamento caratteristico di Tharsis, di cui si parlerà anche nel seguito.

2) Pianure con creste di corrugamento (Lunae Planum, Chryse Planitia, Syrtis Major Planitia). Le creste sembrano del tutto simili a quelle dei mari lunari. Il tasso di craterizzazione è variabile e quindi l'età non è ovunque la stessa. I dettagli della formazione delle creste non sono ancora ben compresi: la questione più controversa è se esse si siano originate per deformazione dopo la deposizione delle lave, oppure se la loro formazione sia contemporanea a tale processo (per esempio, per raffreddamento di bacini di lava liquida).

3) Le pianure di Amazonis. Si distinguono dalle altre tipologie per una ben definita tessitura superficiale che si stende da N a S (o da NO a SE), costituita da larghi archi e, a scale più piccole, una fitta serie di creste e solchi cur-

vilinei e paralleli. Basse scarpate contribuiscono a dare un aspetto “rilevato” alla superficie.

4) Pianure “chiazze” (Mare Acidalium). Le chiazze sono causate da grandi variazioni della riflettività superficiale e quindi dell'albedo. Le parti più chiare sono gli *ejecta* dei crateri, che si sovrappongono alla pianura originaria, molto più scura. I crateri sono sempre del tipo caratteristico marziano, ovvero a *ejecta* di aspetto “fluidico”. Nella zona compresa fra le latitudini 40° e 50° N e le longitudini 10° e 30° W la superficie chiazze è fratturata in strutture poligonali: queste ultime si trovano anche altrove sul pianeta e verranno discusse separatamente.

5) Pianure “segnate” (Deuteronilus Mensae). Ulteriormente divisibili in due sottotipi di terreno: uno piuttosto liscio e poco rilevato, l'altro costituito da dossi e depressioni a spaziatura ravvicinata. Anche in queste regioni le morfologie secondarie dei crateri sono del tipo “fluidico”.

6) Pianure “irregolari” (Utopia Planitia). La superficie assume un aspetto quasi caotico a scale inferiori al km, con alture collinari e depressioni grosso modo tutte delle stesse dimensioni, separate da aree molto lisce. Questo tipo di terreno costituisce la terminazione di alcuni grandi canali che hanno origine sui fianchi della cupola di Elysium, 1000 km a sud-est. Se esiste effettivamente una connessione, e se i canali sono stati scavati dall'acqua, allora la particolare morfologia di queste pianure potrebbe essere stata causata dalla modificazione di depositi fluviali con alto contenuto di ghiaccio.

7) Fratture poligonali (Mare Acidalium, Utopia Planitia). La superficie risulta fratturata da linee irregolari, che parzialmente si intersecano creando un disegno approssimativamente poligonale: questa situazione è rara a basse latitudini (per esempio, Isis Planitia mostra qualcosa di simi-

le). Le dimensioni dei blocchi poligoni variano da alcuni km fino a circa 10 km. L'origine di queste strutture non è nota: esse sono simili a quelle che possono formarsi nelle zone subpolari terrestri dove è certa la presenza di *permafrost* al di sotto della superficie. Il meccanismo in questo caso è quello della contrazione che segue il disseccamento del terreno: tuttavia i poligoni marziani hanno dimensioni cento volte superiori ai loro analoghi terrestri, e un processo di formazione come quello descritto è improbabile. Una possibile alternativa è che le fratture siano il risultato di qualche forma di tensione tettonica causata dalla deformazione su larga scala della superficie.

8) Pianure meridionali (Hellas, Argyre). La zona di Hellas è raramente visibile con chiarezza, essendo quasi sempre presenti foschia, ghiaccio o vere e proprie nubi (si ricordi che è la zona più depressa del pianeta, con la pressione atmosferica più alta). Al centro del bacino la superficie è incisa da piccole buche, simili a quelle visibili nella zona del polo sud quando il ghiaccio lo lascia scoperto: più all'esterno il terreno è relativamente liscio, con alcune creste di corrugamento. Parte del pavimento del bacino di Argyre ha lo stesso rilievo a piccole buche, ma l'aspetto più interessante è la presenza di lunghe creste interconnesse, di larghezza 1-2 km e che si prolungano per centinaia di km: quasi introvabili altrove su Marte (per esempio a 3° S, 207° W), esse potrebbero essere state generate da intrusioni vulcaniche.

Veniamo alla descrizione dei vulcani di Marte. La distribuzione sul pianeta è molto irregolare, con i più grandi in tre regioni (Tharsis, Elysium ed Hellas); sono state comunque identificate altre zone più ristrette con morfologie di tipo vulcanico. L'unico grande edificio al di fuori delle tre regioni suddette è Apollinaris Patera.

I vulcani più grandi sono anche i più giovani, e sono tutti concentrati nella regione di Tharsis, nella zona di maggiore quota e lungo il bordo nord-occidentale (lungo il bordo opposto, quello di sud-est, si trovano estese pianure di origine vulcanica, ma neanche l'ombra di un vulcano!).

	N° di crateri > 1 km per milione di km ²	Età dei crateri in miliardi di anni		
		Minima	Media	Massima
Olympus Mons	27	< 0,1	< 0,1	0,3
Arsia Mons	78	< 0,1	0,1	0,5
Arsia Mons (cima)	150	< 0,1	0,2	0,9
Arsia Mons (pendici)	390	0,2	0,6	1,6
Pavonis Mons	350	0,1	0,5	1,4
Biblis Patera	1400	0,7	2,0	3,4
Alba Patera	1850	1,0	2,7	3,6
Jovis Tholus	2100	1,3	3,0	3,7
Uranus Patera	2480	1,7	3,6	3,9
Apollinaris Patera	990	0,4	1,4	3,0
Tharsis Tholus	1480	0,7	2,1	3,4
Albor Tholus	1500	0,7	2,2	3,4
Hecates Tholus	1800	1,0	2,6	3,6
Elysium Mons	2350	1,6	3,4	3,8
Uranus Tholus	2480	1,7	3,6	3,9
Ceraunius Tholus	2600	1,8	3,8	3,9
Ulysses Patera	3200	2,6	3,9	4,0
Hadriaca Patera	2100	1,2	3,0	3,7
Tyrrhena Patera	2400	1,7	3,5	3,9

Tabella 7.5 – Età dei vulcani marziani sulla base del modello di Hartmann et al. (1981). Conteggio dei crateri secondo Plescia e Saunders (1979), Crumpler e Aubele (1978).

Come Tharsis, anche la zona vulcanica di Elysium è associata ad un rigonfiamento della crosta, sebbene più piccolo per quota ed estensione. La regione di Hellas ospita i vulcani più antichi.

L'aspetto tipico dei vulcani marziani è simile a quello dei vulcani a scudo terrestri, formatisi dall'eruzione di lave basaltiche relativamente fluide: l'esempio più caratteristico è l'arcipelago delle Hawaii, i cui vulcani mostrano grandi somiglianze con quelli marziani, comprese le morfologie secondarie quali le caldere, i canali di lava, i fronti di flusso e le fosse di crollo. L'unica grande differenza sta nell'enorme mole dei vulcani a scudo marziani.

Altre strutture vulcaniche, presenti soltanto su Marte, sono le *paterae* (dal termine latino per indicare un piatto o un disco poco profondo), di grande estensione superficiale ma assai poco rilevate. Sembrano invece assenti gli stratoconi, cioè quei vulcani che eruttano lave poco fluide a composizione acida (per esempio il Vesuvio). Anche se non è completamente escluso che ne esistano sul pianeta, si ritiene più probabile che la differente storia tettonica di Marte non ne abbia consentito la formazione: non vi sono infatti tracce di processi paragonabili alla tettonica a placche terrestri.

Una discussione dettagliata di *tutte* le morfologie vulcaniche marziane è al di fuori degli scopi di questo capitolo; ci limiteremo ad analizzare le caratteristiche della zona più importante, e cioè la regione di Tharsis.

Questa regione è di estremo interesse per gli studiosi, e sembra addirittura poter fornire informazioni essenziali per la comprensione della struttura interna del pianeta. Essa racchiude, nella sua versione "allargata" (quella che include anche Olympus Mons e Alba Patera),

più di dodici vulcani: essi presentano differenti caratteristiche, ma sono tutti formati da lava molto fluida (più di quella che ha creato i vulcani a scudo delle Hawaii).

Olympus Mons è il vulcano più alto di Marte e del Sistema Solare, con sommità a 27 km sopra il livello medio marziano e 25 km sopra le pianure alla base. È una struttura a scudo veramente imponente, la cui base si estende per 700 km: il suo volume stimato è 50-100 volte superiore a quello del più grande vulcano terrestre, il Mauna Loa delle isole Hawaii (che, a partire dal fondo marino, ha un'altezza di 9 km e un diametro di base di 120 km). Attorno alla base del vulcano è presente una scarpata di altezza media sui 2 km (ma che in alcuni punti raggiunge i 6 km). La caldera alla sommità ha un diametro di 80 km e consiste di diversi crateri che si sono congiunti tra loro per crollo delle pareti: sul fondo dei crateri si osservano creste di corrugamento.

La pendenza dei fianchi del vulcano è bassa (in media 4°): tutta la morfologia della zona indica l'azione di lave molto fluide, e non si osservano coni di cenere o altri indizi di attività esplosiva connessa alla presenza di lave acide, più pastose.

La struttura del vulcano è alquanto recente, con maggiore craterizzazione verso la cima: questo suggerisce che l'attività vulcanica fosse meno intensa al crescere della quota.

Tre vulcani "gemelli" disposti in fila sono, da NE a SO, Ascraeus Mons, Pavonis Mons e Arsia Mons. Ognuno di essi ha una base che si estende per 350-400 km, con la caldera sommitale a 24-27 km sopra il livello medio del pianeta e 17 km sopra le pianure circostanti. Il fatto che le altezze siano comparabili tra loro e con Olympus Mons non sembra essere un caso, ma potrebbe piuttosto rappre-

sentare la massima altezza possibile per un vulcano marziano, corrispondente alla massima quota di sollevamento consentita alla lava in virtù della differenza di densità tra essa e le rocce soprastanti. Questa interpretazione è suffragata dall'osservazione che il flusso della lava tende ad indebolirsi man mano che si sale lungo i fianchi dei vulcani.

La pendenza delle pareti è bassa per tutti e tre i vulcani (sotto i 5°): si osserva in superficie una fine tessitura radiale costituita da canali di lava e linee di flusso lunghe e strette.

La caldera sulla cima è diversa per ognuno dei tre vulcani. Quella di Arsia Mons è una depressione di 110 km relativamente piatta e poco profonda, circondata da linee di faglia arcuate, e molto meno craterizzata rispetto ai fianchi del vulcano; Pavonis Mons ha soltanto una semplice depressione circolare profonda 4-5 km; Ascraeus Mons presenta invece una caldera multipla, formata da vari episodi di crollo in diversi punti, e ciascun cratere ha il fondo che si trova a differenti profondità (quello della caldera principale è circa 4 km sotto della sommità delle pareti).

I tre vulcani sembrano aver sperimentato fasi di crescita molto simili, continuate fino a un passato molto recente (come Olympus): non si può neppure affermare con certezza che siano spenti, anche se una attività odierna è improbabile.

I vulcani a scudo terrestri hanno una prima fase di crescita con emissione di lave fluide (basaltiche), seguita da un secondo stadio in cui la lava cambia di composizione diventando più pastosa; l'eruzione diventa di tipo esplosivo, con formazione di stratoconi sopra l'edificio preesistente e la crescita di depositi di cenere. I vulcani marziani sembrano essersi arrestati alla prima fase, con co-

struzione di enormi edifici vulcanici; le lave devono essere state di composizione alcalina e ricche in ferro. Il tasso eruttivo - contrariamente a quanto farebbero pensare le enormi dimensioni – deve essere stato più basso rispetto ai vulcani hawaiani, come dimostrano i differenti tassi di craterizzazione dei fianchi di Arsia Mons. Essi testimoniano che il vulcano è stato attivo per miliardi di anni, costruendo la sua struttura attraverso eruzioni molto distanziate nel tempo, ma con emissione di enormi quantità di lava.

Per spiegare le grandi dimensioni dei vulcani di Tharsis è necessario supporre che Marte possieda una crosta molto più stabile e spessa di quella della Terra. I vulcani delle Hawaii, infatti, si sono formati in corrispondenza di un “punto caldo”, cioè una zona in cui materiale caldo proveniente dal mantello tende a risalire alla superficie. In generale la crosta terrestre è suddivisa in domini (placche) di dimensione variabile, ai bordi delle quali si concentra l'attività vulcanica dovuta alla risalita di materiale proveniente dal mantello; questo avviene in corrispondenza delle dorsali medio-oceaniche, ma anche sulla terraferma dove si trovano le faglie (per esempio, il cosiddetto anello del Pacifico o anche la zona mediterranea). In corrispondenza delle fosse oceaniche si ha invece l'affondamento e la distruzione nel mantello di materiale superficiale, il che completa il ciclo della cosiddetta *tettonica a placche*: l'intera circolazione è alimentata dal calore interno della Terra.

A quanto sembra, su Marte la crosta non è mai stata frantumata da movimenti convettivi del mantello, e questo perché 1) Il pianeta è più piccolo della Terra e ha una minore disponibilità di calore interno 2) La sua crosta ha uno spessore maggiore di quella terrestre ed è quindi più

stabile.

