Lezione 24
Il nucleo e la radiazione nucleare

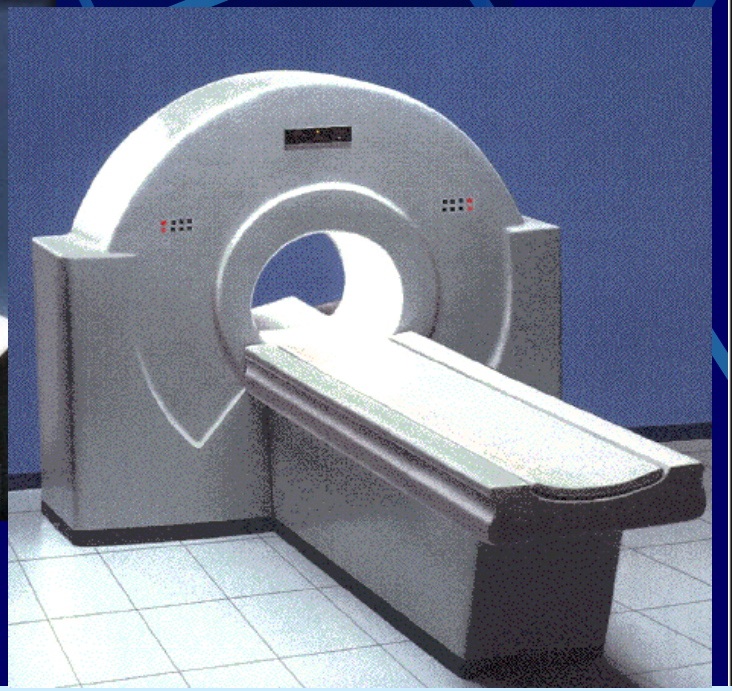
Ezio Maina

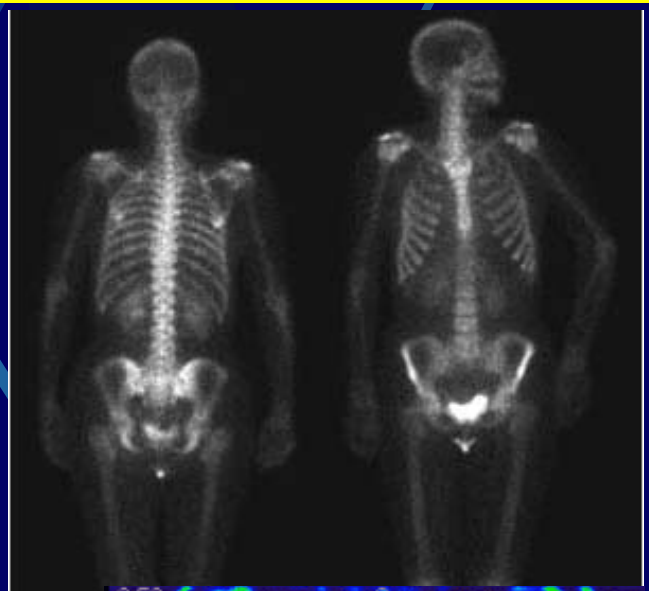
Corso di Laurea in Farmacia

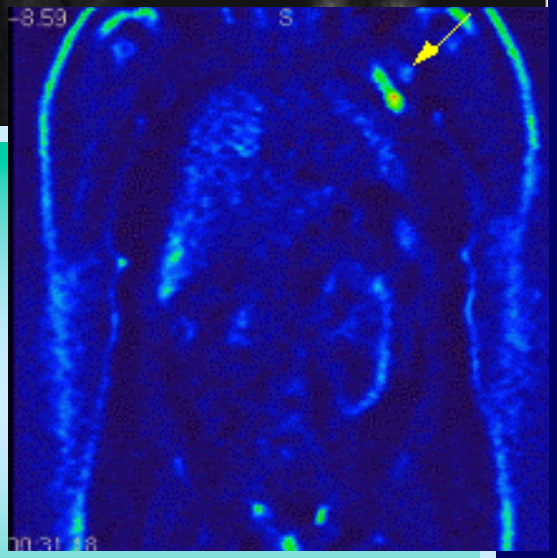
Anno accademico 2020 -2021

Corso di Fisica

La lezione di oggi







I decadimenti α, β, γ

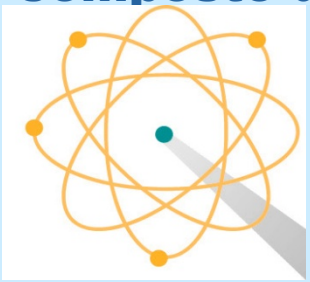
La legge del decadimento radioattivo

Interazione con la materia

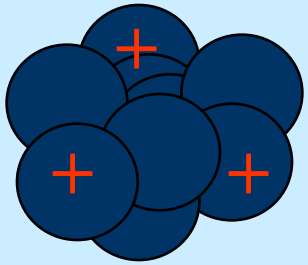
Utilizzo nella pratica clinica

- La radioattività
- I decadimenti α, β, γ
- La legge del decadimento radioattivo
- L'assorbimento della radiazione nella materia
- I radioisotopi in diagnostica
- La scintigrafia e la PET

Gli atomi hanno un nucleo composto di neutroni e protoni (nucleoni)



I nucleoni sono legati dalla forza nucleare forte (vedi di seguito)



Gli isotopi sono nuclidi con uguale Z e diverso A ($^{A}_{Z}X$)

(ad esempio, in natura il piombo è una miscela di $^{206}_{82}Pb$, $^{207}_{82}Pb$, $^{208}_{82}Pb$)

Radioattività

Cos'è una SOSTANZA RADIOATTIVA ?

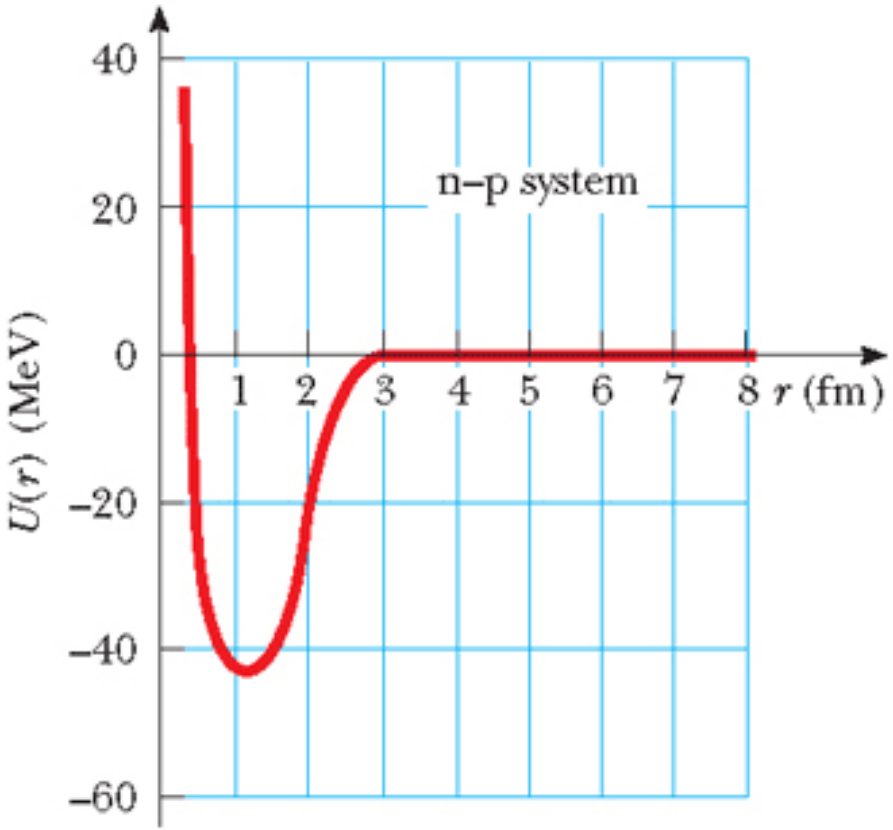
Una sostanza si definisce radioattiva se è costituita da atomi instabili che decadono

