



Laurea triennale in Fisica  
a.a. 2011 - 2012

# CORSO DI ASTRONOMIA

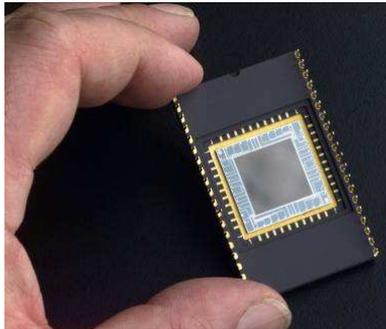
Prof. Angelo Angeletti

## I RILEVATORI CCD

## Introduzione

Verso la fine dello scorso millennio si è avuto uno eccezionale sviluppo dell'elettronica e ciò ha portato ad un forte abbattimento dei costi e alla diffusione di dispositivi sempre più potenti.

Tra questi ci sono i sensori CDD.



## Introduzione

CDD = Charge-Coupled Device, in italiano *dispositivo a carica accoppiata*

Consiste in un circuito integrato formato da una griglia di elementi semiconduttori (pixel) in grado di accumulare una carica elettrica proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica che li colpisce.

Questi elementi sono accoppiati in modo che ognuno di essi, sollecitato da un impulso elettrico, possa trasferire la propria carica ad un altro elemento adiacente.

Inviando al dispositivo una sequenza temporizzata d'impulsi, si ottiene in uscita un segnale elettrico grazie al quale è possibile ricostruire la matrice dei pixel che compongono l'immagine proiettata sulla superficie del CCD stesso.

## Introduzione

Il CCD fu ideato ai Bell Laboratories da Willard S. Boyle e George E. Smith nel 1969.

L'anno seguente venne realizzato un prototipo funzionante. Per questa scoperta Boyle e Smith hanno ricevuto il Premio Nobel per la fisica nel 2009.

Nel 1975 fu realizzata la prima videocamera con CCD con una qualità dell'immagine sufficiente per le riprese televisive.

Oggi il CCD è il cuore delle moderne macchine fotografiche e videocamere digitali, ma anche dei fax e degli scanner.

La ricerca attuale è volta anche ad ottimizzare la forma del singolo pixel e la sua posizione.

## Introduzione

Sin dalla sua nascita il CCD ha avuto largo uso in campo astronomico, dimostrando subito le enormi potenzialità rispetto alla fotografia tradizionale.

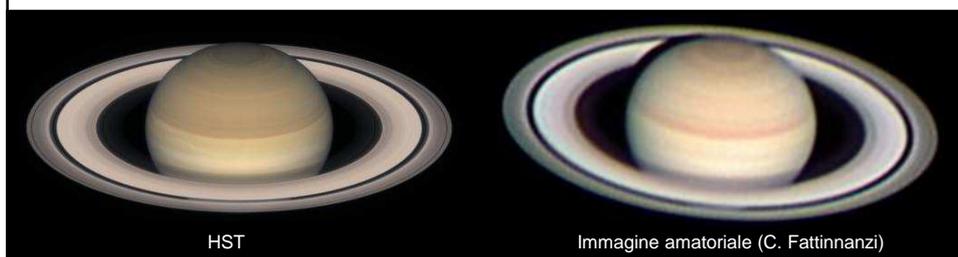
L'abbattimento dei costi, inizialmente molto alti, ha permesso negli ultimi anni la diffusione dei CCD anche in campo amatoriale.

Il CCD per uso astronomico, deve avere, causa le lunghe esposizioni, il minimo rumore di fondo e quindi deve avere una elettronica progettata appositamente per tale scopo e la possibilità di potersi interfacciare ad un dispositivo di raffreddamento (normalmente è una cella di Peltier), che consente di mantenere il dispositivo ad una temperatura molto bassa.

## Introduzione

Negli ultimi anni si è venuta ad affermare un'altra tecnica di utilizzo del CCD in astronomia per oggetti non troppo deboli, come la Luna ed i pianeti. Questa tecnica prevede di eseguire una lunga serie di riprese del soggetto, e successivamente, con appositi software, sommare tali riprese in modo che il rumore di fondo vada a scomparire (in quanto casuale) e venga esaltata l'immagine del corpo celeste ripreso.

Questa tecnica ha di fatto permesso ai modesti strumenti amatoriali di ottenere riprese di grande qualità, confrontabili, qualche volta, con quelle prodotte dagli strumenti professionali.



HST

Immagine amatoriale (C. Fattinanzi)

## Come è fatto un ccd

Il CCD è un dispositivo caratterizzato da una matrice di fotodiodi di forma quadrata o rettangolare, disposte a scacchiera sulla superficie di un cristallo di silicio, opportunamente trattato e integrato in un microchip.

Tali fotodiodi sono molto sensibili alla luce, vengono chiamati *pixel* (picture elements) e sono ricavati direttamente nel silicio.

Tralasciamo la tecnologia e il modo di funzionare di un moderno CCD.

In questa sede ci limiteremo ad illustrarne le caratteristiche e le proprietà salienti al solo scopo di comprenderne l'uso corretto nelle riprese fatte con strumenti dotati di questi dispositivi.

