

Gli strumenti dei cercatori di pianeti

I cercatori di pianeti hanno bisogno *distrumenti* :

La ricerca è un lavoro di squadra, e i ricercatori vengono da orizzonti diversi. Essi devono definire quali [unità](#) usano per quantificare ciò che viene misurato. Occorre anche un linguaggio comune che sono le [notazioni matematiche](#).

E' bene conoscere tutti i meccanismi che agiscono nel sistema solare perchè le stesse regole saranno applicate ai pianeti extrasolari: la [meccanica dei pianeti](#), il [limite di Roche](#), le [risonanze](#).

Per avventurarsi fuori dal sistema solare, bisogna conoscere bene le "leggi dell' ambiente", l'ambiente essendo l'Universo: le [forze in gioco](#), gli [stati della materia](#). [Come si forma un pianeta o una stella](#), perchè [brilla come un corpo nero](#) (e si!!), dnel quale si nascondono o si rivelano degli [atomi e delle molecole](#).

Infine, esistono delle astuzie per la ricerca perchè i pianeti extrasolari sono nascosti dietro alla loro stella, molto più grande e molto più brillante, il [baricentro](#), l'[effetto Doppler](#).

Le unità per misurare le distanze

La distanza tra la Terra e il Sole può valere 1 oppure 0.000016, ma anche 1.5×10^{11} . Per comunicare, i cercatori di pianeti devono innanzi tutto dire quale UNITA' usano !

Il Sistema Internazionale (S.I. o MKSA) definisce un sistema di unità coerenti, ma non è sempre adatto all'astrofisica, che si interessa a delle scale immense e molto piccole.

Per le distanze, l'unità del Sistema Internazionale (SI) è il *metro*.

- Nel sistema solare, gli astronomi utilizzano l'*unità astronomica*, distanza media tra la Terra ed il Sole.

1 unità astronomica (ua) = 150 000 000 km = 1.5×10^8 km (o più esattamente 1.496×10^{11} metri)

- Per le stelle, gli astronomi usano il *parsec*, che è un'abbreviazione per "paralasse secondo": un parsec è la distanza alla quale un ua sotto-tende un arco di un secondo. 1 parsec (pc) = 3.26 a.l. = 3×10^{13} km (3×10^{16} m) = 200 000 UA

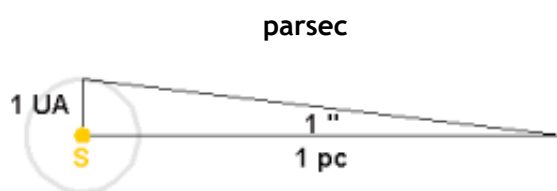
- Le grandi distanze, tra le stelle o le galassie, sono misurate in *anni luce*, distanza percorsa dalla luce in un anno.

La velocità della luce è $c = 300\,000$ km per secondo.

Un anno luce (km) = 365(giorni) * 24(ore) * 3600 (secondi) * 300000(km al secondo) 1 a.l. =

9.46×10^{15} m = 60 000 UA

!! attenzione!!, con queste grandi distanze, il tempo comincia ad avere un ruolo importante: la radiazione che ci arriva da una stella situata a 2000 anni luce è partito dalla stella due mila anni fa. E' impossibile sapere cio' che è successo alla stella durante questi 2000 anni!!!



Credito : ASM

Le unità per misurare le masse

L'unità di masse del Sistema Internazionale è il *chilogrammo*

Quando si parla di pianeti, anche quelli extrasolari, le masse sono misurate a scelta in masse terrestri, masse di Giove o masse solari.

$$M(\text{Terra}) = 6 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$M(\text{Giove}) = 2 \times 10^{27} \text{ kg}$$

$$M(\text{Sole}) = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$$

!!Importante!! la massa e il peso non sono la stessa cosa, anche se, quando si resta alla superficie della Terra, è difficile trovare la differenza! Il peso è uguale alla massa moltiplicata per "g", un valore che è (quasi) costante alla superficie della Terra. Il peso dipende dalla forza di gravità. La massa misura la quantità di materia, che dipende soltanto dal numero di atomi e dalla massa di questi atomi.

Sulla Terra, il vostro peso è l'attrazione tra la vostra massa e la massa della Terra ([la gravitazione](#)) a una distanza uguale al raggio della Terra nello spazio interplanetario, non avreste un peso (sareste in assenza di gravità) ma avreste sempre la stessa massa. Alla superficie della Luna, il vostro peso sarebbe 6 volte più debole del vostro peso su Terra.

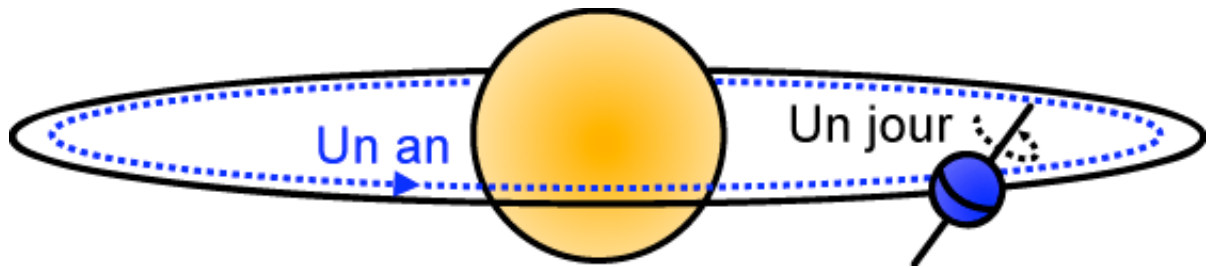
Des poids et des masses



Le unità utilizzate per misurare il tempo

L'unità del tempo del Sistema Internazionale è il *secondo*.

Le principali unità di tempo in astronomia sono il *secondo* (definito a partire dalle vibrazioni del atomo di Cesio) e l'*anno* (definito dal Sole). Il tempo è dato in Tempo Universale (TU), che è il tempo medio sulla Terra, alla longitudine zero.



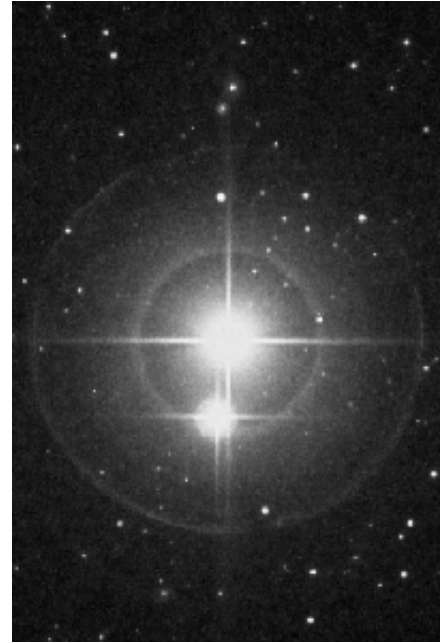
La rotazione della Terra intorno al proprio asse definisce il giorno e la rivoluzione della Terra intorno al Sole definisce l'anno.

Credito : Astrophysique sur Mesure

Le unità per misurare la luminosità delle stelle

L'unità utilizzata per misurare la luminosità delle stelle è la *magnitudine*: Hipparco, 200 anni a.C., classifica le stelle visibili tra la magnitudine 0, per la stella la più brillante del cielo (Vega) e 6 per le stelle le più deboli visibili a occhio nudo.

Per conservare questa scala, si usa la formula $m = -2.5 \log\left(\frac{L}{L_0}\right)$ dove L_0 è il flusso di una stella di magnitudine 0.



