

Padova, settembre 2020

# Fisica Applicata: Fisica delle radiazioni ionizzanti

**Jesús Casal**

1222·2022  
**800**  
ANNI



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

*Scuola di Specializzazione in Medicina Nucleare*  
*I anno*

## Obiettivi generali:

- Capire l'origine della radiazione (fisica quantistica e nucleare)
- Classificare i decadimenti radiattivi e le radiazioni associate
- Studiare come la radiazione interagisce con la materia

Questo corso comprende soltanto lezioni introduttive

(ringrazio il Prof. Vitturi per buona parte del materiale e le figure)

### Il mio recapito:

Jesús Casal  
*DFA, sede via Marzolo, stanza 304*

[casal@pd.infn.it](mailto:casal@pd.infn.it)

## Capitolo 1

- 1 Introduzione
- 2 Concetti di fisica quantistica e nucleare
- 3 La legge del decadimento radioattivo

## Capitolo 2

- 4 Tipi di decadimenti e associate radiazioni
- 5 Interazione delle radiazioni con la materia
- 6 Dosimetria

# Capitolo 1

- 1 **Introduzione**
- 2 Concetti di fisica quantistica e nucleare
- 3 La legge del decadimento radioattivo

## Cos'è?

Con il termine **radioattività** intendiamo la **desintegrazione** o il **riassetamento** (spontaneo o indotto) di nuclei atomici con **emissione di particelle e/o onde elettromagnetiche**

Proprietà fondamentali:

- **origine** ⇒ il nucleo atomico
- **natura** ⇒ particelle e onde

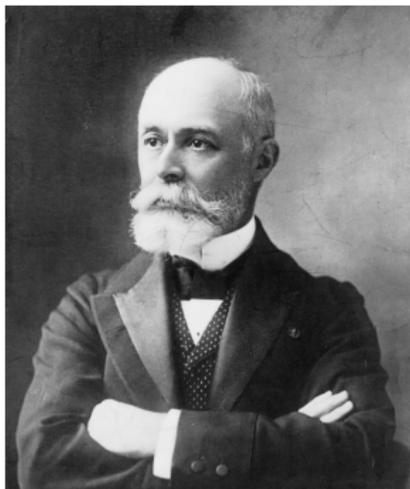
*\* Servono istituzioni di fisica quantistica e nucleare*

**Non tutte le radiazioni sono ugualmente pericolose!**

*\* Bisogna quindi fare una classificazione*

## Radiazione

Fenomeno messo in evidenza per la prima volta da **Antoine-Henri Becquerel** (1896).



Sali di uranio emettevano **radiazioni** capaci di impressionare una lastra fotografica, anche se protetta da uno **schermo** in grado, invece, di fermare i raggi luminosi.

*\* Parleremo di potere penetrante*

**Permio nobel per la fisica 1903**, assieme a Pierre e Marie Curie

Sarebbe **Marie Skłodowska Curie** chi continuasse gli studi, sviluppando camere a ionizzazione per evidenziare e misurare le radiazioni in modo sistematico.

Scoperta di **altri minerali, molto più radioattivi** di quelli usati da Becquerel, e **nuovi elementi radioattivi come il polonio, il radio e il torio.**

Riesce a **misurare l'energia prodotta.**

*\* Parleremo di attività delle sorgente, ionizzazione ed energia associata*





Una delle proprietà fondamentali di queste radiazioni è **lo sviluppo e il trasporto di energia**, di origine inizialmente ignoto, e **diverso per sorgenti diverse**.

Ad esempio, un solo grammo di **radio** è in grado di produrre circa 400 Joule d'energia all'ora, e **l'effetto perdura nel tempo**.

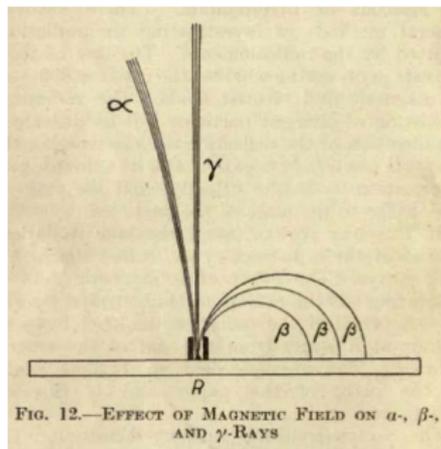
La situazione è diversa da quella di un fenomeno simile, anch'esso in grado di produrre ionizzazione, basato su speciali radiazioni (**raggi X**) ottenute da Röntgen con tubi a vuoto. In quel caso, l'energia è minore e **il processo si interrompe** allo spegnere la tensione del tubo.

*\* Parleremo di decadimento spontaneo e indotto*

(Chadwick, 1921; riproduzione della storica figura dalla tesi di Marie Curie)

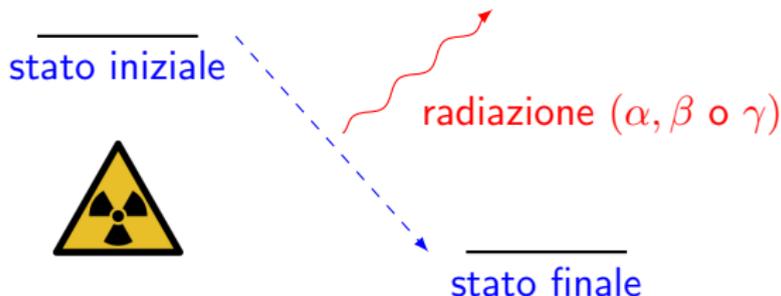
Esperimenti in cui la radiazione viene sottoposta a un campo magnetico permettono di individuare 3 tipi di radiazione:

- Particelle  $\beta$ , di carica negativa elettroni,  $e^-$ , ad alta velocità
- Particelle  $\alpha$ , di carica positiva e massa molto maggiore atomi di elio ionizzati (ossia privati di elettroni),  ${}^4\text{He}$
- Raggi  $\gamma$ , elettricamente neutri onde elettromagnetiche (fotoni), simili a radiazioni luminose o raggi X, ma con frequenza (ed energia) molto superiore

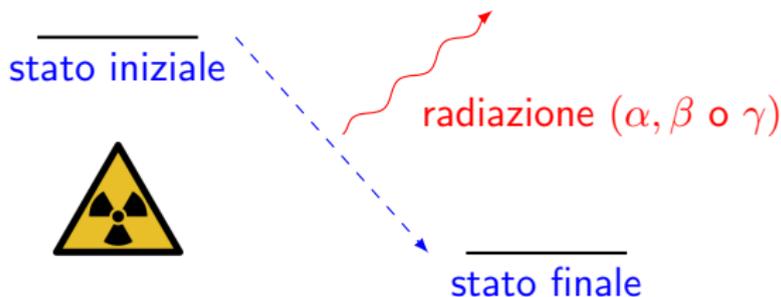


L'**origine** delle radiazioni  $\alpha, \beta, \gamma$  è associato a **decadimenti** (1) o **trasformazioni** (2) **che coinvolgono i nuclei atomici**<sup>1</sup>:

1. Da un livello energetico ad un altro ad energia minore, sempre dello stesso nucleo
2. Da un nucleo instabile ad un nucleo finale corrispondente ad un elemento (numero atomico) diverso



<sup>1</sup> I raggi X, invece, sono originati attraverso interazioni esterne al nucleo



Le forze nucleari determinano le differenze di energie tra configurazione iniziale e finale, e **la radiazione rappresenta** per il sistema il modo in cui liberarsi dell'energia in eccesso.

**Le caratteristiche degli stati iniziale e finale** determinano altresì i tempi e l'intensità con cui avviene il processo di decadimento.

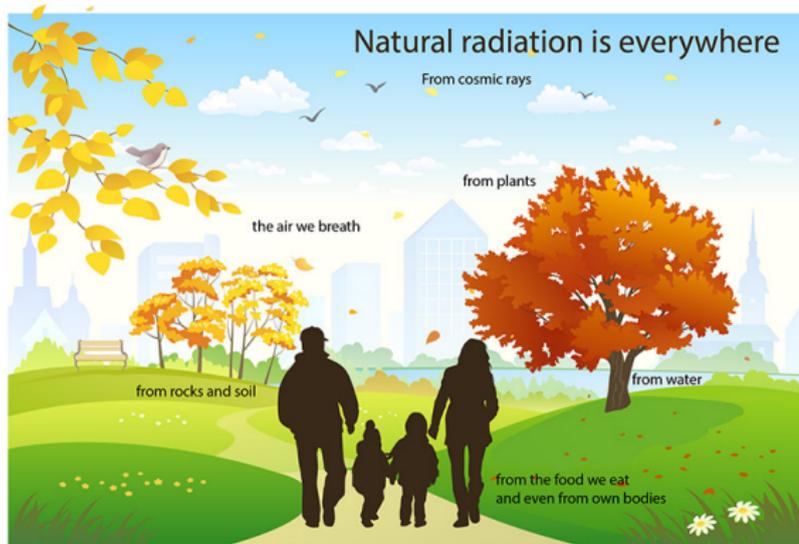
*\* Parleremo di stati quantici in fisica nucleare*

## Radiazioni naturali

Le radiazioni sono per noi, a prima vista, del tutto invisibili.

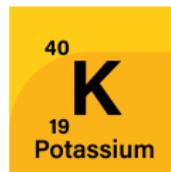
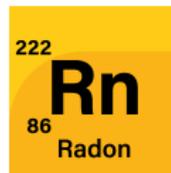
Le conseguenze (anche dannose) del loro assorbimento non sono rilevabili in tempi brevi. Possiamo individuarle solo con particolari rivelatori.

Questo ci impedisce di notare che sorgenti radioattive naturali sono tutto attorno a noi: sul terreno, nell'aria che respiriamo e/o nei nostri cibi.



[nuclearsafety.gc.ca](http://nuclearsafety.gc.ca)

- **Elementi con probabilità di decadimento bassa** (e per ciò **tempi di vita lunghi**) sono sopravvissuti dalla formazione della galassia. In generale sono molto pesanti, come alcuni isotopi dell'**uranio** o del **torio**, che decadono emmettendo particelle  $\alpha$ . I nuclei così prodotti, a sua volta, possono essere anche radioattivi.
  - Uno di questi prodotti è il **radon-222**, che esiste **in forma gassosa**, per ciò riesce ad uscire dalle rocche e se diffonde nell'aria, dopo di che **può decadere al interno dei polmoni**. È la principale sorgente di radiazione naturale.
  - Tra gli elementi primordiali troviamo il **potasio-40**, che **entra nella nostra catena alimentare accanto al potasio-39**, di grande importanza biologica.

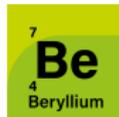
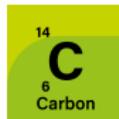
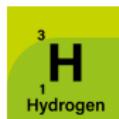


*\* Parleremo di isotopi nucleari*

- **Elementi con probabilità di decadimento alta** (e per ciò **tempi di vita brevi**). La loro presenza attuale è dovuta alla continua **produzione all'interno dell'atmosfera**.

⇒ **Raggi cosmici**: particelle ad alta energia che bombardano la Terra dallo spazio, **inducendo reazioni nucleari** che hanno come risultato isotopi radioattivi. Ad esempio:

- Il **trizio**, l'isotopo superpesante del idrogeno con numero di massa 3, potenzialmente utile nei futuri reattori a fusione nucleare.
- Il **carbonio-14**, utilizzato nella datazione radiometrica di campioni organici.
- Il **berillio-7**, importante nello studio dell'evoluzione stellare.



## Radiazioni artificiali

- **Fissione nucleare**, ad es. utilizzate in modo dirompente nell'esplosione di bombe atomiche, ma anche in centrali nucleari per prod. di energia.
  - Processo in cui **un nucleo pesante si frantuma** in almeno due frammenti, **liberando energia**.
  - **Parte dei prodotti** della fissione sono a loro volta **nuclei radioattivi**, come il caso dello **iodo-131** o del **cesio-137**.
  - Le scorie nucleari con tempi di decadimento molto lunghi **possono continuare a contribuire alla radioattività ambientale**.



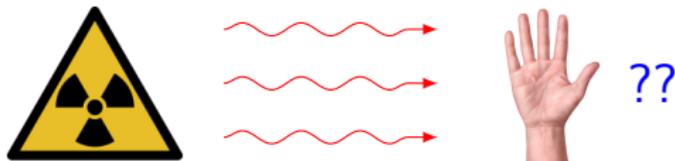
- **Eventi incontrollati** come **l'incidente di Chernobyl** o il **disastro di Fukushima**, con **effetti gravi sull'ambiente**, che perdurano oggi.



- **Sorgenti prodotte per scopi scientifici**, tramite **reazioni nucleari con acceleratori di particelle**, mantenendo sotto controllo i rischi.
  - **Scopi sanitari** (sia diagnostici che terapeutici)
  - Studio delle interazioni fondamentali, ecc.

## Come interagisce la radiazione con la materia?

(sia naturale che artificiale; in particolare con la materia biologica)



- Le **radiazioni cariche** ( $\alpha, \beta$ ) interagiscono principalmente in modo elettromagnetico. **Se la loro energia è sufficiente, la cedono inducendo processi di ionizzazione atomica** (espulsione di un elettrone dall'atomo).
  - Implicano variazioni della struttura atomica o molecolare
  - Danni biologici a livello cellulare

Vengono definite come **radiazioni ionizzanti**.

- Le **radiazioni non cariche ad alta energia** (raggi X,  $\gamma$ ) vengono assorbite tramite meccanismi senza ionizzazione. Invece **creano particelle che a loro volta possono essere assorbite ionizzando il materiale.**

➤ L'effetto sui tessuti può anche essere dannoso.

Vengono definite come **radiazioni indirettamente ionizzanti.**

- **Radiazioni di energia inferiore** (ad es. la radiazione luminosa o particelle ad energie molto basse) **cedono la loro energia in modo termico**, con conseguenze minori a livello biologico, e sono dette **non-ionizzanti.**

I danni biologici sono pertanto correlati alla quantità dei processi di ionizzazione diretta o indiretta

- 1 Introduzione
- 2 **Concetti di fisica quantistica e nucleare**
- 3 La legge del decadimento radioattivo

Abbiamo stabilito che la **radiazione è associata a decadimenti o trasformazioni** che avvengono a **livello atomico o nucleare**.

- La fisica che descrive le proprietà degli stati iniziale e finale è la **meccanica quantistica**. La legge di quantizzazione impone che i valori dell'energia, momento angolare, carica, massa, ecc. assumano solo determinati valori discreti.
- Le forze elettromagnetiche e nucleari (forte e debole) consentono al sistema di **passare da uno stato quantico ad uno stato diverso**, ma rispettando globalmente una serie di leggi di conservazione (energia, quantità di moto, momento angolare, carica).
- Pertanto, **se un sistema subisce una variazione della propria energia o carica**, questa dovrà ritrovarsi in altri sistemi o essere **emessa sotto forma di radiazioni**.

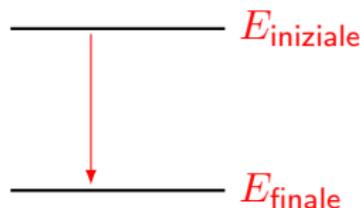
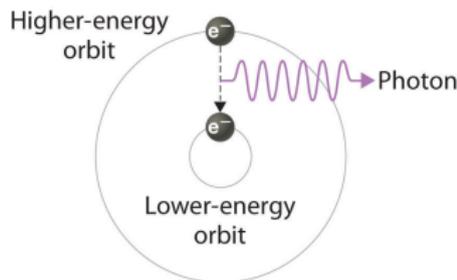
## Alcuni definizioni

- **Isotopo nucleare:**  ${}^A_ZX$   
 $Z$  numero di protoni,  $N = A - Z$  numero di neutroni  
  
Ci sono tanti isotopi di un certo elemento,  
ad es.: il carbonio  $\rightarrow {}^{12}_6C, {}^{13}_6C, {}^{14}_6C$ , ecc.
- **ione:** **atomo elettricamente carico**, ad esempio dopo l'espulsione di un elettrone. Per definizione, il nucleo è un atomo totalmente ionizzato.
- **Stato quantico:** insieme di **proprietà che permettono di individuare un sistema microscopico**. Energia ( $E$ ), momento angolare ( $J^\pi$ ), carica ( $Z, ch$ ), massa ( $A, m$ ), ecc.
- Qualora lo stato finale del sistema abbia un livello energetico inferiore a quello iniziale, parliamo di **decadimento spontaneo**. Altrimenti si tratta di una **trasformazione indotta**.

però. . .

- ✗ Anche nel caso di transizioni energeticamente consentite, non è detto che queste possano avvenire. Le **proprietà quantiche degli stati iniziale e finale** possono rendere alcuni **transizioni proibite**.
- ✗ Le **transizioni concesse** non accadono in modo istantaneo, ma **in modo statistico con probabilità fissate** dalle particolarità dello specifico processo.

