

Marta Ruspa

Professore Associato di Fisica Applicata

Dipartimento di Scienze della Salute
Università del Piemonte Orientale



Masterclass

- Iniziativa internazionale promossa dal **Internazional Particle Physics Outreach Group (IPPOG)**, coordinata in Italia dall'**Istituto Nazionale di Fisica Nucleare**
- Collaudata in **particle physics**, agli esordi in **particle therapy**

Particle Therapy Masterclass

Volta a far conoscere (e sperimentare) agli studenti delle scuole superiori le applicazioni in medicina, e in particolare in **radioterapia**, della fisica fondamentale

La data novarese è frutto della collaborazione tra la **sezione di Torino dell'INFN** e la **Scuola di Medicina dell'Università del Piemonte Orientale**, con il contributo **dell'Associazione Italiana Fisica in Medicina (AIFM) Piemonte e Valle d'Aosta**

Masterclass gemella a Torino!

Grazie ai colleghi con cui ho condiviso organizzazione e preparazione

- Simona Giordanengo
- Roberto Sacchi
- Cosimo Galeone
- Elena Gallio .

L'INFN è l'ente pubblico nazionale di ricerca, vigilato dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR), dedicato allo studio dei costituenti fondamentali della materia e delle leggi che li governano

5 LINEE di RICERCA

CSN1 | fisica delle particelle

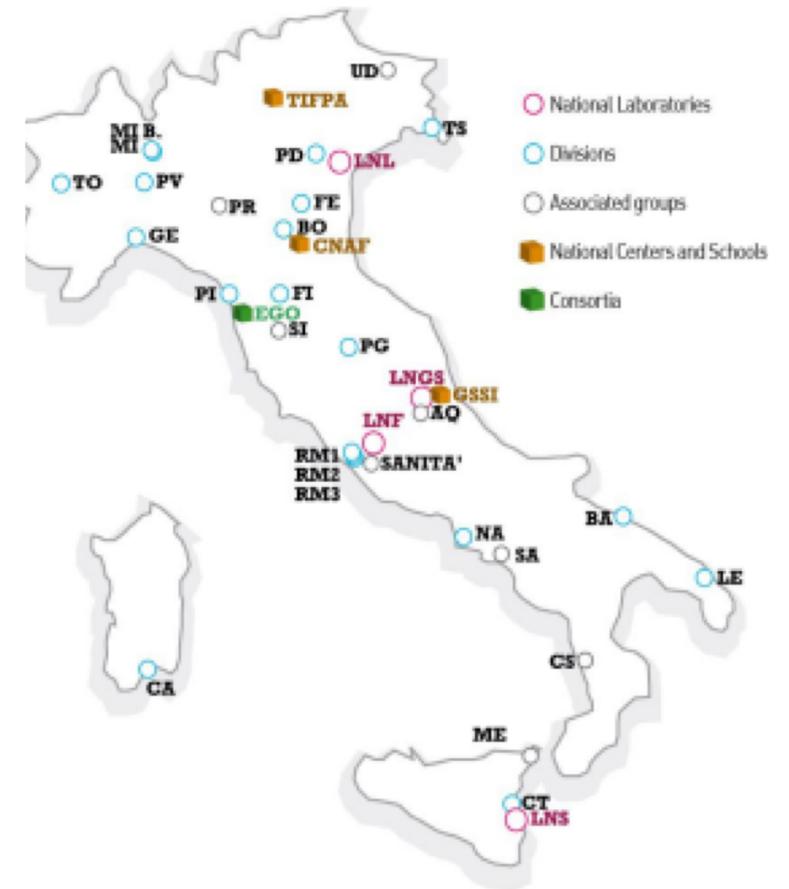
CSN2 | fisica astroparticellare

CSN3 | fisica nucleare

CSN4 | fisica teorica

CSN5 | ricerca tecnologica

FISICA MEDICA



From particle physics To particle therapy

From particle physics To particle therapy



Keywords

Particle Therapy

Radioterapia **RADIO** PET

TERAPIA TC LINAC

PARTICELLE

DOSE

RADIAZIONI

RM

NUCLEARE

RBE

FISICA in RADIOTERAPIA

FISICA in MEDICINA

Storia e principi fisici

Scoperta della radioattività

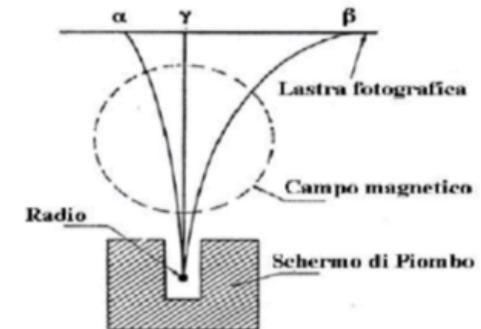
1896: Henri Becquerel



Lastra fotografica sviluppata da Becquerel dopo averla tenuta per giorni in un cassetto. Si possono vedere le sagome dei sali di uranio e, nella parte inferiore, la forma della croce di metallo.

1898: Marie Sklodowska Curie e Pierre Curie

- altre sostanze con proprietà simili all'uranio
- le chiamarono radio (radium=raggio) attive
- 3 tipi di radiazione: alfa, beta e gamma



1934: Frederic Joliot, Irene Curie, Enrico Fermi → Radioattività artificiale

Scoperta della radiazione X



Anna Bertha Roentgen



Wilhelm Conrad Röntgen

1895

Scopre i raggi X

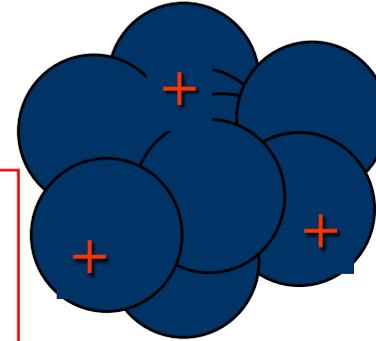
1901

Premio Nobel per
la fisica

Dove origina la radioattività?

Raggio del nucleo $\sim 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$

Protoni (p) e neutroni (n) (NUCLEONI)
costituiscono il **NUCLEO** dell'atomo,
attorno al nucleo sono disposti su
differenti orbite gli **elettroni (e)**



X **Z: NUMERO ATOMICO**
numero dei protoni e degli elettroni

A: NUMERO DI MASSA
numero dei protoni + neutroni

L'alfabeto dell'universo

| Group → | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | |
|----------|----------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|----------|
| Period ↓ | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| | 1 H | | | | | | | | | | | | | 5 B | 6 C | 7 N | 8 O | 9 F | 10 Ne |
| | 3 Li | 4 Be | | | | | | | | | | | | 13 Al | 14 Si | 15 P | 16 S | 17 Cl | 18 Ar |
| | 11 Na | 12 Mg | | | | | | | | | | | | 31 Ga | 32 Ge | 33 As | 34 Se | 35 Br | 36 Kr |
| | 19 K | 20 Ca | 21 Sc | 22 Ti | 23 V | 24 Cr | 25 Mn | 26 Fe | 27 Co | 28 Ni | 29 Cu | 30 Zn | 31 Ga | 32 Ge | 33 As | 34 Se | 35 Br | 36 Kr | |
| | 37 Rb | 38 Sr | 39 Y | 40 Zr | 41 Nb | 42 Mo | 43 Tc | 44 Ru | 45 Rh | 46 Pd | 47 Ag | 48 Cd | 49 In | 50 Sn | 51 Sb | 52 Te | 53 I | 54 Xe | |
| | 55 Cs | 56 Ba | 57 La * | 72 Hf | 73 Ta | 74 W | 75 Re | 76 Os | 77 Ir | 78 Pt | 79 Au | 80 Hg | 81 Tl | 82 Pb | 83 Bi | 84 Po | 85 At | 86 Rn | |
| | 87 Fr | 88 Ra | 89 Ac * | 104 Rf | 105 Db | 106 Sg | 107 Bh | 108 Hs | 109 Mt | 110 Ds | 111 Rg | 112 Cn | 113 Nh | 114 Fl | 115 Mc | 116 Lv | 117 Ts | 118 Og | |
| | | | | * 58 Ce | * 59 Pr | * 60 Nd | * 61 Pm | * 62 Sm | * 63 Eu | * 64 Gd | * 65 Tb | * 66 Dy | * 67 Ho | * 68 Er | * 69 Tm | * 70 Yb | * 71 Lu | | |
| | | | | * 90 Th | * 91 Pa | * 92 U | * 93 Np | * 94 Pu | * 95 Am | * 96 Cm | * 97 Bk | * 98 Cf | * 99 Es | * 100 Fm | * 101 Md | * 102 No | * 103 Lr | | |

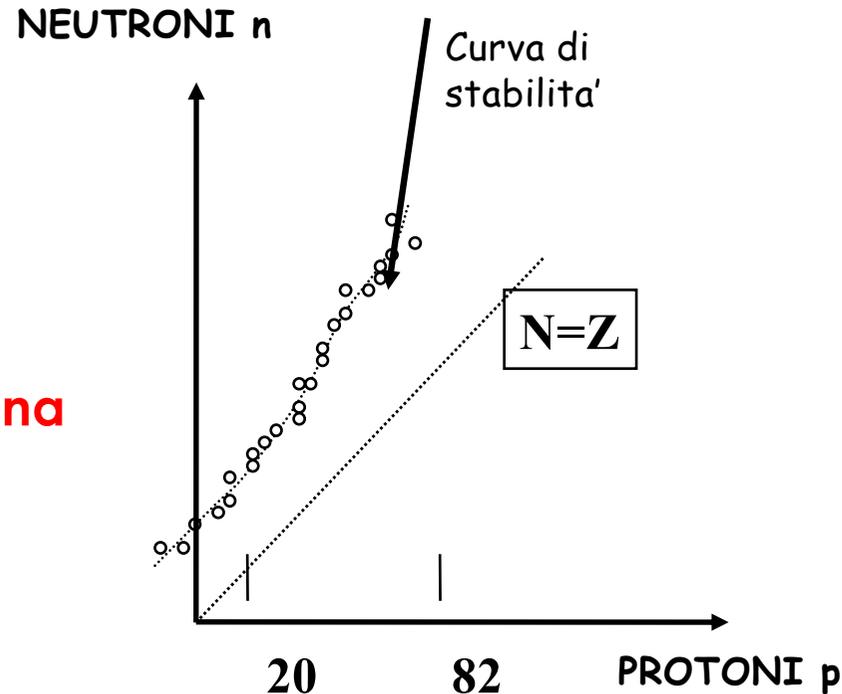
250 nuclei stabili, 1000 nuclei instabili , 1500 nuclei instabili artificiali

Come stanno insieme i pezzi dell'atomo ?