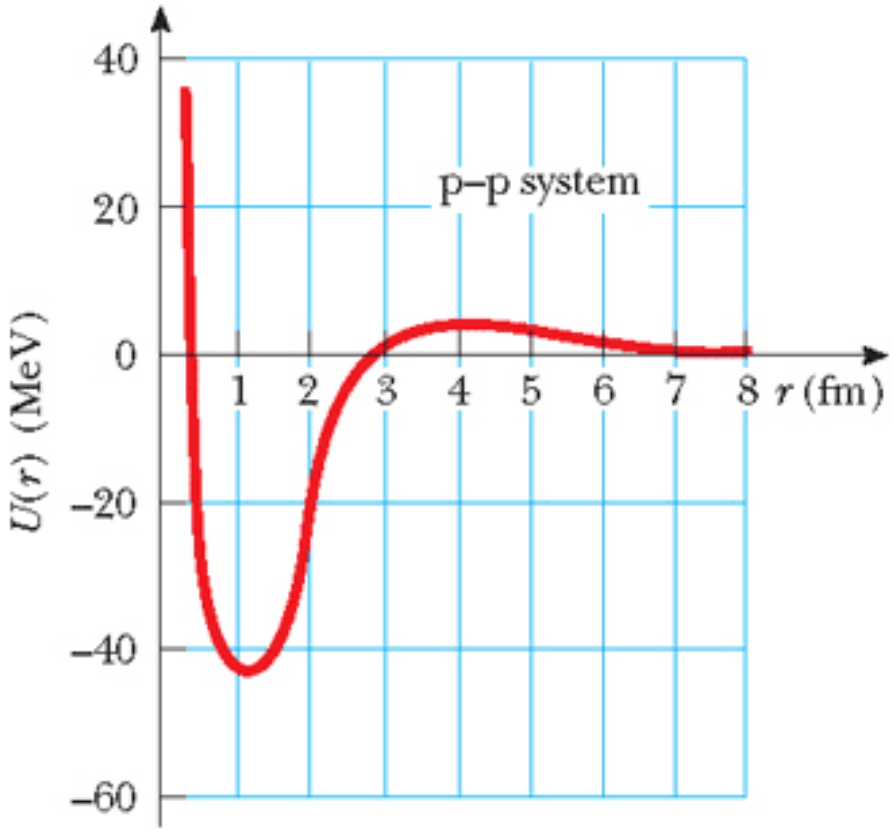
emettendo radiazioni

Sfruttando l'interazione di queste radiazioni con i diversi tessuti biologici è possibile ottenere informazioni diagnostiche o benefici terapeutici.

La terza forza: forza nucleare forte

- È la forza che tiene uniti i nuclei
  - Agisce a corto raggio (1–2 $\cdot 10^{-15}$ m = 1-2 femtometri = 1-2 fermi)
  - È attrattiva
  - Agisce nello stesso modo tra neutroni/protoni
  - Non agisce sugli elettroni

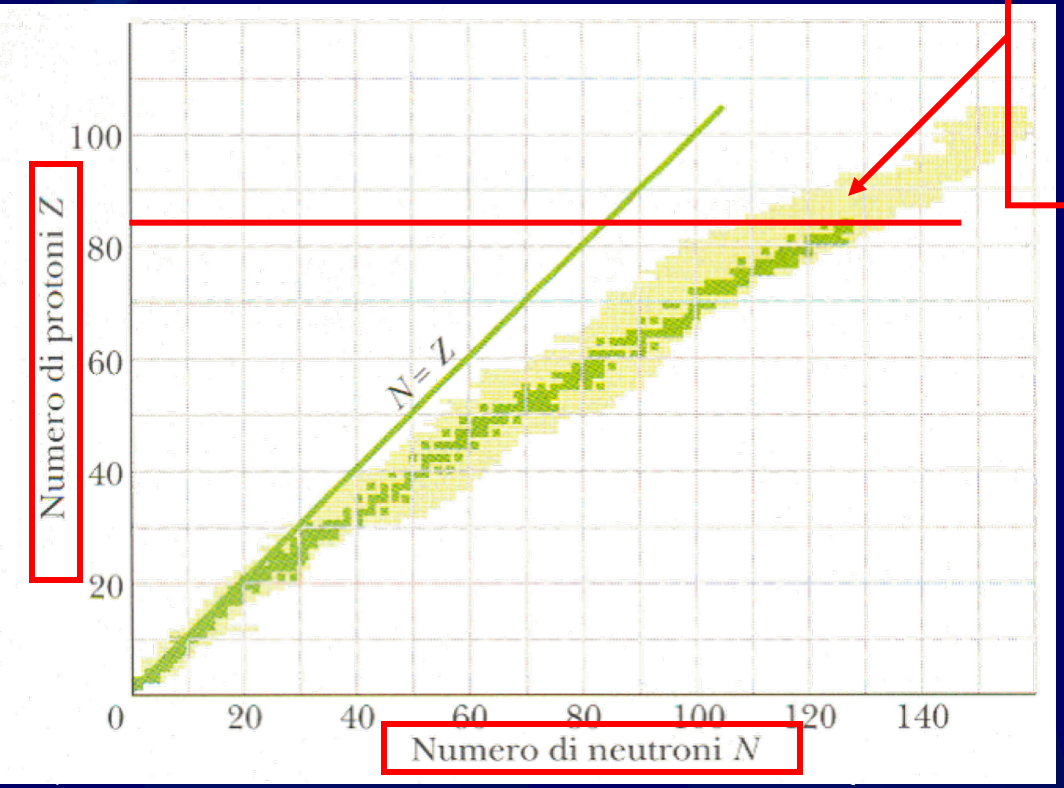




Curva di stabilità

Per A elevati, la repulsione elettrica tende a prevalere

Per mantenere la stabilità il sistema reagisce arricchendo il nucleo di componenti neutre (neutroni)



Per Z > 83 non esistono atomi stabili: gli atomi decadono emettendo radiazioni

➔Radioisotopi

Esempio: $^{12}_{6}C$ verso $^{14}_{6}C$

Radioisotopi

naturali (^{40}K, ^{14}C, ^{238}U)

artificiali (^{60}Co, ^{137}Cs)

