

L'universo in un raggio di luce

COME LA SPETTROSCOPIA HA CAMBIATO L'ASTRONOMIA

di Francesco Battistelli (2008)

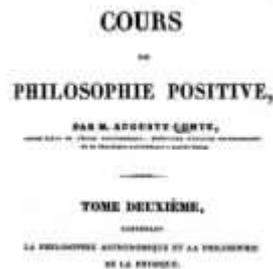
1. le ultime parole famose...

Nel 1835 Auguste Comte, il filosofo padre della sociologia, nel volume dei suoi "Corsi di filosofia positiva" dedicato alla filosofia dell'astronomia e della fisica, scriveva:

(...) à l'égard des astres. (...) Nous concevons la possibilité de déterminer leurs formes, leurs distances, leurs grandeurs et leurs mouvemens; tandis que nous ne saurions jamais étudier par aucun moyen leur composition chimique, ou leur structure minéralogique, et, à plus forte raison, la nature des corps organisés qui vivent à leur surface

Auguste Comte, Cours de philosophie positive, Tome XII (1835)

(...) riguardo agli astri (...) concepiamo la possibilità di determinare le loro forme, le loro distanze, le loro dimensioni e i loro movimenti; mentre non sapremo mai studiare in alcun modo la loro composizione chimica, o la loro struttura mineralogica, e, a maggior ragione, la natura dei corpi organizzati che vivono sulla loro superficie.



francobollo francese per il centenario della morte di Auguste Comte (1798-1857) a destra frontespizio da [Google Libri](#) del "Cours de philosophie positive - Tome XII"

Che cosa studia l'astronomia

Fin dall'antichità l'uomo ha osservato e si è lasciato guidare dagli astri. E' probabile che, alzando gli occhi nelle notti serene, i nostri progenitori nelle foreste si siano chiesti che cosa fossero quelle luci nel cielo, quesito filosofico destinato per secoli a rimanere senza risposte certe. Alcuni pazienti osservatori delle antiche civiltà iniziarono a misurare la posizione dei corpi celesti, distinguendo gli astri che si muovevano nel corso dell'anno da quelli che se ne restavano fissi: grazie a loro nasceva l'**astronomia**.



foto di Akira Fuji

Nel II secolo d.C. l'opera del greco Tolomeo riassume lo stato dell'astronomia antica: da una parte un sistema che ponendo la nostra Terra fissa al centro dell'Universo tentava di spiegare e prevedere i movimenti dei corpi mobili (i cosiddetti *planeti*); dall'altra un catalogo contenente la posizione e la luminosità delle stelle fisse, raggruppate in figure dette *costellazioni*.

Dopo che Newton con la legge di gravitazione universale (1687) aveva dimostrato che a regolare il movimento dei corpi celesti e il movimento degli oggetti terrestri provvede la stessa forza, nacque e si sviluppò la **meccanica celeste**, scienza del moto applicata ai corpi celesti.

All'inizio dell'Ottocento, l'opinione che l'astronomia coincidesse essenzialmente con lo studio della posizione e del movimento dei pianeti era diffusa anche tra gli astronomi. Il grande Bessel, direttore dell'osservatorio di Königsberg e primo astronomo a misurare la distanza di una stella con il metodo della parallasse, diceva: "L'astronomia deve scrivere le regole per determinare il moto dei corpi celesti, come appare dalla Terra". La meccanica celeste ha permesso all'umanità risultati straordinari, quali il calcolare l'orbita delle comete, prevedere l'esistenza e predire la posizione di pianeti sconosciuti, lanciare astronavi ai confini del Sistema solare e inviare uomini sulla Luna, e forse a breve anche su Marte!

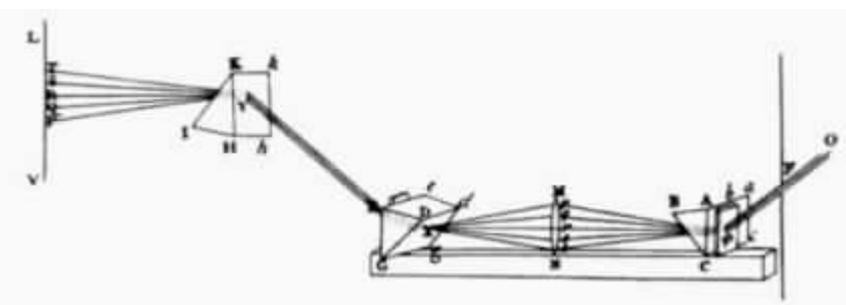


francobollo tedesco per il bicentenario della nascita di Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846)

Eppure, proprio negli anni in cui Comte pubblicava le sue opere, si stava sviluppando grazie ad alcuni studiosi della luce la disciplina che avrebbe permesso, entro la fine del secolo, di dare le prime risposte concrete alle domande: "qual è la composizione chimica di una stella? di che cosa è fatto l'Universo?". Stava nascendo la **spettroscopia**.

2. la nascita della spettroscopia

Nel 1704 Isaac Newton aveva pubblicato il trattato "Opticks", il primo trattato di ottica, in cui descriveva un raggio di luce che attraversando un prisma viene separato in fasci di luce colorati. Il fenomeno era già conosciuto, anche perché è lo stesso che provoca l'arcobaleno, nel quale il prisma è sostituito dalle gocce d'acqua. Ma prima di Newton si pensava che i colori fossero generati in qualche modo dal prisma, che aveva la proprietà di colorare la luce bianca.



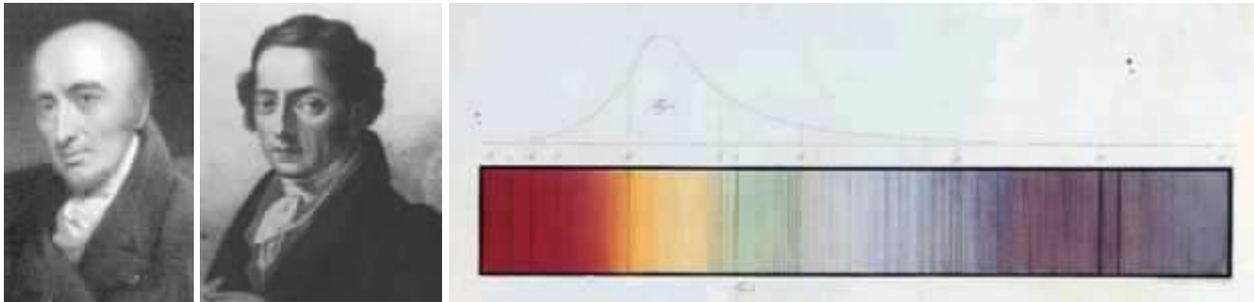
Isaac Newton (1642-1727) in un ritratto di Sir Godfrey Kneller (Farleigh House, Farleigh Wallop, Hampshire) a destra immagine tratta dall'edizione di Opticks del 1721, fonte: [Storia della spettroscopia](#), INFN Bari

Il grande scienziato inglese nei suoi esperimenti utilizzò lenti convergenti e riuscì a riunire i fasci di luce colorata ricreando la luce bianca. E così Newton fu il primo a capire che la luce bianca non è altro che la somma delle diverse componenti cromatiche della luce solare, così come vengono avvertite dal nostro occhio. Quando il fascio di luce diffusa da un prisma viene proiettato su una parete si ottiene una banda colorata simile all'arcobaleno, dal violetto al rosso: questa banda, che rappresenta l'immagine della luce solare, venne chiamata **spettro** (dal latino *spectrum*, che significa "immagine, visione") e i suoi colori sono detti colori spettrali.



La scoperta delle righe

Nel 1802 il chimico inglese **Wollaston** si accorse per primo della presenza di sette **righe** scure nello spettro del Sole e dei pianeti, righe che non erano state viste neppure da Newton. L'osservazione che si trovavano sempre nella stessa posizione fece supporre che le righe scure fossero una proprietà della luce emessa dal Sole. Inoltre il fatto che la loro posizione corrispondesse a quella delle righe scure osservate nello spettro dei pianeti confermò la supposizione che i pianeti emettessero solamente luce solare riflessa. Un grande contributo allo studio degli spettri venne dall'ottico tedesco **Fraunhofer**, che nel 1814 misurò oltre 500 righe scure nella luce solare diffusa; le righe più importanti vennero indicate con le lettere dalla A alla G, lettere che vengono tuttora usate nello studio dello spettro solare.

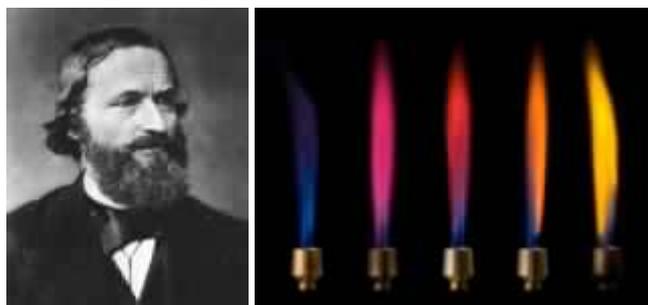


da sinistra William Wollaston (1766-1828) e Joseph von Fraunhofer (1787-1826)
a destra lo spettro del sole nel disegno originale di Fraunhofer
fonte: [I pionieri della Spettroscopia](#) di Pierfranco Bellomo

Quando ci si accorse che riscaldando alcuni materiali venivano prodotti spettri con righe a volte scure, a volte luminose, furono molti gli scienziati che iniziarono a studiare gli spettri in laboratorio. Ogni sostanza produceva uno spettro con righe caratteristiche, e naturalmente furono i chimici i primi a beneficiare di un metodo che dava la possibilità di indagare le proprietà dei componenti elementari della materia. Spettri di sostanze contenenti sodio presentavano due righe ravvicinate nel giallo uguali alle righe D di Fraunhofer, ma nessuno sapeva da dove venissero gli spettri, e tanto più che cosa significassero quelle righe.

Le tre leggi di Kirchhoff

Il contributo più significativo alla spettroscopia venne dal fisico tedesco **Kirchhoff**, che nel 1859 enunciò tre leggi empiriche sui tre tipi di spettri allora conosciuti. Insieme al fisico Bunsen, che aveva ideato un fornello (il becco Bunsen) che sarebbe diventato uno degli strumenti simbolo della chimica, analizzò una fiamma contenente sali di litio e di altri elementi, facendo poi passare la luce sole attraverso di essa.

