INTERNATIONAL YEAR OF LIGHT 2015

Acceleratori come sorgenti di luce

Antonella Balerna

INFN - Laboratori Nazionali di Frascati

OPEN DAY – INFN Laboratori Nazionali di Frascati – 23 Maggio 2015

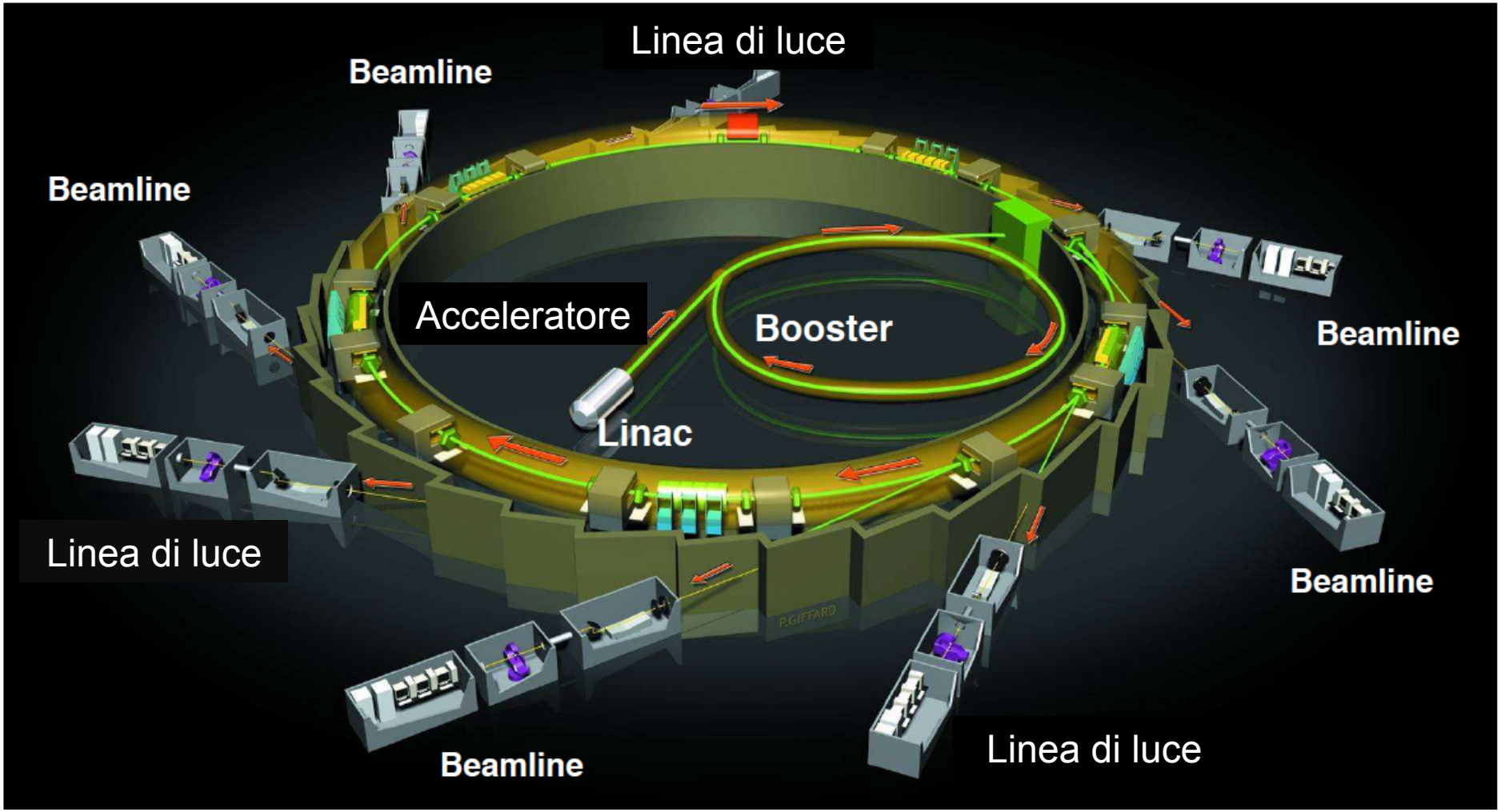
Sorgenti di luce

*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.

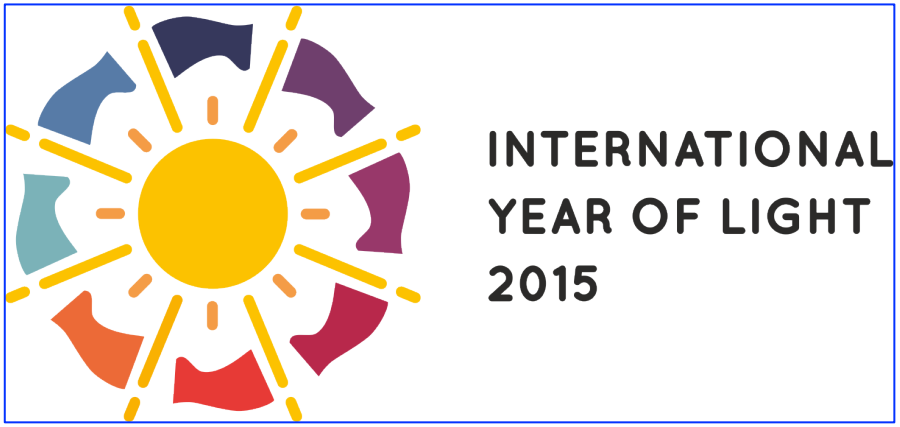
Acceleratori come sorgenti di luce di sincrotrone



Scopriamo insieme:

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

2015 – Anno Internazionale della Luce



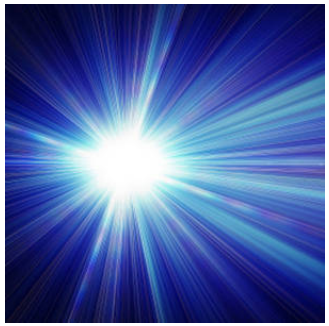
L'Assemblea Generale delle Nazioni Unite ha proclamato il 2015 Anno Internazionale della Luce e delle Tecnologie Basate sulla Luce.

Nel 2015 ricorrono i seguenti anniversari della fisica:

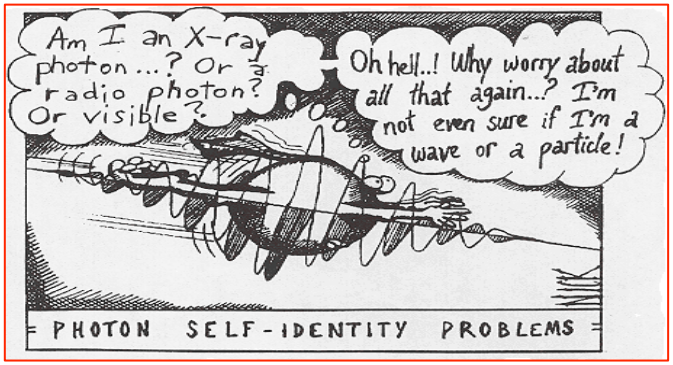
- ***1000 anni*** dalla pubblicazione del ***primo libro sull'ottica*** di Alhazen (1015);
- ***200esimo*** anniversario della ***teoria ondulatoria della luce*** di A.-J. Fresnel (1815);
- ***150esimo*** anniversario della ***teoria elettromagnetica della luce*** di Maxwell (1865);
- ***100 anni*** 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 realtivi 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.

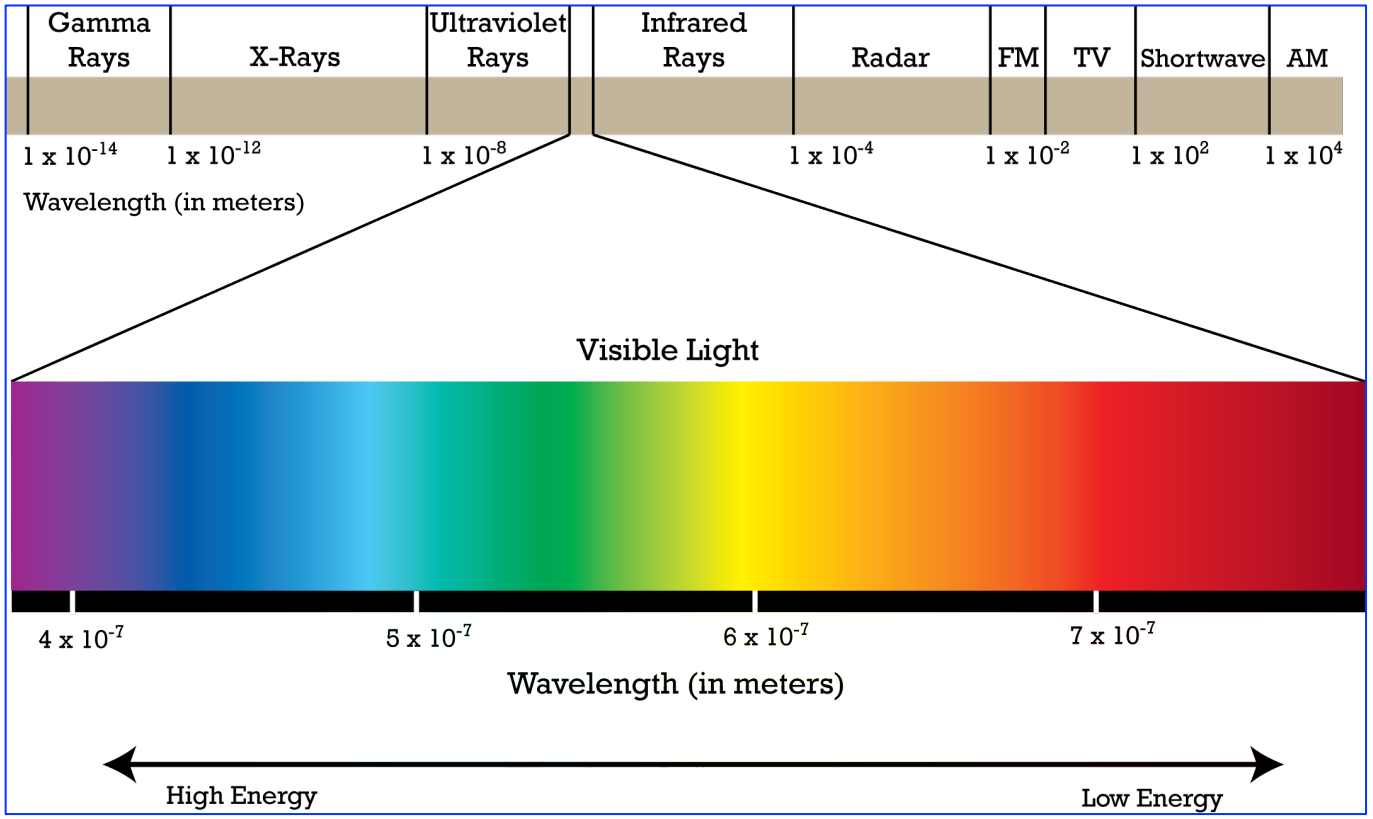
Di solito comunque noi ***non vediamo "la" luce, vediamo "attraverso la" luce***. Non si può apprezzare la bellezza di ***una rosa pensando che il colore rosso è solo il frutto dell'interpretazione del nostro cervello*** di una specifica lunghezza d'onda con picchi a distanza di circa 700 nanometri...

Il potere della luce - Joel Achenbach – National Geographic – 2010

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*.

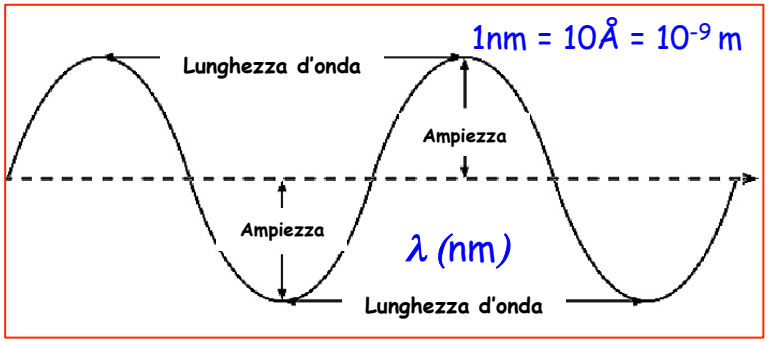
La parte dello spettro elettromagnetico che chiamiamo ***luce visibile*** e' quella che possiamo percepire con i nostri occhi e ha lunghezze d'onda comprese tra ***380 nm*** e ***780 nm***.

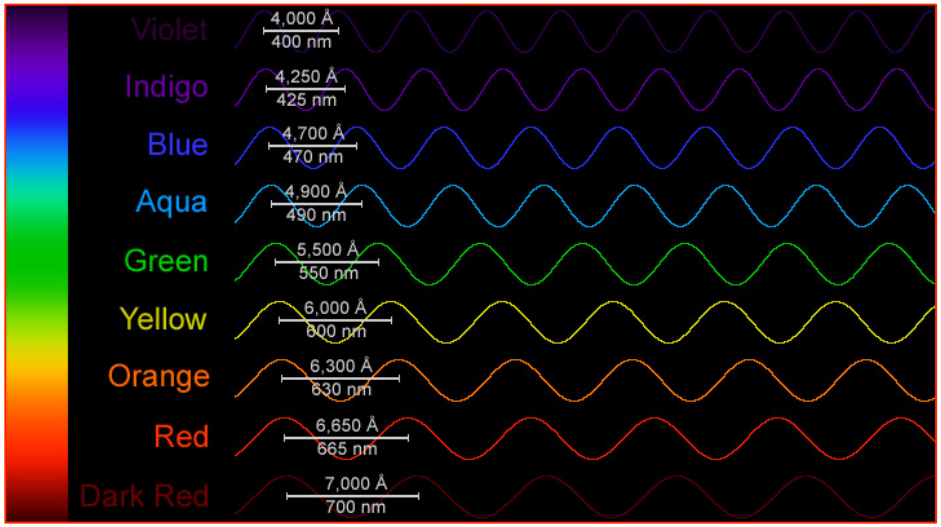


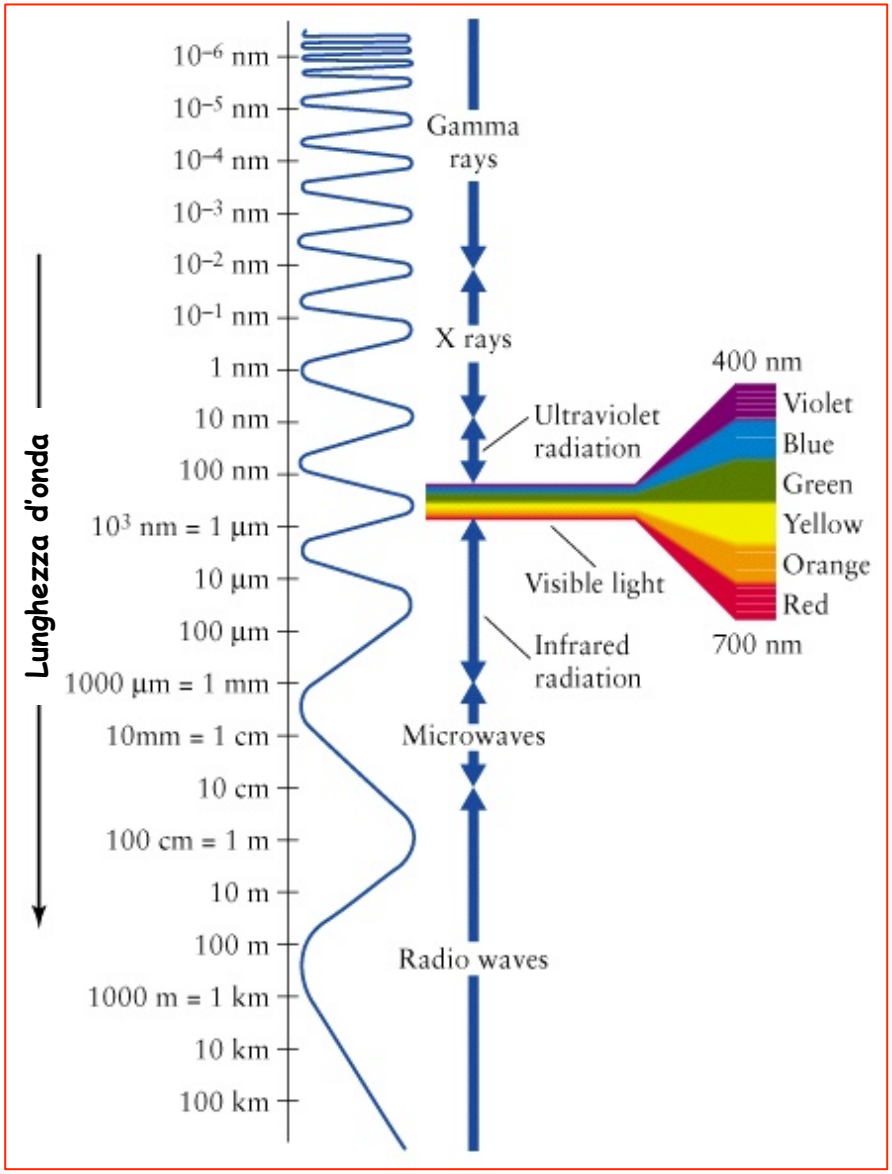
Di fatto la *luce visibile è la parte dello spettro elettromagnetico* alla quale i *fotoricettori nelle nostre retine sono sensibili*. Il *colore è la percezione visiva generata dai segnali nervosi che i fotoricettori della retina inviano al cervello* quando assorbono le radiazioni elettromagnetiche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

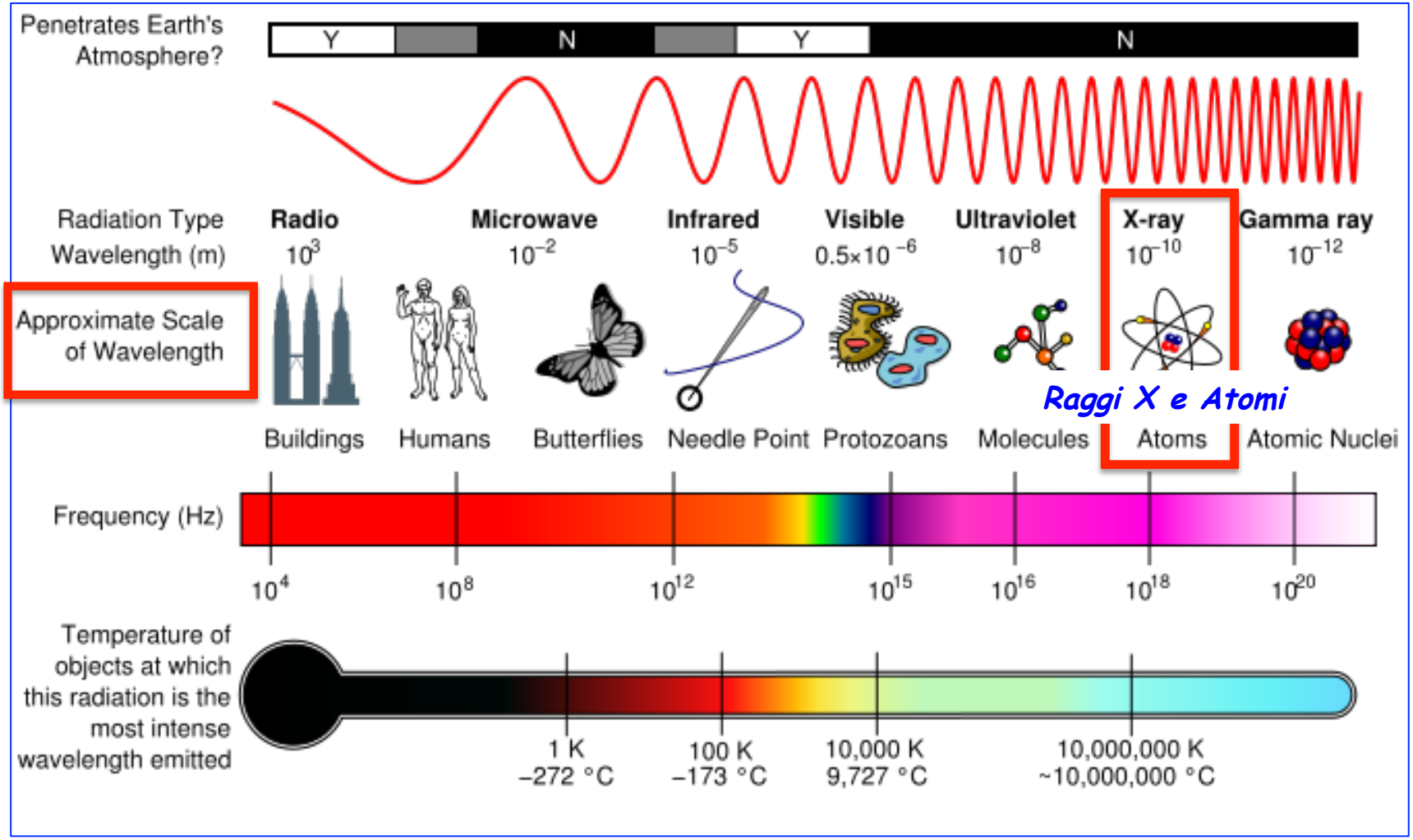






Ai diversi colori corrispondono diverse lunghezze d'onda!