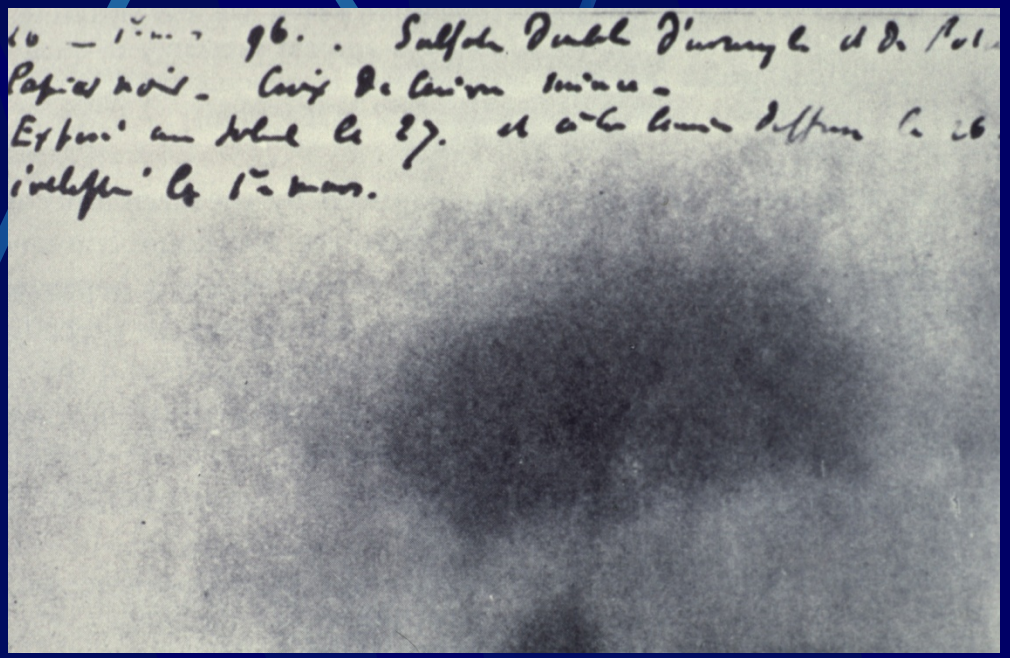
Età universo 13.8 10^9 anni

Numero atomico (Z)	Elemento	Simbolo	Numero di massa (A)	Massa atomica*	Abbondanza (%) o tipo di decadimento† (se radioattivo)	Tempo di dimezzamento (se radioattivo)
82	Piombo	Pb	204	203,973 044	β^-, 1,48	$1{,}4 \cdot 10^{17}$ anni
			206	205,974 46	24,1	**stabile**
			207	206,975 89	22,1	**stabile**
			208	207,976 64	52,3	**stabile**
			210	209,984 18	α, β^-, γ	22,3 anni
			211	210,988 74	β^-, γ	36,1 min
			212	211,991 88	β^-, γ	10,64 ore
			214	213,999 80	β^-, γ	26,8 min
83	Bismuto	Bi	209	208,980 39	100	**stabile**
			211	210,987 26	α, β^-, γ	2,15 min
			212	211,991272	α	60,55 min
84	Polonio	Po	210	209,982 86	α, γ	138,38 giorni
			212	211,988852	α	0,299 μs
			214	213,995 19	α, γ	164 μs
86	Radon	Rn	222	222,017 574	α, β	3,8235 giorni
87	Francio	Fr	223	223,019 734	α, β^-, γ	21,8 min
88	Radio	Ra	226	226,025 406	α, γ	$1{,}60 \cdot 10^3$ anni
			228	228,031 069	β^-	5,76 anni
89	Attinio	Ac	227	227,027 751	α, β^-, γ	21,773 anni
90	Torio	Th	228	228,028 73	α, γ	1,9131 anni
			231	231,036297	α, β^-	25,52 ore
			232	232,038 054	100; α, γ	$1{,}41 \cdot 10^{10}$ anni
			234	234,043596	β^-	24,10 giorni
91	Protoattinio	Pa	234	234,043302	β^-	6,70 ore
92	Uranio	U	232	232,037 14	α, γ	72 anni
			233	233,039 629	α, γ	$1{,}592 \cdot 10^5$ anni
			235	235,043 925	0,72; α, γ	$7{,}038 \cdot 10^8$ anni
			236	236,045 563	α, γ	$2{,}342 \cdot 10^7$ anni
			238	238,050 786	99,275; α, γ	$4{,}468 \cdot 10^9$ anni
			239	239,054 291	β^-, γ	23,5 min
93	Nettunio	Np	239	239,052 932	β^-, γ	2,35 giorni
94	Plutonio	Pu	239	239,052 158	α, γ	$2{,}41 \cdot 10^4$ anni
95	Americio	Am	243	243,061 374	α, γ	$7{,}37 \cdot 10^3$ anni
96	Curio	Cm	245	245,065 487	α, γ	$8{,}5 \cdot 10^3$ anni

Henri Becquerel (1852-1908)

1896

Scoperta della radioattività naturale dell'uranio



Marie Slodowska Curie (1867 – 1934)

Pierre Curie (1859 – 1906)

1898

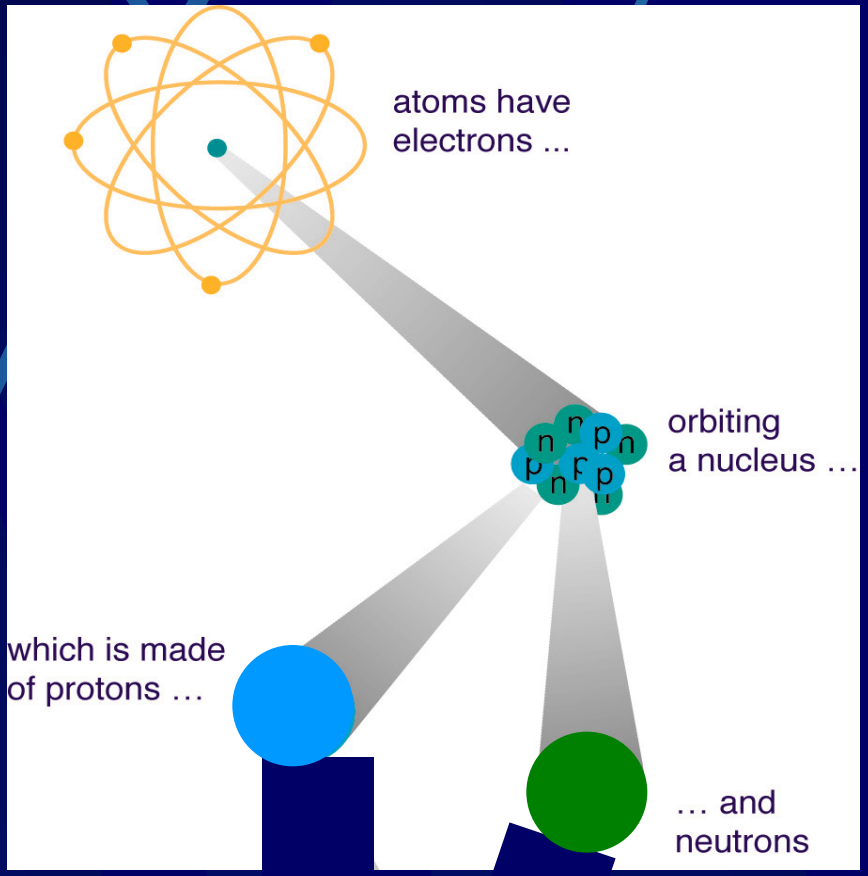
Scoperta del polonio e del radio

James Chadwick

(1891 – 1974)

1932

Scoperta del neutrone



Radioattività artificiale prodotta dai neutroni e il primo isotopo radioattivo dello iodio

RADIOATTIVITÀ « BETA » PROVOCATA
DA BOMBARDAMENTO DI NEUTRONI. — III.

E. Amaldi, O. D'Agostino, E. Fermi, F. Rasetti, E. Segrè

« Ric. Scientifica », 5 (I), 452–453 (1934).

Sono state proseguite ed estese le esperienze di cui alle Note precedenti coi risultati che ricordiamo appresso.

Jodio. – Periodo 30 minuti. L'attività segue chimicamente lo Jodio.

Ne parleremo tra poco

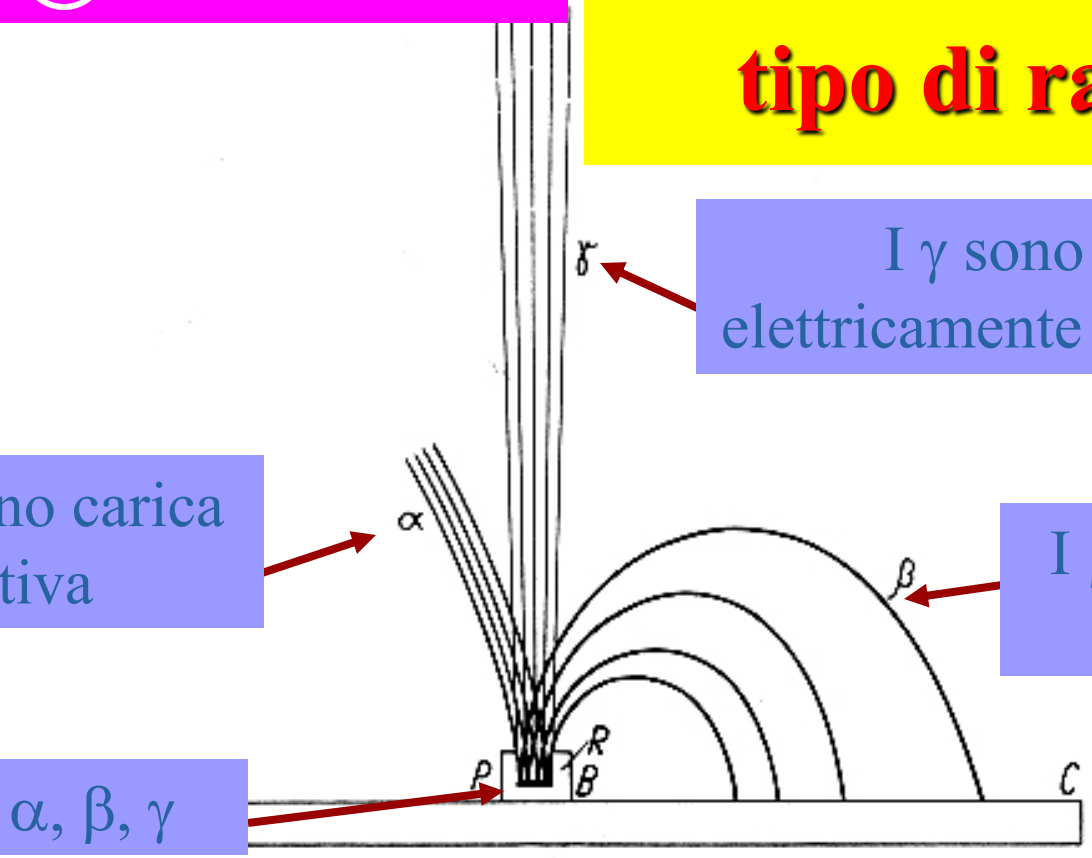
O. D'Agostino E. Segrè

E. Amaldi F. Rasetti E. Fermi

I ragazzi di Via Panisperna - 1934

- La radioattività
- **I decadimenti α, β, γ**
- La legge del decadimento radioattivo
- L'assorbimento della radiazione nella materia
- I radioisotopi in diagnostica
- La scintigrafia e la PET

