LO SPETTRO ELETTROMAGNETICO

long wavelength, low frequency Fisica Generale II

short wavelength, high frequency



A. M. ROSSI Università di Bologna 1

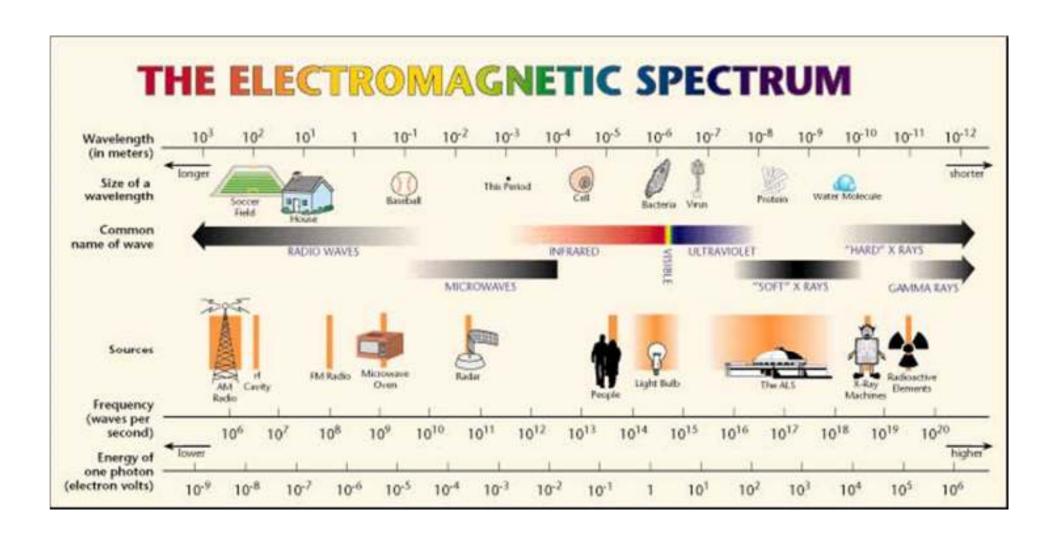
Radio waves

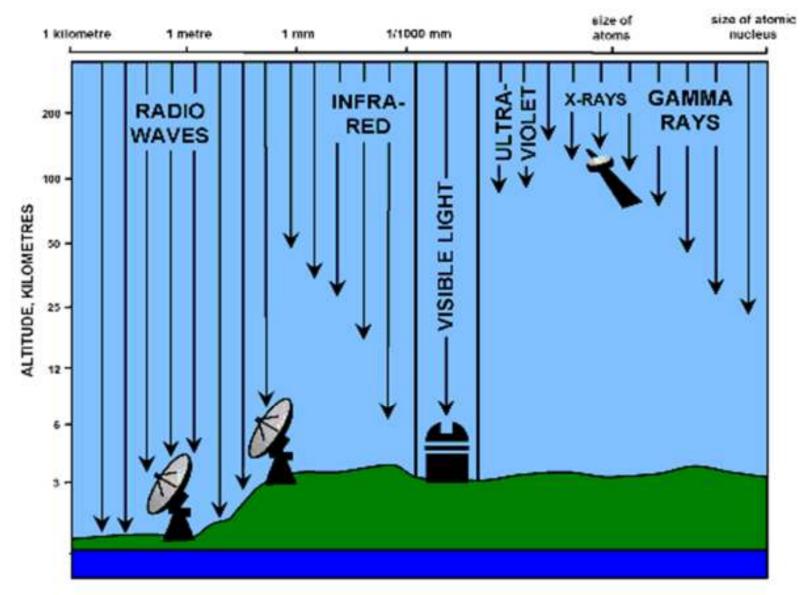
nfra-rec

Visible Light

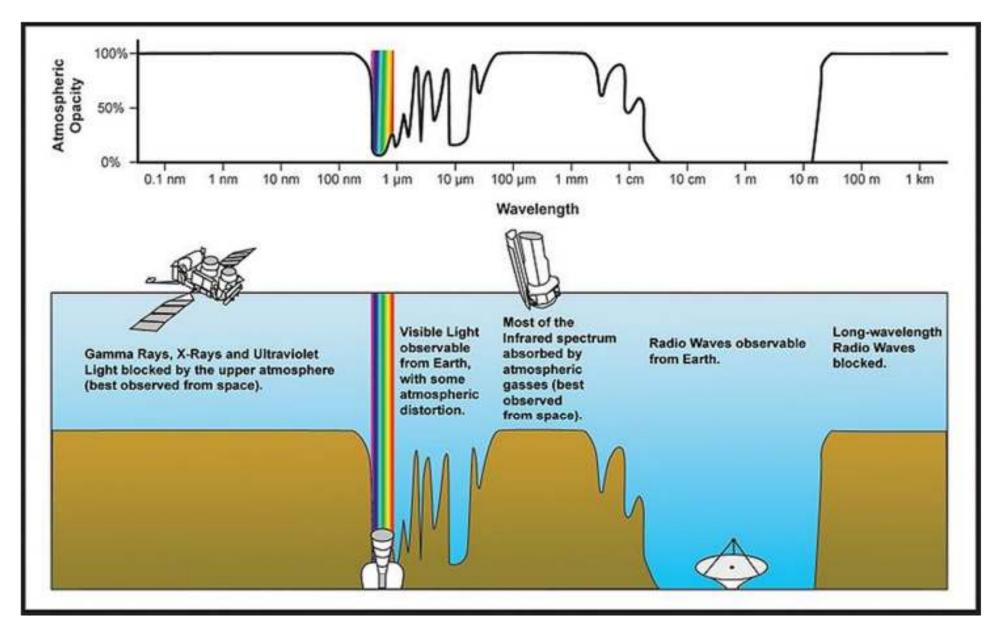
K-ray-viol

jamma ray



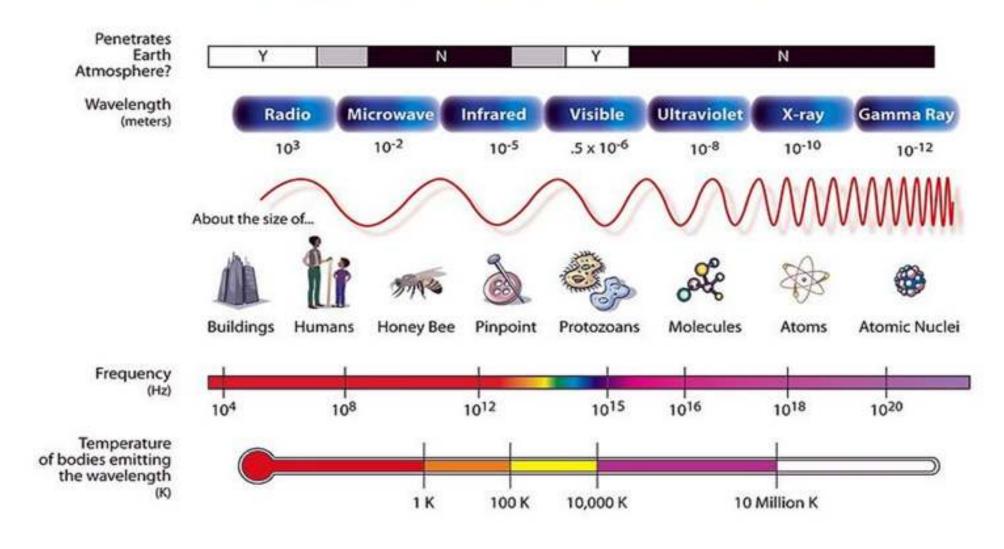


Solo portando strumenti di osservazione nello spazio (palloni sonda, satelliti...) è possibile estendere l'informazione a tutte le frequenze elettromagnetiche



Plot of Earth's atmospheric transmittance (or opacity) to various wavelengths of electromagnetic radiation

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



Schema che mostra lo spettro elettromagnetico con il tipo, la lunghezza d'onda, la frequenza e la temperatura di emissione del corpo nero.

Corpo Nero

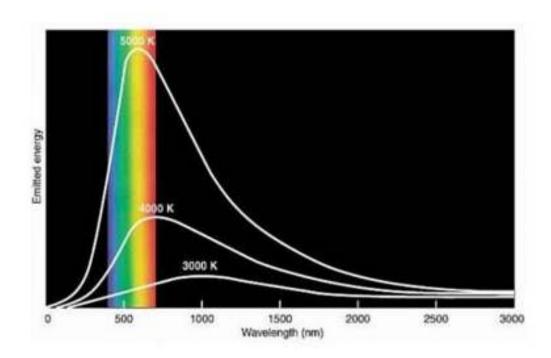
Un Corpo è Nero se assorbe completamente (100%) tutte le radiazioni (di qualsiasi lunghezza d'onda e a qualsiasi angolo) che incidono su di esso. Perciò nessuna radiazione passa attraverso di esso e nessuna radiazione è riflessa.

Un Corpo Nero emette (isotropicamente) uno spettro di radiazioni che dipende solo dalla temperatura (e non dalla sua forma o dal materiale di cui è costituito).

Legge di Planck (in funzione della lunghezza d'onda λ)

$$I(\lambda,T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\frac{hc}{e^{\lambda kT} - 1}}$$

 $I(\lambda,T)$ rappresenta l'energia irradiata, ossia l'energia emessa per secondo dalla superficie di un m², per una unità di lunghezza d'onda.



Spettri di corpo nero per oggetti a tre differenti temperature: 5000 K, 4000 K, 3000K.

Legge dello spostamento di Wien

La lunghezza d'onda a cui l'intensità della radiazione prodotta da un corpo nero è massima, λ_{max} , è funzione unicamente della temperatura e diminuisce al crescere della temperatura

$$T \lambda_{max} = b$$

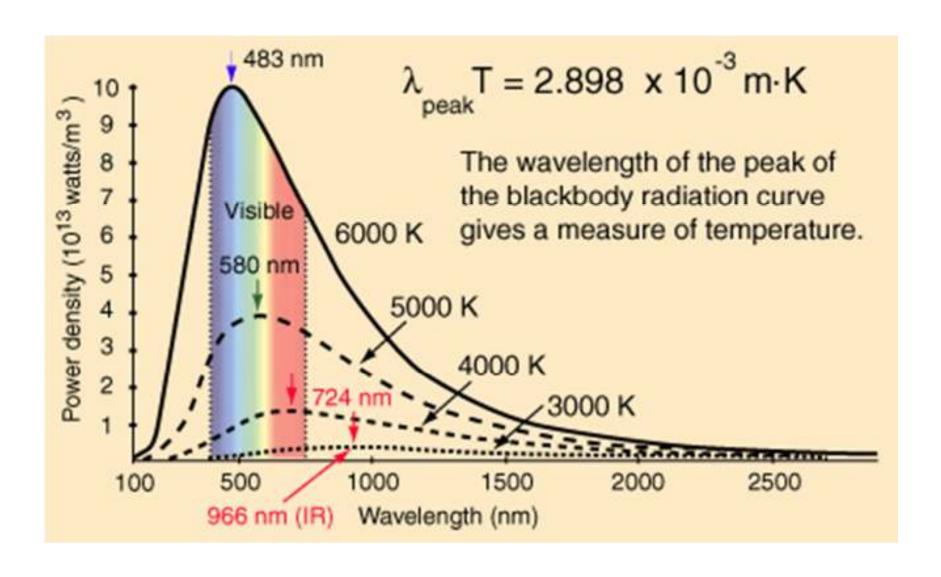
b (costante di Wien) è uguale a 2.898×10⁻³ m K.

Legge di Stefan-Boltzmann

L'energia totale irradiata per unità di superficie di un corpo nero, in unità di tempo, U (flusso della radiazione), è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta

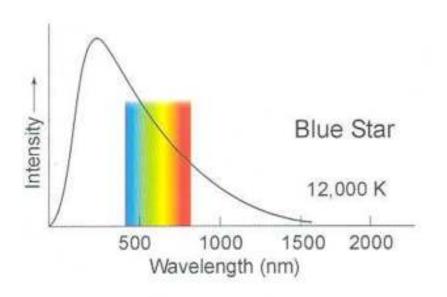
$$U = \sigma T^4$$

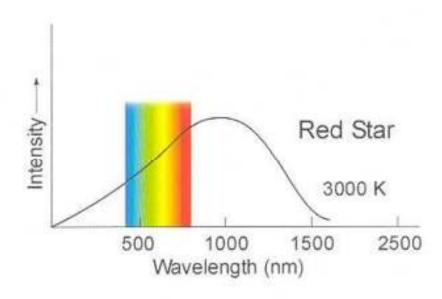
 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ è la costante di Stefan-Boltzmann.



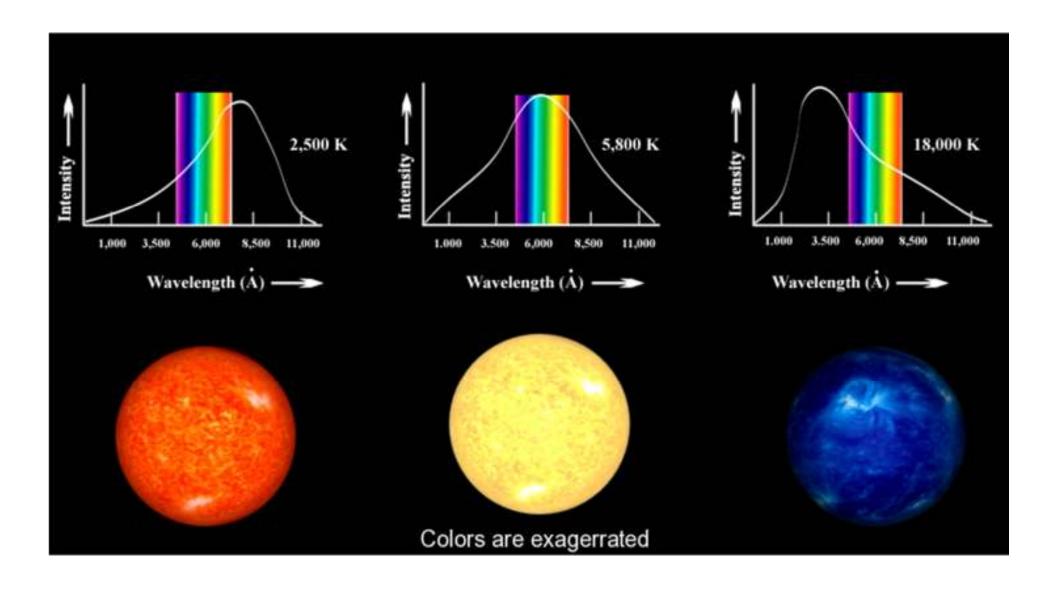
La temperatura e il colore delle stelle

La luce emessa dalle stelle può essere considerata con buona approssimazione come radiazione di corpo nero, e il colore delle stelle è una diretta conseguenza delle loro temperature superficiali (vedi legge di Wien).



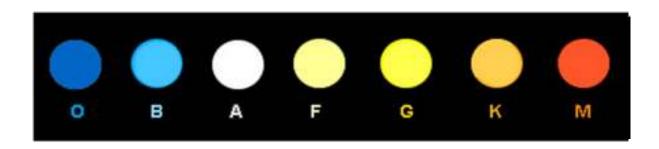


La temperatura e il colore delle stelle



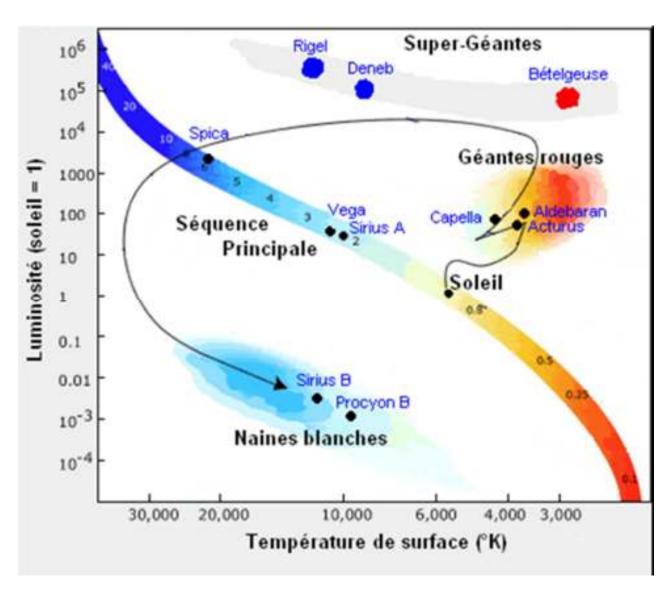
La temperatura e il colore delle stelle

Le stelle sono divise in sette classi principali contraddistinte dalle lettere O, B, A, F, G, K, M.

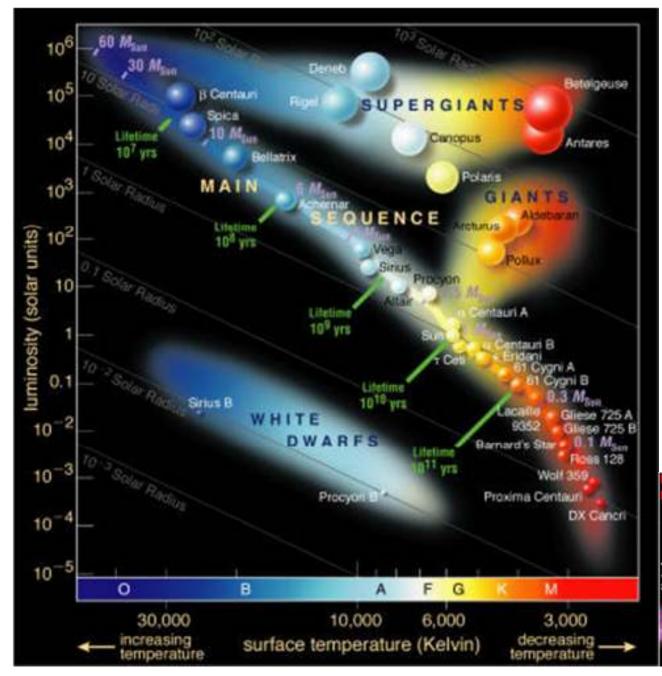


| Classe spettrale | Colore stella | Temperatura superficiale |
|------------------|------------------|--------------------------|
| | | |
| 0 | Blu | 50.000 - 25.000 K |
| В | Azzurre | 25.000 - 11.000 K |
| Α | Bianche | 11.000 – 7.500 K |
| F | Bianche/Gialle | 7.500 – 6.000 K |
| G | Gialle | 6.000 - 5.000 K |
| K | Gialle/Arancione | 5.000 – 3.500 K |
| M | Rosse | 3.500 – 3.000 K |

Diagramma di HERTZSPRUNG-RUSSELL



Il diagramma di Hertzsprung-Russell mette in relazione la luminosità delle stelle e la loro temperatura superficiale, permettendo di mettere in evidenza la loro fase evolutiva: si nota che le stelle non si distribuiscono in modo uniforme sul diagramma, ma al 90% si dispongono su una linea caratteristica che è nota come sequenza principale. Vi sono anche alcune stelle anomale che si collocano al di sopra di questa sequenza (giganti rosse: stelle molto luminose di colore rosso o arancio) o al di sotto (nane bianche: stelle pochissimo luminose di colore bianco)

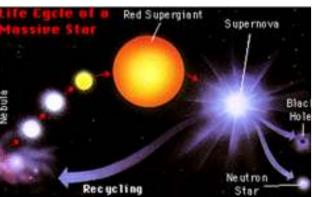


Diagramma

di

HERTZSPRUNG

RUSSELL



La generazione delle onde elettromagnetiche

Le onde e.m. sono generate da cariche elettriche, si propagano nel vuoto con la stessa velocità, indipendente dalla frequenza, e interagiscono con cariche elettriche.

Nella pratica, le onde e.m., in dipendenza dalla banda di frequenze considerata, sono generate da sorgenti diverse, producono fenomeni diversi, e diversi sono i rivelatori utilizzati per osservarle.

L'ambito e i fenomeni che coinvolgono le cariche elettriche che sono alla base della generazione di onde e.m. dipendono dalla frequenza delle onde considerate.

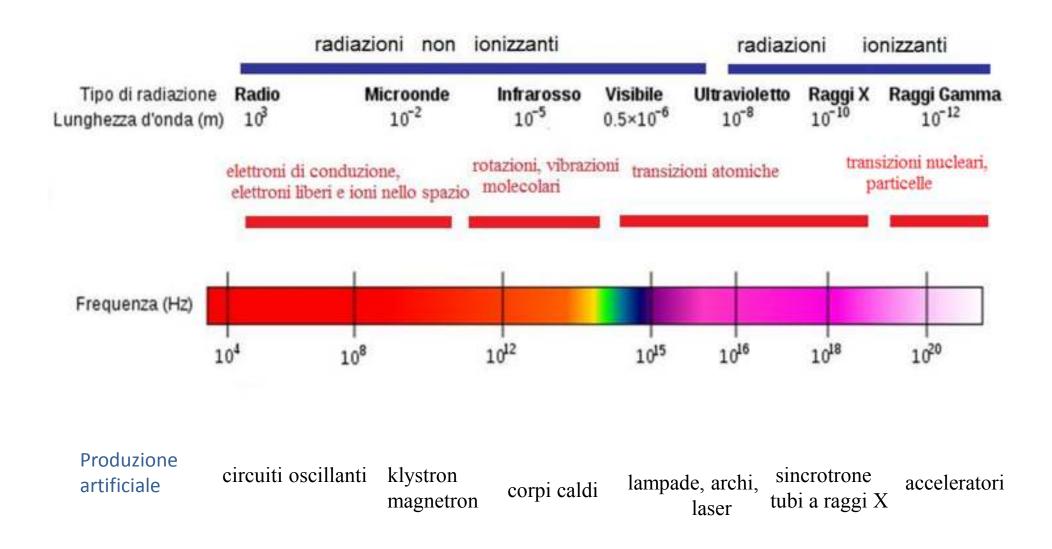
A basse frequenze, onde radio e microonde, le cariche elettriche sono elettroni liberi di muoversi nei conduttori metallici di antenne o elettroni liberi e ioni nello spazio.

A frequenze maggiori, infrarosso, le cariche in moto sono associate principalmente alla rotazione e vibrazione di molecole e al moto di atomi legati assieme nei materiali.

Le onde e.m., nelle bande del visibile, ultravioletto e raggi X, hanno frequenze che corrispondono a cariche negli atomi (radiazione da sincrotrone, bremsstrahlung...).

I raggi gamma sono associati con frequenze che corrispondono a cariche nei nuclei atomici (interazioni tra particelle...)