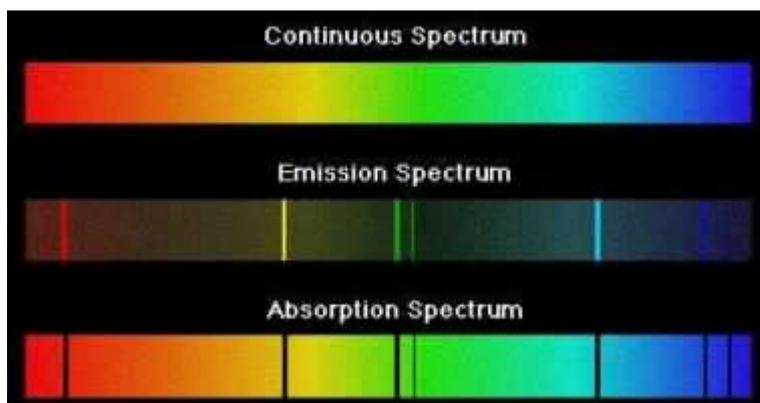


Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887);
fiamme al becco Bunsen di potassio (colore viola),
litio (porpora), stronzio (rosso), calcio (arancio) e sodio (giallo)

Le tre leggi di Kirchhoff sono le seguenti:

1. un corpo denso (solido, liquido o gas ad alta pressione) incandescente genera uno **spettro continuo**.
2. un gas rarefatto (quindi a bassa pressione) incandescente genera uno **spettro ad emissione**, ovvero un debolissimo spettro continuo con specifiche righe più brillanti del fondo.

3. una sorgente che emette uno spettro continuo e un gas freddo posto davanti ad essa generano uno **spettro di assorbimento**, ovvero uno spettro continuo con specifiche righe scure, che corrispondono alle righe brillanti dello stesso gas incandescente.



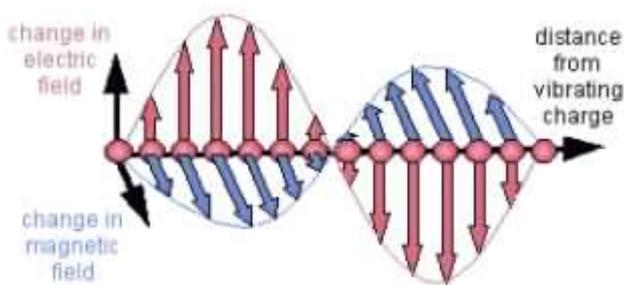
fonte: [M. Rieke, Fundamentals of Astronomy](#)

3. che cos'è la luce?

Nel 1859 il fisico scozzese **Maxwell** aveva enunciato in un'unica teoria le leggi dell'Elettromagnetismo. Per la fisica classica fu un'altra notevole opera di unificazione, paragonabile alle leggi della meccanica di Newton. Infatti non solo Maxwell aveva unificato i fenomeni elettrici e magnetici, fino ad allora ritenuti del tutto separati, ma nelle sue formule entrava della porta di servizio anche l'ottica, una branca isolata della fisica. Infatti, in presenza di fenomeni elettrici e magnetici, c'era qualcosa che si propagava nello spazio, guarda caso ad una velocità identica a quella della luce.

Si chiariscono le idee sulla luce

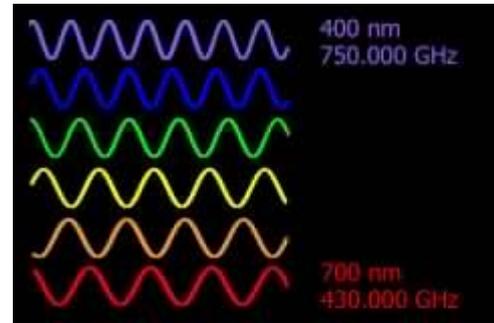
A questo punto divenne possibile rispondere alla domanda "Che cos'è la luce?". La **luce** è una propagazione di campi elettrici e magnetici oscillanti. Ogni variazione del campo elettrico produce una variazione del campo magnetico e viceversa, variazione che si propaga come un'**onda trasversale** alla velocità costante di circa 300000 km/s. Per fare un esempio è come osservare un lago sul quale si trova un tappo di sughero; facendo oscillare su e giù il tappo di sughero si crea un'onda di altezza proporzionale all'ampiezza di movimento del tappo. Questa onda che si propaga per tutta la superficie può trasmettere l'identico movimento oscillatorio ad un altro tappo fermo e galleggiante.



onda elettromagnetica, fonte: www.physics.uiowa.edu
a destra James Clerk Maxwell (1831-1879), foto www-gap.dcs.st-and.ac.uk

Nei fenomeni ondulatori trasversali la **lunghezza d'onda** (λ) è la distanza tra due creste, o due valli, successive, mentre la **frequenza** (ν) è il numero di oscillazioni nell'unità di tempo. Per la meccanica classica l'energia trasportata da un'onda dipende dalla sua **ampiezza** (A), ovvero l'altezza di una cresta rispetto all'asse di propagazione. Inoltre se l'onda si propaga con **velocità** v, vale sempre la relazione fondamentale $\lambda = v / \nu$.

Il **colore** che i nostri occhi avvertono dipende dalla lunghezza d'onda della luce ricevuta. Nel caso della luce la velocità (indicata con la lettera c) è costante, quindi la relazione $\lambda = c / \nu$ implica che lunghezza d'onda e frequenza sono inversamente proporzionali: quando una raddoppia l'altra si dimezza. Questo significa che il colore dipende allo stesso modo dalla lunghezza d'onda e dalla frequenza. Per esempio la luce rossa all'estremo dello spettro ha una lunghezza d'onda di circa 700 miliardesimi di metro corrispondente ad una frequenza di 430 mila miliardi di oscillazioni al secondo. La luce violetta all'altro estremo ha una lunghezza d'onda di 400 miliardesimi di metro e una frequenza di 750 mila miliardi di oscillazioni al secondo. La luce dei colori intermedi avrà dal rosso al violetto frequenza crescente e lunghezza d'onda decrescente.



Naturalmente i nostri occhi non ricevono sempre luce **monocromatica** (ovvero fasci di luce di una sola frequenza, come accade nei LASER): l'esperienza comune è vedere luce mescolata di diverse lunghezze d'onda. In tal caso, pur essendo luce e suono entrambi fenomeni ondulatori, l'occhio è un ricettore che non si comporta come l'orecchio. Nel suono avvertiamo e possiamo distinguere suoni diversi che si sommano, mentre i nostri occhi interpretano qualunque miscela come un singolo colore, tanto che non siamo in grado di distinguere una somma di luce gialla e blu dalla corrispondente luce monocromatica verde. Ecco da dove vengono tutti quei colori che in natura non esistono: il bianco, i marroni, i porpora, i colori pastello, sono tutti colori, chiamati "non spettrali", che i nostri occhi generano a partire dalle infinite miscele di colori spettrali.

Lo spettro elettromagnetico

Le formule di Maxwell non ponevano limiti alle lunghezze d'onda, quindi in teoria doveva esistere una serie di altre radiazioni, dette **onde elettromagnetiche**. Alcune di queste erano già state osservate: studiando gli spettri con un termometro, Herschel aveva scoperto nel 1800 che non solo c'era un aumento di temperatura dal rosso al violetto, ma che veniva rilevato del calore anche nella regione invisibile detta *infrarosso*, cioè "sotto il rosso", e; più tardi Rayleigh scoprì che esisteva qualcosa oltre il violetto, nella regione detta *ultravioletto*, cioè "al di là del violetto". La conferma delle ipotesi di Maxwell venne fatta nel 1886 da Hertz, che scoprì le onde radio (dette anche hertziane) di lunghezza d'onda assai superiore rispetto alla luce visibile. Quindi la luce che i nostri occhi avvertono è solo una piccola parte di tutte le radiazioni possibili. Così come in uno spettro osserviamo la luce in ordine di frequenza (o di lunghezza d'onda), così lo **spettro elettromagnetico** è formato mettendo in ordine tutte le radiazioni elettromagnetiche, dalle onde lunghe di bassa frequenza alle onde brevissime di altissima frequenza.

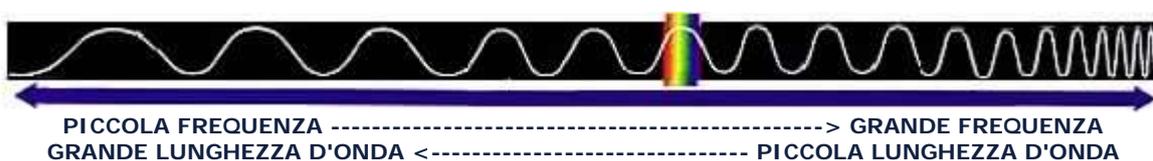
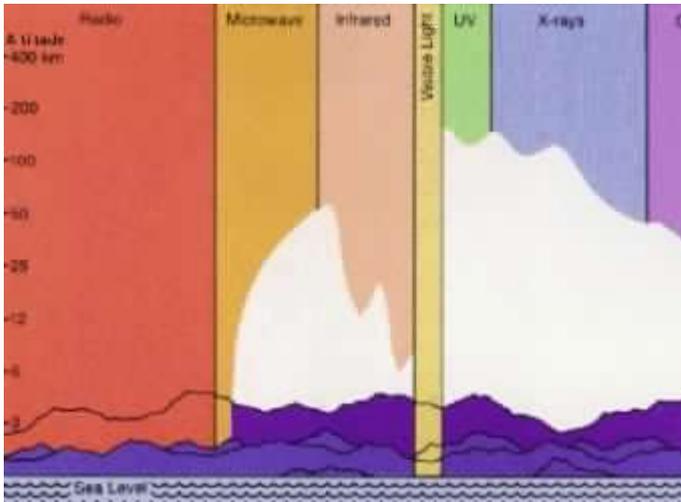


immagine originale: [Osservatorio di Parigi/LESIA](#)

Le varie regioni, dalla banda radio vengono definite in base a come le misuriamo o al meccanismo che origina le radiazioni. I confini tra una banda e l'altra non sono definiti univocamente, e la classificazione e le divisioni interne delle regioni dipendono spesso dal campo di studio o di applicazione.



L'assorbimento delle radiazioni elettromagnetiche da parte dell'atmosfera terrestre
 fonte: [NASA Goddard Space Flight Center](https://www.nasa.gov/goddard)

BANDA	LUNGHEZZA D'ONDA	FREQUENZA
radio	oltre 10^{-2} m	meno di 10^{10} Hz
microonde	da 10^{-2} a 10^{-4} m	da 10^{10} a 10^{12} Hz
infrarosso	da 10^{-4} a 10^{-6} m	da 10^{12} a 10^{14} Hz
luce visibile	da $7 \cdot 10^{-7}$ a $4 \cdot 10^{-7}$ m	da $4 \cdot 10^{14}$ a $7 \cdot 10^{14}$ Hz
ultravioletto	da 10^{-7} a 10^{-8} m	da 10^{15} a 10^{16} Hz
raggi X	da 10^{-8} a 10^{-12} m	da 10^{16} a 10^{20} Hz
raggi γ	meno di 10^{-12} m	oltre 10^{20} Hz

L'atmosfera terrestre premette solo alla luce visibile di raggiungere completamente la superficie terrestre. Possono raggiungere il suolo una parte degli ultravioletti (quelli che ci abbronzano) e alcune frequenze a microonde e nell'infrarosso. Gran parte delle onde radio vengono riflesse dalla bassa atmosfera, fenomeno utilizzato dall'uomo per comunicare a distanze intercontinentali, mentre onde ad altissima frequenza, letali per la vita, non riescono per nostra fortuna a raggiungere la superficie della Terra.