$\vec{B}$ perpendicolare al foglio ed entrante



Lo studio del nuovo tipo di radiazione

I γ sono elettricamente neutri

La α hanno carica positiva

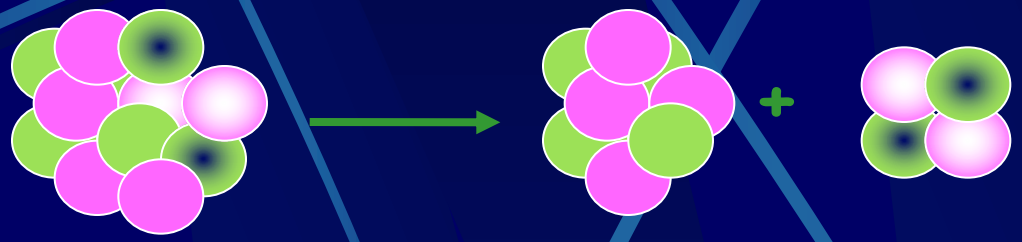
I β hanno carica negativa

Sorgenti α, β, γ

- I raggi α attraversano a malapena un foglio di carta
- I raggi β riescono ad attraversare qualche mm di alluminio
- I raggi γ attraversano vari cm di piombo

Il decadimento α

Emissione di un nucleo di elio (He) da parte del nucleo **genitore (X)**



$${}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2} + {}^{4}_{2}He_{2}$$

per esempio

$${}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$$

Conservazione dell'energia $m_U c^2 = E_{He} + E_{Th} + m_{He}c^2 + m_{Th}c^2$

e sapendo che: $E_{He} + E_{Th} > 0$

posso avere un decadimento α solo se vale la $W = (m_U - m_{He} - m_{Th})c^2 > 0$

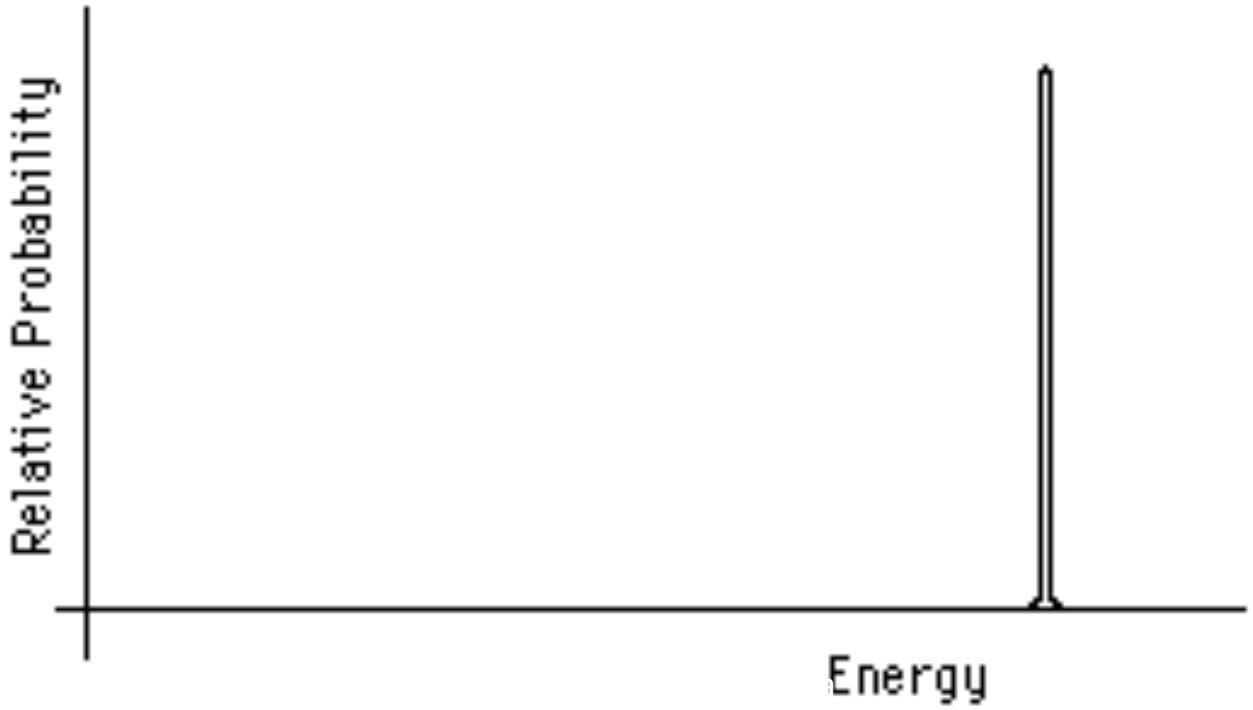
Conservazione della quantità di moto $m_{He}\vec{v}_{He} + m_{Th}\vec{v}_{Th} = 0$

Le velocità, e quindi le energie, del nucleo figlio e del nucleo di elio sono fissate dal valore di W ➔ **monoenergetici**

Raggi α ≡

nuclei di Elio, tutti con la stessa energia ≡

He monocromatici



***Raggi* α ≡**

nuclei di Elio, tutti con la stessa energia ≡

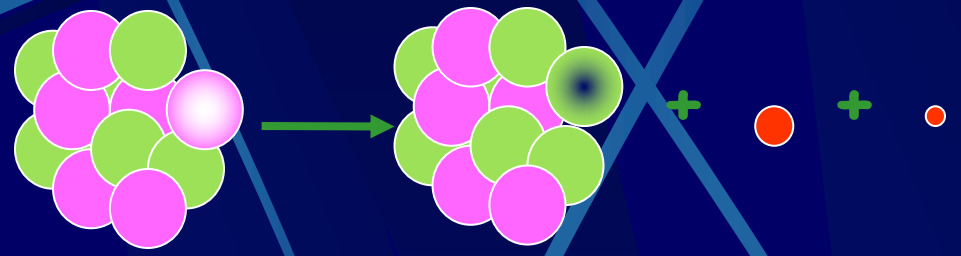
He monocromatici

PERCHE' ?

- **è un decadimento a 2 corpi**
- **valgono conservazione di energia e quantità di moto**

Il decadimento β^-

Emissione di un e^- e un antineutrino da parte del nucleo **genitore (X)**



$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y_{N-1} + e^- + \bar{\nu} $$

per esempio

$$ {}^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + e^- + \bar{\nu} $$

La quarta forza

Forza nucleare debole

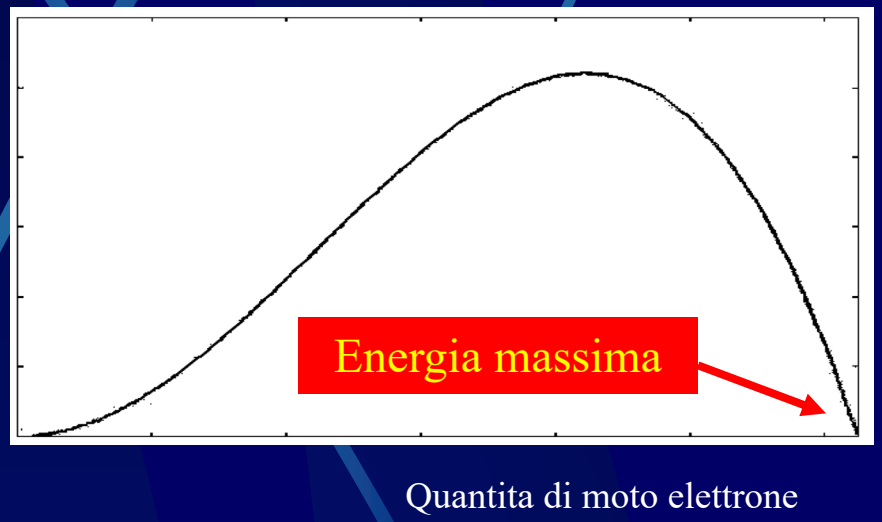
Un neutrone scompare e un protone appare ? !

Neutrone → Protone ? !