- Forze di **attrazione gravitazionale**
- Forza **elettrica**, attrattiva tra protoni ed elettroni, repulsiva tra i protoni nel nucleo
- E' necessario ipotizzare l'esistenza di una forza attrattiva che agisce solo nel nucleo (a breve raggio d'azione dunque) e molto intensa. Questa forza è chiamata **forza nucleare forte** e si manifesta nel legame tra i costituenti del nucleo (protoni e neutroni)

Nuclei stabili e instabili

- al crescere di Z per mantenere la stabilità il nucleo si arricchisce di **neutroni**, privi di carica elettrica e anch'essi soggetti alla forza forte
- per $Z > 82$ **la repulsione coulombiana tende comunque a prevalere sulla forza nucleare forte**
 → non esistono nuclei stabili
- i nuclei instabili che si formano "decadono" in altri nuclei

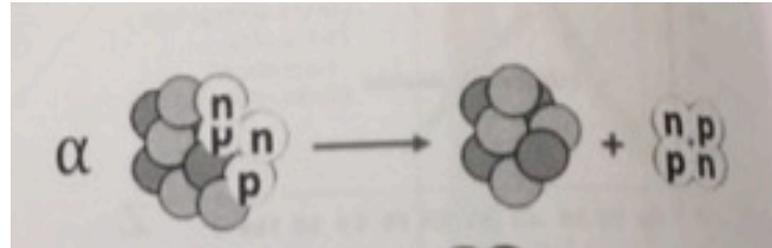


3 POSSIBILITA' di DECADIMENTO

La quarta forza, detta **nucleare debole**, governa i decadimenti

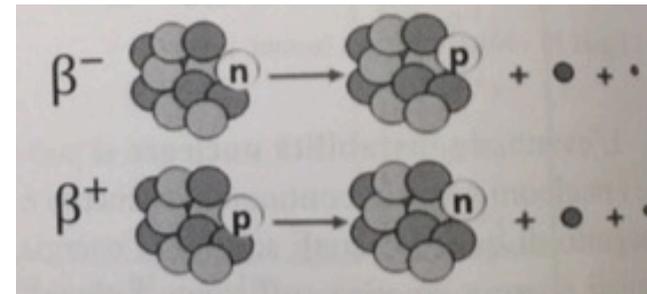
Decadimenti radioattivi

- **ALFA:** emissione di nuclei di He



I raggi ALFA attraversano solo **un foglio di carta**

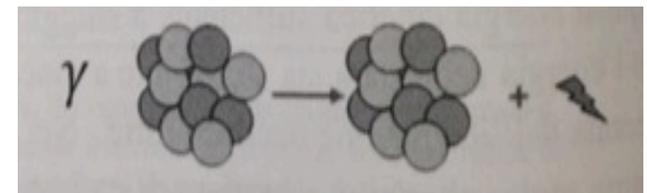
- **BETA:** un neutrone si trasforma in protone o viceversa con emissione di un elettrone e un neutrino



I raggi BETA attraversano **qualche mm di alluminio**

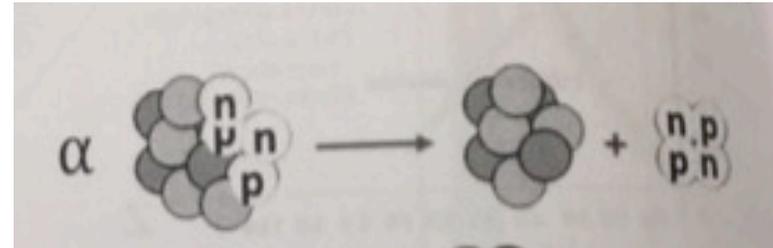
- **GAMMA:** un nucleo si diseccita emettendo un fotone

I raggi GAMMA attraversano **vari cm di piombo**



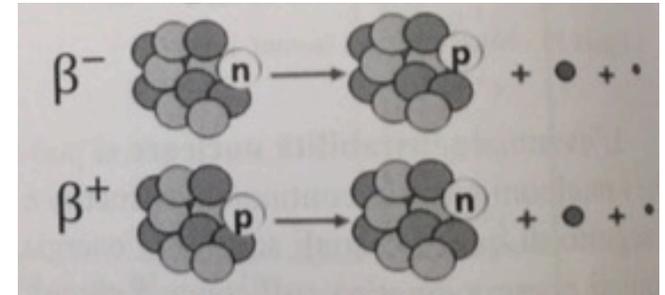
Decadimenti radioattivi

- **ALFA:** emissione di nuclei di He



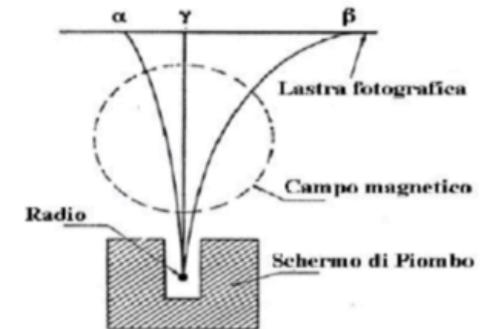
I raggi ALFA attraversano solo **un foglio di carta**

- **BETA:** un neutrone si trasforma in protone o viceversa con emissione di un elettrone e un neutrino

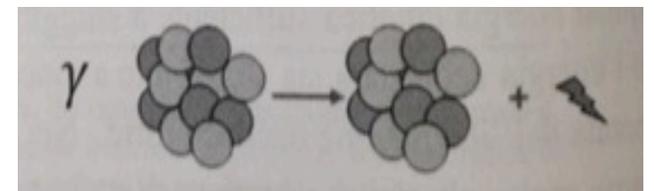


I raggi BETA attraversano **qualche mm di alluminio**

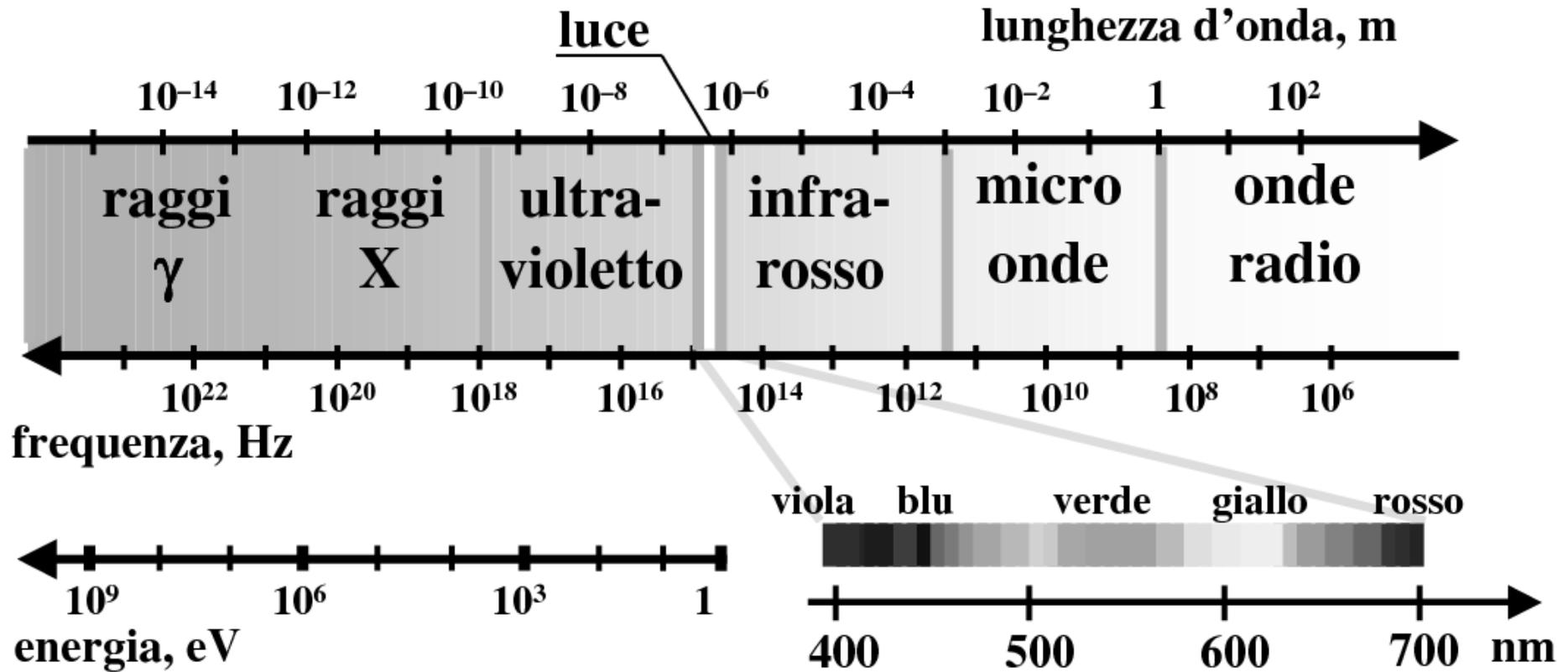
- **GAMMA:** un nucleo si diseccita emettendo un fotone



I raggi GAMMA attraversano **vari cm di piombo**

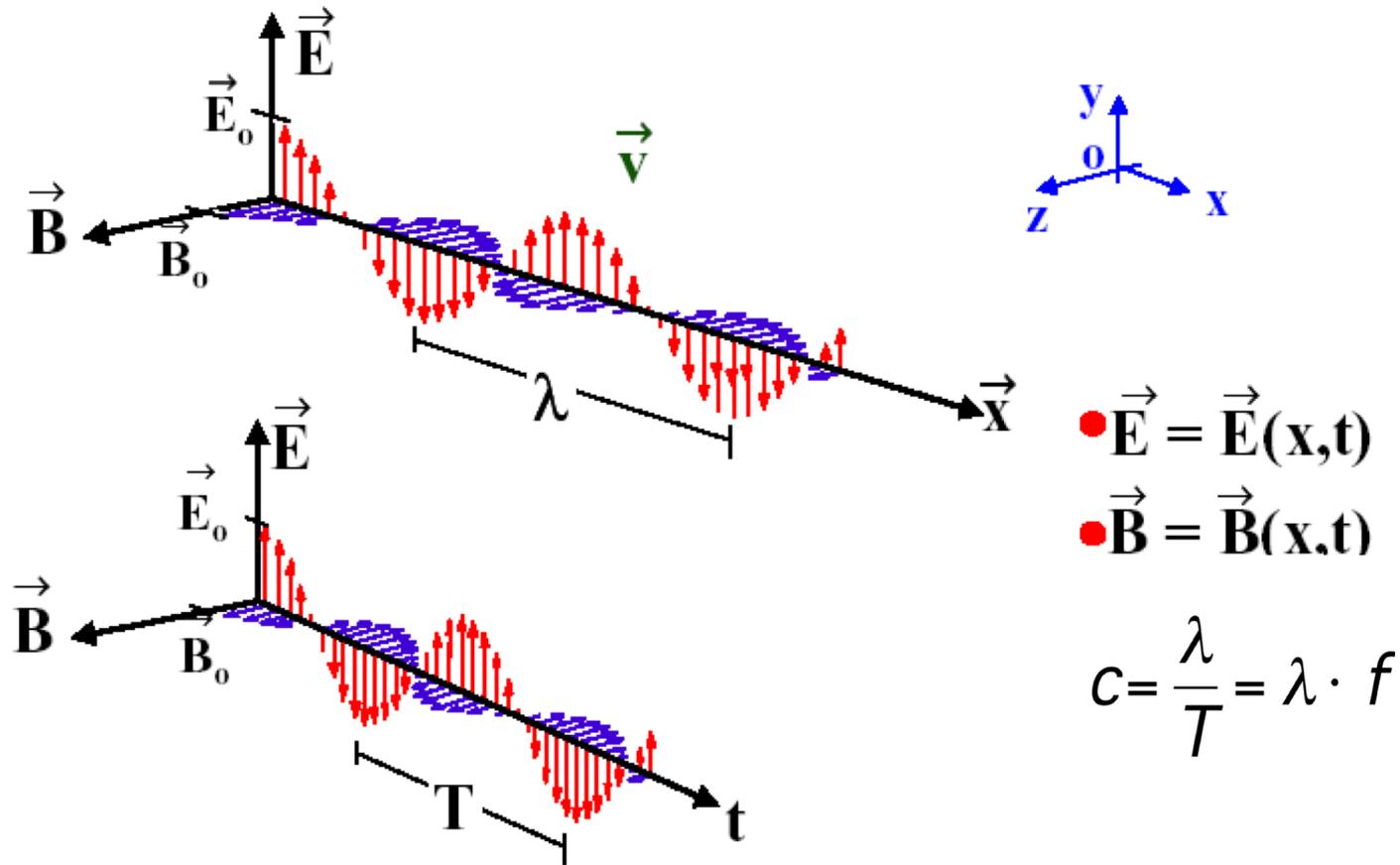


Che cosa sono i raggi X?



