# Misure di soglie di assorbimento di elementi con basso numero atomico utilizzando raggi X molli

#### Tutori:

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

INFN - Laboratori Nazionali di Frascati 5-7 Ottobre 2011

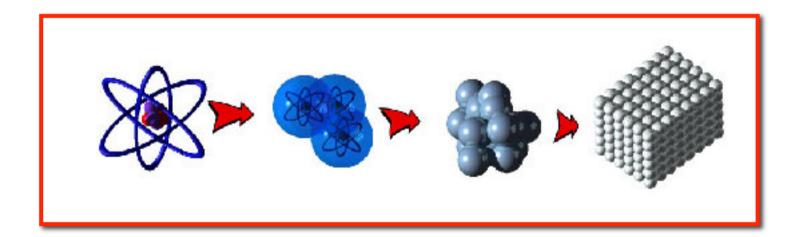


#### Sommario

- · Introduzione
- · La luce di sincrotrone
- Applicazioni
- · 'Linee di luce' o beamlines
- · 'Linea di luce' Dafne-L DXR1
- · Interazione radiazione-materia
- · Assorbimento e informazioni strutturali
- · Cenni di analisi dei dati

#### Introduzione

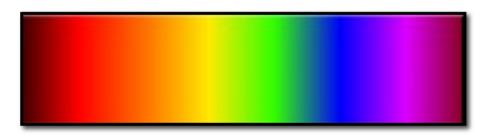
Studiare la **struttura della materia**, composta di atomi di vario tipo, significa **ottenere informazioni** sulle sue **proprieta' elettroniche**, **strutturali** e **magnetiche**.



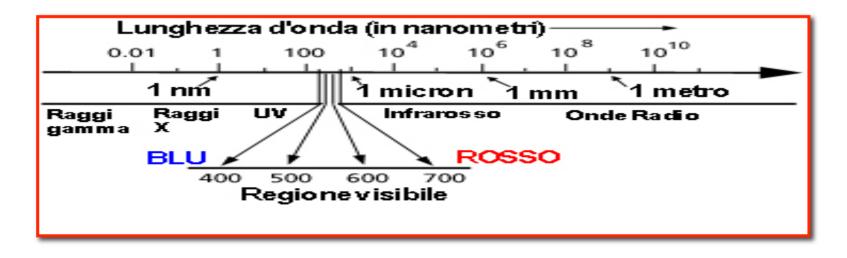
Da sempre la *radiazione elettromagnetica* ha costituito per l'uomo l'elemento piu' importante per la conoscenza dell'universo che lo circonda. Nello studio della struttura della materia, la '*luce di sincrotrone'* e' importante per aiutarci a '*vedere*'.

#### La luce

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



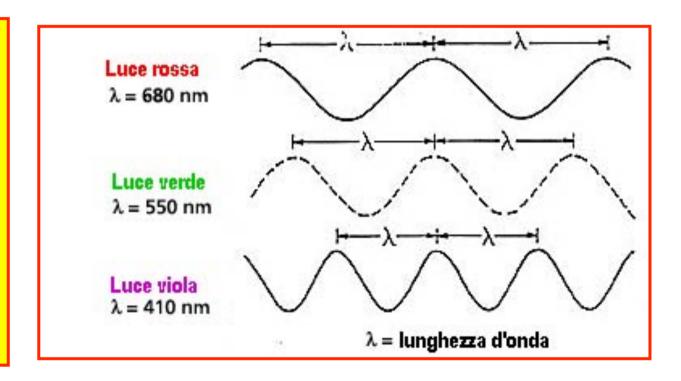
Di fatto la luce visibile e' solo una piccola parte dello spettro elettomagnetico. Le altre parti dello spettro sono note come onde radio, microonde, radiazione ultravioletta, raggi X e raggi gamma.



#### Radiazione, luce e onde

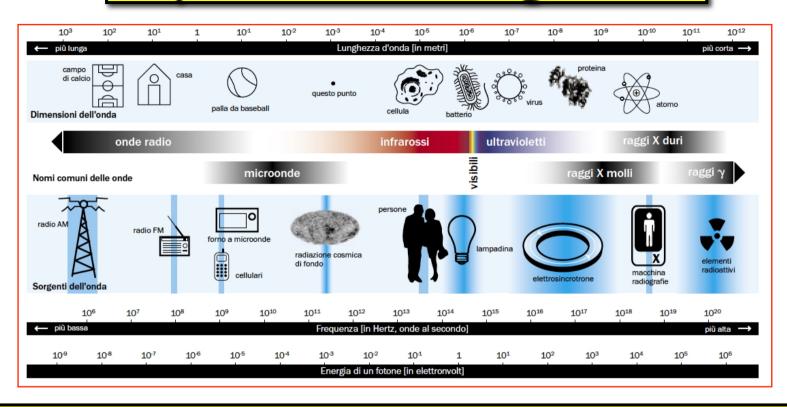
I vari tipi di radiazione rappresentano in senso piu' ampio particolari tipi di luce classificati in base alle loro definite frequenze e lunghezze d'onda associate.

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



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

#### Spettro elettromagnetico



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

 $\lambda v = c$  dove c e' la velocita' della luce.

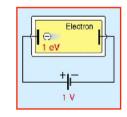
Queste due grandezze sono connesse con l'energia trasportata dall'onda: l'energia associata alla radiazione elettromagnetica è infatti direttamente proporzionale alla frequenza.

#### Energia

La radiazione e' quindi un'onda elettromagnetica, ossia un campo elettromagnetico oscillante, che si propaga trasportando energia.

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

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



Il successo di un lavoro di ricerca dipende in molti casi dall'uso della corretta energia o lunghezza d'onda per il particolare studio che si vuole attuare.

#### Sorgente ideale

Una sorgente ideale per molti studi legati alla struttura della materia dovrebbe avere le seguenti caratteristiche:

alta intensita' luminosa

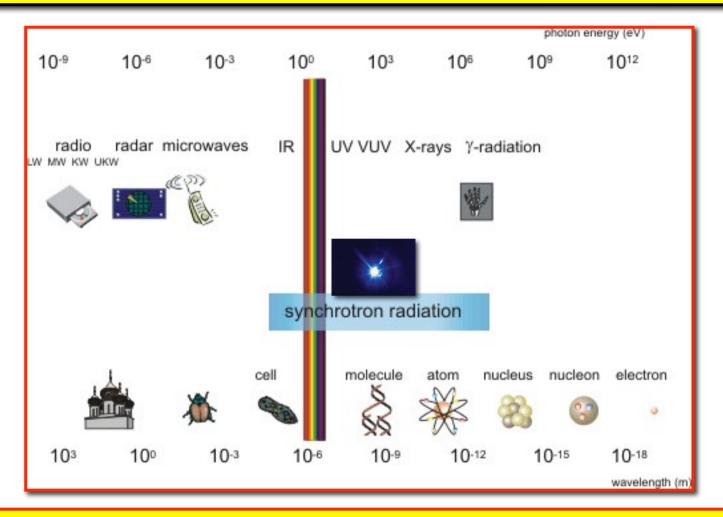
larghissimo spettro di frequenze con possibilita' di selezionare tra queste la frequenza desiderata mantenendo perlomeno una ragionevole intensita'

facile scelta della polarizzazione

un certo grado di coerenza

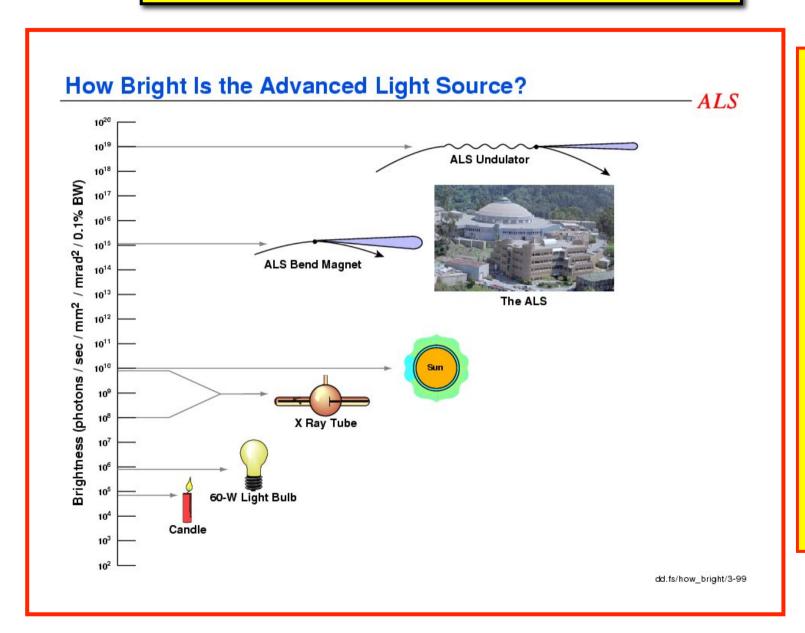
collimazione etc.