*\*Lo vedremo con la legge del decadimento radioattivo*

Esempio: **transizione atomica**

Passaggio da una configurazione elettronica eccitata ad un'altra con energia inferiore. L'energia guadagnata nel decadimento,

$$\Delta E = E_{\text{finale}} - E_{\text{iniziale}},$$

viene emessa come un fotone di frequenza  $\nu$  tale che  $\Delta E = h\nu$  dove  $h$  è la costante di Planck ( $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  J s). **Nel caso atomico, quest'energia è del ordine del eV\* o keV.**

\*  $1 \text{ eV} = 1.602176 \dots \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$ ;  $1 \text{ MeV} = 10^3 \text{ keV} = 10^6 \text{ eV}$

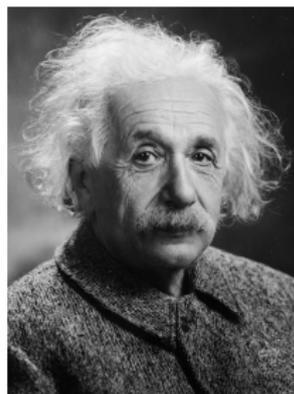
## Relazione massa-energia

A livello nucleare, sono possibili transizioni con cambio de massa o di carica, non previsto da Newton o Lavoisier.

⇒ Relatività di Einstein

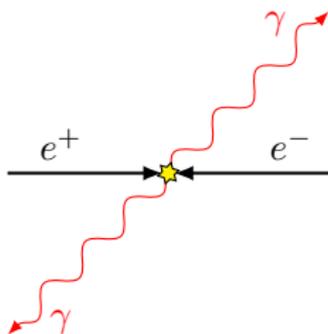
$$E = mc^2$$

Associa un'energia  $E$  alla pura esistenza di una massa  $m$ . Questo ci permette anche di parlare di masse con unità di energia.



Per ciò, un aumento (o diminuzione)  $\Delta m$  della massa è possibile se viene fornita (o sottratta) al sistema la corrispondente energia  $\Delta E = \Delta m c^2$ .

Esempio: **processo di annichilazione  $e^+e^-$**



Un **elettrone** e la sua antiparticella (il **positrone**, con stessa massa e carica opposta) interagiscono, dando come risultato la **loro distruzione**.

Oltre all'energia cinetica, **ogni particella ha un'energia pari a la loro massa**, dalla relazione di Einstein:

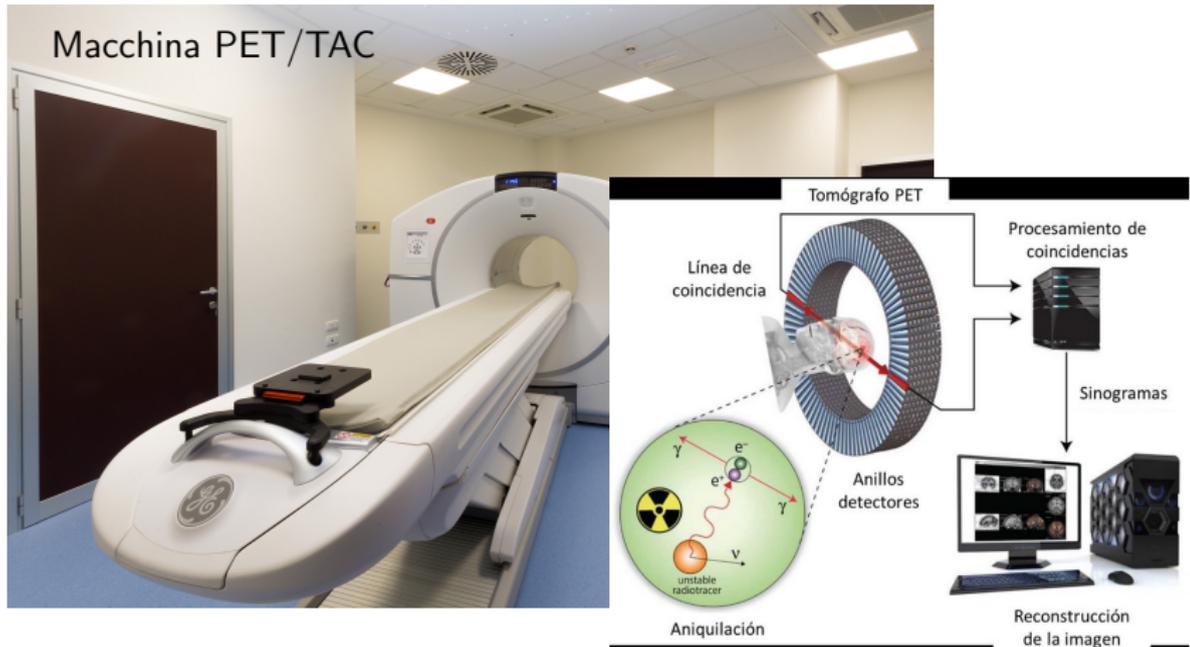
$$E_0 = m_e c^2, \text{ con } m_e = m_{e^-} = m_{e^+}$$

La massa del elettrone è  $9.11 \cdot 10^{-31}$  Kg  $\Rightarrow E_0 = 0.511$  MeV

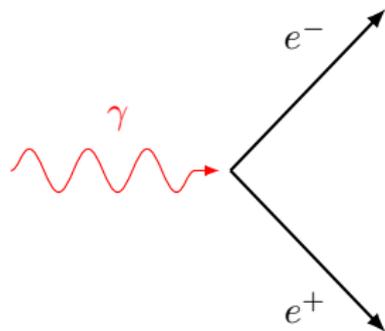
Il sistema ha un'energia totale pari a  $E_{\text{tot}} = 2E_0 + E_{\text{cin}}$

**L'energia liberata viene emessa sotto forma di radiazione elettromagnetica.** La conservazione della quantità di moto fa sì che vengano emessi **due fotoni  $\gamma$  in direzioni opposte**. Nell'ipotesi che l'elettrone e il positrone siano praticamente a riposo, la loro energia cinetica è trascurabile e l'energia di ogni fotone sarà pari a la metà del totale,  $E_\gamma = E_{\text{tot}}/2 = 0.511$  MeV.

*Il processo di annichilazione  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$  è alla base della tecnica PET - tomografia a emissione di positroni*



Esempio: **produzione di coppie  $e^+e^-$**  (simmetrico all'annichilazione)



Annichilazione:  $e^+ + e^- \longrightarrow \gamma + \gamma$

Produzione:  $\gamma \longrightarrow e^+ + e^-$

Un fotone  $\gamma$  scompare, originando una coppia positrone - elettrone

Possibile solo se il fotone ha una frequenza tale che la sua **energia**  $E_\gamma = h\nu$  sia almeno uguale all'energia di massa della coppia,  $E_\gamma > 2E_0$ .

Ovvero,  $E_\gamma > 1.022 \text{ MeV}$ . La quantità di energia in eccesso si trasformerà in energia cinetica della coppia, pertanto  $E_{\text{cin}} = E_\gamma - 2E_0$ .

Per conservazione della quantità di moto, **il processo può avvenire solo nelle vicinanze di un nucleo.**

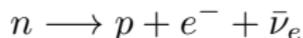
Esempio: **stabilità del protone**

Il **protone** e il **neutrone**, costituenti dei nuclei, hanno **masse diverse**:

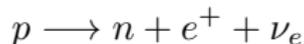
$$m_p = 1.6726 \cdot 10^{-27} \text{ Kg} = 938.272 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n = 1.6749 \cdot 10^{-27} \text{ Kg} = 939.565 \text{ MeV}/c^2$$

Vedremo più avanti che il **neutrone può trasformarsi in un protone**, con l'emmissione di un elettrone e un antineutrino (**processo  $\beta^-$** ),



che è **energeticamente possibile poiché  $m_n > m_p + m_e$** . Questo avviene in natura, con il neutrone libero che decade con un tempo medio di circa 14 minuti. Invece, il **decadimento del protone** (**processo  $\beta^+$** ),

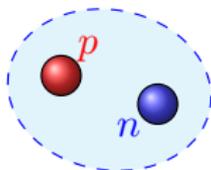


è **energeticamente proibito**. Di conseguenza, il **protone libero è una particella stabile**. Vedremo che il processo può invece avvenire al interno del nucleo.

Esempio: il **deutone** (idrogeno-2;  ${}^2\text{H}$ )

Se tratta del **nucleo del atomo di deuterio**.

È il nucleo composto più semplice.



Unione di **un protone e un neutrone**.

La sua massa è:  $m_d = 1875.613 \text{ MeV}/c^2$

Viene definita la quantità **difetto di massa**:

$$\Delta m = m - (Zm_p + Nm_n)$$

che nel caso del deutone vale  $m_d - m_p - m_n = -2.224 \text{ MeV}/c^2$

Il valore  $E = -\Delta m c^2$  rappresenta l'**energia di legame** del sistema. Se **positiva**, come nel **caso del deutone**, il sistema è detto **legato** ed  $E$  è l'energia necessaria per spezzarlo nei suoi costituenti.

→ *Informazione operativa per il calcolo di  $\Delta m$  ed  $E$*

Di solito, quelle tabulate sono le masse atomiche  $m_a$   
(in unità di massa atomica,  $u = 931.494 \text{ MeV}/c^2$ )

⇒ per trovare  $\Delta m$ , bisogna quindi sottrarre la massa degli elettroni

$$\Delta m = \underbrace{m_a - Zm_e}_m - (Zm_p + Nm_n)$$

$$\Delta m = m_a - (Zm_H + Nm_n)$$

ove  $m_H$  è la massa di un atomo di idrogeno.

Esempio: **difetto di massa del deutone**

Valore tabulato per il deuterio (ad. es. wikipedia):

$$m_{\text{deuterio}} = 2.014102 \text{ u}$$

$$\Rightarrow \Delta m_d = 2.014102 \cdot 931.494 - 0.511 - 938.272 - 939.565$$

$$\Delta m_d = -2.224 \text{ MeV}/c^2 \quad \checkmark$$

→ *Informazione sulla notazione*

Molto spesso, utilizziamo le definizioni:

- $M(A, Z) \equiv m = m_a - Zm_e$  per la massa nucleare
- $B(A, Z) \equiv E = -\Delta m$  per l'energia di legame

che sono uniche per ogni nucleo (per ciò la dipendenza in  $A, Z$ )

$$\Delta m = m - Zm_p - Nm_n$$

$$m = Zm_p + Nm_n + \Delta m$$

$$M(A, Z) = Zm_p + (A - Z)m_n - B(A, Z)$$

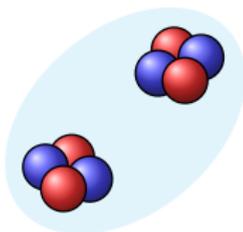
Esempio di nucleo non stabile:  ${}^8\text{Be}$

Non tutti sistemi legati ( $\Delta m$  negativo) sono stabili.

Un chiaro esempio è il  ${}^8\text{Be}$ , con  $Z = 4$  e  $N = 4$

$\Rightarrow \Delta m({}^8\text{Be}) = m({}^8\text{Be}) - 4m_p - 4m_n = -56.498 \text{ MeV}/c^2$   
per ciò la sua energia di legame è positiva e pari a 56.498 MeV

Ma dal punto di vista energetico, **due particelle  $\alpha$**  (ciascuna con un'energia di legame pari a 28.295 MeV, per un totale di 56.590 MeV), **costituiscono un sistema più legato rispetto al  ${}^8\text{Be}$ .**

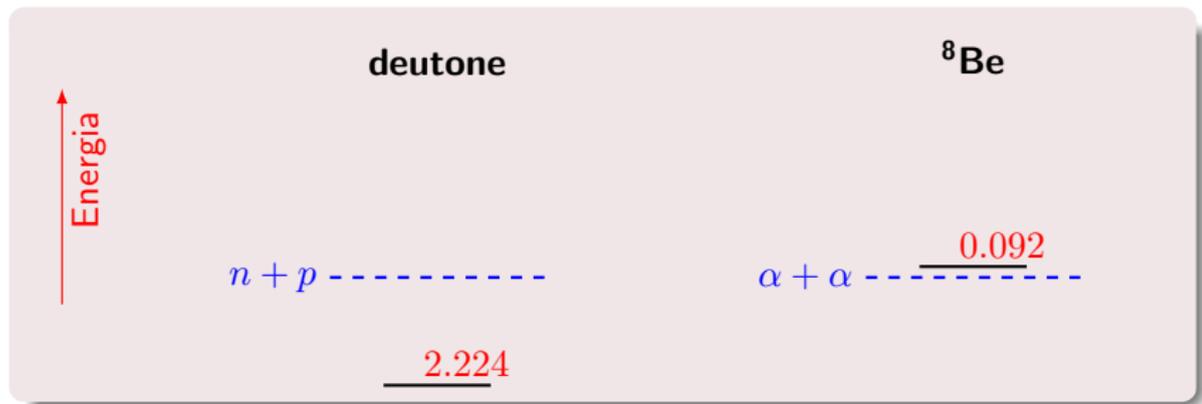


La **differenza fra nucleo e frammenti**,

$$\Delta E = E({}^8\text{Be}) - 2E(\alpha) = -0.092 \text{ MeV}$$

è **negativa** e significa che il  ${}^8\text{Be}$  è **instabile** e, se prodotto, **si rompe in due particelle  $\alpha$ .**

Questo ci porta alla definizione di **soglia** e di **separazione**



A volte, parliamo di **energia rispetto alla soglia di separazione**  
(ovvero di **emissione di particelle**)

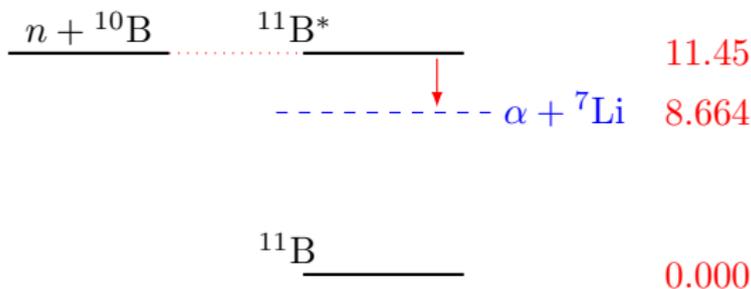
Il deutone è legato da 2.224 MeV, energia necessaria per spezzarlo in  $n + p$

Il  ${}^8\text{Be}$  invece decade emettendo due particelle  $\alpha$  con energia cinetica relativa di 0.092 MeV

Esempio con applicazioni:  $^{11}\text{B}$

$^{11}\text{B}$  è l'isotopo più abbondante del boro (80%, rispetto al 20% del  $^{10}\text{B}$ ).

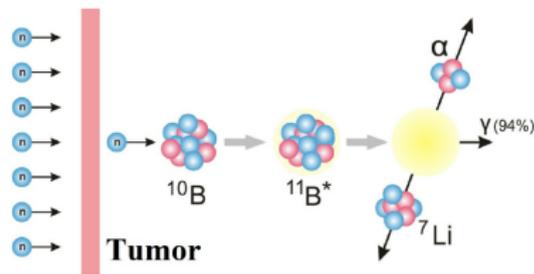
Nel suo stato fondamentale è stabile, a 8.664 MeV sotto la soglia più energeticamente favorevole, che in questo caso è  $\alpha + ^7\text{Li}$ .



Una tecnica è quella di bombardare nuclei di  $^{10}\text{B}$  con un fascio di neutroni a bassa energia. Il neutrone viene catturato trasformando  $^{10}\text{B}$  in  $^{11}\text{B}$ .

Le masse in gioco fanno sì che il  $^{11}\text{B}$  sia formato in uno stato eccitato  $^{11}\text{B}^*$  a 11.45 MeV, che poi decade nei due frammenti  $\alpha + ^7\text{Li}$ .

