

I raggi X e lo sviluppo della “Fisica moderna”

Paolo Fornasini
Università di Trento, Dipartimento di Fisica

Sommario

- La scoperta dei raggi X
- Radiologia
- Cosa sono i raggi X ?
- I raggi X e la Fisica Moderna
 - Breve storia dell'atomo
 - La struttura dei solidi cristallini
 - La struttura elettronica dell'atomo

La scoperta dei raggi X

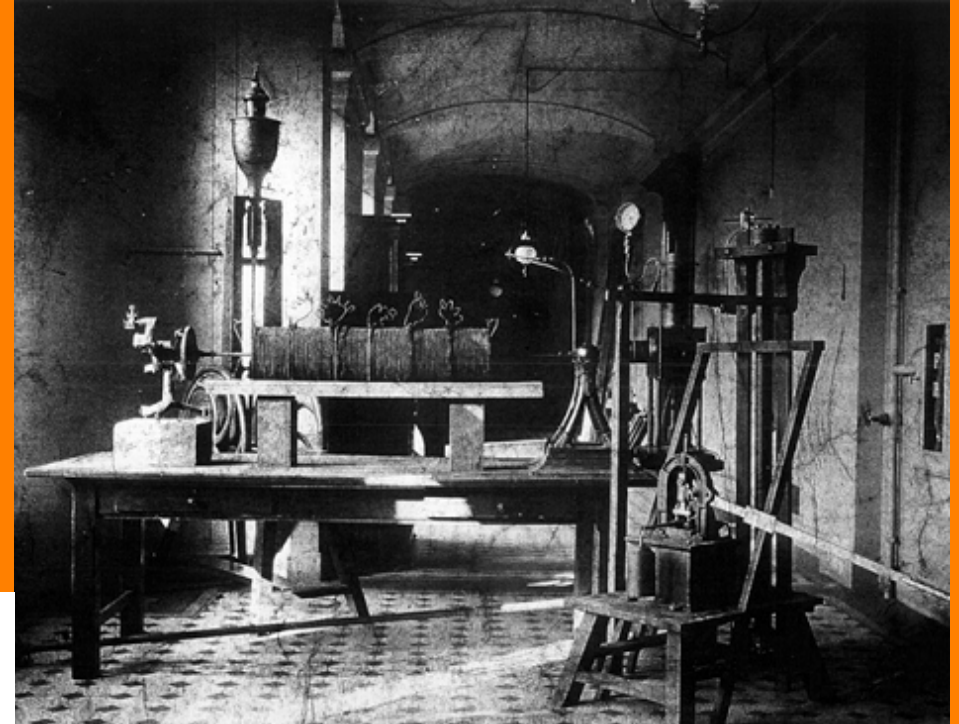


8 Novembre 1895



Wilhelm Konrad Röntgen
(1845-1923)

e il suo laboratorio
all'Università di Würzburg



La sera dell'8 Novembre 1895
Röntgen scopre **un nuovo tipo di radiazione**, che chiama "raggi X".

Le scariche nei gas

Lo studio delle scariche nei gas rarefatti è un argomento di ricerca molto popolare nella seconda metà dell'800.

I risultati ottenuti contribuiranno in modo determinante allo sviluppo della `Fisica "moderna". La ricerca è resa possibile dallo sviluppo di 2 tecnologie:

a) La produzione di alte tensioni mediante il rocchetto di Ruhmkorff (1851).

Il rocchetto consente di ottenere tensioni impulsate dell'ordine delle decine di kilovolt a partire dall'alimentazione in corrente continua fornita da batterie di pile.

Attorno allo stesso nucleo ferromagnetico sono avvolte due bobine, il *circuito primario*, alimentato da una batteria, e il *secondario*, a molte più spire.

Il primario comprende un interruttore e, in serie, un sistema a martelletto che interrompe periodicamente il contatto ogni volta che il nucleo ferromagnetico si magnetizza quando passa corrente.

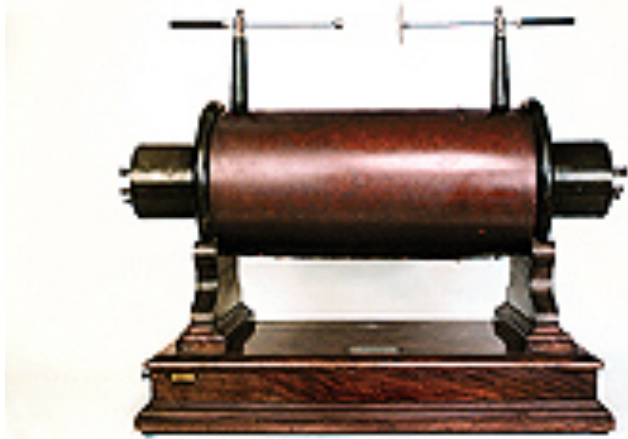
Dopo ogni interruzione del contatto, il nucleo ferromagnetico si magnetizza e il martelletto torna nella posizione iniziale chiudendo nuovamente il circuito.

In tal modo nel secondario circola corrente continua alternativamente in un verso e nell'altro.

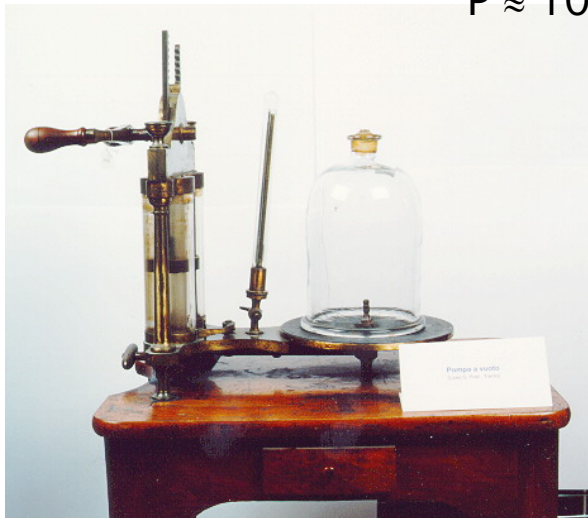
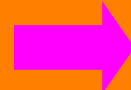
b) La tecnologia del vuoto.

Le pompe disponibili richiedono comunque ore di lavoro manuale per raggiungere pressioni dell'ordine dei 10^{-3} mbar (milionesimi di atmosfera).

Le scariche nei gas



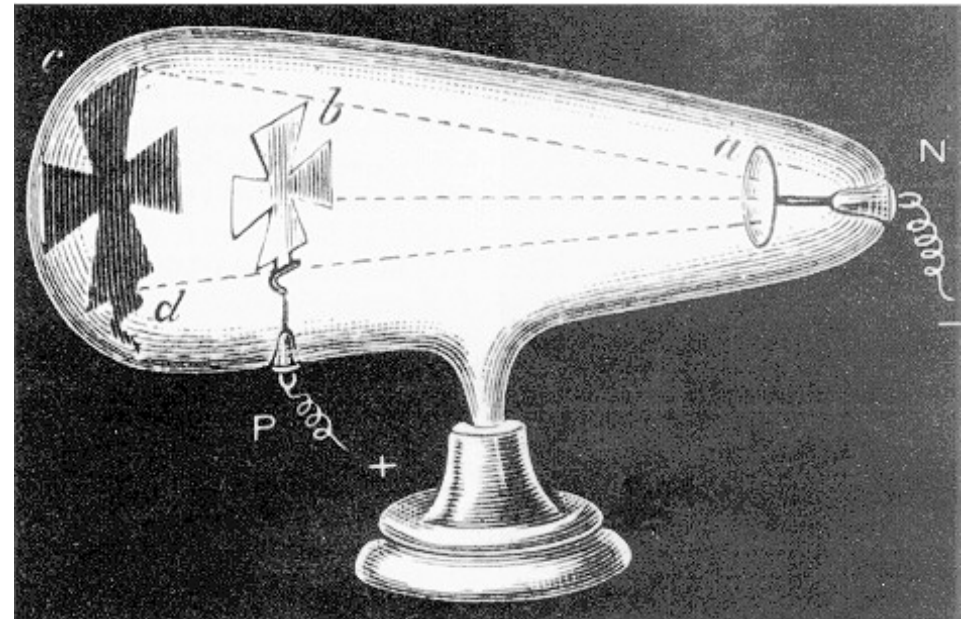
Rocchetto di Ruhmkorff
Alte tensioni impulsate



Pompe da vuoto manuali
 $P \approx 10^{-6}$ bar



Scariche elettriche nei gas rarefatti



1869 - J.W.Hittorf scopre i "raggi catodici"

Prima di Röntgen

I raggi catodici

Nel 1869 J.W.Hittorf, dell'università di Münster, ottiene pressioni inferiori a 0.001 mbar (milionesimi di atmosfera) e scopre i "raggi catodici", che producono fluorescenza sul vetro dell'ampolla da vuoto.

La scoperta stimola la ricerca sui "raggi invisibili di alta frequenza" previsti da H.L.F. von Helmholtz in base alla teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell.

W. Crookes costruisce una grande varietà di tubi da vuoto per ricerche sui raggi catodici (i "tubi di Hittorf-Crookes").

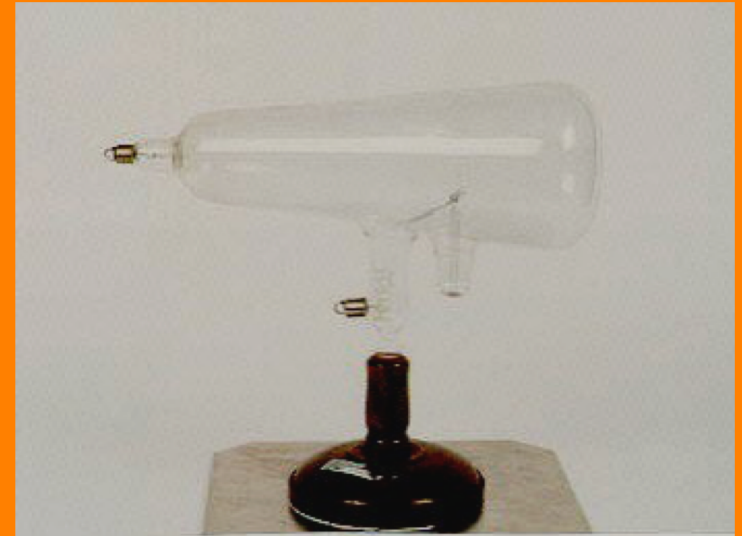
Intorno al 1880 Crookes osserva appannamenti inspiegabili di pellicole tenute presso tubi a raggi catodici; restituisce le pellicole come difettose.

Nel 1890 A.W.Goodspeed, dell'Univ. della Pennsylvania, osserva l'ombra lasciata da due monete su una lastra fotografica, ma non indaga oltre.

Nel 1892 P. Lenard costruisce un'ampolla con una sottile finestra di alluminio dalla quale i raggi catodici possono uscire, e inizia a studiare l'interazione dei raggi catodici con la materia. Nel 1893 osserva una fluorescenza inattesa prodotta al di fuori del tubo a raggi catodici, ma non ha la possibilità di svolgere ulteriori indagini.

Prima di Röntgen

W. Crookes costruisce una grande varietà di tubi catodici (i “tubi di Hittorf-Crookes”).



1880 - W. Crookes
appannamenti di pellicole presso tubi catodici -
restituisce le pellicole come difettose.

1890 - A.W.Goodspeed
ombra lasciata da due monete su una lastra fotografica - non
indaga oltre.

1893 - P. Lenard
fluorescenza inattesa al di fuori del tubo catodico
non può svolgere ulteriori indagini.

La scoperta di Roentgen

Nella tarda sera dell' 8 novembre, mentre lavora nel suo laboratorio con un tubo di Hittorf coperto da un cartone nero, Röntgen osserva una luce di fluorescenza emessa da uno schermo di platinocianuro di bario.

Attribuisce il fenomeno ad un nuovo tipo di radiazione emessa dal tubo catodico.

Per sette settimane non abbandona il laboratorio, eseguendo una serie di esperimenti decisivi per caratterizzare le proprietà dei “raggi X”.

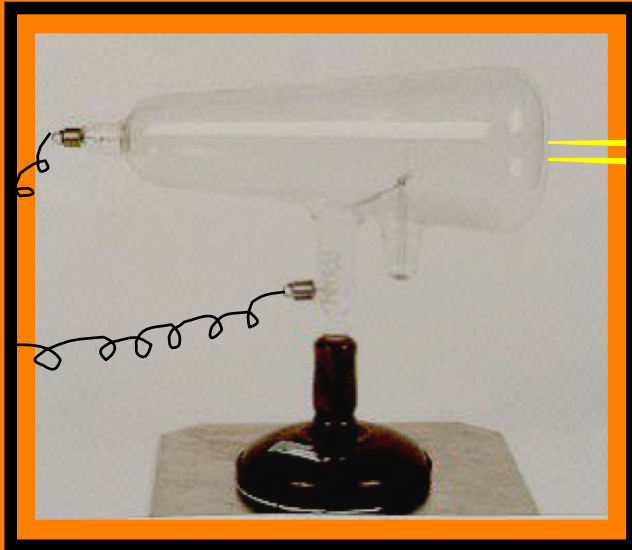
Il 28 dicembre 1895 invia all' Associazione fisico-medica di Würzburg un manoscritto, intitolato "Su un nuovo tipo di raggi, resoconto preliminare ".

Il manoscritto si articola in 17 punti che riassumono i risultati delle sette settimane di sperimentazioni.

Röntgen spedisce copie del manoscritto a molti colleghi sparsi nel mondo.

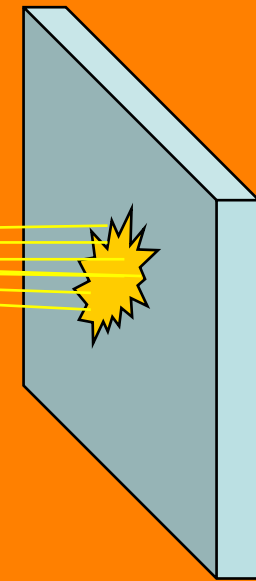
La scoperta di Roentgen

Tubo catodico schermato



Fluorescenza !

Nuovo tipo
di radiazione ?



Lastra
 $\text{BaPt}(\text{CN})_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Per sette settimane Roentgen non abbandona il laboratorio, eseguendo una serie di esperimenti decisivi per caratterizzare le proprietà dei “raggi X”.

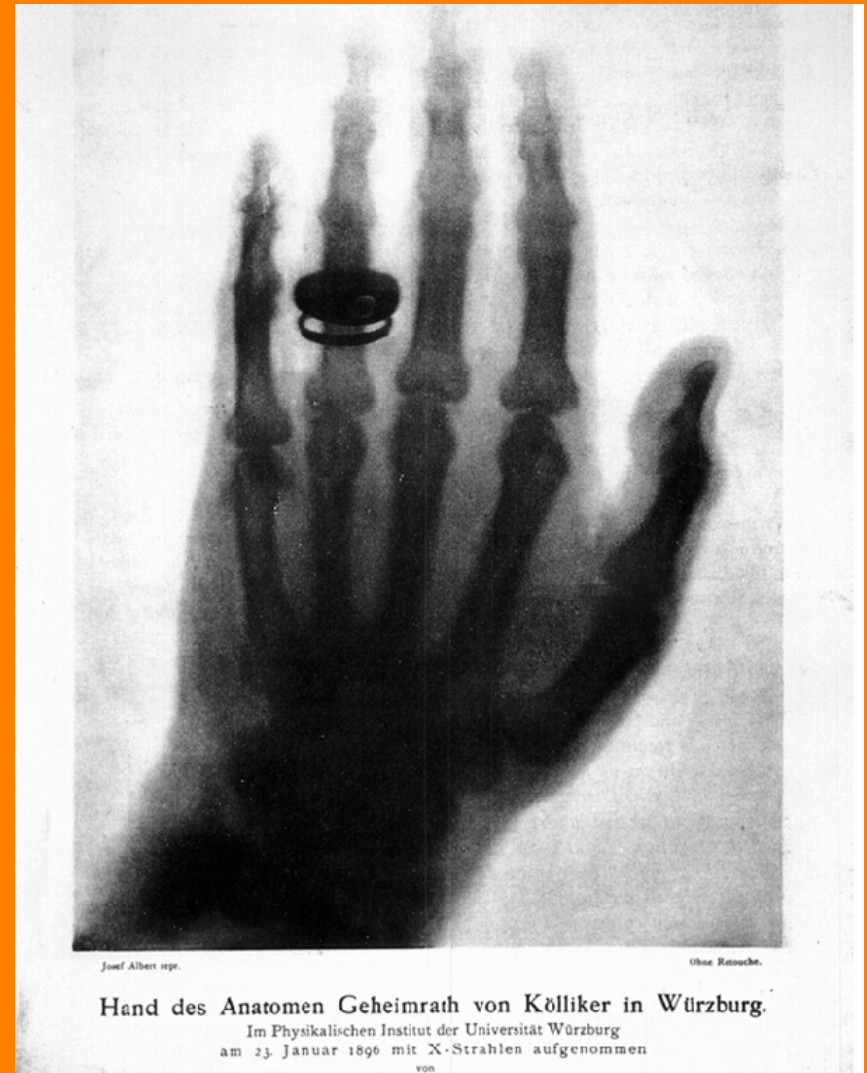
Prime proprietà dei raggi X

➤ Elevato potere di penetrazione,
dipendente da
natura e densità dei materiali.

➤ I raggi X impressionano
le lastre fotografiche



Radiografia



Europa e Germania nel 1895



1861-1888
Guglielmo I

1888-1918
Guglielmo II

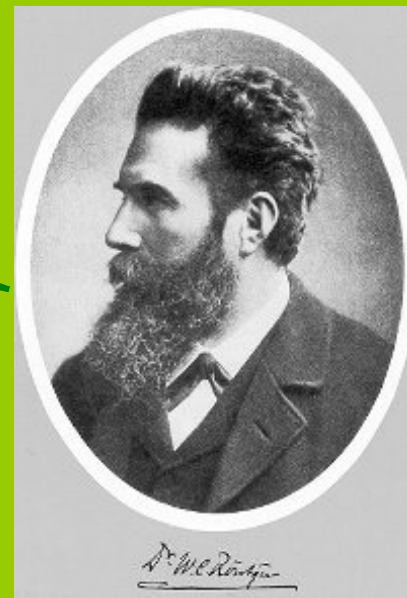
1862-1890
Bismark

1870	Guerra franco-prussiana
1871	Unificazione tedesca
1914	Inizio Grande Guerra

Il valore della scoperta scientifica

La mia scoperta appartiene al mondo intero.

Roentgen rifiuta di brevettare la sua scoperta, favorendo così il rapido sviluppo delle applicazioni.



- Röntgen comunica subito ai colleghi di tutto il mondo la sua scoperta, illustra gli esperimenti condotti e le sue ipotesi.
- Fisici, medici e molti altri iniziano subito a studiare e utilizzare la nuova radiazione.

La scoperta si diffonde

28-12-1895 Röntgen invia all'Associazione Fisico-Medica di Würzburg e a colleghi sparsi in tutto il mondo la comunicazione della scoperta.