$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

Onde elettromagnetiche



Intensità: energia che un'onda trasporta attraverso una superficie A in un intervallo di tempo t: $I = E / (A \cdot t)$ (W/m²)

Che cosa si intende per radiazioni?



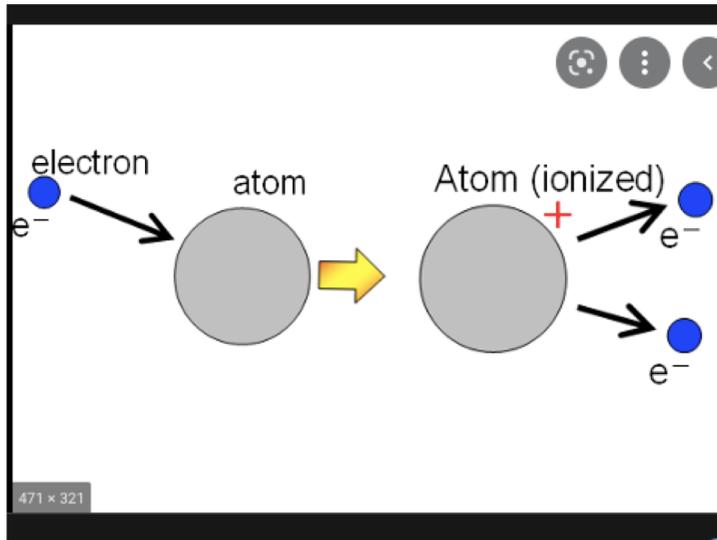
«Dualismo onda corpuscolo»

**Che cosa succede quando la
radiazione attraversa la materia
(vivente)?**

INTERAZIONE RADIAZIONE-MATERIA

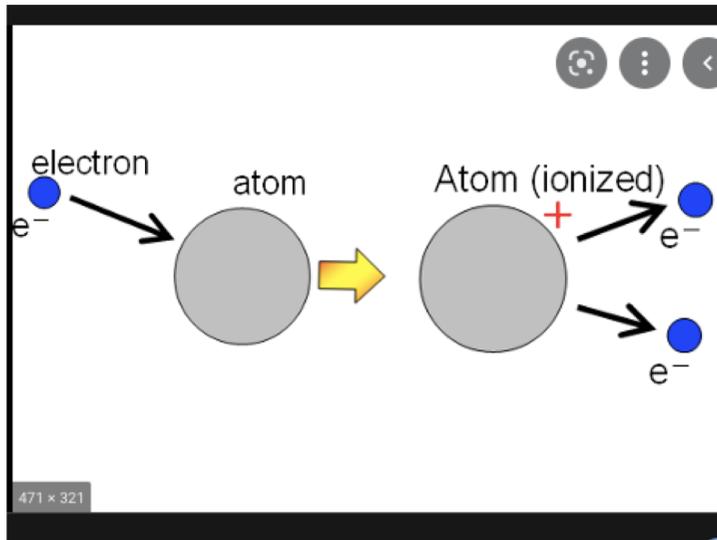
Le radiazioni depositano energia. Qualora l'energia depositata superi il potenziale di ionizzazione del materiale attraversato si definiscono **ionizzanti**

Le radiazioni depositano energia. Qualora l'energia depositata superi il potenziale di ionizzazione del materiale attraversato si definiscono **ionizzanti**



Dose assorbita

Le radiazioni depositano energia. Qualora l'energia depositata superi il potenziale di ionizzazione del materiale attraversato si definiscono **ionizzanti**

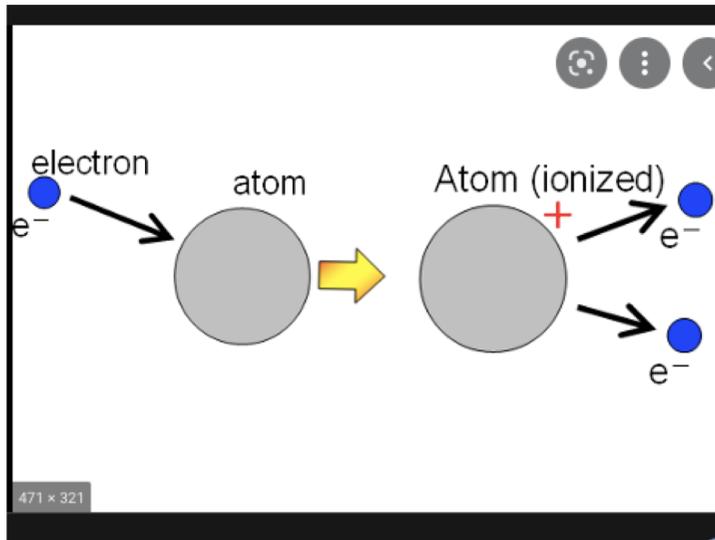


La grandezza fisica che quantifica l'energia rilasciata si chiama:

Dose assorbita = energia/massa
 unità di misura Gy (gray) = J/kg

Dose assorbita

Le radiazioni depositano energia. Qualora l'energia depositata superi il potenziale di ionizzazione del materiale attraversato si definiscono **ionizzanti**



Attenzione: nei materiali biologici **le radiazioni ionizzanti danneggiano le cellule (anche DNA)**

La grandezza fisica che quantifica l'energia rilasciata si chiama

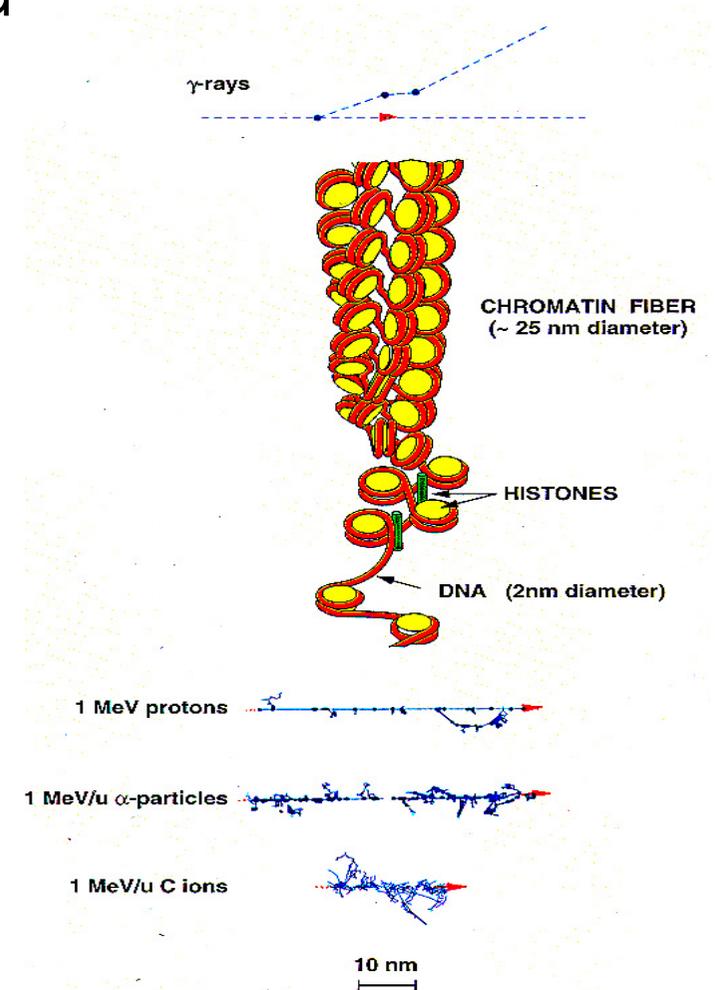
Dose assorbita = energia/massa
 unità di misura Gy (gray) = J/kg

Non è l'energia assorbita che provoca l'effetto radiobiologico bensì il modo in cui viene assorbita

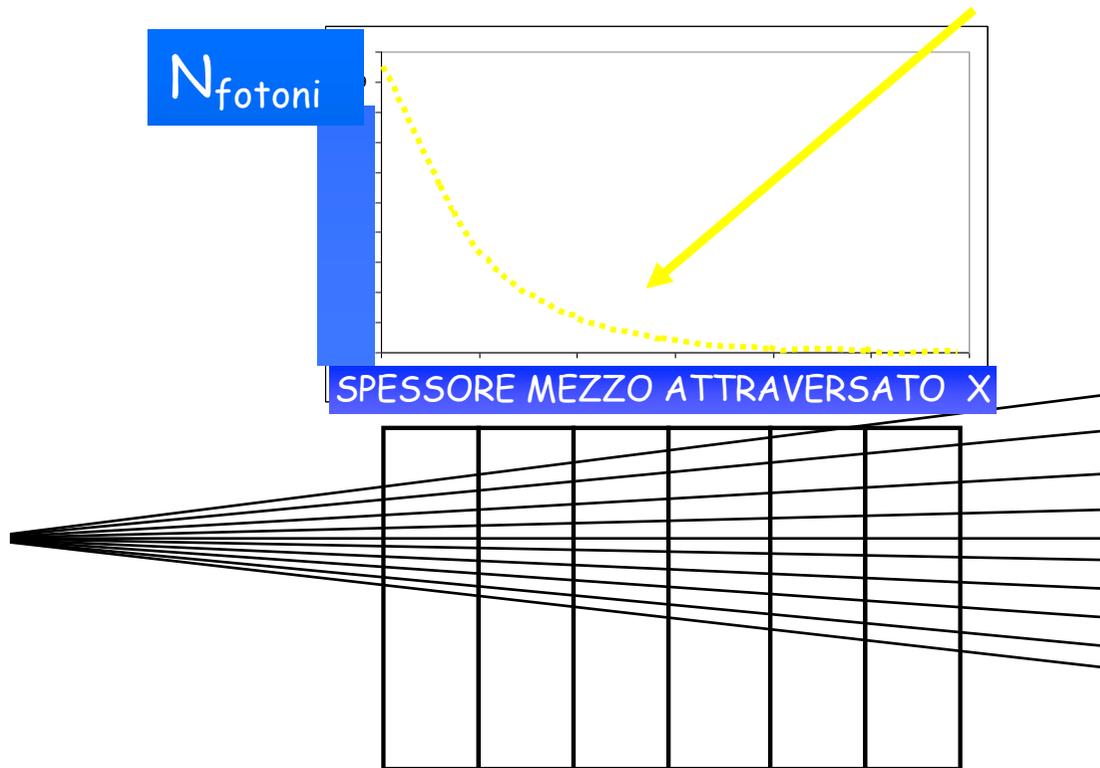
- **Radiazioni diverse generano effetti diversi**
- **Diversi organi sono sensibili alle radiazioni in modo diverso**