#### Cosa e' la luce di sincrotrone?



La *luce o radiazione di sincrotrone* permette di 'vedere' molte cose perche' di fatto e' una *radiazione molto intensa* con una *banda di emissione larga* che puo' andare *dall'infrarosso ai raggi x* duri.

#### Brillanze a confronto



Brillanza o flusso (numero di fotoni emessi nell'unita' di tempo in una determinat a regione spettrale) per angolo solido e unita'di superficie della sorgente

## Emissione di una particella carica accelerata

Una particella carica, tipo elettrone o protone, accelerata, emette radiazione elettromagnetica.

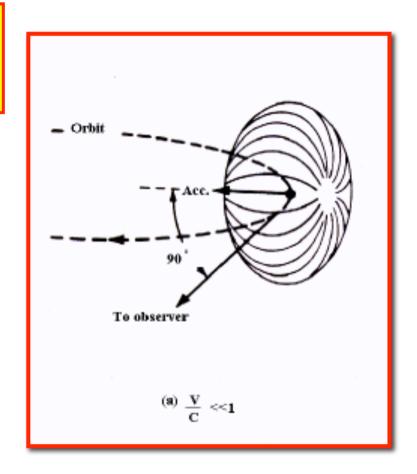
Larmor, nel 1897, aveva ricavato, a partire dall'elettrodinamica classica, la formula che esprime la potenza irradiata da una particella accelerata non relativistica

v << c o v/c << 1

v = velocita' della particella

c = velocita' della luce

P - potenza integrata su tutto l'angolo solido a - accelerazione e - carica

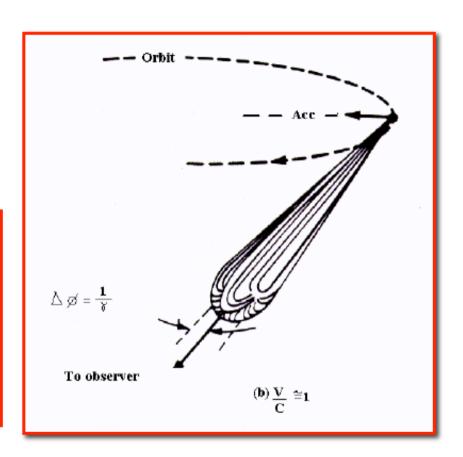


 $P = 2 e^2 a^2/(3c^3)$  [W]

#### Luce di sincrotrone

Quando particelle cariche, si muovono a velocita' vicine a quelle della luce, su una traiettoria curva, le particelle 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. Piu' alta e' l'energia cinetica (E) degli elettroni piu' stretto e' il cono di emissione e lo spettro di radiazioni emesso si sposta verso piu' alte energie.

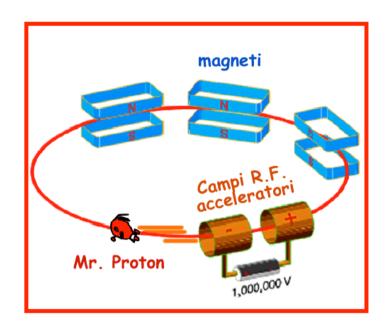


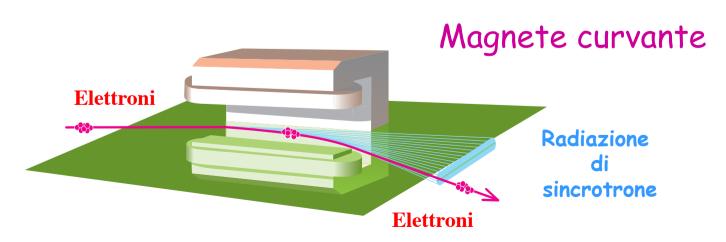
$$P_{rad} = \frac{2}{3} \frac{Q^2 c}{R^2} \left[ \frac{E}{mc^2} \right]^4$$

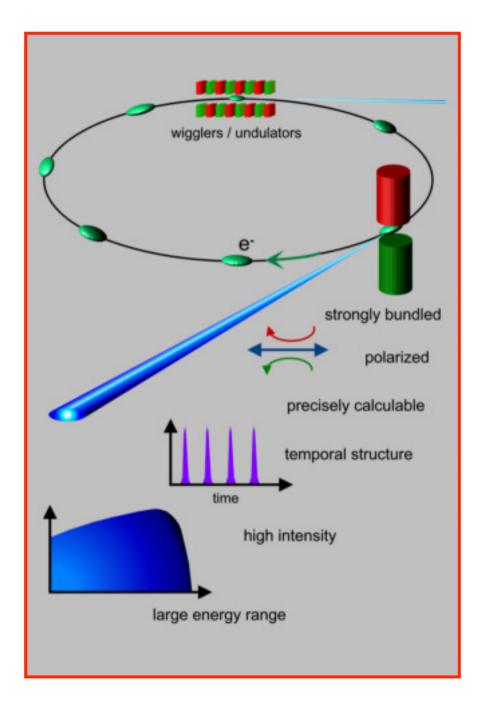
La potenza dipende dalla massa (m) e dall'energia della particella(E) e dal raggio di curvatura della traiettoria (R)

#### Sincrotroni o acceleratori di particelle

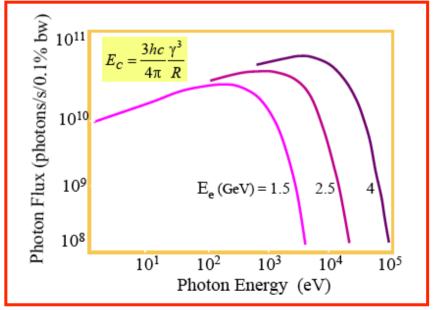
I sincrotroni sono degli acceleratori circolari. Le particelle cariche vengono accelerate per mezzo di campi elettrici e vengono mantenute sulle orbite circolari quindi deflesse campi magnetici. Le particelle sono confinate in un anello in cui c'e' ultra alto vuoto.



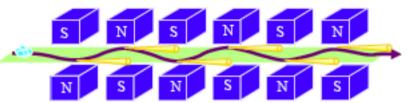


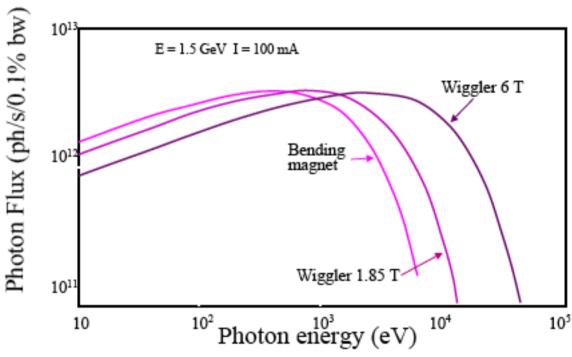


## Proprieta' della Luce di Sincrotrone



#### Magneti Wiggler





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

#### Acceleratori dedicati e non

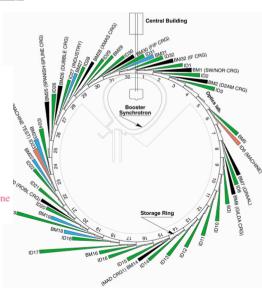




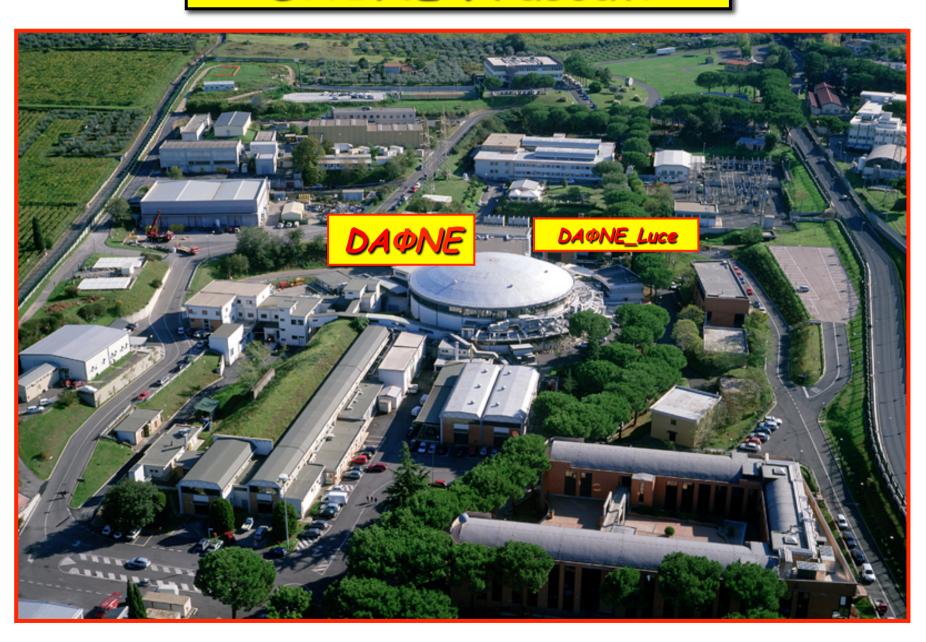
ESRF - Dedicated Synchrotron Radiation Facility -Grenoble - France

A partire dagli anni '70 la luce di sincrotrone ha trovato numerose applicazioni e sono stati costruiti anche acceleratori dedicati al suo uso.

