

Indagini sulla struttura della materia: luce, acceleratori e atomi. Edizione speciale 2015!!!

Tutori:

A. Balerna, A. Grilli, A. Raco, V. Sciarra

INFN - Laboratori Nazionali di Frascati 7-9 Ottobre 2015



**Incont
ri ■ di
fisica**



Sorgenti di luce

Il fuoco è una sorgente di luce poco efficace per guardare piccoli dettagli perché la sua intensità luminosa è emessa in tutte le direzioni!



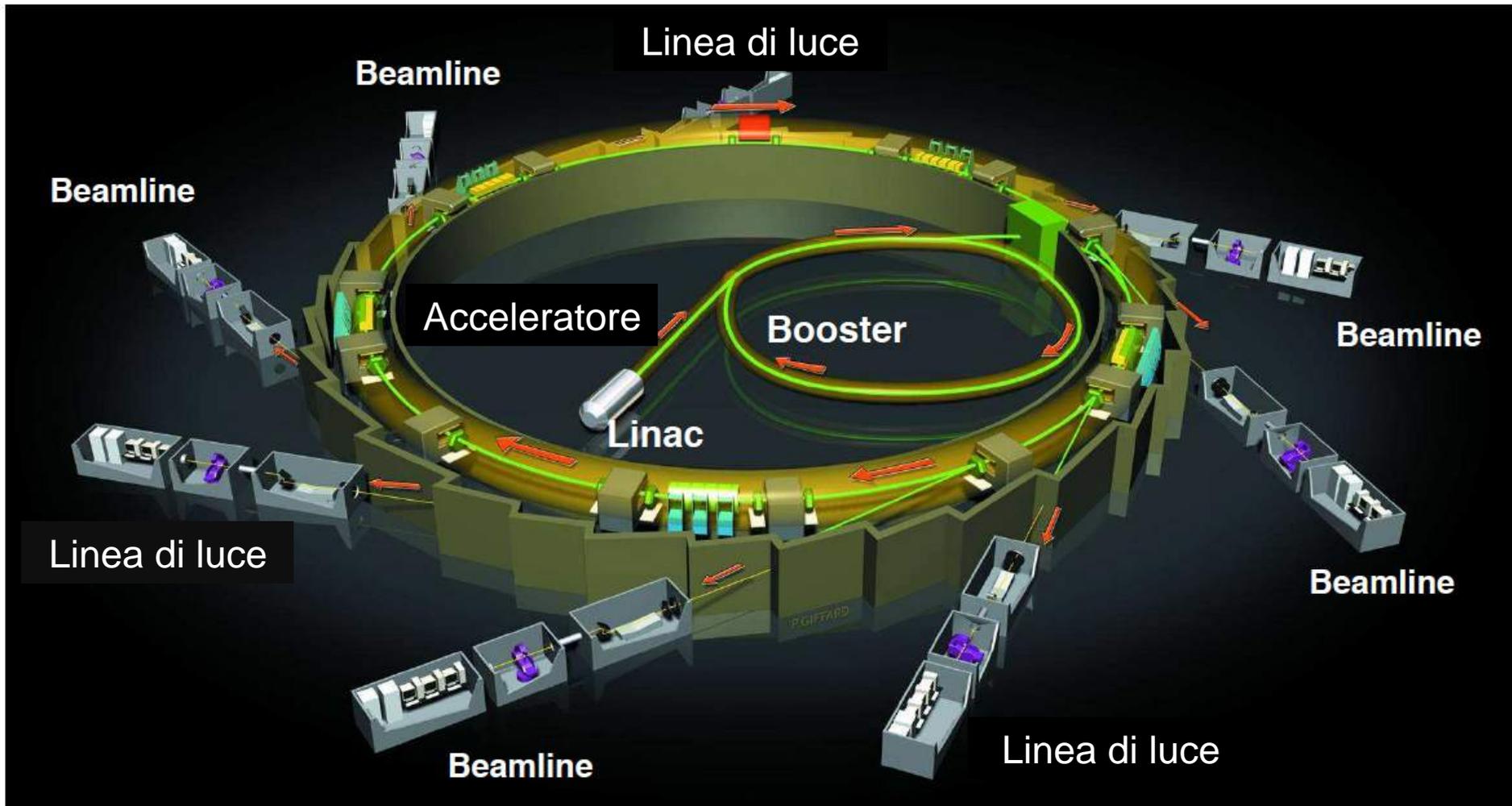
La luce prodotta da una torcia essendo concentrata in un angolo solido più piccolo è più brillante ed efficace.



La luce di sincrotrone è una radiazione estremamente brillante che ci permette di 'vedere' anche cose che non sono visibili ai nostri occhi utilizzando i raggi X.



Acceleratori come sorgenti di luce di sincrotrone



Scopriamo insieme:

- *Luce e spettro elettromagnetico*
- *Raggi X e atomi*
- *Luce di sincrotrone e acceleratori*
- *Applicazioni con raggi X*

2015 - Anno Internazionale della Luce



L'Assemblea Generale delle Nazioni Unite ha proclamato il 2015 Anno Internazionale della Luce e delle Tecnologie Basate sulla Luce.

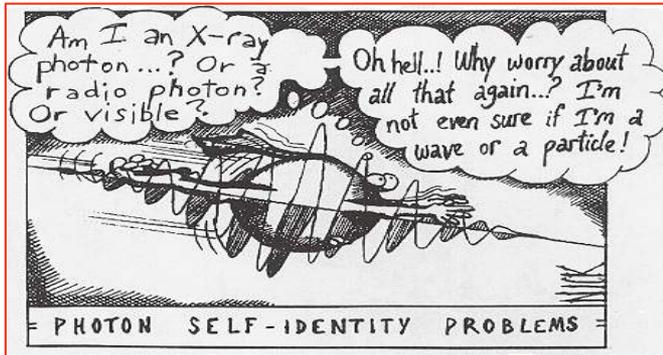
Nel 2015 ricorrono i seguenti anniversari della fisica:

- *1000 anni* dalla pubblicazione del *primo libro sull'ottica* di Alhazen (1015);
- *200esimo* anniversario della *teoria ondulatoria della luce* di A.-J. Fresnel (1815);
- *150esimo* anniversario della *teoria elettromagnetica della luce* di Maxwell (1865);
- *100 anni* della *teoria generale della relatività* di A. Einstein (1915);
- *50 anni* della *scoperta della radiazione cosmica di fondo* (microonde) di A. Penzias e R. Wilson (1965) e dello *sviluppo delle fibre ottiche per la comunicazione*.
- *1 anno* dall'assegnazione del premio *Nobel per la Fisica* a *I. Akasaki, H. Amano e S. Nakamura* per l'invenzione dei *diodi efficienti a emissione di luce blu* che hanno permesso la realizzazione di fonti luminose bianche brillanti e a risparmio di energia ossia i **LED**.

Eventi reattivi all'Anno Internazionale della Luce: <http://www.sif.it/attivita/iyl2015>

La Luce

La luce in tutte le sue forme - visibili e invisibili - riempie l'universo.



Come si deve descriverla: onda? particella?

Per gli scienziati è entrambe; ciò dimostra l'importanza di un elemento che è sempre presente nelle nostre vite malgrado la scarsa attenzione che noi le dedichiamo:

la luce è quasi come l'aria, la consideriamo una cosa scontata.

Un essere umano non si interroga sulla natura della luce più di quanto un pesce non farebbe con l'acqua.

Certo, *ci sono eccezioni, momenti particolari di gloria passeggera in cui apprezziamo la luce in tutta la sua grandezza:* l'arcobaleno, il tramonto, un fulmine nel cielo buio, il luccichio del mare al crepuscolo, la luce a tratti nella foresta; la vetrata illuminata di una chiesa retroilluminata dal cielo terso; lo scintillio di una candela, che rende tutto più romantico; la torcia con cui si cerca di sistemare il quadro elettrico dopo un cortocircuito.

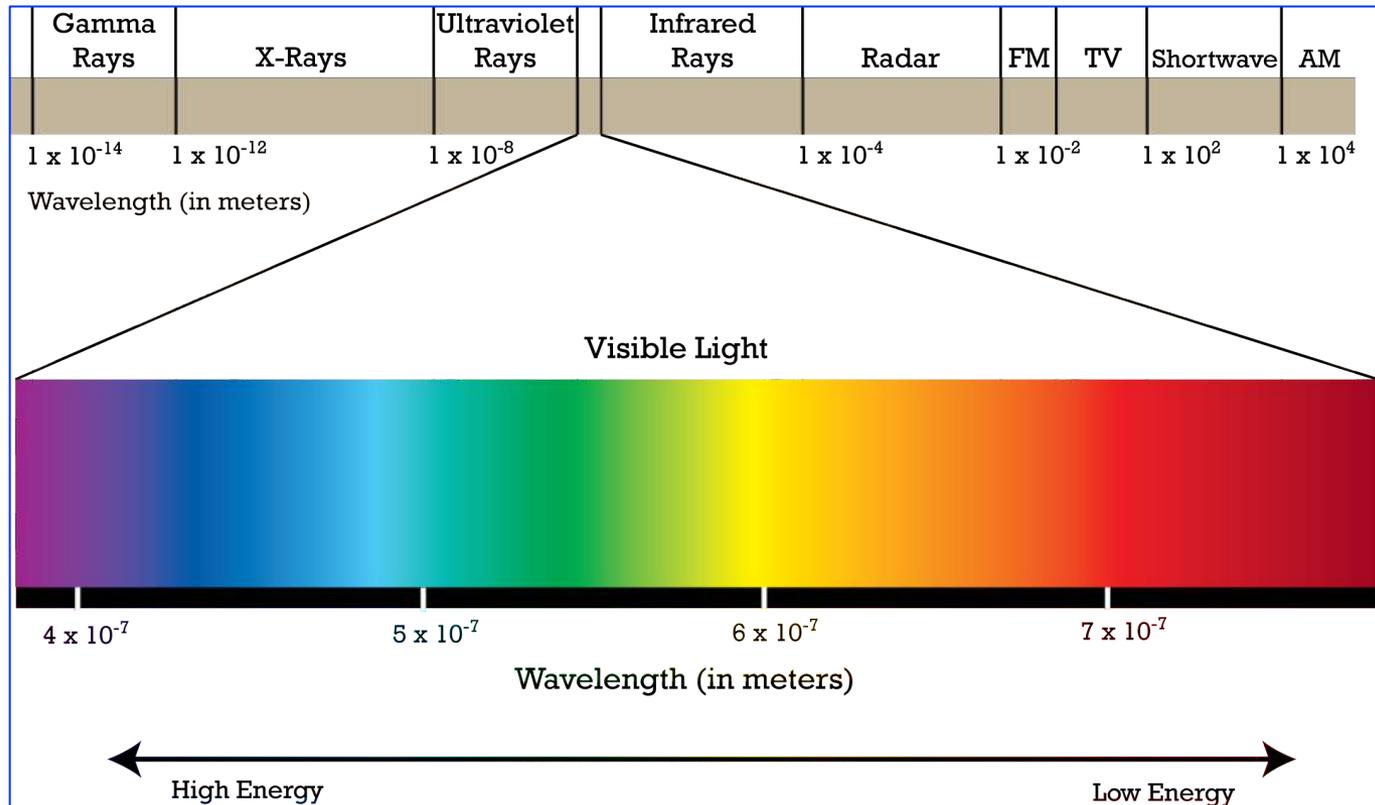
Di solito comunque noi *non vediamo "la" luce, vediamo "attraverso la" luce.* Non si può apprezzare la bellezza di *una rosa pensando che il colore rosso è solo il frutto dell'interpretazione del nostro cervello* di una specifica lunghezza d'onda con picchi a distanza di circa 700 nanometri...



La luce

La *luce* nella sua normale accezione e' una piccola parte dello spettro elettromagnetico (insieme di tutti i tipi di radiazione) che invece si estende dai raggi gamma fino alle onde radio.

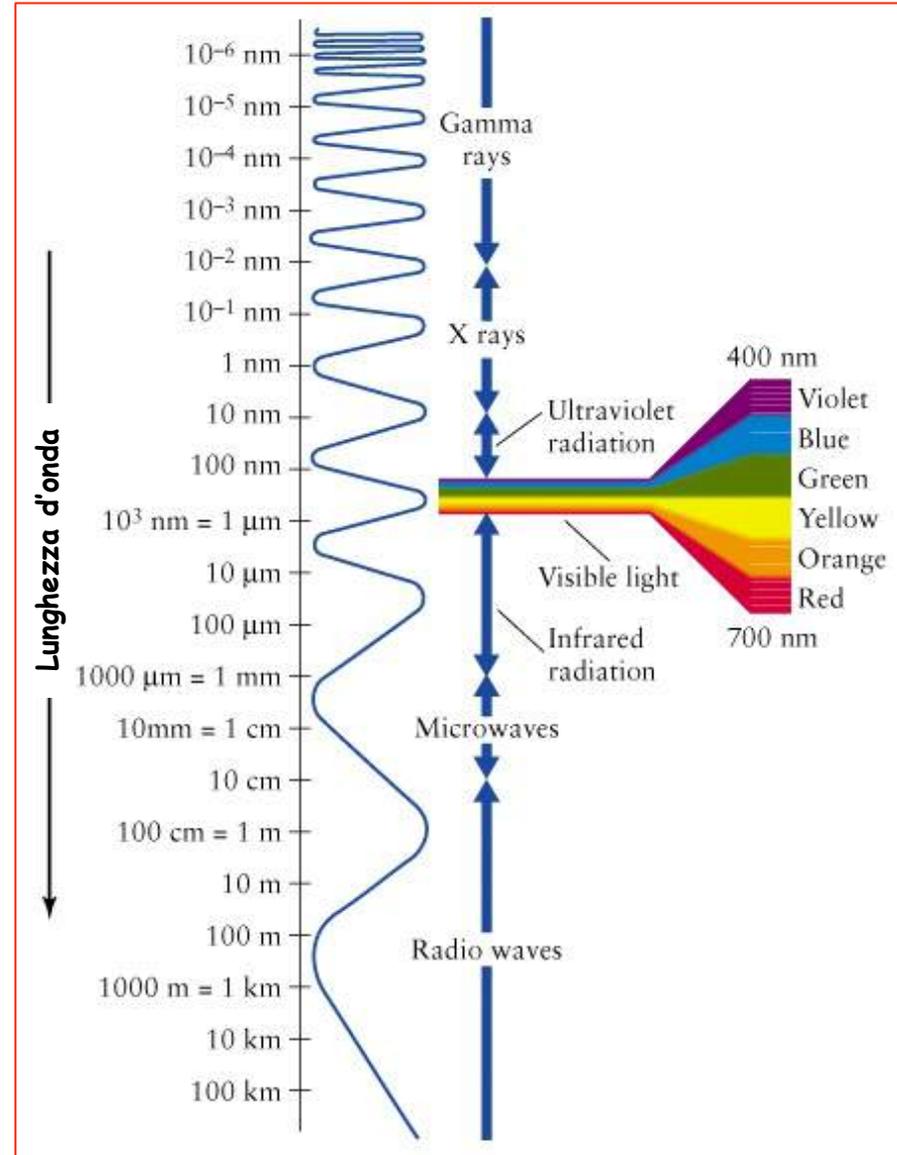
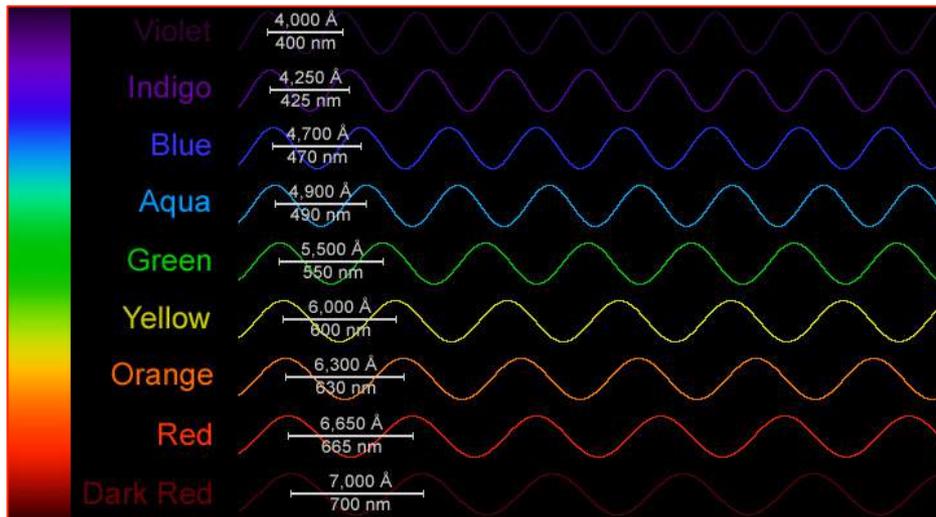
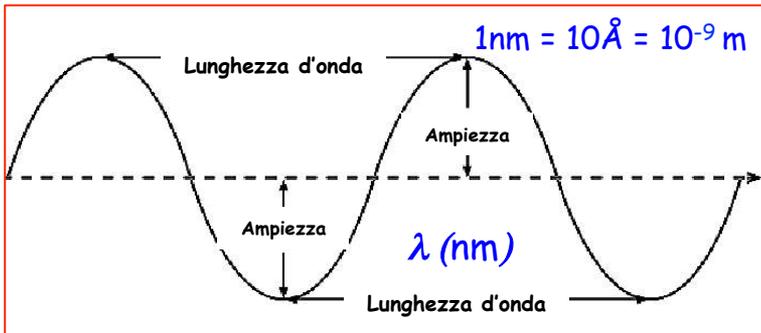
La parte dello spettro elettromagnetico che chiamiamo *luce visibile* e' quella che possiamo percepire con i nostri occhi e ha lunghezze d'onda comprese tra **380 nm** e **780 nm**.



Di fatto la *luce visibile* è la parte dello spettro elettromagnetico alla quale i *fotoricettori* nelle nostre retine sono sensibili. Il *colore* è la percezione visiva generata dai segnali nervosi che i *fotoricettori* della retina inviano al cervello quando assorbono le radiazioni elettromagnetiche di specifiche lunghezze d'onda.

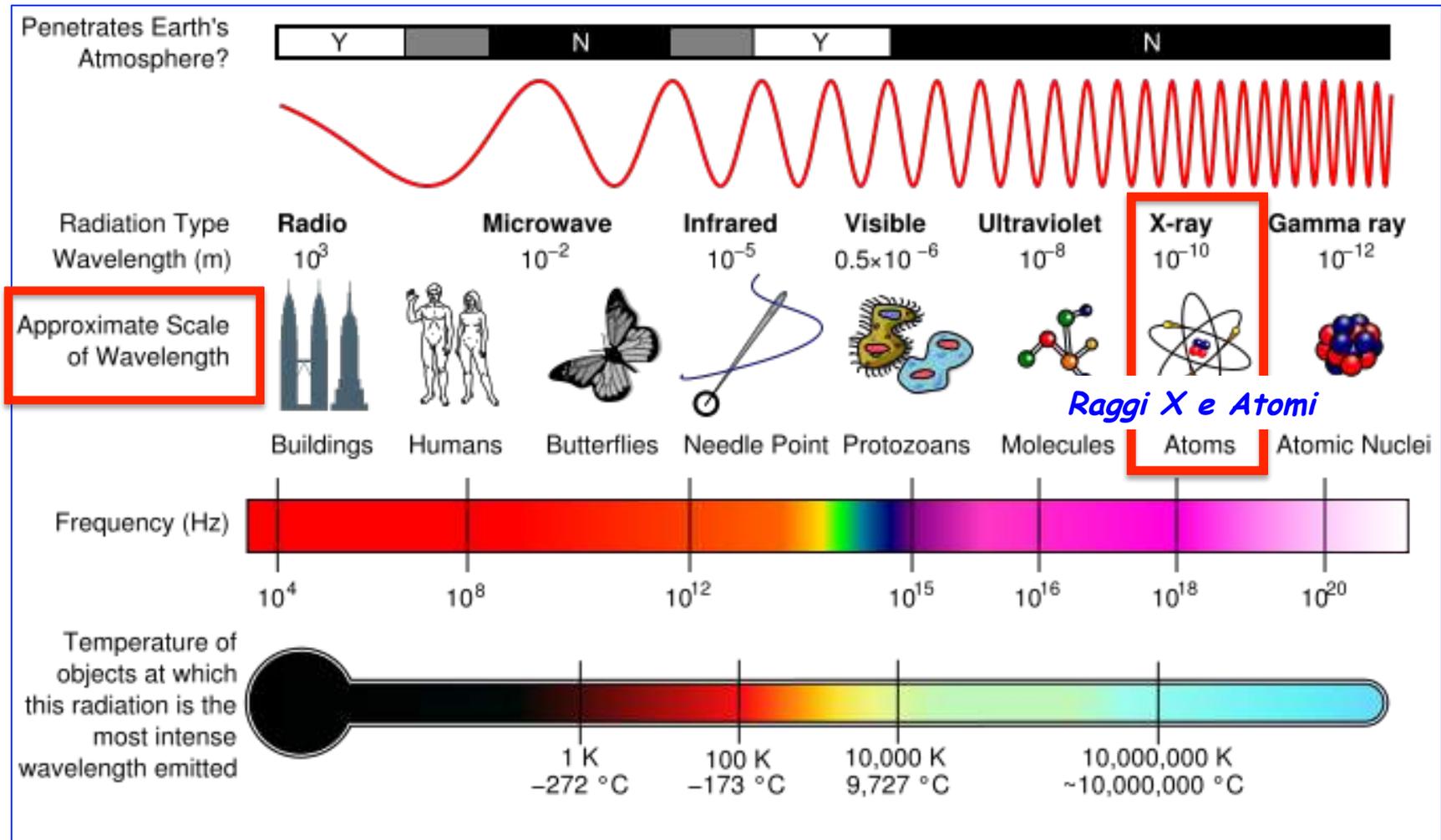
Luci e onde

La luce viene vista come un'onda che si propaga in maniera del tutto simile alle onde del mare o a quelle acustiche. Ogni onda è caratterizzata da una **specificata lunghezza d'onda** (la distanza tra due creste consecutive di un'onda sinusoidale) che viene rappresentata con la lettera greca lambda (λ) e la sua unità di misura è il **nanometro** (unità di lunghezza ed è pari a 10^{-9} m ossia un miliardesimo di metro).



Ai diversi colori corrispondono diverse lunghezze d'onda!

Spettro elettromagnetico e raggi X



La **lunghezza d'onda** (λ) e la **frequenza** (ν) (numero di oscillazioni effettuate dall'onda nell'unità di tempo) sono strettamente connesse: più alta è la frequenza più piccola è la lunghezza d'onda. Questo dipende dal fatto che la luce si propaga ad una velocità costante c ($c = 299792 \text{ km/s}$) e la relazione che lega **lunghezza d'onda** e **frequenza** è:

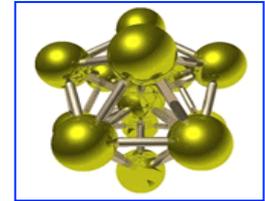
$$\lambda \nu = c.$$

Atomi

Il nostro mondo è popolato da notevoli diversità e forme di materiali: quello che può sorprendere è che questa grande varietà di materia sia composta da pochi e relativamente semplici elementi chiamati atomi.

Periods	Alkali Metals Group 1	Alkali Earth Metals Group 2	Transition Metals										Boron Group 13	Carbon Group 14	Nitrogen Group 15	Oxygen Group 16	Halogens Group 17	Noble Gases Group 18	
1	H Hydrogen Sun and Stars	He Helium Balloons											B Boron Sports Equipment	C Carbon Basis of Life's Molecules	N Nitrogen Protein	O Oxygen Air	F Fluorine Toothpaste	Ne Neon Advertising Signs	
2	Li Lithium Batteries	Be Beryllium Emeralds											Al Aluminum Airplanes	Si Silicon Stone, Sand, and Soil	P Phosphorus Bones	S Sulfur Egg Yolks	Cl Chlorine Swimming Pools	Ar Argon Light Bulbs	
3	Na Sodium Salt	Mg Magnesium Chlorophyll											Ga Gallium	Ge Germanium Semiconductor Electronics	As Arsenic Poison	Se Selenium Copiers	Br Bromine Photography Film	Kr Krypton Flashlights	
4	K Potassium Fruits and Vegetables	Ca Calcium Shells and Bones	Sc Scandium Bicycles	Ti Titanium Aerospace	V Vanadium Springs	Cr Chromium Stainless Steel	Mn Manganese Earthmovers	Fe Iron Steel Structures	Co Cobalt Magnets	Ni Nickel Coins	Cu Copper Electric Wires	Zn Zinc Brass Instruments	Aluminum	Ga Gallium	Ge Germanium	As Arsenic	Se Selenium	Br Bromine	Kr Krypton
5	Rb Rubidium Global Navigation	Sr Strontium Fireworks	Y Yttrium Lasers	Zr Zirconium Chemical Pipelines	Nb Niobium Mag Lev Trains	Mo Molybdenum Cutting Tools	Tc Technetium Radioactive Diagnosis	Ru Ruthenium Electric Switches	Rh Rhodium Searchlight Reflectors	Pd Palladium Pollution Control	Ag Silver Jewelry	Cd Cadmium Paint	In Indium Liquid Crystal Displays (LCDs)	Sn Tin Plated Food Cans	Sb Antimony Car Batteries	Te Tellurium Thermoelectric Coolers	I Iodine Disinfectant	Xe Xenon High-Intensity Lamps	
6	Cs Cesium Atomic Clocks	Ba Barium X-Ray Diagnosis	57 - 71 Rare Earth Metals	Hf Hafnium Nuclear Submarines	Ta Tantalum Mobile Phones	W Tungsten Lamp Filaments	Re Rhenium Rocket Engines	Os Osmium Pen Points	Ir Iridium Spark Plugs	Pt Platinum Labware	Au Gold Jewelry	Hg Mercury Thermometers	Tl Thallium Low-Temperature Thermometers	Pb Lead Weights	Bi Bismuth Fire Sprinklers	Po Polonium Anti-Static Brushes	At Astatine Radioactive Medicine	Rn Radon Surgical Implants	
7	Fr Francium Laser Atom Traps	Ra Radium Luminous Watches	89 - 103 Actinide Metals	104 Rutherfordium	105 Dubnium	106 Seaborgium	107 Bohrium	108 Hassium	109 Meitnerium	110 Darmstadtium	111 Roentgenium	112	113	114	115	116	117	118	
8	<p>Superheavy Elements radioactive, never found in nature, no uses except atomic research</p>																		
	<p>Rare Earth Metals</p> <p>La Lanthanum Telescope Lenses</p> <p>Ce Cerium Lighter Flints</p> <p>Pr Praseodymium Torchworkers' Eyeglasses</p> <p>Nd Neodymium Electric Motor Magnets</p> <p>Pm Promethium Luminous Dials</p> <p>Sm Samarium Electric Motor Magnets</p> <p>Eu Europium Color Televisions</p> <p>Gd Gadolinium MRI Diagnosis</p> <p>Tb Terbium Fluorescent Lamps</p> <p>Dy Dysprosium Smart Material Actuators</p> <p>Ho Holmium Laser Surgery</p> <p>Er Erbium Optical Fiber Communications</p> <p>Tm Thulium Laser Surgery</p> <p>Yb Ytterbium Scientific Fiber Lasers</p> <p>Lu Lutetium Photodynamic Medicine</p>																		
	<p>Actinide Metals</p> <p>Ac Actinium Radioactive Medicine</p> <p>Th Thorium Gas Lamp Mantles</p> <p>Pa Protactinium Radioactive Waste</p> <p>U Uranium Nuclear Power</p> <p>Np Neptunium Radioactive Waste</p> <p>Pu Plutonium Nuclear Weapons</p> <p>Am Americium Smoke Detectors</p> <p>Cm Curium Mineral Analyzers</p> <p>Bk Berkelium Radioactive Waste</p> <p>Cf Californium Mineral Analyzers</p> <p>Es Einsteinium radioactive, never found in nature, no uses except atomic research</p> <p>Fm Fermium</p> <p>Md Mendelevium</p> <p>No Nobelium</p> <p>Lr Lawrencium</p>																		

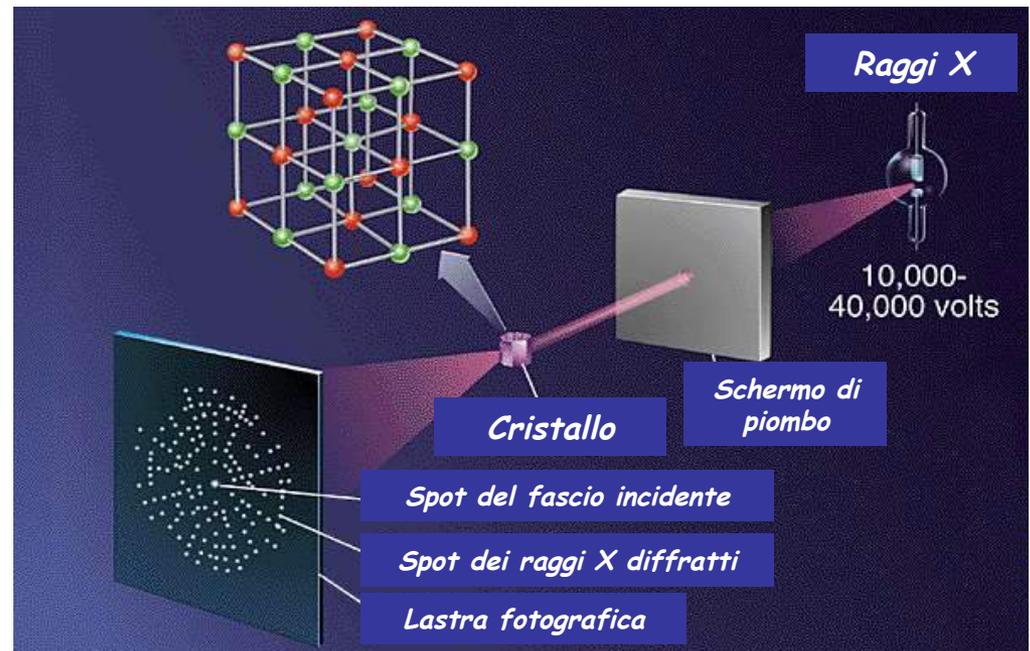
Atomi e raggi X



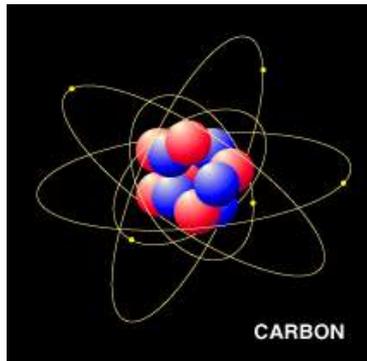
Se si vuole studiare la **struttura della materia a livello atomico** e' necessario **utilizzare radiazione elettromagnetica di lunghezze d'onda dell'ordine di 0.1 nm** ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{ m}$) ossia **i raggi X**.

Studiare la **struttura della materia**, composta di **atomi** di vario tipo, significa **ottenere informazioni** sulle sue **proprietà elettroniche, strutturali e magnetiche**.

Perche' questo e' importante?



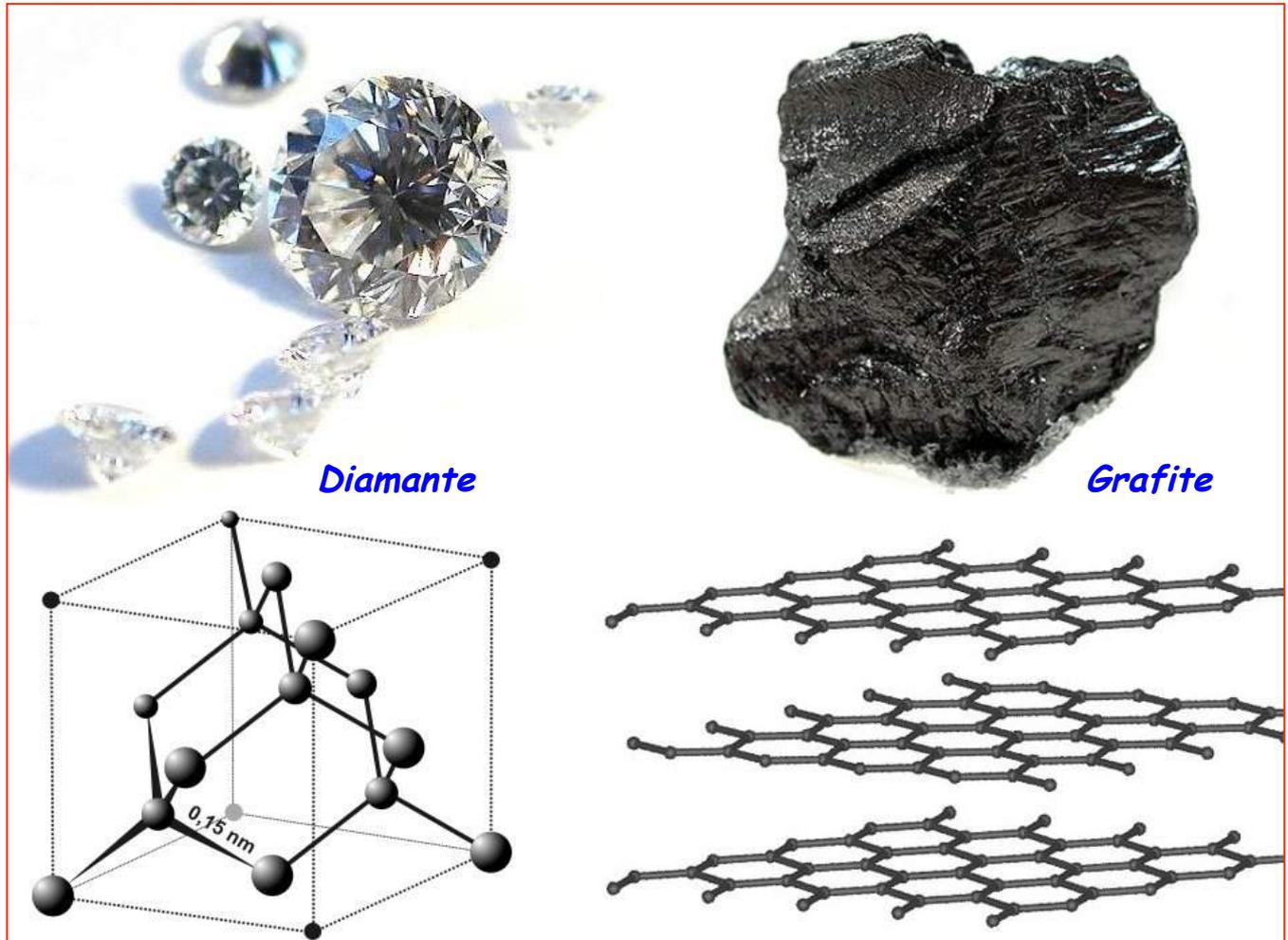
Atomi e raggi X



L'atomo di carbonio.

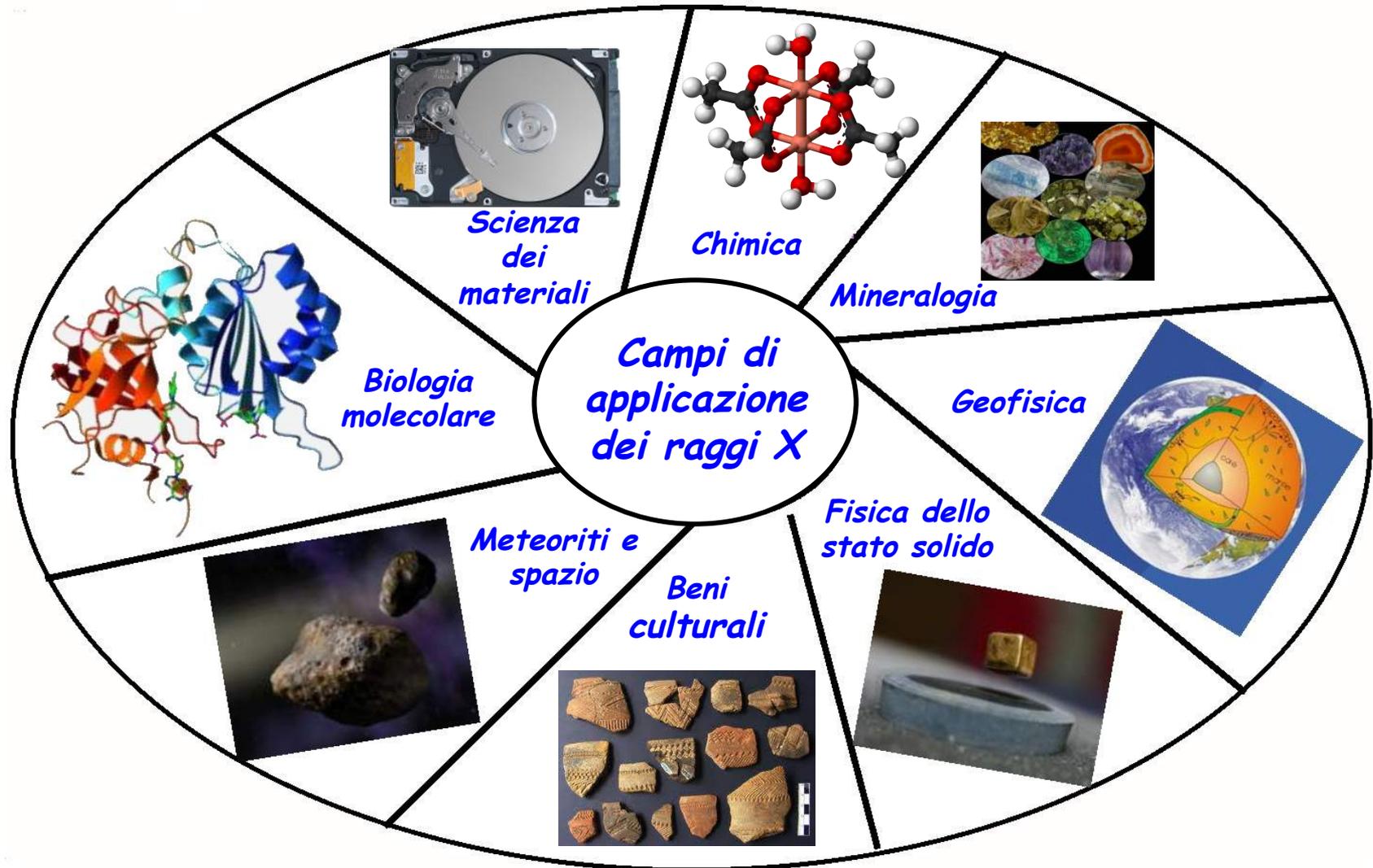
Elemento
essenziale per la
vita, è per lo
più fatto di spazio
vuoto.

Una nube di *sei*
elettroni, orbita
attorno al nucleo.



Un *diamante grezzo* e un *blocco di grafite* appaiono così diversi ma sono entrambi composti da carbonio puro. *Ciò che conferisce al diamante la sua lucentezza è la sua diversa struttura atomica.* Foto: Wikipedia.

Raggi X e applicazioni



*Sorgenti di raggi X di alta
brillanza*



Acceleratori di particelle



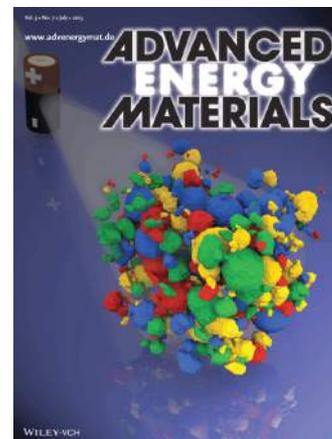
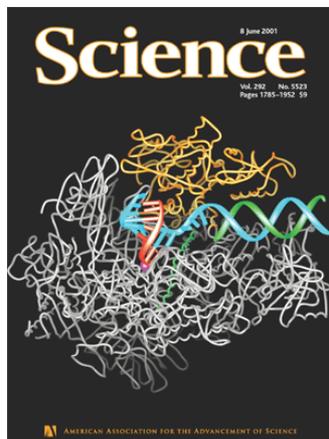
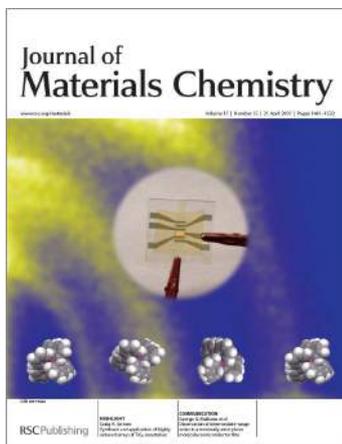
Luce di Sincrotrone

Luce di sincrotrone

La luce di Sincrotrone è uno strumento essenziale per le ricerche in molte discipline scientifiche. Questo è in gran parte dovuto alla combinazione di varie importanti caratteristiche delle sorgenti, quali la **brillanza**, la **stabilità**, l'ampio **spettro di energia accessibile**, le caratteristiche di **polarizzazione** e l'**affidabilità** dei sistemi nel loro insieme.

I campi di ricerca in cui vengono usati i **raggi X** in particolare sono di **interesse scientifico**, sia **fondamentale** che **applicativo**.

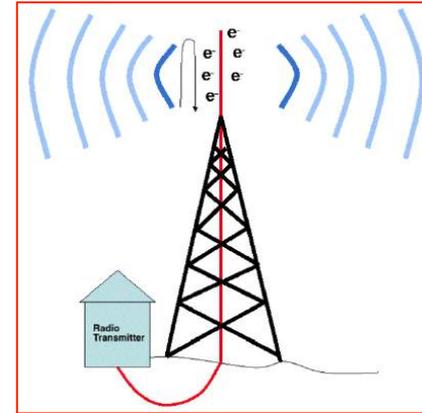
I raggi X sono importanti nello studio e caratterizzazione di **nuovi materiali**, nello sviluppo di moderne **componenti elettroniche e magnetiche**, nelle **produzione di energia**, negli studi di **biologia** e del loro impatto in **campo medico**, nella analisi non distruttiva di elementi legati all'**ambiente naturale**, alla conservazione e studio dei **beni culturali**, a campioni considerati unici come **materiali stellari** o di interesse **paleontologico**.



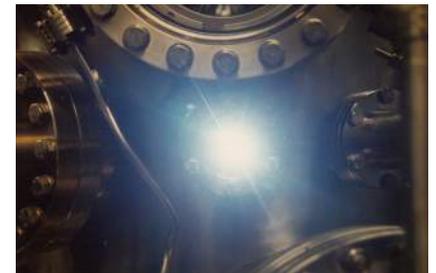
Luce di sincrotrone

Particelle cariche come elettroni e positroni, se accelerate, emettono radiazione.

$$v \ll c \text{ or } \beta = v/c \ll 1$$

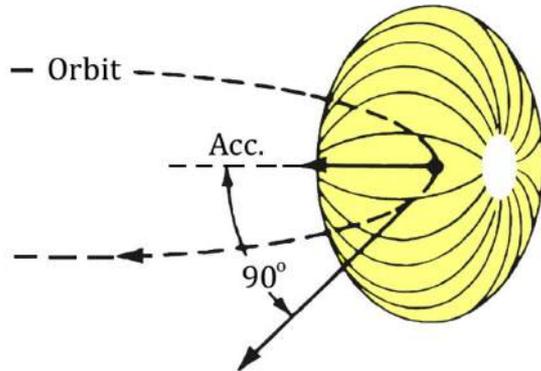


Quando *particelle cariche, che si muovono a velocità relativistiche, in acceleratori circolari di particelle come sincrotroni e/o anelli di accumulazione*, sono costrette a cambiare la direzione del loro moto sotto l'azione di *campi magnetici*, **la radiazione che emettono prende il nome di luce di sincrotrone.**



$$v \approx c \text{ or } \beta = v/c \approx 1$$

Luce di sincrotrone: fisica



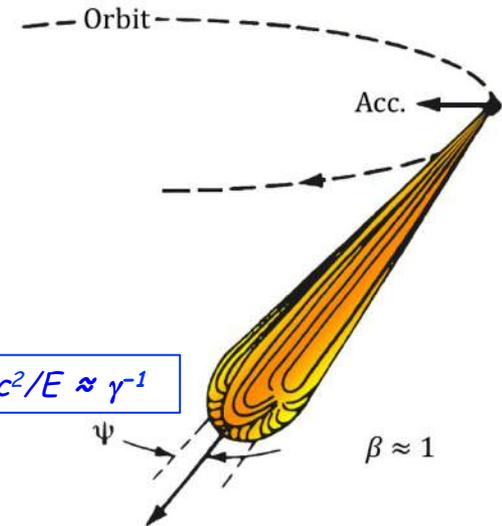
$\beta \ll 1$ *Situazione non-relativistica!*

$$v \ll c \text{ or } \beta = v/c \ll 1$$

$$P = 2 e^2 a^2 / (3c^3) \text{ [W]}$$

P = potenza totale emessa, a = accelerazione, e = carica della particella

Una particella carica, se accelerata, emette radiazione elettromagnetica. Una tale emissione era stata predetta da Larmor, nel 1897 che ha ricavato, a partire dall'elettrodinamica classica, la formula che esprime la potenza P irradiata.



$$\psi \approx mc^2/E \approx \gamma^{-1}$$

$\beta \approx 1$

$$v \approx c \text{ or } \beta = v/c \approx 1$$

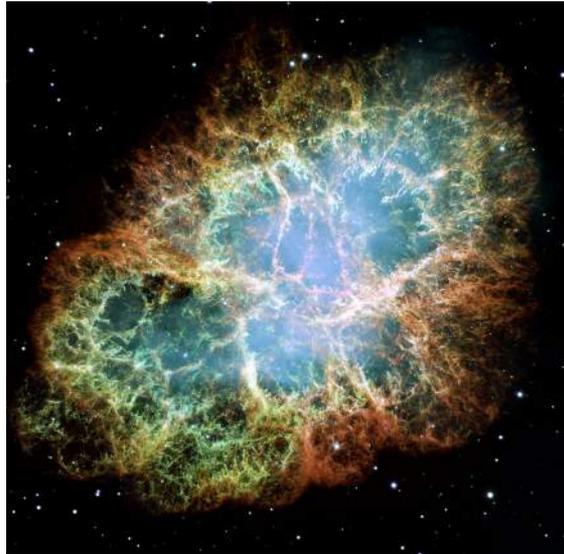
Quando particelle cariche, si muovono a *velocita' vicine a quelle della luce*, su una traiettoria curva, esse emettono radiazione elettromagnetica nota come *luce di sincrotrone*. La radiazione e' emessa nella direzione del moto, in uno *stretto cono tangente* all'orbita degli elettroni.

$$P_{\text{rad}} = \frac{2}{3} \frac{Q^2 c}{R^2} \left[\frac{E}{mc^2} \right]^4$$

E energia della particella, m = massa, R = raggio di curvatura della traiettoria

1945 Schwinger

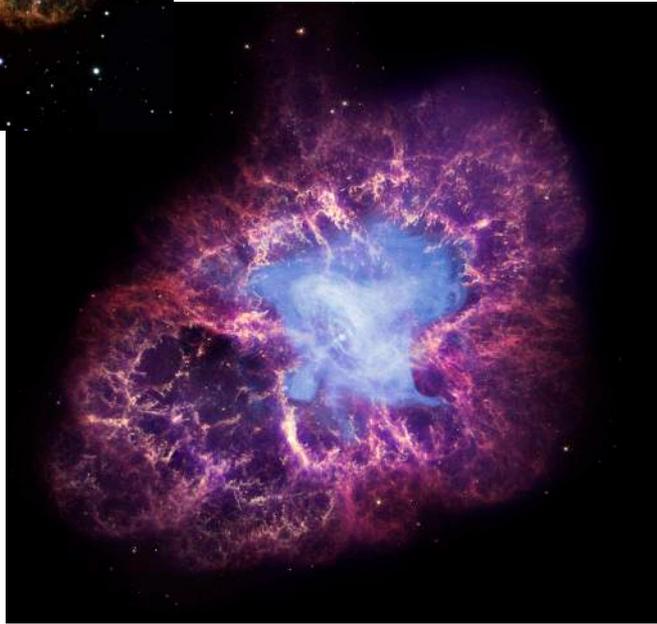
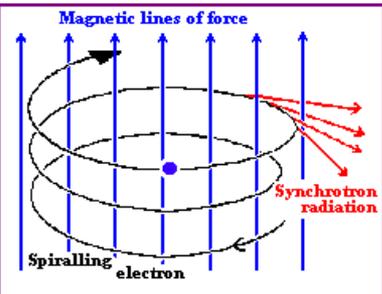
La Luce di Sincrotrone naturale



La *Nebulosa del Granchio* è ciò che rimane dell'esplosione di una grande stella, la cui luce ha raggiunto la Terra nel 1054, e si trova a 6500 anni luce da noi, nella costellazione del Toro.