Si definiscono la dose equivalente e la dose efficace, misurate in Sievert

Si stima l'efficacia biologica relativa (RBE)



Interazione dei fotoni con la materia



LEGGE dell'attenuazione

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

N_0 = n° fotoni iniziale

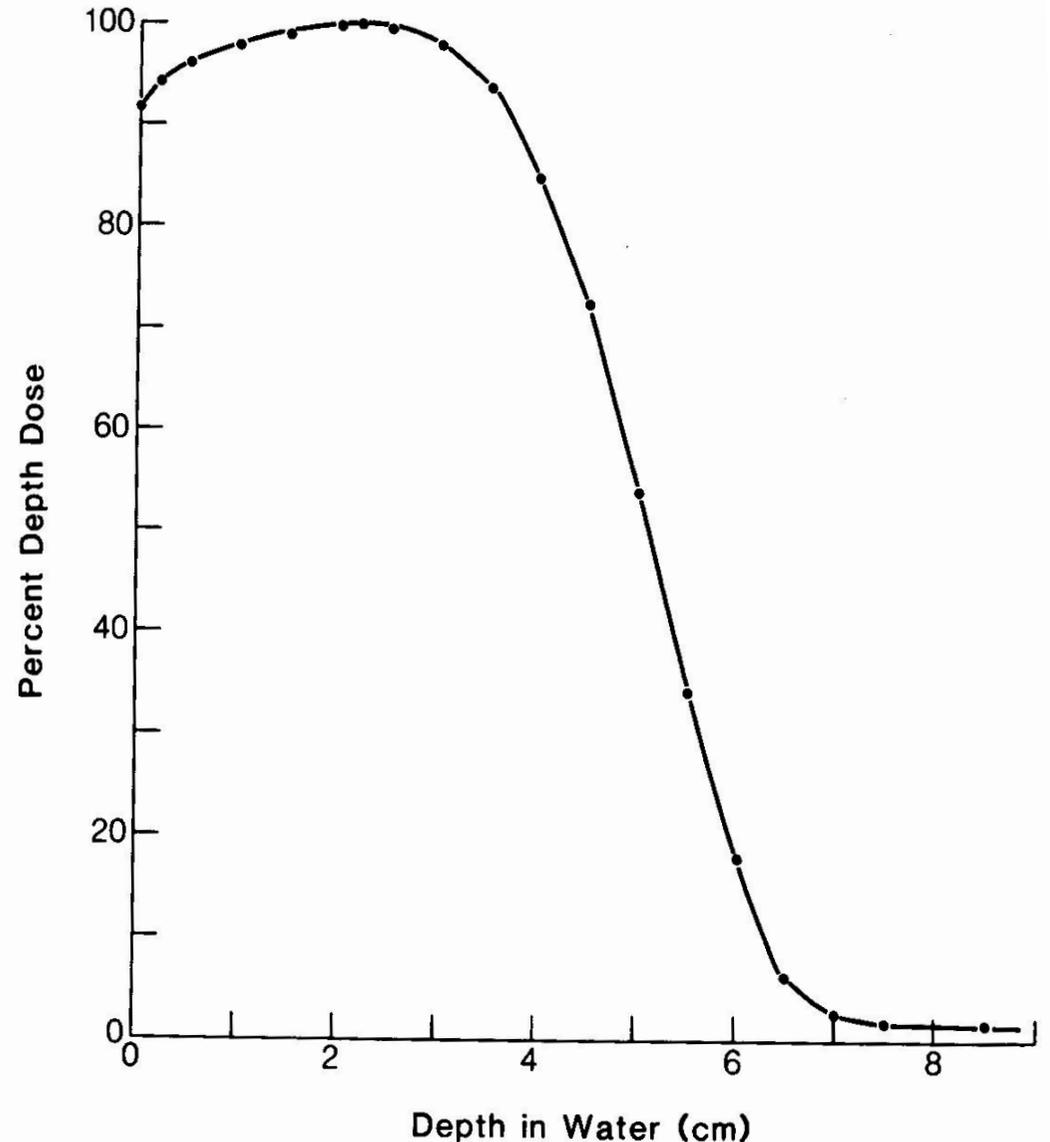
N = n° fotoni dopo spessore x

μ : coefficiente di attenuazione

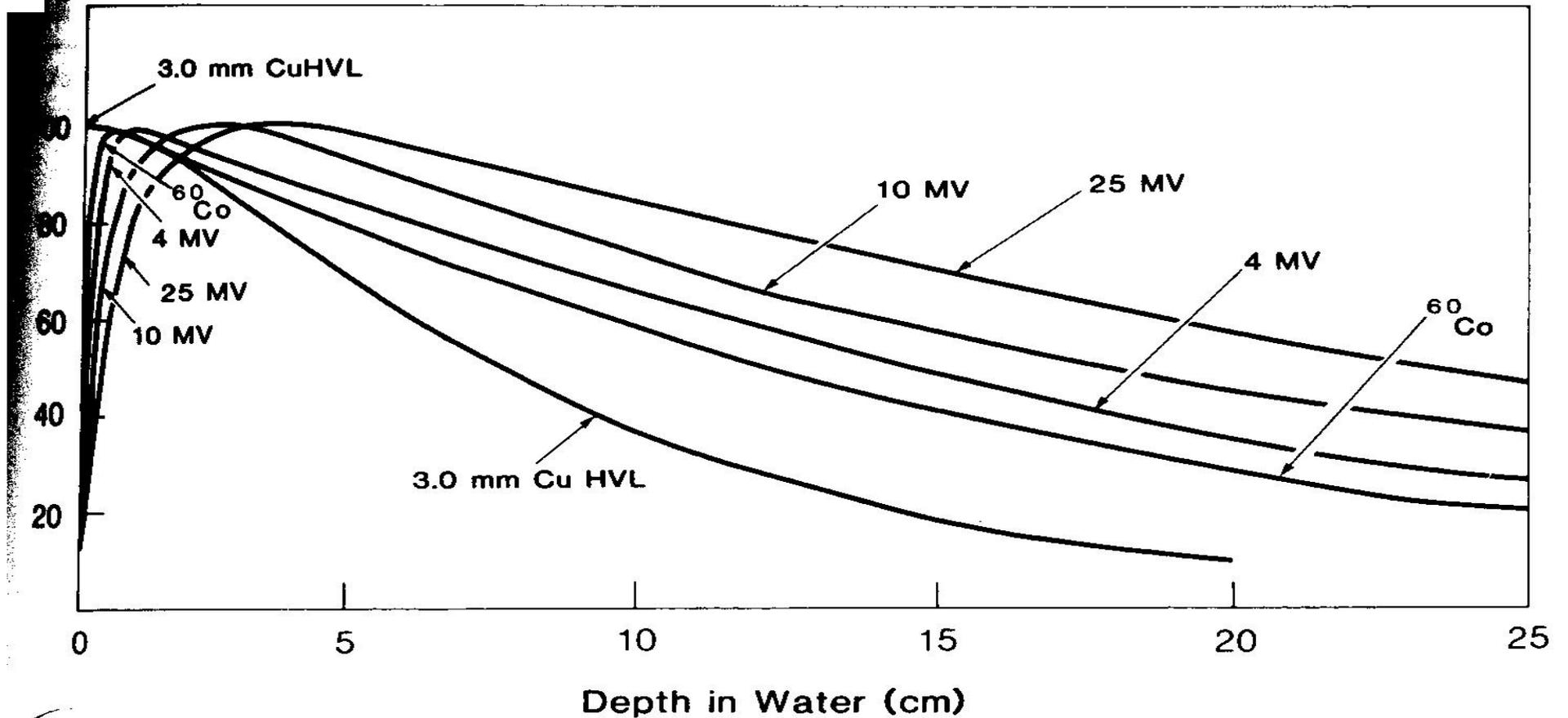
Si producono elettroni liberi

Interazione degli elettroni con la materia

Perdono la loro energia cinetica principalmente per **ionizzazione** della materia che incontrano con una successione continua di urti che li rallentano