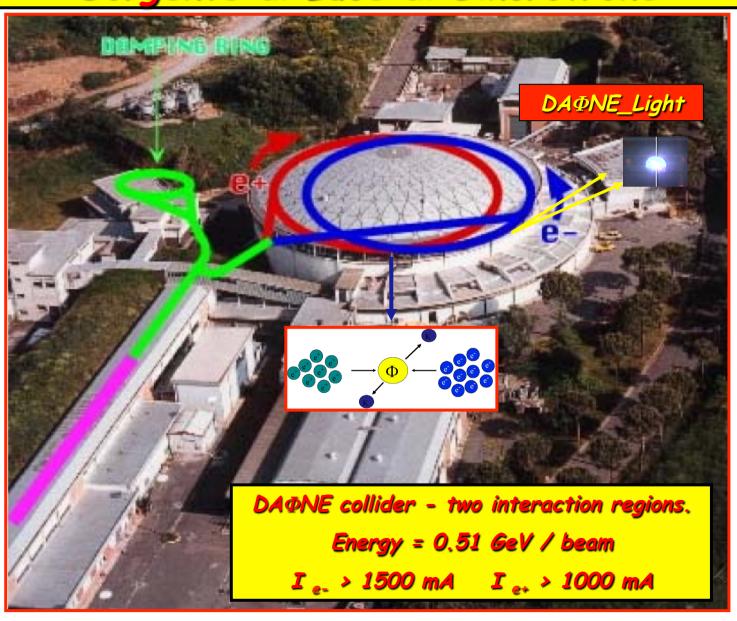




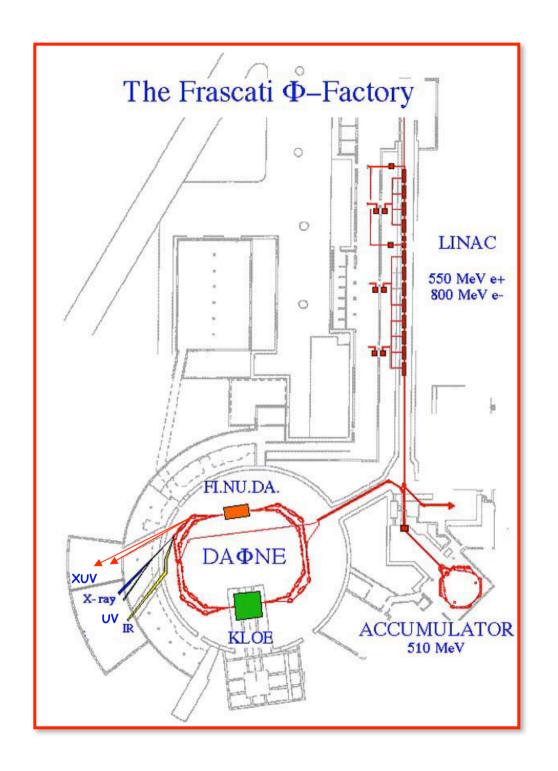
#### DAPNE Frascati



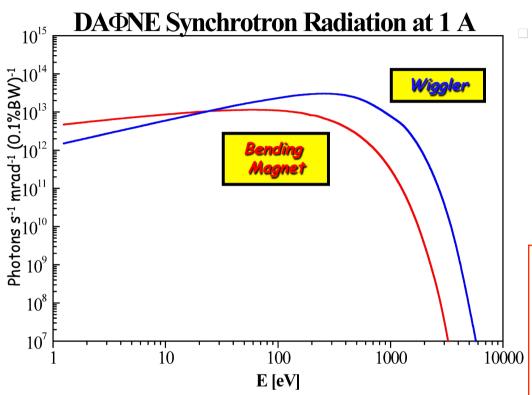
#### DAΦNE come Collider (e⁺-e⁻) ma anche come Sorgente di Luce di Sincrotrone

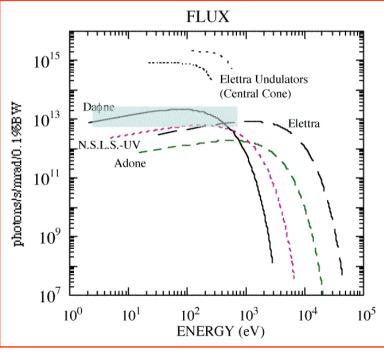


Visione
schematica
del
laboratorio
DAΦNE Luce



#### Flusso fotonico @ DADNE





#### Beamlines @ DADNE

```
DXR1 - Soft x-ray beamline (900 - 3000 eV aperta ad utenti)
```

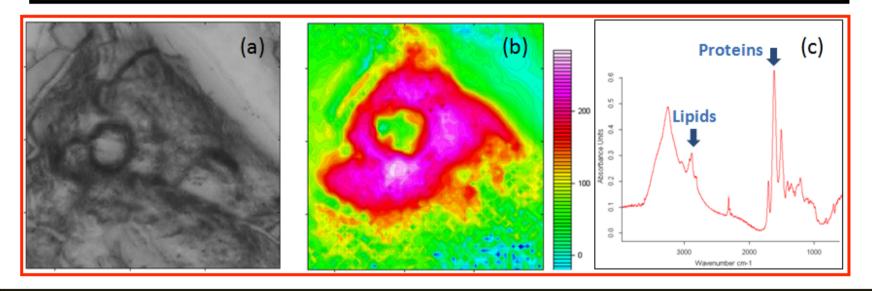
DXR2 - UV beamline (2 - 10 eV nuovo setup)

SINBAD - IR beamline (1.24 meV to 1.24 eV aperta ad utenti)

DXUV - 2 new XUV beamlines (LEB: (35 - 200) eV- HEB: (60-1000) eV commissioning)

#### Ricerca e Luce di Sincrotrone

## Imaging e spettro-microscopia usando radiazione IR



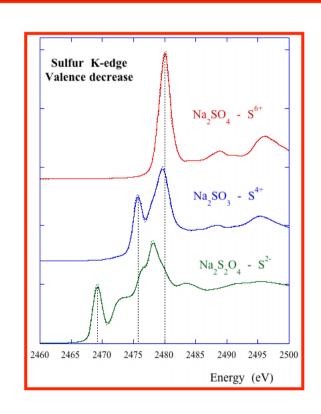
(a) Visible image of a **skeletal muscle connective tissue** showing insertion between endomysium and perimysium. The image size is  $170 \times 170 \, \mu m$ . (b) Infrared image of the tissue with 1.3  $\mu m$  pixel resolution representing the protein (amide I) band distribution. (c) A typical absorption spectra where different cell contributions are resolved: proteins (amide I @1715-1600 cm<sup>-1</sup>) and lipids (fatty acyl chains @3020-2880 cm<sup>-1</sup>).

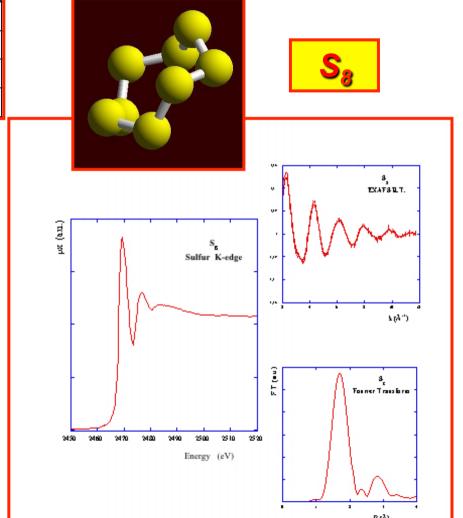
#### A bright future for synchrotron IR imaging

C. Petibois, G. Deleris, M. Piccinini, M. Cestelli-Guidi, A. Marcelli, Nature Photonics 3, 179 (01 Apr 2009)

#### Spettroscopie e raggi-x molli

Crystal type	2d spacing (Å)	Energy range (eV)	Absorption edges
Beryl (10-10)	15.954	1000 - 1560	Na K, Mg K, Cu L
KTP (011)	10.950	1200 - 2200	Mg K, Al K
InSb (111)	7.481	1800 - 3100	Si K, P K, S K, Cl K
Ge (111)	6.532	2100 - 3100	P K, S K, Cl K





#### Applicazioni con radiazione UV e XUV

- □ Particle experiments (using Cherenkov light)
- □ Astro-particle experiments (using fluorescence light)
- ☐ Astronomy experiments
- □ Space experiments
  - ·Cosmic rays
  - · Astronomy
  - ·Earth Observation

- Astrobiology and photo-biology
- Optical technology
- Detector technology
- Instrumentation testing and calibration
  - Optical properties of materials

#### XUV radiation fields of interest:

Biology

Surface Science

Material Science

R&D studies of INFN interest

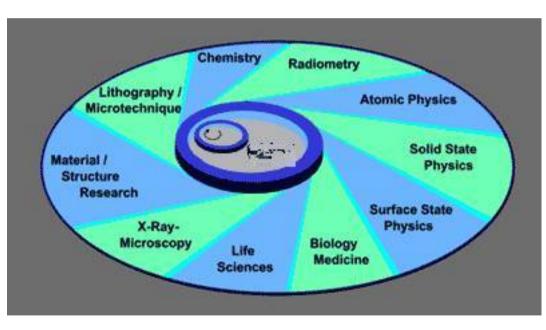
#### Campi di ricerca

La luce di sincrotrone viene utilizzata per lo studio delle proprieta' dei materiali, ad esempio magnetici o superconduttori, per l'analisi di strutture biologiche, quali proteine e virus, nel campo della microelettronica e micromeccanica e anche in medicina.