$m_p = 938.3$ MeV, $m_n = 939.6$ MeV, $m_e = 0.5$ MeV

Il decadimento β^-

Il neutrino (e la sua antiparticella antineutrino) sono stati introdotti da W.Pauli nel 1930 (e battezzati così in seguito da E.Fermi) per spiegare lo spettro energetico dell'elettrone emesso in questo tipo di decadimenti



Applicando conservazione di energia e quantità di moto ottengo che le velocità (e quindi energie) dei prodotti di decadimento variano in un intervallo di valori ➔ **spettro**

Raggi β ≡

elettroni, con energie varie, all'interno di un intervallo ≡

spettro di energia

PERCHE' ?

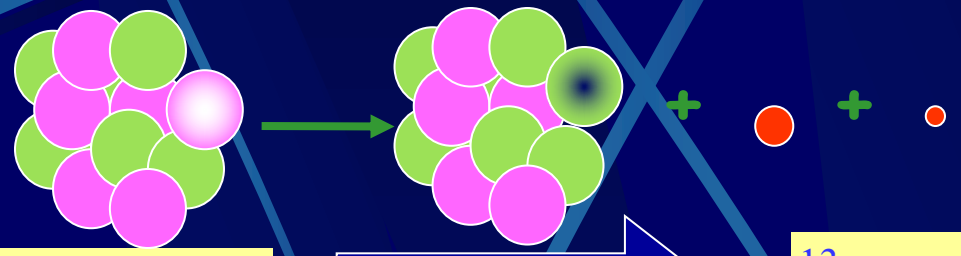
- **è un decadimento a 3 corpi**
- ***vedo* solo l'elettrone; non-vedo il neutrino**

Occhio alla figura della slide precedente

(vale un certo numero di premi Nobel !!!

Il decadimento β^+

Emissione di un e+ e un neutrino da parte del nucleo genitore (X)



$${}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y_{N+1} + e^{+} + \nu$$

per esempio

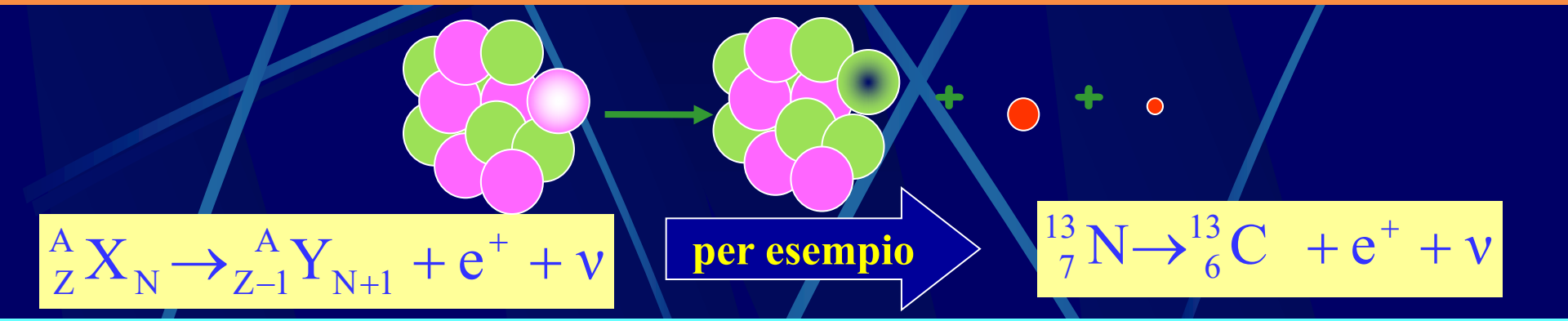
$${}^{13}_{7}N \rightarrow {}^{13}_{6}C + e^{+} + \nu$$

Un protone scompare e un neutrone appare ? !

Protone → Neutrone ? !

Il decadimento β^+

Emissione di un e+ e di un neutrino da parte del nucleo genitore (X)



$${}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y_{N+1} + e^{+} + \nu$$

per esempio

$${}^{13}_{7}N \rightarrow {}^{13}_{6}C + e^{+} + \nu$$

Domanda cattiva

Il decadimento β^- equivale al decadimento di un neutrone in protone.

E il β^+ ? Ricordiamoci che $m_p < m_n$

Risposta

Il decadimento β^+ è il decadimento di un protone in neutrone,

con la differenza di massa ottenuta a spese

dell'energia di legame del nucleo

Raggi β ≡

positroni, con energie varie, all'interno di un intervallo ≡

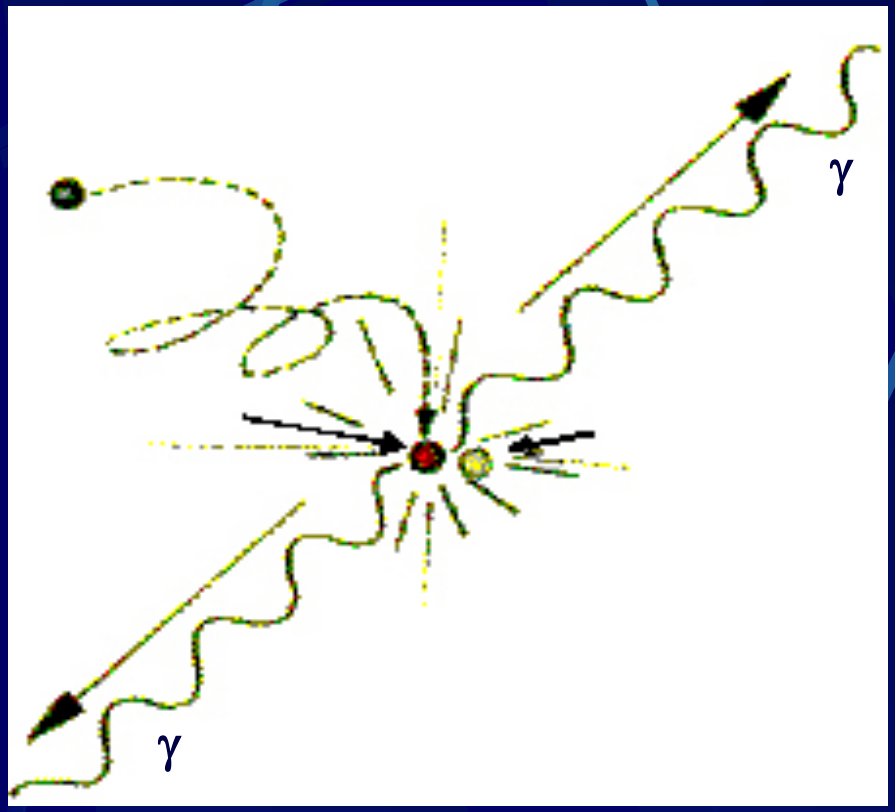
spettro di energia

PERCHE' ?

- **è un decadimento a 3 corpi**
- ***vedo* solo l'elettrone; non-vedo il neutrino**

L'annichilazione $e^+ e^- \rightarrow \gamma\,\gamma$

Il positrone percorre qualche mm nel tessuto umano, prima di annichilarsi con un elettrone e produrre due fotoni $\rightarrow E=(m_{e-} + m_{e+})c^2$



Se il positrone è quasi fermo (a riposo), i due fotoni sono emessi con un angolo di 180° (schiena a schiena)

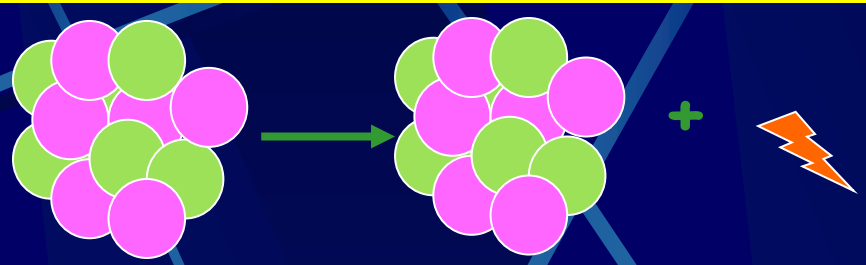
Questa interazione è alla base della

Positron Emission Tomography (PET)

Le 4 forze in natura

Forza	Intensità relativa	Raggio d'azione
Forte	1	circa 1 fm
Elettromagnetica	10^{-2}	Infinito ($\propto 1/r^2$)
Debole	10^{-6}	circa 10^{-3} fm
Gravitazionale	10^{-43}	Infinito ($\propto 1/r^2$)

Il decadimento γ



isomeri

$$ {}^{A}_{Z}X^{*}_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z}X_{N} + \gamma $$

per esempio

$$ {}^{60}_{28}Ni^{*} \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + \gamma $$

Come faccio a ottenere un nucleo eccitato?