Rappresenta uno degli oggetti del cielo più studiati dagli astrofisici.

NASA Hubble Space Telescope image of the Crab Nebula (NASA, ESA and Allison Loll/Jeff Hester (Arizona State University)).

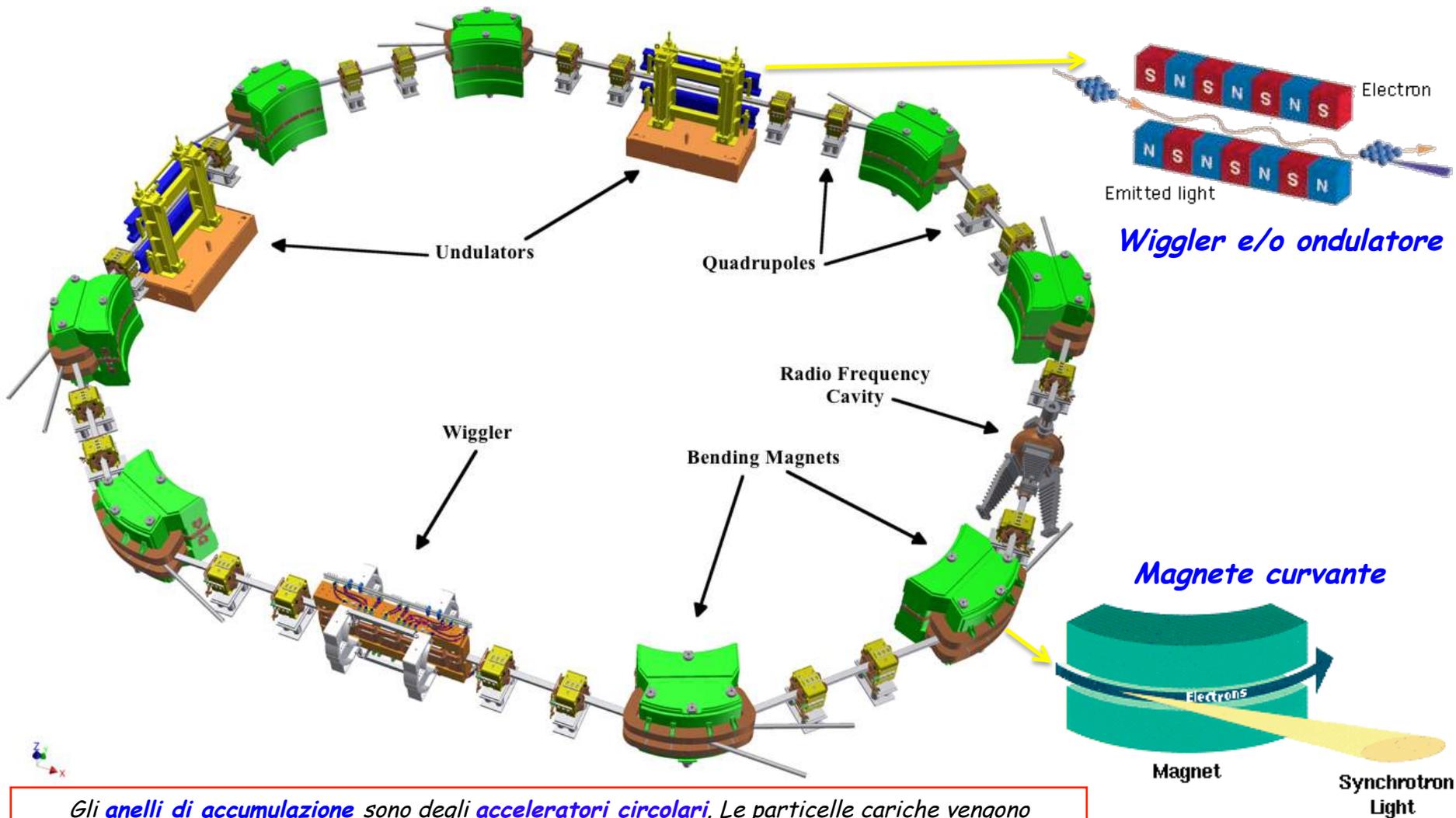


NASA's Great Observatories' View of the Crab Nebula X-Ray-blue: NASA/CXC/J.Hester (ASU); Optical-red and yellow: NASA/ESA/J.Hester & A.Loll (ASU); Infrared-purple: NASA/JPL-Caltech/R.Gehrz (Univ. Minn.)

Si tratta di una nuvola di gas in espansione al cui centro c'è ciò che rimane del cuore della stella originario: una stella di neutroni che ruota 30 volte al secondo e ad ogni rotazione emette un fascio di radiazione verso il nostro pianeta, che costituisce la caratteristica emissione pulsata delle stelle di neutroni rotanti, da cui il nome *pulsar*.

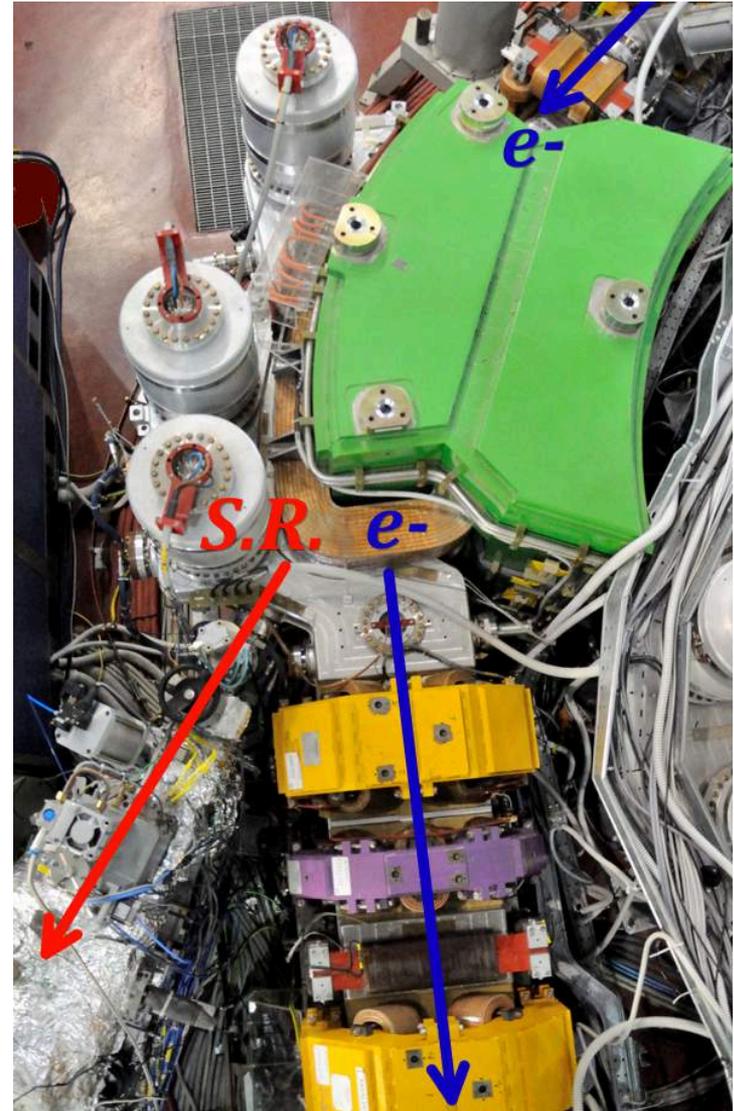
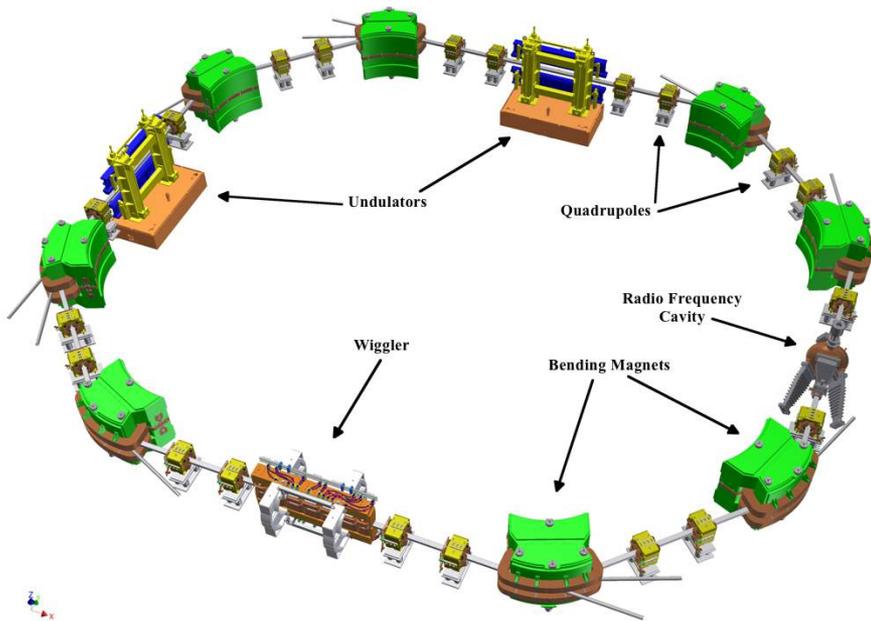
Nel 1953 Iosif Sklovskij propose che la regione diffusa di colore blu fosse generata soprattutto dalla radiazione di sincrotrone, ossia la radiazione prodotta da particelle cariche (in questo caso gli elettroni) che sono costrette a muoversi a velocità prossime alla velocità della luce in traiettorie curve da un campo magnetico; tre anni dopo questa teoria fu confermata dalle osservazioni. Negli anni sessanta si scoprì che la sorgente dei livelli di curvatura degli elettroni è il forte campo magnetico prodotto dalla stella di neutroni al centro della nebulosa.

Luce di sincrotrone artificiale e acceleratori circolari di particelle

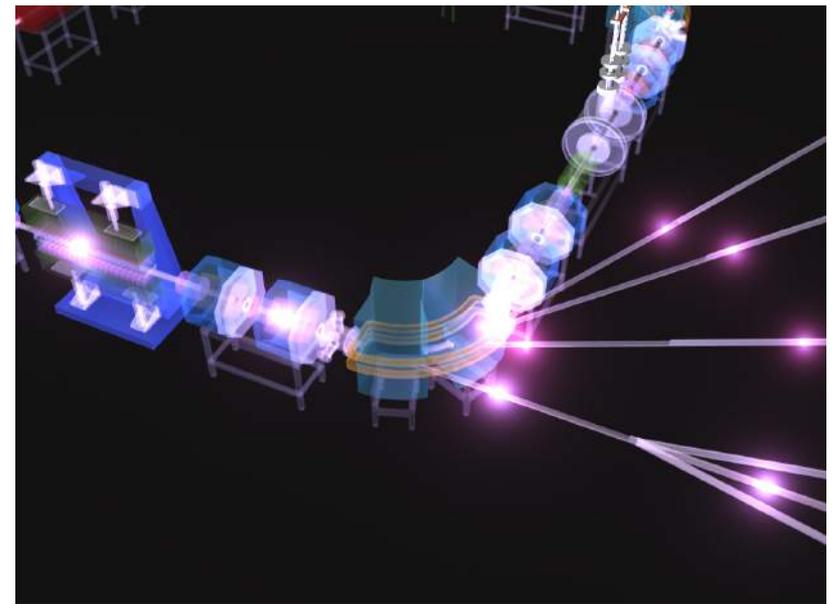
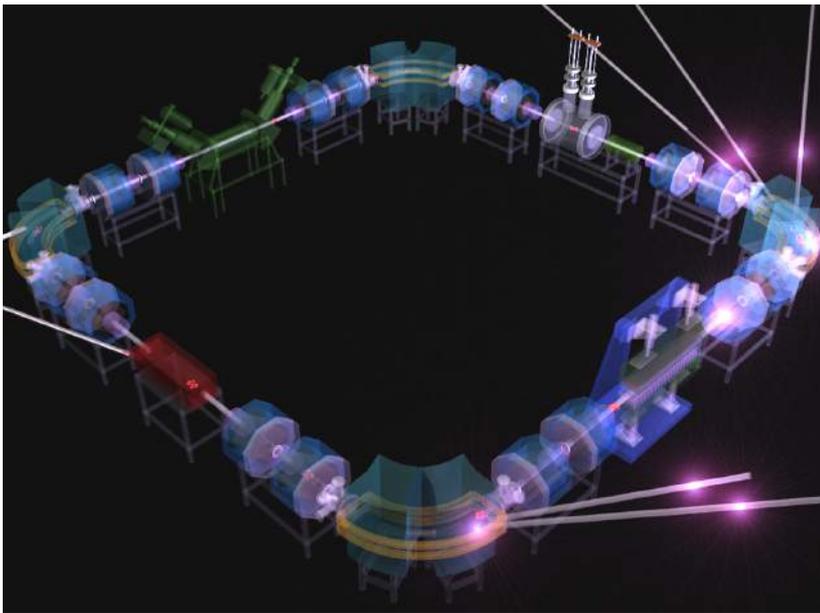
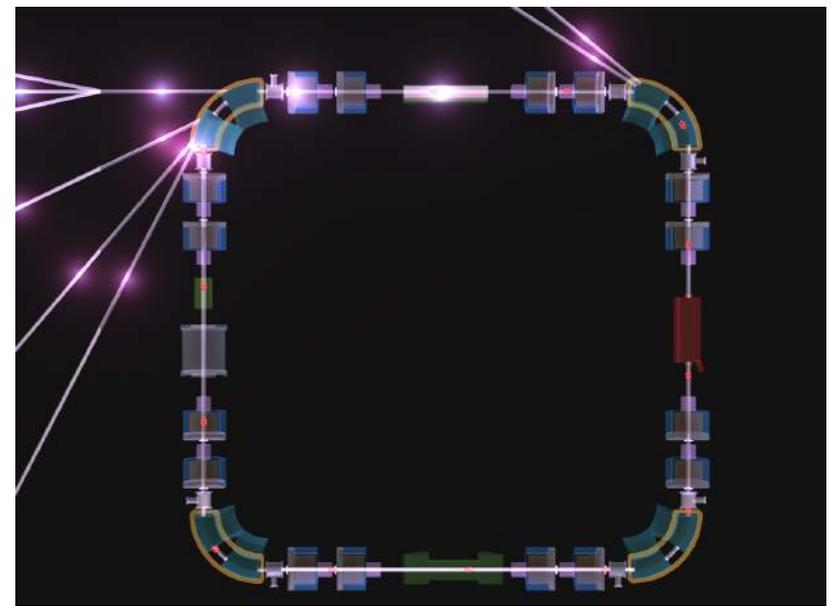


Gli **anelli di accumulazione** sono degli **acceleratori circolari**. Le particelle cariche vengono **accelerate per mezzo di campi elettrici** e vengono mantenute sulle orbite circolari grazie all'azione di **campi magnetici**. Le particelle sono confinate in un anello in cui c'è ultra alto vuoto.

Magneti curvanti



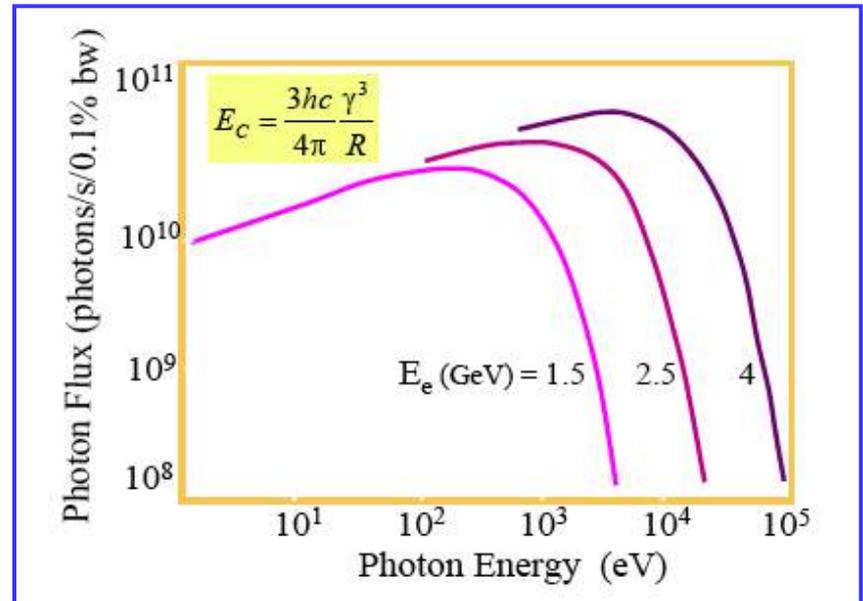
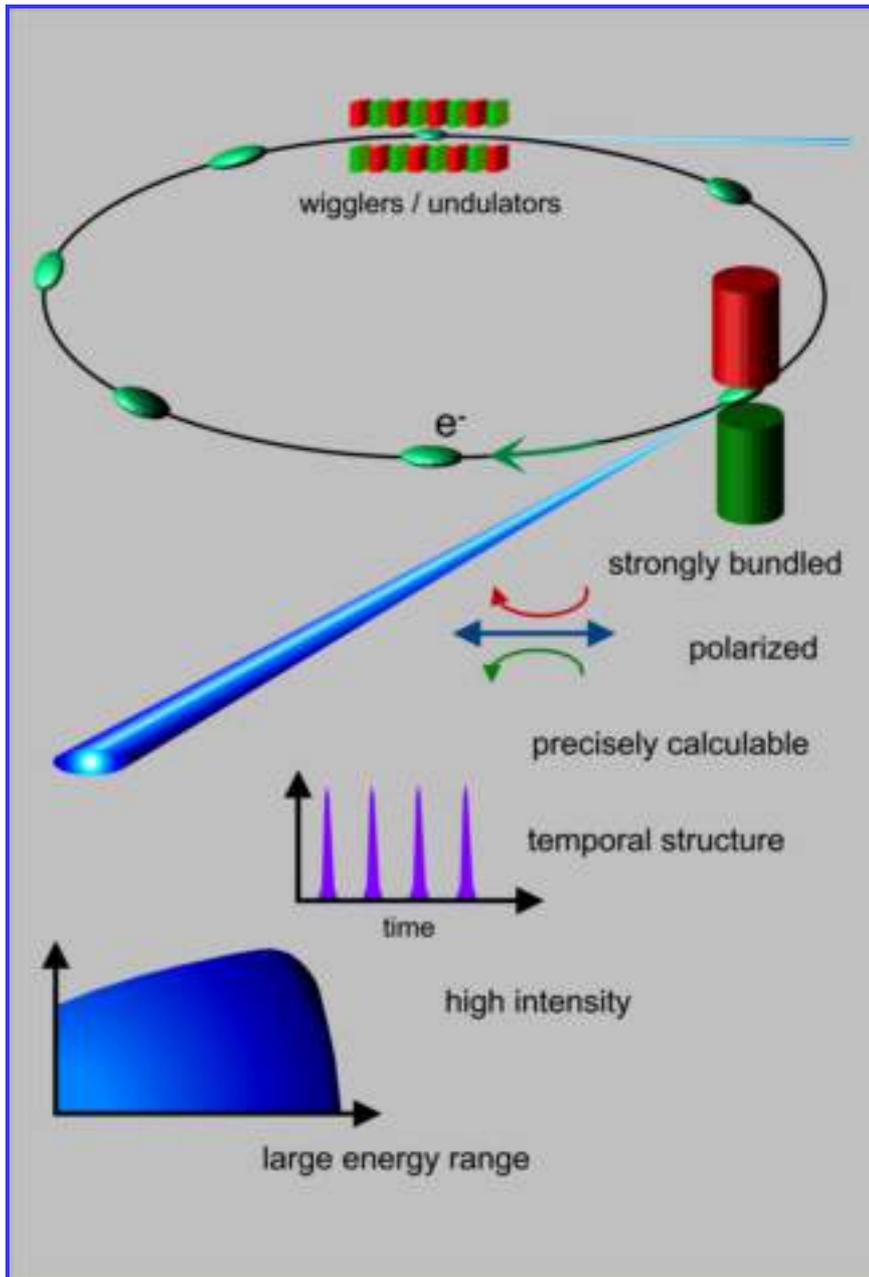
Magnete curvante di DAΦNE



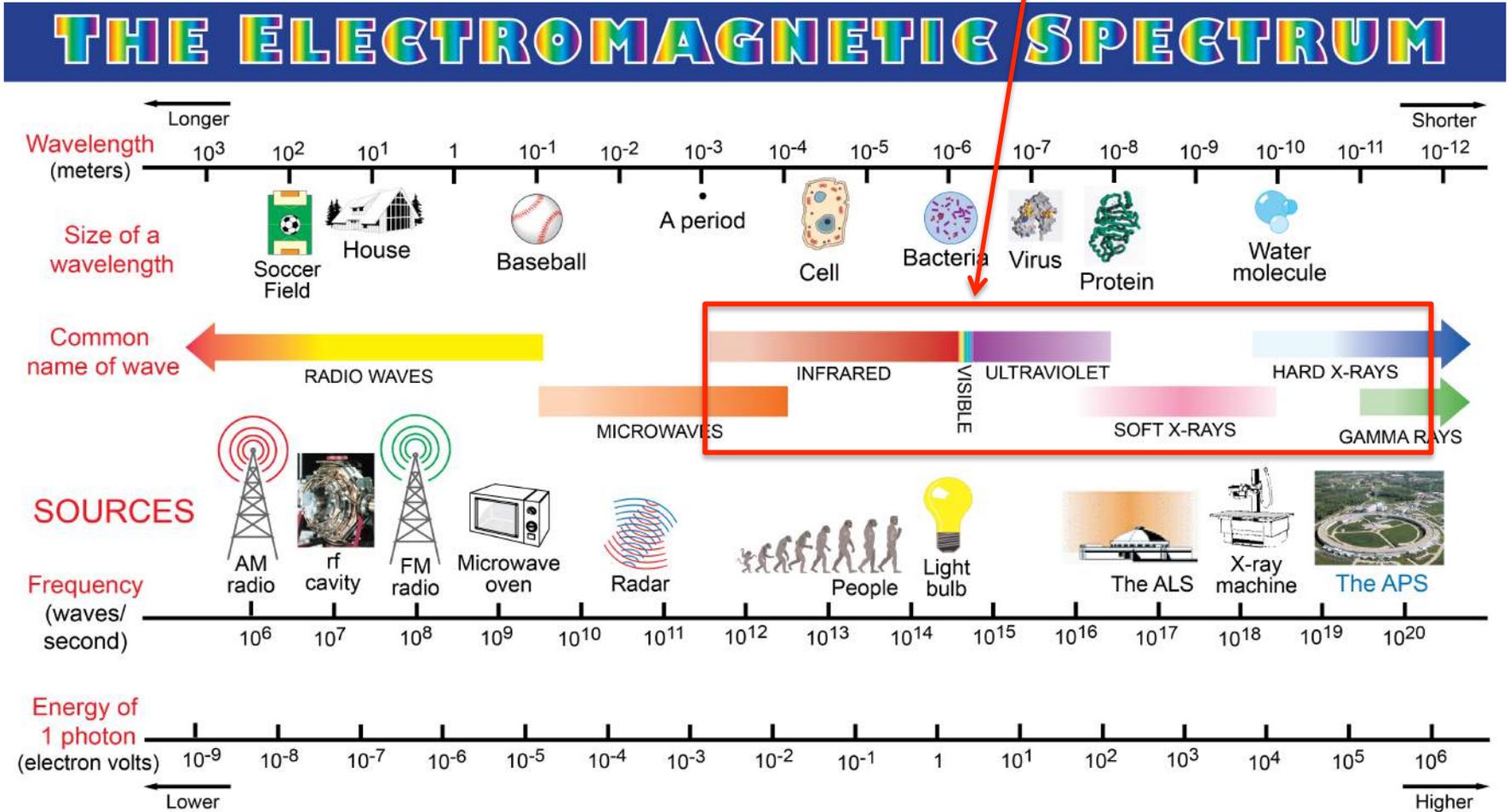
ASTRID (Aarhus - Denmark) <http://www.isa.au.dk/animations/pictures/pic-index.asp>

http://www.isa.au.dk/animations/Finalmovie/astrid_total_v2.mov

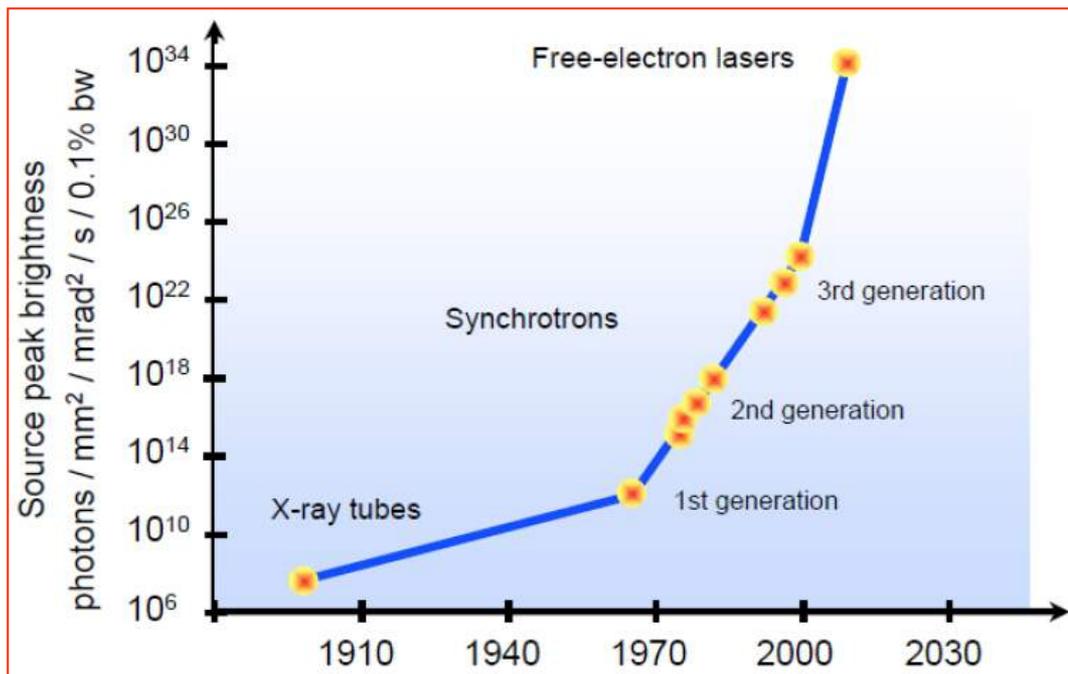
Proprietà della Luce di Sincrotrone



Intervallo spettrale coperto dalla luce di sincrotrone!

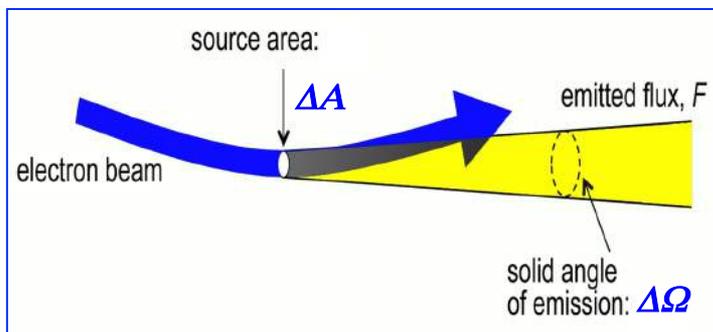


Evoluzione della brillantezza in funzione del tempo



La brillantezza caratterizza le macchine acceleratrici di terza generazione, dette di bassa emittanza, grazie alle ridotte dimensioni delle sorgenti e piccole divergenze angolari.

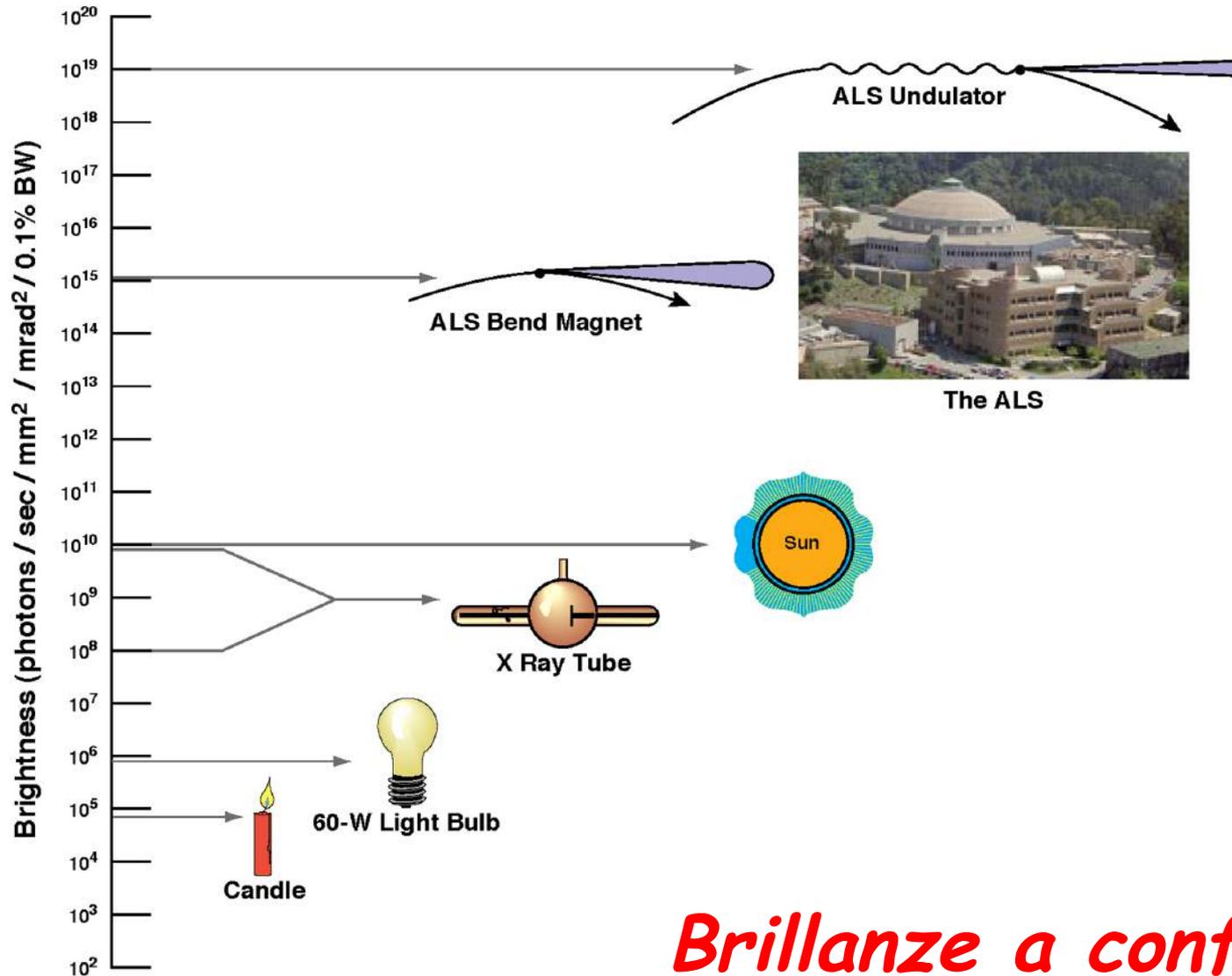
Notevole incremento della brillantezza di circa un fattore 1000 ogni 10 anni!!!



$$\text{Brillantezza} = \frac{\text{Flusso}}{(\Delta A)(\Delta \Omega)}$$

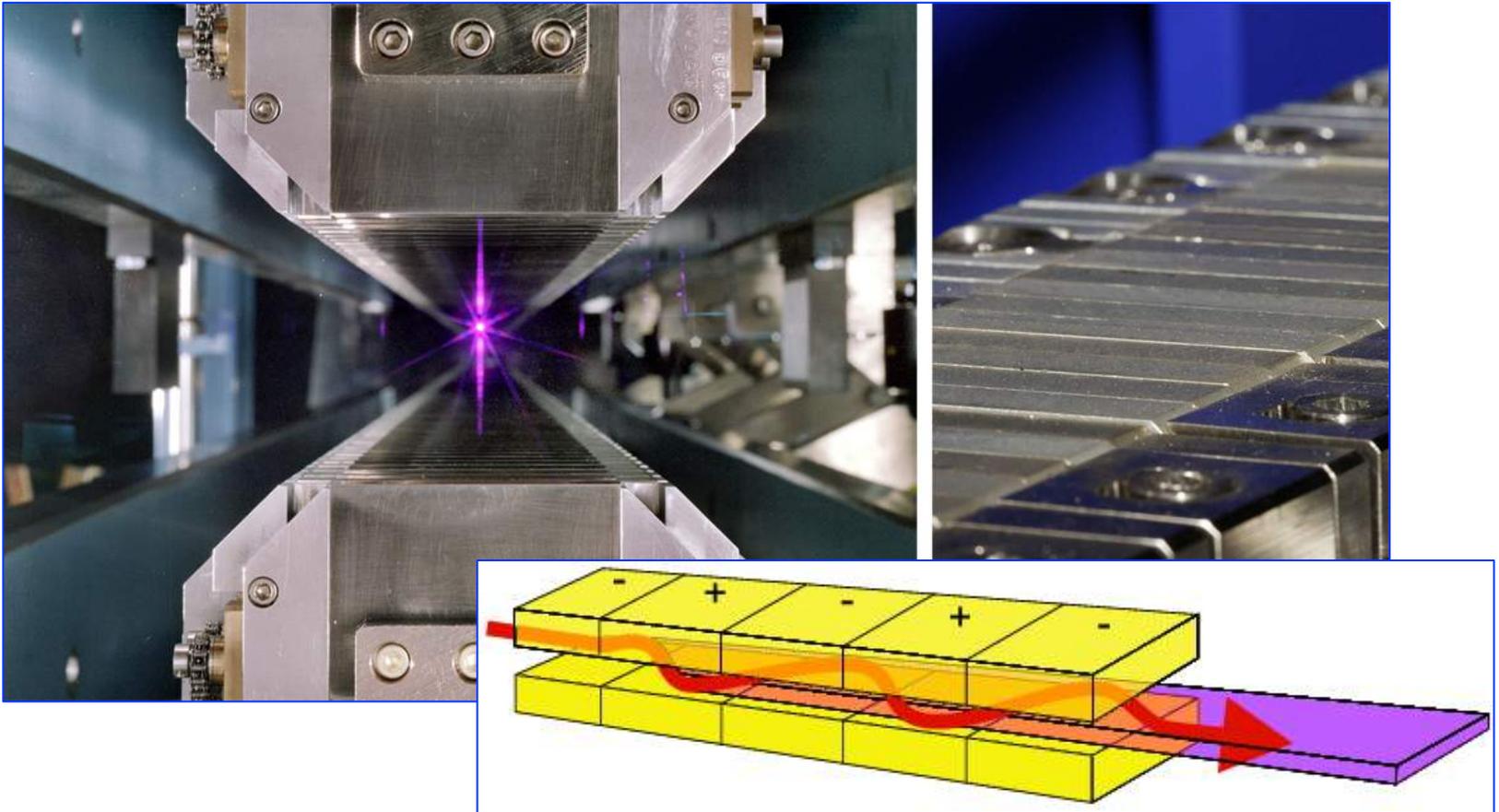
How Bright Is the Advanced Light Source?

ALS



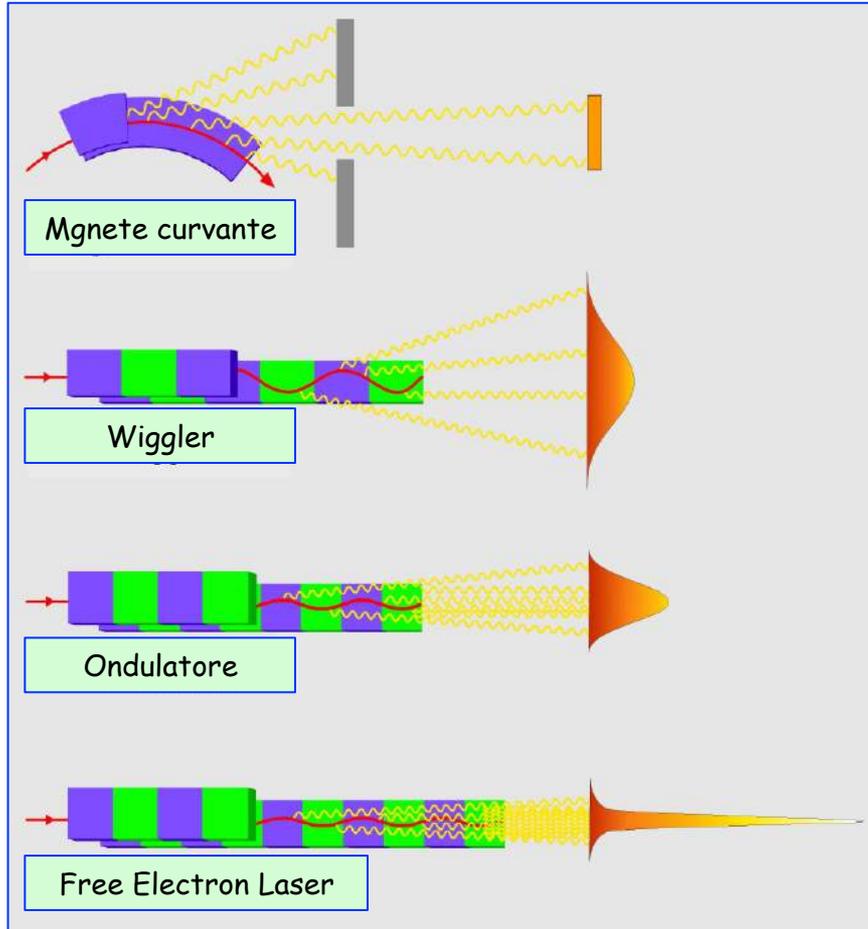
Brilliance a confronto

Magneti sezioni dritte: ondulatori e wiggler

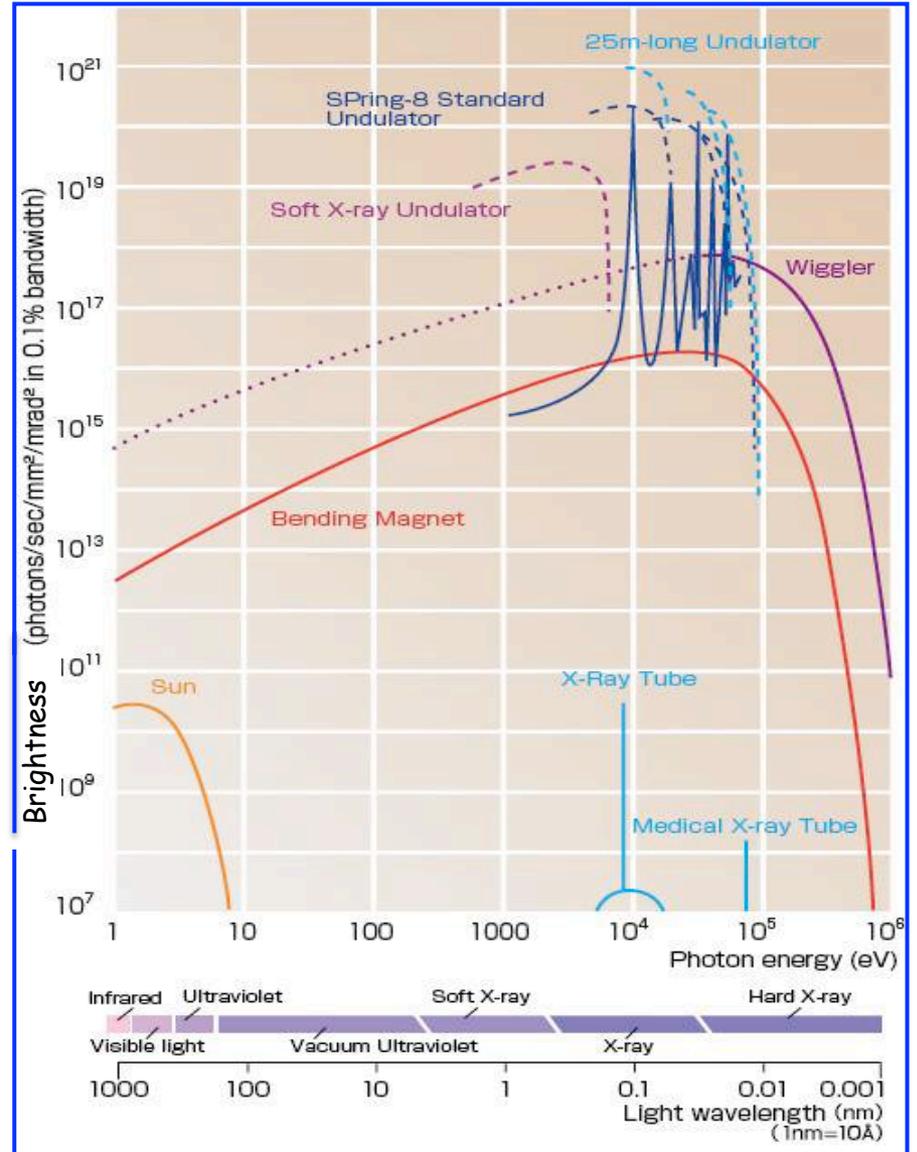


Il *flusso* e la *brillanza della radiazione emessa* possono essere aumentati, mediante '*insertion devices*' (ID) (tipo *wiggler* e *ondulatori multipolari*) che vengono installati in tratti rettilinei dell'anello (sezioni diritte) opportunamente ricavate tra i vari magneti curvanti.