## Come funziona un ccd

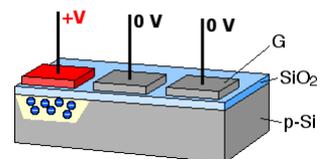
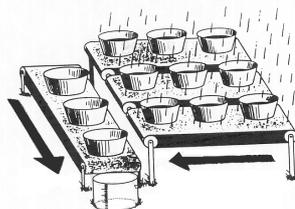
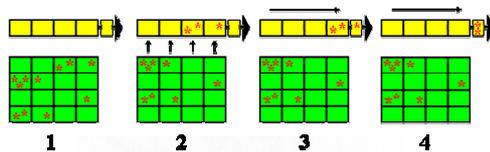
Il ccd va collegato ad un telescopio o ad un obiettivo fotografico.

I fotoni provenienti dall'oggetto inquadrato, vengono catturati dalla superficie del sensore e ciascun pixel raccoglierà una quantità proporzionale alla durata dell'esposizione e all'intensità del flusso luminoso incidente; tali fotoni producono elettroni che vengono immagazzinati in una buca di potenziale (*well*).

Durante l'esposizione (processo di integrazione delle cariche) andrà formandosi sulla superficie del sensore una precisa mappa elettronica dell'immagine dell'oggetto astronomico.

## Come funziona un ccd

Al termine dell'esposizione l'immagine astronomica "impressa" nel substrato del sensore sarà poi trasmessa sotto forma di segnale elettrico ad un circuito integrato, che ne effettuerà il *campionamento*, ovvero la digitalizzazione, la quale determina mediante un processo fondamentale, la trasformazione del segnale dell'immagine in una ordinata sequenza numerica di bit. L'immagine digitale così ottenuta che prende il nome di *light frame* sarà quindi trasferita in un computer e visualizzata sul monitor.



## Campionamento

L'immagine che il telescopio produce sul piano focale è continua, mentre il sensore è costituito da un numero finito di pixel separati tra di loro e quindi si ha una perdita di informazione.

Il criterio di campionamento enunciato da Nyquist asserisce che: se viene effettuato un numero sufficiente di campionamenti, è possibile ricostruire fedelmente tutta l'informazione contenuta in un segnale continuo ma registrato in forma discreta.

Per ottenere questo è necessario che i campionamenti non siano più grandi della metà del più piccolo dettaglio visibile.

Nel caso di CCD il criterio stabilisce che il più piccolo dettaglio che il telescopio è in grado di mostrare (= al potere risolutivo) deve essere registrato in almeno due pixel.

Una formula per calcolare la focale ottimale è data da:

$$F (\text{mm}) = p (\mu\text{m}) \times D (\text{mm}) \times 3,438$$

## Campionamento

Se la focale del telescopio è inferiore a quella di campionamento, si dice che l'immagine è sottocampionata, cioè non viene sfruttata al massimo il potere risolutivo del telescopio.

Ma questo dipende molto dal seeing.

Le stelle vengono quadrate (*pixelate*)

Se la focale impiegata è maggiore di quella ottimale, le immagini saranno sovracampionate.

In genere non c'è motivo per sovracampionare se non in casi di particolari tipi di ccd o in caso di ottimi seeing e altrettanto ottime ottiche.

## Come funziona un ccd

I CCD maggiormente utilizzati nelle camere CCD sono caratterizzati da una schiera ordinata di fotoelementi disposti per righe e colonne a formare una matrice di  $m \times n$  pixel, organizzata in maniera diversa in funzione dello schema di trasferimento di carica adottato:

Interline Transfer,

Frame Transfer,

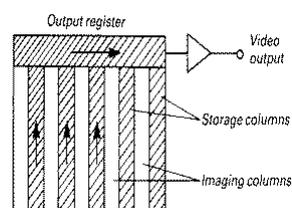
Full Frame Transfer.

## Come funziona un ccd

### Interline Transfer

Sono caratterizzati dalla particolare disposizione verticale dei registri di shift delle cariche elettriche accumulate durante il processo di integrazione. Ad ogni colonna di elementi fotosensibili è associata una colonna adiacente di elementi che godono in generale delle stesse proprietà.

Alla fine del processo di integrazione, le cariche accumulate negli elementi fotosensibili sono trasferite nei registri verticali per poi essere trasferite, riga per riga, nel registro orizzontale di lettura del segnale di uscita del CCD.



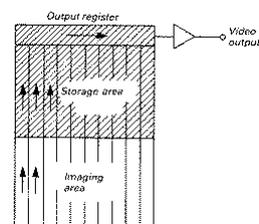
Lo shift delle cariche dai pixel ai registri verticali di lettura dura poco più di un milionesimo di secondo. Le camere dotate di CCD Interline Transfer non hanno pertanto bisogno di otturatori elettromeccanici in quanto di per sé dotate di velocissimi otturatori elettronici.

## Come è fatto un ccd

### Frame Transfer

I CCD Frame Transfer presentano due aree strutturalmente identiche sulla superficie del sensore. Una, sensibile alla luce dove si accumulano le cariche durante la posa; l'altra, schermata con una lamina metallica, è la memoria dove al termine del processo di integrazione sarà parcheggiata l'immagine dopo un trasferimento dall'area sensibile, di brevissima durata, generalmente 1-2 millesimi di secondo.

Per questa ragione, anche se l'area attiva del sensore, al termine della posa, continua a rimanere esposta al flusso dei fotoni, l'immagine salvata nella memoria schermata adiacente sarà letta e trasferita intatta nel computer. Le camere dotate di CCD Frame Transfer non hanno pertanto bisogno di essere equipaggiate con otturatori elettromeccanici.