L'assenza di placche permette solo l'esistenza di punti caldi sulla crosta marziana. La differenza fondamentale è che sulla Terra la crosta scorre sopra il punto caldo (fisso), mentre su Marte nulla si muove. Sulla Terra è allora possibile osservare la formazione di una fila di vulcani allineati, che nascono in corrispondenza del punto caldo per poi estinguersi quando la deriva della crosta li porta troppo lontano da esso: questo è esattamente il caso delle isole Hawaii. Su Marte, invece, un vulcano può continuare a crescere indisturbato fino a raggiungere dimensioni impressionanti, perché non si ha scorrimento della crosta sul mantello. Quindi sarebbe più giusto confrontare un vulcano marziano con il complesso vulcanico costituito dall'intero arcipelago delle Hawaii!

È possibile stimare la profondità della camera magmatica sottostante un vulcano dall'altezza che esso raggiunge: in questo modo per i vulcani delle Hawaii si è ricavato un valore di 60 km, utilizzando valori ragionevoli per le densità della lava, della crosta e del mantello sottostante. L'operazione è molto più difficile nel caso di Marte: con molte approssimazioni si è ricavato un valore indicativo per la sorgente del magma sotto Olympus Mons (la cui camera magmatica deve essere più profonda di quella degli altri vulcani, perché esso più degli altri si eleva rispetto alle pianure circostanti), che è di 160-170 km di profondità. Le camere magmatiche del terzetto Ascraeus-Pavonis-Arsia si troverebbero a 120-130 km: tutti questi valori rafforzano l'ipotesi che la crosta marziana sia molto più spessa di quella terrestre, che al massimo raggiunge i 50 km, e solo in zone limitate (Himalaya).

La descrizione della regione di Tharsis sarebbe incompleta se omettessimo di citare Alba Patera, che è il più

grande vulcano marziano per estensione (1600 km) anche se come altezza non è eccezionale (meno di 6 km). L'inclinazione dei suoi fianchi è ovviamente bassissima (meno di 0,5°) e al centro si trova una caldera di 100 km. I flussi lavici sulle "pareti" del vulcano sono ancora straordinariamente preservati. Non si hanno informazioni sufficienti sull'origine di questa formazione.

Chiudiamo la rassegna dei vulcani di Tharsis con le formazioni minori, che citiamo soltanto per nome: Biblis Patera, Ulysses Patera, Uranius Patera, Tharsis Tholus, Jovis Tholus, Uranius Tholus, Ceraunius Tholus. Le loro caratteristiche variano notevolmente, sia nella struttura e nella morfologia che in età.

Chiudiamo il discorso vulcani dedicando qualche parola in più alla prominente "cupola" che costituisce la regione di Tharsis: dal punto di vista tettonico essa rappresenta la caratteristica più importante di Marte. Le linee di frattura intorno al suo rigonfiamento interessano quasi l'intero emisfero nord, e ai suoi bordi si sono sviluppati i più grandi vulcani e il vasto sistema di canyon equatoriali. La cupola ha dimensioni tali che la sua formazione ha probabilmente influenzato la precessione dell'asse di rotazione marziano, con importanti effetti sul clima globale del pianeta (anche con modifiche del regime di venti e delle acque superficiali, che all'epoca quasi certamente esistevano).

In corrispondenza del rigonfiamento esiste un'anomalia gravitazionale positiva, con massimi locali centrati sotto i maggiori vulcani. È il contrario di quanto succede sulla Terra, dove sotto le catene montuose si trova materiale a densità minore che compensa l'eccesso soprastante e le anomalie risultanti sono molto piccole: questo fenomeno è noto come *compensazione isostatica*.

Sono state avanzate molte idee per la formazione della cupola di Tharsis, come la possibile connessione con il bacino da impatto Hellas, che si trova pressappoco ai suoi antipodi: tuttavia, i modelli che incontrano maggiormente il favore degli studiosi presuppongono meccanismi di convezione per il mantello marziano nel passato, oggi certamente assenti.

Un'ipotesi è che la regione di Tharsis si sia formata sopra una colonna di materiale del mantello in risalita, facente parte di una circolazione convettiva del mantello. C'è in questo caso il problema di spiegare l'assenza di morfologie correlate in corrispondenza della parte opposta della cella, dove il materiale deve scendere verso il basso; a questo scopo sono stati proposti diversi processi, tutti plausibili.

Un'altra possibilità è che Marte si sia formato in modo disomogeneo, consentendo durante la differenziazione chimica del suo interno la formazione di un mantello inferiore meno denso degli strati soprastanti: l'inevitabile successivo riequilibrio avrebbe stimolato la risalita dall'interno di materiale più ricco in elementi radioattivi, proprio in corrispondenza della zona di Tharsis, innescando così il vulcanismo tipico della regione.

Un'ultima proposta coinvolge il processo di formazione del nucleo del pianeta. Dopo l'accrescimento per opera dei planetesimi, Marte si sarebbe riscaldato a sufficienza da far fondere il ferro a profondità intermedie, consentendo la differenziazione di due strati, uno di ferro più puro e l'altro invece arricchito in solfuro (FeS). Con il procedere del riscaldamento verso l'interno (per esempio, grazie all'energia del bombardamento meteoritico) la successiva fusione delle zone centrali del pianeta avrebbe permesso la caduta del ferro e dei suoi composti (media-

mente più densi degli altri materiali) verso il centro, fenomeno in grado di provocare un rimescolamento del mantello e un sollevamento simile allo scenario descritto nell'ipotesi precedente.

Quale che sia il meccanismo corretto, esso deve essere stato in grado di sostenere il vulcanismo nella regione di Tharsis per un lungo periodo di tempo: da 2,5 a 4 miliardi di anni, secondo gli indizi geo-morfologici. Questi ultimi suggeriscono che la cupola si sia formata molto presto nella storia del pianeta.

Passiamo all'analisi dei canyon marziani. È stato già da tempo osservato che l'uso del termine "canyon" è fuorviante, perché in ambito terrestre implica fenomeni di erosione da parte dell'acqua: tuttavia è usato universalmente e ormai non ha molto senso cercare di sostituirlo.

Poco a sud dell'equatore marziano, tra le longitudini 30° W e 110° W, si possono osservare enormi spaccature connesse tra loro, che hanno collettivamente ricevuto il nome di Valles Marineris. Esse si estendono per più di 4000 km, e i singoli canyon possono raggiungere la larghezza di 200 km e la profondità di 7 km.

I canyon si distinguono dai canali per diverse ragioni: sono pieni di detriti prodotti da crolli a valanga verificatisi lungo le loro scarpate, e nella maggior parte di essi mancano indizi d'attività fluviale. Inoltre molte sezioni sono segmentate e sembrano allineamenti di depressioni chiuse piuttosto che canyon continui veri e propri.

Gli specialisti di geomorfologia planetaria hanno individuato diverse forme e classificazioni per le pareti e i pavimenti dei canyon: qui ci limiteremo a descrivere alcuni possibili processi di formazione per queste morfologie così imponenti (il sistema di Valles Marineris fa sembrare minuscolo il Gran Canyon del Colorado).

Un ruolo importante può essere stato indubbiamente svolto da meccanismi tettonici, con formazione di faglie: non si tratta però di processi simili a quelli terrestri, ed essi non sono in grado di spiegare l'intera struttura, al massimo alcune sue parti (Ius, Tithonium e Coprates Chasma) attraverso fenomeni di subsidenza tettonica.

L'azione di faglia può essere stata rinforzata ed esaltata dall'erosione delle scarpate, che arretrando sempre più avrebbero formato gli abissi odierni: però non si capisce dove sia andata a finire l'enorme massa di detriti che si sarebbe così prodotta, a meno di non supporre per essi un'elevata percentuale di ghiaccio (equivalente a più di un milione di km³!) che potrebbe allora sparire per sublimazione. Una tale massa di ghiaccio equivarrebbe a uno strato di 60 m d'acqua distribuita uniformemente su tutto il pianeta: tale quantità appare eccessiva e costituisce un punto debole del modello.

	Polveri fini di Chryse	Polveri fini di Utopia
SiO ₂ , % in peso	44,7	42,8
Al ₂ O ₃ , % in peso	5,7	non disponibile
Fe ₂ O ₃ , % in peso	18,2	20,3
MgO, % in peso	8,3	non disponibile
CaO, % in peso	5,6	5,0
K ₂ O, % in peso	< 0,3	< 0,3
TiO ₂ , % in peso	0,9	1,0
SO ₃ , % in peso	7,7	6,5
Cl, % in peso	0,7	0,6
Totale	91,8	non disponibile
Rb, ppm	≤ 30	≤ 30
Sr, ppm	60	100
Y, ppm	70	50
Zr	≤ 30	30

Tabella 7.6 – Composizione dei campioni di suolo marziano analizzati dalle sonde Viking (da Toulmin et al., 1977)

Non si può escludere l'azione di falde acquifere, anche se neppure tale meccanismo sembra sufficiente (occorrerebbe un'enorme quantità d'acqua). In conclusione, molte caratteristiche del sistema di canyon marziani potrebbero essere spiegate da varie concause (faglie tettoniche, erosione delle scarpate, acque di falda). Restano tuttavia due questioni irrisolte: gli strati di sedimenti nella sezione centrale dei canyon e l'ultima destinazione del materiale che sarebbe stato eroso.

A differenza dei canyon, vi sono ben pochi dubbi che almeno alcuni dei canali della superficie marziana abbiano avuto origine dallo scorrimento dell'acqua. Una classificazione di massima di queste morfologie distingue tra:

1) Canali di scorrimento. Presenti quasi ovunque nella zona degli altopiani craterizzati e praticamente assenti nelle pianure: sembrano quindi formazioni molto antiche. Iniziano con piccole dimensioni, aumentando di taglia man mano che procedono "a valle", e possiedono anche dei tributari. La maggior parte è lunga pochi km e larga 1 km o anche meno.

2) Canali di deflusso. Per via della loro forte rassomiglianza con le grandi formazioni alluvionali terrestri essi hanno generato forse le maggiori controversie tra gli studiosi: alcuni ritengono che debbano essere il risultato di catastrofiche inondazioni, mentre altri sostengono che per dimensioni e forma debbano essere stati il risultato di processi di erosione glaciale. Qualcuno li considera prodotti dall'erosione della lava e/o del vento. Questa tipologia di canali ha dimensioni molto maggiori dei canali di scorrimento, e la larghezza rimane più o meno la stessa lungo tutto il loro corso, senza che si osservi alcuna crescita progressiva (come ci si aspetterebbe da strutture fluviali). In

vari casi si osservano al loro interno “isole” di terreno di forma caratteristica, allungata a goccia. La loro età sembra essere più recente dell’antico terreno craterizzato, come pure di parte delle pianure: entrambi questi tipi di terreno appaiono sezionati da queste formazioni.

3) Canali con “scanalature”. Sono larghi, con pareti ripide e fondo piatto: quest’ultima caratteristica, e anche le maggiori dimensioni, li distinguono dai canali di scorrimento. Le differenze con i canali di deflusso sono invece la completa assenza di morfologie di letto e la rarità delle isole allungate a goccia.

I canali di scorrimento costituiscono l’evidenza più convincente del fatto che un tempo l’acqua scorresse liberamente alla superficie di Marte. Molti di essi sembrano essersi formati attraverso l’azione di acque del sottosuolo o per fusione di ghiaccio preesistente, anche se non è possibile escludere del tutto l’effetto, diretto o indiretto, di piogge vere e proprie. Queste indicazioni di un clima più temperato rispetto a quello attuale, e il fatto che tali canali si trovino solo in terreni antichi, forniscono stime di età superiori ai 3 miliardi di anni.

I canali di deflusso possono essere, come già visto, di varia origine. Anche se più giovani dei canali di scorrimento, i conteggi statistici sui crateri mostrano indicano un’età comunque superiore ai 2,5 miliardi di anni.

I canali con scanalature, infine, si formano presumibilmente per allargamento di canali preesistenti, attraverso perdita di materiale detritico: il processo sembra confinato a due precise fasce di latitudine, 40° N e 45° S: l’allargamento potrebbe continuare anche oggi.

L’ultimo argomento che affronteremo è quello della chimica del suolo marziano.

Le informazioni disponibili provengono da alcuni

esperimenti operati dalle sonde e dalle misure di riflettività superficiale. Ognuna delle sonde Viking, per esempio, aveva con sé uno spettrometro a fluorescenza a raggi X, con il quale i campioni di terreno prelevati erano analizzati mediante irradiazione con ^{55}Fe e ^{109}Cd , e lo spettro X prodotto dal bombardamento radioattivo veniva comparato con quello già noto di minerali conosciuti. Il materiale analizzato era probabilmente lo strato superiore della superficie, di grana molto fine: i risultati delle due sonde, benché i siti di atterraggio fossero molto distanti tra loro, sono stati molto simili. Una caratteristica interessante è stata il deficit in peso del materiale, ovvero una parte di esso è sfuggita all'analisi: si tratta molto probabilmente di H_2O e CO_2 , anche se non si può escludere la presenza di nitrati e Na_2O . Le stime dell'acqua contenuta nei campioni esaminati variano dallo 0,3% al 3% in peso.

Il materiale analizzato mostra rispetto alle rocce eruttive della Terra un alto contenuto di ferro, magnesio e zolfo, basso contenuto in alluminio e scarsissima presenza di potassio. Poiché le sonde mancavano di qualsiasi mezzo per determinare la composizione mineralogica dei campioni prelevati, l'interpretazione dei risultati non è univoca: l'ipotesi che maggiormente incontra il favore degli studiosi è che le polveri fini consistano di argille ad alto contenuto ferroso, con minori aggiunte di solfati, carbonati e ossidi. I meccanismi più plausibili per la formazione di questo minerale implicano la presenza d'acqua allo stato liquido.

Nel complesso, la composizione dei campioni suggerisce la provenienza, per erosione e altri processi di degradamento, da rocce ricche di ferro e magnesio come i basalti.

