



*Ministero dell'Istruzione
dell'Università e Ricerca*



XIV OLIMPIADI ITALIANE DI ASTRONOMIA – SIRACUSA – 2014

Le comete e la vita

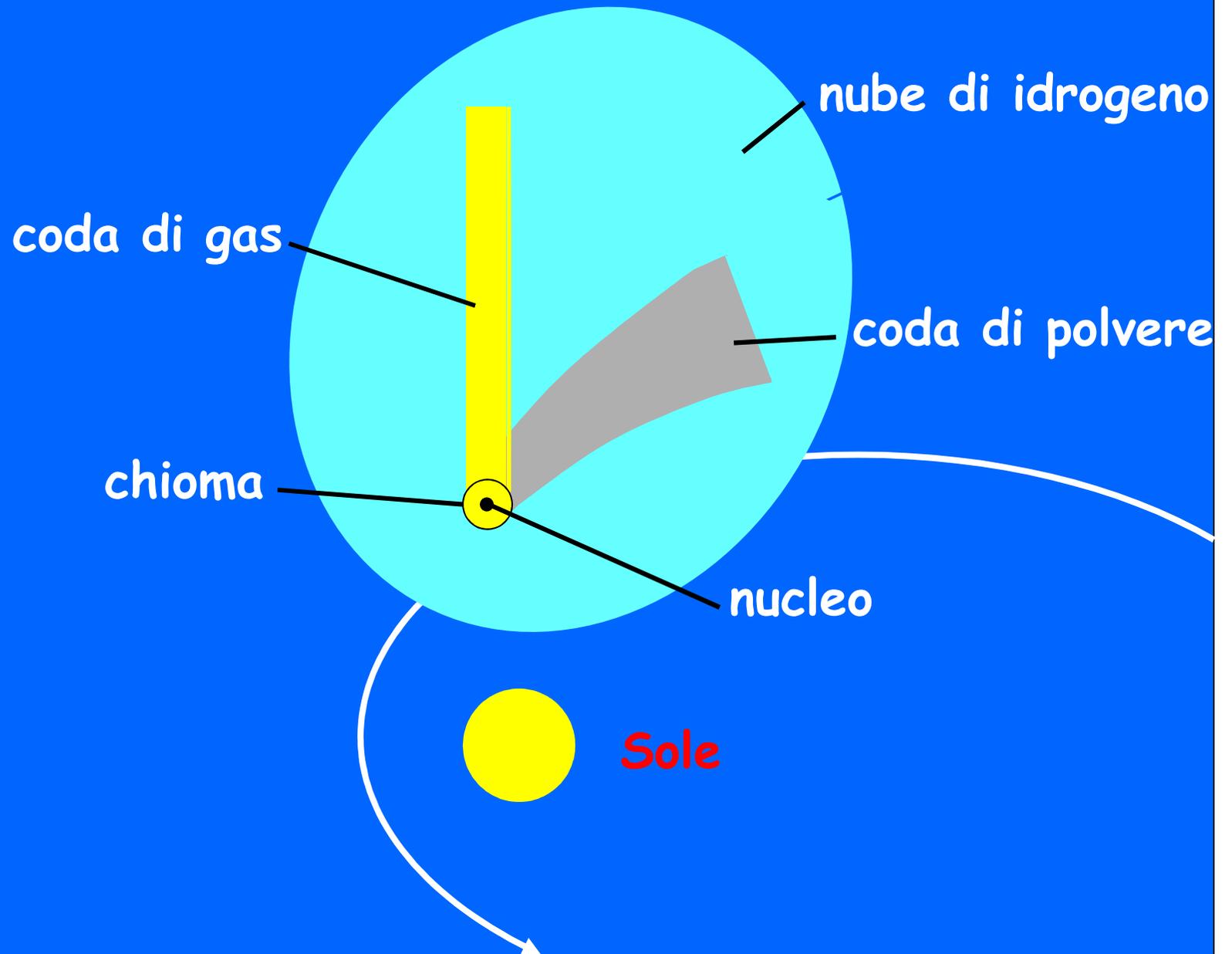
25 ottobre 2013

Prof. Manlio Bellesi

LE COMETE E LA VITA



Componenti di una cometa



DISTRIBUZIONE DELLE COMETE

In ordine crescente di distanza dal Sole troviamo:

- *La FASCIA DI EDGEWORTH-KUIPER (EK). Tra 30 e 50 UA (Unità Astronomiche. 1 UA = 149 600 000 Km). Appena oltre l'orbita di Nettuno. Plutone è il corpo più grande*
- *Gli OGGETTI TRANS-NETTUNIANI (TNO), il cui perielio è a 28-35 UA e l'afelio tra le 60 e le 1000 UA. Circa 10-30 miliardi di oggetti*
- *OGGETTI SPARSI DEL DISCO, con perielio oltre le 35 UA e afelio più lontano (esempi: Sedna, Eris). Probabile origine nella fascia EK, poi perturbati da Nettuno*
- *La NUBE DI OORT, fino agli estremi confini del Sistema Solare (circa 100 000 UA). Consistenza: $\approx 10^{12}$ oggetti.*

Si sa che le comete sono residui del materiale “di costruzione” dei pianeti esterni, di composizione molto simile a quella della nube proto-solare.

Negli ultimi anni, grazie ai dati forniti da diverse sonde (alcune missioni sono ancora in corso) si è scoperto che popolazioni di nuclei cometari simili alla fascia di Kuiper o alla nube di Oort esistono intorno a molte stelle vicine.