Spettro elettromagnetico



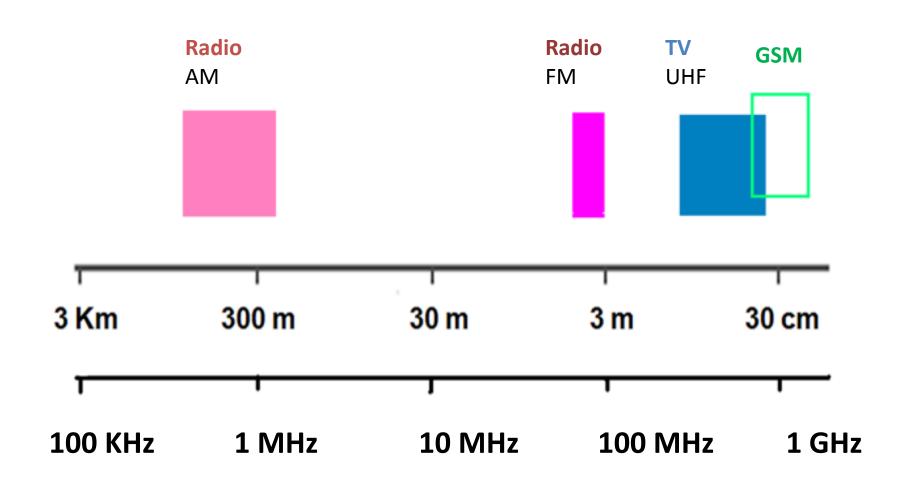
ONDE RADIO

Le onde radio sono impiegate in radiotelegrafia, nelle trasmissioni radiofoniche, telefoniche, televisive, radar, nei sistemi di navigazione e nelle comunicazioni spaziali.

Oggetti nello spazio, quali stelle e galassie, gas e polveri, comete, pianeti, emettono radiazione e.m. a diverse lunghezze d'onda; anche con lunghezza d'onda nella banda radio dello spettro e.m.:

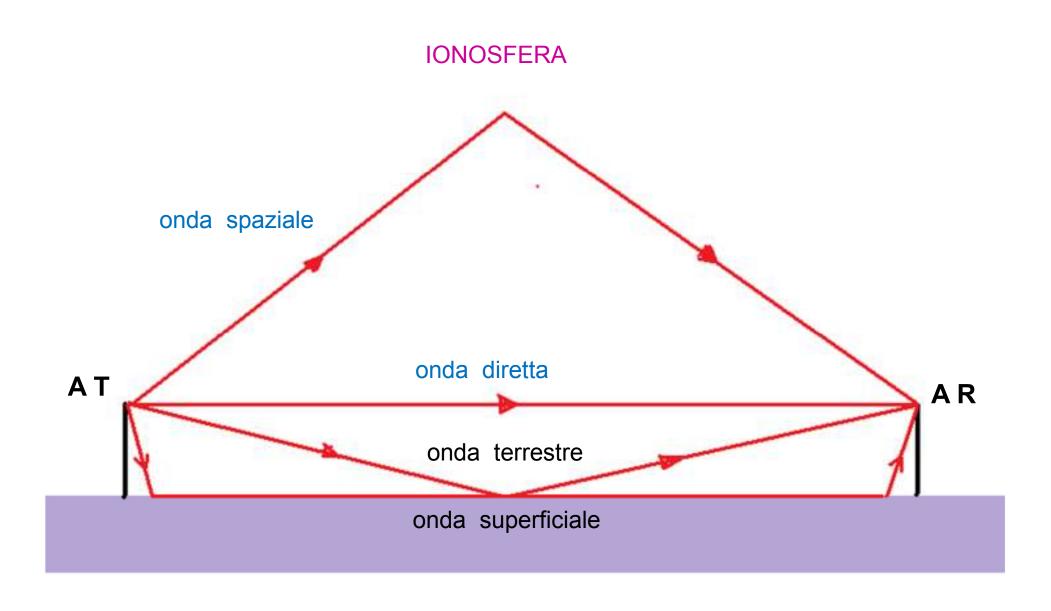
radioastronomia.

ONDE RADIO



Propagazione delle onde radio (nell'atmosfera).

- Onda diretta. Stabilisce un collegamento "line of sight", ovvero in linea ottica, tale per cui rende possibile la comunicazione fra siti che siano in visibilità. Variazione dell' indice di rifrazione nell'atmosfera. L'onda diretta viene tipicamente utilizzata nei sistemi radio che operano a frequenze particolarmente alte, con sistemi d'antenna capaci di sagomare a fascio le onde elettromagnetiche (es. onde ultracorte, VHF e UHF, tra 30 MHz e 3 GHz).
- •*Onda riflessa*. Può essere di due tipi: 1) *onda spaziale*, riflessa dalla ionosfera, 2) *onda terrestre*, che si riflette sulla superficie della terra. La riflessione da parte della ionosfera avviene per onde e.m. di frequenza < 30 MHz (es. trasmissione di onde corte (SW), tra 3 e 30 MHz).
- •Onda di superficie. Le onde emesse in direzione parallela al suolo scorrono sulla superficie terrestre. L'onda superficiale viene più o meno attenuata a seconda del tipo di superficie sulla quale si propaga. L'attenuazione cresce con la frequenza; a parità di frequenza l'attenuazione è molto bassa sul mare e assai elevata sulla terra (es. trasmissione di onde lunghe, tra 20KHz e 600 KHz).



Guglielmo Marconi (Bologna, 25 aprile 1874 – Roma, 20 luglio 1937)



Marconi, dal discorso per il premio Nobel (1909)

L'utilizzazione delle onde elettriche per le comunicazioni telegrafiche senza filo fra regioni della terra fra loro distanti, e le esperienze, che ho avuto la fortuna di poter svolgere su scala più vasta di quanto non sia ottenibile negli ordinari laboratori, hanno reso possibile di studiare fenomeni e di constatare risultati spesso nuovi e inattesi......

Nel tracciare brevemente la storia del mio contributo alla realizzazione della radio telegrafia, debbo dire che non ho mai studiato in modo regolare la Fisica e l'Elettrotecnica, per quanto fin da ragazzo abbia nutrito il più vivo interesse per questi argomenti. Ho, tuttavia, seguito un corso di conferenze sulla Fisica tenuto dal compianto prof. Rosa a Livorno e posso asserire di essermi tenuto diligentemente al corrente di tutte le pubblicazioni di quel tempo relative ad argomenti scientifici comprendenti lavori di Hertz, Branly e Righi. Nella mia casa presso Bologna, in Italia, io intrapresi fin dal 1895 delle prove e delle esperienze volte a stabilire se fosse possibile trasmettere a distanza, per mezzo delle onde hertziane, segnali telegrafici e segni convenzionali senza ricorrere alla connessione per filo. Dopo alcune esperienze preliminari con le onde hertziane io mi convinsi rapidamente che, se fosse stato possibile trasmettere e ricevere in modo sicuro ed a distanze considerevoli queste onde o altre simili, si sarebbe realizzato un nuovo sistema di comunicazioni....

Il 12 Dicembre del 1901 Marconi riuscì a trasmettere attraverso l'atlantico su una distanza di circa 3200 Km, collegando Poldhu in Cornovaglia con St. John di Terranova (una isola in territorio canadese vicino agli Stati Uniti), cioè l'Europa con l'America.

Marconi1 Marconi2

Le onde radio utilizzate in quella trasmissione che frequenza avevano?

La questione è stata discussa a lungo, ma non è stata chiarita del tutto.

E il fatto di non conoscere la frequenza delle onde radio rivelate dal ricevitore di St. John di Terranova non ci consente di comprendere in che modo sia avvenuta (di giorno) la propagazione di queste onde attraverso l'atlantico.

A quell'epoca non esistevano teorie che potessero spiegare come onde radio potessero propagarsi su distanze tanto grandi.

L'esistenza di uno strato fortemente ionizzato nell'alta atmosfera fu proposto da Kennelly (Stati Uniti) e Heaviside (Inghilterra) nel 1902, ma solo parecchi anni dopo si comprese come era fatta la ionosfera.

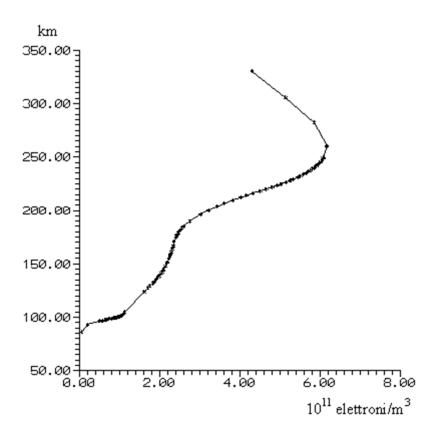
Ionosfera

Le radiazioni ultraviolette ionizzano l'atmosfera e in dipendenza della loro frequenza vi penetrano più o meno profondamente e producono strati ionizzati ad altezze diverse. La densità degli elettroni e ioni presenti nella ionosfera varia a seconda della quota. Inoltre la densità degli strati ionizzati dipende dalla variazione diurna. Onde radio a frequenza diversa vengono riflesse da strati di densità diversa.

- **Strato D:** è il più basso, attorno a 70 Km, e la sua percentuale di ionizzazione è la piu bassa nella ionosfera. Non riflette. Dopo il tramonto e durante la notte questo strato praticamente scompare.
- **Strato E** (anche chiamato strato di Kennelly-Heaviside): posto ad un'altezza media di circa 110 Km, si attenua dopo il tramonto e dopo mezzanotte praticamente scompare. Questo strato riflette le onde corte fino a circa 20 MHz.
- -Strato F: durante il giorno si scompone in due strati, F1 e F2, situati rispettivamente a circa 200 Km e 350-400 Km di quota. Di notte i due strati si combinano in un unico strato situato a circa 300 Km di altezza. Questo rimane l'unico strato ionizzato ed è quello che permette le trasmissioni notturne a lunga distanza in onde corte.

La ricezione di onde corte è migliore durante la notte. Di giorno le onde radio ad alta frequenza HF (o onde corte SW) sono riflesse dagli strati E, F_1 , o F_2 . Di notte persiste solo l'unico strato F situato a circa 300 Km di quota, che permette trasmissioni a lunga distanza.

Ionosfera



Andamento tipo della densità elettronica in funzione dell'altezza

IONOSFERA: parte dell'atmosfera tra 100 e 400 Km circa in cui l'aria è parzialmente ionizzata per via della radiazione (ultravioletta) solare.

Perturbazione

separazione locale tra elettroni e ioni e conseguente forza elettrica di richiamo sulle cariche.

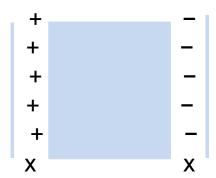
N = numero di cariche libere (elettroni e ioni) per unità di volume.

Data la grande massa degli ioni rispetto a quella degli elettroni, si considera solo il moto degli elettroni.

- x = spessore strato carico
- σ = Nex densità della distribuzione superficiale di carica
- E = σ / ϵ_0 = Nex / ϵ_0 campo elettrico tra le due distribuzioni di carica
- $F = -Ne^2x/\epsilon_0$ forza agente sugli elettroni
- Equazione del moto $m_e d^2x/dt^2 = -Ne^2x/\epsilon_0$ ossia $d^2x/dt^2 + Ne^2x/\epsilon_0 m_e = 0$
- Moto armonico di pulsazione $\omega = [Ne^2/\epsilon_0 m_e]^{1/2} = \omega_p \iff$ frequenza di plasma

Frequenza di plasma v_p = 8,97 [N]^{1/2} Hz. Valori di N: circa 10^{12} e⁻/m³ Posto N = 1,25 10^{12} e⁻/m³ si ha: ω_p = 6.28 10^8 rad/s , v_p = 10^7 Hz e λ_p = 30 m

Onde e.m. con $\,\omega < \,\omega_p \,$ sono riflesse Onde e.m. con $\,\omega > \,\omega_p \,$ possono attraversare la ionosfera



Dielettrici

Modello classico: elettroni legati da forza di natura elastica al nucleo

$$k = m \omega_0^2$$
 Equazione
$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} + \gamma \frac{d\vec{r}}{dt} + \omega_0^2 \vec{r} = \frac{q}{m_e} \vec{E}$$

Indice di rifrazione grandezza complessa dipendente dalla frequenza angolare ω

$$n^{2} = \varepsilon_{r} = 1 + \frac{Na}{\varepsilon_{0}}$$

$$n^{2} = 1 + \frac{Nq^{2}}{\varepsilon_{0}m_{e}} \frac{1}{(\omega_{0}^{2} - \omega^{2}) - i\omega\gamma}$$

Conduttori

Elettroni di conduzione: $\omega_0 = 0$

Equazione
$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} + \gamma \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{q}{m_e} \vec{E}$$

$$n^2 = 1 + \frac{Nq^2}{\varepsilon_0 m_e} \frac{1}{-\omega^2 - i\omega\gamma}$$

$$q = -e$$

$$n^2 = 1 - \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m_e} \frac{1}{\omega^2 + i\omega\gamma}$$

Ionosfera

Si trascura l'effetto del campo magnetico terrestre.

Indice di rifrazione della ionosfera n :

$$n^2 = 1 - \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m_e} \frac{1}{\omega^2 + i\omega\gamma}$$

ossia posto $\omega_p^2 = Ne^2/\epsilon_0 m_e$

$$n^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}$$

Dove γ è un coefficiente di smorzamento (\rightarrow frequenza di collisione degli e^- liberi con le particelle della ionosfera) e ω_p è la frequenza di plasma.

Per frequenze elevate (approssimazione delle alte frequenze, piccolo coefficiente di smorzamento)

$$\omega/\gamma \gg 1$$
 si ha $n^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$

Per $\omega>\omega_p$, $n^2>0$, n è reale : l'onda e.m. si propaga nel plasma. La ionosfera è trasparente all'onda e.m.

Per $\omega < \omega_p$, $n^2 < 0$, n è immaginario, $n = i[\omega_p^2/\omega^2 - 1]$

Per $\gamma \ll \omega < \omega_p$ l'onda e.m. è totalmente riflessa.

Trasmissione di informazioni.

Per trasmettere informazione, l'onda portante deve essere sottoposta al processo di modulazione che consiste nel far variare alcuni parametri dell'**onda portante** (ampiezza, frequenza, fase) in accordo alle variazioni del segnale originale.

Alcune forme di modulazione:

AM: Amplitude Modulation, modulazione di ampiezza,

FM: Frequency Modulation, modulazione di frequenza,

PM: Phase Modulation, modulazione di fase,

PCM: Pulse-Code Modulation, modulazione codificata di impulsi.

Le informazioni trasportate da un'onda modulata vengono riconvertite nella loro forma originale tramite un processo inverso, detto di demodulazione o rivelazione.

Bande di frequenza delle onde radio

La banda delle onde radio (incluse le microonde) si estende da 3 Hz a 300 GHz (in lunghezza d'onda da migliaia di km al mm). Al di sotto di 300 GHz (1 mm) seguono le bande dell'infrarosso, visibile, ultravioletto, raggi X e gamma.

| Acronimo | Banda Frequenza | Banda Lunghezza d'onda | Nome |
|------------------------|--------------------|---------------------------|------------------------------------|
| ELF (Extrem. Low f.) | | 100.000 km – 100 km | |
| VLF (Very Low f.) | 3–30 KHz | 100 km – 10 km | Onde miriametriche |
| LF (Low f.) | 30–300 KHz | 10 km – 1 km | Onde lunghe (LW), Onde chilom. |
| MF (Medium f.) | 300 KHz-3 MHz | 1 km – 100 m | Onde medie (MW), Onde ettometr. |
| HF (High f.) | 3–30 MHz | 100 m – 10 m | Onde corte (SW), Onde decametriche |
| VHF (Very High f.) | 30–300 MHz | 10 m – 1 m | Onde ultracorte, Onde metriche |
| UHF (Ultra High f.) | 300 MHz-3 GHz | 1 m – 100 mm | Microonde, Onde decimetriche |
| SHF (Super High f.) | 3–30 GHz | 100 mm – 10 mm | Microonde, Onde centimetriche |
| EHF (Extr. High f.) | 30–300 GHz | 10 mm – 1mm | Microonde, Onde millimetriche |

ELF (frequenze sotto i 3 kHz, corrispondenti a lunghezze d'onda superiori ai 100 km)

Queste onde sono usate nei sistemi di comunicazione per i sottomarini. L'acqua del mare presenta un assorbimento molto basso per onde tra i 5 e i 100 Hz.

VLF-LF-MF (3 KHz - 3 MHz, 100 Km - 100 m)

Queste bande di frequenze sono usate per sistemi di navigazione e per trasmissioni radio AM (Amplitude Modulation). Possono propagarsi sia per onda spaziale (riflessa dalla ionosfera) sia per onda di superficie per terra e per mare (nella banda VLF, le comunicazioni radio marittime possono propagarsi come onde di superficie per migliaia di chilometri, a causa dell'alta conduttività dell'acqua salata).

Comprendono le onde lunghe e le onde medie.

Trasmissioni radio AM in onde medie (es. 526 KHz – 1620 KHz).

HF (3 MHz – 30 MHz, 100 m – 10 m), onde corte. Le onde corte sfruttano bene l'onda spaziale. Trasmissioni internazionali (onde corte) tra 5.9 MHz e 26.1 MHz.

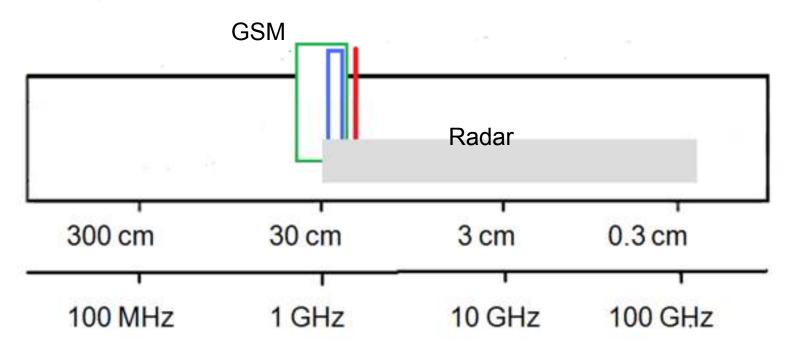
VHF – **UHF** (30 MHz – 3 GHz, 10 m - 10 cm).

Le frequenze di questa banda (> 30 MHz) sono utilizzate per comunicazioni dirette (le onde e.m. non vengono riflesse dalla ionosfera).

Trasmissioni radio FM (es. 88 – 108 MHz), e televisive VHF e UHF. La maggior parte della banda UHF è usata per i collegamenti a microonde e per la telefonia cellulare.

| Acronimo | Banda Frequenza | Banda Lunghezza d'onda | Utilizzo |
|------------------------|--------------------|---------------------------|--|
| ELF (Extr. Low f.) | 3 Hz-3 KHz | 100.000 km – 100 km | Comunicazione radio con i sommergibili |
| VLF (Very Low f.) | 3–30 KHz | 100 km – 10 km | Comunicazione con sommergibili in emersione |
| LF (Low f.) | 30–300 KHz | 10 km – 1 km | Trasmissioni radio intercontinentali in AM Onde lunghe (LW) |
| MF (Medium f.) | 300 KHz-3 MHz | 1 km – 100 m | Trasmissioni radio in AM Onde medie (MW) |
| HF (High f.) | 3–30 MHz | 100 m – 10 m | Trasmissioni internazionali (SW, onde corte) Onde corte (SW) |
| VHF (Very High f.) | 30–300 MHz | 10 m – 1 m | Comunic. aeronautiche civili, navali, forze dell'o Radio commerciali in FM, Televisione, Radioama Onde ultracorte, Onde metriche |
| UHF (Ultra High f.) | 300 MHz-3 GHz | 1 m – 100 mm | Televisione, Telefonia cellulare, Reti Wireless, Forni a microonde, Comunic. aeronautiche milit Microonde, Onde decimetriche |
| SHF (Super High f.) | 3–30 GHz | 100 mm – 10 mm | Radar, Reti Wireless, Ponti Radio terrestri, Comsatellitari. Microonde, Onde centimetriche |
| EHF (Extr. High f.) | 30–300 GHz | 10 mm – 1mm | Radar, Comunic. satellitari e Trasm. radioamato Microonde Onde millimetriche |

MICROONDE



Microonde (1)

Le microonde appartengono alle bande di frequenza UHF, SHF e EHF (1 GHz - 300 GHz, 30 cm - 1 mm).

Telefonia cellulare (GSM, 850, 900, 1800, 1900 MHz: le frequenze variano a seconda degli Stati in cui la rete stessa è installata; tipicamente 900/1800 MHz in Europa, 850/1900 MHz negli Stati Uniti).

Reti wireless (Wi-Fi, 2.4 GHz, 5.8 GHz; Bluetooth, 2.4 GHz).

Forni a microonde domestici (2.45 GHz).

Radar operano in bande di frequenze tra 1 e 110 GHz.

Microonde (2)

Le microonde attraversano l'atmosfera terrestre senza subire interferenze, come accade invece per le onde radio, e possono penetrare attraverso nubi e foschia, a differenza della radiazione visibile e infrarossa (che hanno lunghezza d'onda inferiore), e quindi sono utilizzate in

- Comunicazioni con satelliti
- Global Positioning System (GPS)
- Remote Sensing (Telerilevamento) per lo studio della Terra e dei pianeti

Radioastronomia

Cosmic microwave background

Forno a microonde

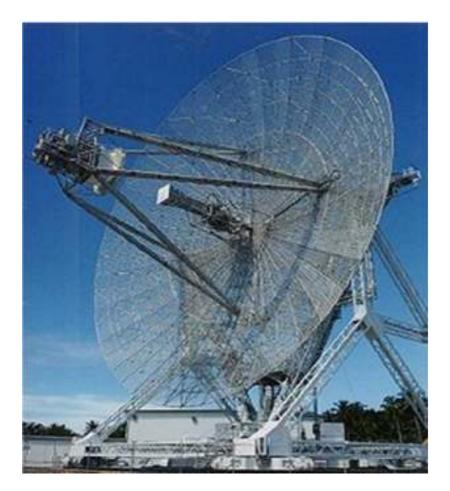


Il **forno a microonde** utilizza un generatore a **magnetron** per produrre microonde alla frequenza di circa **2,45 GHz** (lunghezza d'onda di 12.24 cm) per cuocere o riscaldare il cibo. La potenza è di circa 1 kiloWatt. L'acqua e altre sostanze (grassi, zuccheri, ecc.) nel cibo assorbono energia dalle microonde in un processo chiamato di **riscaldamento dielettrico.** Le molecole dell'acqua (e altre molecole nel cibo) hanno un dipolo elettrico proprio: investite dalle microonde esse ruotano cercando di allinearsi al campo elettrico oscillante. Questo movimento molecolare genera calore. Il riscaldamento avviene allora nel cibo, senza necessità di scaldare l'aria circostante il cibo come nei forni elettrici. Riduzione netta del tempo di cottura o riscaldamento.

Microonde - Radar

Radar (Acronimo di "radio detection and ranging").

