

La luce di sincrotrone: un fantastico strumento

Giorgio Margaritondo
Ecole Polytechnique
Fédérale de Lausanne

The EPFL logo, consisting of the letters 'EPFL' in a bold, red, sans-serif font.

I “sincrotroni”, sorgenti avanzatissime di raggi x, costituiscono oggi la più grande rete internazionale di strumenti per la ricerca, con una forte presenza d’Italia:

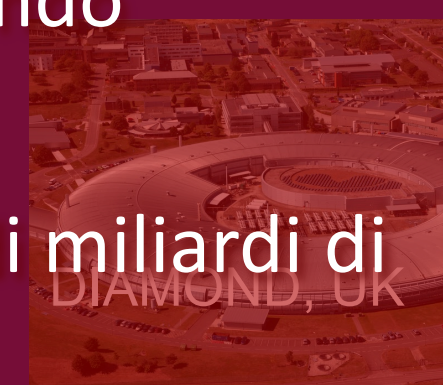
- Decine di centri in tutto il mondo
- Decine di migliaia di utenti
- Finanziamenti per centinaia di miliardi di euro:

PERCHE’?

ALS, Berkeley, USA



SOLEIL, Orsay, France



SLS, Switzerland

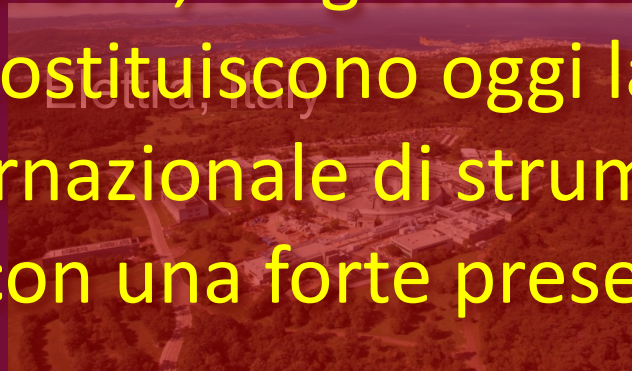
NSRRC, Beijing, China



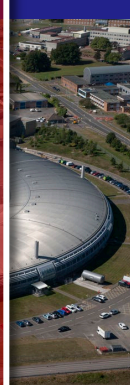
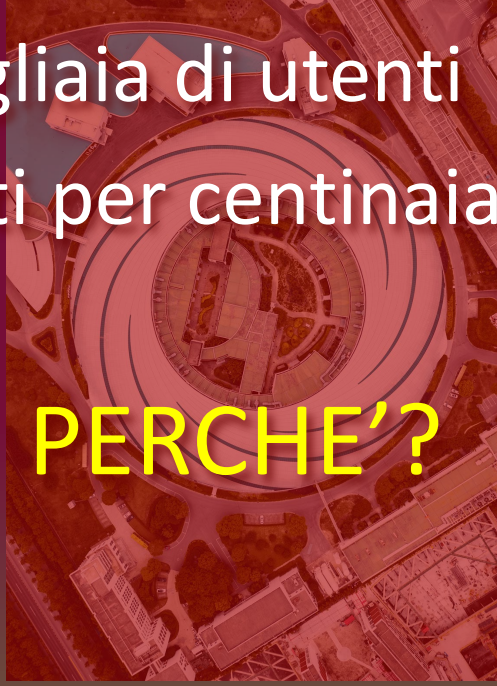
Spring-8, Japan



Elettra, Italy



SSRF, Shanghai, China

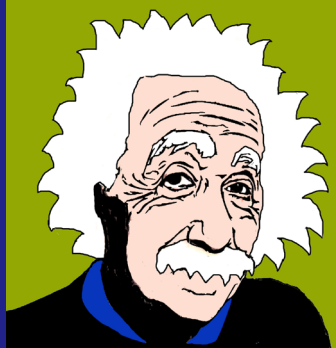


A cosa servono i raggi x -- non solo in medicina ma anche per la ricerca? Cosa si esplora con le loro lunghezze d'onda e energie fotoniche?



Come realizzare una "buona" sorgente di raggi x?

Cominciamo da un paradosso:



mettendo in pratica la relatività di Albert Einstein!



λ

Una sorgente di onde radio è grande grosso modo quanto le lunghezze d'onda emesse, per esempio 1 metro



Per le lunghezze d'onda microscopiche dei raggi x, la sorgente dovrebbe misurare 1 angstrom, come 1 atomo

Per migliorare, dovremmo costruire dispositivi grandi come un atomo: impossibile!

ma con risultati mediocri: poco flusso, poca intensità



In effetti, nelle sorgenti convenzionali di sono gli atomi a emettere i raggi x

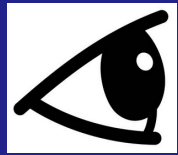
...invece, ecco cosa usiamo:

risposta: è la mia
relatività che
rimpicciolisce le
cose!

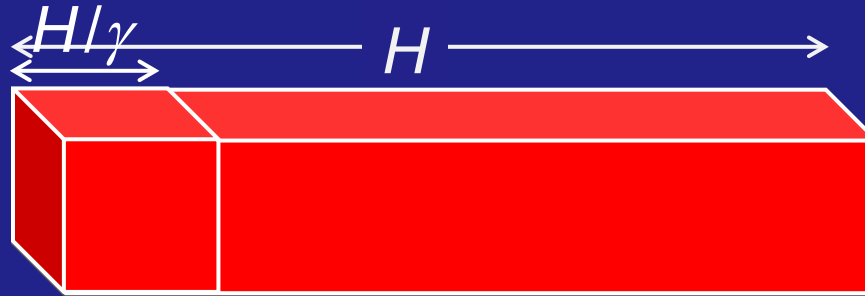
...combinando insieme
due effetti

ELETTRA, Trieste, uno dei centri di luce di sincrotrone
più avanzati del mondo: non 1 angstrom ma
diversi chilometri – Come è possibile???

Quali sono questi due effetti relativistici?



$-v \approx -c$



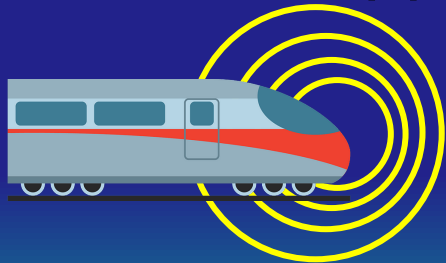
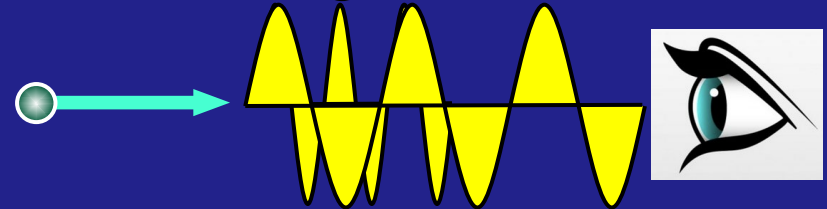
Il primo è la “contrazione di Lorentz”:

un oggetto in moto appare accorciato di un fattore γ

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2} = \text{energia} / m_0 c^2$$

$v \approx c \rightarrow \text{grande } \gamma \rightarrow \text{piccolo } H / \gamma$

...e il secondo è l'effetto “Doppler”: le lunghezze d'onda emesse da una sorgente in moto ci appaiono accorciate