*L'abbondanza di materiale disponibile suggerisce l'idea che esso sia un ingrediente fondamentale dei blocchi di costruzione del materiale **PREBIOTICO** (cioè i composti chimici che sono alla base della nascita della vita vera e propria).*



IMPATTI DISTRUTTIVI

Le comete possono giungere sul nostro pianeta formando crateri da impatto oppure tsunami. L'entità del danno dipende dall'energia cinetica di arrivo ($\approx mv^2$).

Valori da 20 a 50 km/s sono tipici delle comete. Il nucleo può vaporizzare tutto o in parte, e i frammenti possono raggiungere zone anche molto lontane. Non va neppure trascurato l'inquinamento ad opera dei gas della coda.

Le comete più piccole possono essere frenate dall'atmosfera, ma si pensa che la loro influenza sia maggiore sulla ionosfera e sulla magnetosfera terrestre.

Le simulazioni sono ancora molto rozze perché la struttura dettagliata del nucleo e la sua resistenza dinamica rimangono in larga parte un mistero.



...E FORMAZIONE DELLA VITA

Le comete che arrivano in modo meno traumatico possono rilasciare nell'ambiente del pianeta di destinazione il loro carico di molecole e composti organici

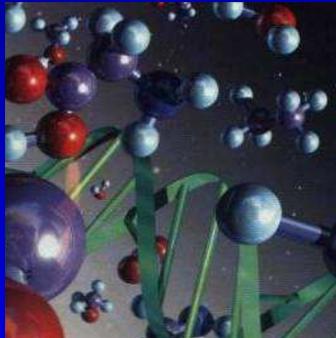


In ambienti favorevoli (come quello terrestre del passato) questo può portare alla formazione di molecole ancora più complesse, e forse alla vita vera e propria.

L'ipotesi della PANSPERMIA, nelle sue varie formulazioni (debole/forte), ha avuto alterna fortuna nel corso dei secoli, ma oggi acquista sempre maggiore credibilità, e su basi scientifiche (HOYLE, Wickramasinghe)

VITA = *Che cos'è?*

“Sistema chimico autosufficiente, soggetto a evoluzione darwiniana”



(NASA exobiology program)

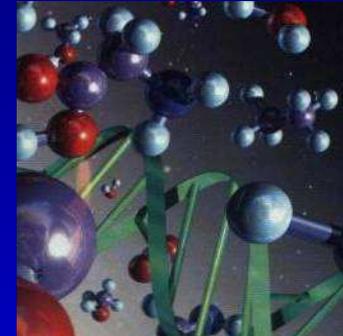
Possibile traduzione in italiano...

“Vita” è un qualsiasi sistema in grado di regularsi in modo autonomo attraverso reazioni chimiche, capace di riprodursi e di evolversi (e anche di morire)

CONTROESEMPIO : un mulo non può essere “vivo” !!

VITA : GLI INGREDIENTI

- ✘ *Molecole (di una certa complessità)*
- ✘ *Una sorgente di energia*
- ✘ *Un sistema di gestione delle reazioni chimiche ...*
- ✘ *... e un solvente per le molecole interagenti*



Tali requisiti implicano la presenza di:

ACQUA *(allo stato liquido)*

CARBONIO

PERCHÉ L'ACQUA ?

💧 *Serve un ambiente liquido per dissolvere le molecole e favorire le reazioni chimiche*

💧 *L'acqua è un solvente quasi universale ed è un composto molto comune nell'Universo*

💧 *Si trova allo stato liquido nell'intervallo "giusto" di temperature: non troppo...*

... BASSE da bloccare i processi chimici fondamentali

... ALTE da spezzare legami chimici tra le molecole organiche

PERCHÉ IL CARBONIO ?

◇ È tra gli elementi più abbondanti nell'Universo

(preceduto solo da: **H**, **He**, **O**, **Ne**, **N**)

◇ È il più versatile nella formazione di legami chimici

◇ Forma molecole grandi, con struttura articolata, adatte a svolgere funzioni complesse come quelle dei processi vitali

◇ I legami che forma si dissolvono facilmente nell'acqua

LA CHIMICA DELLA VITA



<i>TIPO DI COMPOSTO</i>	<i>FUNZIONI SVOLTE</i>	<i>Meteorite Murchison</i>
<i>acqua</i>	<i>solvente</i>	<i>sì</i>
<i>lipidi</i> (idrocarburi, acidi)	<i>membrane, riserve di energia</i>	<i>sì</i>
<i>zuccheri</i> (monosaccaridi)	<i>supporto, riserve di energia</i>	<i>sì</i>
<i>polisaccaridi</i> (zuccheri polimerizzati)	” ” ”	<i>no</i>
<i>amminoacidi</i>	<i>supporto, enzimi catalizzatori</i>	<i>sì</i>
<i>proteine</i> (amminoacidi polimerizzati)	” ” ”	<i>no</i>
<i>fosfati</i>	<i>informazione genetica</i>	<i>sì</i>
<i>basi azotate</i>	” ”	<i>sì</i>
<i>acidi nucleici</i> (zuccheri polimerizzati, fosfati, basi azotate)	” ”	<i>no</i>

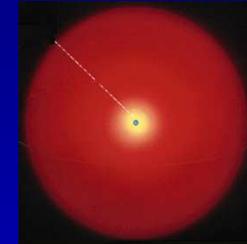
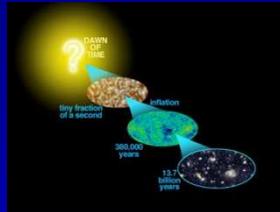
I MAGNIFICI 10

gli elementi più abbondanti (totale = 100 000 atomi)