## Come è fatto un ccd

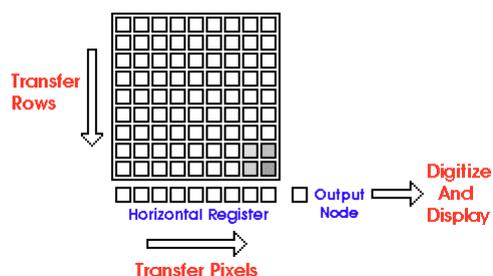
### Full Frame Transfer

I CCD Full Frame Transfer hanno solamente l'area attiva.

La lettura dell'immagine, al termine dell'esposizione, avviene mediante trasferimento progressivo verticale del contenuto delle righe della matrice del sensore dalla prima riga all'ultima, dalla quale il segnale è prelevato e campionato numericamente.

Questo processo dura in genere alcuni secondi. Se l'area del sensore non è protetta dal flusso incidente dei fotoni, l'immagine finale sarà affetta da smearing, ossia da aloni provocato dal continuo assorbimento di energia luminosa.

Tale inconveniente viene eliminato equipaggiando queste camere CCD con otturatori elettromeccanici in grado di schermare opportunamente l'area attiva del sensore durante il processo di lettura e campionamento dell'immagine.



## Come è fatto un ccd

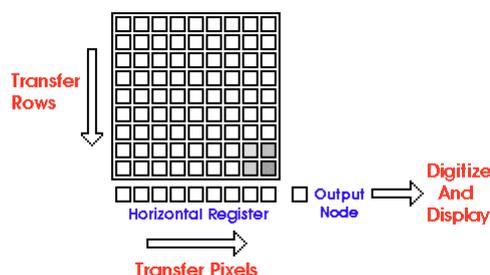
### Full Frame Transfer

I CCD Full Frame Transfer hanno solamente l'area attiva.

La lettura dell'immagine, al termine dell'esposizione, avviene mediante trasferimento progressivo verticale del contenuto delle righe della matrice del sensore dalla prima riga all'ultima, dalla quale il segnale è prelevato e campionato numericamente.

Questo processo dura in genere alcuni secondi. Se l'area del sensore non è protetta dal flusso incidente dei fotoni, l'immagine finale sarà affetta da smearing, ossia da un alone provocato dal continuo assorbimento di energia luminosa.

Tale inconveniente viene eliminato equipaggiando queste camere CCD con otturatori elettromeccanici in grado di schermare opportunamente l'area attiva del sensore durante il processo di lettura e campionamento dell'immagine.



## Caratteristiche di un ccd

La performance di CCD è tra i fattori più importanti di valutazione di una camera CCD.

Essa è data da un insieme di elementi di natura diversa che caratterizzano il modo di funzionare del CCD.

Gli elementi più importanti sono:

- la **sensibilità**
- l'**efficienza quantica** (Quantum Efficiency = QE) e la **sensibilità spettrale**
- la **Full Well Capacity** (FWC)
- il **guadagno**
- la **linearità**
- la **dark current**

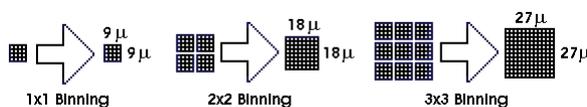
## La sensibilità

La maggior parte dei CCD hanno la capacità di leggere più pixel sia in orizzontale sia in verticale in una singola volta ovvero di leggere un "pixel super".

Questo è indicato come binning. Binning di 1x1 significa che viene letto un singolo pixel alla volta.

Binning 2x2 significa che viene lette una superficie di 4 pixel adiacenti, combinati in un pixel più grande, e così via.

In questo caso la sensibilità alla luce è stata aumentata di 4 volte, ma la risoluzione dell'immagine è stata ridotta alla metà.



## Efficienza quantica

Non tutti i fotoni incidenti sulla superficie di un pixel producono elettroni.

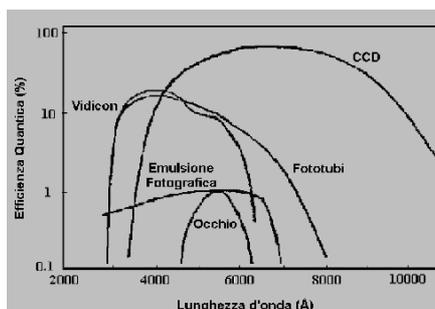
$$QE = \frac{\text{numero di elettroni prodotti}}{\text{numero di fotoni incidenti}}$$

Tale rapporto, per secondo e per singolo pixel, è un numero inferiore all'unità ed è solitamente espresso in percentuale ed indica la sensibilità teorica di un CCD.

La reale sensibilità è inferiore in funzione della qualità della camera CCD.

La sensibilità tipica di una camera CCD non professionale varia tra lo 0 e il 60%, in base alla lunghezza d'onda dei fotoni incidenti.

Misurando l'efficienza quantica per ogni valore di lunghezza d'onda in cui dividiamo lo spettro della luce incidente, possiamo costruire la curva di sensibilità spettrale di ogni sensore.



## Sensibilità spettrale

La curva di sensibilità spettrale è uno dei dati importanti della patente di un sensore.

Supponiamo di voler usare un CCD per riprendere un oggetto astronomico che emette radiazione luminosa nella banda del blu o del violetto: dobbiamo conoscerne la sensibilità in quella banda, ossia l'efficienza quantica relativa alla lunghezza d'onda del blu o del violetto.