Sui giornali:

5-1-1896 *Neue Freie Presse* (Vienna)

6-1-1896 *Frankfurter Zeitung*

7-1-1896 *London Standard*

8-1-1896 New York

12-1-1896 *Corriere della Sera*

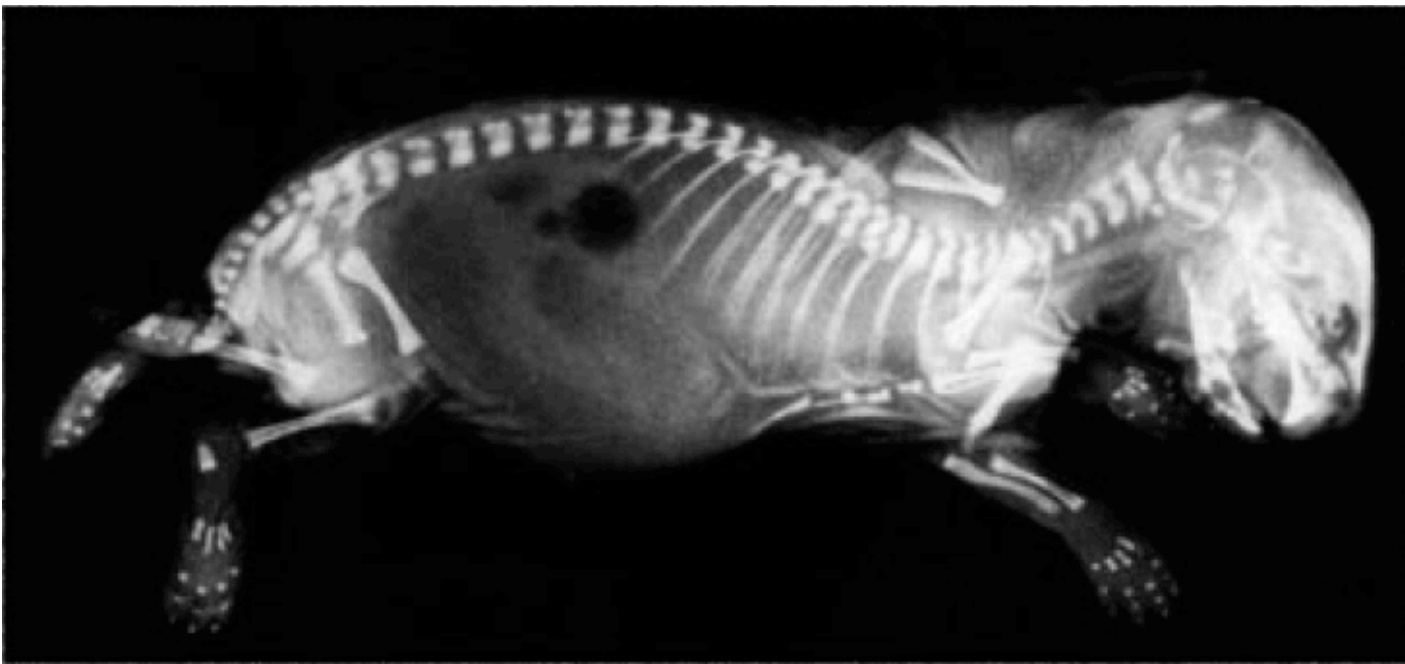
21-1-1896 *Alto Adige* (Trento)



Iniziano subito in Europa e in America le prime applicazioni mediche:

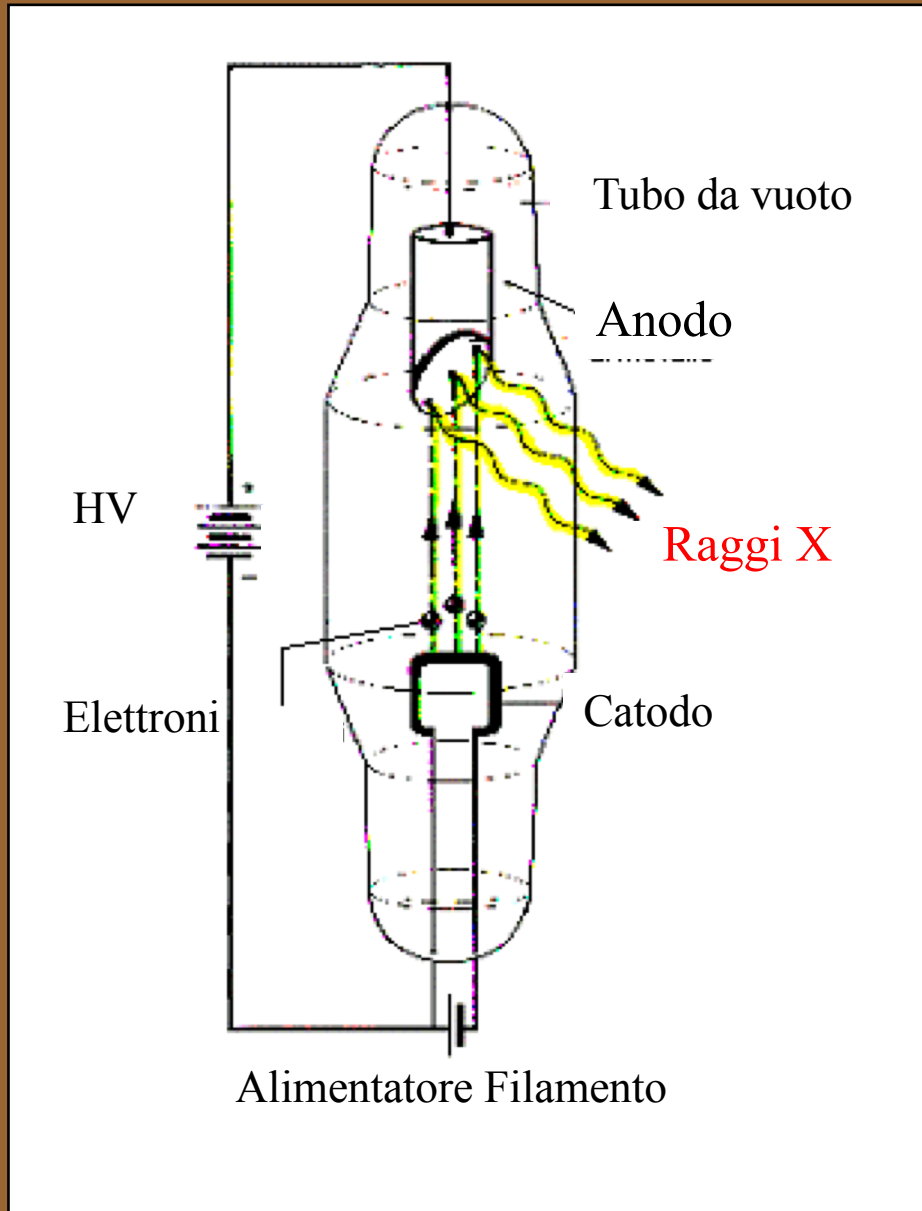
Febbraio 1896: primo trattamento contro il cancro a base di raggi X

Maggio 1896: prime radiografie in guerra (guerra italo-etioptica).



Radiografia

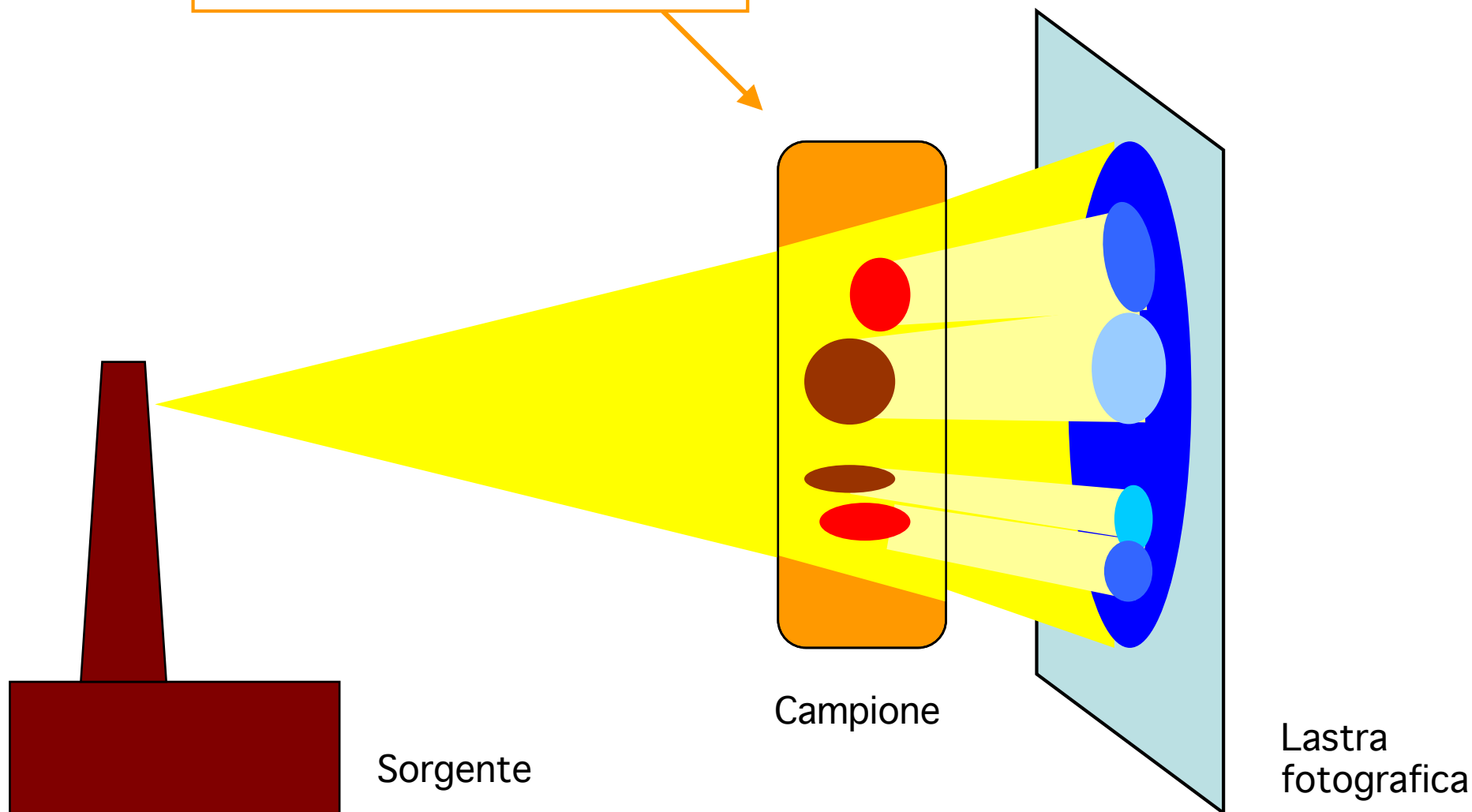
I tubi a raggi X



Tubo di Coolidge, 1913

Il meccanismo della radiografia

L'assorbimento dipende
da tipo e densità del materiale



Gli inizi della radiologia

WONDERFUL NEW RAY
SEES THROUGH HAND!



X-Ray Studio . . .

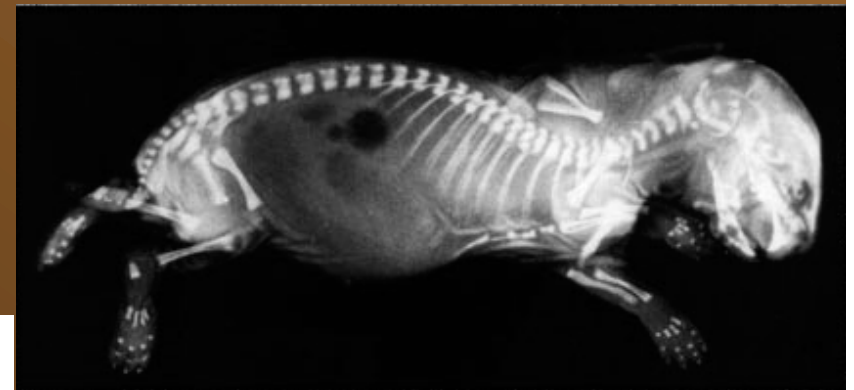
110 East Twenty-Sixty Street,

....New York City.



1903

1896



L'evoluzione della radiologia

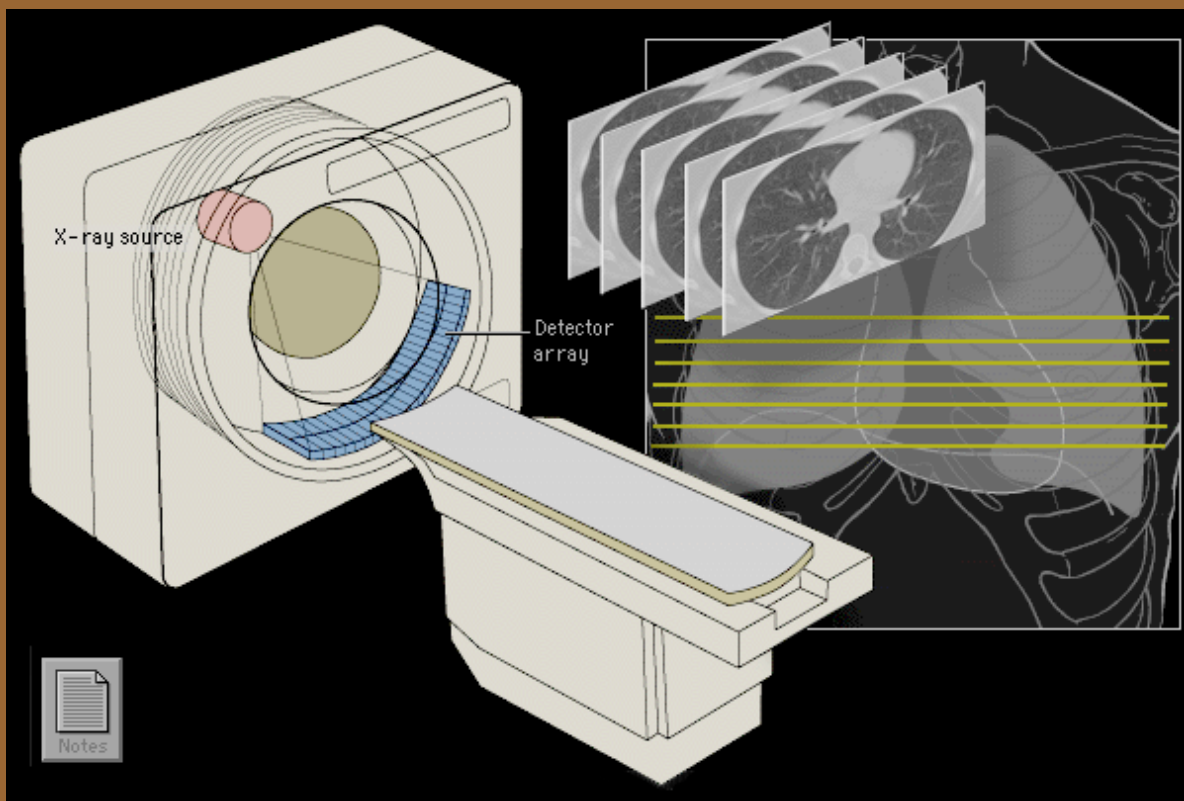


Dalle prime radiografie...

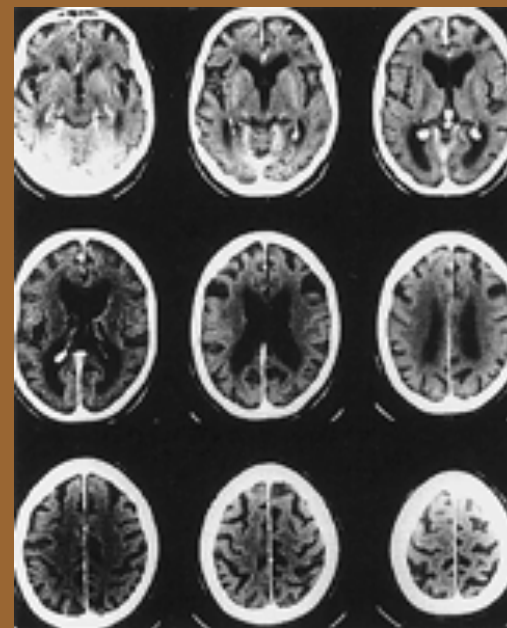


... alla TAC
(Tomografia Assiale Computerizzata)

Radiologia oggi



Tomografia
Assiale
Computerizzata



Il primo Nobel per la Fisica



1901 - W.K. Roentgen
Nobel per la Fisica

Altri Nobel per ricerche con raggi X

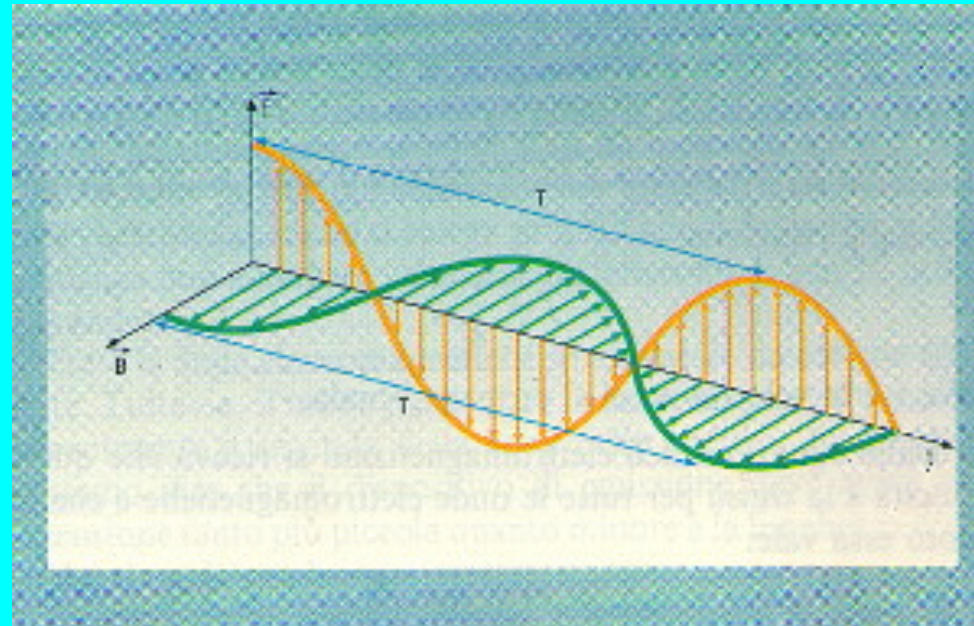
- 6 per la Fisica
- 4 per la Chimica
- 2 per la Medicina



Cosa sono i raggi X ?