Possiamo quindi capire il processo

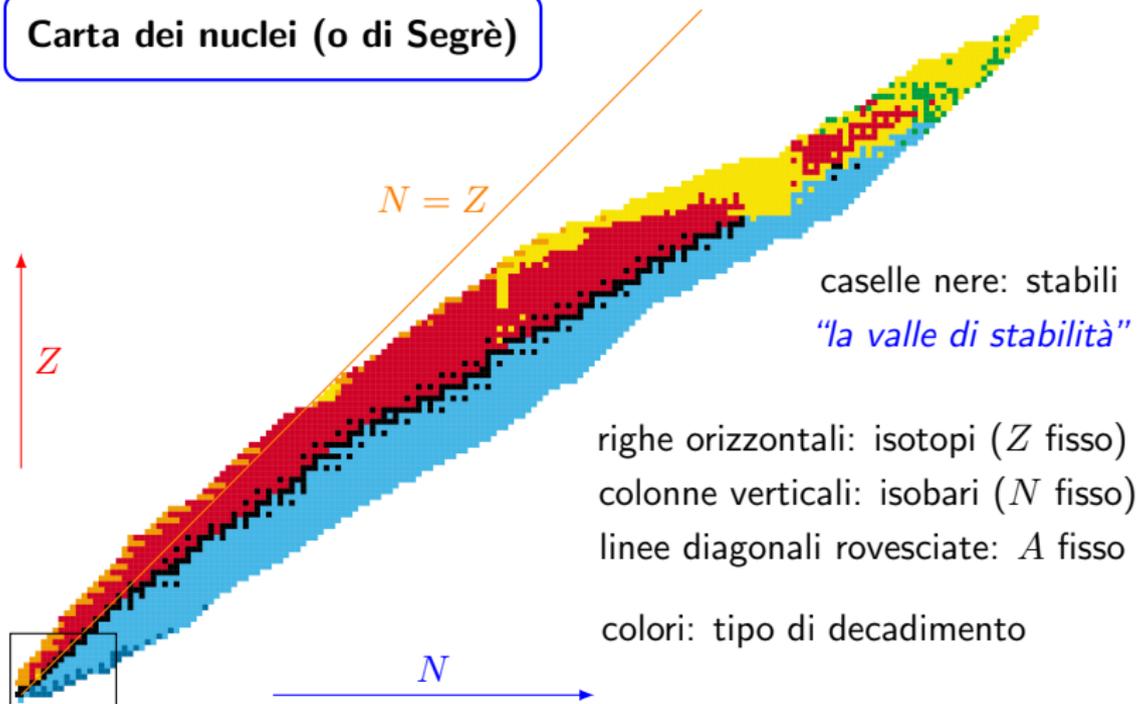


come **radiazione indotta per cattura neutronica**. I due frammenti si dividono tra loro l'energia residua  $11.45 - 8.664 = 2.786$  MeV sotto forma di energia cinetica.

Base della tecnica **BCNT** (*Boron Capture Neutron Therapy*), proposto per la cura dei tumori:

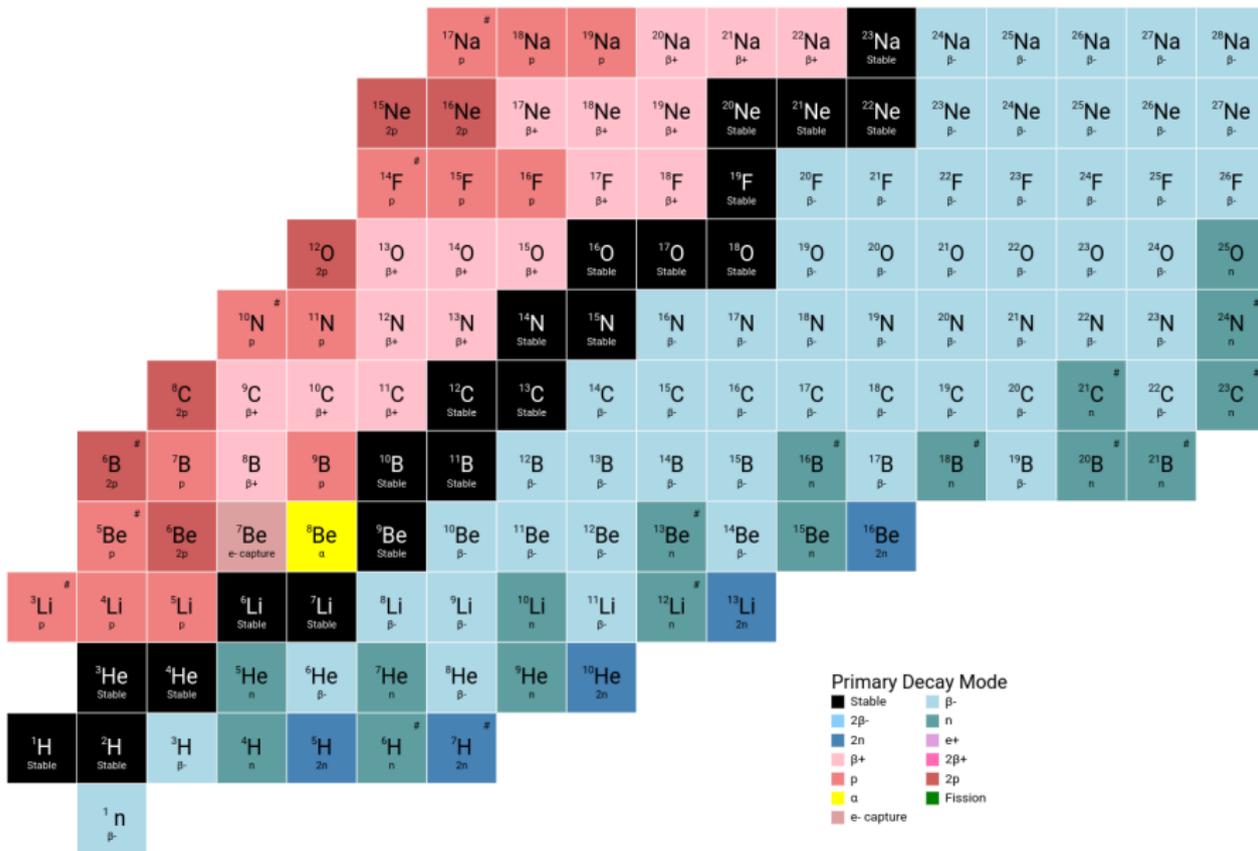
- Far assorbire quantità di  ${}^{10}\text{B}$  da parte dei tessuti malati
- Bombardare con un fascio intenso di neutroni
- I frammenti  $\alpha + {}^7\text{Li}$  emessi vengono assorbiti già all'interno della cellula, cui cedono l'energia residua causandone necrosi

## Carta dei nuclei (o di Segrè)



# Concetti di fisica quantistica e nucleare

## La legge del decadimento radioattivo



- 1 Introduzione
- 2 Concetti di fisica quantistica e nucleare
- 3 La legge del decadimento radioattivo**

I sistemi descritti dalla meccanica classica seguono leggi di tipo deterministico: date le condizioni iniziali e note le forze che agiscono, l'evoluzione del sistema è ben precisa.

*Es.: una palla lasciata cadere da ferma in aria  $\Rightarrow$  cade necessariamente verso il basso, il suo moto totalmente definito dalla forza gravitazionale e l'attrito dell'aria.*

Invece, i **sistemi molecolari, atomici e nucleari** obbediscono alle leggi della **meccanica quantistica**  $\Rightarrow$  elementi in un sistema possono evolversi in modo diverso, con determinate **probabilità** definite dalle forze in gioco.

- Decadimenti radioattivi: ogni elemento di un sistema ha, istante per istante, una certa probabilità di subire il decadimento, in modo indipendente da ciò che accade agli altri elementi.

## Costante di decadimento $\lambda$

Rappresenta la probabilità che un particolare processo di decadimento abbia luogo nell'unità di tempo.

$$\lambda \quad \text{dimensioni } [\lambda] = [T^{-1}] \quad \text{unità: } s^{-1}$$

Un valore di  $\lambda$  maggiore porta un **maggior numero di decadimenti al secondo**, e questo va legato alle proprietà degli stati iniziale e finale e al tipo di decadimento.

- Se ci sono  $N$  nuclei/sistemi che possono decadere, poiché l'evoluzione di ogn'uno è indipendente, non sarà possibile prevedere esattamente quali decadono e quando.
- Se  $N$  è grande, il numero di **sistemi che decadranno in un intervallo di tempo piccolo  $\Delta t$**  sarà  $\lambda N \Delta t$ , quindi la **variazione di  $N$**  è:

$$\Delta N(t) = -\lambda N(t) \Delta t$$

Nel limite di tempi infinitesimali,  $\Delta t \rightarrow 0$ , abbiamo:

$$dN(t) = -\lambda N(t)dt$$

che porta ad una dipendenza temporale del numero di sistemi che devono ancora decadere di tipo esponenziale decrescente:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

con  $N_0$  il numero di sistemi al tempo iniziale.

- Dato il carattere probabilistico del processo di decadimento, solo a tempo infinito tutti i sistema avranno subito il decadimento.

$$N(t) \rightarrow 0 \iff t \rightarrow \infty$$

- La riduzione di  $N(t)$  sarà più rapida quanto più grande sia  $\lambda$

**Legge del decadimento radioattivo:**

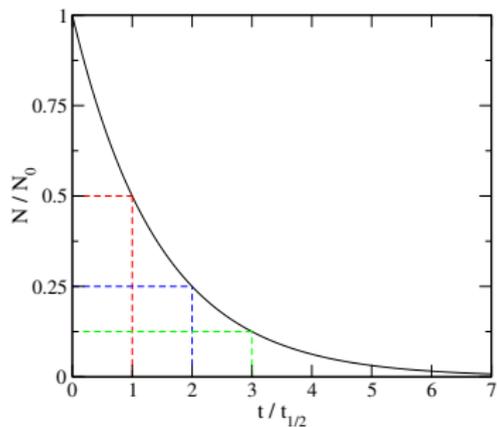
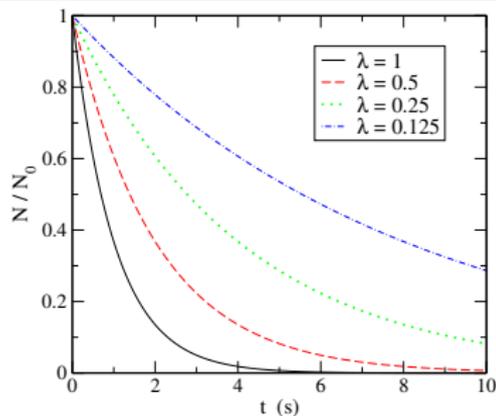
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Andamento per diversi  $\lambda \Rightarrow$

**Tempo di dimezzamento  $t_{1/2}$** 

Tempo in cui la metà di un certo numero di sistemi subisce il decadimento: (chiamato anche emivita)

$$N(t_{1/2}) = N_0/2 \Rightarrow t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$



**Nota:** Si può definire la **vita media** ( $\tau$ ):

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow t_{1/2} = \tau \ln(2)$$

- I valori di  $t_{1/2}$  variano moltissimo da elemento a elemento.
- Gli **elementi radioattivi primordiali** sono caratterizzati da tempi di decadimento molto lunghi:
  - $^{238}\text{U}$ :  $t_{1/2} = 4.468 \cdot 10^9$  anni
  - $^{40}\text{K}$ :  $t_{1/2} = 1.248 \cdot 10^9$  anni
- **Elementi prodotti dai raggi cosmici, artificialmente, oppure dal decadimento di elementi primordiali** hanno vite più brevi:
  - $^{14}\text{C}$ :  $t_{1/2} = 5.730 \cdot 10^3$  anni
  - $^{222}\text{Rn}$ :  $t_{1/2} = 3.8235$  giorni
  - $^{18}\text{F}$ :  $t_{1/2} = 109.771$  minuti

## Attività di una sorgente radioattiva

Numero di **decadimenti** che la sorgente produce **nell'unità di tempo**:

$$A(t) \equiv \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

L'unità di misura è il **Becquerel (Bq)**: 1 decadimento al secondo

Si usa anche il **Curie (Ci)**, corrispondente all'attività di un grammo di radio  $^{226}\text{Ra}$  (isotopo che decade emettendo  $\alpha$  con  $t_{1/2} = 1600$  anni).

- La definizione è legata esclusivamente al numero di decadimenti, e non dipende né dal tipo di processo né dall'energia rilasciata.
- Pertanto  $A$  non è una diretta misura della eventuale pericolosità di una sorgente.

Esempio: **calcolare la relazione tra le unità di misura Bq e Ci**

1 Ci è l'attività di un grammo di  $^{226}\text{Ra}$  ( $1 \text{ g} = 1/226 \text{ mol}$ ).

Il numero di nuclei presenti sarà:

$$N = (1/226)N_A, \quad \text{ove } N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Conosciamo il tempo di dimezzamento del  $^{226}\text{Ra}$  ( $t_{1/2} = 1600 \text{ anni}$ ):

$$t_{1/2} = 1600 \text{ anni} = 1600 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} = 5.04576 \cdot 10^{10} \text{ s}$$

Pertanto la costante di decadimento è:

$$\lambda = \ln(2)/t_{1/2} = 1.373 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

L'attività corrispondente è perciò data da:

$$A = \lambda N = \frac{\lambda N_A}{226} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Si ha pertanto la relazione  $1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

Esempio: calcolare l'attività di una sorgente costituita da un milligrammo di  $^{99m}\text{Tc}$  al tempo iniziale, dopo un secondo e dopo 24 ore

L'isotopo *metastabile*  $^{99m}\text{Tc}$  del tecnezio è uno dei radioisotopi più comunemente utilizzati in medicina nucleare come tracciante radioattivo (imaging biomedico con gamma camere). Decade emettendo fotoni  $\gamma$  da 140 keV, con  $t_{1/2} \simeq 6$  ore.

$$N_0 = \frac{0.001}{99} N_A = 6.08 \cdot 10^{18}$$

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{21600 \text{ s}} = 3.2 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

L'attività iniziale è perciò:

$$A_0 = \lambda N_0 = 1.9 \cdot 10^{14} \text{ Bq} = 5.13 \cdot 10^3 \text{ Ci}$$

Esempio: (cont)

Nel tempo l'attività diminuirà secondo la legge  $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$

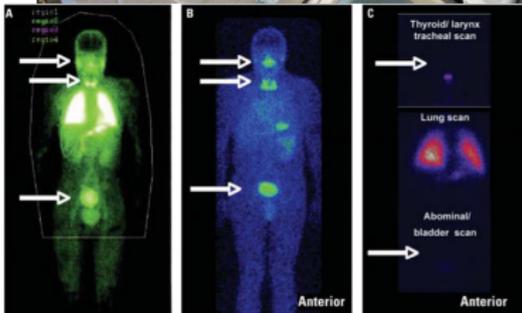
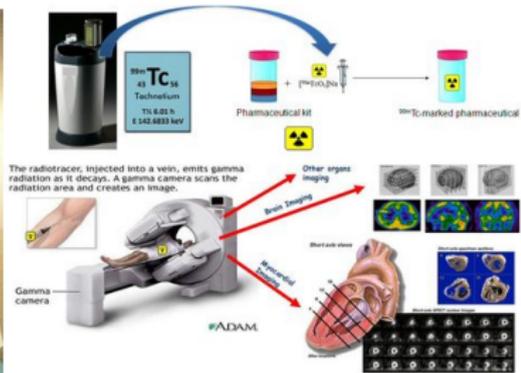
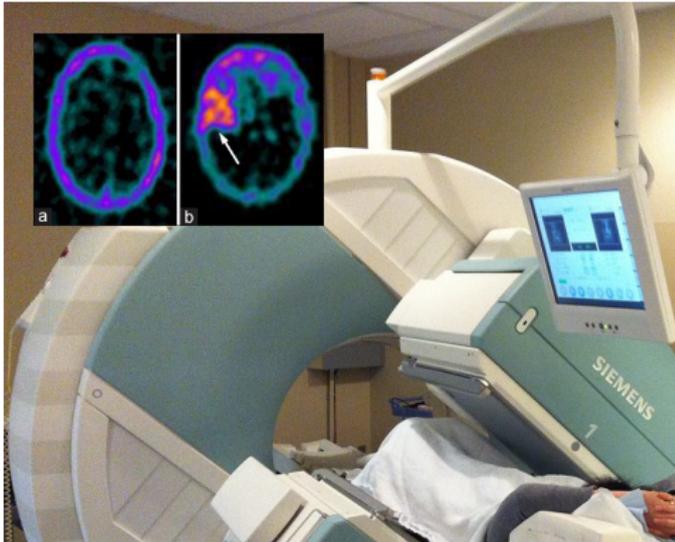
- Al tempo  $t_1 = 1$  s, estremamente piccolo rispetto a  $t_{1/2}$ , l'esponente è praticamente zero, perciò il valore dell'esponenziale è pari ad 1.

Di conseguenza:  $A(t_1 = 1 \text{ s}) \simeq A_0$

- Invece, dopo  $t_2 = 24$  ore ci si aspetta una riduzione notevole. Poiché in questo caso  $t_2 = 4t_{1/2}$ , possiamo scrivere:

$$A(t_2 = 24 \text{ ore}) = A_0 e^{-\lambda t_2} = A_0 e^{-\frac{\ln(2)}{t_{1/2}} 4t_{1/2}} = A_0 e^{-4 \ln(2)} = \frac{A_0}{16}$$

Quindi dopo un tempo del ordine di  $t_{1/2}$ , l'attività della sorgente sarà notevolmente diminuita.