<i>Universo</i>	<i>Terra</i>	<i>Crosta terrestre</i>	<i>Oceani</i>	<i>Corpo umano</i>
<i>H</i> (92714)	<i>O</i> (48880)	<i>O</i> (60425)	<i>H</i> (66200)	<i>H</i> (60563)
<i>He</i> (7185)	<i>Fe</i> (18870)	<i>Si</i> (20475)	<i>O</i> (33100)	<i>O</i> (25670)
<i>O</i> (50)	<i>Si</i> (14000)	<i>Al</i> (6251)	<i>Cl</i> (340)	<i>C</i> (10680)
<i>Ne</i> (20)	<i>Mg</i> (12500)	<i>H</i> (2882)	<i>Na</i> (290)	<i>N</i> (2440)
<i>N</i> (15)	<i>S</i> (11400)	<i>Na</i> (2155)	<i>Mg</i> (34)	<i>Ca</i> (230)
<i>C</i> (8)	<i>Ni</i> (1400)	<i>Ca</i> (1878)	<i>S</i> (17)	<i>P</i> (130)
<i>Si</i> (2,3)	<i>Al</i> (1300)	<i>Fe</i> (1858)	<i>Ca</i> (6)	<i>S</i> (130)
<i>Mg</i> (2,1)	<i>Na</i> (640)	<i>Mg</i> (1784)	<i>K</i> (6)	<i>Na</i> (75)
<i>Fe</i> (1,4)	<i>Ca</i> (460)	<i>K</i> (1374)	<i>C</i> (1,4)	<i>K</i> (37)
<i>S</i> (0,9)	<i>P</i> (140)	<i>Ti</i> (191)	<i>Si</i> -	<i>Cl</i> (33)

PERCHÉ QUESTA DISTRIBUZIONE DI ELEMENTI?

PER L'UNIVERSO:

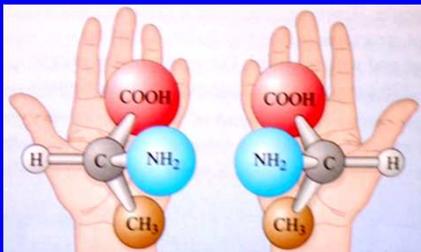


H, He COSMOLOGICI - per tutti gli altri, l'EVOLUZIONE STELLARE

PER LA TERRA: meccanismi di formazione del sistema solare



PER GLI OCEANI TERRESTRI: acqua + sali minerali disciolti



PER IL CORPO UMANO:
evoluzione da organismi acquatici
+ chimica basata sul carbonio



DOVE HA AVUTO ORIGINE LA VITA?

La risposta si trova da qualche parte fra due estremi ...