4. lo spettro continuo

Noi sappiamo che un corpo caldo emette radiazione, la cui intensità cresce all'aumentare della temperatura, ma oltre all'aumento di intensità notiamo che l'oggetto riscaldato cambia progressivamente colore. Quando un fabbro riscalda un pezzo di ferro, prima vengono emessi raggi infrarossi (che ci fanno avvertire calore), poi aumentando la temperatura il ferro diventa rosso scuro e poi sempre più chiaro verso il giallo. La luce di un arco voltaico, che raggiunge una temperatura molto più elevata, ha un colore bianco-azzurro e addirittura emette raggi ultravioletti, per cui un saldatore al lavoro deve proteggere i suoi occhi con lenti speciali per evitare danni permanenti alla retina.



La radiazione di corpo nero

La prima legge di Kirchhoff afferma che riscaldando un solido, un liquido o un gas denso, viene emessa una radiazione che genera uno spettro continuo. Quindi la radiazione è formata da un'insieme di onde elettromagnetiche di diverse lunghezze d'onda. I fisici scoprirono che in condizioni particolari tutti i corpi diventano rossi e successivamente cambiano colore alla stessa temperatura. Valgono in questo caso due leggi scoperte verso la fine dell'Ottocento:

$$\text{Legge di Stefan (1879): } E = \text{costante} \cdot T^4$$

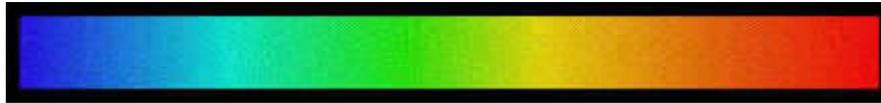
$$\text{Legge di Wien (1896): } \lambda_{\text{max}} = \text{costante} / T$$

- la legge di Stefan descrive la dipendenza dell'emissione di radiazione dalla temperatura: aumentando la temperatura l'energia emessa aumenta notevolmente (per esempio se si raddoppia la temperatura l'energia emessa aumenta di ben 16 volte);
- la legge di Wien specifica la lunghezza d'onda a cui cade il massimo di emissione, confermando l'esperienza quotidiana che più un corpo è caldo più il suo colore va dal rosso verso il bianco-azzurro.



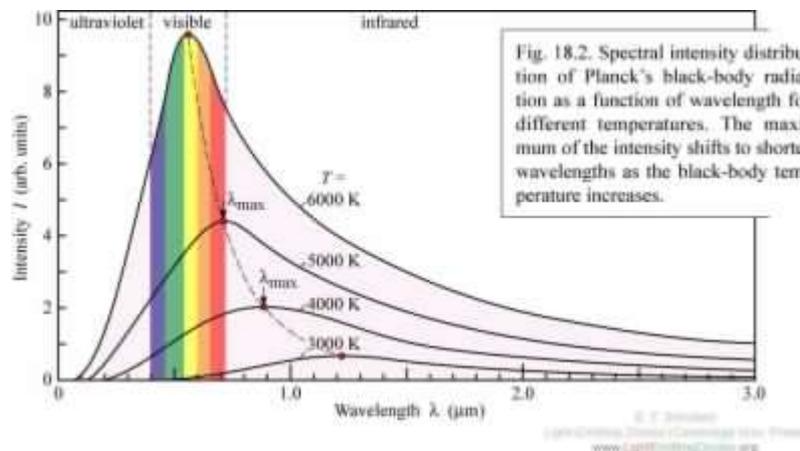
Ma quali sono le condizioni particolari richieste? La radiazione emessa dipende solo dalla temperatura quando c'è *equilibrio termodinamico tra radiazione e materia*, e in questo caso questo oggetto ideale viene chiamato **corpo nero**. Sembra strano che un corpo che emetta radiazioni abbia questo nome, ma la spiegazione è semplice. Noi vediamo neri quegli oggetti che assorbono la luce ricevuta senza rifletterla, come ben sanno i possessori di auto nere parcheggiate sotto un rovente sole estivo... Allo stesso modo un corpo nero è in grado di assorbire completamente radiazioni elettromagnetiche di qualunque frequenza. Un buon esempio di radiazione di corpo nero è la luce emessa dal carbone ardente o quella che esce da un piccolo foro in una parete di un forno.

Quindi un **corpo nero** è definito come un corpo a temperatura uniforme in cui la radiazione è in equilibrio termodinamico con la materia. La radiazione emessa ha uno spettro continuo e l'intensità specifica ad ogni lunghezza d'onda dipende solo dalla temperatura.



La legge di Planck

Se si osserva il grafico delle frequenze presenti nelle radiazioni emesse da un corpo incandescente, si osserva sempre una distribuzione "a campana". La maggior parte dell'emissione intorno alla lunghezza d'onda massima è descritta dalla legge di Wien, diminuendo gradatamente a frequenze minori e notevolmente a frequenze maggiori. Ogni curva corrisponde ad una definita temperatura: più è alta la temperatura, più aumenta l'area sottostante che misura la quantità di energia emessa (data dalla legge di Stefan) e più la lunghezza d'onda massima (data dalla legge di Wien) diminuisce e aumenta la frequenza corrispondente.



distribuzione spettrale della radiazione di corpo nero
 fonte: www.lightemittingdiodes.org

Qui però sorge un piccolo problema: questa distribuzione non è spiegabile con le previsioni teoriche della fisica classica. Ma come spesso accade nella scienza sono proprio "i piccoli dettagli che non tornano" ad aprire nuove strade, grazie alla curiosità e alla tenacia di chi formula nuove ipotesi per per fare "quadrare i conti". Il problema della distribuzione della radiazione di corpo nero venne risolto dal fisico tedesco Planck, e nel riquadro trovate i dettagli.



Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), www.nobelprize.org

LA DISTRIBUZIONE DELLA RADIAZIONE DI CORPO NERO

Max Planck considerò il corpo nero come una serie di oscillatori in risonanza, ognuno dei quali ha energia finita multipla della frequenza di radiazione. Ma l'ipotesi necessaria per poter spiegare la distribuzione di radiazione era che le frequenze di oscillazione non potessero assumere valori qualunque. L'interazione tra radiazione e materia all'interno di un corpo nero può avvenire solo trasferendo quantità finite di energia multiple della frequenza per una costante $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$, detta **costante di Planck**.

$$\text{Legge di Planck: } I(\nu) = \frac{2 h \nu^2}{[c^3 (e^{h\nu/kT} - 1)]}$$

- Il picco dell'emissione segue la legge dello spostamento di Wien:
- L'intensità totale emessa è data dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma T^4$$

σ (costante di Stefan-Boltzmann) = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ J m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ s}^{-1}$

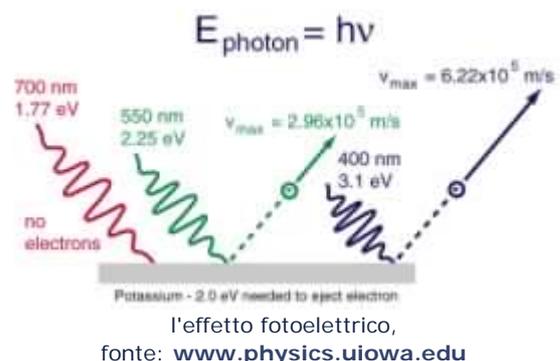
Per spiegare la distribuzione della radiazione di corpo nero Planck dovette ammettere l'ipotesi che l'energia potesse essere scambiata solo in pacchetti detti **quanti**. Questa ipotesi, che non ha effetti a livello macroscopico a causa del valore minimo della costante di Planck, ha importanti conseguenze a livello atomico. Portando avanti questa idea Planck gettò le basi della **meccanica quantistica**, la teoria anti-intuitiva che ci consente di spiegare quello che accade nell'infinitamente piccolo.

5. uno sguardo dentro l'atomo

Abbiamo visto che uno spettro continuo viene emesso quando un corpo incandescente è simile ad un corpo nero. E le righe? Per quale motivo, quando prendiamo in considerazione gas rarefatti incandescenti, nello spettro vediamo solo alcune righe luminose? Ogni riga corrisponde ad una determinata lunghezza d'onda? Cosa fa una sostanza a scegliere quale frequenza di luce emettere? Per rispondere a queste domande occorre prima fare un viaggio del tempo, agli inizi del secolo scorso, per dare insieme a quella generazione di fisici uno sguardo dentro l'atomo.

L'effetto fotoelettrico

Alcuni metalli emettono elettroni quando vengono illuminati. Questo effetto viene utilizzato negli ascensori: un fascio di luce provoca l'emissione di elettroni (e quindi la generazione di corrente elettrica) nella cellula fotoelettrica posta sulle porte; quando qualcuno si pone tra le porte il fascio di luce viene interrotto, e con questo la generazione di energia. Ma anche qui, come nel caso del corpo nero, emerge un problema. Per la fisica classica aumentando l'intensità della luce dovrebbe aumentare l'energia (e quindi la velocità) degli elettroni espulsi, ma la cosa non avviene: vengono emessi più elettroni, ma la loro velocità è la stessa. Inoltre sotto una certa frequenza di luce, anche aumentandone l'intensità, non c'è produzione di elettroni.



L'effetto fotoelettrico venne risolto da Einstein in un suo articolo del 1905, anno in cui, a soli 26 anni, produsse anche l'articolo in cui veniva alla luce la teoria della relatività ristretta, e nel riquadro trovate i dettagli.