## Esempi ordini di grandezza dell'attività

- Una sorgente  $\alpha$  di  $^{241}\text{Am}$  (amerizio) usata nei rivelatori per fumo ha un'attività di  $\sim 30$  kBq
- La stessa attività è prodotta, a causa del radon, dall'aria presente in una nostra casa di circa  $100$  m<sup>2</sup>
- Per una PET è necessario inniettare nel paziente materiale radioattivo con  $A \sim 25$  mCi ( $\sim 10^9$  Bq)
- Una sorgente per terapia tumorale ha  $\sim 10^{14}$  Bq
- Il nostro corpo ha un'attività specifica di  $\sim 100$  Bq/kg

Si definisce come l'**attività specifica** come una **misura della concentrazione di radioattività**:

attività per unità di massa (Bq/g oppure Ci/g)

attività per unità di volume (Bq/l oppure Ci/l)

## Datazione con $^{14}\text{C}$

⇒ **Basata sulla dipendenza temporale dell'attività di una sorgente.**

Il  $^{14}\text{C}$  è un isotopo radioattivo del carbonio, presente in piccola percentuale rispetto agli altri isotopi stabili  $^{12}\text{C}$  e  $^{13}\text{C}$ . Decade  $\beta^-$  trasformandosi in  $^{14}\text{N}$ , con  $t_{1/2} = 5730$  anni.

Questo  $t_{1/2}$  è breve rispetto alla vita dell'Universo, perciò ci si potrebbe aspettare che tutto il  $^{14}\text{C}$  formato all'inizio sia completamente scomparso. Invece, **la sua abbondanza è compensata** dalla sua produzione dovuta all'interazione di raggi cosmici con l'atmosfera.

- Di conseguenza, **la percentuale isotopica del  $^{14}\text{C}$  è costante nel tempo per i sistemi in grado di interagire con l'atmosfera.** I valori per i diversi isotopi sono: 98.89 % di  $^{12}\text{C}$ , 1.1 % di  $^{13}\text{C}$  e  $1.2 \cdot 10^{-12}$  % di  $^{14}\text{C}$ .
- Per i **sistemi che interrompano lo scambio con l'ambiente**, ad esempio per in sistema biologico morto, **la percentuale di  $^{14}\text{C}$  presente nel campione diminuirà esponenzialmente col tempo.**

Esempio: età di un campione di osso antico

Supponiamo di avere un campione di osso, la cui attività attuale dovuta al decadimento del  $^{14}\text{C}$  sia pari a 6 mBq. Dobbiamo confrontare questo valore con quello relativo ad un simile campione vivo.

Campione vivo (massa = 1 g, di cui il 10 % è carbonio).

La sua percentuale isotopica di  $^{14}\text{C}$  è nota:  $1.2 \cdot 10^{-12} \%$

$$N(^{14}\text{C}) = \underbrace{\frac{1 \cdot 0.1}{12}}_{\text{num. moli}} 1.2 \cdot 10^{-12} N_A \simeq 6 \cdot 10^9$$

La costante di decadimento del  $^{14}\text{C}$  a partire di  $t_{1/2} = 5730$  anni è:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{5730 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 6 \cdot 60} \simeq 4 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$$

Esempio: (cont.)

L'attività del campione vivo sarà pertanto:

$$A_0 = \lambda N(^{14}\text{C}) \simeq 0.024 \text{ Bq}$$

Questa va confrontata con quella effettivamente misurata nel campione di osso antico,  $A_{\text{misurata}} = 6 \text{ mBq} = 0.006 \text{ Bq}$ .

$$A_{\text{misurata}}/A_0 = 0.25$$

cio'è la attività misurata è un quarto di quella che stimiamo come l'attività alla morte del campione. Da questa devono avere **passato due tempi di dimezzamento**. L'età stimata dalla morte del campione è perciò di **11460 anni**.

Finora abbiamo considerato sistemi che decadono in base ad un preciso processo, caratterizzato da un'unica probabilità legata ad una costante di decadimento  $\lambda$ . In realtà, molto spesso i sistemi nucleari instabili possono **decadere secondo più canali di decadimento**.

Esempio: **nucleo dispari-dispari**  $^{40}\text{K}$  ( $Z = 19$ ,  $N = 21$ ).

- Canale 1) processo  $\beta^- \rightarrow ^{40}\text{Ca}$  (89 %)
- Canale 2) cattura elettronica  $\rightarrow ^{40}\text{Ar}$  (11 %)

Ogni canale ha la sua costante di decadimento:  $\lambda_1, \lambda_2, \dots$

Il carattere probabilistico dei processi fa sì che l'occorrenza di ciascuno sia indipendente dagli altri. Il risultato è che **il sistema globalmente subirà un decadimento con una probabilità legata alla costante  $\lambda$  ottenuta come somma** delle diverse costanti di decadimento:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots$$



Consideriamo il caso di  $N_1$  nuclidi padri che decadono con costante di decadimento  $\lambda_1$ , trasformandosi in nuclidi figli  $N_2$  che decadono a loro volta con costante  $\lambda_2$ . La popolazione dei due tipi soddisfa:

$$N_1(t) = N_0 e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

- Se  $\lambda_2 \gg \lambda_1 \Rightarrow N_2(t) \simeq \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1(t)$   
quindi  $A_2(t) = \lambda_2 N_2(t) = \lambda_1 N_1(t)$  e si parla di *equilibrio secolare*.
- Se  $\lambda_2 = 0$  (stabile)  $\Rightarrow N_2(t) \simeq N_0(1 - e^{-\lambda_1 t})$   
pertanto dopo un  $t$  infinito abbiamo  $N_0$  nuclei figli

## Tempo di dimezzamento biologico $t_{1/2}^{\text{biol}}$

Necessario ad un organismo per **eliminare la metà di una sostanza attraverso un meccanismo puramente biologico** (urina, traspirazione, ecc.)

Può riferirsi ad un determinato organo o a tutto il corpo, e varia secondo le condizioni e l'età dell'individuo.

Esiste quindi una **costante di decadimento biologico**:

$$\lambda^{\text{biol}} = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}^{\text{biol}}}$$

La **costante totale di decadimento effettiva** e il **tempo di dimezzamento totale effettivo** saranno:

$$\lambda^{\text{tot}} = \lambda + \lambda^{\text{biol}}$$
$$t_{1/2}^{\text{tot}} = \frac{t_{1/2} t_{1/2}^{\text{biol}}}{t_{1/2} + t_{1/2}^{\text{biol}}}$$

- $t_{1/2}^{\text{tot}}$  è sempre minore dei valori fisico e biologico, che porta inevitabilmente ad un più breve tempo di sopravvivenza della sostanza all'interno del corpo.

Questo può essere importante nella progettazione di trattamenti e prove diagnostiche.

- Diversi isotopi di un stesso elemento hanno le stesse proprietà chimiche e pertanto presentano la stessa  $\lambda^{\text{biol}}$  (e lo stesso  $t_{1/2}^{\text{biol}}$ ).

Ad esempio, i due isotopi radioattivi dello iodo ( $^{125}\text{I}$  e  $^{130}\text{I}$ ), che hanno tempi di decadimento fisici diversi (59.4 e 8 giorni), hanno invece lo stesso tempo di decadimento biologico  $t_{1/2}^{\text{biol}} \simeq 138$  giorni, portando a tempi di dimezzamento totali effettivi di 41.8 e 7.6 giorni, rispettivamente.

## Capitolo 2

- 4 Tipi di decadimenti e associate radiazioni
- 5 Interazione delle radiazioni con la materia
- 6 Dosimetria

## Decadimento radiattivo

Trasformazione che porta il sistema ad uno stato con energia minore, con conseguente rilascio dell'energia guadagnata sotto forma di radiazione.

Le differenze di energie sono determinate dalle forze in gioco.

Diverse forze possono dare luogo a diversi processi di decadimento:

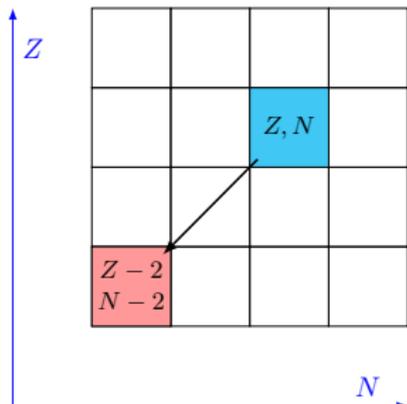
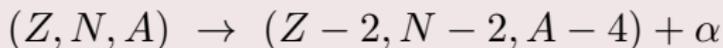
- Interazione forte  $\Rightarrow$  decadimento  $\alpha$
- Interazione debole  $\Rightarrow$  decadimento  $\beta$
- Interazione elettromagnetica  $\Rightarrow$  decadimento  $\gamma$

Le radiazioni  $\alpha$  e  $\beta$  sono corpuscolari, con particelle dotate di massa e carica positiva e negativa, rispettivamente. Invece la radiazione  $\gamma$  è di tipo elettromagnetico (onde).

## Decadimento $\alpha$

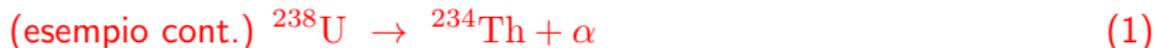
Dovuto alle interazioni forti.

Un nucleo acquisisce una configurazione ad energia inferiore emettendo un nucleo di  ${}^4\text{He}$  (particella  $\alpha$ ).



Il nucleo residuo è un elemento diverso da quello iniziale ( $Z$  diminuisce di 2,  $A$  diminuisce di 4)

Esempio:  ${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{234}\text{Th} + \alpha$   
(possibile se  $m_{\text{finale}} < m_{\text{iniziale}}$ )



Il processo è energeticamente possibile poiché

$$m(^{238}\text{U}) > m(^{234}\text{Th}) + m(\alpha)$$

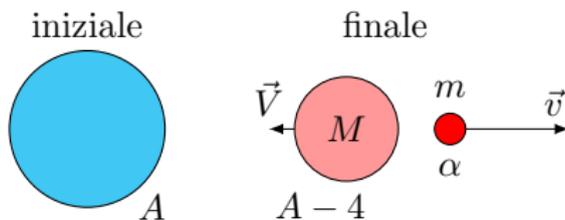
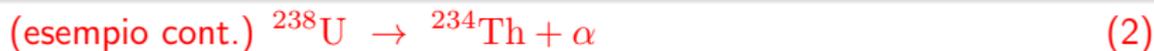
L'energia liberata è pari a:

$$Q = \Delta E = (\Delta m) c^2 \simeq 4.274 \text{ MeV},$$

ed è il valore di energia cinetica totale acquisita dai due frammenti. La conservazione della quantità di moto impone che l'energia non è divisa in modo arbitrario, ma in modo inversamente proporzionale alle masse, e quindi:

$$E_\alpha = \frac{A-4}{A} Q \simeq 4.20 \text{ MeV}$$

cio'è il nucleo residuo rimane praticamente a riposo.  
(nel limite di  $A$  grande, come questo esempio)



La quantità di moto iniziale è pari a 0 (nucleo fermo). Pertanto la somma delle quantità di moto finali vale anche zero:

$$0 = \vec{P} + \vec{p} \Rightarrow 0 = M\vec{V} + m\vec{v} \Rightarrow MV = mv$$

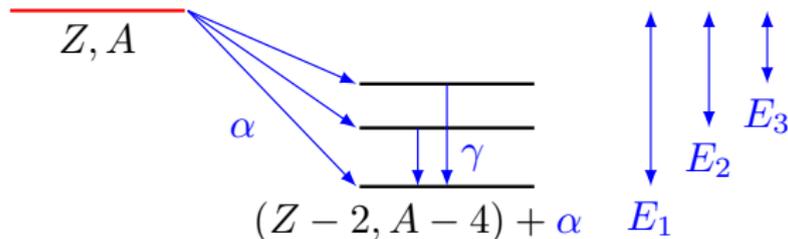
L'energia cinetica:

$$Q = \frac{1}{2}MV^2 + \underbrace{\frac{1}{2}mv^2}_{E_\alpha} \Rightarrow \dots E_\alpha = \frac{M}{m+M}Q$$

Lo spettro energetico della particella  $\alpha$  non è in generale costituito da un solo valore.

È possibile che il decadimento, invece di popolare lo stato fondamentale del nucleo residuo, vada a popolare stati eccitati.

Questi decadono immediatamente emettendo radiazione elettromagnetica. Il processo è espresso come  $(\alpha, \gamma)$



$\alpha$  con energie diverse ( $E_1, E_2, E_3, \dots$ ) da un'unica sorgente

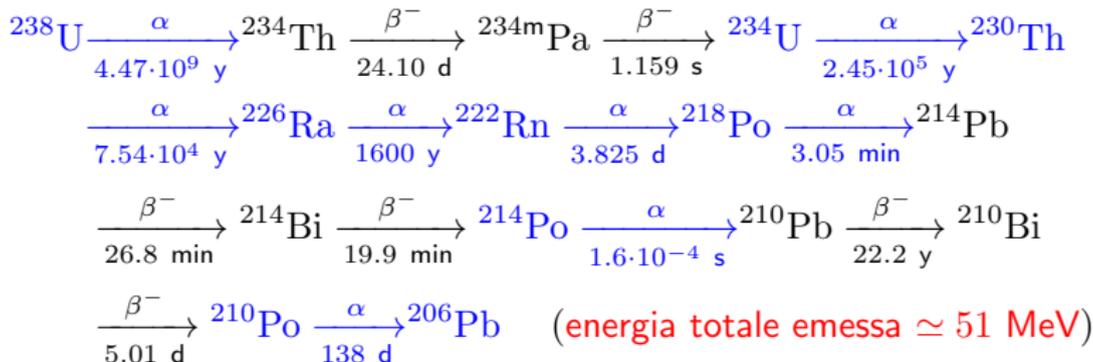
Il decadimento  $\alpha$  è tipico degli elementi oltre il Piombo.  
In generale, i nuclei figli (residui) sono a loro volta radioattivi.

➤ **Catene radioattive.**

I numeri di massa possibili differiscono per multipli di 4

- $A = 4n$ . Catena del Torio (inizia  $^{232}\text{Th}$ )
- ✗  $A = 4n + 1$ . Catena del Neptunio (inizia  $^{237}\text{Np}$ )
- $A = 4n + 2$ . **Catena del Uranio (inizia  $^{238}\text{U}$ )**
- $A = 4n + 3$ . Catena del Actinio (inizia  $^{235}\text{U}$ )

## Riprendiamo la catena del Uranio:



A questa catena appartiene il Radon-222, a cui è dovuta gran parte della dose natura assorbita dall'ambiente. È l'unico elemento gassoso nella catena, che riesce pertanto ad entrare nell'atmosfera. Essendo un gas pesante, tende ad accumularsi nelle aree bassi o interrati. Poi viene inalato, e decade secondo processi  $\alpha$ , quindi danneggiando i tessuti polmonari.

Geiger e Nuttall notarono una correlazione tra l'energia della particella  $\alpha$  emessa e la probabilità che il decadimento avvenga

Isotopo	$E_\alpha$ (MeV)	$t_{1/2}$
$^{232}\text{Th}$	4.01	$1.4 \cdot 10^{10}$ y
$^{230}\text{Th}$	4.69	$8 \cdot 10^4$ y
$^{241}\text{Am}$	5.64	433 y
$^{230}\text{U}$	5.89	20.8 d
$^{220}\text{Rn}$	6.29	56 s
$^{215}\text{Po}$	7.53	1.8 ms

La probabilità di decadimento ( $\lambda$ ) è inversamente proporzionale al tempo di dimezzamento ( $t_{1/2}$ ). È chiaro quindi che una minore energia di decadimento significa un maggiore  $t_{1/2}$  e perciò minore  $\lambda$ .

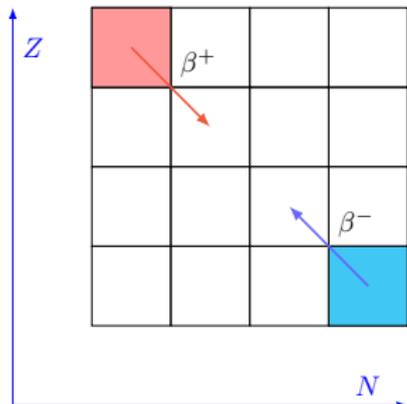
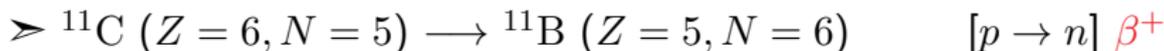
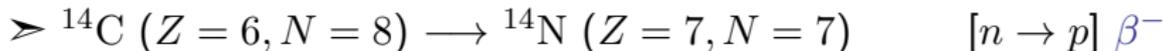
Differenze di più di 20 ordini di grandezza al solo raddoppiare dell'energia!!