La stella centrale ha una magnitudine di 4.5, la seconda stella ha una magnitudine di 7.2 e le stelle in fondo del cielo una magnitudine compresa tra 15 e 18

Credito : CDS

Per verificare un'equazione

Un'astuzia per verificare un'equazione è di utilizzare le unità :

Come sapere il tempo messo dalla luce per giungere fino a noi da Nettuno (4×10^9 km), alla velocità di 300000 chilometri al secondo ? E' :

$$\text{tempo} = \frac{\text{distanza}}{\text{velocità}} \text{ oppure } \text{tempo} = \text{distanza} \times \text{velocità} ??$$

Basta rimpiazzare con le unità :

$$\text{secondo} = \frac{\text{chilometro}}{\frac{\text{chilometro}}{\text{secondo}}} \text{ oppure } \text{secondo} = \text{chilometro} \times \frac{\text{chilometro}}{\text{secondo}}$$

per vedere che la prima è quella giusta.

$$\text{tempo} = \frac{4 \times 10^9}{300000} = 13333 \text{ secondi, che bisogna dividere per 3600 (secondi per ora) per trovare 3,7 ore.}$$

Notazioni

- *I numeri decimali* : 2,5 si scrive più spesso 2.5
- *Le potenze (o esponenti)* di 10 servono per esprimere delle quantità che possono essere molto grandi (per esempio la massa del Sole in grammi) o molto piccole (la massa di un atomo d'idrogeno in grammi).

L'esponente positivo dà un numero di zeri che si deve far seguire all'unità:

$$10^3 = 1000$$

L'esponente negativo dà anche lui un numero di zeri ma con una virgola dopo il primo:

$$10^{-3} = 0.001 = \frac{1}{1000}$$

La massa del sole in grammi si scrive : 2×10^{33} , che si può anche scrivere 2 seguito da 33 zeri.

La massa dell' atomo d'idrogeno in grammi si scrive: 1.7×10^{-25} , che si scrive anche con 25 zeri seguiti da 17 con una virgola dopo il primo zero.

- *Il logaritmo di un numero*: è una funzione che dà l'esponente di un numero:

Il logaritmo decimale o "log" di 10^{33} è 33

Cio sostituisce delle moltiplicazioni con delle addizioni (più facili da fare). E' più difficile calcolare $0.0001 \times 10000000000$ che $10^{-4} \times 10^{10}$: basta addizionare gli esponenti per trovare 10^6 , cioè un milione.

I logaritmi sono molto utilizzati dai cercatori di pianeti che usano miliardi di stelle e millesimi di secondi d'arco. $\log(xy) = \log(x) + \log(y)$

Una funzione

Volume d'une sphère en fonction du rayon



Una funzione mostra come una grandezza varia rispetto ad un'altra.

Per esempio, la funzione

$$\text{volume}(\text{raggio}) = \frac{4 \pi \text{raggio}^3}{3}$$

Mostra come il *volume di una sfera* varia col *raggio*.

$\pi = 3.1415926\dots$ è la costante *pi*.

! Importante !

- Le unità del raggio e del volume sono legate.
- Quando il raggio è moltiplicato per due, il volume è moltiplicato per 8.

Meccanica dei pianeti

E' possibile prevedere la posizione dei pianeti nel futuro o ricostruirla nel passato con una precisione di qualche centimetro, o meglio. Tre persone, Tycho Brahé, Johan Kepler e Isaac Newton hanno segnato gli inizi di quella che si prenderà il nome di "la meccanica celeste" che permette di calcolare i movimenti degli oggetti del sistema solare.

Tycho Brahé ha fatto delle osservazioni della posizione dei pianeti nel cielo con una precisione ineguagliata all'epoca (1600). Tali osservazioni molto precise e che riguardavano un lungo periodo di tempo, hanno permesso a Johan Kepler di scoprire che i pianeti si trovavano su delle orbite ellittiche e che, su queste orbite, i pianeti avanzavano più rapidamente quando erano più vicini al Sole. Le equazioni che definiscono questo movimento sono le tre leggi di Kepler.

QUADRANS MURALIS SIVE TICHONICUS



Tycho Brahé nel suo osservatorio di Uraniborg: utilizza degli strumenti molto precisi per determinare la posizione di un astro.

Credito : Biblioteca del Osservatorio di Parigi

Le leggi di Kepler

- Prima legge di Kepler

Le orbite dei pianeti sono delle ellissi delle quali il Sole occupa uno dei fuochi (animazione 1 delle ellissi)

- Seconda legge di Kepler

La legge delle aree: La velocità lungo l'orbita è tale che la superficie spazzata dal raggio che unisce il pianeta al Sole resta costante. Quando un pianeta è più vicino al Sole, il suo moto è più rapido (animazione 2 delle ellissi).

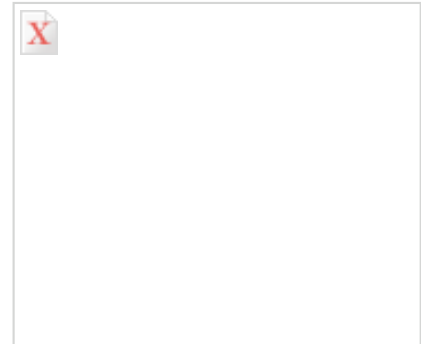


Illustrazione della seconda legge di Kepler

Credito : Astrophysique sur Mesure

- Terza legge di Kepler

Il periodo P di rivoluzione attorno al Sole aumenta con il semiasse maggiore*, D e

$$\frac{P^2}{D^3}$$

è costante per tutti i pianeti del sistema solare.

* : il semiasse maggiore è la metà della distanza tra i due punti più lontani dell'orbita

Se P è espresso in anni terrestri e D in [in unità astronomiche](#), la costante vale 1.

Per un pianeta che è a 5 ua,

$$P^2 = 5^3 = 125$$

$$\text{allora } P = \sqrt{125} = 11.2 \text{ anni}$$

La legge di gravitazione

Newton, alla fine del diciassettesimo secolo, ha capito che il movimento dei pianeti, come il movimento della Luna, era causato dalla forza di gravitazione e che questa stessa forza causa anche il "peso" delle cose su Terra (la mela).

Due oggetti di massa M_1 e M_2 si attirano con una forza proporzionale alle masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza che li separa.

$$F = \frac{G M_1 M_2}{D^2}$$

G è una costante uguale a $6,67259 \frac{m^3}{kgs^2}$

Le equazioni di Kepler si deducono direttamente da questa espressione.

Quando ci sono più di due corpi, ogni corpo subisce un'attrazione da parte di tutti gli altri, e non è più possibile di calcolare i movimenti dei corpi direttamente. Anche il problema dei tre corpi diventa molto complicato. Così' la teoria del movimento della Luna tenendo conto della presenza della Terra e del Sole, è l'opera di una vita, quella del astronomo Charles-Eugène Delaunay, i cui lavori servono ancora di riferimento per i calcoli fatti oggi dai computer.

Limite di Roche

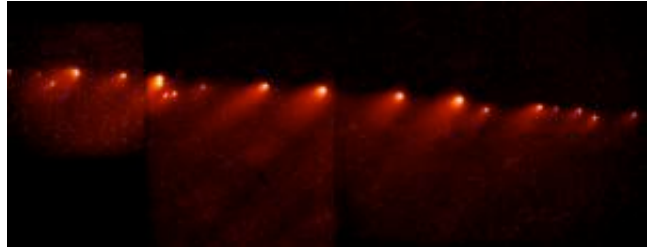
Il limite di Roche è la distanza minima rispetto al centro di un pianeta alla quale un satellite può orbitare senza frammentarsi per effetto delle forze di marea. Se il pianeta e il satellite hanno la medesima densità, il limite di Roche è 2,5 volte il raggio del pianeta. All'interno di questo limite, il satellite è distrutto dalle forze di marea.

Tutti gli anelli dei pianeti del sistema solare si trovano all'interno del rispettivo limite di Roche.