I Radar utilizzano le microonde per rilevare a distanza la presenza ed il movimento di oggetti. I fasci Radar consistono di brevi impulsi di microonde. La distanza di un oggetto (nave, aeroplano, ecc...) può essere determinata misurando il tempo impiegato dall'impulso per arrivare all'oggetto e, dopo riflessione, ritornare all'antenna. Misurando poi la variazione in frequenza delle onde riflesse dovuta all'effetto Doppler, può essere misurata la velocità dell'oggetto.

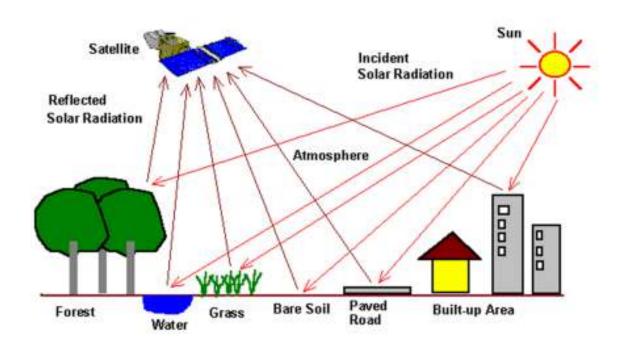


Antenna radar a lunga portata (diametro 40 m) può ruotare per controllare qualsiasi settore nell'intero orizzonte.

Microonde - Telerilevamento (1)

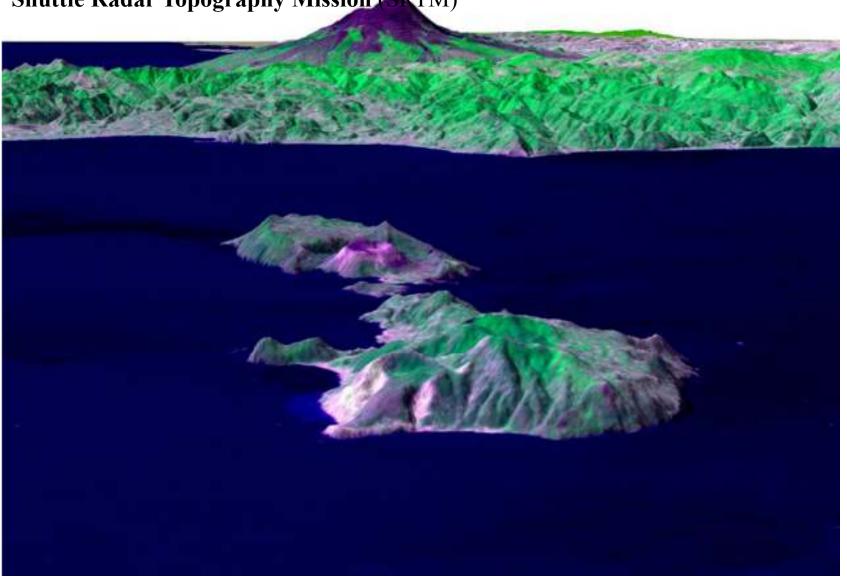
- Il Telerilevamento è la tecnologia che permette di ricavare informazioni sulla terra (nelle sue componenti di terra solida, idrosfera, biosfera, atmosfera) e su oggetti posti a distanza (es. pianeti) mediante misure di radiazione elettromagnetica, emessa, riflessa o trasmessa. Esso utilizza foto o dati numerici rilevati da aerei, satelliti o sonde spaziali per caratterizzare la superficie di un pianeta.
- I sensori di telerivelamento a microonde possono essere attivi (radar) o passivi (radiometri).
- Poiché il radar rileva radiazioni e.m. che sono una riflessione di una trasmissione attiva, il radar è considerato un sensore attivo. Il radiometro è un sensore passivo perchè rileva radiazioni e.m. emessa da altra sorgente.
- I sensori possono essere imaging (es. imaging radar, mappa) o non-imaging (es. altimetro).
- La energia registrata da un dispositivo passivo può essere emessa dall'atmosfera, riflessa dalla superficie, emessa dalla superficie o trasmessa dalla sottosuperficie. Applicazioni alla idrologia, oceanografia e meteorologia (in dipendenza della lunghezza d'onda utilizzata, con la radiazione da microonde si può guardare attraverso l'atmosfera oppure l'atmosfera).
- Vantaggi radar: è un sensore attivo e può essere utilizzato per mappare superfici non solo in condizioni atmosferiche difficili (come del resto i sensori a microonde passivi) ma può anche lavorare a qualsiasi istante, giorno e notte.

Microonde - Telerilevamento (2)



Microonde - Telerilevamento (3)

Etna e Isole Eolie Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)



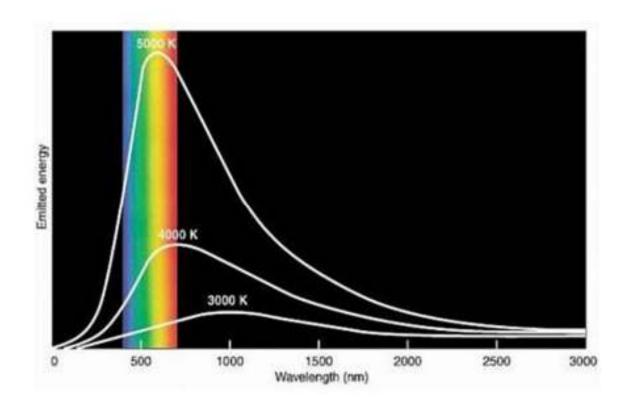
Radioastronomia

La Radioastronomia studia onde e.m. di lunghezza d'onda (e di frequenza) compresa tra 10 metri e 1 millimetro (30 MHz e 300 GHz), banda in cui ionosfera e atmosfera terrestre risultano trasparenti.

Principali processi astrofisici che generano la emissione di onde radio

- Emissione termica
- Radiazione di corpo nero
- Emissione da gas ionizzato (moto di elettroni in un plasma)
- Radiazione di sincrotrone
- Emissioni a frequenze discrete
- ✓ Una riga spettrale importante è quella dell'atomo di idrogeno alla lunghezza d'onda di 21 cm (1420 MHz)

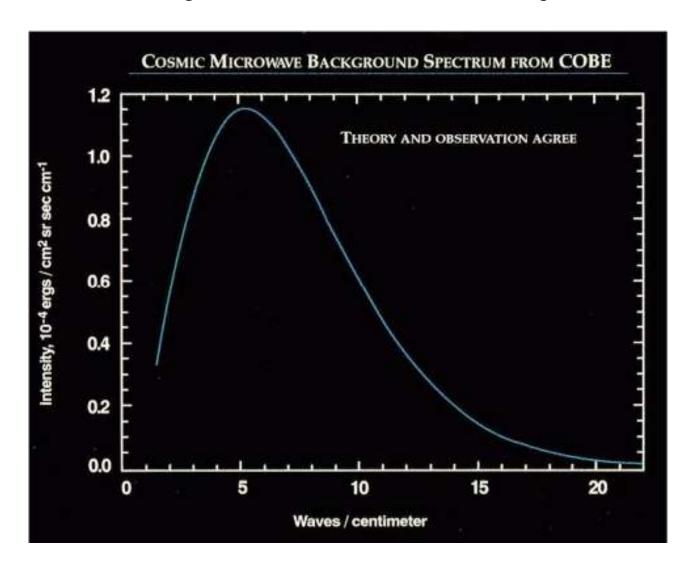
Radiazione di corpo nero



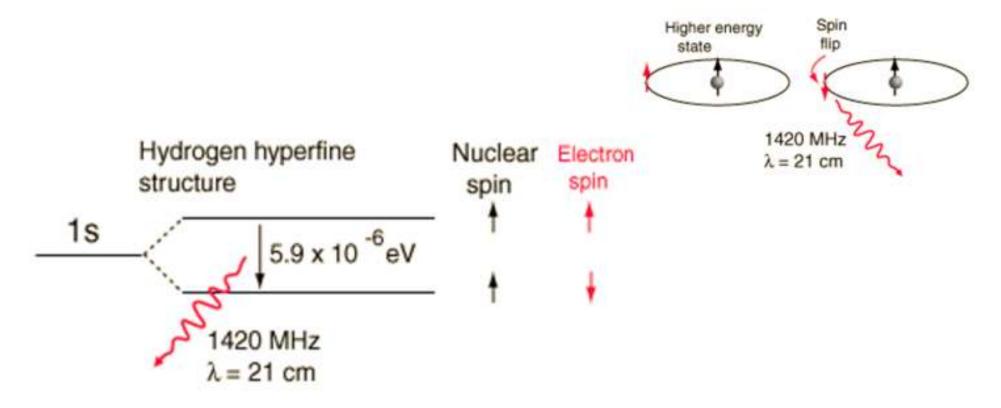
Spettri di corpo nero per oggetti a tre differenti temperature: 5000 K, 4000 K, 3000K. Un oggetto per emettere radiazione termica a lunghezze d'onda radio deve essere molto più freddo.

Radiazione Cosmica di Fondo a Microonde (Cosmic Microwave Background, CMB).

Radiazione Cosmica di Fondo a Microonde (Cosmic Microwave Background, CMB). Tale radiazione è caratterizzata da un perfetto spettro di corpo nero, ad una frequenza di 160,2 GHz corrispondente ad una lunghezza d'onda di 1,9 mm, ad una temperatura di 2,725 K.



Riga di emissione di 21 cm dell'idrogeno neutro



La configurazione a spin paralleli ha una energia di poco superiore a quella a spin antiparalleli.

La probabilità che si verifichi questa transizione è estremamente bassa: $3x10^{-15}$ s⁻¹. Per un atomo isolato questa transizione avviene mediamente ogni 10^{-7} anni. Tuttavia, dato il numero molto elevato di atomi di idrogeno neutro nel mezzo interstellare, le collisioni con altri atomi di idrogeno ecc... \rightarrow riga di emissione osservabile con radiotelescopi.

La radioastronomia ha portato a sostanziali incrementi della ricerca astronomica, in particolare alla scoperta di diverse nuove classi di oggetti: pulsar, quasar e galassie attive (o radio galassie).

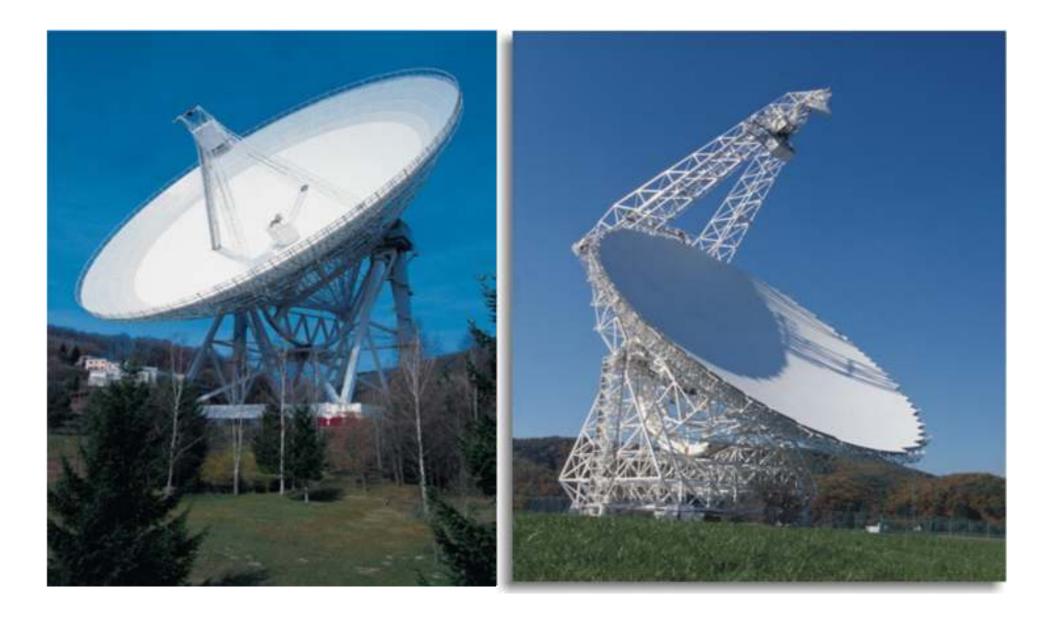
Radiotelescopi

La risoluzione angolare dipende dal rapporto tra la lunghezza d'onda della radiazione e.m. osservata e il diametro della parabola (o dell'ottica).

Poiché le lunghezze d'onda delle onde e.m. con cui lavorano i radio telescopi sono molto (tra 10⁴ a 10⁶ volte) più grandi di quelle ottiche, i radiotelescopi dovrebbero essere estremamente grandi per raggiungere la stessa risoluzione angolare dei telescopi ottici.

I più grandi radiotelescopi <u>singoli</u> hanno parabole *mobili* di 100 m (Effelsberg, Colonia, Germania; Green Bank, Pocahontas County, West Virginia) o parabola *fissa* di 300 m (Arecibo, Puerto Rico, USA).

Green Bank Telescope, West Virginia



Arecibo Puerto Rico USA



Radio Interferometria

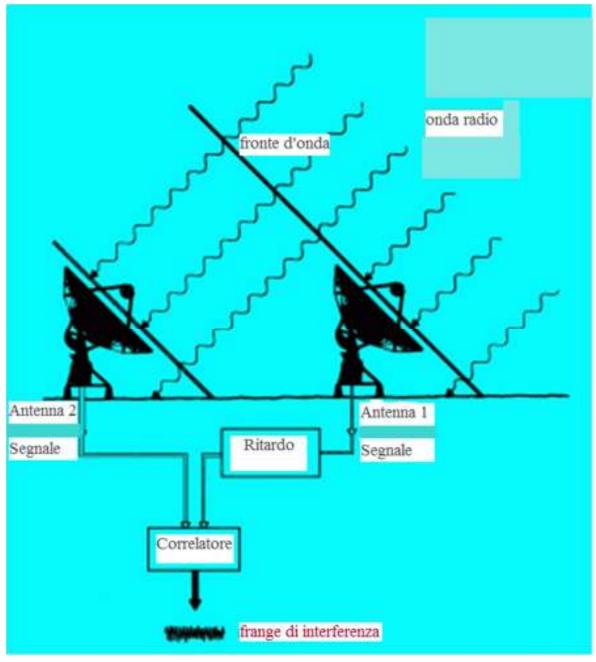
La difficoltà di ottenere buone risoluzioni con singoli radio telescopi (anche a grande apertura) ha condotto alla Radio Interferometria.

Nel caso di onde radio, è possibile ricavare l'ampiezza e la fase della radiazione incidente su una antenna in funzione del tempo.

I radiointerferometri consistono di due o più antenne, anche a grande distanza, che osservano contemporaneamente la radiazione emessa dallo stesso oggetto.

Le osservazioni ottenute da ciascuna antenna (i tracciati di ampiezza e fase in funzione del tempo) vengono poi sovrapposte, ossia fatte interferire.

Il vantaggio della interferometria è di permettere una risoluzione equivalente a quella di un radiotelescopio di diametro equivalente alla separazione massima fra le antenne utilizzate (sintesi di apertura).



Il più semplice interferometro è costituito da due antenne (1 e 2) connesse con cavi. Il segnale radioastronomico raggiunge prima la antenna 1, poi la antenna 2 con un ritardo che dipende dalla direzione in cui puntano le antenne. Introducendo un ritardo sul percorso dell'onda dell'antenna1, si ottengono segnali in fase all'ingresso del correlatore: frange di interferenza

The Very Large Array (VLA), Socorro, New Mexico, Stati Uniti. L'osservatorio consiste di 27 antenne indipendenti, ciascuna di 25 m di diametro.



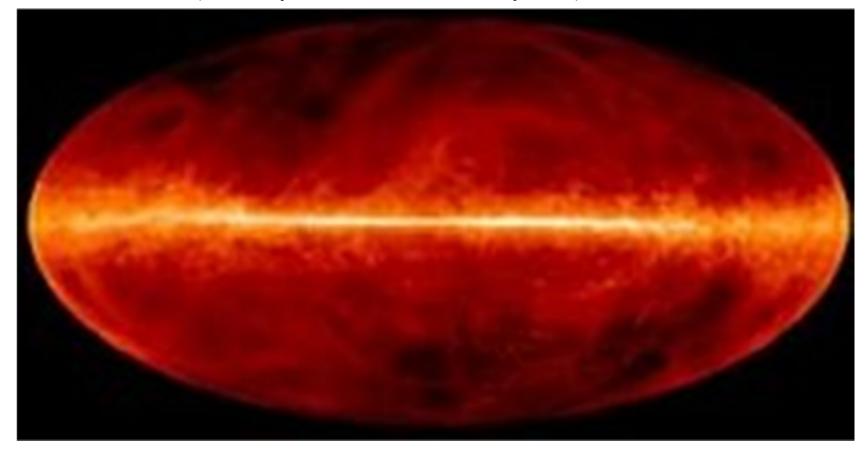
L'osservatorio radio di Medicina in Italia con la rete di dipoli della Croce del Nord, costituita da due rami perpendicolari lunghi 564 metri (Est-Ovest) e 640 metri (Nord-Sud), e il riflettore parabolico da 32 m (VLBI).



Very Long Baseline Interferometry (VLBI)
The European VLBI Network (EVN)

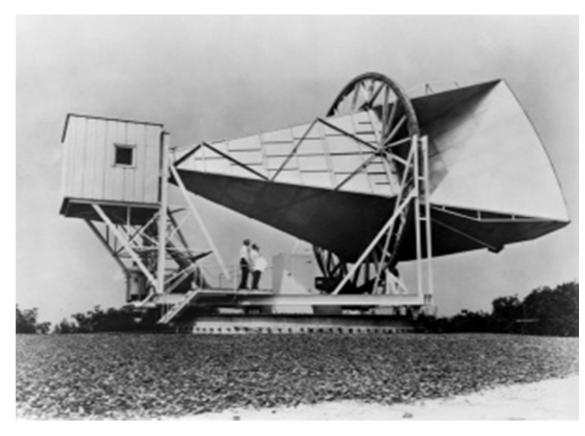


Radio 1420MHz (J. Dickey et.al. UMn. NRAO SkyView)



L'osservazioni della Via Lattea alla frequenza radio di 1420 MHz (lunghezza d'onda di 21 cm) permette di rivelare la presenza dell'idrogeno neutro che riempie la nostra galassia. Non si vedono stelle in questa immagine. Si ossevano nubi diffuse di idrogeno, il più abbondante elemento nell'universo.

Nel 1964 due scienziati dei Laboratori Bell Arno Penzias e Robert Wilson stavano cercando di rivelare con una antenna sorgenti di radiazione in grado di disturbare comunicazioni satellitari. I loro dati mostrarono, tuttavia, un rumore di fondo da un segnale a microonde corrispondente a una temperatura di circa 3 K, proveniente da ogni direzione del cielo, presente giorno e notte. Era stata scoperta la radiazione cosmica di fondo a microonde.



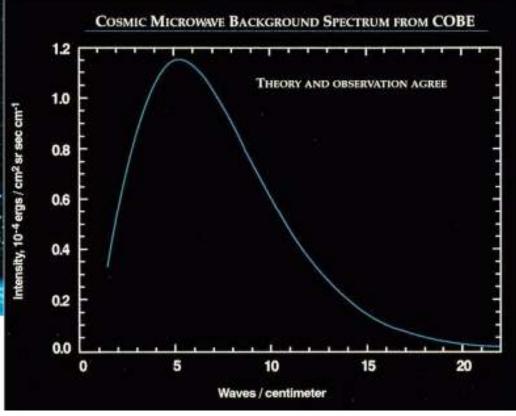
The Universe Adventure, Lawrence Berkeley National Laboratory

Arno Penzias e Robert Wilson con l'antenna a tromba utilizzata per scoprire la radiazione cosmica di fondo a microonde

COBE



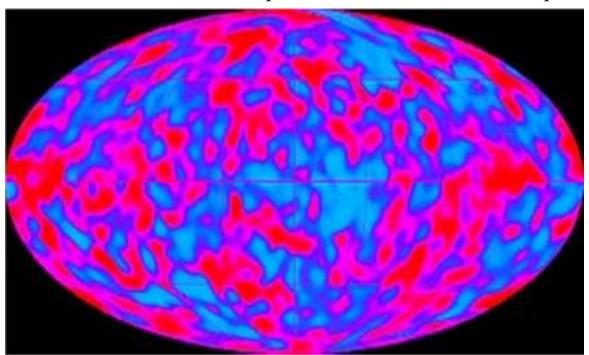
Nel 1992 il rivelatore FIRAS (Far Infrared Absolute Spectrophotometer) sul satellite COBE ha dimostrato che lo spettro e' esattamente di corpo nero, ad una frequenza di 160,2 GHz corrispondente ad una lunghezza d'onda di 1,9 mm, ad una temperatura di 2,725 K.



Cosmic Microwave Background (CMB)

La radiazione cosmica di fondo a microonde (Cosmic Microwave Background, CMB) è una radiazione che risale a circa 380000 anni dopo il Big Bang quando il plasma caldo e denso che riempiva l'universo si raffreddò con l'espansione spaziale.

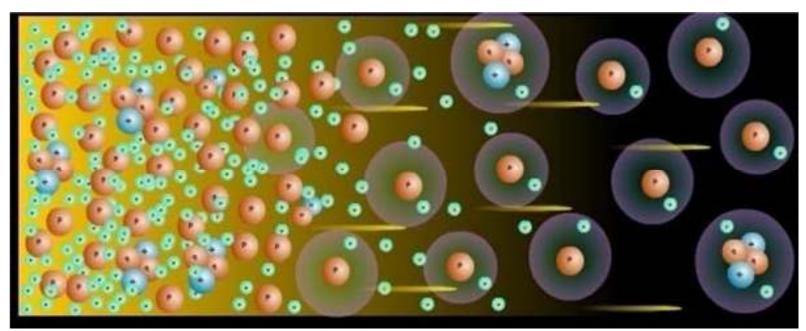
A una temperatura quasi uniforme di 2.725 K la CMB riempie l'intero universo, e può essere rivelata in qualunque direzione si osservi. Se l'occhio umano potesse vedere microonde, il cielo intero splenderebbe con luminosità quasi uguale in ogni direzione.



The Universe Adventure, Lawrence Berkeley National Laboratory

Mappa del CMB rilevata dalla sonda spaziale Cosmic Background Explorer (COBE). Le differenti macchie di colore corrispondono a differenti temperature.