## Decadimenti $\beta$

Dovuto alle interazioni deboli. Sono trasformazioni, all'interno del nucleo, di un neutrone in un protone o viceversa, con  $A$  costante.

Esempi:

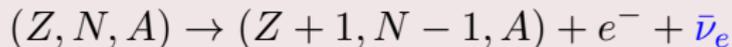


Per conservazione della carica totale, il processo  $\beta^-$  accade con l'emissione di un elettrone ( $e^-$ ).

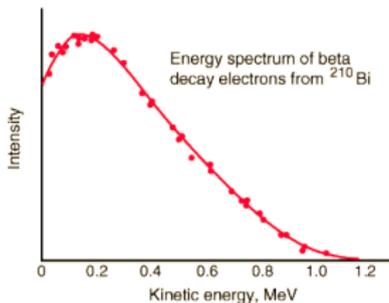
Invece il processo  $\beta^+$  accade con l'emissione di un positrone ( $e^+$ ).

$\beta^-$  e  $\beta^+$  sono favorevoli allo spostamento verso la valle di stabilità.

## Processo $\beta^-$



La particella  $\bar{\nu}_e$  è detta **antineutrino elettronico**, e la sua presenza è in grado di spiegare lo spettro degli elettroni uscenti. Se l'elettrone venisse emesso da solo, l'energia del decadimento sarebbe divisa in modo ben preciso (come nel decadimento  $\alpha$ ). Invece **si osserva che, in ogni singolo decadimento, elettrone e antineutrino si dividono in modo diverso l'energia a disposizione.**



L'energia minima è 0 ( $\bar{\nu}_e$  prende tutto)

L'energia massima è il totale a disposizione ( $\bar{\nu}_e$  prende 0)

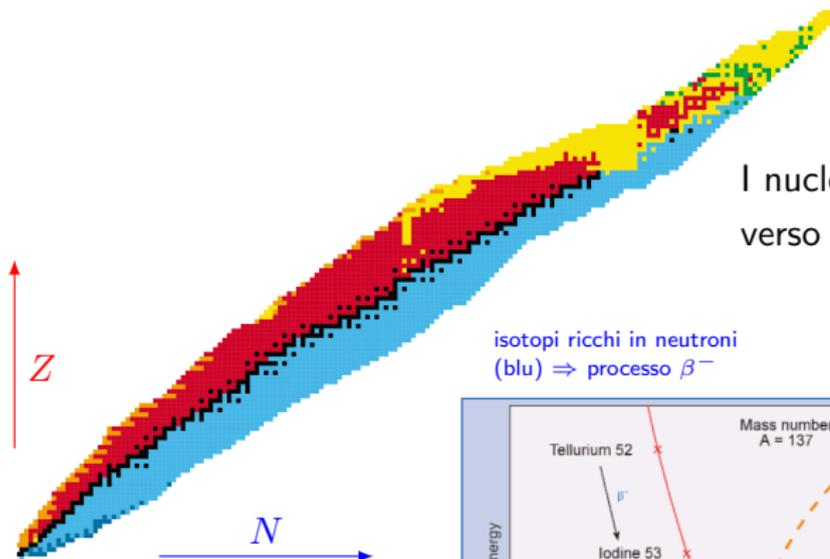
L'energia media è circa pari ad  $1/3$  di quella massima.

## Esempi di decadimento $\beta^-$ :

Iniziale	Residuo	$E$ (MeV)	$t_{1/2}$
$^3\text{H}$	$^3\text{He}$	0.019	12.3 y
$^{14}\text{C}$	$^{14}\text{N}$	0.156	5730 y
$^{60}\text{Co}$	$^{60}\text{Ni}$	2.820	3.27 y
$^{131}\text{I}$	$^{131}\text{Xe}$	0.970	8.0 d
$^{137}\text{Cs}$	$^{137}\text{Ba}$	1.170	30 y
$^{192}\text{Ir}$	$^{192}\text{Pt}$	1.460	73.8 d

A differenza del decadimento  $\alpha$ , non sembra di esserci relazione tra energia di decadimento  $\beta$  e probabilità (o tempo) di decadimento.

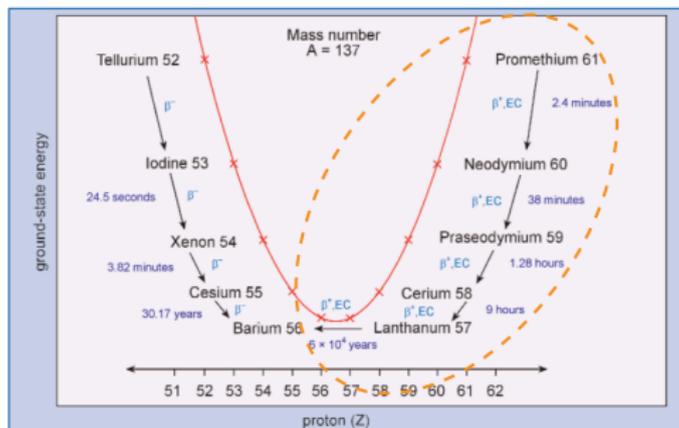
La probabilità che un processo  $\beta$  avvenga (essendo energeticamente possibile) è legato alla natura degli stati iniziale e finale. In generale è tanto maggiore quanto il sistema si allontana dalla stabilità.



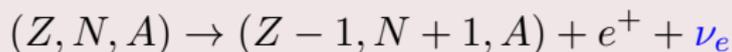
I nuclei “cadono”  
 verso l'interno della valle

isotopi ricchi in neutroni  
 (blu)  $\Rightarrow$  processo  $\beta^-$

isotopi ricchi in protoni  
 (rosso)  $\Rightarrow$  processo  $\beta^+$



## Processo $\beta^+$



Emissione di un **positrone** ( $e^+$ ) e un **neutrino elettronico** ( $\nu_e$ ). Processo simmetrico al decadimento  $\beta^-$  ma partendo da nuclei ricchi in protoni.

Iniziale	Residuo	$E$ (MeV)	$t_{1/2}$
$^{11}\text{C}$	$^{11}\text{B}$	1.980	20 m
$^{18}\text{F}$	$^{18}\text{N}$	1.660	109 m
$^{123}\text{I}$	$^{123}\text{Te}$	1.230	13.2 h

In generale hanno un tempo di dimezzamento piccolo, ottimo per il campo medico (ma devono essere prodotti in laboratorio).

Esiste un processo che porta allo stesso residuo (e che perciò compete con il processo  $\beta^+$ ) e detto **cattura elettronica (EC)**.



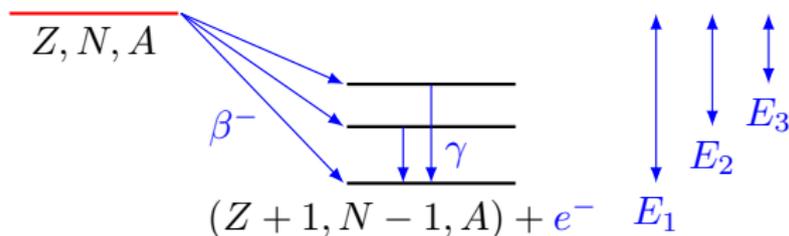
Energeticamente,  $\beta^+$  e EC sono processi diversi. Nel processo  $\beta^+$ , la creazione del positrone si porta via parte dell'energia guadagnata nel decadimento, mentre nella EC un'elettrone scompare e la sua energia di massa viene messa a disposizione.

➤ Il processo  $\beta^+$  è energeticamente più costoso della EC.

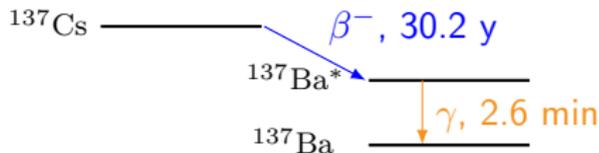
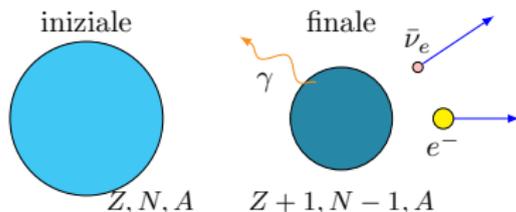
Alcuni nuclei possono decadere tramite EC ma non  $\beta^+$   
(esempio:  ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$ )

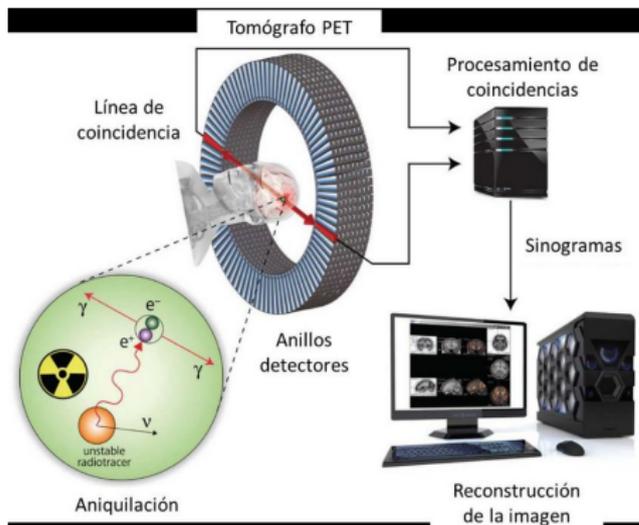
La lacuna lasciata dall'elettrone catturato viene colmata a un elettrone proveniente dagli orbitali atomici superiori, e quindi il processo EC è in generale accompagnato dall'emissione di un raggio X.

Analogamente al decadimento  $\alpha$ , i processi  $\beta^\pm$  possono popolare stati eccitati nel nucleo figlio, con un successivo decadimento di tipo elettromagnetico:  $(\beta, \gamma)$



Ricordare che  $(E_1, E_2, E_3, \dots)$  in questo caso non è un valore fisso, ma l'energia media degli elettroni.





## Tecnica PET

### *Positron Emission Tomography*

Un radiofarmaco con basso contenuto di isotopi radioattivi  $\beta^+$  (es.  $^{11}\text{C}$ ,  $^{18}\text{F}$ ) viene iniettato nel paziente, sostanza che si accumula nei tessuti malati.

I positroni prodotti del decadimento incontrano elettroni nei tessuti e si annichilano.

- **Annichilazione**  $\Rightarrow$  due fotoni da 0.511 MeV in direzione opposta.
- **Anello di rivelatori**. Se  $\Delta t < 1\mu\text{s}$ , si assume che i due fotoni provengano dallo stesso decadimento.
- Individuando più coppie di fotoni è possibile **determinare il punto in cui si trovano gli elementi radioattivi**.

## Radiazione elettromagnetica

Es.: onde radio, onde per la telefonia mobile, microonde, radiazioni ottiche, raggi X, raggi  $\gamma$ .

Si differenziano solo per l'origine (e la frequenza) che le caratterizza.

Onda = variazione periodica nello spazio e nel tempo di una quantità:

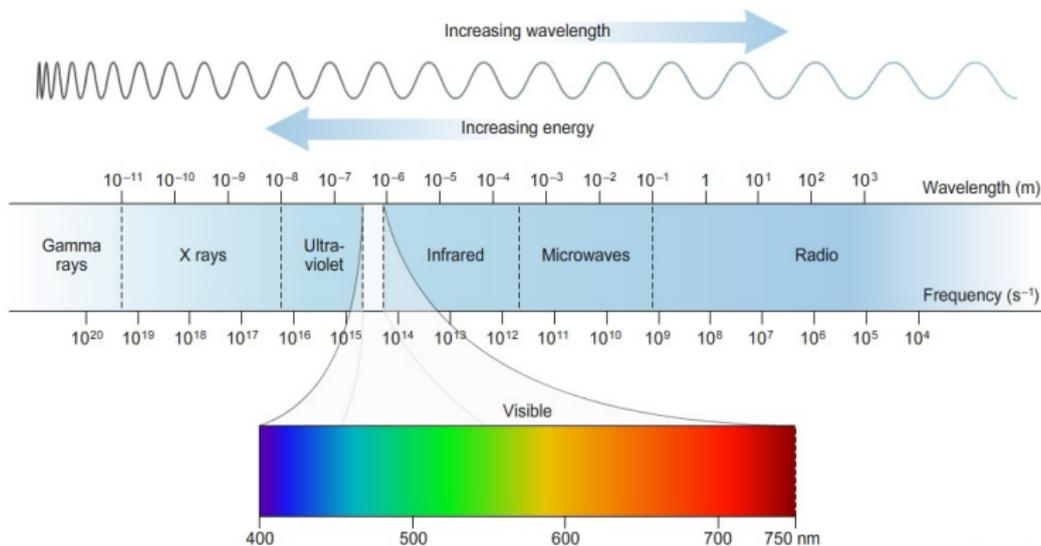
- spostamento da una posizione di equilibrio nel caso di onde meccaniche
- valore del campo elettromagnetico nel caso di onde luminose

- **Frequenza  $\nu$** : numero di periodi per unità di tempo ( $\text{Hz}=\text{s}^{-1}$ )
- **Lunghezza d'onda  $\lambda$** : distanza spaziale tra due fronti d'onda (m)

$$\lambda\nu = V \quad \text{velocità di propagazione}$$

Onde elettromagnetiche nel vuoto:  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s (velocità della luce)

Le lunghezze d'onda delle onde elettromagnetiche variano da valori dell'ordine del m (per le onde radio), ai  $\mu\text{m}$  (per le onde visibili), ai  $10^{-8}$  -  $10^{-13}$  m per raggi X e  $\gamma$ .



© Sapling Learning

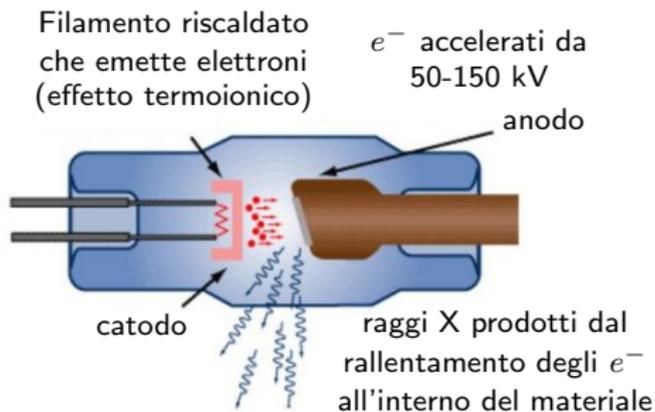
( $E = h\nu$  energia tanto maggiore quanto maggiore sia la frequenza!)

## Raggi X

Si originano attraverso **interazioni atomiche**, esterne al nucleo.

➤ Lunghezze d'onda in pm o  $\mu\text{m}$ . Energie dell'ordine del eV o keV

Prodotti ad esempio in un **classico tubo a raggi X**, dalla conversione in radiazione elettromagnetica di parte dell'energia cinetica di elettroni accelerati tramite una differenza di potenziale.

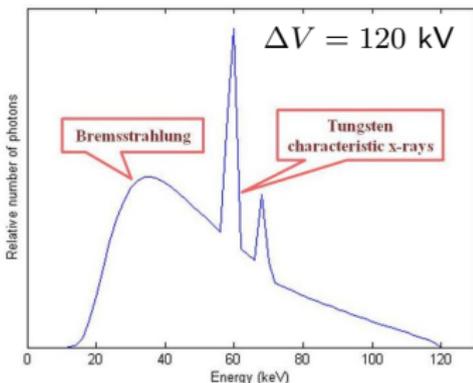


$$d \simeq 1\text{-}2 \text{ cm}$$

$$E_e = e\Delta V = 50\text{-}150 \text{ keV}$$

Il fascio colpisce l'anodo (tungsteno), gli  $e^-$  penetrano nel materiale e si rallentano per interazione con altre cariche (**radiazione di *bremsstrahlung***, frenamento).

## Spettro di un tubo a raggi X in tungsteno



### Bremmstrahlung

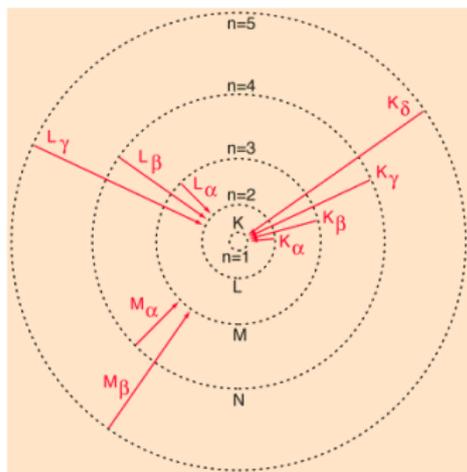
L'energia massima avviene se gli  $e^-$  perdono tutta la loro energia cinetica.