Albert Einstein
(1879-1955),

www.nobelprize.org

LA SPIEGAZIONE DELL'EFFETTO FOTOELETTRICO

Albert Einstein utilizzò l'ipotesi di Planck e il risultato fu l'affermazione che la luce è composta di particelle, chiamate **fotoni** (dal greco φως, φोटος che significa "luce"). L'energia di un singolo fotone è proporzionale alla frequenza tramite la costante introdotta da Planck nella teoria del corpo nero ($h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$):

$$E_{\text{fotone}} = h \nu$$

L'effetto fotoelettrico è quindi descritto come un insieme di urti tra i fotoni e gli elettroni del metallo, e vengono facilmente spiegati gli effetti inspiegabili per la meccanica classica:

- Ad ogni urto un fotone cede la sua energia ad un elettrone del metallo. Se l'energia è superiore ad una soglia minima, l'elettrone viene espulso.
- L'energia cinetica $E = \frac{1}{2} m v^2$ dell'elettrone estratto è provocata dall'energia $E = h \nu$ del fotone, quindi la velocità dell'elettrone dipende solo dalla frequenza del fotone.
- L'intensità di un raggio luminoso dipende solo dal numero di fotoni. L'aumento dell'intensità di un raggio monocromatico, provocando un numero maggiore di urti, estrae più elettroni, che avranno tutti la stessa velocità legata alla frequenza.
- Se E_{min} è l'energia minima di soglia, i fotoni di frequenza $\nu < E_{\text{min}} / h$ non potranno mai provocare l'espulsione di elettroni, neppure aumentandone a piacere l'intensità.

Einstein dimostrò che si può considerare la luce come composta di **fotoni**. L'energia di un singolo fotone è proporzionale alla frequenza tramite la costante di Planck, molto piccola a livello macroscopico (dove le energie possono praticamente considerarsi continue), ma determinante a livello microscopico. Fu proprio per la spiegazione dell'effetto fotoelettrico, e non per la relatività, che Einstein vinse il premio Nobel per la fisica. La dimostrazione della natura corpuscolare della luce pose fine alla diatriba **onda o particella**: entrambe le descrizioni erano valide!

Il modello dell'atomo

Nei primi anni del novecento si pensava all'atomo come un piccolo sistema planetario, con gli elettroni a carica negativa che ruotavano intorno al nucleo positivo. Ma per la meccanica classica un atomo di questo tipo non è stabile, perché un elettrone in orbita emette radiazione e perdendo energia deve prima o poi cadere nel nucleo. Per superare il problema nel 1913 il fisico danese Bohr presentò un nuovo modello atomico, e nel riquadro trovate i dettagli.



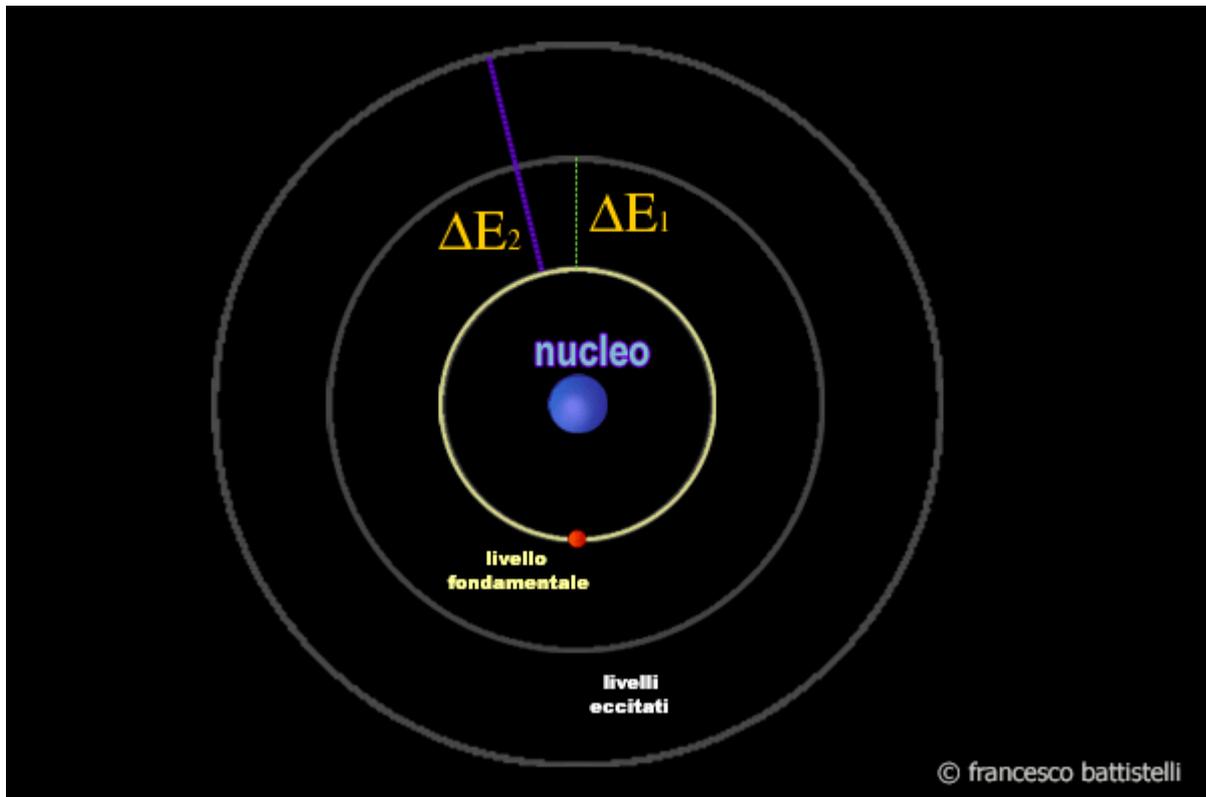
Niels Henrik David Bohr
(1885-1962),
www.nobelprize.org

IL MODELLO DELL'ATOMO DI IDROGENO

Niels Bohr applicò al modello planetario dell'atomo la meccanica quantistica e la relazione $E = h \nu$. Nell'atomo di idrogeno (l'atomo più semplice, costituito da un protone e da un elettrone) sono permesse solo alcune orbite stazionarie, nelle quali l'elettrone è stabile perché non irradia energia. In particolare:

- Sono possibili solo le orbite con momento angolare: $m v r = n h / 2\pi$ (dove n è un numero intero positivo)
- Ad ogni orbita (o stato stazionario) corrisponde una determinata energia. Sono possibili solamente le energie $E = (1/n^2) E_0$, alle quali corrispondono le orbite $r = n^2/a_0$ vale $E_0 = -13,61$ eV; a_0 (detto raggio di Bohr) = $0,53$ Å
- Il passaggio di un elettrone da uno stato all'altro richiede un'energia $\Delta E = h \nu$

Nel modello di Bohr l'elettrone si può trovare solo in alcune determinate orbite, corrispondenti ciascuna ad una determinata energia. L'elettrone tende a occupare sempre l'orbita libera più in basso (detta **stato fondamentale**), saltare in un'orbita superiore (**stato eccitato**) ha un "costo" di energia multiplo della costante di Planck.



6. dove nascono le righe

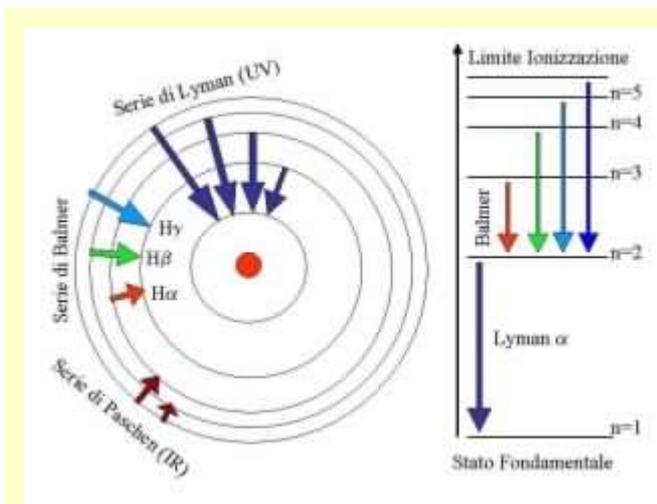
Nella teoria atomica di Bohr abbiamo visto che il passaggio di un elettrone da uno stato all'altro richiede un'energia $\Delta E = h \nu$. Dove trova l'elettrone l'energia "giusta" che gli serve per saltare in un'orbita più elevata?

Le righe e i salti degli elettroni

Uno dei meccanismi che permette di salire su orbite più elevate è la cattura e l'assorbimento di un fotone di energia ΔE . Allo stesso modo quando un elettrone scende in un'orbita meno energetica cede un fotone per l'energia corrispondente ΔE . Ma abbiamo visto che l'energia del fotone è proporzionale alla sua frequenza! Questo significa che per ogni possibile salto dall'elettrone può venire emesso o assorbito un fotone della corrispondente frequenza $\nu = \Delta E / h$.

- alcuni esempi di generazione degli spettri di emissione e assorbimento

Quindi un fotone che ha la giusta frequenza permette all'elettrone di salire in un'orbita superiore. Allo stesso modo quando un elettrone ritorna in un'orbita inferiore emette un fotone della frequenza corrispondente. Quando vediamo una **riga di assorbimento** vuole dire che i fotoni della corrispondente lunghezza d'onda sono stati assorbiti; quando vediamo una **riga di emissione** vuole dire che sono stati emessi i fotoni di quella lunghezza d'onda. Per questo le righe negli spettri di emissione e di assorbimento corrispondono perfettamente: ogni riga corrisponde ad un salto tra due orbite, e ogni salto richiede sempre la stessa energia!



Le serie dell'atomo di idrogeno
fonte: [Spettroscopia](#)
(Società Astronomica Schiaparelli)

LE SERIE DI RIGHE DELL'ATOMO DI IDROGENO

Poiché ad ogni frequenza di un fotone corrisponde una specifica riga verticale nello spettro, nello spettro dell'idrogeno potremo vedere solo determinate righe e non altre.

- Le righe visibili nell'ottico (tra le quali le righe **H- α** , **H- β** e **H- γ** scoperte da Ångström nel 1862) fanno parte della cosiddetta **serie di Balmer** e corrispondono ai salti che vanno dal secondo livello ($n=2$) ai superiori.
- Naturalmente ci sono righe anche nella parte invisibile ai nostri occhi, come la **serie di Lyman** nell'ultravioletto, righe energetiche che corrispondono ai salti dal livello fondamentale ($n=1$) ai superiori, e la **serie di Paschen** nell'infrarosso, le cui righe corrispondono ai salti dal terzo livello.

Se per esempio prendiamo una nube di idrogeno, l'atomo più semplice, avremo miliardi di atomi. I salti possibili tra l'orbita fondamentale e le orbite eccitate sono tanti, perciò in generale potrà essere assorbita ed emessa radiazione in tutte quelle frequenze che corrispondono a differenze di energia tra i livelli, sempre che sia a disposizione l'energia necessaria al salto.