Una caratteristica peculiare del suolo marziano

sembra essere la sua capacità di assorbire elementi volatili, soprattutto H_2O e CO_2 . Questo fenomeno non è limitato al passato del pianeta, ma deve essere stato attivo almeno fino a tempi recentissimi, e questo per via delle osservazioni sul rapporto isotopico dell'ossigeno descritte nel paragrafo dedicato all'atmosfera. È stato dimostrato che la capacità dei detriti fini basaltici di trattenere CO_2 dipende molto dalla temperatura e dalla pressione parziale del gas, crescendo all'aumentare di quest'ultima e al diminuire della temperatura. Questa dipendenza innesca spontaneamente un ciclo di scambio fra terreno e atmosfera, con variazioni climatiche stagionali o anche a lungo termine (stimolate dalla precessione dei poli marziani, che li fa oscillare anche fino a 60°) che comportano sensibili modifiche dei parametri climatici delle regioni polari. Proprio queste zone del pianeta dovrebbero possedere la maggior parte delle riserve di elementi volatili.

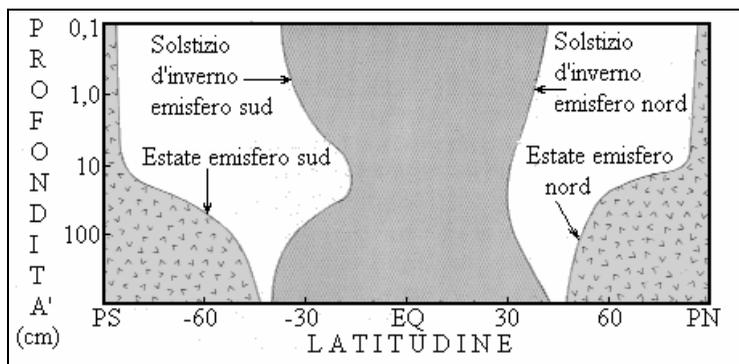


Fig. 7.11 – Stabilità dell'acqua nei primi cm sotto la superficie, in funzione della latitudine. Le regioni equatoriali sono rappresentate dalla zona più scura al centro: in esse l'acqua non è mai stabile rispetto all'atmosfera. Nelle zone polari (punteggiate) l'acqua è sempre stabile sotto forma di ghiaccio. Alle latitudini intermedie la stabilità varia con le stagioni.

Secondo i calcoli, con i poli alla massima inclinazione, le temperature polari sarebbero più alte di 15° rispetto a quelle odierne, mentre quelle equatoriali scenderebbero di alcuni gradi; in condizioni di obliquità minima l'equatore sarebbe solo un po' più caldo di oggi, mentre le temperature polari scenderebbero di 15°. Certamente gli effetti sui processi di scambio di volatili sarebbero molto sensibili.

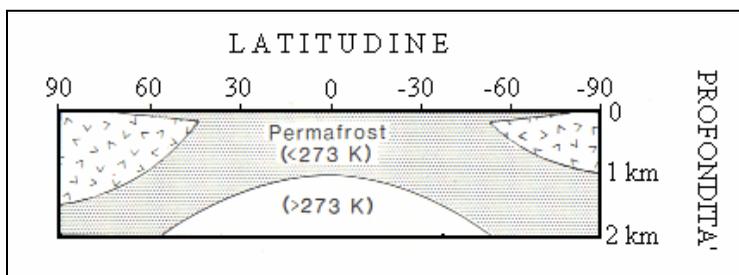


Fig. 7.12 – Stabilità dell'acqua a differenti profondità al variare della latitudine (è riportata anche l'isoterma di 273 K, corrispondente alla transizione acqua-ghiaccio)

La questione della presenza d'acqua, o di ghiaccio, sotto la superficie è stata analizzata in dettaglio da diversi autori, e la sua esistenza sembra quasi certa, viste le evidenze geologiche, mineralogiche, chimiche e climatiche (senza contare i dati in arrivo dal radar della Mars Express). Elenchiamo alcuni possibili candidati per le riserve di acqua odierne:

- 1) Calotte permanenti. Non dovrebbero essere riserve abbondanti, ma sono le uniche direttamente visibili.
- 2) Terreno stratificato. Situato tra gli 80° e i 90° gradi di latitudine ad entrambi i poli, con uno spessore forse variabile tra i 2 e i 4 km. La quantità d'acqua è difficilmente valutabile.
- 3) Lenti di ghiaccio polari (*permafrost*). Si trovano sotto la

superficie delle zone polari e scendono forse fino a 40° di latitudine. Stime (speculative) della quantità di acqua custodita si aggirano intorno ai milioni di km³, corrispondenti a uno strato di 23 m sull'intera superficie del pianeta.

4) Minerali argillosi. Le stime della quantità variano, ma si tratta comunque di valori più bassi rispetto al *permafrost* (forse sui 3 m d'acqua).

5) Ghiaccio sotterraneo (*permafrost*). Non sono ancora possibili stime realistiche del volume d'acqua contenuto.

6) Bacini sotterranei. Anche in questo caso non si dispone ancora di stime attendibili.

I PIANETI ESTERNI

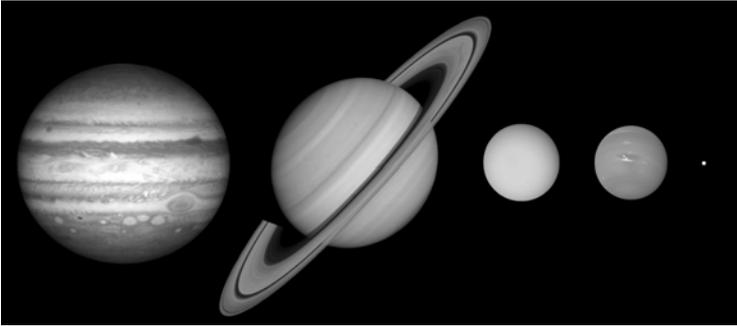


Fig. 8.1 – I pianeti esterni. Fonte NASA

8.1 – IL QUADRO GENERALE

Oltrepassando la fascia principale degli asteroidi incontriamo pianeti molto diversi da quelli di tipo terrestre. Trascurando il più distante, Plutone, che oggi si tende a considerare un corpo più affine alle comete che ai pianeti veri e propri (anche se il dibattito tra gli studiosi è ancora aperto), i pianeti esterni Giove, Saturno, Urano e Nettuno condividono caratteristiche comuni: grandi masse e dimensioni, composizione gassosa (soprattutto idrogeno ed elio), sistemi di anelli e molti satelliti. Si ritiene che nel corso della loro formazione essi abbiano potuto catturare grandi quantità di materia dalla nebulosa protosolare, poiché le basse temperature presenti nella loro regione, a differenza del sistema solare più interno, consentivano la condensazione dei gas nebulari più abbondanti quali idrogeno, elio, vapore acqueo, ammoniaca e metano.

Non esistendo una superficie solida, misurare le dimensioni di questi pianeti può essere piuttosto difficile: gli astronomi fissano convenzionalmente la “superficie”

alla distanza dal centro che corrisponde alla pressione atmosferica di 1 bar (1000 millibar, che è poco meno di un'atmosfera). A tale valore sono riferiti anche gli altri parametri "superficiali" come temperatura, velocità del vento, eccetera.

Gli ambienti più interessanti, almeno dal punto di vista terrestre, sono quelli dei satelliti: i più grandi di essi hanno poco da invidiare ai pianeti terrestri e la loro stupefacente varietà è rimasta nell'ombra fino all'arrivo delle prime sonde Pioneer e Voyager, a partire dal 1979. Alcuni possiedono un'atmosfera e su altri sembra si trovi acqua allo stato liquido.

8.2 – GIOVE

Dopo il Sole è il corpo più grande e pesante del Sistema Solare ed è il prototipo dei pianeti gassosi, caratterizzati da notevoli dimensioni, bassa densità e costituiti soprattutto da idrogeno e elio. La sua densità ($1,34 \text{ g/cm}^3$) è addirittura inferiore a quella solare ($1,41 \text{ g/cm}^3$).

Il pianeta è gigantesco: 143.000 km di diametro equatoriale, 133.000 km il diametro polare. Trattandosi di un corpo gassoso, lo schiacciamento ai poli è molto più pronunciato rispetto a quello terrestre. A questo contribuisce anche la grande velocità di rotazione, misurata in 9 ore e 55 minuti circa (appena più veloce all'equatore che ai poli). La massa di Giove, circa 318 volte quella terrestre, è più del doppio di quella di tutti gli altri pianeti del Sistema Solare messi insieme.

L'atmosfera è molto estesa e non incontra mai una superficie solida: scendendo in profondità verso l'interno del pianeta la pressione dei gas diventa enorme: si ritiene

che al centro del pianeta si trovi un nucleo roccioso, la cui massa sarebbe solo 1/40 del totale della struttura (ma comunque otto volte quella terrestre!). Tale nucleo avrebbe costituito il germe iniziale di Giove e si sarebbe accresciuto catturando grandi quantità di gas della nebulosa protosolare, soprattutto idrogeno ed elio.

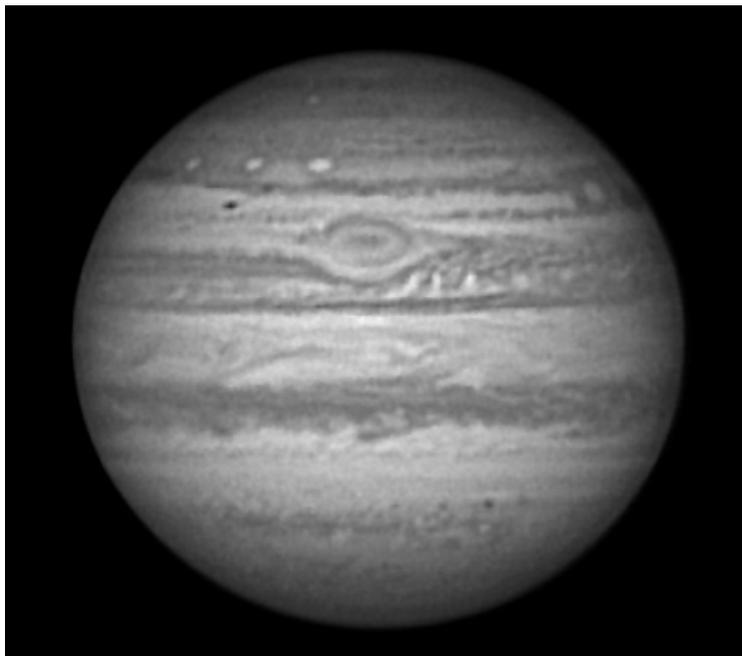


Fig. 8.2 – Giove e la grande macchia rossa. Immagine realizzata da Cristian Fattinanzi con strumentazione amatoriale.

Al telescopio il pianeta appare come un disco giallo solcato da bande chiare (*zone*) e altre scure (*fasce*), caratterizzate rispettivamente da nubi ascendenti calde e nubi discendenti fredde che si alternano come strisce parallele all'equatore.



Fig. 8.3 – Nubi nell’atmosfera di Giove riprese dalla sonda Galileo.
Fonte NASA.

L’uniformità di questo disegno è interrotta dalla cosiddetta “Grande Macchia Rossa”, avente forma più o meno ellittica (39.000 km di asse maggiore e 14.000 km di asse minore). La sua natura non è del tutto certa: dovrebbe trattarsi di una colonna di gas che si muove a spirale verso l’alto, simile ad un uragano terrestre, ma di durata eccezionale per i nostri standard. Il colore è probabilmente dovuto alla presenza di fosforo rosso prodotto dalla scissione per fotolisi della fosfina (PH_3). La macchia è stata sempre visibile da quando è stata osservata per la prima volta al telescopio (Robert Hooke, 1664).

Per esplorare in modo diretto l’atmosfera di Giove è stata lanciata nel 1989 la sonda Galileo, comprendente un’astronave madre e un modulo di discesa, che è stato fatto cadere sul pianeta attaccato a un paracadute. Attraversando l’atmosfera esso ha trasmesso dati fondamentali per la nostra conoscenza di Giove. Le dense nubi sono immerse in un’atmosfera costituita da idrogeno molecolare, elio e in minima parte da metano, ammoniaca e acqua. L’abbondanza di elio è poco più della metà che sul Sole, ma dovrebbe aumentare al crescere della

profondità: essendo più pesante dell'idrogeno, infatti, esso tende a cadere verso il centro. Questo fenomeno contribuisce all'emissione di energia termica da parte del pianeta, che complessivamente è circa 1,67 volte quella ricevuta dal Sole; comunque la temperatura "superficiale" (nel senso illustrato nel paragrafo precedente) non supera i $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$, anche se aumenta procedendo verso l'interno del pianeta. La temperatura al centro, secondo i modelli teorici, raggiungerebbe i $22000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Si ritiene che, se Giove avesse avuto una massa circa 80 volte maggiore, la sua contrazione sarebbe stata sufficiente a innescare un processo di fusione nucleare e a farlo diventare una (piccola) stella.



Fig. 8.4 – Rappresentazione artistica della sonda Galileo. Fonte NASA.

Il pianeta è dotato del campo magnetico più

intenso tra i pianeti del Sistema Solare. La sua magnetosfera si estende per circa 8 milioni di km dalla parte opposta a Sole e per 3 milioni di km dalla parte del Sole; se fosse visibile, essa apparirebbe nel cielo più grande della Luna piena.

Il meccanismo di generazione del campo magnetico è diverso da quello terrestre: a grandi profondità la pressione è così elevata che i maggiori costituenti del pianeta, l'idrogeno e l'elio (entrambi gas), assumono le caratteristiche di liquido e poi addirittura di solido "metallico", diventando buoni conduttori di elettricità. L'effetto dinamo può allora generare e sostenere un campo magnetico permanente.