Dei satelliti solidi possono esistere all'interno del limite di Roche se sono sufficientemente piccoli, perché le tensioni interne delle rocce impediscono loro di frammentarsi.

In un disco di frammenti che avvolge un pianeta appena formato, la materia situata al di là del limite di Roche può assemblarsi in uno o più satelliti mentre nella zona più vicina al pianeta, le forze di marea impediscono la formazione di qualsiasi satellite.

Questo meccanismo è anche valido in prossimità di una stella: non possono esistere pianeti più vicini di 2,5 volte il raggio della stella.



La cometa Shoemaker Levy 9 frammentata da Giove nel 1994

Credito : NASA/HST

Calcolo del limite di Roche

Il ragionamento di Roche, che riportiamo qui di seguito, riposa sull'ipotesi semplificatrice seguente : anche se il satellite è sferico, immaginiamolo costituito da due sfere di raggio r e di massa m . Basta pensare a due palle di neve sporche, ognuna di raggio r , mantenute insieme grazie alla forza di gravitazione universale che ognuna esercita sull'altra. Questa forza, che chiameremo F_{att} , è data dalla relazione di

Newton :

$$F_{att} = \frac{Gm^2}{(2r)^2}$$

Consideriamo ora che il satellite sia piazzato a una distanza D di un pianeta di massa M e di raggio R . La forza d'attrazione F , tra il pianeta e la palla di neve la più vicina, sarà più grande che la forza F' tra il pianeta e la palla più lontana. La Forza F è data dalla relazione seguente :

$$F = \frac{GMm}{D^2}$$

E la forza F' è data da :

$$F' = \frac{GMm}{(D+2r)^2}$$

Le due palle risentiranno una forza risultante F_{mar} che tende a separarle. Questa forza equivale alla

differenza delle forze F e F' . Si ha dunque : $F_{mar} = F - F'$ E, perchè $D \gg r$: $F_{mar} = -\frac{4GMmr}{D^3}$

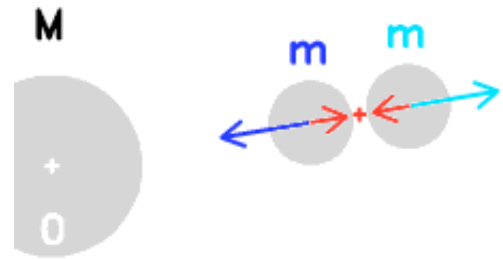
Ci sarà separazione delle due masse se la forza F_{mar} è superiore alla forza F_{att} .

Ci sarà dunque separazione se : $\frac{2^4 M}{D^3} > \frac{m}{r^3}$

Rimpiazziamo la massa M con $\rho_P \frac{4}{3} \pi R^3$, dove ρ_P è la densità del pianeta, e la massa m con $\rho \frac{4}{3} \pi r^3$, dove ρ è la densità del satellite.

C'è separazione se la distanza D è inferiore a $2 \frac{4}{3} R \left(\frac{\rho_P}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}}$

L'approssimazione è accettabile perchè $2 \frac{4}{3}$ vale 2,51 mentre il valore esatto è 2,456



Equilibrio o rottura, per l'azione del campo autogravitazionale che deve assicurare la coesione, e dei termini del gradiente del campo gravitazionale planetario che frammenta il satellite (nel riferimento del centro di massa del satellite).

Credito : Astrophysique sur Mesure

Cos'è una risonanza ?

Un esempio di *risonanza* è l'azione effettuata per lanciare un'*altalena*:

Per dare un movimento a un'altalena, bisogna dargli un impulso a ogni passaggio, o forse una volta su due o su tre. Perché il movimento si mantenga, è importante che gli impulsi siano sempre dati quando l'altalena è nella stessa posizione: gli impulsi devono essere *inrisonanza* con l'altalena.

Il *periodo* degli impulsi (il tempo tra due impulsi) deve essere uguale al *periodo* dell'altalena (durata di un'oscillazione), o uguale al doppio del periodo dell'altalena (o al triplo...)

Intorno ad una stella, i corpi non girano alla stessa velocità e si perturbano gli uni con gli altri per effetto della gravitazione.

- Se due pianeti non sono in risonanza, le loro perturbazioni successive si mischieranno e si tradurranno soltanto in piccoli movimenti di ciascun pianeta.
- Se i pianeti sono in risonanza, le perturbazioni successive si sommeranno e diventeranno importanti.
- Una configurazione di risonanza tra due corpi può anche corrispondere ad una posizione di equilibrio dove i corpi si "disturbano" di meno.



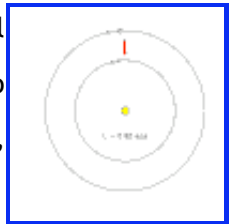
Dove sono le risonanze?

In un sistema dove dei corpi orbitano intorno ad un corpo centrale (pianeti intorno ad una stella, satelliti intorno ad un pianeta), sono possibili delle risonanze tra i corpi che girano.

Queste hanno luogo quando esiste un rapporto commensurabile tra parametri orbitali di due corpi.

Le più "semplici" sono le risonanze che legano i periodi di rivoluzione, che si chiamano risonanze di "moto medio". Il "moto medio" è la velocità angolare, $n = \frac{2\pi}{P}$, con P il periodo di rivoluzione..

C'è una risonanza se il moto medio del pianeta 1, n_1 , è commensurabile con quello del pianeta 2, n_2 . Per esempio, c'è una risonanza $\frac{1}{2}$ se il pianeta 1 è due volte più rapido del pianeta 2, che si scrive $n_1 = 2n_2$, o $2P_1 = P_2$. Esiste una risonanza d'ordine n/m , dove n e m sono dei numeri interi, se un pianeta fa n rivoluzioni quando l'altro ne fa m .



Negli anelli di Nettuno, il bordo dell'anello Adams è in risonanza 42:43 con il satellite Galatea.

Possono anche esistere delle risonanze tra il moto di rotazione di un corpo su se stesso e il suo moto di rivoluzione.

Quando le orbite sono eccentriche e/o inclinate, altre "velocità" possono intervenire: le perturbazioni reciproche tra pianeti fanno ruotare le orbite, dando luogo alla **precessione**. Le velocità di precessione possono anche essere in risonanza, tra di loro e/o con i moti medi.

La **gravitazione** è una legge molto semplice che dà luogo a fenomeni molto complessi.

Le risonanze si manifestano ovunque nel sistema solare:

- Il moto di rotazione della Luna su se stessa è in risonanza 1:1 con il suo moto di rivoluzione attorno alla Terra. La Luna impiega infatti lo stesso tempo a fare un giro su se stessa e un giro intorno alla Terra. E' per questo che, dalla Terra, si vede sempre la stessa faccia della Luna.
- Il moto di rotazione di Mercurio su se stesso è in risonanza 3:2 con il suo moto intorno al Sole. Il pianeta fa 3 giri su se stesso mentre fa 2 giri intorno al Sole.
- Nettuno e Plutone sono in risonanza 3:2. Nettuno fa tre volte il giro del Sole mentre Plutone ne fa due. La velocità angolare di Nettuno, 2 , è più grande della velocità angolare di Plutone, n_P . La si può notare $2n_N = 3n_P$
- Nel sistema di Saturno, esistono molte risonanze tra satelliti o tra satelliti e anelli.

Che ruolo svolgono le risonanze?