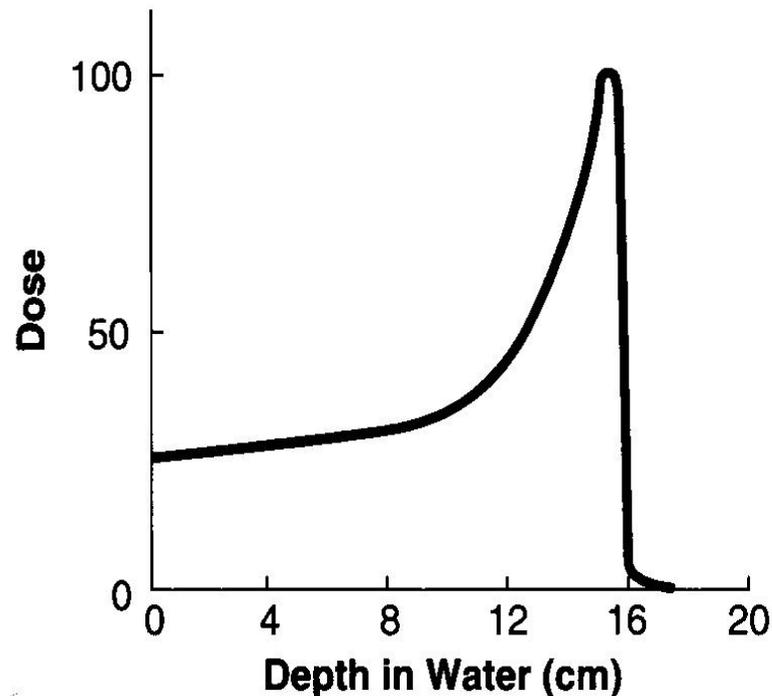
Interazione dei fotoni con la materia

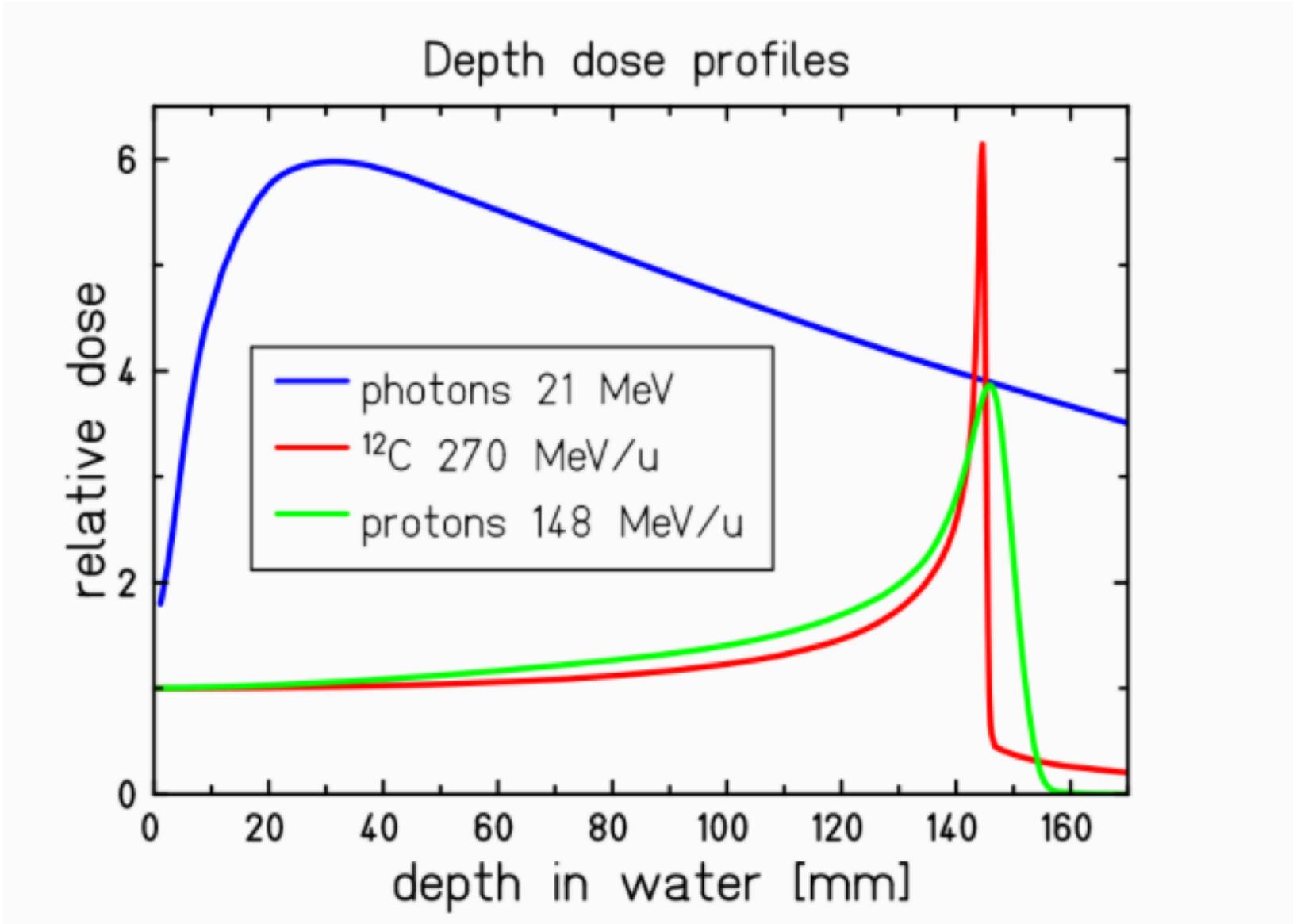


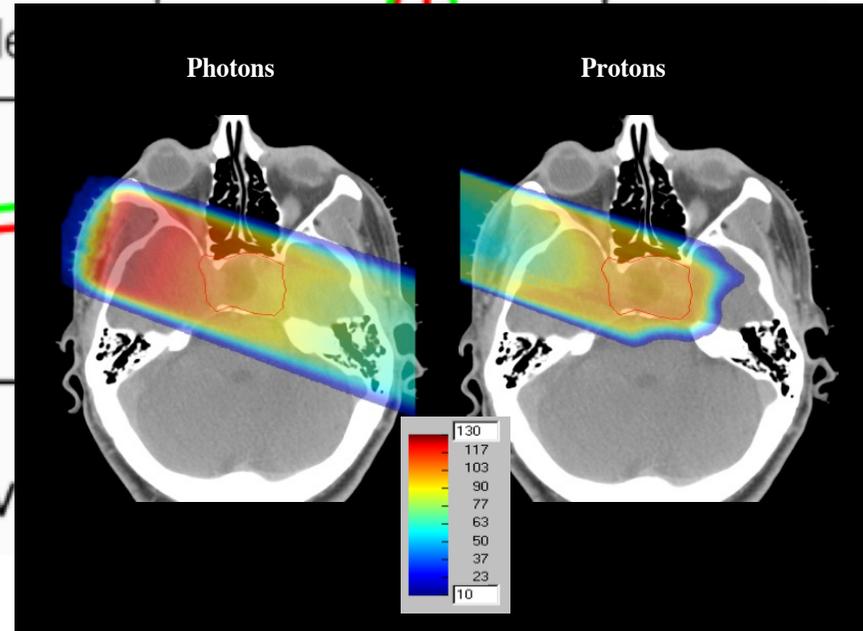
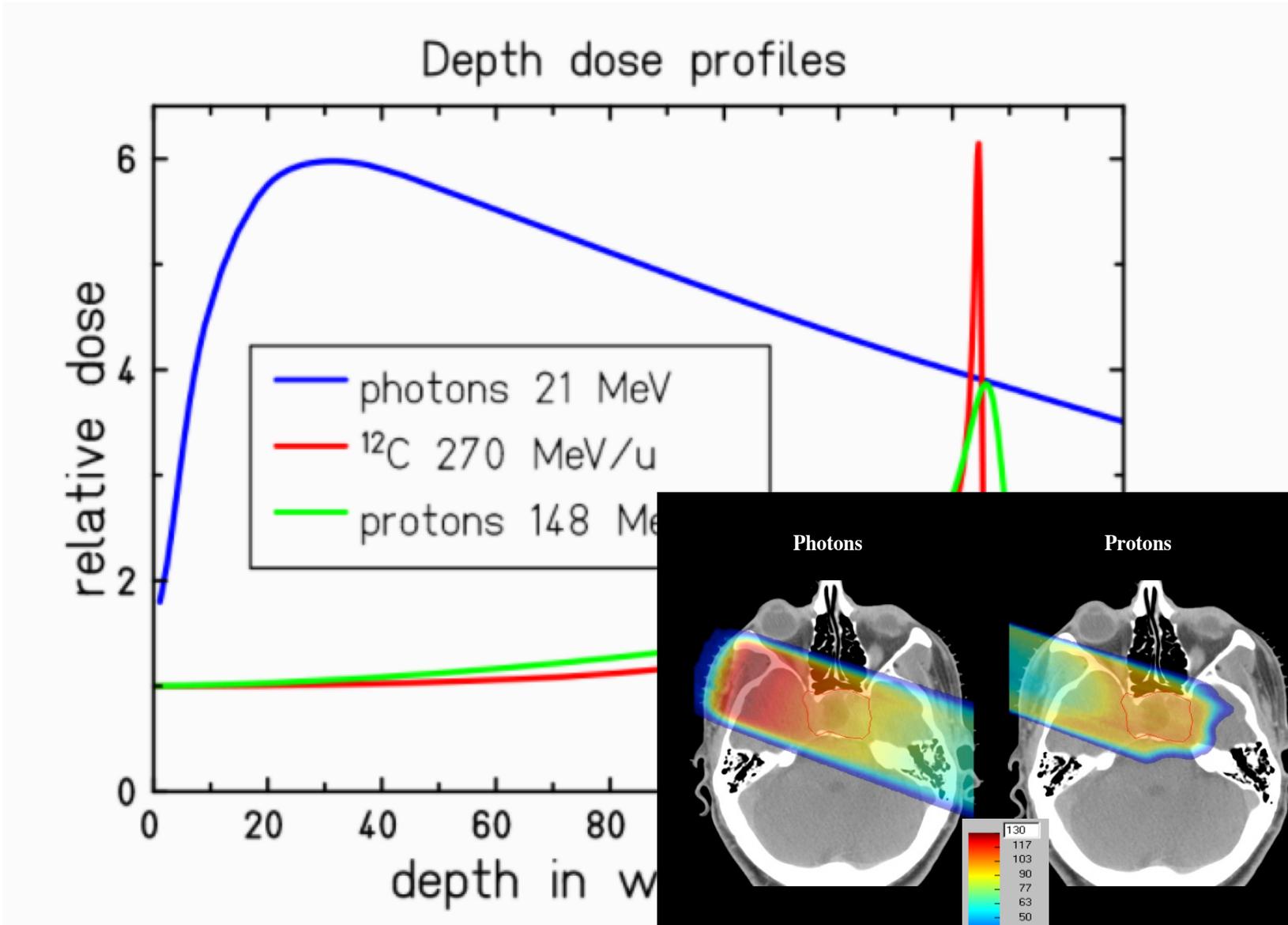
Interazione delle particelle cariche pesanti con la materia

Perdono la loro energia cinetica principalmente per **ionizzazione** della materia che incontrano con una successione continua di urti che li rallentano

Il massimo rilascio di energia si ha alla fine del percorso
 (**picco di Bragg**)







Radiodiagnostica

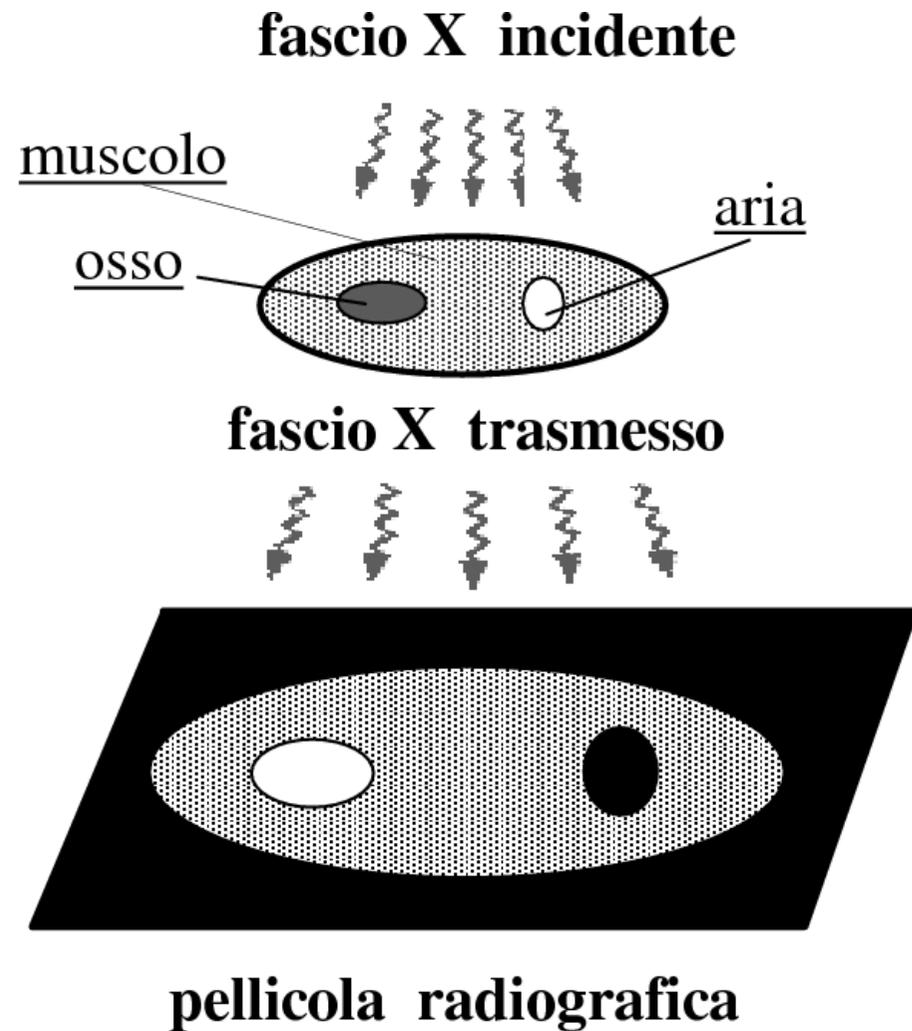
Tutte le apparecchiature di radiodiagnostica prevedono