Spettro elettromagnetico e raggi X

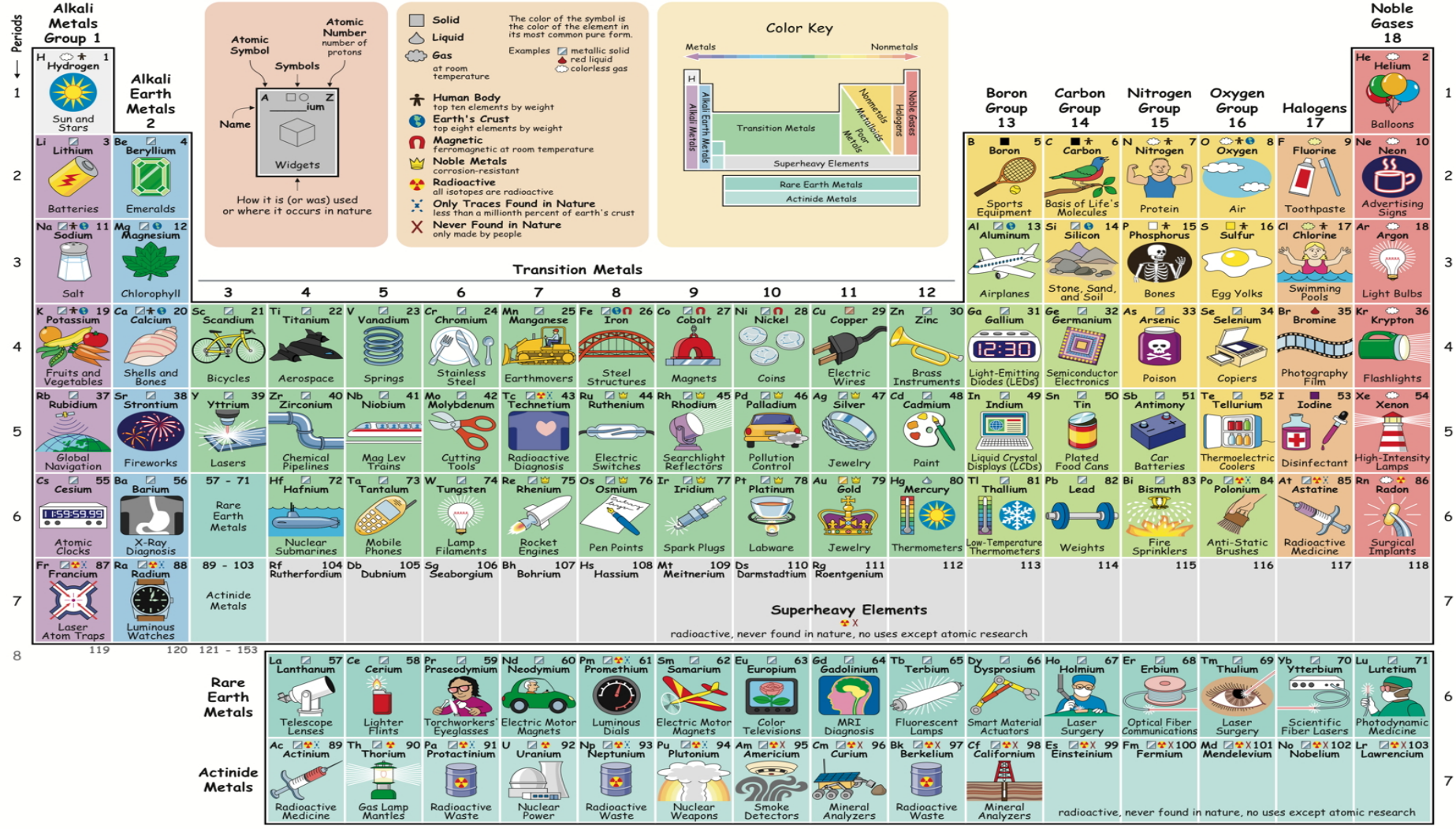


La ***lunghezza d'onda*** (λ) e la ***frequenze*** (ν) (numero di oscillazioni effettuate dall'onda nell'unità di tempo) sono strettamente connesse: più alta è la frequenza più piccola è la lunghezza d'onda. Questo dipende dal fatto che la luce si propaga ad una velocità costante ***c*** (**c = 299792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

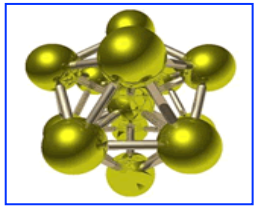
$$\lambda\nu = c.$$

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.***



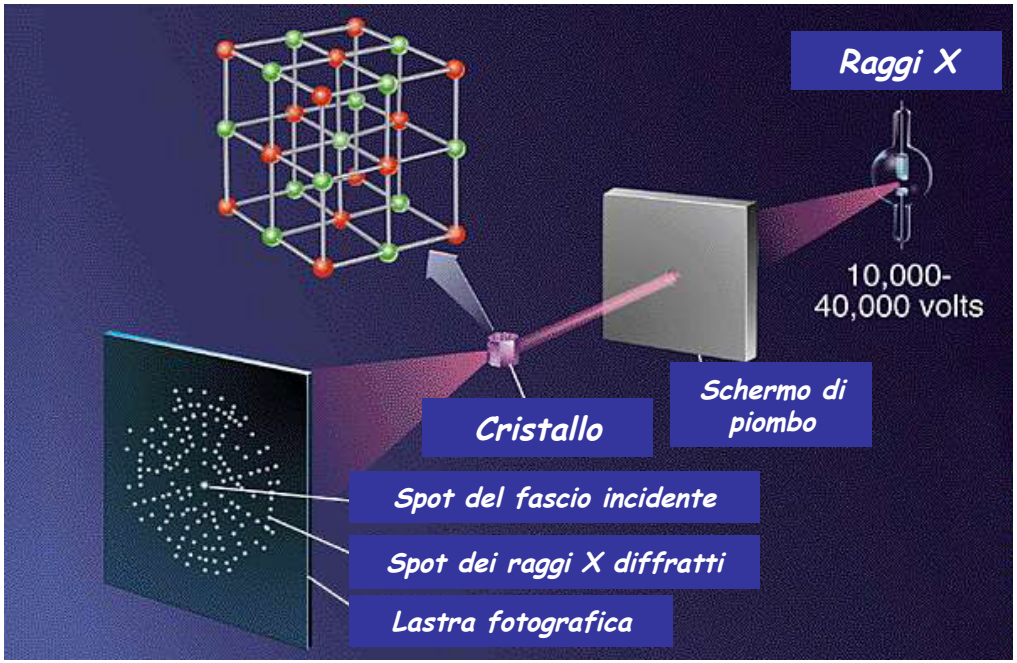
Atomi e raggi X



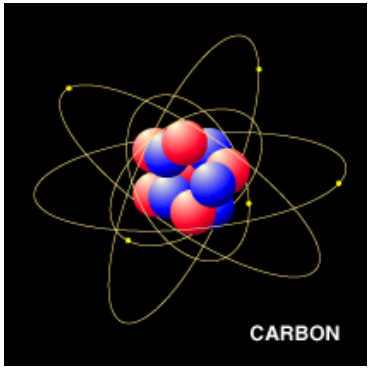
Se si vuole studiare la ***struttura della materia a livello atomico*** e' necessario ***utilizzare radiazione elettromagnetica di lunghezze d'onda dell'ordine di 0.1 nm*** ($1Å = 10^{-10}$ m) ossia ***i raggi X***.

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

Perche' questo e' importante?



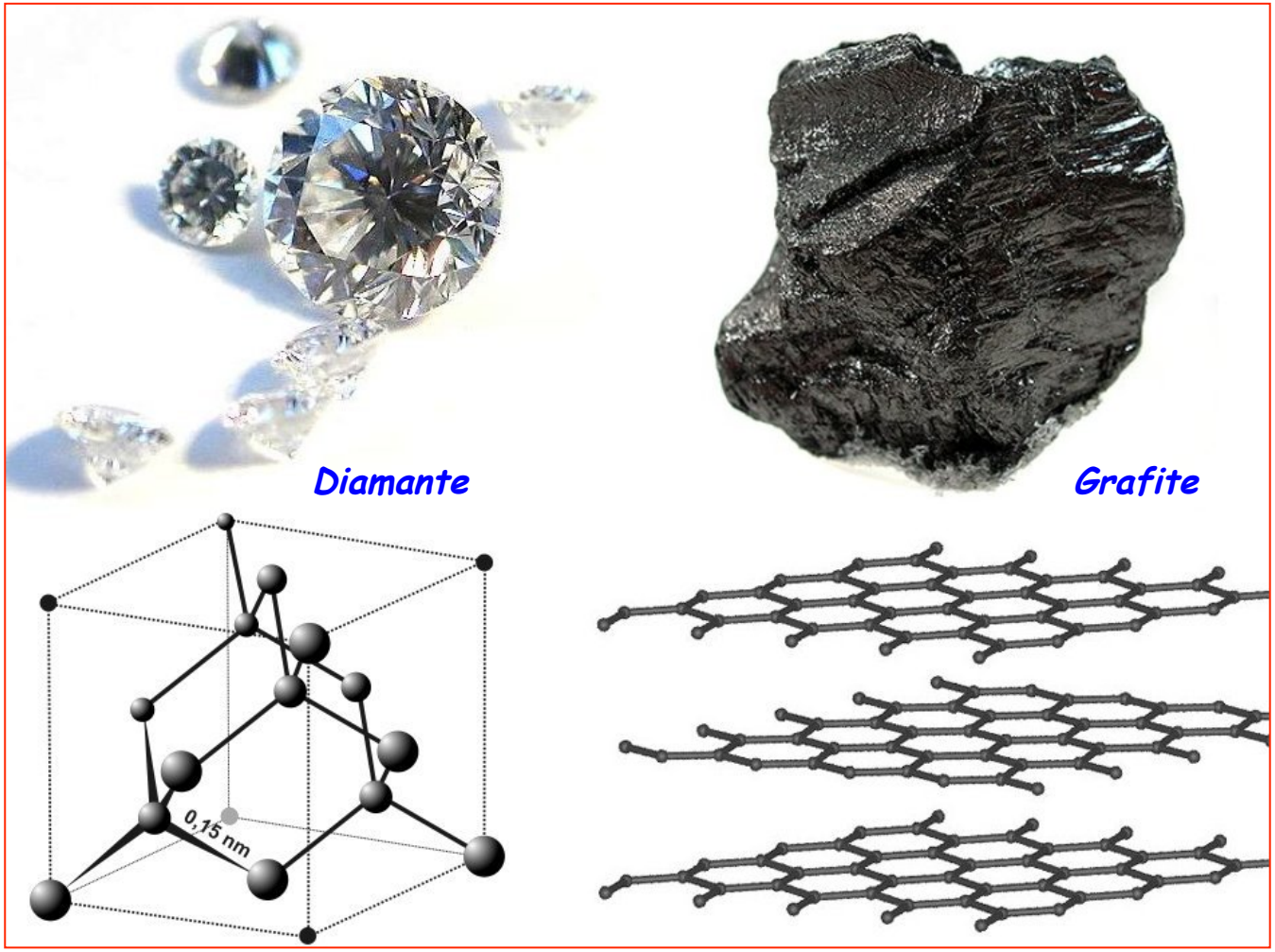
Atomi e raggi X



L'atomo di carbonio.

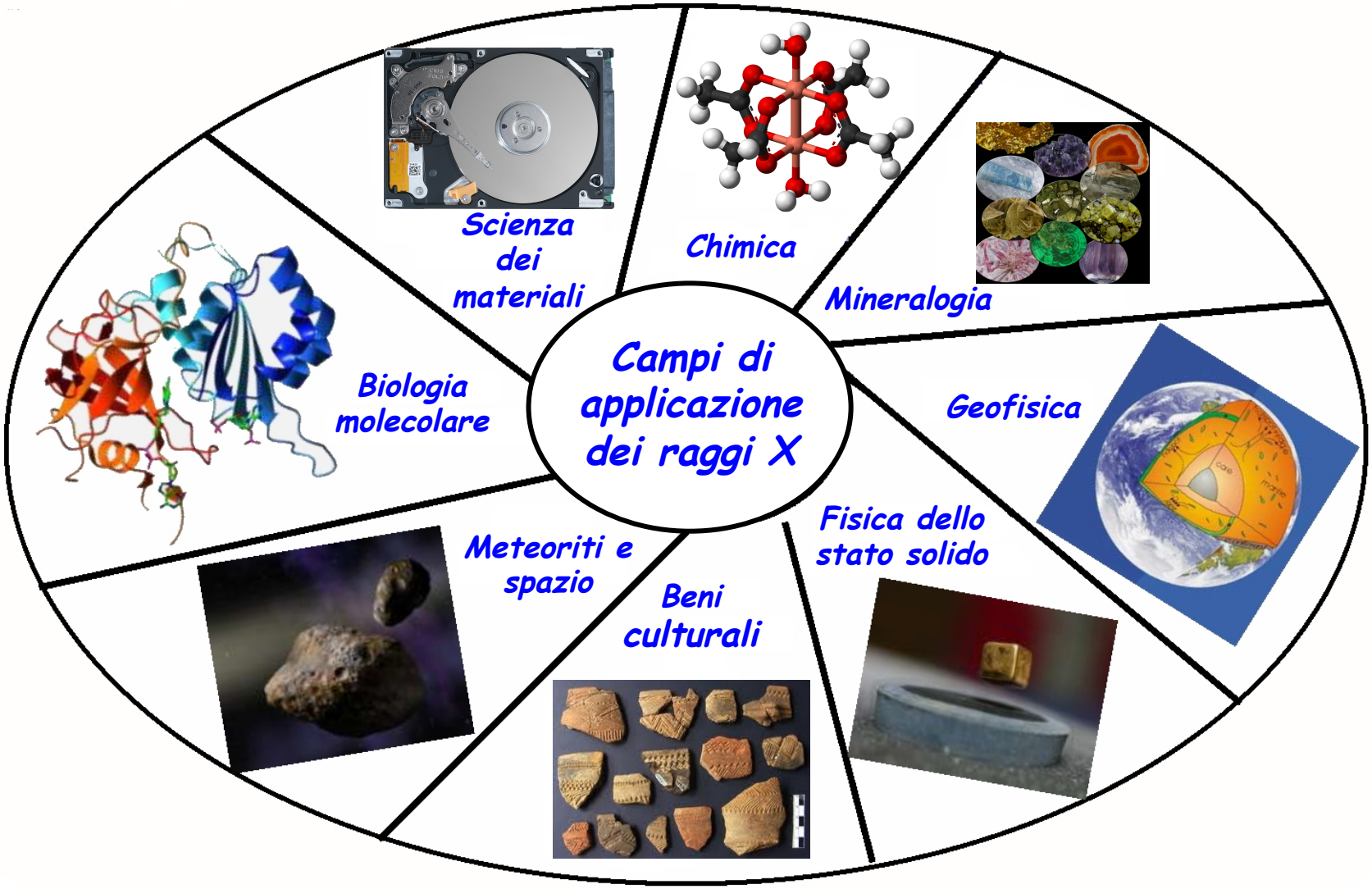
Elemento essenziale per la vita, è per lo più fatto di spazio vuoto.

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

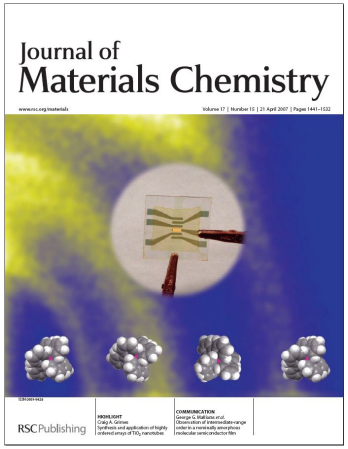
Luce di Sincrotrone

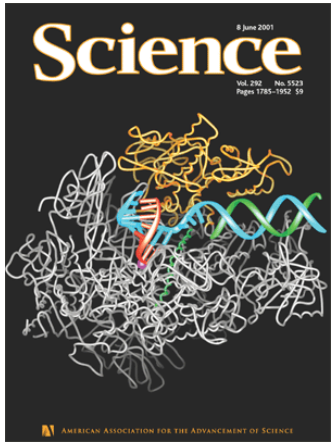
Luce di sincrotrone

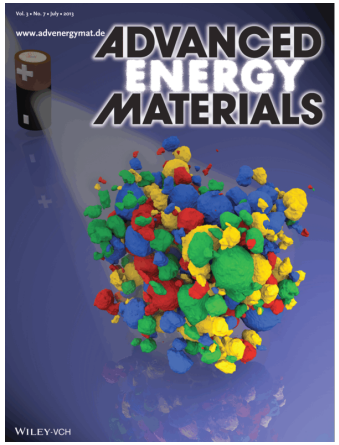
*La **luce di Sincrotrone è uno strumento essenziale per le ricerche in molte discipline scientifiche**.* Questo è in gran parte dovuto alla combinazione di varie importanti caratteristiche delle sorgenti, quali la ***brillanza***, la ***stabilità***, l'ampio ***spettro di energia accessibile***, le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

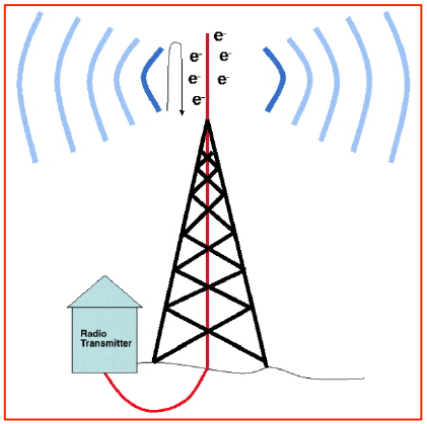






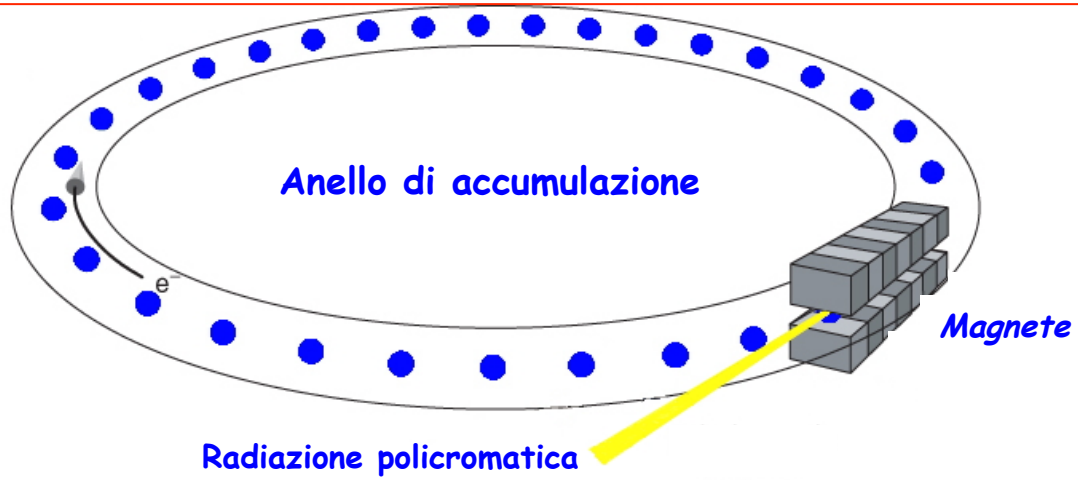
Luce di sincrotrone

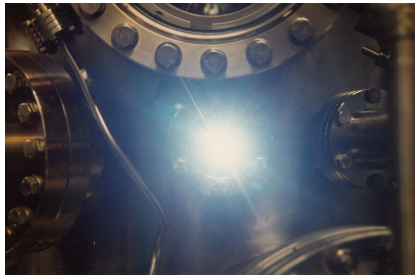
Particelle cariche come elettroni e positroni, se accelerate, emettono radiazione.



$v \ll c$ or $\beta = v/c \ll 1$

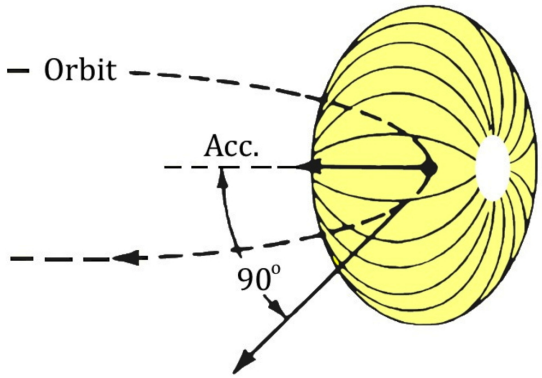
Quando ***particelle cariche, che si muovono a velocita' relativistiche***, ***in acceleratori circolari di particelle come sincrotroni e/o anelli di accumulazione***, sono costrette a cambiare la direzione del loro moto sotto l'azione di ***campi magnetici, la radiazione che emettono prende il nome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





$v \approx c$ or $\beta = v/c \approx 1$

Luce di sincrotrone: fisica



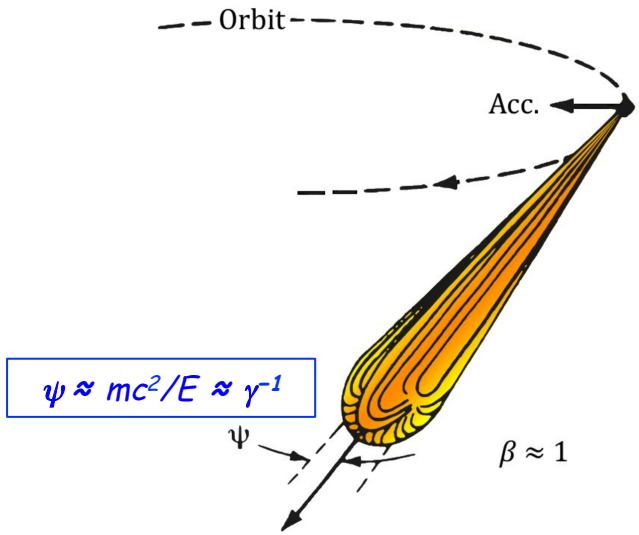
$\beta << 1$ ***Situazione non-relativistica!***

$v << c$ or $\beta = v/c << 1$

$$P = 2\, e^2\, a^2/(3c^3) \quad [W]$$

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.*



$v \approx c$ or $\beta = v/c \approx 1$

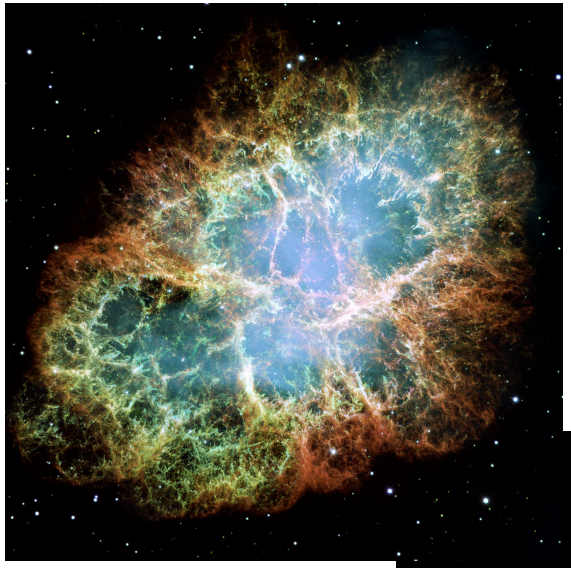
Quando particelle cariche, si muovono a ***velocita' vicine a quelle della luce***, su una traiettoria curva, esse emettono radiazione elettromagnetica nota come ***luce di sincrotrone***. La radiazione e' emessa nella direzione del moto, in uno stretto cono tangente all'orbita degli elettroni.

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

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

1945 Schwinger

La Luce di Sincrotrone naturale

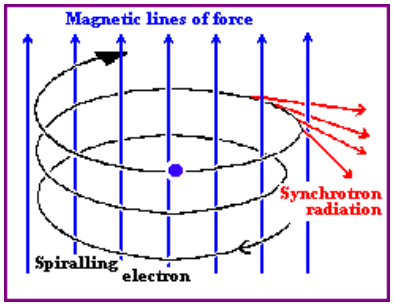


NASA Hubble Space Telescope image of the Crab Nebula (NASA, ESA and Allison Loll/Jeff Hester (Arizona State University)).

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.

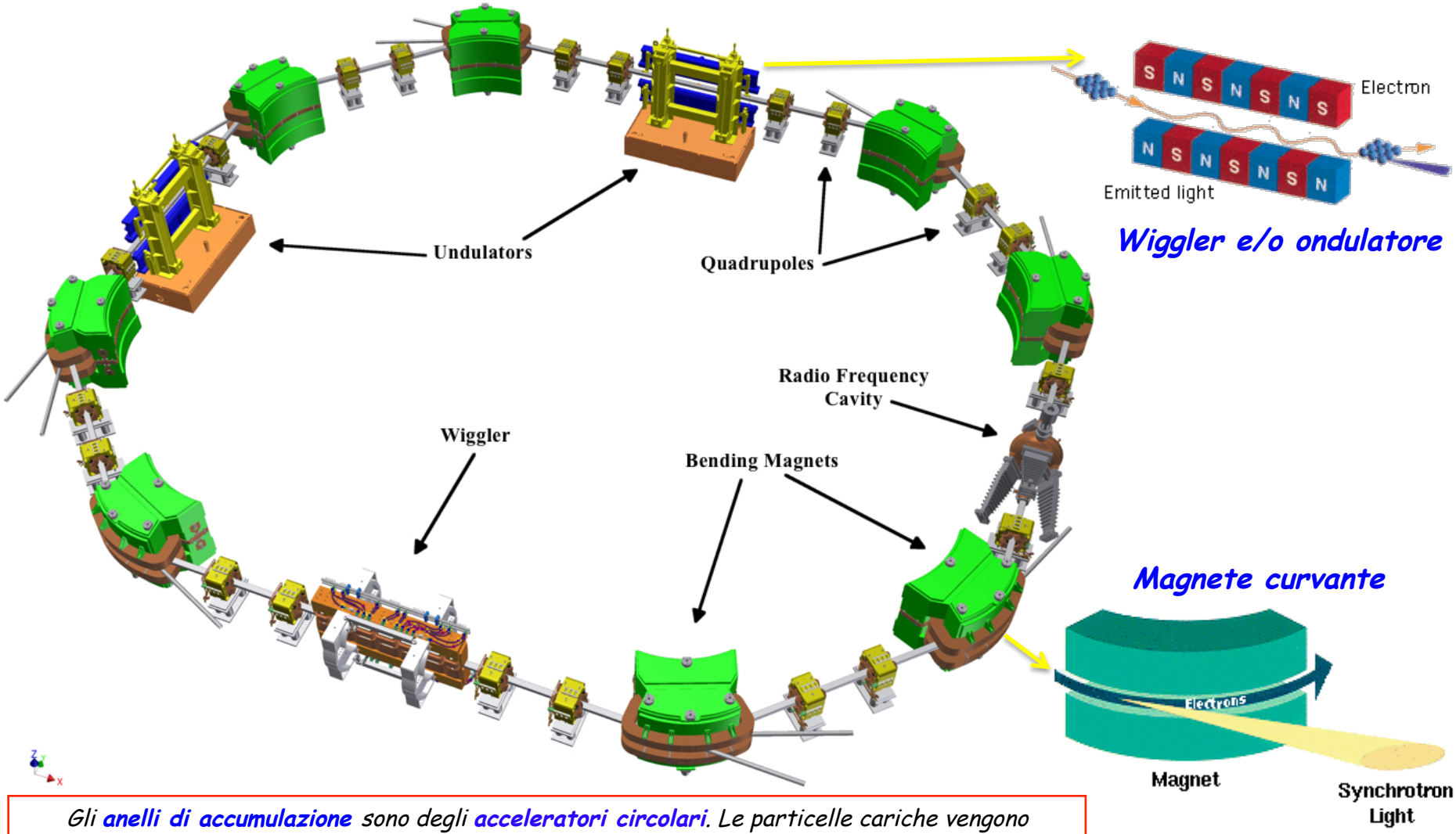
Si tratta di una nuvola di gas in espansione al cui centro c'è ciò che rimane del cuore della stella originario: una stella di neutroni che ruota 30 volte al secondo e ad ogni rotazione emette un fascio di radiazione verso il nostro pianeta, che costituisce la caratteristica emissione pulsata delle stelle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



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

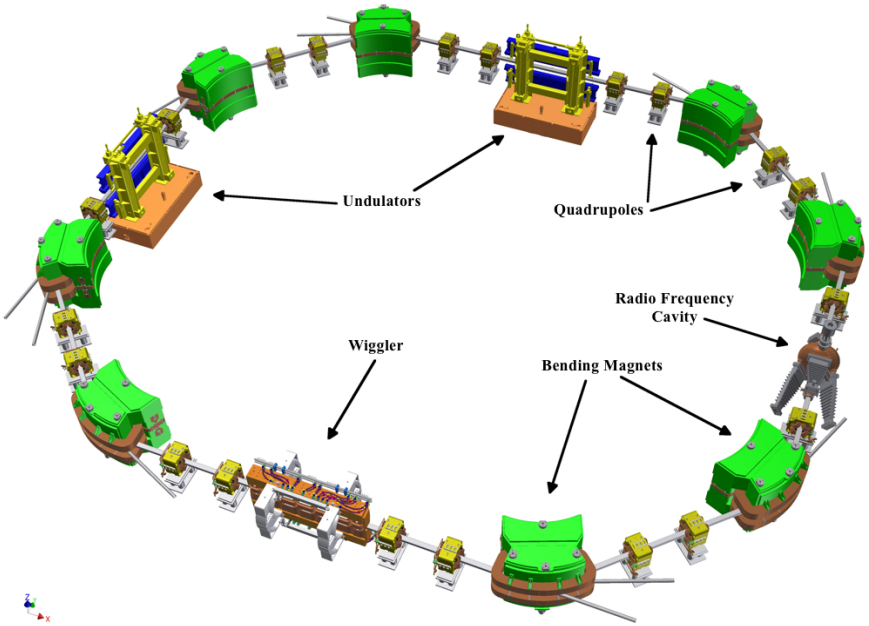
Nel 1953 Iosif Sklovskij propose che la regione diffusa di colore blu fosse generata soprattutto dalla radiazione di sincrotrone, ossia la radiazione prodotta da particelle cariche (in questo caso gli elettroni) che sono costrette a muoversi a velocità prossime alla velocità della luce in traiettorie 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.