I risultati delle risonanze sono molto variabili:

- Si sa da molto tempo che nella cintura degli asteroidi esistono delle lacune, cioè delle zone dove non ci sono oggetti. *Queste zone corrispondono a delle risonanze di moto medio con Giove*. Il ruolo di tali risonanze con Giove è stato quello di perturbare le orbite degli oggetti che vi si trovavano, fino ad *espellerli* dalla cintura asteroidale.
- La risonanza di moto medio 3:2 con Nettuno ha un ruolo inverso. In corrispondenza a questa risonanza, si sono accumulati molti piccoli corpi, tra i quali il pianeta Plutone. In questo caso la risonanza è un punto di *stabilità*.
- La risonanza tra il periodo di rivoluzione e il periodo di rotazione della Luna *stabilisce* la rotazione della Luna in rotazione sincrona con la Terra. Questa configurazione evita alla Luna quegli attriti interni che aveva subire a causa degli effetti di marea della Terra quando girava più veloce e che avevano rallentato la Luna fino all'attuale posizione di equilibrio. Si tratta di un meccanismo molto efficace : nel sistema solare, tutti i satelliti vicini sono in rotazione sincrona.
- Un gran numero di strutture degli anelli di Saturno, come i *bordi netti, le ondulations, le onde di densità*, sono originate dalle risonanze con i satelliti.

Le forze nell'Universo

Le interazioni della materia si spiegano con quattro tipi di forze :

La forza elettromagnetica riguarda le particelle cariche elettricamente. E' attrattiva tra due particelle di segno contrario e repulsiva tra due particelle che hanno lo stesso segno. Varia con $\frac{1}{r^2}$. E' responsabile della coesione degli atomi : i protoni del nucleo e gli elettroni si attraggono. Non è più sensibile a grande scala perchè c'è lo stesso numero di protoni e di elettroni, si dice che la materia è "neutra" a grande scala.

La forza d'interazione forte : è molto intensa e agisce su distanze piccole (10^{-15} metri). Riguarda i protoni e i neutroni. Permette ai nuclei degli atomi di restare uniti malgrado il fatto che i protoni tendono ad allontanarsi l'uno dall'altro per colpa delle forze elettromagnetiche.

La forza d'interazione debole agisce su tutte le particelle a piccola distanza (10^{-18} metri), è responsabile della radioattività beta.

La forza gravitazionale riguarda *tutte* le masse, dunque tutte le particelle. E' forse una proprietà geometrica dello spazio-tempo-materia. Varia con $\frac{1}{r^2}$ fino all' infinito. Questa forza è responsabile della struttura dell' Universo a vasta scala.

I fisici cercano di unificare queste forze nell'ambito di una stessa teoria che terrebbe conto della relatività generale e della meccanica quantistica. La teoria elettrodebole riunisce l'elettromagnetismo e l'interazione debole, ma non esiste attualmente alcuna teoria completa.

Gli stati della materia

Una volta fabbricati dalle stelle, gli atomi sono quasi eterni. Essi possono però associarsi in diversi modi per formare delle molecole che si organizzano diversamente in funzione della temperatura e della pressione dell'ambiente. Così, gli atomi O (ossigeno) e H (idrogeno) hanno miliardi d'anni d'esistenza. Invece le molecole d'acqua (H₂O) possono facilmente essere dissociate per ridare idrogeno e ossigeno.

Si conoscono tre principali *stati* per la materia :

- Lo stato solido: gli atomi (o le molecole) sono molto vicini gli uni agli altri.
- Lo stato liquido: gli atomi (o le molecole) possono muoversi gli uni rispetto agli altri.
- Lo stato gassoso: gli atomi (o le molecole) sono distanti gli uni dagli altri.



Molecola d'acqua.

Credito : Osservatorio di Meudon / UFE

Gli atomi possono anche perdere gli elettroni e diventare degli ioni. Quando la materia è composta da nuclei e da elettroni separati, si parla di plasma.

Riscaldare un corpo produce un'agitazione degli atomi/molecole e fa passare la materia dallo stato solido a quello liquido e poi a quello gassoso. La temperatura a cui avviene il passaggio da uno stato a un altro dipende dalla sostanza ma anche dalle condizioni di pressione a cui essa si trova. Una stessa quantità di materia (cioè uno stesso numero di atomi/molecole) occuperà più spazio allo stato gassoso che allo stato liquido o solido.

Gli stati della materia nel Universo

Il Mezzo InterStellare (MIS)

Il mezzo interstellare è composto da gas diluito, a temperature comprese tra 10 e 100 K. La chimica è molto lenta.

Le stelle

Le stelle sono composte da gas ionizzato denso. La temperatura alla superficie delle stelle è compresa tra 3000 e 50000 K. A queste temperature, gli atomi si dissociano in plasma (zuppa d'ioni).

I pianeti giganti

I pianeti giganti sono composti da gas con un nucleo liquido e/o solido. I pianeti giganti del sistema solare hanno temperature superficiali comprese tra 100 e 200 K.

I pianeti tellurici (terrestri)

I pianeti **tellurici** sono composti di materiali solidi e di una atmosfera più o meno densa. Più vicini la Sole dei pianeti giganti, la loro temperatura superficiale varia tra 200 e 500 K. L'effetto coniugato della temperatura effettiva e dell'effetto serra permette di mantenere l'intervallo di temperatura al quale l'acqua è liquida (0-100 gradi Celsius o 273-373 K), ambiente favorevole all'apparizione della vita.

La densità rappresenta la principale differenza tra pianeti tellurici e pianeti giganti: un centimetro cubo di pianeta terrestre pesa tra 4 e 6 grammi, mentre un centimetro cubo di pianeta gigante pesa tra 1 e 2 grammi.

Una nube di gas collassa su se stessa

La storia comincia nello spazio interstellare : un onda si propaga nel gas (forse a causa dell'esplosione di una supernova in prossimità) e una parte della nube comincia a contrarsi.

La nube collassa, la densità e la temperatura del gas aumentano al centro. Diventando più piccola, la nube comincia a girare su se stessa e prende la forma di un disco che circonda una massa centrale.

Il seguito dipende dalla quantità di materia presente nella massa centrale...



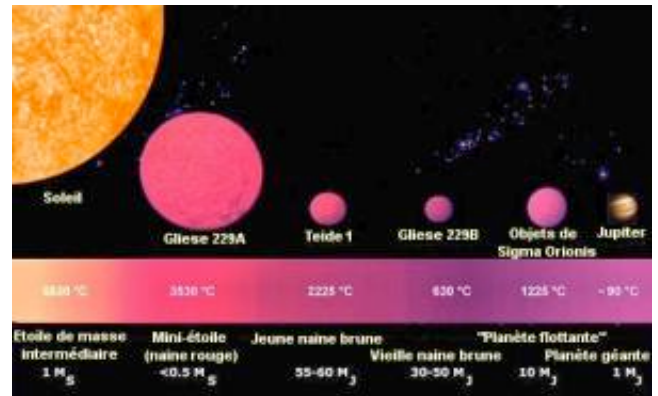
la formazione di un sistema planetario

Credito : Osservatorio di Parigi / UFE

A scelta: stella, nana bruna o pianeta

- Se la massa del nucleo centrale di una nube di gas collassata è piccola, $M < 3 \times 10^{28}$ kg cioè $13 M_J$ (massa di Giove), essa diventa una palla di gas e forma un pianeta gigante (vedere [cosa è un pianeta extrasolare ?](#)).
- Se $13 M_J < M < 100 M_J$ (10% della massa del Sole), si forma una nana bruna, oggetto rimasto a lungo misterioso, nel quale la combustione nucleare riguarda soltanto la fusione del D (deuterio) in He (elio).
- Se $M > 0.1 M_{\odot}$ (massa solare), la temperatura centrale diventa superiore a 5×10^6 K e dà inizio alla fusione di H (idrogeno) in He (elio), accendendo una stella.

Tra stella e pianeta



Temperatura e diametro di diverse nane brune paragonate al Sole e a Giove

Credito : ESA / Medialab secondo i dati di R. Rebolo, e Serge Jodra (colori, immagini e traduzione?)