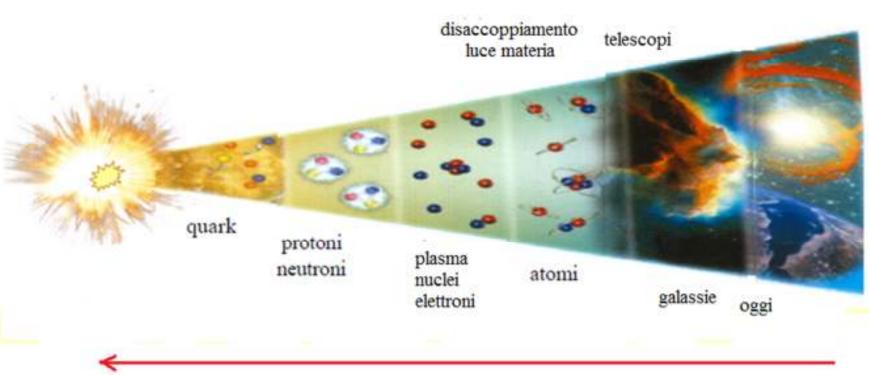
Origine del CMB



The Universe Adventure, Lawrence Berkeley National Laboratory

Durante i primi 380000 anni dopo il Big Bang, l'universo era così caldo che tutta la materia esisteva come plasma. I fotoni non potevano viaggiare indisturbati attraverso il plasma perché interagivano continuamente con elettroni e barioni (diffusione Thompson). L'universo risultava quindi opaco. Come l'universo si espanse e si raffreddò, gli elettroni iniziarono a legarsi ai nuclei, formando atomi. L'introduzione di materia neutra permise alla luce di passare liberamente senza diffusione. Questa separazione di luce e materia è nota come disaccoppiamento. La luce che si propagò indisturbata a seguito di questo disaccoppiamento è ciò che ora noi osserviamo come radiazione cosmica di fondo a microonde (CMB).

tempo (a) $3 \cdot 10^5 \text{ a}$ 10^9 a $15 \cdot 10^9 \text{ a}$

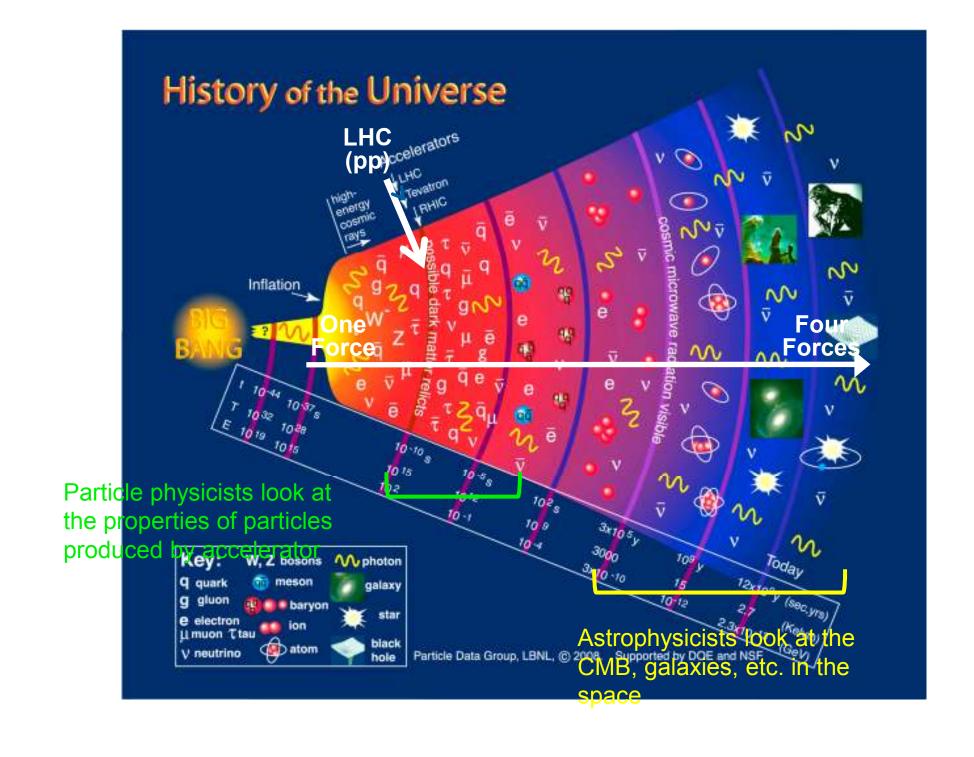


temperatura (⁰K)

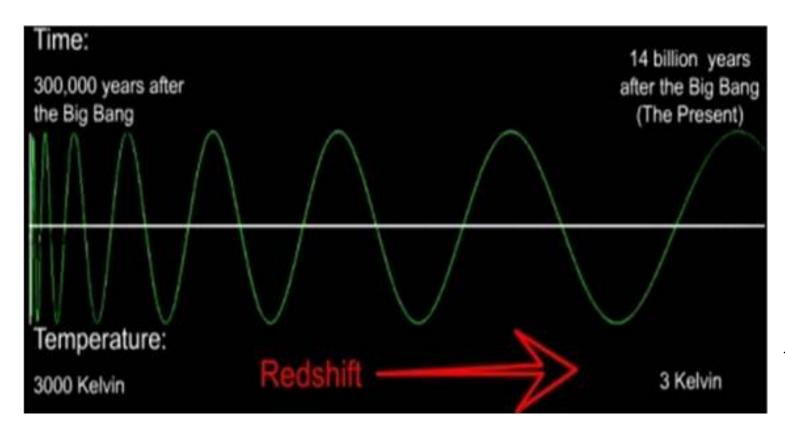
3000

20

3



Perché il CMB è così freddo?

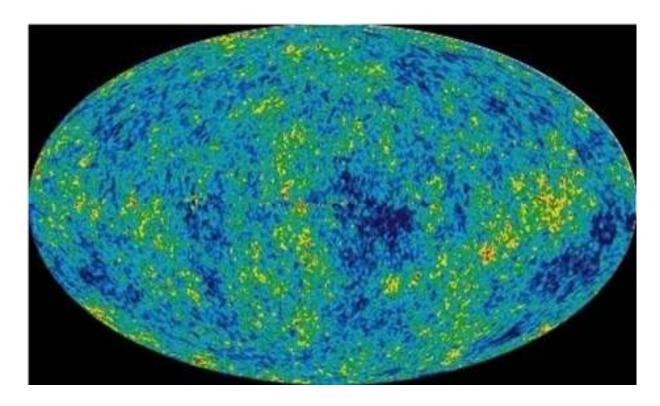


The Universe Adventure, Lawrence Berkeley National Laboratory

La luce del CMB è spostata verso il rosso (redshifted) a causa dell'espansione dell'universo.

La CMB è un esempio perfetto di redshift. Originariamente la luce aveva lunghezze d'onda assai più corte ed una energia associata più elevata, corrispondente a una temperatura di circa 3000 K. Come l'universo si espandeva, le lunghezze d'onda si allungavano e l'energia diminuiva. Circa 14 miliardi di anni dopo questa luce raggiunge la terra, e noi la osserviamo come microonde a una temperatura di 2.7 K.

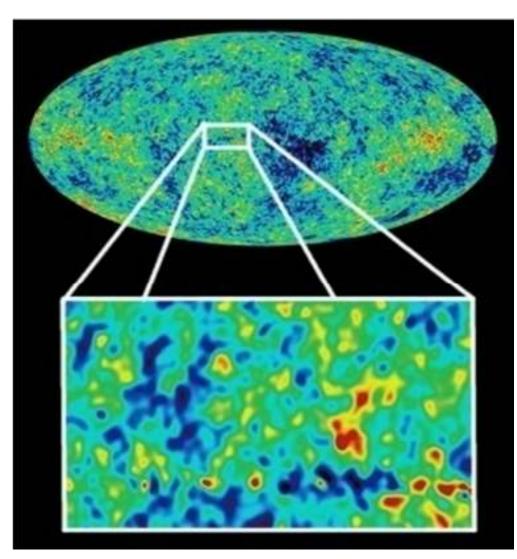
The Surface of Last Scattering



Mappa del CMB rilevata dalla sonda spaziale WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe).

La luce che si propagò indisturbata a seguito del disaccoppiamento tra luce e materia è ciò che ora noi osserviamo come radiazione cosmica di fondo a microonde (CMB): the "Surface of Last Scattering".

Sebbene la temperatura del CMB è quasi completamente uniforme a 2.7 K, ci sono molte piccole variazioni o anisotropie nella temperatura dell'ordine di 10⁻⁵ K. Le anisotropie appaiono nella mappa come macchie blu (più fredde) e rosse (più calde).

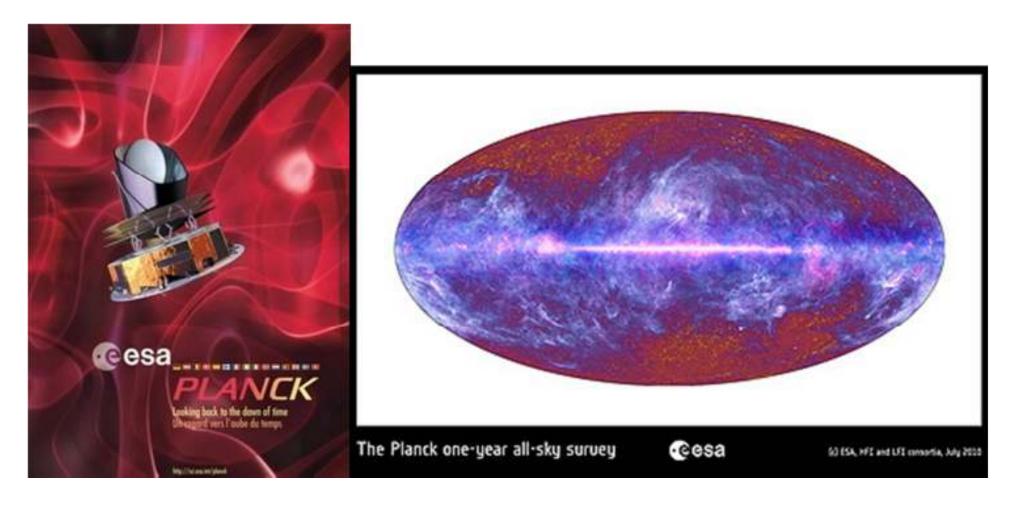


Le anisotropie nella mappa della temperatura corrispondono ad aree di fluttuazioni di densità nell'universo primordiale. Alla fine, la gravità dovrebbe attrarre le fluttuazioni ad alta densità e renderle più dense e più pronunciate.

Dopo miliardi di anni, queste piccole increspature nell'universo primordiale, a causa dell'attrazione gravitazionale, si sono trasformate in pianeti, stelle, galassie e ammassi di galassie che noi osserviamo oggi.

Mappa del CMB rilevata dalla sonda spaziale WMAP.

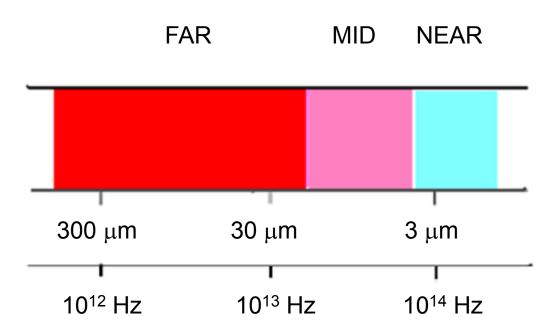
The Universe Adventure, Lawrence Berkeley National Laboratory



Planck was launched on 14 May 2009 together with the Herschel satellite.

Credits: ESA, LFI & HFI Consortia

INFRAROSSO



INFRAROSSO

La radiazione infrarossa occupa l'intervallo di lunghezze d'onda (frequenza) compreso tra 1mm e 750 nm (300 GHz e 400 THz). La banda dell'infrarosso è comunemente divisa in tre parti: FAR, MID, NEAR. La regione FAR è vicina alla banda delle microonde, la NEAR è vicina alla banda della luce visibile.

Circa il 50% della radiazione solare è emessa nella regione infrarossa (NEAR, vicina al visibile), il resto è emesso nel visible e, in piccola parte, nell'ultravioletto. La terra, a una temperatura media di circa 15 °C, emette nell'infrarosso.

Termografia

Comunicazioni

Fisica dell'atmosfera

Astronomia

Riflettografia / Tecniche non invasive di indagini diagnostiche (beni culturali)

TERMOGRAFIA

Tutti i corpi con una temperatura emettono radiazione infrarossa. Corpi a temperatura ambiente, animali ed esseri umani emettono radiazione infrarossa di lunghezza d'onda di circa 10 μm.

Dalla misura della radiazione emessa da un corpo, di emissività nota, può quindi essere ricavata, senza contatto, la sua temperatura.

La termografia sfrutta la capacità di alcuni dispositivi di rivelare l'intensità della radiazione nella zona termica dell'infrarosso. Per rilevare la radiazione infrarossa emessa da un corpo si utilizzano termocamere: questi strumenti (sensibili a radiazioni tra 0.9 e $14~\mu m$) sono in grado di rilevare le temperature dei corpi analizzati attraverso la misura dell'intensità della radiazione emessa. Le differenze di temperatura sono evidenziate nell'immagine da differenti (falsi) colori.

Numerose utilizzazioni in ambito industriale, militare, medico, scientifico, in edilizia, nel restauro, ecc..



Immagine di un gatto nell'infrarosso. Le regioni arancione sono le più calde, quelle biancoazzurre le più fredde.

Credit: SE-IR Corporation, Goleta, CA

Termografia in ambito medico.

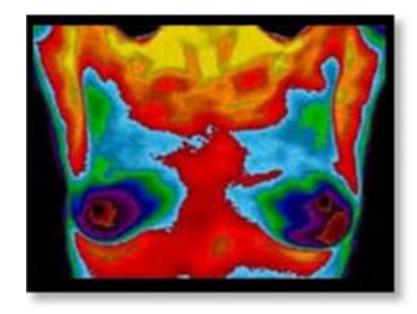
La termografia medica è una tecnica diagnostica non invasiva e indolore che misura la temperatura della superficie corporea tramite l'energia termica emessa dall'organismo attraverso la cute sottoforma di radiazione infrarossa.

Potrebbe essere impiegata nella diagnostica precoce del cancro al seno, in reumatologia, disturbi circolatori ecc

Diagnostica precoce del cancro al seno. La procedura è basata sul fatto che l'attività dei vasi sanguigni nello stadio iniziale di crescita delle celle cancerogene e in quelli successivi è assai elevata e l'aumento del flusso sanguigno in questi tessuti comporta un aumento della temperatura rispetto alla normale temperatura del seno.

La termografia può inoltre mettere in evidenza asimmetrie (tra destra e sinistra) nella temperatura: piccole asimmetrie potrebbero rivelare una lesione sospetta.

La tecnica è interessante ma l'efficacia diagnostica della termografia **non** è ancora stata provata.



Credit: IACT, International Academy of Clinical Thermology

COMUNICAZIONI

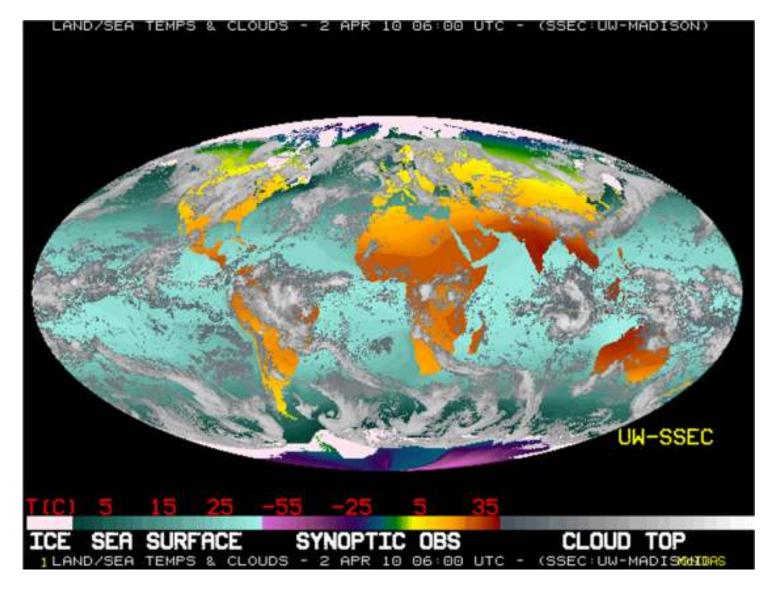
Raggi infrarossi sono utilizzati per comunicazioni su distanze brevi nei telecomandi per televisori (per evitare interferenze con le onde radio del segnale televisivo), per palmari, smartphone, home theater system e altri dispositivi elettronici.



FISICA DELL 'ATMOSFERA



Immagine nell'infrarosso della Terra presa dal satellite GOES nel 1986. L'infrarosso permette di osservare la struttura delle nubi in maggior dettaglio rispetto al visibile: le nubi più scure sono più calde, quelle più chiare più fredde.



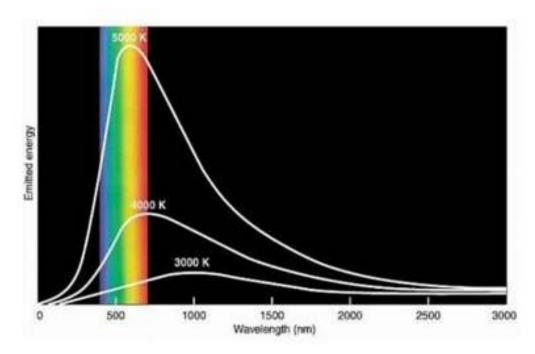
Montaggio con la rielaborazione a colori delle immagini riprese da satelliti geostazionari. La immagine delle nubi è una combinazione delle immagini di GMS, GOES-8 e Meteosat. (Università del Wisconsin, Madison, USA).

Irraggiamento e Corpo Nero

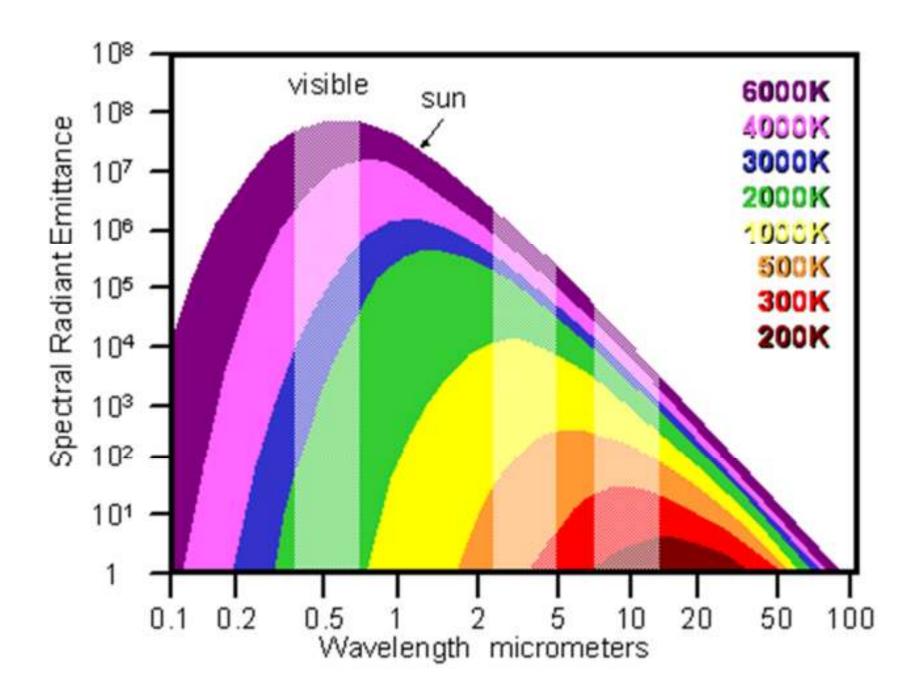
Legge di Planck, in funzione della lunghezza d'onda λ

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\frac{hc}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}}$$

 $I(\lambda, T)$ rappresenta l'energia irradiata, ossia l'energia emessa per secondo dalla superficie di un m², per una unità di lunghezza d'onda.



Spettri di corpo nero per oggetti a tre differenti temperature: 5000 K, 4000 K, 3000K.



Legge dello spostamento di Wien

La lunghezza d'onda a cui l'intensità della radiazione prodotta da un corpo nero è massima, λ_{max} , è funzione unicamente della temperatura e diminuisce al crescere della temperatura

$$T \lambda_{max} = b$$

b (costante di Wien) è uguale a 2.898×10⁻³ m K.

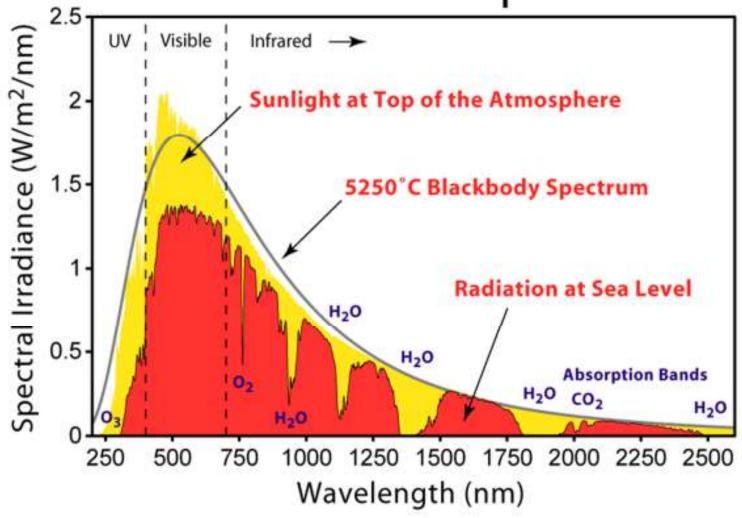
Legge di Stefan-Boltzmann

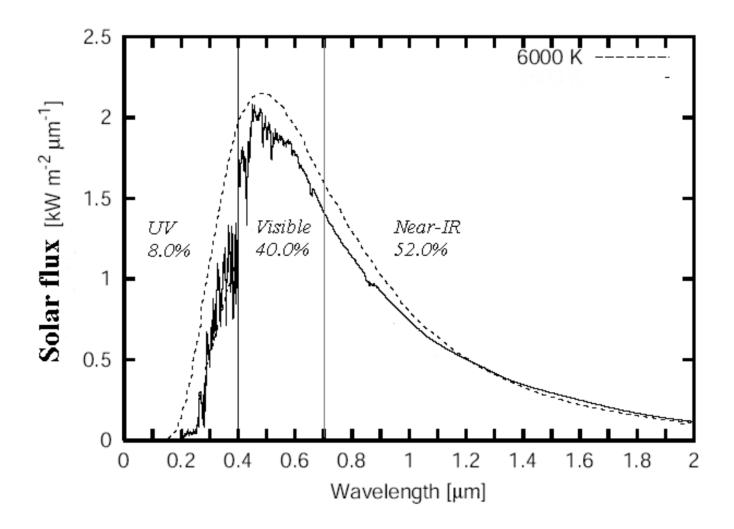
L'energia totale irradiata per unità di superficie di un corpo nero, in unità di tempo, U (flusso della radiazione), è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta

$$U = \sigma T^4$$

 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ è la costante di Stefan-Boltzmann.