I TRENT'ANNI CHE SCONVOLSERO LA FISICA



Max Planck, Albert Einstein e Niels Bohr
www.nobelprize.org

Il fisico George Gamow definì i primi tre decenni del secolo scorso *I trent'anni che sconvolsero la fisica*. Lord Kelvin a fine ottocento pensava che tutta la fisica era ben conosciuta e che tutto quello che c'era da sistemare erano solo alcuni piccoli "dettagli". Ma il lavoro di Planck, Einstein e Bohr, mentre risolveva alcuni di quegli scomodi dettagli, stava aprendo una strada completamente nuova verso l'infinitamente grande l'infinitamente piccolo. Quando poi ci si accorse che il modello di Bohr non funzionava per gli atomi più complessi dell'idrogeno, Schrödinger (1926) nella sua teoria atomica non parlò più di posizione dell'elettrone, ma solamente di probabilità di trovarlo in una determinata regione dello spazio. Il periodo si chiuse con il principio di indeterminazione di Heisenberg (1927), che dimostrò che a livello atomico non è neanche possibile misurare contemporaneamente posizione e moto o energia di qualunque particella! In tre decenni i fisici e gli astronomi avrebbero dovuto lasciare da parte, insieme all'onnipotenza della fisica classica, l'antico sogno di un Universo pensato come un prefetto orologio!

Per ogni elemento la sua firma

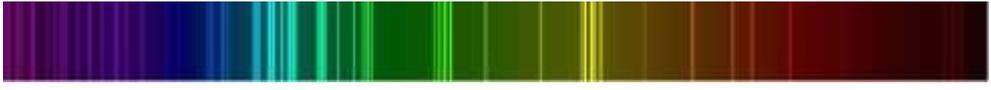
Il calcolo teorico delle righe di emissione dell'idrogeno e dell'elio ionizzato in base al modello di Bohr corrisponde a quanto si osserva nei loro spettri.



Lo spettro dell'idrogeno nel visibile (si nota nel rosso la cosiddetta riga **H- α** , responsabile del colore delle nebulose),
fonte: [Spectra of Gas Discharges](#), Joachim Köppen – Univ. Strasbourg/IlkKirch/Kiel

Nel caso di atomi più pesanti abbiamo più elettroni e più orbite possibili, quindi aumenta anche il numero e la complessità delle righe. Possiamo quindi dire che le righe di emissione e di assorbimento sono una specie di impronte digitali degli elementi chimici. Ecco gli spettri di alcuni elementi chimici nel visibile. Si notano la forte riga nel giallo del sodio e le righe nel viola del potassio, che avevamo visto colorare la fiamma dei corrispondenti sali:

carbonio	
azoto	
ossigeno	

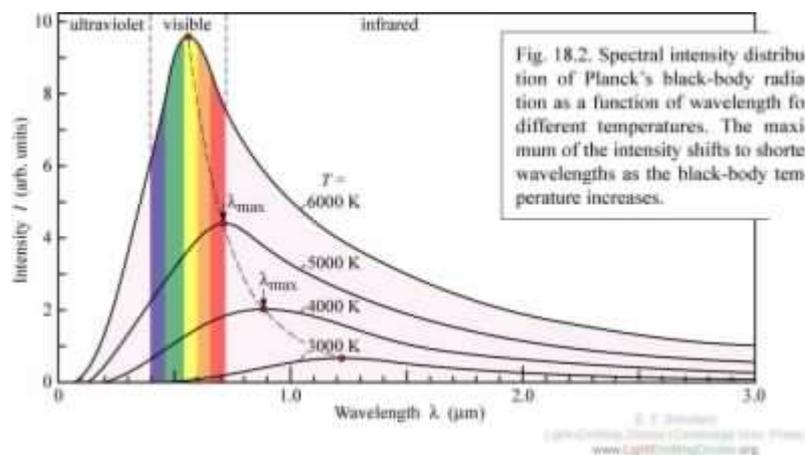
sodio	
potassio	
calcio	
ferro	
fonte: Spectra of Gas Discharges , Joachim Köppen – Univ. Strasbourg/IIIkirch/Kiel	

Nel caso delle molecole le righe sono molto più accostate e diventano vere e proprie bande; nei solidi e nei corpi densi le righe si sovrappongono tra loro dando luogo ad una distribuzione spettrale continua.

Quindi, attraverso l'analisi della luce ricevuta e l'osservazione dello spettro, abbiamo un metodo per riconoscere la composizione chimica di una sostanza "a distanza". E' possibile, smentendo le parole di Auguste Comte, applicare questo metodo per conoscere la composizione chimica degli astri?

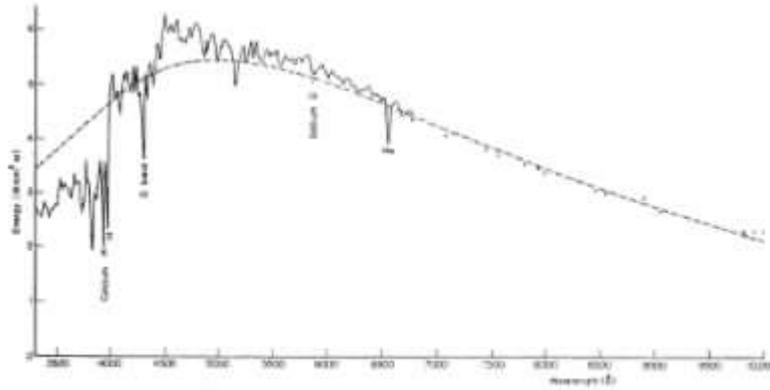
7. la radiazione di corpo nero in astronomia

La possibilità di analizzare a distanza le caratteristiche di ciò che vogliamo studiare rende la spettroscopia essenziale in astronomia, dove la conoscenza dipende dalla "luce" ricevuta. Per un corpo nero ideale ad ogni curva corrisponde una ben definita temperatura... ma esistono sorgenti celesti assimilabili a "corpi neri"?



distribuzione spettrale della radiazione di corpo nero
 fonte: www.lightemittingdiodes.org

La risposta è affermativa, diverse sorgenti astronomiche emettono radiazione con caratteristiche simili a quella di corpo nero. Una di queste è la stella più vicina a noi, il Sole. Nel grafico sottostante si vede che la curva di radiazione misurata corrisponde abbastanza ad una curva di radiazione di corpo nero, malgrado la discordanza nelle regioni con lunghezza d'onda inferiore a $4000 \text{ \AA} = 400 \text{ nm}$.



LO SPETTRO DI RADIAZIONE DEL SOLE

La curva di radiazione ricevuta dal Sole è indicata con una la linea continua nella quale si notano i "buchi" corrispondenti alle righe scure dello spettro; la linea tratteggiata è la curva di radiazione di corpo nero per una temperatura prossima a 5800 K; fonte: <http://spettroscopia.uai.it>

Perché il sole è un corpo nero? La radiazione stellare è prodotta al centro dell'astro, dove avvengono le reazioni nucleari. L'energia del sole liberata all'istante sarebbe enorme, ma un raggio luminoso prima di raggiungere la superficie solare per poi disperdersi nello spazio, urta con gli atomi per migliaia di miliardi di miliardi di volte. Pur viaggiando a 300.000 chilometri al secondo i fotoni impiegano diverse migliaia di anni per emergere in superficie, e a questo punto la distribuzione delle frequenze approssima bene la distribuzione della radiazione di corpo nero.

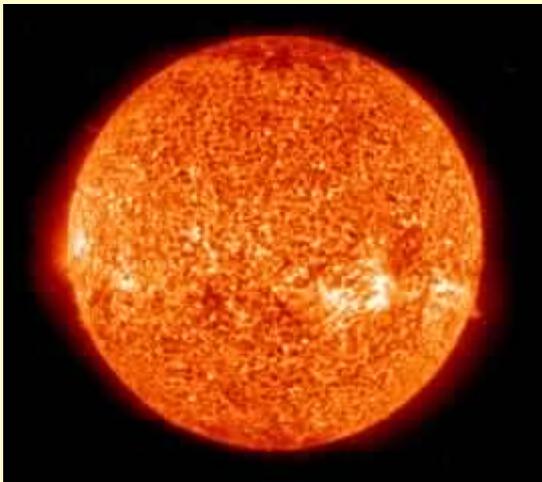


immagine del Sole dalla sonda [SOHO](#)

IL SOLE COME CORPO NERO

- Raggio del Sole:
 $R = 6,96 \cdot 10^6 \text{ km}$
- Cammino libero medio senza urti all'interno del Sole:
 $l = 0,5 \text{ cm}$
- Passi necessari perché un fotone emerga alla superficie:
 $N = 3 R^2 / l^2 = 6 \cdot 10^{22}$
- Tempo impiegato da un fotone per raggiungere la superficie:
 $t = 3 R^2 / l c = 3 \cdot 10^4 \text{ anni}$
- Temperatura superficiale del Sole:
 $T = \text{circa } 5800 \text{ K}$
- Luminosità del Sole (*legge di Stefan Boltzmann*):
 $L = 4 \pi R^2 \sigma T^4 = 3,9 \times 10^{26} \text{ W}$

Con una [applet Java](#) è possibile osservare come cambia la curva della radiazione di corpo nero in base alla temperatura, e qual è il colore apparente che vedono i nostri occhi. Si nota chiaramente che la curva corrispondente alla temperatura del nostro Sole emette gran parte della sua energia come fotoni della luce visibile, e che la luce corrispondente appare bianca. Non è certo un caso che i nostri occhi si siano evoluti imparando a raccogliere la maggior parte della radiazione solare che giunge sulla Terra!

Lo studio della distribuzione delle frequenze in uno spettro continuo ci permette di conoscere la temperatura e non solo questo. Infatti dalle misurazioni di luminosità a diverse frequenze è possibile ricostruire lo spettro con la legge di Planck, trovare la temperatura superficiale tramite la legge di Wien e calcolare l'energia luminosa con la legge di Stefan-Boltzmann. Se con altri metodi conosciamo la distanza della sorgente, dalla luminosità apparente si ricava la luminosità assoluta, e dato che questa dipende sia dall'energia luminosa sia dalla superficie, abbiamo trovato un ottimo metodo per stimare le dimensioni delle stelle!

Hertzsprung e Russell hanno distribuito le stelle nel loro diagramma (detto **diagramma H-R**) proprio in base alla temperatura e alla luminosità assoluta. Si nota la **sequenza principale**, ovvero la diagonale che va da piccole stelle rosse, con curve di corpo nero corrispondenti a temperature di 3000 K, fino a grandi e caldissime stelle azzurre, con curve di corpo nero corrispondenti a temperature di 30000 K. Nella sequenza principale è presente anche il nostro Sole, una stella *media* in tutti i sensi. Esistono anche tipologie di stelle al di fuori della sequenza principale, in cui le dimensioni non sono proporzionali alla temperatura, come le nane bianche molto calde e le giganti e supergiganti più fredde.