#### Chimica

Tecnologia

Scienze dei materiali



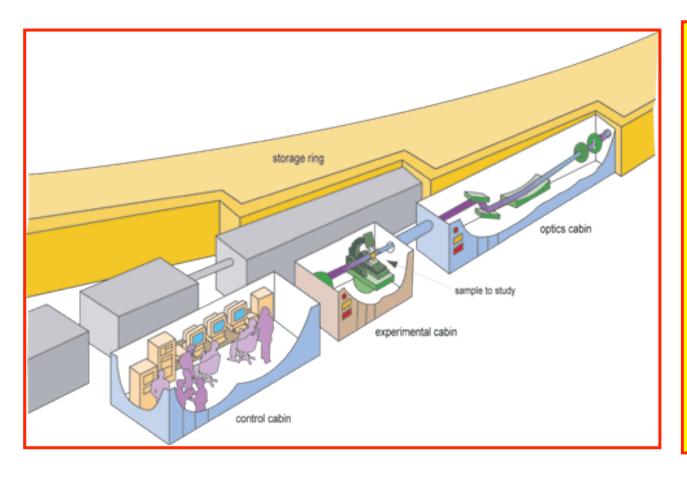
- Scienzedell'ambiente
- Medicina
- Biologia

FisicaAtomica

Fisica delloStato Solido

#### Linee di luce o beamlines

La radiazione emessa da magneti curvanti, ondulatori e wiggler puo' essere ulteriormente 'specializzata' al tipo di attivita' di ricerca sperimentale o applicazione tecnologica che si intende svolgere.



I sistemi ottici che trasportano, focalizzano e rendono monocromatico il fascio prima che raggiunga la camera sperimentale (*linee di* luce o beamlines) sono costruiti in modo da fornire fotoni con caratteristiche specifiche per gli esperimenti progettati.

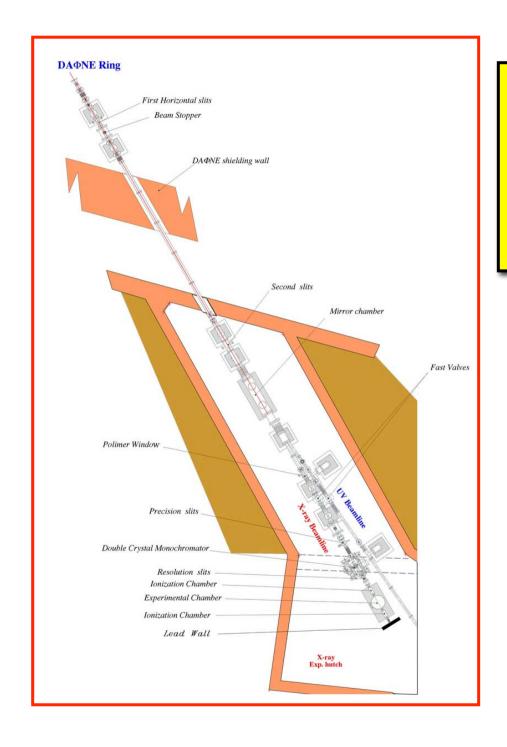
#### Linee di luce o beamlines

I parametri di interesse ossia intervallo di energie, risoluzione energetica, polarizzazione, coerenza, flusso, dimensioni dello spot, etc. non sono tutti ottimizzabili contemporaneamente.

Per un dato esperimento si potra' desiderare di:

- 1) minimizzare il tempo di acquisizione (studio di fenomeni cinetici)
- 2) minimizzare le dimensioni del fascio di luce (spettromicroscopie)
- 3) massimizzare il potere risolutivo in energia (spettroscopie in risonanza)
- 4) avere il massimo flusso sul campione (studio di sistemi diluiti) oppure scegliere una qualunque combinazione tra questi ed altri parametri di interesse.

Una volta note le caratteristiche delle radiazione emessa dalla sorgente disponibile, la progettazione e la messa a punto di beamlines per esperimenti specifici richiede un notevole sforzo finanziario ed una forte capacita' scientifica e tecnologica.



#### DADNE-Luce Linea DXR1 Raggi X molli

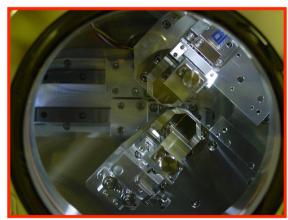
L'intervallo dei raggi X molli
ossia lunghezza
d'onda tra 0.3 nm e 5 nm
riveste una particolare
importanza come strumento di
indagine poiche' corrisponde
alle dimensioni della
struttura microscopica della
materia (atomi, molecole e
strutture cristalline).

#### Linea DXR1

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

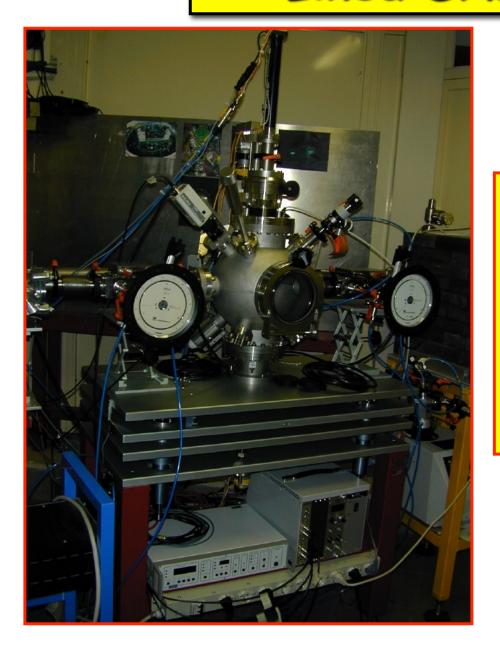






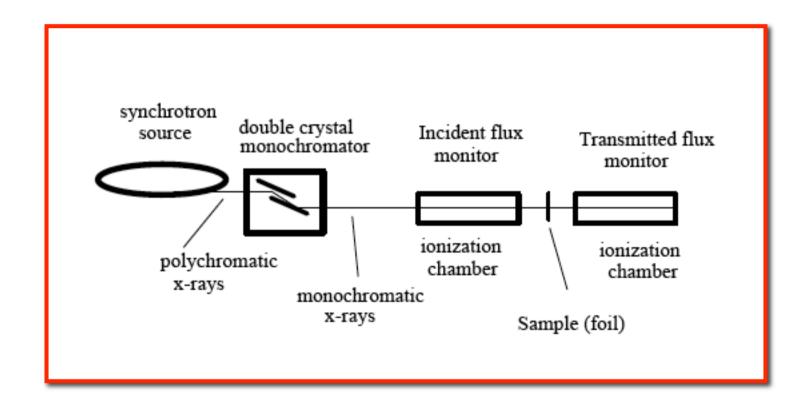
Elemento fondamentale della linea e' il monocromatore, cioe' un sistema che permette la selezione delle energie per il particolare esperimento progettato