C'è anche un'energia minima, necessaria per arrivare all'anodo.

Gli elettroni possono anche colpire altri  $e^-$  del materiale  $\Rightarrow$  eccitazione attraverso rimozione di  $e^-$  dagli orbitali atomici K,L,M,...

La lacuna (o buco) lasciata viene colmata da un'elettrone in un orbitale superiore, con rilascio sotto forma di fotone della differenza di energia.

Questo dà origine alla **radiazione X caratteristica del materiale**.



Picco principale  $K_{\alpha}$ :

un  $e^{-}$  viene rimosso dall'orbitale K. Il buco è poi riempito da un  $e^{-}$  dell'orbitale L.

**Tungsteno:** energie di legame degli orbitali K, L e M pari a 69.5, 11.5 e 2.5 keV. L'energia del raggio X sarà quindi  $69.5 - 11.5 = 58$  keV.

I raggi X caratteristici sono utilizzati per evidenziare la presenza di particolari elementi in un materiale.

Ad esempio la tecnica **PIXE** (*Proton-induced X-ray emission*) usa un fascetto di protoni che induce l'emissione di raggi X da un materiale, e la corrispondente radiazione è analizzata in energia (i valori dei picchi sono noti elemento per elemento).

## Raggi $\gamma$

Si originano attraverso **interazioni nucleari**.

➤ Lunghezze d'onda  $<$  pm. Energie dell'ordine del MeV.

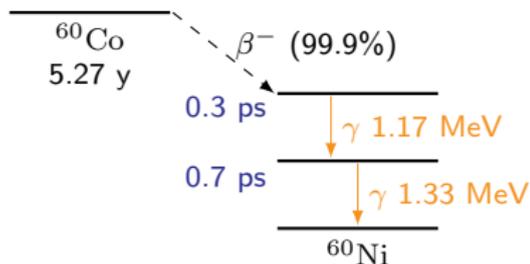
Le transizioni elettromagnetiche nei nuclei avvengono in **tempi molto brevi**. Non possono esistere ancora in natura sorgenti diretti di raggi  $\gamma$ , come nel caso di radiazione  $\alpha$  e  $\beta$  a tempi molto più lunghi.

➤ **I raggi  $\gamma$  naturali vengono prodotti come laterali di decadimento  $\alpha$  o  $\beta$  che vadono a popolare stati eccitati dei nuclei figli** (processi  $(\alpha, \gamma)$ ,  $(\beta, \gamma)$ ).

**Esempio di radiazione  $\gamma$ :  $^{60}\text{Co}$**

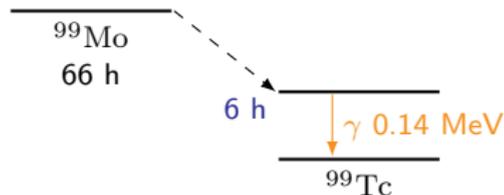
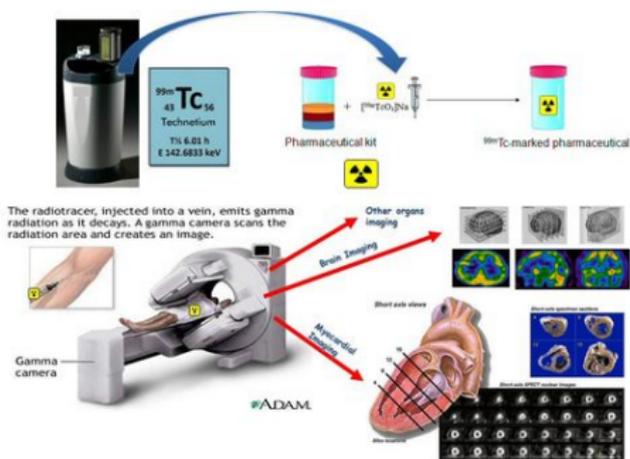
Il  $t_{1/2}$  è sufficiente perché la sorgente resti attiva per un tempo abbastanza lungo da essere utilizzata.

Dopo il decadimento  $\beta^-$ , i raggi  $\gamma$  sono emessi quasi istantaneamente.



Altro isotopo molto utilizzato come sorgente ( $\beta$ ,  $\gamma$ ) è il  $^{99}\text{Mo}$

Decade nel isotopo metastabile del tecnezio  $^{99m}\text{Tc}$ , utilizzato come tracciante radioattivo nella tecnica **SPECT** (Single Photon Emission Computerized Tomography).



Il  $t_{1/2} = 6 \text{ h}$ , e l'emivita biologica di  $\sim 1$  giorno, permettono di fare scansioni mantenendo bassa l'esposizione totale dei pazienti.

Dobbiamo comunque parlare di come rilevare la radiazione! In particolare, capire come interagisce la radiazione (sia corpuscolare che elettromagnetica) con la materia.

## Radiazione neutronica

Neutroni possono essere prodotti attraverso altri processi nucleari.

Ad esempio, un fascio di raggi  $\gamma$  con  $E > 1.6$  MeV può rompere i nuclei di  ${}^9\text{Be}$ , con l'emissione di un neutrone e due particelle  $\alpha$ .

I neutroni così ottenuti possono indurre processi di fissione. Nel caso dell'uranio-235, la reazione crea a sua volta nuovi neutroni, che iniziano una catena di fissioni utilizzata nei reattori nucleari.

Particelle neutre come i neutroni interagiscono molto poco con la materia e di conseguenza, la loro gestione, il loro controllo e il loro assorbimento costituiscono un problema molto più delicato che quello delle particelle cariche (come i prodotti dei decadimenti  $\alpha$  e  $\beta$ ) o la radiazione  $\gamma$ .

- 4 Tipi di decadimenti e associate radiazioni
- 5 Interazione delle radiazioni con la materia**
- 6 Dosimetria

Finora...

- Origine della radiazione (il nucleo atomico)
- Tipi di radiazione
- Leggi che regolano i processi radioattivi

## Fenomeni dell'interazione della radiazione con la materia? (in particolare con la **materia biologica**)

Caratteristica più notevole: **trasporto di energia**.

➤ **Interazione = cessione di parte o tutta l'energia alla materia**

- Particelle ( $\alpha, \beta, n$ ): energia cinetica, viene persa nel frenamento
- Fotoni ( $X, \gamma$ ): energia elettromagnetica, che scompare

⇒ **processi di ionizzazione** (atomica o molecolare)

## (Riassunto ionizzazione)

Energia di ionizzazione atomica o molecolare ( $E_{\text{ion}} \sim \text{eV}$ )

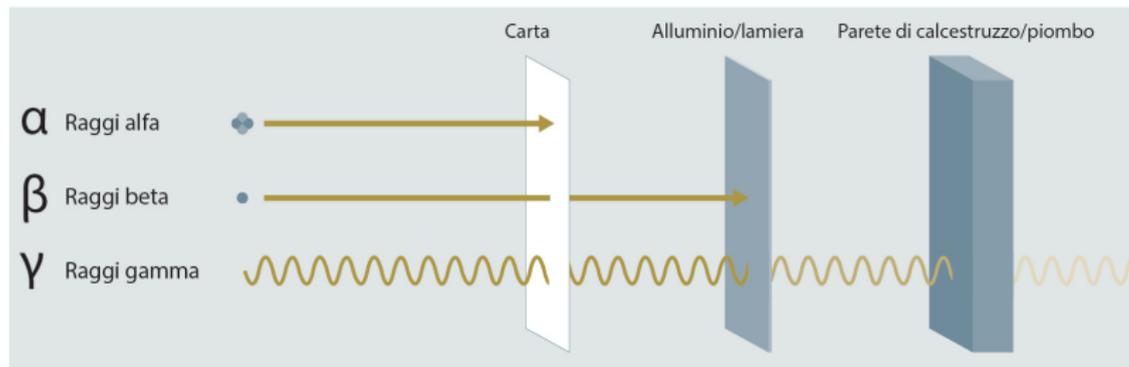
- Radiazione **non ionizzante** ( $E < E_{\text{ion}}$ ): cessione di energia di tipo termico (ad es: radiazione luminosa o ultravioleta; onde radio).
- Radiazione **ionizzante** ( $E > E_{\text{ion}}$ ): corpuscolari ( $\alpha, \beta$ ) ed elettromagnetiche (a partire da frequenze di raggi X o  $\gamma$ ). Producono la rimozione di elettroni del materiale, causando danni a livello cellulare.

La radiazione corpuscolare è detta **direttamente ionizzante**. Invece, la radiazione elettromagnetica produce **ionizzazione indiretta** (mette in moto particelle a loro volta ionizzanti).

➤ A parità di energia, **non tutte le radiazioni hanno la stessa efficienza di ionizzazione** (probabilità che venga assorbita).

## Capacità di penetrazione / assorbimento

Penetrazioni di vari tipi di radiazione



Schema: KEYSTONE, fonte: IFSN

Le particelle cariche più pesanti sono più facilmente assorbite.

Un foglio di carta può essere sufficiente a bloccare un fascio di  $\alpha$  di qualche MeV, mentre i raggi X e  $\gamma$  attraversano con buona probabilità distanze come quella di un corpo umano.

Spesso il **processo di assorbimento di radiazione** da parte di un materiale viene **caratterizzato** soltanto dalla **lunghezza del percorso**.

Il **possibile danno** causato dalla radiazione **dipende non solo dall'energia ceduta ma anche (e soprattutto) dal meccanismo e della velocità con cui l'energia viene ceduta**.

➤ È importante **conoscere i diversi meccanismi che danno luogo all'interazione** e al possibile assorbimento del materiale.

Consideriamo 3 casi:

- Particelle cariche pesanti ( $\alpha$ , protoni, ioni ...)
- Particelle cariche leggere ( $\beta$  elettroni)
- Fotoni (raggi  $\gamma$ )

## Assorbimento di particelle cariche pesanti ( $\alpha$ , ioni)

Meccanismo: urti di tipo Coulombiano con gli elettroni del materiale.

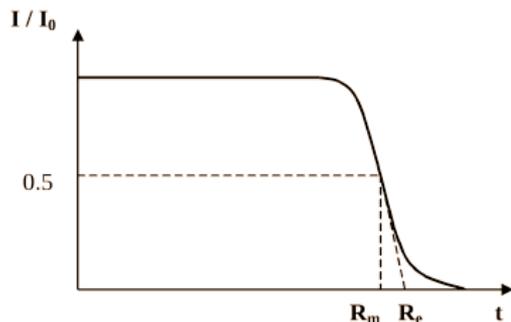
➤ Eccitazioni atomiche (con passaggio ad un livello elettronico superiore) o espulsione dell'elettrone dal atomo (ionizzazione).

- Il moto del ione è solo leggermente variato e le traiettorie saranno approssimativamente rettilinee.
- L'energia persa nel singolo urto è minuscola ( $\sim 1/500$  del totale). Sono necessari urti con tanti elettroni prima di perdere tutta l'energia cinetica.
- Per ogni ione, il numero di urti e la strada percorsa nel materiale saranno molto simili tra loro.

Dato un fascio di particelle cariche pesanti con la stessa energia, tutte saranno in grado di penetrare un certo spessore del materiale prima di fermarsi, poiché le traiettorie sono tutte appross. uguali.

### Range (percorso)

Distanza percorsa all'interno del materiale. Dipende dall'energia delle particelle, dalla loro massa e dal materiale stesso.



Si può definire il range come  $R_m$ , spessore che dimezza l'intensità del fascio; oppure  $R_e$ , spessore stimato che annulla il fascio.

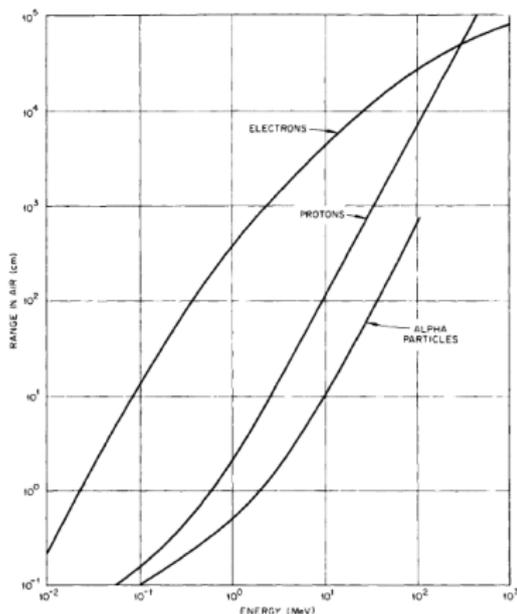
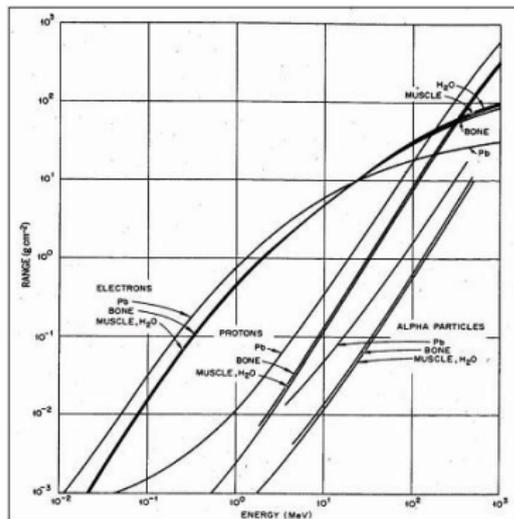


Fig. 5.1 Ranges in cm of protons, alpha particles, and electrons in air at STP. (Courtesy Oak Ridge National Laboratory, operated by Martin Marietta Energy Systems, Inc., for the Department of Energy.)



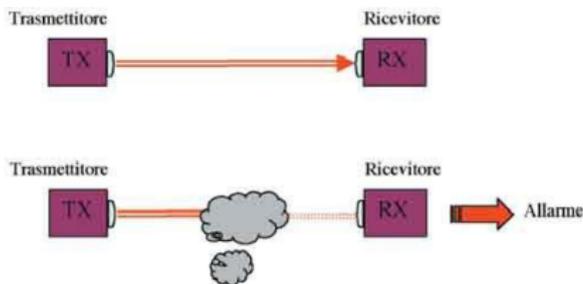
- Ogni particella ha un range caratteristico.
- Il range è diverso in diversi materiali.

In generale il **range** delle particelle cariche pesanti è **minore quanto più denso sia il materiale**.

**Esempio: rivelatori di fumo con sorgenti di  $^{241}\text{Am}$**

Emissione di particelle  $\alpha$  il cui flusso è continuamente monitorato da un rivelatore ad una distanza piccola tale che non vengano assorbite dall'aria.

➤ Il fumo rende l'aria più densa, bloccando il flusso di  $\alpha$  e facendo scattare il sistema di allarme.



Quantitativamente, il meccanismo di interazione si può descrivere introducendo il **potere frenante lineare (S)** come il rapporto tra la perdita di energia ( $-\Delta E$ ) e la distanza percorsa ( $\Delta x$ ) nel limite di piccoli intervalli:

$$S = - \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta x} = - \frac{dE}{dx}$$

- Rappresenta, punto per punto, **una misura dell'energia rilasciata localmente** (grado di ionizzazione).
- Unità: **elettronvolt al metro (eV/m)**; spesso anche keV/ $\mu\text{m}$ .
- **Varia a seconda del materiale, della carica e dell'energia iniziale della particella**, ma soprattutto **varia lungo la traiettoria durante il percorso di arresto**.

## Formula di Bethe-Bloch

$$S = 4\pi r_0^2 z^2 m_e c^4 N B / v^2$$

$r_0 = e^2 / (4\pi\epsilon_0 m_e c^2)$ : raggio classico dell'elettrone ( $\sim 2.81 \cdot 10^{-15}$  m)

$z$ : carica della particella incidente (es.  $z = 2$  per  $\alpha$ )

$m_e$ : massa dell'elettrone

$N$ : densità di atomi del materiale (atomi per unità di volume)

$v$ : velocità della particella incidente

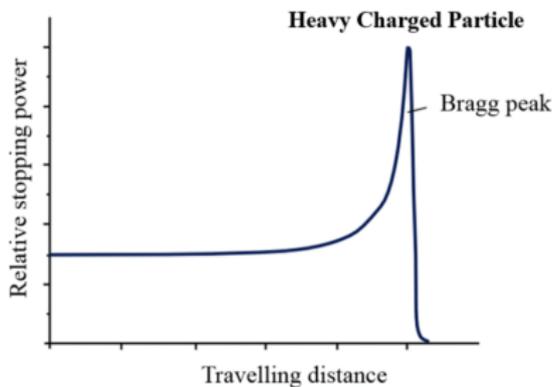
Dove  $B$  è il numero frenante:

$$B \approx Z \ln(2m_0 v^2 / J)$$

$Z$ : carica dell'assorbitore

$J$ : energia media di ionizzazione del materiale

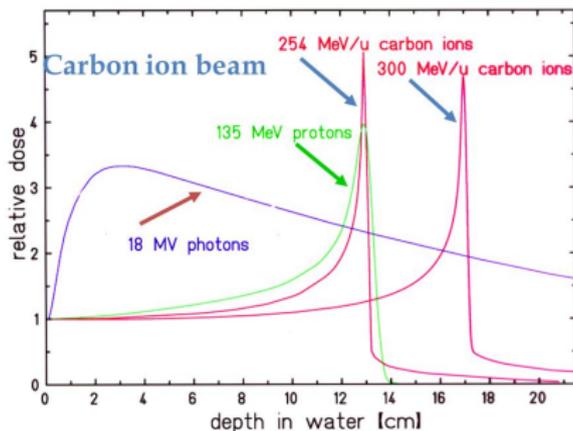
- Il potere frenante aumenta all'aumentare del numero atomico  $Z$  del materiale (ad es. il piombo è più efficace del alluminio).
- Varia con maggior potenza con la carica della particella incidente (ad es. a parità di altre condizioni, una particella  $\alpha$  ( $z = 2$ ) è assorbita quattro volte più di un protone ( $z = 1$ )).
- È inversamente proporzionale alla velocità della particella. Questo fa sì che il potere frenante sia massimo quando la particella sta per fermarsi, cioè alla fine del percorso saranno massime la ionizzazione e l'energia trasferita.