Solar Radiation Spectrum





The spectrum of solar radiation (at the top of the atmosphere) and a blackbody with T=6000 K.

Lo spettro della radiazione solare, misurato al di fuori della atmosfera terrestre, è riproducibile con quello di un corpo nero a 5800 K. Considerato quindi il sole come un corpo nero, il suo spettro di emissione indica una temperatura di 5800 K alla sua superficie.

Dalla legge di Wien $\lambda_{\text{max}} = 2.897 \ 10^{-3} \ / \ 5800 \cong 500 \ \text{nm}$ (banda visibile)

Radiazione solare extra-terrestre:

$$\sim 40\%$$
 visibile, $\sim 52\%$ infrarosso, $\sim 8\%$ ultravioletto

Il flusso della radiazione solare (potenza emessa dal sole per unità di superficie)

$$U = \sigma T^4 = 5.67 \cdot 10^{-8} \times (5800)^4 \sim 6.4 \cdot 10^7 W/m^2$$

Luminosità (potenza media irradiata dal sole):

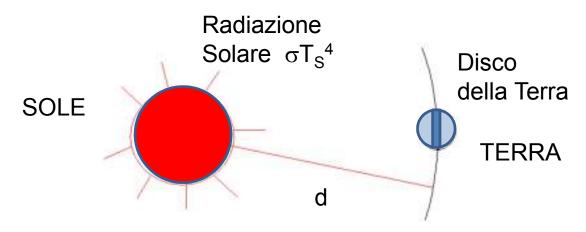
$$L = 4\pi R_S^2 \cdot U \sim 3.9 \cdot 10^{26} W$$

con R_S raggio solare equatoriale = 696,1 10⁶ m

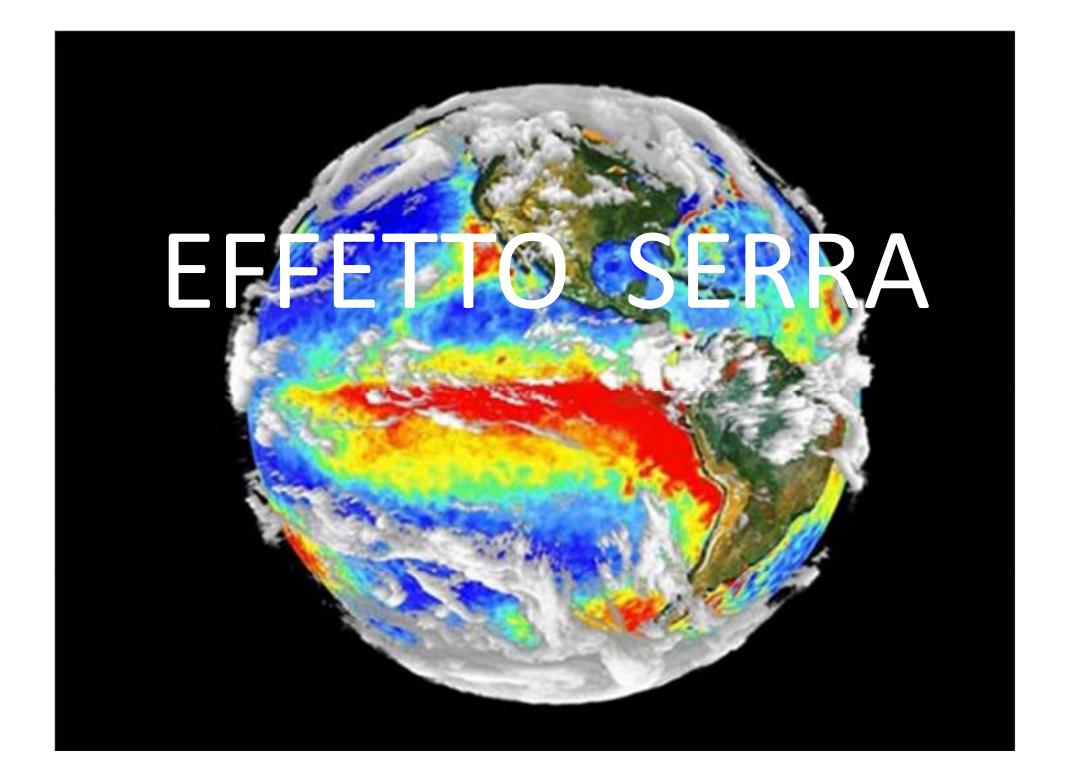
La Terra dista dal Sole $d = 1.5 \ 10^{11} \, \text{m}$. La potenza media irradiata dal sole, a quella distanza, è distribuita uniformemente su una sfera con centro il sole e di raggio d. La potenza media per unità di superficie al di fuori dell'atmosfera terrestre

$$S = (L / 4\pi d^2) = 1370 W/m^2$$

è chiamata Costante Solare della terra. Questo flusso di radiazione solare (1370 W/m²) è intercettato dalla terra su un disco di area πR_T^2 posto perpendicolarmente ai raggi del sole (R_T , raggio della terra).



Tenuto conto della sfericità della terra (solo attorno all'equatore i raggi del sole incidono perpendicolarmente) e dei suoi moti, il flusso di radiazione solare che arriva sulla terra sopra l'atmosfera è di 342 W/m².



Radiazione in entrata e Radiazione in uscita

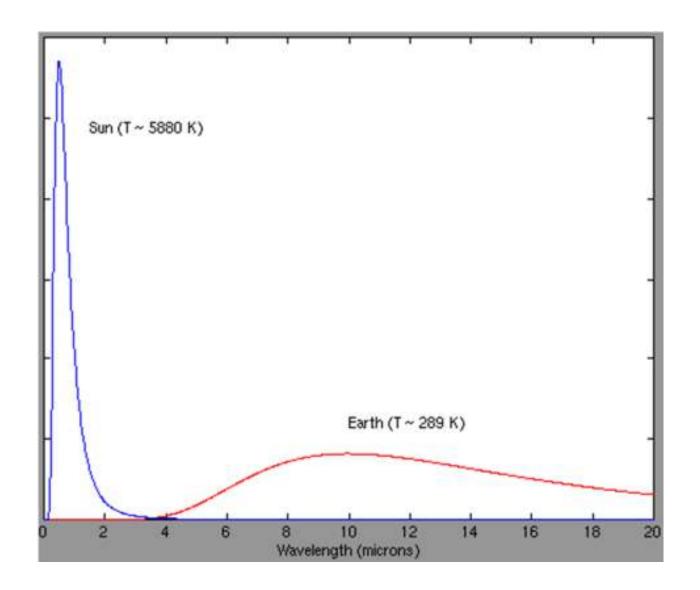
La radiazione entrante (ultravioletto, visibile e infrarosso vicino, con lunghezza d'onda tra 0.2 e $4 \mu m$, shortwave radiation) arriva, in larga misura, sulla superficie della terra (l'atmosfera è in parte trasparente a questa radiazione) e scalda terra e mare.

La terra riscaldata da questa radiazione emette una radiazione a lunghezze d'onda maggiori di quelle dello spettro solare data la sua temperatura molto più bassa, secondo la legge di Planck. La radiazione emessa (infrarosso, con lunghezza d'onda tra 4 e 50 µm, longwave radiation) è in gran parte assorbita dall'atmosfera e la riscalda. L'atmosfera riemette radiazione sia verso l'alto, lo spazio, sia verso il basso, la terra. La superficie terrestre e la parte più bassa dell'atmosfera sono riscaldate da quest'ultima radiazione.

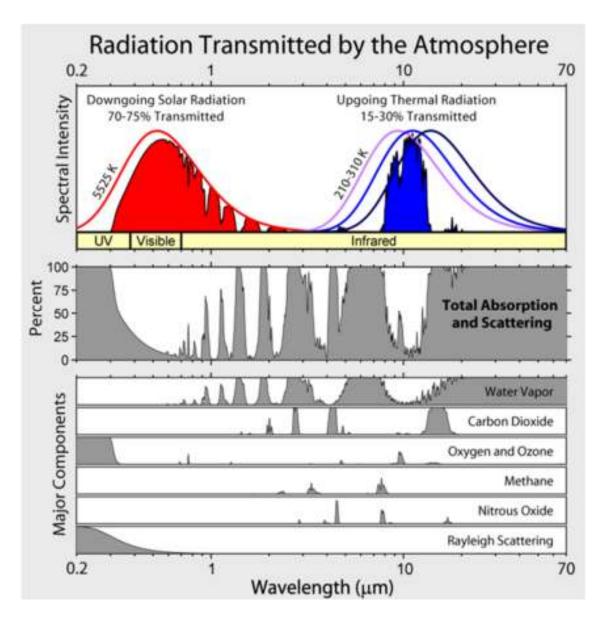
La temperatura aumenta fino al raggiungimento di un equilibrio radiativo

radiazione in entrata = radiazione in uscita

La temperatura media terrestre è di circa 15 °C.



(the magnitude of the Earth curve has been magnified 500,000 times)



Bande di assorbimento di gas serra nell'atmosfera e l'effetto risultante sulla radiazione solare incidente e sulla radiazione termica uscente.

Stima della temperatura della terra (in assenza di atmosfera)

La terra riflette nello spazio parte (circa il 30%) della radiazione solare. Questa frazione di radiazione è chiamata albedo (è dovuta a nubi, neve, ghiaccio ecc..). La parte restante della radiazione solare incidente (1-albedo) = 70% è assorbita dalla terra.

Indicato con S la costante solare e con A l'albedo, valutiamo il bilancio energetico della terra.

Energia radiante assorbita dalla terra nell'unità di tempo: (1-A) S πR_T^2

L'energia irradiata dalla terra è data dal flusso di energia dovuto alla sua temperatura (legge di Stefan-Boltzman) per la superficie della terra $4\pi R_T^2$.

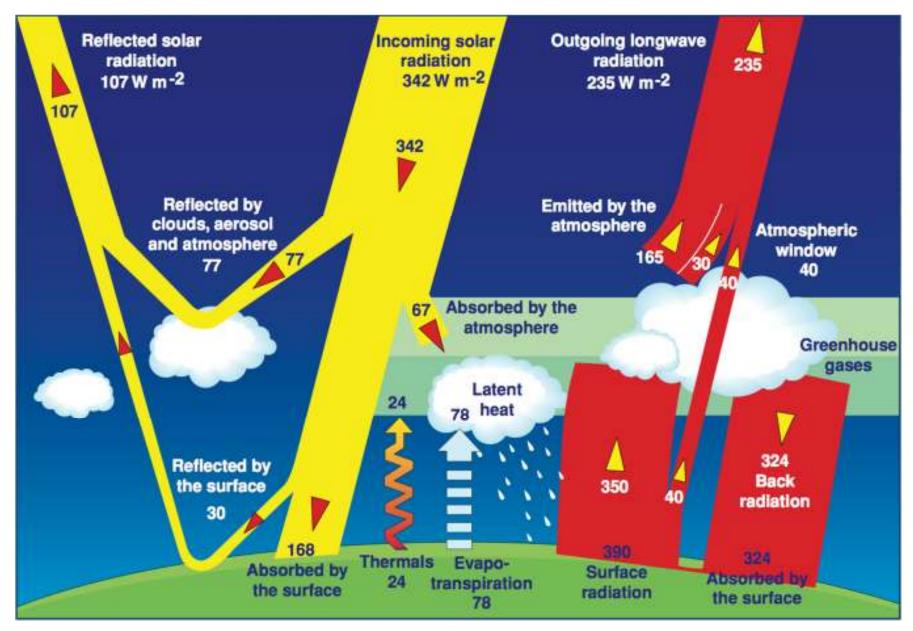
Energia radiante ceduta dalla terra nell'unità di tempo: $4\pi R_T^2 \sigma T_T^4$

Bilancio radiativo: (1-A) S
$$\pi R_T^2 = 4\pi R_T^2 \sigma T_T^4$$

(1-A)
$$S/4 = \sigma T_T^4$$

Da cui la temperatura media della terra (in assenza di atmosfera): 255 K (-18 °C).





Radiation Balance of the Earth (Jeffrey T. Kiehl and Kevin Trenberth)
From CERES Instrument Brochure (NASA's Earth Observing System)

ASTRONOMIA INFRAROSSA

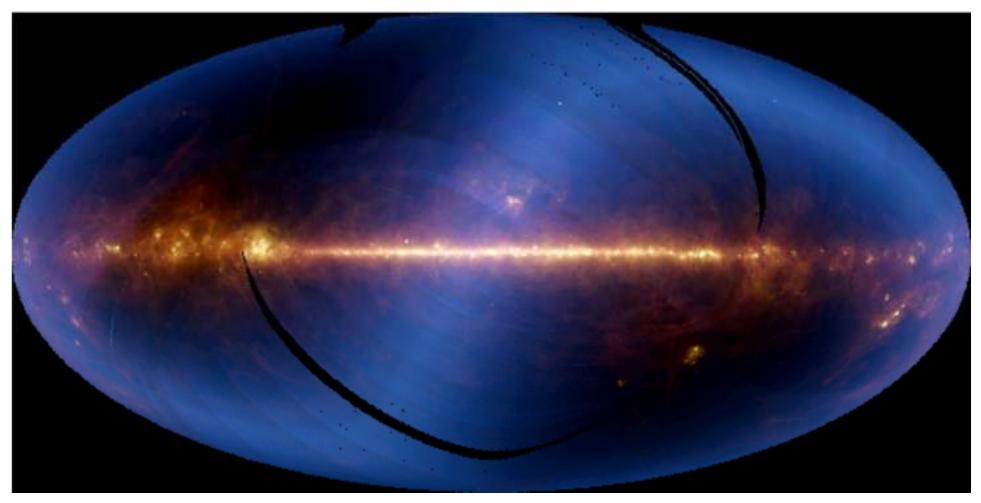
La radiazione infrarossa proveniente dallo spazio viene, per la maggior parte, assorbita dall'atmosfera terrestre, quindi per osservare il cielo nell'infrarosso è necessario utilizzare satelliti o palloni sonda.

L'osservazione nell'infrarosso è utilizzata per rivelare oggetti freddi, che non emettono nel visibile ma che emettono appunto radiazione infrarossa. Inoltre sono molti gli oggetti di interesse nascosti o immersi in nubi di gas e di polveri. Uno dei principali vantaggi della osservazione nell'infrarosso consiste nel fatto che questa radiazione (che ha una lunghezza d'onda maggiore rispetto alla luce visibile) può attraversare regioni piene di polveri, regioni completamente opache alla radiazione visibile che viene assorbita e diffusa.

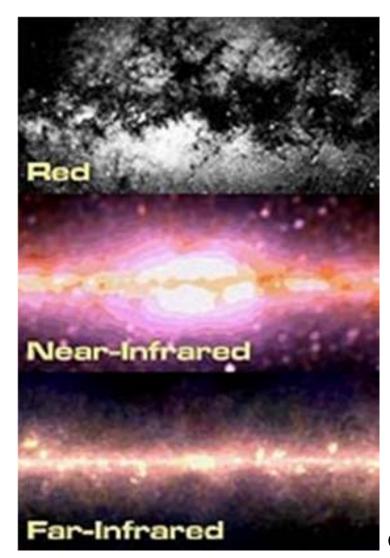
L'osservazione nell'infrarosso è quindi particolarmente indicata nello studio di oggetti relativamente freddi e nascosti o immersi in polveri e gas: pianeti, stelle fredde, nane brune, protostelle, galassie in formazione, nebulose oscure...

Nel 1983 fu messo in orbita il primo telescopio infrarosso: IRAS (Infrared Astronomical Satellite), che rivelò oltre 350000 sorgenti nell'infrarosso.

IRAS View of the Milky Way Galaxy



Credit: Infrared Processing and Analysis Center, Caltech/JPL.

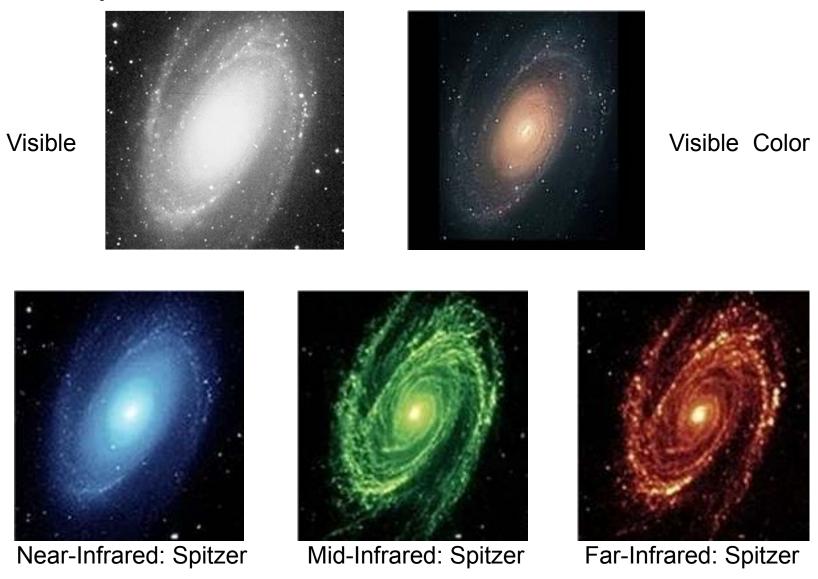


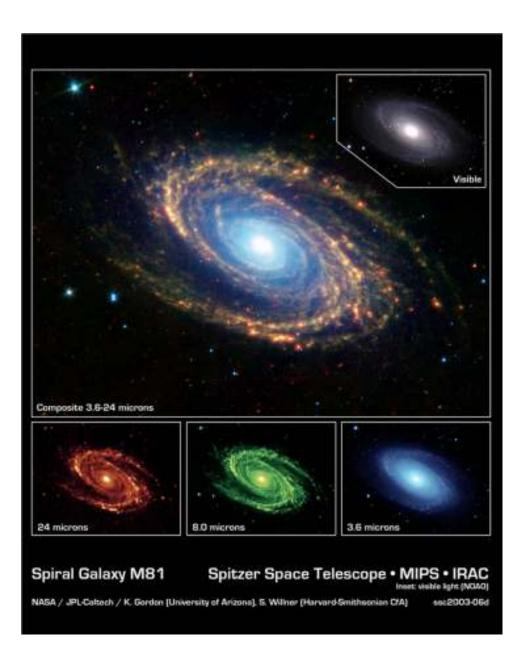
Le immagini a sinistra mostrano la regione centrale della Via Lattea, osservata nel visibile (rosso), nell'infrarosso vicino e nell'infrarosso lontano.

Le immagini mostrano come aree che non sono visibili nell'ottico risultino luminose nell'infrarosso.

Credit: Infrared Processing and Analysis Center, Caltech/JPL.

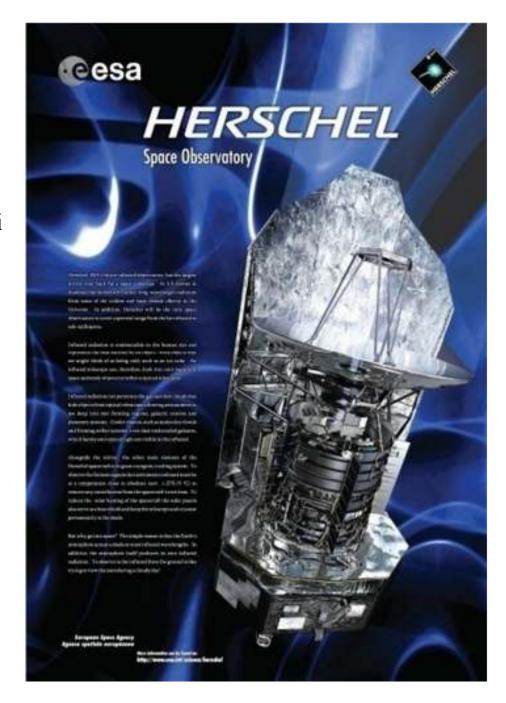
MESSIER 81. Messier 81 is a magnificent spiral galaxy located in the northern constellation of Ursa Major





L'Agenzia Spaziale Europea ha sviluppato un ambizioso progetto di un grande osservatorio infrarosso orbitale chiamato **Herschel**.

Lanciato il 14 maggio 2009, **Herschel** ha il compito di determinare la composizione delle grandi nubi molecolari presenti nelle galassie, di studiare gli oggetti più freddi dell'universo e del sistema solare determinandone sia la composizione chimica che le proprietà fisiche.



Giovani stelle nella nube di Rosetta

La Nebulosa Rosetta dista circa 5000 anni luce dalla Terra, ed è associata ad una più grande nube che contiene abbastanza polvere e gas da dar vita all'equivalente di 10.000 stelle come il Sole. L'immagine di Herschel mostra la formazione di grandi stelle mai viste prima. Le macchie più luminose sono bozzoli di polvere che nascondono gigantesche protostelle



Credits: ESA/PACS & SPIRE Consortium/HOBYS Key Programme Consortia

che diventeranno stelle con massa dieci volte quella del sole. Ogni colore rappresenta una diversa temperatura della nebulosa, dal rosso (-263°C) al blu (-233°C).

Tecniche non invasive di indagini diagnostiche Beni Culturali

- > fotografia nel VISIBILE a luce diffusa e radente
- > riflettografia nel VISIBILE, INFRAROSSO, ULTRAVIOLETTO
- > spettroscopia di fluorescenza a raggi X
- radiografia a raggi X

Diagnostica spettroscopica di un dipinto: tecniche di immagine

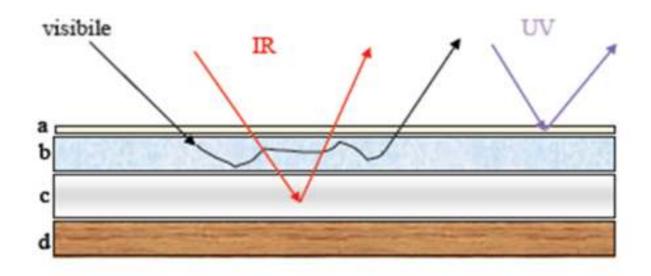


Riflettografia a colori Riflettografia IR

Fluorescenza UV Radiogra

Radiografia a raggi X

Interazione della radiazione luminosa con una superficie pittorica



Struttura di un dipinto classico

- d) Supporto, costituito da tavole di legno
- c) **Strato di preparazione,** steso sul supporto per poter applicare il colore in modo uniforme.
- b) Disegno preparatorio, cui segue lo Strato pittorico.
- a) **Vernice**, costituita da resine naturali, applicata su tutta la superficie del dipinto con funzione protettiva.

Indagine in Luce radente

Le fotografie con le quali vengono documentati i dipinti e le opere d'arte sono normalmente eseguite a luce diffusa, ovvero ricreando, anche artificialmente, condizioni di illuminazione che rendano al meglio leggibile la composizione e i suoi valori cromatici. In altre parole queste fotografie vengono realizzate cercando di eliminare qualsiasi riflesso speculare della superficie ma al tempo stesso cercando di rispettare il più possibile le normali condizioni di osservazione dell'opera. Il primo passo per esaminare un dipinto con lo scopo di ottenere nuove informazioni e indagare il suo stato di conservazione e la tecnica con il quale è stato eseguito consiste nell'illuminarlo con un fascio di luce radente la superficie.