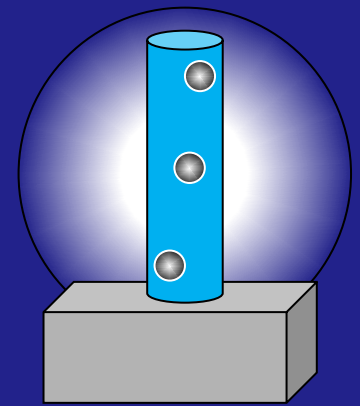


...fenomeno analogo al cambio di tonalità del rumore di un treno che si avvicina

...ma per i raggi x è un effetto relativistico, che riduce fortemente le lunghezze d'onda – di un fattore $\approx 2\gamma$

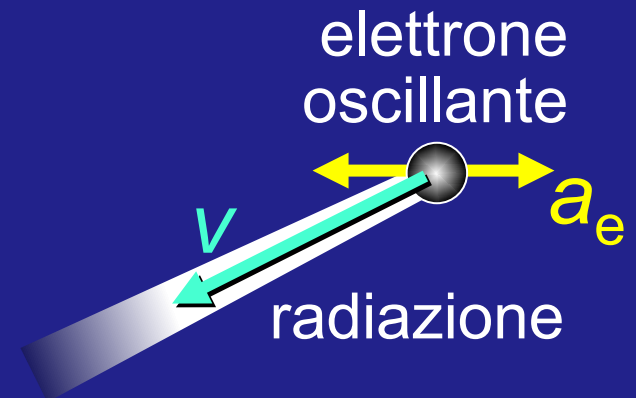
Come sfruttare i due effetti per costruire una sorgente di raggi x?

...cominciamo dagli elettroni che oscillano in un'antenna radio: sono accelerati, ed è la loro accelerazione a_e che causa l'emissione d'onde



Visto che **accelerazione = forza/massa**, la piccola massa degli elettroni ne esalta l'accelerazione e facilita l'emissione

Passiamo ora a un elettrone che emette delle onde elettromagnetiche oscillando nella direzione orizzontale

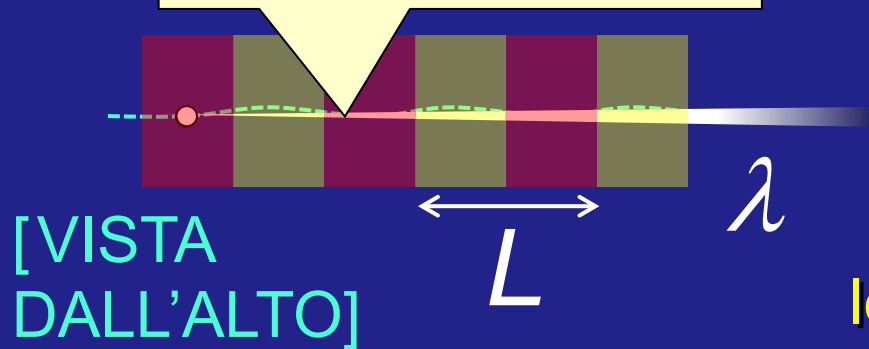


...e rendiamolo relativistico aggiungendo una velocità longitudinale $v \approx c$ impartita da un acceleratore

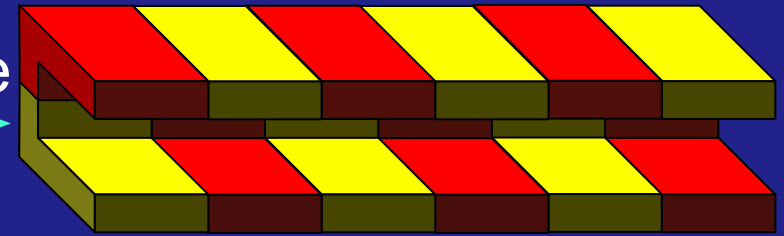
Come realizzare questo moto combinato?

Risposta: facendo passare l'elettrone a velocità $\approx c$ lungo una serie periodica di magneti (un "ondulatore")

L'ondulatore obbliga gli elettroni a oscillare trasversalmente



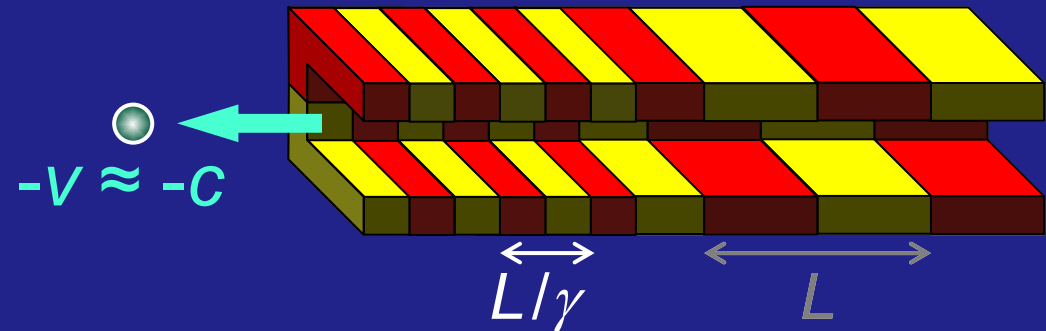
elettrone
 v



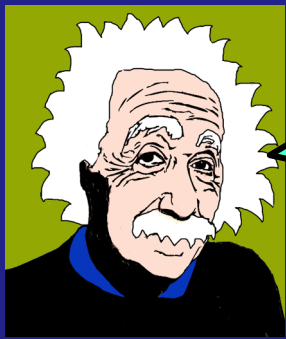
...e ad emettere onde elettromagnetiche

...la cui lunghezza d'onda λ è legata a L , il periodo dell'ondulatore

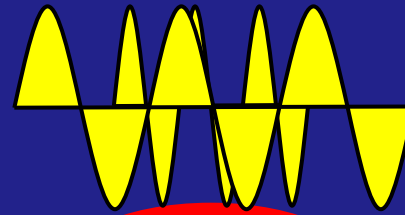
Ma attenzione:
l'elettrone "vede"
l'ondulatore viaggiare
con velocità $-v \approx -c$ e il
suo periodo accorciato
a L/γ dalla contrazione
di Lorentz, quindi λ si
riduce a L/γ



$v \approx c \rightarrow \gamma$ grande $\rightarrow L/\gamma$ piccolo
Tipicamente, $\gamma = 2,000 - 12,000$



...e questo non è tutto, gente!!!



$$L\sqrt{2\gamma^2}$$

L/γ è la lunghezza d'onda nel riferimento dell'elettrone

...ma nel riferimento del laboratorio il moto della sorgente (l'elettrone) causa **l'effetto Doppler** (relativistico) – diminuendo ancora la lunghezza d'onda osservata di un fattore $\approx 1/(2\gamma)$

Insieme, l'effetto Doppler e la contrazione di Lorentz diminuiscono la lunghezza d'onda a:

$$\lambda \approx \frac{L/\gamma}{2\gamma} = \frac{L}{2\gamma^2}$$

Esempio: $L = 1 \text{ cm}$,
 $\gamma = 5000 \rightarrow \lambda \approx 2 \text{ \AA}$: **raggi x!!!**

OK, gli elettroni relativistici producono dei raggi x:
ma possono darci delle buone sorgenti?

Per cominciare: cosa è una “buona” sorgente di raggi x?