#### Linea DXR1



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

#### Schema della linea DXR1



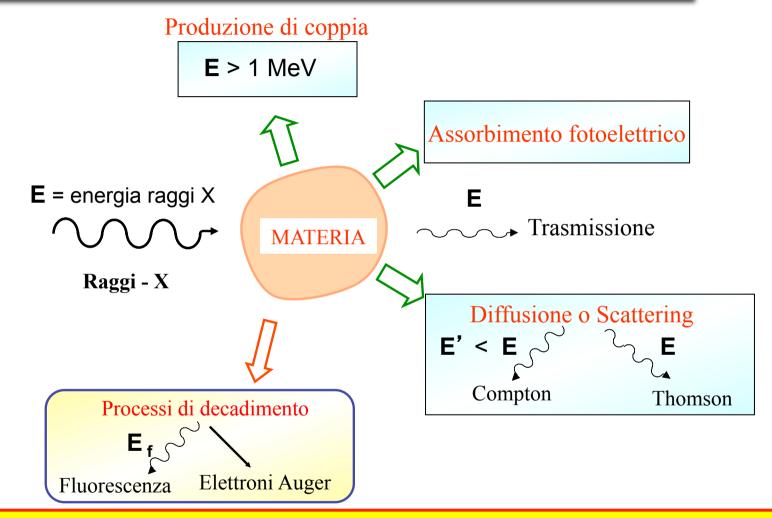
#### Interazione radiazione-materia

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

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

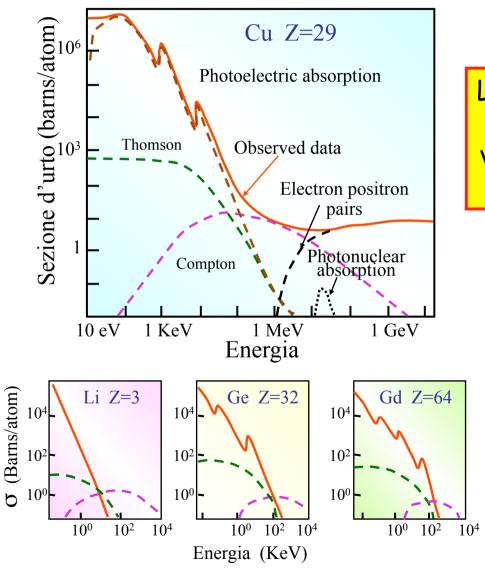
Prendiamo in considerazione l'interazione dei *raggi X con la materia*.

#### Interazione Raggi X - Materia



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

#### Sezioni d'urto - $\sigma$



La sezione d'urto  $\sigma$  misura la probabilità che si verifichi un certo processo d'interazione.

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

#### Assorbimento dei raggi X

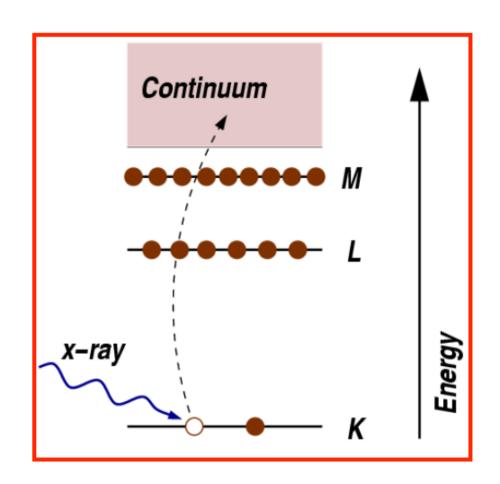
Nel processo fotoelettrico i raggi X vengono assorbiti dagli atomi.

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

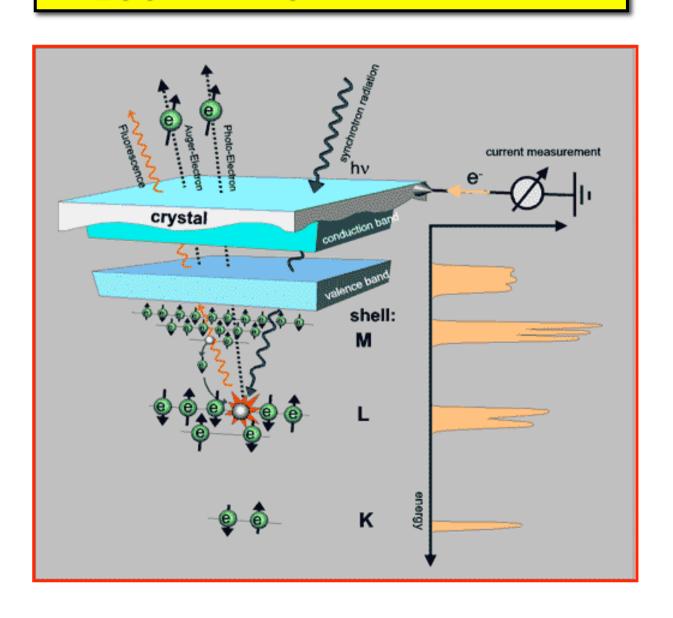
Affinche' questo accada

I'energia della radiazione
incidente E deve essere
maggiore all'energia di
legame E<sub>0</sub> dell'elettrone.

La differenza *E-E*<sub>0</sub> rappresenta *l'energia* cinetica del fotoelettrone.

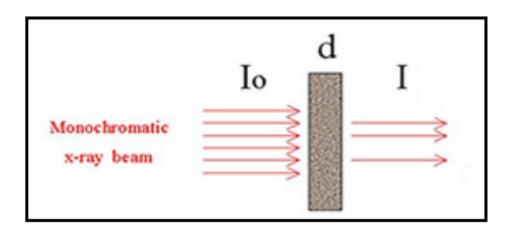


# Effetto fotoelettrico



### Coefficiente di Assorbimento

Un fascio di raggi X
monocromatico, di
intensita' I<sub>o</sub> che
attraversi uno strato
di materiale di
spessore d viene
assorbito secondo
una nota legge:



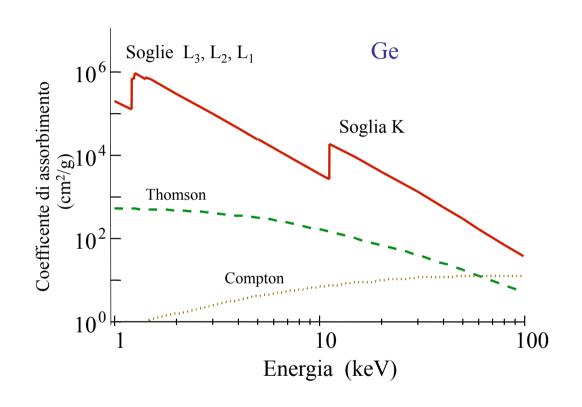
$$I = I_o e^{-\mu(E)d}$$

Dove Ie' l'intensita' in uscita dallo strato, µ dipende dal materiale e dall'energia E ed e' noto come coefficiente di assorbimento.

# Soglie di assorbimento

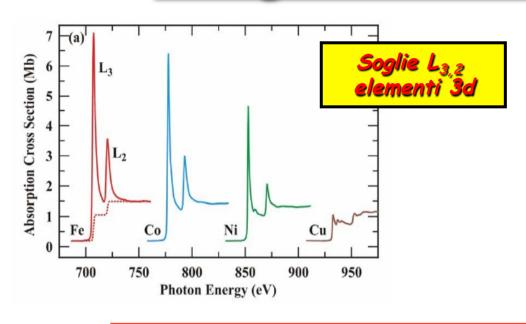
La dipendenza dalla energia del coefficiente di assorgimento e' monotona decrescente tranne che in corrispondenza di alcune energie discrete in cui compaiono delle brusche discontinuita' dette soglie di assorbimento.

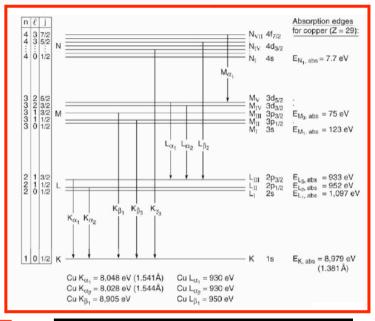
Le posizioni in energia delle soglie corrispondono alle energie di legame  $E_0$ .

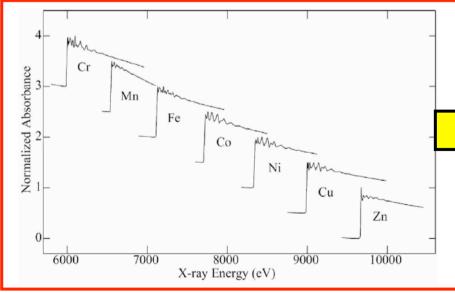


Quando *l'energia dei raggi X* e' sufficiente ad eccitare un *elettrone 1s* del livello elettronico piu' profondo, si parla di *soglie K*, se si verifica una transizione al continuo si un *elettrone 2s* o *2p* si parla di *soglie L* e cosi' via.