Con luce radente si intende un fascio luminoso parallelo alla superficie o formante con questa un angolo molto ridotto.

In queste condizioni tutti i difetti della superficie vengono accentuati al punto che l'immagine del dipinto risulterà in qualche caso irriconoscibile. La luce radente farà apparire anche i più piccoli sollevamenti del colore e della preparazione guidando così il restauratore nell'esecuzione di interventi localizzati e nel controllo del risultato ottenuto. Inoltre può anche fornire informazioni sulla tecnica pittorica (poiché evidenzia la pastosità delle pennellate, l'eventuale impiego della spatola, etc.).

Fotografia con luce diffusa (Sinistra) e luce radente (Destra). La luce radente mette in evidenza la tecnica pittorica di Van Gogh





Van Gogh Mademoiselle Gachet dans son jardin Musée d'Orsay

La ripresa in luce radente (Destra) evidenzia lo stato di conservazione del film pittorico non rilevabile dall'immagine nel visibile in luce diffusa (Sinistra)





RIFLETTOGRAFIA IR

La riflettografia infrarossa (IR) è una tecnica ottica non distruttiva per l'esame di superfici dipinte, e in particolare di dipinti antichi su tavola e su tela, che consente di registrare immagini nell'infrarosso, dette riflettogrammi, aventi l'aspetto di fotografie in bianco e nero, da cui è possibile interpretare il disegno realizzato dall'autore sullo strato preparatorio dell'opera. Ciò avviene per via dalla trasparenza dello strato pittorico alla radiazione nell'infrarosso vicino, a quella radiazione cioè, che ha una lunghezza d'onda compresa tra 1 e 2 micron. Gli storici dell'arte fanno oggi largo uso di questo tipo di indagine, che risulta imprescindibile per ottenere informazioni sulla tecnica dell'autore e sul mezzo grafico impiegato per il disegno.





L'immagine riprodotta è un particolare della pala "Madonna col Bambino e Santi" realizzata da Matteo di Giovanni per la cattedrale di Pienza.

Inoa – Gruppo Beni Culturali – Diagnostica Ottica per la Conservazione

Riflettografia nel visibile e nell'infrarosso (IR)

Da: S. Lorusso, *The traditional, the innovative*..,Conference at the Italian Cultural Institute of New York(2009).

Al fine di caratterizzare la tecnica pittorica utilizzata durante la stesura del dipinto ed individuare la presenza di possibili disegni preparatori e/o ripensamenti pittorici, è stata utilizzata la tecnica di riflettografia nell' IR. La ripresa complessiva del dipinto eseguita in infrarosso evidenzia un dato molto importante: la presenza di un'altra figura alla destra della Vergine.

Ciò può significare sia un pentimento sia l'utilizzo di una tavola già parzialmente dipinta: tale figura potrebbe essere attribuibile a san Giuseppe.





Madonna col Bambino e ritratto di devoto, attribuito all'artista veneziano Alvise Vivarini (circa 1445-1505).

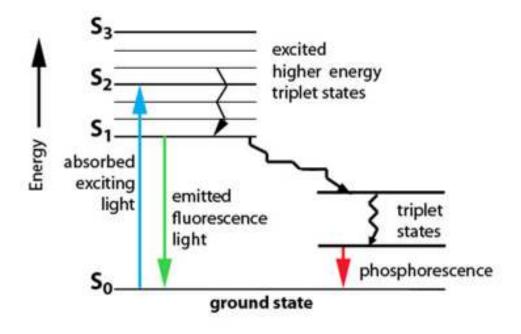
La fluorescenza UV-VIS

- E' una tecnica ottica per ottenere immagini di superfici dipinte usando radiazione nella **banda spettrale dell'ultravioletto**
- ➤ Si raccoglie la fluorescenza emessa dalla superficie
- Se applicata all'analisi di dipinti antichi, può rivelare la presenza di vernici, leganti, coloranti o particolari pigmenti di restauro

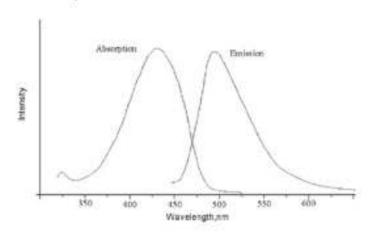
La fluorescenza UV-VIS

La fluorescenza è un processo di decadimento radiativo per cui una molecola assorbe radiazioni della banda ultravioletta e le emette nel visibile, con una frequenza cioè più bassa di quella iniziale. La molecola passa dal livello energetico fondamentale a uno eccitato con una transizione elettronica, dopo di che inizia a cedere energia tramite urti con altre molecole. Arrivata a un certo punto perde l'energia rimasta con un processo radiativo e quindi la radiazione è emessa con una frequenza minore di quella iniziale, cioè nel visibile.

L'ordine di grandezza tipico del fenomeno è di 10⁻⁹ secondi.



Spettro di fluorescenza



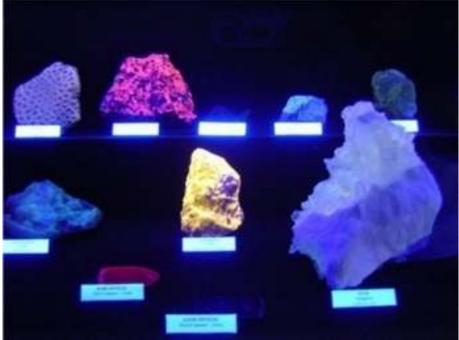
Spettro di assorbimento (a destra) e spettro di emissione (a sinistra) di una molecola fluorescente

Molti dei materiali usati tradizionalmente in pittura presentano, anche se debole, una emissione per fluorescenza nel visibile.

Qui è possibile vedere il colore naturale di 10 minerali illuminati con luce bianca (foto a Sinistra). I minerali dall'alto in basso e da sinistra a destra sono: corallo, calcite con willemite, quarzo, scheelita, quarzo con calcite, agata, wernrita, gesso, hackmanita e rubino rosso e azzurro.

Nella foto a Destra si osserva la reazione dei minerali alla luce ultravioletta a onde lunghe (366 nm)





Collection of various fluorescent minerals under UV-A, UV-B and UV-C light



Un caso di fluorescenza spontanea in natura può essere mostrato da certi fiori, come si vede nella figura a destra.

La sorgente di UV è il cielo; l'oggetto illuminato è un campo pieno di fiori di Crocifere.

I fiori appaiono più brillanti del cielo.

Il nostro occhio non è sensibile all'UV e ci fa vedere il cielo scuro. Invece i fiori, che contengono abbondanti pigmenti gialli, sono fluorescenti, e trasformano una parte dell'irraggiamento UV in luce "visibile": nella banda visibile, essi ci appaiono più luminosi del cielo.

C. Zeiss - Ein Lichtjahr, 1999, 4. Modif.



La fluorescenza UV-VIS

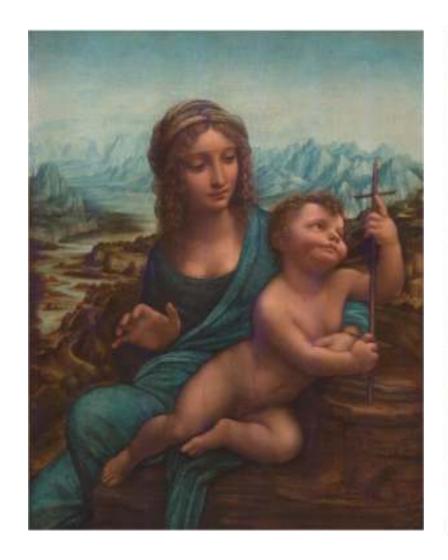
Questa tecnica se applicata all'analisi di dipinti antichi, può rivelare la presenza di vernici, leganti, coloranti o particolari pigmenti di restauro.

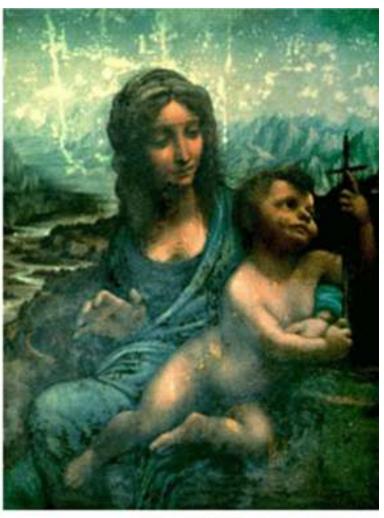




Il Perugino, Adorazione dei Magi (particolare), Trevi (Perugia) 1522

La fotografia della fluorescenza da ultravioletti





Leonardo, Madonna dei Fusi

Spettroscopia di fluorescenza a raggi X

La fluorescenza a raggi X , prodotta irraggiando un campione con raggi X, è una delle tecniche di analisi più utilizzate nel campo dei beni culturali. La fluorescenza X è un metodo di analisi elementare che permette, senza dover prelevare sull'opera e grazie ai raggi X, di identificare le sostanze chimiche dei pigmenti degli strati superficiali.

In questa tecnica, il campione è colpito con un fascio di raggi X con una energia sufficientemente elevata da provocare negli atomi colpiti l'emissione di elettroni dagli orbitali più interni. Le vacanze che si generano sono riempite da elettroni appartenenti ad orbitali più esterni con emissione di fotoni (raggi X) con energia caratteristica dell'elemento chimico eccitato e pari alla differenza di energia tra i due orbitali coinvolti nella transizione. Poiché l'energia delle radiazioni emesse è minore di quella incidente, si parla di fluorescenza X o XRF (X-Ray Fluorescence). L'energia delle radiazioni emesse permette di riconoscere qualitativamente gli elementi presenti nel campione nel punto irraggiato, mentre l'intensità delle radiazioni è correlabile alla concentrazione degli elementi.

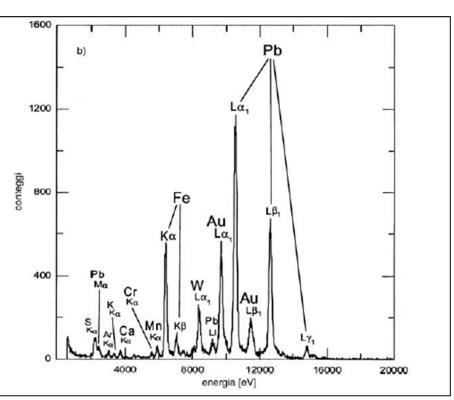
La strumentazione utilizzata deve avere una buona risoluzione energetica nella misura dei raggi X (ad es. 150 eV FWHM a 6 keV) per potere distinguere linee vicine dello spettro.

La conoscenza degli elementi chimici presenti in un dipinto consente di risalire ai pigmenti utilizzati → informazioni sulla tecnica pittorica dell'artista, elementi utili ad eventuale restauro dell'opera; inoltre individuazione di pigmenti anacronistici, introdotti cioè in epoca posteriore a causa di ritocchi successivi ecc...

Affreschi di Lorenzo Lotto nella Cappella della Vergine in san Michele al Pozzo Bianco a Bergamo.

A sinistra particolare dell'aquila con aureola. A destra lo spettro di fluorescenza: si nota la presenza di ferro (Fe, ocra gialla) e di oro (Au) nel pigmento oro giallo dell'aureola dell'aquila.



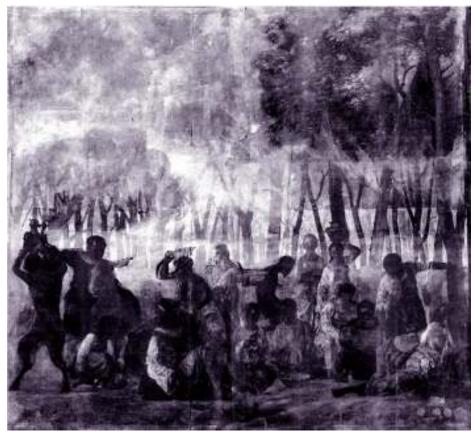


C. Fiorini, A. Gianoncelli, A. Longoni. Il nuovo saggiatore (2002).

Radiografia a raggi X

La festa degli dei (Bellini, Dosso, Tiziano), National Gallery of Art in Washington, D.C.





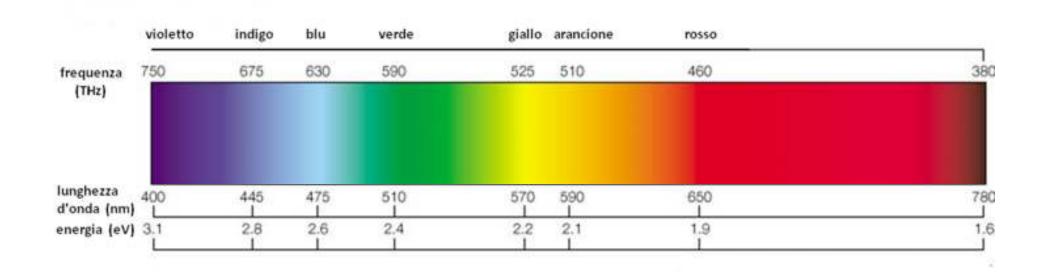
Sono evidenti strutture che nella realizzazione finale non sono state mantenute, come la foresta di alberi e soprattutto i vestiti che ricoprivano i seni delle dee e che nell'opera finale risultano assenti ("Bellini'First" è una ricostruzione di come l'opera doveva presentarsi nella prima fase in base all'immagine ottenuta ai raggi x)





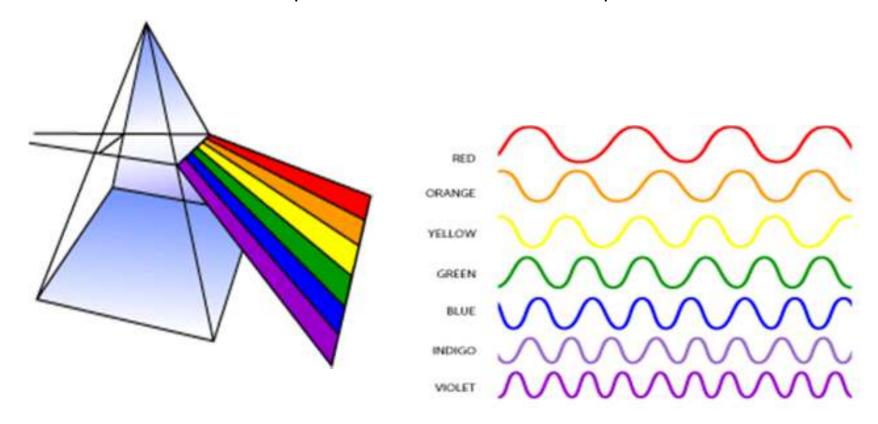


LA LUCE, LO SPETTRO VISIBILE



La radiazione visibile occupa l'intervallo di lunghezze d'onda (frequenza) compreso tra 750 nm e 400 nm (400 GHz e 750 THz)

La luce bianca attraverso un prisma è divisa nei colori dello spettro della luce visibile.



Anche il vapore acqueo nell'atmosfera può separare la luce bianca nelle sue componenti creando l'arcobaleno.



ULTRAVIOLETTO

La radiazione ultravioletta occupa l'intervallo di lunghezza d'onda (frequenza) compreso tra la luce visibile e i raggi X, ossia tra:

400 nm e 10 nm (750 THz e 30000 THz) ed energie tra 3 eV e 124 eV.

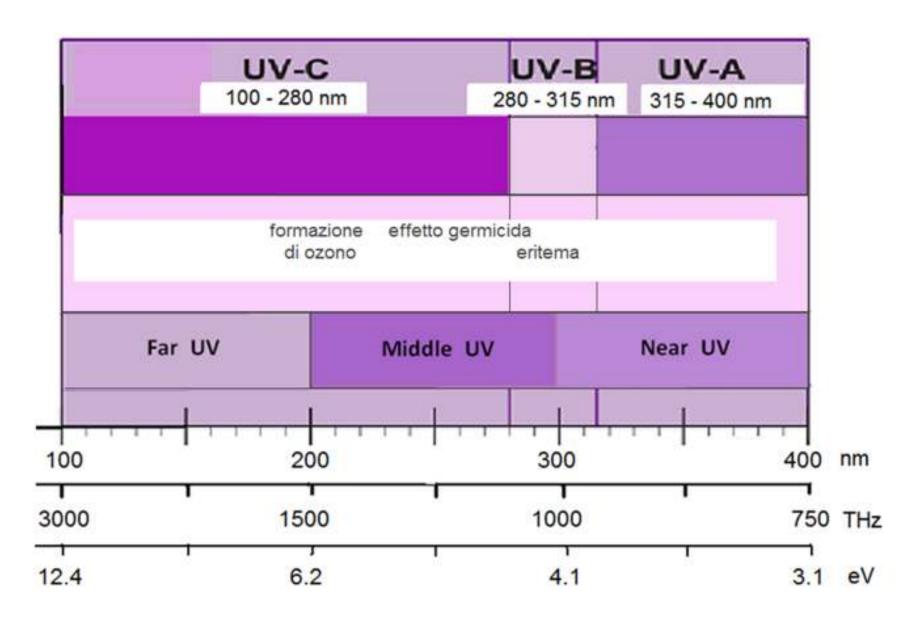
In fisica la radiazione ultravioletta è divisa in quattro regioni:

Near (400-300 nm), Middle (300-200 nm), Far (200-100 nm), Extreme (sotto i 100 nm).

Quando si considera l'impatto dei raggi UV sull'ambiente e sulla salute umana, sono evidenziate tre regioni dello spettro UV:

UV-A (400-315 nm), **UV-B** (315-280 nm) e **UV-C** (280-100 nm).

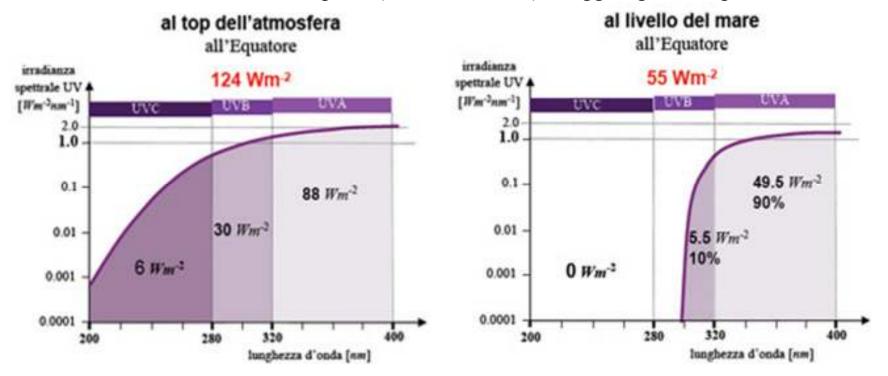
ULTRAVIOLETTO



La **sorgente naturale** più importante di radiazione UV è il **sole.**

La radiazione UV che raggiunge la superfice terrestre è circa il 9% (circa 120 W/m²) della radiazione solare al top dell'atmosfera. L'atmosfera terrestre, tramite processi di assorbimento e diffusione, agisce come un filtro rispetto alle radiazioni provenienti dal sole. In particolare:

- •la radiazione UV-C (la più dannosa per la vita a causa del suo alto contenuto energetico) viene completamente assorbita dall'ozono e dall'ossigeno degli strati più alti dell'atmosfera;
- •la radiazione UV-B viene anch'essa in buona parte assorbita, ma una non trascurabile percentuale (circa il 15-20%) riesce a raggiungere la superficie terrestre; è responsabile di bruciature solari e di cancro alla pelle.
- •la radiazione UVA riesce in buona parte (circa il 55-60%) a raggiungere a superficie terrestre.



Sorgenti artificiali.

Lampade germicide (UV-C): distruggono microorganismi quali batteri, virus, muffe, ecc., e sono usate per assicurare la sterilità di utensili e ambienti ospedalieri.

Lampade UV (UV-A) per favorire l'abbronzatura.

UVA lamps, it is claimed, tan safely without burning. However, as the carcinogenesis action spectrum extends into the longer UVA spectral region, exposure to these lamps is not without risk. (IPCS, Environmental Health Criteria - Ultraviolet Radiation)

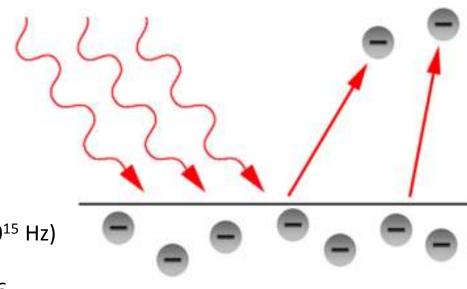
Laser UV: applicazioni nell'industria (incisioni con laser), medicina (dermatologia), ecc..

Effetto Fotoelettrico

Effetto Fotoelettrico

 $E_k = hv - W_e$

W_e = lavoro di estrazione

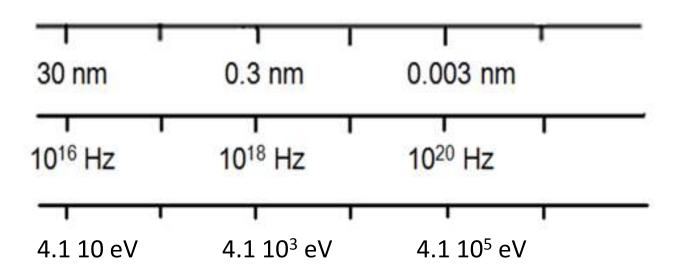


| materiale | W _e (eV) | λ_{max} (nm) | ν (10 15 Hz) |
|-----------|---------------------|-----------------------------|-----------------------|
| argento | 4.8 | 258 | 1.16 |
| cromo | 4.6 | 270 | 1.11 |
| litio | 2.1 | 588 | 0.51 |
| nichel | 4.6 | 270 | 1.11 |
| platino | 5.3 | 234 | 1.28 |
| tungsteno | 4.5 | 275 | 1.09 |
| | | | |

Raggi Gamma

RAGGI X





I raggi X occupano l'intervallo di lunghezza d'onda (frequenza) dello spettro elettromagnetico compreso tra 10 e 0.01 nm (tra $3 \times 10^{16} \text{ Hz} \text{ e } 3 \times 10^{19} \text{ Hz}$) corrispondente ad energie comprese tra 120 eV to 120 KeV.

Hand mit Ringen: print of Wilhelm Röntgen's first "medical" x-ray, of his wife's hand, taken on 22 December 1895



Tubi a raggi X

I tubi a raggi X sono ampiamente usati in medicina per scopi diagnostici (radiografia, fluoroscopia, tomografia computerizzata) e terapeutici (radioterapia oncologica). Sono diffusi anche nel settore della fisica per i beni culturali.