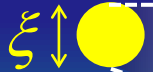


un caminetto non è molto efficace nell'illuminare
un oggetto: l'area emittente è estesa e
l'emissione è sparsa in un grande angolo solido



Una torcia elettrica è più efficace, emettendo da
una piccola area e in un piccolo cono

Area $\approx \xi^2$



Angolo
solido Ω

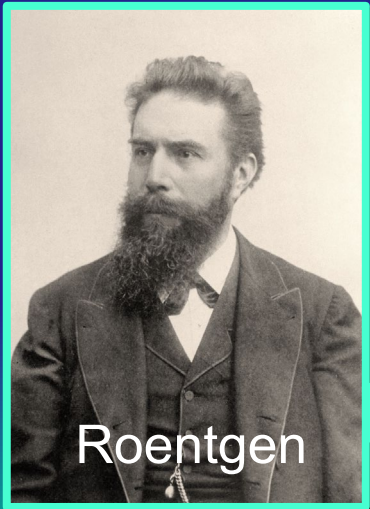
da qui, la nozione di “brillanza”, b

Flusso
 F

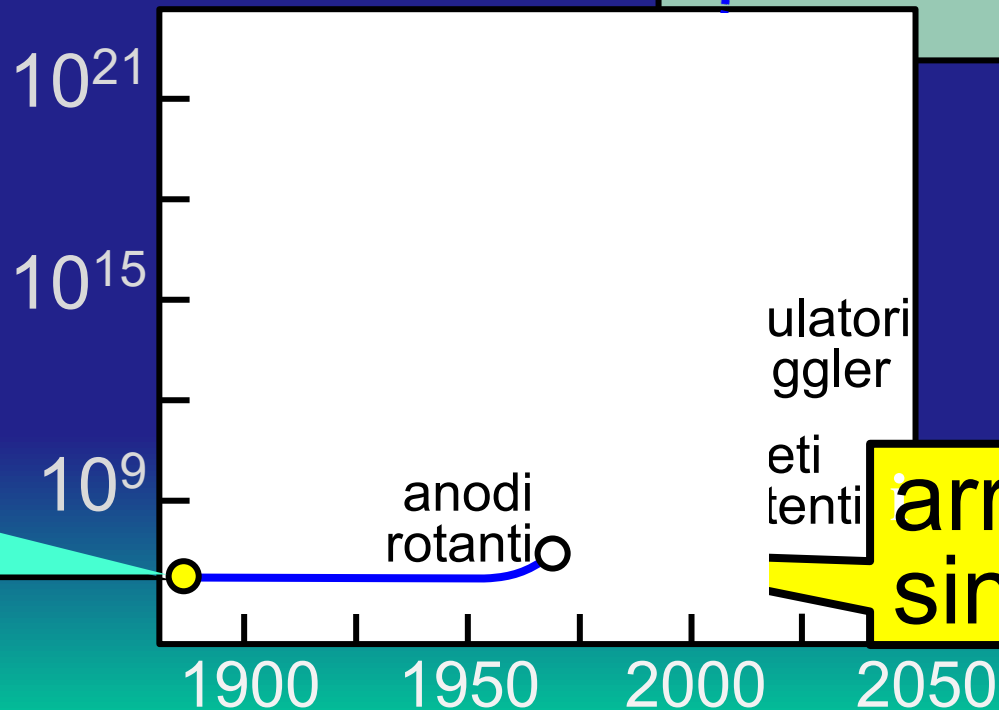
$$b = \text{costante} \frac{F}{\xi^2 \Omega}$$

Evoluzione storica dei raggi x: la luce di sincrotrone ha enormemente aumentato la brillantezza delle sorgenti (misurata in fotoni/mm²/s/mrad², su una banda del 0.1%)

un aumento di **26** ordini di grandezza dal **1970**, mentre le memorie dei calcolatori sono migliorate "solo" di **7** ordini di grandezza



Roentgen



(valori di picco)

10³³

10²⁷

X-FEL's

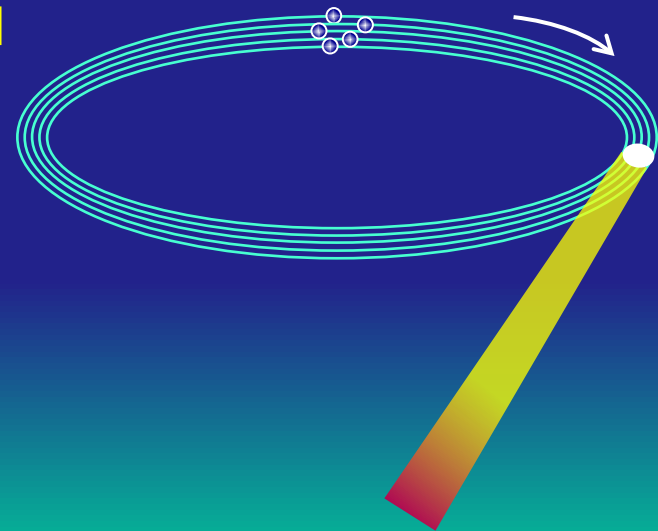
ulatori
ggler

eti
tenti

**arrivano i
sincrotroni!**

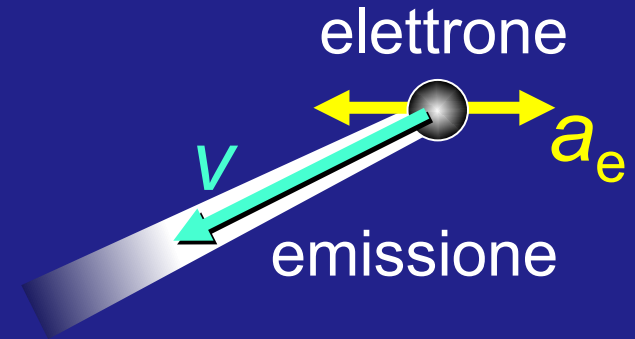
Da cosa è permessa l'estrema brillantezza della luce di sincrotrone? Da 4 fattori:

1. Vedremo fra poco che la relatività aumenta la **potenza emessa**
2. **E che la relatività limita la divergenza angolare**
3. Gli elettroni nel vuoto possono emettere più potenza di quelli in un solido perché la potenza non danneggia quest'ultimo \Rightarrow **alto flusso**
4. **Piccola area della sorgente: gli elettroni circolano su traiettorie differenti; l'area della sorgente è la sezione trasversale del loro insieme. Dei sistemi di controllo avanzati la limitano fortemente**



La relatività causa un'enorme potenza

Formula di Larmor: la potenza emessa è **proporzionale ad a_e^2** (a_e = accelerazione trasversale nel riferimento dell'elettrone)



Andando al riferimento del laboratorio:

- **Le coordinate trasversali sono invarianti**
- La dilatazione relativistica moltiplica il tempo per γ
- **L'accelerazione a , essendo proporzionale a $1/(\text{tempo})^2$, è a_e/γ^2 , quindi $a_e = \gamma^2 a$**
- La potenza emessa è proporzionale a $\gamma^4 = (\text{energia})^4/(m_0 c^2)^4$

L'emissione aumenta con la quarta potenza dell'energia dell'elettrone, ed è enorme

**e decresce come $1/m_0^4$:
gli elettroni emettono
molto più dei protoni**

Un altro effetto relativistico della luce di sincrotrone: l'altissima collimazione angolare