Questi tre scenari possono svolgersi in vicinanza di una stella che si sta formando. Ciò porta alla formazione di un sistema binario (le stelle doppie sono numerose nell'Universo) o di un sistema che associa una stella a un pianeta gassoso o una stella a una nana bruna.

Se questo scenario riguarda una condensazione di una nube di gas isolata, questa finirà col diventare una stella isolata. Se la massa è piccola, si formerà una nana bruna isolata, o perchè no, un pianeta isolato !

Qualche nana bruna isolata è stata scoperta, ma non è cosa facile perchè la loro radiazione è debole, dura poco tempo ed è massima nell'infrarosso.

La formazione di pianeti isolati (chiamati pianeti galleggianti) è teoricamente possibile ma non sono ancora mai stati scoperti. Questi oggetti non hanno alcuna sorgente di energia, nè emettono radiazione.

Ora, ci si interesseremo al caso in cui l'oggetto formato è una stella e più particolarmente a ciò che succede nel suo intorno. Perchè è là che si formano i "veri" pianeti, che, come la Terra, nascono in un disco circumstellare.

Nell'intorno di una stella

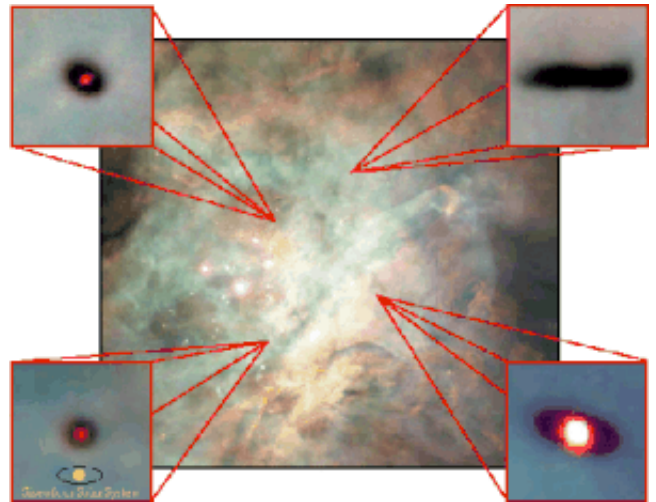
Quando la stella si "accende", il collasso della nube produce un disco intorno alla proto-stella. Lo studio del sistema solare ha permesso di ricostituire le tappe che hanno portato alla formazione di pianeti:

- Il disco si stratifica in un disco di polvere molto sottile immerso in un disco più spesso di gas.
- Nel disco di polvere, i grani aderiscono tra di loro per creare corpi più grossi, i planetesimi (che assomigliano agli attuali asteroidi e/o comete).
- I planetesimi formeranno, attraverso collisioni non distruttive, dei corpi ancora più massicci. Non appena si sarà formato un nucleo abbastanza grosso, questo attirerà sempre più planetesimi e gas, crescendo sempre più in fretta e formando così un pianeta.
- I pianeti perturbano le orbite dei planetesimi restanti, che cadono sul Sole, sui pianeti e sui satelliti (formando gli innumerevoli crateri visibili sulla Luna o su Mercurio) oppure si frammentano in prossimità dei pianeti massicci per formare degli anelli. Certi sono deviati ai confini del sistema solare, dove formano la nuvola di Oort, serbatoio delle attuali comete.
- Le interazioni tra i pianeti creeranno ancora delle collisioni, che spiegano la formazione della Luna e il ribaltamento di Urano. I pianeti possono anche respingersi e migrare tirandosi a vicenda fino a che non trovano delle posizioni stabili. Le [risonanze](#) giocano un ruolo importante nel modellare le attuali orbite dei corpi del sistema solare.

Il disco di polvere è composto da rocce e da metalli vicino alle stelle, dove fa caldo. Aldilà di una certa distanza (chiamata "limite dei ghiacci"), la temperatura più bassa permette al ghiaccio di formarsi. Poiché l'idrogeno (H) e l'ossigeno (O) sono gli [atomi](#) più abbondanti nel sistema solare, al di là del limite dei ghiacci ci sono molti più planetesimi e i pianeti si formano più rapidamente. Giove, il pianeta più grande, si è formato al limite dei ghiacci, e gli altri pianeti giganti, fatti di gas e di ghiaccio, si trovano all'esterno di questo limite.

Questo scenario di formazione dei pianeti spiega bene le proprietà dei pianeti del sistema solare. Ma è anche valido per i pianeti extrasolari?...

Sistemi planetari in formazione nella nebulosa di Orione



Le zone scure sono dischi di polvere attorno a stelle giovani e forse sono sede di formazione di pianeti

Credito : NASA / HST / C. R. O'Dell e S. K. Wong

Vita e morte delle stelle

La vita di una stella comincia con una fase agitata, detta T-Tauri, la cui durata è dell'ordine di un milione d'anni. Durante questa fase, la stella, ancora nel suo bossolo di gas e di polvere, invierà delle ondate di radiazione e di particelle che perturberanno fortemente il disco circumstellare.

La stella entra sulla "Sequenza Principale", dove passerà la maggior parte della sua esistenza (9 miliardi d'anni per una stella come il Sole). Quando l'idrogeno (H) è finito nel nucleo, la contrazione ricomincia e la temperatura al centro della stella aumenta. Il seguito dello scenario, che racconta la fine della vita della stella, dipenderà dalla sua massa :

- Per le stelle con una massa piccola ($M < 0.3 M_{\odot}$), la contrazione cessa e la stella si "spegne".
- Per le stelle più massicce ($M > 0.3 M_{\odot}$), la maggior parte delle stelle, la temperatura al centro della stella raggiunge i 10^8 K, e

comincia la fusione di He (elio) nel nucleo.

L'aumento della temperatura permette anche la ripresa della fusione dell'idrogeno (H) in

elio (He) negli strati che avvolgono il nucleo. La luminosità aumenta così come la pressione di radiazione ed il raggio della stella. Nello stesso tempo, gli strati esterni si espandono e si raffreddano mentre il nucleo diventa più denso. La stella diventa una gigante rossa. Nel nucleo, la combustione dell'elio (He) in carbonio (C) e ossigeno (O) dura poco tempo. Quando finisce l'elio (He), è la seconda crisi energetica della stella. Ancora una volta la sua massa determinerà la sua evoluzione :

Se la massa è inferiore a $1.4 M_{\odot}$, gli strati più esterni diluiti vengono soffiati via e si forma una "nebulosa planetaria" (esempio : Lyre). Il nucleo si "spegne" molto lentamente sotto forma di una nana bianca, molto piccola, $R \sim 3000$ km, molto densa $\sim 10^{10}$ kg/m³ e inizialmente molto calda, che si raffredderà lentamente fino a diventare una nana nera.

Per le stelle di massa superiore a 1.4 masse solari, la contrazione continua. La fusione di C (carbonio), O (ossigeno), Si (silicio), Mg (magnesio), Ne (neon)... Fe (ferro), è molto rapida e libera poca energia. Dopo il Fe (ferro) elemento più stabile rispetto alle reazioni termonucleari, non esistono più combustibili disponibili. La contrazione riprende; la temperatura al centro aumenta, provocando la fusione di elementi più pesanti del Fe (ferro). Ma queste reazioni di fusione consumano dell'energia (mentre gli elementi più leggeri del Fe (ferro) liberano dell'energia), e ciò accelera ancora la contrazione !

Si arriva allora alla fusione degli elettroni e dei protoni in neutroni. Il nucleo della stella collassa in caduta libera, fino ad avere un raggio di ~ 10 km con una densità di 10^{17} kg/m³. Si produce un rimbalzo dall'interno e un'onda d'urto che genera una supernova. Dopo l'esplosione, rimane un oggetto centrale molto denso, che è una stella a neutroni, o un buco nero.