➤ ***SOLO sulla Terra***

➤ ***Nello spazio interstellare, ed è diffusa
OVUNQUE***

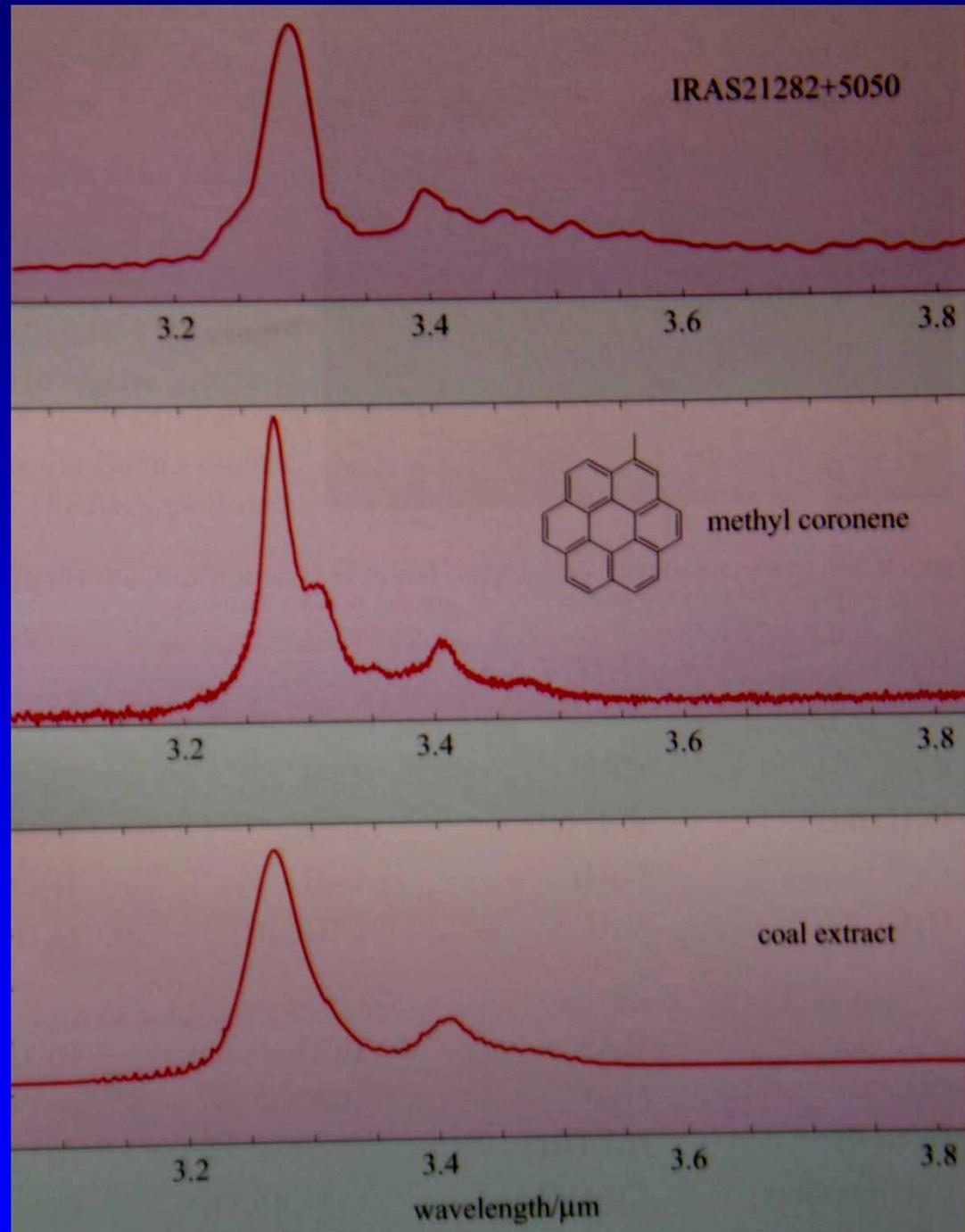


**MATERIA
ORGANICA
INTERSTELLARE**

*Spettro infrarosso
(parziale) di
assorbimento per
un involuppo
circumstellare (a),
confrontato con:*

*(b) un idrocarburo
aromatico*

*(c) un miscuglio di
composti organici*



MOLECOLE ORGANICHE nello spazio interstellare

*Sono assai comuni soprattutto nelle **NUBI MOLECOLARI GIGANTI**, dove si formano stelle e pianeti*

La più alta concentrazione di composti organici della Galassia (Terra inclusa) si trova proprio all'interno di queste nubi.

Le molecole rilevate sono di estremo interesse per la vita: acqua, vari acidi e composti organici complessi.

*La molecola più grande è l'**HC₁₁N***



Regione centrale di M42 (nebulosa di Orione) con le stelle del Trapezio in primo piano

LE MOLECOLE INTERSTELLARI - 1

7 atomi

CH₃CCH methyl acetylene CH₃CHO acetaldehyde

CH₃NH₂ methylamine CH₂CHCN vinyl cyanide

HC₅N cyanobutadiyne C₆H_{1,3,5}-hexatriynl

c-C₂H₄O ethylene oxide CH₂CHOH vinyl alcohol

8 atomi

CH₃COOH acetic acid CH₃OCHO methyl formate

CH₃C₃N cyanomethylacetylene CH₂(OH)CHO glycolaldehyde

H₂C₆ hexapentaenylidene HC₆H triacetylene

C₂H₆ ethane C₇H_{2,4,6}-heptatriynylidyne

CH₂CHCHO propenal

LE MOLECOLE INTERSTELLARI - 2

9 atomi

$(\text{CH}_3)_2\text{O}$ dimethyl ether $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ethanol

$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$ ethyl cyanide $\text{CH}_3\text{C}_4\text{H}$ methylbutadiyne

HC_7N cyanoheptatriyne $\text{C}_8\text{H}_{1,3,5,7}$ octatetrayne

10 atomi

$(\text{CH}_3)_2\text{CO}$ acetone $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ethylene glycol

$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CHO}$ propanal $\text{CH}_3\text{C}_5\text{N}$ methyl-
cyanodiacetylene

11 atomi

HC_9N cyanooctatetrayne

12 atomi

C_6H_6 benzene

13 atomi

HC_{11}N cyanodecapentayne

ABBONDANZE CHIMICHE NELLE COMETE

Sembra che il rapporto più basso $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ rilevato per la materia interstellare (la cui misura ha fatto uso principalmente di osservazioni effettuate nella banda delle radiofrequenze, ancora da convalidare pienamente) sia causato da un incremento dell'isotopo più pesante nelle nubi interstellari, causato dall'immissione di materiale stellare elaborato dal ciclo CNO

Gli altri valori delle abbondanze isotopiche (con l'eccezione del rapporto deuterio/idrogeno D/H, che merita un discorso a parte) sono più o meno allineati con i valori solari: in particolare, $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$, $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$.