Un valore troppo basso della sensibilità spettrale ci costringerà ad effettuare lunghe esposizioni, tipiche della fotografia tradizionale, che impiega emulsioni di sensibilità equivalente non superiore al 4%, nel migliore dei casi.

Un buon CCD deve possedere una curva spettrale abbastanza efficiente per lunghezze d'onda comprese tra i 400 e i 700 nm, con valori limite di efficienza quantica non inferiori al 50% del valore di picco. I CCD che hanno curve spettrali con picco a 530-550 nm danno generalmente ottimi risultati. Altro fattore importante è l'uniformità dell'efficienza quantica su tutta la superficie del sensore. Variazioni di sensibilità tra pixel e pixel, a parità di lunghezza d'onda, sono causa di rumore e riducono la qualità delle immagini.

## Full Well Capacity

La capacità di accumulo delle cariche di un pixel non è illimitata.

Il valore massimo di fotoelettroni che un CCD può accumulare in un singolo pixel è una caratteristica propria di ogni sensore e viene detta Full Well Capacity.

Grandi valori di capacità elettronica di un pixel esprimono un maggior range dinamico del sensore a parità di rumore complessivo presente nel segnale.

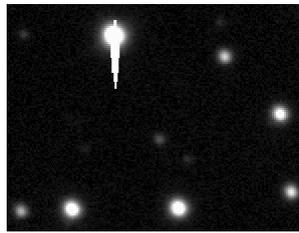
Maggiore è la capacità elettronica per pixel di un CCD, minore è l'impatto del rumore fotonico con conseguente beneficio per le immagini planetarie.

I vantaggi di una maggiore capacità elettronica sono ancor più evidenti ove si pensi che occorrerà un maggior tempo di integrazione per saturare i pixel esposti alla luce di maggior intensità incidente.

## Full Well Capacity

Una volta raggiunta la saturazione, i fotoelettroni in eccesso si spargeranno sui pixel adiacenti (preferibilmente lungo le colonne) dando luogo al noto fenomeno del **blooming**.

Molti CCD sono oggi dotati di **anti-blooming**, un dispositivo in grado di effettuare il drenaggio automatico delle cariche in eccesso, impedendo a quest'ultime di raggiungere i pixel adiacenti.



## Il guadagno

L'elettronica del CCD restituisce un numero **DN** (= **data number**), si definisce guadagno il rapporto

$$\text{guadagno} = \frac{\text{numero di elettroni prodotti}}{\text{DN}}$$

Il DN si misura in ADU (**Analog-to-Digital Unit**)

Il CCD che utilizzeremo ha  $2.2e^-/\text{ADU}$

## Linearità

Il CCD è un rivelatore lineare (la linearità è di solito migliore dello 0.01%).

In pratica ciò significa che il numero di elettroni generati in un pixel è direttamente proporzionale alla quantità di luce incidente.

Ne derivano numerosi vantaggi rispetto alla fotografia tradizionale:

- La soglia minima di rivelazione è data dal rumore medio complessivo presente nell'immagine. Se il rumore è molto basso il CCD sarà in grado di rivelare dettagli estremamente deboli.
- Il CCD manterrà la stessa sensibilità ed efficienza quantica indipendentemente dalla durata dell'esposizione.
- La linearità consente di effettuare misure dirette di luminosità degli oggetti (fotometria di precisione).

## Dark current

I sensori CCD hanno la proprietà di produrre e accumulare spontaneamente elettroni, anche quando la loro superficie è schermata dalla luce incidente.

A riposo il sensore continua a produrre elettroni fino a saturare completamente i livelli di capacità dei pixel. È pertanto necessario azzerare le cariche prodotte spontaneamente dal sensore prima di iniziare una nuova esposizione.

La produzione spontanea di elettroni continua però anche durante l'esposizione. Ciò significa che nei pixel si accumuleranno sia fotoelettroni prodotti dalla luce incidente sia elettroni prodotti spontaneamente.

È impossibile distinguere gli uni dagli altri.

Gli elettroni prodotti spontaneamente hanno caratteristiche tali da permettere di eliminare quasi interamente il loro effetto negativo.

## Dark current

Il fenomeno della Dark Current è perfettamente riproducibile.

In identiche condizioni di temperatura e di durata di una esposizione, un dato sensore genera sempre lo stesso numero di elettroni a meno di un fattore di dispersione statistica (Rumore Termico), variabile a seconda del tipo di sensore impiegato.

La quantità di cariche elettriche generate è quasi proporzionale al tempo di integrazione.

La Dark Current prodotta dipende fortemente dalla temperatura del sensore: la sua intensità diminuisce in genere di un fattore 2 per ogni 6°C in meno di temperatura del sensore.

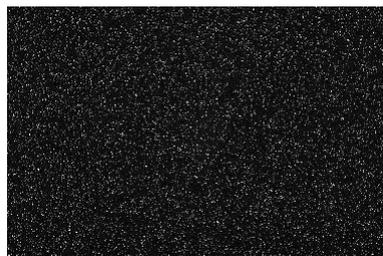
Per questa ragione essa viene anche chiamata Corrente Termica (***Thermal Current***) e le cariche prodotte si chiamano Cariche Termiche (***Thermal Charges***).

## Dark current

Possiamo quindi eliminare questo problema se operiamo in un modo appropriato.