# Soglie di assorbimento







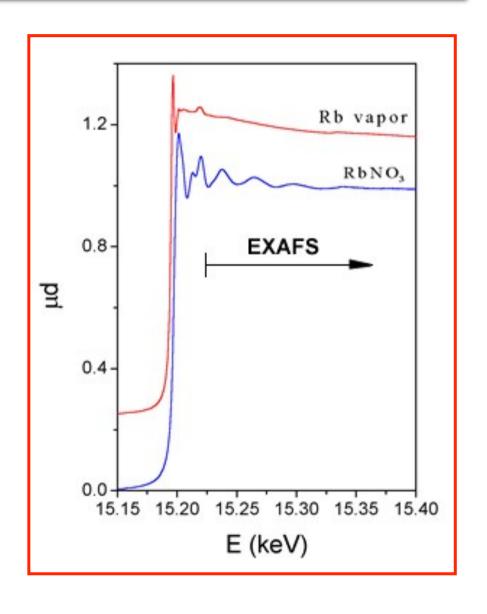
Soglie di assorbimento Cu

Soglie K elementi 3d

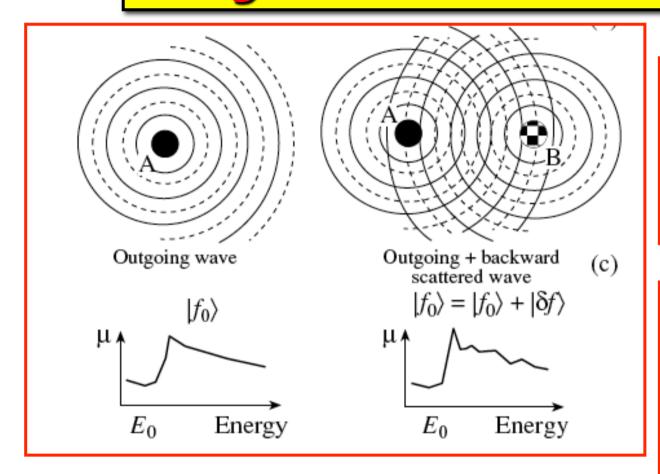
### XAFS - X ray Absorption Fine Structure

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

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



### Origine della Struttura Fine

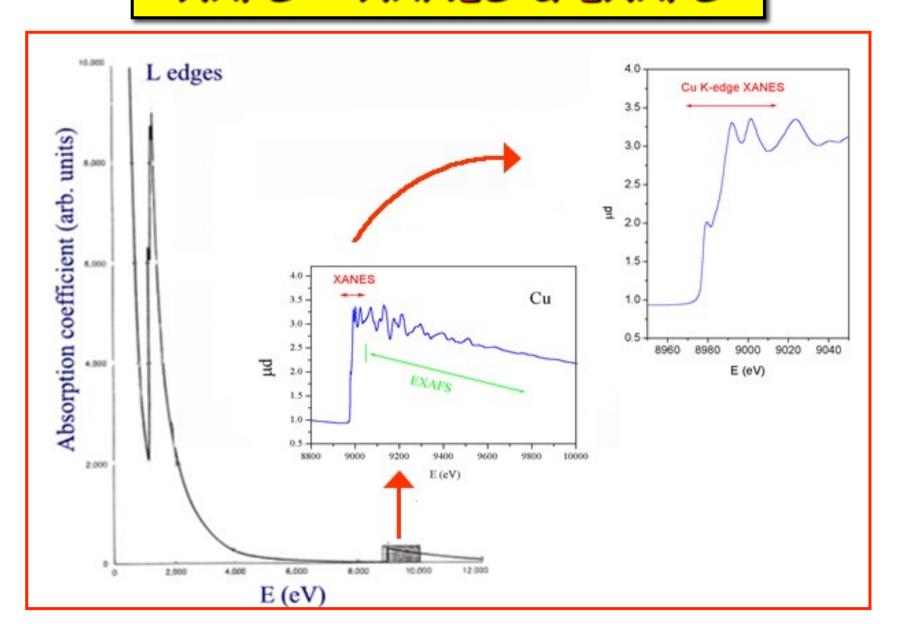


Il fenomeno di interferenza dipende dall'ambiente che circonda l'atomo assorbitore ed e' funzione dell'energia: grazie a questo fenomeno la struttura fine custodisce informazioni strutturali locali.

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

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

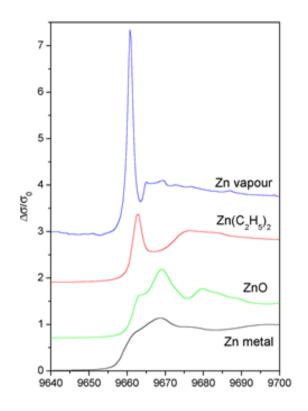
#### XAFS - XANES & EXAFS

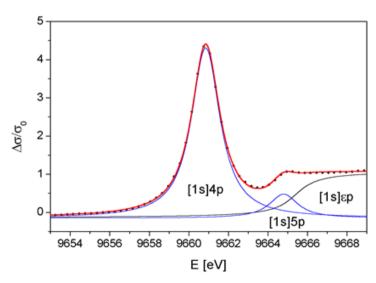


#### XANES

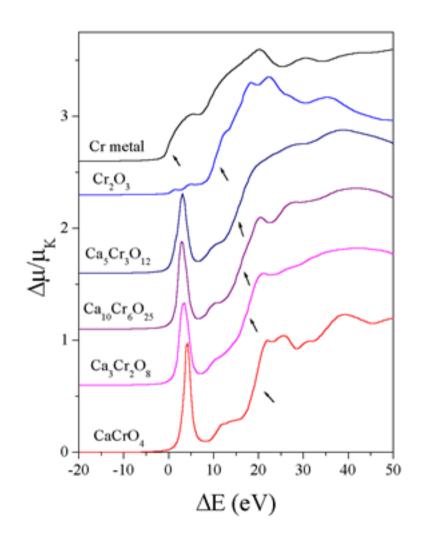
La zona vicino alla soglia prende il nome di XANES o X-ray
Absorption Near Edge Structure.
Essa e' presente da pochi eV
prima della soglia a circa 50 eV
dopo la soglia. In questo intervallo il fotoelettrone ha energia confrontabile ai livelli elettronici liberi.

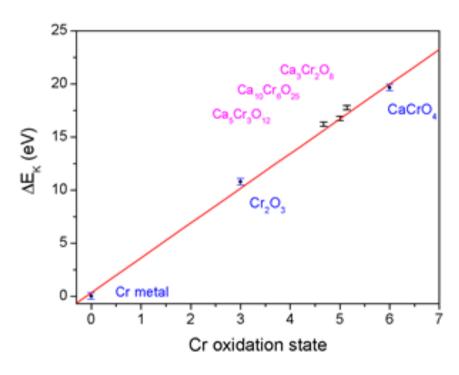
Di fatto le XANES permettono di studiare sia le strutture elettroniche atomiche che quelle della parte bassa della banda di conduzione.





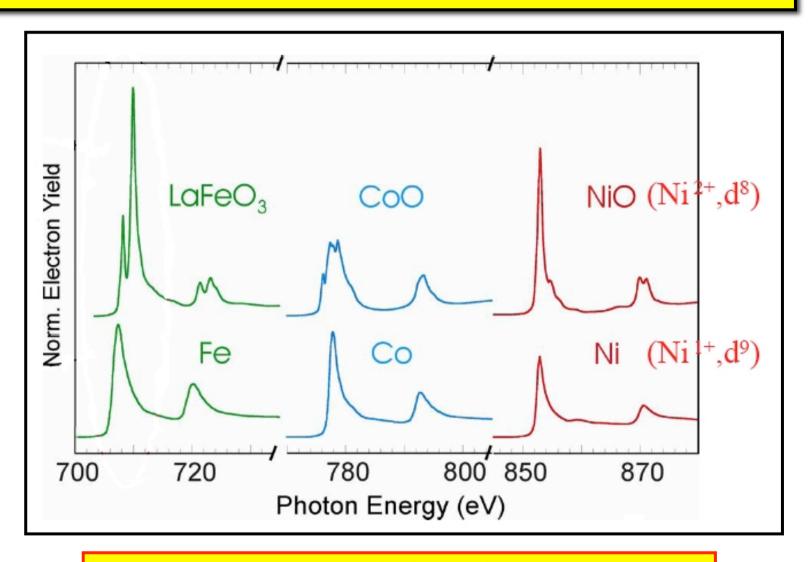
### XANES e stati di ossidazione





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

### XANES e stati di ossidazione



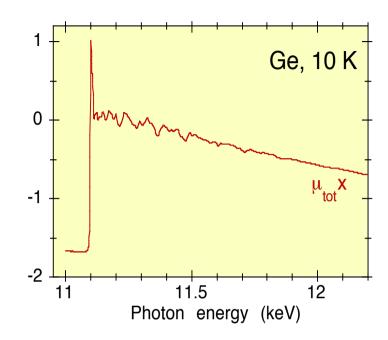
Le XANES sono sensibili al tipo di legame chimico.