8.3 – IL SISTEMA GIOVIANO

Trent'anni fa si conoscevano solo 12 satelliti di Giove, mentre oggi il conteggio ha superato i 60 e continua a crescere. La maggior parte di essi è costituita da corpi irregolari e di piccole dimensioni, probabilmente catturati dalla fascia degli asteroidi. Vi sono però quattro satelliti di grandi dimensioni; scoperti nel 1610 da Galileo, e per questo chiamati satelliti medicei o galileiani, hanno ricevuto com'è d'uso nomi legati alla divinità che Giove rappresenta: Io, Europa, Ganimede e Callisto, elencati in ordine di distanza crescente dal pianeta. Essi giacciono tutti su orbite quasi circolari, complanari con l'equatore di Giove, rivolgendogli sempre la stessa faccia. I periodi orbitali di Io, Europa e Ganimede sono in rapporto 1:2:4, il che significa che per ogni orbita di Ganimede Europa ne compie due e Io quattro: tale fenomeno, assai comune nel Sistema Solare, è detto *risonanza orbitale* e minimizza l'energia del sistema, accrescendone la stabilità.

La regolarità delle orbite dei quattro satelliti maggiori fa pensare che essi abbiano avuto origine da un disco di polveri e gas intorno al pianeta, replicando in dimensioni ridotte il processo di formazione del Sistema Solare: l'ipotesi è confermata dal confronto fra le densità medie dei quattro corpi, decrescenti all'aumentare della distanza da Giove.

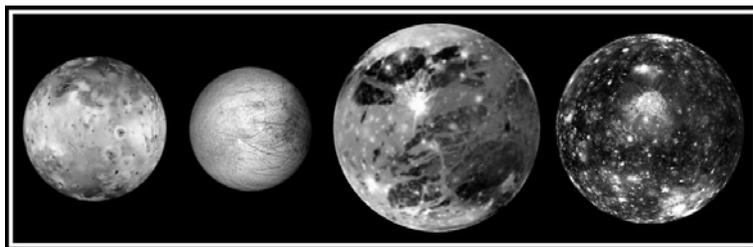


Fig. 8.5 – I satelliti galileiani. Rappresentazione in scala con immagini della sonda Galileo. Fonte NASA

Riportiamo nella tabella le caratteristiche fisiche principali dei satelliti galileiani:

	Io	Europa	Ganimede	Callisto
Distanza in raggi gioviani ($R_J=143000$ km)	5,90	8,97	14,98	26,34
Raggio (km)	1821	1560	2634	2400
Massa (kg)	$0,89 \cdot 10^{23}$	$0,48 \cdot 10^{23}$	$1,48 \cdot 10^{23}$	$1,08 \cdot 10^{23}$
Densità media (g/cm^3)	3,529	3,018	1,936	1,851

Tabella 8.1 – I parametri fisici dei satelliti galileiani

Può essere utile un confronto con Mercurio, il più piccolo dei pianeti terrestri: il suo raggio è 2438 km e la massa è $3,30 \cdot 10^{23}$ kg. Mercurio è quindi più piccolo di Ganimede, ma ha una massa più che doppia. Marte,

invece, ha un raggio di 3390 km e una massa di $6,42 \cdot 10^{23}$ kg: tuttavia la sua superficie di colore scuro ha una riflettività molto più bassa di quella di Ganimede, che se si trovasse alla stessa distanza di Marte apparirebbe più brillante del Pianeta Rosso!

Io e Europa sono per lo più composti di silicati e la loro densità è simile a quella delle rocce della crosta terrestre; per Ganimede e Callisto i valori sono più bassi e ciò indica una composizione mista di silicati e ghiaccio in quantità grosso modo equivalenti. Callisto è probabilmente l'unico dei quattro ad avere una struttura interna non differenziata, mentre gli altri sembrano possedere un nucleo e un mantello come i pianeti terrestri.

Dal punto di vista geologico Io è senza dubbio il corpo più attivo di tutto il Sistema Solare, Terra compresa. Praticamente ogni punto della superficie mostra i segni del vulcanesimo: caldere in continua evoluzione e le ininterrotte effusioni laviche modificano incessantemente la topografia superficiale del satellite. A testimonianza di ciò stanno le immagini riprese dalle sonde spaziali a partire dal 1979: poco più di vent'anni sono bastati per alterare sensibilmente la morfologia di alcune caldere e per farne nascere di nuove. Una nube di gas vulcanici (in cui sono stati rilevati zolfo e sodio) avvolge il satellite e, in parte, riesce addirittura a sfuggire al suo campo gravitazionale: tracce di questi depositi sono state osservate sul vicino Europa.

È importante a questo punto sottolineare che un comportamento del genere è del tutto inaspettato; l'attività geologica di un pianeta o satellite dipende dal calore interno che esso è in grado di generare, e questo a sua volta è proporzionale al volume del corpo. Così la Terra e Venere, i corpi solidi più grandi del Sistema Solare, sono

geologicamente attivi, mentre la Luna e Mercurio possono definirsi quasi “morti”, con Marte che si trova in una situazione forse intermedia. Quindi Io, con dimensioni appena superiori a quelle della Luna, dovrebbe essere freddo e spento, e così anche gli altri satelliti galileiani. La spiegazione di questo paradosso è nella meccanica celeste: Io è molto vicino a Giove, tanto che esiste una sensibile differenza tra l’attrazione sul punto di Io più vicino al pianeta e quella sul punto più lontano, dall’altra parte del satellite. Questa differenza, detta *forza mareale*, tende a spaccare in due il satellite. La struttura solida resiste, si deforma in parte e dissipa grandi quantità di energia gravitazionale sotto forma di attrito: in questo modo viene generato calore interno sufficiente a mantenere l’eccezionale attività geologica del satellite. Perché il meccanismo funzioni è necessaria almeno una piccola eccentricità orbitale per il satellite interessato (condizione soddisfatta dai satelliti galileiani).

Affinché la dissipazione mareale sia efficace nel trasferimento di energia occorre una notevole vicinanza tra pianeta e satellite. Nel sistema gioviano l’effetto è particolarmente rilevante per Io e, in misura minore, anche per Europa. Per quest’ultimo satellite la situazione è addirittura più interessante. Se l’incessante attività vulcanica di Io lo ha ormai depauperato di elementi volatili, Europa ha conservato grandi quantità di ghiaccio, che gli danno un aspetto simile a una palla di biliardo azzurra. Il meccanismo di dissipazione mareale sembra in grado di fondere il ghiaccio a partire da una profondità di circa 10 km; come risultato Europa custodirebbe un oceano profondo forse 150 km.

Molti indizi, sia pure di natura indiretta, danno supporto a questo promettente modello. Il primo è la

misura di un piccolo, ma significativo, campo magnetico scoperto dalle prime sonde spaziali inviate in esplorazione nel sistema gioviano. La densità di Europa, e la zona del Sistema Solare in cui esso si è formato, rendono improbabile la presenza di materiali ferromagnetici nel suo nucleo, che quindi non può essere ragionevolmente il motore del campo magnetico osservato; è assai più verosimile che la sua sorgente sia uno strato di materiale fluido conduttore, quale potrebbe essere l'acqua con dei sali minerali disciolti in soluzione.

Un altro indizio importante è costituito dall'aspetto della superficie di Europa, che è simile a quello della banchisa polare terrestre; i crateri sono pochissimi e poco profondi, come se l'impatto avesse fatto uscire del fluido che ha riempito il fondo del cratere. In molti punti della superficie, poi, sono evidenti i segni di rottura recente della crosta ghiacciata, con fuoriuscita di materiale fluido dalla zona sottostante: il fluido congela rapidamente per via delle bassissime temperature dello spazio (Europa non possiede un'atmosfera di densità apprezzabile). Il materiale di cui stiamo parlando è in gran parte acqua, addizionata a diversi sali (soprattutto solfati) provenienti dalle eruzioni vulcaniche del vicino Io. Secondo alcuni modelli, l'acqua dell'oceano di Europa potrebbe avere l'acidità della batteria di un'auto: questo può sembrare sfavorevole alla vita, ma la presenza dello zolfo renderebbe disponibile per eventuali organismi una sorgente energetica e una fonte di nutrimento, sfruttando il meccanismo della chemiosintesi. Negli ultimi trent'anni sono stati scoperti sulla Terra veri e propri ecosistemi situati nelle profondità oceaniche, intorno a dei "camini" sottomarini che si trovano in corrispondenza di punti caldi della crosta terrestre. Intere colonie di organismi, di cui

non si sospettava neppure l'esistenza, prosperano grazie all'energia prodotta da alcuni batteri alla base della catena alimentare, che utilizzano le reazioni chimiche dello zolfo; il meccanismo supplisce alla fotosintesi clorofilliana, impossibile a quelle profondità.

Gli ecosistemi che abbiamo appena descritto (in modo molto sommario: meriterebbero un capitolo a parte) costituiscono delle oasi di vita in un ambiente sostanzialmente sterile e assai ostile. Se si pensa al probabile oceano di Europa, è molto plausibile che anch'esso possieda un qualche tipo di camini sottomarini, che consentono il trasferimento del calore interno verso la superficie. La possibilità di un simile scenario è considerata molto seriamente dagli specialisti, che stanno attualmente combattendo una battaglia politica per salvare una missione spaziale su Europa, già in studio da qualche anno e minacciata da cancellazione per scarsità di fondi. Una sonda ben attrezzata potrebbe infatti stabilire con certezza la presenza dell'oceano, semplicemente misurando con tecniche di telemetria l'ampiezza delle "maree" della crosta ghiacciata provocate dalla gravità di Giove: il passo successivo sarebbe poi un tentativo di trivellazione, da effettuarsi in prossimità dei punti della crosta che manifestano i segni di rottura più recenti.

Allontanandoci ulteriormente da Giove, dopo Io ed Europa incontriamo il più grande satellite del Sistema Solare: Ganimede. Meno denso dei primi due, la sua superficie presenta alcune analogie con quella di Europa, in particolare per il frazionamento in varie "zolle" di ghiaccio separate da trincee e fratture di età variabile e aspetto dinamico: secondo il modello di dissipazione mareale, però, il satellite dovrebbe avere un'attività minore essendo più lontano da Giove, e quindi ci si aspetta

che la sua topografia sia più antica e più lenta a rinnovarsi. Questo sembra confermato dal maggior numero di crateri rispetto a Europa. Potrebbe allora darsi che su Ganimede, se un oceano è mai esistito, sia ormai solidificato: questa idea è però contraddetta dalla presenza di un campo magnetico. Per gli stessi motivi di Europa è poco probabile che la sua origine si trovi nel nucleo, quindi resta una piccola possibilità che l'oceano, o almeno un suo residuo, esistano ancora oggi. Se davvero è così, l'ipotetico oceano dovrebbe essere in fase di progressiva solidificazione.

Ganimede non possiede una vera e propria atmosfera, ma un velo molto tenue, è presente anche ossigeno. Come su Europa, il ghiaccio del satellite ha intrappolato una certa quantità di ossigeno e di ozono, la cui origine è probabilmente dovuta a reazioni fotochimiche e a interazioni con particelle energetiche della magnetosfera gioviana.

Callisto è l'ultimo dei quattro satelliti galileiani. Per dimensioni è terzo nel Sistema Solare, ma la bassa densità fa pensare che sia composto in parti quasi uguali da roccia e ghiaccio, senza una differenziazione interna. La sua superficie è di colore molto scuro e costellata di crateri, grandi e piccoli; tali caratteristiche fanno pensare che il satellite non abbia mai avuto un'attività geologica apprezzabile, non disponendo di una fonte di calore interna, e che abbia quindi preservato anche le morfologie superficiali più antiche. In questo quadro apparentemente semplice si inseriscono però due fatti inaspettati: il primo è l'aspetto di alcuni crateri, a fondo piatto e con indizi di fuoriuscita di materiale fluido dal sottosuolo, in modo simile ai pochi crateri di Europa. Il secondo è la misura di un debole campo magnetico: mancando con ogni

probabilità un nucleo di materiale ferromagnetico, il fluido conduttore che genera il campo potrebbe essere l'acqua, con sali disciolti in soluzione.

Un'analisi dettagliata degli altri satelliti di Giove (gli ultimi dati della sonda Galileo danno un totale di 63, aggiornato al settembre 2003) esula dagli scopi di questo capitolo. I più interni sono probabilmente nati, insieme ai quattro satelliti maggiori, da un disco di materiale orbitante intorno al pianeta appena formato: i più esterni, che hanno orbite allungate e piuttosto eccentriche, sono quasi certamente corpi catturati nella vicina fascia degli asteroidi.

Un cenno a parte meritano gli anelli. Scoperti dal Voyager 1 nel marzo 1979, essi formano un sistema composto da un alone (tra 1,3 e 1,7 raggi gioviani dal pianeta), un anello principale (di spessore circa 6400 km, si trova a 1,8 raggi da Giove) e un anello esterno molto sottile, quasi evanescente, che si estende fino a 2,9 raggi gioviani. Alcuni satelliti minori (Metis e Adrastea) si trovano all'interno dell'anello principale, uno (Amaltea) nell'anello più sottile. Lo splendore complessivo degli anelli è molto basso: le particelle che li compongono sono composte di silicati e materiale carbonioso, con dimensioni che possono variare da meno di un micron fino a circa un metro.

8.4 – SATURNO E I SUOI ANELLI

Con i suoi anelli, ben visibili da Terra anche con un piccolo telescopio, è la meraviglia del Sistema Solare. Saturno è il pianeta più distante chiaramente visibile ad occhio nudo, l'ultimo conosciuto fin dall'Antichità. È il pianeta con la più bassa densità media (0,69 volte quella

dell'acqua) e il più forte schiacciamento ai poli (il diametro equatoriale è 121.000 km, quello polare solo 109.000 km): attualmente ha anche il maggior numero di satelliti, anche se fare una classifica è compito assai problematico perché sui pianeti esterni se ne scoprono in continuazione!