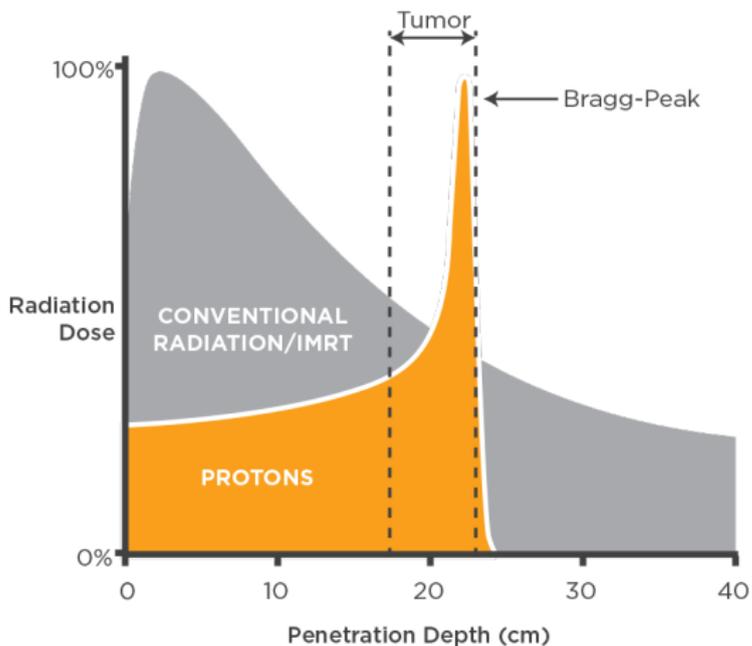


La forte variazione del potere frenante durante l'assorbimento è alla base dell'utilizzo di particelle cariche pesanti ( $\alpha$ , protoni, ioni come  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ...) per **terapia antitumorale**.

Bisogna una **cessione selettiva e localizzata della dose assorbita** (che è proporzionale al potere frenante).

Particelle con **picchi di Bragg** quanto più stretti possibile, con rapporto tra il picco e plateau iniziale grande. **Variazione del range con l'energia in corrispondenza con la distanza voluta.**





## Assorbimento di elettroni ( $\beta$ )

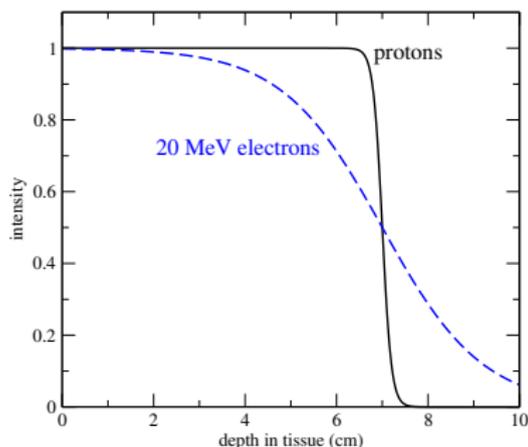
La differenza con il caso precedente è che la massa dell'elettrone incidente è uguale alla massa degli elettroni del materiale.

- L'urto provoca in generale una **deviazione della direzione dell'elettrone**. La traiettoria non è più rettilinea.
- I continui urti daranno origine ad un **percorso diverso elettrone per elettrone**.
- La **ionizzazione sarà più irregolare**, e non si osserverà un picco di Bragg.

Di conseguenza, l'intensità del fascio in funzione della penetrazione non si annullerà in questo caso in un breve intervallo, ma in modo più diffuso.

L'effetto sarà anche maggiore nel caso in cui, provenendo da un decadimento  $\beta$ , il fascio abbia già in partenza una certa distribuzione in energia.

Nel caso di  $e^-$  è molto più difficile definire un range, poiché non c'è un percorso caratteristico uguale per tutti.



Valori tipici:  $e^-$  di 1 MeV penetrano 420 cm di aria, 0.5 cm di tessuti molli, o 0.15 cm di alluminio (enormemente maggiori che nel caso delle  $\alpha$ )

La perdita di energia sarà anche minore (a parità di energia: minore  $m$  significa maggiore  $v$ , e sappiamo che  $S \sim 1/v^2$ ).

## ATTENZIONE:

➤ Non confondere questo meccanismo di assorbimento (urti fra elettroni incidenti ed elettroni del materiale → ionizzazione) con il processo di perdita di energia per emissione di radiazione per frenamento (*bremhsstrahlung*, introdotto in precedenza con i raggi X).

Per alte energie o alti valori di  $Z$  dell'assorbitore, il frenamento è decisamente competitivo. Questo causa una possibile differenza tra potere frenante lineare  $S$  (legato alla perdita di energia) e il trasferimento lineare di energia (LET, legato all'energia di fatto trasferita al materiale).

Questo determina la ionizzazione specifica e la dose assorbita (capitolo successivo).

## Assorbimento di radiazione elettromagnetica ( $\gamma$ )

A differenza delle particelle cariche, i fotoni subiscono istantaneamente un evento “drammatico”: vengono o completamente assorbiti o deviati con perdita di energia e cambio di frequenza.

L'interazione con la materia avviene attraverso 3 meccanismi:

- (1) l'assorbimento fotoelettrico,
- (2) lo scattering Compton,
- (3) la produzione di coppie.

- La dinamica della perdita di energia differisce decisamente del comportamento graduale che se ha per particelle cariche.
- Le forze in gioco sono ancora di tipo elettromagnetico.

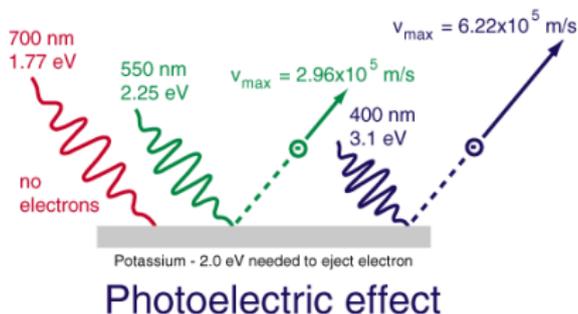
## L'effetto fotoelettrico

Quello che **prevale a bassi valori di frequenza (e di energia)**.

➤ **Cessione totale dell'energia del fotone ad un elettrone legato**, che acquisisce un'energia pari a:

$$E(e^-) = h\nu - E_{\text{legame}}$$

Pertanto,  $E_{\gamma} = h\nu = E_{\text{legame}}$  è una **soglia (energia minima necessaria)**



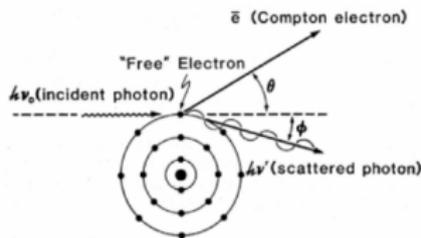
- La **probabilità** che il processo avvenga è **proporzionale** a  $Z^5 E_\gamma^{-3}$ .
  - Anche se l'energia del fotone fosse tale da permettere l'espulsione di più elettrone, **il processo coinvolge sempre un solo elettrone**.
  - **L'elettrone emesso** viene a sua volta assorbito e fermato dal mezzo, **producendo ulteriore ionizzazione** (perciò la radiazione  $\gamma$  è detta indirettamente ionizzante).
  - **La perdita di energia** della radiazione fotonica **si trasforma in energia assorbita di fatto dal mezzo**, in due *steps*.
  - La lacuna creata dall'elettrone espulso viene colmata da elettroni di orbitali superiori, con ulteriore **emissione di un raggio X**.
  - Questo può creare, di nuovo indirettamente, ulteriore ionizzazione.
- La catena può portare un'importante dose assorbita dal materiale.

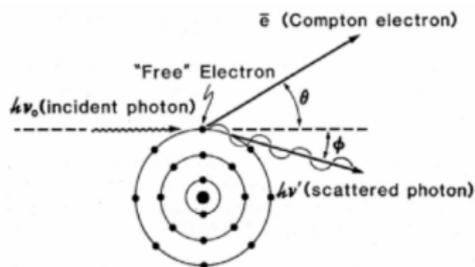
## La diffusione Compton

Poco probabile per valori bassi di frequenze (e di energia)

➤ **Interazione tra il fotone e un elettrone libero** (o così debolmente legato da poter essere considerato come libero).

Il fotone non scompare, invece viene sostituito da un'altro fotone di energia minore. Processo assimilabile ad un urto tra due palline, dato che il fotone (pur privo di massa) ha un'energia e una quantità di moto.





Il fotone deviato ha un'energia:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \phi)}$$

- La **variazione di frequenza** è maggiore quanto maggiore sia  $\phi$ . In particolare è massima per i fotoni difussi all'indietro ( $\phi = 180$  gradi). In questo caso è anche massima l'energia trasferita all'elettrone e, tramite ionizzazione secondaria, al mezzo.
- Per **frequenze piccole**, la variazione è anche molto piccola, e quindi l'assorbimento tramite diffusione Compton sarà minore.

## Produzione di coppie $e^-$ , $e^+$ .

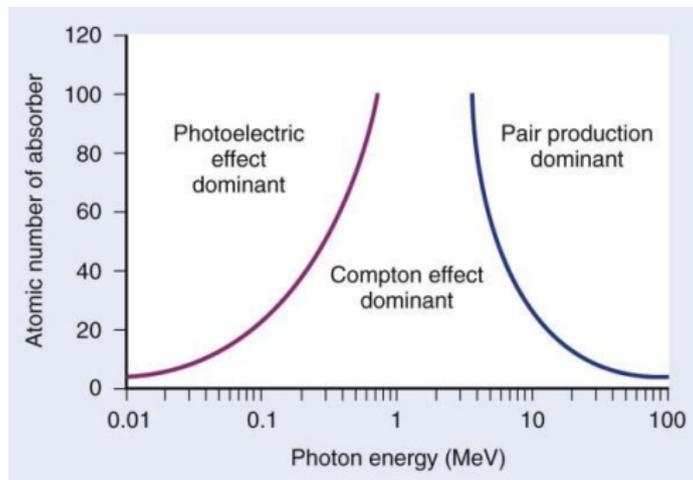
### Più probabile ad alta frequenza (ed energia)

➤ Un fotone di alta energia, interagendo con un nucleo, perde tutta la sua energia e **scompare, creando invece una coppia elettrone-positrone**.

La soglia in questo caso è  $E_\gamma > 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$ . Al di sopra, il processo diventa più probabile e domina a più alte energie.

- La **probabilità** che il processo avvenga è **proporzionale a  $Z$** .
- L'elettrone ( $e^-$ ) viene assorbito ionizzando nuovamente il mezzo.
- Il positrone ( $e^+$ ) tende ad annichilarsi con un altro elettrone, producendo una nuova coppia di fotoni  $\gamma$  che possono a loro volta essere assorbiti e proseguire la catena di cessione dell'energia iniziale.
- Come discusso per gli elettroni, non è detto che tutta l'energia persa venga assorbita localmente dal mezzo, e questo può portare a **differenze tra  $S$  e LET**.

Meccanismo più probabile a seconda dell'energia del fotone e del numero atomico del assorbitore:



➤ La prevalenza di un processo non significa che tutti i fotoni vengano assorbiti in quel modo. Ad esempio, in acqua ( $Z$  basso):

- fotoni di 0.01  $\Rightarrow$  95% fotoelettrico, 5% Compton
- fotoni di 100  $\Rightarrow$  84% coppie, 16% Compton

- Le particelle  $\alpha$  (e in grado meno quelle  $\beta$ ) di un certo fascio subiscono dinamiche simili tra loro. Questo è diverso per i fotoni.
- L'assorbimento dei fotoni da parte del mezzo avviene su base statistica. Ciascun fotone di un certo fascio verrà eventualmente assorbito o deviato dopo essere penetrato per distanze diverse nel mezzo.
- Possiamo dire che ciascun fotone ha la stessa probabilità di interagire (qualcuno lo farà subito, qualcuno dopo tempi e spazi lunghi).

$N(x)$ : numero di fotoni sopravvissuti alla profondità  $x$ . La sua riduzione:

$$\Delta N = -\mu N \Delta x,$$

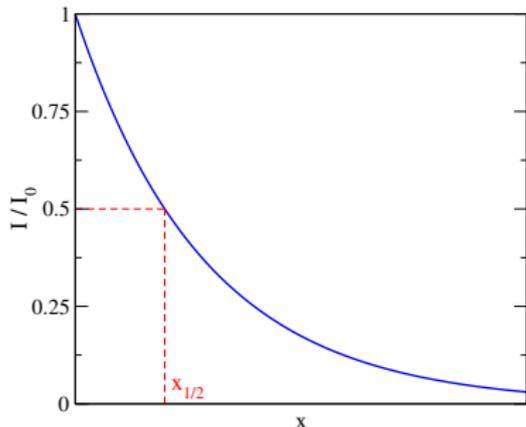
$\mu$ : **coefficiente lineare di attenuazione fotonica**, che rappresenta la probabilità per ciascun fotone di essere assorbito nell'unità di percorso (dimensioni di  $\mu$ : un inverso di lunghezza).

$$\text{Limite differenziale: } dN = -\mu N dx$$

Il numero di fotoni sopravvissuti, o *l'associata intensità del fascio*, sarà:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

in termini del coefficiente di attenuazione  $\mu$  e dell'intensità incidente  $I_0$ .



Andamento analogo alla legge del decadimento radioattivo.

**Spessore di dimezzamento**

$$x_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\mu}$$

dopo il quale l'intensità si riduce alla metà di quella incidente

$\mu$  dipende in generale dal materiale ma anche dalla frequenza del fascio.

### Esempio: raggi X su piombo e calcestruzzo

Vtaggio (kV)	$x_{1/2}$ (mm)	
	piombo	calcestruzzo
50	0.06	4.32
100	0.27	15.1
250	0.88	28.0
1000	7.90	44.5

### Esempio: decadimenti ( $\beta, \gamma$ ) del $^{192}\text{Ir}$ e $^{60}\text{Co}$

Sorgente	$E_\gamma$ (MeV)	$x_{1/2}$ (mm)				
		calcestruzzo	acciaio	piombo	tungsteno	uranio
$^{192}\text{Ir}$	0.316	41.0	12.7	4.8	3.3	2.8
$^{60}\text{Co}$	1.330	60.5	21.6	12.5	7.9	6.9

Il coefficiente di attenuazione lineare  $\mu$  e gli associati  $x_{1/2}$  dipendono fortemente dalla frequenza dei fotoni e dal materiale assorbitore.

➤ Ci sono **3 contributi**, uno per ogni meccanismo di assorbimento:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$

$\tau$ : associato all'**effetto fotoelettrico**

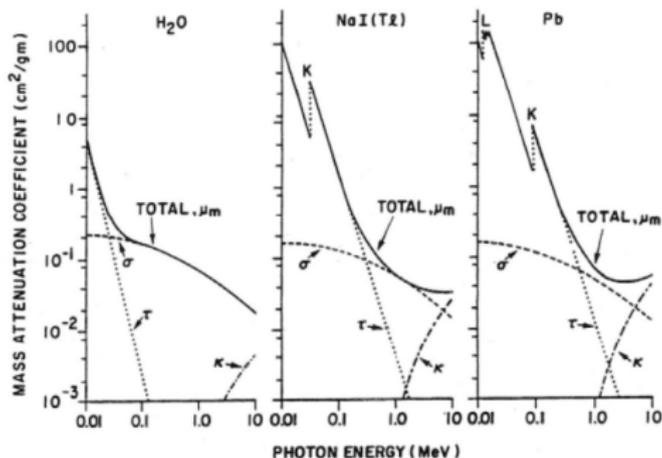
$\sigma$ : associato alla **diffusione Compton**

$\kappa$ : associato alla **produzione di coppie**

➤ Inoltre, si definisce un **coefficiente di attenuazione di massa**:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

per eliminare la dipendenza alla diversa densità  $\rho$  dei materiali.