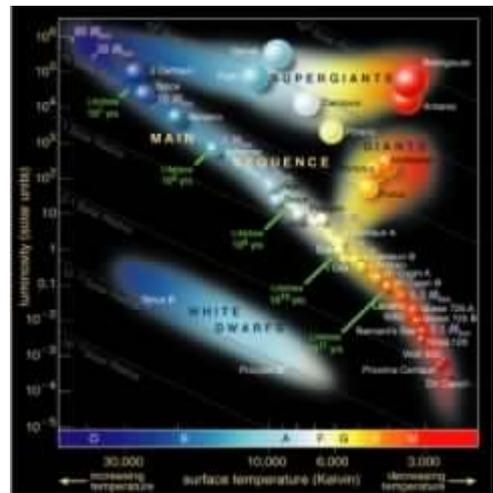


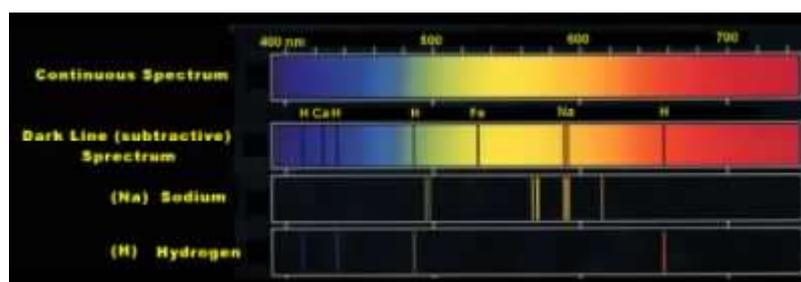
Diagramma temperatura-luminosità di Hertzsprung e Russell

8. lo studio delle righe in astronomia

In chimica lo studio degli spettri ad emissione o di assorbimento ci permette di conoscere gli ingredienti della sostanza che osserviamo. Come si formano le righe negli spettri della luce che ci proviene dal cielo?

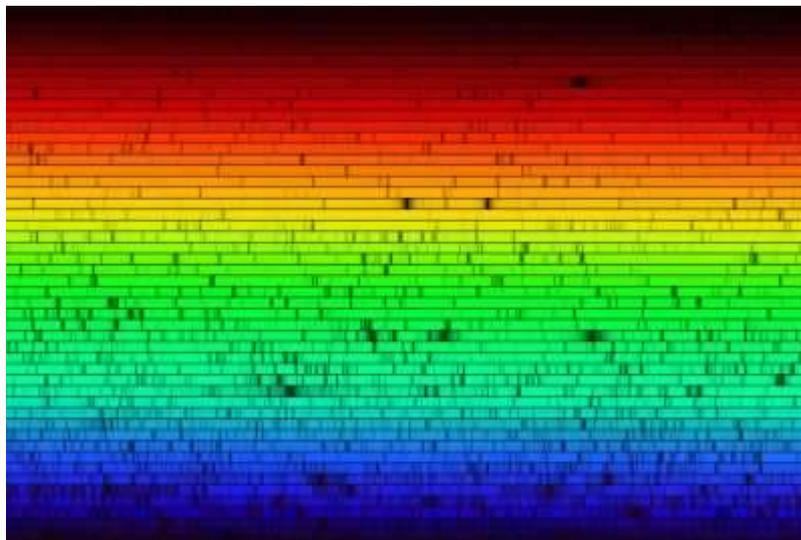
Gli spettri di assorbimento

Le righe scure vengono generate per assorbimento o per diffusione (*scattering*) da parte di gas rarefatti che si trovano nello spazio tra la sorgente e l'osservatore, compresi i gas che fanno parte dell'atmosfera di una stella. Nel 1849 Foucault (proprio quello del famoso pendolo che dimostrava pubblicamente la rotazione della Terra) riconobbe la doppia riga gialla del Sodio nello spettro solare (corrispondente alla riga D di Fraunhofer).



Le righe nere dello spettro solare confrontate con gli spettri di emissione del sodio e dell'idrogeno
 fonte: R.C. Brill, <http://honolulu.hawaii.edu>

Nel 1868 Lockyer e Janssen scoprirono nello spettro solare alcune righe che attribuirono ad un elemento sconosciuto: questo nuovo elemento venne chiamato **Elio** (da Ηλιος, il nome greco del Sole), e soltanto in seguito venne trovato sulla Terra. Nello stesso anno il chimico svedese Ångstrom pubblicò una mappa dello spettro solare identificando l'origine chimica di ben 1.000 righe. Non furono però trovate righe appartenenti ad altri elementi sconosciuti: nel 1869 Charles Young identificò nello spettro della corona solare una riga incognita, attribuendola ad un nuovo elemento che battezzò *Coronio*. Ma in seguito si scoprì che era una riga mai vista perché generata da ferro altamente ionizzato in condizioni mai create in laboratorio.



LO SPETTRO COMPLETO DEL SOLE NEL VISIBILE
 si scorgono chiaramente la riga H-alfa (656 nm nel rosso) e la doppia riga del sodio nel giallo
 fonte: [National Optical Astronomy Observatory](#) - [NOAO](#) /[AURA](#) /[NSF](#)

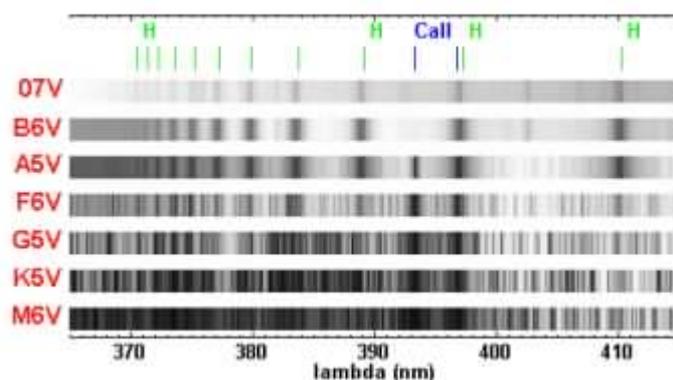
Lo spettro continuo del Sole viene generato dalla fotosfera. Tutte le righe di assorbimento che vediamo vengono generate dai gas che compongono l'atmosfera solare. Le **righe principali nel visibile** (e in particolare le righe di Fraunhofer) derivano da idrogeno, sodio, ferro, calcio e ossigeno molecolare. Naturalmente gli spettri del Sole e di tutte le stelle si estendono anche nelle altre regioni dello spettro elettromagnetico.

Le classi spettrali delle stelle

Le stelle sono state via via classificate in base alla morfologia del loro spettro, e uno dei pionieri fu Padre Angelo Secchi, che divise in 4 classi spettrali ben 4.000 stelle. Quella che viene usata correntemente è la classificazione di Harvard: le stelle sono catalogate nelle classi **O B A F G K M**, ordinate in base alla temperatura ottenuta con la legge del corpo nero. Ogni tipo è diviso in 10 sottotipi (da 0 a 9), e per memorizzare l'ordine si utilizza la frase inglese: "Oh Be A Fine Girl, Kiss Me"...

CLASSE	TEMPERATURA	DESCRIZIONE
O	36000 (O5)	Forti righe di assorbimento dell'elio ionizzato, presenza di idrogeno
B	28600 (B0)	Crescono le righe dell' idrogeno, calano le righe dell'elio. Sono visibili le righe del silicio ionizzato, dell'ossigeno e del magnesio
A	10000 (A0) 8530 (A5)	Righe della serie di Balmer dell'idrogeno, riga K del calcio ionizzato
F	7500 (F0) 6470 (F5)	Meno righe dell' idrogeno, crescono le righe del calcio ionizzato. Si vedono le righe dei metalli
G	5200 (G0)	Diminuisce l'idrogeno, la riga K del calcio si rafforza. Numerose righe di metalli neutri. il Sole appartiene alla classe G5
K	4320 (K0)	Crescono le righe dei metalli, spariscono le righe dell' idrogeno

M	3400 (M0)	Crescono le bande dell'ossido di titanio. Corrisponde al Gruppo III di Secchi
	2590 (M8)	



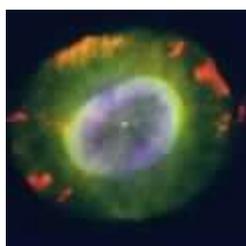
Gli spettri di stelle appartenenti a classi diverse
fonte: [Osservatorio di Parigi/ASM](#)

Esistono anche le classi **W** (stelle di Wolf-Rayet con bande larghe di idrogeno ed elio) con le sottoclassi Wc e Wn (che presentano carbonio e azoto); **R** (classe intermedia tra G ed N), **N** (il gruppo IV di Secchi con bande dei composti del carbonio) e **S** (con bande dell'ossido di zirconio).

Gli spettri ad emissione

Diversi oggetti celesti hanno forti righe di emissione, dovute a gas eccitati che a loro volta emettono fotoni a determinate frequenze. Alcune sorgenti interessanti sono le seguenti:

- Nelle **nebulose planetarie** la sorgente è una nana bianca e il gas eccitato che apparteneva alla stella produce uno spettro ad emissione per fluorescenza;
- Le **regioni H I** sono composte da idrogeno neutro, che in condizioni di bassissima densità emette una riga alla lunghezza d'onda di 21 cm; questa emissione dipende dalla *struttura iperfine* dell'idrogeno, dato che la configurazione con spin magnetici di protone ed elettrone allineati è energeticamente vantaggiosa rispetto a quella con spin opposti;
- Le **regioni H II** sono composte di idrogeno ionizzato, ovvero che ha perso l'elettrone. Il gas, quando circonda stelle molto luminose di tipo O e B, produce uno spettro ad emissione per fluorescenza;
- Gli spettri ottici dei **quasar** (che fanno parte della famiglia dei **nuclei galattici attivi**) mostrano sempre forti righe in emissione, e per questo motivo oggetti che apparentemente sembravano stelle vennero classificati come "quasi stellari".



La nebulosa planetaria
NGC 7662, fonte [HST](#)



Lo spettro ottico della nebulosa planetaria NGC 7662
autore: [Maurice Gavin](#)

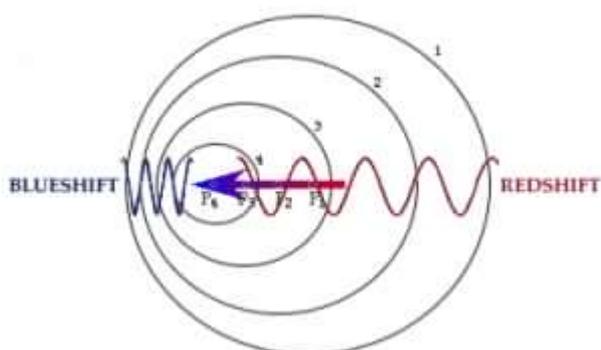
9. l'effetto Doppler in astronomia

Nel 1842 il fisico austriaco Doppler aveva studiato l'effetto di una sorgente acustica in movimento: in base alla differenza di tono possiamo sapere se una sorgente si sta avvicinando (suono più acuto) o allontanando (suono più grave) da noi.