Normalmente da un atomo,

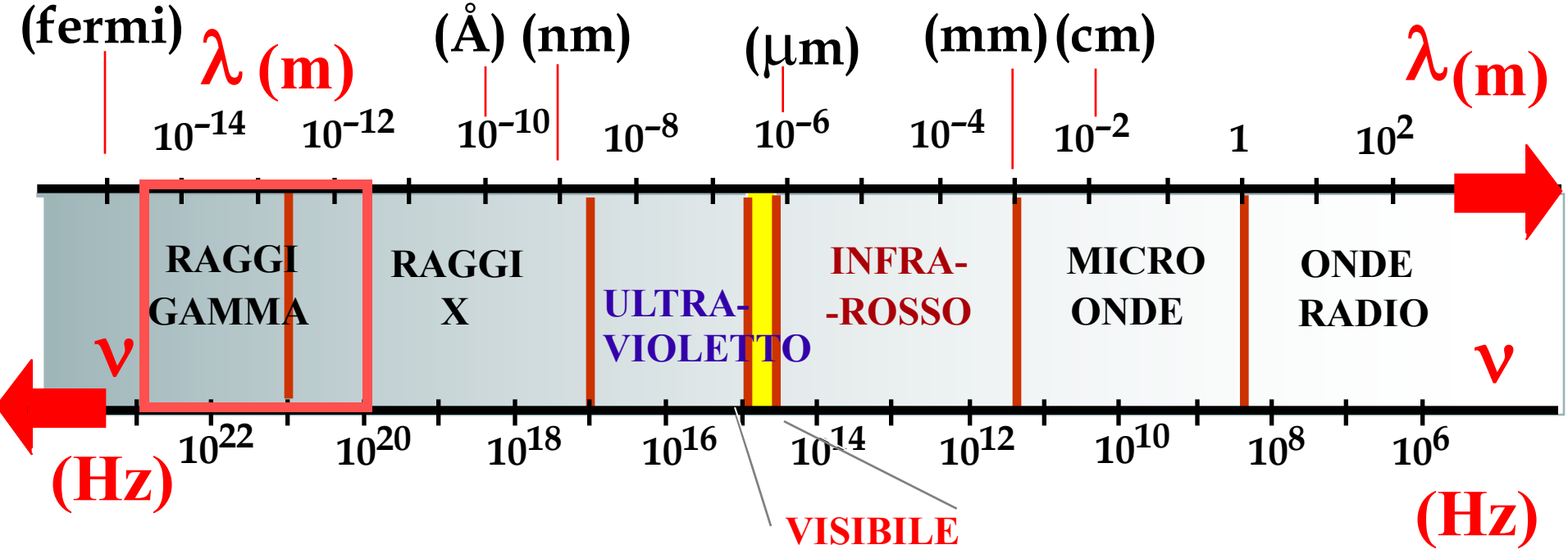
dopo un decadimento α o β

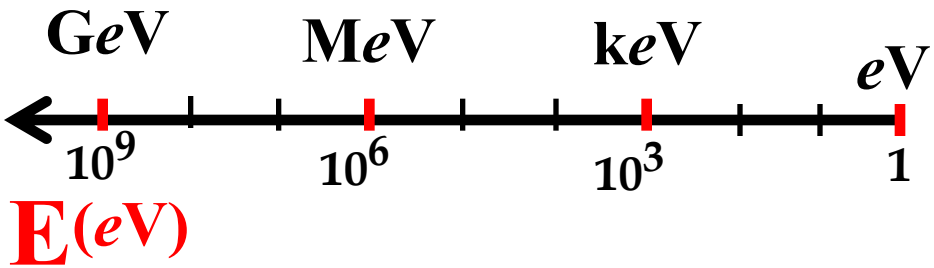
Neutrone lento

$$ n + {}^{59}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{27}Co^{*} \rightarrow {}^{60}_{27}Co + \gamma $$

$$ {}^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni^{*} + e^{-} + \bar{\nu} $$

Spettro delle onde elettromagnetiche





$\lambda\nu = c$

$E = h\nu$

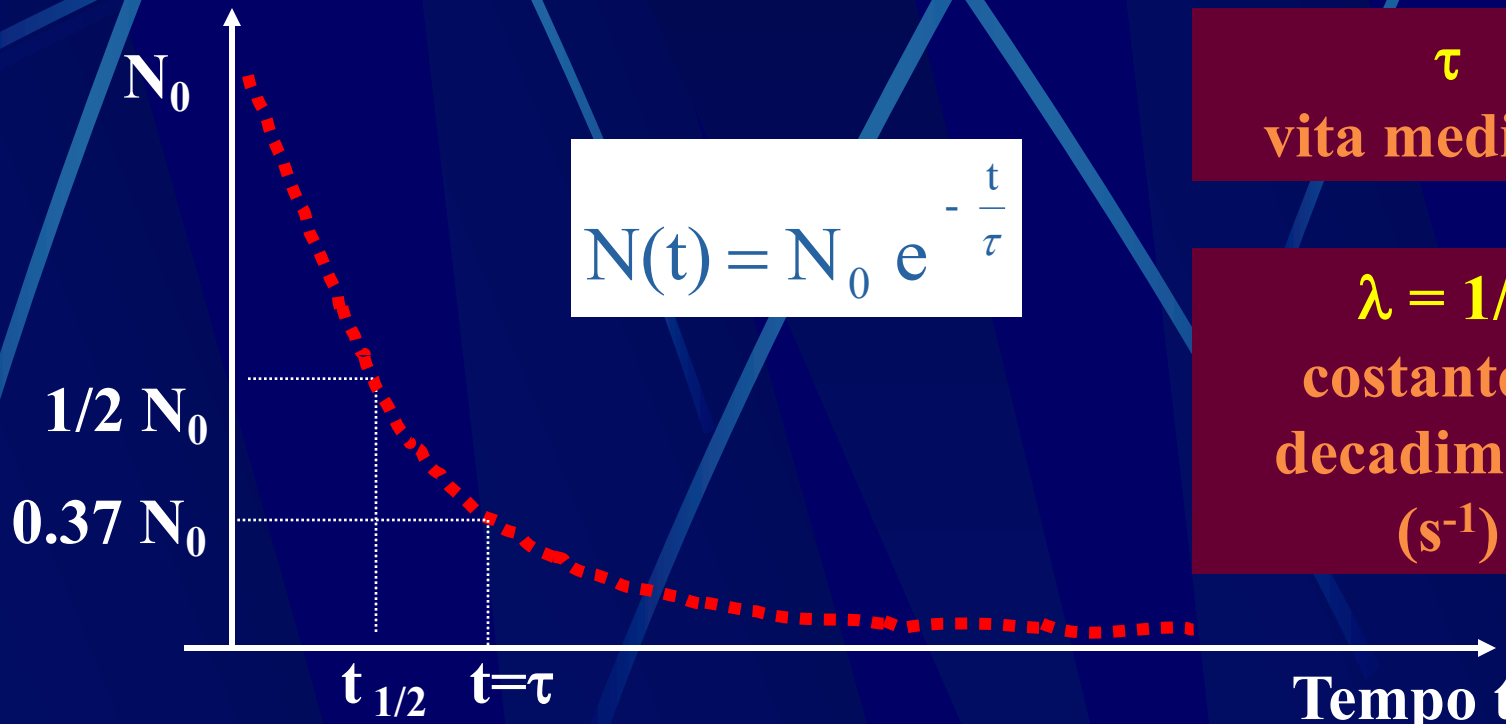
Nota bene: si tratta di FOTONI

- La radioattività
- I decadimenti α, β, γ
- **La legge del decadimento radioattivo**
- L'assorbimento della radiazione nella materia
- I radioisotopi in diagnostica
- La scintigrafia e la PET

Legge del DECADIMENTO RADIOATTIVO

N_0: numero di nuclei all'istante iniziale t_0

N(t): numero di nuclei non ancora decaduti al tempo t



$$N(t) = N_0 \, e^{-\frac{t}{\tau}}$$

τ
vita media (s)

λ = 1/τ
costante di decadimento (s^{-1})

1/e = 1 /2.72 = 0.37

$T_{1/2}$ = τ ln2 = τ 0.693
tempo di dimezzamento

DECADIMENTO RADIOATTIVO

ATTIVITÀ A di una sorgente:

Numero di nuclei che decadono nell'unità di tempo

A si misura in bequerel (Bq) (S.I.) o curie (Ci)

1 disintegrazione /secondo = 1 Bq

1 Ci = $3.7*10^{10}$ disintegrazioni /secondo

(è l'attività di 1g di ^{226}Ra)