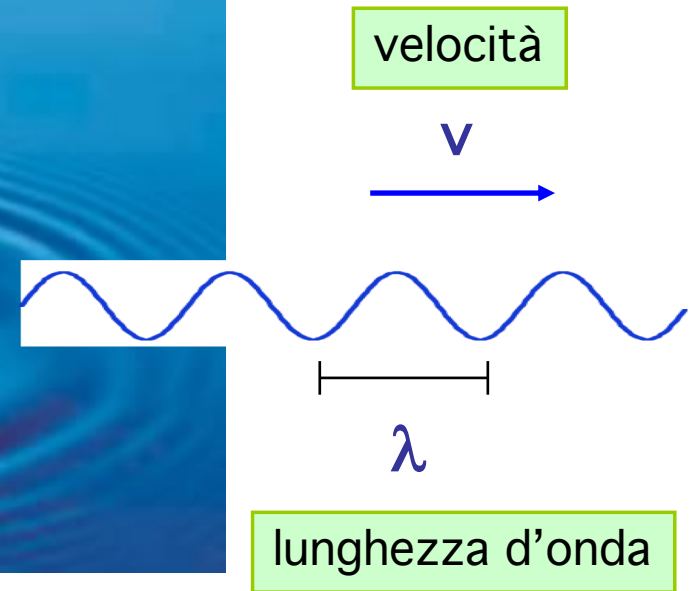
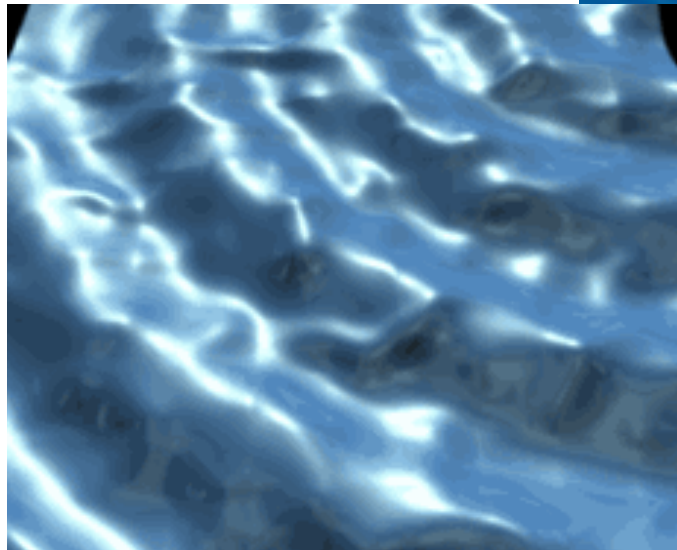
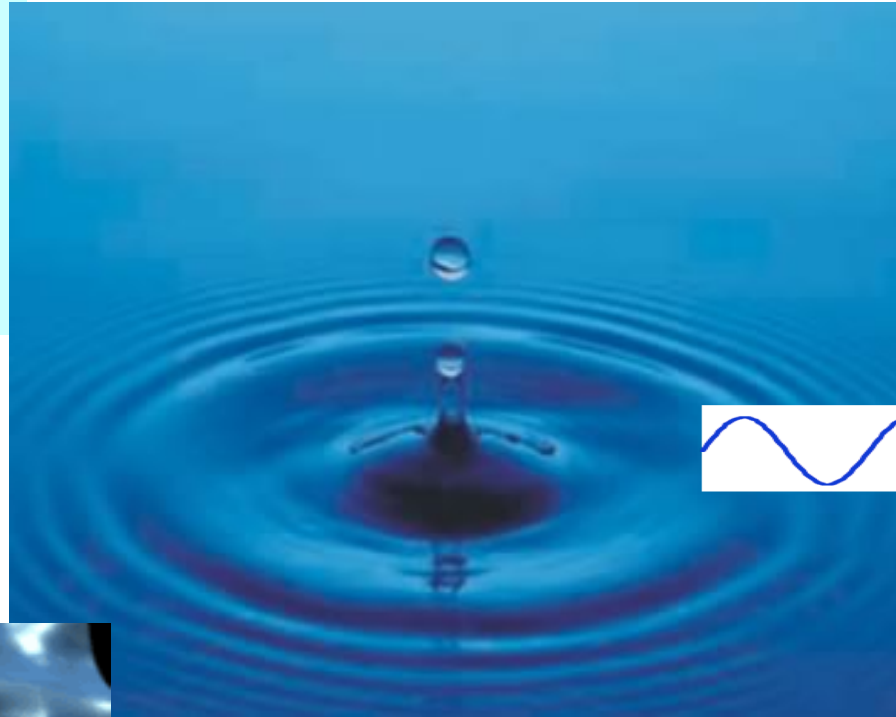


Cosa sono i raggi X



I raggi X sono
onde elettromagnetiche

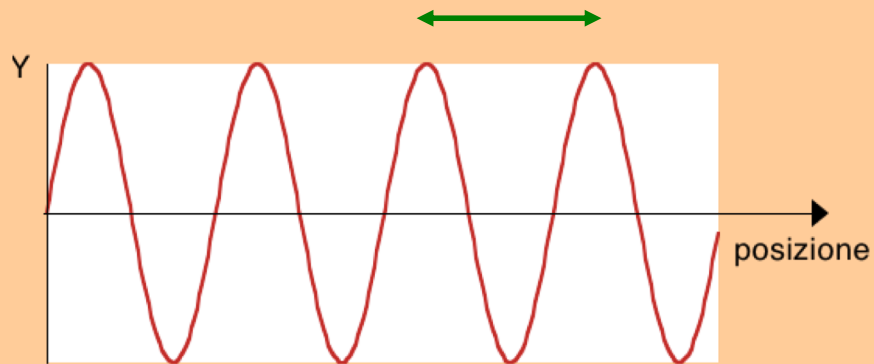
Onde nell'acqua



La fisica delle onde

Istante fisso

Lunghezza d'onda λ



Frequenza

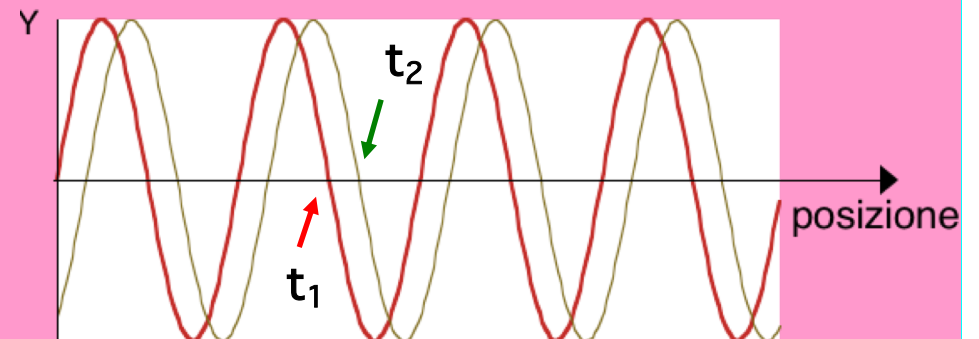
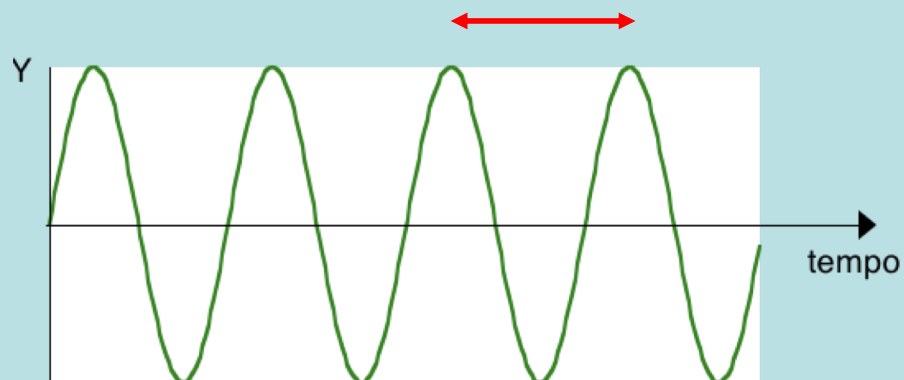
$$\nu = \frac{1}{T}$$

Velocità di propagazione

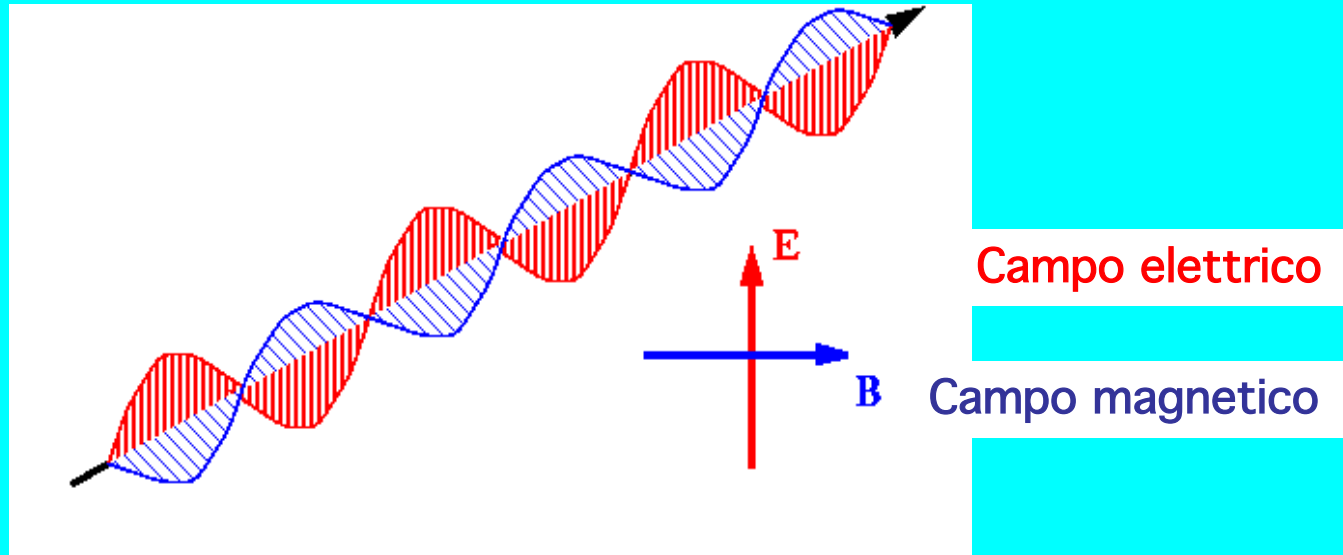
$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu$$

Posiz. fissa

Periodo T



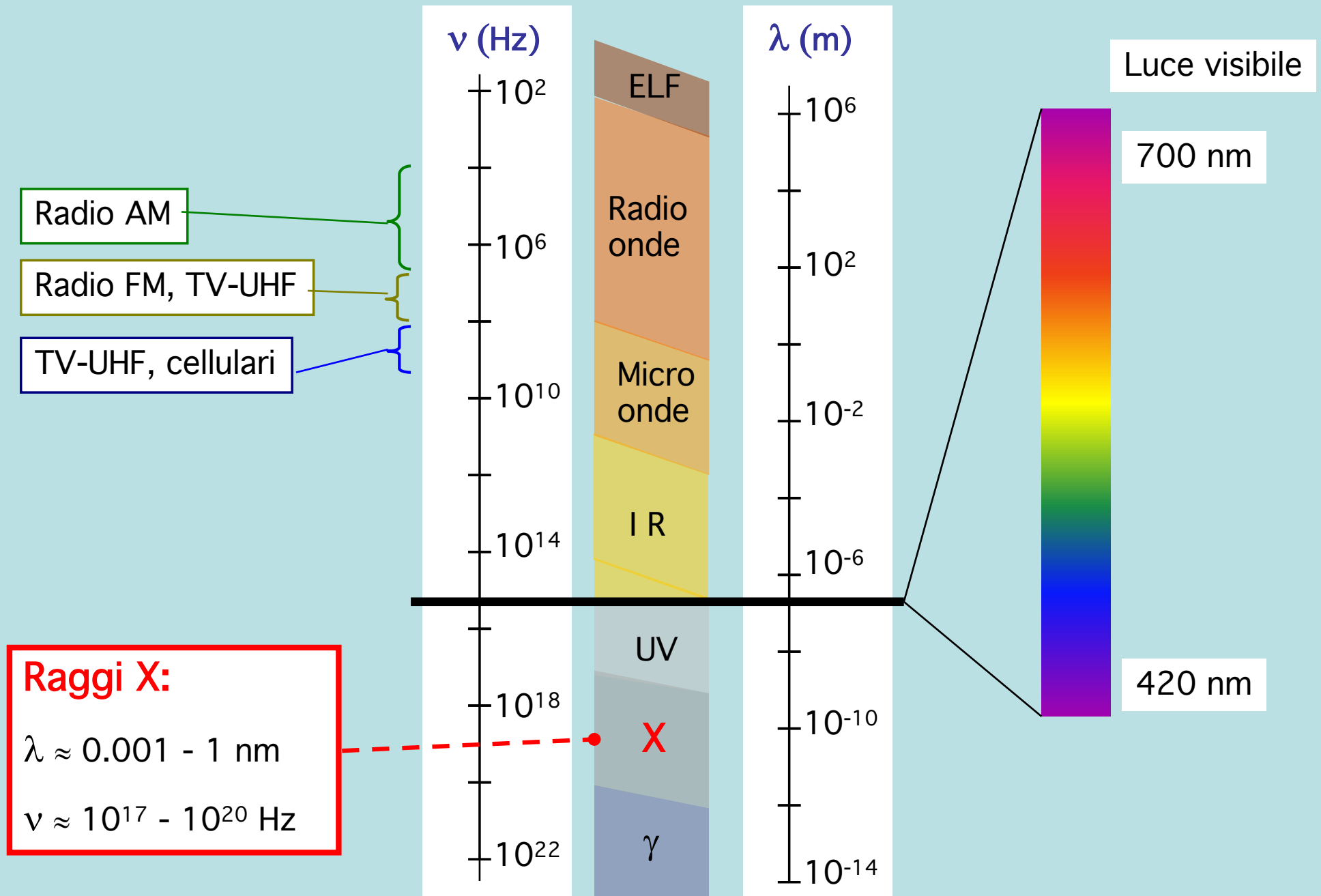
Onde elettromagnetiche



Velocità di propagazione nel vuoto:

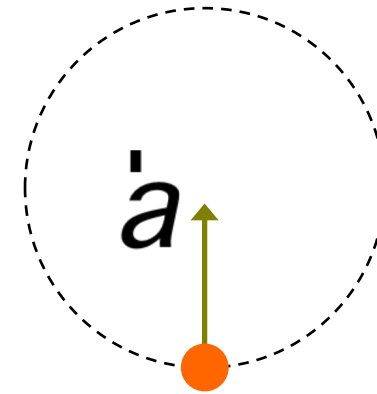
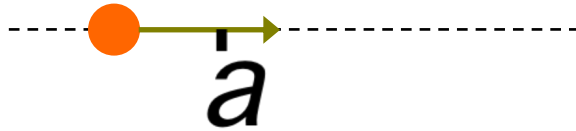
$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$
$$\sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Lo spettro elettromagnetico

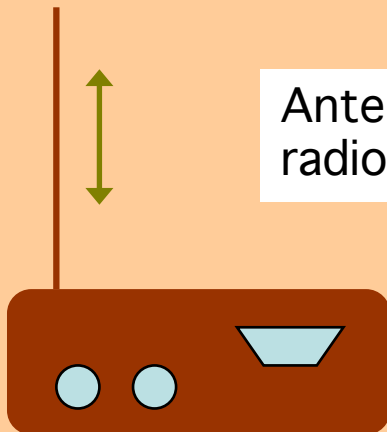


Generazione di onde elettromagnetiche

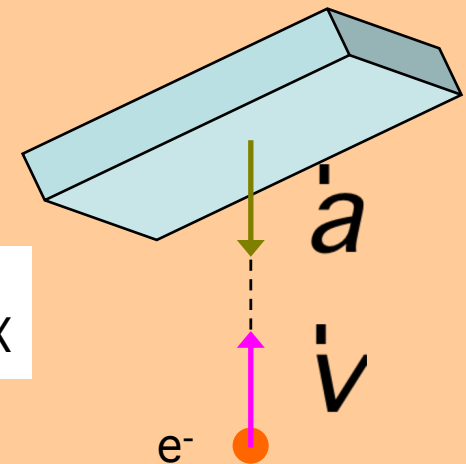
Una carica elettrica accelerata emette onde elettromagnetiche



Antenna radio/trasmittente



Anodo di tubo a raggi X



Raggi X e Fisica Moderna

- Storia dell'atomo
- Struttura dei cristalli
- Spettroscopia atomica



Fisica "Classica" e Fisica "Moderna"

1700

1800

1900

2000

Meccanica classica

Termodinamica

Elettromagn.

Atomi
Particelle sub-atomiche
Relatività
Meccanica quantistica

1700

1800

1900

2000



Breve storia dell'atomo

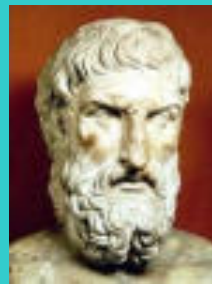
ELEMENTS	
Hydrogen. 1	Strontian 46
Azote 5	Barytes 68
Carbon 5	Iron 50
Oxygen 7	Zinc 56
Phosphorus 9	Copper 56
Sulphur 13	Lead 90
Magnesia 20	Silver 190
Limic 24	Gold 190
Soda 28	Platina 190
Potash 42	Mercury 167

Atomi: le origini

- Atomi
- discontinuità



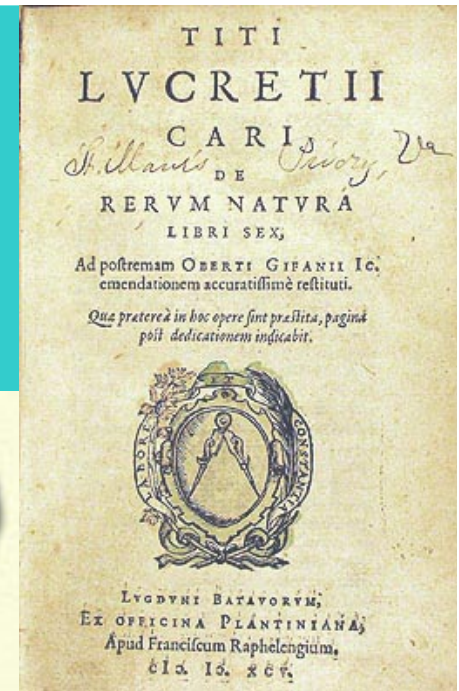
Democrito



Epicuro



T. Lucrezio Caro



500

400

300

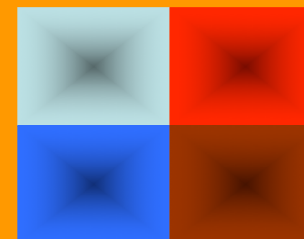
200

100

AC

Empedocle

Aristotele



- 4 elementi
- continuità

L' "ipotesi atomica" in chimica

J.L. Proust

- proporzioni costanti

J. Dalton

- proporz. multiple
- atomi

Gay-Lussac

- gas: rapporti di volume

Berzelius

- simboli chimici

Group	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Period 1	H=1							
2	Li=7	Be=9.4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27.3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35.5	
4	K=39	Ca=40	?=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59 Ni=59
5	Cu=63	Zn=65	?=68	?=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	?=100	Ru=104, Rh=104 Pd=106
7	Ag=108	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140				
9								
10			?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184		Os=195, Ir=197 Pt=198
11	Au=199	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208			
12				Th=231		U=240		

1700

1800

1900

R. Boyle

Materia = particelle in movimento

A.L. Lavoisier

- elementi chimici
- qualità delle particelle

1860
S. Cannizzaro

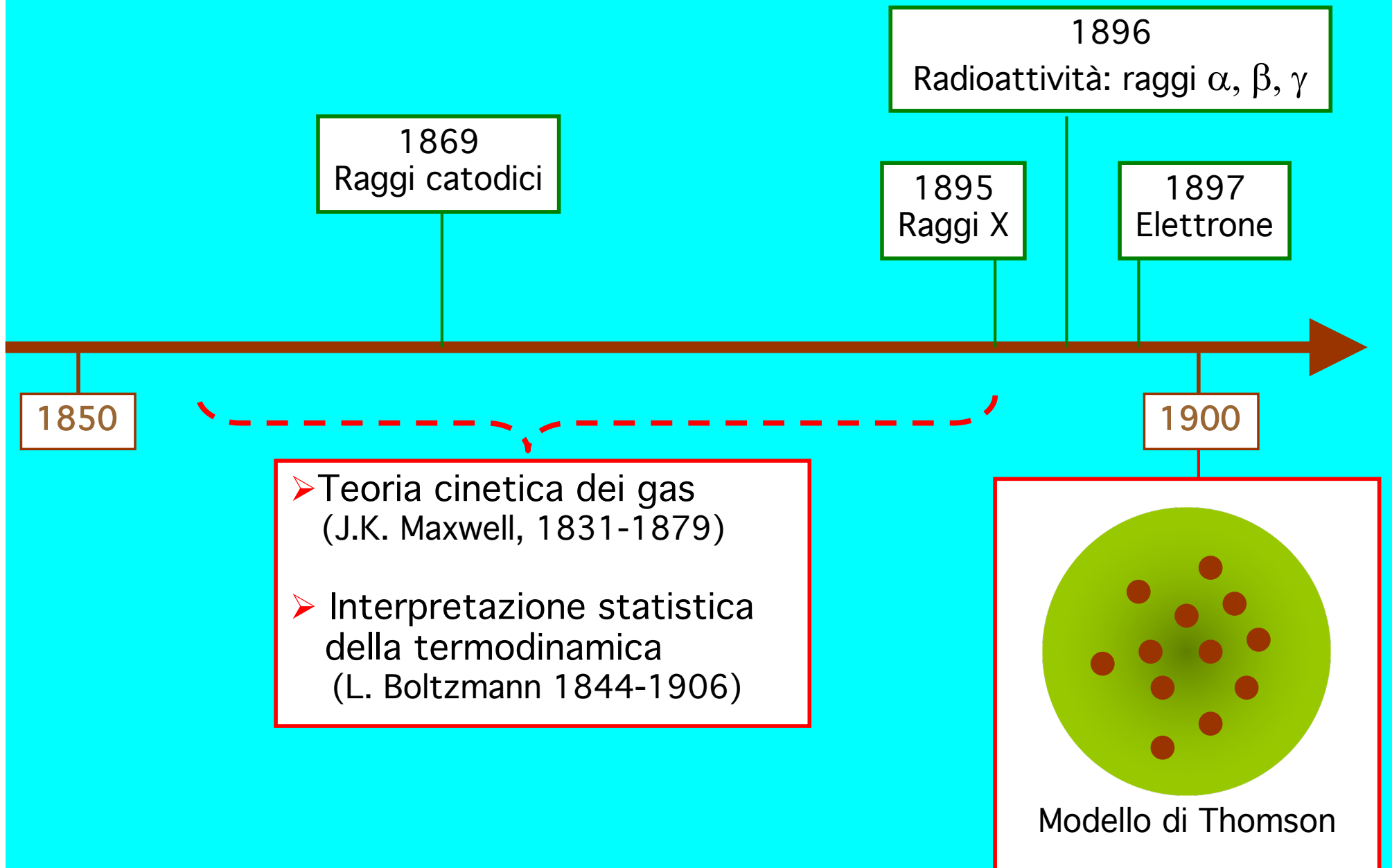
1811 - A. Avogadro

- atomi e molecole
- legge del volume di gas diversi

S. Arrhenius
dissociazione elettrolitica

He

L' "ipotesi atomica" in fisica (1)