Nebulosa del granchio



Materia espulsa durante l'esplosione della supernova del 1054 che fu osservata dai Cinesi : sovrapposizione di un'immagine ai raggi X (rappresentata in blu) e nel visibile (rosso). La dimensione dell'anello è di circa un anno luce.

Credito : raggi X: NASA/CXC/ASU/J. Hester e al.; visibile: NASA/HST/ASU/J. Hester e al.

La luce del Sole

La radiazione elettromagnetica è la principale sorgente d'informazione in astronomia.

Cio che chiamiamo "luce", nella vita di tutti i giorni, è una piccolissima parte della radiazione proveniente dal Sole. E' la parte percepita dall'occhio umano.



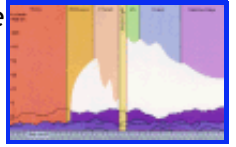
Le gocce di pioggia disperdono la luce del Sole come un prisma.

Credito : Osservatorio di Parigi / UFE

La velocità della luce

Il Sole non emette soltanto luce visibile. Emette anche onde radio, infrarosse, UV, X e gamma.

- La radiazione elettromagnetica si propaga alla velocità $c = 299790 \text{ km/s}$.
- La luce mette 8 minuti e 22 secondi per arrivare dalla superficie del Sole alla Terra.



Certe parti della radiazione solare non raggiungono il suolo, perchè sono assorbite dall'atmosfera. Per osservare il cielo a tutte le lunghezze d'onda, bisogna inviare i ricevitori nello spazio.

Le quantità che definiscono la luce sono:

- La frequenza, f , è il numero di pulsazioni al secondo (l'unità è l'hertz)
- Il periodo, $P = \frac{2\pi}{f}$, è la durata di una pulsazione (l'unità è il secondo)
- La lunghezza d'onda $\lambda = c \times P$ (l'unità è il metro)
- L'energia $E = h \times f$ (l'unità è il Joule)

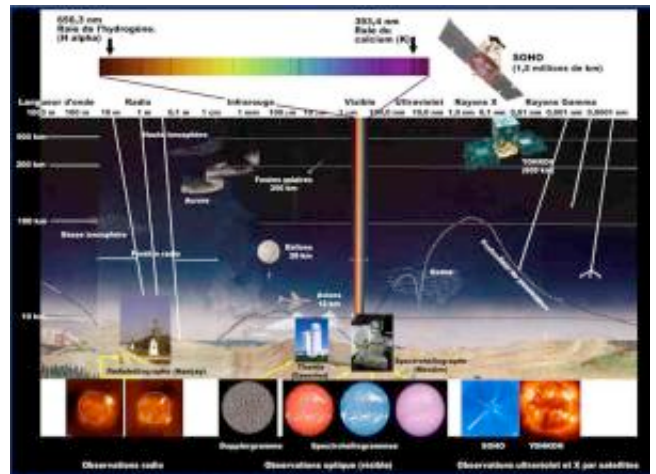


h è la costante di Planck : $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ joule.secondo}$

Lo spettro elettromagnetico

Queste radiazioni sono tutte della stessa natura. Le differenti regioni dello spettro elettromagnetico hanno nomi diversi perchè corrispondono a dei sensori diversi e a diversi meccanismi d'emissione.

Le diverse sorgenti di radiazione



Credito : Osservatorio di Parigi / LESIA

Il corpo nero

Una stella o un pianeta, emette una radiazione elettromagnetica, composta da uno spettro continuo (corpo nero) che dipende dalla sua temperatura, a cui si sovrappongono delle righe d'emissione e delle righe d'assorbimento che dipendono dalla materia che si trova tra l'oggetto e il telescopio.

Un *corpo nero* interagisce fortemente con la radiazione che emette, è "opaco". Assorbe tutta l'energia che riceve e emette a tutte le lunghezze d'onda una radiazione che dipende dalla sua *temperatura*. Più è caldo, più la luce è spostata verso le lunghezze d'onda corte.

La legge di Wien dà la lunghezza d'onda del massimo d'emissione : λ_{max} (in metri)

$= \frac{0.003}{T(\text{in Kelvin})}$. Questa legge permette di definire una relazione tra temperatura e colore attraverso la corrispondenza tra lunghezza d'onda e colore.

Si dispone così di un termometro: una stella blu è più calda di una stella rossa.

Per esempio, il corpo umano è a 37° C, cioè 37 + 273 = 310 ° Kelvin. $\lambda_{max} = 9.7 \times 10^{-6}$ metri. Il corpo umano emette un irraggiamento nel infrarosso.

Il sole ha una temperatura di 5780K. La sua emissione è forte nelle lunghezze d'onda visibili. E' probabile che l'occhio umano sia adattato per "vedere" la regione dello spettro elettromagnetico dove la radiazione emessa dal Sole è massima.

La temperatura di un corpo T corrisponde a una velocità d'agitazione termica data da $\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k T$ dove m è la massa, e k la costante di Boltzmann.

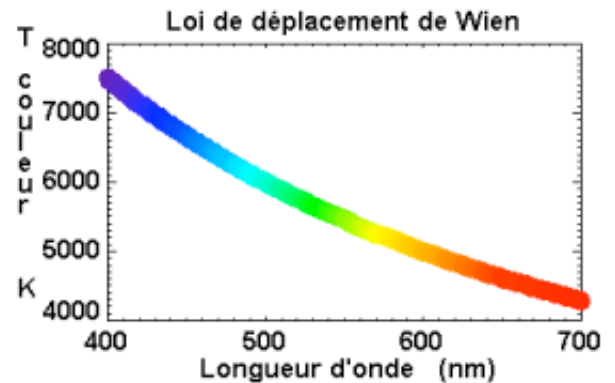
$$k = 1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{joule}}{\text{Kelvin}}$$

Cio spiega perchè, se un pianeta è troppo caldo, le molecole della sua atmosfera avranno una velocità sufficientemente elevata per sfuggire al pianeta e perchè, nell'atmosfera della Terra, c'è l'ossigeno, e non l'elio.

La legge di Stefan-Boltzmann dà il flusso totale emesso : $F = \sigma T^4$

$$\text{Costante di Stefan : } \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{Watt}}{\text{mètre}^2 \text{ Kelvin}^4}$$

la legge di Wien



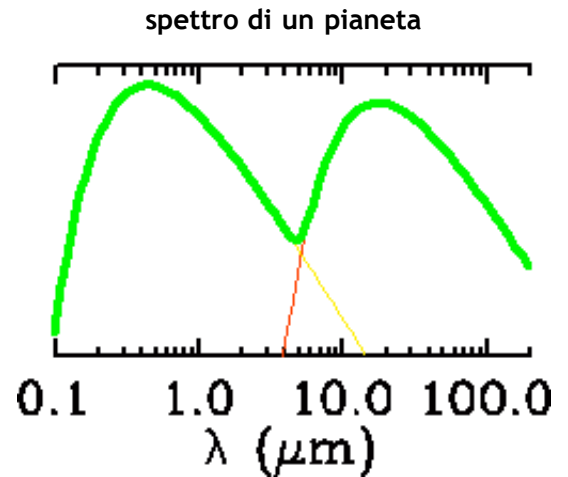
Credito : Osservatorio di Parigi / ASM



Lo spettro di un pianeta

Lo spettro di un pianeta ha due gobbe:

- La prima è la luce riflessa dalla stella, è la parte visibile il cui massimo è dato dalla temperatura della stella.
- La seconda corrisponde all'emissione propria del pianeta. Questa componente è invisibile, è nell'infrarosso perchè il pianeta è "freddo" (qualche centinaio di gradi Kelvin)



Credito : Osservatorio di Parigi / ASM

Gli elementi chimici

L'Universo è composto principalmente da atomi d'*idrogeno* e di*elio*. Gli altri elementi rappresentano meno dello 1% della materia. Ma questi elementi rari sono essenziali per formare la materia solida, i ghiacci e le rocce che sono le componenti dei pianeti terrestri.