...ma nel laboratorio
l'emissione è
confinata in un cono
strettissimo

$v \approx c$

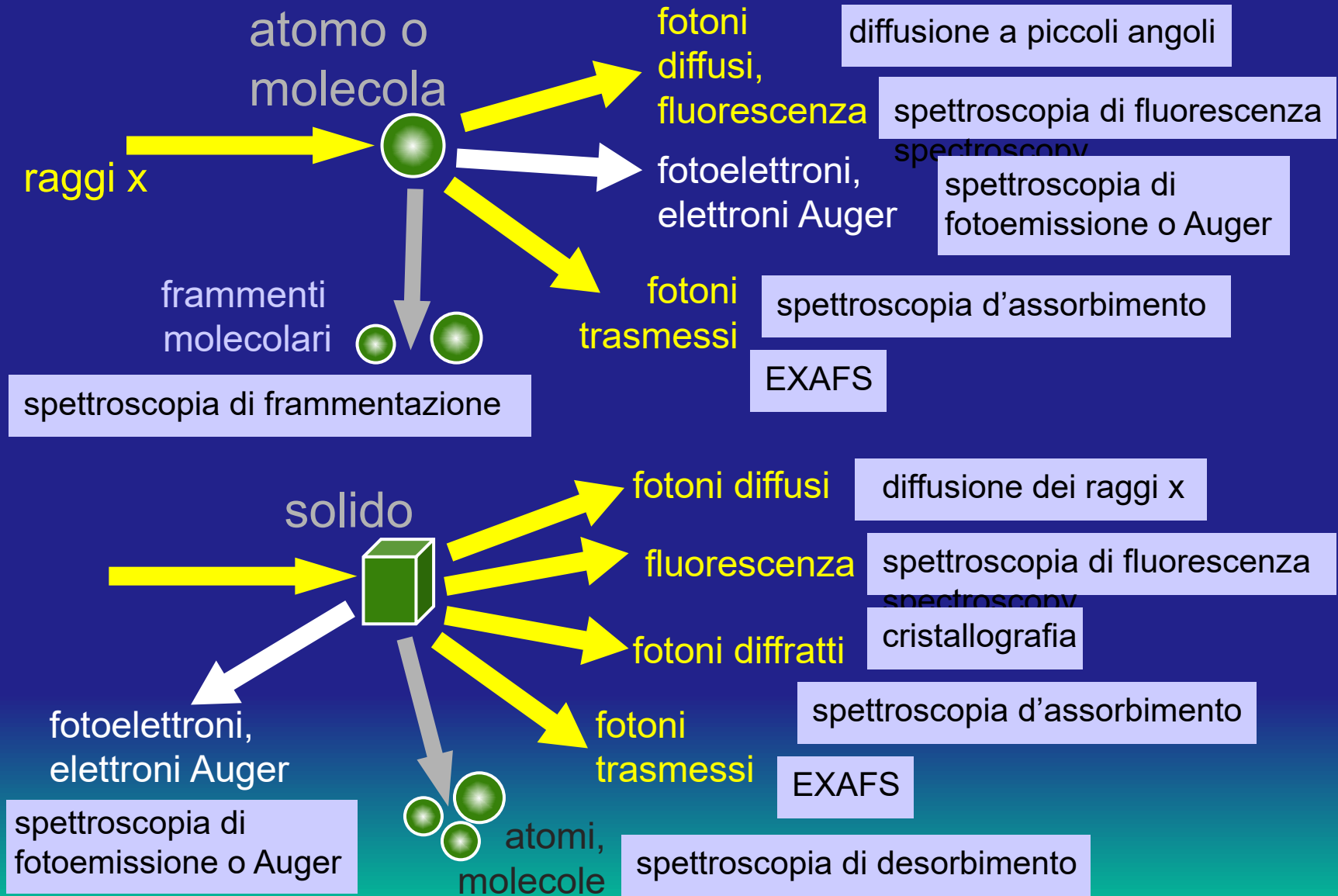
Nel
i raggi
ness
grande gamma ang
come l'emissione d
un'antenna radio

suono udito da un pedone

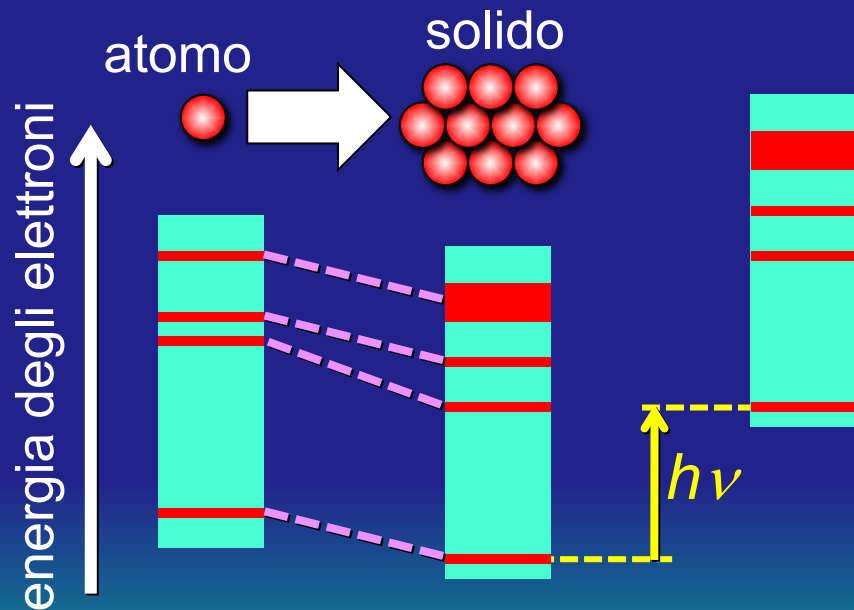
v

...un po' come la proiezione in avanti dei suoni emessi da
un'auto che celebra una vittoria degli azzurri – ma accentuata
dalla relatività: gli elettroni sono **come dei puntatori laser**

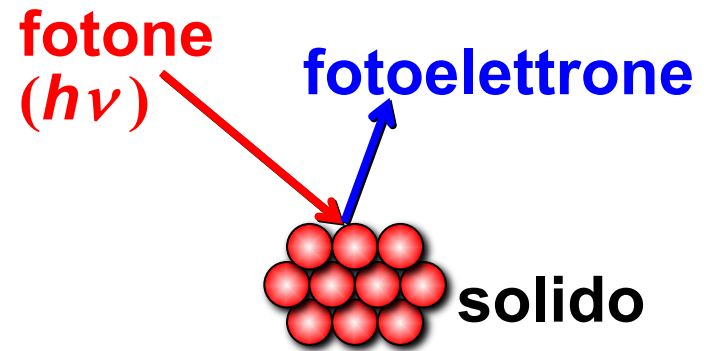
Uso della luce di sincrotrone: le molte interazioni dei raggi x con la materia permettono molte applicazioni