- Sul **diverso assorbimento in funzione della densità** si basa la **tecnica radiografica X**: il fascio esce attenuato in modo diverso a seconda dei diversi tessuti attraversati e impressionerà in modo diverso una lastra fotografica (evidenziando ad esempio le ossa).
- **L'assorbimento diminuisce drasticamente all'aumentare dell'energia**. Ad esempio non è pensabile utilizzare raggi  $\gamma$  energetici al posto dei raggi X per radiografia, poiché sono poco assorbiti.
- **L'ordine di grandezza di  $\mu_m$  è simile per diversi mezzi**: con materiali più pesanti si raggiunge la stessa riduzione di intensità con spessori minori.

## Extra: assorbimento di neutroni ( $n$ )

In questo caso non gioca alcun ruolo diretto l'interazione elettromagnetica, poiché i neutroni sono privi di carica.

Possono interagire solo con i nuclei del materiale attraverso l'interazione forte, che è a raggio piccolo ( $\sim 10^{-15}$  m = fm).

- Il volume del nucleo è trascurabile rispetto al volume totale, perciò la probabilità che il neutrone interagisca sul proprio cammino con un nucleo è estremamente piccola.
- Lo spazio percorso dai neutroni nei mezzi sarà molto maggiore di quello relativo a particelle cariche di stessa energia. **Es: in acqua, 3cm per neutroni da 3 MeV, 14cm per neutroni da 10 MeV.**

I meccanismi di interazione dei  $n$  sono essenzialmente due:

- (1) **Urto elastico con un nucleo atomico** (domina per i **neutroni veloci**)
- (2) **Cattura del  $n$  da parte di un nucleo** (domina per i **neutroni lenti**)

Ovviamente, il processo (1) porta una riduzione dell'energia iniziale del  $n$ , che subisce un rallentamento. Dopodiché, quando l'energia si riduce a valori prossimi a zero, comincia il processo (2).

➤ Questo processo porta una trasformazione isotopica.

Es.: un protone del materiale cattura il neutrone, dando luogo all'isotopo dell'idrogeno con  $A = 2$ , ossia il deutone, che è stabile.

➤ In molti altri casi, il nuovo isotopo è instabile e decade successivamente attraverso processi  $\beta$  o  $(\beta, \gamma)$ .

Es.: il nucleo stabile  $^{23}\text{Na}$  cattura un neutrone, e si trasforma nell'isotopo instabile  $^{24}\text{Na}$ , che decade  $(\beta, \gamma)$  con  $t_{1/2} \approx 15$  ore.

In questo modo, la radiazione neutronica induce radioattività secondaria, processo detto in generale attivazione neutronica.

➤ La cattura può avvenire con simultanea espulsione di un protone. In quel caso  $A$  non cambia.

Es.: neutroni cosmici con l'azoto dell'aria.  $^{14}\text{N}$  diventa  $^{14}\text{C}$ , nucleo radioattivo usato per datazione.

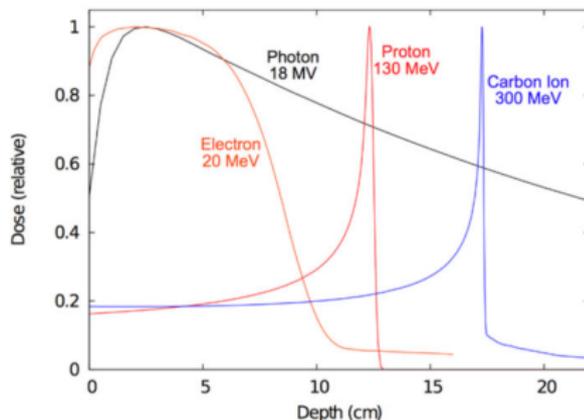
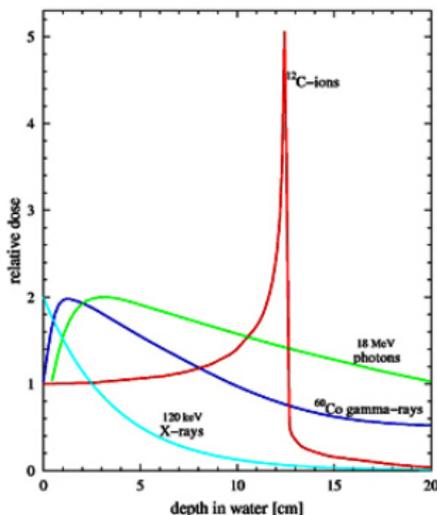
- 4 Tipi di decadimenti e associate radiazioni
- 5 Interazione delle radiazioni con la materia
- 6 **Dosimetria**

## Dose

Associata all'assorbimento di energia da parte di un mezzo in seguito all'assorbimento **locale\*** di radiazioni.

- Particelle  $\alpha$  o  $\beta$  progressivamente rallentate al passaggio attraverso il mezzo cui cedono tutta o parte della loro energia cinetica.
- Fotoni X o  $\gamma$  vengono assorbiti o diffusi, perdendo energia elettromagnetica che viene anche totalmente o in parte ceduta al mezzo.

\*: è importante conoscere se la radiazione deposita l'energia molto localmente oppure su un percorso lungo.



Al concetto di **potere d'arresto lineare  $S$**  (legato alla perdita di energia da parte della radiazione) viene affiancato quello di **trasferimento lineare di energia LET** (legato alla quantità di energia di fatto assorbita dal mezzo).

➤ LET è legato ai **danni biologici** causati dalla radiazione, che dipendono non tanto dall'energia totale perduta ma dalla **cessione locale di energia**.

Entrambe quantità  $S$  e LET hanno le stesse unità (keV/mm).

- L'assorbimento di  $\alpha$  (o ioni pesanti) è caratterizzato da una rapida cessione di energia in corrispondenza del picco di Bragg  $\Rightarrow$  radiazione ad alto LET.
- I fotoni invece tendono ad essere assorbiti e a depositare energia in modo più diluito  $\Rightarrow$  radiazione a basso LET.

radiazione	LET (keV/mm) in acqua
raggi X da 3 MeV	0.3
$\gamma$ da 1.3 MeV ( $^{60}\text{Co}$ )	0.3
raggi $\gamma$ da 250 MeV	3.0
$\beta$ da 0.6 MeV ( $^3\text{H}$ )	5.5
$\alpha$ da 5.3 MeV ( $^{210}\text{Po}$ )	110

La dose ( $D$ ) è definita come la quantità totale di energia assorbita per unità di massa (e quindi tiene conto della cessione locale):

$$D = \frac{\text{energia totale assorbita}}{\text{massa}}$$

- È indipendente dal tipo di radiazione, dal meccanismo di assorbimento, dallo spessore del materiale o dal tempo durante il quale è avvenuto l'assorbimento.
- Unità: **Gray (Gy)**, che rappresenta **Joule su chilogrammo (J/kg)**. Si usa anche il **rad** (radiation absorbed dose), corrispondente ad un assorbimento di 0.01 Joule per unità di massa. Di conseguenza,  $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ .

Per tener conto delle diverse capacità di provocare danni biologici si introduce un fattore di qualità detto **efficacia biologica relativa RBE**.

Radiazione di riferimento: raggi X da 200 keV  $\Rightarrow$  RBE = 1

Es.: RBE = 2 per un certo tipo di radiazione significa che ogni dose da 1 Gy è in realtà equivalente, dal punto di vista degli effetti biologici, ad una dose di 2 Gy di raggi X da 200 keV.

radiazione	RBE
raggi X da 200 keV	1
raggi $\gamma$	1
raggi $\beta$	1 - 1.7
protoni	10

radiazione	RBE
neutroni lenti	4-5
neutroni veloci	10
raggi $\alpha$	10-20
ioni pesanti	20

Combinando la dose ( $D$ ) dovuta ad una certa radiazione e il fattore di efficacia biologica relativa (RBE) si ottiene l'equivalente di dose ( $H$ ):

$$H = D \cdot \text{RBE}$$

- A differenza della dose  $D$ , l'equivalente di dose  $H$  è una stima diretta del danno biologico subito dal mezzo.
- Unità: **Sievert (Sv)**. Una radiazione con dose pari ad 1 Gray e RBE uguale a 1 dà origine ad un equivalente di dose di  $H = 1$  Sv.

La stessa dose dovuta ad un fascio di protoni ( $\text{RBE} = 10$ ) produce una dose equivalente 10 volte maggiore, 10 Sv.

In analogia con il rad (100 rad = 1 Gray), si definisce il **rem** (röntgen\* equivalent in man). 1 Sv = 100 rem.

\* il röntgen ( $R$ ) è associato alla quantità di ionizzazione, che è obsoleta.

Esempio: calcolo della dose e la dose equivalente totale assorbita in un anno da un uomo di 70 Kg per effetto delle radiazioni provocate dai nuclei di  $^{14}\text{C}$  contenuti nel corpo.

Per stimare la dose è necessario in generale:

- 1 conoscere la modalità di produzione della radiazione
- 2 stimare l'attività, ossia il numero di decadimento al secondo
- 3 conoscere l'energia della radiazione emessa
- 4 stimare delle modalità di assorbimento
- 5 conoscere il fattore di efficacia biologica della radiazione

(1)  $^{14}\text{C}$  decade  $\beta^-$ , ossia emette elettroni e antineutrini.

I parametri della radiazione sono  $E = 156 \text{ keV}$  e  $t_{1/2} = 5730 \text{ anni}$ .

(2) Dobbiamo valutare il numero di nuclei di  $^{14}\text{C}$  presenti nel corpo.

Sappiamo che il contenuto di carbonio è di circa 18%. Quindi su 70 Kg, abbiamo  $m(\text{C}) = 12.6 \text{ Kg}$ . Una mole di carbonio contiene 12 g. Quindi:

$$N[^{12}\text{C}] = 12600 \text{ g} \frac{1 \text{ mole}}{12 \text{ g}} \frac{6.022 \cdot 10^{23}}{1 \text{ mole}} = 6.32 \cdot 10^{26}$$

La abbondanza di  $^{14}\text{C}$  rispetto a quella di  $^{12}\text{C}$  è di 1 parte per bilione ( $1.2 \cdot 10^{-12}$ ). Perciò:

$$N = N[^{12}\text{C}] \cdot 1.2 \cdot 10^{-12} = 7.59 \cdot 10^{14}$$

Il numero di decadimenti al secondo, ossia l'attività:

$$A = \lambda N = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} N \approx 2910 \text{ s}^{-1}$$

che in un anno significa  $\approx 9.2 \cdot 10^9$  decadimenti in un anno.

(3) e (4) L'energia del decadimento  $\beta^-$  viene divisa fra  $e^-$  e  $\bar{\nu}_e$ . Solo l'elettrone verrà assorbito, mentre l'antineutrino se ne andrà indisturbato. In media gli elettroni prendono un terzo dell'energia a disposizione, e quindi  $E_e = 52 \text{ keV}$ . Tutta essa verrà assorbita dal corpo.

Nell'intero anno, l'energia totale assorbita sarà:

$$E_{\text{anno}} = 9.2 \cdot 10^9 E_e \approx 4.78 \cdot 10^{12} \text{ keV} = 4.78 \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

Questo vale  $7.7 \cdot 10^{-4} \text{ J}$  ( $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ). E la dose è:

$$D = \frac{\text{energia assorbita}}{\text{massa}} = \frac{7.7 \cdot 10^{-4} \text{ J}}{70 \text{ Kg}} = 0.000011 \text{ Gy} = 11 \mu\text{Gy}$$

(5) Stimando  $\text{RBE} = 1.5$ , la dose equivalente totale assorbita è:

$$H = \text{RBE} \cdot D = 16.5 \mu\text{Sv}$$

**Esempio:** Calcolare la dose e dose equivalente assorbita, in un minuto, da una persona di 70 Kg per effetto di una sorgente di  $^{99m}\text{Tc}$  con un'attività di 10 mCi, in una configurazione geometrica tale che solo l'uno per cento della radiazione  $\gamma$  venga emessa nella direzione della persona. Assumere che i raggi sono dimezzati al passaggio attraverso il corpo.

Il  $^{99m}\text{Tc}$  decade emettendo  $\gamma$  da 140 keV.

L'attività di 10 mCi corrisponde a  $3.7 \cdot 10^8$  decadimenti al secondo. Possiamo assumere che solo il 0.5% dei fotoni emessi verranno assorbiti localmente dal corpo. Quindi il numero di fotoni assorbiti è  $1.85 \cdot 10^6$  al secondo, oppure  $1.1 \cdot 10^8$  in un minuto.

Poiché ogni  $\gamma$  rilascia 140 keV, l'energia totale assorbita in un minuto sarà pari a  $1.54 \cdot 10^{13}$  eV, ossia  $2.5 \cdot 10^{-6}$  J. Quindi la dose in un minuto:

$$D = \frac{2.5 \cdot 10^{-6} \text{ J}}{70 \text{ Kg}} = 0.036 \mu\text{Gy} \quad \Rightarrow \quad H = 0.036 \mu\text{Sv}$$

## Dose mediamente assorbita

(in un anno, dovuta a cause naturali e artificiali)

### Radiazioni naturali:

- Dose dovuta a **processi di decadimento del Radon**, principalmente dall'inalazione dell'aria interna alle abitazioni e al successivo irraggiamento polmonare. Tipico valore in Italia  $\sim 2$  mSv/anno.
- **Altri radionuclidi** assorbiti dal corpo, **ad esempio attraverso il cibo**, come il  $^{40}\text{K}$ . Circa  $\sim 0.4$  mSv/anno
- **Raggi cosmici** ( $\gamma$  e protoni) che bombardano la terra dallo spazio. La dose è più importante a grandi altitudini (densità dell'aria). Es.: un volo Roma - New York andata/ritorno  $\sim 30$   $\mu\text{Sv}$

**Totale naturale:**  $\sim 3$  mSv/anno.

Ai radionuclidi naturali va sempre aggiunto il **contributo dai nuclidi prodotti artificialmente** (la radioattività è stata utilizzata da più di un secolo).

➤ In generale minore di quello naturale (più breve  $t_{1/2}$ ).

- **Test nucleari e reattori a fissione:**

$^{131}\text{I}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ .  $\sim 10^2 \mu\text{Sv/anno}$

- **Diagnostica medica. Es:**

radiografia dentale o torace  $\sim 0.1 \text{ mSv}$

mammografia  $\sim 0.7 \text{ mSv}$

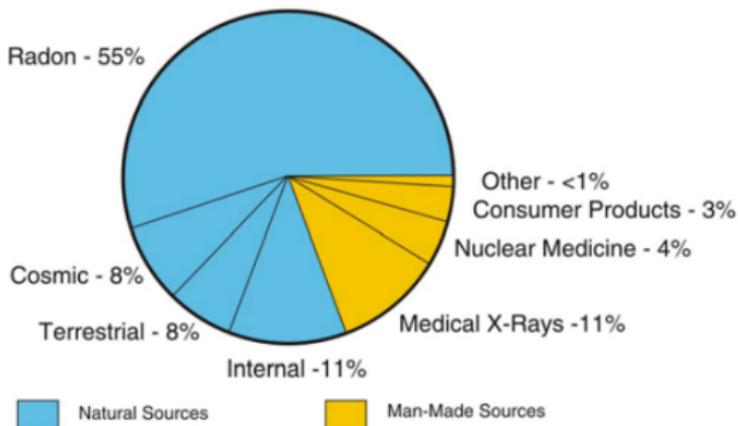
serie completa raggi X per diagnostica gastrointestinale  $\sim 3 \text{ mSv}$

**Stima totale mediata (rad. artificiali):  $\sim 0.6 \text{ mSv/anno}$ .**

Inizio rischio  $\sim 100 \text{ mSv}$

(1 singola seduta di radioterapia  $\sim 1500\text{-}2000 \text{ mSv}$ )

### Sources of Radiation Exposure in the United States\*



## Avvelenamento da radiazione: valori tipici

<b>Dose equiv. (<math>H</math>)</b>	<b>Effetti biologici</b>
1 Sv	Alterazioni temporanee dell'emoglobina
2-3 Sv	Nausea, perdita dei capelli, emorragie
4 Sv	Morte nel 50% dei casi entro 30 giorni
> 6 Sv	Sopravvivenza improbabile (15 giorni)

# GRAZIE

Incontro da fissare (chiarimenti, domande)

Test a risposta multipla

**Buon lavoro!**