- una sorgente di radiazione (esterna o interna)
- un target
- un rivelatore di radiazione
- un sistema di acquisizione dati e analisi dell'immagine

Radiografia

Diversa intensità della radiazione trasmessa a seconda di che cosa si interpone tra la sorgente e la pellicola

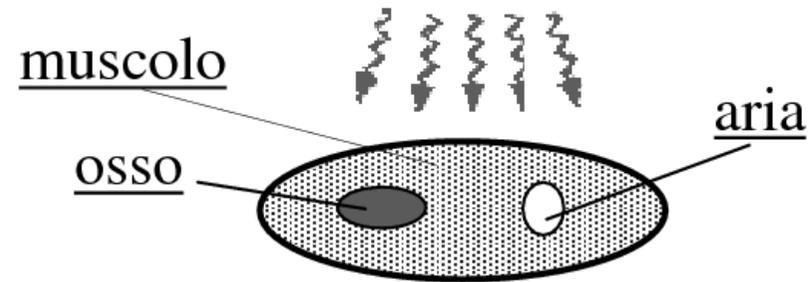
Attenuazione dipende dalle densità attraversate



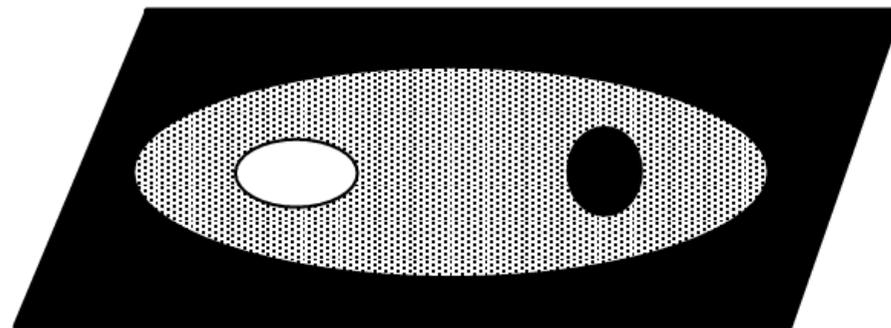
Radiografia



fascio X incidente



fascio X trasmesso

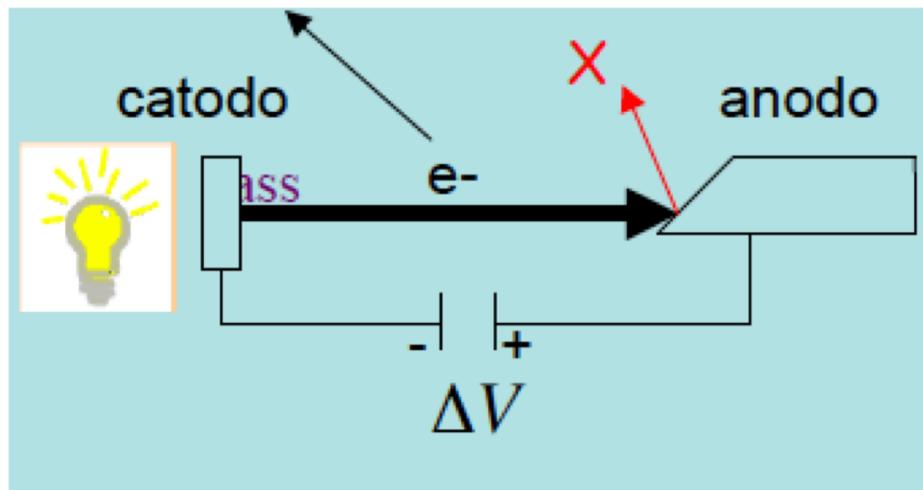


pellicola radiografica

Come si producono i raggi X ?

Come si producono i raggi X ?

Il primo **tubo radiogeno** fu realizzato da **Roentgen**: costituito da un'ampolla a vuoto contenente un catodo connesso al polo negativo di un generatore di tensione. Riscaldato, il catodo emetteva elettroni che fluivano accelerati dal campo elettrico verso l'anodo

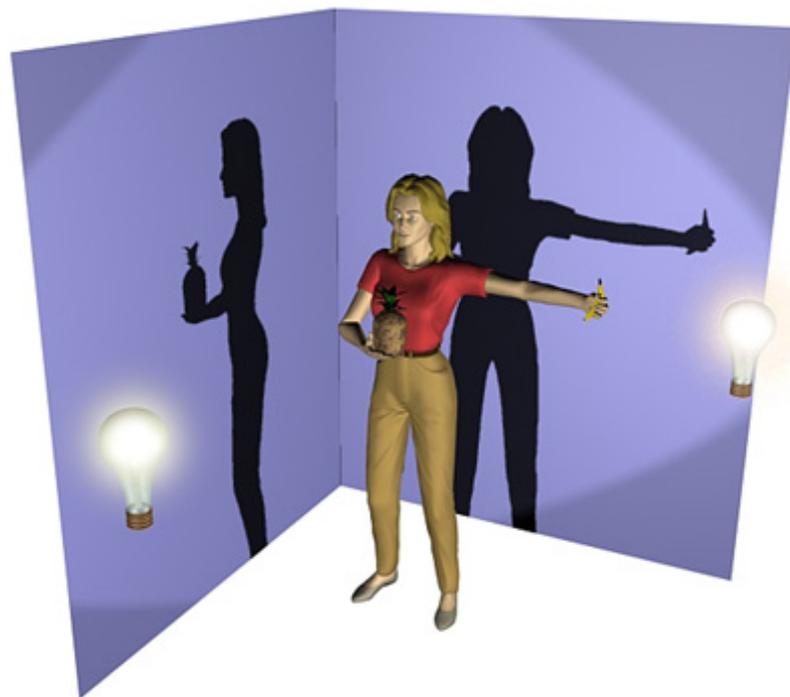


$$\Delta E = -e\Delta V$$

Energia massima raggiungibile dipende dalla tensione applicata. Per alti valori di ΔV si possono avere scariche

$\Delta E \rightarrow$ pochi MeV per unità di carica

E SE LA PROIEZIONE NON BASTASSE?

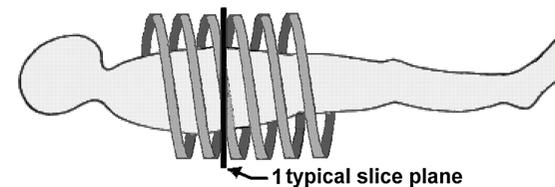


Tomografia assiale computerizzata

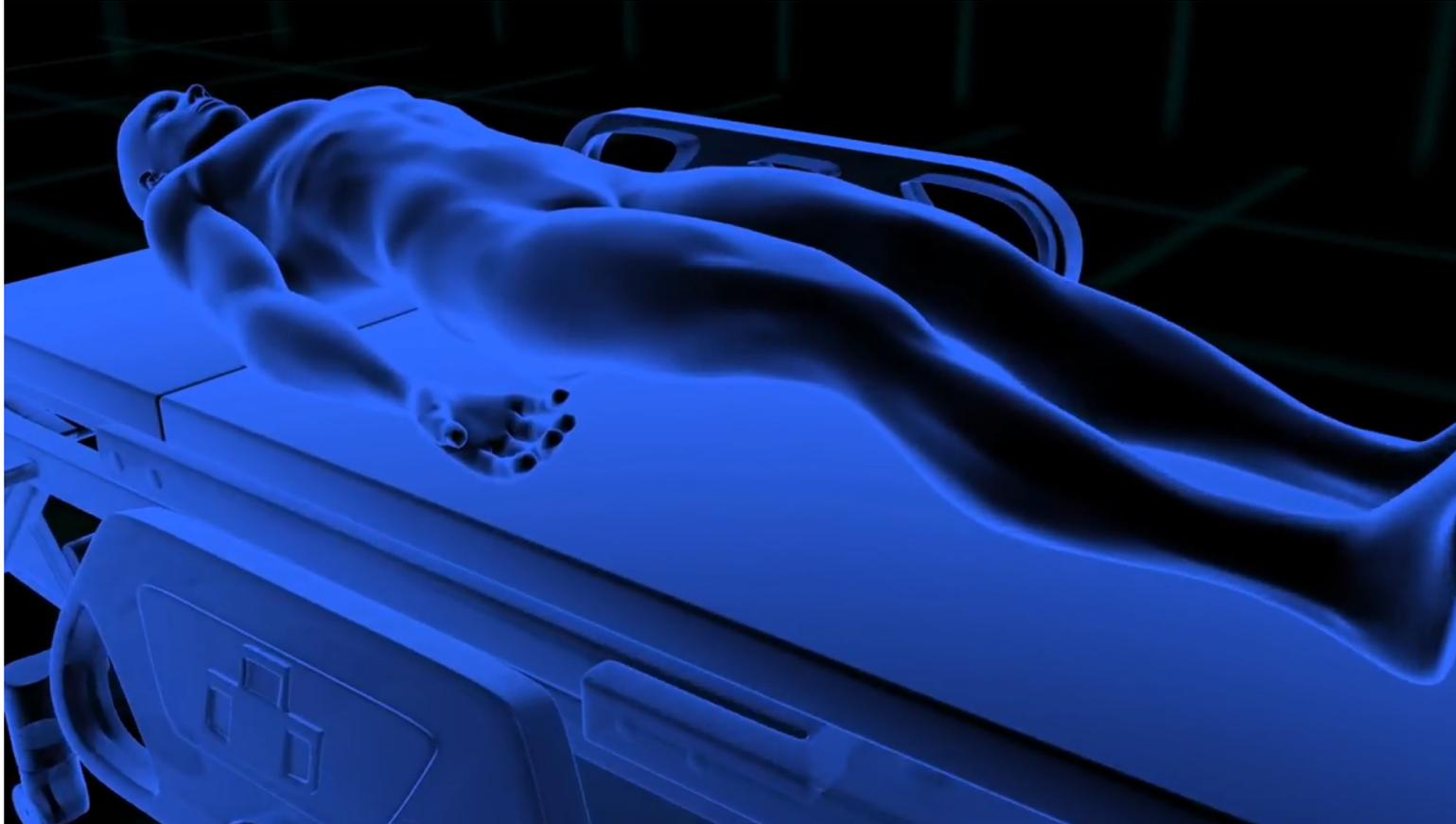
- La sorgente **ruota intorno al paziente** solidalmente ai rivelatore
- Per ogni posizione della sorgente viene registrato **un profilo di attenuazione**
- Una **complessa elaborazione** permette di ottenere per ogni sezione indagata un'immagine digitale bidimensionale
- La disponibilità di molte sezioni permette uno studio del paziente in 3 dimensioni