Ecco i passi:

- Abbassare la temperatura di esercizio del sensore (i CCD sono normalmente raffreddati termoelettricamente).
- Fare un'esposizione (***Dark Frame***), con il CCD schermato dalla luce, di durata uguale a quella usata per la normale ripresa (Light Frame), avendo cura che la temperatura del sensore sia la stessa.
- Sottrarre il Dark Frame dal Light Frame.



## Rumore termico

La procedura non è completa e non è sufficiente per ottenere un'immagine astronomica esente dal Segnale Termico accumulatosi nei pixel durante l'integrazione.

Abbiano eliminato il Segnale Termico ma non gli effetti del Rumore Termico associato alla dispersione probabilistica delle cariche termiche, un valore pari alla radice quadrata del numero degli elettroni termici prodotti.

Il Rumore Termico non può essere eliminato.

Il suo effetto principale è quello di rendere impossibile la rivelazione di dettagli astronomici deboli la cui intensità, espressa in numero di fotoelettroni, risulti inferiore al valore del Rumore Termico presente nell'immagine.

Oggi alcuni ccd hanno una produzione di cariche termiche piuttosto bassa anche a temperatura ambiente. Questi CCD, raffreddati a  $-30^{\circ}\text{C}$ , producono meno di un elettrone al secondo, poco più di 200 elettroni in una posa di 5 minuti

Ciò da luogo a un Rumore Termico di meno di 15 elettroni, più o meno pari al Rumore di Lettura (**Readout Noise**) dovuto all'elettronica della camera CCD, valore piuttosto basso se confrontato con quello esibito da alcuni CCD professionali tuttora in uso.

## Rumore termico

La procedura non è completa e non è sufficiente per ottenere un'immagine astronomica esente dal Segnale Termico accumulatosi nei pixel durante l'integrazione.

Abbiano eliminato il Segnale Termico ma non gli effetti del Rumore Termico associato alla dispersione probabilistica delle cariche termiche, un valore pari alla radice quadrata del numero degli elettroni termici prodotti.

Il Rumore Termico non può essere eliminato.

Il suo effetto principale è quello di rendere impossibile la rivelazione di dettagli astronomici deboli la cui intensità, espressa in numero di fotoelettroni, risulti inferiore al valore del Rumore Termico presente nell'immagine.

Oggi alcuni ccd hanno una produzione di cariche termiche piuttosto bassa anche a temperatura ambiente. Questi CCD, raffreddati a  $-30^{\circ}\text{C}$ , producono meno di un elettrone al secondo, poco più di 200 elettroni in una posa di 5 minuti

Ciò da luogo a un Rumore Termico di meno di 15 elettroni, più o meno pari al Rumore di Lettura (**Readout Noise**) dovuto all'elettronica della camera CCD, valore piuttosto basso se confrontato con quello esibito da alcuni CCD professionali tuttora in uso.

## Bias Frame

Se leggiamo il CCD senza fare alcuna integrazione (in altre parole si pensi ad una esposizione con zero secondi di posa), ci sarà un segnale chiamato il segnale di **bias** (o offset = scostamento).

Si può pensare che il bias sia zero, ma ciò non è. Si pensi ad esso come a uno scostamento elettrico o ad un fondo.

Questo segnale deve essere misurato (dipende in un certo modo da cose tipo la temperatura del CCD) e sottratto dalle immagini che registriamo. Poiché c'è rumore di lettura per QUALSIASI lettura del CCD, perfino i bias frame hanno un rumore di lettura associato con essi.

Per ridurre al minimo il rumore quando sottraiamo il bias, dobbiamo riprendere molti bias frame e quindi combinarli tra loro per abbattere il rumore.

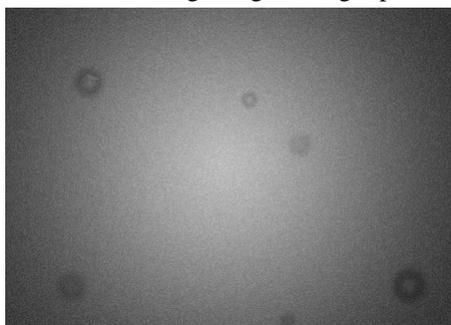
## Flat Field

In un CCD non esistono due pixel assolutamente identici.

Applicare un **flat field** ad una immagine significa riascalare la capacità di raccogliere luce di ogni pixel.

Ottenere un flat field significa puntare il telescopio su una sorgente di luce uniforme e ottenere un'immagine al 50% - 70% della possibilità del CCD.

Poiché il flusso di fotoni è uniforme, la disparità di valori letti sarà dovuta alla non uniformità del guadagno di ogni pixel.