Radiazione di sincrotrone

Astronomia a raggi X

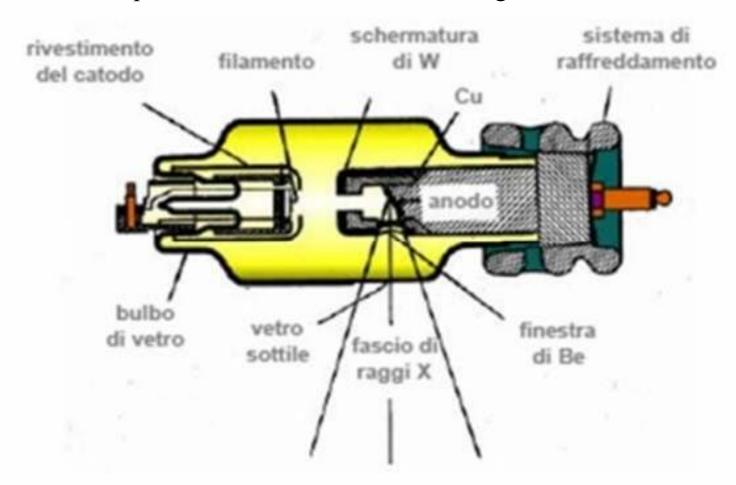
L'atmosfera assorbe i raggi X: osservazioni satellitari.

L'astronomia a raggi X ha a che fare con fenomeni che accadono alla fine di vite stellari: esplosioni di supernove, stelle binarie, stelle a neutroni, buchi neri. Al di fuori della nostra galassia il cielo a raggi X è dominato da galassie attive con buchi neri supermassivi al loro centro.

Inoltre anche stelle normali, il sole e i pianeti, comete sono osservati in radiazione X.

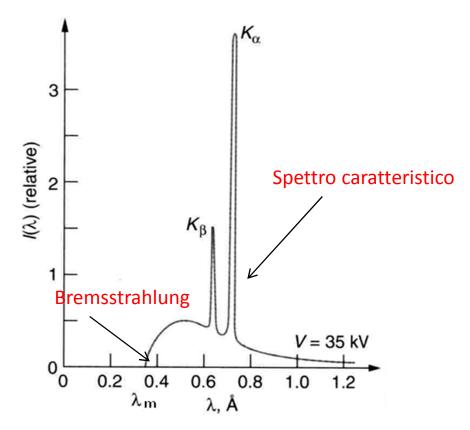
Il tubo a raggi X (o tubo radiogeno) contiene, sotto vuoto spinto, un catodo e un anodo ad alta tensione (tra 20 e 150 KV). Il catodo, riscaldato, emette, per effetto termoionico, elettroni che sono accelerati dall'alta tensione verso un bersaglio metallico (l'anodo) e creano raggi X.

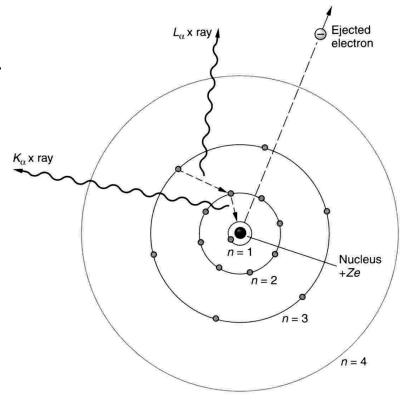
In questo processo solo una minima parte dell'energia cinetica degli elettroni (circa l'1%) si trasforma in radiazione X, il resto va in calore. Nei tubi a raggi X usati in medicina l'anodo è spesso costituito da un disco di tungsteno.



I raggi X sono creati da due differenti processi:

- Bremsstrahlung (radiazione di frenamento) distribuzione *continua* di radiazione: la frequenza massima della radiazione \mathbf{v}_{max} è legata alla energia degli elettroni $\mathbf{E} = \mathbf{h} \ \mathbf{v}_{max} \ (= h \ c \ / \ \lambda_{min})$
- Radiazione caratteristica spettro *discreto* di frequenze X: righe singole.





Interazione radiazione-materia

Coefficiente di attenuazione di un materiale

Un campione di un dato spessore x e densità ρ , quando viene irradiato da una sorgente di fotoni mono energetici di intensità I_o , trasmette una quantità di radiazione pari a I(x) secondo la legge:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

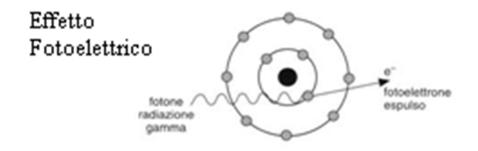
 μ (ρ , Z, E) : coefficiente di attenuazione lineare

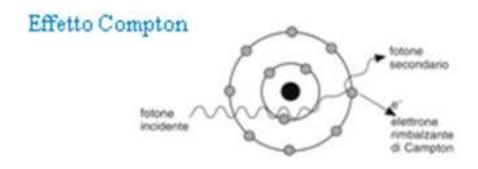
Il coefficiente di attenuazione lineare µ dipende dall'**energia** della radiazione, dalla **densità** e dal **numero atomico** del materiale attraversato.

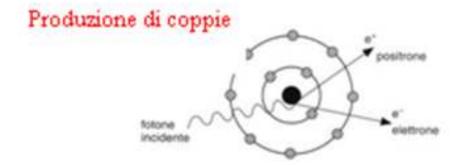
I meccanismi di attenuazione

I raggi X nella materia sono soggetti a:

- •Assorbimento (effetto fotoelettrico, creazione di coppie)
- •Diffusione (Thomson, Compton)







Effetto fotoelettrico

Nell'effetto fotoelettrico un fotone di energia $E_o = hv$ viene assorbito da un elettrone (e^-) atomico di energia di legame E_{el} con conseguente sua espulsione dall'atomo con energia cinetica

$$E_k = h \nu - E_{el}$$

A seguito dell'espulsione dell'elettrone e del riassestamento dei livelli elettronici viene emesso un raggio X caratteristico.

La sezione d'urto dell'effetto fotoelettrico è $\sigma_{ph}=4\sqrt{2}~\sigma_{T}~\alpha^{4}~Z^{5}~(mc^{2}/h\nu)^{7/2}$ con $\sigma_{T}=8~\pi~r_{e}/3$, dove σ_{T} è la sezione d'urto per la diffusione Thomson.

Data la forte dipendenza da Z e la decrescita con l'energia, l'effetto fotoelettrico è molto pronunciato in materiali densi e a basse energie (E≤0.3 MeV).

Diffusione Compton

Questa interazione coinvolge un fotone incidente di energia E_o ed un e⁻ libero ovvero con energia $E_{el} << E_0$. Il fotone incidente sull'elettrone trasferisce parte della sua energia all'elettrone; quindi la sua energia diminuisce e la lunghezza d'onda aumenta. Se l'energia del fotone è molto più piccola di $m_e c^2$, si ha la diffusione Thomson in cui non c'è variazione di frequenza della radiazione.

L'energia del fotone diffuso risulta essere:

$$E = E_0 \left(\frac{1}{1 + \frac{E_0}{mc^2} (1 - \cos \theta)} \right)$$
 (θ angolo di diffusione)

La diffusione Compton è proporzionale a Z e inversamente proporzionale a E_o E' particolarmente importante tra 0.1 e 5 MeV.

In astrofisica ha particolare importanza il processo **Compton inverso** per cui un elettrone di alta energia interagisce con un fotone di bassa energia a cui cede parte della propria energia.

.

Produzione di coppie

Interazione di un fotone con il campo elettrostatico che circonda una particella carica (normalmente un nucleo atomico):

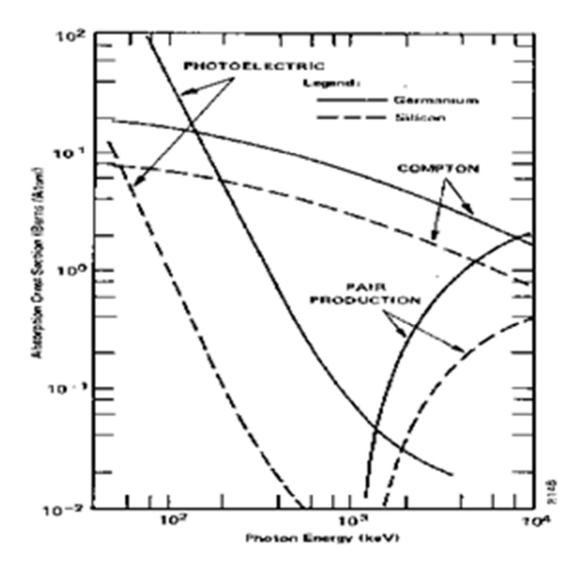
 γ + nucleo \rightarrow nucleo + elettrone + positrone

Energia fotone $E_o \ge 2 m_e c^2 (1.022 \, MeV)$

L'energia del fotone in eccesso di $2 m_e c^2$, nel caso di produzione di coppie, viene distribuita sotto forma di energia cinetica tra le due particelle della coppia; solo una quantità trascurabile viene ceduta al nucleo per la conservazione della quantità di moto.

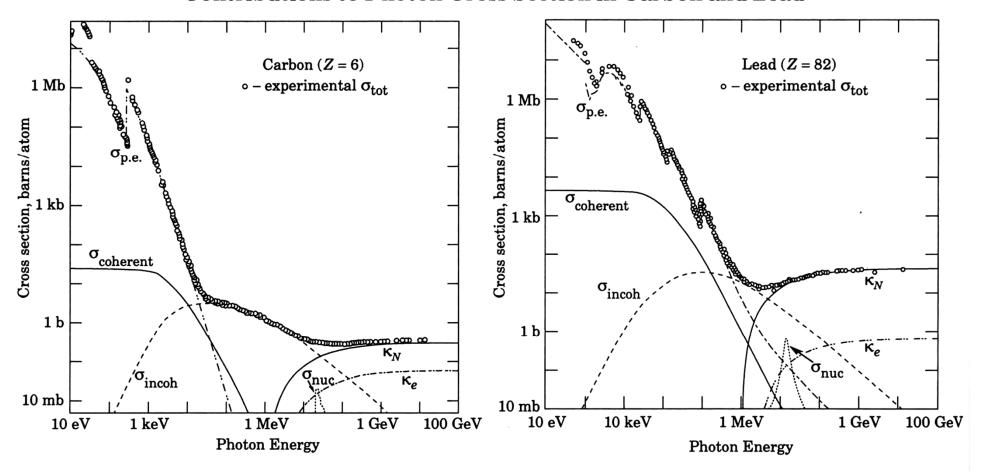
Le particelle di coppia (elettrone e positrone) dissipano entrambi la loro energia cinetica in ionizzazione ed eccitazione degli atomi della materia: il positrone si combina con un elettrone annichilandosi in due fotoni, l'elettrone, esaurita la sua energia cinetica, si disperde tra gli elettroni liberi o legati negli atomi.

La probabilità della produzione di coppie è proporzionale a \mathbb{Z}^2



Sezioni d'urto in funzione dell'energia per i tre processi: fotoelettrico, Compton, produzione di coppie.

Contributions to Photon Cross Section in Carbon and Lead



Photon total cross sections as a function of energy in carbon and lead, showing the contributions of different processes.

 $\sigma_{\text{p.e.}}$ = Atomic photo-effect (electron ejection, photon absorption)

 $\sigma_{\text{coherent}} = \text{Coherent scattering}$ (Rayleigh scattering—atom neither ionized nor excited)

 $\sigma_{\text{incoherent}} = \text{Incoherent scattering (Compton scattering off an electron)}$

 κ_n = Pair production, nuclear field

 κ_e = Pair production, electron field

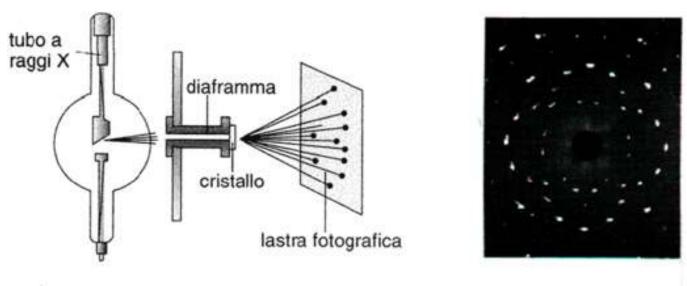
 σ_{nuc} = Photonuclear absorption (nuclear absorption, usually followed by emission of a neutron or other particle)

From Hubbell, Gimm, and Øverbø, J. Phys. Chem. Ref. Data 9, 1023 (80). The photon total cross section is assumed approximately flat for at least two decades beyond the energy range shown. Figures courtesy J.H. Hubbell.

Diffrazione dei raggi X

I raggi X hanno $\lambda < 1$ nm

Max von Laue: le schiere regolari di atomi in un cristallo possono funzionare come reticolo di diffrazione tridimensionale per i raggi X (distanza d tra piani reticolari confrontabile con λ raggi X)



Radiazione X di lunghezza d'onda λ investe gli atomi di un cristallo: gli elettroni che circondano i nuclei si comportano come dipoli oscillanti ed emettono radiazione X di lunghezza d'onda λ in tutte le direzioni. Il cristallo si comporta come un sistema tridimensionale di sorgenti coerenti e nello spazio circostante si può osservare la interferenza delle onde emesse da queste sorgenti.

Cristallo Cloruro di Sodio (NaCl): simmetria cubica.

In figura a) la disposizione degli ioni Na+ e Cl- nella cella elementare di lato $\mathbf{a_0}$ del cristallo NaCl Serie di piani reticolari (piani paralleli passanti per gli atomi) distanti \mathbf{d} ($\mathbf{d} \leq \mathbf{a_0}$), figure b) e d). Un fascio di raggi X incide su uno dei piani reticolari formando (con il piano e non con la sua normale) un angolo θ . Il fascio può essere riflesso da quel piano così come dai piani inferiori. Il fascio riflesso dal piano inferiore (e adiacente) fa un percorso più lungo: la differenza di cammino è 2 \mathbf{d} sen θ , figura c).

Raggi X incidenti (a) Raggio 2 Raggio $d \sin \theta$ $d \sin \theta$ (c)

Perché si abbia interferenza costruttiva è necessario che la differenza di cammino dei raggi diffusi dai piani reticolari sia uguale a un numero intero di λ

$$2\mathbf{d} \operatorname{sen}\theta = n \lambda$$
 $n = 1,2,3...$ legge di Bragg

Se una radiazione X monocromatica investe dei piani reticolari di un cristallo si avrà diffrazione unicamente se l'angolo θ soddisfa la legge di Bragg.

Se invece la radiazione X è continua si formeranno dei fasci diffratti tutte le volte che una λ soddisfa la

$$\lambda = 2d \operatorname{sen}\theta / n$$
 $n=1,2,3...$

Utilizzando uno spettrografo a cristallo (di Bragg) si può fare:

- •Analisi dello spettro delle λ di un fascio di raggi X. Fissata una serie di piani reticolari di distanza **d** nota, si varia l'angolo θ e dalla misura degli angoli dei massimi si deduce dalla legge di Bragg lo spettro delle λ .
- •Analisi della struttura di un cristallo (distanza tra piani del reticolo e struttura della cella elementare) con un fascio di raggi X monocromatico.

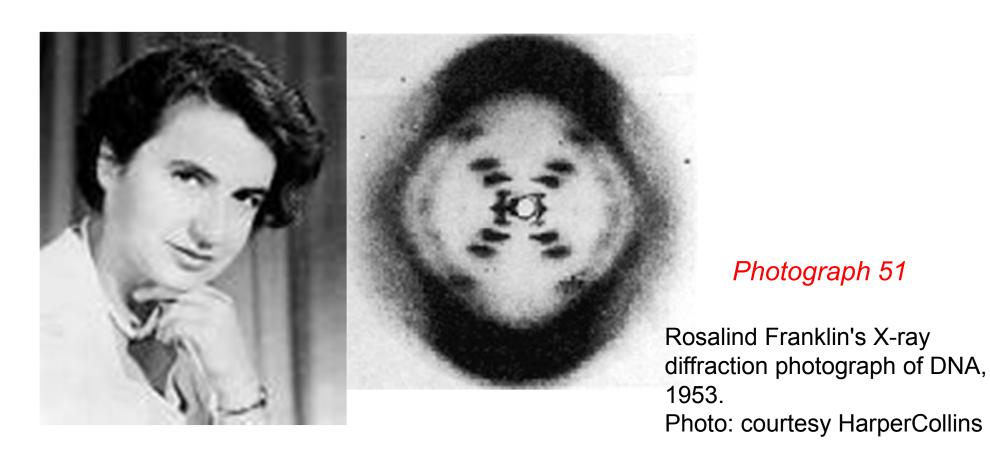
Spesso il materiale diffondente è costituito non da un cristallo ma da una polvere di microcristalli

Applicazioni: mineralogia, chimica e fisica dei materiali, biofisica (cristallografia di proteine).

La scoperta della struttura del DNA

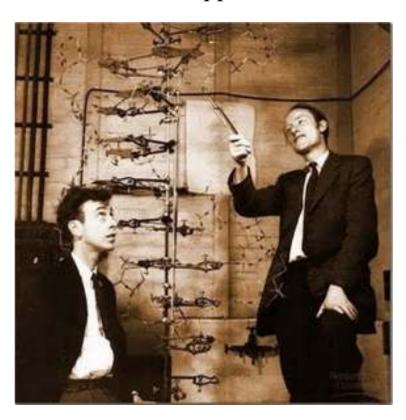
La più importante applicazione dei raggi X

Rosalind Franklin (1920-1958), al King's College di Londra, utilizzò la diffrazione a raggi X per studiare fibre di DNA. Con i risultati che ottenne (tra il 1951 e il 1953) diede un contributo fondamentale alla scoperta della struttura a doppia elica del DNA.

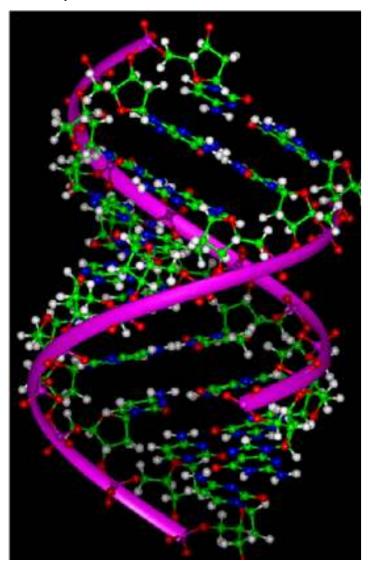


La scoperta della struttura del DNA

James Watson e Francis Crick ebbero modo di conoscere foto e dati elaborati (non ancora pubblicati) dalla Franklin: i risultati della Franklin furono per loro molto utili nella elaborazione del modello della doppia elica del DNA (marzo 1953).



Computer Model of the DNA Helix



Radiazione di sincrotrone

La luce di sincrotrone possiede delle caratteristiche che la rendono una sorgente di radiazione elettromagnetica unica e, per alcuni versi, insostituibile.

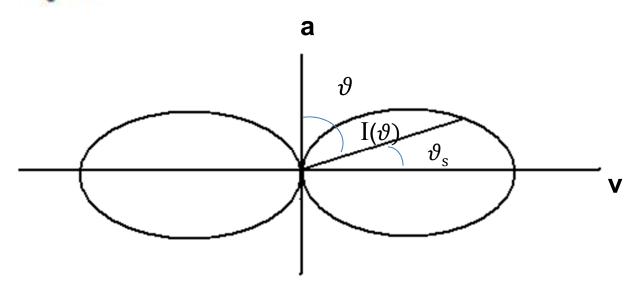
Alcune di queste sono:

- ➤ la distribuzione spettrale continua e senza strutture, che si estende dal lontano infrarosso ai raggi X,
- l'elevata intensità che, nella regione dei raggi X, può essere anche diversi ordini di grandezza più alta di quella di una sorgente convenzionale,
- ➤ l'elevata collimazione sul piano verticale

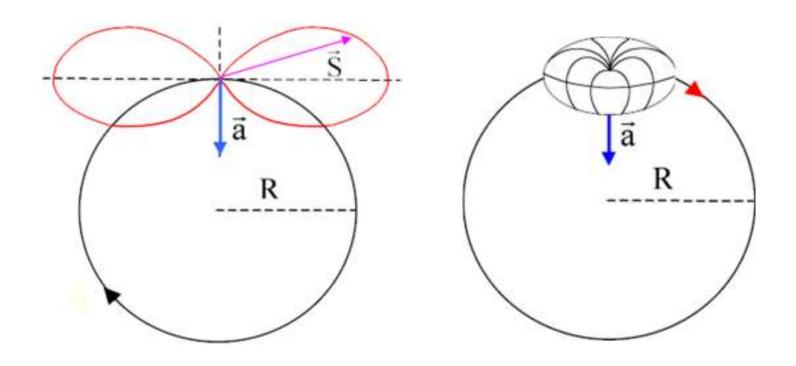
Osservando, infine, la radiazione lungo una direzione complanare al piano dell'orbita degli elettroni essa risulta polarizzata linearmente.

Intensità irradiata da dipolo oscillante non relativistico

$$|\vec{S}| = I(\theta) = \frac{\omega^4 p_0^2 \sin^2 \theta}{32\pi^2 \epsilon_0 c^3 r^2}$$



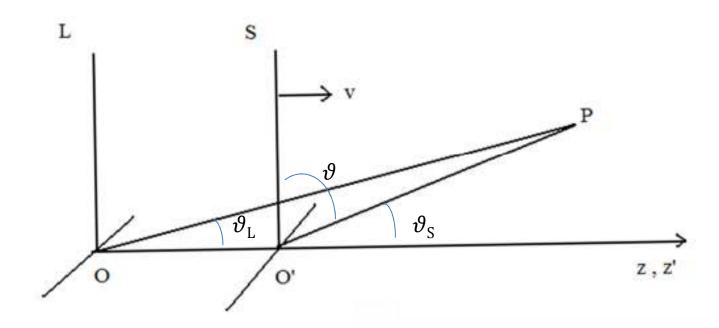
La distribuzione ha simmetria rotazionale rispetto alla accelerazione **a** nel sistema di riferimento dell'elettrone.