<http://y2u.be/CtPhxCc59IA>



Scintigrafia, SPECT e PET



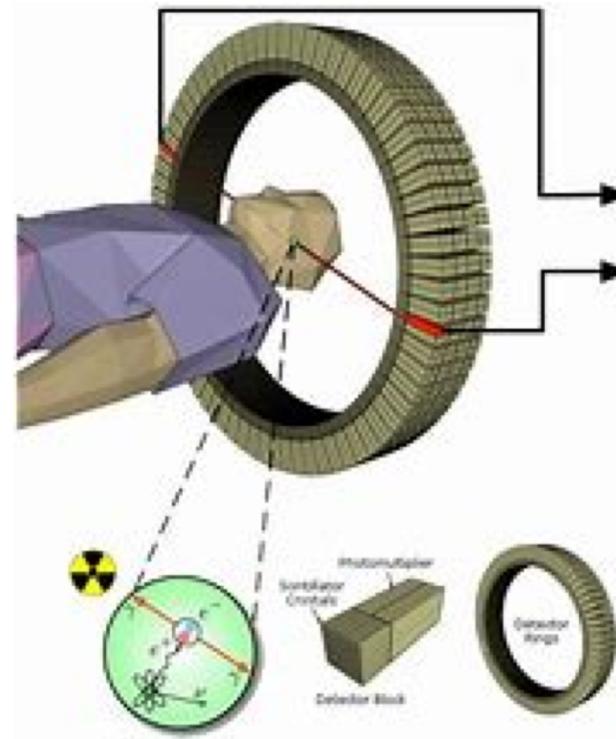
Scintigrafia, SPECT e PET

- Si somministrano ai pazienti **composti appositamente marcati con radionuclidi (radiofarmaci) emettitori di fotoni (SPECT) o di positroni (PET)**
- Il radiofarmaco
 - Si concentra nell'organo oggetto di studio
 - Traccia una particolare funzione metabolica

Scintigrafia, SPECT e PET

- Si somministrano ai pazienti **composti appositamente marcati con radionuclidi (radiofarmaci) emettitori di fotoni (SPECT) o di positroni (PET)**
- Il radiofarmaco
 - Si concentra nell'organo oggetto di studio
 - Traccia una particolare funzione metabolica
- I prodotti di decadimento del radiofarmaco vengono registrati da rivelatori che circondano il paziente o ruotano intorno ad esso permettendo di mappare **l'attività e pertanto la concentrazione del radiofarmaco**

Come per la TAC, la disponibilità di molte sezioni permette uno studio del paziente in 3 dimensioni



Risonanza magnetica nucleare (RMN)

Sfrutta una proprietà dei nuclei atomici chiamata **momento magnetico** associata al movimento delle particelle cariche (protoni) → in particolare nel nucleo di idrogeno il momento magnetico è dovuto alla rotazione dell'unico protone

In **campo magnetico** i momenti magnetici dell'idrogeno **si allineano come bussole**

Somministrando **radiofrequenze i momenti magnetici si invertono e quando si riallineano restituiscono un segnale**



Radioterapia

Le radiazioni ionizzanti sono impiegate per ottenere un effetto radiobiologico distruttivo sui tessuti tumorali

Radioterapia metabolica
Boron Neutron Capture (BNCT)
Radioterapia con fasci esterni

Come si accelerano le particelle

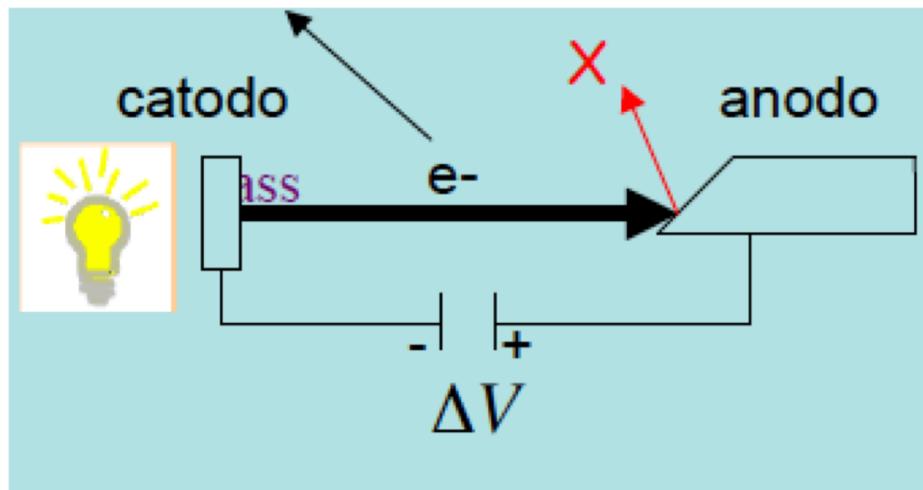
The image contains three panels illustrating particle acceleration:

- Left Panel:** Shows a proton being accelerated by a 1.5 Volt electrostatic field between two cylindrical electrodes. A red box below reads "Campo elettrico: accelera." (Electric field: accelerates).
- Middle Panel:** Shows a proton being deflected by a magnetic field between the North (N) and South (S) poles of a magnet. A teal box below reads "Campo magnetico: curva" (Magnetic field: curves).
- Right Panel:** Shows a circular particle accelerator with an "Accelerating 'Cavity'" and a 1,000,000 V power source. A red box below reads "Campo magnetico: curva" (Magnetic field: curves).

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Primo acceleratore lineare elettrostatico!

Il primo **tubo radiogeno** fu realizzato da **Roentgen**: costituito da un'ampolla a vuoto contenente un catodo connesso al polo negativo di un generatore di tensione. Riscaldato, il catodo emetteva elettroni che fluivano accelerati dal campo elettrico verso l'anodo



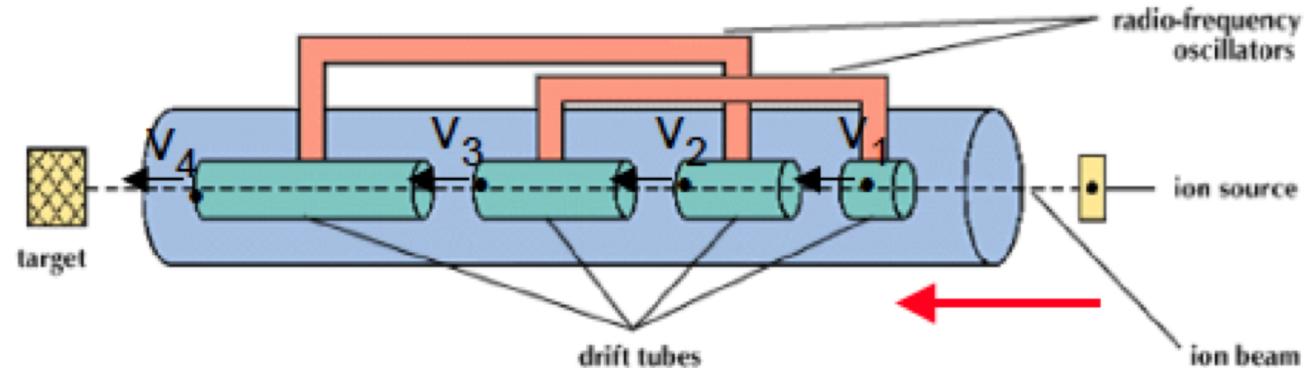
$$\Delta E = -e\Delta V$$

Energia massima raggiungibile dipende dalla tensione applicata. Per alti valori di ΔV si possono avere scariche

$\Delta E \rightarrow$ pochi MeV per unità di carica

Moderni acceleratori lineari

Concetto di accelerazione con **campi a radiofrequenza**: dall'idea di Wideroe (1927) di sostituire il campo elettrico statico con un campo oscillante