Cristian Doppler (1803-1853)

Doppler sosteneva che ci potesse essere un effetto ottico simile, ovvero che la lunghezza d'onda della luce in un corpo in avvicinamento dovesse spostarsi verso il viola e in un corpo in allontanamento dovesse spostarsi verso il rosso. Naturalmente alle basse velocità l'effetto è trascurabile, in effetti noi vediamo la luce di un'ambulanza in movimento sempre dello stesso colore. Ma quando riceviamo la luce da sorgenti celesti abbiamo a che fare con velocità maggiori: poter sapere in qualche modo se un corpo si sta avvicinando o allontanando sarebbe molto utile, perché il moto che noi possiamo misurare con l'osservazione della posizione è solamente quello trasversale.



fonte: [Elaine Fortin](#), Harvard



Sappiamo che determinate combinazioni di righe sono specifiche di alcuni elementi chimici: se noi ritroviamo le stesse combinazioni di righe spostate verso destra o verso sinistra, significa che le corrispondenti lunghezze d'onda sono aumentate o diminuite della stessa quantità: ma questo è proprio quello che accade per effetto Doppler quando una sorgente è in movimento! Prendiamo per riferimento una sorgente stazionaria. Se in sorgenti fisicamente simili per temperatura e composizione osserviamo le stesse righe spostate verso il blu (il cosiddetto **blue shift**) possiamo dedurre che la sorgente si sta avvicinando verso di noi; se osserviamo le stesse righe

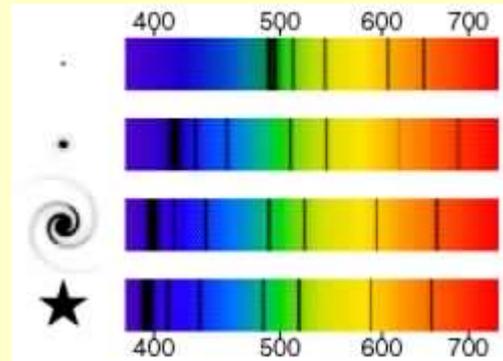
spostate verso il rosso (il cosiddetto **red shift**) possiamo dedurre che la sorgente si sta allontanando.

LA MISURA DELLE VELOCITA' RADIALI

Oltre alla direzione dello spostamento l'effetto Doppler ci dà la possibilità di misurare la velocità radiale della sorgente. Infatti questa è direttamente proporzionale allo spostamento delle righe.

- Per basse velocità vale la relazione:
$$\Delta\lambda / \lambda = v / c$$
- Se le velocità sono relativistiche vale la relazione:
$$\Delta\lambda / \lambda = v / [c (1 - (v/c)^2)^{1/2}]$$

dove v è la velocità radiale della sorgente, c è la velocità della luce, $\Delta\lambda$ lo spostamento rilevato della lunghezza d'onda λ .

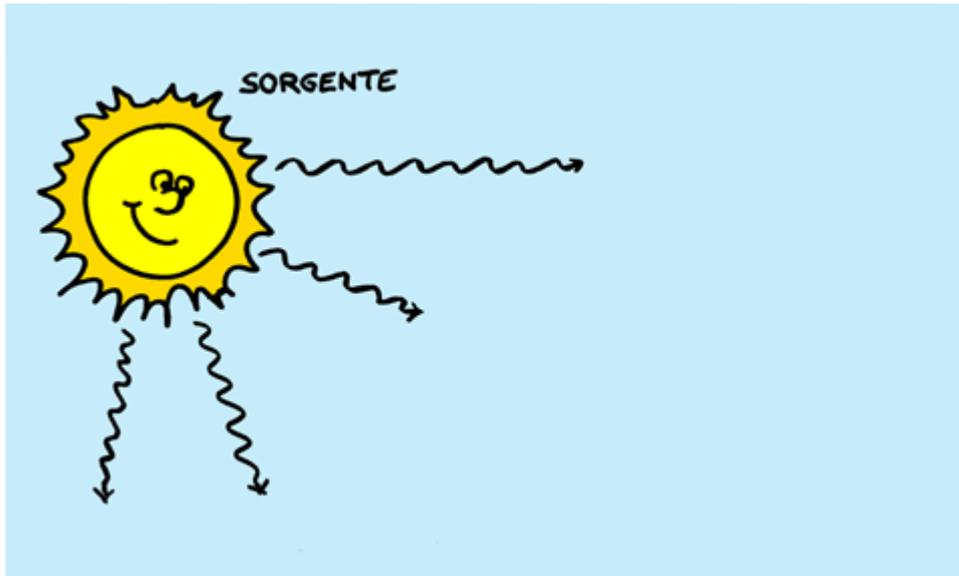


fonte: [Edward L. Wright](#), UCLA

Il primo ad effettuare la misurazione dello spostamento Doppler nelle righe spettrali delle stelle fu William Huggins, che nel 1868 stimò per Sirio una velocità di allontanamento di 47 Km/s. Due anni prima lo stesso Huggins, osservando lo spettro di una supernova apparsa nella Corona Boreale, aveva compreso che le supernovae sono stelle che esplodono emettendo gas incandescenti e non stelle in veloce avvicinamento e successivo allontanamento, come fino ad allora si pensava.

L'effetto Doppler è stato da tempo utilizzato per scoprire le stelle doppie, le cosiddette **binarie spettroscopiche**. Ultimamente è il metodo che ha permesso di scoprire la maggior parte dei **pianeti extrasolari**: analizzando la luce proveniente dalla stella intorno alla quale orbitano corpi per noi invisibili, è possibile misurare il periodo di rivoluzione (e quindi la distanza con la legge di Keplero) nonché stimare la massa del pianeta.

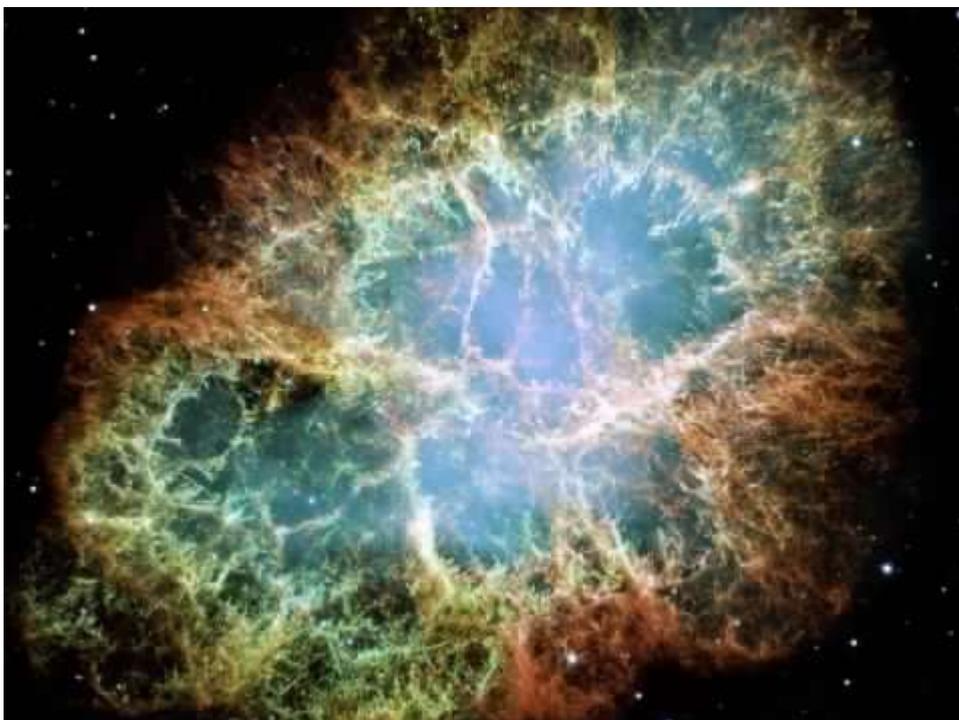
10. cosa vediamo in uno spettro?



disegni di Francesco Battistelli (AMA)

Numerose sono le conoscenze astronomiche che ci derivano dallo studio degli spettri. In astronomia è impossibile fare esperimenti a distanza sugli astri, visto che possiamo solo osservare la posizione e la radiazione emessa. Occorre anche considerare che la scala dei tempi è molto più estesa dei tempi umani, e che guardare lontano nello spazio significa andare nel passato. La possibilità di analizzare lo spettro delle radiazioni elettromagnetiche, e in particolare lo studio delle righe di assorbimento ed emissione, ci ha permesso di effettuare degli esperimenti "a distanza". Infatti:

- uno **spettro continuo** dà informazioni sulla sorgente celeste;
- uno **spettro ad assorbimento** dà informazioni sulla materia posta tra la sorgente e l'osservatore;
- uno **spettro ad emissione** dà informazioni sulla materia eccitata da una sorgente che non è prospetticamente allineata con l'osservatore.



M1, credit: [NASA](#), [ESA](#) and Allison Loll/Jeff Hester (Arizona State University).

Lo studio degli spettri ci ha permesso di conoscere la composizione chimica e fisica dell'Universo, e in particolare:

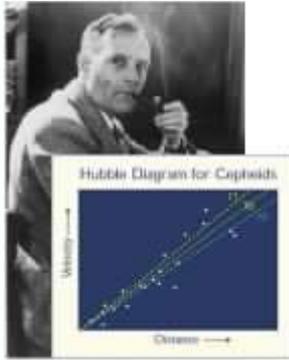
- La misura della radiazione dello spettro continuo ci dà informazioni sulla **temperatura** superficiale della sorgente.
- La lunghezza d'onda delle righe dà la **composizione fisica** dei corpi celesti.
- L'intensità delle righe dà l'**abbondanza relativa** degli elementi.
- Lo spostamento delle righe (*effetto Doppler*) misura la direzione dello spostamento e la **velocità radiale** della sorgente.
- La separazione di una riga in molte righe vicine (sdoppiamento) è dovuta a:
 - presenza di **isotopi**;
 - la cosiddetta **struttura iperfine** dell'atomo di idrogeno (la configurazione energetica con spin magnetici di protone ed elettrone allineati è diversa da quella con spin opposti);
 - presenza di un forte **campo magnetico** (effetto Zeeman).
- L'allargamento di una riga può dipendere da:
 - **temperatura** e **pressione** dei gas;
 - **turbolenze** nei gas;
 - **rotazione** della stella;
 - emissione di forti **venti stellari** (come accade nella stella tipo P-Cygni);
 - **moti di sistemi stellari** quali ammassi e galassie;
 - nubi calde in **moto molto rapido** nei nuclei galattici attivi.
- Esiste anche un allargamento naturale dovuto al principio di indeterminazione di Heisenberg.