Fig. 8.6 – Saturno e i suoi anelli. Immagine realizzata da Cristian Fattinanzi con strumentazione amatoriale.

La composizione chimica di Giove e di Saturno è quasi identica, ma la minor massa di quest'ultimo (95 volte quella terrestre, o 0,3 volte quella di Giove) ha impedito un'efficace compressione dei gas sotto l'azione della gravità: per questo motivo la densità di Saturno è metà di quella gioviana, rendendolo capace di galleggiare sull'acqua (ammesso che esista un oceano abbastanza grande da contenerlo!). I modelli della struttura interna, come anche i dati spettroscopici, mostrano che Saturno contiene elementi più pesanti dell'elio in misura maggiore rispetto a Giove: ciò è confermato dalle misure delle abbondanze di metano (CH_4), fosfina (PH_3) e arsina (AsH_3) rispetto all'idrogeno molecolare H_2 . In contrasto, il

rapporto He/H₂ misurato nell'atmosfera è molto inferiore rispetto al dato analogo per Giove: la spiegazione è che l'elio, più pesante dell'idrogeno, tende a separarsi da questo e a cadere verso l'interno liberando energia gravitazionale nel processo (bisogna ricordare che sui pianeti gassosi non vi sono strati di materiale solido che possano contrastare il moto delle specie chimiche mantenendole separate). Questo modello sembra confermato dal calore interno emesso da Saturno, che è circa 1,78 volte quello ricevuto dal Sole: un valore molto più elevato di quello previsto senza tener conto dell'effetto di separazione tra elio e idrogeno. Questo dato è invece in buon accordo con l'energia liberata dall'elio in caduta verso il centro del pianeta: dunque l'impoverimento in He dipende soltanto da una maggiore concentrazione all'interno.

Elio e idrogeno sono i principali costituenti dell'atmosfera di Saturno; legandosi con carbonio ed azoto, l'idrogeno forma idrocarburi ed ammoniaca. L'osservazione al telescopio rivela fasce nuvolose parallele all'equatore, a volte interrotte da giganteschi vortici in cui i venti raggiungono velocità di 1800 km/h.

Saturno ha un campo magnetico più debole rispetto a Giove, ma comunque di tutto rispetto: il meccanismo di generazione è lo stesso per i due pianeti.

Gli anelli di Saturno costituiscono la caratteristica più spettacolare del pianeta e sono noti fin dal 1659, anno in cui Huygens interpretò correttamente quello che osservava al telescopio; in precedenza Galileo li aveva già osservati nel 1610, senza però riconoscerli come tali a causa della scarsa risoluzione del suo strumento. La struttura si estende complessivamente tra 1,1 e 7,96 raggi del pianeta ed è composta da sette anelli di diversi

ampiezza, spessore e opacità. Le particelle costituenti sono principalmente di ghiaccio d'acqua, con gas e polveri al loro interno: le dimensioni variano a seconda dell'anello considerato, da meno di un micron a diversi metri. Ogni particella ruota intorno al pianeta con il suo proprio periodo.

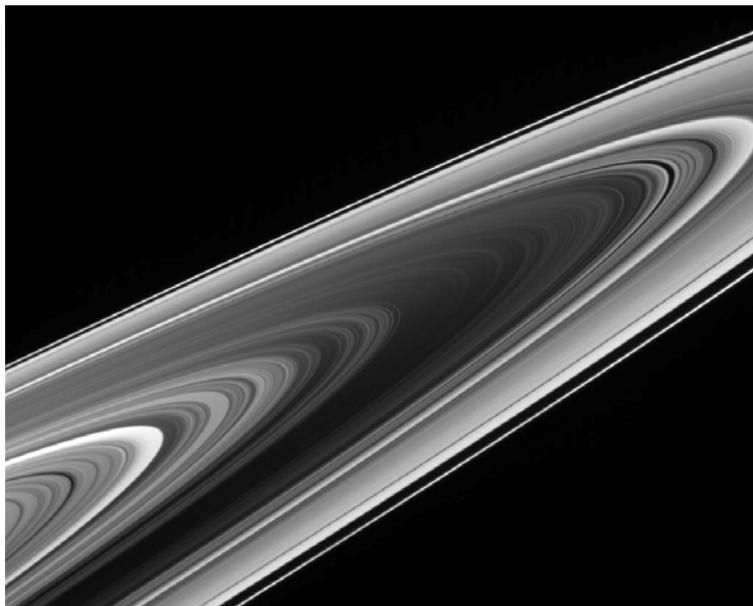


Fig. 8.7 – Gli anelli di Saturno ripresi dalla sonda Cassini. Fonte NASA

Nonostante la grande estensione, lo spessore degli anelli non supera mai i 100 m e la loro massa complessiva è 10^{-5} volte quella di Saturno, ovvero circa un millesimo della massa terrestre. Probabilmente si sono formati in seguito alla frantumazione di un satellite abbastanza grande per lo scontro con un asteroide o una cometa. Questa ipotesi è confermata dal fatto che la massa totale degli anelli è prossima a quella del satellite Mimas.

Negli ultimi anni, con la scoperta di un qualche sistema di anelli intorno a tutti i pianeti esterni, si è meglio compresa la loro natura e si è soprattutto chiarito il loro carattere transitorio. Questo è vero anche nel caso di Saturno, dove probabilmente il sistema di anelli è stato distrutto e ricostituito diverse volte nel passato. La loro instabilità dinamica nel lungo periodo, già evidenziata dagli studi di meccanica celeste dell'Ottocento, ha condotto dapprima alla ricerca, e successivamente alla scoperta (quando si sono rese disponibili le sonde), di satelliti interni ad essi (satelliti "pastori"), che svolgono una funzione stabilizzatrice per le particelle costituenti, convogliandole su orbite simili e impedendo l'innescare di instabilità gravitazionali in grado di distruggere l'intera struttura. Le scoperte si stanno susseguendo grazie all'arrivo della sonda Cassini, che dalla fine del 2004 orbita intorno a Saturno dopo essere partita dalla Terra il 15 ottobre 1997. Mentre Cassini sta studiando il pianeta, i suoi anelli e i satelliti "minori" del sistema, un suo modulo di esplorazione (Huygens) è sceso nel gennaio 2005 sul maggior satellite di Saturno, Titano, trasmettendo le prime sensazionali immagini della misteriosa superficie.

8.5 – I SATELLITI DI SATURNO

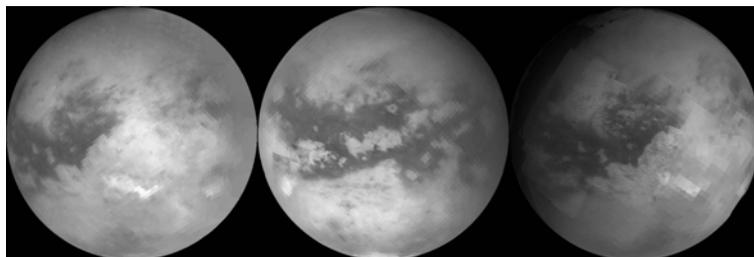


Fig. 8.8 – Superficie di Titano ripresa dalla sonda Cassini. Fonte NASA.

Titano è il più affascinante tra i satelliti di Saturno, e senza dubbio uno dei luoghi più interessanti di tutto il Sistema Solare. Dopo Ganimede, è il più grande satellite del Sistema Solare, (è più grande del 6% rispetto a Mercurio, anche ha solo il 40% della sua massa) ed è l'unico a possedere una vera atmosfera, densa e opaca: la pressione al suolo è 1496 hPa, addirittura una volta e mezza il valore medio alla superficie della Terra! Fino all'arrivo della missione Cassini era stato impossibile osservare qualsiasi dettaglio della superficie. Si conosceva però la composizione dell'atmosfera, il cui principale costituente è l'azoto N_2 , con una discreta percentuale di metano (CH_4) ed etano (C_2H_6) e con presenza di argon (Ar); si ritiene che la Terra avesse in origine un'atmosfera di composizione abbastanza simile, e questo rende molto interessante lo studio dell'ambiente di Titano, dove la presenza di idrocarburi e azoto dà luogo a reazioni chimiche molto complesse nell'atmosfera e anche alla superficie, basate sul carbonio (di gran lunga l'elemento più versatile nella formazione di legami e composti chimici, costituente fondamentale di tutti gli organismi viventi terrestri). Tuttavia non bisogna dimenticare le differenze fondamentali con la Terra: la temperatura media di Titano è $-178^\circ C$, non può quindi esservi acqua allo stato liquido e manca completamente l'ossigeno. A queste temperature etano e metano possono condensare allo stato liquido: il metano (più abbondante) modifica la superficie del satellite come l'acqua modifica quella terrestre, creando una rete di "fiumi", "laghi" e forse addirittura degli "oceani". L'assenza di acqua e ossigeno previene qualsiasi processo di ossidazione di tutti gli idrocarburi e dei nitrili presenti: essi rimangono liberi nell'atmosfera, creando una "pioggia" di particelle che

discende verso il basso dagli strati più alti e che costituisce uno strato di “smog” di colore arancione, molto opaco. Esistono anche nubi bianche, costituite da metano ghiacciato, che si spostano a notevole velocità e tendono a concentrarsi al polo sud (questo al momento delle osservazioni di Cassini). La concentrazione del metano è abbastanza elevata da saturare l’atmosfera già a 10 km di altezza, creando delle foschie che aggiungendosi allo “smog” rendono impossibile osservare la superficie di Titano dall’esterno.

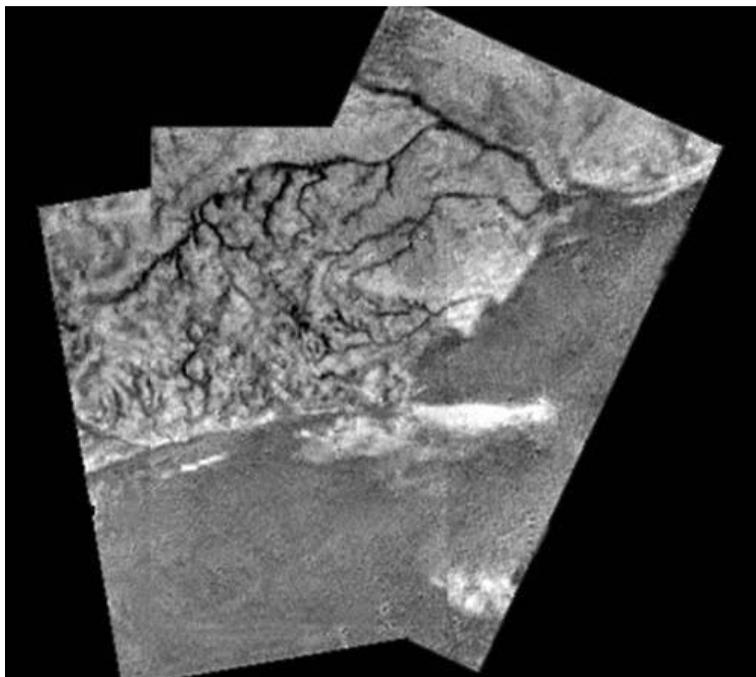


Fig. 8.9 – La superficie di Titano ripresa dalla sonda Heugens mentre si avvicinava al suolo il 14 gennaio 2005. Fonte NASA

A questo punto si pone un interrogativo importante. Indotte dalle radiazioni UV solari, molte

reazioni fotochimiche producono in alta atmosfera tutta la serie di composti organici che rendono così particolare l'ambiente di Titano. Il processo, però, tende a distruggere il componente principale dell'atmosfera, ossia il metano, in un tempo stimato sui 10-20 milioni di anni. La sua attuale abbondanza è dunque solo un caso particolare e transitorio nella storia del satellite, oppure esiste un meccanismo che tende a rimpiazzare la quantità perduta? Gli studiosi favoriscono proprio questa possibilità, sulla base di un'evidenza indiretta: la misura dell'abbondanza isotopica di azoto e carbonio. Mentre il rapporto tra isotopi leggeri e pesanti dell'azoto risulta sbilanciato verso i secondi (indicando che l'azoto è sfuggito nello spazio, quello leggero più facilmente), questo non è vero per il carbonio: la deduzione naturale è che il carbonio atmosferico (che entra nella formazione di tutti i composti organici) non è stato a lungo in atmosfera quanto l'azoto, altrimenti il rapporto isotopico mostrerebbe un andamento analogo a quello per l'azoto. In altre termini, deve esistere una sorgente di metano che ne mantiene stabile la concentrazione in atmosfera. Con ogni probabilità esso fuoriesce per degassamento dall'interno del satellite: tuttavia i dettagli del processo non sono ancora noti. Una conferma a questa ipotesi viene dalla presenza dell'isotopo ⁴⁰Ar nell'atmosfera di Titano. Tale isotopo si forma per decadimento radioattivo del potassio presente nelle rocce, ma la superficie del satellite non è fatta di materiale roccioso: la roccia può solo trovarsi all'interno del satellite. L'isotopo ⁴⁰Ar costituisce dunque un'evidenza di degassamento dall'interno.

È necessario a questo punto chiarire un punto fondamentale: con ogni probabilità il metano di Titano *non* è di origine biologica. Se lo fosse, il carbonio in esso

contenuto risulterebbe arricchito nell'isotopo più leggero, come accade agli organismi terrestri. Non possiamo certo escludere la presenza di forme di vita che non alterano il rapporto isotopico del carbonio: tuttavia sembra molto più logico pensare che Titano non ospiti la vita, come la sua temperatura bassissima suggerisce.