la fotoemissione, applicazione leader della luce di sincrotrone

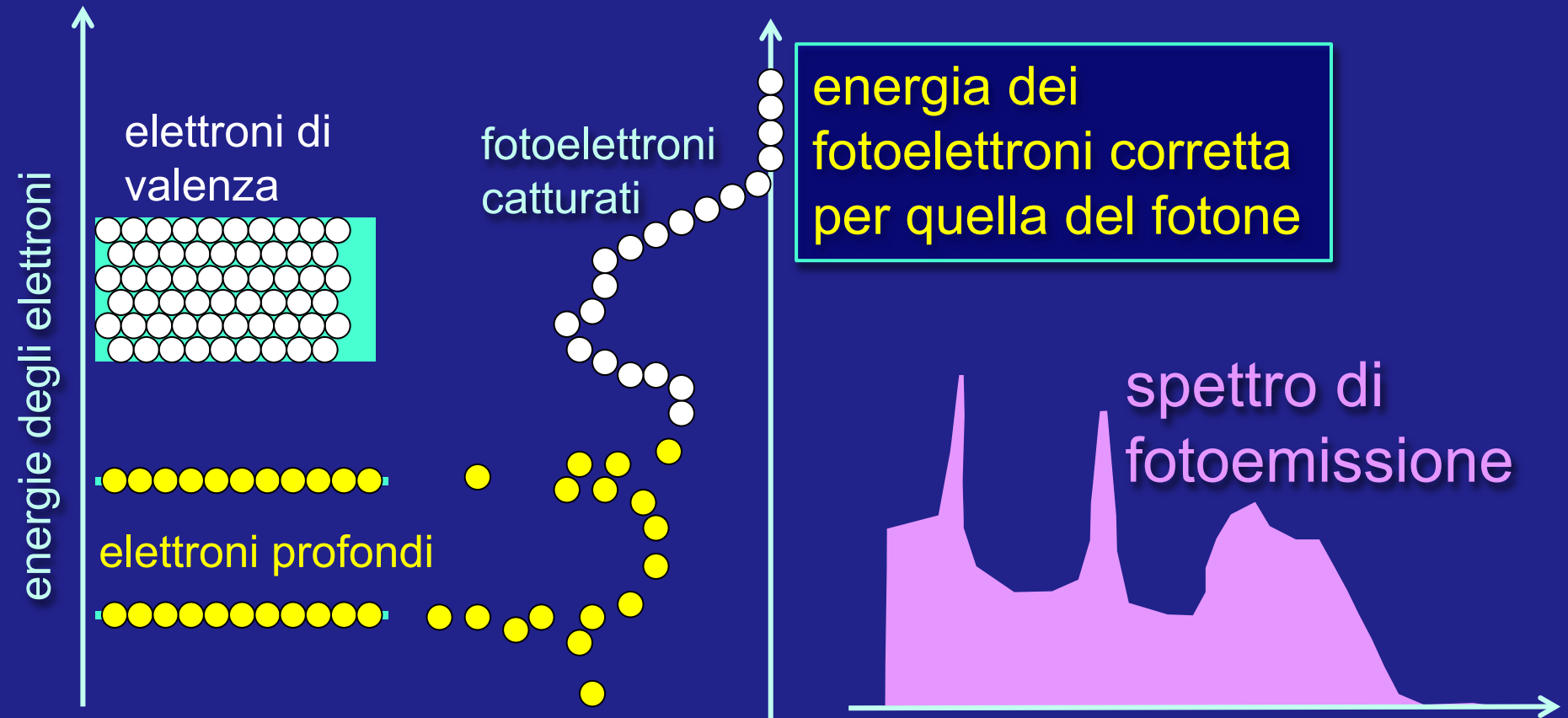


effetto fotoelettrico:



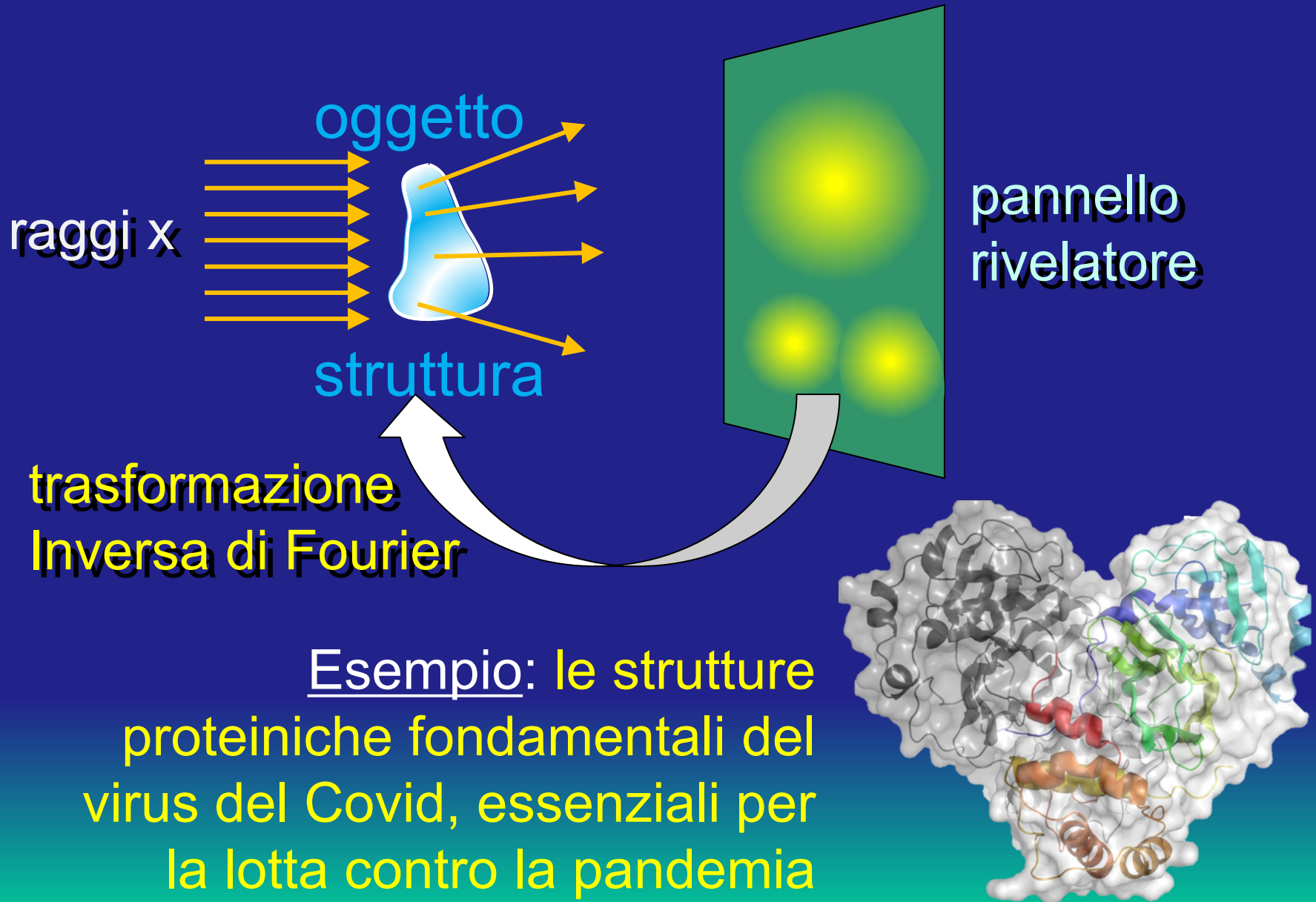
l'effetto fotoelettrico
aggiunge l'energia del
fotone, $h\nu$, a quella
dell'elettrone: si possono
così derivare le energie dei
fotoni nel solido da quelle
misurate dei fotoelettroni

la fotoemissione rivela gli elettroni di valenza e quelli profondi



...la fotoemissione con luce di sincrotrone ha mutato le mie libresche nozioni quantistiche in realtà concrete!