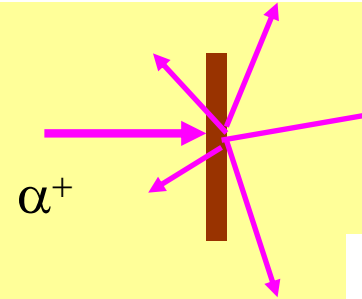
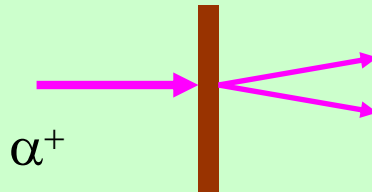


L' "ipotesi atomica" in fisica (2)

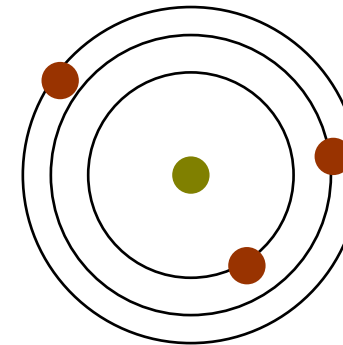
1900

1905
Interpretazione
dei
moti browniani
(Einstein)

1911 - Esperienza di Rutherford



$$F = -k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$



1913 - Modello di Bohr

La struttura dei cristalli



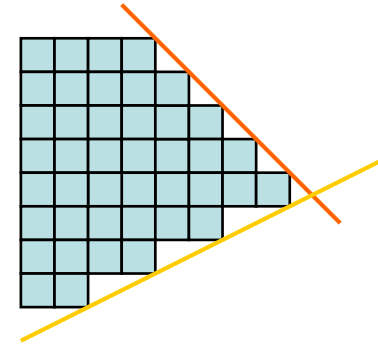
Il "cristallo di rocca" e' un minerale di quarzo molto limpido e di forme geometriche perfette. Nel linguaggio comune il termine "cristallo" è legato alla trasparenza (indipendentemente dall'ordine geometrico). Nel linguaggio della Fisica il termine "cristallo" è legato all'ordine geometrico della struttura atomica (indipendentemente dalla trasparenza).

Cristalli



Cristallo di quarzo (SiO₂)

Legge della costanza degli angoli
R. de l'Isle (1736-1790)



Impaccamento regolare
di unità strutturali microscopiche
R.J. Haüy (1743-1822)

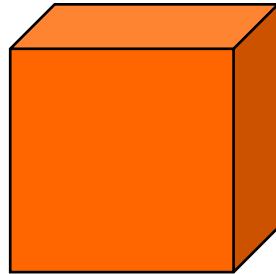
Classificazione dei cristalli

Atomi e cristalli

IPOTESI:

Unità strutturali = atomi

Esempio: NaCl

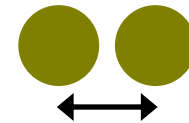


Masse atomiche: Na $38,12 \times 10^{-24}$ g
Cl $58,85 \times 10^{-24}$ g

Struttura cubica

1 cm^3 $m = 2,165 \text{ g}$

$N = 44,6 \times 10^{21}$ atomi



0,28 nm

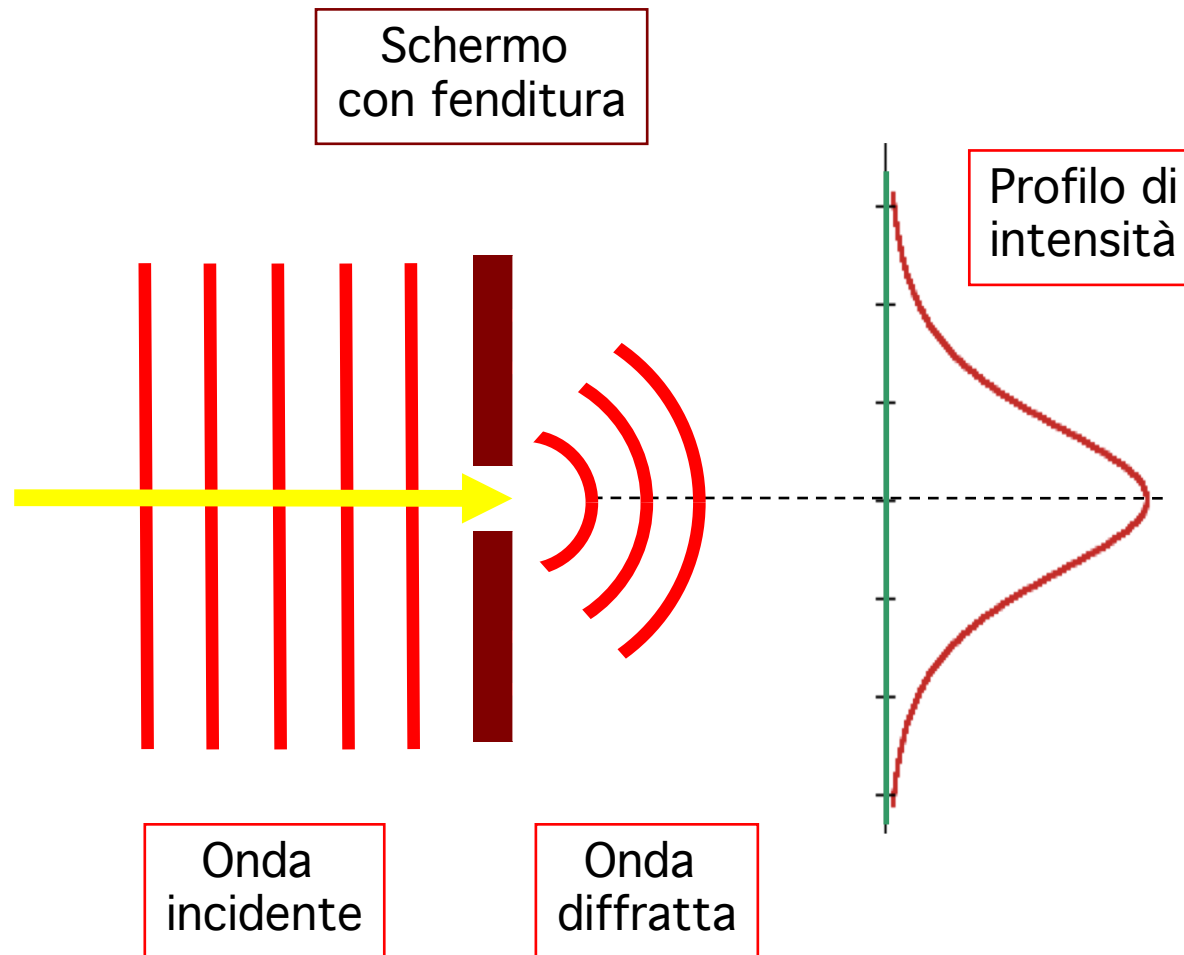
CONCLUSIONE:

Distanze interatomiche
Dimensioni atomiche

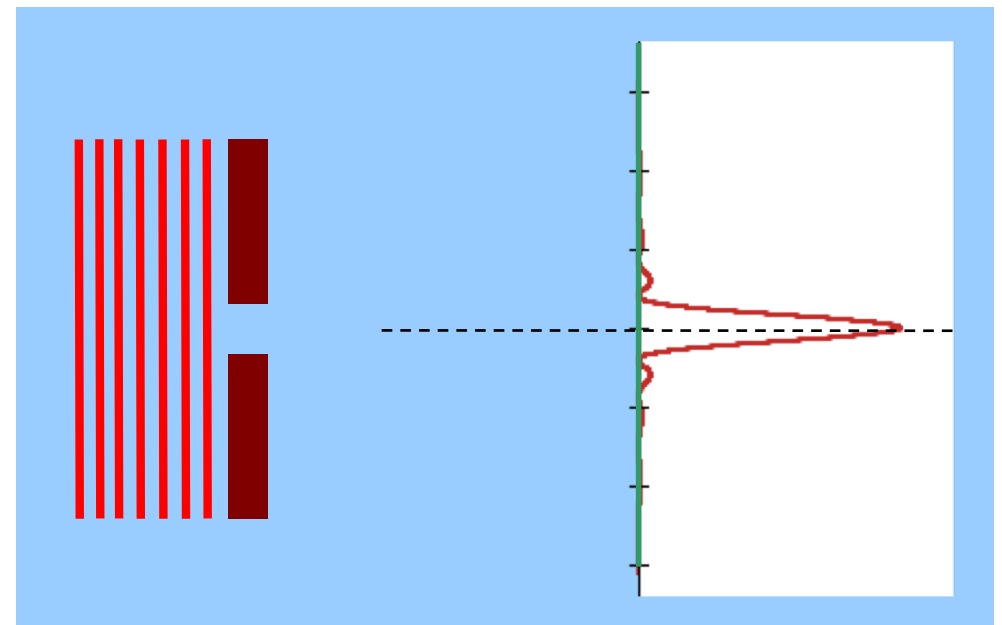
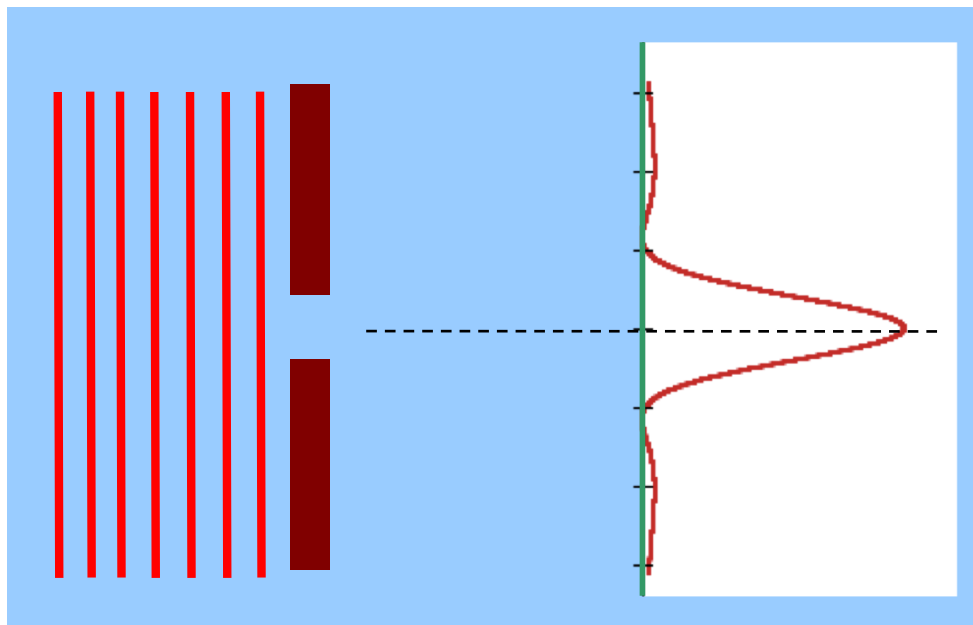
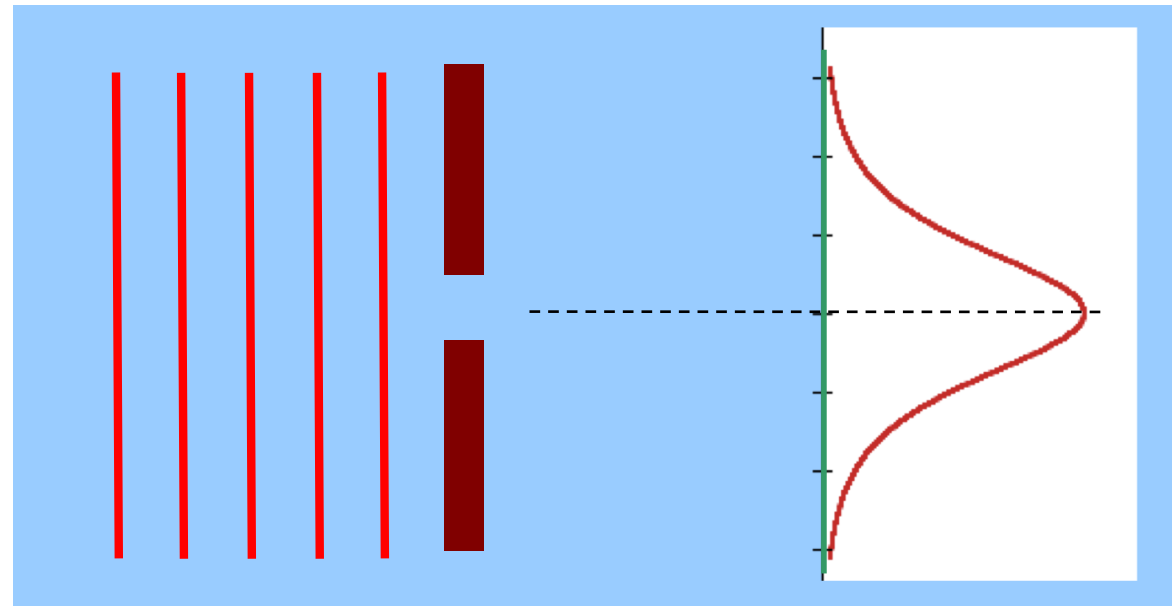
\approx lunghezze d'onda raggi X

Cos'è la diffrazione (1)

Luce visibile, $\lambda \approx 400 - 700 \text{ nm}$

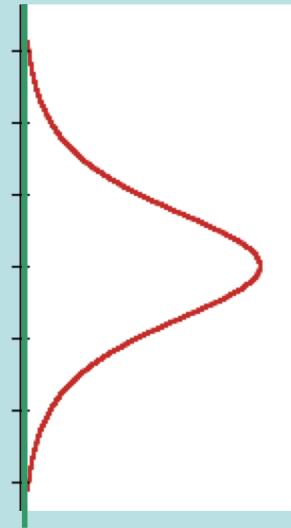
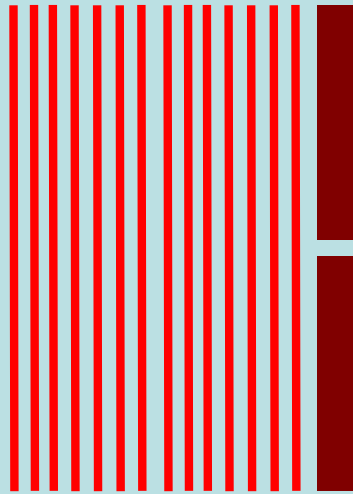


Cos'è la diffrazione (2)



Reticoli di diffrazione (1)

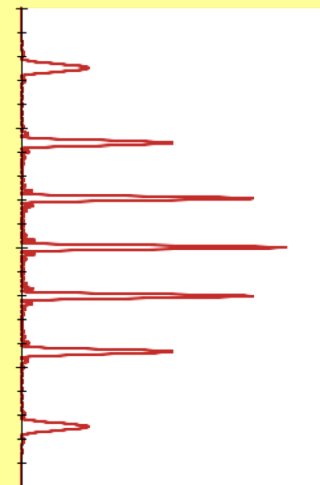
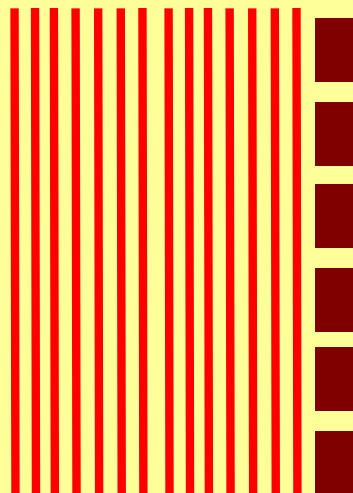
1 fenditura



Diffrazione

Luce visibile, $\lambda \approx 400 - 700 \text{ nm}$

N fenditure

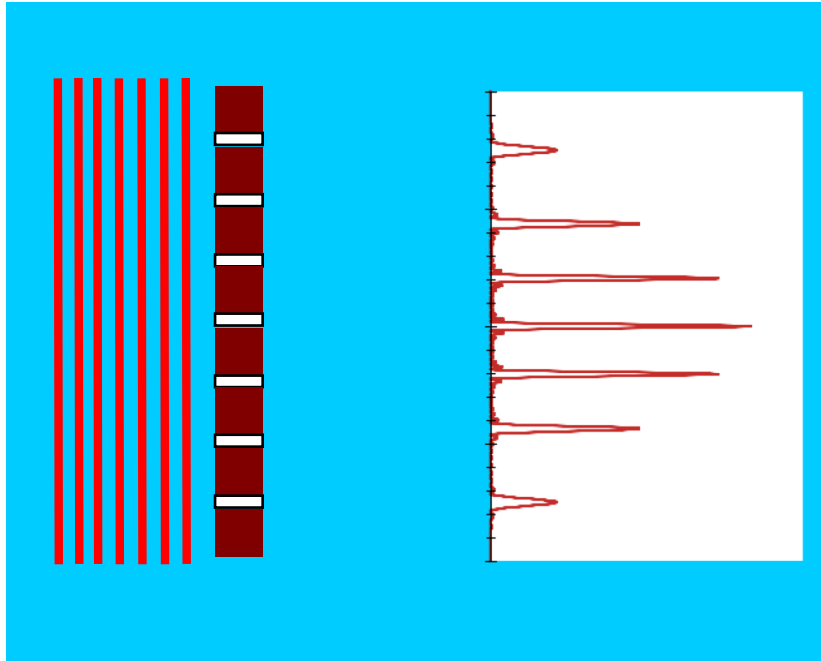
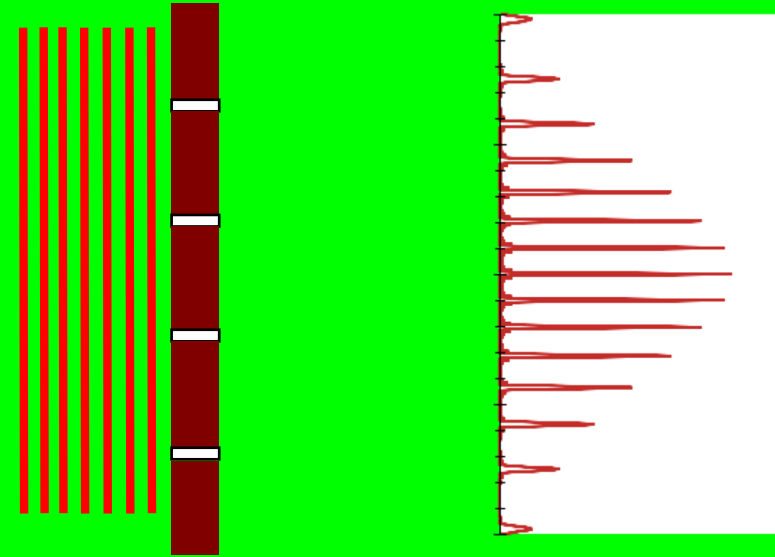