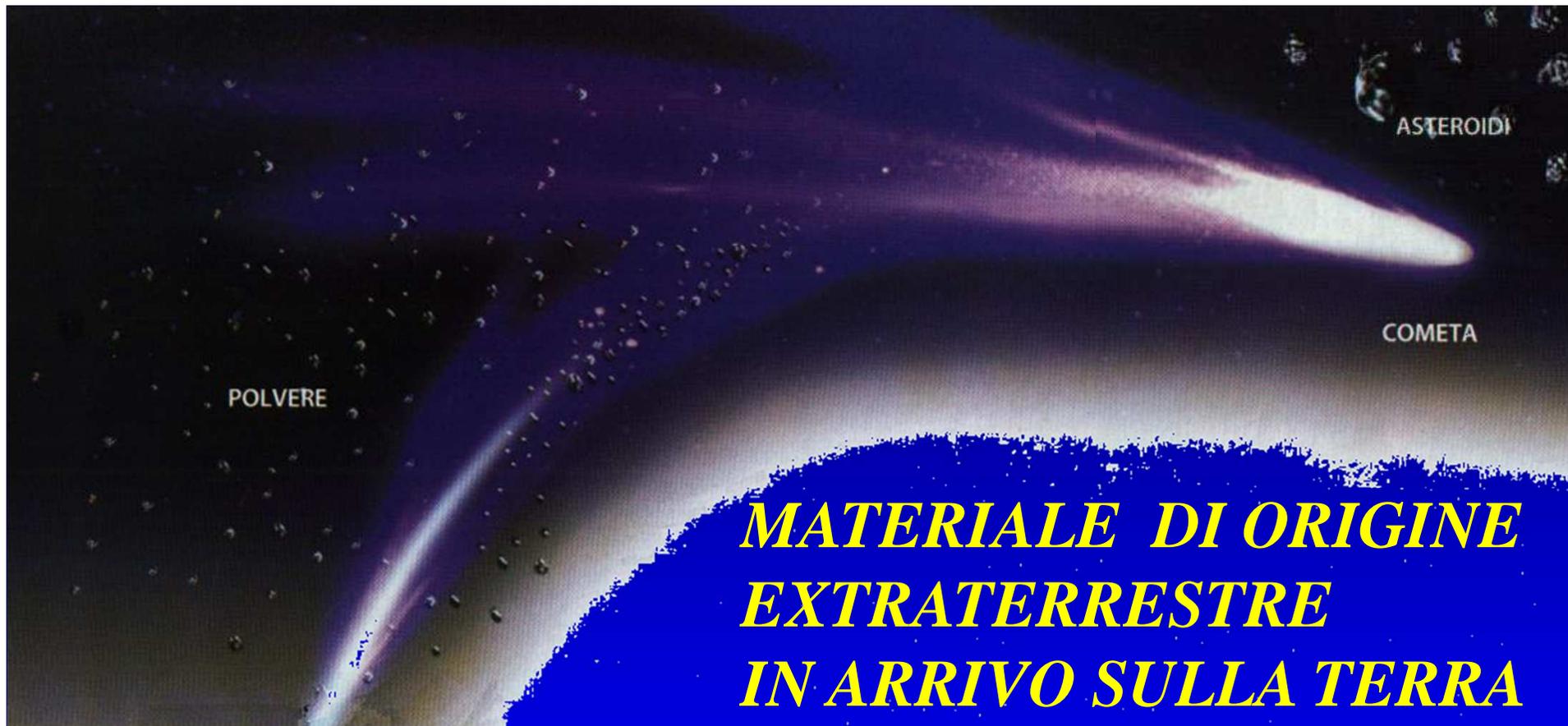
È praticamente impossibile elencare in poco spazio tutti composti organici individuati nelle comete. A parte i soliti CH_4 , CO , CO_2 ricordiamo:

CH , C_2H_2 , C_2H_6 , CN , HCN , HCNO , H_2CO , CH_3OH , CS , CS_2 , OCS .

Tra le varie specie non organiche citiamo:

*NH , NH_2 , NH_3 , NO , H_2S , SO_2 , Ca , Ni , Fe , Cr , Mn , Co ,
 Cu , S_2 , K , Na .*





<i>TIPOLOGIA</i>	<i>Masse tipiche (kg)</i>	<i>Tasso annuale di accrescimento (kg)</i>	<i>Percentuale in Carbonio</i>
<i>detriti cometari</i>	$10^{-17} - 10^{-1}$	16 000 000	10%
<i>meteore</i>	$10^{-2} - 10^5$	58 000	1,3%
<i>meteoriti e asteroidi</i>	$10^5 - 10^{15}$	62 000 000	4,2%

PERDITE DI MASSA DELLE COMETE

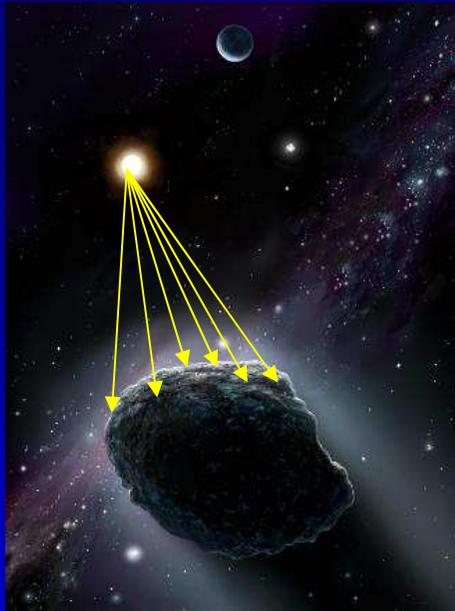
Manca ancora una statistica attendibile e siamo quindi al livello di ipotesi, per quanto attendibili.

Alla distanza della Terra (1 UA = 150 milioni di km) una cometa “tipica” perde 10-100 tonnellate al secondo; per un intero passaggio si può arrivare a 100-1000 miliardi di tonnellate, quasi tutte emesse vicino al perielio...

...che corrisponde a circa l' 1% dell'intera massa del nucleo. Le comete hanno dunque vita molto breve su scala astronomica: da 10000 anni per le comete a corto periodo fino a qualche milione di anni per le più eccentriche.