Confrontando le diverse brillanze



Courtesy DESY



Courtesy SPring-8

*Breve storia della
Luce di Sincrotrone*

Breve storia della luce di sincrotrone

Prima osservazione della luce di sincrotrone
1947

Teorie e concetti
1897-1946



J. Schwinger Nobel Prize 1965 Classical Relativistic quantum field theory

Uso parassitico degli elettro-sincrotrone
1961



Sviluppo degli anelli di accumulazione
1960



ADA - B. Touschek - LNF

1st gen. dedicata Tantalus I (USA) 1968

2nd gen. dedicata SRS (UK) 1981



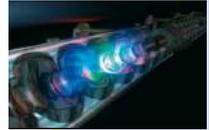
3rd gen. dedicata ESRF (France) 1994



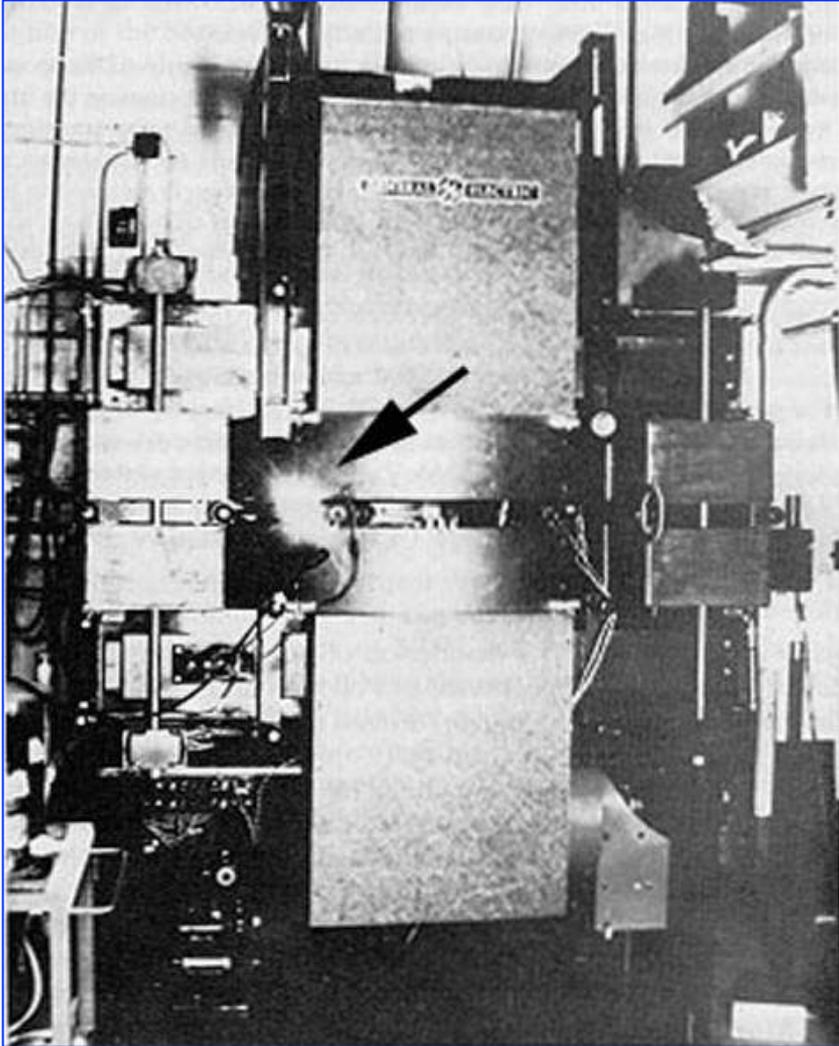
Aumento della brillantezza

3rd* gen. ultimate storage rings tipo MAX IV
(Sweden) futuro

4th gen. - LINAC based accelerators
FELs



Luce di sincrotrone: Acceleratori di prima generazione uso parassitico/dedicato



Nel **1947** fu osservata sperimentalmente, **per la prima volta, la radiazione prodotta da un piccolo acceleratore circolare di particelle**, un elettrosincrotrone da 70 MeV, costruito nei laboratori della General Electric a New York, **radiazione che fu chiamata luce di sincrotrone.**

Questa radiazione, per molto tempo, è stata **prevalentemente considerata come un disturbo per le macchine acceleratrici**, proprio perché le particelle accelerate perdevano parte della loro energia sotto forma di radiazione e questa andava poi loro rifornita.

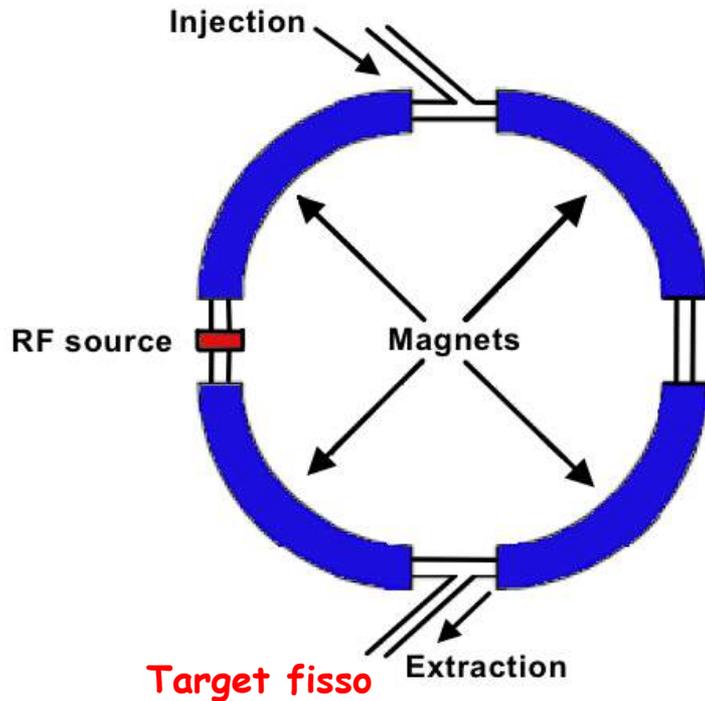
Gli acceleratori di particelle sono stati costruiti per altri tipi di applicazioni e **la loro evoluzione è dipesa inizialmente proprio dalle crescenti esigenze nell'ambito della fisica delle alte energie.**

1947 General Electric Res. Lab. - 70 MeV Electron Synchrotron - N.Y. USA

Passaggio dagli elettro-sincrotroni agli anelli di accumulazione.

*Prima e seconda generazione di anelli di accumulazione
dedicati*

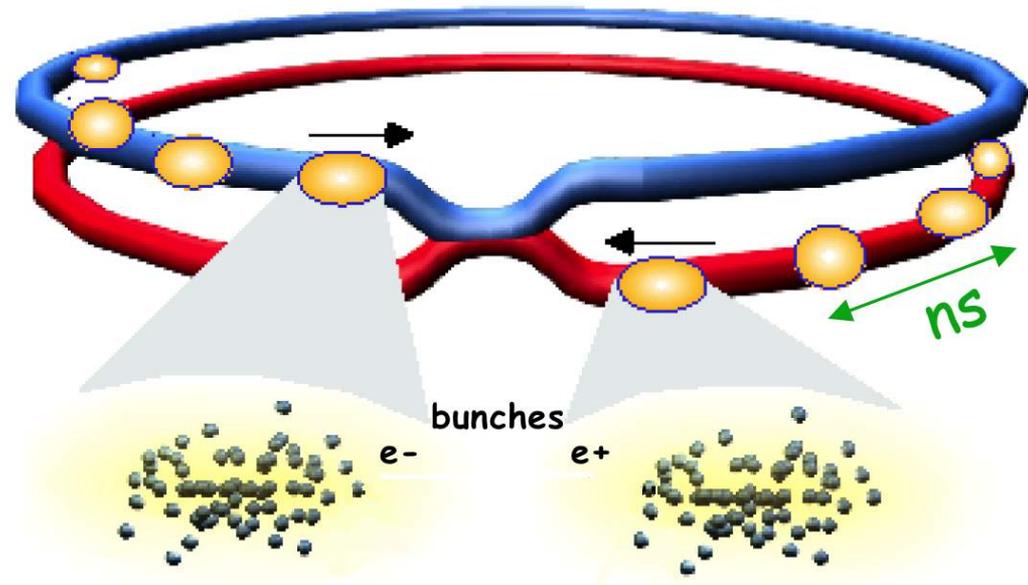
Sincrotroni e anelli di accumulazione



Sincrotrone

Fascio di particelle di alta energia su un bersaglio fisso

$$E_{CM} \approx (mE)^{1/2}$$



Anello di accumulazione

Interazione tra due fasci di particelle di alta energia

$$E_{CM} \approx 2E$$

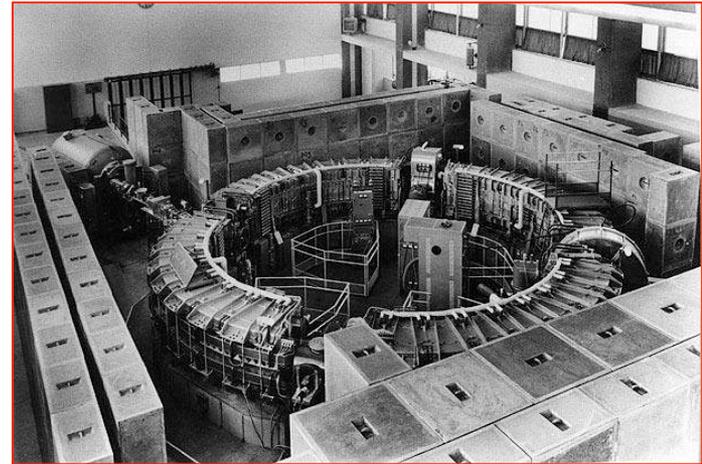
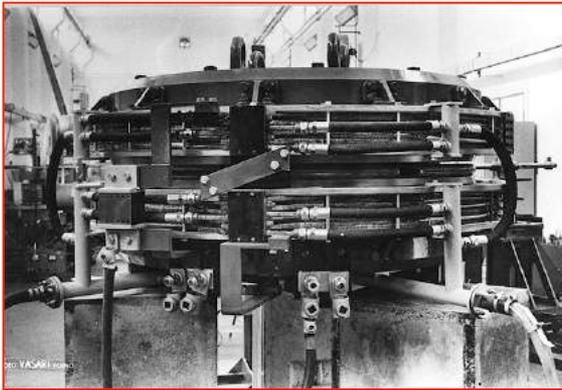
Anello di accumulazione: collisione tra fasci di particelle più efficiente

$E =$ Energia delle particelle $\gg mc^2$; $E_{CM} =$ Energia al centro di massa

Sincrotroni e anelli di accumulazione

Frascati: Elettro-Sincrotrone, ADA e ADONE

Frascati - CNEN (Comitato Nazionale Energia Nucleare)
Laboratory **Elettrosincrotrone** - (0.4-1.1) GeV, $C = 28$ m
(1959-1975)



LNF **ADA** (Anello Di Accumulazione) - primo anello di
accumulazione elettrone-positrone (proposed by B. Touschek)
0.25 GeV, $C = 5$ m (1961-1964)

LNF **ADONE** (big ADA) anello di accumulazione da 1.5 GeV
per fascio, $C = 105$ m
(1969-1993)

1976-1993 LNF **ADONE** 1.5 GeV uso parassitico/dedicato
dopo gli esperimenti di fisica delle alte energie.



Terza generazione di anelli di accumulazione

*Sorgenti di luce di sincrotrone ottimizzate per
ottenere una elevata brillantezza*

Sorgenti di luce di terza generazione



Elettra (2.4 GeV) - Trieste



DIAMOND (3 GeV) - UK



ALBA (3 GeV) - Spagna

In costruzione - Ultimate SR facilities



Max-IV

Lund (3 GeV) - Svezia



Sirius (3 GeV) - Brasile



SSRF

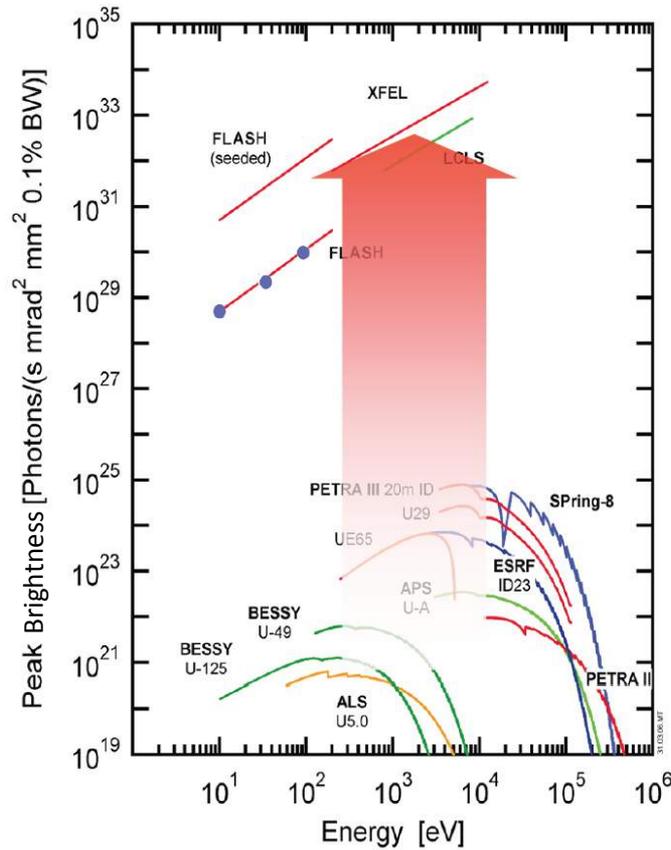
SSRF (3.5 GeV) Shanghai -Cina

Quarta generazione: laser ad elettroni liberi o FEL

Dagli anelli di accumulazione ai FEL.

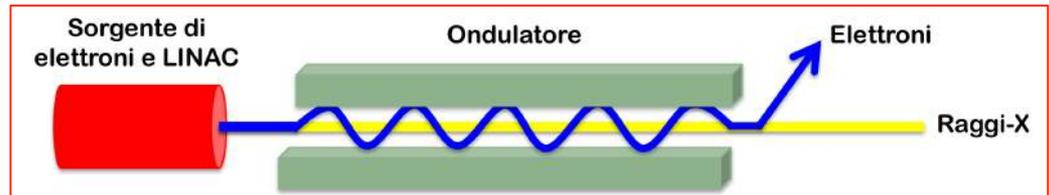
FEL o Free Electron Laser

Un enorme incremento della brillantezza - no a nove ordini di grandezza di aumento della brillantezza di picco - rispetto ai valori ottenibili da sorgenti di luce di sincrotrone di terza generazione, arriva dallo sviluppo e realizzazione di sorgenti di quarta generazione o laser a elettroni liberi.



Negli XFEL, invece, come nei laser, si verifica la produzione di impulsi di radiazione ultra-corti (decine di femtosecondi) grazie ad un processo di emissione stimolata (SASE o Self Amplified Spontaneous Emission) e coerente di luce, prodotta però da un fascio di elettroni relativistici, che attraversano un ondulatore e interagiscono con la radiazione da loro stessi emessa.

1 femtosecondo = 10⁻¹⁵ s

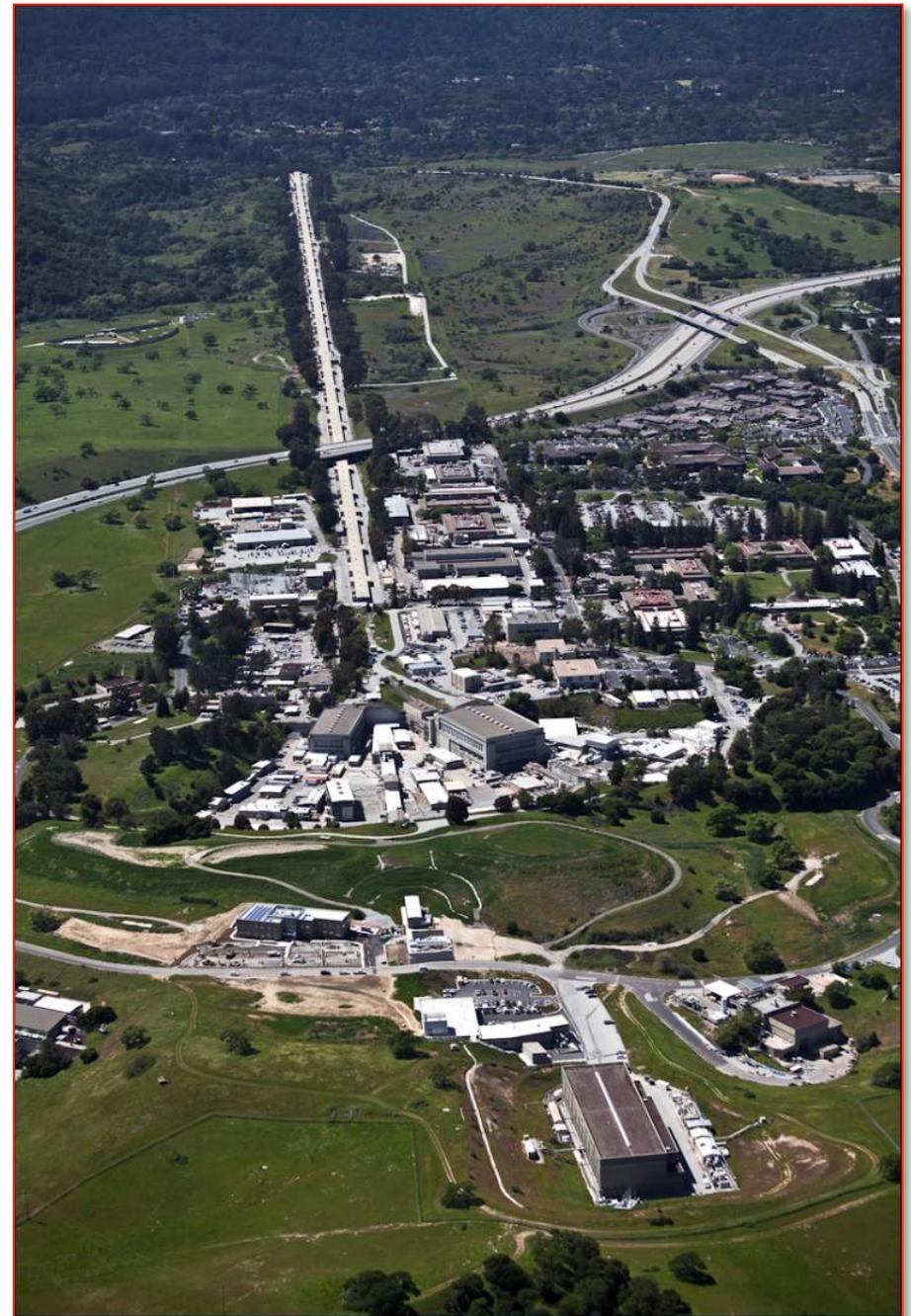
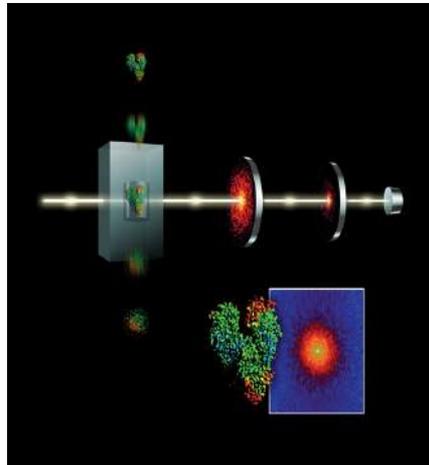
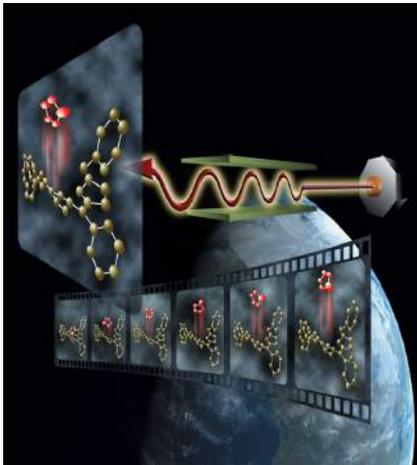


Visione schematica di un XFEL

I laser a elettroni liberi sono macchine acceleratrici in grado di emettere radiazione coerente, monocromatica, estremamente brillante e collimata, proprio come i laser convenzionali.

XFEL

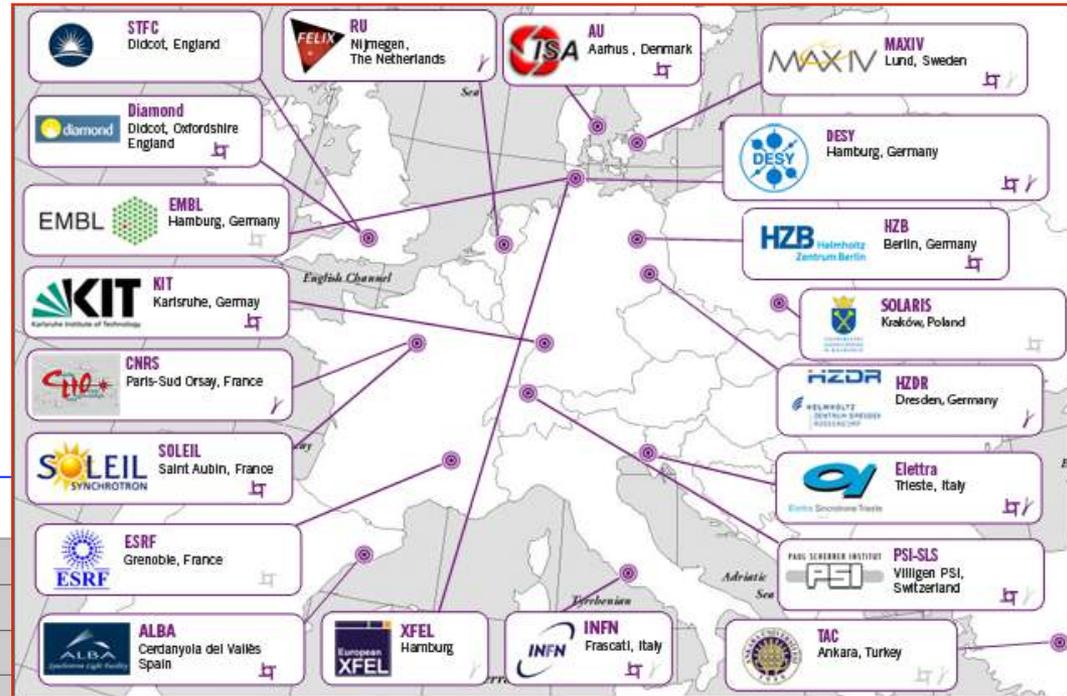
- *Sorgenti di luce estremamente brillanti e coerenti*
- *Produzione di impulsi di luce ultra-veloci*
- *Già in funzione diversi FEL da IR ad UV e raggi X (LCLS Aprile 2009)*
- *XFEL Europeo in costruzione*
- *Possibilità di 'filmare' in le reazioni chimiche in tempo reale*
- *Indagini strutturali delle singole biomolecole senza senza crescere cristalli.*



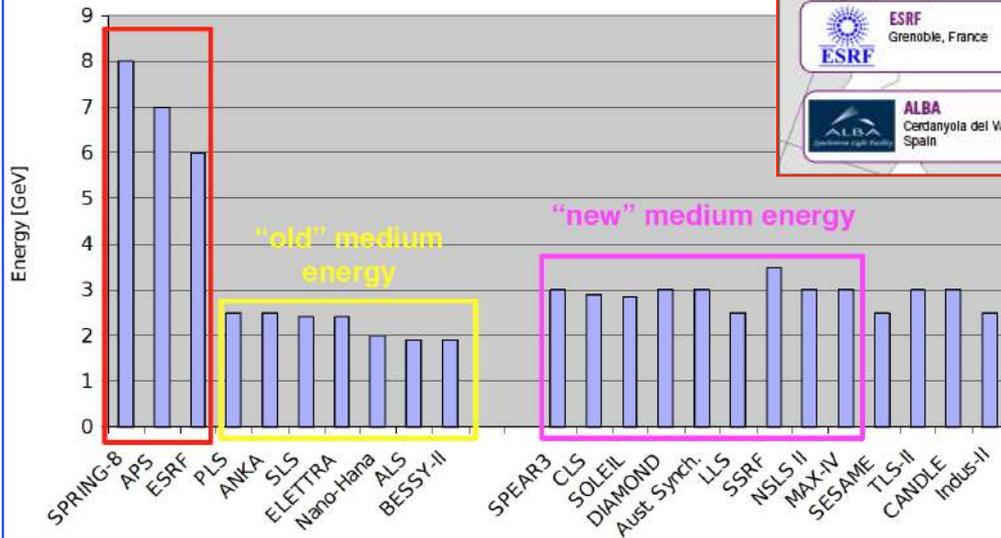
Luce di sincrotrone in Europa

18 in America
25 in Asia
25 in Europe
1 in Oceania

Incluse le macchine in costruzione e i FELS

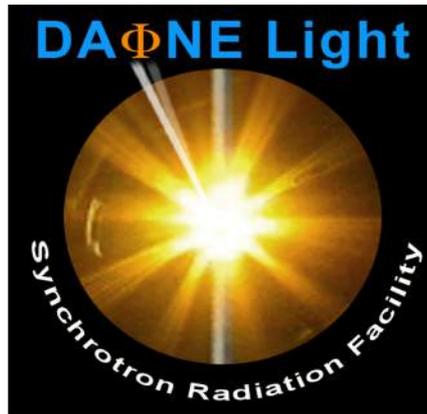


“old” high energy



Info sulle facilities di luce di sincrotrone Europee: www.wayforlight.eu
Circa 67 facilities già in funzione in tutto il mondo: www.lightsources.org

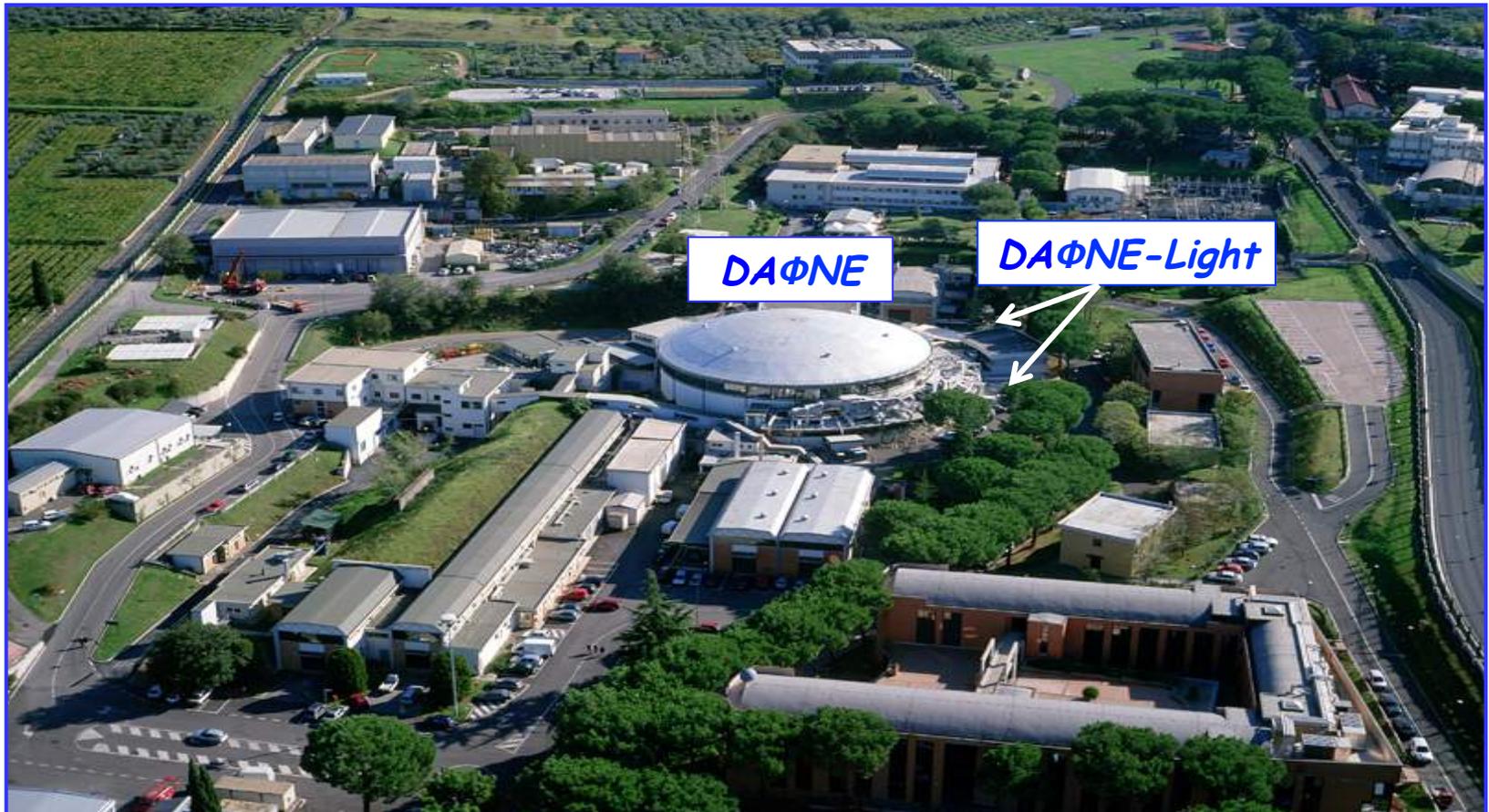
*Luce di sincrotrone@
INFN-Laboratori Nazionali di Frascati*



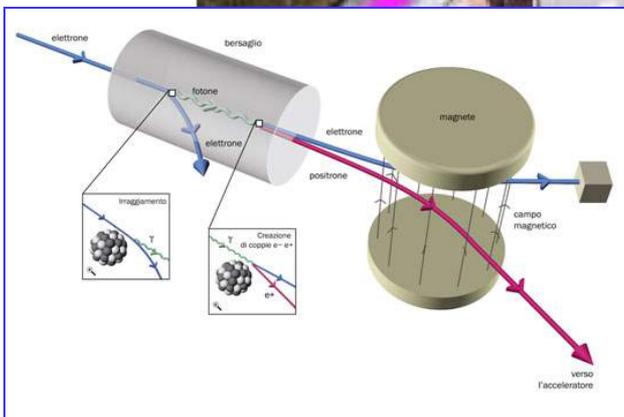
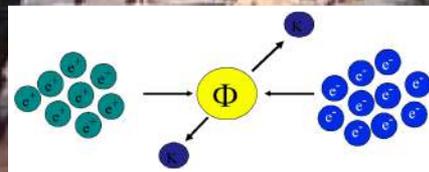
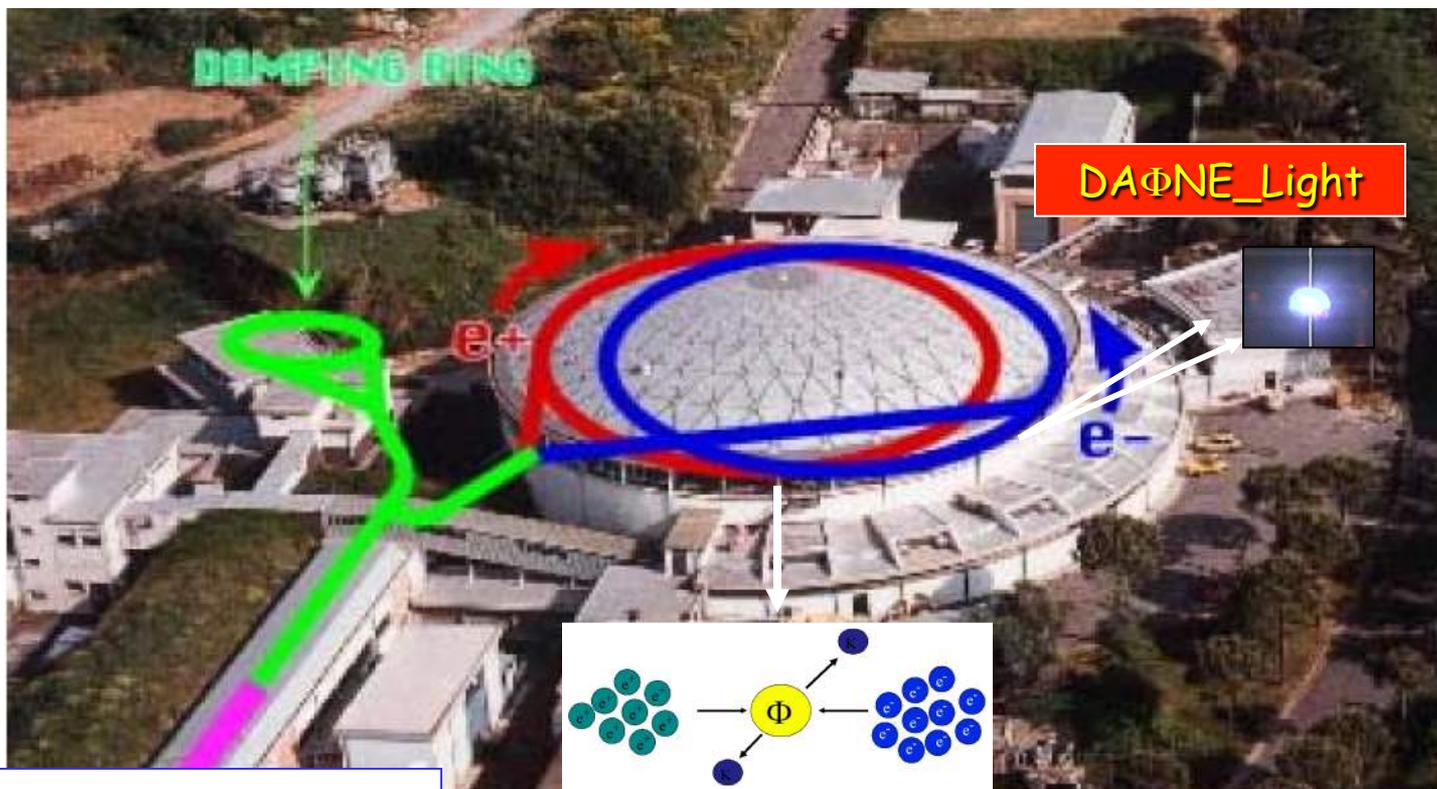
DAΦNE-Luce



INFN-LNF Facility di Luce di Sincrotrone



DAΦNE come Collider ($e^+ - e^-$) ma anche come Sorgente di Luce di Sincrotrone



DAΦNE collider - two interaction regions.
Energy = 0.51 GeV / beam
 $I_{e^-} > 1500 \text{ mA}$ $I_{e^+} > 1000 \text{ mA}$

Beamlines @ DAΦNE

1) **SINBAD - IR beamline** (1.24 meV - 1.24 eV)

2) **DXR1- Soft x-ray beamline**
(900-3000 eV)

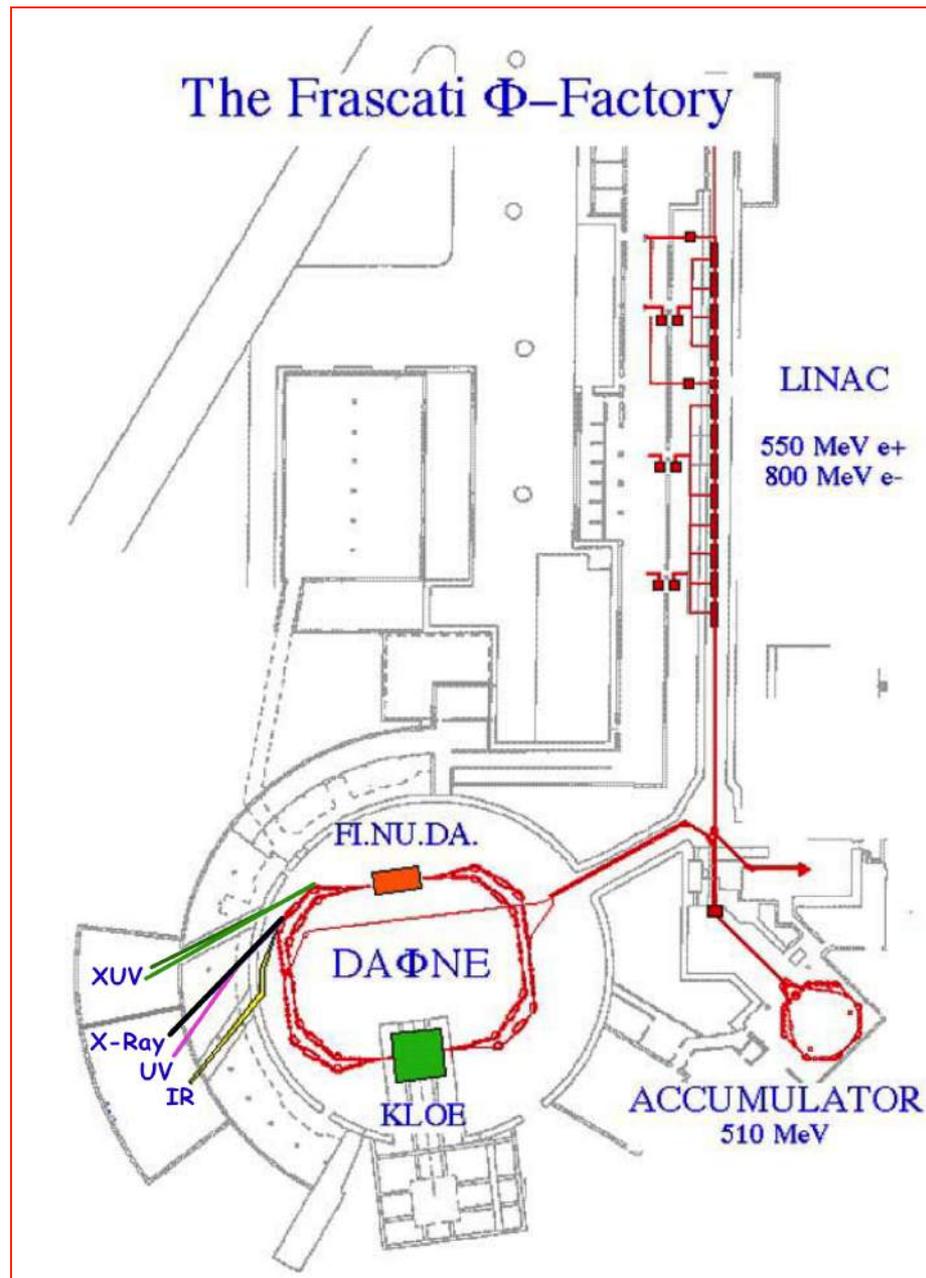
Aperte ad utenti interni ed esterni

3) **DXR2 - UV-VIS beamline** (2-10eV)
nuovo setup.

XUV beamlines

4) **Low Energy Beamline** (35-200 eV)
pronta per il commissioning;

5) **High Energy Beamline** (60-1000eV)
pronta per il commissioning.



Raggi X

Interazione raggi X-materia

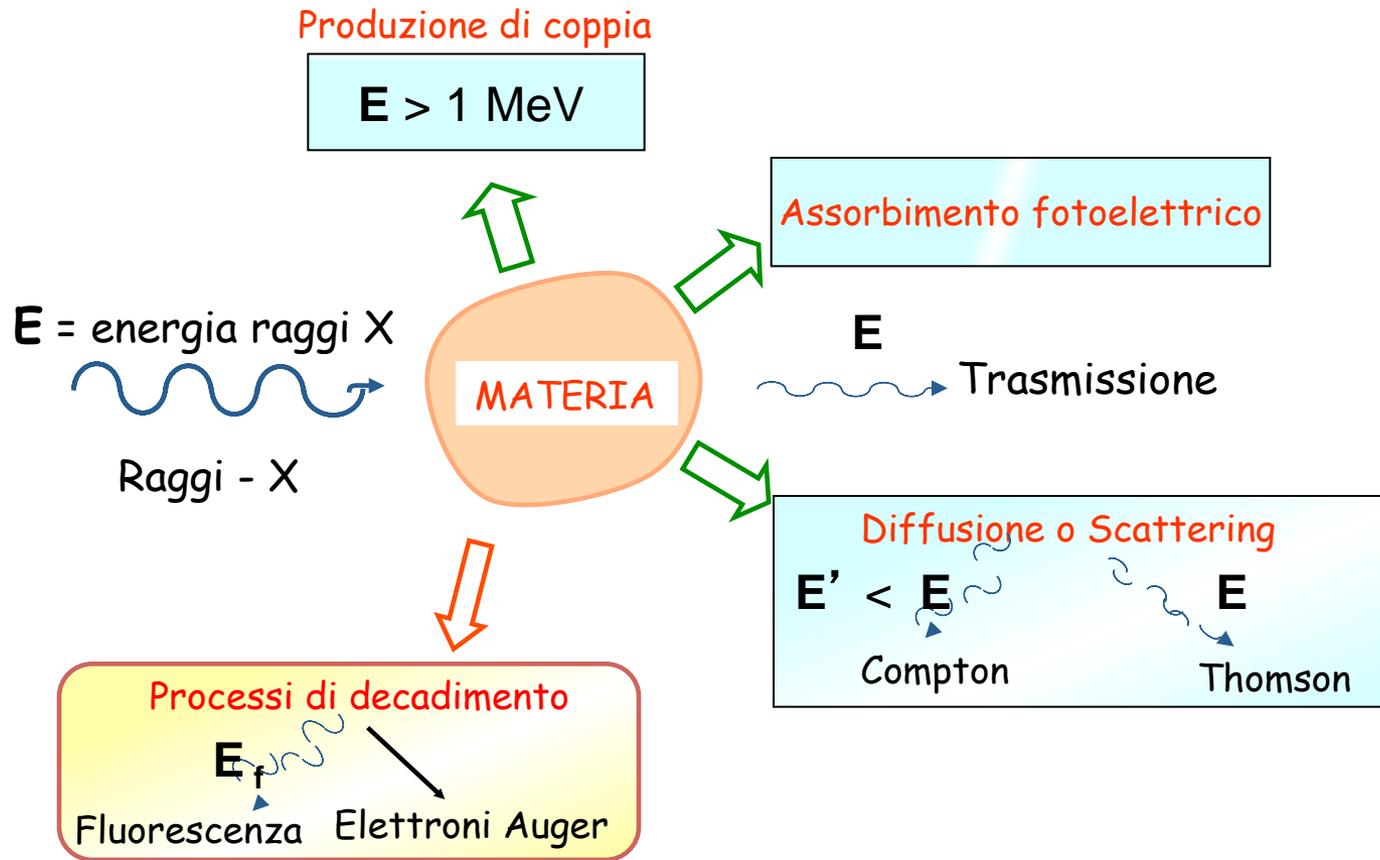
Interazione radiazione-materia

Onde elettromagnetiche di *diversa frequenza*, manifestano *interazioni con la materia profondamente diverse*.

La materia e' composta di *atomi di vario tipo*. Gli *atomi a loro volta sono composti da nuclei* di *protoni* (cariche elettriche positive) e *neutroni* (particelle prive di carica elettrica) e dagli *elettroni*.

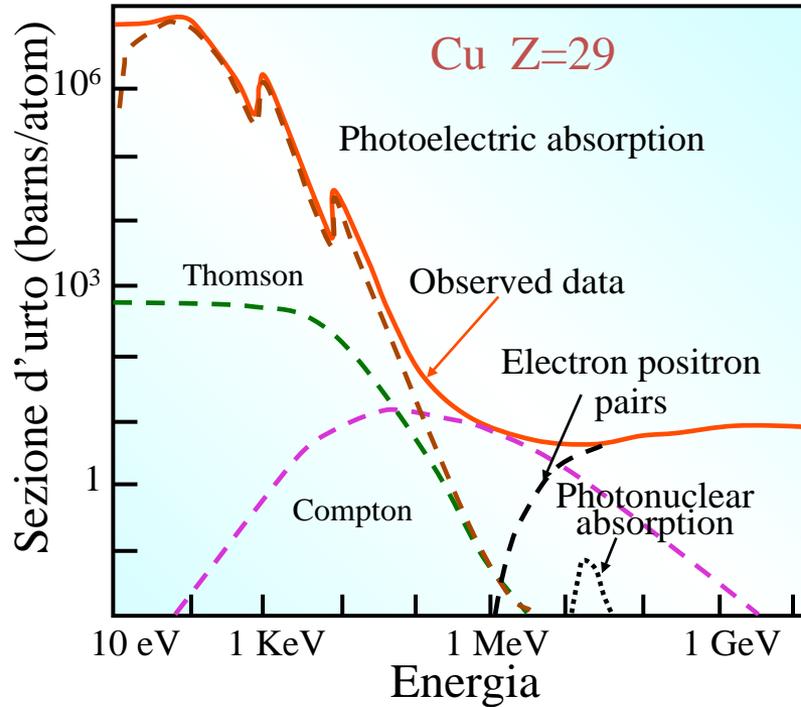
Vediamo come funziona l'interazione dei *raggi X con la materia*.

Interazione Raggi X - Materia



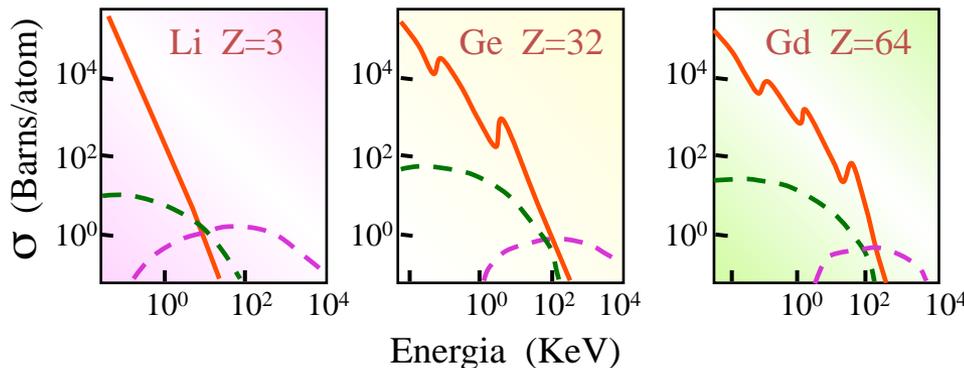
Nell'interazione fra raggi X e materia si possono *verificare diversi processi*: l'*effetto fotoelettrico*, la *diffusione elastica* (Thomson), la *diffusione anelastica* (Compton) e la *creazione di coppie elettrone-positrone*.