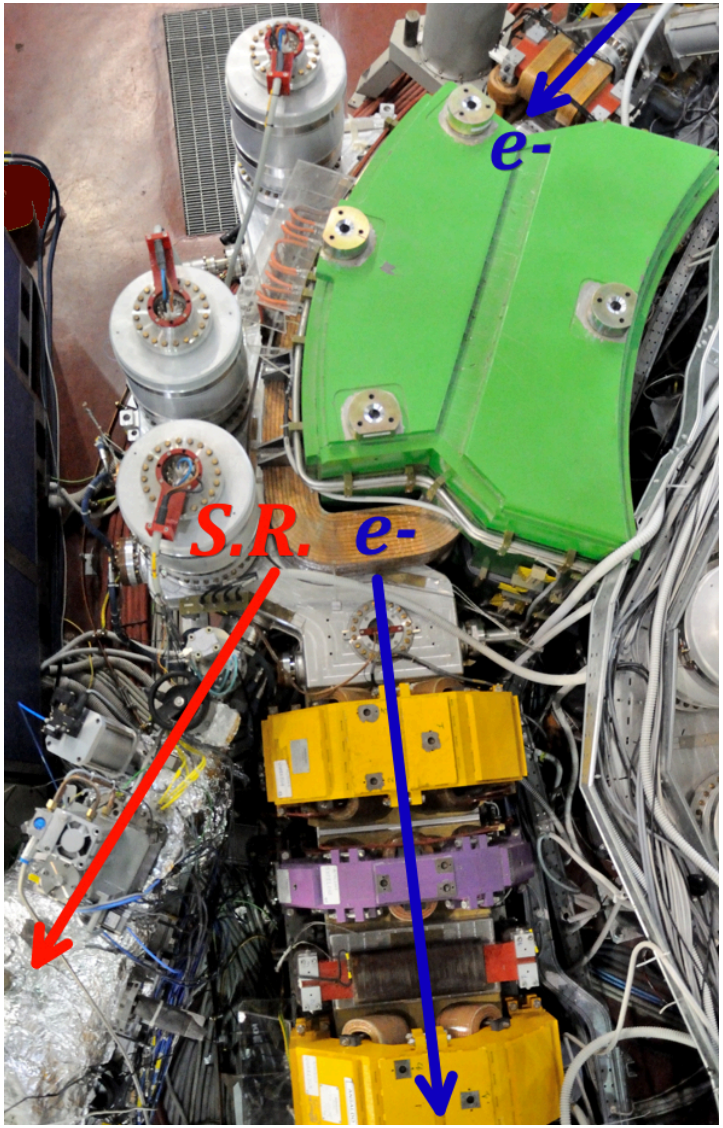
Luce di sincrotrone artificiale e acceleratori circolari di particelle



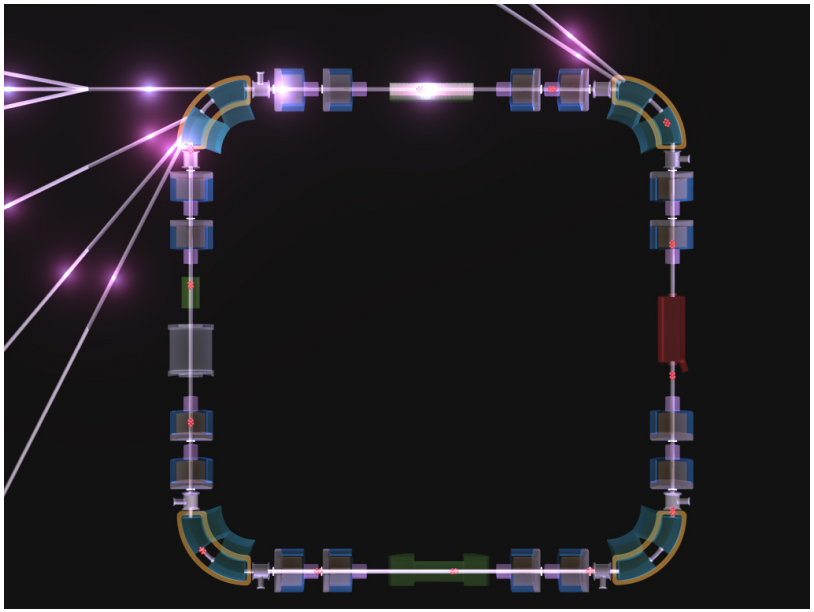
*Gli **anelli di accumulazione** sono degli **acceleratori circolari**. Le particelle cariche vengono **accelerate per mezzo di campi elettrici** e vengono mantenute sulle orbite circolari grazie all'azione di **campi magnetici**. Le particelle sono confinate in un anello in cui c'e' ultra alto vuoto.*

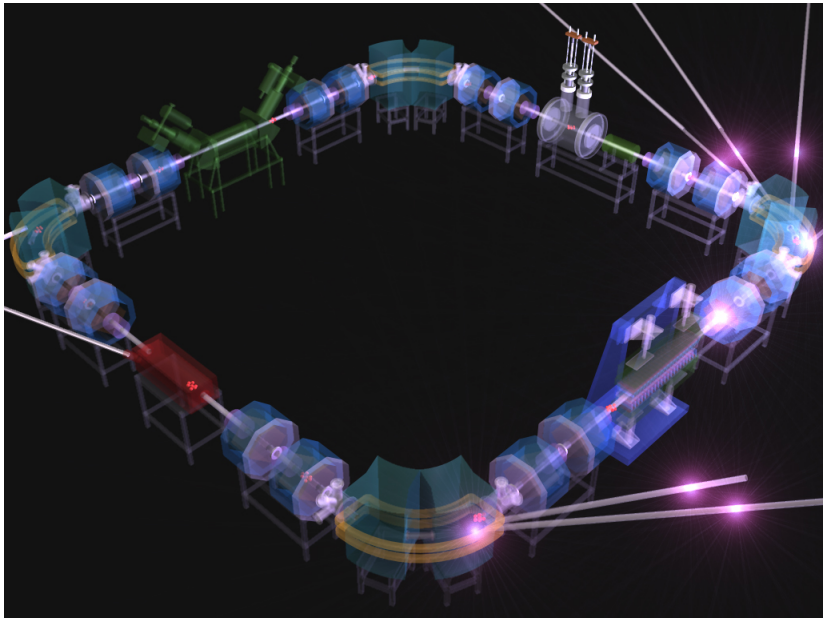
Magneti curvanti

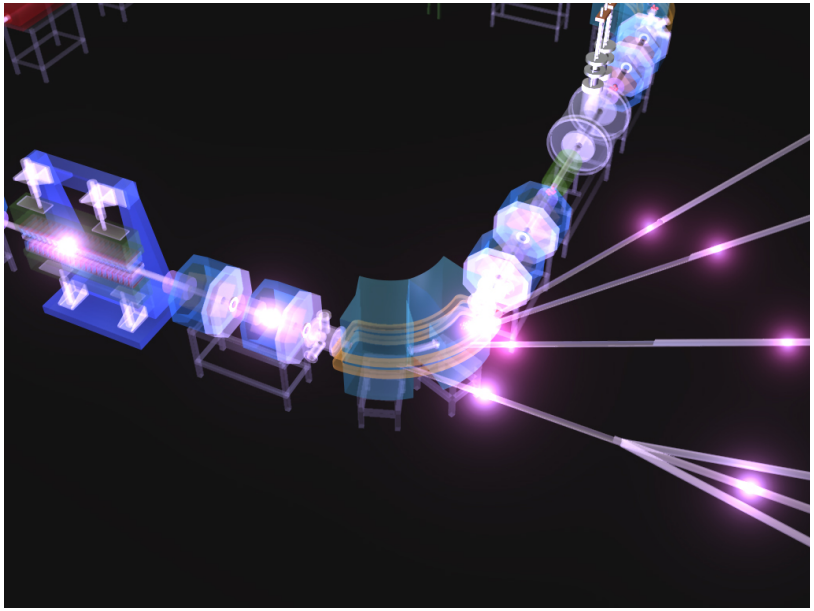




Magnete curvante di DAΦNE



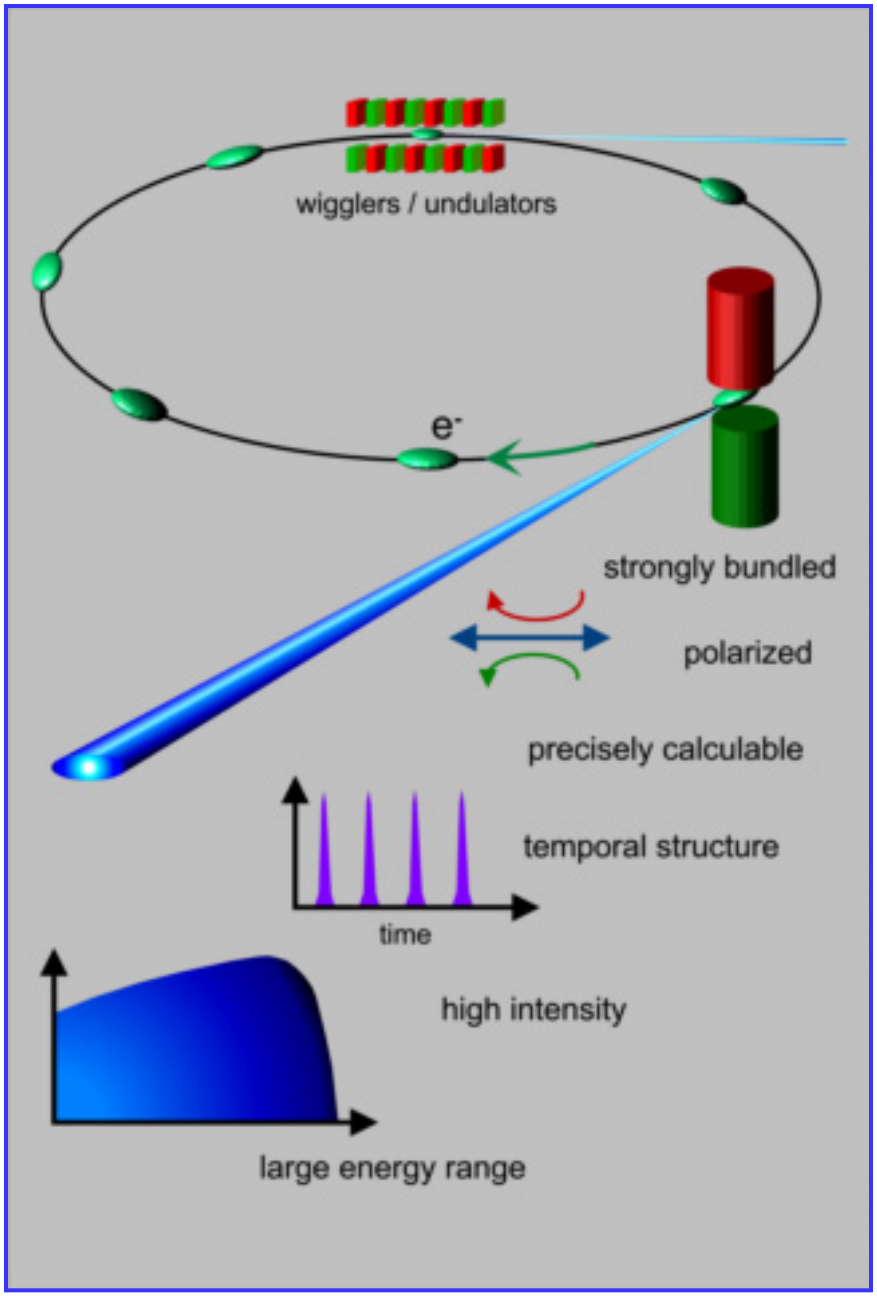


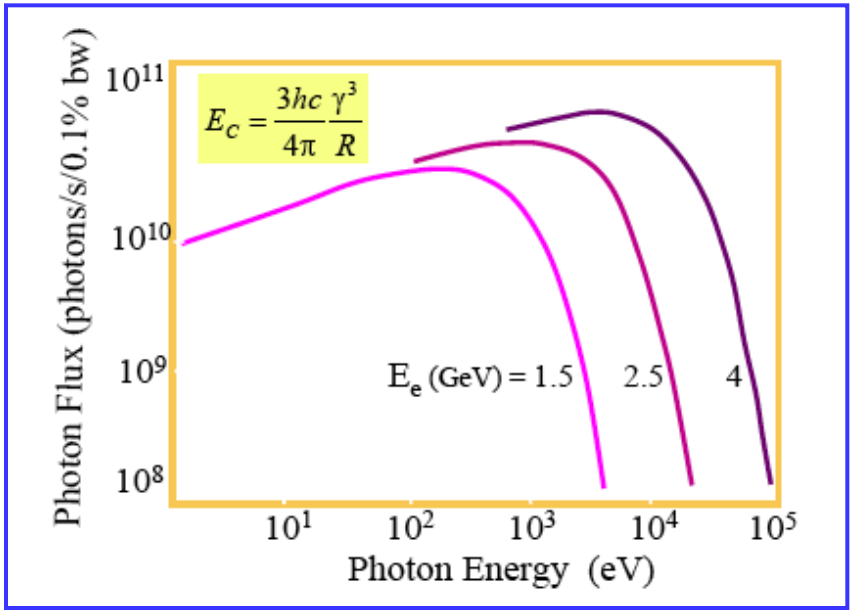


ASTRID (Aarhus - Denmark) http://www.isa.au.dk/animations/pictures/pic-index.asp

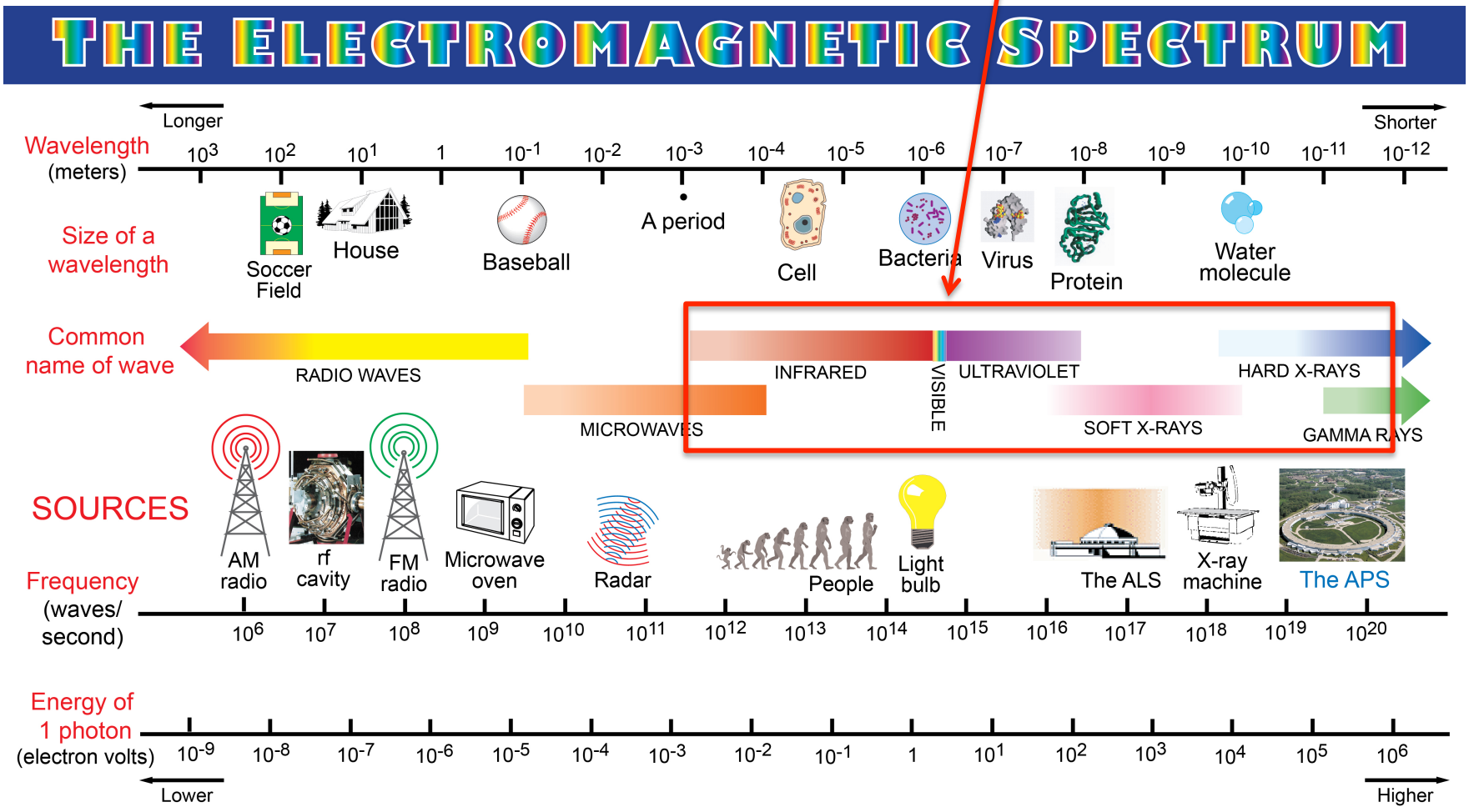
http://www.isa.au.dk/animations/Finalmovie/astrid_total_v2.mov

Proprietà della Luce di Sincrotrone

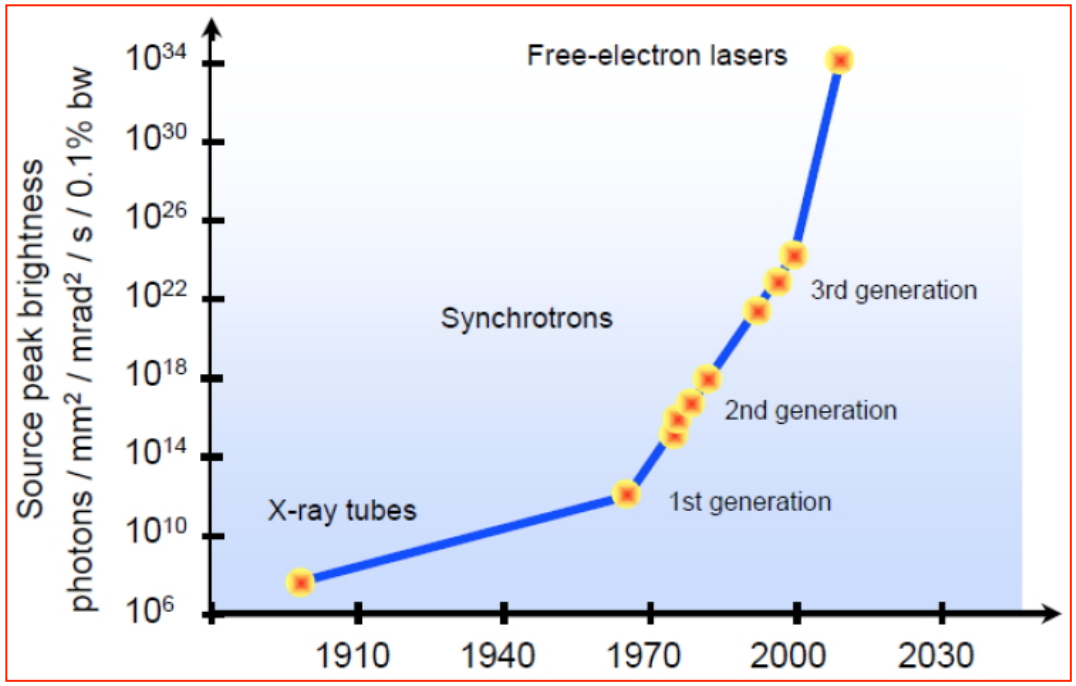




Intervallo spettrale coperto dalla luce di sincrotrone!

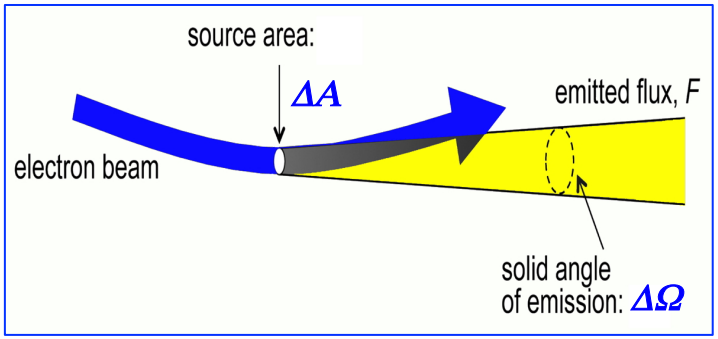


Evoluzione della brillanza in funzione del tempo



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

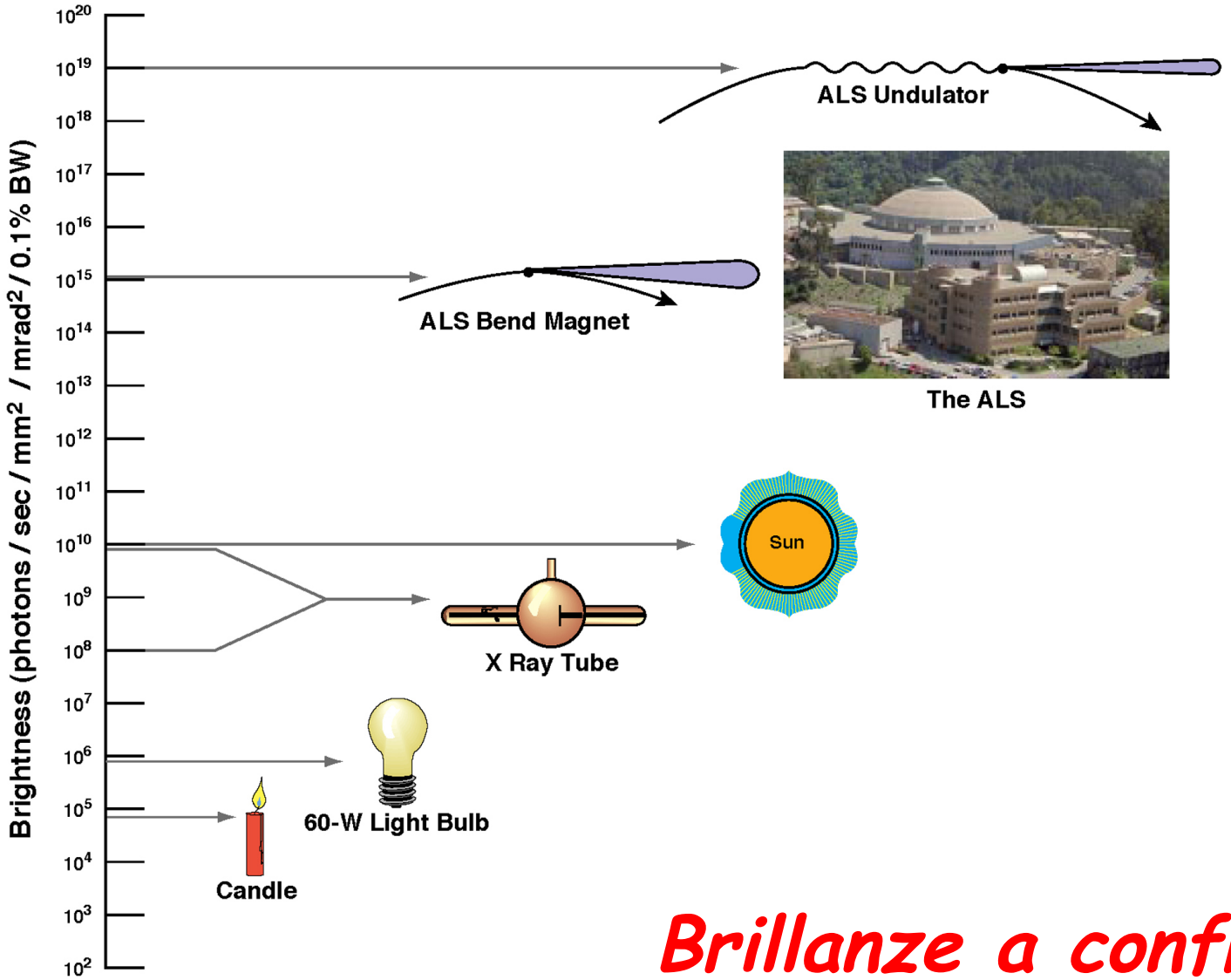
Notevole incremento della brillanza di circa un fattore 1000 ogni 10 anni!!!