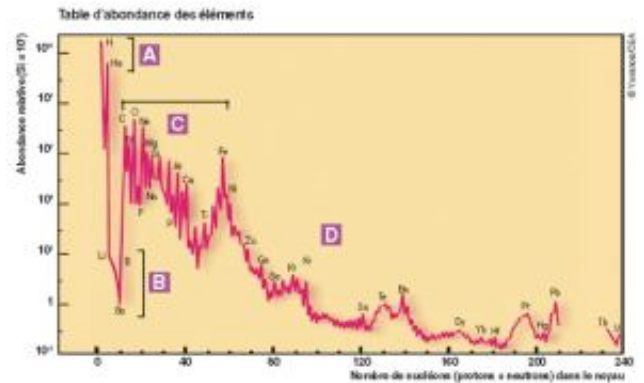
La proporzione relativa degli elementi è il riflesso dei processi che hanno formato questi atomi.

Nella figura, si nota che la scala è **logaritmica**, ci sono 3 intervalli tra H (idrogeno) e O (ossigeno), ciò che significa che c'è $10^3=1000$ volte più H che O.

Gli atomi più leggeri, l'idrogeno (H), l'elio (He), un po' di litio (Li) e berillio (Be), si sono formati durante il Big Bang., Le prime reazioni termonucleari formano all'interno delle stelle del carbonio (C), dell'azoto (N), dell'ossigeno (O), del fluoro (F).

La vita delle stelle si sviluppa in diverse tappe e la creazione di ogni atomo è associata a una delle tappe.

L'abbondanza degli elementi chimici nel sistema solare



I primi pianeti

Certe stelle sono vecchie come l'Universo (15 miliardi d'anni), altre hanno delle durate di vita molto più corte (3 milioni d'anni).

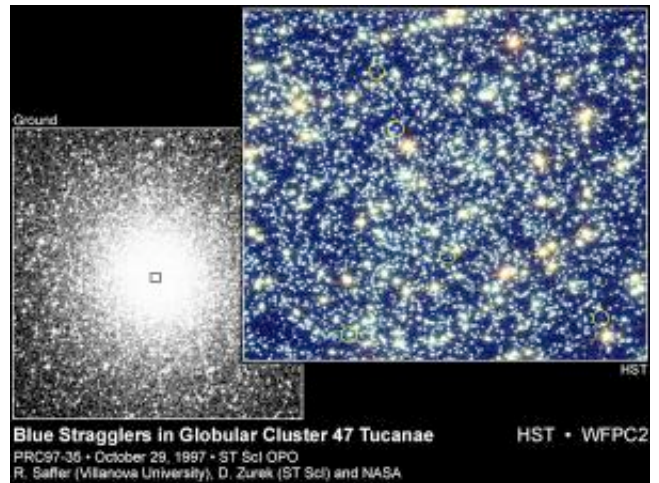
Le stelle della prima generazione erano composte unicamente d'idrogeno e d'elio. Queste stelle non potevano avere dei pianeti solidi!

Hanno bruciato il loro H e He per formare degli atomi di C, N, O e F. Alla fine della loro vita, sono diventate delle **novae** o delle **supernovae** e hanno disperso la loro materia nel mezzo interstellare (MIS).

Le stelle della seconda generazione, formate in tale mezzo interstellare, erano composte di H, He, un po' di carbonio (C), ossigeno (O), azoto (N), e fluoro (F). I pianeti di queste stelle erano fatti di gas (H e He) e di ghiaccio: del ghiaccio d'acqua (H₂O), del ghiaccio di CO, del ghiaccio di CO₂. Gli atomi pesanti formati da queste stelle sono dispersi nel MIS. Solo le stelle delle generazioni successive potranno avere dei pianeti rocciosi e metallici.

Il Sole ha 4.5 miliardi d'anni. Si è formato in un ambiente arricchito da diverse generazioni di stelle.

Il **Telescopio Spaziale Hubble** ha osservato una deficienza di pianeti intorno alle stelle molto vecchie, povere in "metalli" (atomi più pesanti dell'He) nell'ammasso del Tucano.



Credito : [NASA](#) / [HST](#)

Gli atomi d'idrogeno

Il modello "classico" dell' atomo d'idrogeno è un elettrone in orbita intorno al nucleo, composto soltanto da un protone.

Gli elettroni si trovano a delle distanze precise del nucleo. Allo stato fondamentale (n=1), l'orbita dell' elettrone ha un raggio di 10^{-11} metri (raggio classico di Bohr). L'elettrone può anche essere su orbite più grandi, associate a dei numeri interi $n = 2, 3, 4 \dots n = \infty$

Il nucleo ha un raggio di 10^{-15} metri. L'atomo allo stato fondamentale è 10000 volte più grosso del nucleo. Se il nucleo avesse le dimensioni di una moneta da dieci centesimi, l'atomo avrebbe le dimensioni di un campo da calcio.

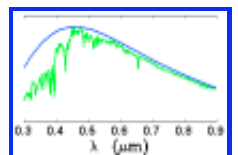
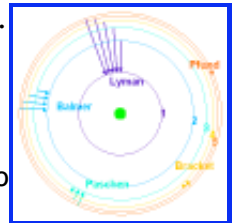
L'atomo può passare dallo stato fondamentale (n=1) a uno stato eccitato assorbendo un fotone di luce. Può anche tornare al suo stato fondamentale emettendo della luce il cui colore (lunghezza d'onda) dipenderà dai livelli d'energia del atomo.

Il passaggio dal livello n2 al livello n1 corrisponde a un'emissione/assorbimento di lunghezza d'onda λ , tale

$$\text{che } \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \text{ con } R = 1.1 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Se l'atomo riceve sufficiente energia, l'elettrone passa dal livello n=1 al livello infinito. L'atomo perde il suo elettrone e diventa uno *ione*. La lunghezza d'onda corrispondente è 0.91×10^{-6} m cioè nella regione UV dello spettro elettromagnetico.

Nell'atmosfera di una stella, gli atomi d'idrogeno, illuminati dalla stella, assorbono unicamente i colori che li fanno passare da un livello ad un altro.



Gli atomi

Tutti gli atomi sono, come l'idrogeno, composti da un nucleo (protoni e neutroni) circondato da un insieme di elettroni. In un atomo a riposo, il numero di elettroni è uguale al numero di protoni. Per esempio l'atomo d'ossigeno ha 8 protoni e 8 elettroni. Si ritrova questo numero nella tabella degli elementi.

Esistono 113 elementi chimici (atomi), che rappresentano tutte le combinazioni tra protoni, elettroni, e neutroni. I più pesanti sono instabili e hanno delle durate di vita molto corte.

Tabella periodica degli elementi

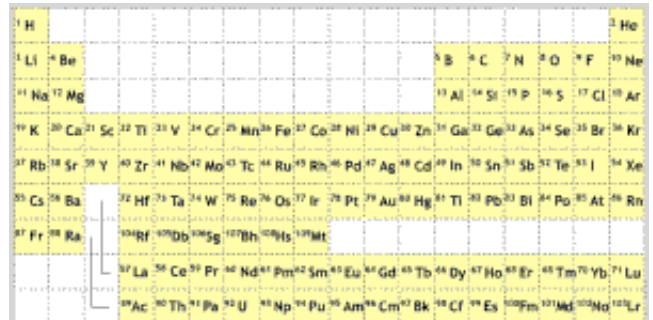


Tabella periodica degli elementi, anche chiamata tavola di Mandeleiev, nella quale gli atomi sono classificati per massa crescente.