La diffusione elastica della luce di sincrotrone, strumento principe per identificare le strutture microscopiche:

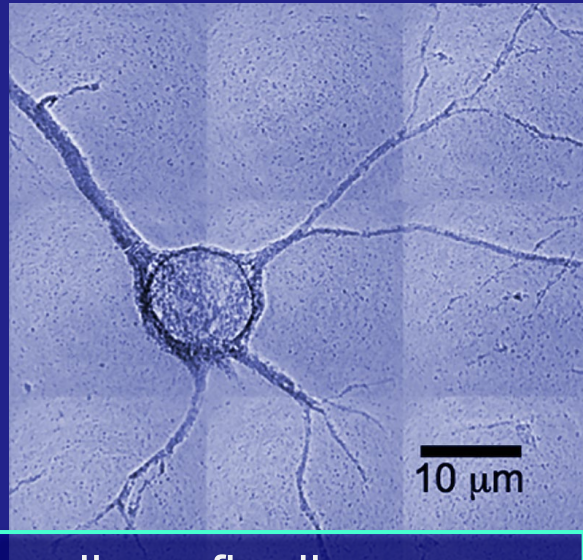


Una nuova radiologia, un secolo dopo Roentgen: arrivo del “contrasto di fase”

sistema microvascolare
all'insorgere del cancro

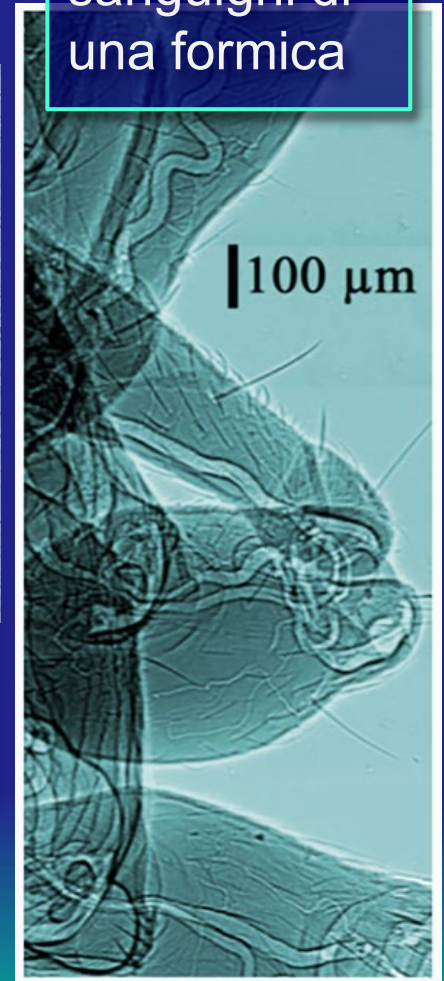


[H. R. Wu et al., J. Phys. **D 45**,
242001 (2012)]



radiografia di un
neurone: record
mondiale di risoluzione

Microvasi
sanguigni di
una formica



eccellente contrasto, rivelazione di dettagli
molto piccoli: com'è possibile?

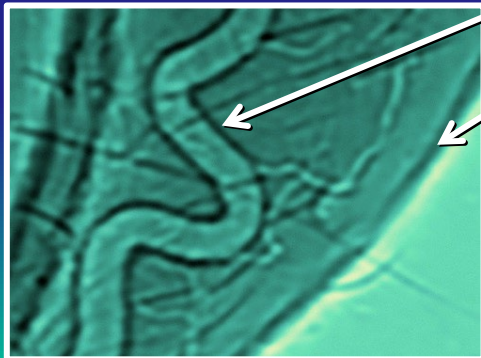
Per comprendere, usiamo un'analogia: come “vediamo” un bicchiere di vino rosso?

il vino è visibile perché assorbe alcuni colori e appare rosso

ma noi vediamo anche i bordi del bicchiere (che è trasparente), perché essi deviano la luce con la rifrazione e/o la diffusione



Analogamente, il “contrasto di fase” (rifrazione, diffusione ecc. dei raggi x) causa dei bordi marcati e ben visibili nelle radiografie con luce di sincrotrone



...ma questo richiede dei raggi x con una direzione molto ben definita. Il che è vero per la luce di sincrotrone a causa della cosiddetta “coerenza”: vediamo cos'è

L'altissima "coerenza" della luce di sincrotrone



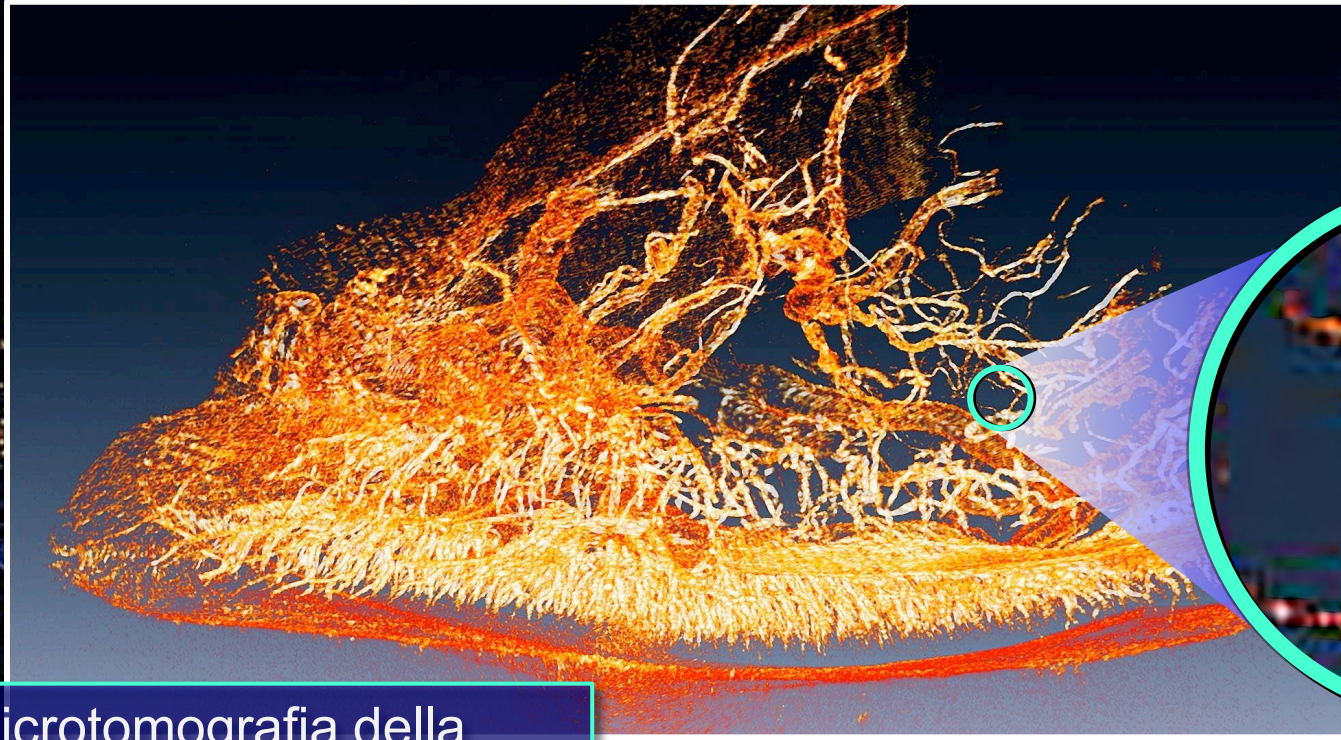
Abbiamo visto che la luce di sincrotrone ha una piccolissima divergenza angolare e proviene da una minuscola sorgente

Questo vuol anche dire che ha una fortissima "coerenza" (spaziale) – dove la "coerenza" è la capacità di produrre fenomeni visibili di carattere ondulatorio, come l'interferenza o la diffrazione

Per misurare la coerenza si usa il "fattore di coerenza" $\lambda^2/(\xi^2\Omega)$

...che aumenta al diminuire di ξ e Ω – gli stessi parametri geometrici che determinano la brillantezza: un'alta brillantezza implica anche una forte coerenza

Tomografia a contrasto di fase con luce di sincrotrone: la magia delle lucciole



Microtomografia della
“lanterna” di una lucciola
[Y. L. Tsai, Y. Hwu et al.]