Sezioni d'urto - σ

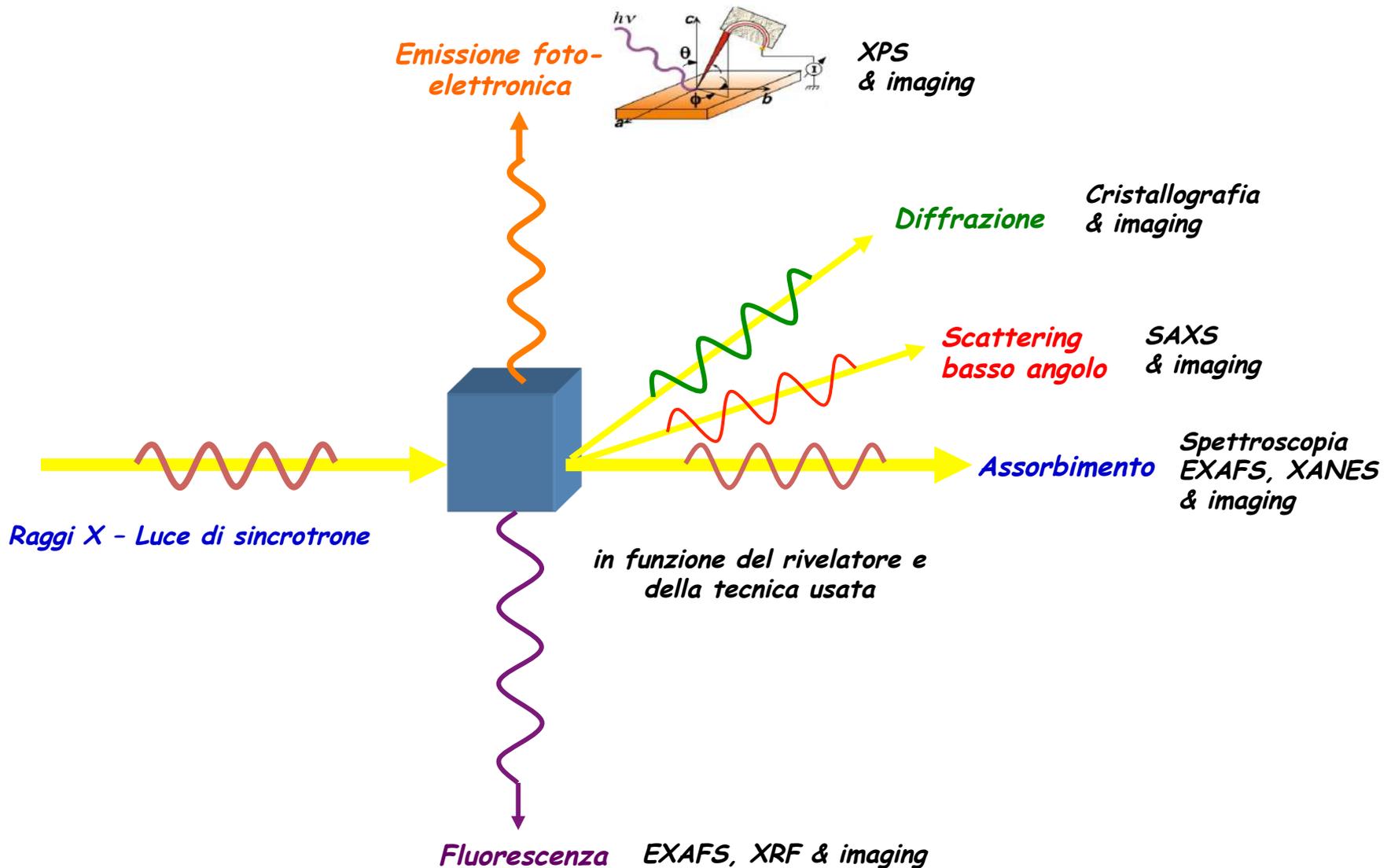


La sezione d'urto σ misura la **probabilità** che si verifichi un certo processo d'interazione.

σ e' funzione dell'energia e nel intervallo delle energie dei raggi X il processo dominante e' quello fotoelettrico.

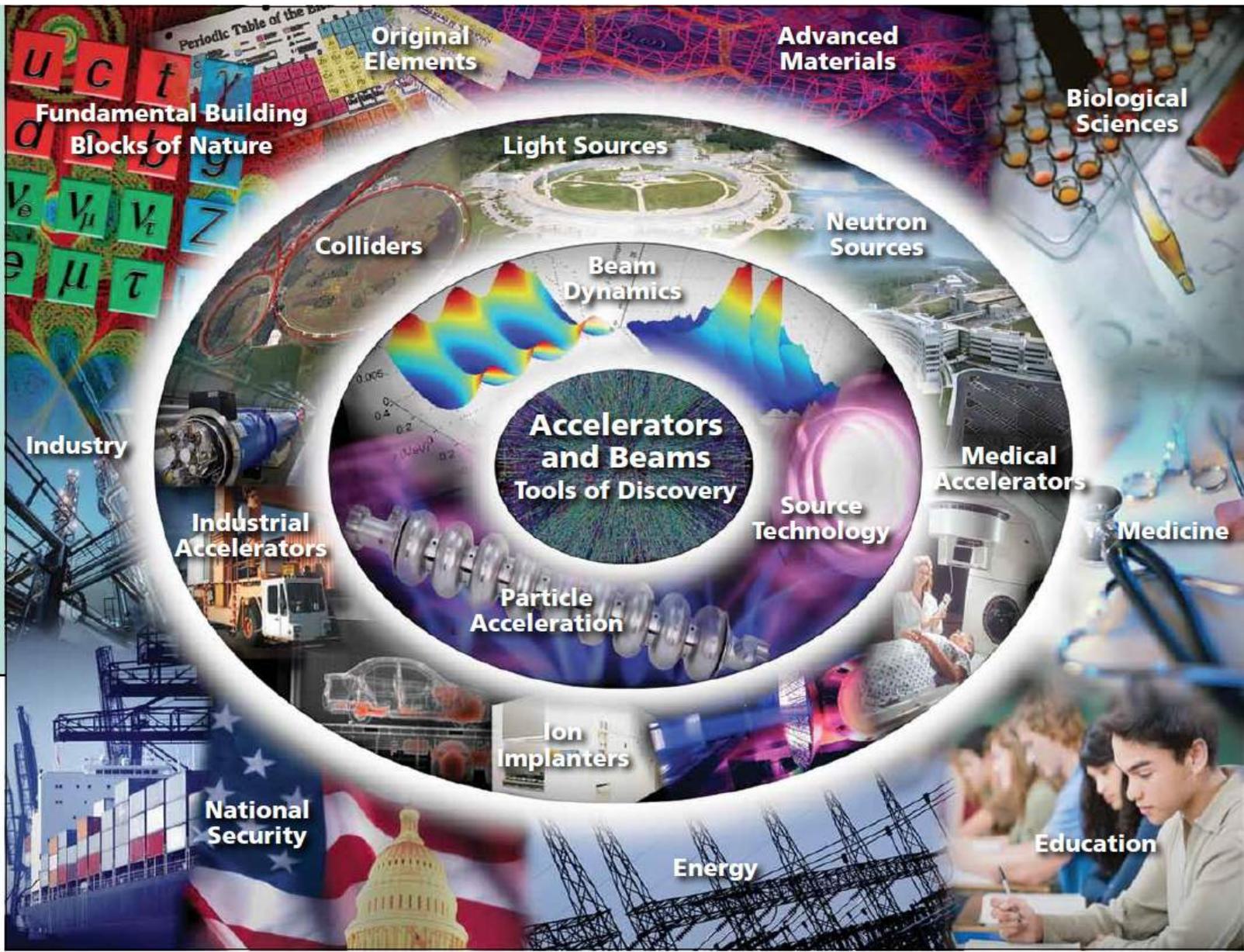


Interazioni e tecniche spettroscopiche



*Dagli acceleratori alle
applicazioni*

COURTESY OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY.



Alcune applicazioni di rilievo usando raggi X (luce di sincrotrone)

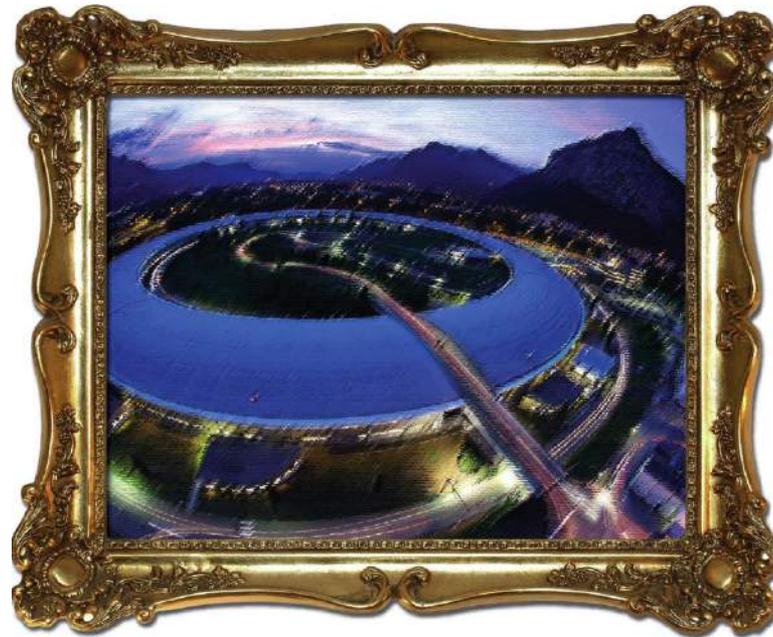
Beni culturali

Imaging

Bio-Cristallografia



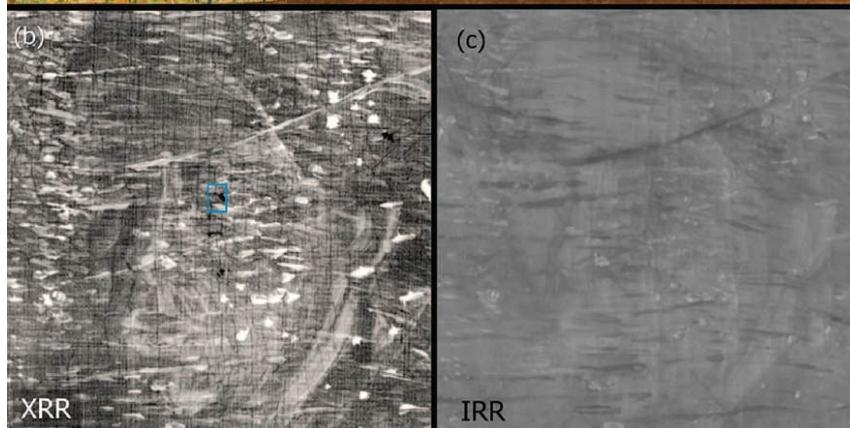
Raggi X: applicazioni nel campo dei beni culturali



Raggi X e Vincent van Gogh



Vincent van Gogh, Patch of Grass, Paris 1887, Kroller-Muller Museum, Otterlo, The Netherlands, (KM 105.264; F583/JH1263).

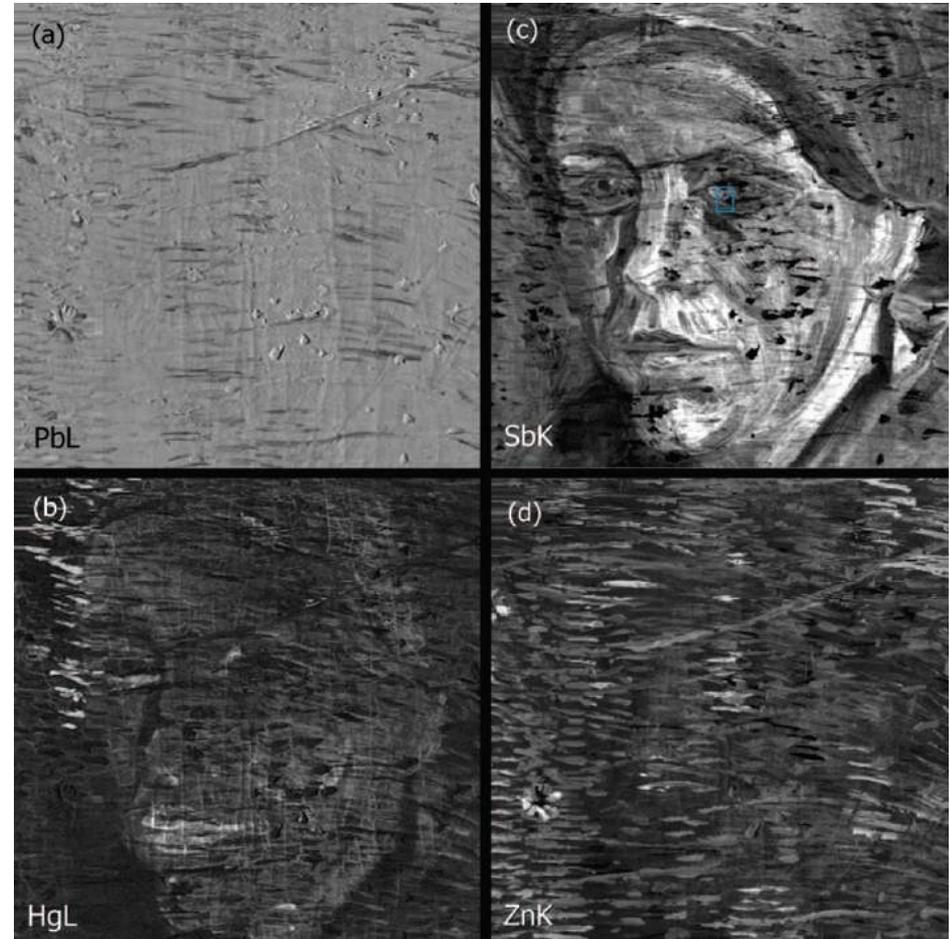
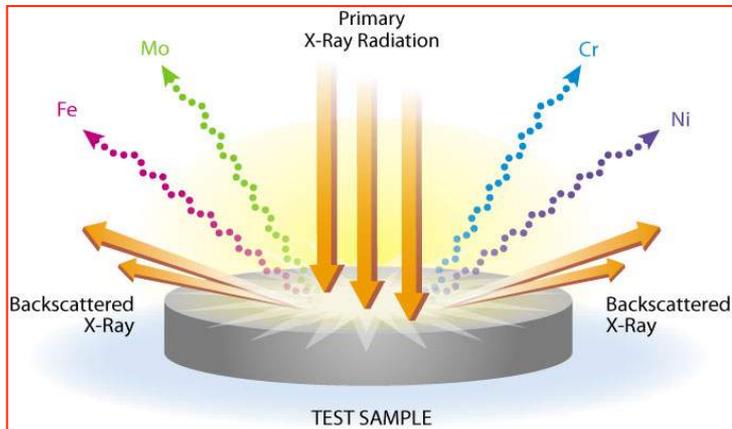
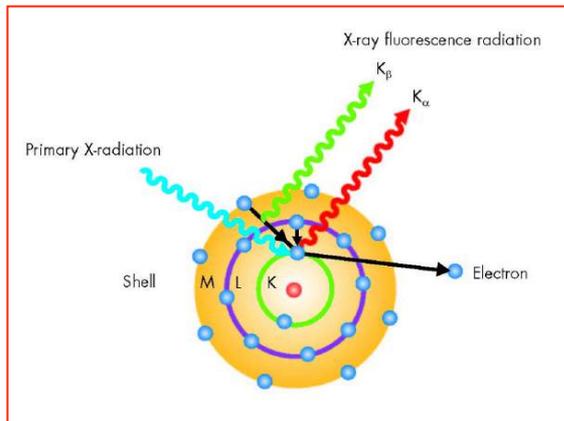


Radiografia X in trasmissione

Riflettografia infrarossa (IR)

Raggi X, fluorescenza e Vincent van Gogh

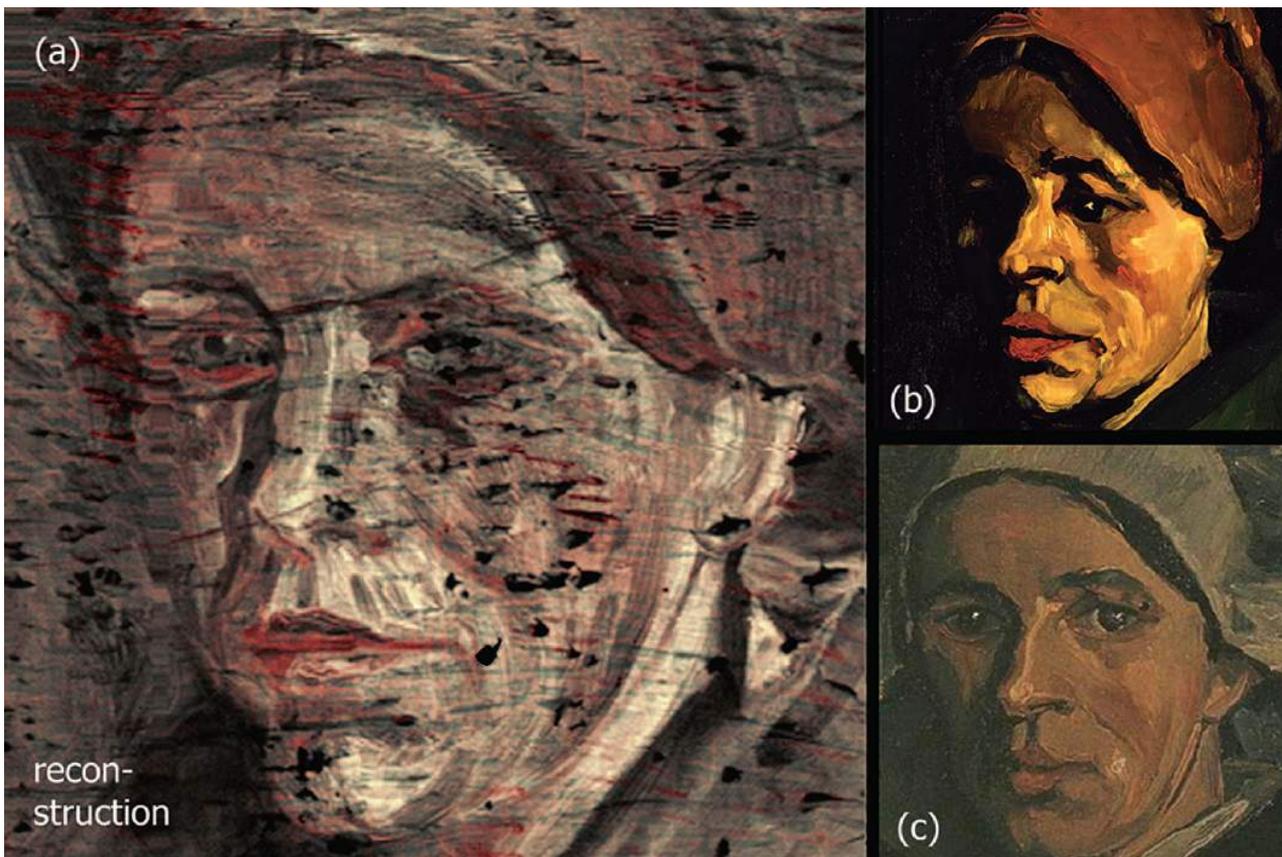
La spettroscopia legata alla fluorescenza-X è uno strumento che consente di determinare qualitativamente e quantitativamente e in modo non distruttivo, la composizione chimica di un campione, attraverso l'analisi delle radiazioni X caratteristiche emesse. La radiazione proveniente dal campione viene rivelata in funzione della sua energia da rivelatori a stato solido.



Radiazione di sincrotrone - XRF: nero bassa intensità - bianco alta intensità.

J. Dik et al., Visualization of a Lost Painting by Vincent van Gogh Using Synchrotron Radiation Based X-ray Fluorescence Elemental Mapping, Anal. Chem. 2008, 80, 6436

Raggi X e Vincent van Gogh



a) Ricostruzione Sb (bianco giallastro) e Hg (rosso vermiglio) (b) Dettaglio da Vincent van Gogh, Head of a Woman, Nuenen 1884-85, Kro Iler-Muller Museum, Otterlo (KM 105.591;F154/JH608). (c) Dettaglio da Vincent van Gogh, Head of a Woman, Nuenen 1884-85, Van Gogh Museum, Amsterdam (F156/JH569). Elementi da pigmenti di vernice specifici hanno permesso di ottenere una 'foto a colori' del lavoro nascosto.

Vincent van Gogh (1853-1890), is best known for his vivid colors and his short but highly productive career. His productivity is even higher than generally realized, as many of his known paintings cover a previous composition. *Van Gogh avrebbe spesso riutilizzare la tela di un dipinto abbandonata per dipingere una nuova composizione. Questi dipinti nascosti offrono una visione unica e intima nella genesi delle sue opere.*

Raggi X e Rembrandt



Foto- Credit: Andrea Sartorius, © J. Paul Getty Trust



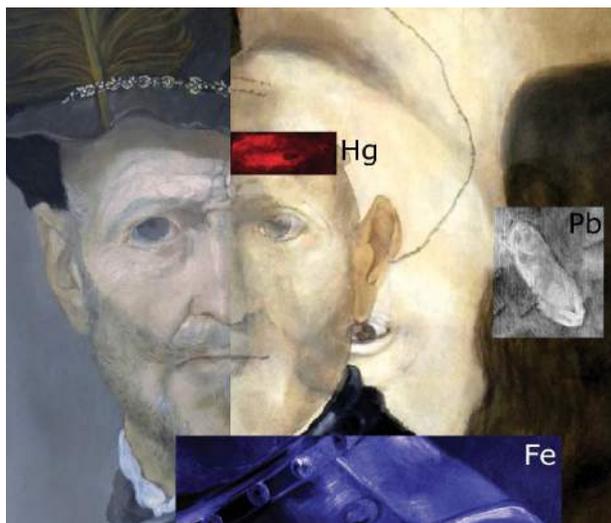
Foto- Credit: Andrea Sartorius, © J. Paul Getty Trust

Attraverso un'analisi macro-XRF con raggi X (NSLS, DESY) è stato scoperto il ritratto di una donna sotto il quadro l'Uomo Anziano in Costume Militare di Rembrandt opera della collezione del Museo J. Paul Getty di Los Angeles.

M. Alfeld et al. Revealing hidden paint layers in oil paintings by means of scanning macro-XRF: a mock-up study based on Rembrandt's "An old man in military costume", J. Anal. At. Spectrom., 2013, 28, 40

Raggi X e Rembrandt

In precedenza erano state usate tecniche a infrarossi e raggi X, non sufficienti per individuare l'immagine sottostante, questo perché pare che Rembrandt abbia usato gli stessi pigmenti per realizzare sia il dipinto nascosto che quello visibile.



(b) Radiografia convenzionale con raggi X- (d) Riflettografia infrarossa

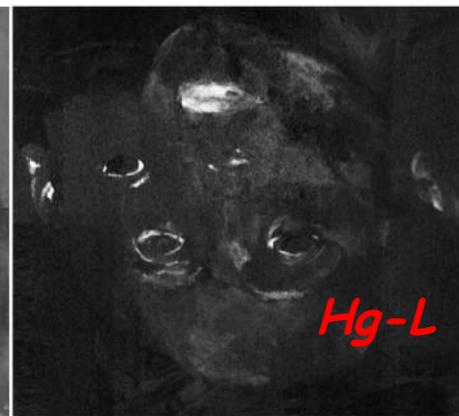


Foto- Credit: Andrea Sartorius

M. Alfeld et al. Revealing hidden paint layers in oil paintings by means of scanning macro-XRF: a mock-up study based on Rembrandt's "An old man in military costume", *J. Anal. At. Spectrom.*, 2013, 28, 40

Papiri di Ercolano letti senza srotolarli grazie ai raggi X

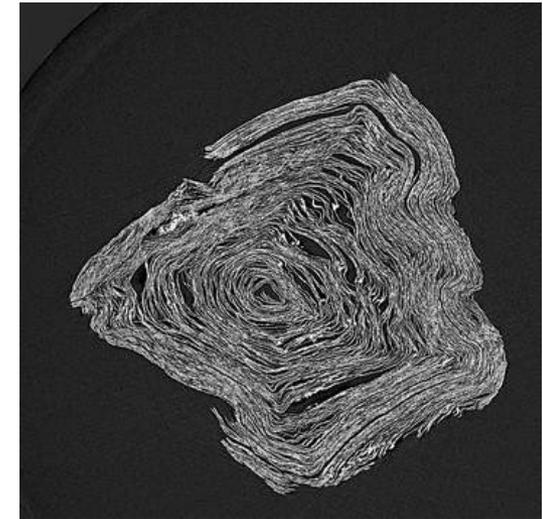


Un particolare ingrandito del papiro decifrato. PHerc.Paris.4. La zona fotografata è di 5cm. (Credit: E. Brun)

I **papiri di Ercolano** 'sopravvissuti' alla **disastrosa eruzione del Vesuvio del 79 d.C.** sono circa **800 rotoli** recuperati durante la campagna di scavi voluta nel **1754 dal re Carlo di Borbone**, all'interno di una villa **sepolta sotto oltre 15 metri di cenere**, da allora chiamata "**Villa dei Papiri**".

La **carbonizzazione** ha reso i **rotoli fragili** e i tentativi di leggerli fatti finora, con l'apertura meccanica, li hanno inevitabilmente rovinati o distrutti.

A **rendere possibile la lettura senza aprire i rotoli** è una tecnica non invasiva, chiamata **tomografia a raggi X a contrasto di fase**, utilizzata presso la struttura Europea di la luce di sincrotrone, **ESRF (European Synchrotron Radiation Facility)**, di Grenoble.



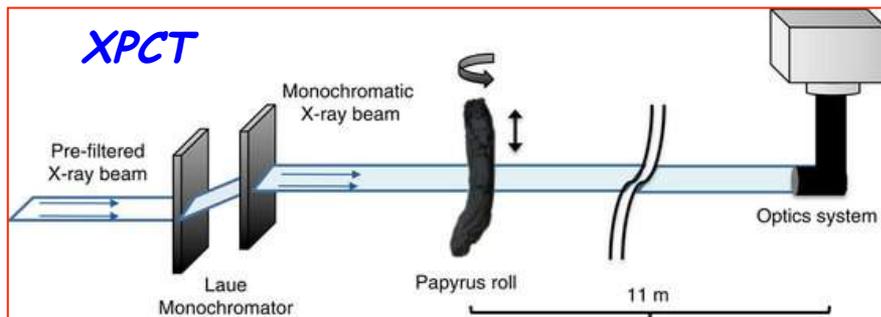
Sezione del papiro. La sequenza di lettere è stata trovata in un frammento di uno strato interno. (Credit: CNRS-IRHT UPR 841 / ESRF / CNR-IMM Unité de Naples)

V. Mocella et al., Nature Communications - DOI: 10.1038/ncomms6895- Gennaio 2015

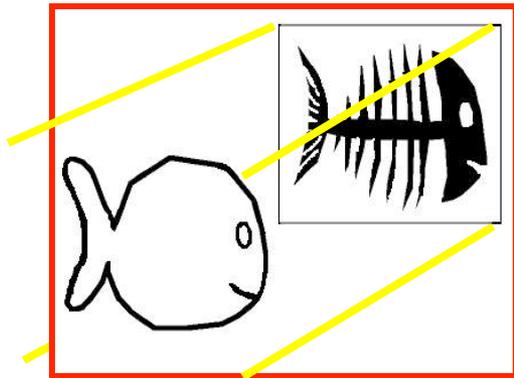
<https://www.youtube.com/watch?v=d3aWBgNYOCU>

Papiri di Ercolano letti senza srotolarli grazie ai raggi X

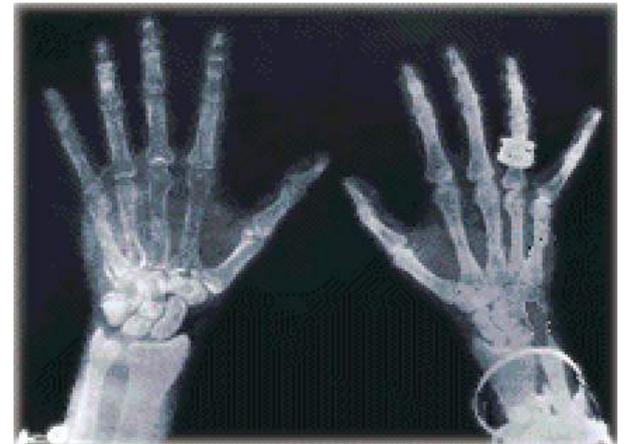
La nuova tecnica, *XPCT (X-ray Phase Contrast Tomography)* è simile a una TAC medica e permette di *distinguere tra materiali che hanno limitato contrasto tra loro, come i papiri carbonizzati e l'inchiostro nero*. Applicata a due papiri arrotolati, ha *prodotto delle immagini tridimensionale*, nella *quali alcune lettere del testo spiccavano sulle fibre carbonizzate del papiro* grazie allo spessore (pochi micron) dell'inchiostro a base di nerofumo utilizzato dall'antico amanuense. Si tratta di due brevissime frasi (*24 lettere in tutto*) scritte in greco, la lingua in cui, anche nel mondo romano, venivano scritte le opere filosofiche.



Un prospetto *dell'alfabeto di lettere greche* scovate dagli studiosi nella *parte interna* di un papiro carbonizzato (*PHerc.Paris.4*), dove le diverse spire erano più separate, viene *riportato sulle prime due righe*, mentre *sulla terza* viene riportata l'immagine IR delle *stesse lettere ottenute invece da un papiro che è stato srotolato (PHerc. 1471)* e usato come riferimento.

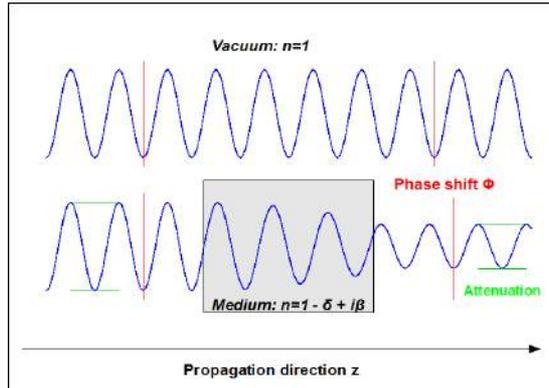


Raggi X e imaging



Imaging biomedico

Con i termini radiologia o imaging biomedico o diagnostica per immagini ci si riferisce a una branca della medicina che si occupa di fornire immagini dell'interno del corpo umano, allo scopo di fornire informazioni utili alla diagnosi.

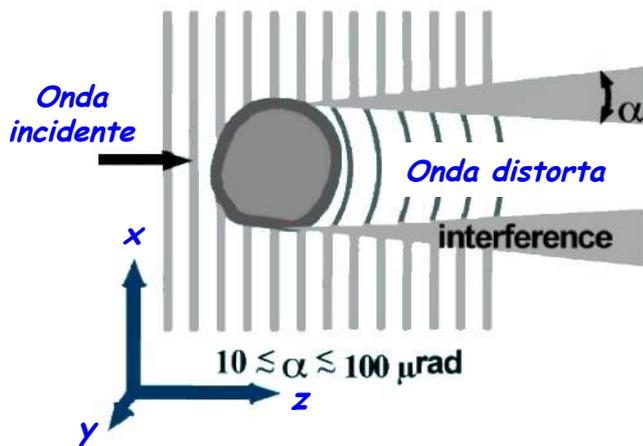


Indice di rifrazione

$$n = 1 - \delta + i\beta$$

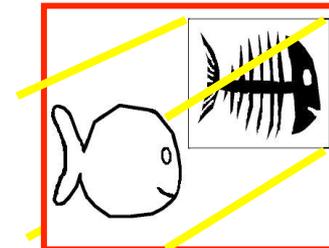
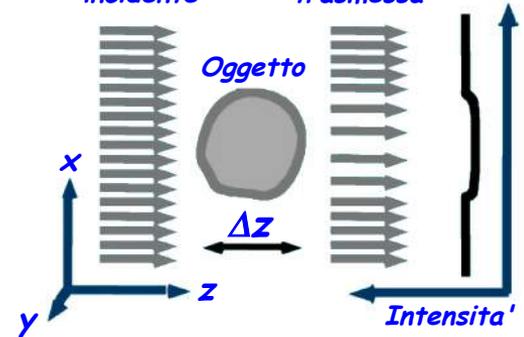
Imaging a contrasto di fase

Imaging in assorbimento



Onda incidente

Onda trasmessa

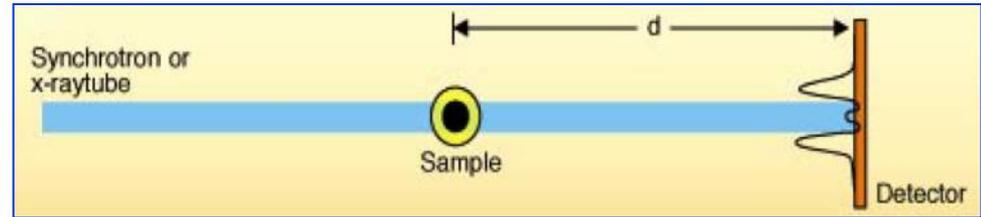


Radiografia a contrasto di fase

Vantaggi con la luce di sincrotrone:

Alta intensità ed ampio spettro implica la possibilità di selezionare l'energia ottimale per la specifica applicazione e quindi ridurre le dosi;

*Piccole divergenze e dimensioni della sorgente oltre alla grande distanza sorgente-campione garantiscono: **coerenza spaziale**, la possibilità di utilizzare tecniche di imaging sensibili alla fase .*



*Nelle radiografie convenzionali si misurano solo variazioni dell'ampiezza del fascio X trasmesso quindi c'è poco contrasto in presenza di materiali che assorbono poco; nella radiografia a contrasto di fase si sfrutta la **coerenza spaziale** si registrano variazioni di fase tra il fascio X incidente e quello diffratto dal campione ed è fondamentale che la distanza campione rivelatore **d** sia grande.*

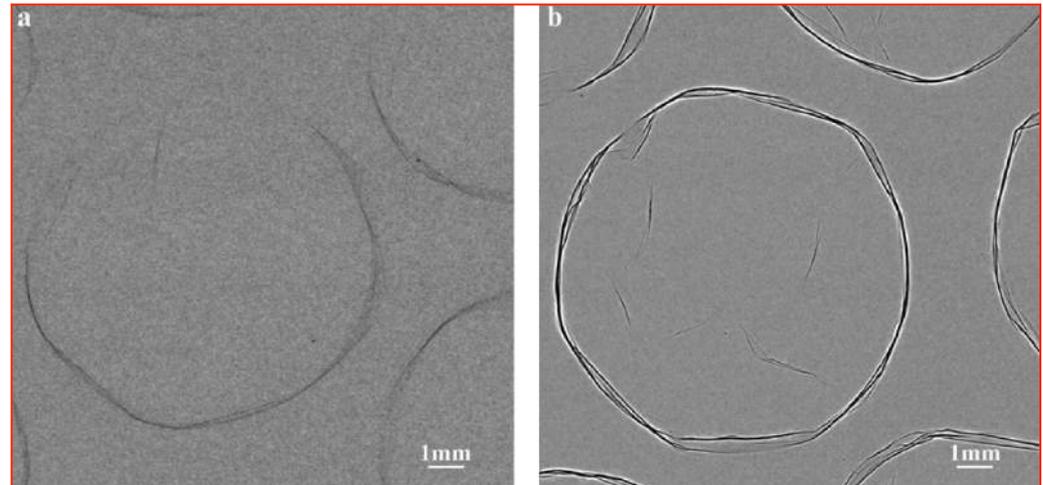
Indice di rifrazione $n = 1 - \delta + i\beta$

Per campioni biologici 'soft' nell'intervallo di energia del fotone 15 -25 KeV

$$\delta \sim 10^{-6}; \beta \sim 10^{-10}$$

effetti di fase (rifrazione) >> effetti di assorbimento

Immagini di un involucro di nylon da imballaggio con bolle d'aria, usando: a) sistema di imaging a raggi X convenzionale (assorbimento) e b) PB-PCI (propagation-based phase-contrast imaging). L'esaltazione dei contorni in b) permette di visualizzare dettagli non visibili in a).



Luce di sincrotrone, raggi X e imaging

*Obiettivo della moderna radiologia e' quello di **migliorare i metodi radiografici** includendo la rivelazione di elementi di basso contrasto e di piccole dimensioni cosa resa possibile anche dalle nuove tecniche messe a punto usando la luce di sincrotrone*



*Radiografia convenzionale
in assorbimento*



*Radiografia a contrasto di
fase*



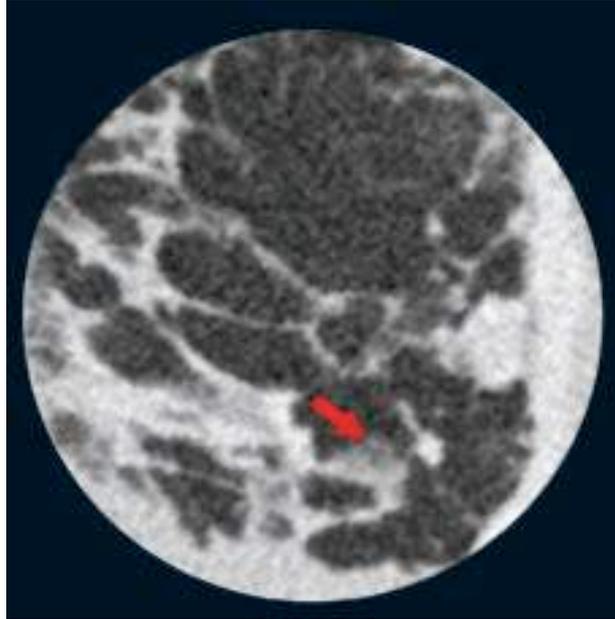
*Radiografia a contrasto di
fase amplificata dalla
diffrazione*

Analyzer Based Imaging (ABI) o radiografia con cristallo analizzatore

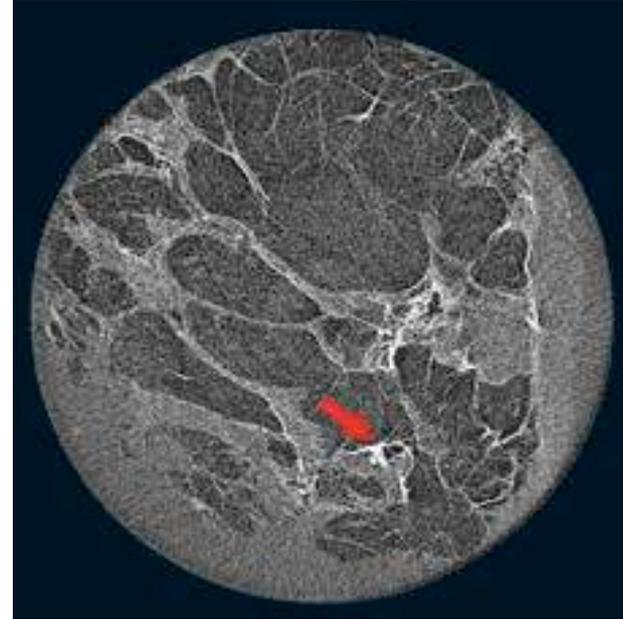


R. Fitzgerald, Physics Today 53, 23 (2000)

Luce di sincrotrone e medicina



*Esame senologico - TC Tomografia computerizzata
convenzionale produce immagine 3D*



*Esame senologico -ABI Analyser Based x-ray
Imaging, 3D, risoluzione 7 volte migliore.*

La tecnica ABI (**Analyzer Based Imaging**), usando una dose simile a quella di esame mammografico, che corrisponde ad 1/4 di quella necessaria per fare una Tomografia Computerizzata convenzionale, garantisce risoluzioni molto migliori. Si possono chiaramente osservare delle micro calcificazioni-piccoli depositi di minerali- che possono indicare la presenza di tumori e se ne possono definire in modo più accurato forma e margini.

A. Bravin - E.S.R.F. Grenoble

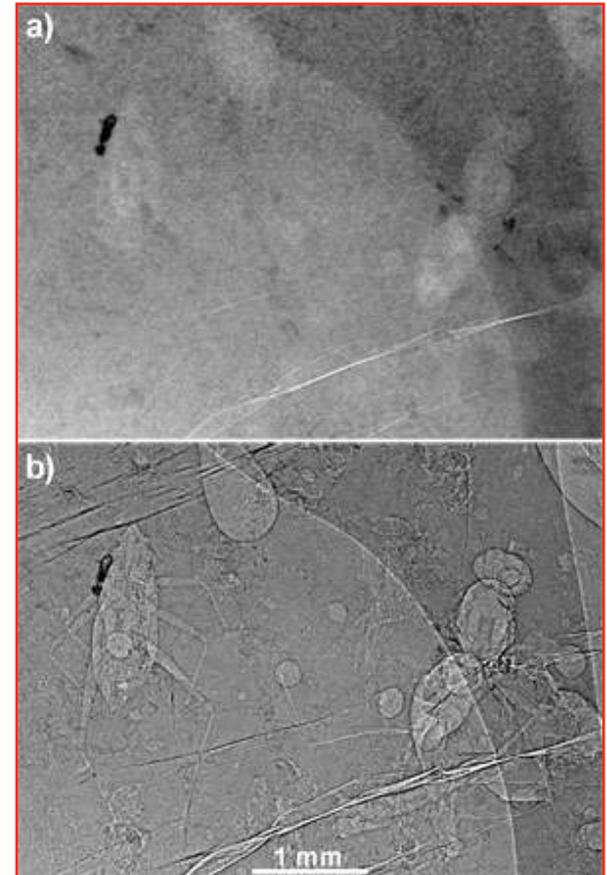
Imaging e paleobiologia

Paleontologi dell' Università di Renne in Francia e ricercatori che lavorano presso la facility di luce di sincrotrone ESRF a Grenoble hanno scoperto la presenza di 356 animalletti, inclusi in un pezzo (2 kg) di resina fossile di albero, completamente opaco, di **100 milioni di anni fa** (periodo medio-Cretaceo)



Ambra fossile opaca

*Imaging e
assorbimento
convenzionale*



*Imaging e
contrasto di
fase*

M. Lak, D. Neraudeau, A. Nel, P. Cloetens, V. Perrichot and P. Tafforeau, Phase Contrast X-ray Synchrotron Imaging: Opening Access to Fossil Inclusions in Opaque Amber, Microscopy and Microanalysis, (2008), 14:251-259

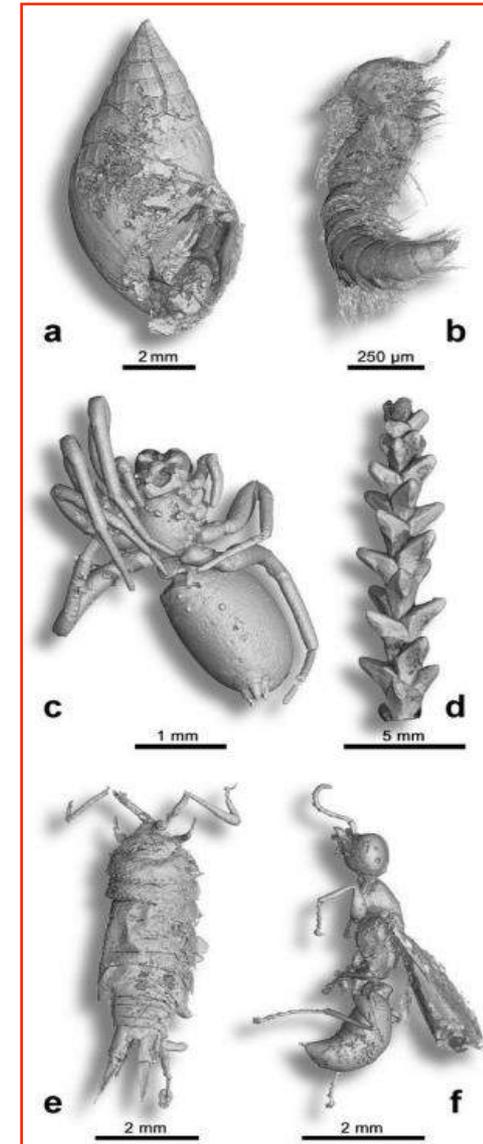
Imaging e paleobiologia

Sempre ad ESRF usando la **microtomografia X** a contrasto di fase e' stato possibile effettuare una visualizzazione 3D dei microorganismi inclusi nel campione di resina fossile.



a) *Gastropod Ellobiidae*; b) *Myriapod Polyxenidae*; c) *Arachnid*; d) *Conifer branch (Glenrosa)*; e) *Isopod crustacean Ligia*; f) *Insect hymenopteran Falciformicidae*.