Tensione variabile nel tempo $V(t) = V_0 \sin(\omega t)$

Sequenza di tubi "di drift" metallici tra un gap e l'altro



LINAC per radioterapia a elettroni/fotoni



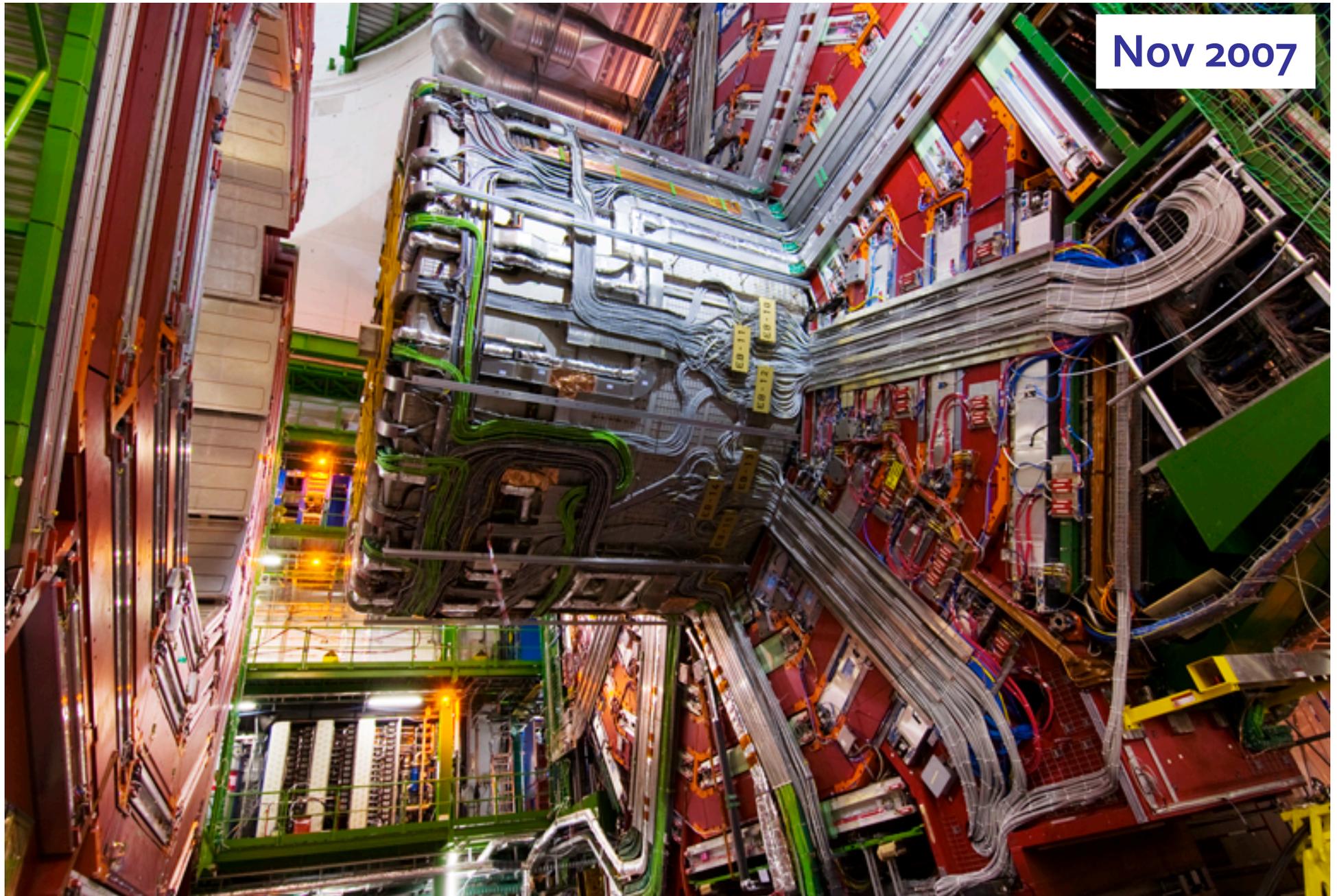
LINAC a FERMILAB

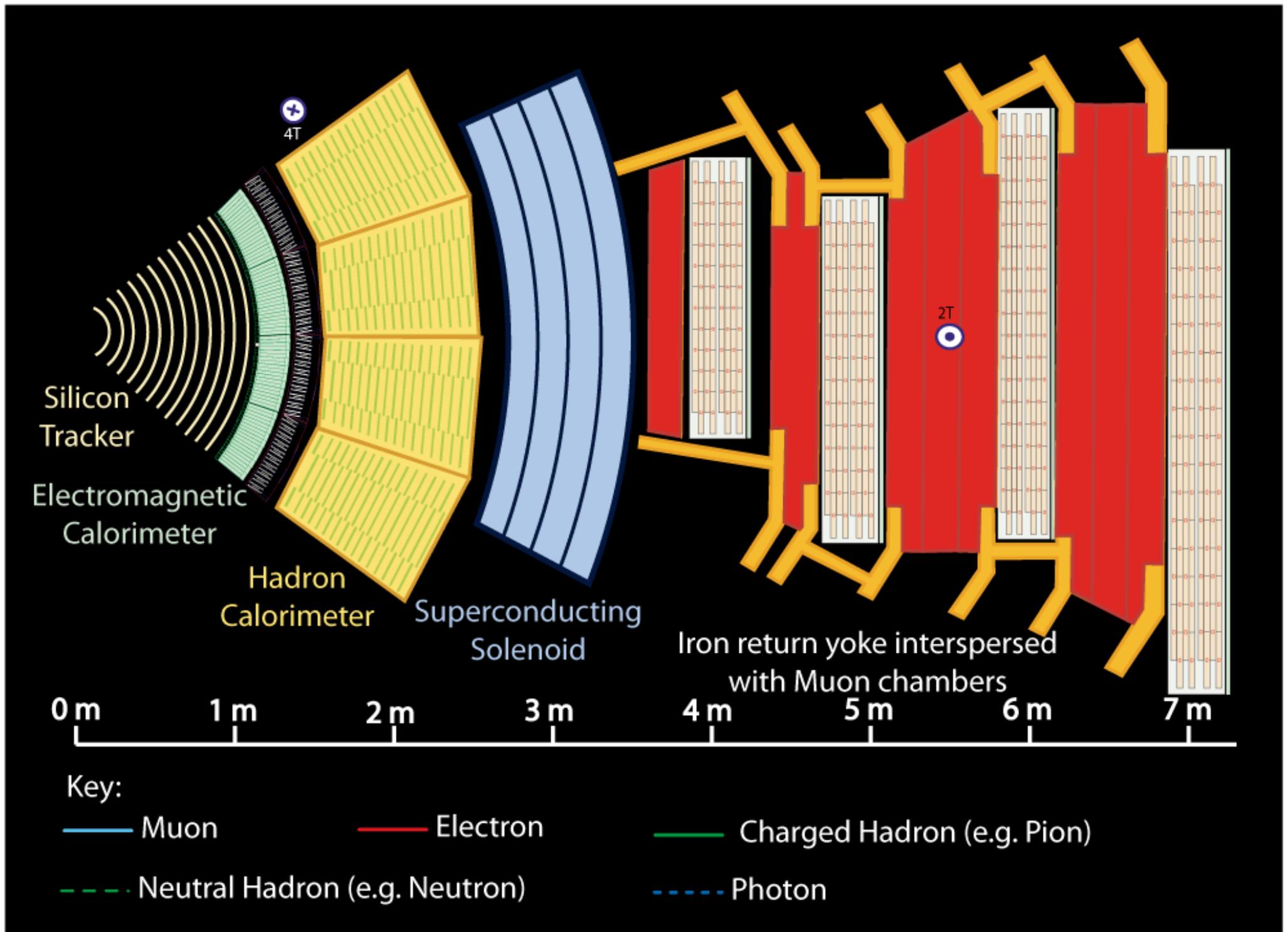
Rivelatori di radiazione

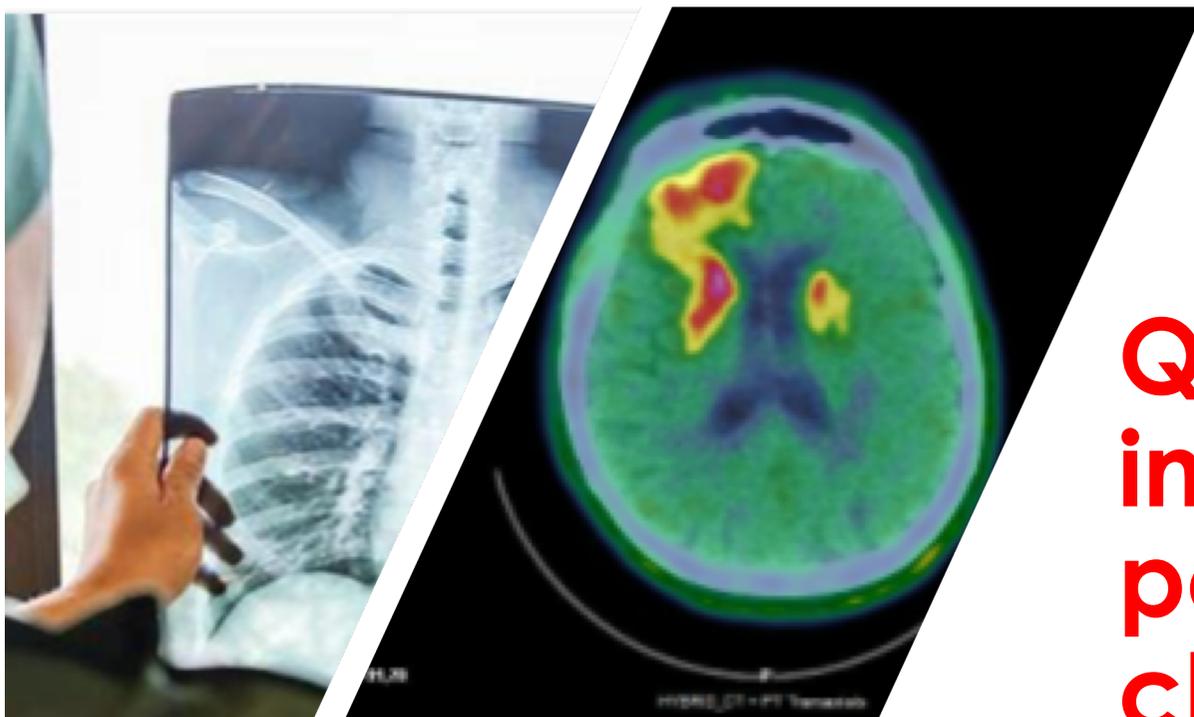
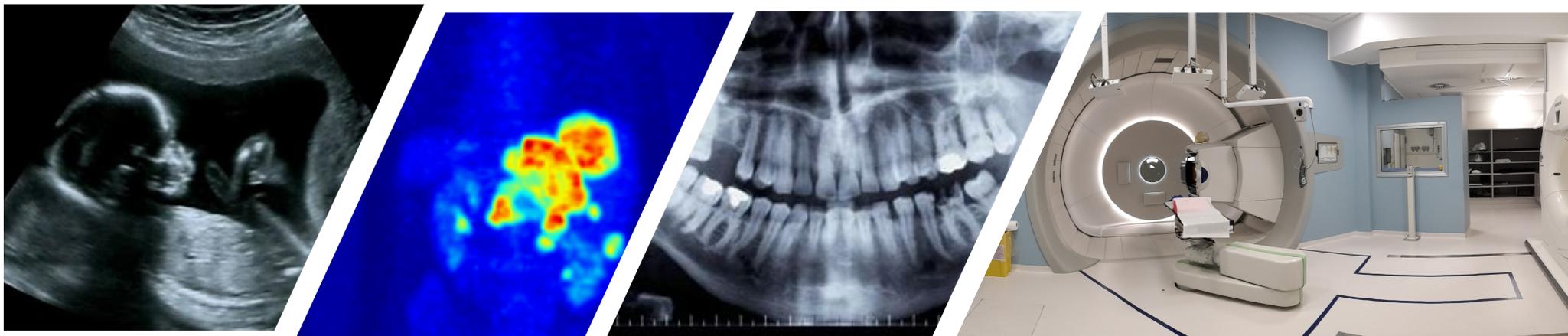
Per misurare le radiazioni si utilizzano strumenti in grado di misurare l'energia depositata e/o di identificare le tracce del passaggio di particelle cariche

- Rivelatori di raggi X
- Gammacamere nei tomografi PET/SPECT
- Dosimetri
- Camere a ionizzazione

CMS@LHC (CERN, Geneva)







**Quanta fisica
intorno a
poche parole
chiave?**

FISICA

- delle radiazioni (ionizzanti, non ionizzanti)
 - delle particelle subatomiche e del nucleo - atomico
 - delle interazioni delle radiazioni con la materia
 - degli acceleratori di particelle
 - dei rivelatori di particelle
 - della radiobiologia
 - degli ultrasuoni (di cui non abbiamo parlato oggi)
 - dei “Big data” e di complessi sistemi di calcolo
-

cambia pensa includi **cerca**

immagina

RICERCA ADATTA

Condividi Persevera Testa

AMA SPERIMENTA

Desidera Ascolta Crea

COLLABORA DIVULGA

sfida **CURA** decidi

incontra **prova** scegli parla

non accontentarti

UPO CAAD

1998
2018

VENTESIMO ANNIVERSARIO
UPO UNIVERSITÀ DEL
PIEMONTE ORIENTALE