Legge del decadimento radioattivo

$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N$$

In un campione di un isotopo radioattivo, il numero di nuclei che decade nell'unità di tempo è proporzionale al numero di nuclei contenuti nel campione

integro in t

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

Dalla definizione di attività

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N = \frac{N}{\tau} = N \frac{0.693}{t_{1/2}}$$

- La radioattività
- I decadimenti α, β, γ
- La legge del decadimento radioattivo
- **L'assorbimento della radiazione nella materia**
- I radioisotopi in diagnostica
- La scintigrafia e la PET

L'assorbimento della radiazione nella materia

RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA (fotoni)

Legge dell'assorbimento esponenziale $I(x) = I_0 \, e^{-\mu x}$

RADIAZIONE CORPUSCOLARE (α,β)

Ionizzazione

Il RANGE è la distanza media percorsa nella materia ed è tanto maggiore all'aumentare dell'energia

Range di α di energia ~ 1 MeV in aria: 5.5 mm, in H_2O: 30 μm

Range di β di energia ~ 1 MeV in aria: 4 m, in H_2O: 5 mm

- La radioattività
- I decadimenti α, β, γ
- La legge del decadimento radioattivo
- L'assorbimento della radiazione nella materia
- **I radioisotopi in diagnostica**
- La scintigrafia e la PET

I radioisotopi in diagnostica

- radiofarmaci
- diffusione nell'organismo
- decadimento radioattivo
- rivelazione della radiazione

PET

^{3}H	^{11}C	^{13}N	^{14}C	^{15}O
^{18}F	^{24}Na	^{32}P	^{40}K	^{60}Co
^{64}Cu	^{67}Ga	^{81}Rb	^{86}Y	^{99m}Tc
^{111}In	^{120}I	^{123}I	^{124}I	^{125}I
^{131}I	^{133}Xe	^{197}Hg	^{198}Au	^{201}Tl

Scintigrafia ossea

Scintigrafia tiroidea

Il tempo di dimezzamento biologico

Un nuclide radioattivo ingerito non diminuisce soltanto a causa del decadimento, ma viene anche **eliminato con il normale ricambio**

Come per la legge del decadimento radioattivo, anche in questo caso vale un andamento esponenziale decrescente

$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda_{fisico}\, N(t) + \lambda_{biologico}\, N(t) = \lambda_{efficace}\, N(t)$$

$$\frac{1}{t_{1/2}^{efficace}} = \frac{1}{t_{1/2}^{fisico}} + \frac{1}{t_{1/2}^{biologico}}$$

Il nuclide deve avere tempi di dimezzamento FISICO e BIOLOGICO compatibili con la **pratica clinica e le esigenze del paziente.**

Esempio: $\tau_{1/2}(^{99m}\mathrm{Tc}) = 6$ ore

- La radioattività
- I decadimenti α, β, γ
- La legge del decadimento radioattivo
- L'assorbimento della radiazione nella materia
- I radioisotopi in diagnostica
- **La scintigrafia e la PET**

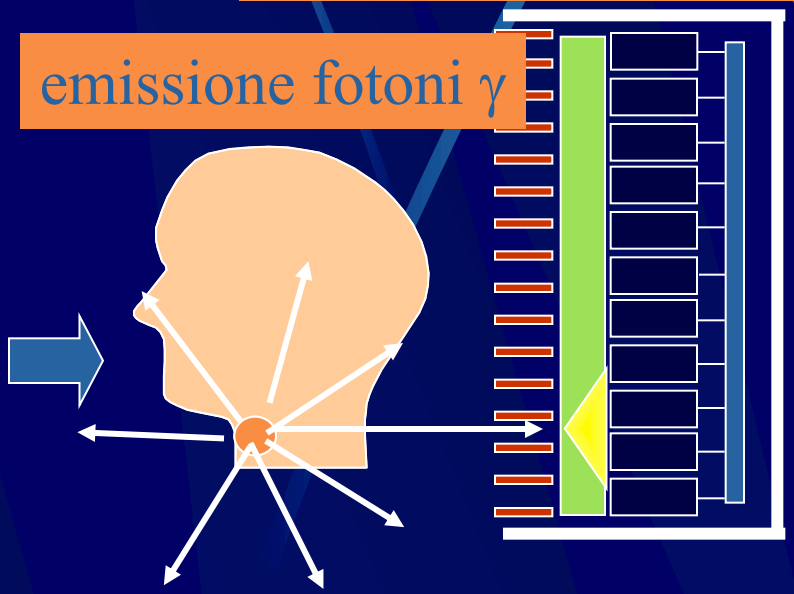
I radioisotopi in diagnostica
La scintigrafia

Scintigrafia tiroidea
300 kBq/8 μCi di ^{131}I o ^{99}Tc

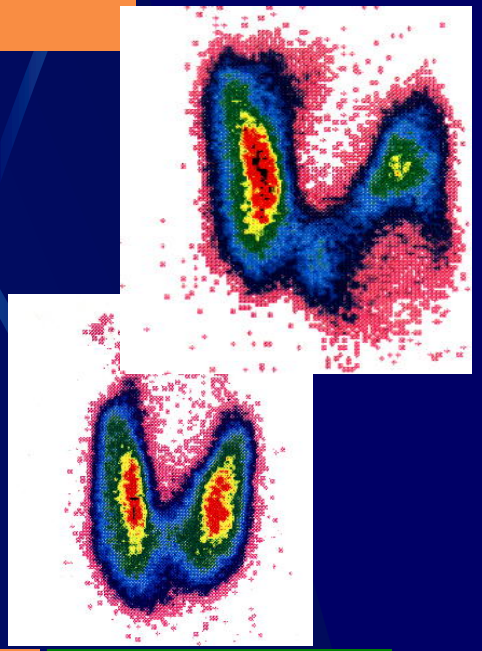
Iniezione radiofarmaco

emissione fotoni γ

Rivelatore di radiazione (gamma camera)