...potendo rivelare tutti i microtubi,
compresi i più piccoli, abbiamo chiarito il
meccanismo efficacissimo dell'emissione

La tomografia con luce di sincrotrone può leggere i manoscritti antichi, anche sigillati

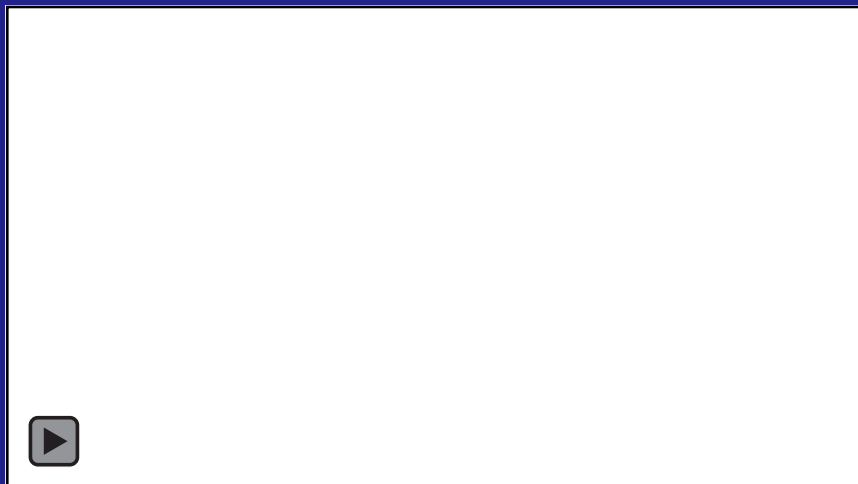
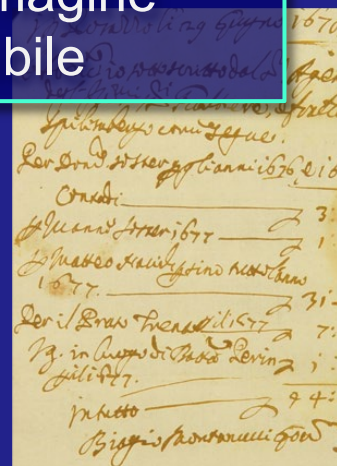
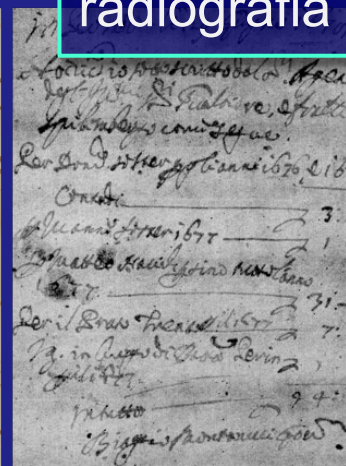


immagine
visibile



radiografia



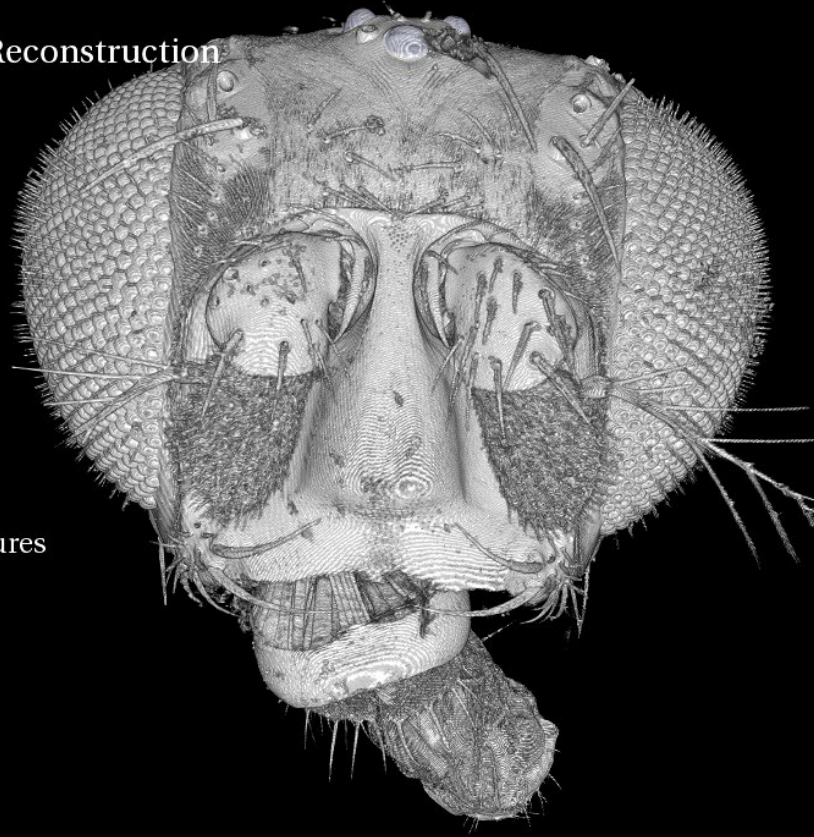
per esempio, Catarina
Savonarola di Venezia ci ha
parlato dopo 7 secoli



...tutto questo, grazie al talento
eccezionale un'altra italiana:
Fauzia Albertin

L'avventura storica della mappatura del cervello, partendo dalla Drosophila:

X-ray Tomographic Reconstruction



Fly Head General Structures

Ocelli

...e affrontando ora l'obiettivo più
affascinante: il cervello umano!