La spettroscopia ha generato quella parte essenziale dell'astronomia detta **astrofisica**, grazie alla quale comprendiamo cosa accade dentro le stelle, come sono fatte le galassie, cosa possiamo trovare nello spazio intergalattico... Ma lo studio degli spettri ha dato un notevole contributo anche alla **cosmologia**, lo studio dell'evoluzione dell'intero Universo, fornendo un valido supporto al modello del Big Bang.

11. la spettroscopia e la cosmologia

Il cosiddetto modello del Big Bang è il modello che tutt'ora spiega meglio l'evoluzione dell'Universo, da uno stato iniziale in cui la densità e la temperatura erano incredibilmente elevate, fino ad oggi, in cui la materia conosciuta e qualcos'altro che ancora non conosciamo bene sono dispersi nello spazio freddo. Questo modello ha ricevuto tre forti conferme sperimentali, che in un modo o nell'altro hanno a che fare con la spettroscopia:

1. la fuga delle Galassie



Edwin Hubble (1889-1953)

Osservando lo spettro di galassie contenenti cefeidi, delle quali si conosceva la distanza, l'astronomo americano Hubble nel 1929 ha scoperto grazie all'**effetto Doppler** che la velocità di allontanamento è proporzionale alla distanza. Da questo ha dedotto che l'Universo si espande e dalla velocità di espansione dipende l'età dell'Universo.

2. l'abbondanza degli elementi



NGC 281
credit: [NASA](#), [ESA](#), and The Hubble Heritage Team [STScI/AURA](#)

L'abbondanza relativa degli elementi idrogeno, deuterio, elio-3, elio-4 e litio è stata misurata in ambienti poco evoluti attraverso lo studio delle **righe spettrali**. L'analisi ha confermato le ipotesi della teoria del Big Bang, che prevedeva negli istanti iniziali una produzione di 3/4 di idrogeno 1/4 di elio e tracce di altri elementi leggeri.

3. la radiazione di fondo



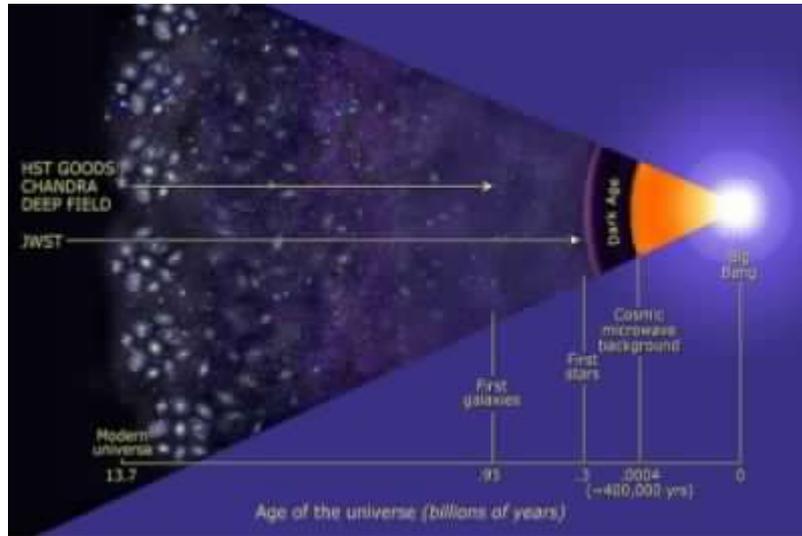
Arno Penzias e Robert Wilson

Nel 1965 Penzias e Wilson hanno scoperto un segnale uniforme proveniente dallo spazio. Questa radiazione nella banda delle microonde proviene da tutto l'universo ed ha una perfetta curva di **corpo nero**, e corrisponde alla radiazione cosmica di fondo prevista da Gamow nel 1948 nella sua teoria del Big Bang.

La radiazione cosmica di fondo

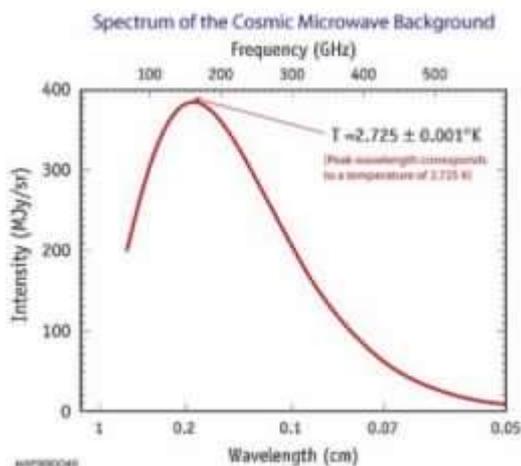
La radiazione cosmica di fondo a microonde, conosciuta con l'acronimo **CMB** (Cosmic Microwave Background), è sicuramente l'oggetto di studio più interessante della cosmologia, la scienza che indaga le origini e l'evoluzione dell'Universo. Ma che cos'è e da dove viene?

Nei primi istanti dell'Universo la materia era ionizzata e molto calda, materia e radiazione si urtavano continuamente ad altissima energia. L'Universo era opaco come accade all'interno di una stella, e tutte le particelle insieme ai fotoni erano in equilibrio termodinamico. Quando l'espansione raffreddò il plasma, elettroni e protoni iniziarono a combinarsi formando i primi atomi di idrogeno, e lasciarono i fotoni al loro destino, quello di vagare per sempre nell'Universo alla velocità della luce, almeno finché non incontrano qualcosa in grado di intercettarli. Fu in questo istante detto **ricombinazione**, avvenuto circa 380.000 anni dopo il Big Bang, che l'Universo divenne trasparente.



credit: [NASA/ESA](#) and Ann Feild ([STScI](#))

Il fondo di radiazione nelle microonde misurato da Penzias e Wilson è proprio quello che resta di quel mare di fotoni iniziali. Al momento della ricombinazione (proprio quando si sono lasciati l'ultimo fotone e l'ultimo elettrone) la temperatura era di circa 4.000 K, e a causa dell'equilibrio termodinamico precedente la distribuzione della radiazione in quell'istante era una perfetta **curva di corpo nero** corrispondente a quella temperatura.

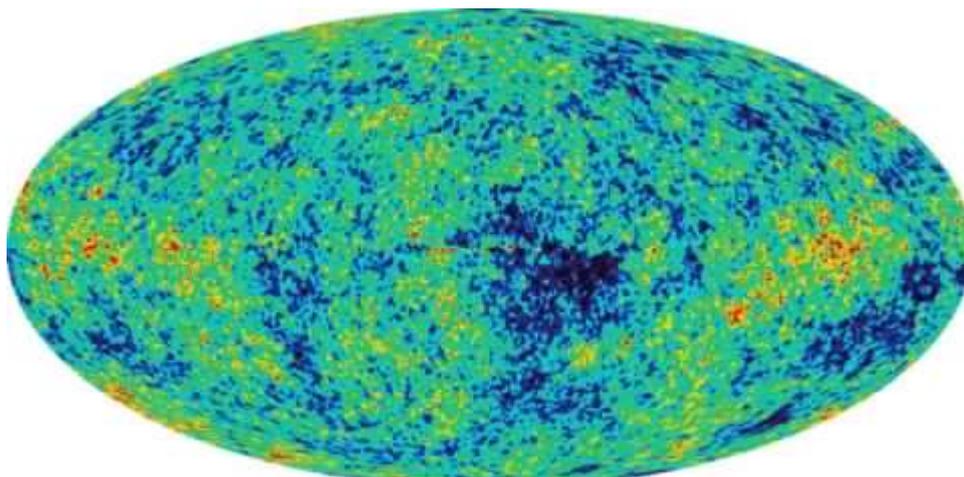


fonte: [WMAP Science Team](#), [NASA](#)

Da quel momento ad oggi, a causa dell'espansione dell'Universo, questa radiazione si è notevolmente raffreddata mantenendo il caratteristico spettro di corpo nero. Attualmente noi vediamo un fondo cosmico nelle microonde che proviene da da ogni direzione dello spazio e fortemente **isotropo** (ovvero pressoché identico in tutte le direzioni). Lo spettro corrisponde perfettamente alla radiazione di un corpo nero con la temperatura di 2,725 K e la lunghezza d'onda massima cade nelle microonde a circa 1,7 mm.

La radiazione cosmica di fondo è come una fotografia dell'Universo all'istante della ricombinazione: la sua temperatura ci dà informazioni sulla storia termica dell'Universo, e la misura delle minime fluttuazioni di temperatura ci dà informazioni sulle perturbazioni primordiali che per instabilità gravitazionale hanno formato le strutture cosmiche che oggi conosciamo.

La misura più accurata dello spettro delle fluttuazioni di temperatura del CMB è dovuta al satellite WMAP:



La mappa del WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), l'universo all'età di 400 mila anni
credit: [Astronomy Picture of the Day](#), [WMAP Science Team](#), [NASA](#)

L'analisi della mappa prodotta dal WMAP ha permesso di misurare i seguenti dati, compatibili con i dati ricavati dall'osservazione delle supernove lontane di tipo Ia:

- l'età dell'Universo: **13,7 miliardi di anni** (con un'accuratezza dell'1%)
- la densità totale dell'Universo: **$\Omega = 1,02 \pm 0,02$** (quindi l'Universo o è piatto o è quasi piatto)
- la composizione dell'Universo: **4 % materia conosciuta, 24 % materia fredda oscura, 74 % energia oscura**

La spettroscopia ha contribuito alla conoscenza dell'Universo, fornendo risposte all'antica domanda dei nostri progenitori dalla quale siamo partiti. L'uomo nell'antichità era convinto che la Terra fosse al centro dell'Universo. Poi la scienza ci ha insegnato via via che siamo su un piccolo pianeta in orbita intorno ad una piccola stella in rotazione alla periferia di una comune galassia appartenente ad uno dei tanti ammassi di galassie distribuiti in uno spazio vuoto... ora scopriamo che la materia di cui siamo fatti contribuisce in minima parte alla densità totale dell'Universo, e chissà quante cose conosceremo ancora nel futuro. Per l'uomo è un salutare bagno di umiltà, ma ci deve essere anche un po' di orgoglio, per essere riusciti, dal nostro piccolo angolino, a viaggiare con la mente nello spazio e nel tempo per ammirare le meraviglie del nostro Universo.