soggetto malato

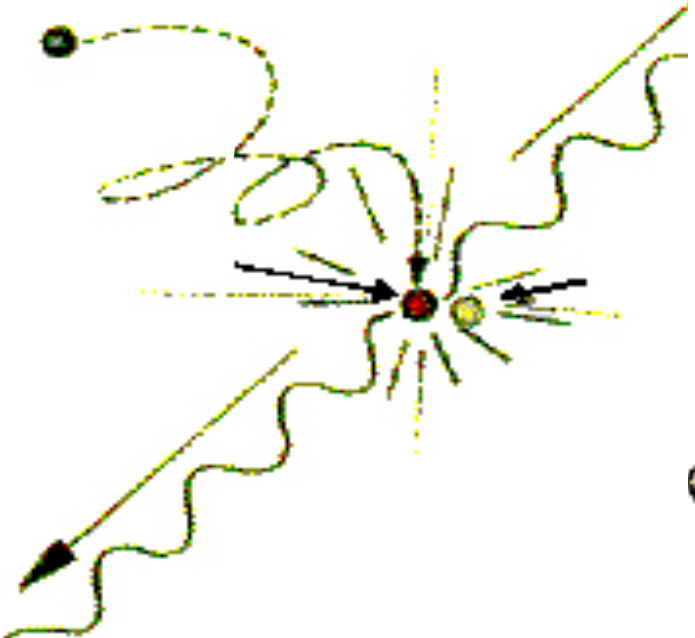


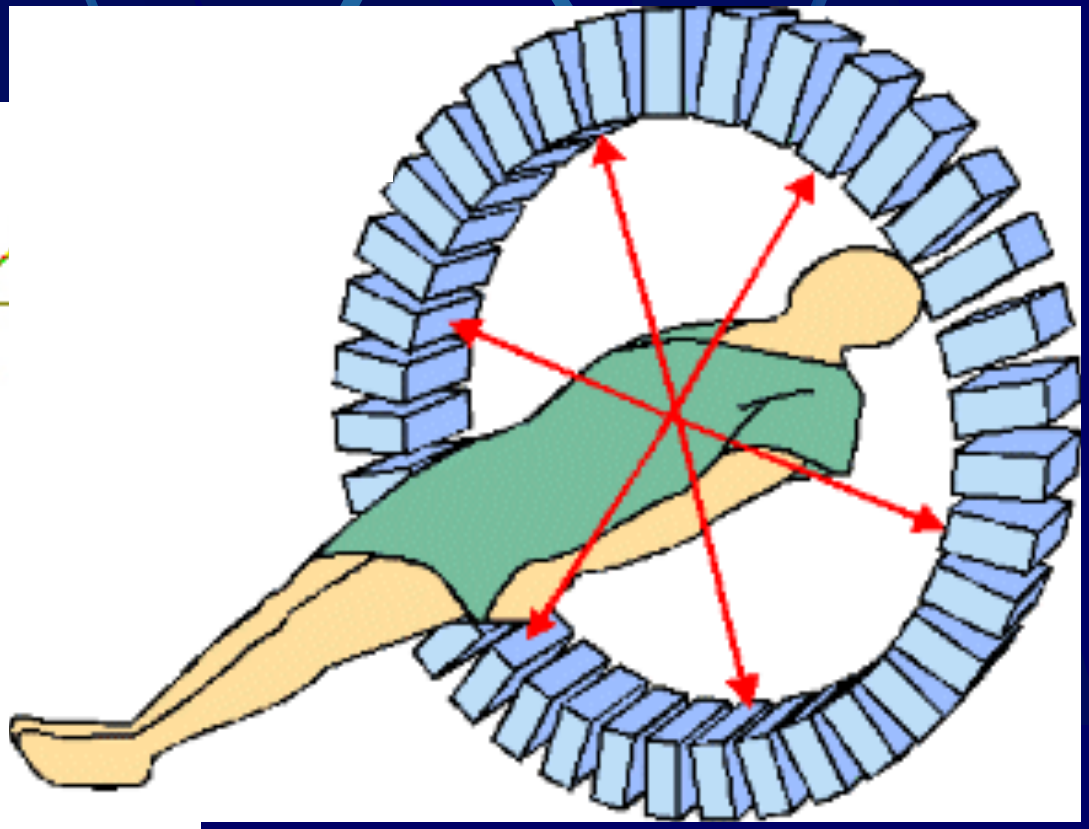
Radiografia: assorbimento
Scintigrafia: captazione ed emissione

elaborazione e visualizzazione

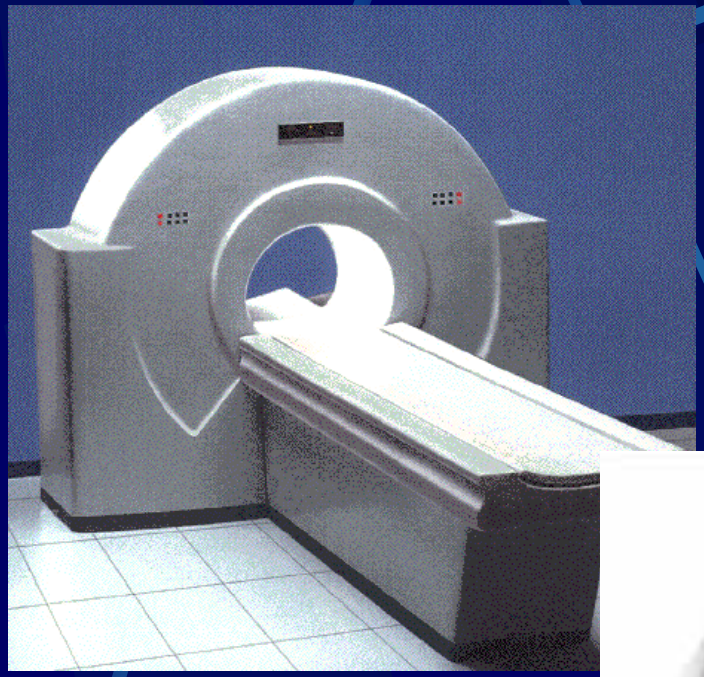
soggetto normale

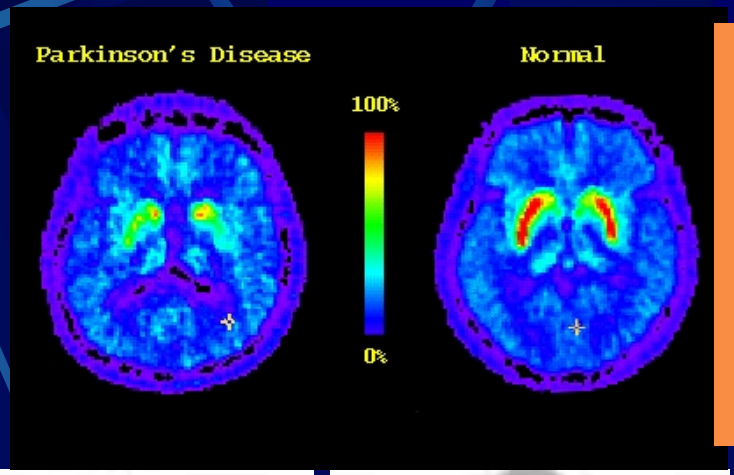
I radioisotopi in diagnostica
La Positron Emission Tomography (PET)





La diagnostica PET





Misura PET della captazione cerebrale in un soggetto sano e in un soggetto affetto da Parkinson

PET whole body eseguita su un malato oncologico prima e dopo la chemioterapia

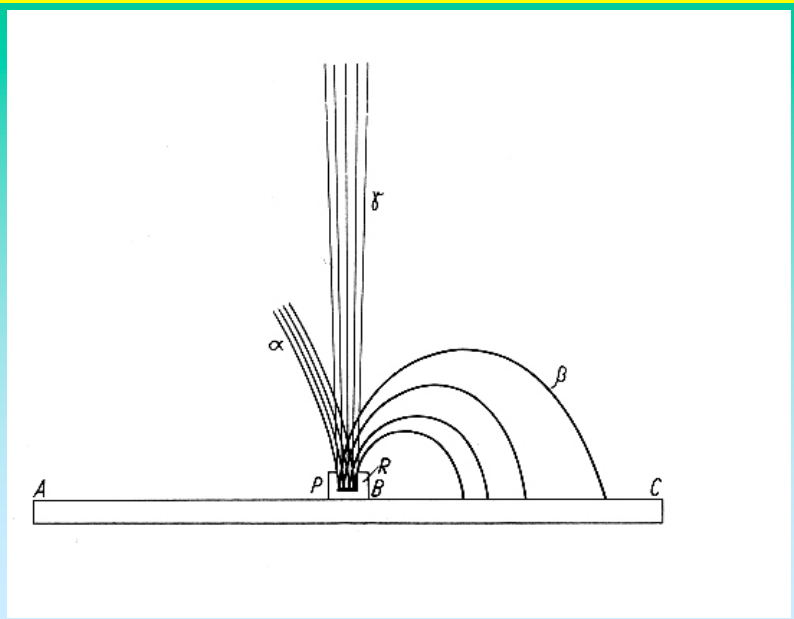
Prima della chemioterapia

2 mesi dopo la chemioterapia

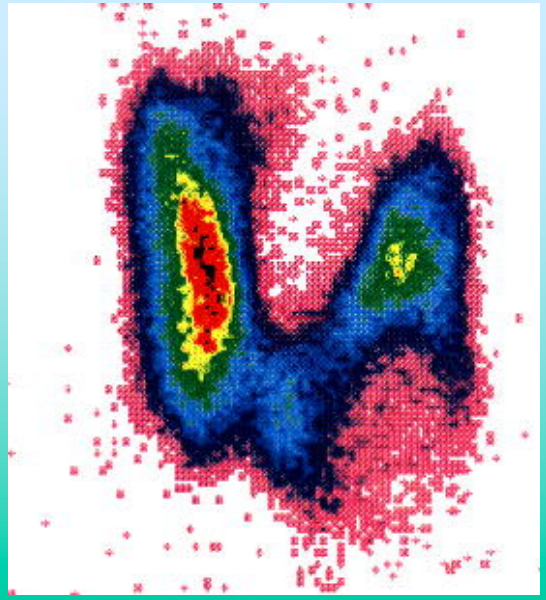
4 mesi dopo la chemioterapia

Riassumendo

Atomi instabili emettono **radiazione α,β,γ**



Con tecniche come scintigrafia e PET posso utilizzare la **radioattività in diagnostica**



Esercizio da fare a casa

All'istante t_0 siano dati 1000 nuclei di un isotopo con $t_{1/2}$ = 10 minuti.

1. calcolare l'attività all'istante t_0;
2. calcolare l'attività dopo 10 minuti

Soluzione esercizio da fare a casa

(1)

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N = \frac{N}{\tau} = N \frac{0.693}{t_{1/2}}$$

$$A = 1000 \frac{0.693}{10\ \text{min}} = 1.16\ \text{Bq}$$

(2)

$$A = 500 \frac{0.693}{10\ \text{min}} = 0.58\ \text{Bq}$$