Uno storico progetto internazionale:



“Synchrotrons for Neuroscience – an Asia-Pacific Strategic Enterprise”

(SARI/SSRF-China, PAL-Korea, AS-Taiwan, RIKEN/Spring8-Japan, NUS/SSLS-Singapore, ANSTO-Australia)

Principali obiettivi dei prossimi 4 anni:

- Mappatura di un intero cervello umano con la microtomografia a luce di sincrotrone
- Mappatura di 100 cervelli di topi
- Sviluppo di nuove tecniche per accelerare i processi di almeno 2 ordini di grandezza

Le sorgenti di luce di sincrotrone hanno
alto flusso, alta brillantezza, polarizzazione,
collimazione, coerenza

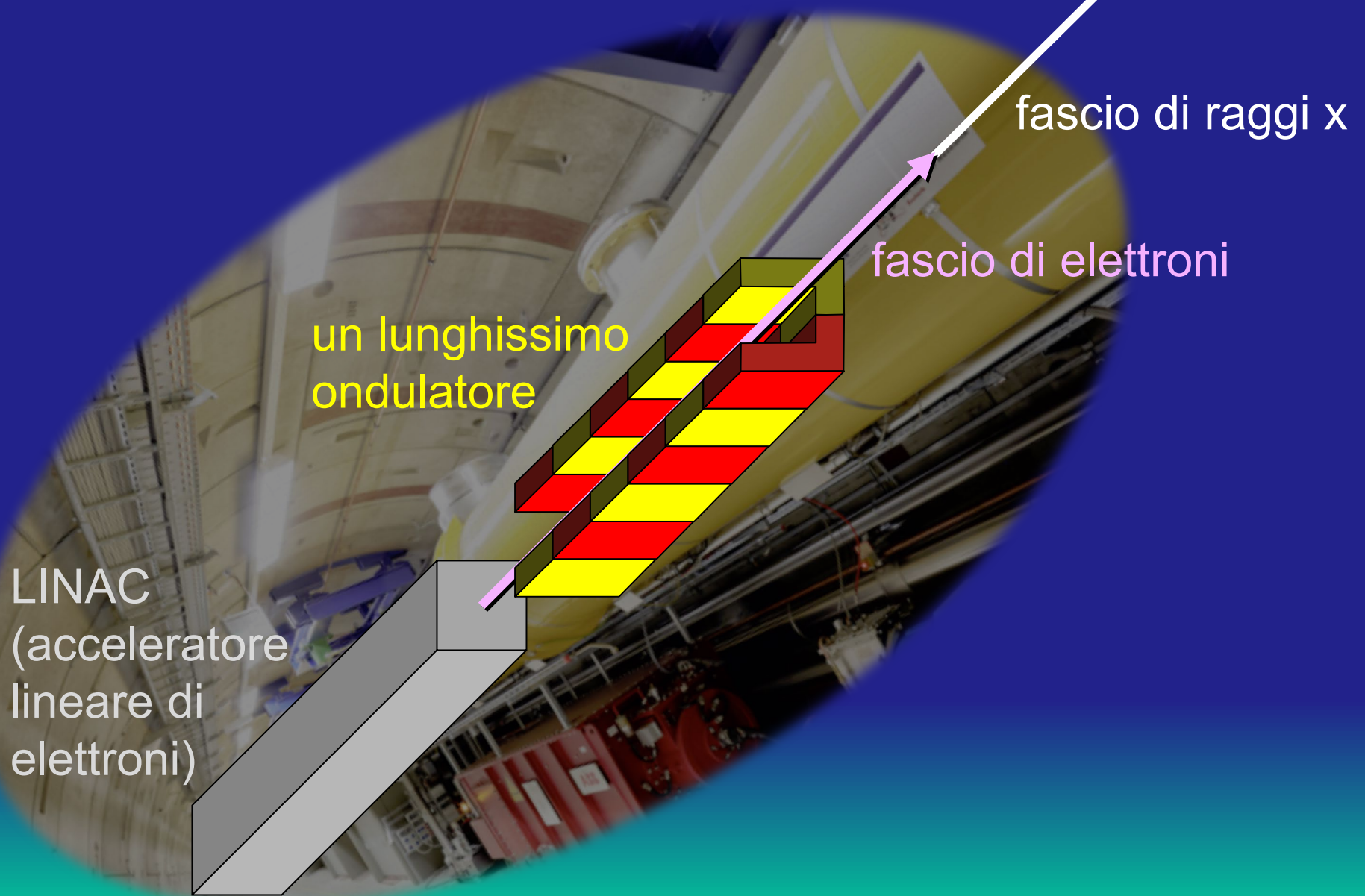
Una domanda legittima: sono dei laser?

**...no: il meccanismo
non è l'emissione
stimolata – ma ora
abbiamo i laser a
elettroni liberi per i
raggi x (x-FEL's)**



Laser a elettroni liberi
FERMI, Trieste

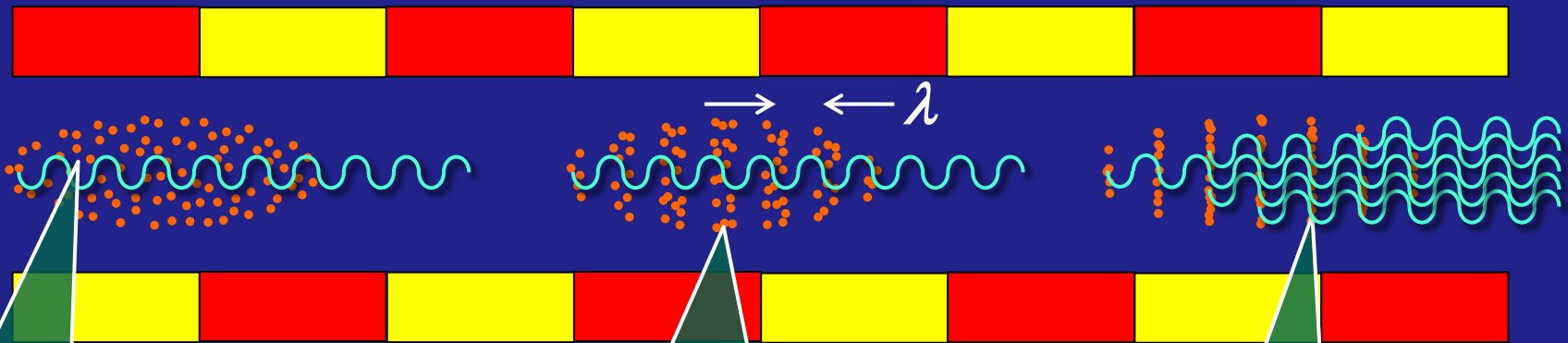
Laser a elettroni liberi per raggi x: schema generale





Lo schema d'amplificazione ottica dei FEL: il "salame italiano affettato"

Ondulatore



Un pacchetto d'elettroni entra nell'ondulatore: uno di essi emette un'onda

Interagendo con il pacchetto, l'onda crea una microstruttura (a fette) con periodo uguale alla lunghezza d'onda

Gi elettroni nella microstruttura emettono onde coordinate

Usi dei laser a elettroni liberi per raggi x: cosa accade sulla scala dei femtosecondi, durata tipica dei loro impulsi?

Reazioni chimiche veloci

In 100 femtosecondi le onde di shock nei solidi viaggiano su distanze di scala atomica

Una molecola d'acqua si dissocia in 10 femtosecondi

I fotoni viaggiano per centinaia di nanometri

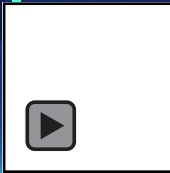
Il periodo tipico delle vibrazioni molecolari: 10-100 femtosecondi

Chirurgia laser senza danneggiamento collaterale

Nuove tecniche di microfabbricazione, ecc.

Al termine del nostro cammino,
desidero ringraziare:

- Maya Kiskinova e Yeukuang Hwu per la messa a disposizione dati non pubblicati
- Primoz Rebernik per il suo contributo alla teoria dei laser a elettroni liberi
- Gli organizzatori di questo evento per il loro cortese invito



**...e le nuove generazioni per la loro
attenzione: il loro futuro è più
brillante che mai!**