Caso relativistico

Effetto Doppler

$$\tan \vartheta_L = \frac{\sin \vartheta_S}{\gamma(\beta + \cos \vartheta_S)}$$

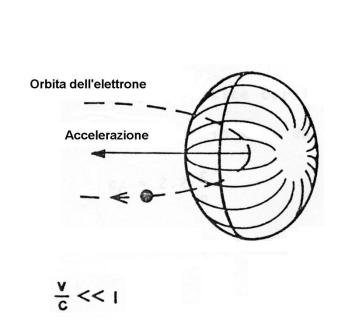


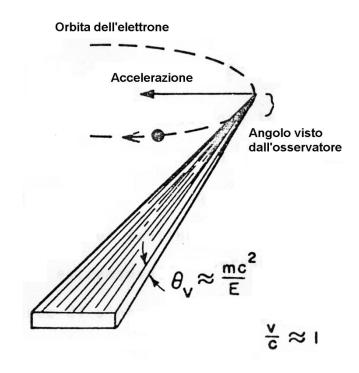
La distribuzione è spostata in avanti in direzione della velocità **v**



Nel caso di apertura massima in S, $\theta_{\rm S} = \pi/2$, $\tan \theta_{\rm L} \simeq 1/\gamma \beta \simeq 1/\gamma = {\rm mc^2/E}$, (per $\theta_{\rm S} = \pi/4$, $\tan \theta_{\rm L} \simeq 0.41/\gamma \approx 1/\gamma$)

La radiazione è emessa in un cono di semiapertura $\vartheta_{\rm L} \simeq 1/\gamma \;$ nella direzione di moto



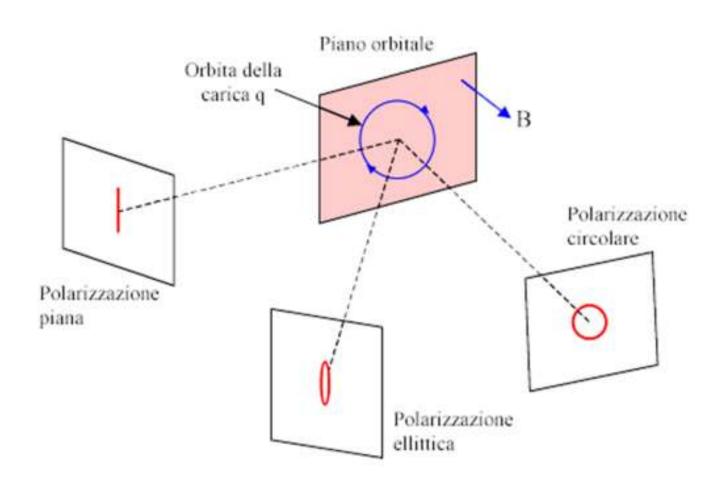


Velocità non relativistica

Velocità relativistica

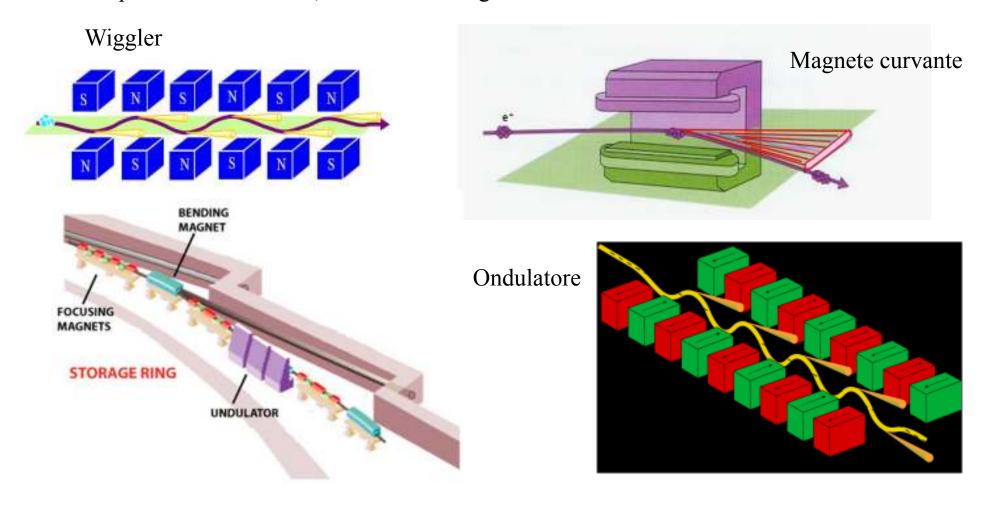
In genere $\gamma=10^3$ – 10^4 , la radiazione emessa è molto collimata: $\vartheta_{\rm L}\simeq 1/\gamma\sim 10^{-3}$ – 10^{-4} rad

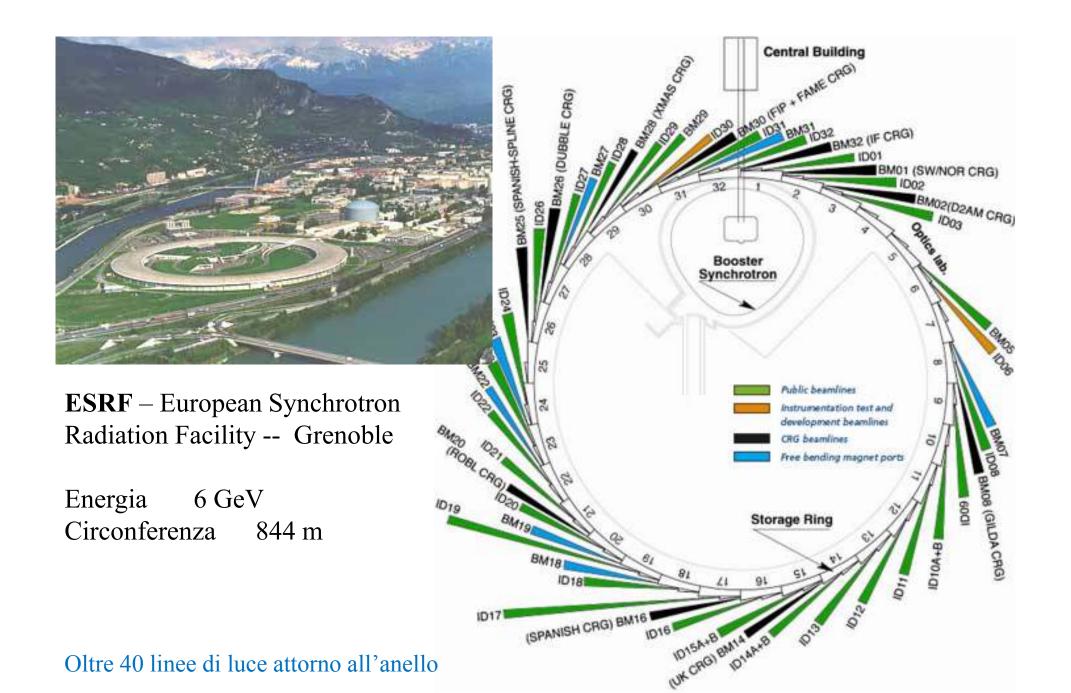
Osservando la radiazione lungo una direzione complanare al piano dell'orbita degli elettroni essa risulta polarizzata linearmente.



Le Sorgenti della radiazione

Si estrae luce di sincrotrone da magneti curvanti e da strutture magnetiche multipolari a campo alterno appositamente inserite lungo il cammino degli elettroni per costringerli a percorrere una traiettoria oscillatoria. Questi dispositivi sono denominati wiggler e ondulatori e consentono di ottenere o fasci di fotoni di energia e intensità più alta, come accade nel caso dei wiggler, o fasci di fotoni quasi monocromatici, come accade negli ondulatori.





Le linee di ricerca in cui si fa uso della luce di sincrotrone sono numerose: dalla nanotecnologia alla scienza dei materiali e ai settori industriali, dalla biofisica alla medicina, dalla geofisica all'ambiente.

NANOTECNOLOGIA

Studio delle superfici dei materiali. Applicazioni nella microelettronica.

SCIENZA DEI MATERIALI

Una grande varietà di materiali vengono studiati utilizzando raggi X : leghe metalliche, semiconduttori, cristalli liquidi, polimeri, fibre ottiche, materie plastiche ... Sviluppo di nuovi materiali. Sempre più spesso, l'obiettivo è creare materiali con particolari proprietà prefissate. Per questo, la conoscenza di ciò che accade a livello atomico è indispensabile.

INDUSTRIA

Applicazioni industriali.

In settori differenti, come il settore farmaceutico, cosmetico, dell'agroalimentare, la microelettronica, la metallurgia, l'industria chimica e la carta, le industrie fanno ricerca e sviluppo utilizzando la radiazione di sincrotrone.

BIOFISICA

Proteine

Per studiare la struttura delle proteine a scala atomica, la cristallografia a raggi X è la tecnica più utilizzata.

MEDICINA

Esplorazione delle arterie.

L'angiografia è una tecnica utilizzata per studiare le arterie coronarie (prodotto di contrasto immesso nel cuore o per via intravenosa ecc...)

SCIENZA DELLA TERRA

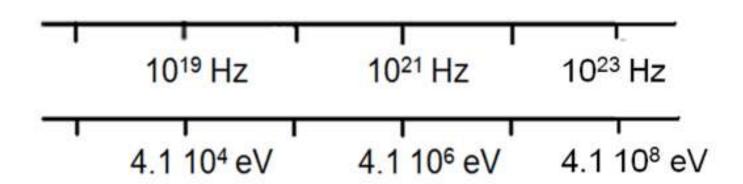
Terremoti, vulcani... Per meglio comprendere questi fenomeni la geofisica si interessa alla composizione e alla struttura dei materiali presenti nella crosta terrestre, così come nel mantello e nel nucleo.

AMBIENTE

Lo studio e la tutela del nostro ambiente sono diventate dei punti importanti della nostra società. Studiare nuove forme di energia meno inquinanti o pulite, analizzare la qualità dei suoli o delle acque contaminate. Aerosol.

RAGGI GAMMA

Raggi X



$RAGGI \gamma$

Dello spettro elettomagnetico i raggi gamma (γ) costituiscono la radiazione di più alta frequenza ed energia (tipicamente frequenze sopra i 10^{19} Hz ed energie maggiori di alcune decine di KeV).

Sono prodotti nei decadimenti radioattivi gamma, in interazioni tra particelle (annichilazione elettrone-positrone, decadimento del pione neutro); in processi astrofisici ha, tra gli altri, un ruolo importante lo scattering Compton inverso.

Raggi X e raggi γ hanno un intervallo energetico di sovrapposizione. Tipicamente, quando possibile, le due radiazioni sono distinte e definite (X o γ) in base alla loro origine: raggi X se emessi da elettroni al di fuori del nucleo, raggi γ se emessi dal nucleo (decadimenti radioattivi).

Medicina nucleare

Impiego diagnostico

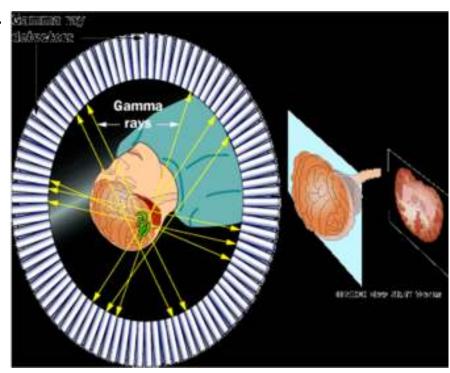
SPECT (Tomografia computerizzata a emissione di fotoni singoli) PET (Tomografia a emissione di positroni)

PET (Positron Emission Tomography). Tecnica di imaging della medicina nucleare.

Utilizza radio farmaci, molecole marcate con radioisotopi di breve vita media (tipo ¹⁸F, ¹¹C e ¹⁵O).

Impiego terapeutico

Cobalto terapia 60 Co γ (1.3 MeV)



PET Positron Emission Tomography

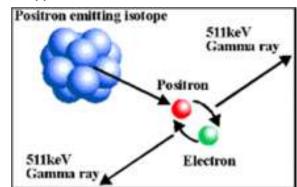
Produzione del isotopo radioattivo (acceleratore di protoni)

$$p + {}^{18}_{8}O \rightarrow n + {}^{18}_{9}F$$
 (fluorine-18)

$$^{18}_{9}F$$
 + glucosio \rightarrow 18FDG (fluorodeoxyglucose)

Al paziente viene iniettata una sostanza radiofarmacologica (prodotta da un ciclotrone) con una vita media breve (O(min)).

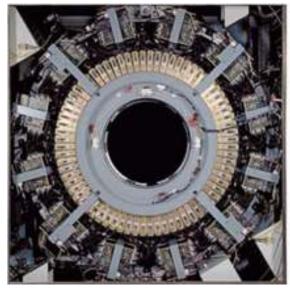




$$^{18}_{9}F \rightarrow ^{18}_{8}O + e^{+} + neutrino$$

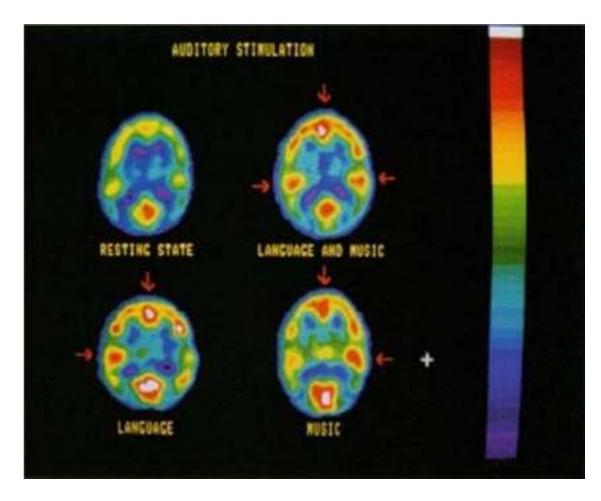
$$t_{1/2} (^{18}_{9}F) = 110 \text{ min}$$

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$



La sostanza iniettata raggiunge l'organo che si vuole visualizzare (cuore, cervello etc...) ed emette positroni.

Positron emission tomography (PET)



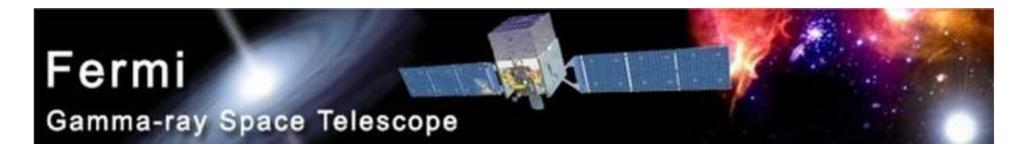
Positron emission tomography (PET) records electrical activity inside the brain. These PET scans show what happens inside the brain when it is resting and when it is stimulated by words and by music. The red areas indicate concentrations of brain activity. Notice how language and music appear to produce responses in opposite sides of the brain.

Roger Ressmeyer/Corbis

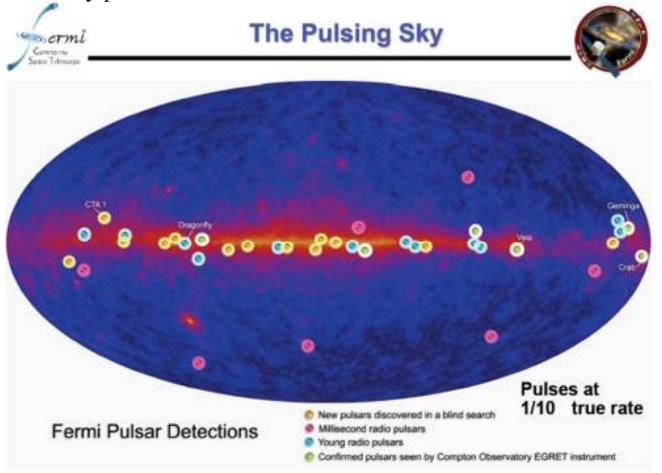
Astronomia a raggi gamma

Sorgenti di raggi gamma: esplosioni di supernove, stelle a neutroni e pulsar, buchi neri e nuclei galattici attivi, che contengono al loro centro buchi neri supermassivi...

Gamma-Ray Bursts (GRB o lampi gamma): intensi lampi di raggi gamma, sono il fenomeno più energetico osservato nell'universo. I GRB possono durare da pochi millisecondi ad alcune decine di minuti. Il lampo gamma iniziale è poi in genere seguito da una emissione ("afterglow") di radiazione più debole emessa a lunghezze d'onda maggiori.



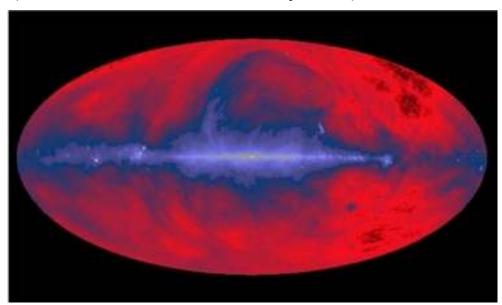
NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope has discovered 12 new gamma-ray-only pulsars and has detected gamma-ray pulses from 18 others.



NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope has found 12 previously unknown pulsars (orange). Fermi also detected gamma-ray emissions from known radio pulsars (magenta, cyan) and from known or suspected gamma-ray pulsars identified by NASA's now-defunct Compton Gamma-Ray Observatory (green). (Credit: NASA/Fermi/LAT Collaboration)

La Via Lattea alle diverse frequenze

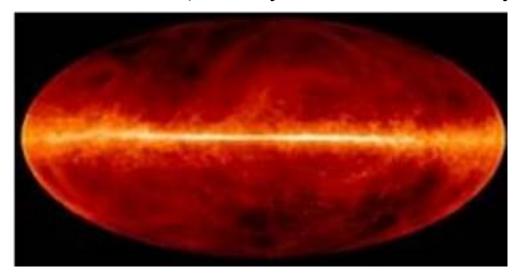
The Radio Sky: Tuned to 408MHz (C. Haslam et al., MPIfR, SkyView)



L'osservazione della Via Lattea alla frequenza radio di 408 MHZ (lunghezza d'onda di 74 cm). Le sorgenti luminose attorno al piano galattico sono dovute a pulsar lontane, resti di supernove...

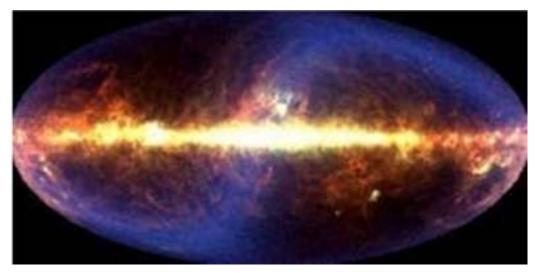
Non sono visibili stelle.

Radio 1420MHz (J. Dickey et.al. UMn. NRAO SkyView)



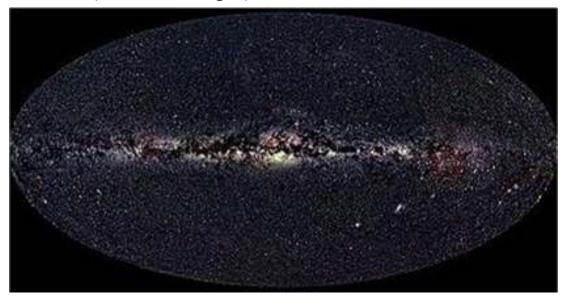
L'osservazioni della Via Lattea alla frequenza radio di 1420 MHz (lunghezza d'onda di 21 cm) permette di rivelare la presenza dell'idrogeno neutro che riempie la nostra galassia. Non si vedono stelle in questa immagine. Si ossevano nubi diffuse di idrogeno, il più abbondante elemento nell'universo.

Infrared (DIRBE Team, COBE, NASA)



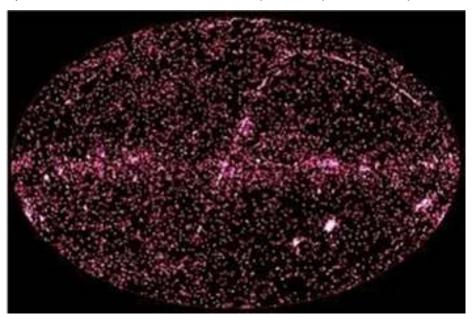
L'immagine della Via Lattea (presa da COBE) è composta da radiazione infrarossa di lunghezze d'onda di 60, 100 e 240 micron. Il centro della galassia è pieno di stelle circondate da dense nubi di polveri. Queste polveri riscaldate dalle stelle risplendono nell'infrarosso.

Visible (Axel Mellinger)



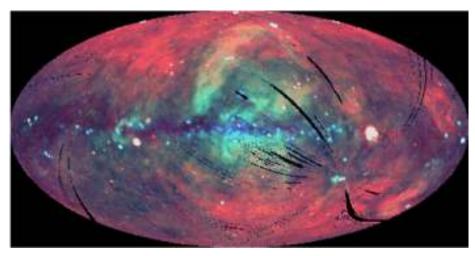
L'osservazione in luce visibile consente di avere una panoramica generale delle stelle visibili.
Le zone scure attorno al piano galattico sono regioni di polveri e gas che bloccano la luce visibile delle stelle al loro interno.

The International Ultraviolet Explorer (IUE) (J. Bonnell and M. Perez (GSFC), NASA)



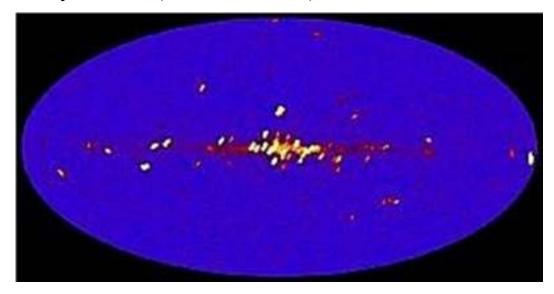
Il satellite IUE, lanciato nel 1978, per 18 anni ha fatto osservazioni nell'ultravioletto. L'IUE ha permesso di osservare la posizione di lontane galassie, quasar, ammassi stellari, supernove...

X-Ray 0.25, 0.75, 1.5 keV (S. Digel et. al. GSFC, ROSAT, NASA)

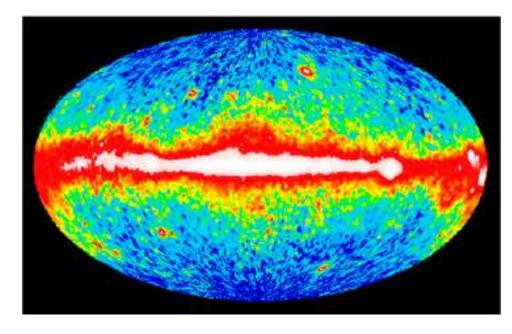


La immagine a raggi X è una mappa di tre bande di raggi X molli centrate a 0.25 keV (rosso), 0.75 keV (verde) e 1.5 keV (blu). A basse energie sopratutto il mezzo interstellare assorbe fortemente i raggi X. Nubi di gas e polveri nel piano della Via Lattea sono all'origine delle zone scure che si osservano in questa area

X-Ray 2-10keV (HEAO-1, NASA)



La immagine a sinistra mostra le sorgenti a raggi X più brillanti nella Via Lattea. I raggi X osservati, con le energie indicate (2-10KeV), sono prodotti da nane bianche, buchi neri, stelle a neutroni, pulsar, resti di supernove, galassie attive...



Gamma Ray All Sky Map (CGRO, NASA)

> L'immagine rappresenta una mappa del cielo di fotoni con energia maggiore di 100 MeV presa dall'Osservatorio Compton Gamma Ray