Per interesse scientifico gli altri satelliti di Saturno non possono competere con Titano. Tuttavia alcuni meritano di essere citati per qualche caratteristica peculiare. Ricordiamo Febe, la cui orbita distante e inclinata e l'abbondanza di ghiaccio d'acqua ne rivelano la natura di corpo catturato dalla gravità di Saturno, proveniente forse dalle regioni esterne del Sistema Solare; Iperone, con il suo aspetto "sbocconcellato" e la sua orbita quasi caotica, entrambe indicazioni di una storia di impatti distruttivi; Giapeto, con un emisfero quasi bianco (albedo 0,50: riflette solo il 50% della luce che riceve) e l'altro molto scuro (albedo 0,04, più scuro della Luna), all'interno del quale si osserva una misteriosa cresta, alta fino a 8 km, che corre lungo l'equatore; infine Encelado, che nonostante le piccole dimensioni (520 km di diametro) mostra estensioni pianeggianti lisce e poco craterizzate, sicuro indizio di superficie giovane e di una sorgente di calore interno ancora non identificata. Un indizio di criovulcanesimo (eruzioni durante cui viene emesso materiale ghiacciato a base d'acqua anziché roccia fusa) è il picco di densità esibito dall'anello E di Saturno in corrispondenza di Encelado, causato probabilmente dall'espulsione di materiale dal satellite. Oltre a tutte queste cose, la sonda Cassini ha individuato un tenue velo atmosferico a base di ossigeno che circonda Encelado: la sua origine è probabilmente da ricercarsi nell'impatto di particelle cariche della magnetosfera di Saturno, che

colpendola superficie ghiacciata del satellite estraggono molecole di H_2O dissociandole. L'idrogeno, più leggero, sfugge facilmente nello spazio lasciando indietro una maggiore quantità di ossigeno.

8.6 – IL SISTEMA DI URANO

Scoperto nel 1781 da Herschel, è visibile da Terra come un astro verde-azzurro di sesta magnitudine. La sua particolarità è di avere l'asse di rotazione inclinato di 98° rispetto alla perpendicolare al piano orbitale, per cui il Sole è visibile da uno stesso polo per 42 anni (cioè metà del periodo di rivoluzione). Le orbite dei satelliti maggiori giacciono sul piano equatoriale del pianeta, che “rotola” lungo la sua orbita.

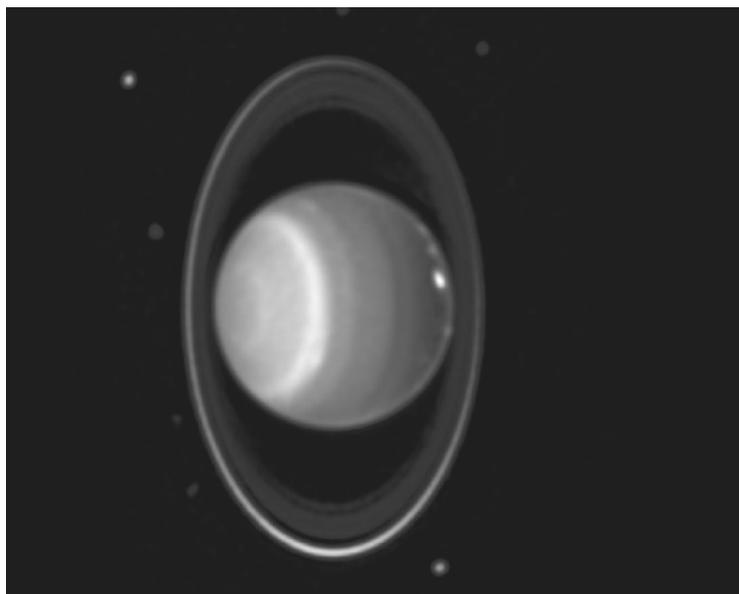


Fig. 8.10 – Urano ripreso dal telescopio spaziale Hubble. Sono visibili gli anelli e alcuni dei satelliti.

L'ipotesi più accreditata per spiegare l'anomala inclinazione dell'asse del pianeta è quella di una collisione non centrale con un corpo di massa paragonabile a quella della Terra.

Urano ha una densa e fredda atmosfera (52 K), composta principalmente da idrogeno molecolare (85%) e da elio (15%): tale composizione rispecchia quella della nebulosa solare primordiale.

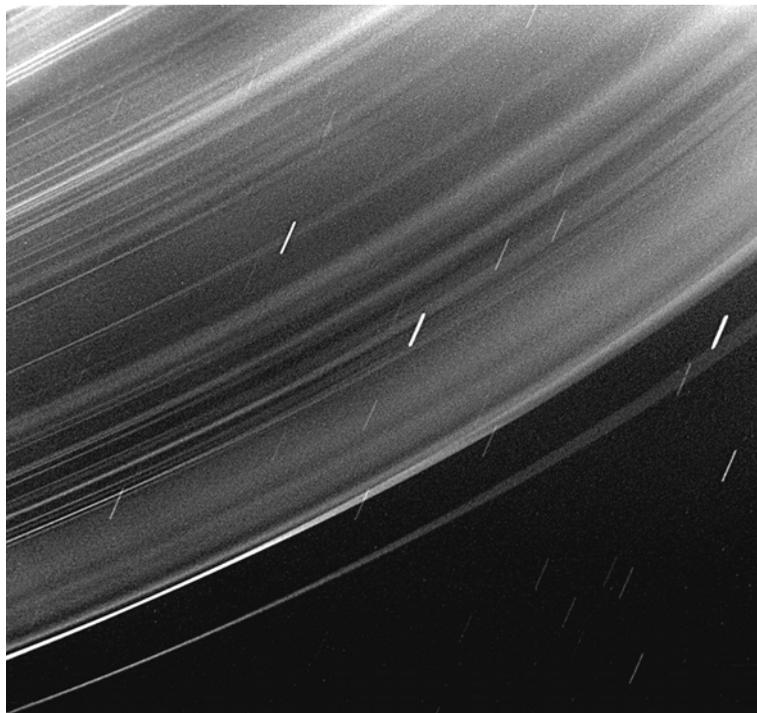


Fig. 8.11 – Gli anelli di Urano ripresi dalla Voyager 2. Fonte NASA – Calvin J. Hamilton

L'inclinazione dell'asse di rotazione e la presenza di venti analoghi alle correnti a getto terrestri fanno sì che non vi siano grandi differenze di temperatura fra i poli e

l'equatore. Urano ha un nucleo roccioso composto da ferro e silicati, ricoperto da un oceano ghiacciato di acqua, metano ed ammoniacca. Tra questo e l'atmosfera si trova uno strato di idrogeno gassoso-liquido. Recenti modelli teorici ed esperimenti di laboratorio hanno portato a supporre che l'interno di Urano, come pure quello di Nettuno, contenga carbonio allo stato di diamante. Tra i pianeti giganti Urano è l'unico a non avere una propria fonte interna di calore.

Il pianeta presenta un asse magnetico inclinato di circa 60° rispetto all'asse di rotazione e spostato di 0,3 raggi uraniani dal centro; esso ruota in senso antiorario con lo stesso periodo di rotazione del pianeta ed ha un'intensità all'equatore di 0,23 Gauss (quello terrestre è di 0,5 Gauss).

Prima della sonda Voyager 2 si conoscevano 5 lune e 9 anelli, questi ultimi scoperti attraverso l'osservazione di occultazioni stellari; la sonda ha portato a 15 il numero dei satelliti (salito a 21 già nell'ottobre 1999) e ad 11 quello degli anelli, che sono scuri e di forma circolare. I dieci satelliti scoperti dal Voyager 2 hanno dimensioni molto piccole; due di essi fungono da "satelliti pastori" per l'anello *ipson* (il più esterno). Il Voyager 2 ha inoltre esaminato le caratteristiche dei cinque satelliti principali, che sono (dal più esterno al più interno) Oberon, Titania, Umbriel, Ariel e Miranda. Il corpo più interessante sembra proprio quest'ultimo, anche se è quello di minori dimensioni (472 km): la sua superficie è una delle più tormentate e irregolari, tanto da far pensare che il satellite sia costituito da un mucchio di detriti tenuto insieme solo dalla mutua gravità. Attualmente gode di maggior credito l'ipotesi che il satellite sia stato effettivamente distrutto nel passato (come i modelli collisionali suggeriscono per

un corpo così vicino ad Urano), e forse anche più volte: però il satellite che oggi osserviamo dovrebbe la sua morfologia così peculiare ad un episodio di interazione mareale (come nel caso delle lune gioviane Io ed Europa) che avrebbe avuto luogo nel passato grazie alle perturbazioni gravitazionali del vicino satellite Umbriel. Attualmente Miranda ha un'orbita troppo circolare perché la dissipazione mareale possa avere effetto, ma un tempo la situazione poteva essere diversa. Secondo tale ipotesi, dunque, Miranda ha attraversato una fase di rimodellamento grazie all'energia assorbita tramite il meccanismo mareale: il processo si è però interrotto proprio mentre il satellite stava cominciando a differenziarsi in nucleo e crosta. La questione della storia di Miranda rimane per il momento aperta.

8.7 – IL SISTEMA DI NETTUNO

La scoperta di questo pianeta costituisce una delle pagine più entusiasmanti della storia dell'astronomia. L'esistenza di un nuovo pianeta fu ipotizzata dall'inglese Adams e dal francese Leverrier in base alle perturbazioni osservate sul moto di Urano, ma fu effettivamente confermata nel 1846 dall'astronomo tedesco Galle, che trovò il pianeta a 55' di distanza dalla posizione calcolata da Leverrier.

A causa della riflessione della luce blu e dell'assorbimento delle componenti più rosse da parte del metano atmosferico, Nettuno ci appare come una perla turchese variegata di bianco. La sonda Voyager 2 ha fotografato una grande macchia scura che si estende per oltre 10000 km, ruotante in senso antiorario, per molti aspetti simile alla Grande Macchia Rossa di Giove. La

sonda ha potuto individuare numerose altre strutture nell'atmosfera del pianeta: violente tempeste e cicloni semipermanenti di forma ovale, come pure lunghe catene di nubi bianche, simili a giganteschi cirri. Le velocità dei venti nell'atmosfera possono raggiungere i 2000 km/h, il valore più alto misurato nel Sistema Solare: questa è una delle caratteristiche che distinguono Nettuno dal più tranquillo Urano, al quale per altri versi molto assomiglia.

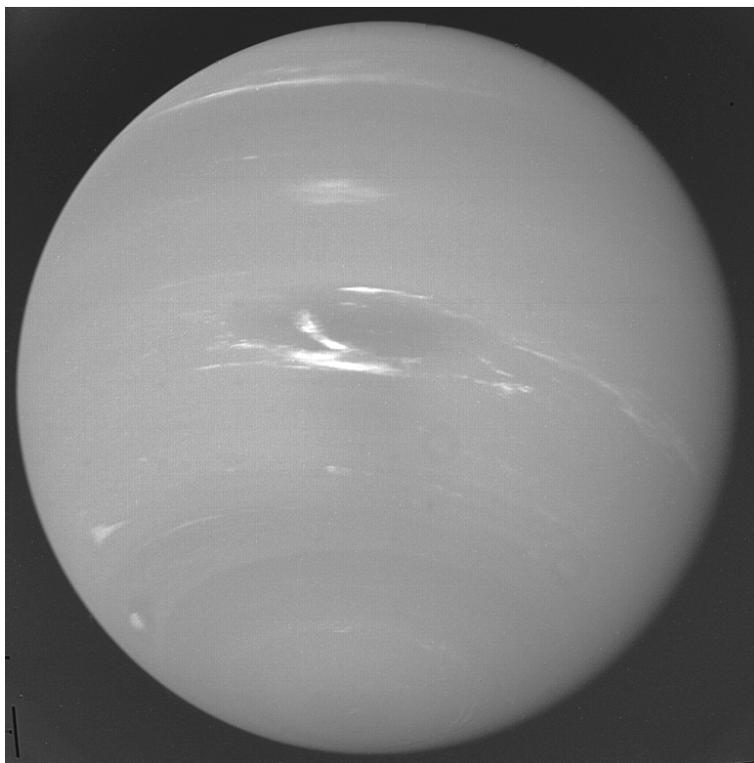


Fig. 8.12 – Nettuno ripreso dalla Voyager 2 nell'agosto del 1989.
Fonte NASA

Il campo magnetico di Nettuno ha un'intensità dello stesso ordine di grandezza di quello di Urano e può essere approssimato a quello di un dipolo; inaspettatamente l'asse magnetico è inclinato di 47° rispetto all'asse di rotazione. Attorno a Nettuno ruotano cinque anelli. La loro peculiarità consiste nel fatto che alcuni hanno una larghezza variabile: ad archi sottilissimi ne seguono altri molto grossi.

Delle otto (per ora) lune la più interessante è Tritone, uno dei satelliti più grandi del Sistema Solare (il raggio è 1300 km), che percorre un'orbita circolare con moto retrogrado. La sua superficie presenta un numero di crateri piuttosto contenuto e quindi deve essere geologicamente giovane. Avvolto da una tenue atmosfera di azoto, presenta delle fenditure di distensione (*graben*) e macchie scure causate probabilmente da vapori fuoriusciti da geysers. La temperatura è estremamente bassa, 38 K. Alcune morfologie superficiali sono uniche e la loro genesi è ancora misteriosa; altre zone mostrano indizi di criovulcanesimo, come per Encelado. Questo satellite meriterebbe certamente ulteriori visite.

8.8 – IL SISTEMA DI PLUTONE

Più piccolo della Luna, Plutone fu scoperto nel 1930 da C.W. Tombaugh; è l'unico pianeta a non essere stato ancora esplorato da sonde spaziali. Nel 1978 fu scoperto il satellite Caronte. Le misure del periodo orbitale del sistema Plutone-Caronte (6,387 giorni) e della loro distanza media (19640 km) hanno permesso il calcolo della somma delle loro masse (1/400 di quella terrestre). Proprio nel 2006 sono stati scoperti altri due piccoli satelliti di Plutone, battezzati Nyx e Hydra.

Fra il 1985 e il 1990 la Terra si è venuta a trovare sul piano dell'orbita di Caronte attorno a Plutone; in tale situazione, dalla Terra l'orbita è vista "di taglio" ed è possibile osservare le mutue eclissi; la loro durata (circa 4 ore) ha permesso di calcolare il diametro di Plutone (2284 km) e quello di Caronte (1190 km). Il rapporto delle loro masse (circa 1:12) è il più alto nel Sistema Solare, tanto che il sistema Plutone-Caronte può essere considerato come un pianeta doppio.

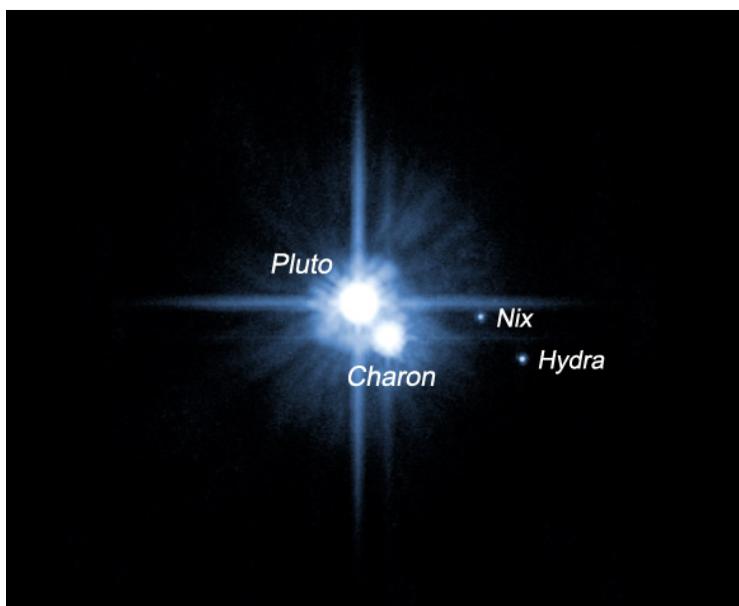


Fig. 8.13 – Plutone e le sue Luna. Immagine del telescopio spaziale Hubble resa pubblica il 15 febbraio 2006.

Dalla massa totale e dai diametri del sistema Plutone-Caronte, si ricava una densità media di circa $2,07 \text{ g/cm}^3$, più alta di quella dei pianeti gassosi, che fa sospettare almeno per Plutone la presenza di un grande

nucleo roccioso. Plutone presenta moltissime somiglianze con Tritone, il satellite di Nettuno. Queste similarità e le orbite peculiari (inclinata ed eccentrica quella di Plutone, retrograda quella di Tritone) suggeriscono una loro formazione come corpi indipendenti nelle regioni più esterne della nube solare primordiale, il che spiegherebbe la loro somiglianza chimica. In seguito Tritone sarebbe stato catturato da Nettuno nel corso di un evento dinamico violento e dai dettagli ancora oscuri: questo darebbe ragione delle particolarità orbitali.



Fig. 8.14 – Le dimensioni di Plutone e Caronte confrontate con gli Stati Uniti. Calvin J. Hamilton 1998

Dalla sintesi di molte foto prese dall'Hubble Space Telescope si è scoperto che la superficie di Plutone presenta forti contrasti; queste macchie causano variazioni di luminosità del pianeta durante la sua rotazione ed hanno permesso il calcolo del periodo di quest'ultima,

confermando così il fatto che il sistema Plutone-Caronte è sincrono, cioè entrambi i corpi rivolgono l'uno verso l'altro sempre la stessa faccia.

Nel giugno del 1988 Plutone transitò davanti ad una stella e, grazie all'eclissi di questa, sono stati acquisiti nuovi elementi circa la composizione della sua sottile atmosfera, che è risultata 30000 volte meno densa di quella terrestre. Durante l'occultazione il progressivo affievolimento di luminosità della stella ha permesso di stabilire la presenza di un tenue strato di azoto, monossido di carbonio e metano. Quando il pianeta si avvicina al Sole il riscaldamento provoca la sublimazione di una parte della sua superficie, proprio come avviene per le comete.

Plutone può forse essere considerato l'esempio più grande e brillante di una nuova classe di oggetti denominati "Plutini", che girano attorno al Sole su orbite esterne a Nettuno e fanno parte di un gruppo più ampio: i corpi della cintura (o fascia) di Edgeworth-Kuiper. La recente individuazione di un oggetto della fascia avente dimensioni (forse) superiori a quelle dello stesso Plutone rafforza l'idea che quest'ultimo non sia da considerarsi un vero e proprio pianeta. In tal caso Plutone sarebbe il primo corpo della fascia di Edgeworth-Kuiper a possedere dei satelliti.

L'11 gennaio 2006 è stata lanciata la sonda americana New Horizons, sorvolerà Plutone, Caronte e si perderà nella cintura di Kuiper.

I CORPI MINORI DEL SISTEMA SOLARE

Oltre che dai pianeti con i loro satelliti, il Sistema Solare è popolato da una miriade di corpi minori, anch'essi in orbita attorno al Sole. In base alla loro natura e alla loro massa tali corpi vengono classificati come pianetini, comete, meteoroidi e polveri interplanetarie. Ci occuperemo solo dei primi due gruppi, che comprendono gli oggetti più importanti.

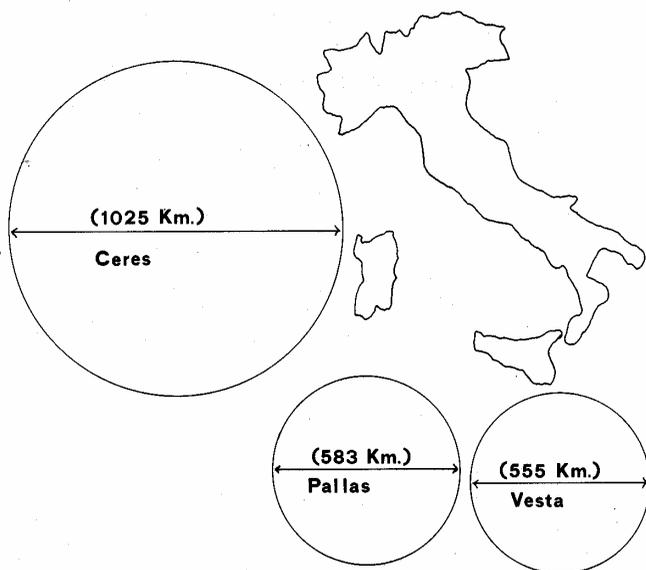


Fig. 9.1 – Dimensioni dei maggiori asteroidi

9.1 – GLI ASTEROIDI

Sono corpi rocciosi ricchi di silicati e metalli (ma una sottoclasse è ricca di composti del carbonio e

comprende alcuni degli oggetti più antichi del Sistema Solare), confinati generalmente (ma non sempre!) in una zona posta fra le orbite di Marte e di Giove, detta Fascia Asteroidale Principale.

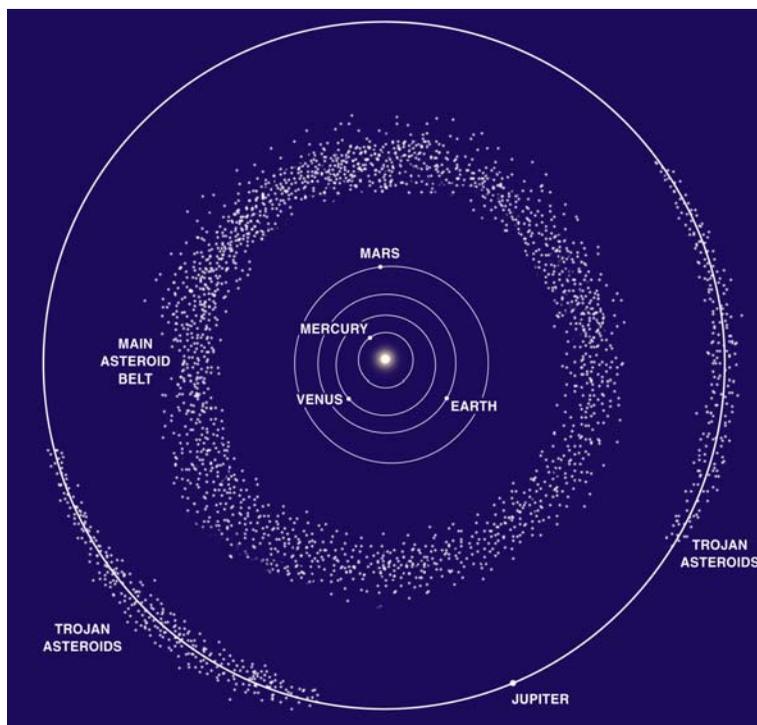


Fig. 9.2 – La fascia principale degli asteroidi.

Il più grande, Cerere, scoperto nel 1801 da Piazzi, ha un diametro di circa 1000 km e raccoglie in sé circa un terzo della massa totale di tutti i pianetini; Pallade e Vesta hanno un diametro di circa 500 km. Alla fine del 1999 erano stati scoperti 63000 pianetini. Di questi 850 possono avvicinarsi al Sole più della Terra e sono chiamati "oggetti Apollo". Il 3 luglio 2006 l'asteroide 2006 XP 14 è passato

ad una distanza di 410.000 chilometri, un po' più distante della Luna. L'oggetto aveva un diametro di circa 600 m.

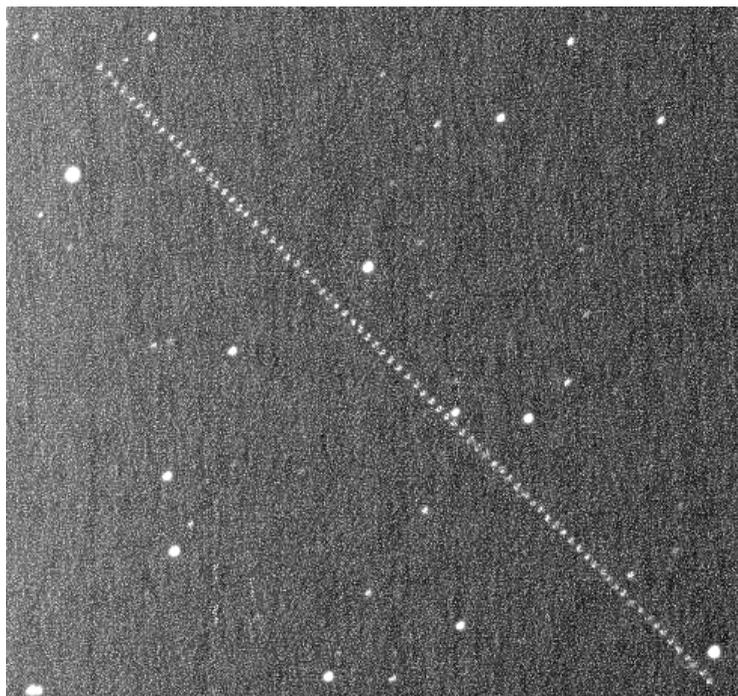


Fig. 9.3 – L'asteroide 2004 XP 14 ripreso dall'Osservatorio Astronomico "Padre Francesco De Vico" di Serrapetrona (MC) il 3 luglio 2006 alle ore 23.16. Somma di 79 immagini di un secondo di esposizione, intervallate di 5 secondi. Autori: Angelo Angeletti, Fabiano Barabucci, Francesco Barabucci, Gianclaudio Ciampechini

Questi asteroidi prendono il nome di NEO (Near Earth Object) Nonostante oscillazioni climatiche ed estinzioni di massa, dovute a possibili impatti di asteroidi (date ipotizzate: 439, 367, 251, 206 e 65 milioni di anni fa) la vita ha prosperato sul nostro pianeta, trasformandolo con la sua attività e, stupidità umana permettendo, continuerà a farlo.

Tutti gli asteroidi hanno subito un'evoluzione di tipo collisionale, cioè sono frammenti di corpi più grandi che si sono scontrati tra loro. Soltanto Vesta conserva la sua crosta originaria, che ne fa l'unico asteroide ancora "intero" (anche se butterato da alcuni grandi crateri). Lo studio dinamico delle "famiglie" di pianetini derivate dalla distruzione di uno stesso antico asteroide (finora ne sono state individuate alcune decine) viene portato avanti con un uso spinto delle simulazioni numeriche al computer e ha lo scopo di ottenere il maggior numero possibile di informazioni sulla situazione di partenza della fascia degli asteroidi (prima che Giove scatenasse la loro evoluzione collisionale). Il vero obiettivo è lo sfruttamento delle informazioni ottenute come test di calibrazione per i modelli teorici della nebulosa protoplanetaria. Non meno importante è la questione degli impatti: questi corpi hanno pesantemente bombardato il Sistema Solare interno (Terra compresa) nel passato, e vi sono fondati motivi per ritenere che, a cadenze più o meno regolari, si possano ancora verificare delle collisioni, che avrebbero conseguenze catastrofiche per la nostra civiltà.

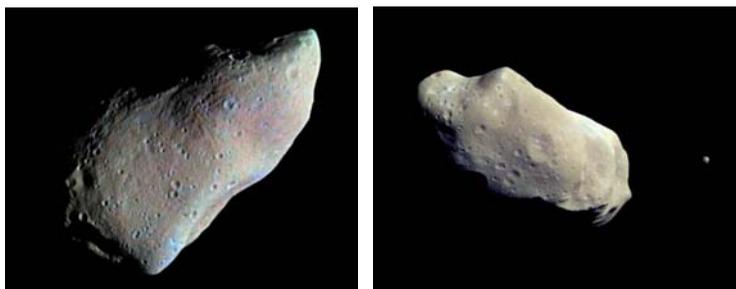


Fig. 9.4 – Gli asteroidi Gaspra (sinistra), Ida e Dactyl (destra) ripresi dalla sonda Galileo durante il suo viaggio verso Giove. Ida è circa il doppio di Gaspra; Dactyl è una luna di Ida.



Fig. 9.5 – La cometa Hale-Bopp. È stata visibile nei nostri cieli nella primavera del 1997.

Una classificazione accurata di tutti gli asteroidi con dimensioni superiori a un valore di soglia (100 m o magari anche meno) e la conoscenza di tutti i relativi elementi orbitali consentirebbero di prevedere con largo anticipo gli eventi potenzialmente pericolosi. Attualmente resta moltissimo lavoro da fare: più o meno, si stima di

aver censito quasi completamente solo i corpi della fascia asteroidale con dimensioni di una decina di km, un valore ancora troppo alto. Inoltre il numero degli oggetti cresce vertiginosamente al diminuire delle dimensioni (e c'è sempre la possibilità che le orbite conosciute vengano perturbate: il monitoraggio non deve mai cessare).

9.2 – LE COMETE

Si tratta di conglomerati di ghiacci e altri materiali volatili uniti a roccia, tipici del Sistema Solare esterno. Quando si avvicinano al Sole una parte della loro superficie sublima: si sviluppano così una chioma e una o più code, lunghe anche decine di milioni di km. I ripetuti passaggi vicino al Sole le consumano progressivamente.



Fig. 9.6 – Uno dei frammenti della cometa 73P/Schwassman-Wachmann 3 ripresa il 24 aprile 2006 dall'Osservatorio Astronomico "Padre Francesco De Vico" di Serrapetrona (MC). Autori: Angelo Angeletti, Fabiano Barabucci, Francesco Barabucci, Gianclaudio Ciampechini.

Come per i pianetini, le perturbazioni dovute ai pianeti di massa maggiore alterano le orbite delle comete modificando il loro periodo di rivoluzione. Per esempio la cometa di Halley (il cui primo passaggio storicamente registrato e identificabile risale al 240 a. C.) gira attorno al Sole in circa 76 anni.

Alcune delle comete osservate sono “nuove”, cioè mai giunte in precedenza nelle vicinanze del Sole: questo fatto, unito alla loro inevitabile distruzione dopo diversi passaggi al perielio, ha fatto pensare che esse provengano da due serbatoi praticamente inesauribili: la *fascia di Edgeworth-Kuiper*, un disco situato nel piano dell'eclittica oltre l'orbita di Nettuno, e la *nube di Oort*, di forma sferica e con un raggio di circa 50000 AU.

Le prime ipotesi sull'esistenza di un disco di materiale situato oltre l'orbita di Nettuno si debbono a Edgeworth (1943) e, indipendentemente, a Kuiper (1951): si è sempre ritenuto poco probabile che la nebulosa protosolare si interrompesse bruscamente in corrispondenza di Plutone. Nel corso degli anni Ottanta diversi autori analizzarono i parametri orbitali delle comete a breve periodo per ricavare indicazioni dinamiche sugli eventuali oggetti di quella regione esterna.

La scoperta del primo oggetto nel 1992 trasformò la cintura (o fascia) di Edgeworth-Kuiper da plausibile speculazione teorica a realtà sperimentalmente misurabile; nel 2000 erano già stati classificati circa 600 oggetti KBO (dalle iniziali di Kuiper Belt Object), un numero sufficiente per consentire stime quantitative - anche se ancora molto imprecise - della massa totale e della distribuzione dei corpi della fascia. Essa sarebbe popolata da circa un miliardo di oggetti, a distanze comprese tra 30 e 50 Unità Astronomiche (ma certamente esistono molti altri oggetti più lontani), con una distribuzione molto

irregolare che risente degli effetti perturbativi dei pianeti vicini (soprattutto di Nettuno). I corpi di dimensioni superiori ai 100 km sarebbero circa 100.000.

In questo quadro l'esistenza del sistema binario Plutone-Charonte (che di recente è diventato quadruplo) non sembra più una stranezza come si pensava fino a una decina d'anni fa; gli ultimi corpi scoperti sembrano molto simili a Plutone, e le loro dimensioni variano tra i 50 e i 1200 km.

Sicuramente ne esiste ancora un grandissimo numero nelle regioni più distanti dal Sole: si spera in futuro di osservare direttamente i più vicini tra i membri della nube di Oort.

Perché i corpi cometari ricevono così tante attenzioni? La risposta è che essi e gli asteroidi custodiscono i "fossili" meglio conservati di un periodo primordiale in cui i pianeti non si erano ancora formati, e questi "mattoni" che poi hanno dato vita ai pianeti contengono molte risposte alle domande sull'origine del Sistema Solare.

Inoltre i modelli teorici attuali di formazione prevedono che la Terra non abbia potuto conservare la quantità di elementi volatili (soprattutto l'acqua) di cui oggi dispone. La soluzione più probabile è che il bombardamento del Sistema Solare interno nel passato non sia stato causato solo da asteroidi, ma anche da corpi cometari provenienti dalla cintura di Edgeworth-Kuiper e dalla nube di Oort. Secondo un'ipotesi ancora più ardita le comete avrebbero così portato sulla Terra non solo i componenti organici necessari per la nascita della vita, ma addirittura i primi veri e propri microrganismi.

BIBLIOGRAFIA

Testi di carattere generale

- FLAMMARION C., *L'Astronomia Popolare*, Casa Editrice Sonzogno, 1928
- HACK M., *Corso di Astronomia*, Hoepli, 1984
- MASANI A., *Astrofisica*, Editori Riuniti, 1984
- CESTER B., *Corso di Astrofisica*, Hoepli, 1984
- GRIBBIN J., *Enciclopedia di Astronomia e Cosmologia*, Garzanti, 1998
- BONOLI F., PARMEGGIANI G. e ZUCCOLI M. a cura di, *Leggere il cielo*, «Giornale di Astronomia», Supplemento al n. 1, marzo 2000
- BRACCESI A., *Dalle Stelle all'Universo*, Zanichelli, 2000
- REES M., *Il nostro ambiente cosmico*, Adelphi, 2004
- HACK M., *Dove nascono le stelle*, Sperling, 2004

L'Universo

- SCIAMA D. W., *Cosmologia Moderna*, Mondadori, 1973
- GALEOTTI P. e NUVOLI L., *La fisica dell'Universo*, Loescher, 1977
- LERNER E. J., *Il Big Bang non c'è mai stato*, Dedalo, 1994
- WEBB S., *Measuring The Universe*, Springer, 1999
- HARRISON E., *Cosmology*, Cambridge University Press, 2000
- GREENE B., *L'Universo elegante: superstringhe, dimensioni nascoste e la ricerca della teoria ultima*, Einaudi, 2000

- GASPERINI M., *L'Universo prima del Big Bang: Cosmologia e teoria delle stringhe*, Franco Muzzio Editore, 2002
- MAZZITELLI I., *Tutti gli Universi possibili*, Liguori Editore, 2002
- LIDDLE A., *An Introduction to Modern Cosmology*, Wiley, 2003

Il Sole e le stelle

- KAPLAN S. A., *Fisica delle Stelle*, Sansoni, 1982
- CASTELLANI V., *Astrofisica stellare*, Zanichelli, 1985
(al seguente indirizzo internet è possibile scaricare una edizione aggiornata del libro:
<http://www.mporzio.astro.it/~marco/AstrofisicaStellare/>)
- KIPPENHAHN R. and WEIGERT A., *Stellar structure and evolution*, Springer Verlag, 1990
- PHILLIPS A. C., *The physics of stars*, John Wiley & Sons, 1994
- ARNETT D., *Supernovae and Nucleosynthesis*, Princeton University Press, 1996
- KALER J., *Extreme stars*, Cambridge University Press, 2001
- STIX M., *The Sun: An Introduction*, Springer Verlag, 2002

Il Sistema Solare

- CAMERON A. G. W., *L'origine e l'evoluzione del sistema solare*, «Le Scienze» n.91 pp. 20-29, 1976
- HARTMANN W. K., *I corpi minori del sistema solare*, «Le Scienze» n.91, pp. 114-127, 1976
- GODOLI G., *Il Sole: Storia di una stella*, Einaudi, 1982

- FARINELLA P., PAOLICCHI P., ZAPPALA' V., Gli asteroidi, IL CASTELLO, 1983
- CAPRARA G., *Il libro dei voli spaziali*, Vallardi, 1984
- FAVERO G., *L'evoluzione del Sistema Solare*, Curcio, 1986
- CHAMBERLAIN, J. W. and HUNTEN, D. M., *Theory of planetary atmospheres*, II Ed., Academic Press Inc., 1987
- BIANUCCI P., *La Luna*, Giunti 1988
- BRIGGS G. e TAYLOR F., *Atlante Cambridge dei Pianeti*, Zanichelli, 1989
- NEWCOTT W., *Venus revealed*, National Geographic, vol. 183, n. 2, pp. 36-59, Feb. 1993
- ACCORDI B., LUPIA PALMIERI E., PARROTTO M., *Il globo terrestre e la sua evoluzione*, Zanichelli
- LUHMANN J. G., POLLACK J. B., COLIN L., *The Pioneer mission to Venus*, Scientific American, Apr. 1994
- COWLEY C. R., *Cosmochemistry*, Cambridge University Press, 1995
- NELSON R. M., *Mercury: the forgotten planet*, Scientific American, pp. 28-35, Nov. 1997
- RIGUTTI M., *Comete, meteoriti e stelle cadenti*, Giunti, 1997
- LODDERS K. and FEGLEY B. Jr., *The Planetary Scientist's Companion*, Oxford University Press, 1998
- BULLOCK M. A. e GRINSPOON D. H., *Global climate change on Venus*, Scientific American, pp. 34-41, Mar. 1999
- CORRADINI A. a cura di, *Il Sistema Solare*, «Le Scienze» quaderni n.111, 1999

- VILLA M. e MONTANARI E., *Meteore e Meteoriti*, «l'Astronomia» quaderni, 2001
- CAPRARA G., *La conquista di Marte*, De Agostani, 2002

INDICE

Prefazione	Pag.	V
Presentazione	»	XII
1 – L’Universo: struttura ed evoluzione		
1.1 – Le galassie	»	1
1.2 – La struttura dell’Universo	»	8
1.3 – L’origine e l’evoluzione dell’Universo	»	17
2 – Il Sole e le stelle		
2.1 – Il Sole	»	31
2.2 – La formazione del Sistema Solare	»	36
2.3 – Gli spettri e la classificazione stellare. Il diagramma HR	»	49
2.4 – Struttura stellare ed equazioni di equilibrio	»	53
2.5 – Evoluzione stellare	»	59
3 – Mercurio		
3.1 – I numeri di Mercurio	»	87
3.2 – L’osservazione di Mercurio	»	92
3.3 – L’esplorazione di Mercurio	»	97
	Pag.	101

3.4 – I nomi delle strutture superficiali di Mercurio		
3.5 – Mercurio nella cultura	»	104
3.6 – Le caratteristiche fisiche di Mercurio	»	107
4 – Venere		
4.1 – I numeri di Venere	»	121
4.2 – L’osservazione di Venere	»	125
4.3 – L’esplorazione di Venere	»	128
4.4 – Venere nella cultura	»	140
4.5 – La struttura fisica di Venere	»	146
5 – La Terra		
5.1 – Parametri fisici	»	163
5.2 – Cenni sulla struttura interna	»	165
5.3 – Cenni sulla struttura dell’atmosfera	»	167
5.4 – I moti della Terra	»	169
5.5 – L’origine della vita sulla Terra	»	185
6 – La Luna		
6.1 – Parametri fisici	»	207
6.2 – Geologia lunare	»	219
6.3 – L’esplorazione della Luna	»	232

7 - Marte

7.1 – I numeri di Marte	»	243
7.2 – Osservazioni di Marte nella storia	»	248
7.3 – L’esplorazione spaziale	»	256
7.4 – Marte nella cultura popolare	»	266
7.5 – L’atmosfera, i venti e il clima	»	273
7.6 – Le morfologie della superficie	»	284

8 – I pianeti esterni

8.1 – Il quadro generale	»	315
8.2 – Giove	»	316
8.3 – Il sistema gioviano	»	320
8.4 – Saturno e i suoi anelli	»	327
8.5 – I satelliti di Saturno	»	331
8.6 – Il sistema di Urano	»	336
8.7 – Il sistema di Nettuno	»	339
8.8 – Il sistema di Plutone	»	341

9 – Corpi minori

9.1 – Gli asteroidi	»	345
9.2 – Le comete	»	350

Bibliografia	»	353
--------------	---	-----

Indice	»	357
--------	---	-----

ACCADEMIA MONTALENA DEGLI INCULTI

Associazione Astronomica Helios

Scuola Estiva di Astronomia e Meteorologia
"Paolo Antonio Foscarini"

Fig. 4

Fig. 1

LUCIANO ROMEO

Fig. 2

Fig. 3



Fig. 5



Fig. 6

INTRODUZIONE ALLA TERZA EDIZIONE
DEL CORSO DI ASTRONOMIA

*I pianeti interni del sistema solare:
Mercurio e Venere*