Scarabeo del Cretaceo



M. Lak, D. Neraudeau, A. Nel, P. Cloetens, V. Perrichot and P. Tafforeau, *Phase Contrast X-ray Synchrotron Imaging: Opening Access to Fossil Inclusions in Opaque Amber, Microscopy and Microanalysis*, (2008)

MILLION YEARS AGO

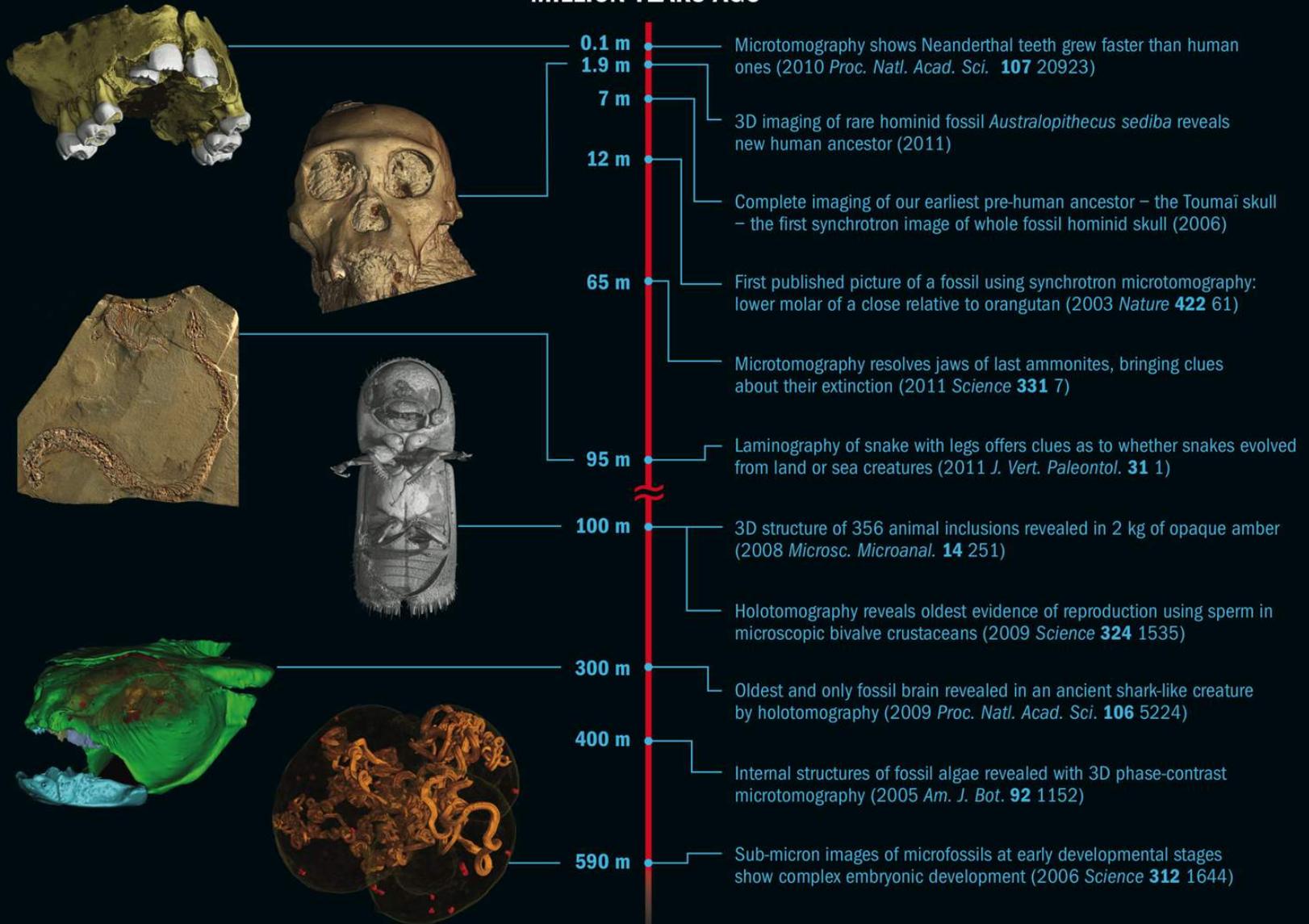
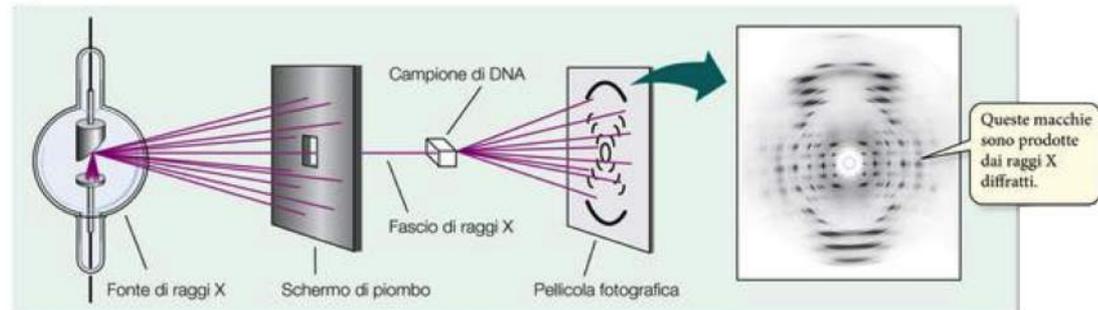


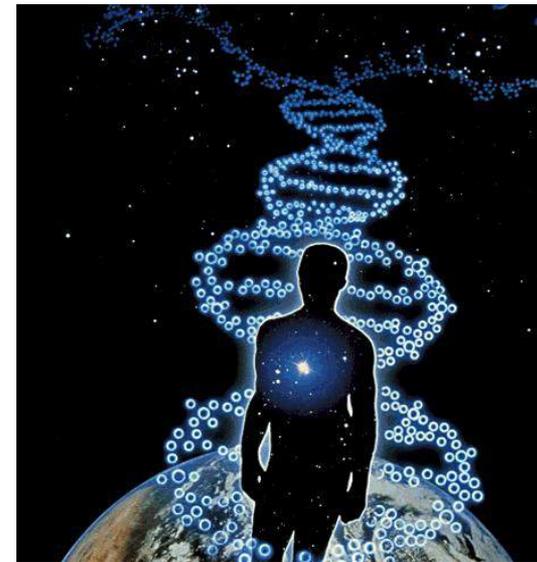
Image credits (top to bottom): Van Gogh Museum, Amsterdam; Mary Rose Trust; Royal Museum of Fine Arts, Antwerp; American Chemical Society; C Reyes-Valerio; D Bagault C2RMF; P Tafforeau, ESRF; P Tafforeau, ESRF; A Houssaye; P Tafforeau, ESRF; A Pradel/CNRS; P Tafforeau, ESRF.



Rosalind Franklin e la struttura del DNA



Raggi X e Cristallografia

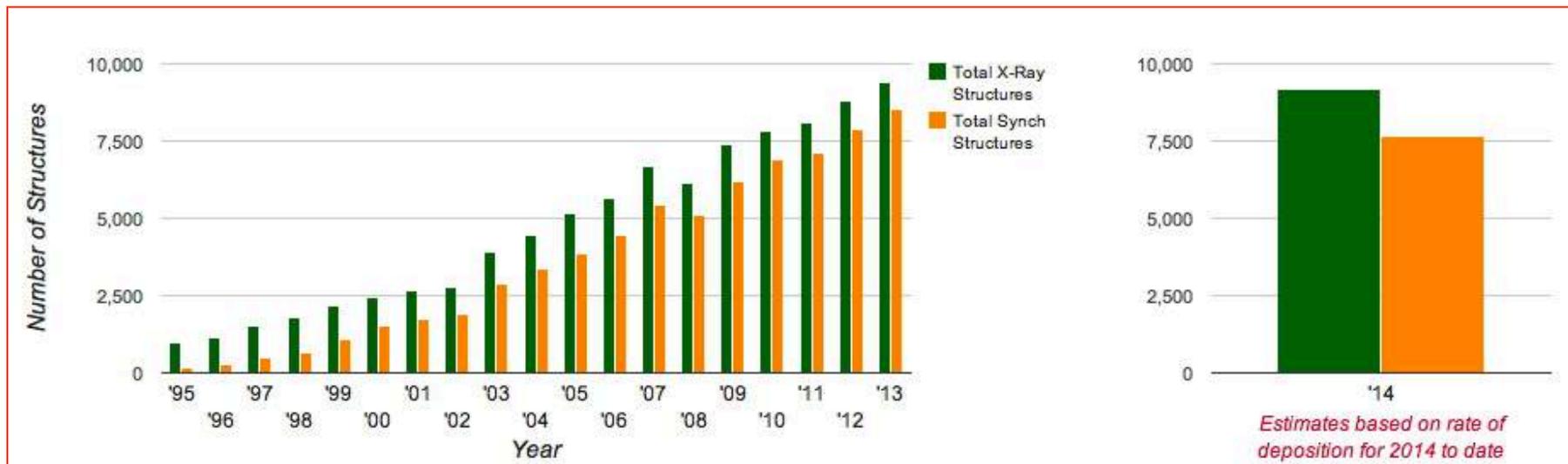


Cristallografia con raggi X



L'Anno Internazionale della Cristallografia ha commemorato il centenario della nascita della cristallografia a raggi X, grazie al lavoro di **Max von Laue** (premio Nobel nel 1914) e **William Henry e William Lawrence Bragg**.

La cristallografia è fondamentale nello studio e sviluppo di **nuovi materiali**, in **mineralogia** e anche nella **ideazione di nuovi farmaci**! Volendo sviluppare un nuovo farmaco per combattere un batterio o un virus specifico si deve prima individuare una molecola in grado di bloccare le proteine (enzimi) che possono danneggiare cellule umane. Conoscendo la struttura della proteina si possono ideare farmaci, che possono legarsi ai siti attivi della proteina e quindi disattivare la funzione proteica dannosa.

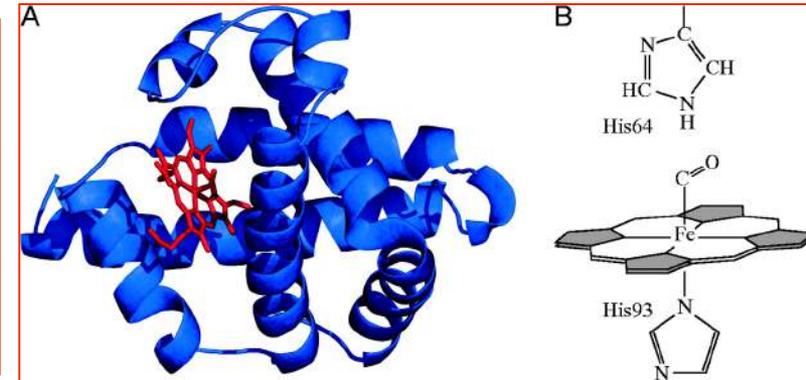
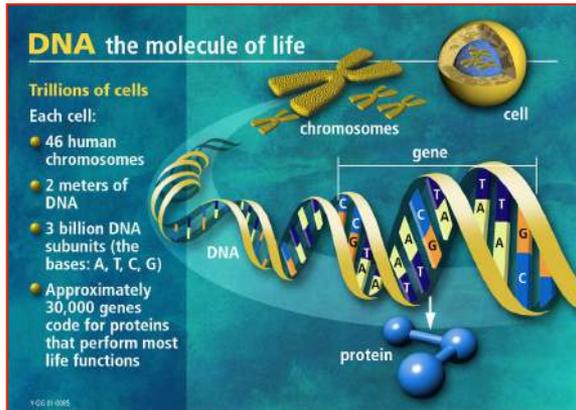


Biocristallografia e passato

DNA the molecule of life

Trillions of cells
Each cell:

- 46 human chromosomes
- 2 meters of DNA
- 3 billion DNA subunits (the bases: A, T, C, G)
- Approximately 30,000 genes code for proteins that perform most life functions



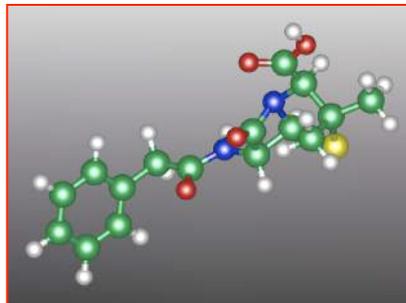
G. A. Ordway and D. J. Garry, J Exp Biol 2004

1962

Nobel Prize in Physiology or Medicine was awarded jointly to **F. H. C. Crick, J. D. Watson and M. H. F. Wilkins** "for their discoveries concerning the molecular structure of nucleic acids and its significance for information transfer in living material".
The first solved protein crystal structure was myoglobin and M. Perutz and Sir J. C. Kendrew, awarded the Nobel Prize in Chemistry for their structural studies on globular proteins (hemoglobin and myoglobin, respectively)

1964

Nobel Prize in Chemistry was awarded to **Dorothy Crowfoot Hodgkin** "for her determinations by X-ray techniques of the structures of important biochemical substances" (penicillin, insulin, vitamin B12).



Penicillina modello
3D - Wikipedia

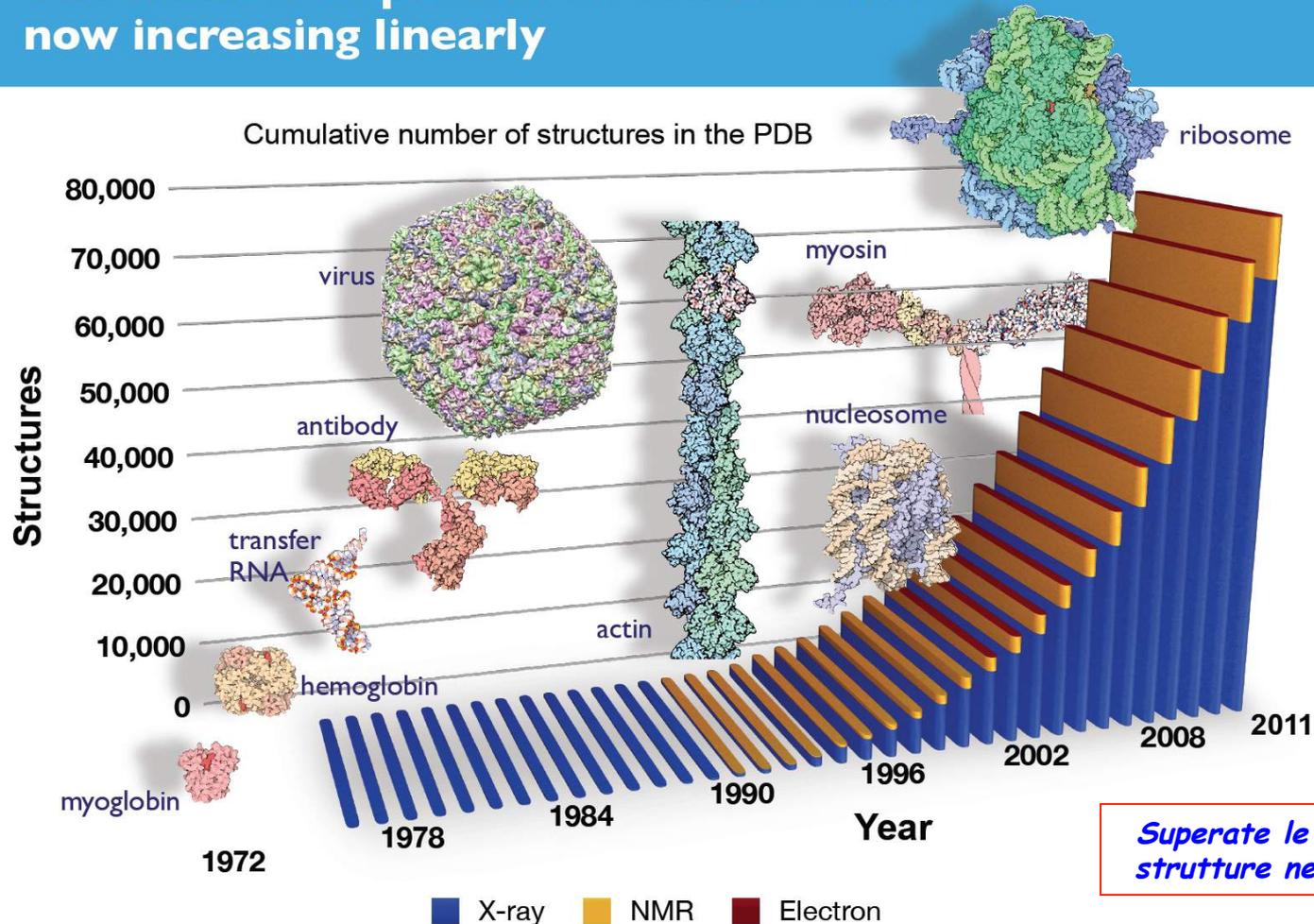


Insulina - Wikipedia



Luce di sincrotrone e progressi nella biologia strutturale

The number of protein structures solved is now increasing linearly



Premi Nobel in Chimica: recenti



2009 "for studies of the structure and function of the ribosome"

Biocrystallography vs. Structural Biology

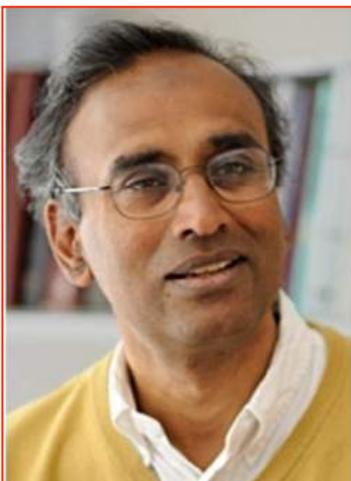


Photo: MRC Laboratory of
Molecular Biology

**Venkatraman
Ramakrishnan**



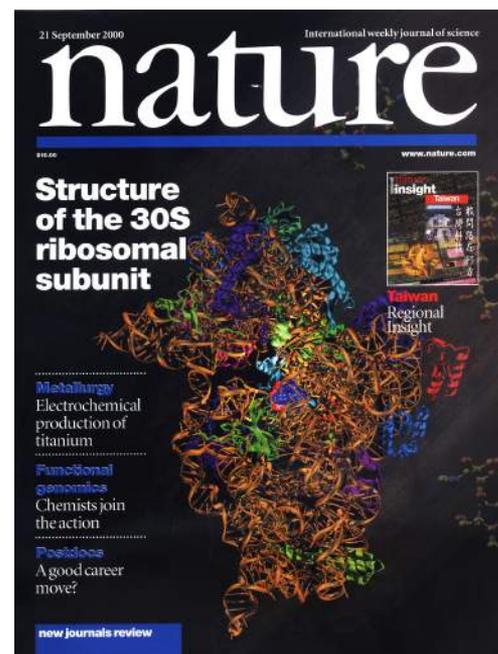
Credits: Michael
Marsland/Yale University

Thomas A. Steitz



Credits: Micheline
Pelletier/Corbis

Ada E. Yonath



Ricerche effettuate con l'uso della luce di sincrotrone

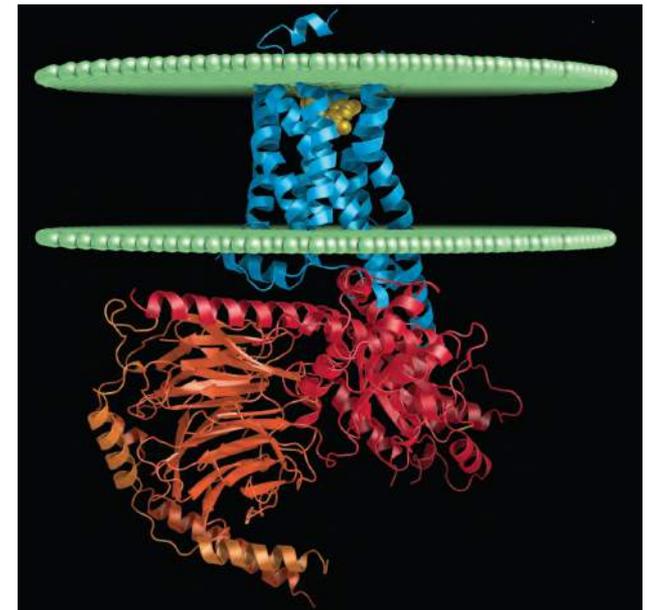
*Premi Nobel più recenti sono stati assegnati a Venkatraman Ramakrishnan, Thomas Steitz e Ada Yonath per aver rivelato i segreti alla base del funzionamento della macchina molecolare, **il ribosoma**, responsabile della sintesi delle proteine, sono tra i composti organici più complessi e sono i costituenti fondamentali di tutte le cellule animali e vegetali e bersaglio ideale per gli antibiotici*

Premi Nobel in Chimica: recenti



2012 "for studies of G-protein-coupled receptors"

Biocrystallography vs. Structural Biology



Ricerche effettuate con l'uso della luce di sincrotrone

G-Protein Coupled Receptor (blue) sits within lipid bilayer (green) to respond to hormone (yellow)- Image by W. Decatur

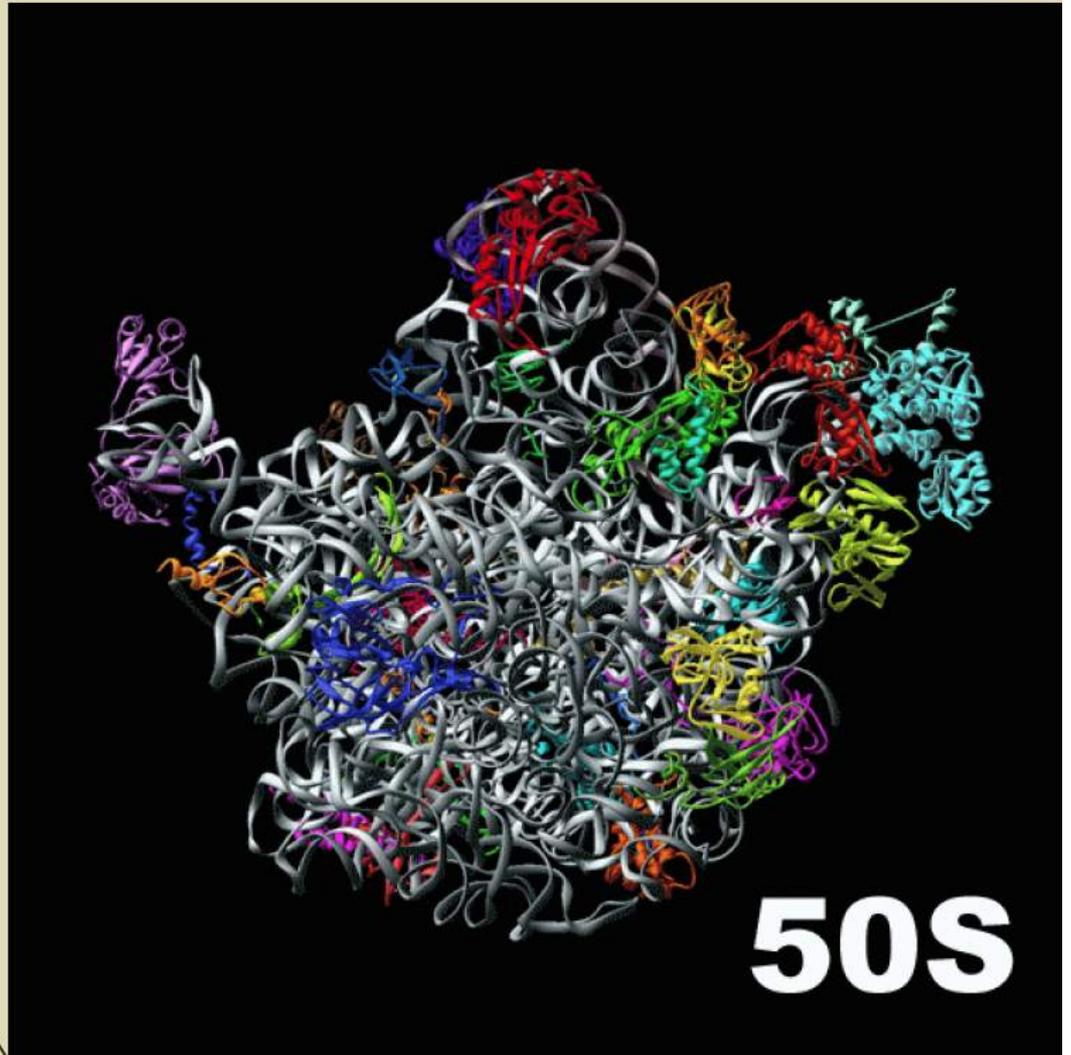
Premi Nobel più recenti sono stati assegnati anche a Robert Lefkowitz e Brian Kobilka per uno studio che ha rivelato in dettaglio il funzionamento di una importante famiglia di recettori cellulari (recettori accoppiati alle proteine G) che governa gran parte delle funzioni del corpo umano. Esistono migliaia di recettori accoppiati a proteine G, ognuno in attesa del suo particolare messaggero. Alcuni riconoscono gli ormoni e regolano il metabolismo. Altri riconoscono i neurotrasmettitori che portano il segnale nervoso da un neurone al successivo. Il nostro senso della vista utilizza un sistema di proteine G sensibile alla luce e il nostro senso dell'odorato utilizza migliaia di recettori, ognuno in grado di riconoscere l'odore di una diversa molecola. Ogni recettore che riceve un segnale è accoppiato ad una particolare proteina G che lo trasmette all'interno della cellula.



Myoglobin
16 kDa

50 YEARS

Peso molecolare:
 $1\text{kDa} = 1000\text{ g mol}^{-1}$



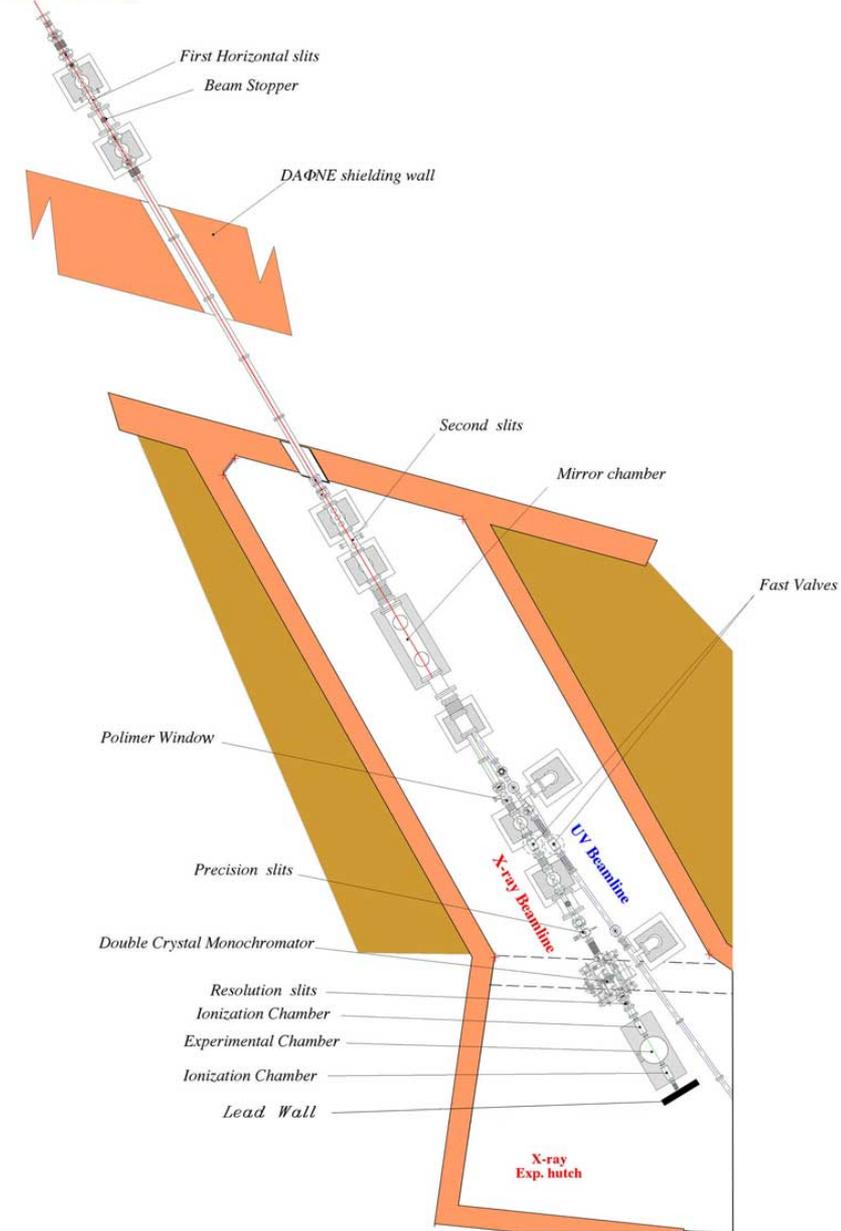
50S

Ribosome 2.5 MDa

Assorbimento di raggi X

- *Linea DXR1 @ DAFNE*
- *Spettroscopia XAFS: XANES e EXAFS*

DAΦNE Ring

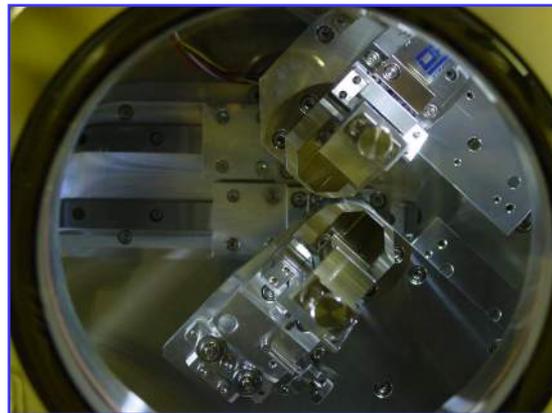
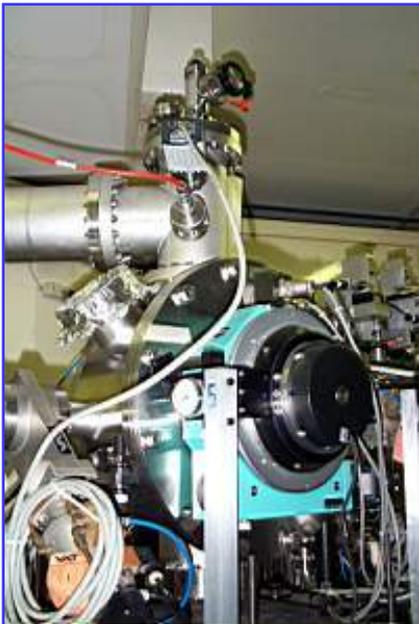


DAΦNE-Luce Linea DXR1 Raggi X molli

*L'intervallo dei raggi X molli
ossia lunghezza
d'onda tra 0.3 nm e 5 nm
riveste una particolare
importanza come strumento di
indagine poiche' **corrisponde
alle dimensioni della
struttura microscopica della
materia** (atomi, molecole e
strutture cristalline).*

Linea DXR1

Poiche' la linea di luce e' collegata all'anello di accumulazione, dove gli elettroni viaggiano in ultra alto vuoto tutti gli *elementi ottici sono inseriti in contenitori compatibili con l'alto vuoto* e tutti i movimenti meccanici sono spesso molto sofisticati proprio per le loro condizioni di funzionamento.

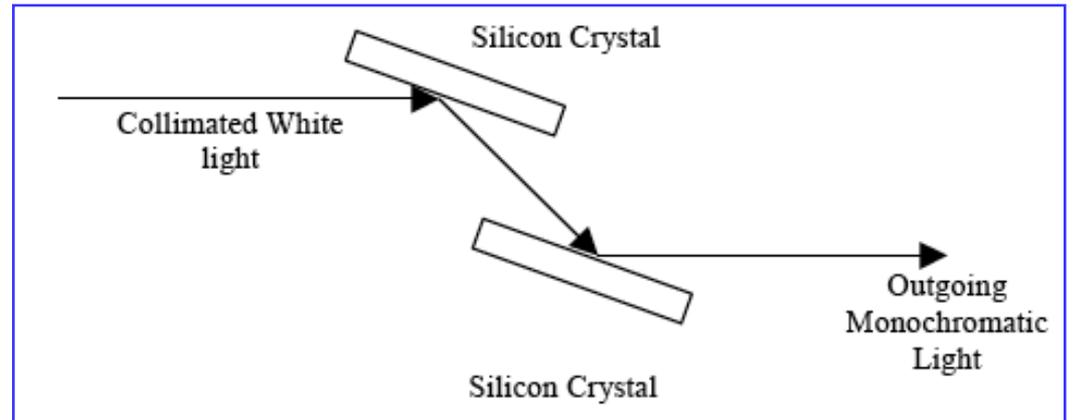


Elemento fondamentale della linea e' il *monocromatore*, cioe' un sistema che permette la selezione delle energie per il particolare esperimento progettato

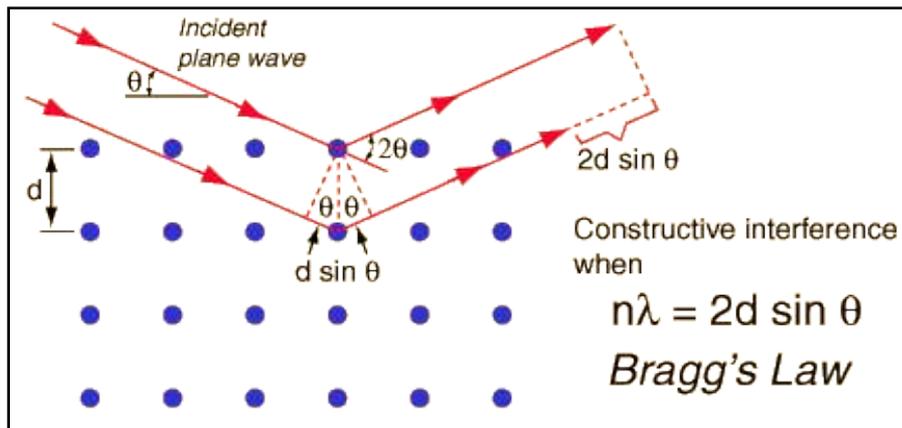
Monocromatore



Luce visibile: prisma

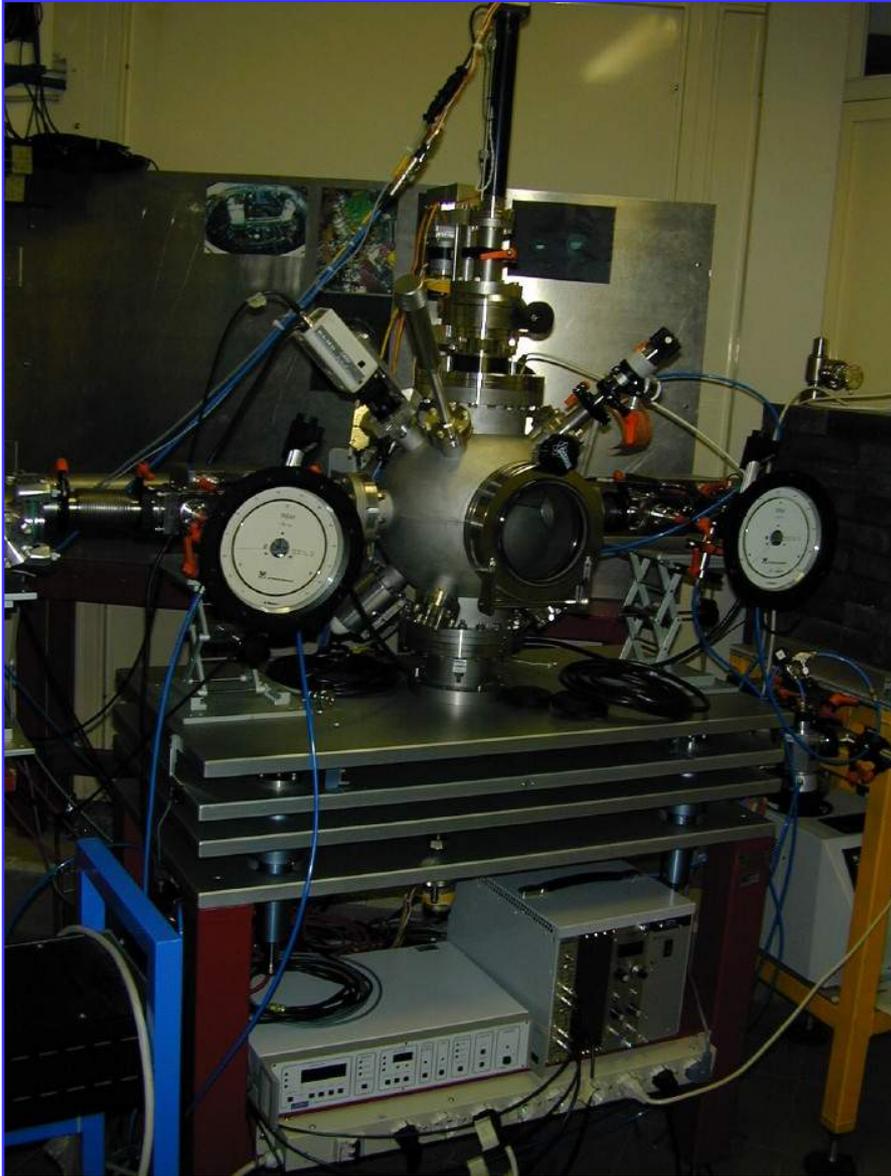


Raggi X: cristalli



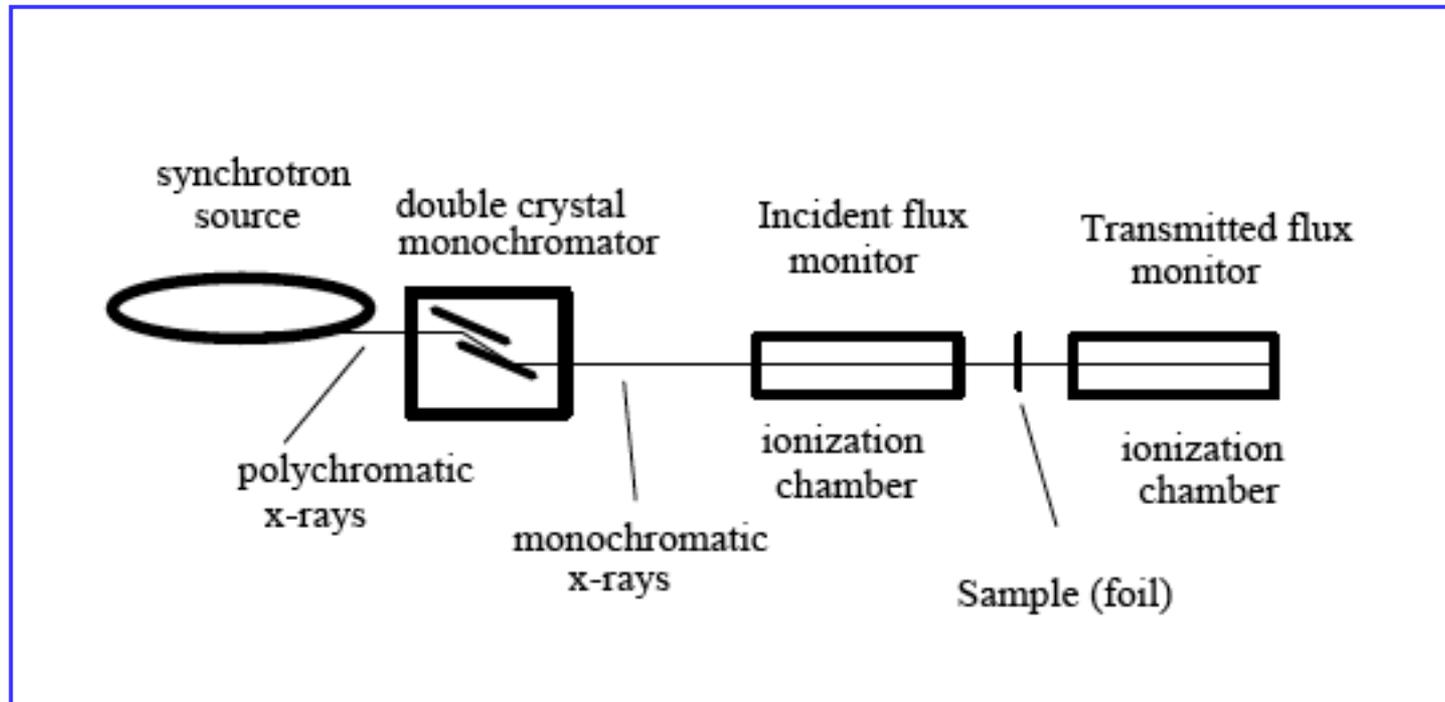
$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \text{Bragg's Law}$$

Linea DXR1



Altri elementi fondamentali sono i *rivelatori* e la *camera* nella quale verranno *inseriti i campioni* da studiare.

Schema della linea DXR1



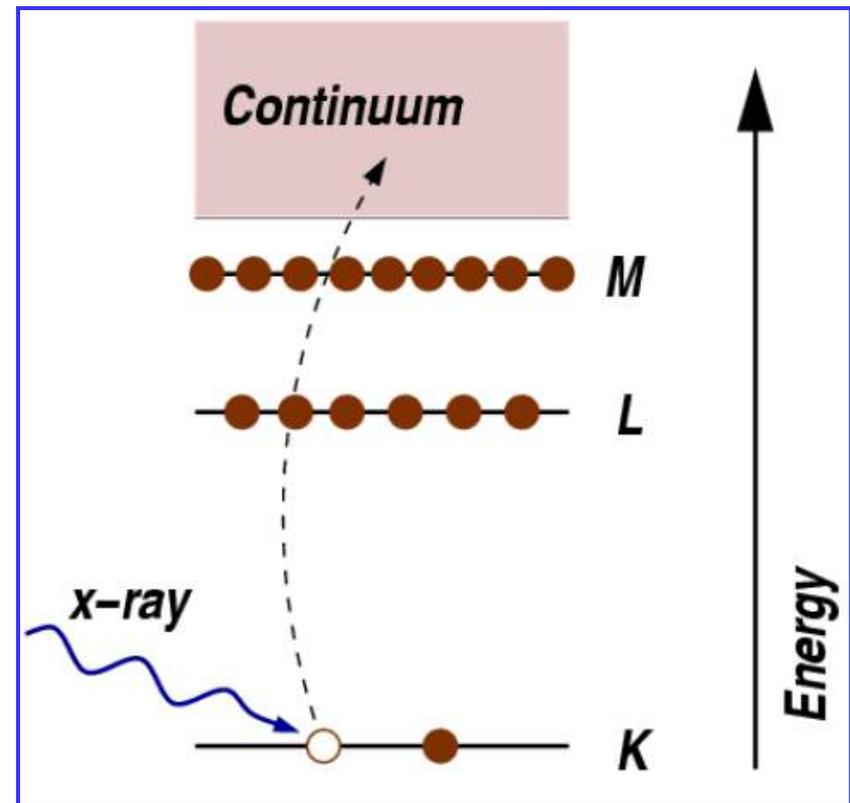
Spettroscopia di assorbimento
XAFS

Assorbimento dei raggi X

Nel processo fotoelettrico i raggi X vengono assorbiti dagli atomi.

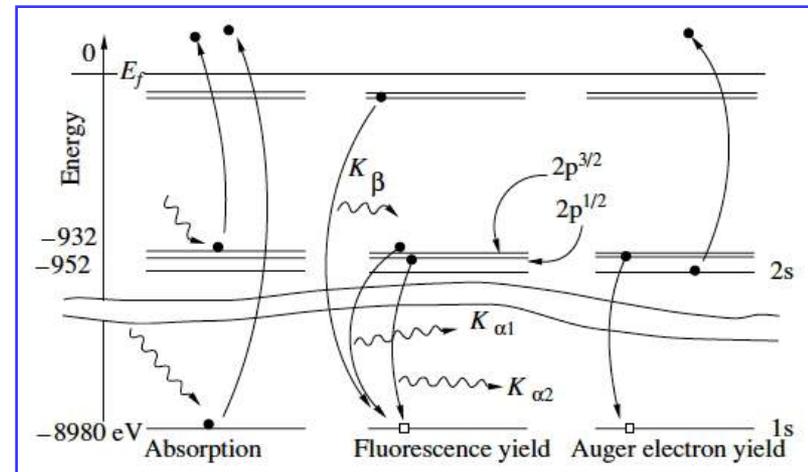
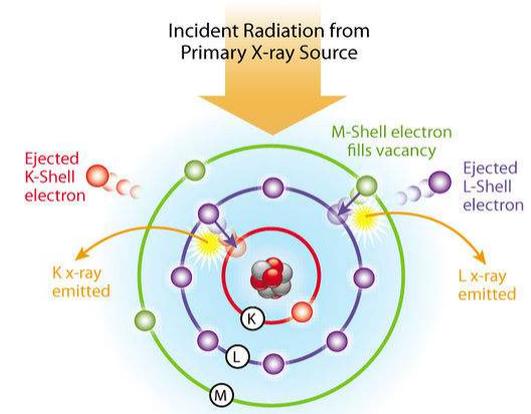
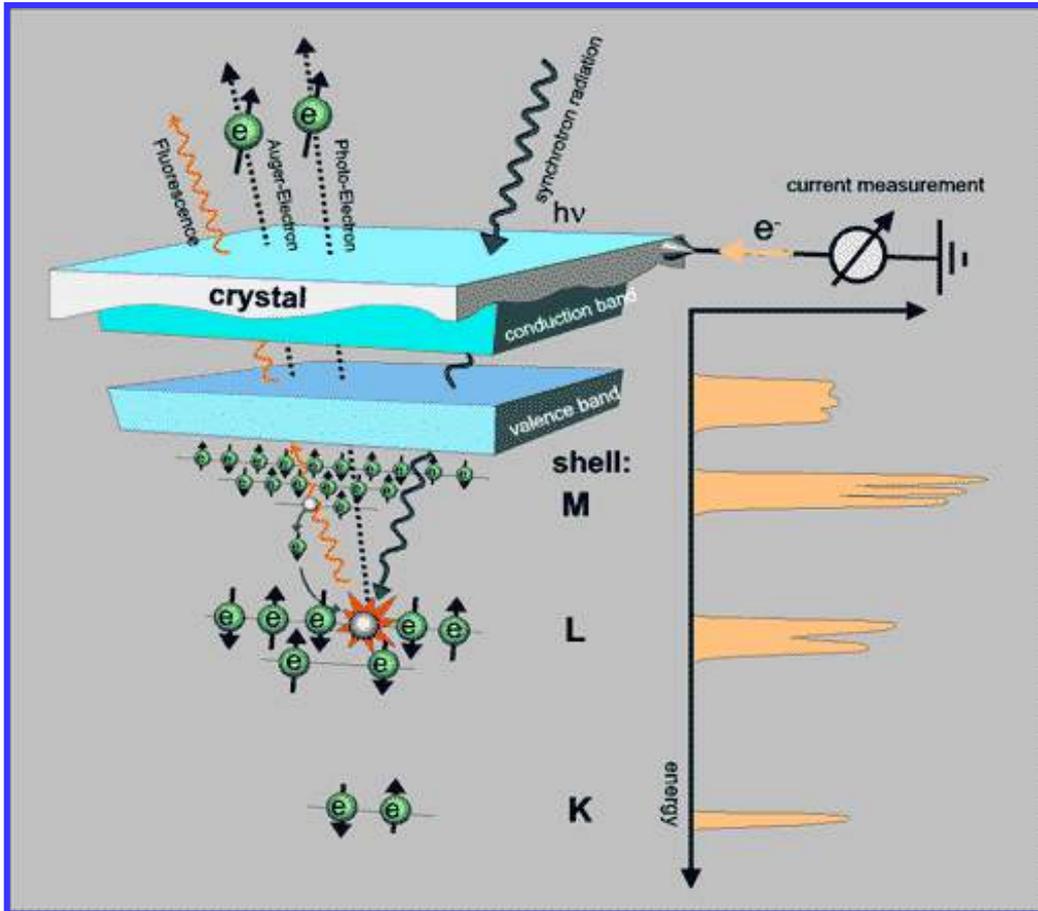
Nell'atomo questo causa la transizione di un elettrone (fotoelettrone) ad uno stato non legato.