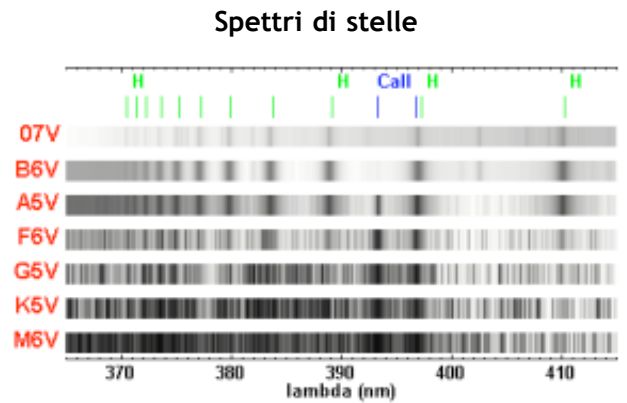
Credito : Osservatorio di Parigi / UFE

Atomi, molecole e spettri

Le molecole sono degli insiemi di atomi. Una molecola d'acqua è formata da un atomo d'ossigeno e da due atomi d'idrogeno.

Ogni atomo e ogni molecola è associato a un insieme di lunghezze d'onde corrispondenti a delle transizioni d'energia. Lo spettro di un corpo è la carta d'identità del (o degli) elemento(-i) chimico(-i) che lo compone (-ongono). L'analisi di uno spettro complesso fornisce la composizione chimica e l'abbondanza di ogni elemento.

Conclusione :lo spettro di una stella/di un pianeta è dunque composto da un spettro *corpo nero* che dipende dalla sua *temperatura*, et da *righe d'assorbimento/emissione* che dipendono dalla *composizione della sua atmosfera*. Qui a fianco è riportato lo spettro di diverse stelle, dalla più calda (stella O) alla più fredda (stella M).



Il centro di gravità



Quando due oggetti sono attratti dalla forza di gravità, girano l'uno intorno all' altro, intorno a un punto fisso, il loro baricentro o centro di gravità.

Quando le loro masse sono uguali, il centro di gravità è in mezzo ai due corpi.

Quando le loro masse sono diverse, il centro di gravità è più vicino dal oggetto più massiccio. Il rapporto delle distanze dal centro di gravità è uguale al rapporto delle masse.

Una stella e un pianeta girano intorno al loro centro di gravità. Poichè il pianeta è molto meno massiccio della stella, il centro di gravità è molto vicino al centro della stella.

Nel sistema solare, Giove è 1000 volte meno massiccio del Sole. La distanza tra Giove e il Sole è di 750 milioni di chilometri. Il centro di gravità è a 750 mila chilometri dal centro del Sole, non lontano dalla sua superficie. Gli altri pianeti, molto meno massicci di Giove, cambiano poco questi valori.

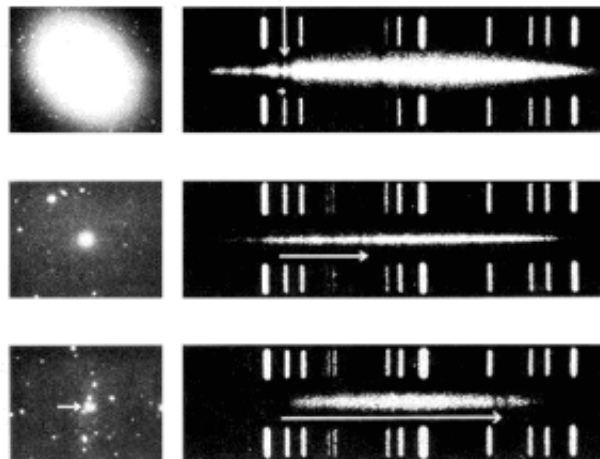
Si puo usare questo effetto per cercare dei pianeti extrasolari : la presenza di un pianeta invisibile è rivelato dal movimento della stella intorno alla quale esso gira !

L'effetto Doppler

Quando un'onda acustica viene emessa, il suono percepito da chi ascolta non sarà lo stesso se l'emittente è immobile o se è in movimento rispetto a chi ascolta.

Se la sua lunghezza d'onda è λ metri, l'onda emessa ha delle creste separate di λ che vengono emesse ad istanti separati da P (secondi) cosicché $\lambda = cP$ dove c è la velocità della luce (3×10^8 metri al secondo).

- Se la sorgente è immobile rispetto a chi ascolta, quest'ultimo riceve un'onda le cui creste sono separate da P , e la cui lunghezza d'onda è λ , uguale alla lunghezza d'onda emessa.



Credito : Osservatorio di Parigi / ASM / Hale Observatory

- Se la sorgente d'onde è in movimento con una velocità v_r rispetto all'osservatore, le creste sono emesse a intervallo P . Durante l'intervallo di tempo che separa l'emissione di due creste, la sorgente ha percorso una distanza $d = v_r P$
- Se la sorgente si allontana da chi ascolta, la seconda cresta percorre una distanza più grande per raggiungere chi ascolta, una distanza uguale a $\lambda + d$. Chi ascolta riceve un'onda di lunghezza d'onda $\lambda' = \lambda + d = Pc + v_r P = Pc \left(1 + \frac{v_r}{c}\right)$. La lunghezza d'onda ricevuta è $\lambda \left(1 + \frac{v_r}{c}\right)$. Essa è quindi più grande di λ . Se l'onda emessa è un suono, il suono ricevuto sarà più grave di quello emesso. Se l'onda è luce, la luce osservata sarà più rossa della luce emessa.
- Al contrario, se la sorgente si avvicina chi ascolta, la seconda cresta percorre una distanza più piccola per raggiungere chi ascolta, una distanza uguale a $\lambda - d$. Chi ascolta riceve un'onda con una lunghezza d'onda $\lambda' = \lambda - d = Pc - v_r P = Pc \left(1 - \frac{v_r}{c}\right)$. La lunghezza d'onda ricevuta è $\lambda \left(1 - \frac{v_r}{c}\right)$. Essa è quindi più piccola di λ . Se l'onda emessa è un suono, il suono ricevuto sarà più acuto di quello emesso. Se l'onda è luce, la luce osservata sarà più blu di quella emessa.

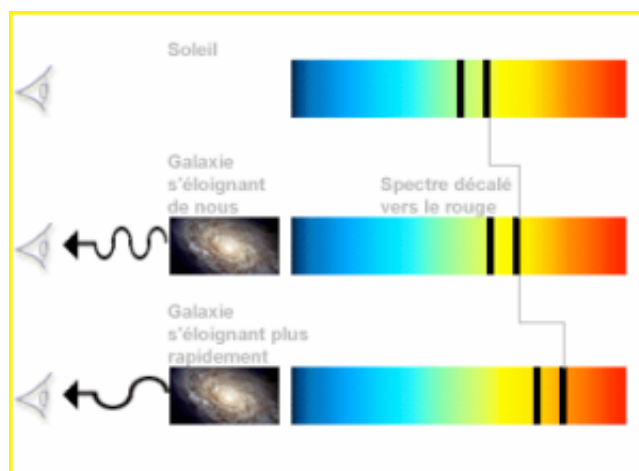
Delle applicazioni del effetto Doppler

La moto che passa in prossimità di chi ascolta è un emittente di suono che si avvicina prima e si allontana poi da chi ascolta. Il suono è più grave quando la moto si allontana.



Le righe scure visibili nello spettro del Sole si ritrovano negli spettri delle galassie (stesso fenomeno fisico) spostate verso il rosso. Nei dati reali, le frecce indicano la posizione delle righe scure in tre galassie sempre più lontane.

Le galassie molto lontane dalla nostra si allontanano con una grande velocità. Il loro spettro è molto spostato verso il rosso.



Effetto Doppler

Credito : Osservatorio di Parigi / ASM / Hale Observatory