Diffrazione
+
interferenza

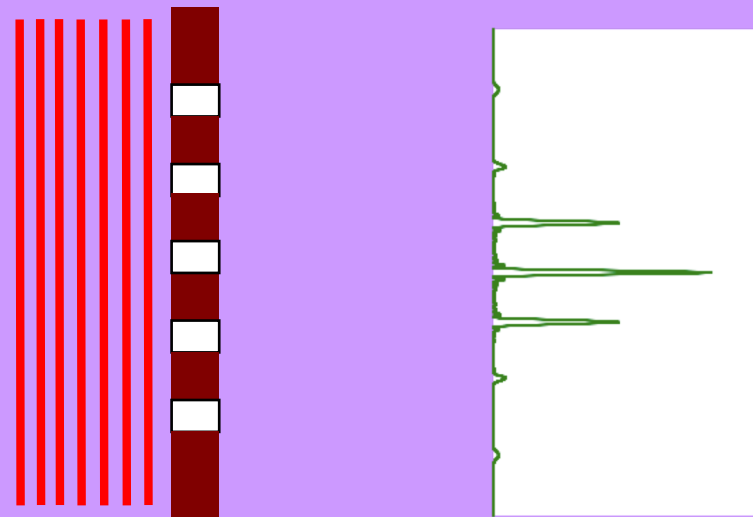
Reticoli di diffrazione (2)

Luce visibile,
 $\lambda \approx 400 - 700 \text{ nm}$

Distanza tra le fenditure



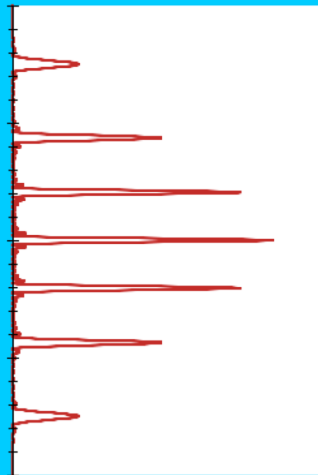
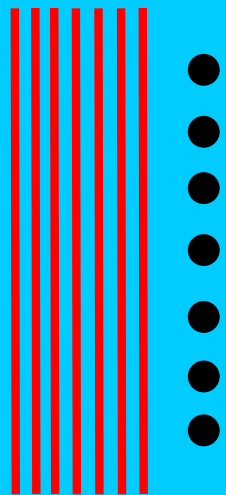
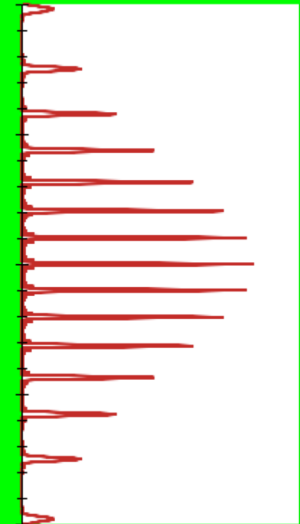
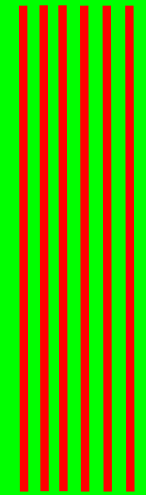
Larghezza delle fenditure



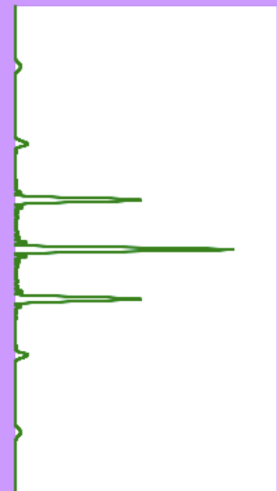
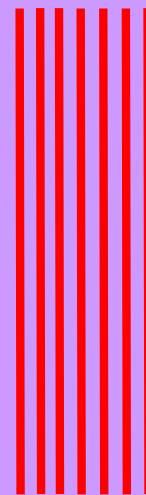
Reticoli di diffrazione, raggi X

Raggi X,
 $\lambda \approx 0.1 - 1 \text{ nm}$

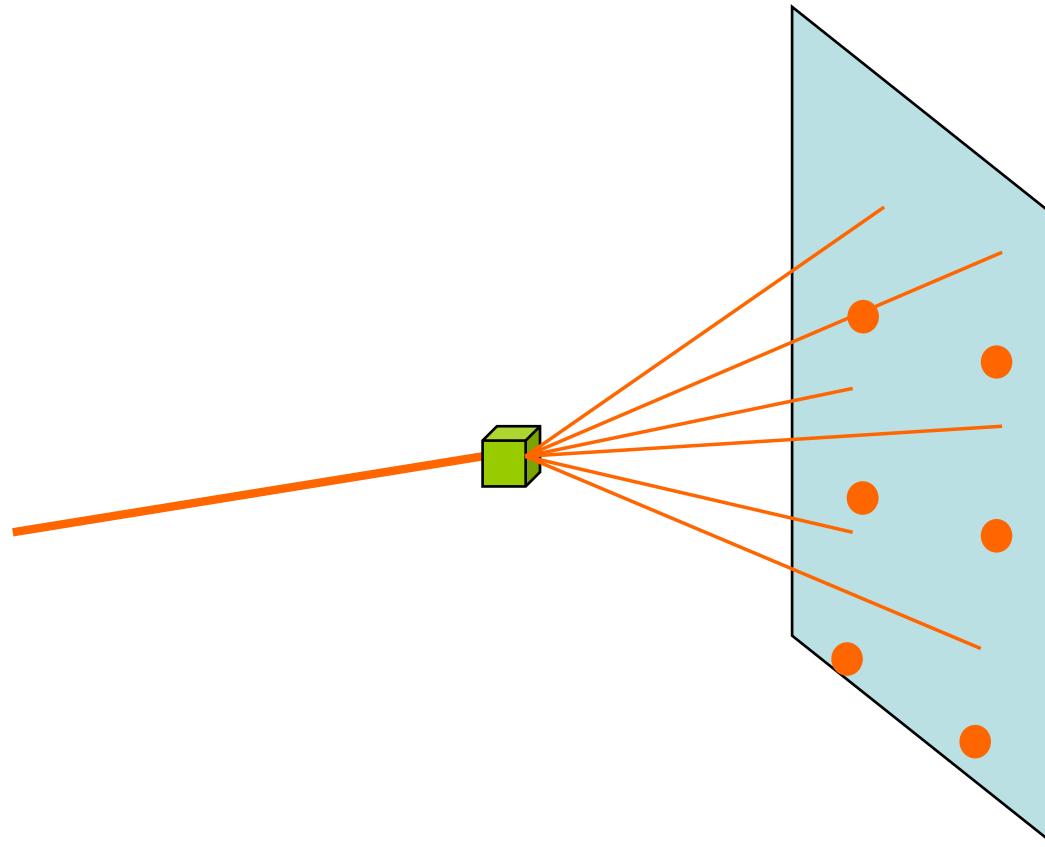
Distanza tra gli atomi



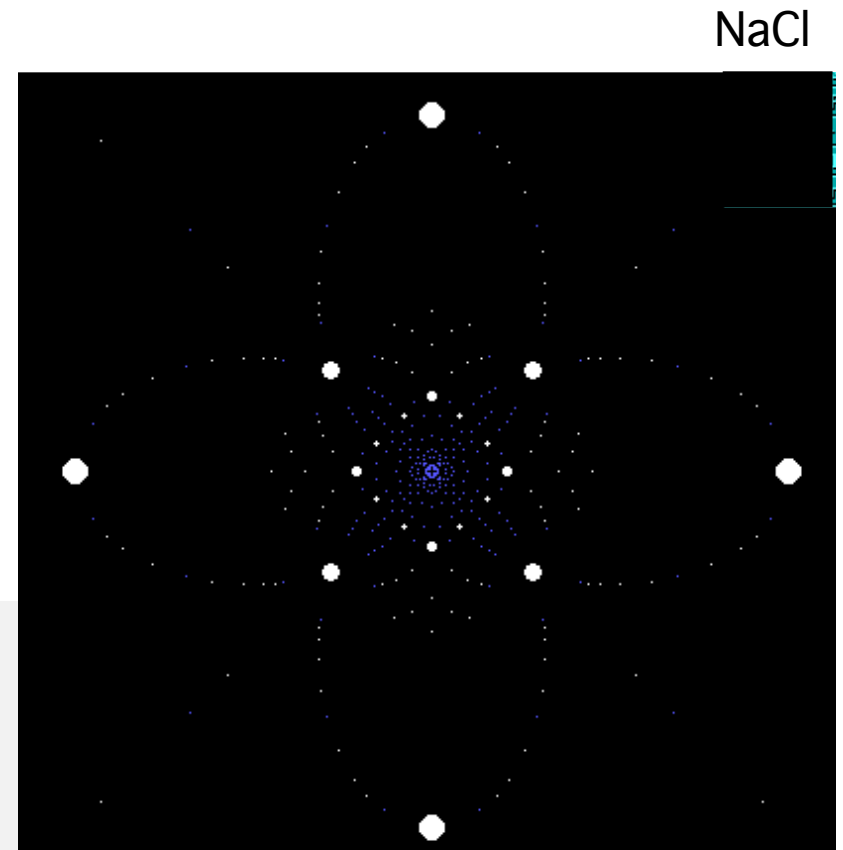
Dimensioni atomiche



Diffrazione X da cristalli



Fenditure → centri diffusori (atomi)
1 dimensione → 3 dimensioni



1912: M. von Laue a Monaco suggerisce che gli atomi di un solido cristallino costituiscano un reticolo tridimensionale di diffrazione per un fascio di raggi X. Friedrich e Knipping ottengono in laboratorio la prima figura di diffrazione dei raggi X da un cristallo.

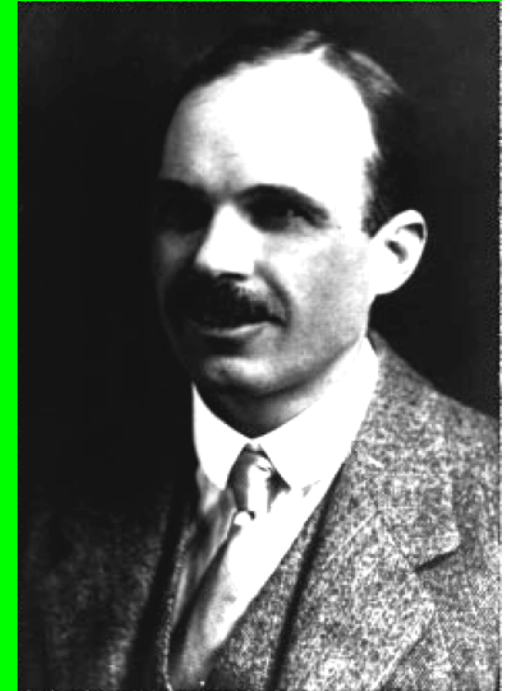
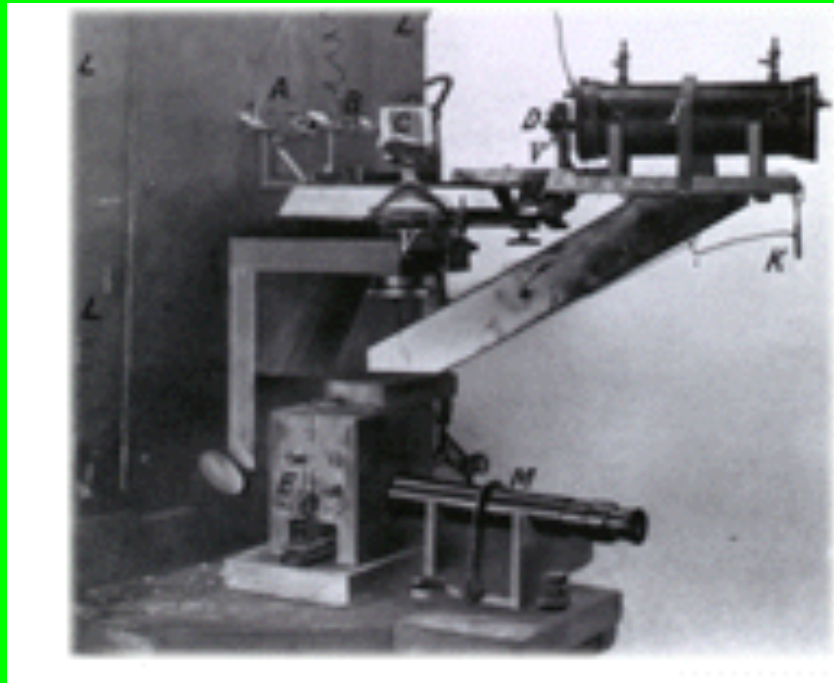
Cristallografia



William Henry Bragg
(1862-1942)

Cambridge, 1912/13

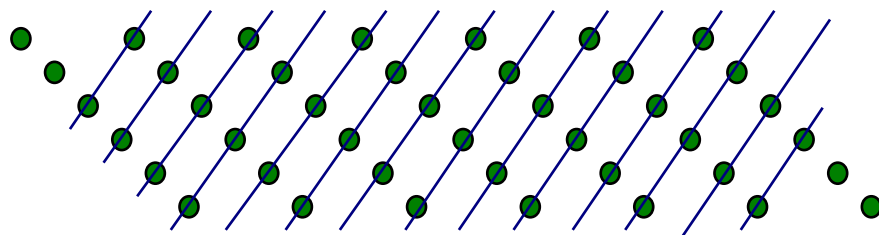
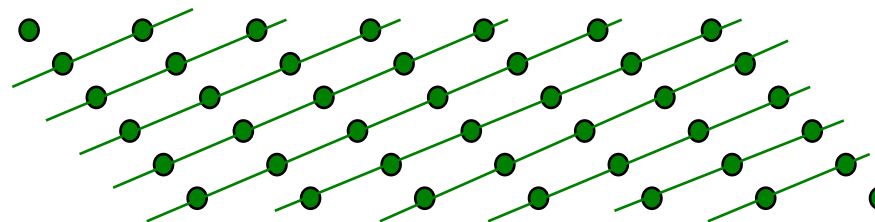
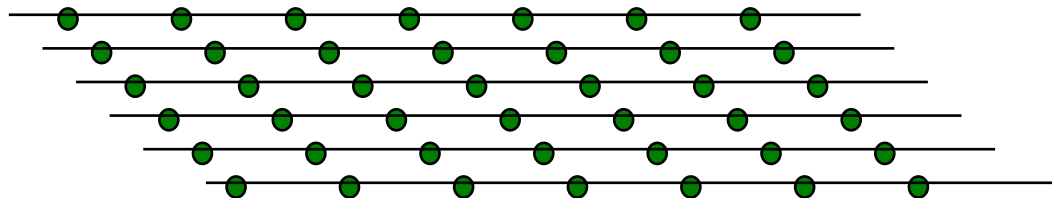
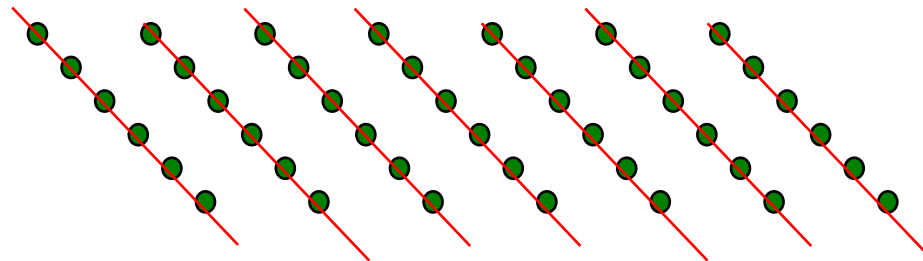
Uno spettrometro di Bragg



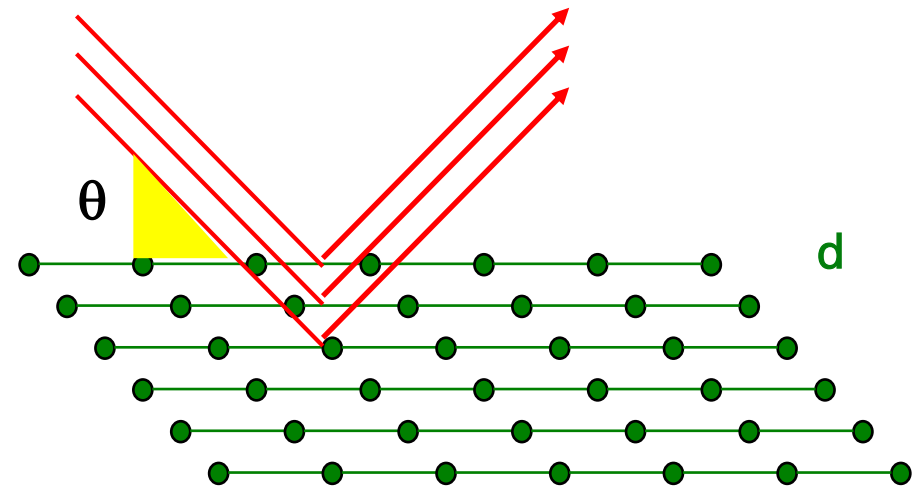
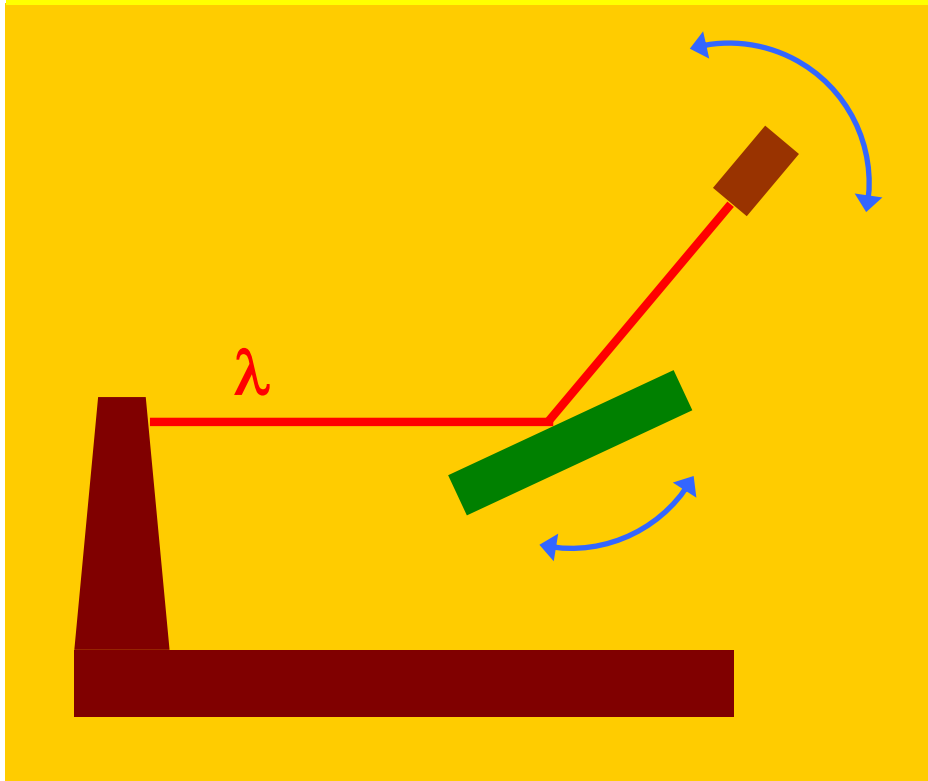
William Lawrence Bragg
(1890-1971)

1913: gli inglesi W.H. Bragg e W.L. Bragg, padre e figlio, danno un'interpretazione quantitativa della *diffrazione dei raggi X*, aprendo la strada al suo uso per lo studio della struttura atomica dei solidi cristallini.