Affinche' questo accada l'energia della radiazione incidente E deve essere maggiore all'energia di legame E_0 dell'elettrone.



La differenza $E - E_0$ rappresenta l'energia cinetica del fotoelettrone.

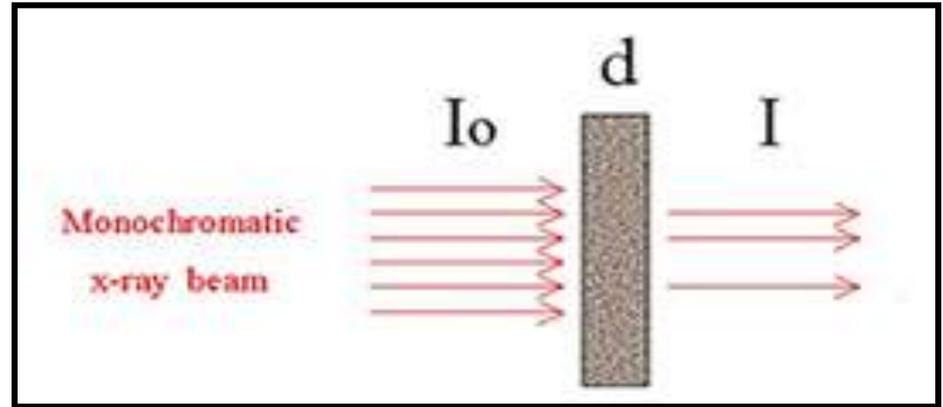
Effetto fotoelettrico



Assorbimento e processi di ricombinazione (XRF e AES)

Coefficiente di Assorbimento

Un fascio di raggi X monocromatico, di intensità I_0 , che attraversa uno strato di materiale di spessore d viene assorbito secondo una nota legge:

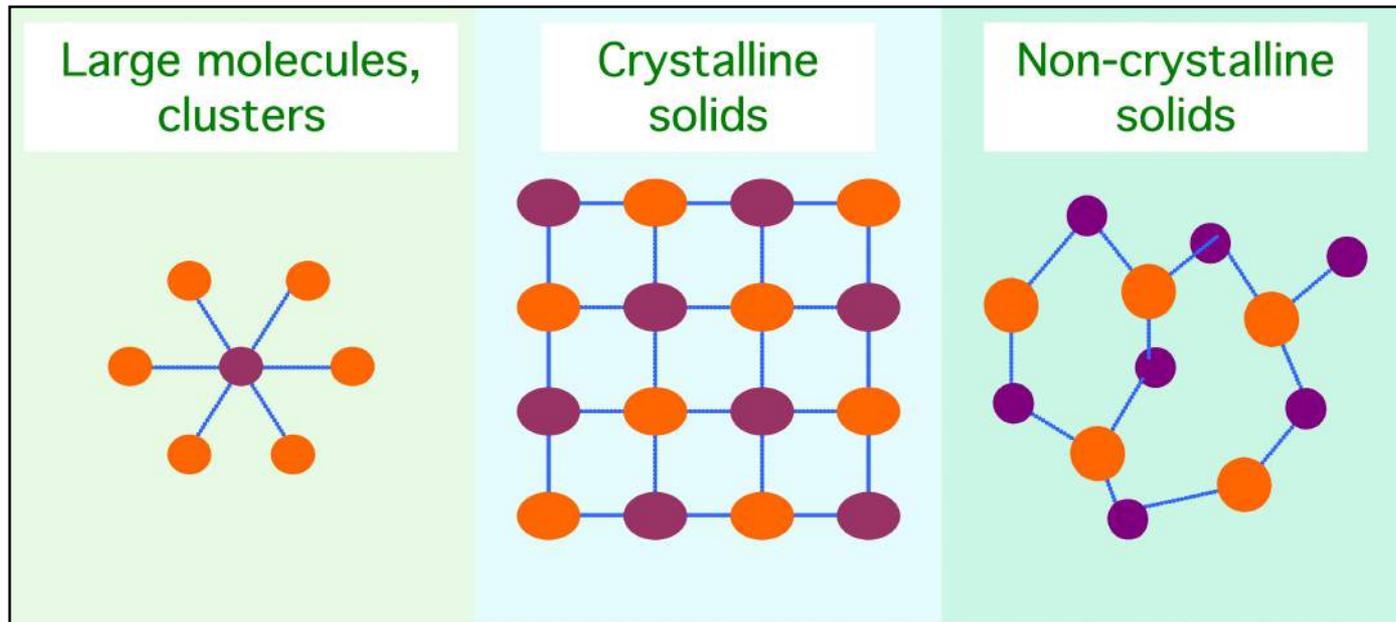


$$I = I_0 e^{-\mu(E)d}$$

Dove I è l'intensità trasmessa dallo strato attraversato, μ dipende dal materiale e dall'energia E ed è noto come **coefficiente di assorbimento**.

Applicazioni possibili

La spettroscopia di assorbimento di raggi X e' una sonda della struttura geometrica locale ed elettronica delle specie atomiche nella materia, **garantisce selettivita' chimica e non richiede nessun specifico stato fisico del campione.**

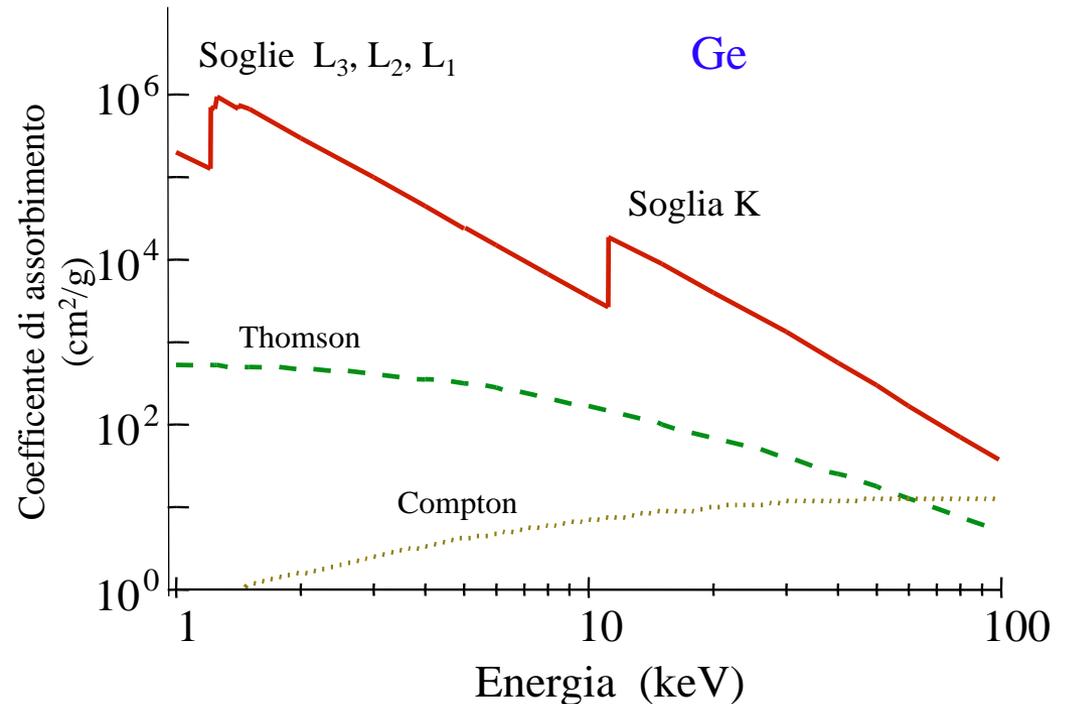


La sensibilita' alla specie atomica e l'indipendenza dallo stato di aggregazione rendono questa tecnica di grande utilita' in molti campi della ricerca; le applicazioni si estendono **dalla fisica dello stato solido, alla chimica della catalisi, alla scienza dei materiali, alla biofisica, alla geofisica etc.**

Soglie di assorbimento

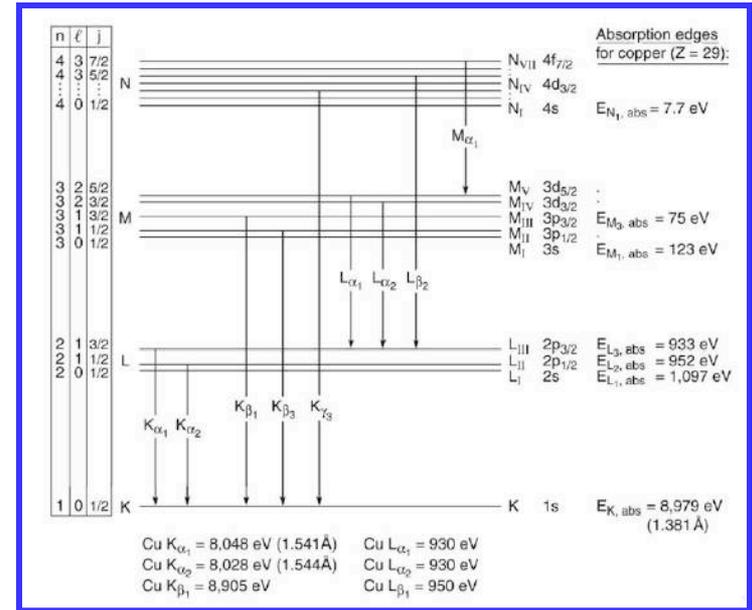
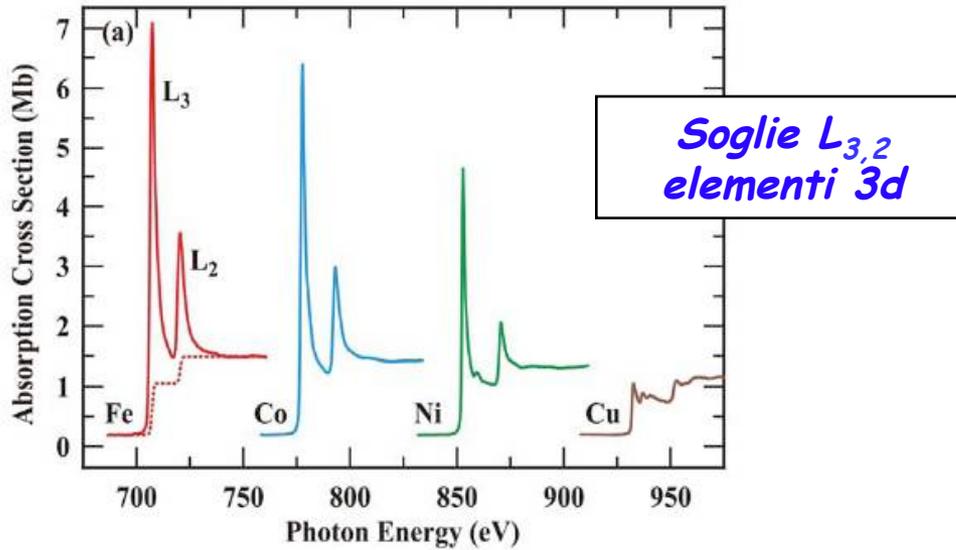
La dipendenza dalla **energia** del coefficiente di assorbimento e' **monotona decrescente** tranne che in corrispondenza di alcune **energie discrete** in cui compaiono delle **brusche discontinuita'** dette **soglie di assorbimento**.

Le **posizioni in energia** delle soglie corrispondono alle **energie di legame E_0** .

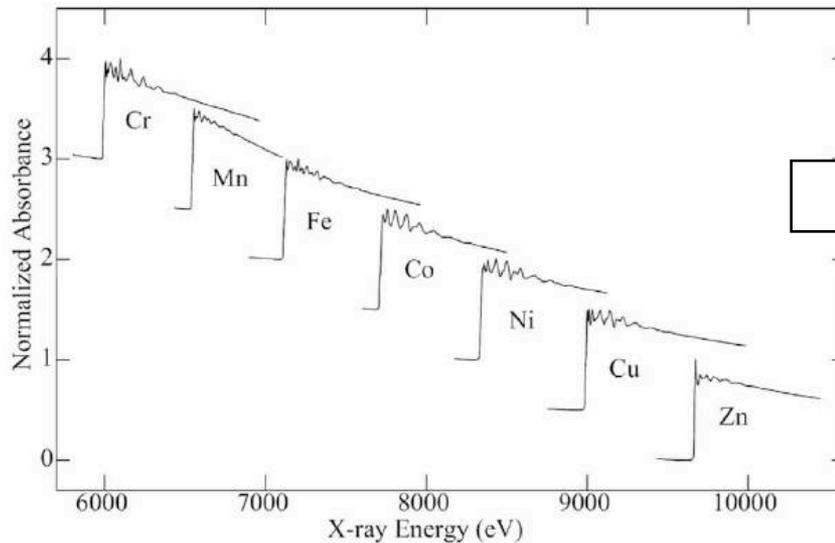


Quando l' **energia dei raggi X** e' sufficiente ad eccitare un **elettrone 1s** del livello elettronico piu' profondo, si parla di **soglie K**, se si verifica una transizione al continuo di un **elettrone 2s** o **2p** si parla di **soglie L** e cosi' via.

Soglie di assorbimento



Soglie di assorbimento Cu

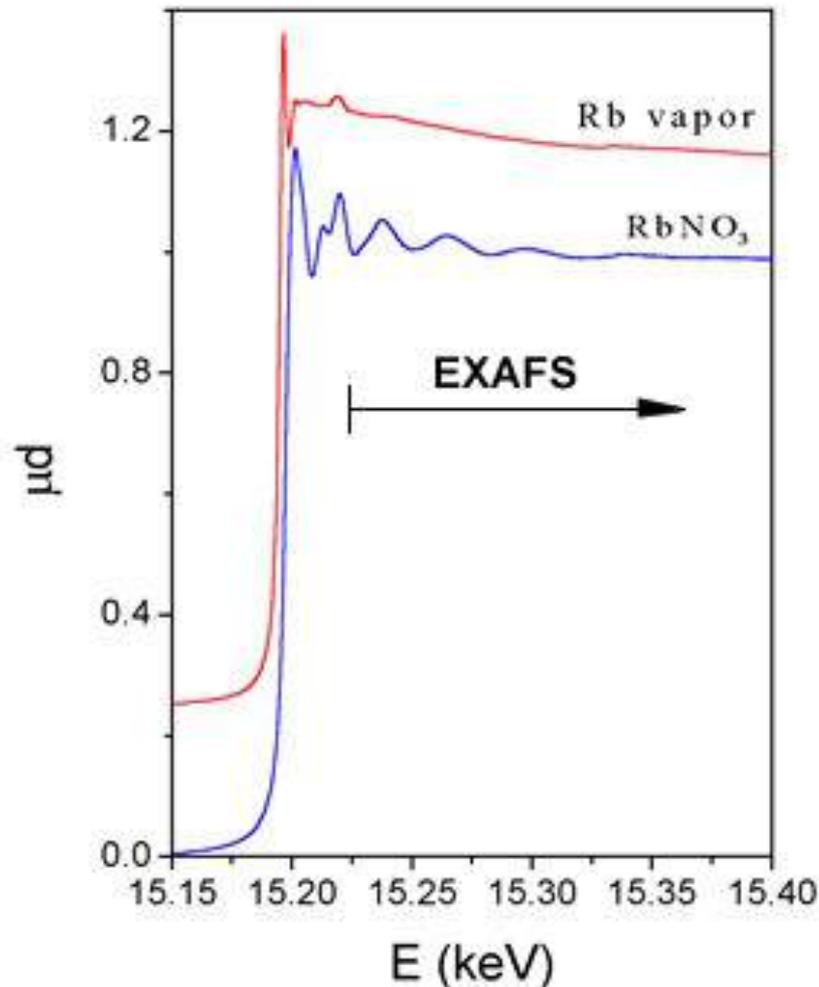


Soglie K elementi 3d

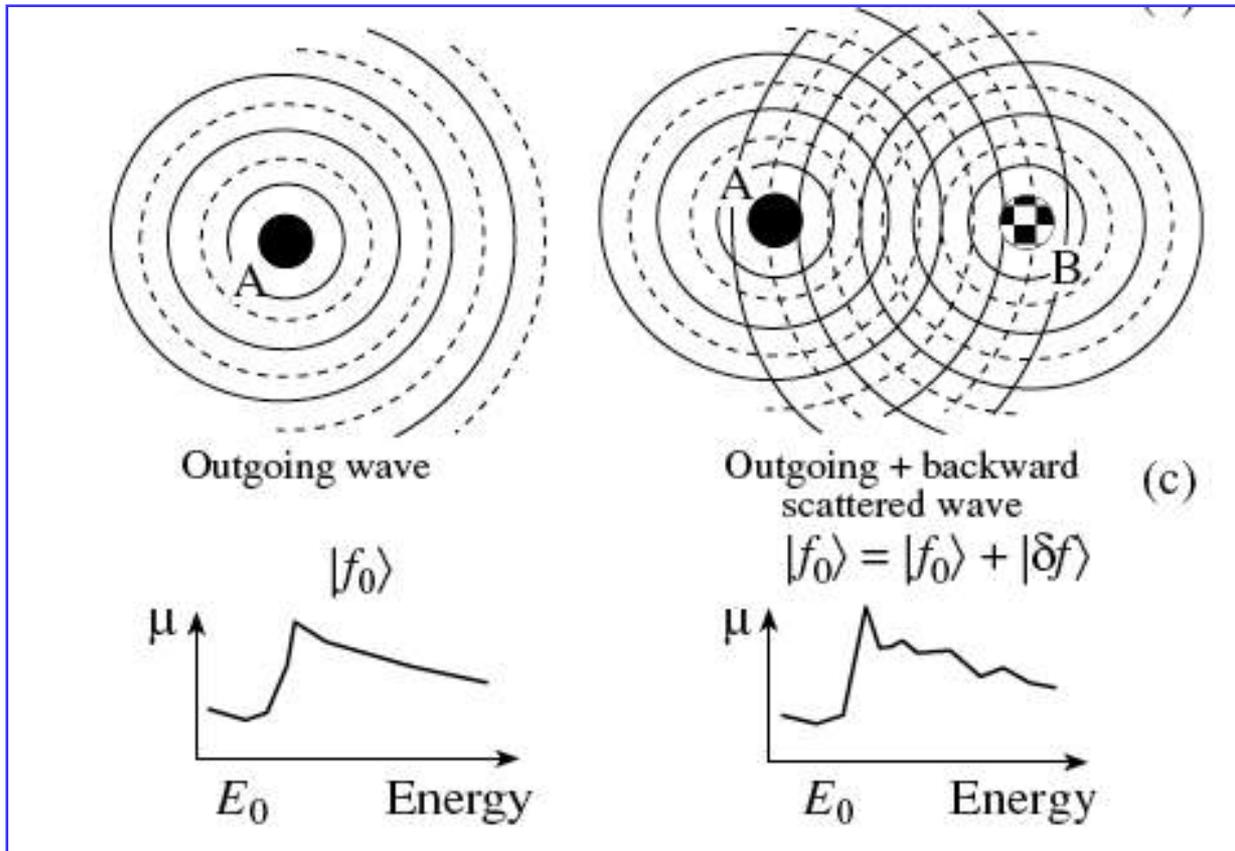
XAFS - X ray Absorption Fine Structure

Nella *materia condensata* un *esame attento delle singole soglie di assorbimento*, in un intervallo che *puo' estendersi fino a oltre 1000 eV dopo la soglia*, mostra la presenza di *una struttura fine oscillante* a cui e' stato dato il nome di **EXAFS**.

Questa struttura oscillante e' **assente nei gas monoatomici**. Questo indica che essa e' dovuta alla *interazione del fotoelettrone dell'atomo assorbitore con gli atomi circostanti*.



Origine della Struttura Fine

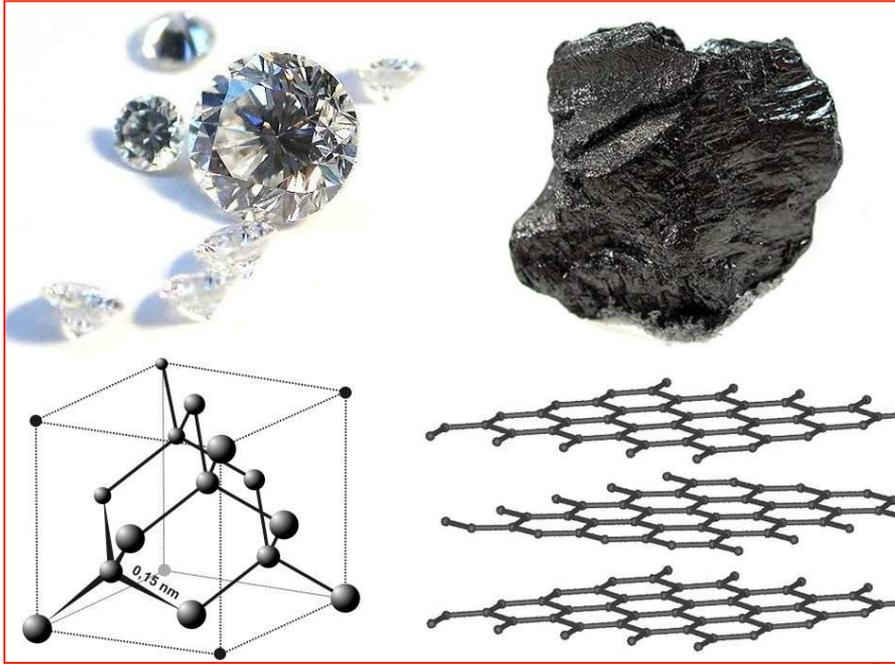


In sistemi monoatomici l'elettrone che si allontana dall'atomo assorbitore puo' essere visto come una onda sferica,

Nei sistemi poliatomici la **struttura fine** che si osserva e' dovuta alla **interferenza tra funzione d'onda del fotoelettrone uscente dall'atomo assorbitore e quella diffusa dagli atomi vicini.**

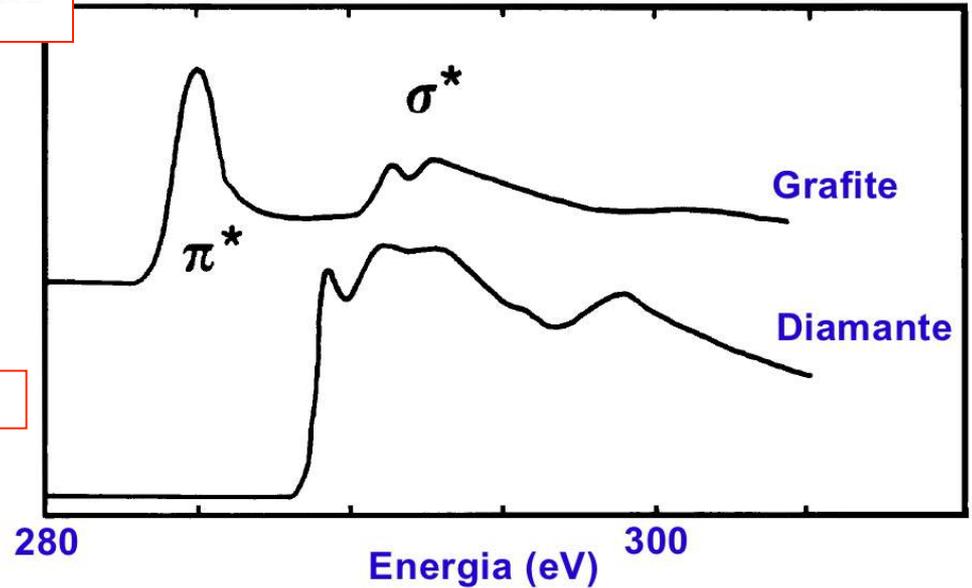
Il fenomeno di interferenza dipende dall'ambiente che circonda l'atomo assorbitore ed e' funzione dell'energia: grazie a questo fenomeno la struttura fine custodisce informazioni strutturali locali.

XAFS e carbonio



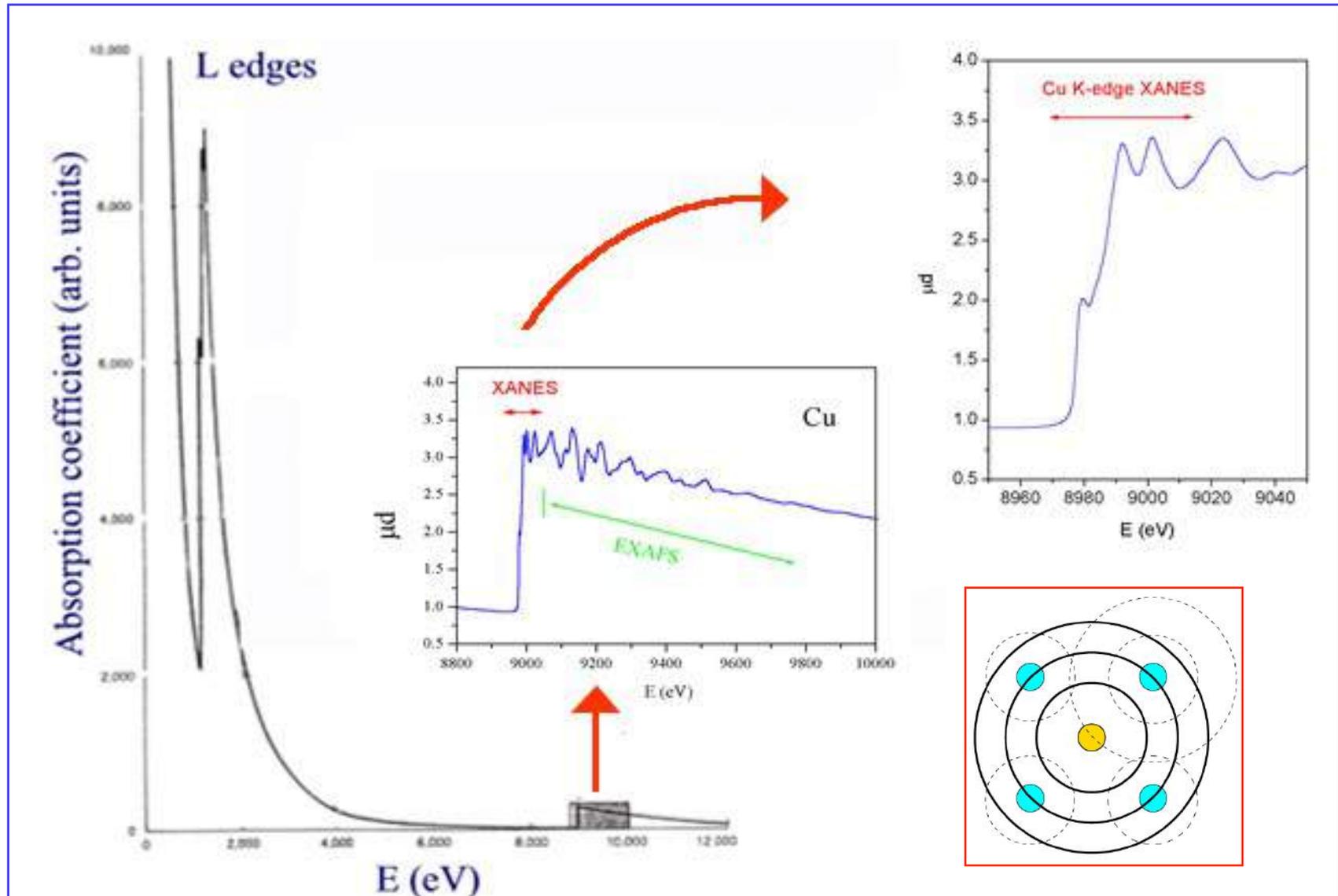
Diamante

Grafite



J. Robertson, Prog Solid St. Chem 21, 199 (1991)

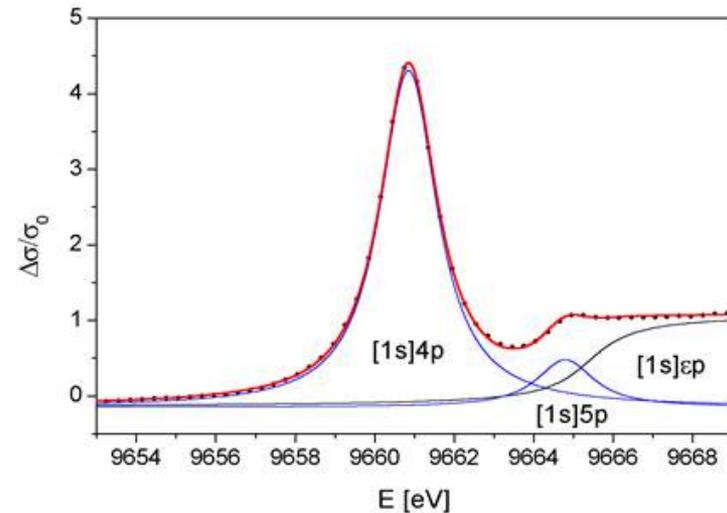
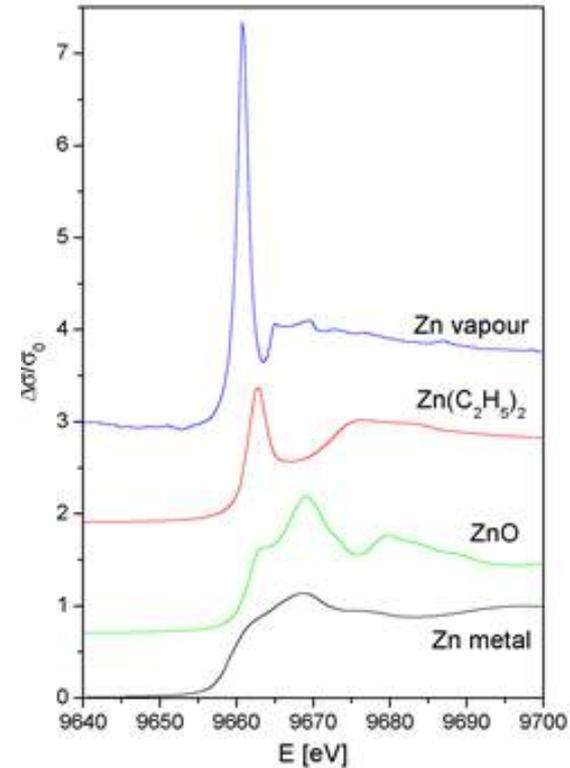
XAFS - XANES & EXAFS



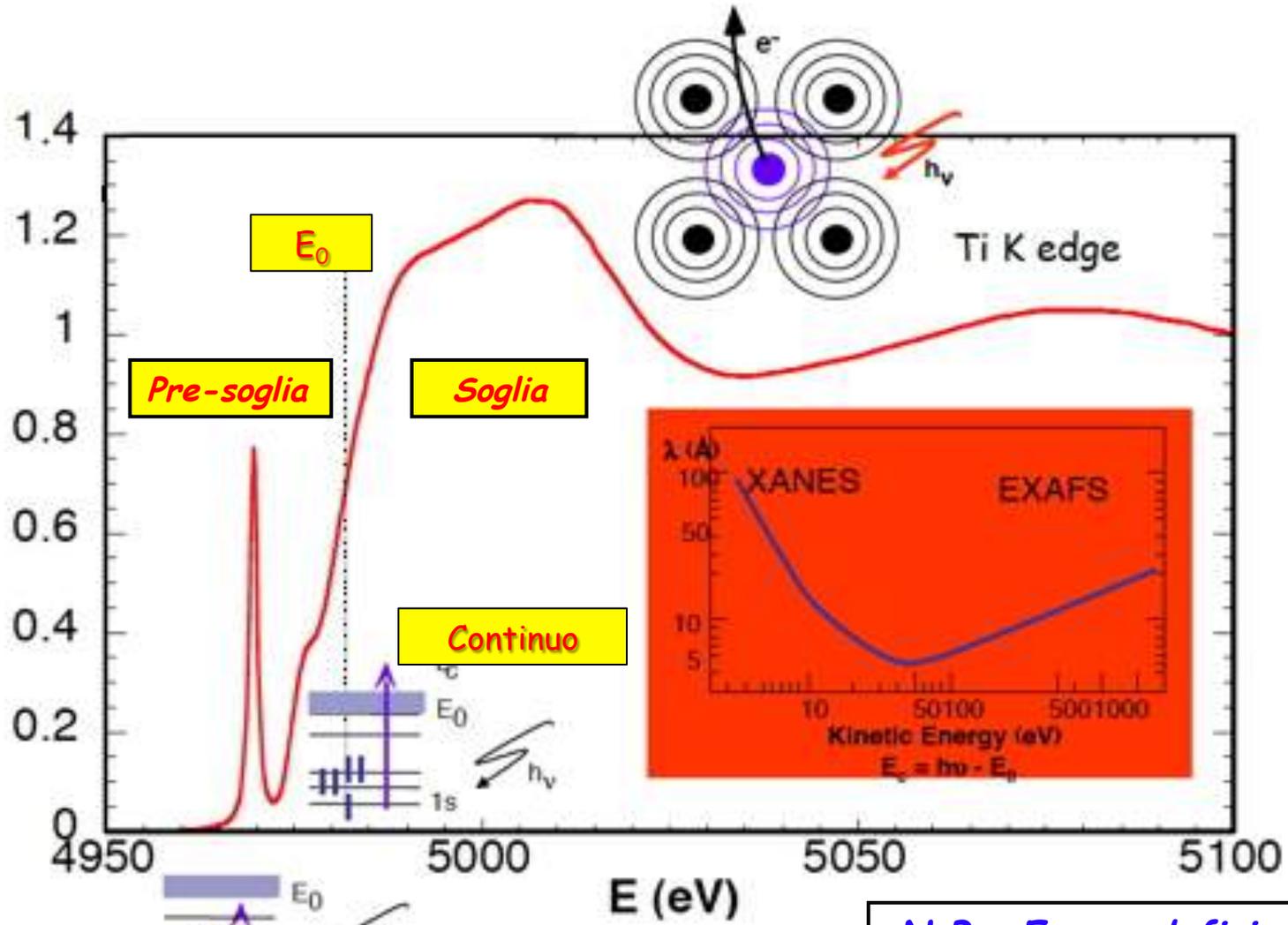
XANES

La zona vicino alla soglia (edge) di assorbimento prende il nome di **XANES** o **X-ray Absorption Near Edge Structure**. Essa e' copre l'intervallo energetico da **pochi eV prima della soglia a circa 50 eV dopo la soglia**. In questo intervallo il fotoelettrone ha energia confrontabile ai **livelli elettronici liberi**.

Di fatto le **XANES** danno molte informazioni e permettono di studiare sia le strutture elettroniche atomiche che quelle della parte bassa della banda di conduzione.



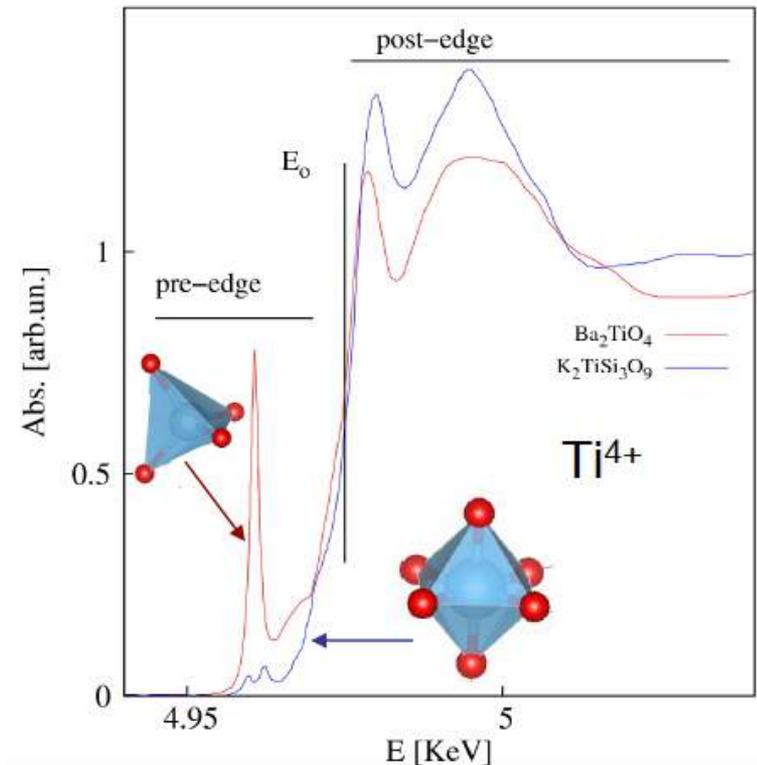
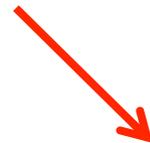
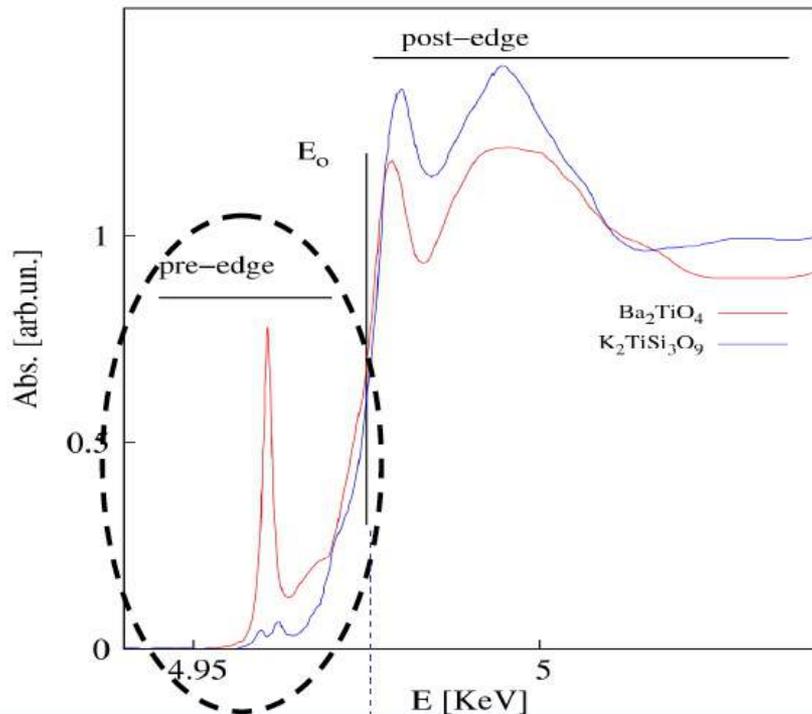
Definizioni relative alle XANES



Stati localizzati

N.B.: E_0 non definisce il livello di Fermi !

Regione di pre-soglia



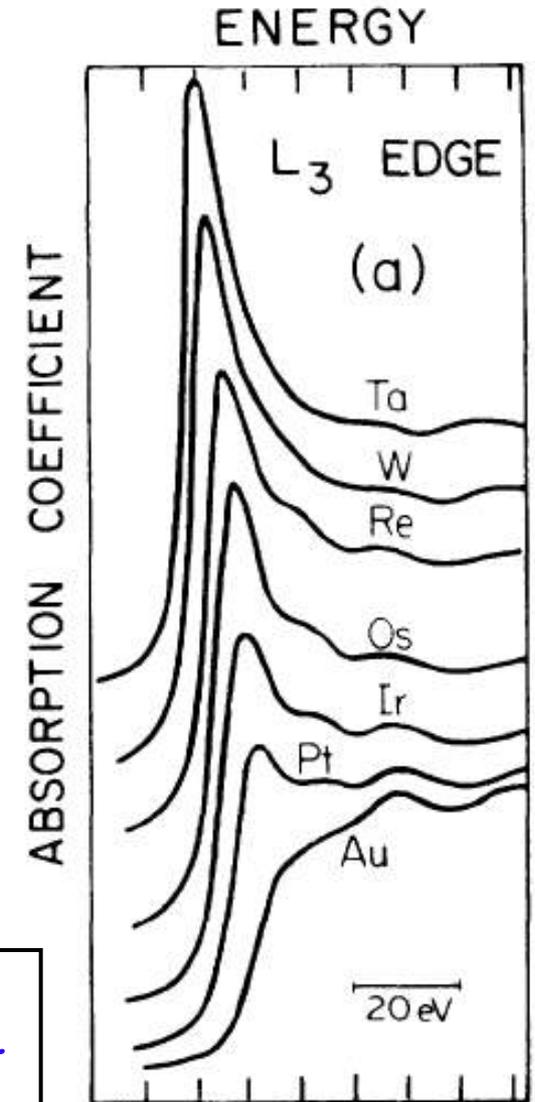
Transizioni elettroniche a stati vicino al livello di Fermi: danno informazioni sulla struttura geometrica locale attorno all'atomo assorbitore

In presenza di transizioni $s \rightarrow p$ (soglia K) e struttura tetraedrica (non centrosimmetrica), ibridizzazioni tra livelli p e d rendono possibili transizioni di dipolo da cui dipende l'intensita' del picco pre-soglia.

Regione di soglia

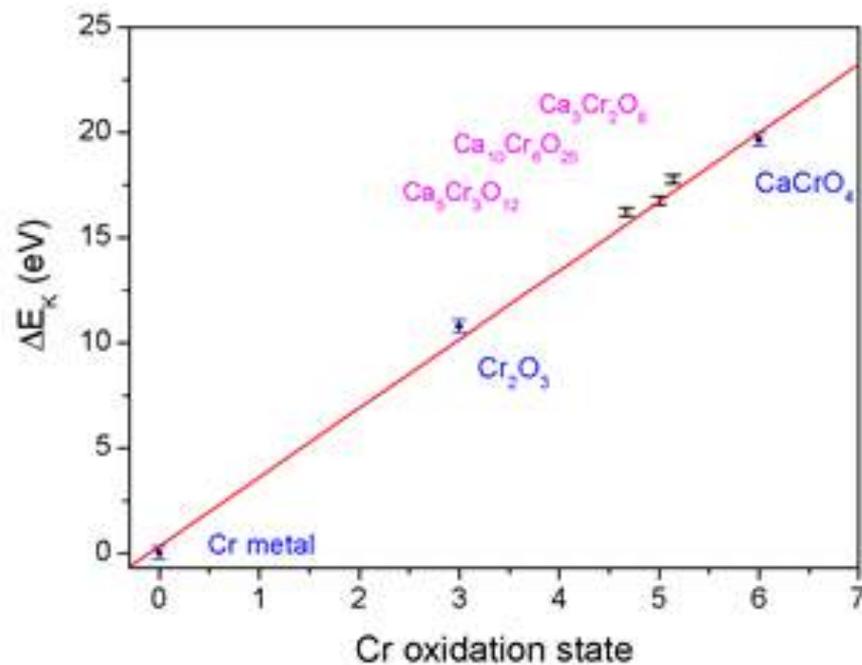
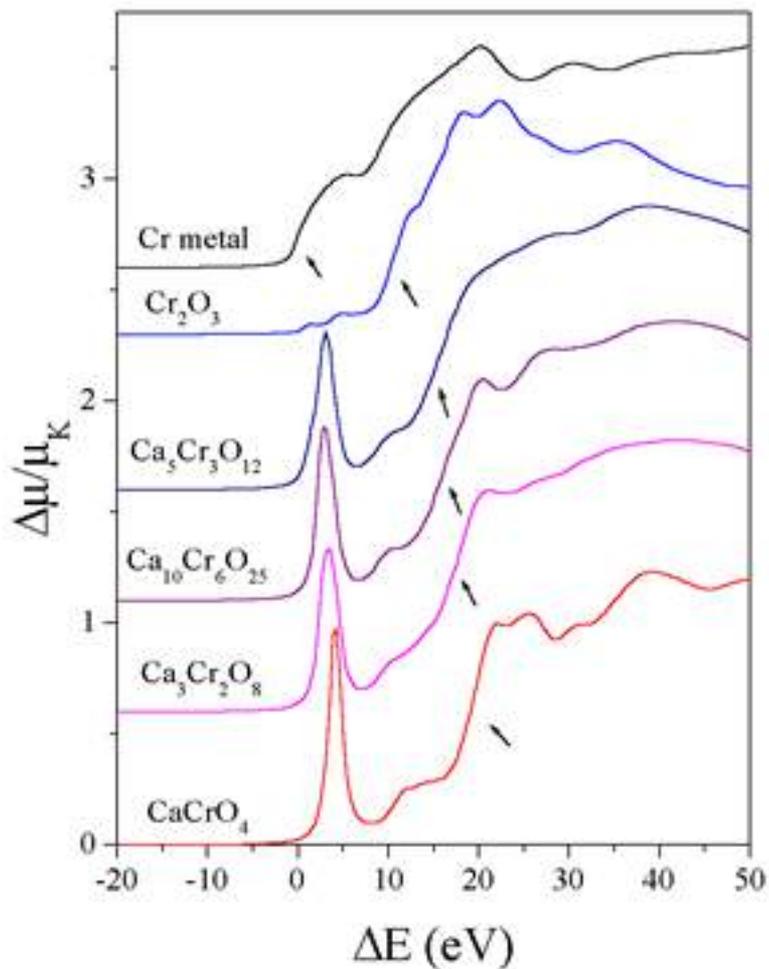
L'aumento della intensita' del picco della soglia L_3 noto come 'white line' fornisce, per gli elementi 4d e 5d, informazioni sulla occupazione dei livelli d.

IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIB	VIII	VIII	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIA	VIIA	
1 H													5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3 Li	4 Be											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
11 Na	12 Mg											31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds									
			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
			90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		
Groupe s			Groupe p				Groupe d					Groupe f						



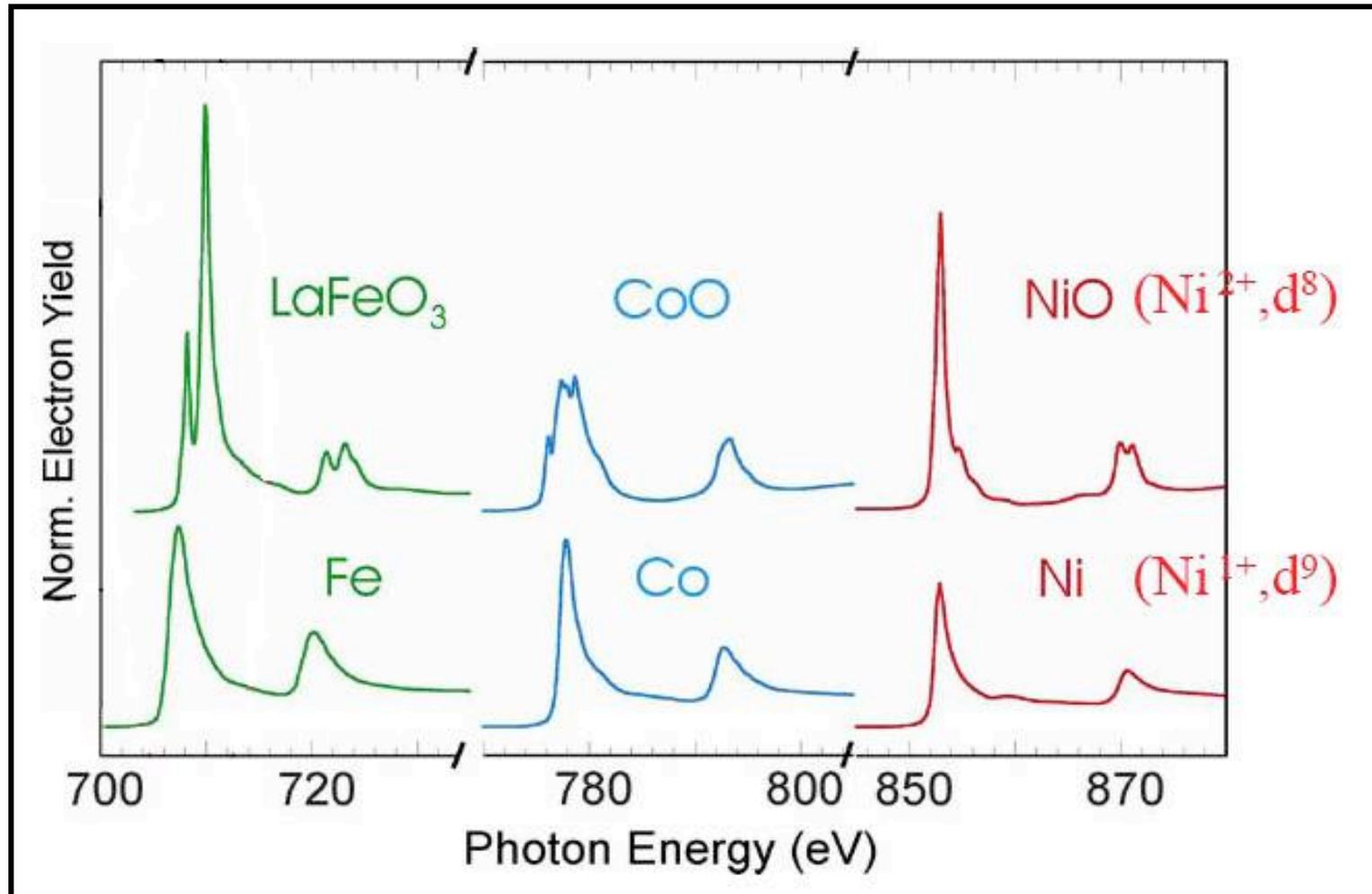
L'intensita' del picco di soglia aumenta al decrescere dell'occupazione del livelli d. In Au i livelli 5d sono pieni.
Phys. Rev. B 36 (1987) 2972

XANES e stati di ossidazione



Le **XANES** sono sensibili al tipo di *legame chimico*.

XANES e chimica



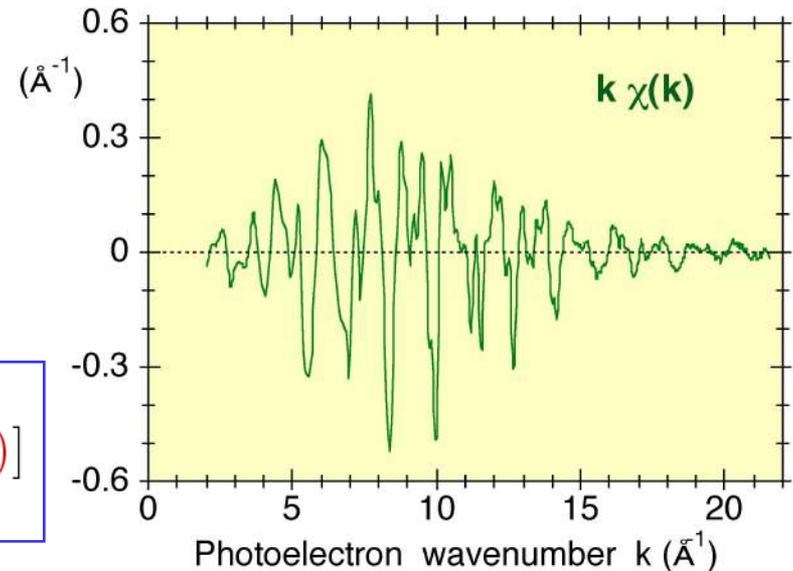
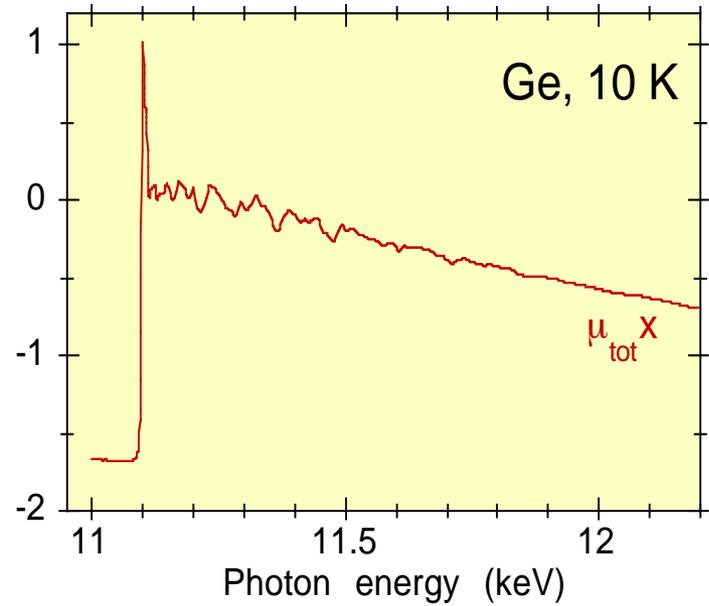
Le **XANES** sono sensibili al tipo di *legame chimico*.

EXAFS

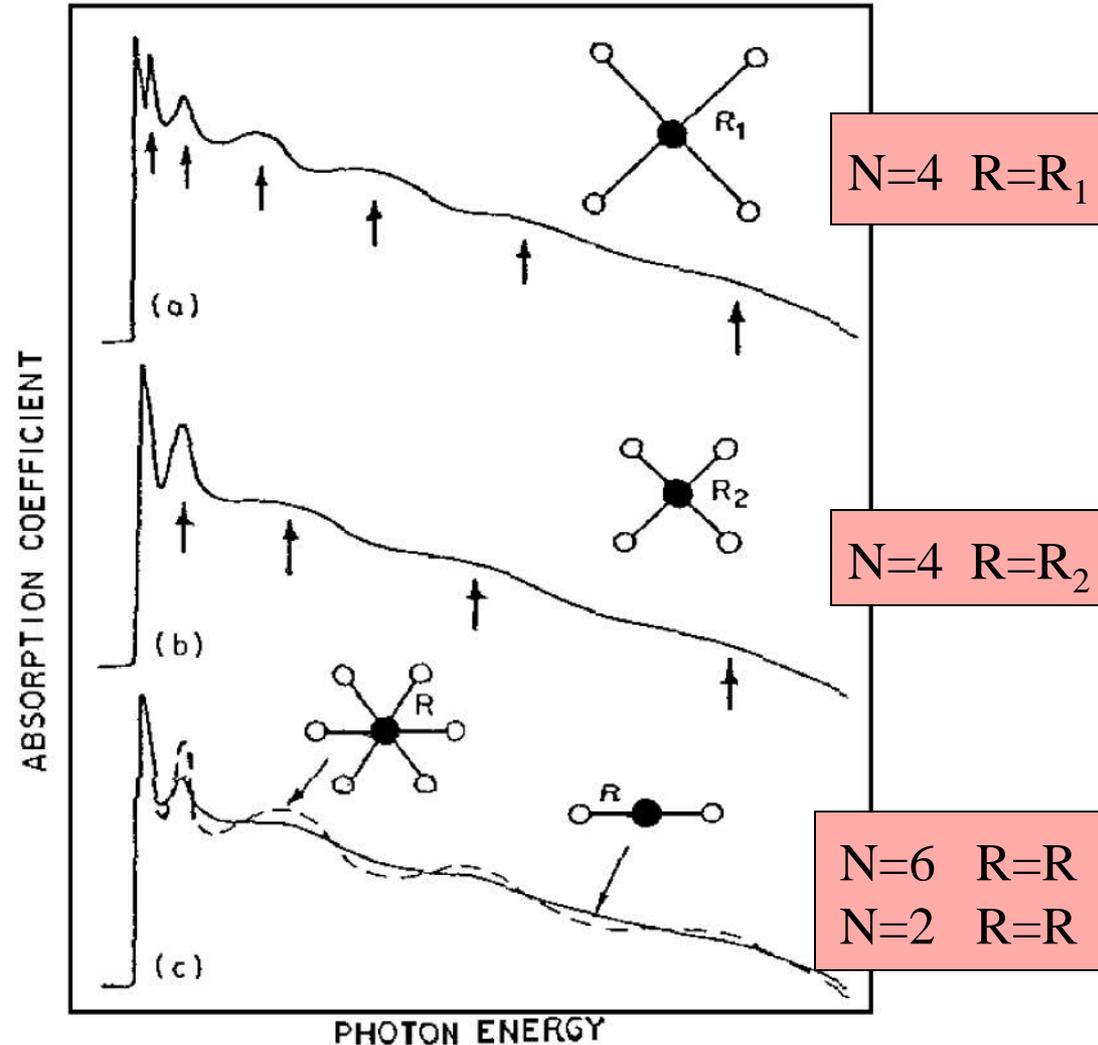
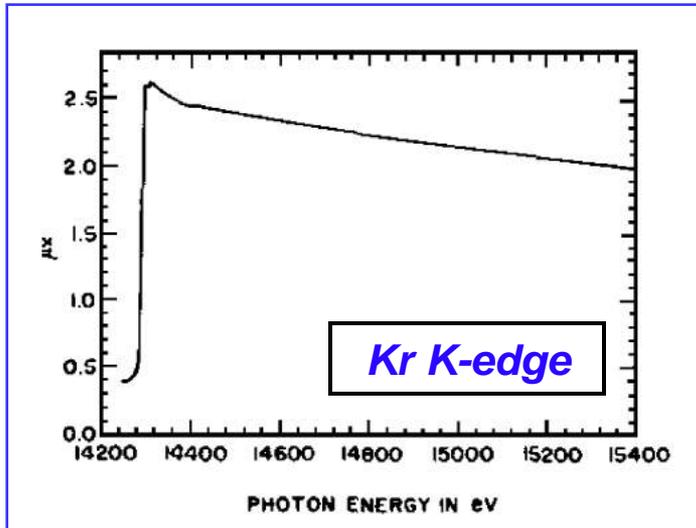
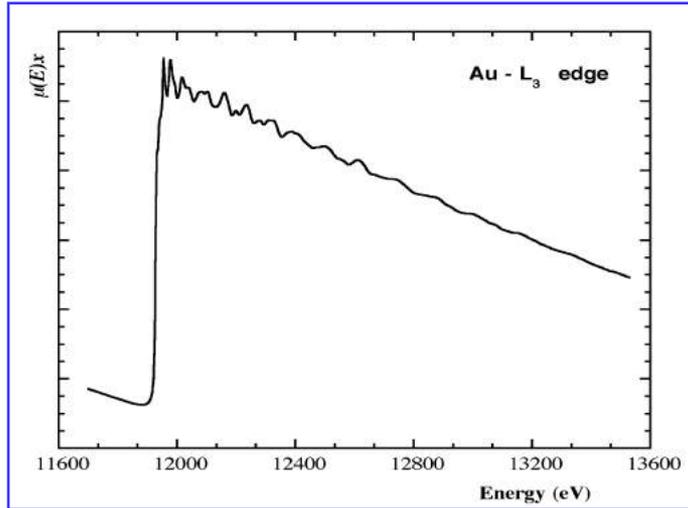
La parte che si estende lontano dalla soglia di assorbimento e' denominata EXAFS o Extended X-ray Absorption Fine Structure

La struttura EXAFS e' in grado di fornire informazioni sulle *distanze* interatomiche tra l'atomo assorbitore e i suoi vicini (R), sul tipo e *numero* di vicini (N), sul loro *disordine* termico e strutturale (σ^2) e anche sugli *angoli di legame*.

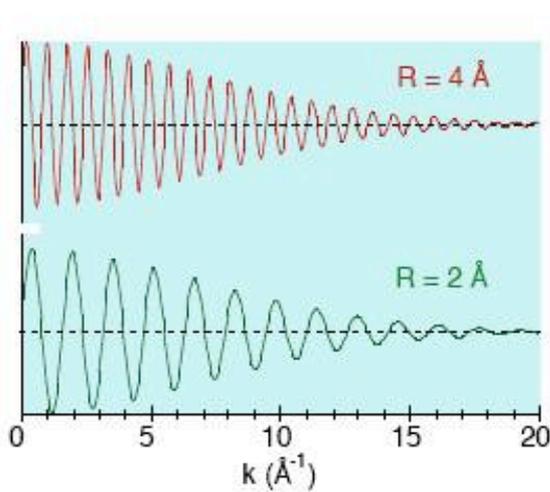
$$\chi(k) = \sum_j \frac{N_j f_j(k) e^{-2k^2 \sigma_j^2}}{k R_j^2} \sin[2k R_j + \delta_j(k)]$$



Informazioni strutturali e osservazione dei dati



Informazioni strutturali

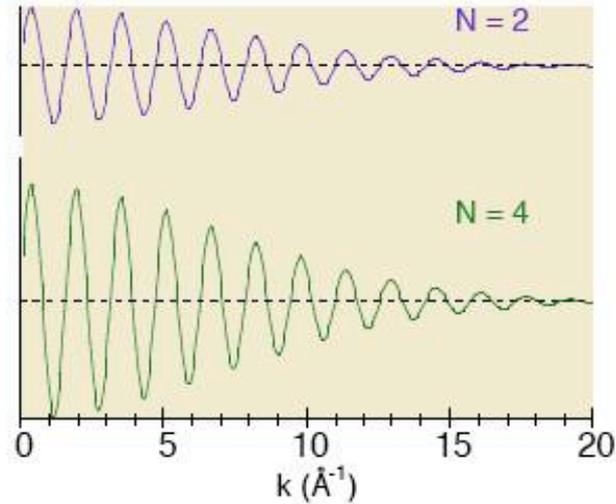


Frequency



Inter-atomic
distance

R

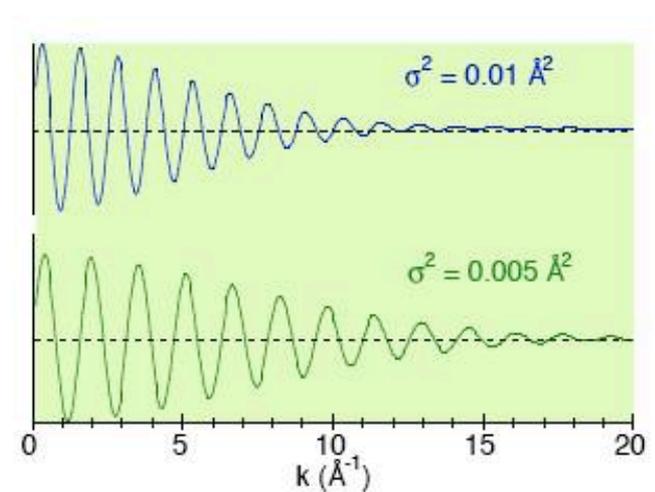


Amplitude



Coordination
number

N



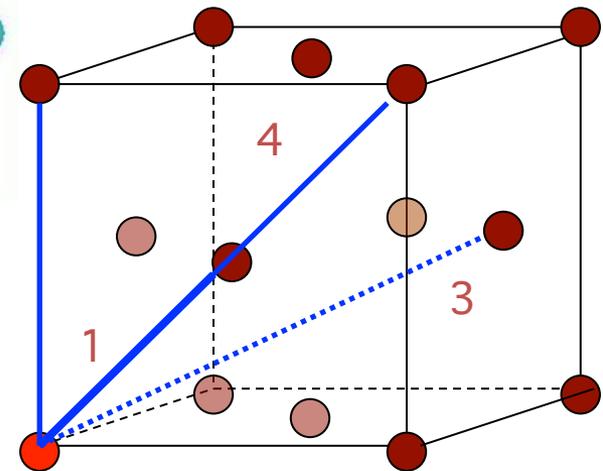
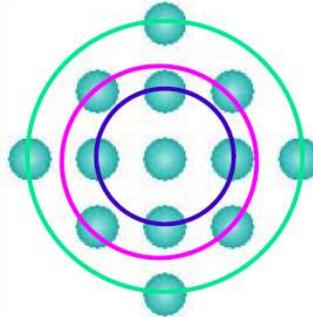
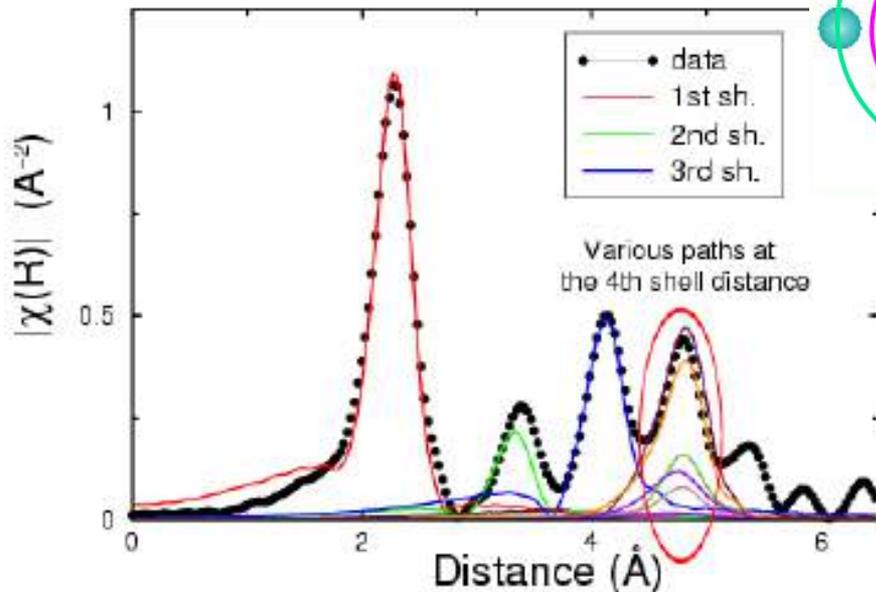
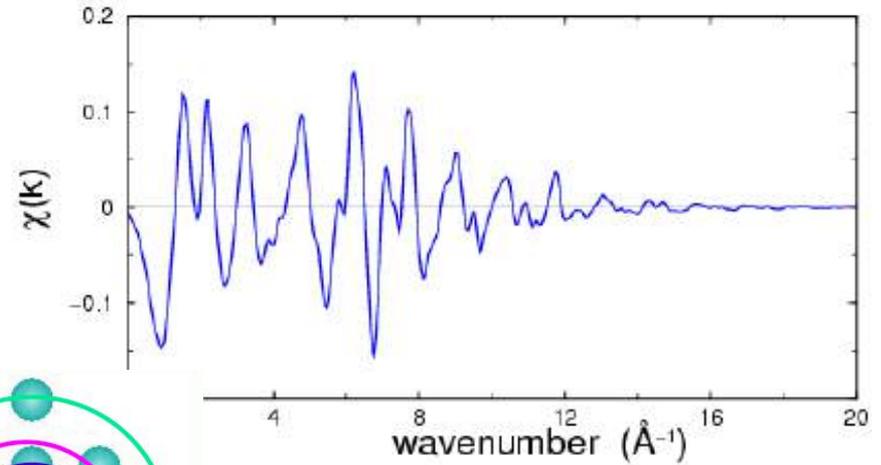
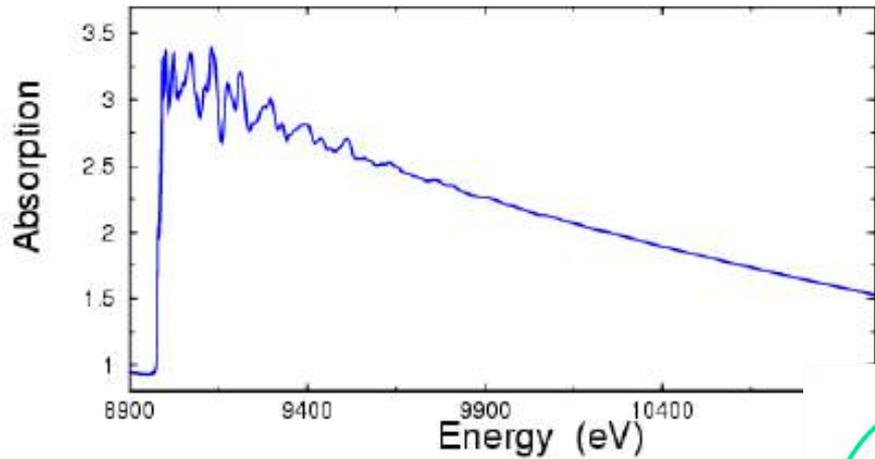
Damping



Disorder

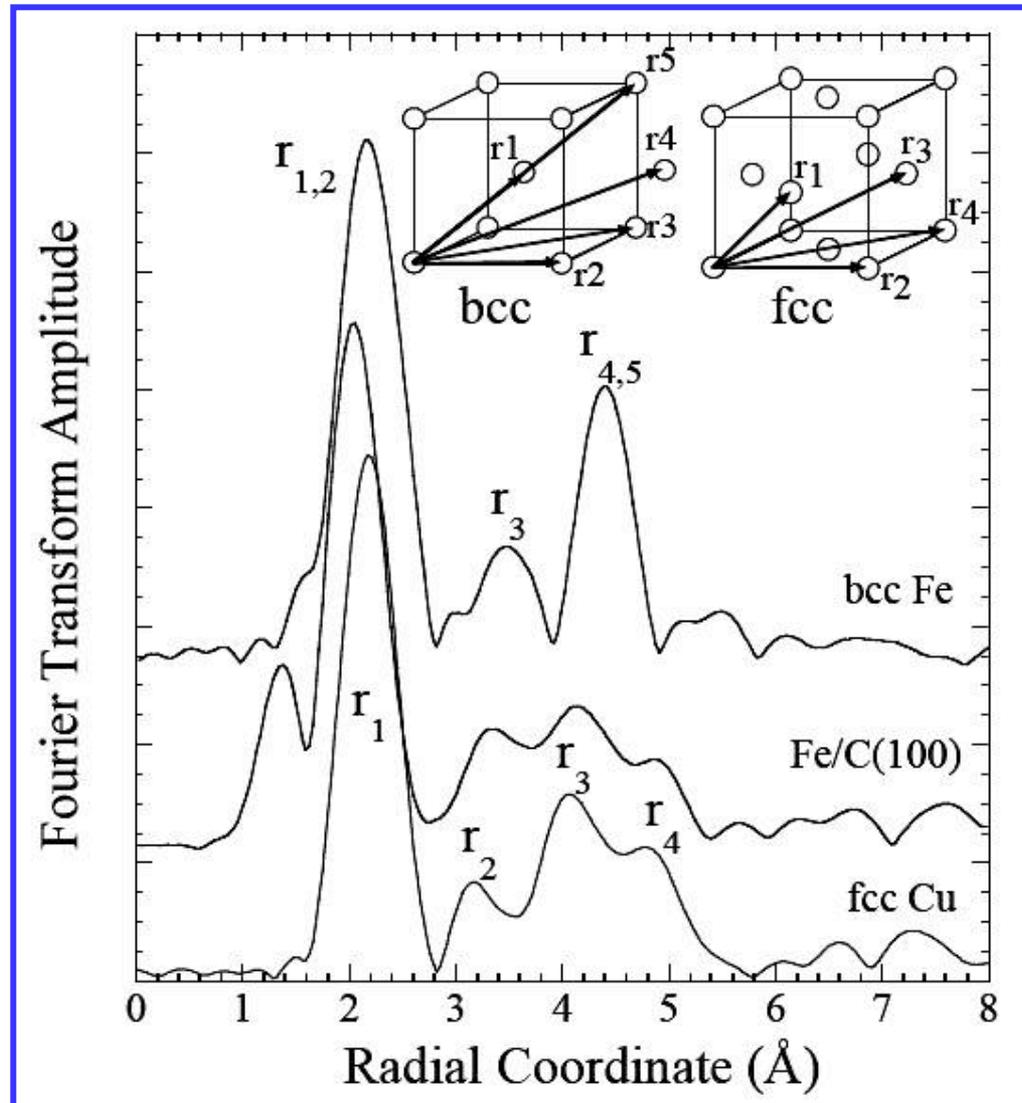
σ^2

EXAFS - Cenni di analisi dei dati



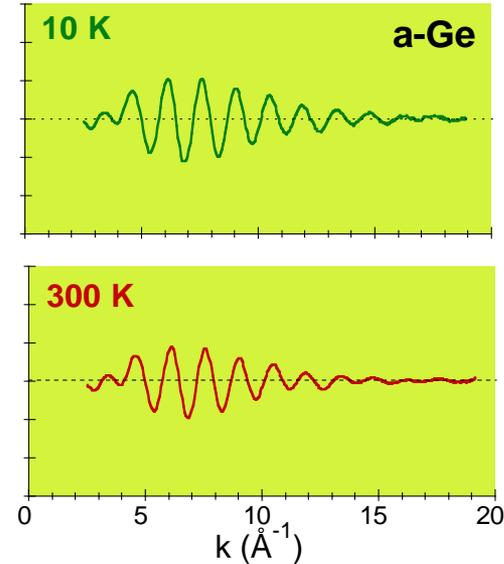
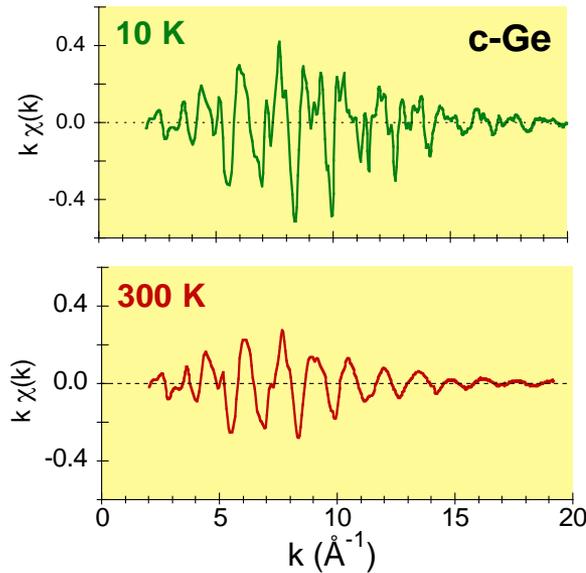
Rame metallico- Struttura cubica a facce centrate FCC

EXAFS - Cenni di analisi dei dati

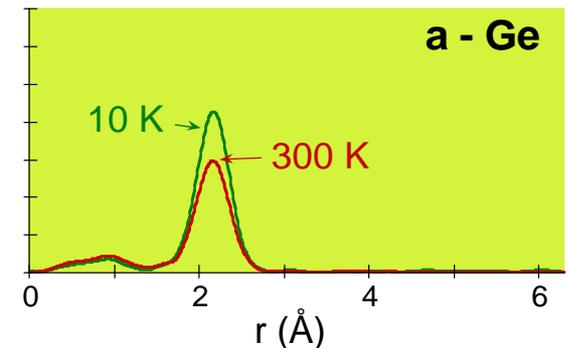
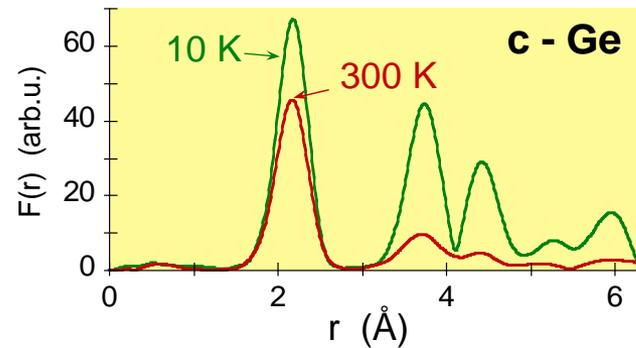


EXAFS - Cenni di analisi dei dati

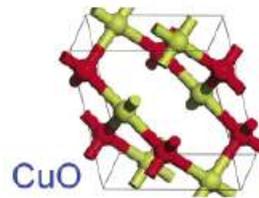
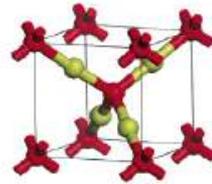
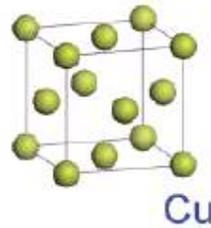
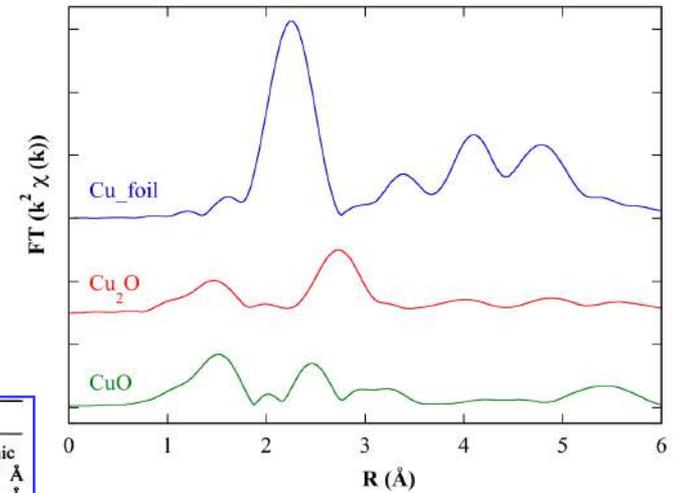
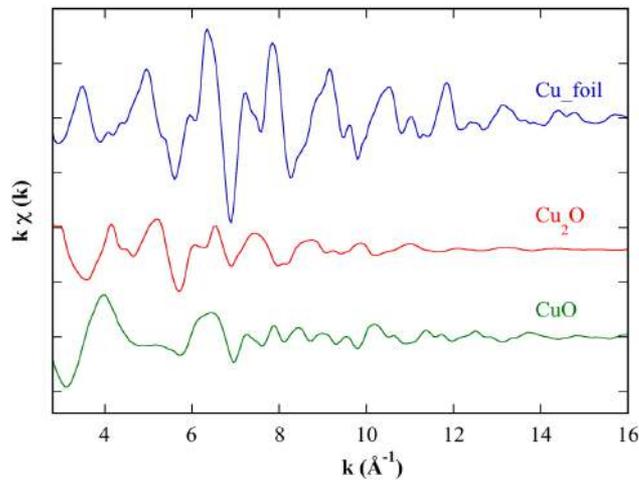
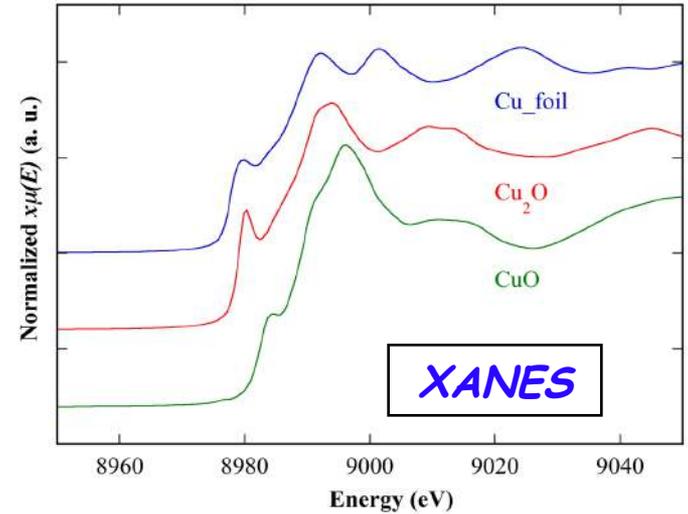
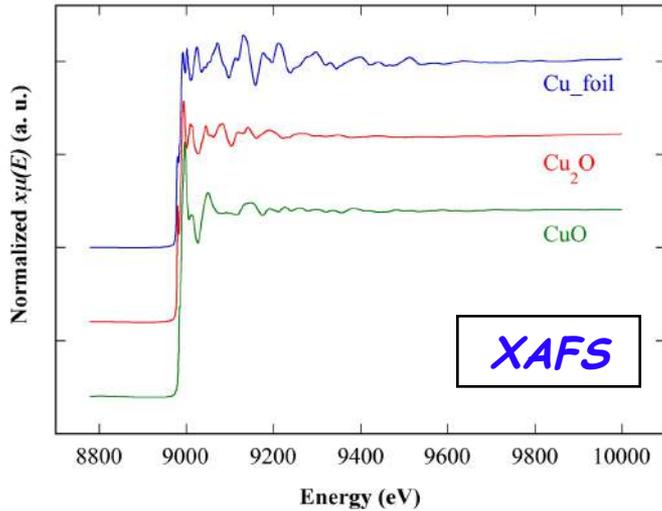
EXAFS signals



Fourier transforms



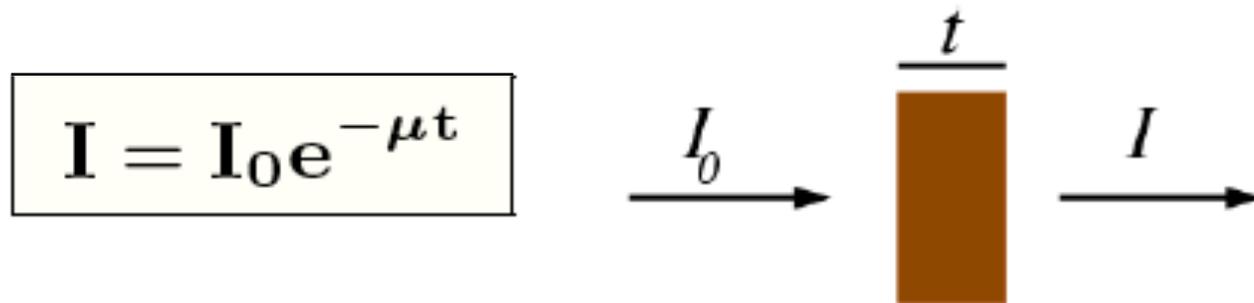
Cu Cu₂O CuO



Cu metal FCC $a = 3.61 \text{ \AA}$

	Cu ₂ O	CuO
Lattice parameter	Cubic $a = 4.27 \text{ \AA}$	Monoclinic $a = 4.6837 \text{ \AA}$ $b = 3.4226 \text{ \AA}$ $c = 5.1288 \text{ \AA}$ $\beta = 99.54^\circ$
Shortest distances		
$d_{\text{Cu-O}}$	1.84 \AA	1.95 \AA
$d_{\text{O-O}}$	3.68 \AA	2.62 \AA
$d_{\text{Cu-Cu}}$	3.02 \AA	2.90 \AA

Misure di assorbimento



Se si misura l'intensità della radiazione incidente sul campione I_0 e quella trasmessa dal campione di spessore t ossia I e se ne fa il logaritmo naturale, si ottiene:

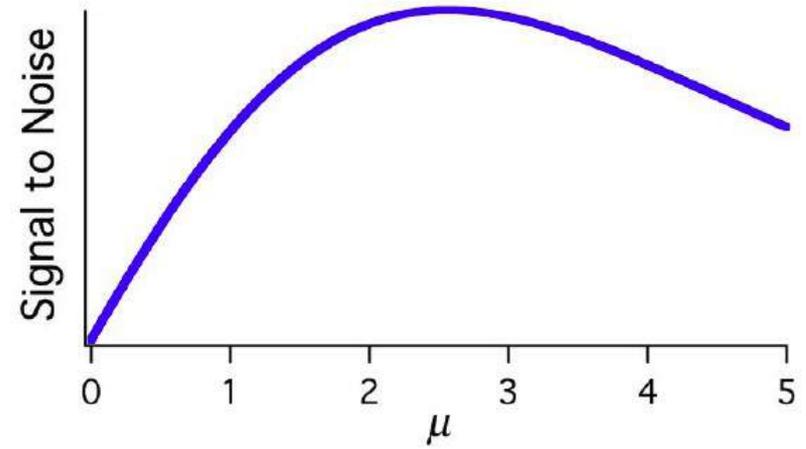
$$\mu(E)t = -\ln(I/I_0)$$

μ , ossia il coefficiente di assorbimento dipende fortemente dalla *energia* dei raggi X incidenti (E), dal *numero atomico* (Z), dalla *densità del materiale* (ρ) e dalla *massa atomica* (A).

$$\mu \approx \frac{\rho Z^4}{A E^3}$$

Cenni sulla preparazione del campione

Per misure in trasmissione bisogna avere campioni omogenei e di appropriato spessore ($\mu x \sim 1-2$ dove ora x è lo spessore del campione) ossia il campione non deve essere né troppo spesso né troppo sottile altrimenti il rapporto segnale/rumore non è ottimale. Il campione non deve avere buchi quindi usando polveri bisogna ridurre al minimo la dimensione dei grani.



$$\mu x = 2 = \mu_m \rho x = \ln(I_0 / I)$$

dove μ_m è il coefficiente di assorbimento di massa e ρ è la densità del materiale.

$$2 = \mu_m \rho x = \mu_m \frac{m}{V} x = \mu_m \frac{m}{A} \Rightarrow$$

$$m = \frac{2A}{\mu_m}$$

La quantità in grammi m di campione da depositare su un supporto di area A .

Conclusioni



La ricerca scientifica basata su luce di sincrotrone deve molto del suo successo *all'impatto che ha avuto in diverse discipline scientifiche.*

La luce di sincrotrone è stata inizialmente molto usata nella *fisica della materia*, ma successivamente il suo uso si è rapidamente esteso allo *studio della chimica, la geofisica, la biologia, le scienze ambientali e la medicina e più recentemente l'archeologia e le scienze dei beni culturali.*

Oggigiorno, sostanzialmente *tutte le discipline scientifiche sono interessate alla generazione e all'uso della luce di sincrotrone* e la maggior parte dei *paesi industrializzati si sono dotati di acceleratori per produrla.*

Grazie per la vostra attenzione!



Appendici I

Luce: onda e particella

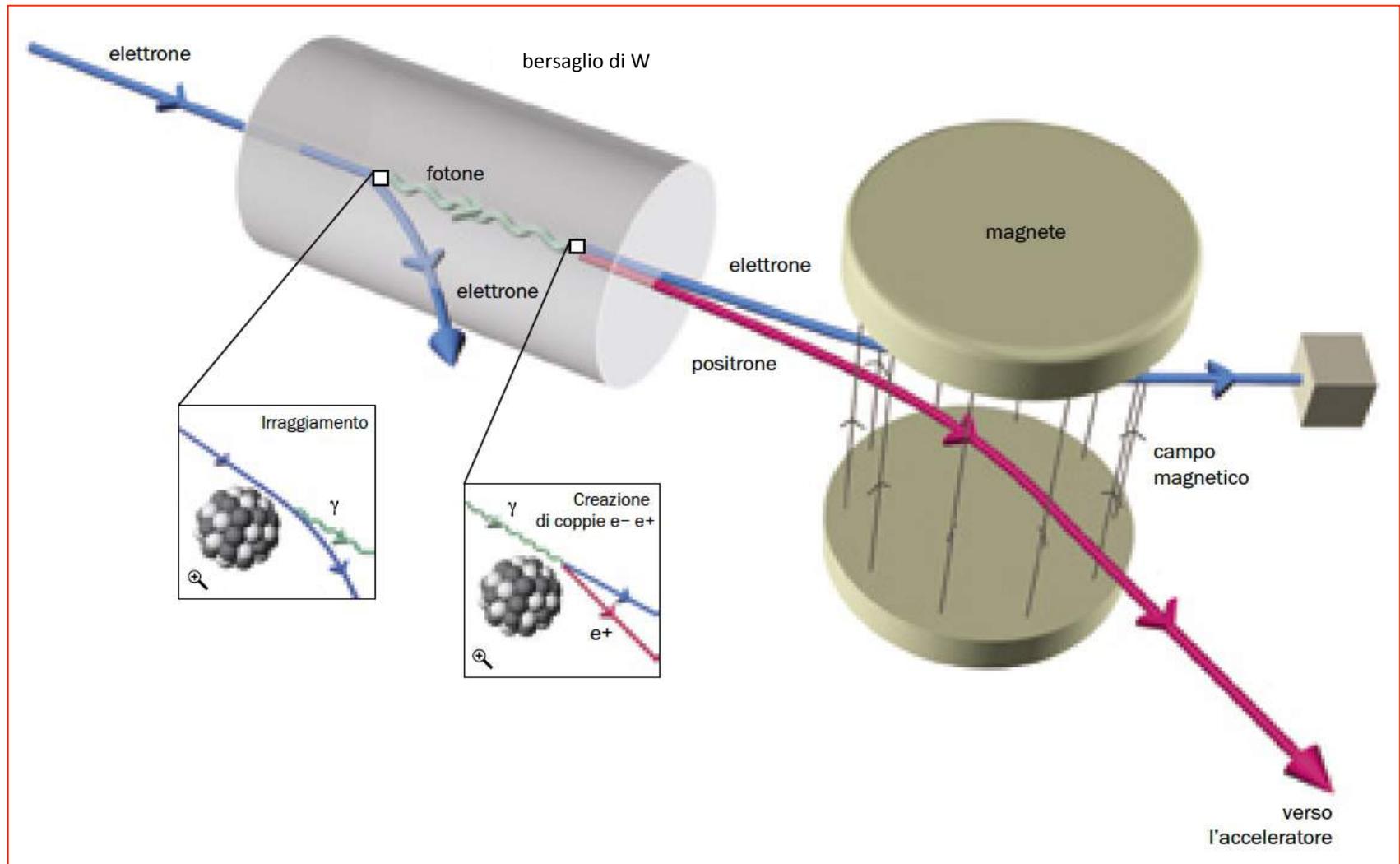


La natura della luce è oggetto di diatriba da secoli: diversi esperimenti hanno osservato con successo sia la *particella che l'onda*, ma sempre in maniera distinta e mai contemporaneamente. Per Newton la luce era una particella, per Huygens invece un'onda. A fine '800 nelle equazioni di Maxwell sembrava aver trionfato la natura ondulatoria della luce ma nel 1905 Einstein mostra che la luce è costituita da particelle (quanti) che chiama *fotoni*.

Solo successivamente, con la meccanica quantistica si comprende che i fotoni sono sia particelle che onde.