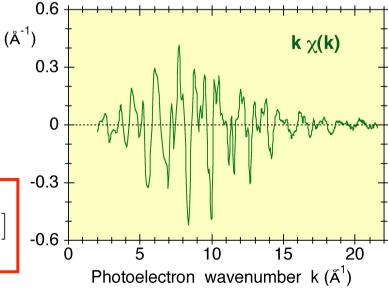
### **EXAFS**

La parte che si estende lontano dalla soglia di assorbimento e' denominata *EXAFS* o *E*xtended *X*-ray *A*bsorption *F*ine *S*tructure

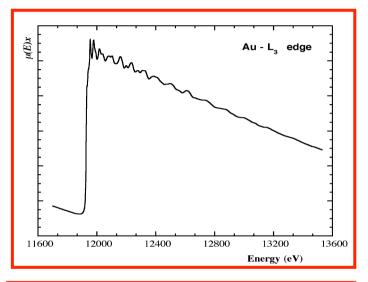
La struttura EXAFS e' in grado di fornire informazioni sulle distanze interatomiche tra l'atomo assorbitore e i suoi vicini (R), sul tipo e numero di vicini (N), sul loro disordine termico e strutturale (o²) e anche sugli angoli di legame.

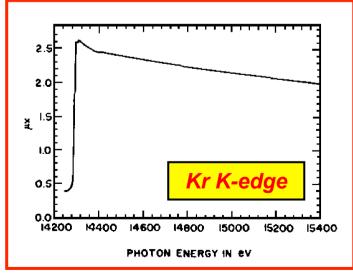
$$\chi(\mathbf{k}) = \sum_{\mathbf{j}} \frac{\mathbf{N_j f_j(k)} e^{-2\mathbf{k^2 \sigma_j^2}}}{\mathbf{k R_j}^2} sin[2\mathbf{k R_j} + \boldsymbol{\delta_j(\mathbf{k})}]$$

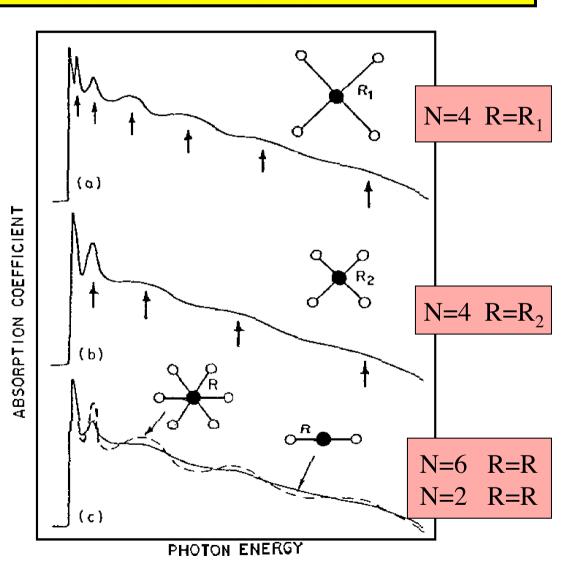




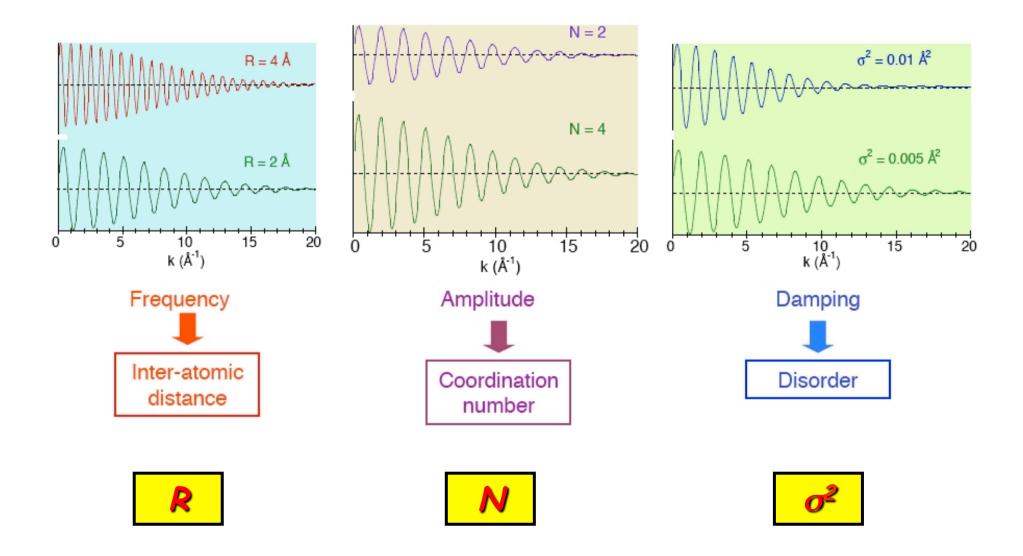
# Informazioni strutturali ed osservazione dei dati