Piani cristallini



La legge di Bragg



$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda$$

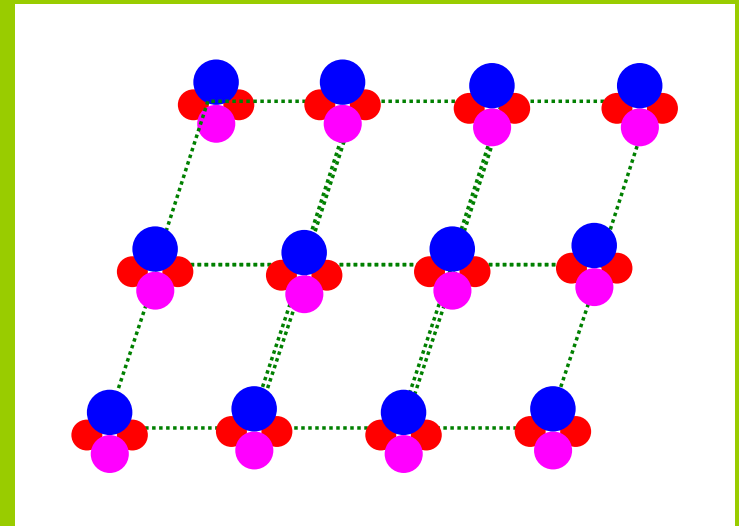
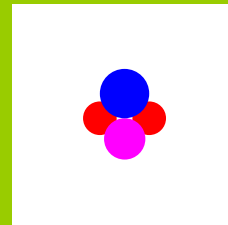
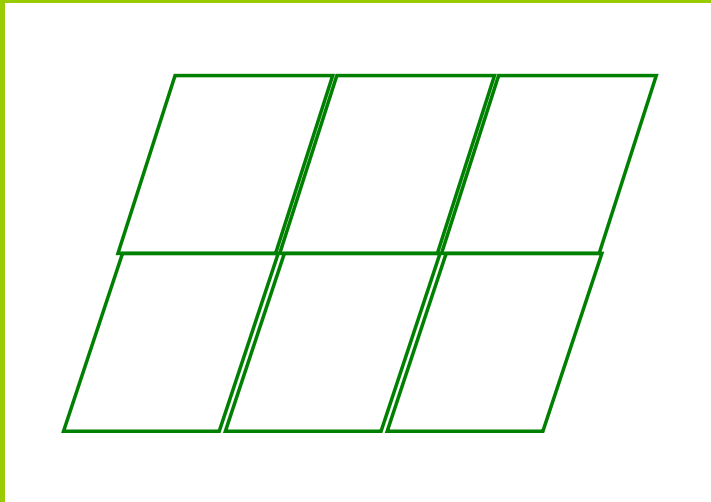
Condizione per interferenza costruttiva

Un reticolo geometrico forma famiglie di piani paralleli.

La diffrazione viene ricondotta alla "riflessione" dei raggi X da piani cristallini e all'interferenza tra raggi diffusi da piani paralleli: n è un numero, λ è la lunghezza d'onda dei raggi X, d è la distanza tra i piani cristallini paralleli, θ è l'angolo di incidenza.

L'interferenza costruttiva è possibile se sono soddisfatte le relazioni imposte dalla legge di Bragg. Fissata la lunghezza d'onda, i valori di angolo per i quali si hanno raggi diffratti corrispondono a valori d di distanze tra piani cristallini.

La struttura dei cristalli



Reticolo geometrico

+

base

=

struttura cristallina

Alcuni solidi manifestano una struttura cristallina regolare anche per dimensioni dell'ordine dei centimetri.

Altri solidi, ad esempio i metalli, sono aggregati disordinati di micro-strutture cristalline

In un solido cristallino gli atomi sono disposti in modo regolare nello spazio:

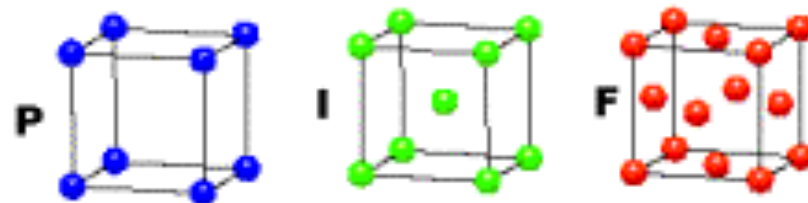
reticolo geometrico + base atomica = struttura cristallina

I reticoli cristallini

CUBIC

$$a = b = c$$

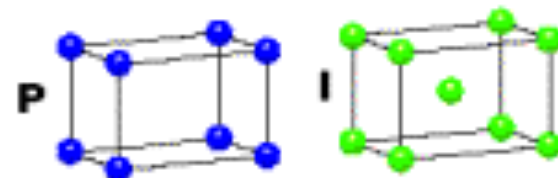
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



TETRAGONAL

$$a = b \neq c$$

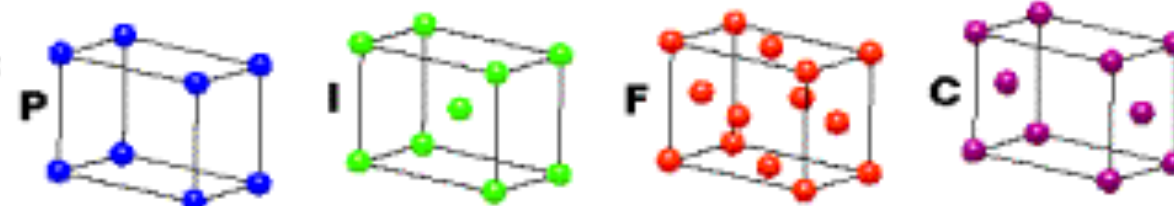
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



ORTHORHOMBIC

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

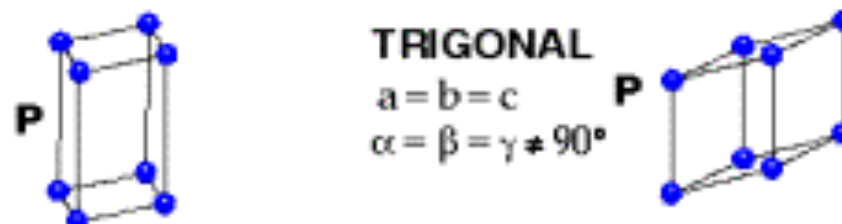


HEXAGONAL

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ$$

$$\gamma = 120^\circ$$



TRIGONAL

$$a = b = c$$

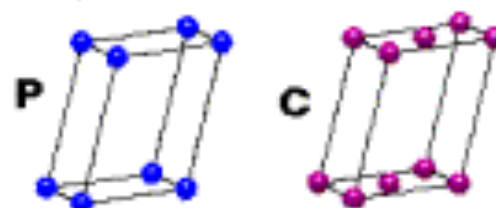
$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$

MONOCLINIC

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \gamma = 90^\circ$$

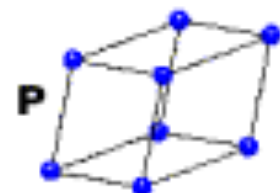
$$\beta \neq 120^\circ$$



TRICLINIC

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$



4 Types of Unit Cell

P = Primitive

I = Body-Centred

F = Face-Centred

C = Side-Centred

+

7 Crystal Classes

→ 14 Bravais Lattices

I reticoli cristallini

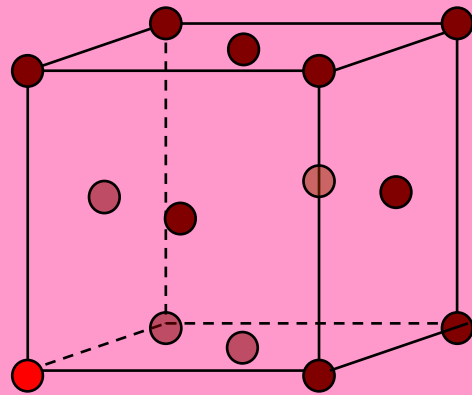
Esistono 14 tipi di *reticoli geometrici* tridimensionali (reticoli di Bravais).

La *base atomica* può essere costituita da 1 o più atomi:

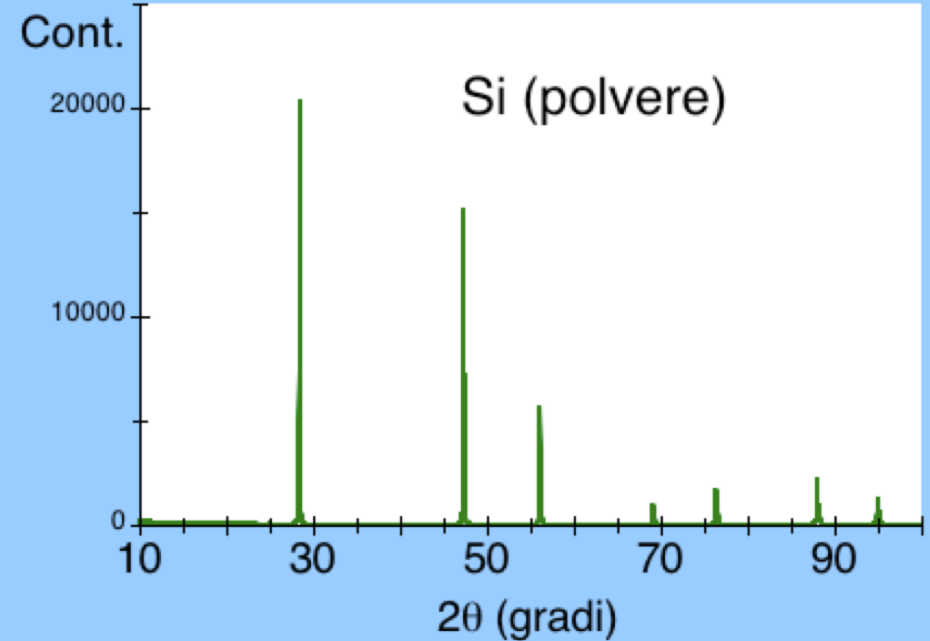
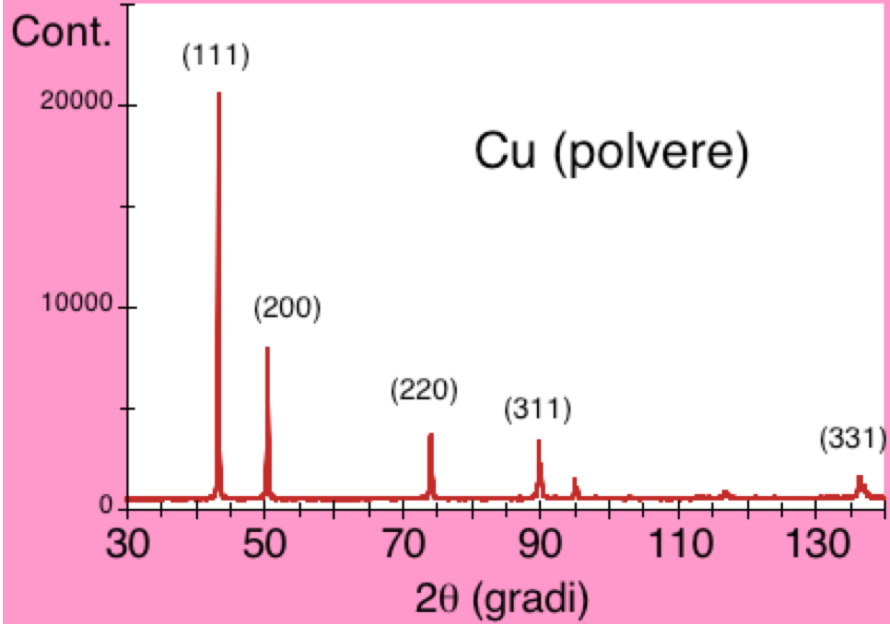
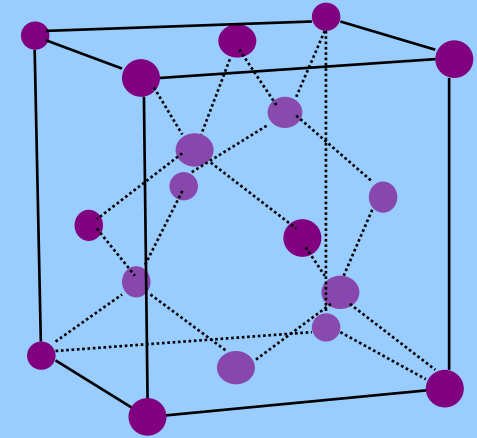
- nel ferro la base atomica è costituita da 1 atomo
- nel sale da cucina (NaCl) la base è costituita da 2 atomi
- in laboratorio si possono realizzare cristalli la cui base atomica è una macromolecola biologica (ad esempio una proteina) costituita da migliaia di atomi

Figure di diffrazione

Rame



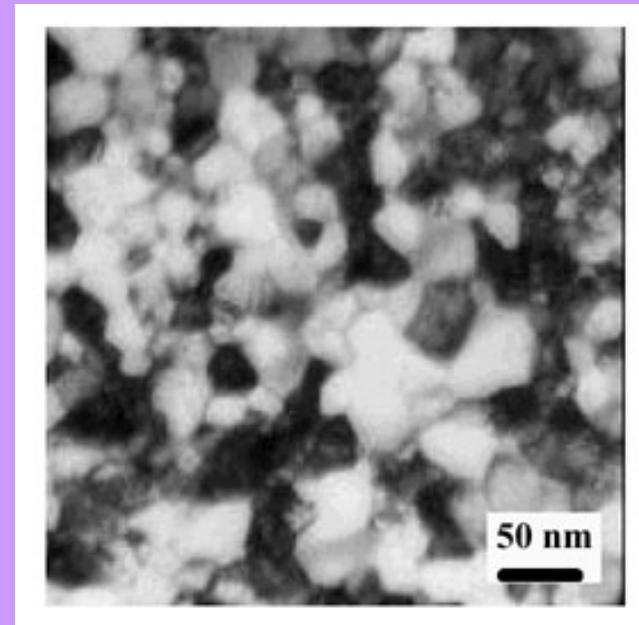
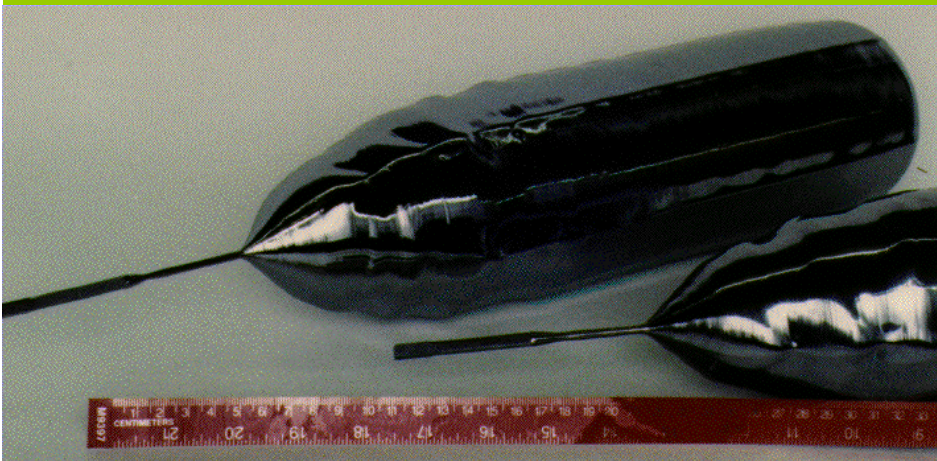
Silicio



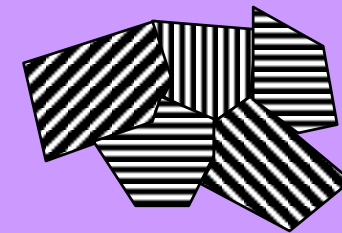
Macro e micro-cristalli



Silicio monocristallino, \varnothing 13 cm



Cromo, microscopia elettronica



Struttura a grani

La Fisica dello Stato Solido

Struttura microscopica dei materiali cristallini

Proprietà termodinamiche

- Calori specifici
- Dilatazione termica
- Conduzione termica

Proprietà elettriche

- Conducibilità elettrica
- Semiconduttori
- Superconduttori

Proprietà magnetiche

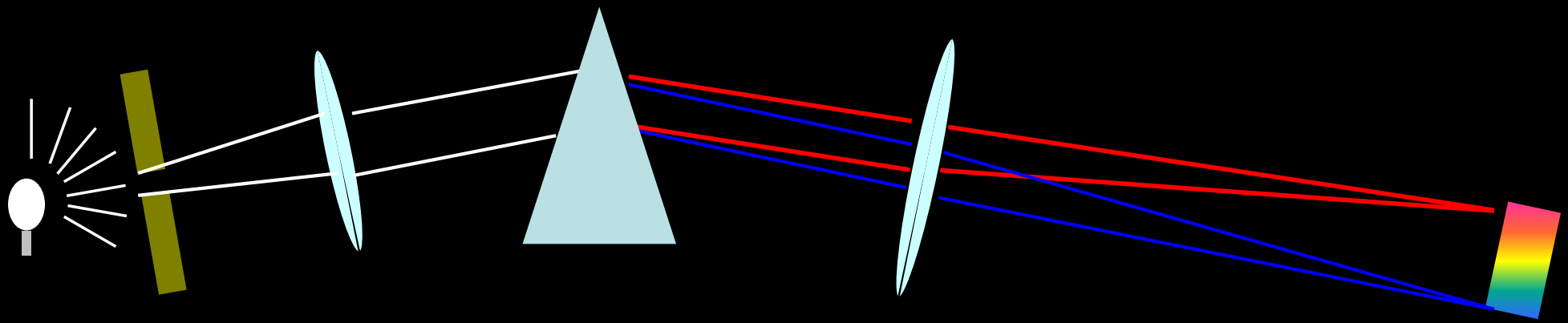
- Diamagnetismo
- Paramagnetismo
- Ferromagnetismo