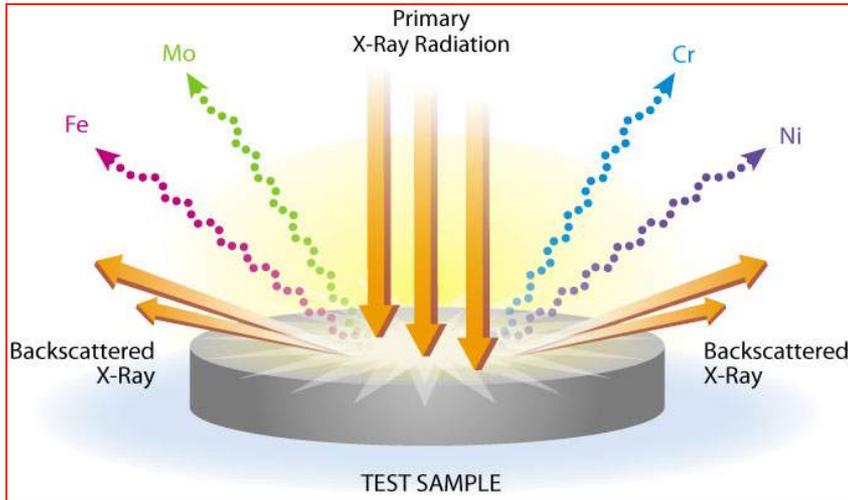
Nell'esperimento un impulso di luce laser è stato sparato su un nano-filo metallico. La luce sul filo ha cominciato a circolare come un'onda, su due direzioni opposte fino al punto in cui le onde si sono scontrate. Dallo scontro è nata una nuova onda, che resta però sempre nella stessa zona di spazio. A questo punto, spiega Carbone, "abbiamo sparato un flusso di elettroni vicino al nano-filo: urtando l'onda stazionaria gli elettroni sono stati accelerati, rallentati o deflessi". Quindi un microscopio ultraveloce ha fotografato la posizione in cui si è verificata la variazione di velocità, visualizzando l'onda. Nello stesso tempo sono state immortalate anche le particelle: quando gli elettroni passano vicino all'onda stazionaria, colpiscono le particelle della luce e queste subiscono un cambiamento di velocità che appare come uno scambio di 'pacchetti' di energia tra elettroni e fotoni. La presenza dei pacchetti è la spia che gli elettroni hanno interagito con un'altra particella, quella della luce.

Produzione di anti-materia: positroni



M. Calvetti, Antiparticelle accelerate, Asimmetrie 7, 16-21 (2008)

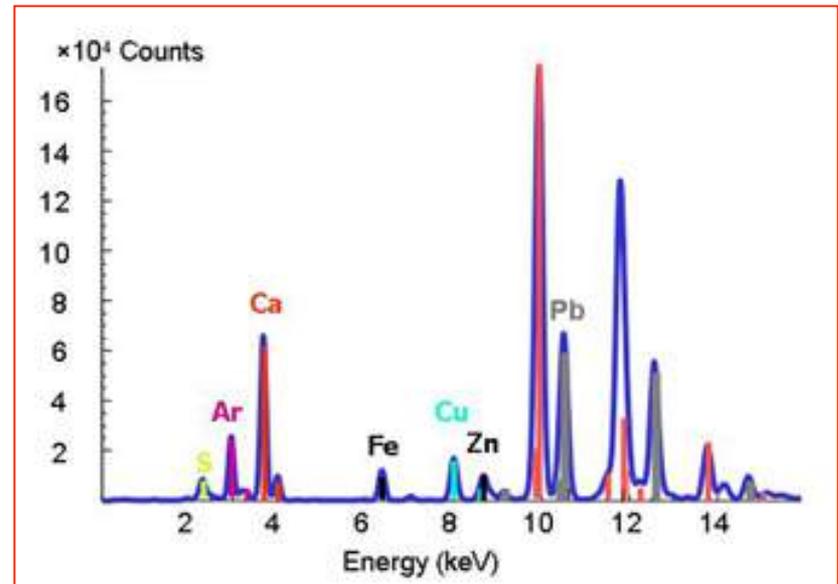
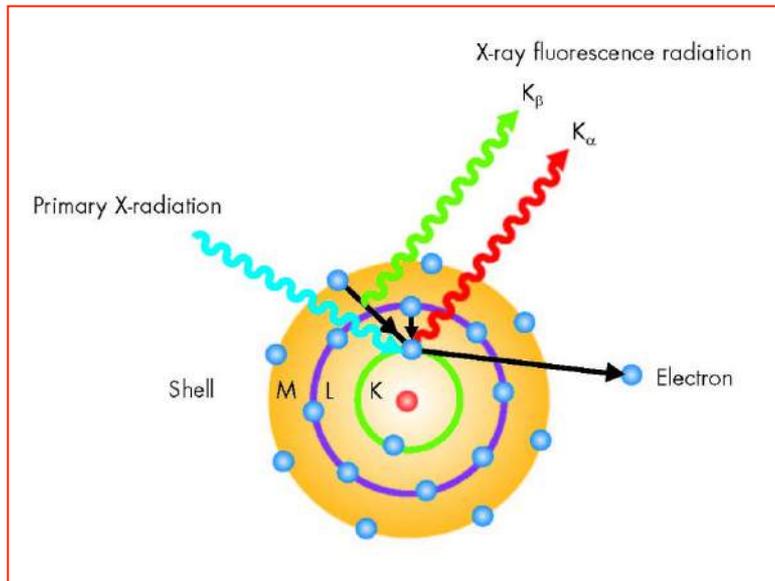
XRF o fluorescenza X



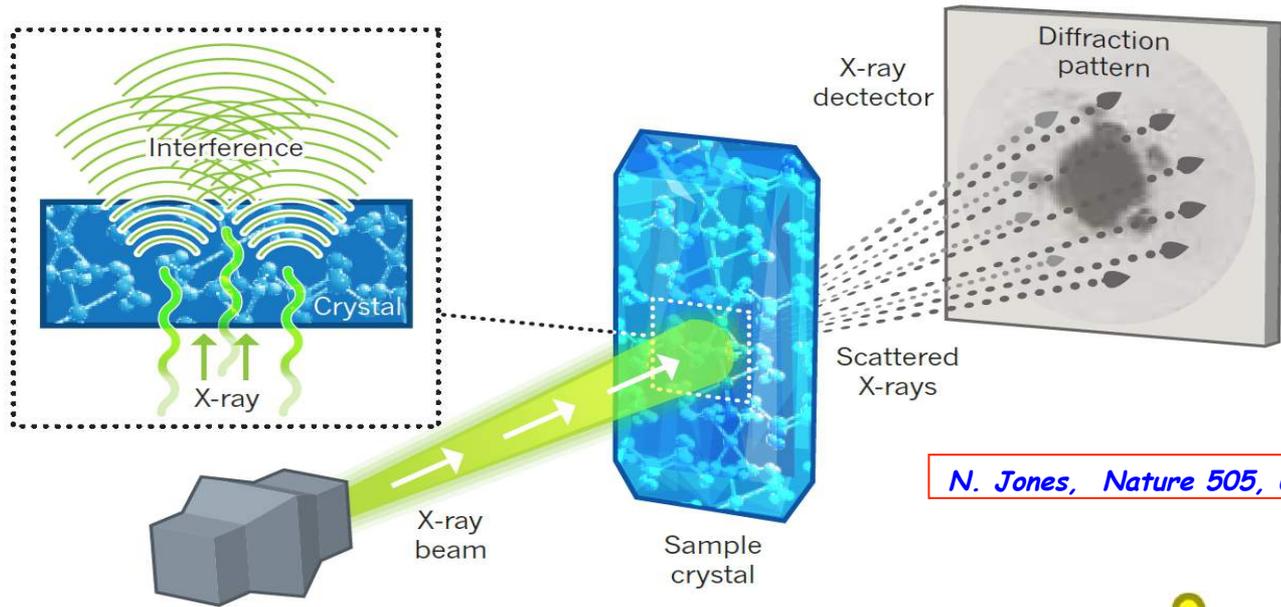
La spettroscopia legata alla fluorescenza-X è *uno strumento che consente di determinare qualitativamente e quantitativamente e in modo non distruttivo, la composizione chimica di un campione, attraverso l'analisi delle radiazioni X caratteristiche emesse*.

La radiazione proveniente dal campione viene rivelata in funzione della sua energia (Energy dispersive: ED-XRF) da rivelatori a stato solido tipo HPGe o SDD (Silicon Drift Detectors).

Legge di Mosely : $E \approx Z^2$

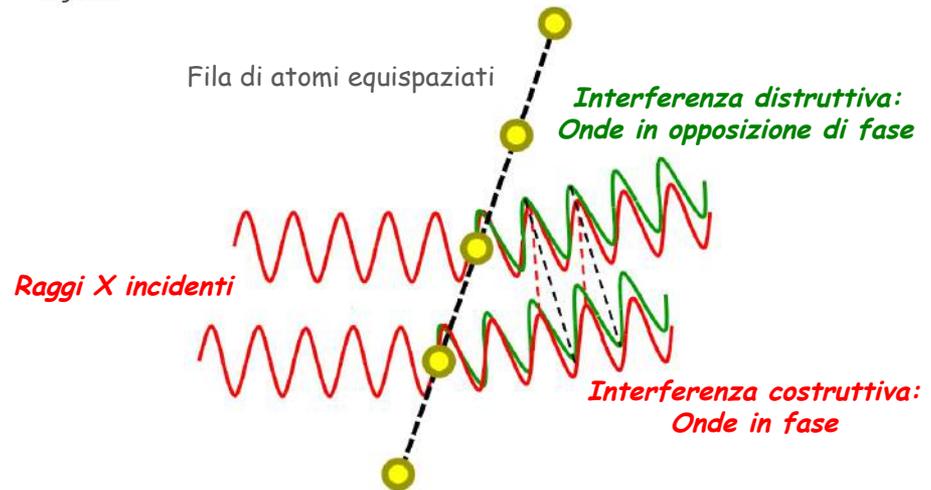


Cristallografia e raggi X



N. Jones, Nature 505, 602 (2014)

Metodo Laue : dopo il cristallo viene posta la pellicola fotografica per misurare i fasci che sono diffratti dal cristallo. I fasci diffratti con **interferenza costruttiva** giacciono su un cono che la pellicola fotografica interseca, dando una **figura di diffrazione a spot**. I cristalli possono essere visti come dei "reticoli" con "fenditure" (gli atomi diffradenti) poste a distanze tali da dare una **figura di diffrazione**. L'interazione dei raggi X con gli atomi, (in realtà con i loro elettroni) disposti periodicamente nei cristalli e aventi distanze interatomiche confrontabili con la lunghezza d'onda dei raggi X stessi, fa sì che i cristalli si comportino come un **reticolo di diffrazione tridimensionale** rispetto ai raggi X.



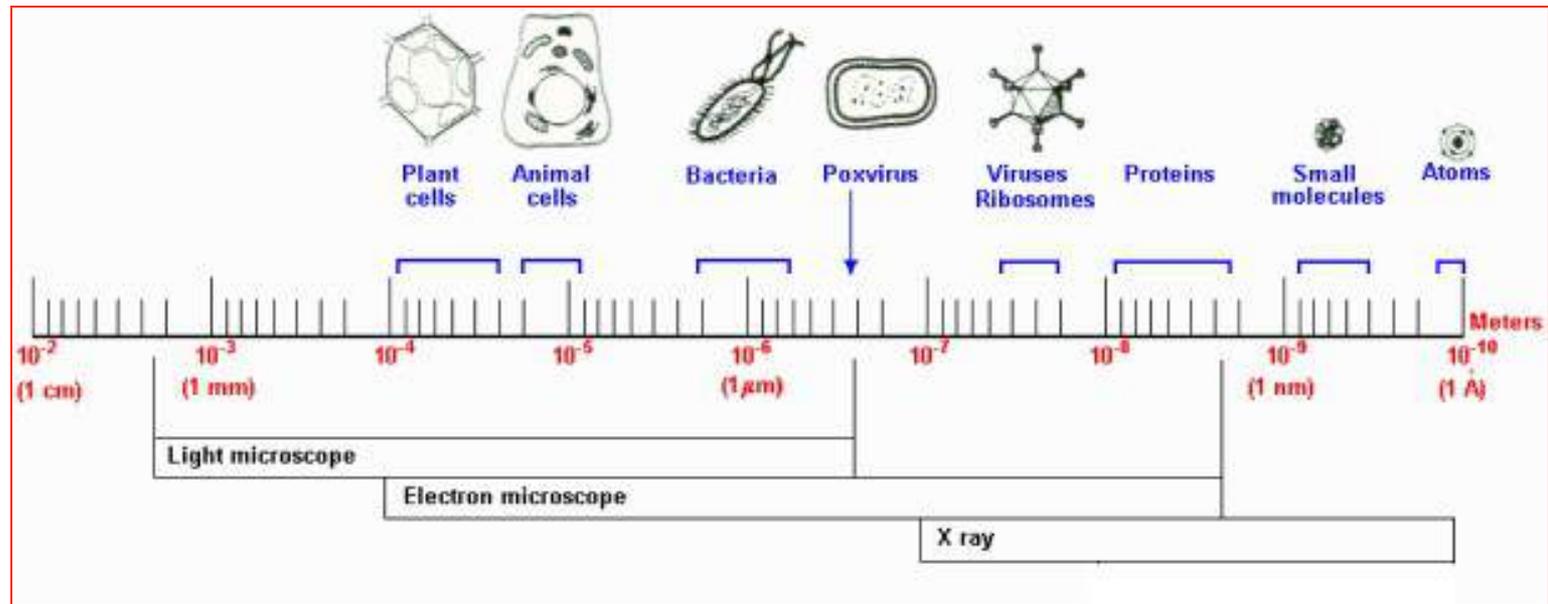
La diffrazione si verifica quando l'onda incontra un ostacolo di dimensioni comparabili alla sua lunghezza d'onda e gli spot regolarmente spazati, sono distanziati fra loro in modo inverso (reciproco) rispetto agli intervalli fra gli "oggetti" originari .

Struttura delle proteine

Le proteine sono tra i composti organici più complessi e sono i costituenti fondamentali di tutte le cellule animali e vegetali.

Le proteine hanno una organizzazione tridimensionale di atomi (struttura) molto complessa a cui è associata sempre una funzione biologica.

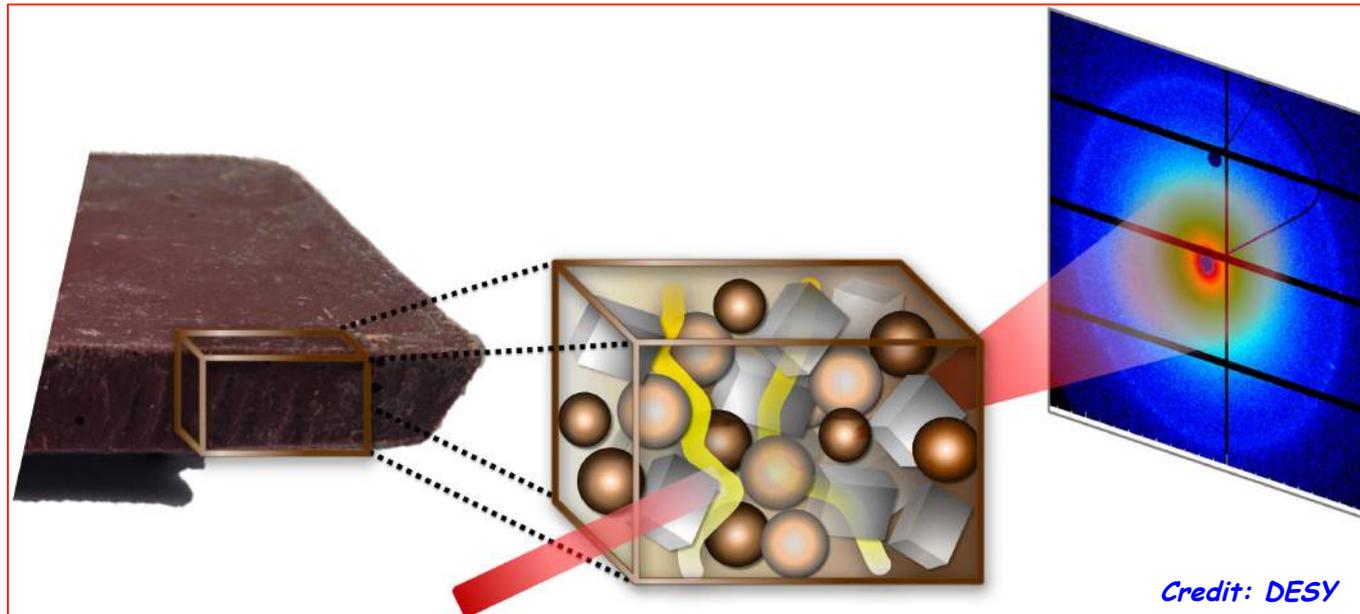
Le proteine sono macromolecole che consistono di una o più catene polipeptidiche aggregate in una struttura tridimensionale articolata su 4 livelli.



Spettro elettromagnetico e dimensioni

Raggi X e cioccolata

Il burro di cacao, il più importante ingrediente del cioccolato, forma sei tipi differenti di cristalli, ma solo uno fonde piacevolmente in bocca ed ha quella lucentezza superficiale e croccantezza che lo rendono così buono. Purtroppo questo cristallo "goloso" non è così stabile e tende a trasformarsi nella forma più stabile, opaca, con una tessitura morbida, che fonde lentamente in bocca, producendo una sensazione sgradevole e sabbiosa in bocca. Fortunatamente la trasformazione è lenta, ma se il cioccolato è conservato per lungo tempo in un luogo tiepido, può formare delle "infiorescenze", sottili residui bianchi risultanti dalla ri-cristallizzazione del burro di cacao. I mastri cioccolatai usano complessi processi di cristallizzazione per ottenere la forma cristallina desiderata dai buongustai e dai consumatori.



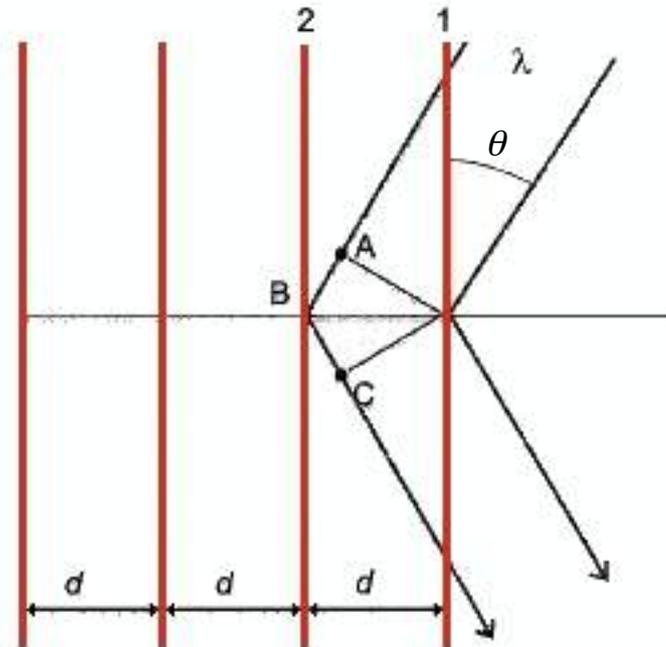
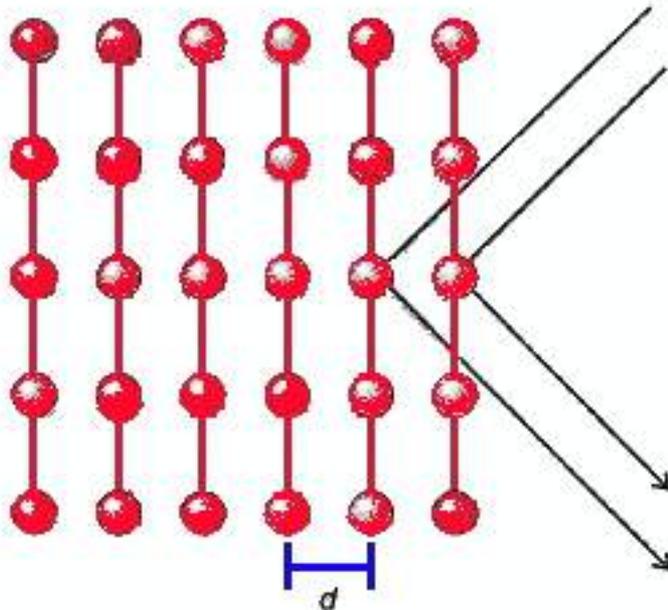
Appendici II

- *Diffrazione*
- *Luce*
- *Water-window e raggi X molli*
- *Monocromatore a doppio cristallo*
- *Rivelatori per raggi X*
- *Camera ad ionizzazione*

Diffrazione X da cristallo

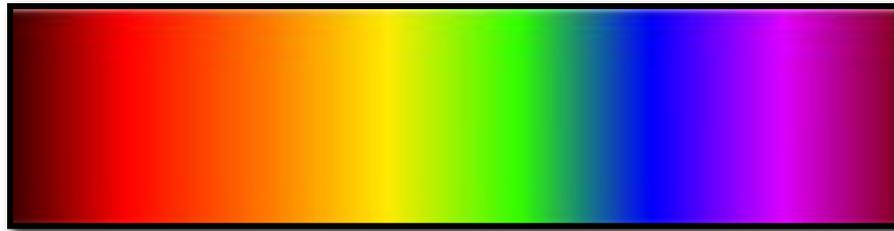
$$2d\sin\theta = n\lambda$$

Per misurare la distanza interatomica di un cristallo (d) occorre una 'luce' con lunghezza d'onda (λ) confrontabile con le dimensioni della struttura atomica. I fronti d'onda riflessi dai piani consecutivi (1 e 2) si sommano se le differenze dei loro cammini (ABC) sono un multiplo intero n di λ . Con una semplice costruzione geometrica si ottiene la legge di Bragg! Poiché il seno non può avere un valore > 1 , la minima distanza investigabile è: $n\lambda/2$. Di fatto per investigare un parametro strutturale occorre un λ minore della sua grandezza!

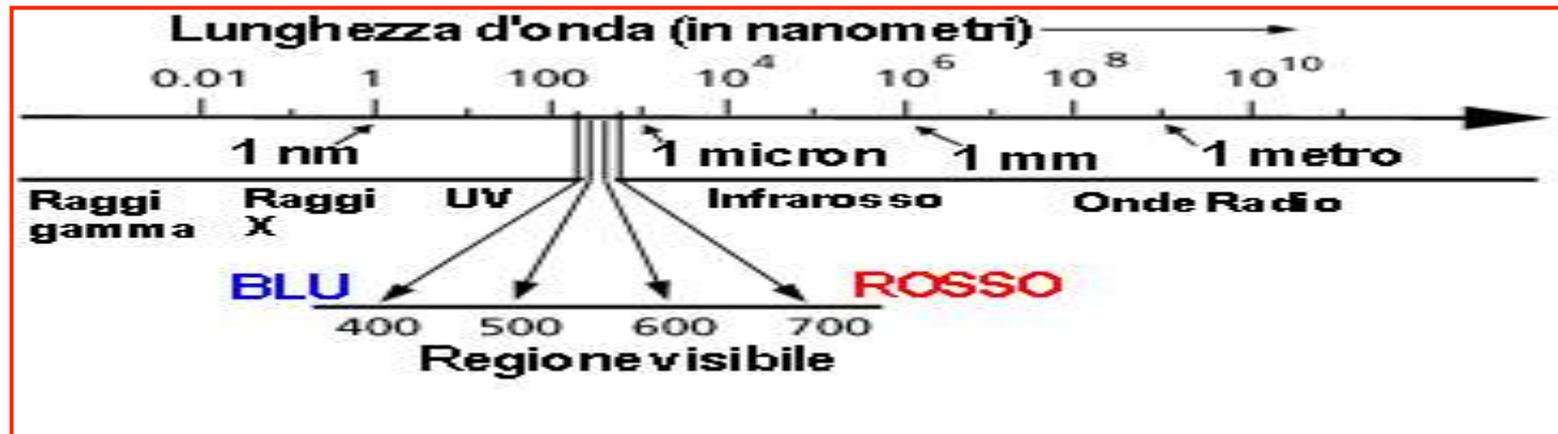


La luce

La luce nella sua normale accezione e' quella parte dello spettro elettromagnetico (insieme di tutti i tipi di radiazione) che e' visibile dall'occhio umano.



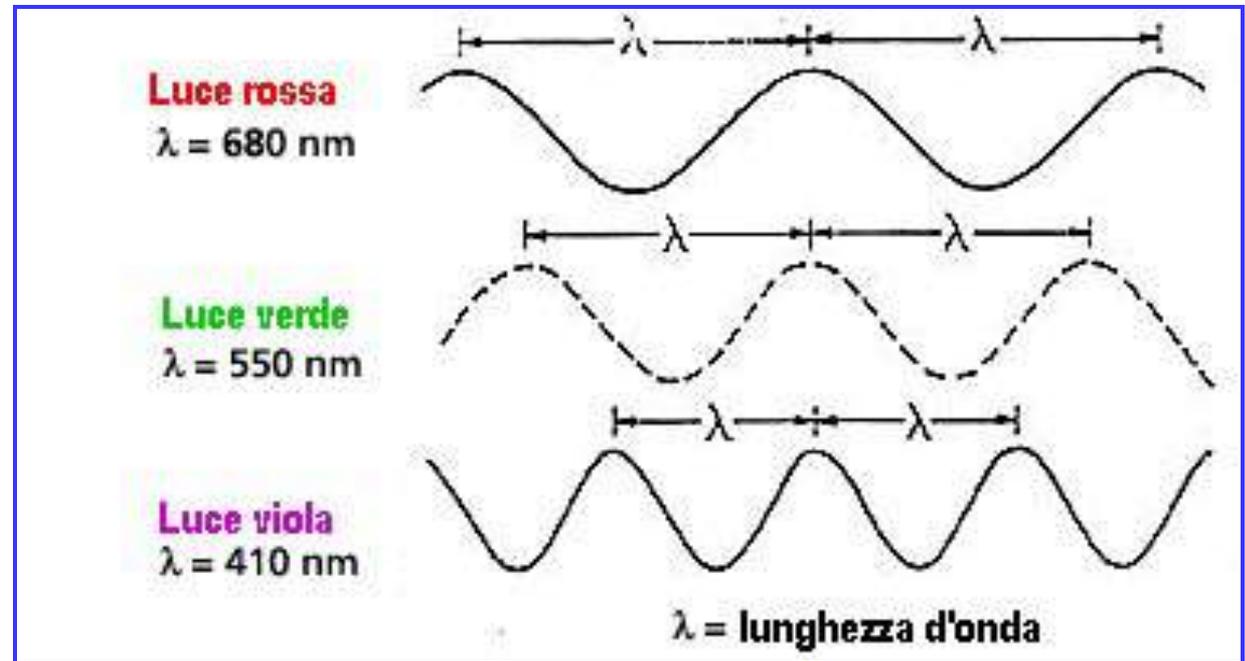
Di fatto la *luce visibile e' solo una piccola parte dello spettro elettromagnetico*. Le altre parti dello spettro sono note come *onde radio, microonde, radiazione ultravioletta, raggi X e raggi gamma*.



Radiazione, luce e onde

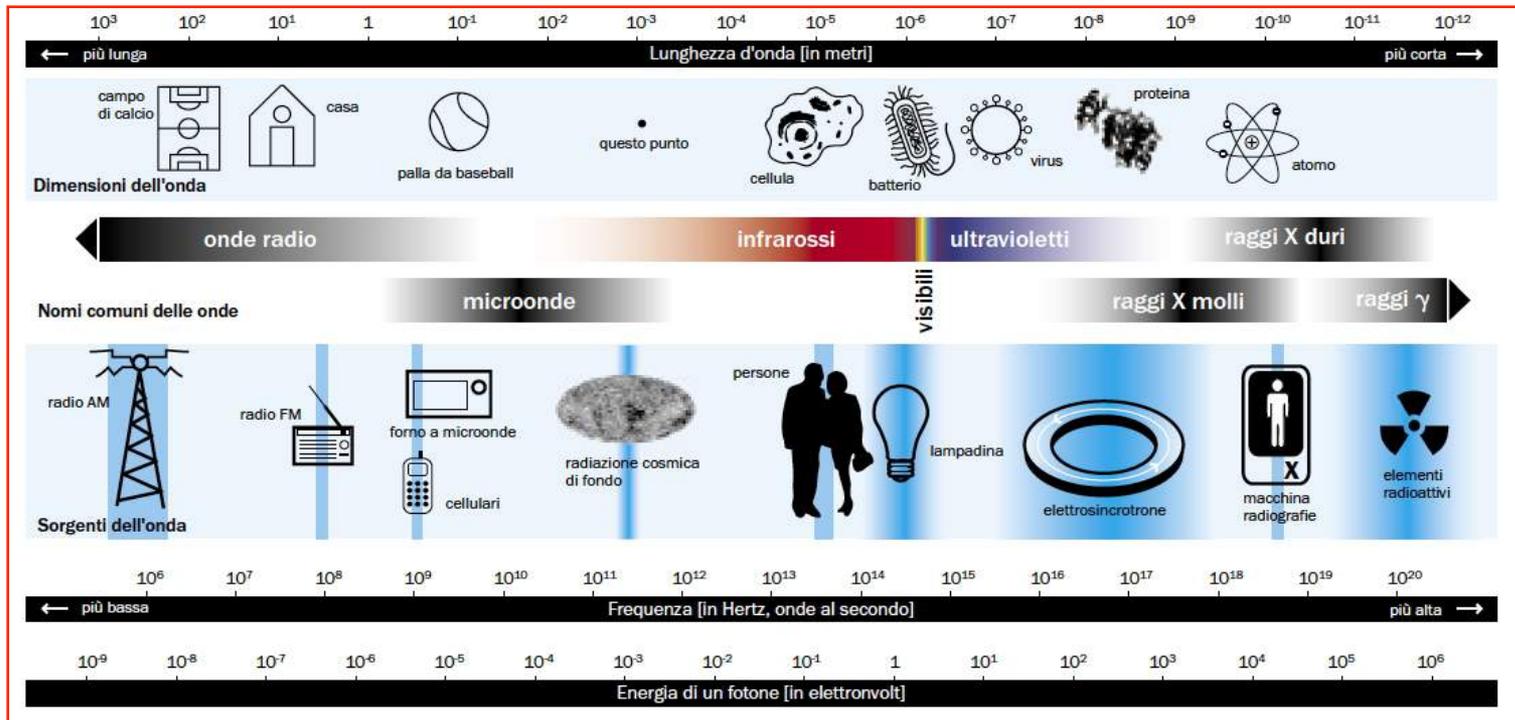
I vari tipi di *radiazione* rappresentano in senso più ampio particolari tipi di luce classificati in base alle loro *definite frequenze e lunghezze d'onda associate*.

La *lunghezza d'onda* è la distanza tra due creste consecutive di un'onda sinusoidale, essa viene rappresentata con la lettera greca lambda (λ) e la sua unità di misura è il *nanometro* (unità di lunghezza ed è pari a 10^{-9} m ossia un miliardesimo di metro).



I nostri occhi percepiscono i cambiamenti di frequenza della luce visibile, attivando la percezione cerebrale, sotto forma di cambiamenti di colore

Spettro elettromagnetico



Lo spettro elettromagnetico è costituito da un *insieme continuo di frequenze* (ν). La frequenza o numero di oscillazioni effettuate dall'onda nell'unità di tempo, si misura in Hertz (Hz). Connessa con la frequenza è la *lunghezza d'onda* (λ):

$$\lambda \nu = c \quad \text{dove } c \text{ e' la velocita' della luce.}$$

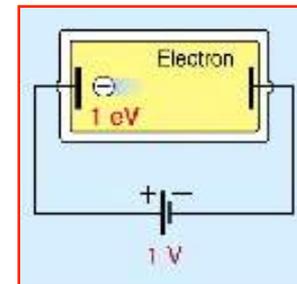
Queste due grandezze sono connesse con l'energia trasportata dall'onda: l'energia associata alla radiazione elettromagnetica è infatti direttamente proporzionale alla frequenza.

Energia

Radiazione = onda elettromagnetica = campo elettromagnetico oscillante, che si propaga trasportando energia.

*L'energia si misura in **eV** - electron volt definito come **l'energia cinetica** guadagnata da un elettrone passando in una differenza di potenziale di un Volt.*

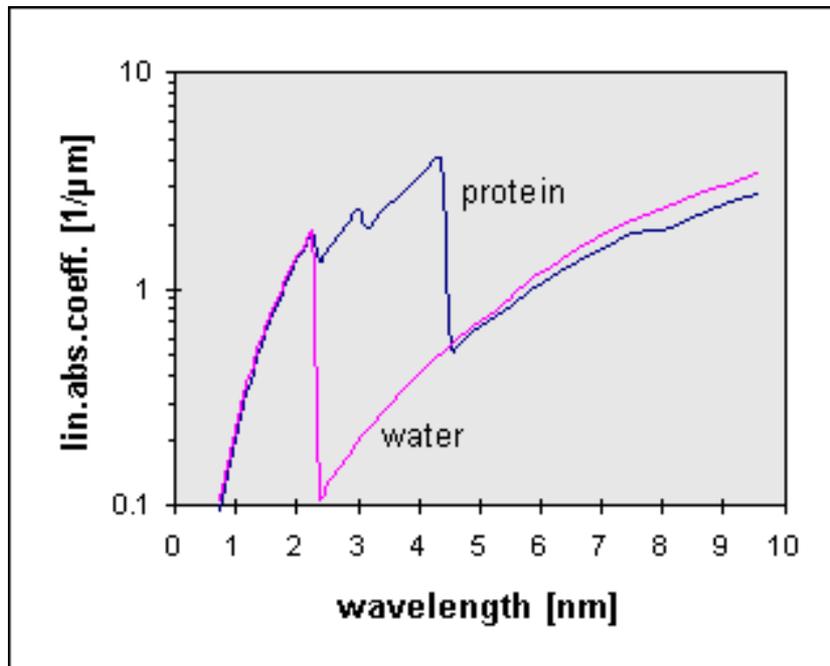
$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ Joules}$$



Water-window e raggi X molli

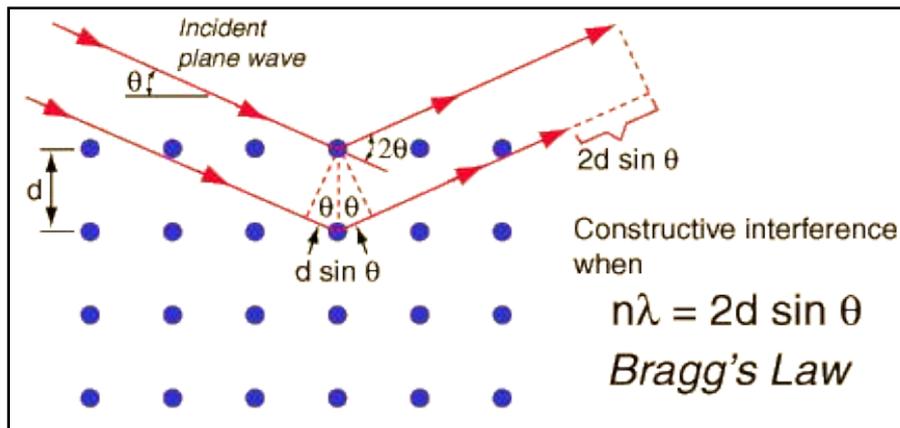
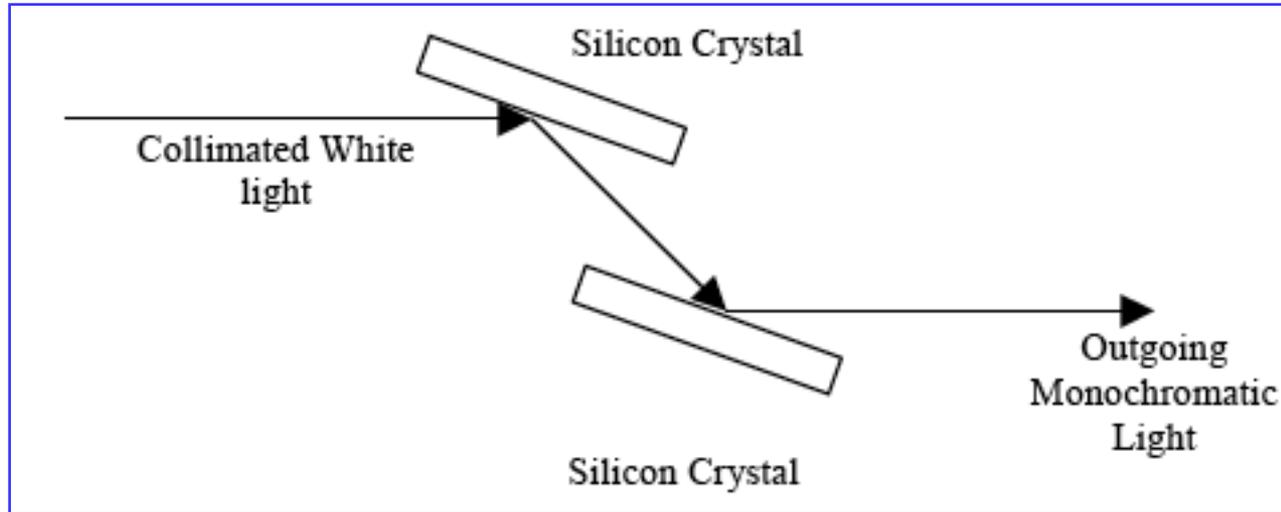
Questo intervallo di energia include le **soglie di assorbimento K** (energie di legame delle soglie dei livelli di core' 1s) degli elementi della prima serie del sistema periodico: **carbonio** (285 eV), **azoto** (410 eV) e **ossigeno** (545 eV).

L'accessibilità a queste soglie con fasci di fotoni estremamente intensi, apre notevoli possibilità nello studio di materiali organici, polimerici e nei sistemi biologici.



Particolarmente importante è l'intervallo 300-500 eV (**water window**) dove il carbonio (ovvero i materiali organici) assorbe la radiazione e l'ossigeno (ovvero l'acqua) è trasparente.

Monocromatore a doppio cristallo



$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \text{Bragg's Law}$$

Rivelatori per raggi X

Classificazione principale

CONTATORI

contano singoli fotoni di una certa energia

INTEGRATORI

generano segnali la cui ampiezza è proporzionale al flusso di fotoni

Scelta

Tipo di misura

Informazione

Flusso, energia, posizione, tempo, ...

Alcune proprietà :

Efficienza di rivelazione

Frazione percentuale di fotoni che produce un segnale rivelabile rispetto al numero totale di fotoni che entrano nel rivelatore

Intervallo dinamico

Intervallo di livelli di segnale entro il quale il rivelatore fornisce una risposta lineare

Efficienza quantica

Numero di portatori di carica/fotone

Risoluzione

Rumore (noise)

Fluttuazioni del segnale rivelato dipendenti da cause diverse, che impongono un limite all'intensità minima di fotoni rivelabile

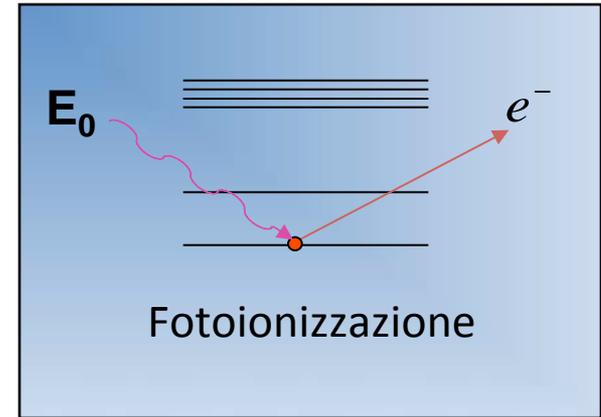
Integratori

INTEGRATORI

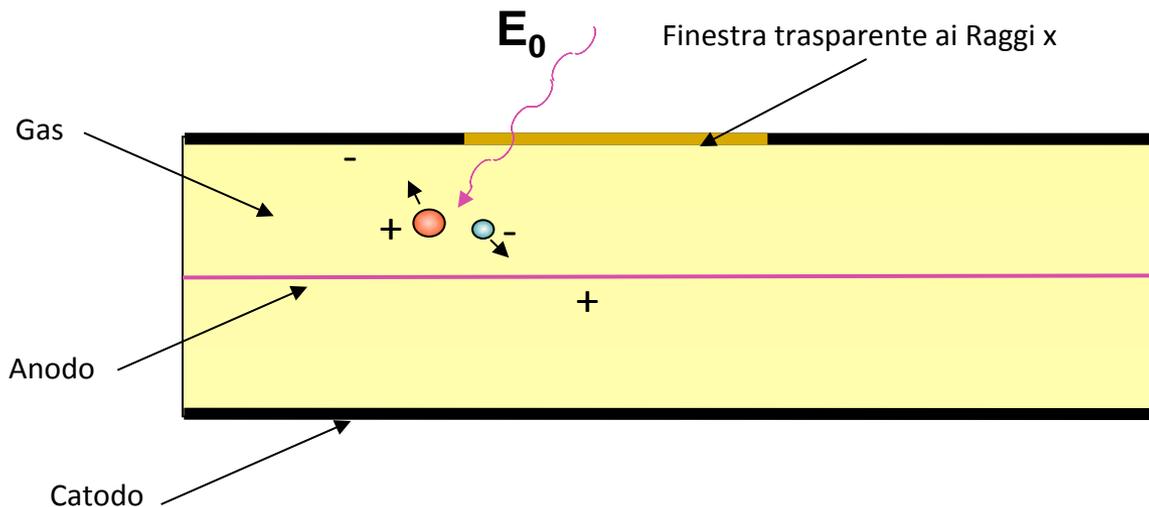
Caratteristiche principali

- Rumore di lettura
read out noise
- Elevata dinamica
- Sorgenti luminose

Processo primario: assorbimento



Rivelatori a gas: schema di principio



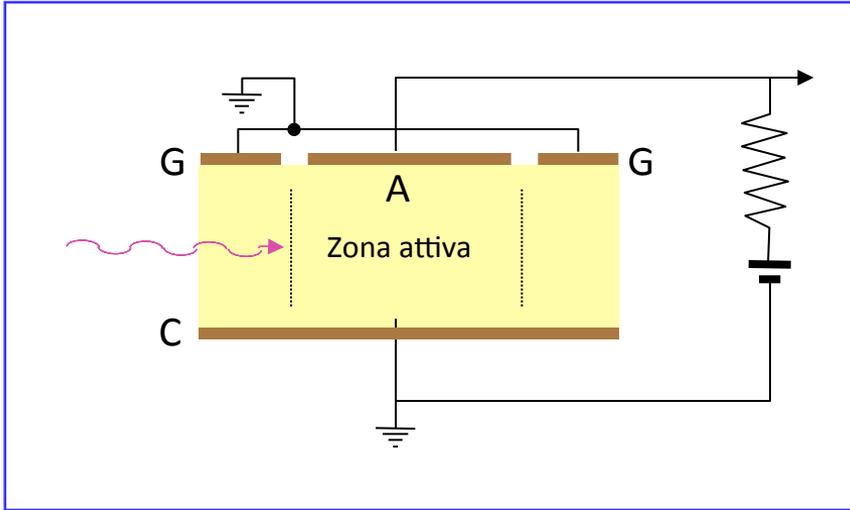
Assorbimento in un un gas \rightarrow ioni + elettroni

● Ione positivo

● Fotoelettrone di energia:

$$E = E_0 - E_b$$

Camera ad ionizzazione



G - anello di guardia
A - Anodo
C - catodo

L' **anello di guardia** riduce le distorsioni del campo elettrico ai confini della regione attiva. Gli **elettroni prodotti** dalla ionizzazione vengono **raccolti dall'anodo**.

Gli **ioni**, che hanno una mobilità molto minore di quella degli elettroni vengono raccolti dal **catodo**

La scelta del **gas** e della **finestra** viene **ottimizzata** in funzione **dell'intervallo di lunghezze d'onda di operazione** del rivelatore

Numero, N , di coppie elettrone-ione prodotte:

$$N \cong \frac{E}{\langle V_i \rangle}$$

Nel caso il **flusso di fotoni** sia **completamente assorbito** entro la camera la **corrente misurata, i** , e':

$$\langle V_i \rangle$$

Potenziale di ionizzazione efficace, cioè un valor medio tra i potenziali di ionizzazione di più elettroni dello stesso atomo

$$i = N e = I_0 T \gamma e$$

I_0 - intensità della radiazione incidente (ph/s)

T - trasmittanza della finestra

γ - efficienza di fotoionizzazione del gas (elettroni/ph)

http://web.infn.it/Dafne_Light/



DAFNE-LIGHT

INFN-LNF Synchrotron Radiation Facility

INFN

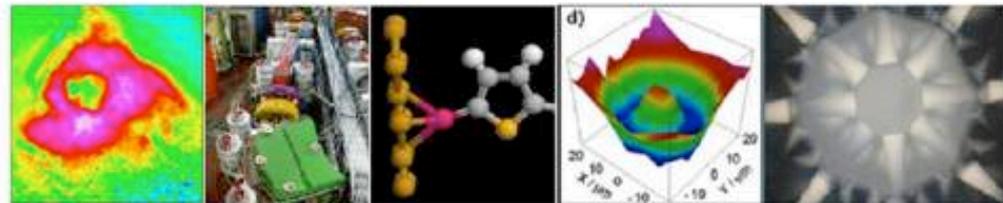
LNf

DAFNE Storage Ring

DAFNE-Light

Menu

- Home
- Beamlines
- Organization
- Secretariat
- Technical Staff
- General publications
- Highlights
- DAFNE storage ring parameters
- DAFNE status
- How to apply



DAFNE-Light

DAFNE-Light is the Synchrotron Radiation Facility at the Laboratori Nazionali di Frascati (LNF).

Three beamlines are operational using, in parasitic and dedicated mode, the intense photon emission of DAFNE, a 0.51 GeV storage ring with a routinely circulating electron current higher than 1 Ampere. Two of these beamlines (**DXR1** and **DXR2**) have one of the DAFNE wiggler magnets as synchrotron radiation source, while the third beamline (**SINBAD-IR**) collects the radiation from a bending magnet. New **XUV** bending magnet beamlines are nowadays under construction.

The beamlines **DXR1** and **SINBAD-IR** are open to **external users**.