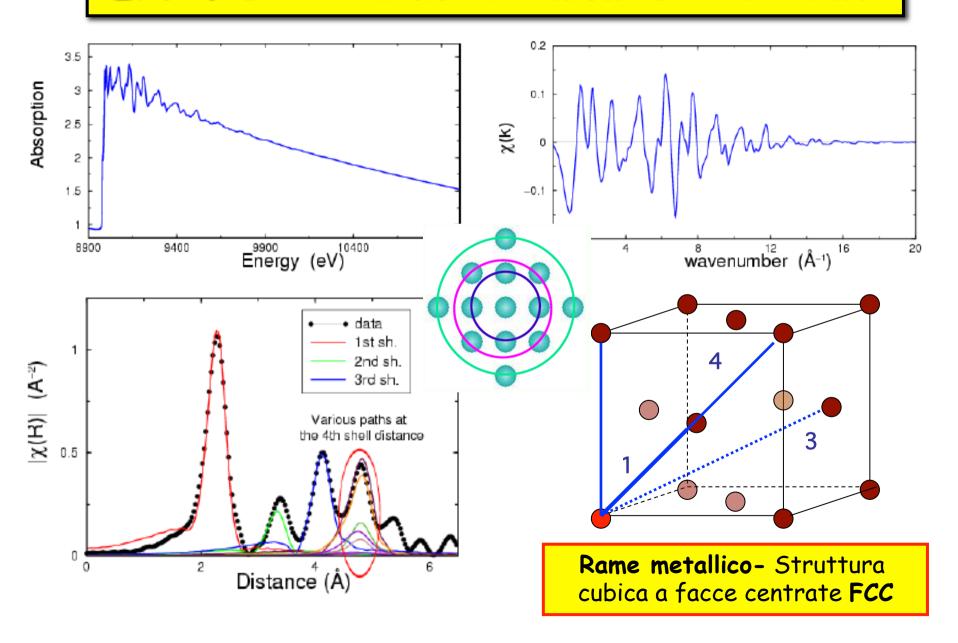




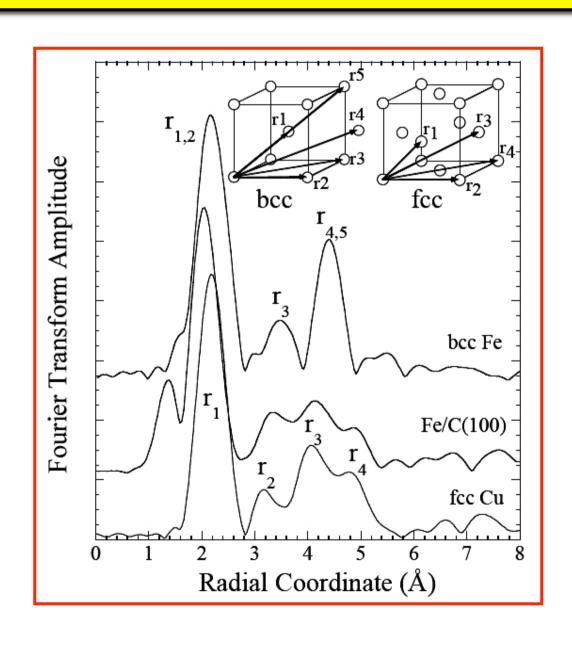
### Informazioni strutturali



# EXAFS - Cenni di analisi dei dati

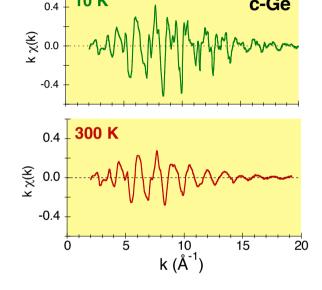


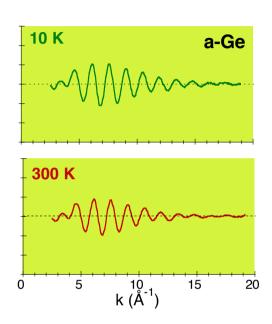
# EXAFS - Cenni di analisi dei dati



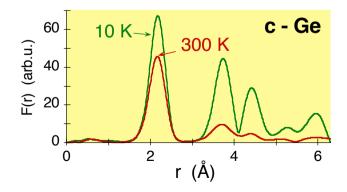
# EXAFS - Cenni di analisi dei dati

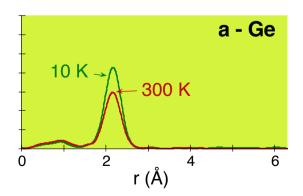






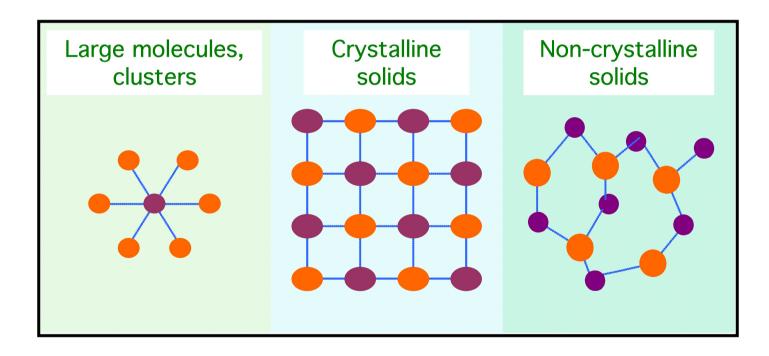
Fourier transforms





# Applicazioni possibili

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



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

### Misure di assorbimento

$$\mathbf{I} = \mathbf{I_0} \mathbf{e^{-\mu t}} \qquad \underbrace{I_0} \qquad \mathbf{I}$$

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

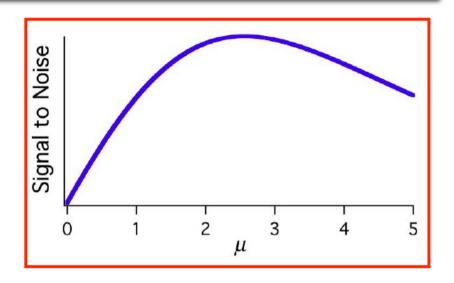
$$\mu(\mathbf{E})\mathbf{t} = -\ln(\mathbf{I}/\mathbf{I}_0)$$

μ, ossia il coefficiente di assorbimento dipende fortemente dalla energia dei raggi X incidenti (Ε), dal numero atomico (Ζ), dalla densita' del materiale (ρ) e dalla massa atomica (Λ).

$$\mupproxrac{
ho {f Z^4}}{{f A}{f E^3}}$$

## Cenni sulla preparazione del campione

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



$$\mu x = 2 = \mu_{\rm m} \rho x = \ln(I_0/I)$$

dove μ<sub>m</sub> e' il coefficiente di assorbimento di massa e ρ e' la densita' del materiale.

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

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

La quantita' in grammi **m** di campione da depositare su un supporto di area **A**.

# Riferimenti per approfondimenti

- http://cars.uchicago.edu/xafs/
- http://alpha.science.unitn.it/~fisica1/raggi\_x/
- Lezione M. Benfatto @ <u>http://www.lnf.infn.it/edu/incontri/2004/programma.html</u>
- http://www.bessy.de/guided\_tour/en.02.sr.php?docs=0
- I valori di μ<sub>m</sub> possono essere trovati sul sito:
   http://www cxro.lbl.gov/optical\_constants/pert\_form.html

### http://web.infn.it/Dafne\_Light/



#### **DAFNE-LIGHT**

INFN-LNF Synchrotron Radiation Facility

INFN

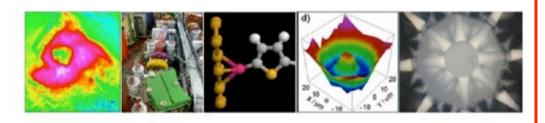
LNF

**DAFNE Storage Ring** 

**DAFNE-Light** 

#### Menu

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



#### **DAFNE-Light**

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

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

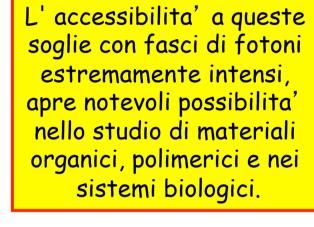
The beamlines DXR1 and SINBAD-IR are open to external users.

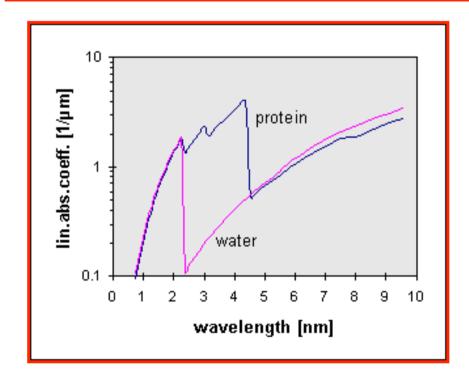
# Appendici

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

# Water-window e raggi X molli

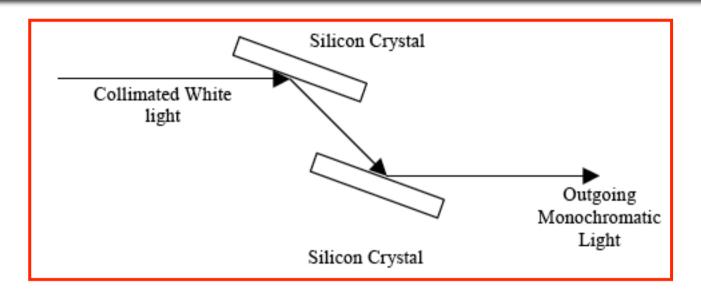
Questo intervallo di energia include le soglie di assorbimento K (energie di legame delle soglie del livelli di' core' 1s) degli elementi della prima serie del sistema periodico: carbonio (285 eV), azoto (410 eV) e ossigeno (545 eV).

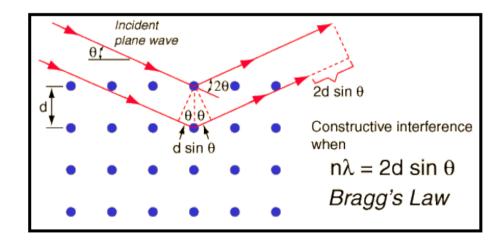




Particolarmente importante e'
l'intervallo 300-500 eV (water
window) dove il carbonio (ovvero i
materiali organici) assorbe la
radiazione e l'ossigeno (ovvero
l'acqua) e' trasparente.

# Monocromatore a doppio cristallo







# Rivelatori per raggi X

#### Classificazione principale

**CONTATORI** 

contano singoli fotoni di una certa energia

**INTEGRATORI** 

generano segnali la cui ampiezza è proporzionale al flusso di fotoni

Scelta

Tipo di misura

Informazione

Flusso, energia, posizione, tempo, ...

#### Rumore (noise)

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

#### Alcune

#### proprieta':

Efficienza di rivelazione

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

Intervallo dinamico

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

Efficienza quantica
Numero di portatori di
carica/fotone

Risoluzione

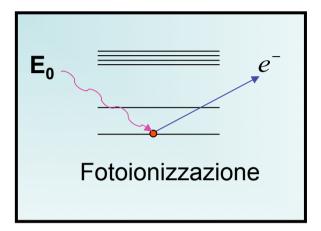
#### **INTEGRATORI**

#### Caratteristiche principali

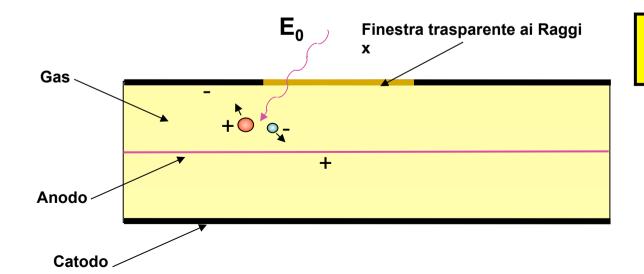
- Rumore di lettura read out noise
- Elevata dinamica
- Sorgenti luminose

### Integratori

#### Processo primario: assorbimento



#### Rivelatori a gas: schema di principio

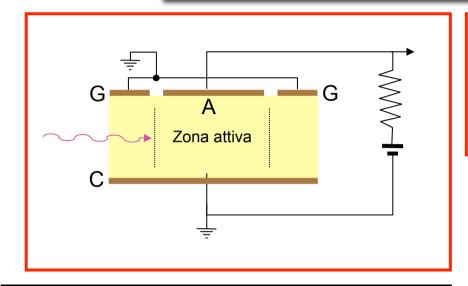


Assorbimento in un un gas → ioni + elettroni

- Ione positivo
- Fotoelettrone di energia:

$$E = E_0 - E_b$$

### Camera ad ionizzazione



Ganello di guardia A Anodo Ccatodo

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

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

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

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

Numero di coppie elettrone-ione prodotte:

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



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

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

Intensità della radiazione incidente (ph/s)
 trasmittanza della finestra
 yefficienza di fotoionizzazione del gas (elettroni/ph)