## I pianeti extrasolari

- Un po' di storia
- Tecniche per la rilevazione dei pianeti extrasolari
- Il metodo dei transiti
- I risultati attuali

## Un po' di storia

### Che cos'è un pianeta?

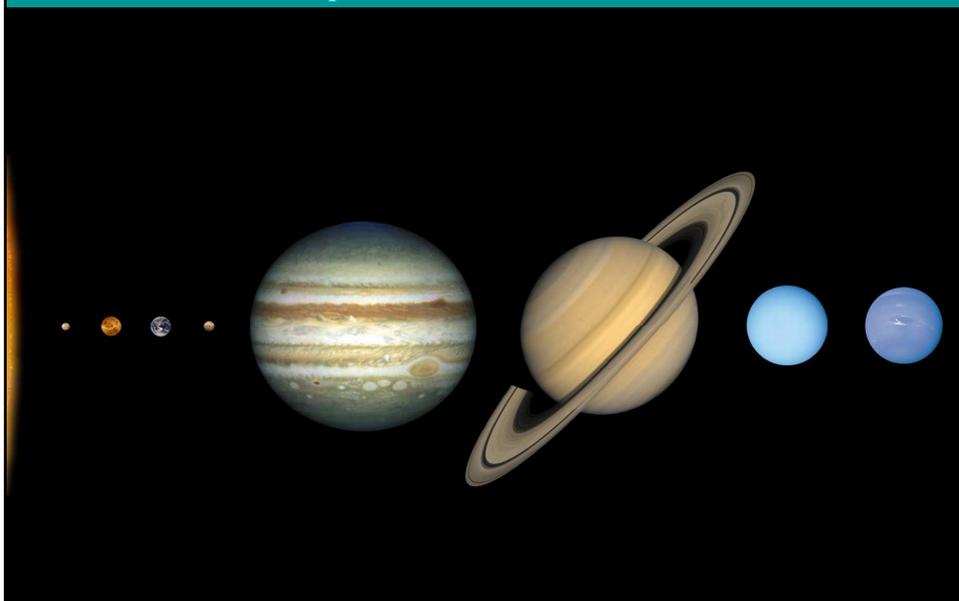
Pianeta viene dal greco e significa vagabondo; con questo termine venivano indicati quegli astri che si spostavano nel cielo rispetto alle stelle fisse, ovvero la Luna, il Sole, Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno. Gli unici visibili a occhio nudo.

Il 24 agosto 2006 l'Assemblea Generale di Praga dell'*International Astronomical Union* (IAU) ha stabilito che un pianeta è un corpo celeste che:

***è in orbita intorno al Sole;  
ha una massa sufficiente affinché possa assumere una forma quasi sferica;  
ha "ripulito" le vicinanze intorno alla sua orbita.***

## Un po' di storia

### I pianeti del Sistema Solare





## Un po' di storia

### I Corpi Minori

Corpi minori sono tutti gli altri corpi del Sistema Solare.

Un gruppo importante di questi, detti asteroidi (o anche pianetini) si trova tra Marte e Giove.

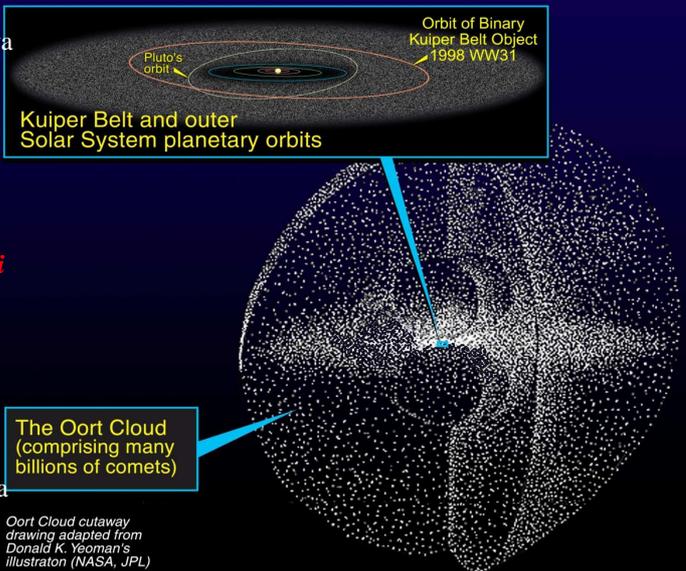
Alcuni di essi hanno orbite che intersecano l'orbita della Terra.

## Un po' di storia

### I Corpi Minori

Un altro importante gruppo di oggetti si trova oltre l'orbita di Nettuno (per questo sono detti **TNO = Trans-Neptunians Objects**)

Sono distribuiti in una struttura detta **cintura di Kuiper** e esternamente costituiscono la cosiddetta **nube di Oort** che si estende probabilmente fino a metà della distanza che separa il Sole dalla stella più vicina:  $\alpha$  Centauri



Oort Cloud cutaway drawing adapted from Donald K. Yeoman's illustration (NASA, JPL)

## Un po' di storia

### Come si è formato il Sistema Solare?

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:

- si trovano approssimativamente nello stesso piano;
- sono praticamente circolari ;
- i pianeti ruotano nello stesso senso, che è pure quello di rotazione del Sole;
- le distanze eliocentriche obbediscono alla legge empirica di Titius-Bode.

Verso la fine del XIX secolo, inoltre, assunse molta rilevanza il problema del momento angolare: il Sole contiene il 99% della massa del Sistema Solare, ma possiede solo il 3% del momento angolare totale.

## Un po' di storia

### Come si è formato il Sistema Solare?

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**  
 quella della **teoria nebulare**.

## Un po' di storia

### Come si è formato il Sistema Solare?

#### ***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* (1644), 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 "vortici" si siano poi prodotti i pianeti.

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).

## Un po' di storia

### Come si è formato il Sistema Solare?

#### *Le teorie mareali*

La prima versione della teoria si deve al conte di Buffon che 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 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.