Applicazioni tecnologiche



Spettroscopia X

Spettroscopia ottica



Luce
bianca

Prisma:
dispersione
della luce

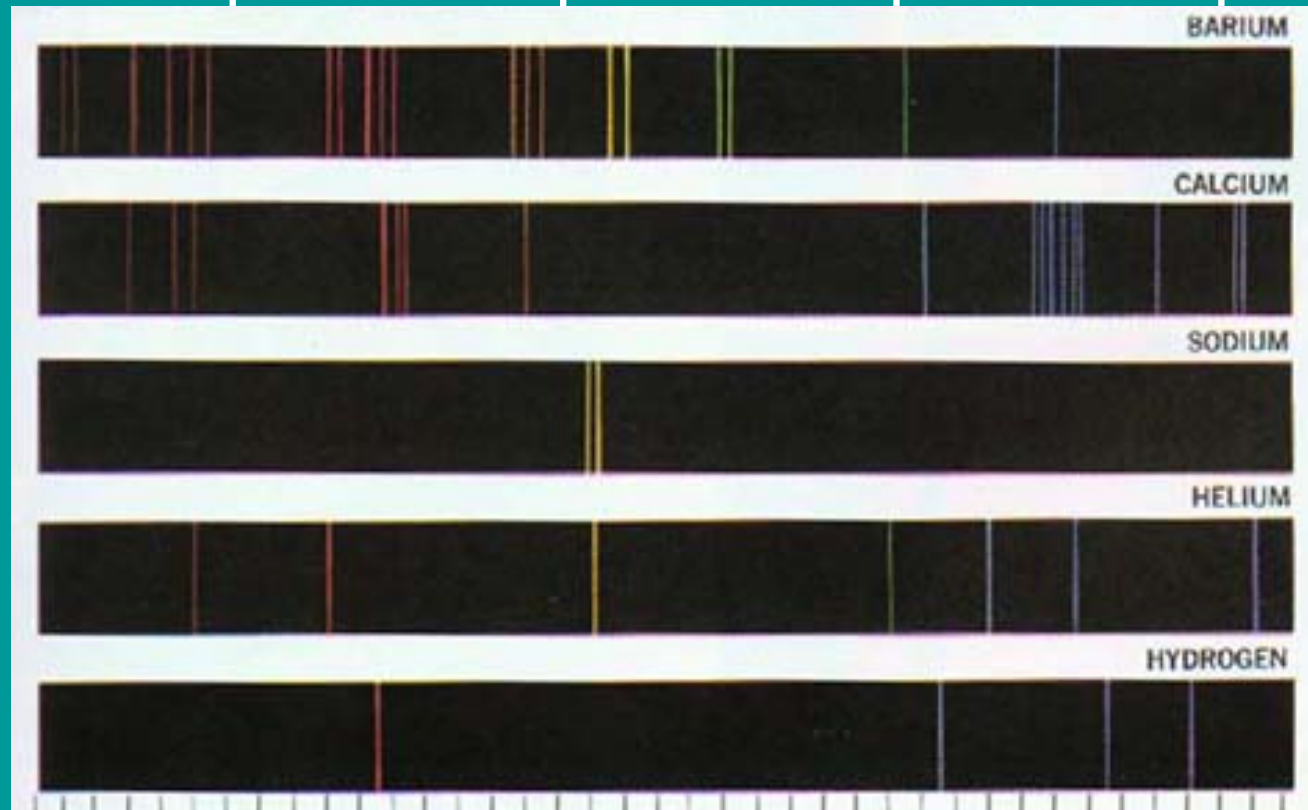
Spettro

Spettri atomici ottici

Lampada a incandescenza



Spettri atomici di emissione



700

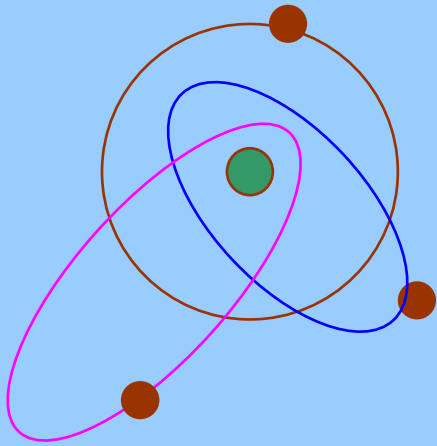
600

500

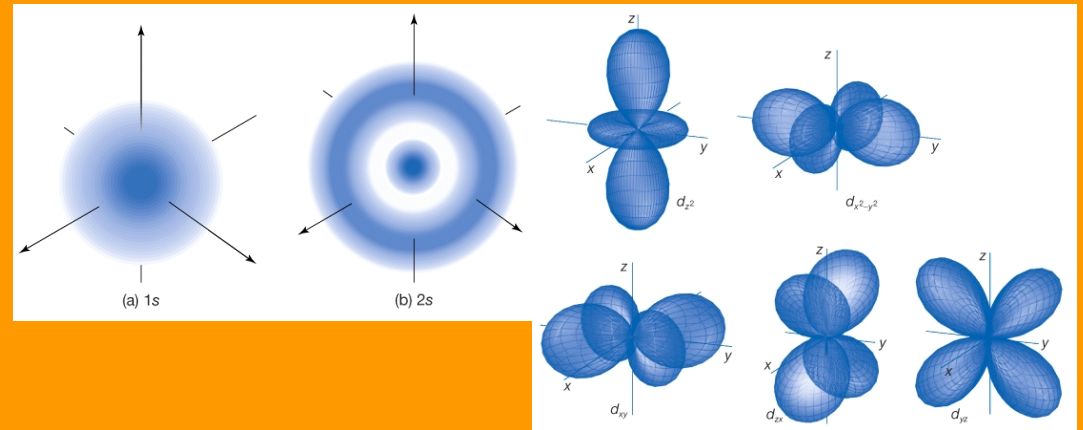
400

Lunghezza d'onda (nm)

La struttura dell'atomo



Modello di Bohr-Sommerfeld



Modello della meccanica quantistica

➤ Stati stazionari stabili

➤ Energie di legame degli elettroni: valori discreti

➤ Transizioni tra livelli energetici

$$E_1 - E_2 = h\nu$$

onde elettromagnetiche

Ipotesi non classiche !

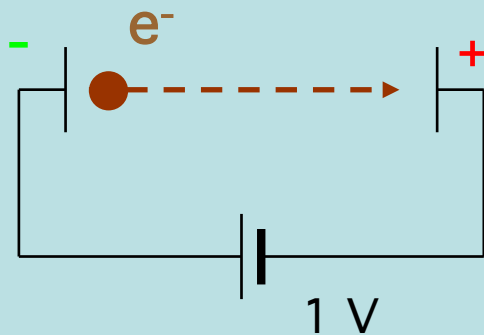
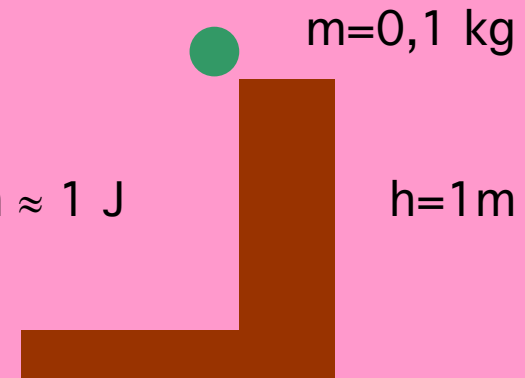
Unità di energia

Il joule (J)

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N m}$$

Unità SI

$$E_p = mgh \approx 1 \text{ J}$$

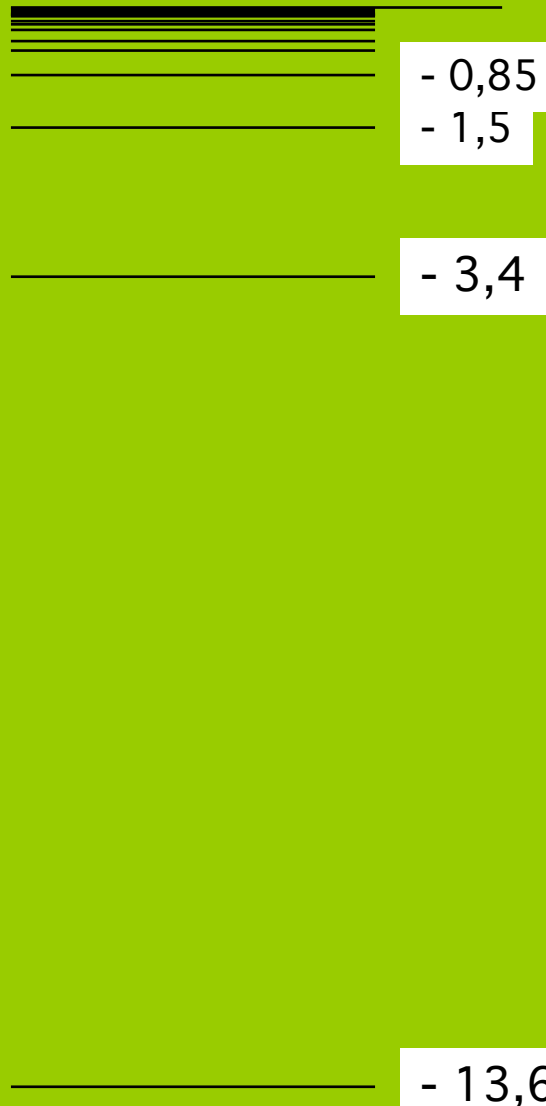


L'elettronvolt (eV)

$$1 \text{ eV} = 1.602\,176\,462\,(63) \times 10^{-19} \text{ J}$$
$$\approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Unità non-SI ammessa all'uso

L' atomo di idrogeno

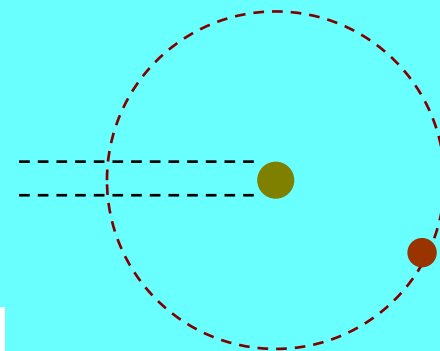


Energie di legame dell'elettrone (eV)

$$E_b = \frac{13607}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- Livelli di energia discreti
- Stati stazionari

0,01 pm

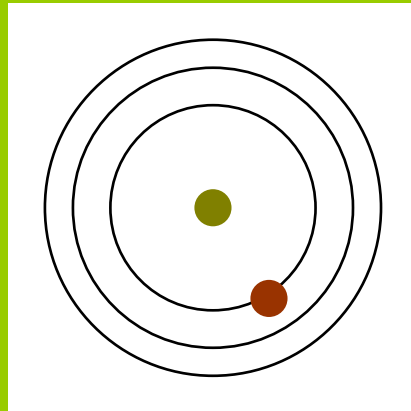
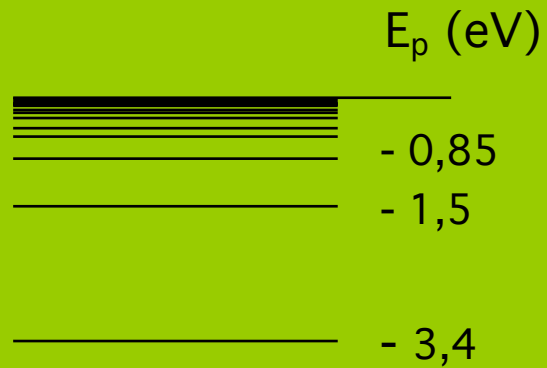


100 pm

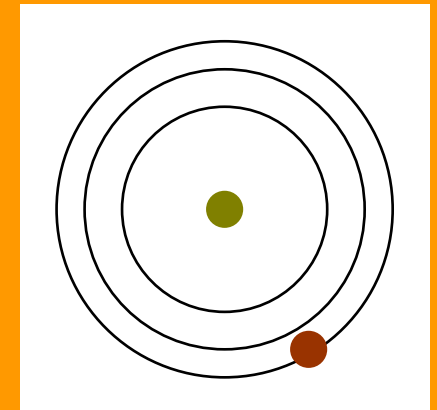
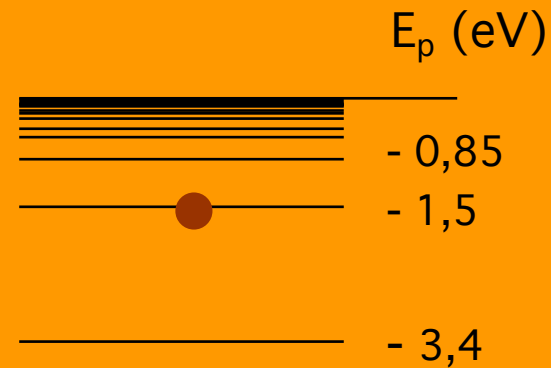
$$\frac{M_n}{m_e} = 1850$$

Stato fondamentale e stati eccitati

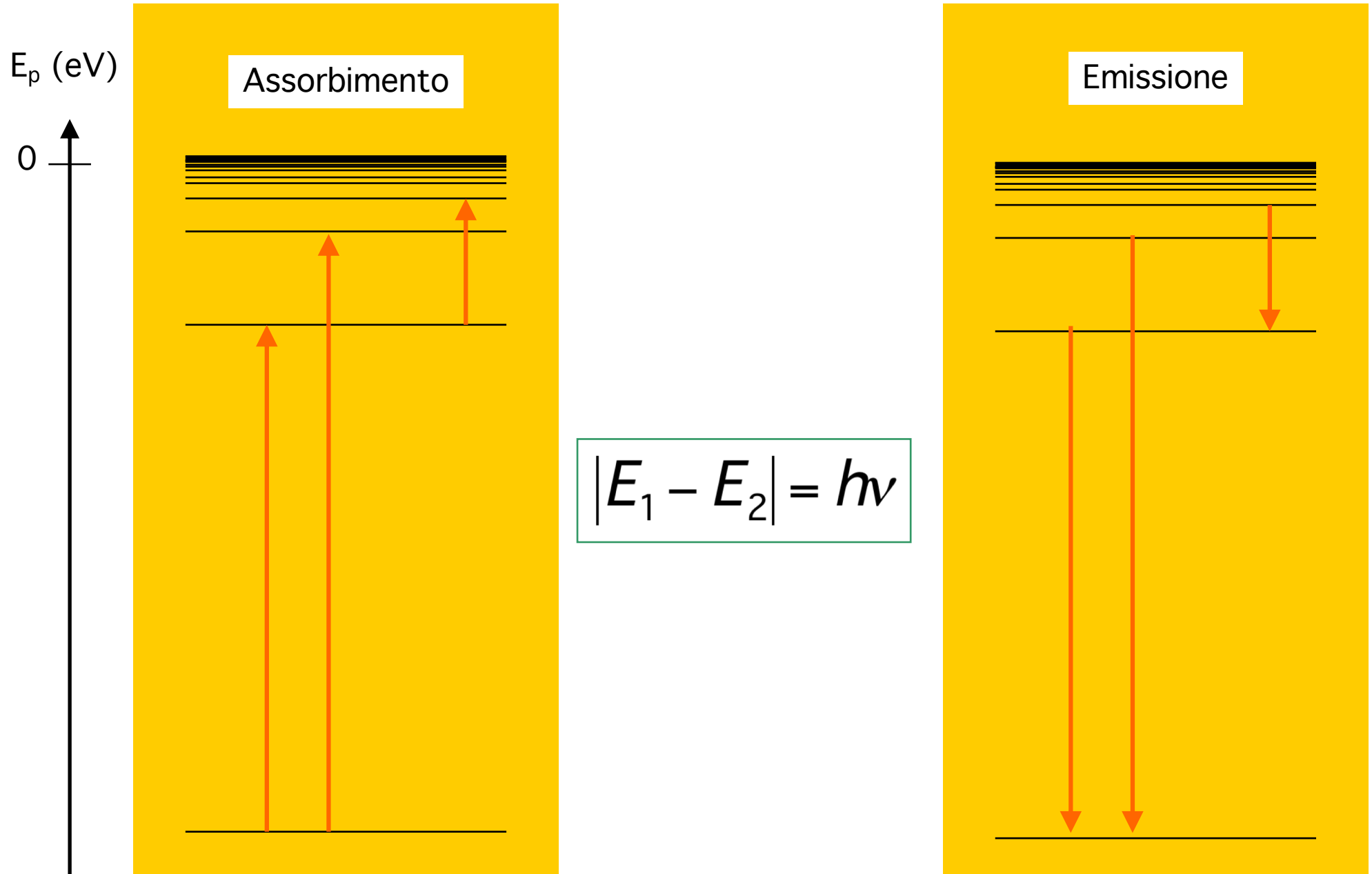
Stato fondamentale



Stato eccitato



Transizioni radiative



Quanti di radiazione

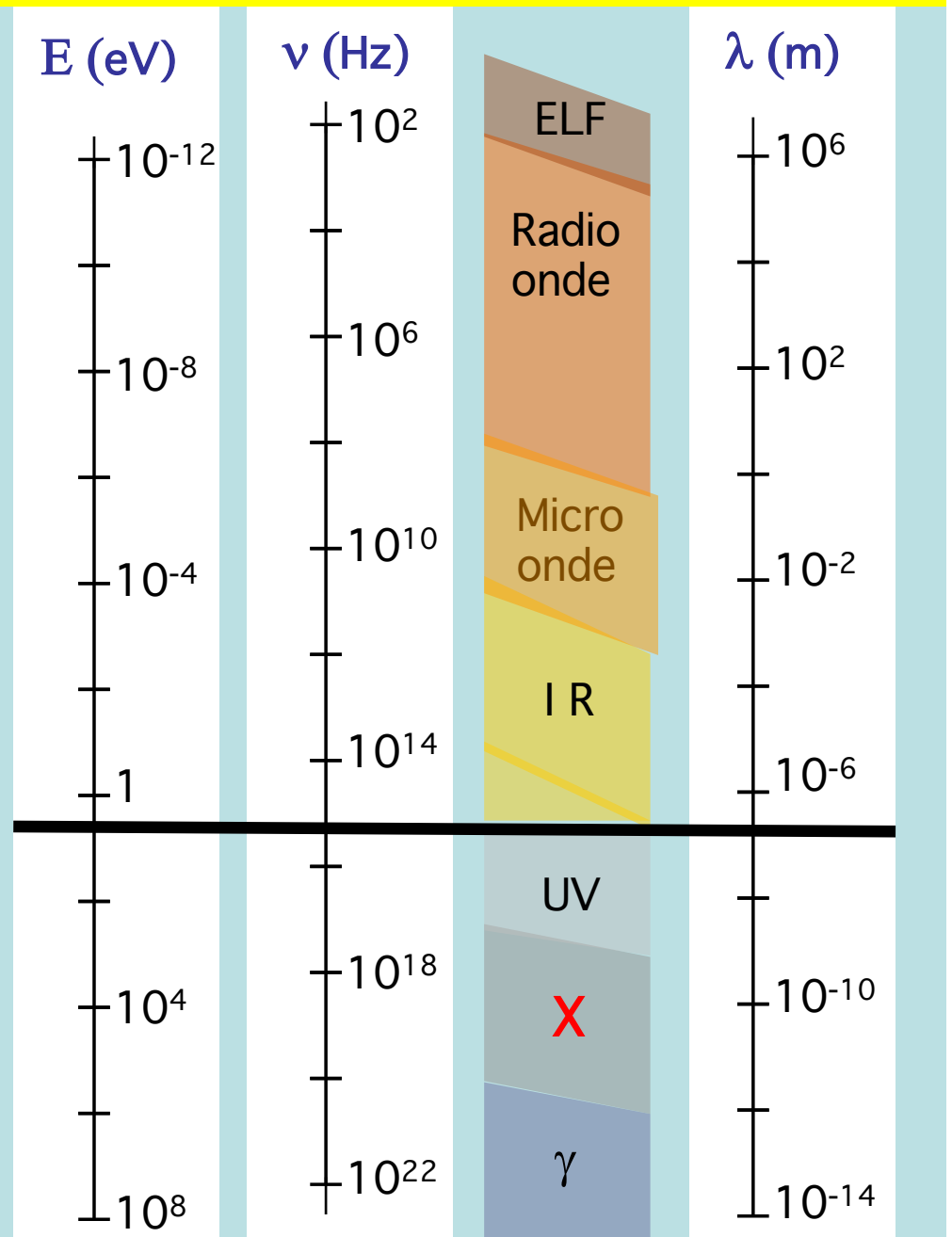
Energia

Frequenza

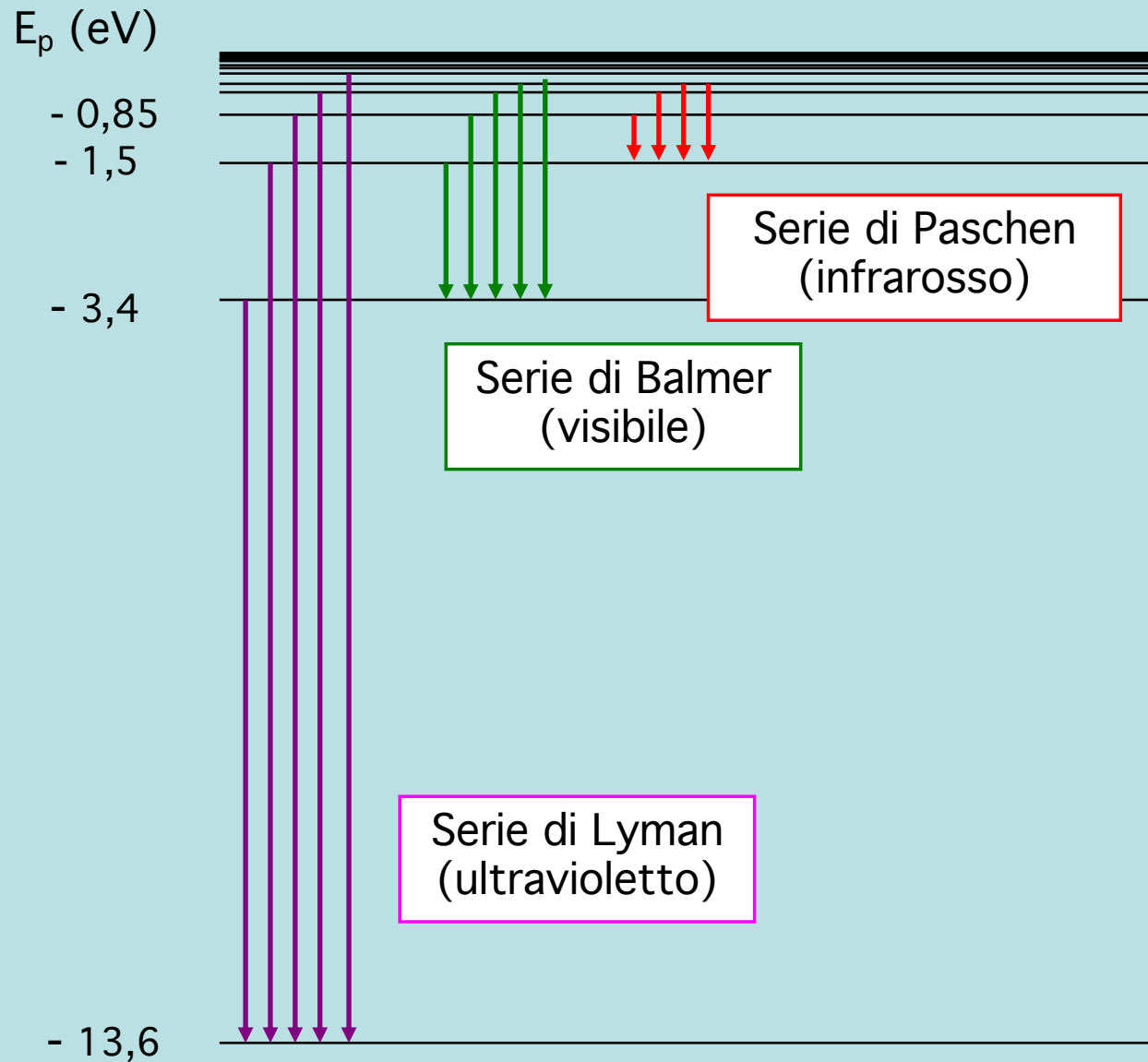
$$|E_1 - E_2| = h\nu$$

Costante di Planck:

$$h \approx 4,13 \times 10^{-15} \text{ eV/Hz}$$



Spettro dell'idrogeno

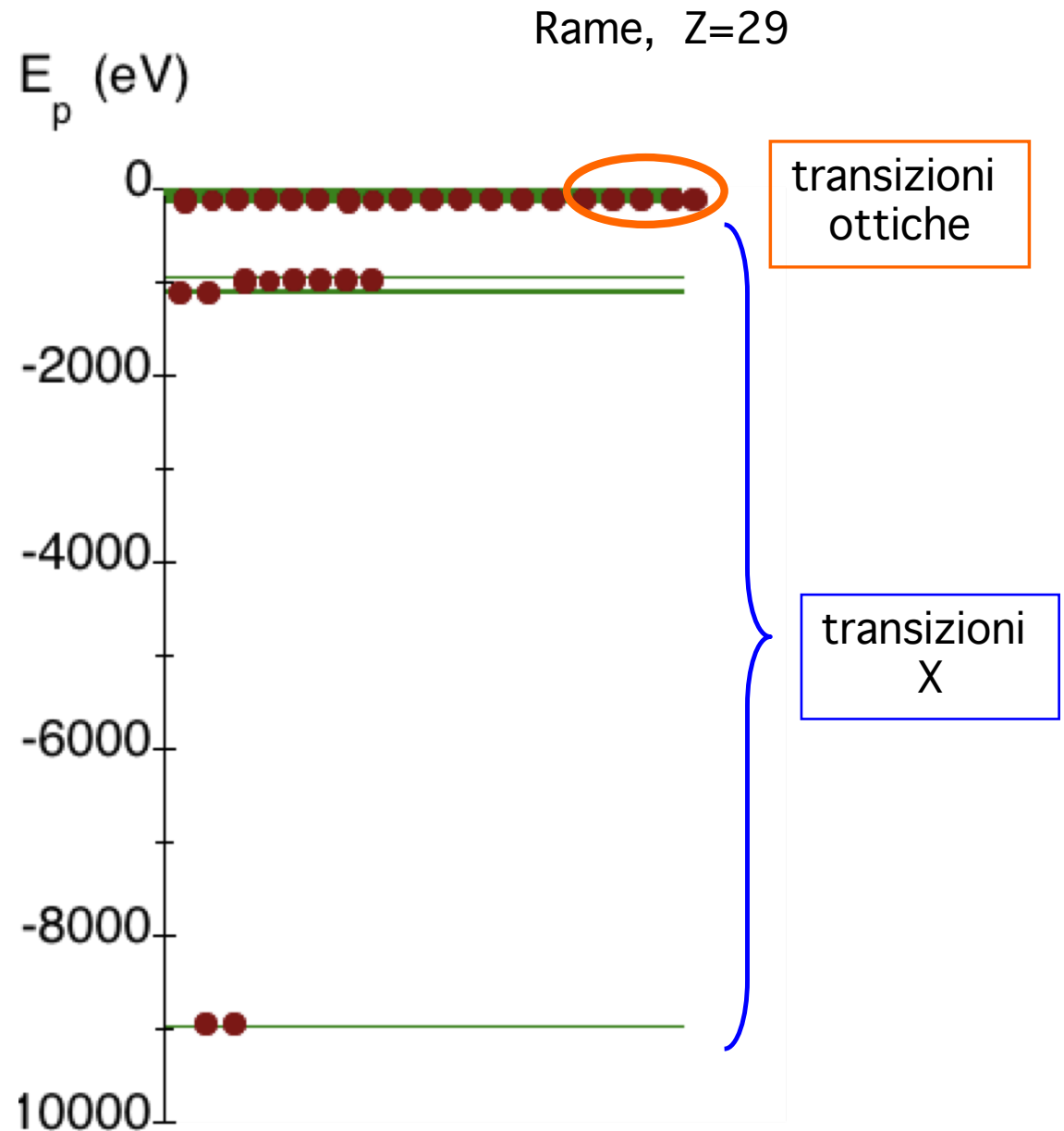


Atomi "pesanti"

Z elettroni
Carica nucleare $+Ze$

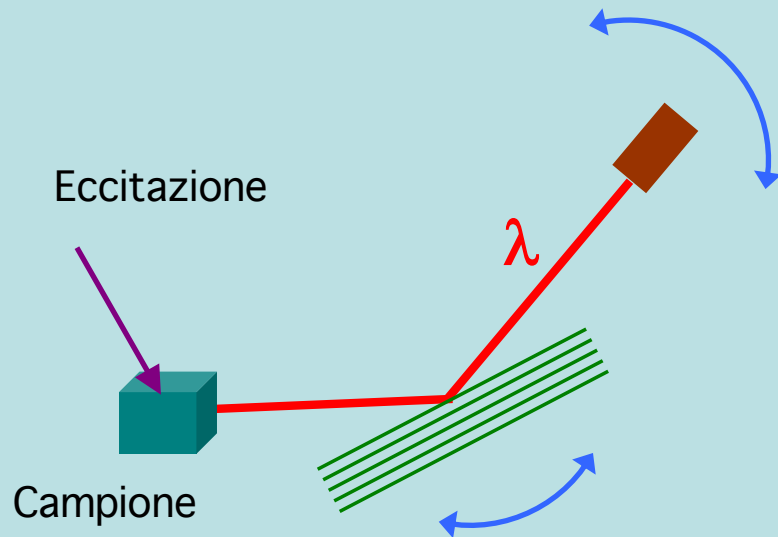
Interazione nucleo-elettroni
Energie di legame elevate

Interazioni tra elettroni
Livelli energetici complicati

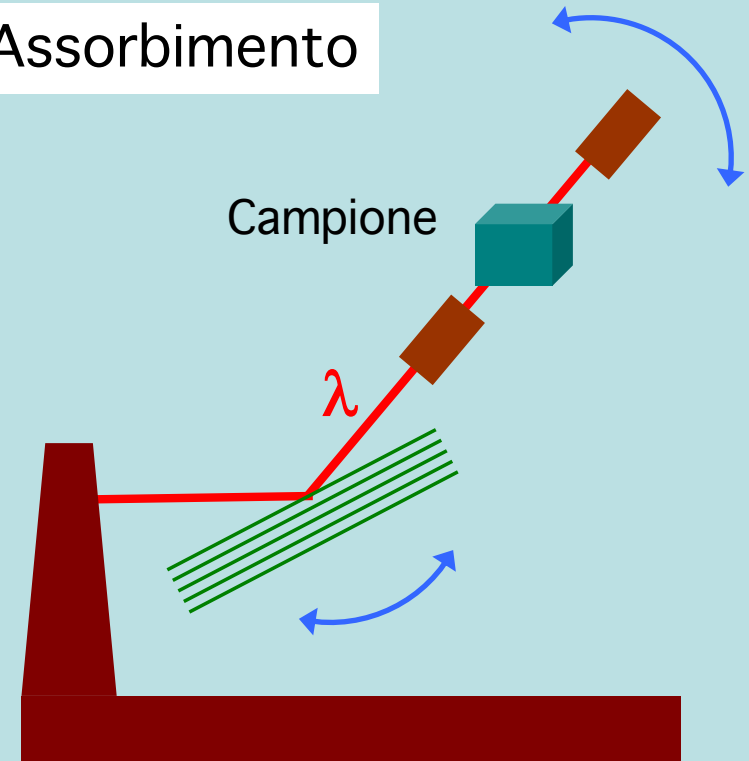


Spettroscopia X

Emissione



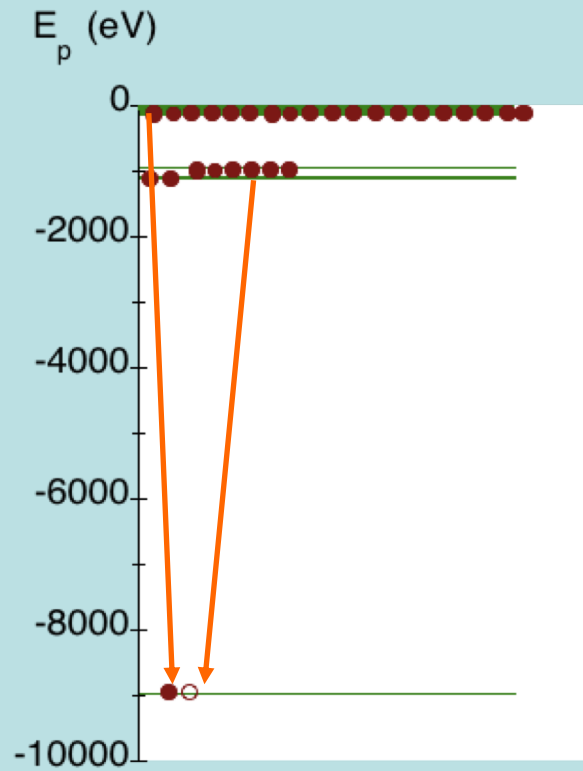
Assorbimento



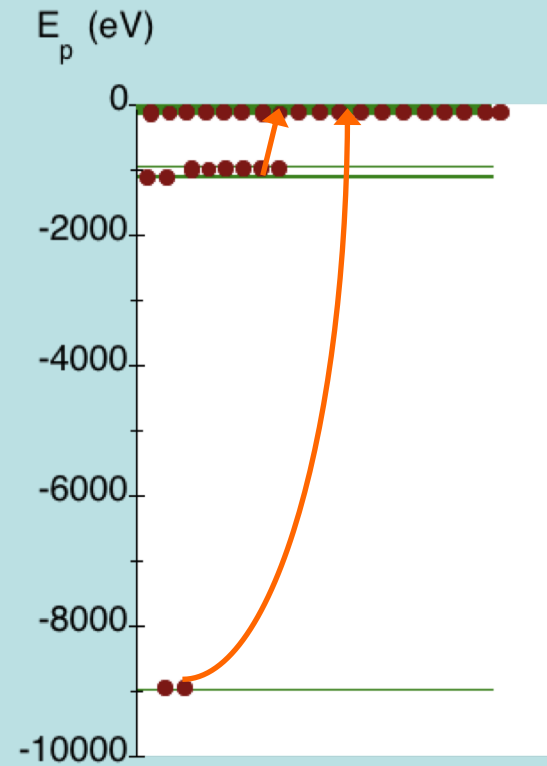
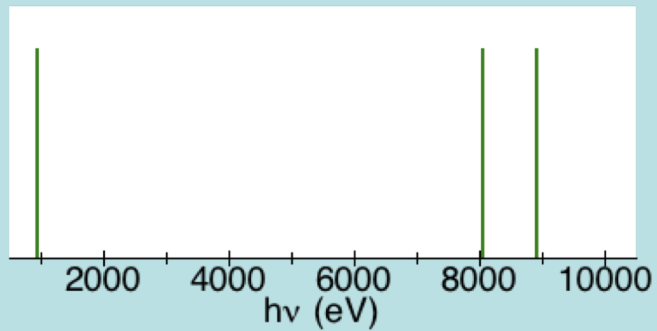
Monocromatore - Legge di Bragg

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

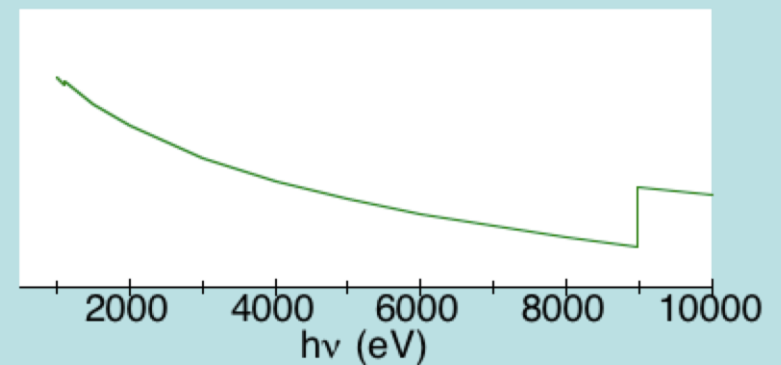
Emissione e assorbimento X



Spettri di emissione a righe



Spettri di assorbimento a soglie



Ruolo della spettroscopia X

Verifica della teoria quantistica dell'atomo

Studio della struttura elettronica
di atomi e sistemi condensati

Analisi elementare delle sostanze
Righe e soglie caratteristiche

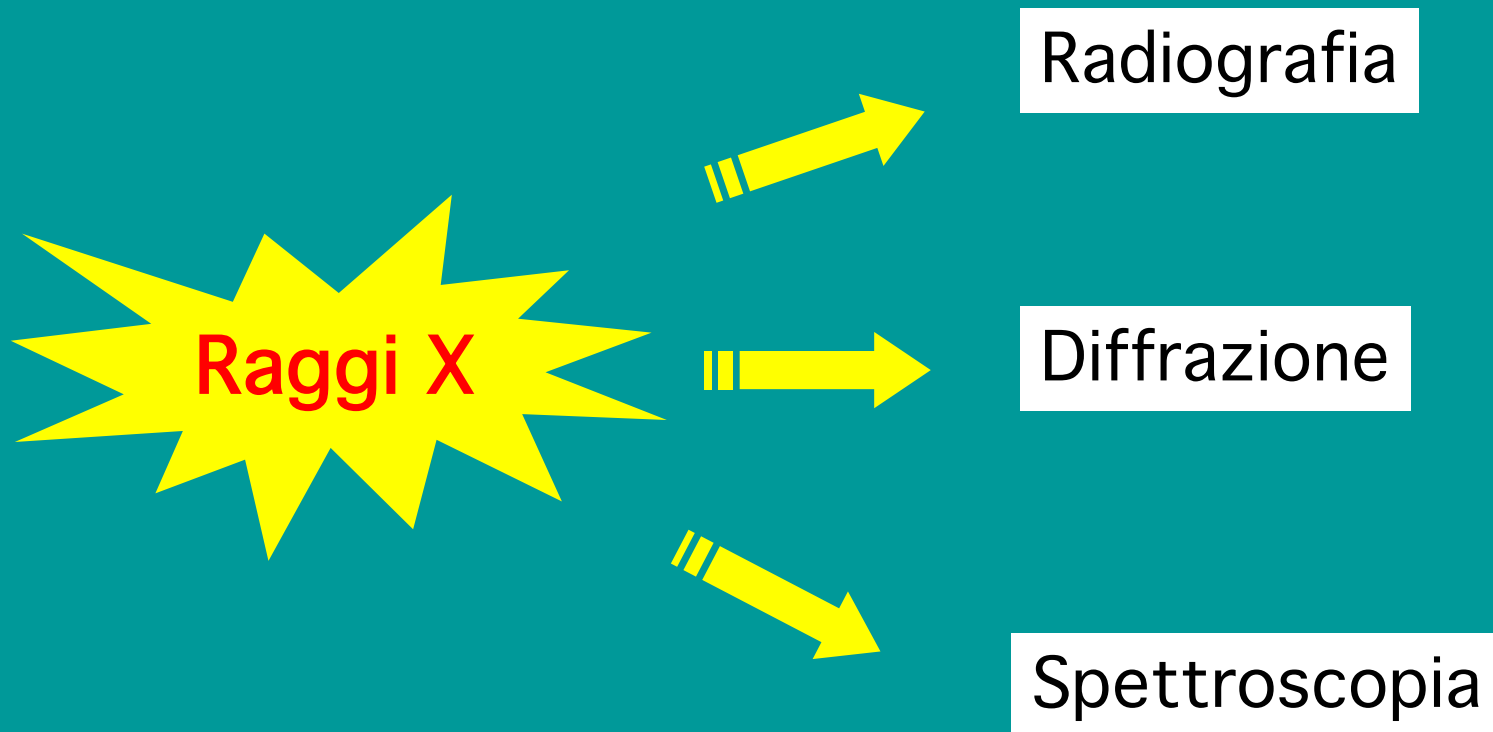
Tecniche recenti: studi strutturali di materiali disordinati



Conclusioni

L'uso dei raggi X

Tre famiglie di tecniche sperimentali



Premi Nobel per ricerche con raggi X

1901	WK Roentgen	Fisica	Scoperta Raggi X
1914	M von Laue	Fisica	Diffrazione X da cristalli
1915	WH Bragg & WL Bragg	Fisica	Struttura dei cristalli
1917	CG Barkla	Fisica	Radiazione caratteristica
1924	KMG Siegbahn	Fisica	Spettroscopia X
1927	AH Compton	Fisica	Diffusione da elettroni
1936	P Debye	Chimica	Diffusione nei gas
1962	M Perutz & J Kendrew	Chimica	Struttura dell'emoglobina
1962	Watson, Wilkins, Crick	Medicina	Struttura del DNA
1979	Cormack & Hounsfield	Medicina	Tomografia assiale computerizzata
1981	KM Siegbahn	Fisica	Spettroscopia elettronica
1985	Hauptman & Karle	Chimica	Metodi strutturali diretti
1988	Deisenhofer, Huber, Michel	Chimica	Strutture di proteine della fotosintesi

Spunti di riflessione

Come progredisce la scienza

Il rapporto teoria-esperimento

La nascita della Fisica Moderna

L'influenza dell'ambiente culturale ed economico

Le finalità della ricerca scientifica

Valore culturale e ricadute tecnologiche

La gestione della ricerca scientifica

Ricerca pura e ricerca applicata

Ricerca libera e ricerca su commissione

Libera diffusione dei risultati e brevetti

Ricerca settoriale e ricerca integrata