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

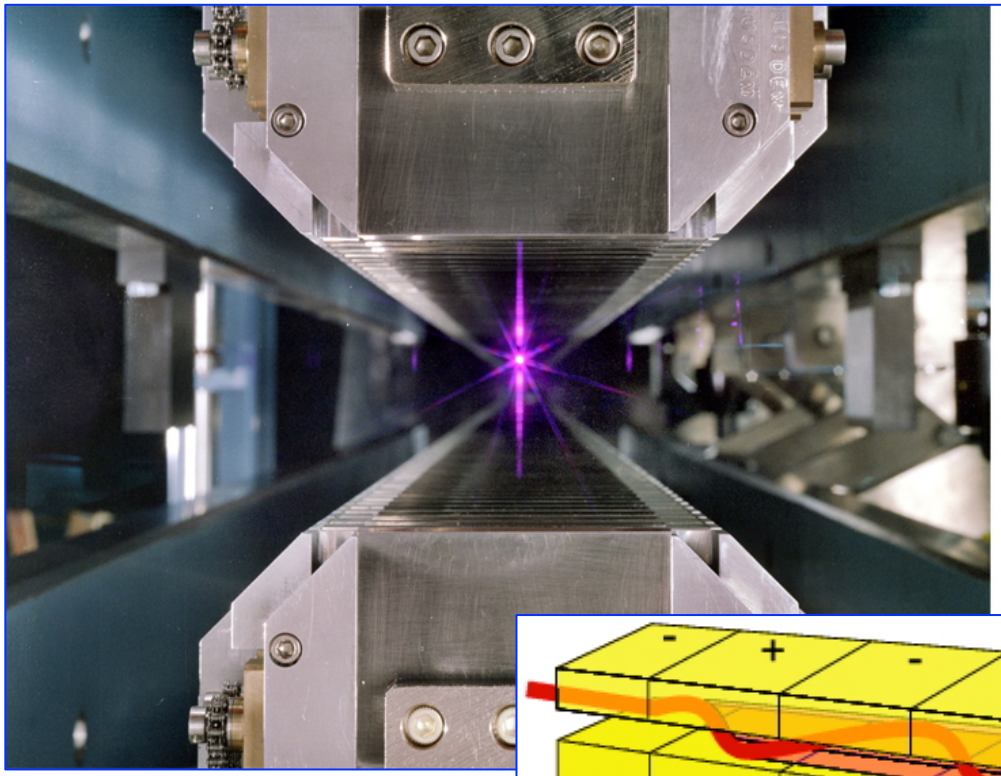
How Bright Is the Advanced Light Source?

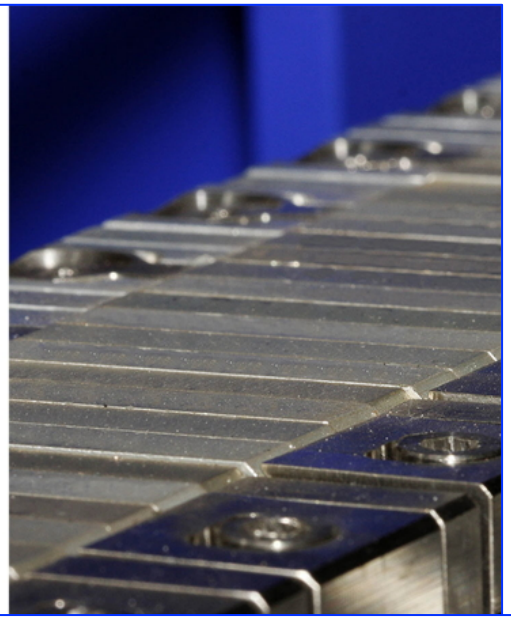
ALS

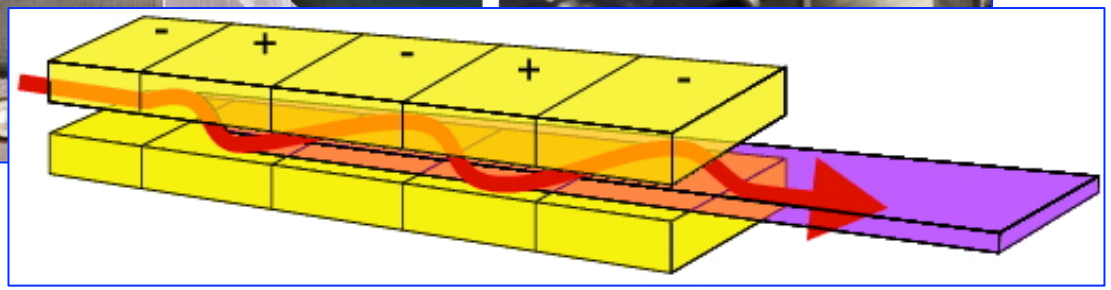


Brillanze a confronto

Magneti sezioni dritte: ondulatori e wiggler

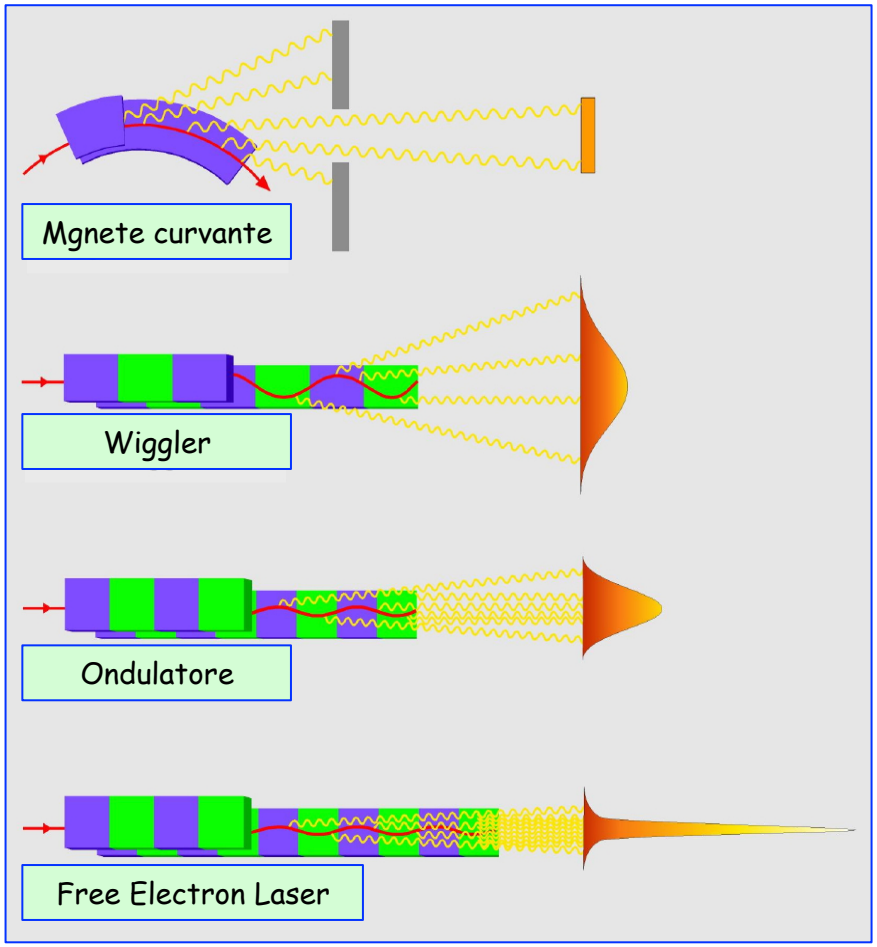




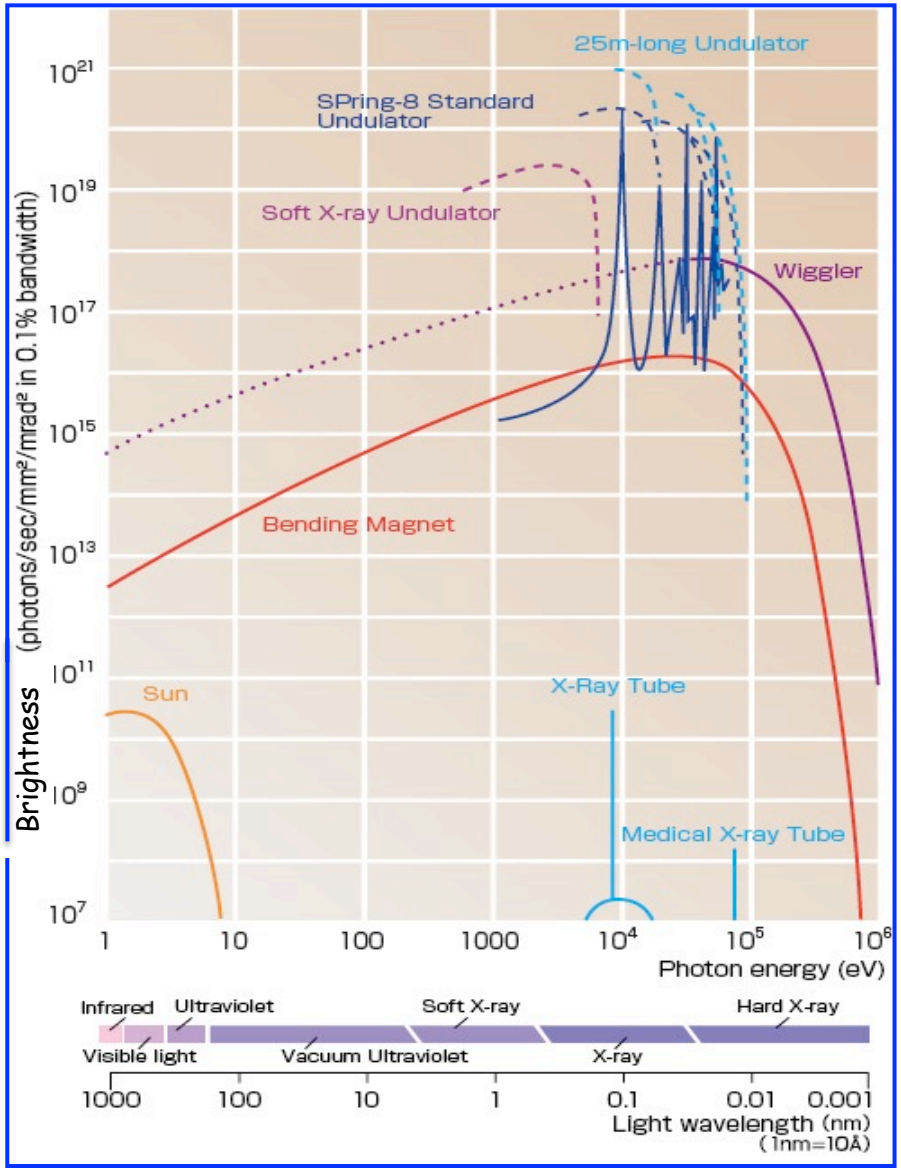


Il ***flusso*** e ***la brillanza della radiazione emessa possono essere aumentati***, mediante '***insertion devices***' (ID) (tipo ***wigglers*** e ***ondulatori multipolari***) che vengono installati in tratti rettilinei dell'anello (sezioni diritte) opportunamente ricavate tra i vari magneti curvanti.

Confrontando le diverse brillanze



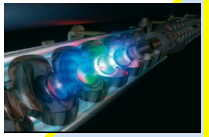
Courtesy DESY



Courtesy SPring-8

Breve storia della Luce di Sincrotrone

Breve storia della luce di sincrotrone



4th gen. - LINAC based accelerators FELs

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

3rd gen. dedicata ESRF (France) 1994

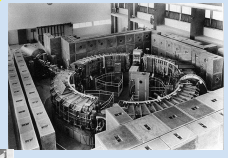
Aumento della brillanza

2nd gen. dedicata SRS (UK) 1981

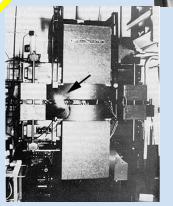
1st gen. dedicata Tantalus I (USA) 1968

Sviluppo degli anelli di accumulazione 1960

ADA - B. Touschek - LNF



Uso parassitico degli elettro-sincrotrone 1961



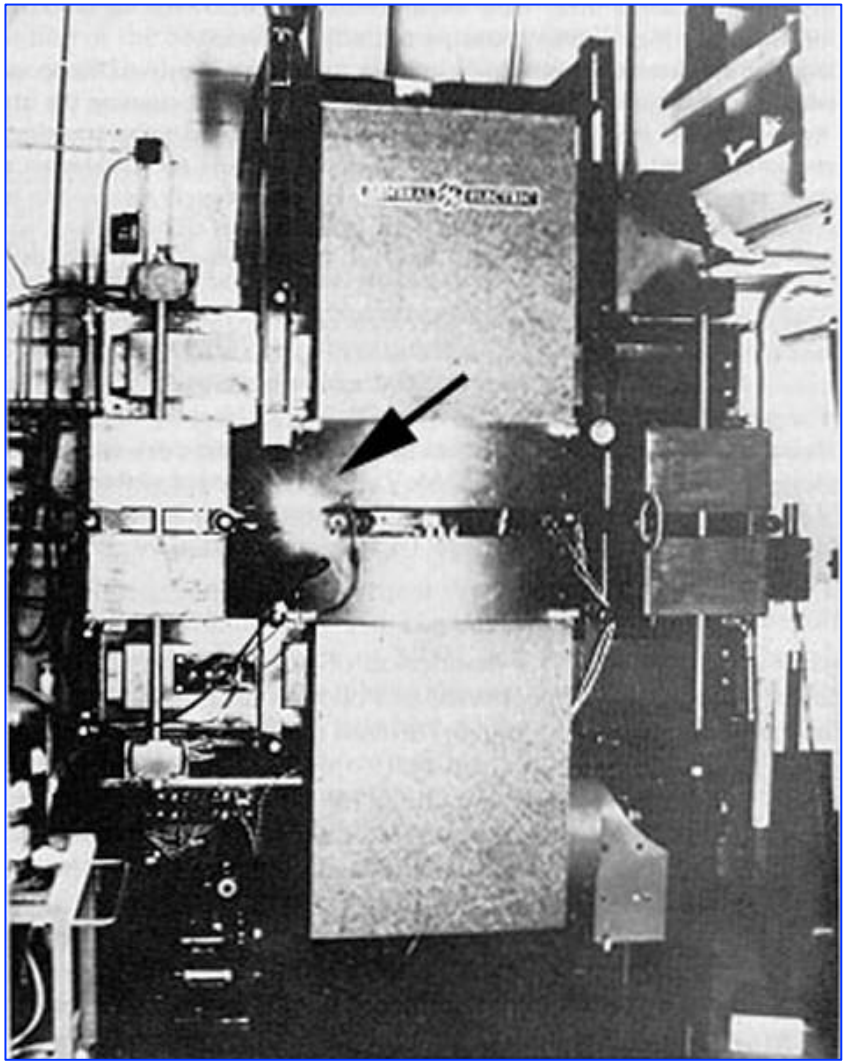
Prima osservazione della luce di sincrotrone 1947

General Electric Res. Lab. - 70 MeV Electro-Synchrotron (N.Y. USA)

J. Schwinger Nobel Prize 1965 Classical Relativistic quantum field theory

Teorie e concetti 1897-1946

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, e 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***.

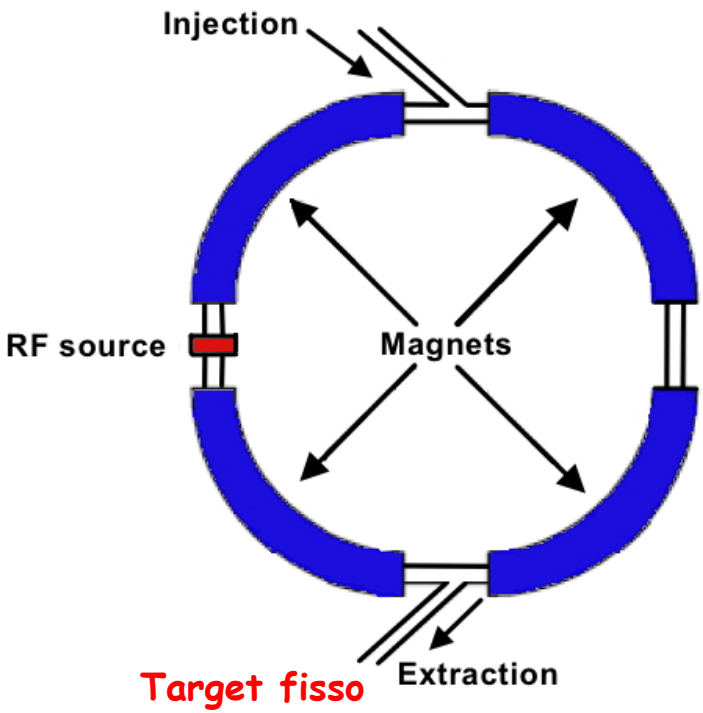
1947 *General Electric Res. Lab.* - 70 MeV Electron Synchrotron – N.Y. USA

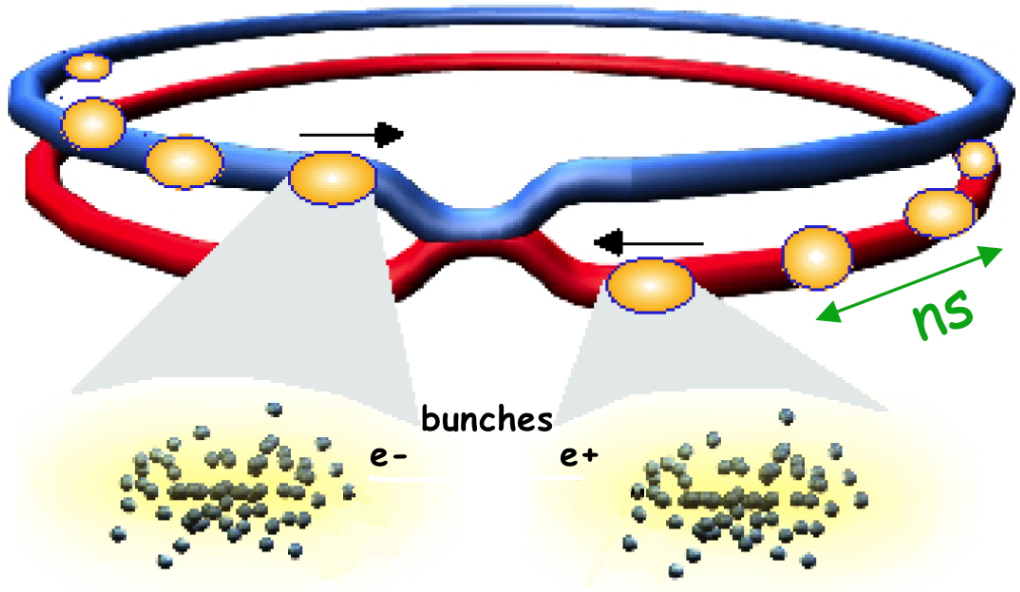
F.R. Elder, A.M. Gurewitsch, R.V. Langmuir, and H.C. Pollock, Radiation from Electrons in a Synchrotron, *Phys. Rev.* 71, 829 (*1947*)
G. C. Baldwin and D.W. Kerst, Origin of Synchrotron Radiation, Physics Today, 28, 9 (*1975*)

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

$E_{CM} \approx 2E$

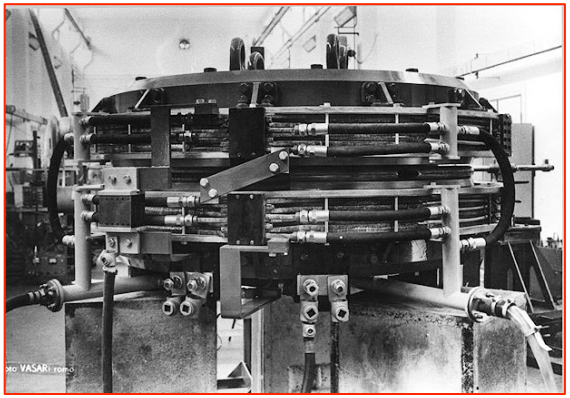
***Anello di accumulazione*: collisione tra fasci di particelle più efficiente**

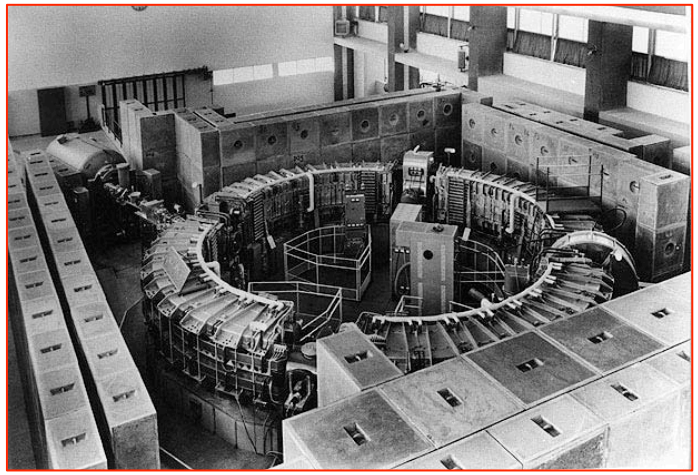
E= Energia delle particelle >> mc^2; E_{CM}= Energia al centro di massa

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 esperimensti di fisica delle alte energie.

Terza generazione di anelli di accumulazione

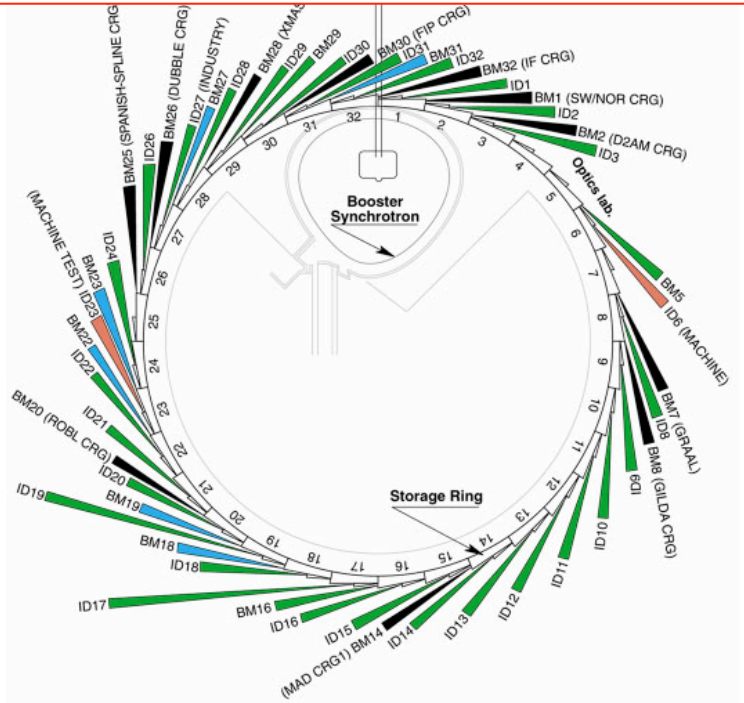
Sorgenti di luce di sincrotrone ottimizzate per ottenere una elevata brillanza

Terza generazione: European Synchrotron Radiation Facility - ESRF

La luce di sincrotrone diventa una radiazione veramente unica!

ESRF, Grenoble - Francia 6 GeV, C = 844 m aperta agli utenti nel 1994

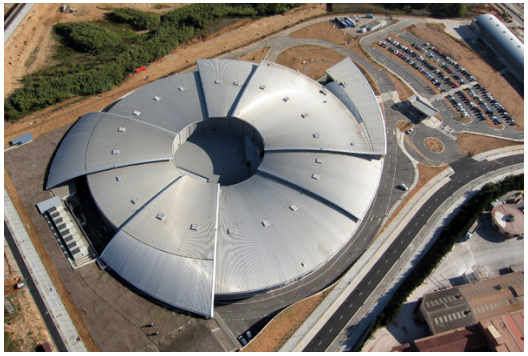
- *Alta brillanza e quindi bassa emittanza.*
- *Ricerche utilizzando la radiazione prodotta dagli ondulatori.*
- *Macchine di alta energia capaci di generare raggi X duri.*
- *Grandi facilities in grado di ospitare molte linee di ricerca e molti utenti in parallelo.*



Sorgenti di luce di terza generazione

Elettra (2.4 GeV) - Trieste

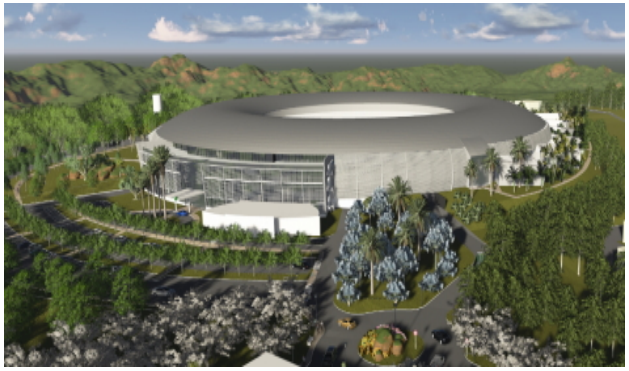
DIAMOND (3 GeV) - UK



ALBA (3 GeV) - Spagna

In costruzione – Ultimate SR facilities

Lund (3 GeV) - Svezia



Sirius (3 GeV) - Brasile

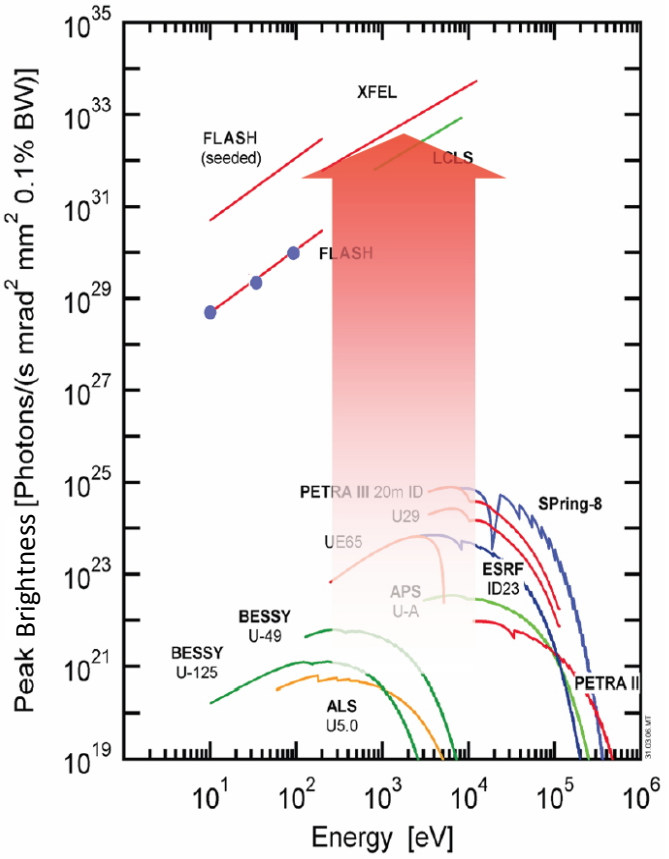
SSRF (3.5 GeV) Shanghai -Cina

Quarta generazione: laser ad elettroni liberi o FEL

Dagli anelli di accumulazione ai FEL.

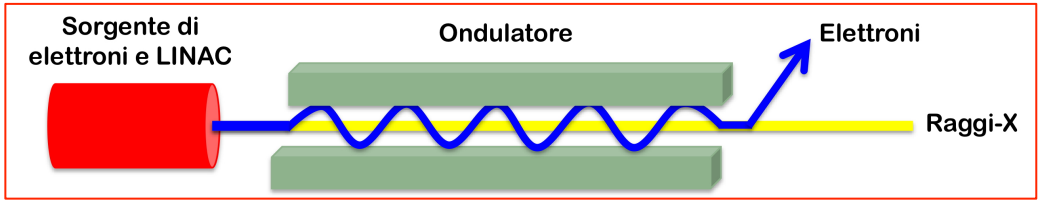
FEL o Free Electron Laser

Un enorme incremento della brillanza - no a nove ordini di grandezza di aumento della brillanza 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 pero da un fascio di elettroni relativistici, che attraversano un ondulatore e interagiscono con la radiazione da loro stessi emessa.

1 femtosecondo = 10^{-15} s

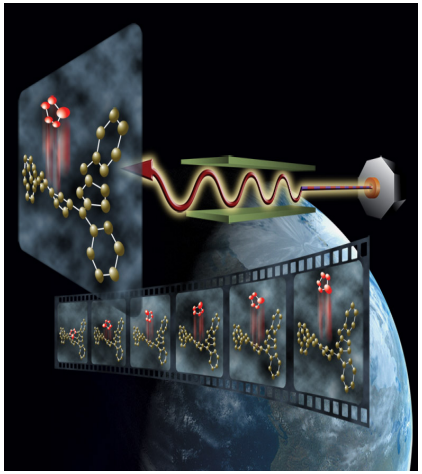


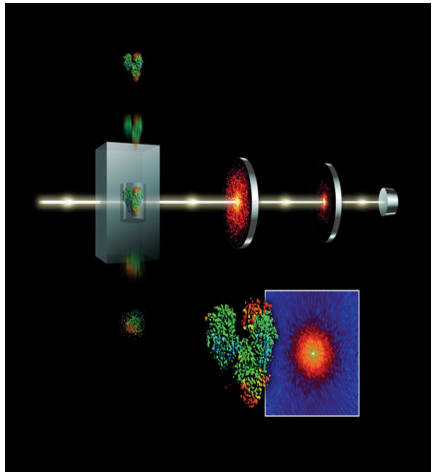
Visione schematica di un XFEL

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.*

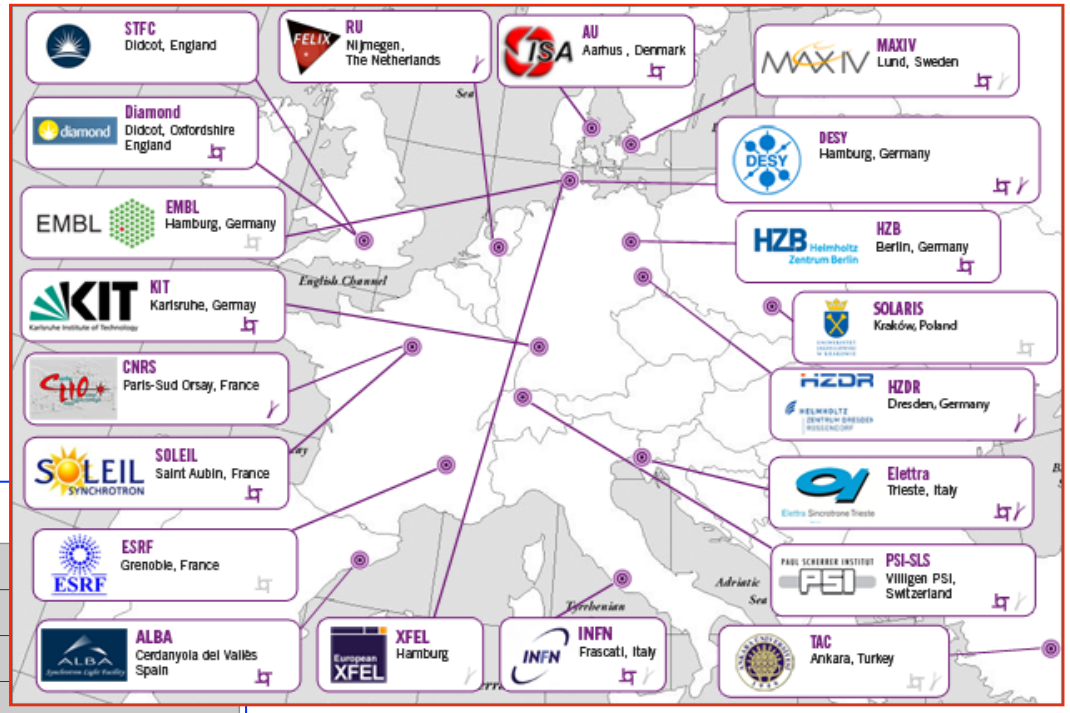


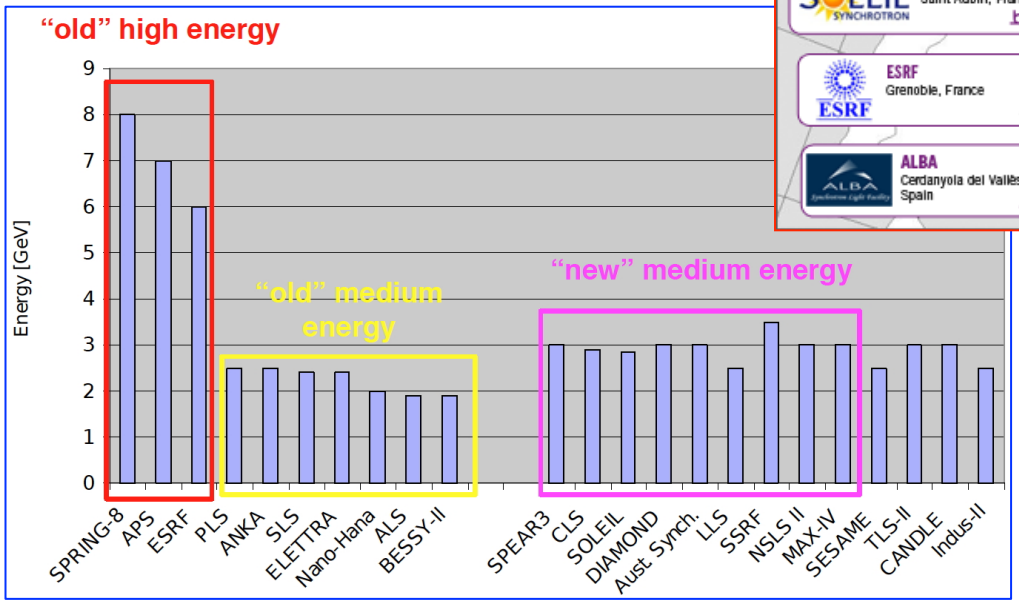


LCLS http://www-public.slac.stanford.edu/lcls/aboutlcls.aspx

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





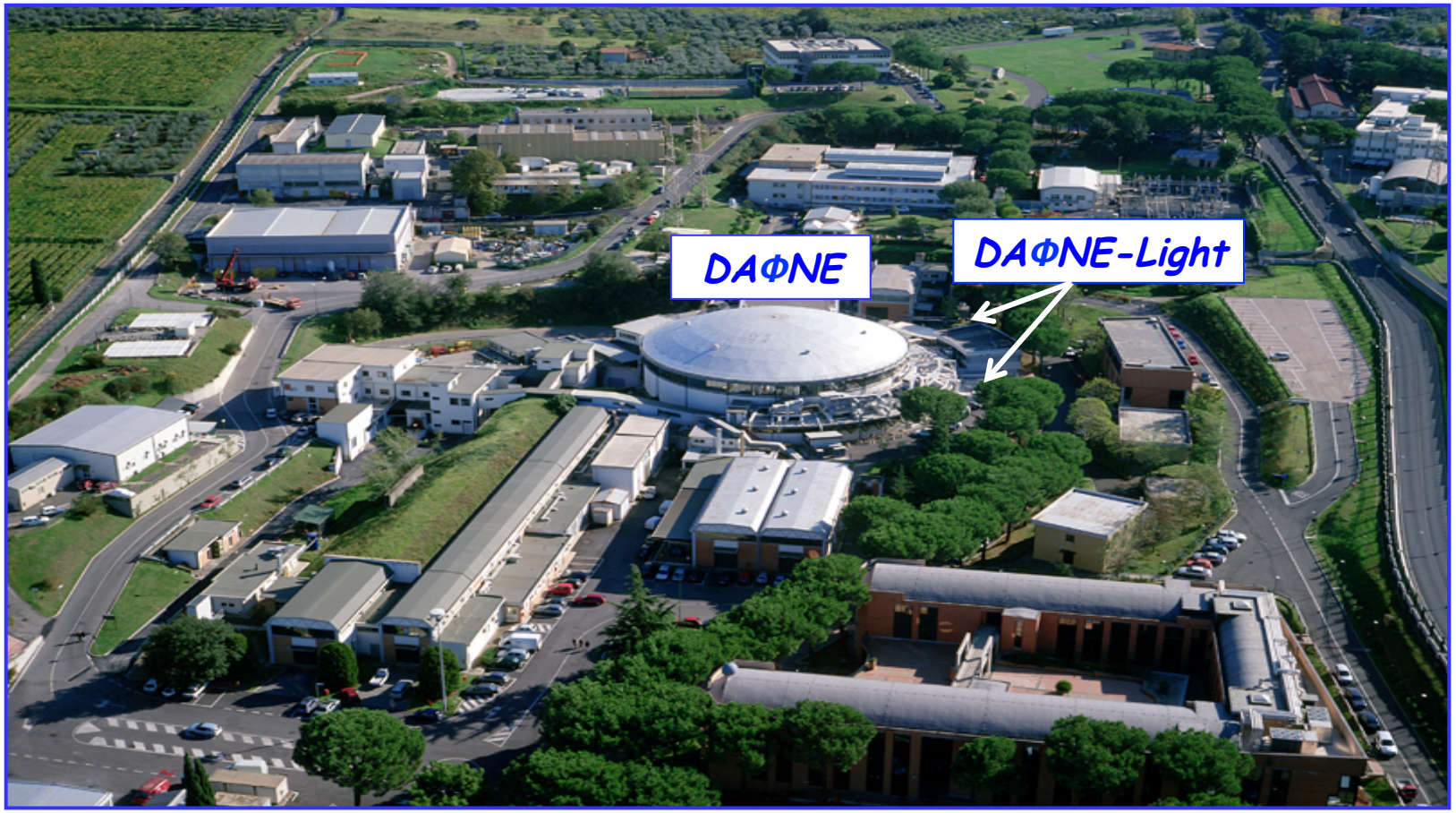
wayforlight
the european lightsources single entry point

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



Beamlines @ DAΦNE

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

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

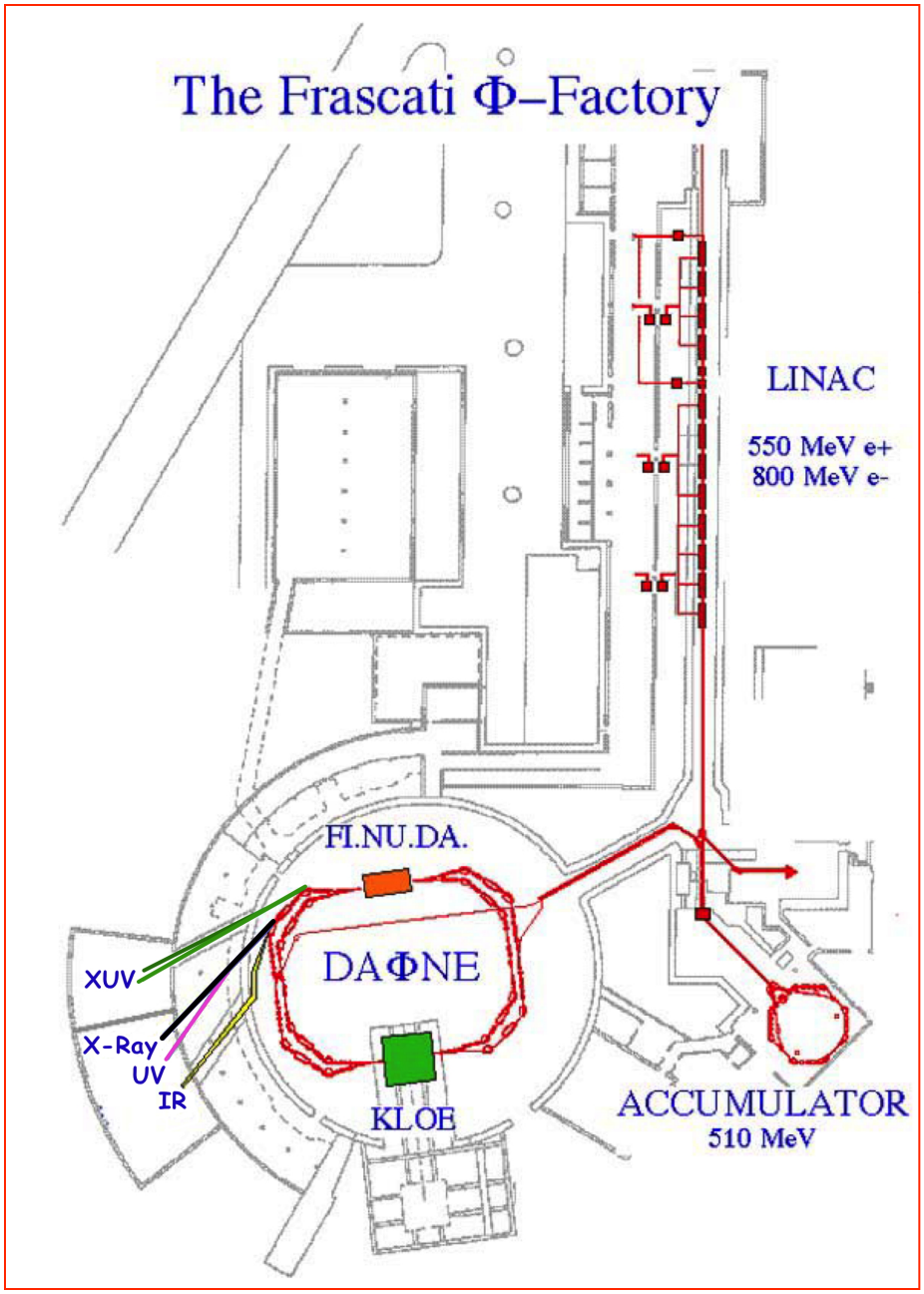
Aperte ad utenti interni ed esterni

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

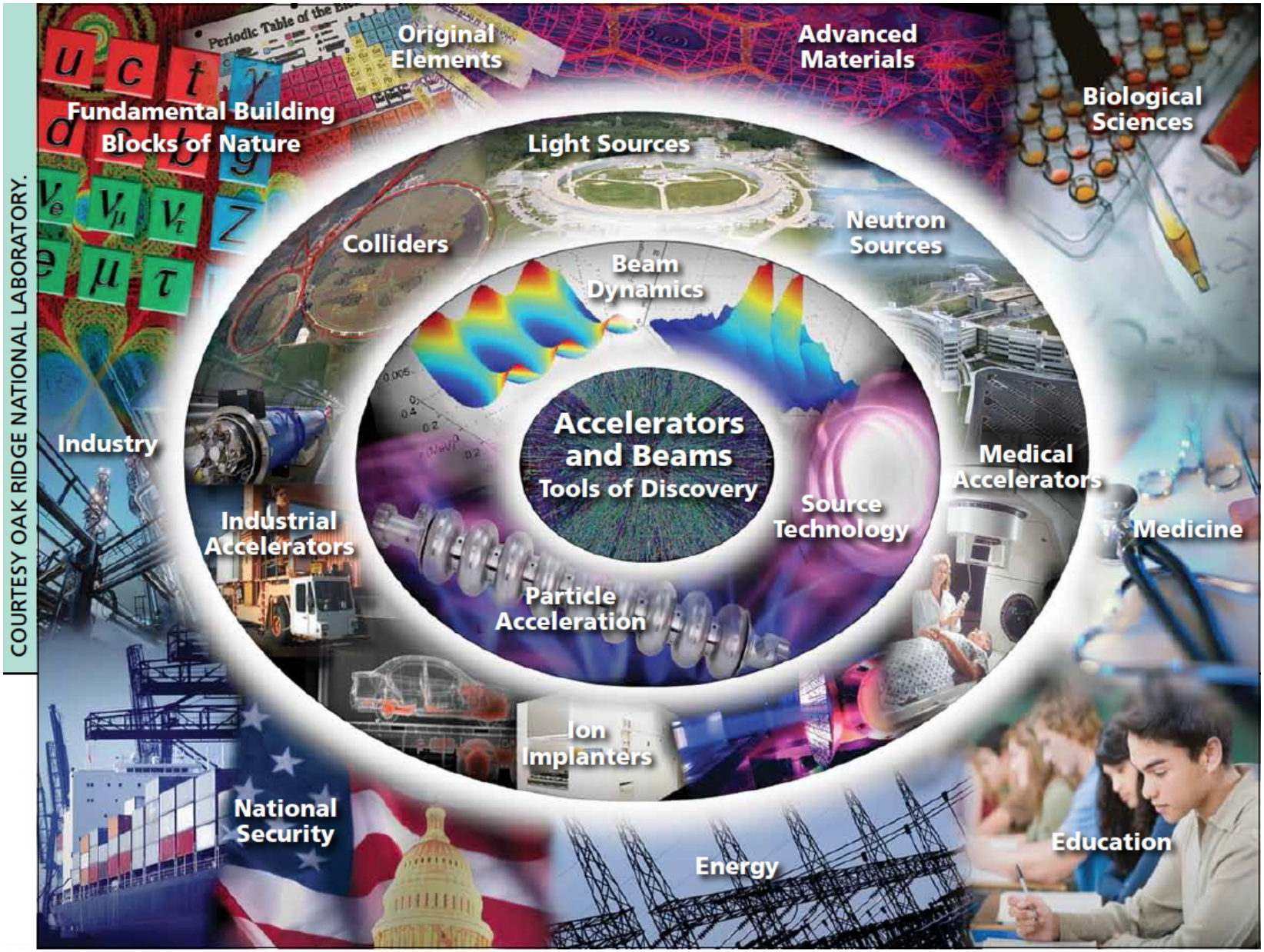
XUV beamlines

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

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



Dagli acceleratori alle applicazioni



E. Malamud Ed., ***Accelerators and Beams tools of discovery and innovation*** (http://www.aps.org/units/dpb/news/edition4th.cfm) ***2013***

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

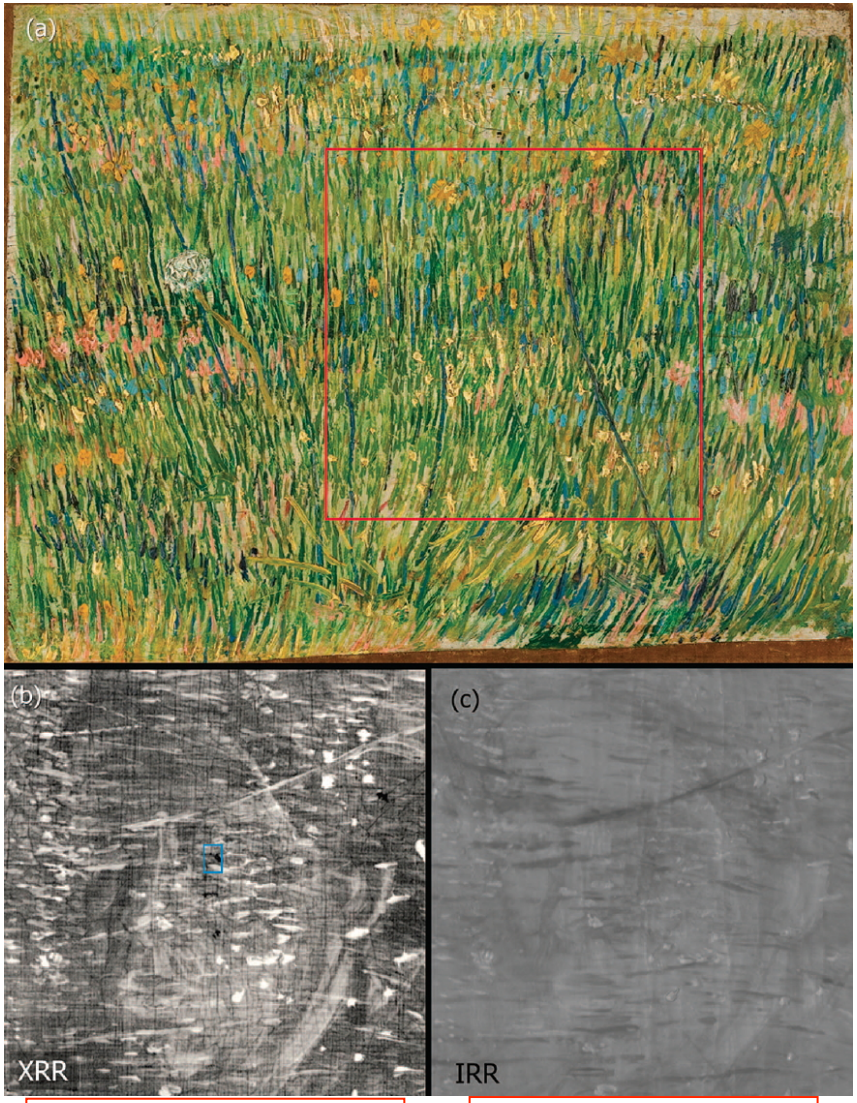
Beni culturali

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).

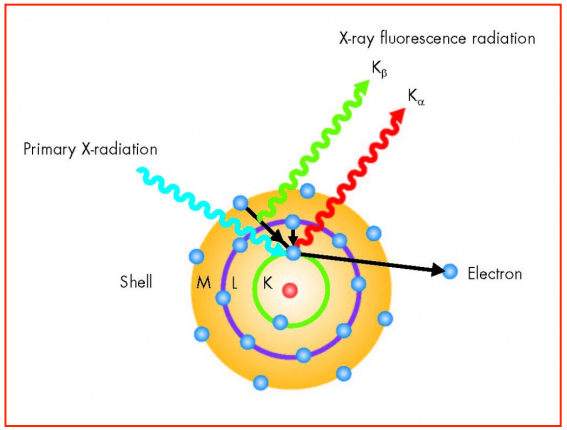
Radiografia X in trasmissione

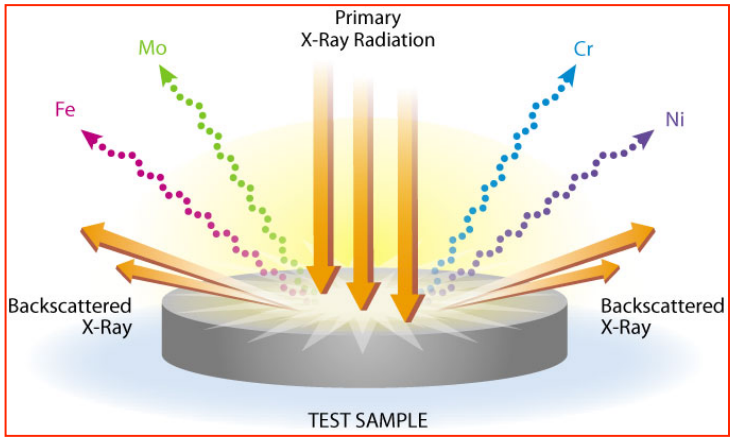
Riflettografia infrarossa (IR)

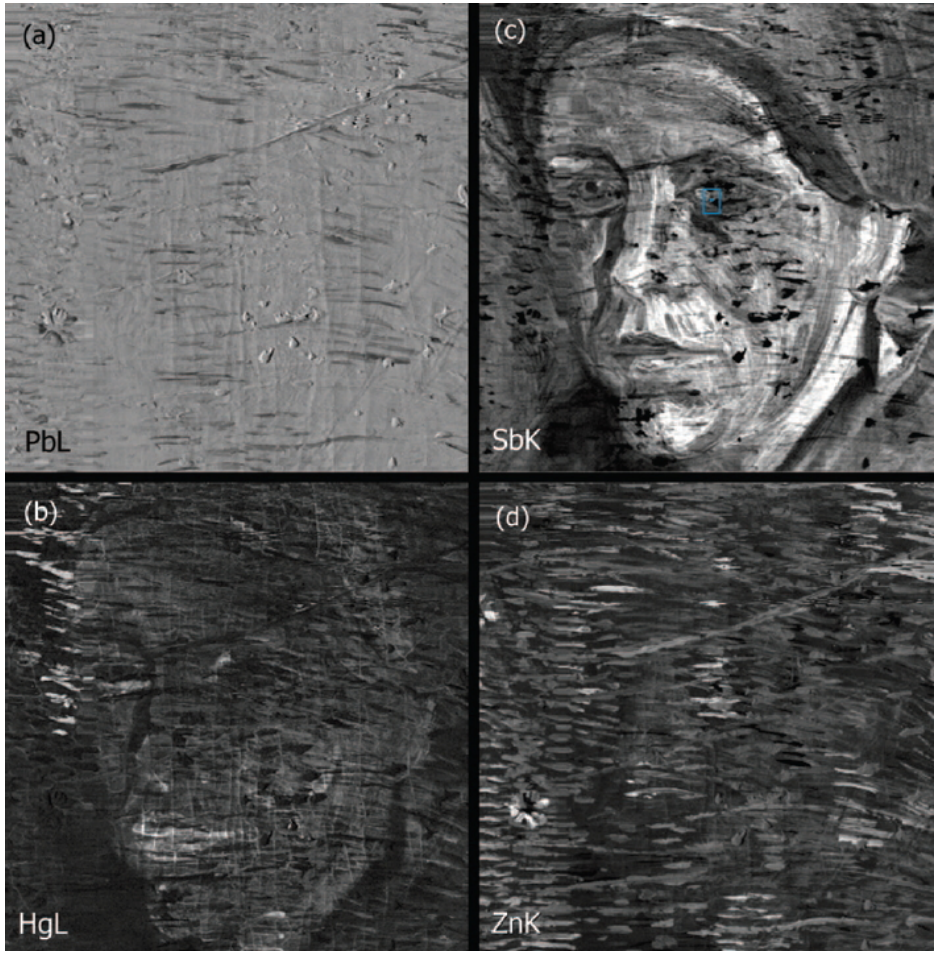
J. Dik et al., *Visualization of a Lost Painting by Vincent van Gogh Using Synchrotron Radiation Based X-ray Fluorescence Elemental Mapping*, Anal. Chem. 2008, 80, 6436

Raggi X, 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 ller-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.***

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 Rembrandt

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

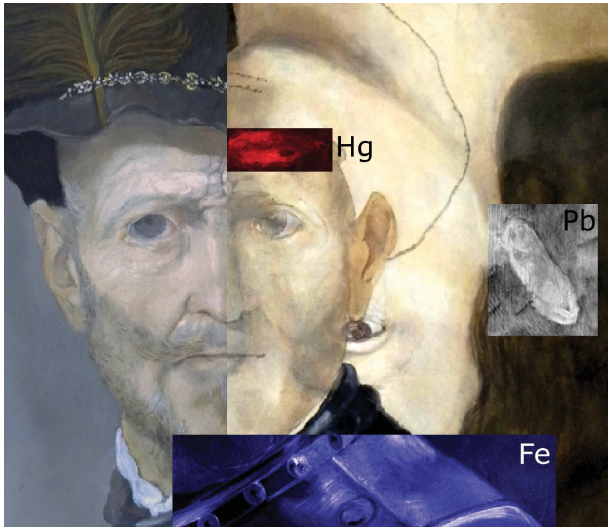
Foto- Credit: Andrea Sartorius, © J. Paul Getty Trust

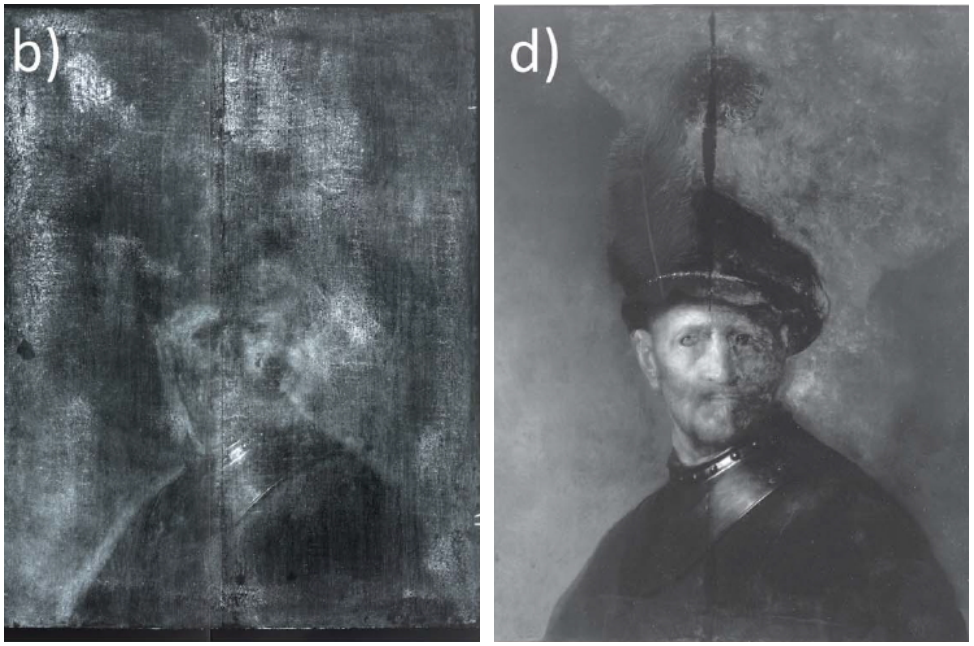
*Attraverso un'analisi macro-XRF con raggi X (**NSLS, DESY**) è stato scoperto il ritratto di una donna sotto il quadro **l'Uomo Anziano in Costume Militare** di **Rembrandt** opera della collezione del **Museo J. Paul Getty** di **Los Angeles**.*

***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 e'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.

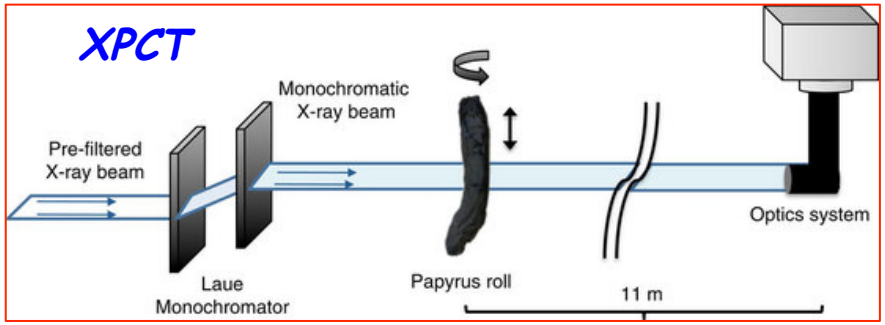
Sezione del papiro. La sequenza di lettere e'stata trovata in un frammento di uno strato interno. (*Credit: CNRS-IRHT UPR 841 / ESRF / CNR-IMM Unité de Naples*)

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

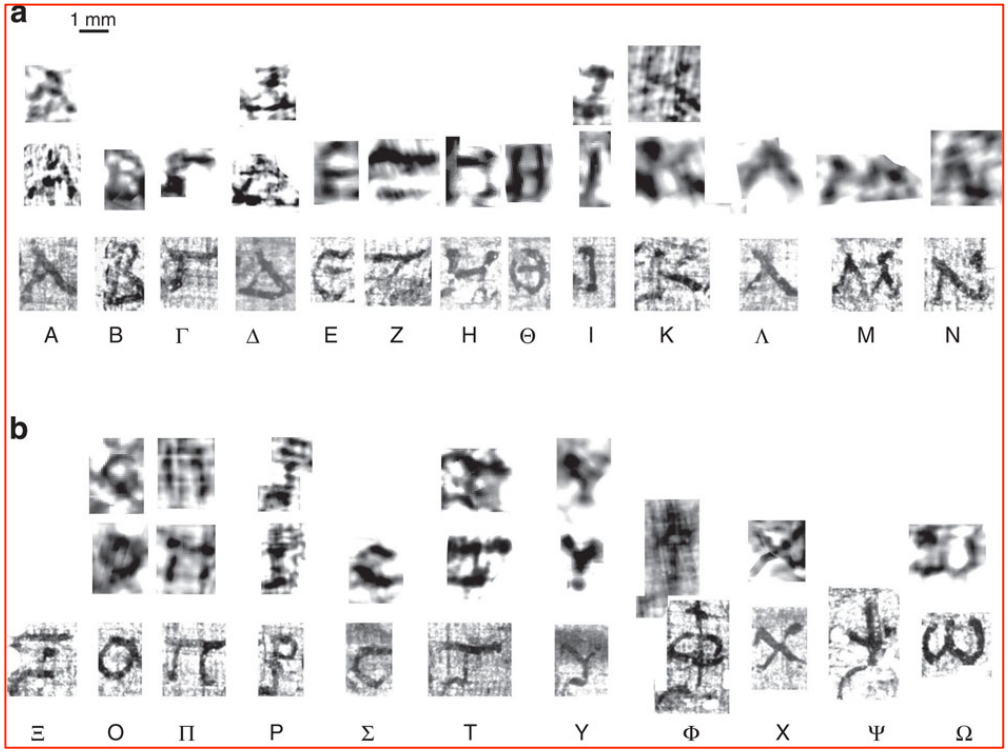
https://www.youtube.com/watch?v=d3aWBgNYOCU

Papiri di Ercolano letti senza srotolarli grazie ai raggi X

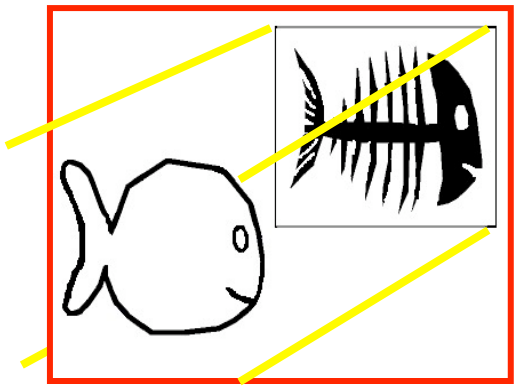
La nuova tecnica, ***XPCT (X-ray Phase Contrast Tomography)*** è simile a una TAC medica e permette di ***distinguere tra materiali che hanno limitato contrasto tra loro, come i papiri carbonizzati e l'inchiostro nero***. Applicata a due papiri arrotolati, ha ***prodotto delle immagini tridimensionale***, 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.



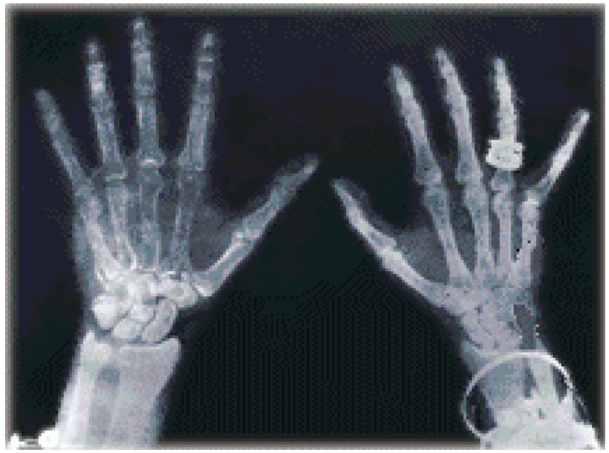
Un prospetto ***dell'alfabeto di lettere greche*** scovate dagli studiosi nella ***parte interna*** di un papiro carbonizzato (***PHerc.Paris.4),*** dove le diverse spire erano più separate, viene ***riportato sulle prime due righe,*** mentre ***sulla terza*** viene riportata l'immagine IR delle ***stesse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



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



Raggi X e imaging

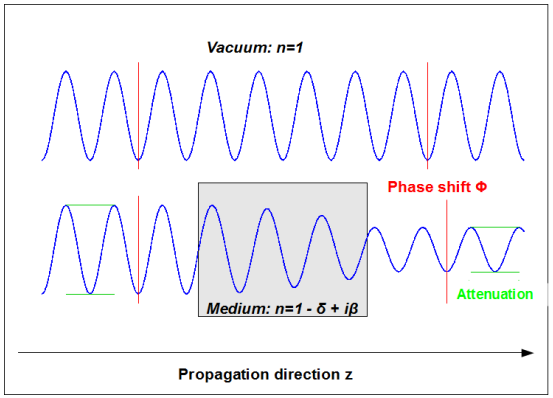


Imaging biomedico

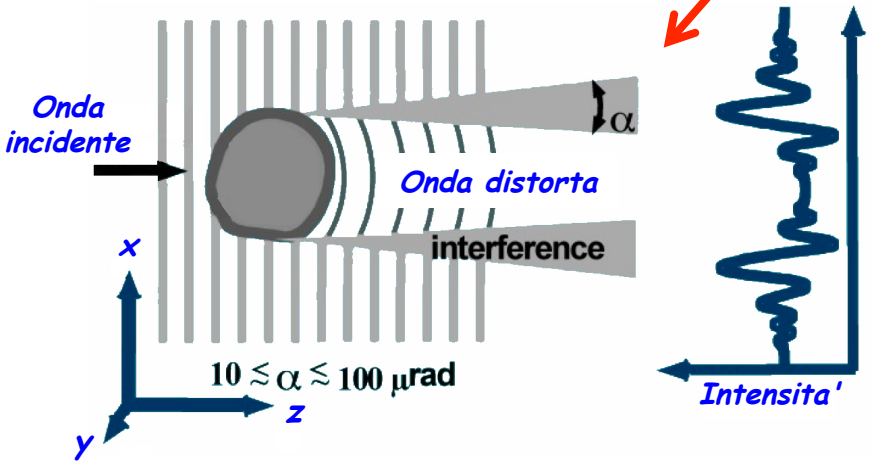
Con i termini radiologia o imaging biomedico o diagnostica per immagini ci si riferisce branca della medicina che si occupa di fornire immagini dell'interno del corpo umano, allo scopo di fornire informazioni utili alla diagnosi.

Indice di rifrazione

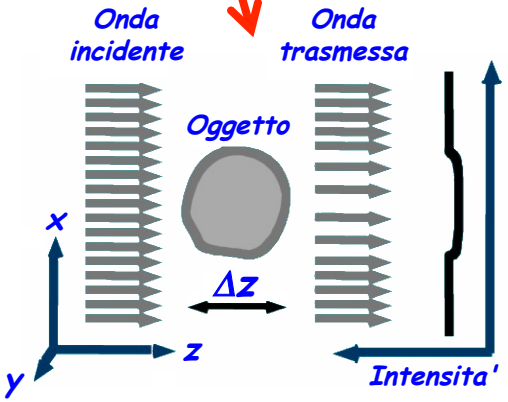
$$n = 1 - \delta + i\beta$$

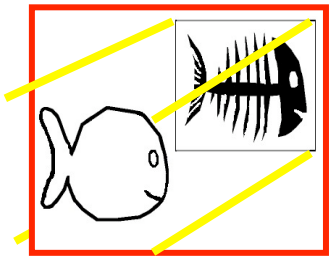


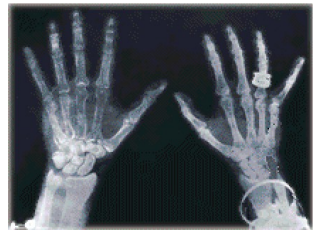
Imaging a contrasto di fase



Imaging in assorbimento





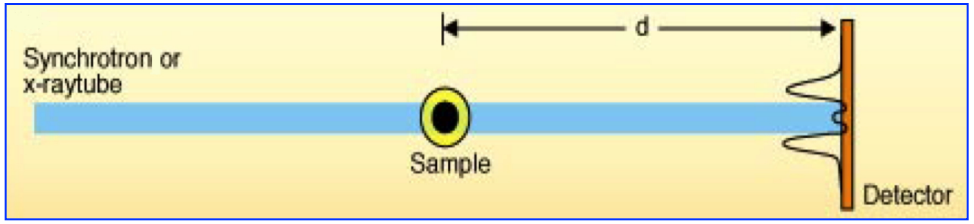


Radiografia a contrasto di fase

Vantaggi con la luce di sincrotrone:

Alta intensità *ed* ***ampio spettro implica la possibilita' 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 grantiscono:* ***coerenza spaziale, la possibilità di utilizzare tecniche di imaging sensibili alla fase*** *.*



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

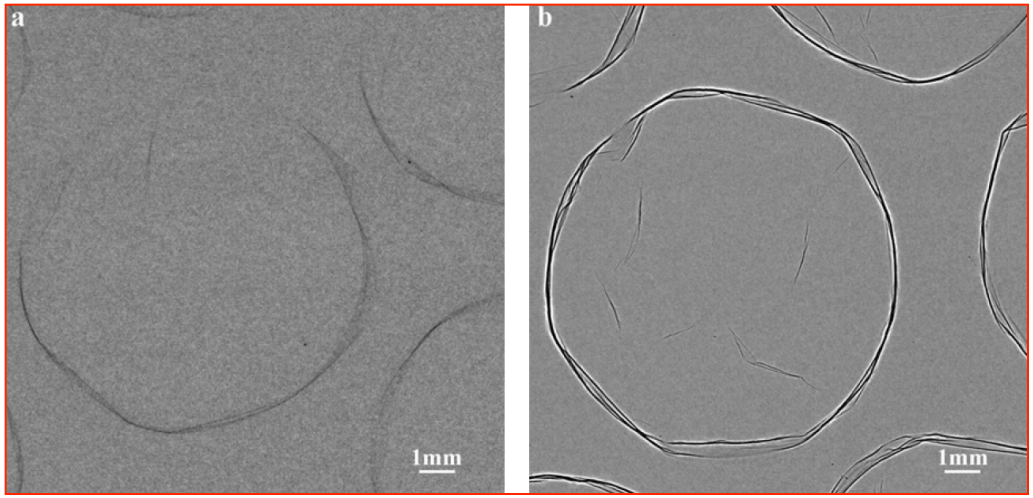
Per campioni biologici 'soft' nell'intervallo di energia del fotone 15 -25 KeV

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

effetti di fase (rifrazione) >> effetti di assorbimento

Nelle ***radiografie convenzionali*** *si misurano solo* ***variazioni dell'ampiezza*** *del fascio X trasmesso quindi c'e'* ***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 e' fondamentale che la* ***distanza campione rivelatore d*** *sia grande.*

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).

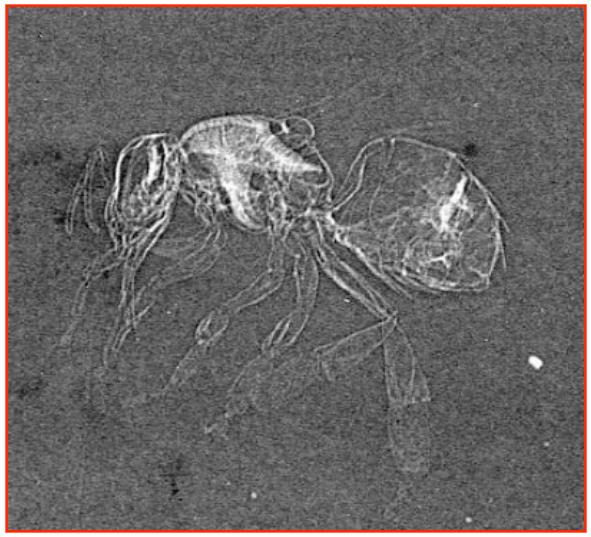


B. Kaulich et al., *Cooperazione Trieste - Melbourne sull'imaging avanzato con luce di sincrotrone*, **2006**

Luce di sincrotrone, raggi X e imaging

Obbiettivo 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

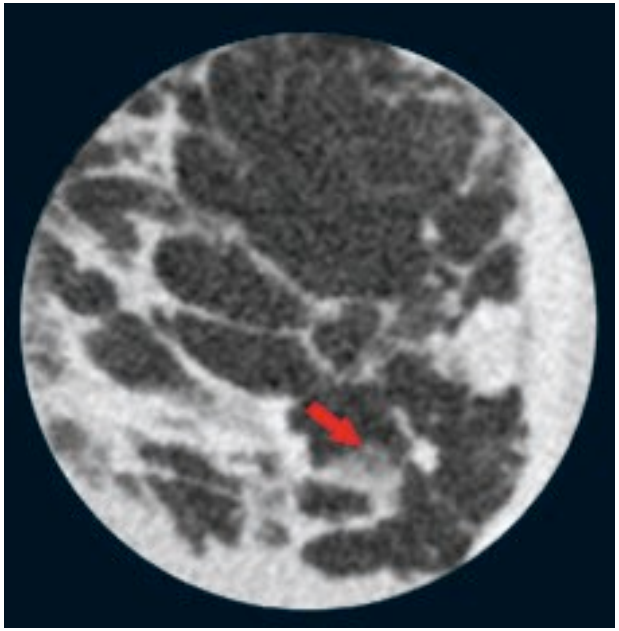
Radiografia a contrasto di fase amplificata dalla diffrazione

G. Tromba - ELETTRA- Sincrotrone Trieste

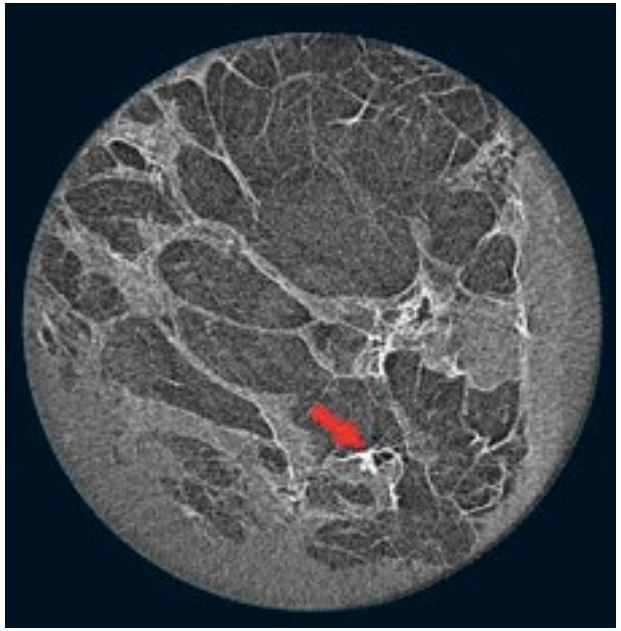
Analyzer Based Imaging (ABI) o radiografia con cristallo analizzatore

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

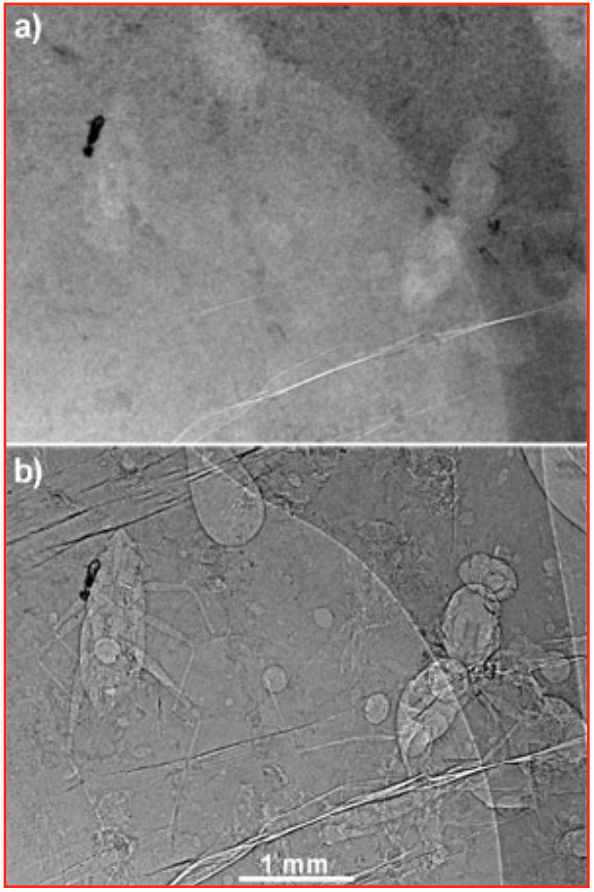
Imaging e paleobiologia

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 animaletti, 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

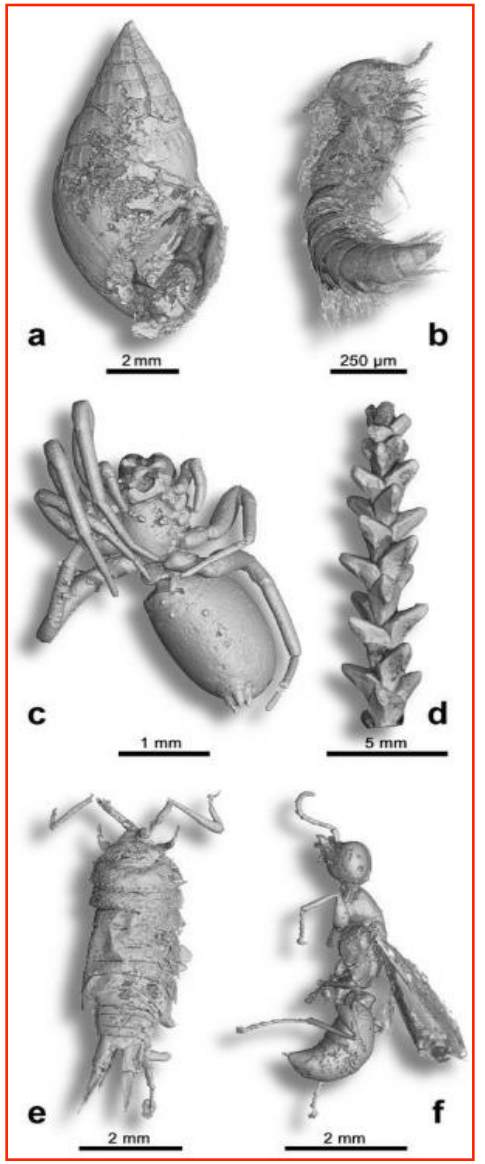


M. Lak, D. Neraudeau, A. Nel, P. Cloetens, V. Perrichot and P. Tafforeau, Phase Contrast X-ray Synchrotron Imaging: Opening Access to Fossil Inclusions in Opaque Amber, Microscopy and Microanalysis, (2008), 14:251-259

Imaging e paleobiologia

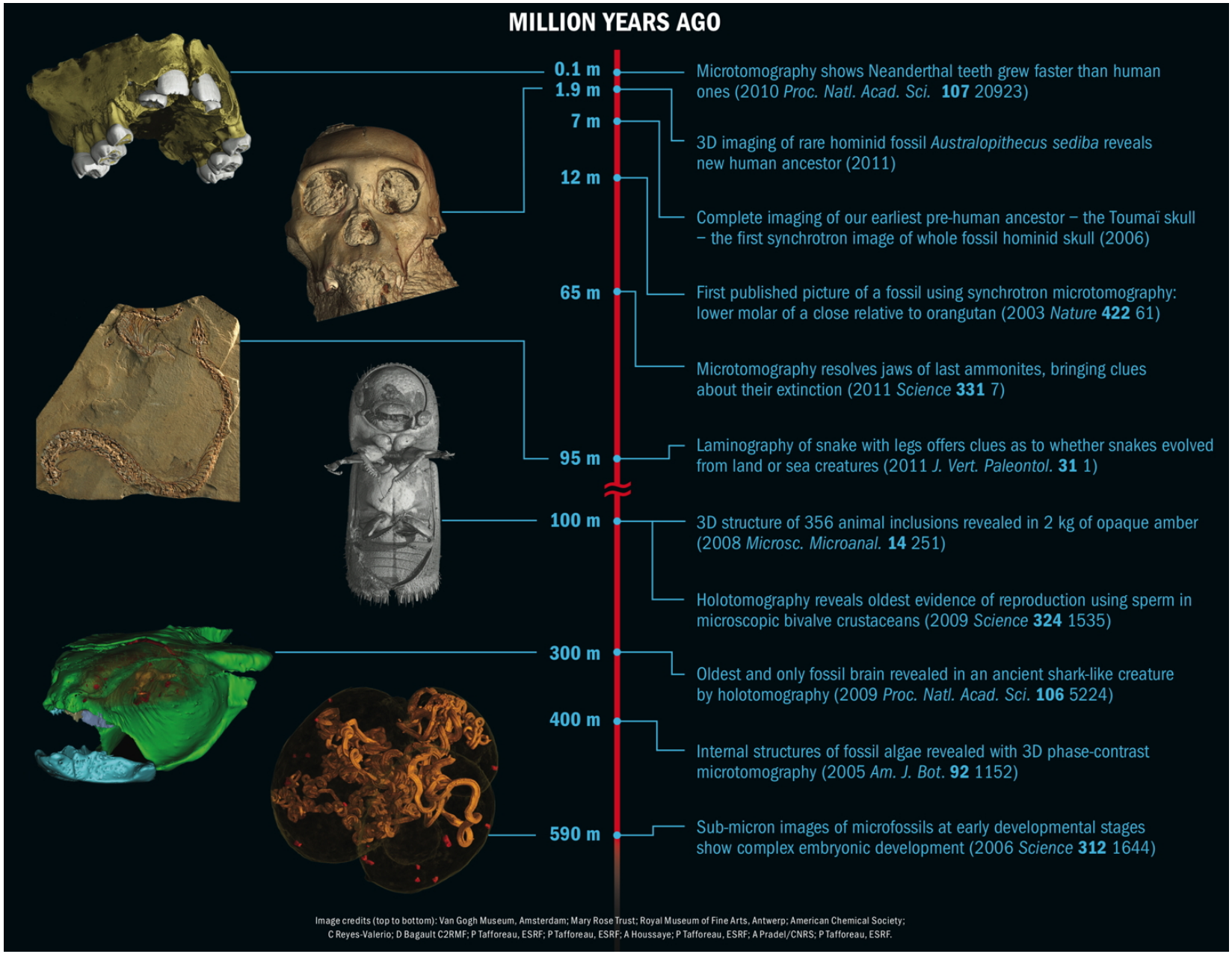
Sempre ad ESRF usando la microtomografia X a contrasto di fase e' stato possibile effettuare una visualizzazione 3D dei microorganismi inclusi nel campione di resina fossile.

Scarabeo del Cretaceo



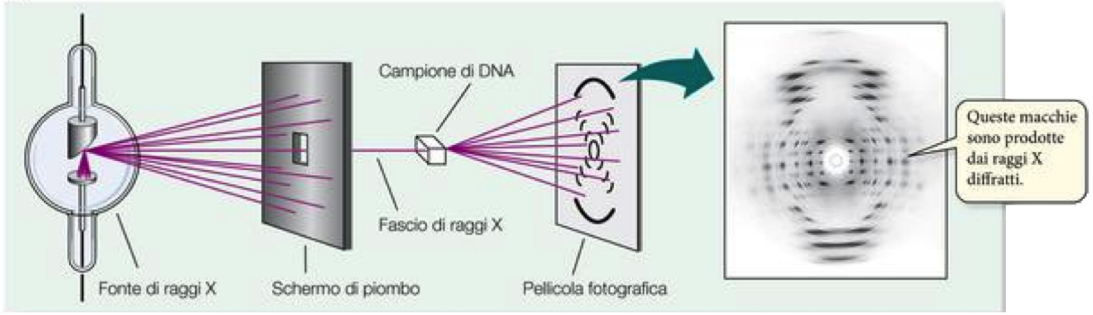
a) Gastropod Ellobiidae; b) Myriapod Polyxenidae; c) Arachnid; d) Conifer branch (Glenrosa); e) Isopod crustacean Ligia; f) Insect hymenopteran Falciformicidae.

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)

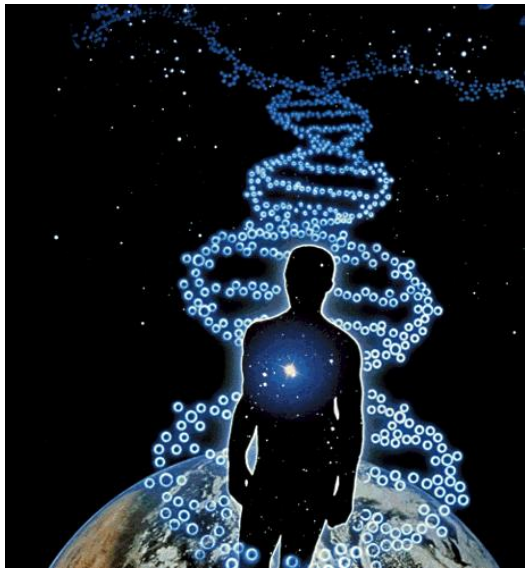


Marine Cotte - *Synchrotron culture : Focus on: paleontology and cultural heritage* – **ESRF News –June 2011**

Rosalind Franklin e la struttura del DNA



Raggi X e Cristallografia

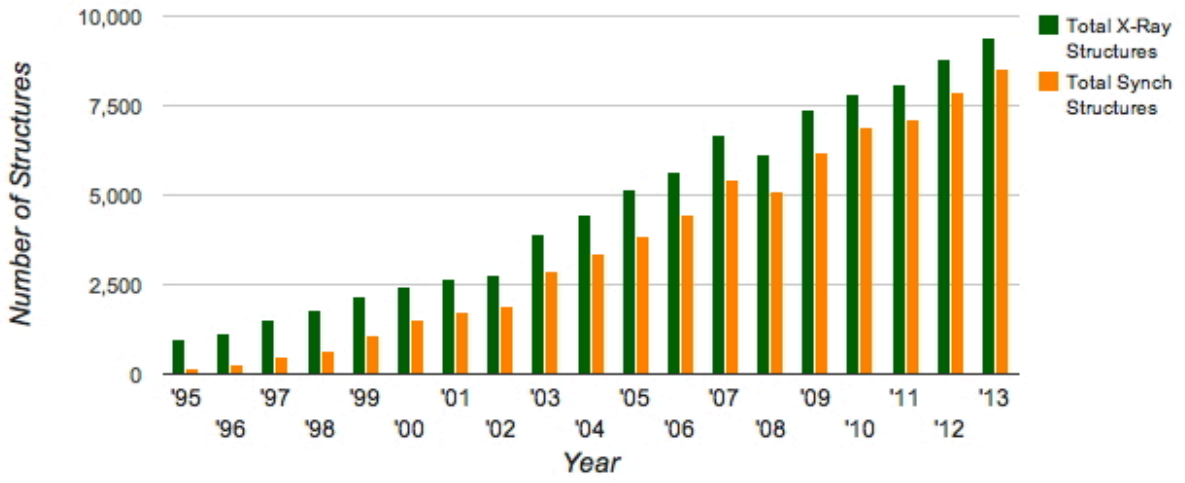


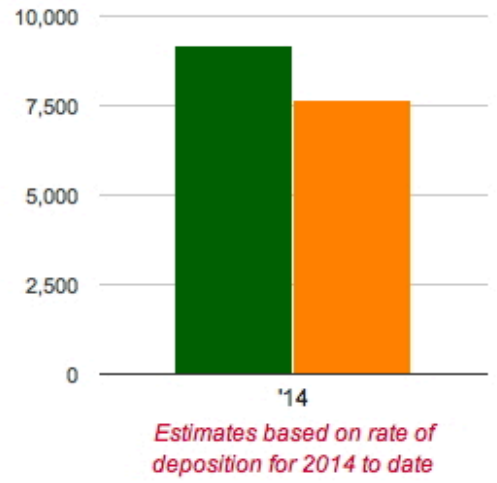
Cristallografia con raggi X

2014
anno internazionale della cristallografia

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.

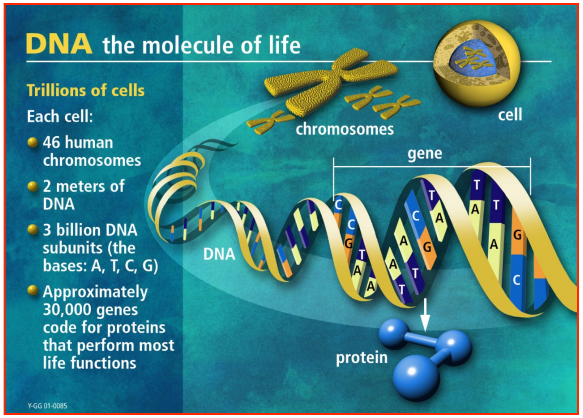
La cristallografia e' fondamentale nello studio e sviluppo di nuovi materiali, in mineralogia e anche nella ideazione di nuovi farmaci! Volendo sviluppare un nuovo farmaco per combattere un batterio o un virus specifico si deve prima individuare una molecola in grado di bloccare le proteine (enzimi) 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.

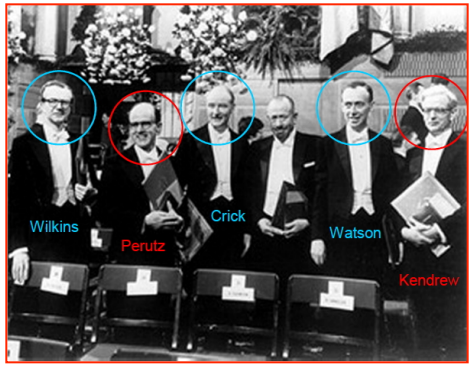


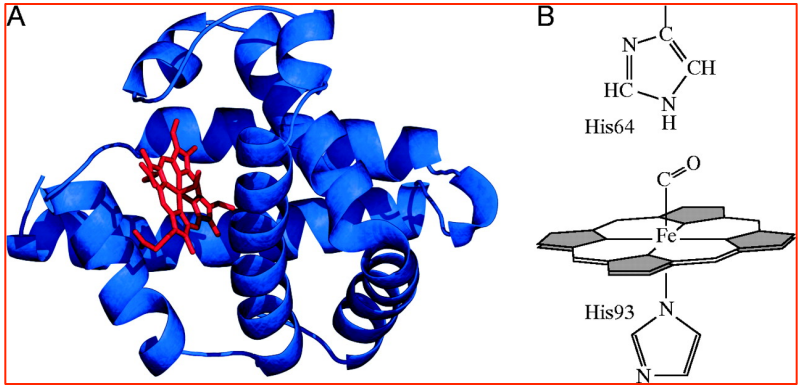


22 July 2014 http://biosync.sbkb.org/index.jsp

Biocristallografia e passato







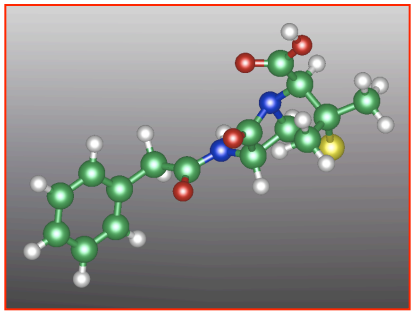
G. A. Ordway and D. J.Garry, J Exp Biol 2004

1962

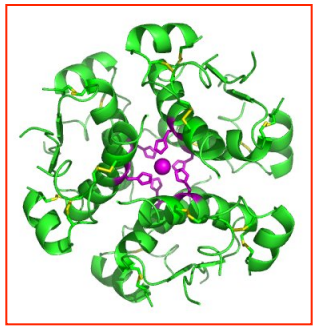
Nobel Prize in Physiology or Medicine was awarded jointly to F. H. C. Crick, J. D. Watson and M. H. F. Wilkins "for their discoveries concerning the molecular structure of nucleic acids and its significance for information transfer in living material". The first solved protein crystal structure was myoglobin 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" (penicellin, insulin, vitamin B12).

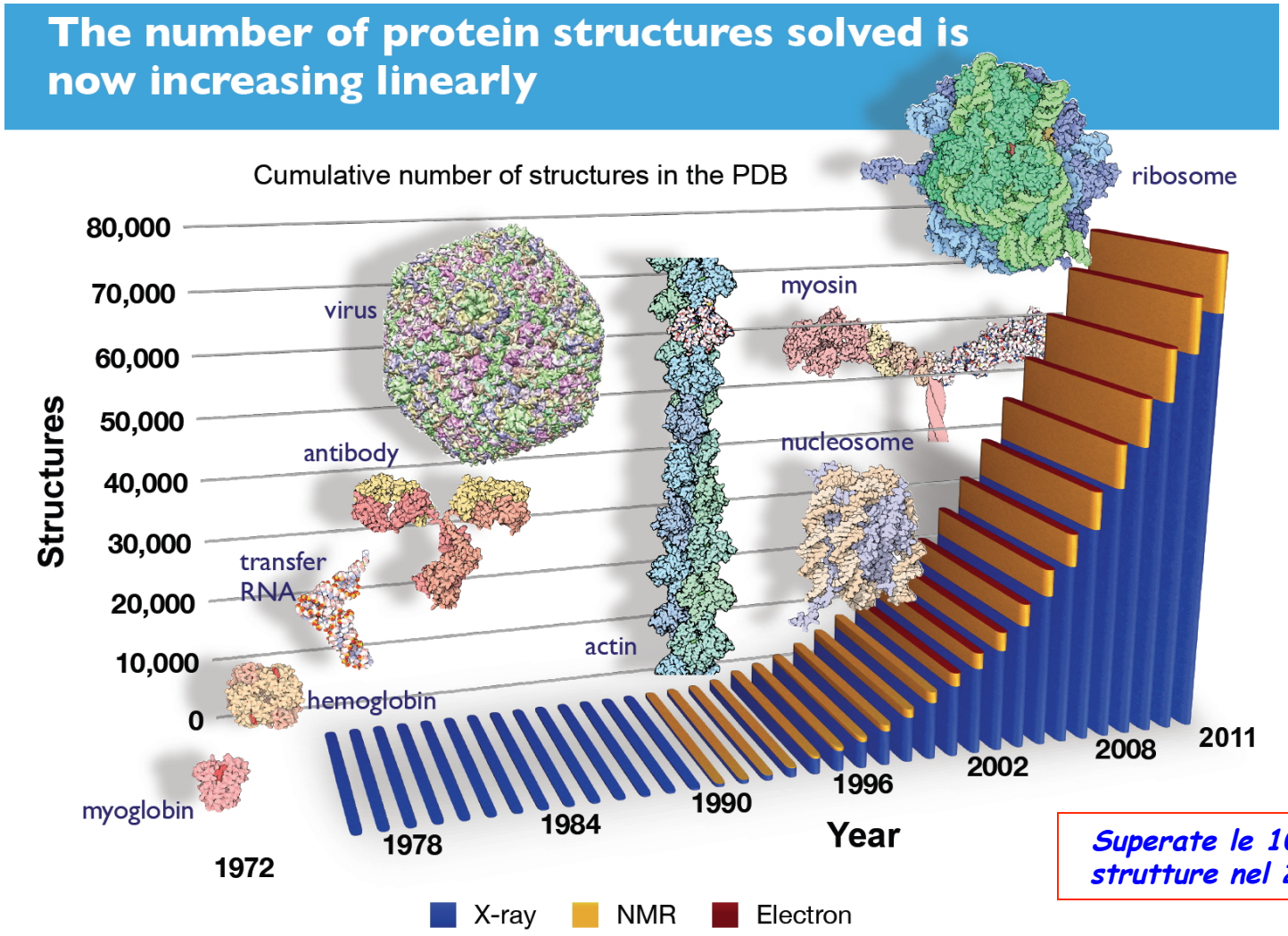


Penicellina modello 3D - Wikipedia



Insulina- Wikipedia

Luce di sincrotrone e progressi nella biologia strutturale



Superate le 100.000 strutture nel 2014 !!!

H. Chapman – Lecture on Imaging Molecules with X-ray Free-Electron Lasers - 2012

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

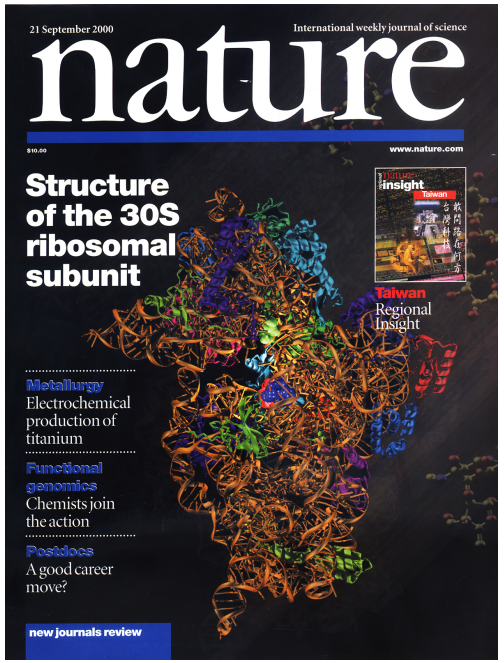
Venkatraman Ramakrishnan

Credits: Michael Marsland/Yale University

Thomas A. Steitz

Credits: Micheline Pelletier/Corbis

Ada E. Yonath



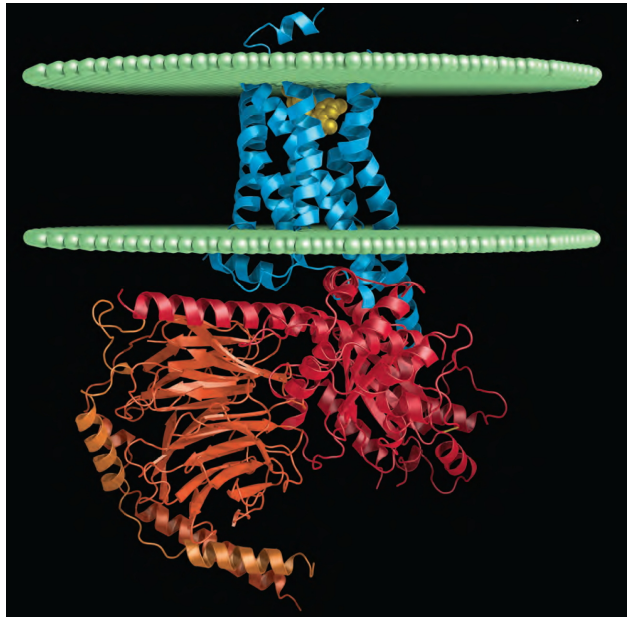
Ricerche effettuate con l'uso della luce di sincrotrone

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

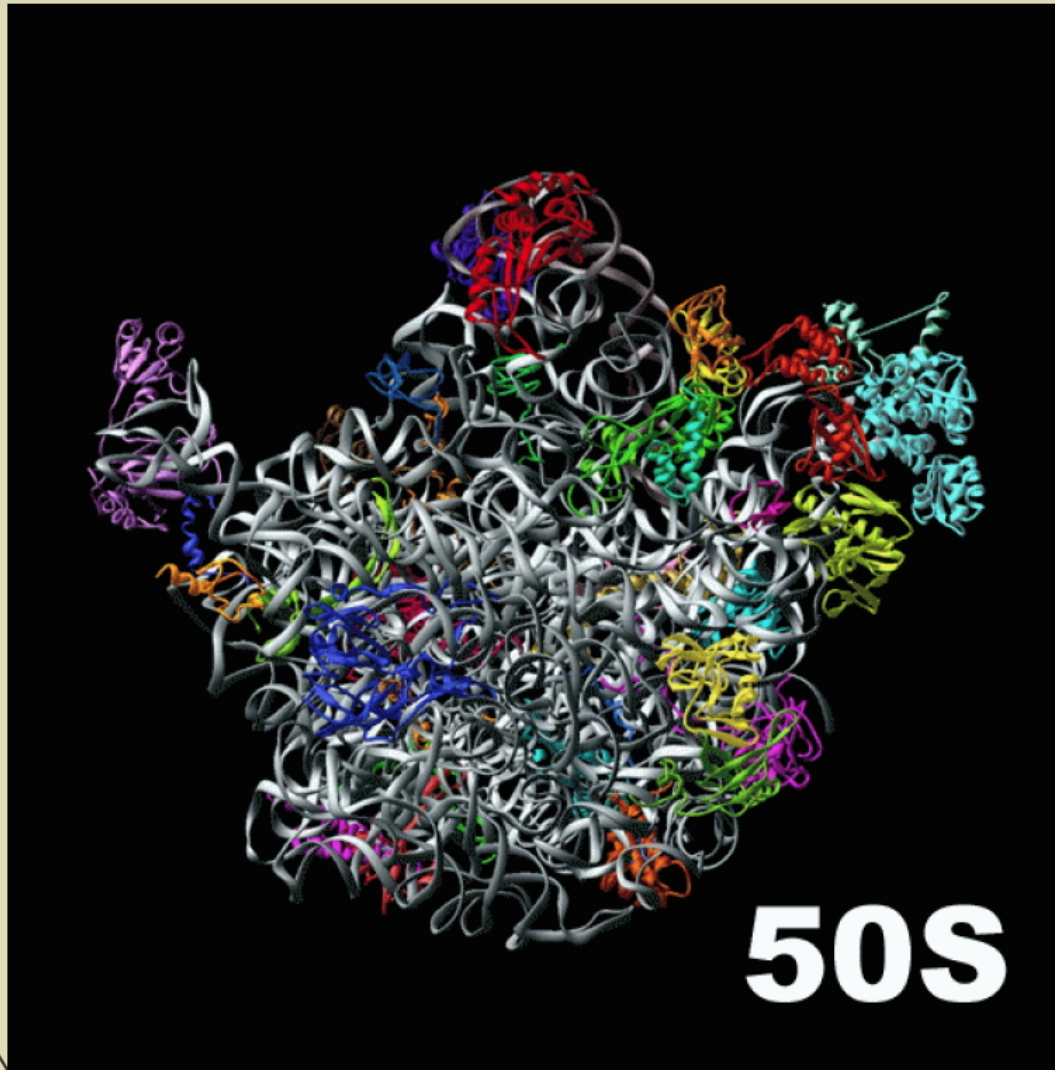
G-Protein Coupled Receptor (blue) sits within lipid bilayer (green) to respond to hormone (yellow)- Image by W. Decatur

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.

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

Myoglobin
16 kDa

50 YEARS



Ribosome 2.5 MDa

M. Bolognesi, Univ. Milano, Biologia strutturale, Conf. Luci di sincrotrone, CNR, 2014

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

Luce: onda e particella

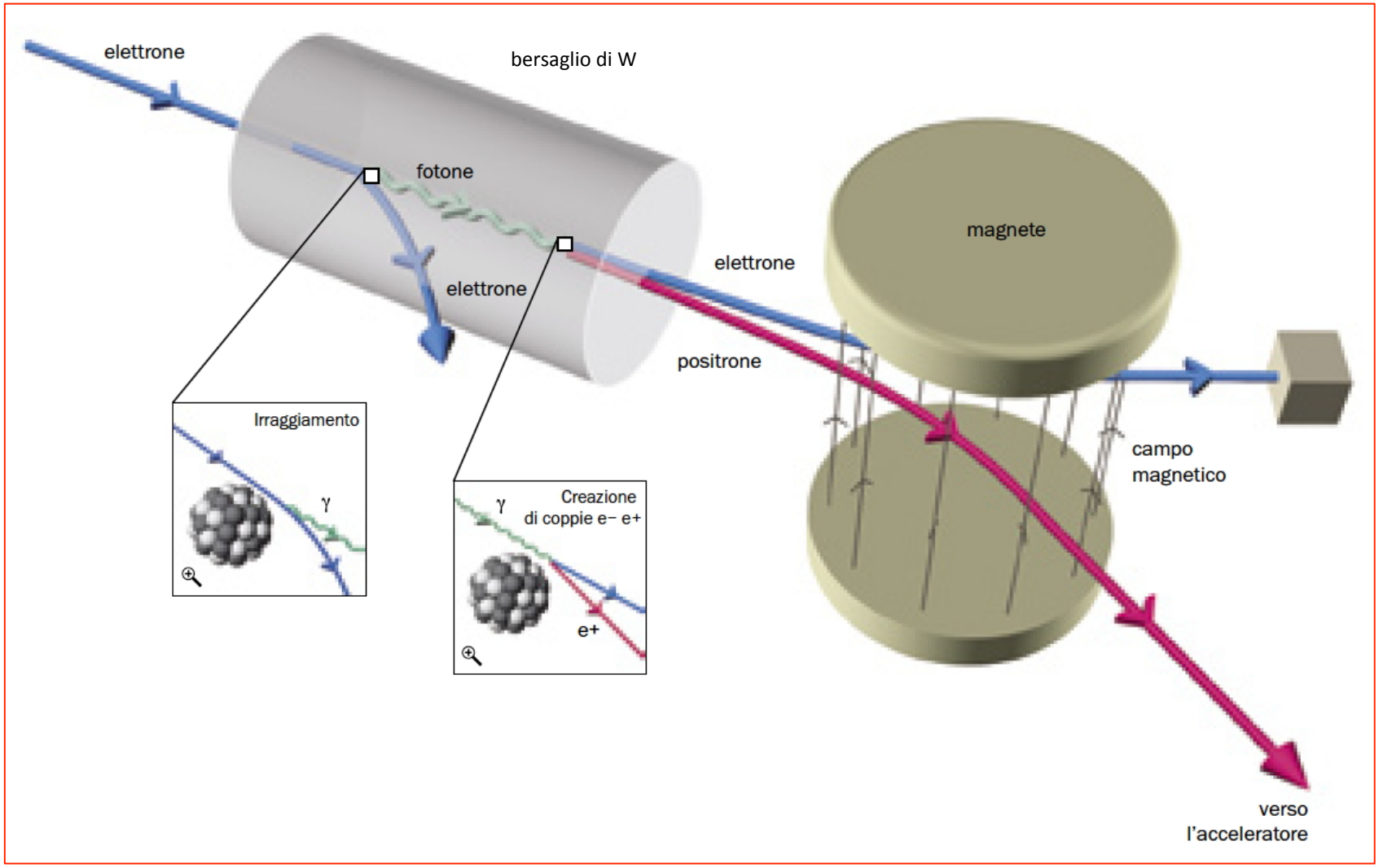
La ***natura della luce è oggetto di diatriba da secoli***: diversi esperimenti hanno osservato con successo ***sia la particella che l'onda***, ma sempre in maniera distinta e mai contemporaneamente. **Per Newton la luce era una particella**, per **Huygens invece un'onda**. A fine '800 nelle equazioni 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.

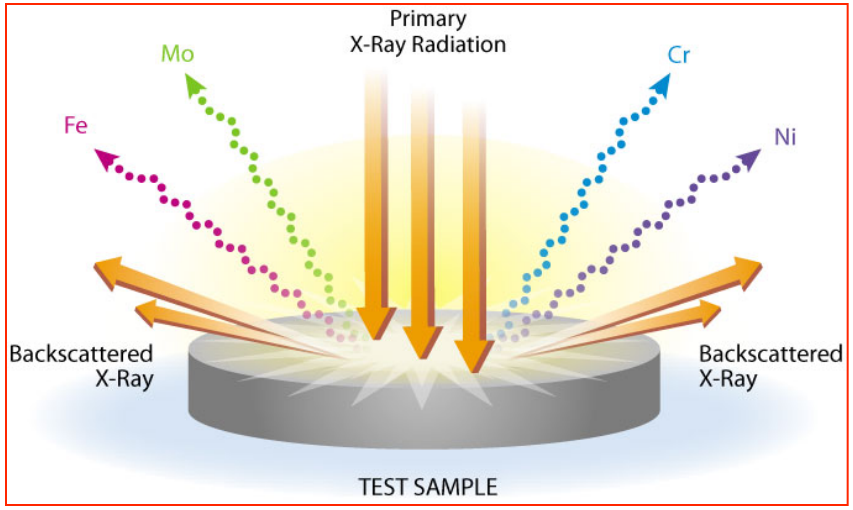
L. Piazza, T.T.A. Lummen, E. Quinonez, Y. Murooka,B. W. Reed, B. Barwick & F. Carbone, *Simultaneous observation of the quantization and the interference pattern of a plasmonic near-field*, **Nature Communications**, DOI: 10.1038/ncomms7407, **2015**

Produzione di anti-materia: positroni



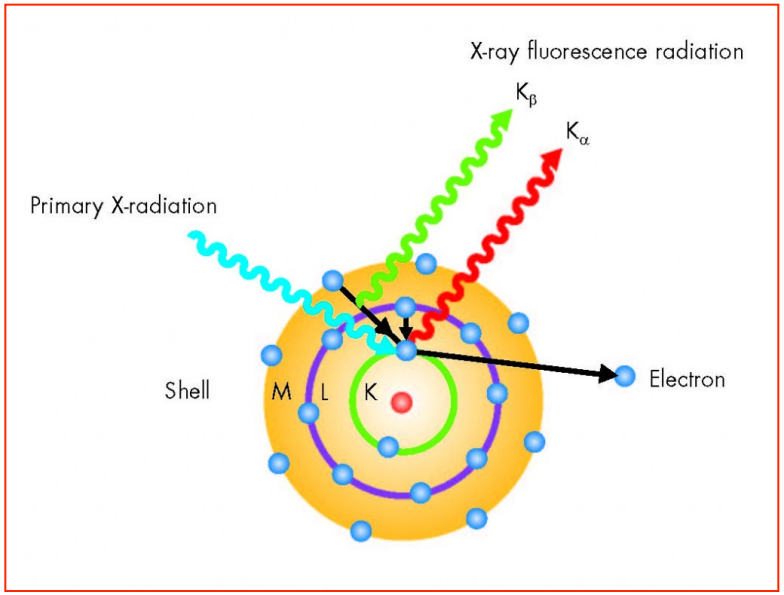
M. Calvetti, Antiparticelle accelerate, ***Asimmetrie*** 7, 16-21 (***2008***)

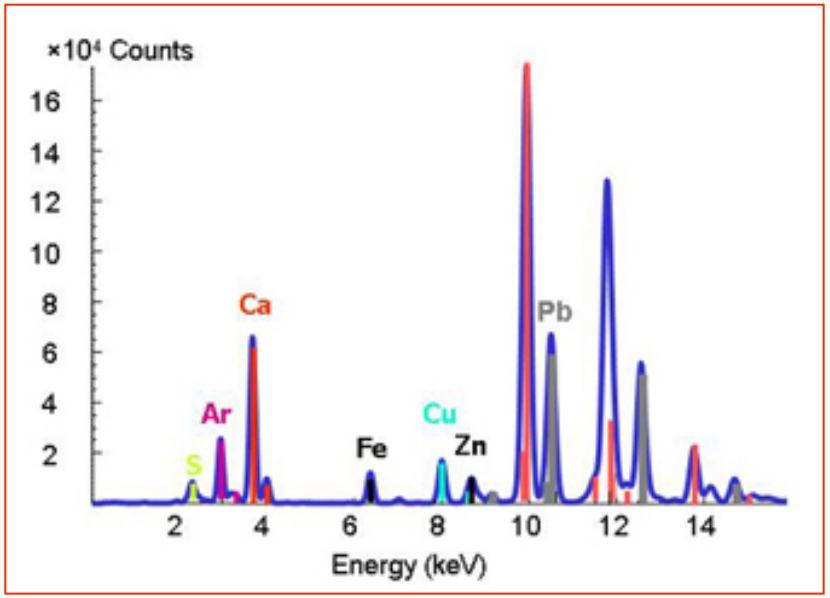
XRF o fluorescenza X



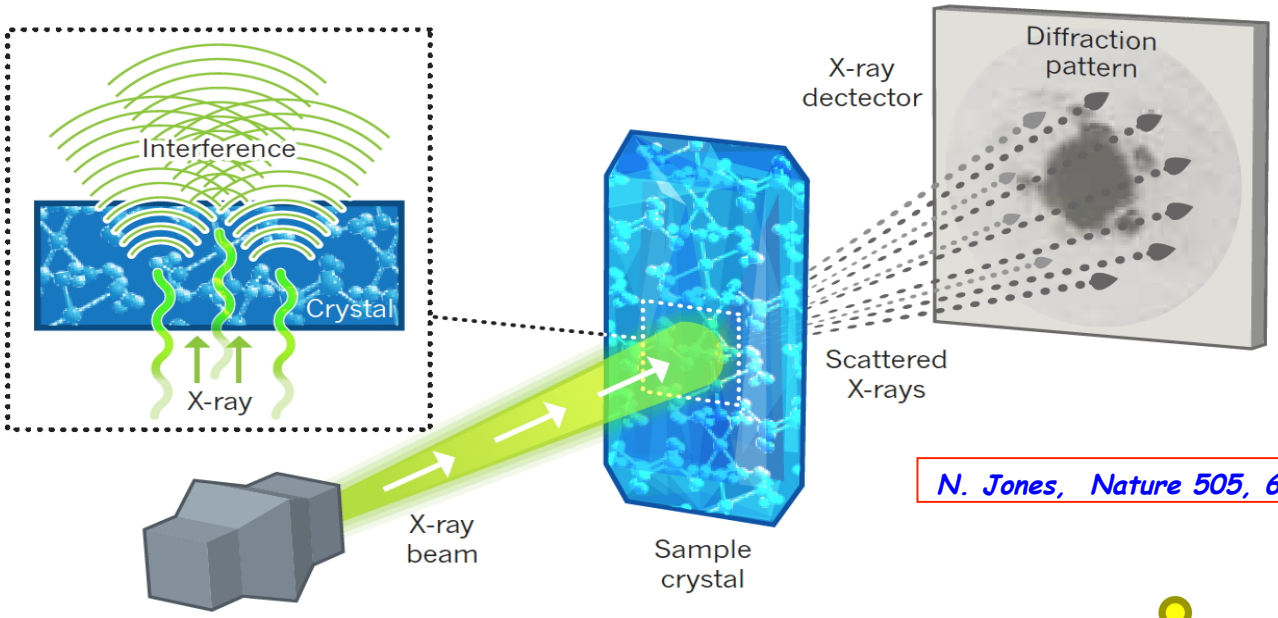
La spettroscopia legata alla fluorescenza-X è ***uno strumento che consente di determinare qualitativamente e quantitativamente e in modo non distruttivo, la composizione chimica*** di un campione, ***attraverso l'analisi delle radiazioni X caratteristiche emesse*** .
La ***radiazione proveniente dal campione viene rivelata in funzione della sua energia*** (*Energy dispersive*: ED-XRF) ***da rivelatori a stato solido tipo HPGe oSDD*** (Silicon Drift Detectors).

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



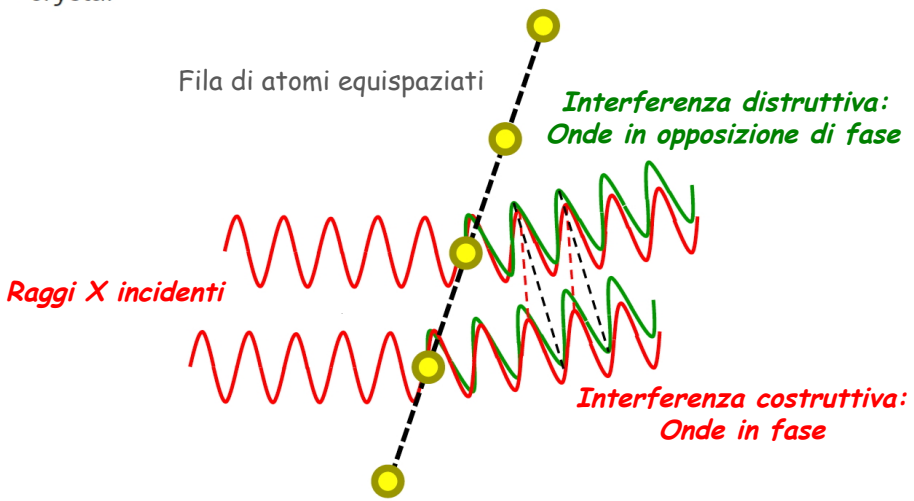


Cristallografia e raggi X



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 diffondenti) 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 si che i cristalli si comportino come un* ***reticolo di diffrazione tridimensionale rispetto ai raggi X****.*



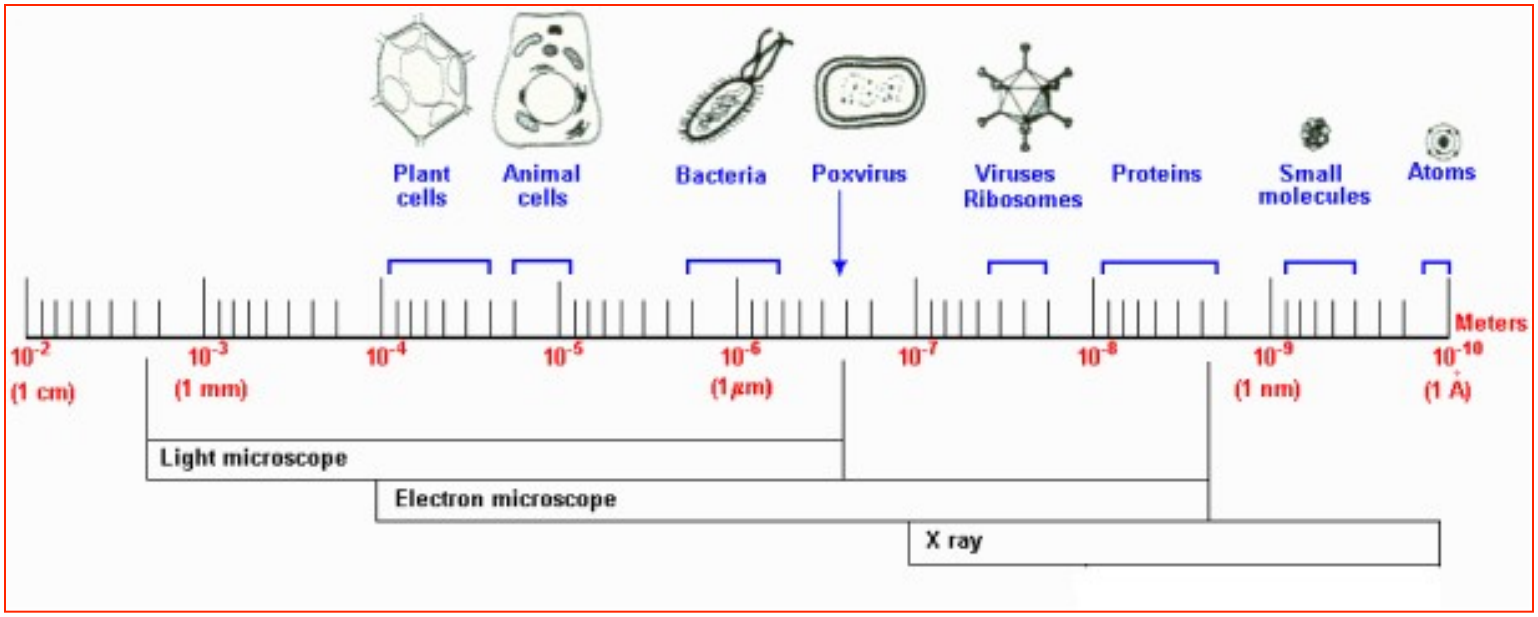
La ***diffrazione si verifica quando l'onda incontra un ostacolo di dimensioni comparabili alla sua lunghezza d'onda e gli*** spot regolarmente spaziati, sono distanziati fra loro in modo inverso **(reciproco) rispetto agli intervalli fra gli "oggetti" originari** .

Struttura delle proteine

*Le **proteine** sono tra i **composti organici piu' 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 e' associata sempre una **funzione biologica**.*

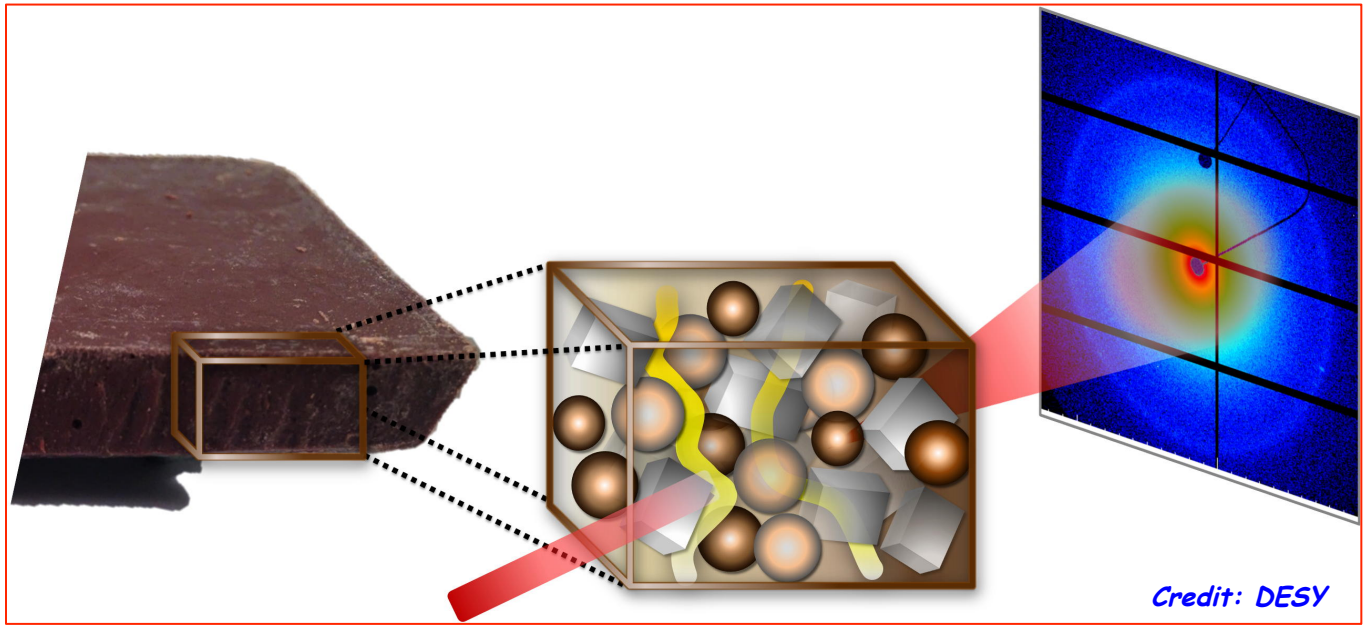
*Le **proteine sono macromolecole** che consistono di una o più catene polipeptidiche aggregate in una **struttura tridimensionale articolata su 4 livelli**.*



Spettro elettomagnetico 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.



Svenja K. Reinke et al., *Tracking Structural Changes in Lipid-based Multicomponent Food Materials due to Oil Migration by Microfocus Small-Angle X-ray Scattering*, **ACS Appl. Mater. Interfaces 2015, 7, 9929**