## Un po' di storia

### Come si è formato il Sistema Solare?

#### *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.

## Un po' di storia

### Come si è formato il Sistema Solare?

#### *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 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..

## Un po' di storia

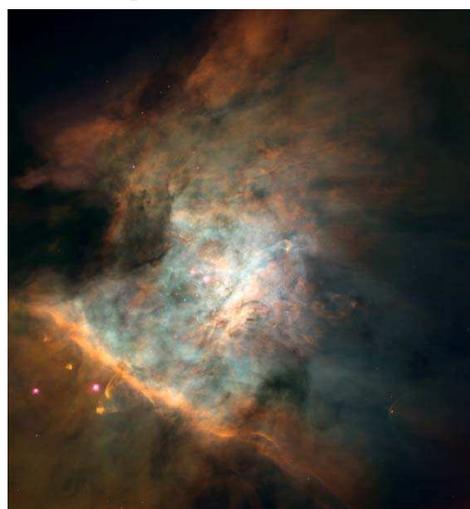
### Come si è formato il Sistema Solare?

#### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

Riassumiamo i dettagli più significativi ipotizzati per il processo di formazione del Sistema Solare.

Nel centro del disco, tra 5 e 4,6 miliardi di anni fa, si è formato il Sole, con quasi tutta la massa della nube.

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).



*La nebulosa di Orione*

## Un po' di storia

### Come si è formato il Sistema Solare?

#### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

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.

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.

## Un po' di storia

### Come si è formato il Sistema Solare?

#### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

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.

## Un po' di storia

### Come si è formato il Sistema Solare?

#### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

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

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

R è espresso in unità astronomiche (UA = ).

La zona della nebulosa dove il vapore acqueo può solidificare ( $T \leq 273 \text{ K}$ , cioè  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 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.

## Un po' di storia

### Come si è formato il Sistema Solare?

#### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

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.

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,  $\pi r^2$ ), mentre nella seconda l'influenza gravitazionale esercitata dalla particella è in grado di attirare anche del materiale che non le sarebbe finito direttamente addosso.

## Un po' di storia

### Come si è formato il Sistema Solare?

#### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

Poiché la gravità di un oggetto dipende dalla sua massa, la collisione gravitazionale è all'inizio trascurabile, 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  $r^4$ .

Il processo, di crescita esponenziale, porta in brevissimo tempo le dimensioni degli oggetti all'interno della nebulosa protosolare da un metro ad alcuni km: i cosiddetti **planetesimi**.

I planetesimi continuano ad accrescersi, sia per mutue collisioni sia per cattura di particelle più piccole e raggiungono dimensioni paragonabili a quelle della Luna o a anche di Marte: a questo punto sono diventati **protopianeti**.

## Un po' di storia

### Come si è formato il Sistema Solare?

#### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

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:

**a) Formazione della Luna** a causa dell'impatto di un protopianeta grande come Marte contro la Terra;

**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.

**c) Anomalie di Urano**. L'asse di rotazione è inclinato di  $97,9^\circ$  sul piano orbitale e questo potrebbe essere spiegato da un altro impatto:

**d) La "sottigliezza" del mantello di Mercurio**. Le misure di densità e del campo magnetico indicano che il nucleo di questo pianeta è sproporzionatamente grande e ciò potrebbe essere stato prodotto da un impatto.

## Un po' di storia

### Come si è formato il Sistema Solare?

#### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

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).

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.

## Un po' di storia

### Come si è formato il Sistema Solare?

#### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

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.

Va comunque detto che questo resta un punto debole del modello, perché il Sole all'inizio della sua vita ha attraversato una fase detta fase T-Tauri, 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.

## Un po' di storia

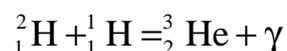
### Che cos'è un pianeta extrasolare?

Il *Working Group on Extrasolar Planets* (WGESP) dell'IAU dà la seguente definizione di pianeta extrasolare

(è una definizione di lavoro, quindi suscettibile a revisioni) :

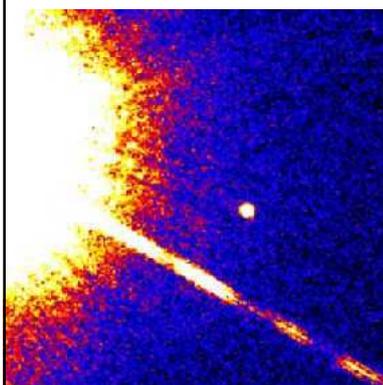
***Oggetti con massa inferiore alla massa limite per la fusione termonucleare del deuterio che orbitino intorno a stelle o resti di stelle (non importa come si siano formati) e superiore al minimo di massa che si usa nel Sistema Solare (Mercurio  $M=3.3 \cdot 10^{23}$  kg).***

Attualmente il limite per la fusione del deuterio è stimata pari a 13 volte la massa di Giove [ $M_J=1,9 \cdot 10^{27}$  kg] per gli oggetti di metallicità solare.