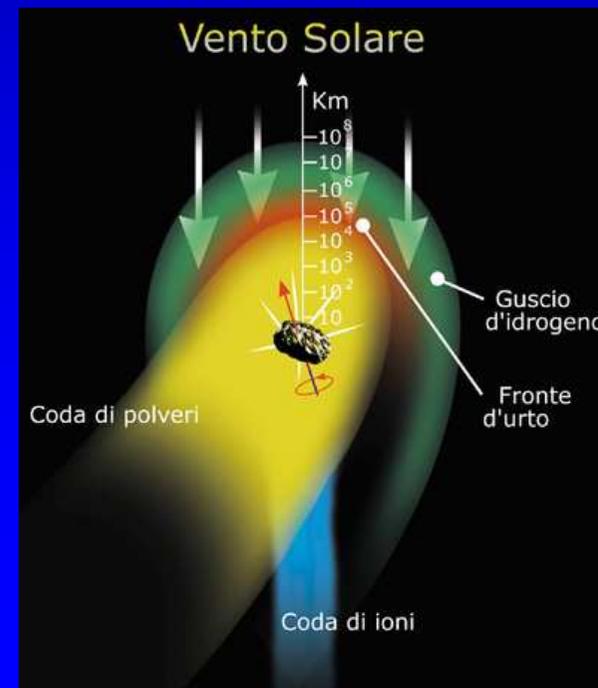
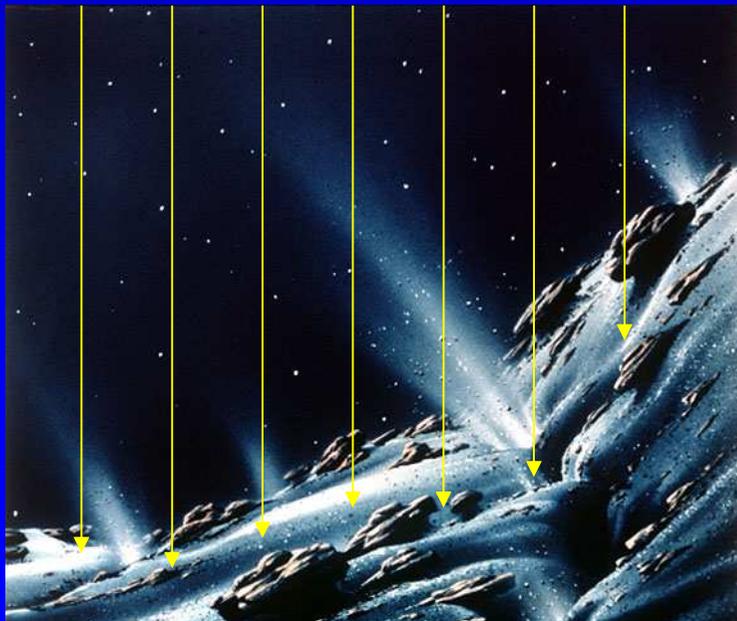
Le emissioni del nucleo cessano rapidamente quando la cometa si allontana, in particolare alla distanza di circa 3 UA, che è la soglia di congelamento dell'H₂O: esistono però eccezioni di comete attive a distanze maggiori.

Se ne deduce che il componente principale del nucleo è ghiaccio d'acqua (~80%). Sono presenti anche altri “ghiacci” come CO, CO₂, CH₄, inglobati nella struttura a reticolo dei cristalli di ghiaccio d'acqua (CLATRATI) o sotto forma di composti idrati (CH₄·6H₂O, CO₂·6H₂O)



L'azione del Sole fa evaporare la crosta del nucleo, da cui fuoriescono gas e polveri. L'emissione riguarda solo alcune zone: ampie regioni del nucleo restano inerti

*Il materiale espulso forma progressivamente le altre parti della cometa: **code** (una di gas ionizzati, una di polveri), **chioma**, **corona***



Il meccanismo di emissione del materiale dal nucleo è assai complesso: la radiazione solare incidente viene in parte riflessa e in parte assorbita

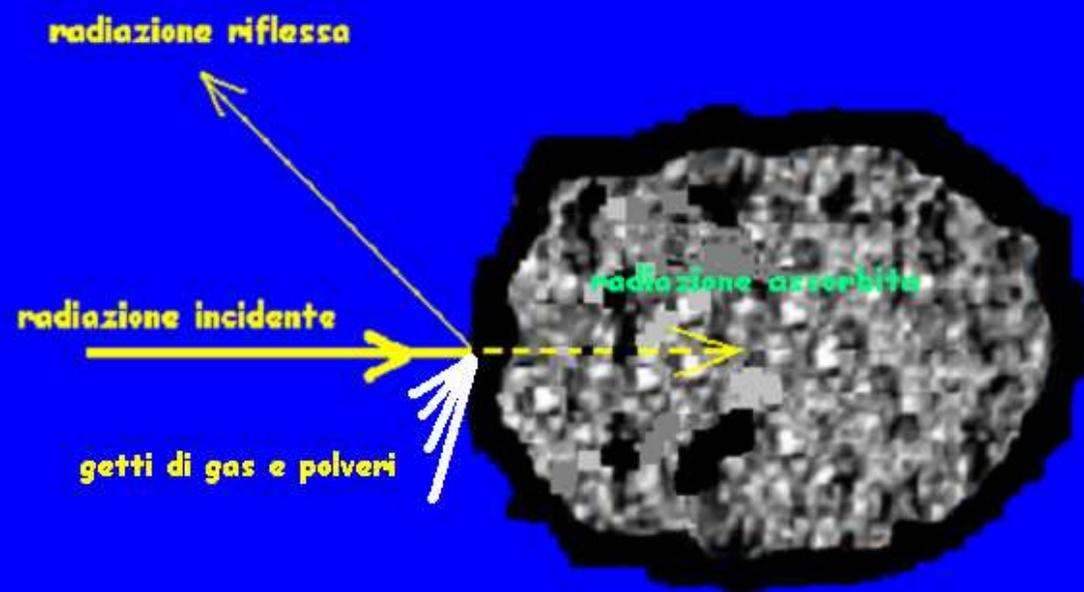
*La riflessione dipende dall' **albedo** della superficie: l'assorbimento dipende dall'angolo di incidenza della radiazione e dalla **temperatura T** del nucleo*

Una parte di quanto assorbito viene poi riemesso, a seconda della temperatura e delle proprietà strutturali del nucleo

L'energia assorbita viene utilizzata per la sublimazione della crosta, che lascia fuoriuscire gas e polveri dall'interno

La quantità di gas e polveri emessa è assai variabile e comunque massima vicino al perielio

*Valori per la cometa Arend-Roland (vicino al perielio):
gas 75 tonnellate/sec,
polveri 60 tonnellate/sec*



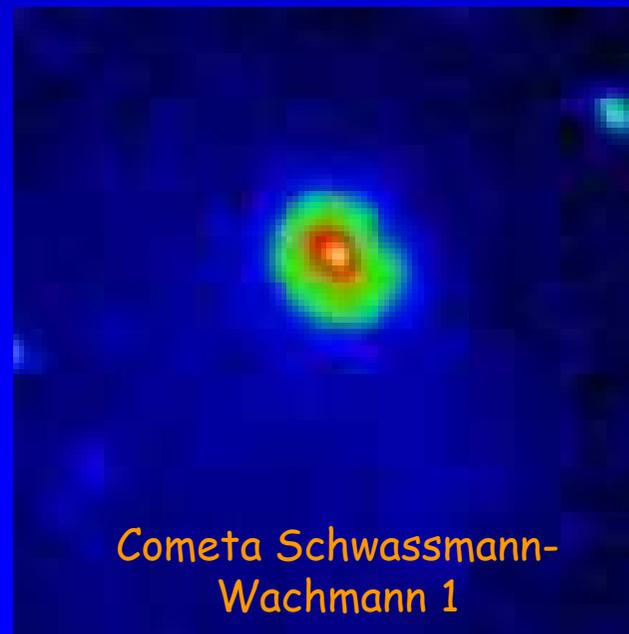
GLI “OUTBURSTS” DEL NUCLEO

*Si osservano spesso rapidi incrementi nell'emissione, detti **OUTBURSTS**, che possono accrescere la luminosità anche di 100 volte. Dopo il parossismo si forma una chioma temporanea che svanisce nel giro di poche settimane.*

Una possibile spiegazione degli outbursts è che essi dipendano da reazioni chimiche esotermiche, che coinvolgono l'azione di radicali liberi su sacche di gas imprigionate sotto la crosta del nucleo: l'energia liberata potrebbe aumentare la pressione fino al verificarsi delle esplosioni. Per esempio, la transizione di fase dal ghiaccio amorfo a quello cristallino ($a \sim 140\text{K}$) è un processo che fornisce 24 calorie per ogni grammo.

Un'altra possibile sorgente di energia è la rapida sublimazione di CO_2 o CO solidi imprigionati nel reticolo cristallino del ghiaccio d'acqua.

Può darsi che processi di tipo diverso siano all'opera su diverse comete, o anche sulla stessa cometa in tempi diversi



COMPOSIZIONE CHIMICA DEL NUCLEO

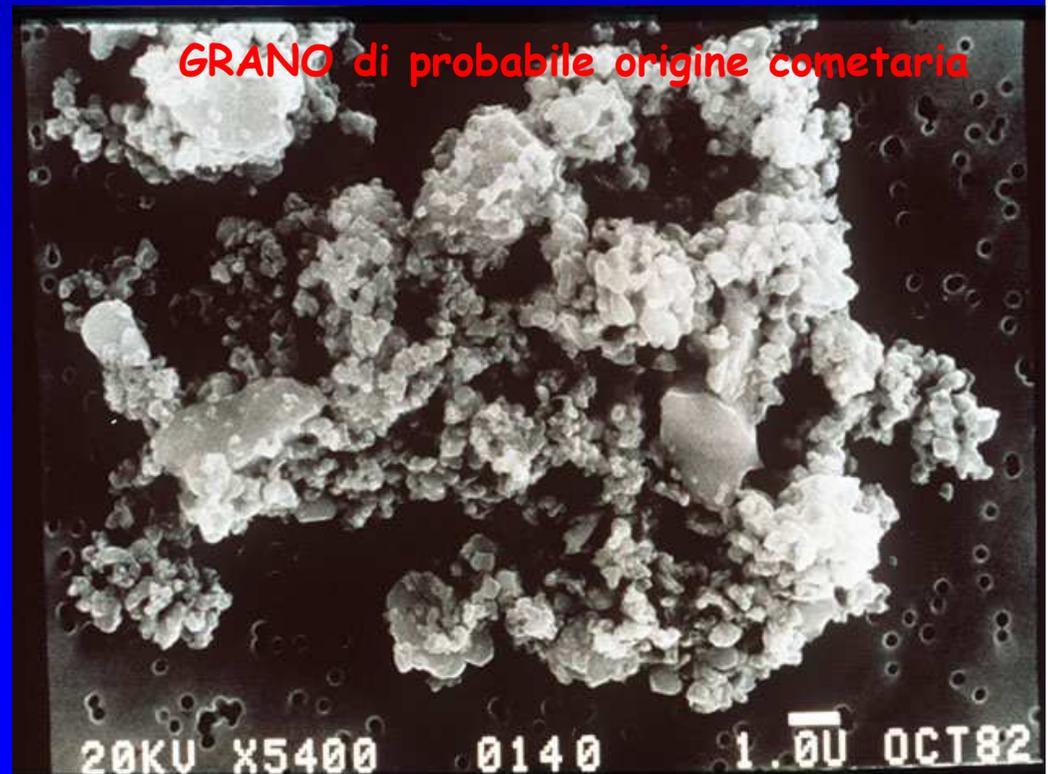
Lo studio si basa soprattutto sull'analisi spettroscopica della chioma. Le abbondanze chimiche, almeno per la cometa di Halley, risultano molto simili a quelle solari, con l'eccezione dell'idrogeno (meno del Sole) e del carbonio, che sembra in gran parte segregato sotto forma di composti organici complessi (CHON).

Particolare interesse riveste lo studio delle abbondanze isotopiche.

Il rapporto $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ SEMBRA più basso del corrispondente valore per il mezzo interstellare. Ciò suggerisce che l'equazione

“materiale cometario = nebulosa protosolare = materiale interstellare”

debba essere guardata con notevole scetticismo. Occorrono comunque ancora ulteriori dati.



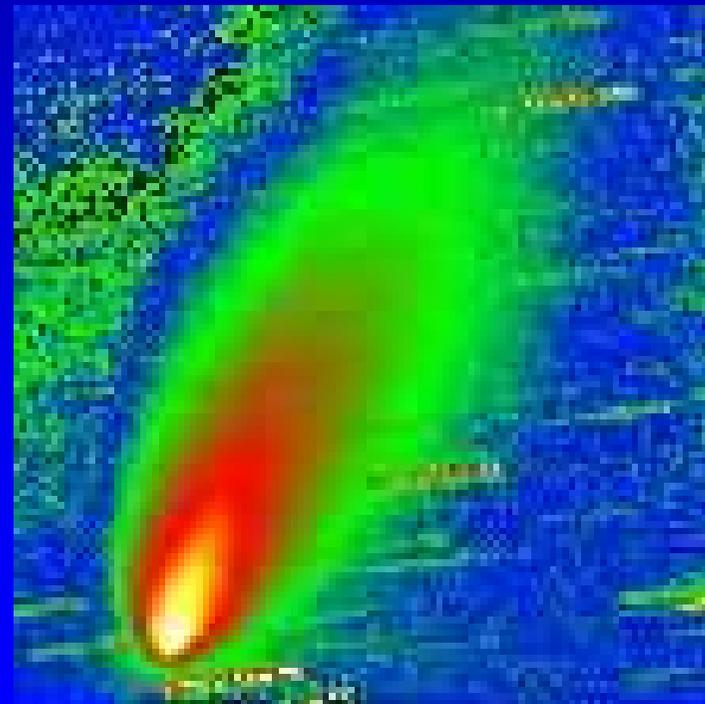
IL RAPPORTO D/H (1)

Vale la pena soffermarsi su un aspetto di estremo interesse, che è imperniato sulla misura del rapporto isotopico D/H tra deuterio e idrogeno.

Sintetizzato in modeste quantità all'inizio della storia dell'Universo, il deuterio mostra una distribuzione di abbondanza BIMODALE tra i corpi del Sistema Solare.

Per esempio, il rapporto D/H delle (poche) comete analizzate finora è circa 10 volte quello "primitivo" stimato per la nebulosa protosolare.

L'arricchimento sembra dipendere dalla maggiore efficacia di alcune reazioni ioniche e molecolari generatrici di deuterio nell'ambiente del nucleo (bassa temperatura + alta densità).



Cometa LINEAR (1999)

IL RAPPORTO D/H (2)

Continuando nei confronti ci si accorge che il rapporto D/H è molto più basso per le comete che per Giove e Saturno (anche in questo simili al Sole).

Ciò può suggerire una domanda importante: che risultati dà il confronto tra il D/H dei nuclei cometari e quello dell'acqua degli oceani terrestri?

L'importanza della questione nasce da un problema non ancora risolto dai modelli di formazione del Sistema Solare.

La teoria “canonica” prevede che il disco che ha formato i pianeti avesse distribuzione di temperature decrescenti partendo dal centro (protosole) e andando verso l'esterno.



IL RAPPORTO D/H (3)

Nella zona dove si è formata la Terra la temperatura doveva aggirarsi sui 600 Kelvin (~330 C), un valore che non poteva in alcun caso permettere la condensazione del vapore acqueo.

Ma allora, da dove viene l'acqua degli oceani della Terra?

Potrebbe darsi che molti impatti cometari abbiano arricchito di acqua un pianeta in precedenza asciutto: in tal caso il rapporto D/H dovrebbe essere simile.



IL RAPPORTO D/H (4)

I risultati (parziali) finora ottenuti mostrano una notevole variabilità e l'esistenza di DIVERSE popolazioni di comete.

In particolare, una specifica famiglia di comete possiede un rapporto D/H molto simile a quello degli oceani della Terra.

Sembra dunque che solo alcuni oggetti della fascia cometaria abbiano contribuito all'arricchimento di acqua del nostro pianeta.

**QUESTI DATI ATTENDONO
COMUNQUE ULTERIORI
CONFERME!**



Cometa Ikeya-Seki (1965)



FINE