## Un po' di storia

### Che cos'è un pianeta extrasolare?



*Gliese 229 A e B. A sinistra, molto più brillante, la nana rossa Gliese A, al centro la nana bruna Gliese B.*

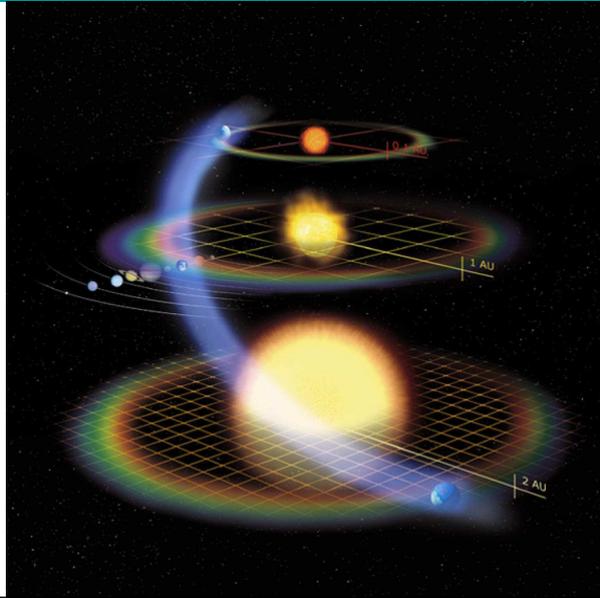
Oggetti con massa minore di  $70 M_J$  ( $\sim 7\% M_S$ ), ma superiore a  $13 M_J$  sono “nane brune”, non importa come si siano formate, nè dove si trovino.

Oggetti liberi in ammassi di stelle giovani con massa inferiore a  $13 M_J$  non sono pianeti, ma “sotto-nane brune”.

## Un po' di storia

### La zona di abitabilità

Nella ricerca di pianeti extrasolari riveste un particolare interesse quelli che si trovano nella cosiddetta **zona di abitabilità di un sistema planetario**, ossia nell'intervallo di distanze dalla stella in cui, su di un pianeta roccioso, è possibile trovare acqua allo stato liquido.



## Un po' di storia

### Perché cercare pianeti extrasolari?

La ricerca dei pianeti extrasolari è una recentissima branca dell'astronomia che sta assumendo sempre più un ruolo fondamentale per le sue rilevanti implicazioni in ambito sia culturale sia filosofico.

È da lì che potrebbe giungere una risposta, forse in un futuro neppure troppo lontano, ad una delle domande cruciali per l'umanità:

*nell'Universo esistono altre forme di vita,  
altri mondi abitati?*

## Un po' di storia

### Gli inizi

*In alcuni mondi non ci sono né Sole né Luna, in altri essi sono più grandi che nel nostro, in altri più numerosi. [..]*

*Vi sono alcuni mondi privi di creature viventi o piante e di qualsiasi umidità.*

*Democrito ~460 - 370 a. C.*

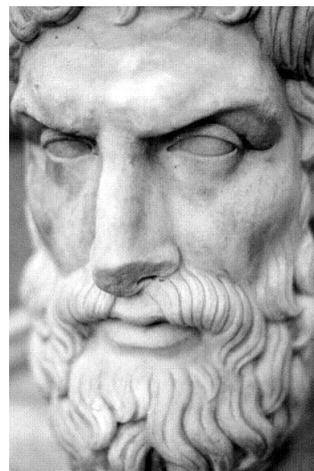


## Un po' di storia

### Gli inizi

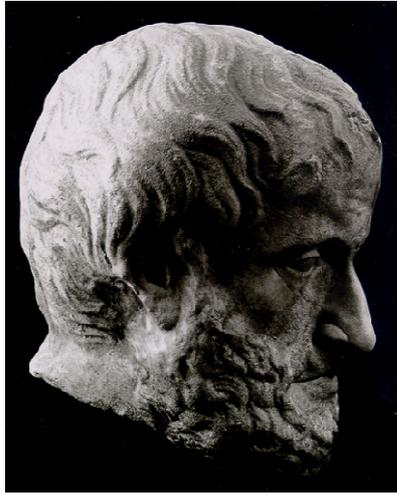
*Vi sono infiniti mondi, sia simili che differenti dal nostro. Poiché gli atomi sono infiniti in numero [...], non vi è ostacolo all'esistenza di infiniti mondi.*

*Epicuro 341 - 270 a. C.*



## Un po' di storia

Gli inizi



*Non possono esserci altri mondi  
oltre al nostro.*

*Aristotele 384 – 322 a.C.*

## Un po' di storia

Gli inizi

*[...] Il solo infinito è perfetto e di esso nulla  
può essere più importante e migliore, il Dio  
come sola natura intera e universale.*

*Universo è sinonimo di verità, unità e  
bontà; per questo l'infinito viene chiamato  
universo. Dio è glorificato non in uno ma in  
innumerevoli Soli, non in un'unica Terra,  
ma in un'infinità di mondi.*

*Giordano Bruno (1548-1600)*



## Un po' di storia

### Gli inizi

[...]

*quante saranno le stelle e i loro mondi.*

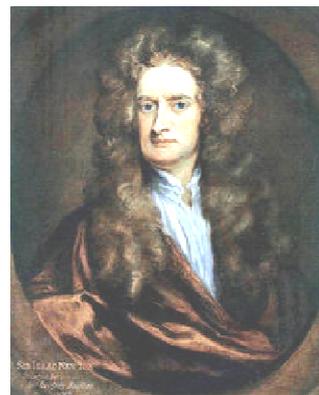
*Giacomo Leopardi (1798 – 1837) – Operette morali: Il Copernico*



## Un po' di storia

Nel campo scientifico, anche Newton ipotizzava l'esistenza di esopianeti e la sua statura scientifica fu senz'altro uno stimolo per la loro ricerca.

Ma per tutto il XIX secolo vi furono solo falsi annunci di scoperte.



ERROR: ioerror  
OFFENDING COMMAND: image

STACK: