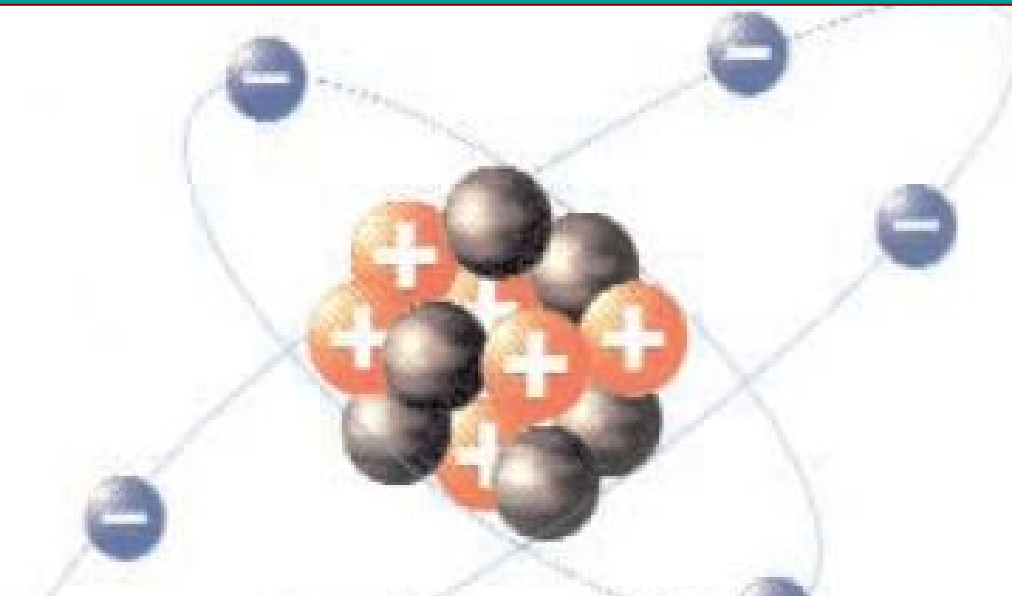


Radioattività e suo monitoraggio



Giancarlo Buccella

 Protoni  Elettroni  Neutroni

Sommario

- 1) Cenni di fisica atomica e nucleare
- 2) L'antefatto
- 3) Che cosa è la radioattività
- 4) Radioattività naturale ed artificiale
- 5) Grandezze radioprotezionistiche
- 6) Effetti della radioattività sull'uomo
- 7) La radioprotezione
- 8) La sorveglianza fisica della radioprotezione

1) Cenni di fisica atomica e nucleare

Teoria atomica 1

- L'Universo è composto di materia ed energia, due aspetti della medesima entità visto che, come dimostrò Einstein, esse possono convertirsi l'una nell'altra secondo la relazione $E = mc^2$. Oggi noi possediamo un modello sufficientemente dettagliato per descrivere la struttura della materia, il modello atomico. Parlare di atomi è attualmente quasi un fatto scontato, ma il modello atomico si affermò con difficoltà, nonostante sia stato proposto per la prima volta più di duemila anni fa.

Le prime ipotesi sulla struttura e sulla natura della materia vennero infatti avanzate, agli albori del pensiero occidentale, in Grecia. A tal proposito possiamo individuare, in estrema sintesi, due problemi fondamentali intorno ai quali si sviluppò il dibattito filosofico su questo tema:

- **A) continuità/discontinuità della materia: l'atomo**

Da una parte **Aristotele** (IV sec a.C) che ipotizza l'esistenza di una **materia continua**, divisibile indefinitamente in frammenti sempre più piccoli e quindi irriducibile ad unità elementari.

Dall'altra **Democrito di Abdera** (IV sec a.C.), anche se il primo ad avere parlato di atomi fu Leucippo, che ritiene invece la **materia discontinua** e sostiene pertanto l'esistenza di particelle minuscole, chiamate atomi, invisibili, incorruttibili ed eterne.

Le idee di Democrito sopravvissero nei secoli. Furono divulgate da Epicuro di Samo (III sec. a.C.) e, nel mondo latino, da Tito Lucrezio Caro (95-55 a.C.) nel "De Rerum Natura".

Teoria atomica 2

B) complessità/semplifictà della materia: l'elemento

- La ricerca dell'ἀρχη, del 'principio primo', dal quale discendeva tutta la molteplicità dell'essere, rappresentò forse l'elemento peculiare della prima speculazione greca intorno al mondo. Il problema di poter ricondurre l'enorme varietà di sostanze conosciute alla combinazione di poche sostanze semplici significava fondamentalmente razionalizzare il mondo e quindi "spiegare" i fenomeni complessi riconducendoli e riducendoli alla loro composizione elementare.
- A parte i primi tentativi effettuati in tal senso dai primi 'Fisiologi' presocratici, come **Talete** (624-546 a.C.) che individuò nell'acqua il principio primo o **Anassimene** (586-528 a.C.) che lo identificò nell'aria, l'ipotesi che ebbe la maggior fortuna durante tutto il medioevo, grazie all'autorevole consenso di Aristotele, fu senza dubbio quella di **Empedocle** (490-430 a.C.). Secondo tale ipotesi **tutta la materia era composta da quattro sostanze fondamentali ed elementari: l'aria, l'acqua, la terra e il fuoco.**
- Le prime definizioni moderne si devono a Boyle e a Newton.
- Per **R.Boyle** (1627-1691) gli elementi sono *"corpi primitivi, semplici, incontaminati, che, non essendo costituiti da altri corpi o di loro mescolanze, sono ingredienti di cui i corpi misti sono costituiti e nei quali questi possono essere in definitiva risolti"*.
Mentre **Newton** immaginò gli atomi come minuscole sfere, dominate solo da forze attrattive e repulsive. dal greco atomos, indivisibile. In Opticks così scrive: *"In principio Dio creò la materia in particelle mobili, impenetrabili, dure, massicce, solide...."*

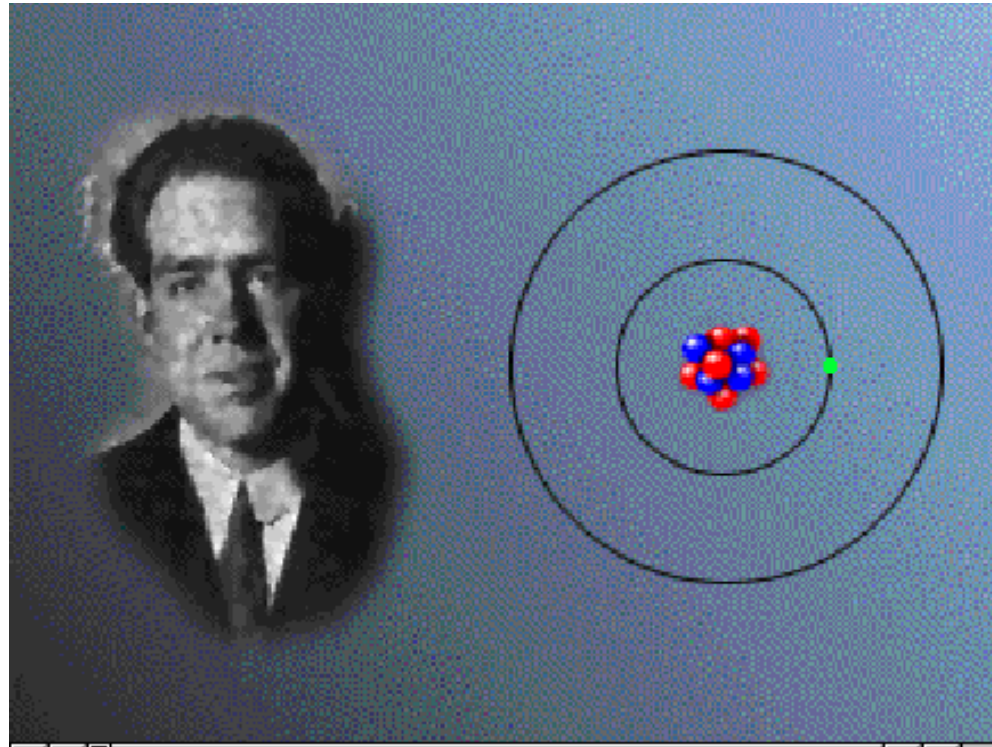
Teoria atomica 3

- Oggi la nostra idea di atomo è notevolmente cambiata rispetto al modello newtoniano, ciononostante vi sono ambiti della chimica e della fisica moderna (teoria cinetica dei gas, ad esempio) in cui tale modello risulta essere ancora perfettamente adeguato ed in grado di giustificare alcuni comportamenti della materia.

La concezione moderna nasce tra la fine del '700 e l'inizio dell'800, e giunge ad unificare il concetto di atomo e di elemento. Tale unificazione si produce con la formulazione da parte di **Dalton** della **Teoria atomica**, che possiamo così sintetizzare

- 1 La materia è composta di atomi indivisibili ed inalterabili;
- 2 Esistono atomi con caratteristiche differenti. Tutti gli atomi di uno stesso tipo costituiscono le sostanze semplici o **elementi**;
- 3 Le trasformazioni chimiche si producono per unione o separazione di atomi secondo rapporti rigorosamente determinati e caratteristici per ogni sostanza chimica.

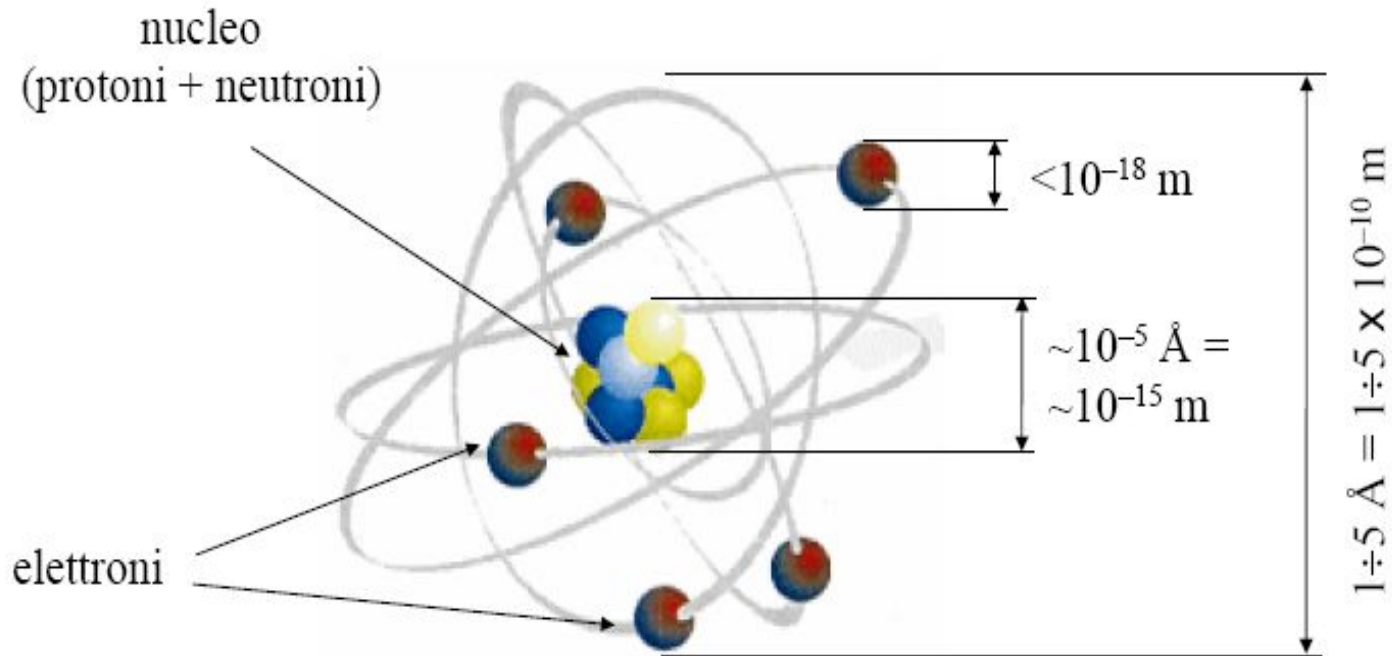
L'atomo di Bohr: il modello solare



*Quantizzazione
delle orbite*

- 1913 -

Com'è fatto l'atomo?



1 nm (nanometro) = 10^{-9} m
1 Å (Ångstrom) = 10^{-10} m
1 pm (picometro) = 10^{-12} m

Se il nucleo dell'atomo di idrogeno avesse le dimensioni di una palla da tennis, l'elettrone si troverebbe ad una distanza di circa 2000 m con dimensione praticamente puntiforme.

Caratteristiche delle particelle subatomiche

Particella	Carica (C)	Carica (e)	Massa* (kg)
NEUTRONE (n)	0	0	1.675×10^{-27}
PROTONE (p)	1.602×10^{-19}	+1	1.673×10^{-27}
ELETTRONE (e)	-1.602×10^{-19}	-1	9.1094×10^{-31}

L'atomo moderno: la nuvola elettronica (gli orbitali)



L'elettrone non percorre orbite ben definite, ma occupa uno spazio, detto orbitale, per cui si parla di probabilità di trovare l'elettrone in un certo punto dello spazio.

Orbitale: zona dello spazio dove l'elettrone passa la maggior parte del suo tempo. In altre parole è una regione di spazio attorno ad un nucleo atomico in cui la probabilità di trovarvi un elettrone è massima (di solito superiore ad un limite convenzionalmente fissato nel 90%)

2) L'ANTEFATTO

L'inizio della storia radioattiva

L'antefatto

Dal *fosforo mercuriale*
ai tubi di Crookes

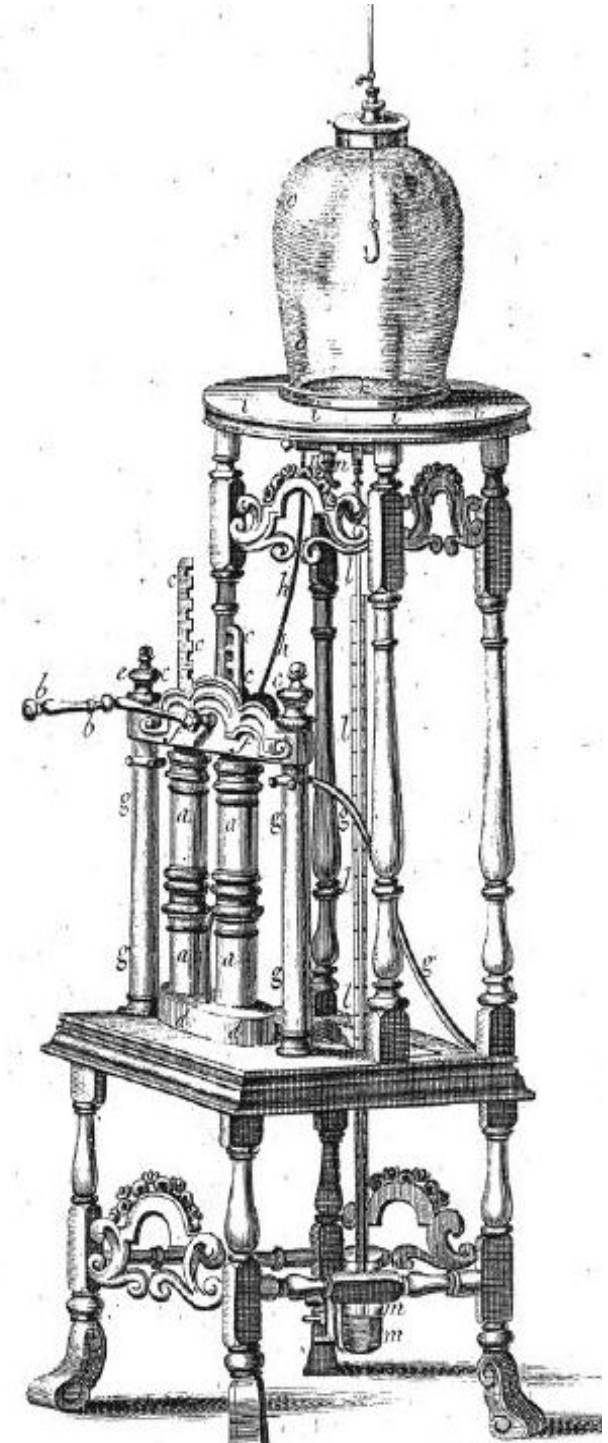
Alle origini fu il *fosforo mercuriale*...

- 1676 Spostando un barometro, Jean Picard nota un curioso bagliore al di sopra della colonna di mercurio.
- Si trattava di uno strumento per evidenziare l'elettrizzazione per strofinio del mercurio quando il metallo veniva agitato all'interno del tubo che lo contiene. Il nome dato non deve trarre in inganno; fosforescente si deve qui intendere in grado di emettere luce "per elettricità", come si inquadrava all'epoca il fenomeno, e non legato alla fosforescenza (Telaio con tubi fosforescenti) conseguente alla radiazione elettromagnetica.

Lo strumento ospita una piccola quantità di mercurio a bassa pressione. Il tubo interno è a diametro variabile, a differenza della camicia esterna. Agitando al buio la fialetta, lo sfregamento del mercurio contro le pareti lo elettrizzava allo stesso modo in cui si elettrizza una penna sfregandola con un panno di lana. Così sulla superficie del metallo si sviluppavano scariche elettriche (come quelle che si osservano togliendosi un maglione di lana al buio) che facevano brillare debolmente il tubo con luce azzurrina.
- 1700 Johann Bernoulli s'interessa al fenomeno e mostra che la luminescenza è legata al moto del mercurio e al grado di rarefazione.
- 1705-1709 I misteriosi bagliori, che diventano noti con il nome di "fosforo mercuriale", vengono studiati da Francis Hauksbee...

... grazie alla
pompa
pneumatica a due
cilindri da
lui inventata nel
1703

Hauksbee scopre che il mercurio
non è affatto
indispensabile per ottenere i
bagliori: strofinando infatti
in aria rarefatta corpi vari, come
l'ambra o il vetro, con
un panno di lana si ottengono gli
stessi effetti luminosi.



Le scoperte continuano

- **1745** Diversi esperimenti convincono la comunità scientifica che i “bagliori” sono di natura elettrica, ossia

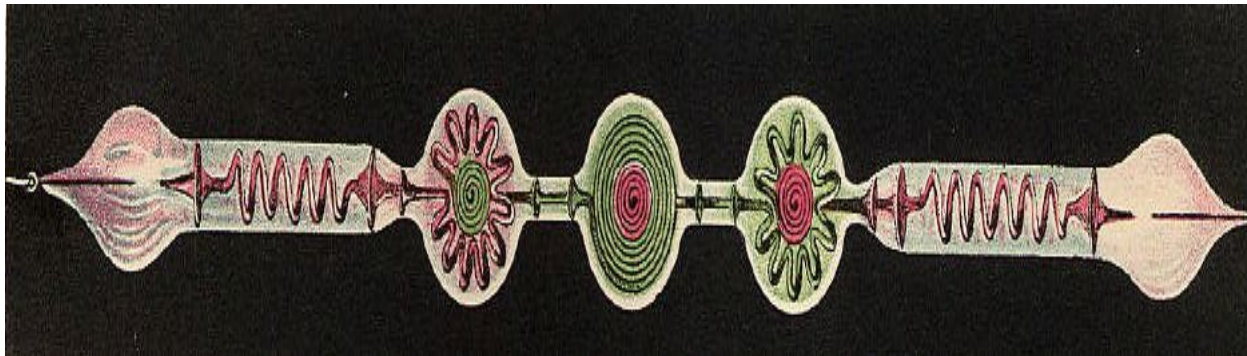
scariche elettriche in aria rarefatta.

Non sono quindi fenomeni di luminescenza
(caratteristica di alcuni corpi di emettere luce dopo aver assorbito energia da onde e.m.) (fluorescenza se il tempo di diseccitazione è $<10^{-5}$ s, altrimenti fosforescenza (anche alcune ore!))



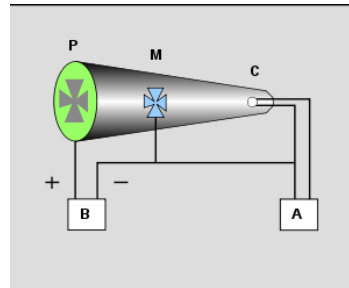
I tubi di Geissler

- 1857 Geissler, utilizzando la sua nuova pompa da vuoto a mercurio, riesce a costruire i cosiddetti *tubi di Geissler*, piccoli tubi di vetro contenenti gas molto rarefatti per l'epoca all'interno dei quali penetrano due elettrodi.



I tubi di Crookes

- **1869** Hittorf stabilisce per la prima volta che quelli che lui chiamava “Glimmstrahlen” (“raggi splendenti o balenanti”) vengono emessi dal catodo seguendo poi traiettorie rettilinee.
- **1876** Eugen Goldstein introduce il termine ancora oggi in uso di “raggi catodici”.
- **1879** William Crookes studia le proprietà dei raggi catodici a gradi di vuoto dell'ordine di 1/1000 mm di mercurio, un vuoto molto più spinto rispetto ai tubi di *Geissler*. Effettua diverse scoperte con i tubi da lui ideati, detti appunto tubi di Crookes

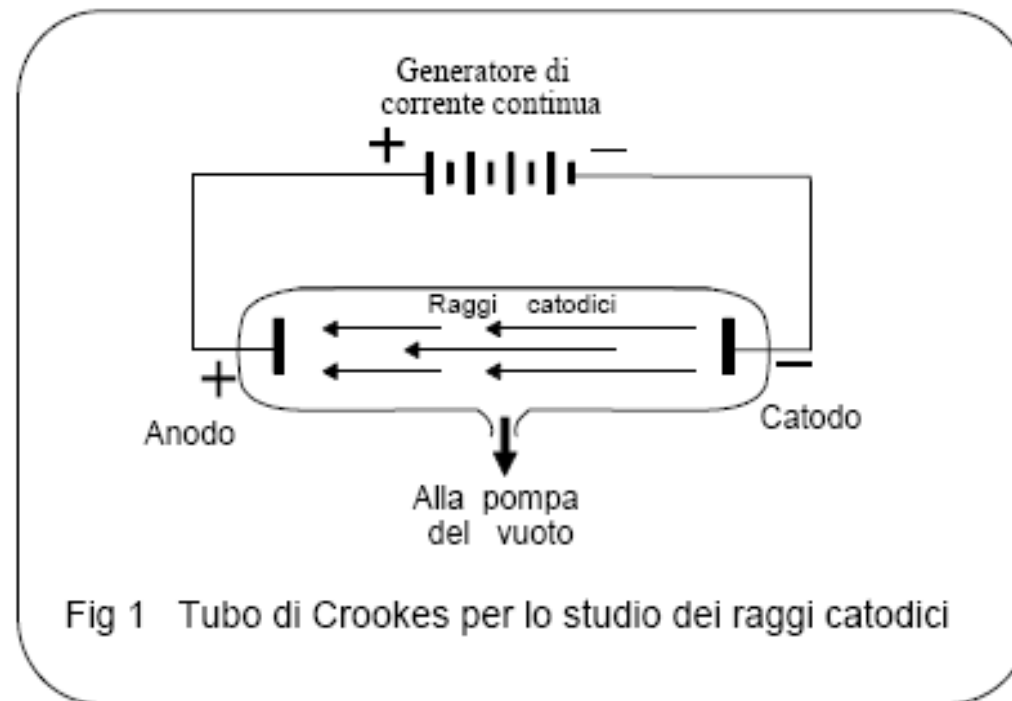


Il tubo di Crookes è un particolare tubo a vuoto di vetro, a forma di cono, che presenta in genere 3 elettrodi: un anodo e due catodi. Deve il suo nome al suo inventore, il fisico William Crookes, e rappresenta l'evoluzione del tubo di Geissler e il precursore del tubo catodico.

I raggi catodici

- L'apparecchiatura utilizzata, ideata da Crookes (**tubo di Crookes**), è costituita da un tubo di vetro alle cui estremità sono saldati due elettrodi (a volte tre) metallici collegati con un generatore di corrente continua con una differenza di potenziale di circa 10 kV. All'interno l'aria viene sostituita con un gas qualsiasi.
- Si collega il tubo con una pompa del vuoto che fa diminuire gradatamente la pressione interna. Finché la pressione è superiore a 0,4 atm tra i due elettrodi si producono normali scariche elettriche, del tutto simili ai fulmini atmosferici.
- Al di sotto di tale valore la scintilla scompare per lasciare il posto ad una luminosità diffusa che, a pressioni di circa 10^{-6} atm, interessa via via tutto il gas. In queste condizioni il vetro di fronte al catodo (cosparso di fosforo) emette una debole luminescenza (fluorescenza).
- Tale fenomeno fu messo in relazione con possibili radiazioni che potevano essere prodotte dal catodo e che **Goldstein** in seguito chiamò **raggi catodici**

Il tubo di Crookes



I raggi catodici sono elettroni

- Oggi si sa che si tratta di elettroni che vanno dal catodo all'anodo rendendo la parete che colpiscono fluorescente, ma allora non si sapeva se si trattasse di radiazioni luminose o corpuscolari. Si sapeva solo che si propagavano in linea retta dal polo negativo a quello positivo. Infatti un oggetto metallico frapposto sul loro cammino proiettava nettamente la sua ombra. Nel **1895** finalmente, **Perrin**, osservando che una lastra metallica interposta sul cammino del fascio si elettrizzava negativamente, dimostrò che i raggi emessi dal catodo erano dotati di **carica negativa**.

Vari tipi di tubi...

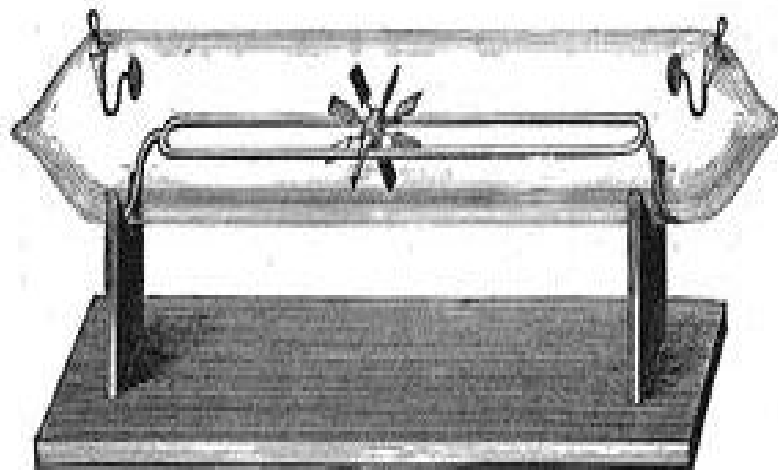
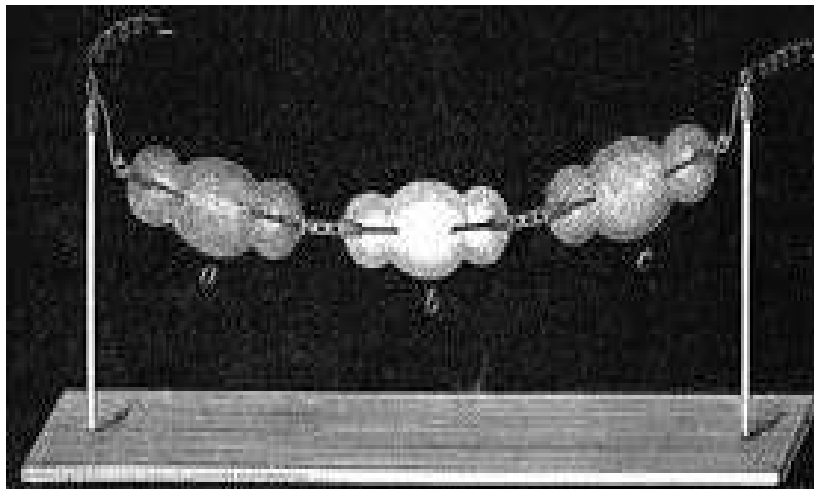
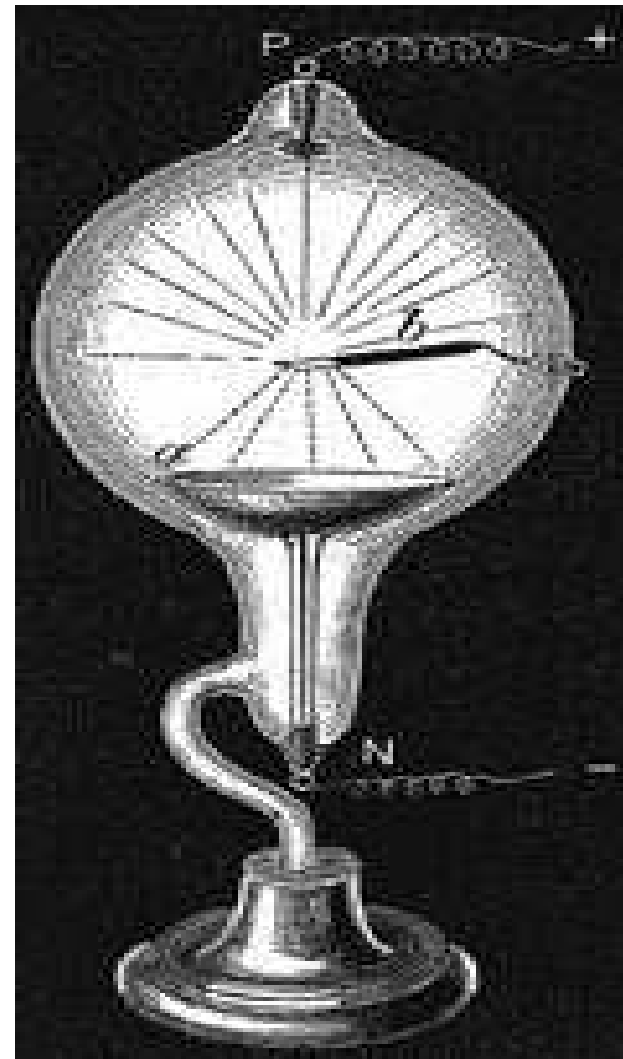


Fig. 200.



La scoperta dei raggi X

- Il 1894 fu l'anno che segnò la sua carriera di ricercatore: a quel tempo, dopo la scoperta dei raggi catodici, avvenuta nel 1876 per merito del fisico tedesco Eugen Goldstein, questo argomento divenne molto dibattuto negli ambienti scientifici, poiché era ancora incerta la natura dei raggi stessi.^[1] Röntgen decise di intraprendere anche lui studi nel campo dei raggi catodici per verificare le conclusioni alle quali erano giunti i fisici tedeschi Heinrich Hertz e Philipp Lenard, e per realizzare il suo progetto rifornì il suo laboratorio degli strumenti più all'avanguardia, quali una bobina a induzione per la corrente elettrica, generatrice di otto impulsi al secondo di circa 35000 volt. È da sottolineare come, a causa del suo daltonismo, Röntgen oscurasse completamente la sala durante i suoi esperimenti; la sera della scoperta egli si accorse che un foglio di carta su cui era stata scritta la lettera "A" con una soluzione di platinocianuro di bario brillava di luce, emessa da raggi invisibili provenienti dal tubo a vuoto con cui stava lavorando. Nel tentativo di scoprire le qualità dei raggi, egli si accorse che sul foglio appariva l'ombra delle ossa della sua mano posta nella traiettoria dei raggi stessi, e notò che tali raggi, chiamati "X" in quanto sconosciuti, scaturivano dal contatto dei raggi catodici con l'anticatodo nel tubo (8 novembre 1895).

Wilhelm Konrad Roentgen



*Prima radiografia
della storia... la
mano della moglie.*



Nel 1895, il fisico tedesco Wilhelm Röntgen scoprì un raggio nuovo, e strano: aveva origine quando un fascio di elettroni colpiva un pezzo di vetro. Poiché erano raggi dalla natura sconosciuta e misteriosa, furono chiamati "raggi X".

Diapositiva 23

g1

g.buccella; 10/05/2012

La scoperta della radioattività

- Nel 1896 Antoine Henri Becquerel, durante uno studio sulle relazioni intercorrenti tra fosforescenza e Raggi X, scopre la radioattività naturale dell'uranio. Nel 1898 Maria Skłodowska (più nota come Marie Curie) e Pierre Curie scoprono la radioattività del polonio e del radio.
- Nel 1896 Henri Becquerel scoprì casualmente la **radioattività** dell'Uranio. Le sue ricerche sulla radioattività vennero proseguite dai **coniugi Curie** e poi da **Rutherford**, il quale per primo nel 1898 riconosce le radiazioni da lui chiamate α (**alfa**) e β (**beta**), emesse da elementi radioattivi.

Ben presto risulta chiaro che le radiazioni beta sono costituite da elettroni come i raggi catodici, mentre per lungo tempo resta oscura la natura delle radiazioni alfa.
- Pochi anni più tardi **P. Villard** in Francia scoprì che tra le radiazioni emesse da una sostanza radioattiva ve ne sono di un terzo tipo, chiamate γ (**gamma**), che si riconoscono simili ai raggi X.
- Bisogna aspettare il **1904** perchè **Rutherford** dimostri che la radiazione alfa è costituita da nuclei di Elio. Lo stesso Rutherford, con la collaborazione di Soddy, fu in grado ben presto di dimostrare che durante l'emissione delle radiazioni alfa e beta, **l'elemento radioattivo si trasforma, con un ritmo caratteristico, in un elemento diverso.**

Henry Becquerel



I coniugi Curie



Quadro riassuntivo degli antefatti

- 1676 Fosforo mercuriale (Picard)
- 1857 Tubi di Gleisser (inserisce elettrodi)
- 1869 Tubi di Crookes (miglior vuoto: 1/1000 mmHg)
- 1895 Scoperta dei raggi X (Roengten)
- 1896 Scoperta della radioattività (Bequerel)

La radioattività nella storia 1

La radioattività nella storia

- Tratto dalla pubblicazione APAT: "La radioprotezione in Italia (1999) –

- **Nel novembre 1895**, mentre studia le scariche di corrente nei tubi a vuoto, il tedesco Wilhelm Conrad Röntgen osserva che ogni volta che la corrente fluisce nel tubo sono emesse radiazioni invisibili che chiama raggi X. Egli nota che queste radiazioni possono attraversare moderati spessori di materia e sono fermate da alcune sostanze più facilmente che da altre. Entro breve tempo, nel febbraio 1896, ad opera di E. Frost, i raggi X sono utilizzati in medicina per la diagnosi radiografica.
- **Il 1° marzo 1896** il ricercatore francese Antoine-Henri Becquerel verifica che la peceblenda - un minerale di uranio - può causare l'annerimento delle lastre fotografiche anche in assenza di luce, e scopre in tal modo la radioattività naturale. Nel 1899 lo scienziato inglese Ernest Rutherford identifica due tipi di radiazione emessi dalla peceblenda, e li chiama raggi alfa e raggi beta. Nel 1900 il francese Paul Villard trova fra le emissioni della peceblenda un terzo tipo di radiazione, che battezza raggi gamma.
- **Nel 1896** l'americano Thomas Edison riferisce di danni agli occhi causati dai raggi X. N. Testa mette in guardia gli sperimentatori sulla necessità di evitare la permanenza in prossimità dei tubi a raggi X durante il loro funzionamento. Il dottor D.W. Gage pubblica un articolo nel quale descrive alcuni danni provocati dai raggi X: caduta dei capelli e lesioni cutanee.
- Nel dicembre 1898 Pierre Curie e Maria Sklodowska, trattando diverse tonnellate di peceblenda, riescono ad isolare e ad estrarre meno di un grammo di un nuovo elemento - il radio - cui attribuiscono la radioattività emessa dalla peceblenda. Henry Becquerel ne riceve in dono una piccola quantità, che ripone in una tasca. Giunto nel proprio laboratorio si accorge di avere la pelle ustionata in corrispondenza della tasca.
- **Nel 1910** il padre gesuita Theodor Wulf effettua misure di radioattività a livello del suolo e sulla cima della torre Eiffel, scoprendo che la radiazione cresce con l'elevazione. Egli formula l'ipotesi che la radiazione ambientale abbia una componente di origine cosmica, e propone di effettuare misure ad alta quota utilizzando i palloni aerostatici. Attuando il suo suggerimento Victor Hess scopre nel 1912 i raggi cosmici.
- **Nei primi anni del novecento** i ciarlatani entrano nel "business" radioattivo. L'U.S. Patent Office rilascia un gran numero di brevetti per apparecchiature, sostanze e tecniche di cura "miracolose". Nel 1912 è brevettato il "Revigorator", una pozione a base di minerali di radio. Nello stesso anno si registra il decesso di un paziente che per curare l'artrite si sottoponeva a iniezioni di radio-226. Nel 1925 W. Bailey commercializza il "Radithor", una pozione a base di radio contro le disfunzioni sessuali. Nel 1932 l'industriale e *playboy* e miliardario E. Byers muore in seguito all'assunzione di Radithor.

La radioattività nella storia 2

- **Nel 1915** la *British Rontgen Society* propone i primi standard per la protezione dei lavoratori e della popolazione dagli effetti indesiderati delle radiazioni. Si tratta di un sistema di controlli volontari che agiscono sulla schermatura delle sorgenti, sulla limitazione delle ore lavorative e su regolari controlli sanitari. L'assenza di unità di misura standard e di dosimetri impedisce l'adozione di precisi limiti di dose.
- Durante la prima guerra mondiale è esposto alla radioattività un elevato numero di lavoratrici impiegate nella costruzione di strumenti a quadrante luminoso. Nel 1920 l'uso di vernici fluorescenti a base di sostanze radioattive si estende senza particolari controlli all'industria civile dell'orologeria. Nel 1925 il fisiologo Martland rileva nei lavoratori coinvolti stati di anemia e patologie ossee.
- **Nel 1925** inizia l'utilizzazione su larga scala della radioterapia per la cura del cancro. Negli anni successivi vengono perfezionate e descritte nelle pubblicazioni mediche e scientifiche apparecchiature e metodiche. Nel 1927, ad opera di H.Muller, appaiono i primi studi sugli effetti genetici delle radiazioni negli animali (moscerini), mentre nessun effetto genetico sull'uomo è stato evidenziato a tutt'oggi (vedasi gli studi epidemiologici più importanti che sono quelli condotti sui sopravvissuti di *Hiroshima e Nagasaki*).
- **Nel 1927** un medico di Boston, Herman Blumgart, fa uso per la prima volta di traccianti radioattivi per la diagnosi di stati patologici del cuore e dell'apparato cardiocircolatorio.
- **Nel 1928** si tiene il primo congresso *dell'International Committee on X-ray and Radium Protection*, organismo dal quale trarrà successivamente origine l'International Commission for Radiological Protection (ICRP). Sono pubblicati i primi standard internazionali per la protezione dalle radiazioni.
- **Nel 1932** Chadwick, interpretando precedenti risultati sperimentali ottenuti da Irène Curie (figlia di Marie) e Frederic Joliot, stabilisce l'esistenza di una nuova particella elementare, il neutrone, che si viene ad aggiungere alle uniche due precedentemente identificate, l'elettrone e il protone.
- **Nel 1934** Irène Curie e Frederic Joliot, bombardando con particelle alfa un foglio di alluminio, producono il primo isotopo radioattivo artificiale: il fosforo-30. Lo stesso anno Enrico Fermi dimostra che è possibile produrre isotopi radioattivi in grande quantità utilizzando come proiettili i neutroni in luogo delle particelle alfa. Pur essendosi imbattuto durante questi studi, nella fissione nucleare, Fermi non se ne rende conto, e avvia con la sua équipe un'intensa attività sperimentale finalizzata alla produzione di isotopi radioattivi.
- **Nel 1938** Otto Hanh, F. Strassmann e Lise Meitner scoprono che bombardando l'uranio con neutroni lenti si può produrre la scissione del nucleo in due o più frammenti radioattivi, con liberazione di neutroni e di energia: a questo particolare tipo di reazione viene dato il nome di fissione nucleare.
- **Il 2 dicembre 1942** a Chicago un'equipe guidata da Enrico Fermi realizza la "pila" di uranio e grafite CP-1, con la quale dimostra la possibilità di indurre e sostenere in modo controllato la reazione di fissione a catena. Nasce in tal modo il primo prototipo di reattore nucleare

Modelli atomici classici

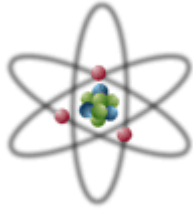
Negli ultimi decenni dell'Ottocento la maggior parte degli scienziati aderiva alla teoria atomica, ma i dati sperimentali che si andavano accumulando suggerivano l'idea che l'atomo non fosse in realtà il costituente ultimo della materia, ma che possedesse una struttura interna costituita di particelle

elettricamente cariche. Al fine di descrivere e giustificare in modo adeguato le nuove caratteristiche che si evidenziavano a livello subatomico vennero creati, nei primi anni del '900, diversi modelli atomici.

La struttura interna dell'atomo

I primi indizi sull'esistenza di una struttura interna dell'atomo si ebbero con la scoperta dell'elettrone e la constatazione che tale particella poteva essere estratta da qualsiasi tipo di atomo e doveva pertanto essere considerata un costituente comune di tutti gli atomi.

La scoperta dell'elettrone avvenne grazie ad una serie di esperimenti condotti durante gran parte dell'Ottocento sulla conduzione elettrica attraverso i gas rarefatti.



Il Nucleo



E' composto da due tipi di particelle, i protoni e i neutroni chiamati complessivamente nucleoni.
Il numero di nucleoni definisce il **Numero di Massa (A)**, che è la somma del **numero dei neutroni (N)** e del **numero di protoni (Z)**:
 $A = Z + N$

- Il **protone (p)** possiede una massa circa 1836 volte maggiore di quella dell'elettrone e carica elettrica positiva unitaria, uguale a quella di un elettrone ma di segno opposto.
- Il **neutrone (n)** possiede massa circa 1837 volte maggiore di quella dell'elettrone e non possiede carica elettrica.
- Il **Numero Atomico Z** indica in numero di protoni **che** coincide anche con il numero di elettroni nell'atomo elettricamente neutro e **caratterizza in modo univoco l'elemento chimico.**

Gli isotopi sono atomi di uno stesso elemento aventi però nuclei diversi, e ciò significa che avranno un numero diverso di neutroni.

Le dimensioni del nucleo sono comprese fra 10^{-14} e 10^{-15} m
cioè tra 0.1 e 1 fm (femtometri)
quelle dell'atomo sono dell'ordine di 10^{-10} m cioè **0.1 nm (nanometri)**

Quindi l'atomo è più grande del nucleo di un fattore che va da 10 000 a 100 000.

Se ad es. poniamo in scala un atomo di idrogeno (formato da un protone (nucleo) e un elettrone che gli orbita intorno) pensando il suo nucleo avere le dimensioni di una mela (dal peso di circa 2 Kg), l'elettrone sarebbe un pallino insignificante (virtualmente privo di dimensione) posto ad una distanza di 2 Km (dal peso di 1 g).

90 sono gli elementi naturali

- La teoria atomica è stata in seguito elaborata e raffinata ma sostanzialmente confermata. In natura esistono 90 tipi di atomi che individuano altrettanti elementi chimici (gli elementi fino all'Uranio sono 92, ma il 43mo (Tc Tecnezio) ed il 61mo (Pm Promezio) sono prodotti artificialmente), inoltre sono stati creati in laboratorio circa un una ventina di elementi - detti transuranici – tutti radioattivi con tempi di dimezzamento da frazioni di secondo a millenni.
- Gli isotopi di un elemento possono essere radioattivi o stabili.
- La massima parte degli elementi in natura costituita da miscele di isotopi stabili

Tavola periodica

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun								

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Gli isotopi

Un **isòtopo** (letteralmente *nello stesso luogo*) è un atomo di uno stesso elemento chimico, e quindi con lo stesso numero atomico Z , ma con differente numero di massa A , e quindi differente massa atomica M . La differenza dei numeri di massa è dovuta ad un diverso numero di neutroni presenti nel nucleo dell'atomo a parità di numero atomico. Stessi isotopi che differiscono solamente per lo stato eccitato vengono definiti **isomeri**.

Una peculiarità importante degli isotopi è quella di avere caratteristiche chimiche uguali (capacità di formare gli stessi composti chimici) ma caratteristiche fisiche diverse (peso, densità, punto di fusione, capacità essere radioattivo (radioisotopo), ecc.)

Nota: i due latitanti (sulla terra)... il Tecnezio e il Promezio

*Il **tecnezio** (dal greco technetos, artificiale) fu scoperto da Carlo Perrier ed Emilio Segrè in Italia (nei laboratori dell'Istituto di Fisica dell'Università di Palermo) nel **1937**. I ricercatori lo individuarono in un campione di molibdeno inviato loro da Ernest Lawrence. Il campione era stato bombardato con nuclei di deuterio nel ciclotrone dell'Università della California di Berkeley, trasformandolo in ^{99}Tc . Il tecnezio è stato il primo elemento prodotto artificialmente nella storia.*

- *L'esistenza del **promezio** fu dapprima predetta da Bohuslav Brauner nel 1902; tale predizione venne confermata da Henry Moseley nel 1914. Molti gruppi dichiararono di aver prodotto questo elemento, ma nessuno poté confermare la scoperta per la grande difficoltà di separare questo elemento dalle altre terre rare. La dimostrazione dell'esistenza del promezio fu ottenuta nel **1945** da Jacob A. Marinsky, Lawrence E. Glendenin e Charles D. Coryell durante l'analisi di alcuni sottoprodotti della fissione dell'uranio; tuttavia i tre scienziati erano troppo occupati dalle ricerche belliche alleate durante la seconda guerra mondiale, per cui non annunciarono la loro scoperta fino al 1947. Il nome promezio deriva da Prometeo, uno dei titani della mitologia greca, che rubò il fuoco agli dei e ne fece dono ai mortali.*
- **Tuttavia questi due elementi sono stati individuati nello spettro di alcune stelle**

Cosa c'è in natura

- **In natura (universo) esistono 92 elementi** (dall'idrogeno, il più leggero, all'uranio, il più pesante) , e circa **340 isotopi (280 stabili e 60 radioattivi (ad es. Rn-222, K-40, C-14, U-235))**. Tra gli elementi, **una ventina sono costituiti da un unico isotopo** (come ad esempio il sodio, il cobalto, l'arsenico e l'oro), gli altri hanno almeno due isotopi (ad esempio: il cloro ne ha due, lo zinco ne ha cinque, lo stagno ne ha dieci).
- Oltre agli isotopi da sempre presenti in natura (isotopi naturali) , esistono oggi un gran numero di **isotopi artificiali circa 2800**, cioè prodotti dall'uomo. Esempi di isotopi artificiali sono il cobalto-60 (27 protoni, 33 neutroni), usato in radioterapia e in gammagrafia, il plutonio-239 (94 protoni, 145 neutroni), usato come combustibile nelle centrali nucleari, di questi una ventina sono quelli prevalentemente usati

3. Che cosa è la radioattività

COSA E' LA RADIOATTIVITA'

La materia è costituita da atomi che combinandosi e legandosi tra loro in diverso modo e con diversa forza di legame danno origine a un'innumerabile varietà di sostanze e strutture sotto forma di gas, liquidi e solidi.

- Alcuni isotopi dei vari elementi naturali, così come molti nuclei creati artificialmente, **sono instabili** (chiamati ***radioisotopi*** oppure ***radionuclidi***) ossia tendono spontaneamente a ridisporsi in strutture nucleari energeticamente più favorevoli (configurazione di minima energia potenziale).
- In altre parole, dopo un tempo, il cui valore medio può variare per ogni tipo di isotopo dai milionesimi di secondo ai miliardi di anni, i nuclei instabili si trasformano in altri tipi di nuclei (figli) che possono a loro volta essere stabili o instabili.
- ***La radioattività consiste proprio in questo processo di disintegrazione dei nuclei.***

Definizione

Radioattività = trasformazione spontanea o artificiale dei nuclei con emissione di radiazione

radiazione Corpuscolare \longrightarrow ***particelle (alfa,beta)***

radiazione Elettromagnetica \longrightarrow ***energia (fotoni)***

Con il termine instabile si intende un nucleo che spontaneamente subisce una trasformazione nucleare per raggiungere uno stato stabile (o più stabile)

Cosa è un decadimento nucleare

- Per decadimento si intende una qualunque trasformazione nucleare che generi un nuovo tipo di nucleo.

Unità di misura dell'Attività : Il Becquerel

Un Bq è l'attività di un radionuclide che decade spontaneamente subendo in media una disintegrazione

al secondo (1 Bq = 1 decadimento/secondo).

E' ancora di uso comune una "vecchia" unità di misura, il Curie (Ci), che esprime l'attività di un grammo di Radio226 e corrisponde a $3,7 \cdot 10^{10}$ decadimenti al secondo.

Oppure **$1 \mu\text{Ci} = 37 \text{ KBq}$**

Perché i nuclei decadono?

- Il principio fisico per cui avvengono i decadimenti è quello della minima energia:
- **”Un sistema fisico tende naturalmente verso l'equilibrio, cioè verso stati in cui la sua energia potenziale è minima”.**
- Quindi possiamo anche dire che **non avvengono spontaneamente quelle reazioni nucleari per le quali si deve somministrare dell'energia.**

Difetto di massa

- Il contenuto di energia del nucleo è determinato dal suo contenuto di massa m secondo la famosissima relazione

$$E = m_{\text{nucleo}} c^2$$

e questa energia è minore di quella che si ottiene come somma delle singole masse componenti il nucleo quando sono allo stato libero,

$$E < Zm_p c^2 + Nm_n c^2$$

oppure si può dire che la massa del nucleo è minore della somma delle singole masse e tale differenza è detta difetto di massa

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M(Z, N)$$

L'energia nucleare vale molto

- Il difetto di massa rappresenta quindi l'energia di legame del nucleo, cioè il lavoro che bisogna fare per portare i nucleoni allo stato libero.
- **Caso del deuterio ($p+n$):**
- $\Delta m = 2.22 \text{ MeV}$ questa energia rappresenta il lavoro che bisogna compiere per separare il neutrone dal protone.
- Si vede quindi come l'energia nucleare sia circa un milione di volte maggiore dell'energia atomica (energia che occorre somministrare all'atomo per strappargli elettroni) che è di qualche eV!

Quindi se un atomo decadendo abbassa il suo contenuto di energia ...semplicemente lo fa!

- Le trasformazioni spontanee più comuni sono le seguenti:



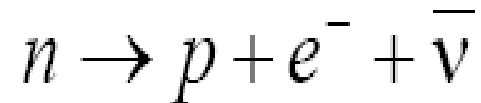
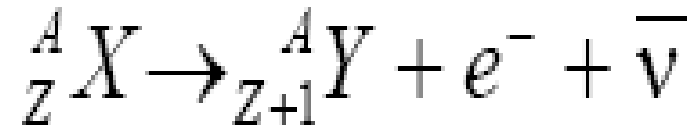
Decadimento α

Il nucleo emette α (2p+2n)



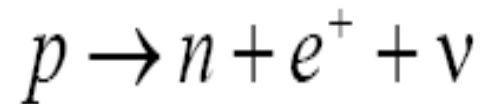
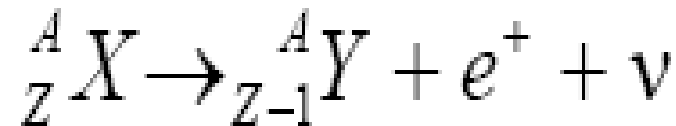
Decadimento β^-

Un neutrone si trasforma in un protone



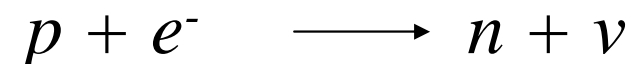
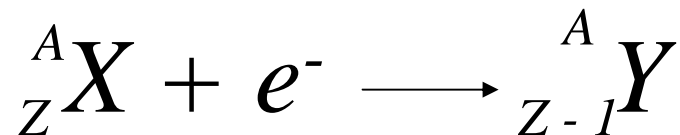
Decadimento β^+

Un protone si trasforma in un neutrone



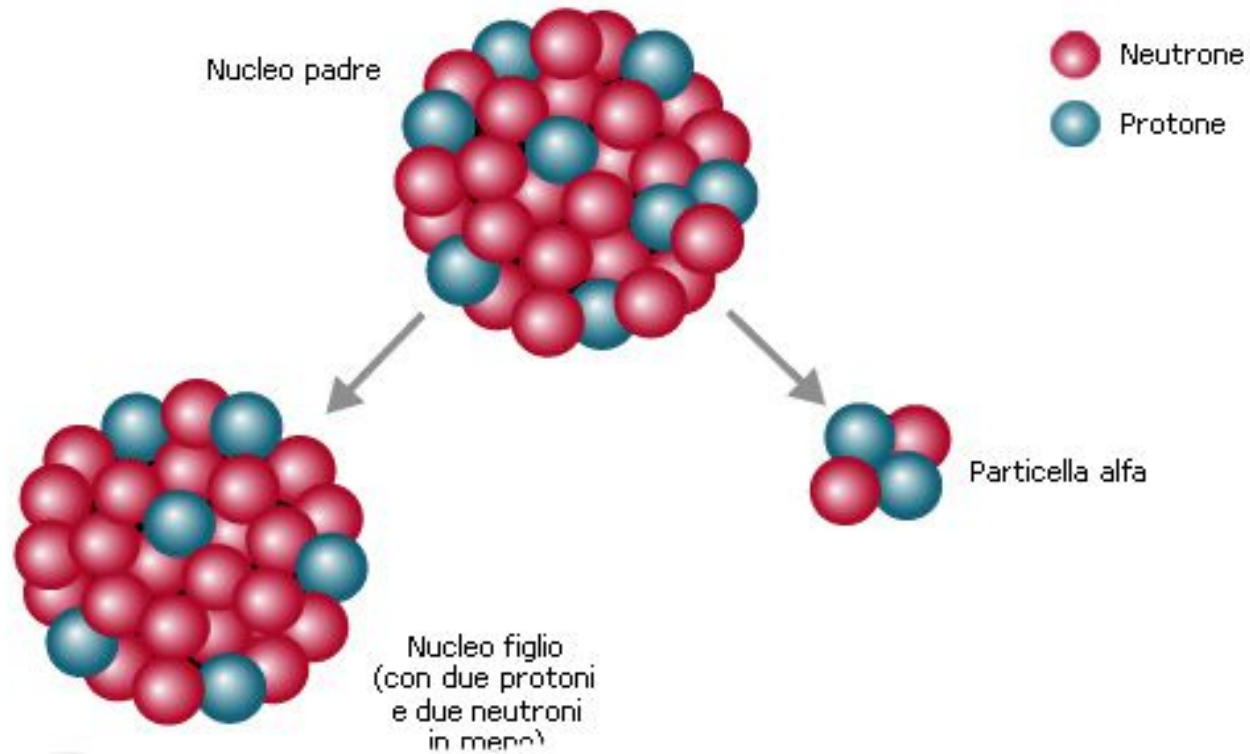
Cattura elettronica

Un protone del nucleo
“mangia” un elettrone (il più vicino) trasformandosi in un neutrone





Il decadimento alfa





Decadimento beta negativo



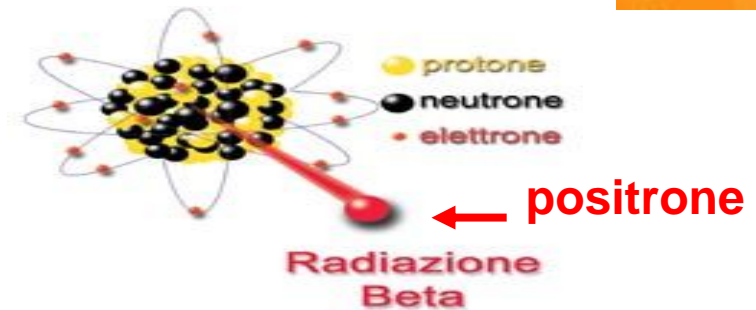
- $n = p + \beta^- + \text{antineutrino}$



- Il *neutrino* e l'*antineutrino* sono due particelle di massa prossima allo zero e carica elettrica neutra. Non possono essere considerati dei costituenti del nucleo ma vengono emessi da questo in corso di vari processi radioattivi.
 - Un neutrone può decadere secondo il suddetto decadimento **anche quando non è contenuto all'interno di un nucleo**, essendo la sua massa a riposo maggiore della somma di quelle del protone e dell'elettrone.
 - Il decadimento beta negativo provoca una **transizione isobarica**: il numero **Z** aumenta di una unità e l'atomo si trasforma in un elemento chimico differente, situato a destra nella tavola di Mendelejev mentre resta invariato il numero **A**.



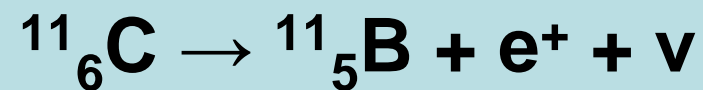
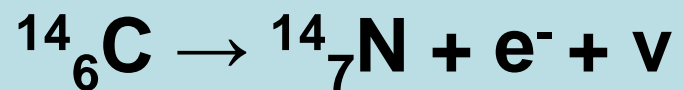
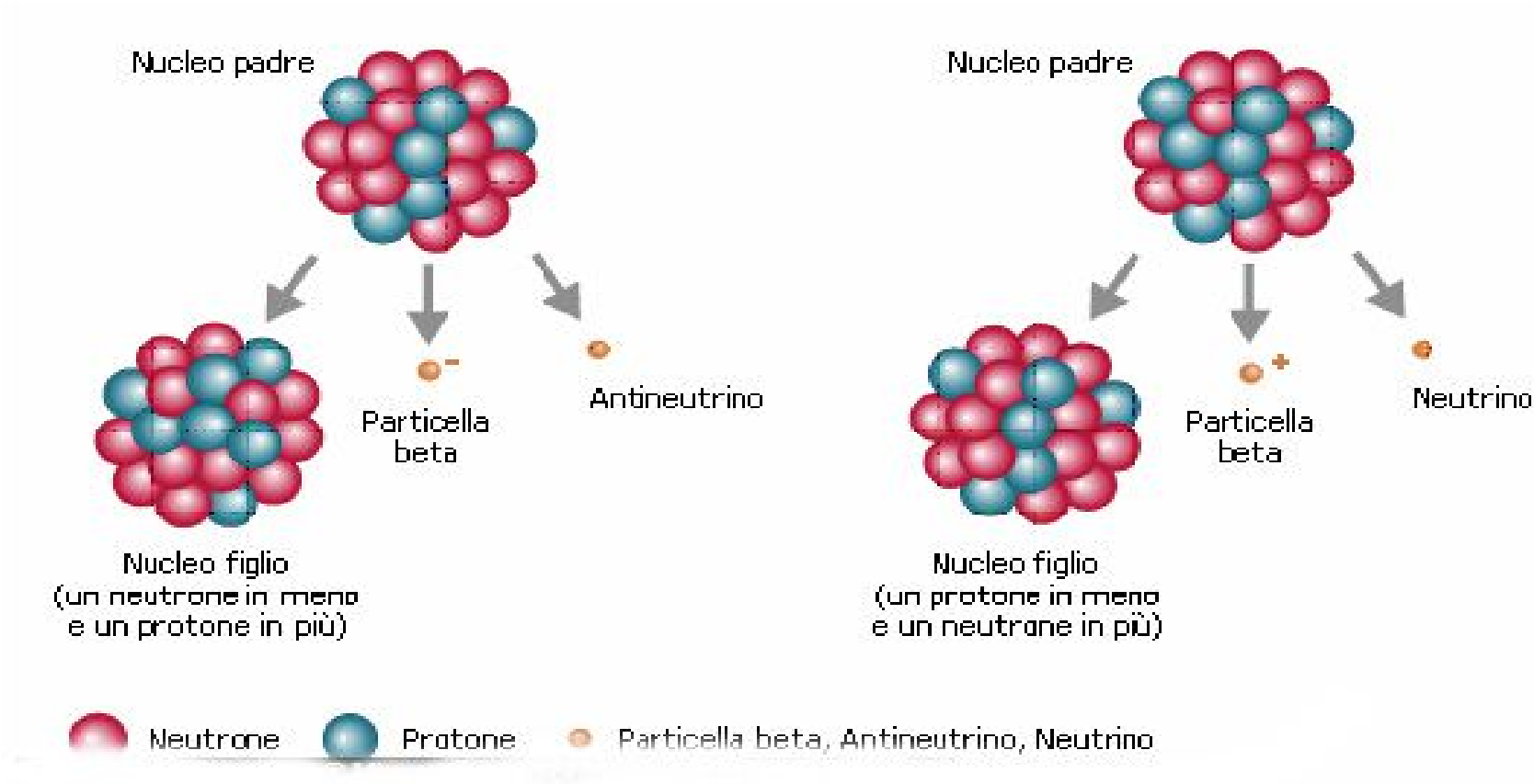
Decadimento beta positivo



- Il decadimento di un protone secondo lo schema precedente può avvenire **solo all'interno di un nucleo**, a spese dell'energia di quest'ultimo, poiché la sua massa a riposo è minore della somma delle masse del neutrone e dell'elettrone.
- Il decadimento β^+ è più probabile rispetto alla cattura elettronica per gli elementi con basso numero atomico.
- Il decadimento β^+ provoca una **transizione isobarica**: il numero **Z** si riduce di una unità e l'atomo si trasforma in un elemento chimico differente, situato a sinistra nella tavola di Mendelejev mentre resta invariato **A**.



Il decadimento beta + e -

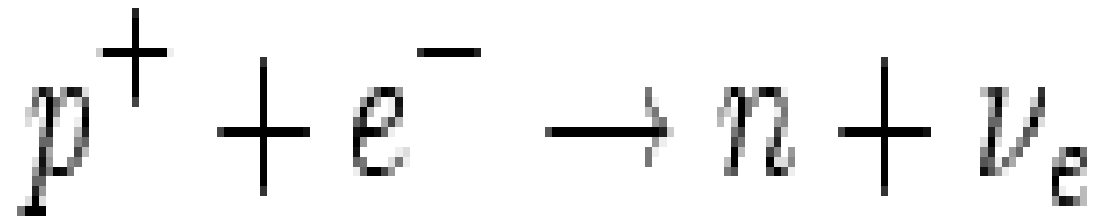




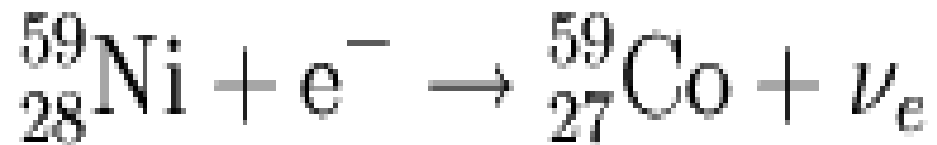
Il decadimento per cattura elettronica



- La **cattura elettronica** è uno dei tre modi in cui può avvenire il decadimento β : accade quando un nucleo assorbe uno dei suoi elettroni orbitanti e un protone del nucleo diventa un neutrone e come risultato si ottiene l'emissione di un neutrino :



Ecco due esempi:

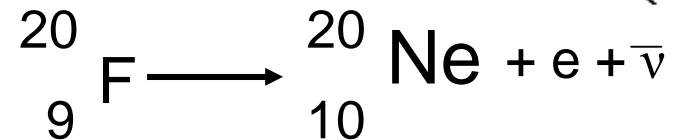
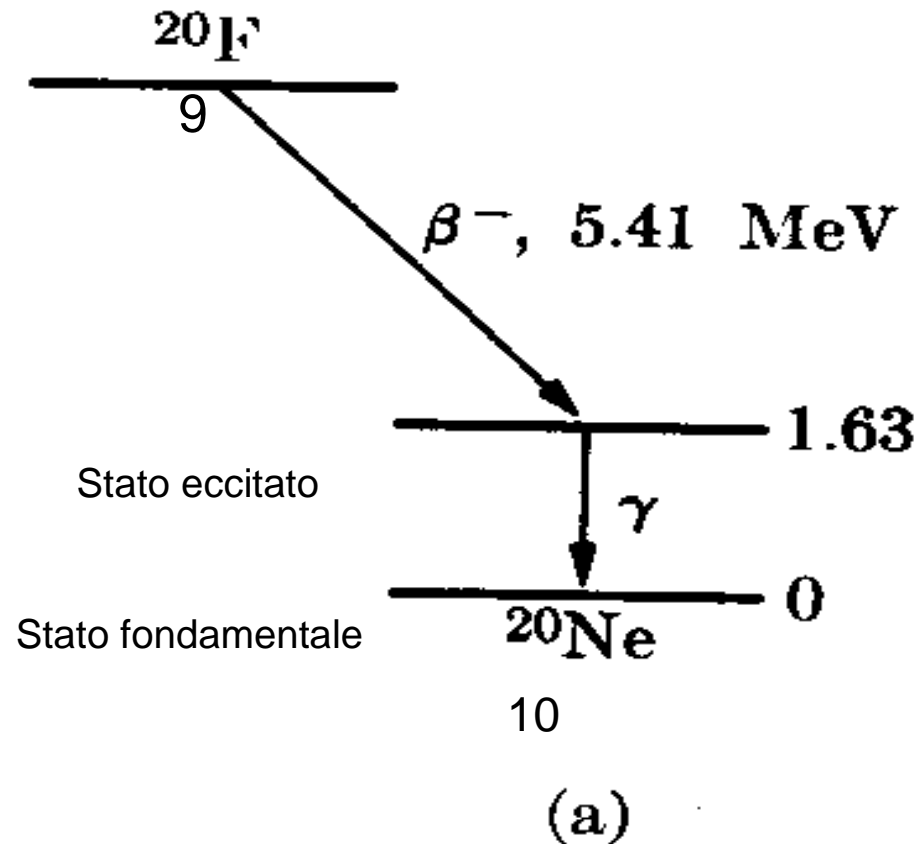


Esempio di decadimento

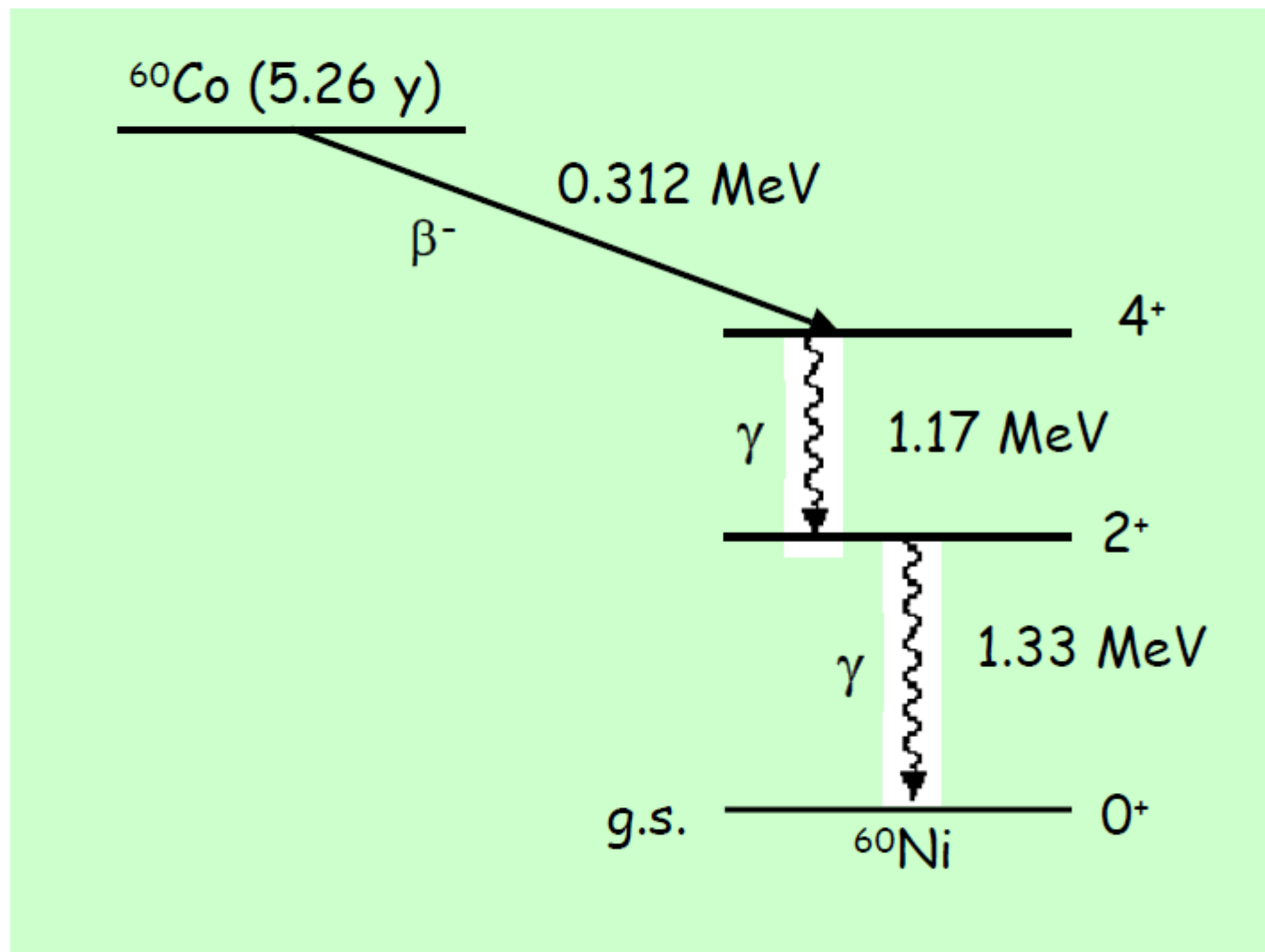
Il Fluoro 20 decade trasformandosi in un atomo di Neon 20

Cosa è successo?

È successo che un suo neutrone si è trasformato in un protone espellendo un elettrone e un antineutrino



Lo schema di decadimento del Co-60



Condizione di instabilità

- In sintesi si può affermare che:

Il nucleo è instabile se vale la relazione:

$$m_{\text{atomo originale}} > m_{\text{atomo prodotto}} + m_{\text{particelle emesse}}$$

Nucleo instabile = nucleo radioattivo



Gli atomi e le molecole esistono davvero!

(e oggi si possono vedere)

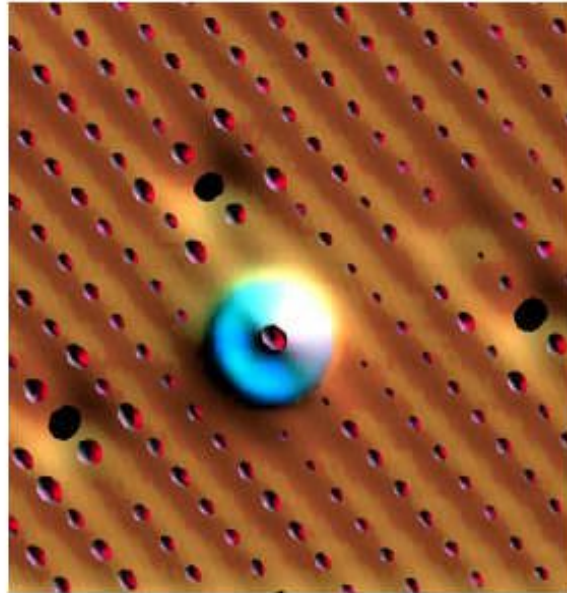
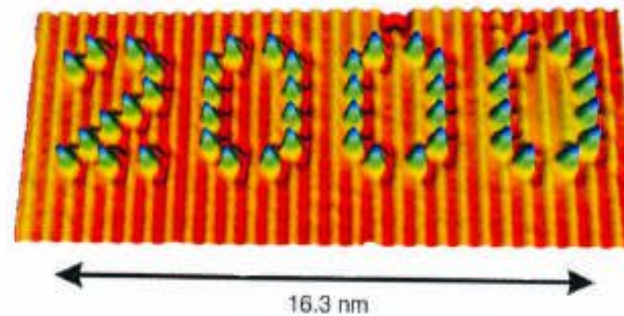


Immagine ottenuta con un microscopio a scansione a effetto tunnel (STM) di un singolo atomo di Xenon depositato su una superficie di Nickel(110)

Fonte: IBM Research Labs, Almaden
www.almaden.ibm.com



La data celebrativa del nuovo millennio è stata ottenuta posizionando 47 molecole di ossido di carbonio, CO, su una superficie di rame, mediante tecniche di microscopie a sonda

Fonte: *ChemPhysChem*, 2, 2001, pag. 362

La diseccitazione nel nucleo figlio

- Quasi sempre accade che le reazioni di disintegrazione lasciano il nucleo figlio in uno stato eccitato. **Esso si diseccita** in due modi fondamentali:
 - **Emissione di fotoni gamma**
 - **Conversione interna**

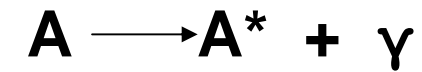
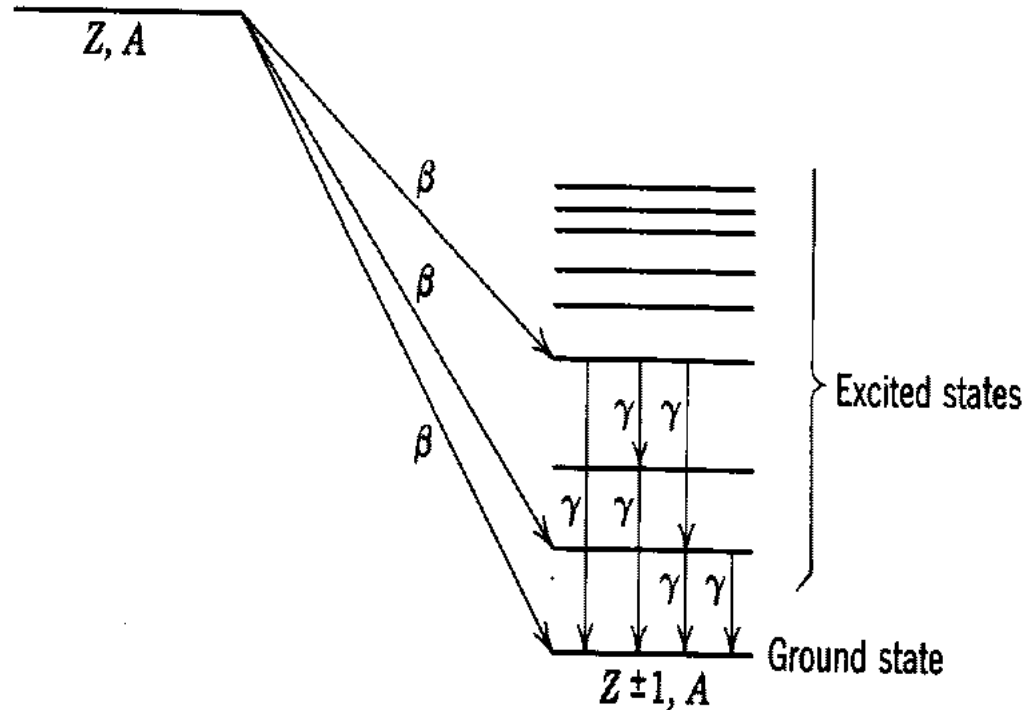
L'emissione gamma

- **Molto spesso il nucleo figlio di un decadimento alfa o beta viene creato in uno stato eccitato ossia con un contenuto di energia maggiore del suo stato fondamentale allora esso si disecciterà emettendo fotoni gamma.**
- **L'emissione gamma non trasforma perciò un nuclide in un altro ma semplicemente opera un riaggiustamento al contenuto energetico del nuclide figlio.**

Cosa sono i raggi gamma

- I raggi gamma sono fotoni di radiazione elettromagnetica, emessi dal nucleo. I nucleoni all'interno del nucleo hanno una struttura simile a quella degli elettroni nell'atomo, con livelli energetici discreti. Anche nel nucleo dunque le transizioni da un livello ad un altro possono avvenire (in assenza di reazioni con altre particelle) solo con l'emissione di fotoni, che prendono il nome appunto di raggi gamma.
- La loro energia va da poche decine di keV a molti MeV

Esempio di emissione gamma



The excitation of a nucleus as a result of beta decay

La conversione interna

- Vi è un'altra possibilità di diseccitazione, quella dovuta all'emissione di un elettrone (in genere della shell K) per effetto fotoelettrico. In sostanza il fotone gamma emesso dal nucleo sfugge dall'atomo in due modi: in modo diretto senza urtare elettroni, oppure urtando nel suo percorso un elettrone (con probabilità fortissima che esso sia il più vicino al nucleo) questa seconda modalità prende il nome di conversione interna.
- L'elettrone emesso avrà ovviamente una energia ben definita che sarà la differenza fra quella del fotone gamma e quella dell'energia di legame dell'elettrone stesso.

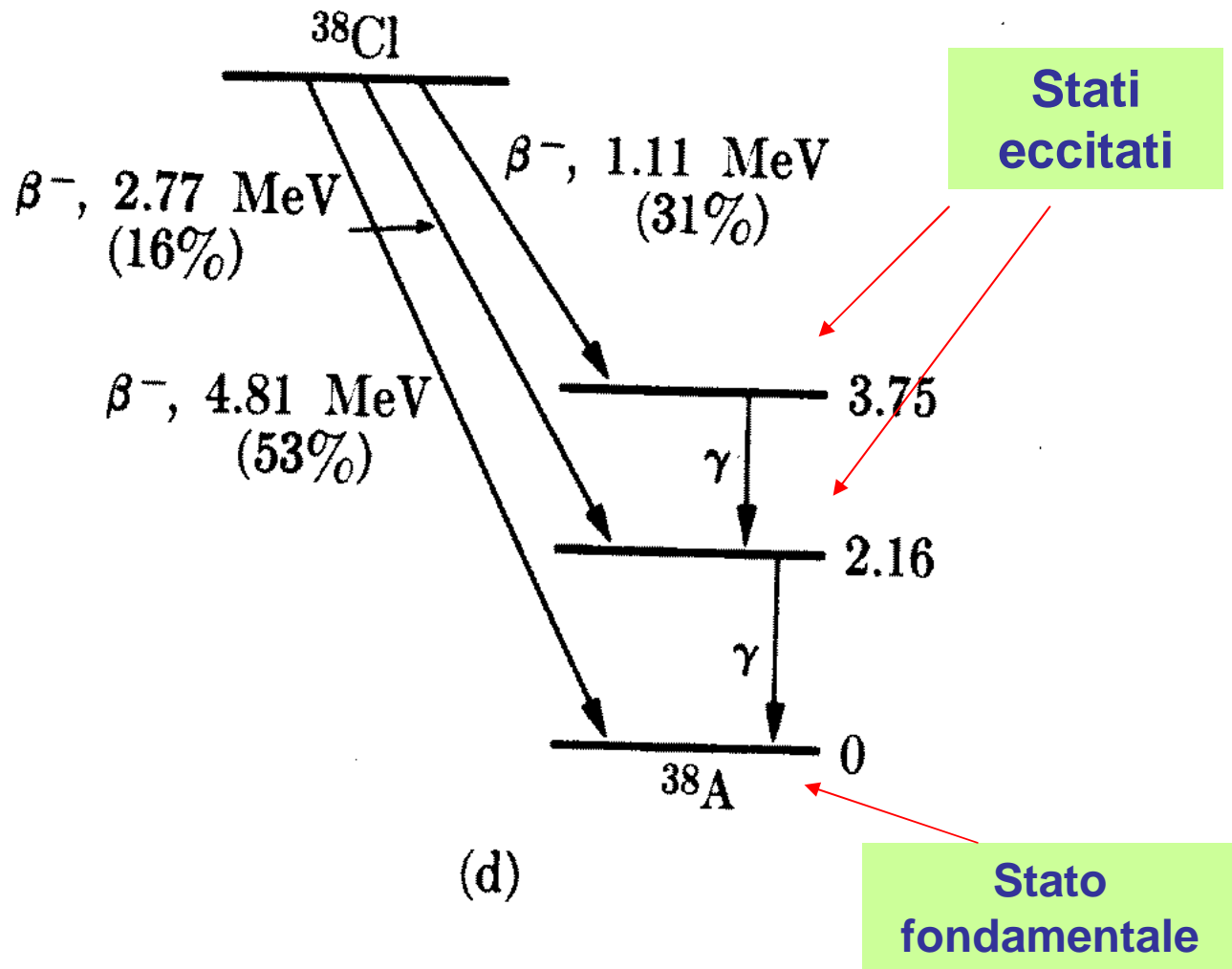
Elettroni di Auger

- Una volta che l'elettrone K sfugge dall'atomo la buca sarà presto riempita da un altro elettrone proveniente dalle shell superiori con emissione di fotoni X.
- Quindi nel fenomeno della C.I. noi vedremo che l'atomo emette un elettrone di energia ben definita (detto elettrone di conversione interna) e dei fotoni X caratteristici dell'atomo in questione.
- Ma c'è un'aggiunta finale, il fotone X può urtare nel suo tragitto di abbandono dell'atomo un elettrone (più esterno della shell K) che per il solito effetto fotoelettrico sfuggirà con energia definita pari alla differenza fra il fotone X e la sua energia di legame, che sarà inferiore dell'elettrone di conversione interna e proprio per distinguerlo viene chiamato "elettrone di Auger" e il processo viene detto "effetto Auger"

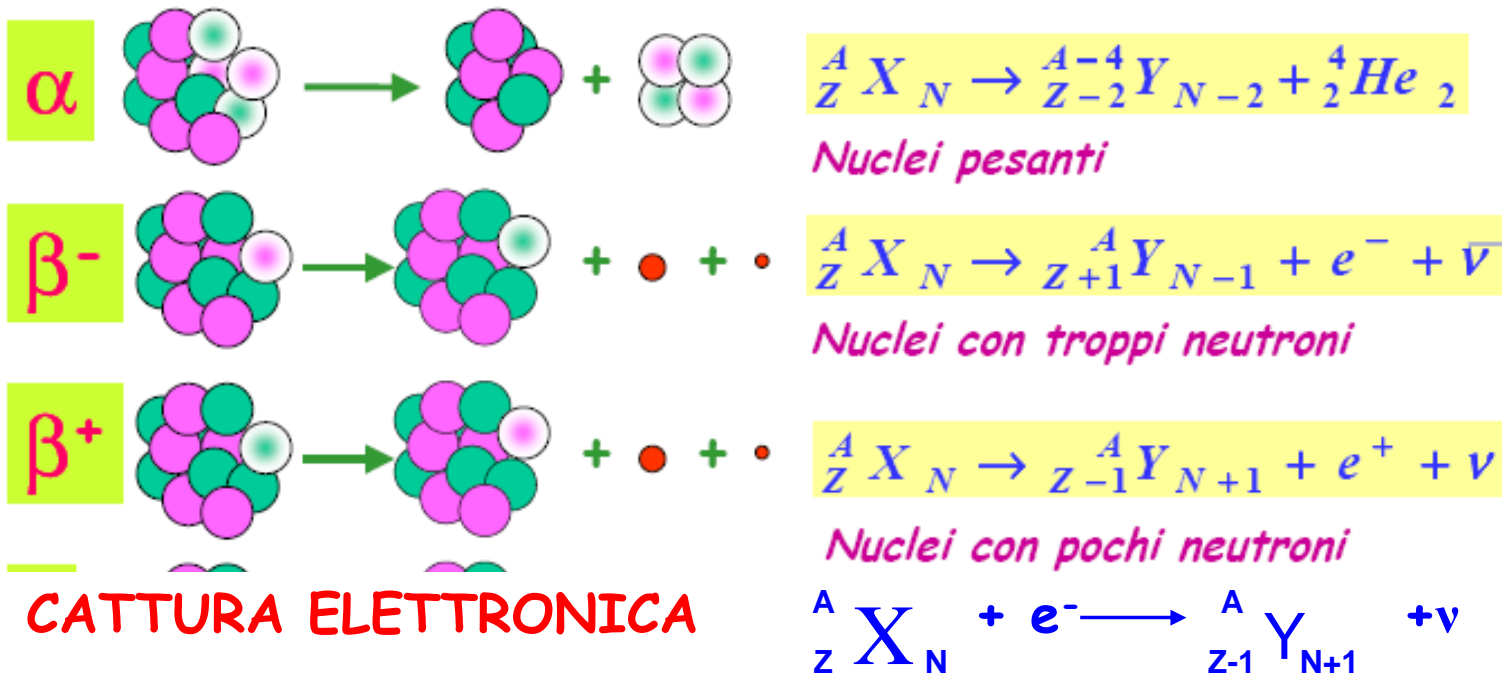
Altro esempio di decadimento più complesso

Il Cloro 38 decade in Argon 38

In questo caso il cloro 38 decade in Argon 38 che però non è nel suo stato fondamentale ma eccitato, allora emetterà dei fotoni gamma per togliersi di dosso l'eccitazione !



Quadro riassuntivo dei decadimenti

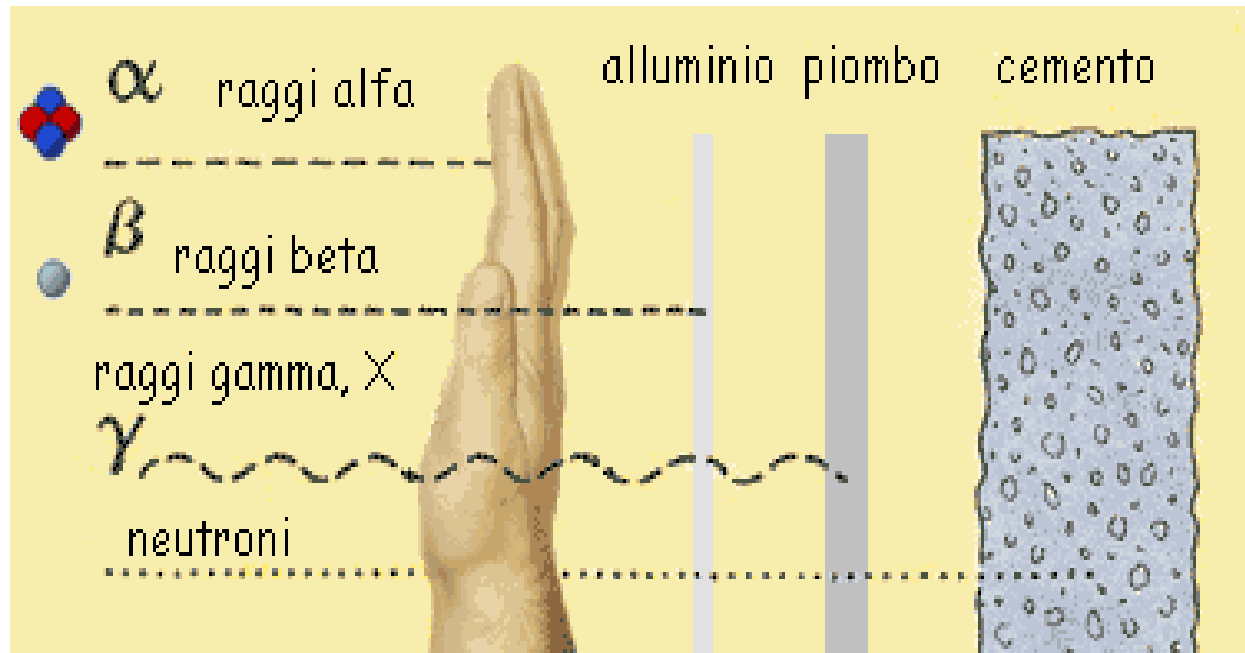


Quadro riassuntivo: diseccitazione



- ***Emissione di fotone gamma da nucleo***
 - 1) Esso raggiunge l'esterno dell'atomo senza urtare elettroni ----- ***emissione gamma***
 - 2) Esso urta gli elettroni K (elettroni di conversione interna) espellendoli con conseguente emissione di X caratteristici --- ***conversione elettronica***
(Possibile effetto Auger se il fotone X urta e espelle elettroni delle shell superiori)

Potere penetrante delle radiazioni



IN ARIA con fasci da 1 Mev

alfa 0.04 m range

beta 4 m range (100 volte le alfa)

gamma 400 m SEV (non si può definire un range ma solo il SEV il quale ci indica che dopo un percorso pari a 100 volte quelle beta il loro numero si dimezza)

Raggi alfa

- Particelle costituite da nuclei di Elio (2 neutroni e 2 protoni) ed hanno carica 2^+
- Energia: da 4 a 9 Mev
- Velocità: da 15.000 a 20.000 Km/s
- Potere penetrante: meno di 10 cm. (Range in aria)
- Potere ionizzante: molto elevato (con un'energia di 3 Mev producono 4000 coppie di ioni per millimetro in aria)
- Grado di pericolosità: sono pericolose solo se emesse da una sorgente interna al corpo umano







Raggi beta

- Particelle costituite da elettroni o positroni
- Energia: da qualche Kev a molti Mev ma di rado superiore ai 4 Mev
- Velocità: da 150.000 Km/s a “c” (velocità della luce)
- Potere penetrante: debole (100 volte minore dei raggi gamma e 100 volte superiore ai raggi alfa) in aria percorrono circa un metro (Range in aria)
- Potere ionizzante: molto basso (4 coppie di ioni per millimetro in aria con energia di 3 Mev)
- Grado di pericolosità: il limitato potere penetrante fa sì che siano pericolose solo se emesse da sorgente interna al corpo umano.

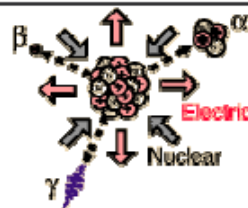
Raggi gamma

Onde elettromagnetiche con λ compreso fra 10^{-11}m e 10^{-14}m

- Energia: da qualche Kev a molti Mev
(ma di rado superiore ai 10 Mev)
- Velocità: pari a “c” (velocità della luce)
- Potere penetrante: forte in aria percorrono centinaia di metri, non è possibile definire un range ma solo il SEV (qualche cm di piombo ne diminuisce l'intensità di un fattore due)
- Potere ionizzante: indiretto per mezzo degli elettroni secondari
- **Grado di pericolosità: sempre molto pericolosi** anche se emessi da sorgente esterna al corpo umano.

Tipo di radiazione	Frequenze / lunghezze d'onda	energia	Effetto sulla materia	
Microonde	$1,6-30 \text{ GHz} / 187 - 10 \text{ mm}$	$10 - 1000 \mu\text{eV}$		rotazione e torsione molecolare e quindi calore
Infrarosso	$0.03-40 \cdot 10^{15} \text{ Hz} / 1 \text{ mm} - 750 \text{ nm}$	$1 - 1500 \text{ meV}$		vibrazione molecolare e quindi calore
Visibile	$40 - 75 \cdot 10^{15} \text{ Hz} / 750-400 \text{ nm}$	$1,5 - 3,2 \text{ eV}$		Vibrazione molecolare e transizione di livello degli elettroni
Ultravioletta	$75 - 300 \cdot 10^{15} \text{ Hz} / 400 - 10 \text{ nm}$	$3,2 - 124 \text{ eV}$		Transizione di livello degli elettroni e ionizzazione di alcuni elementi
Raggi X	$10^{16} - 10^{20} \text{ Hz} / 10 \text{ nm}-1 \text{ pm}$	$124 \text{ eV} - 1 \text{ MeV}$		Ionizzazione
Raggi Gamma	$> 10^{20} \text{ Hz} / < 1 \text{ pm}$	$1 - 3 \text{ MeV}$		Ionizzazione, e per energie superiori a 1,02 MeV produzione di coppie elettrone-positrone

I raggi cosmici non sono una radiazione elettromagnetica: sono composti al 90% da protoni e per il resto da raggi alfa e altre particelle subatomiche.

Raggi cosmici	In media $0,3 \text{ GeV}$ con punte fino a 1000 TeV		L'energia è talmente elevata da rendere instabile il nucleo di alcuni elementi provocando l' emissione di raggi gamma e neutroni
---------------	--	---	---



Legge del decadimento 1



Il numero dei nuclei che decadono nell'unità di tempo è proporzionale al numero dei nuclei presenti

$$- \Delta N / \Delta t = \lambda N$$

λ è la probabilità che avvenga il decadimento nell'unità di tempo riferito al singolo atomo

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

Andamento nel tempo del numero di radionuclidi

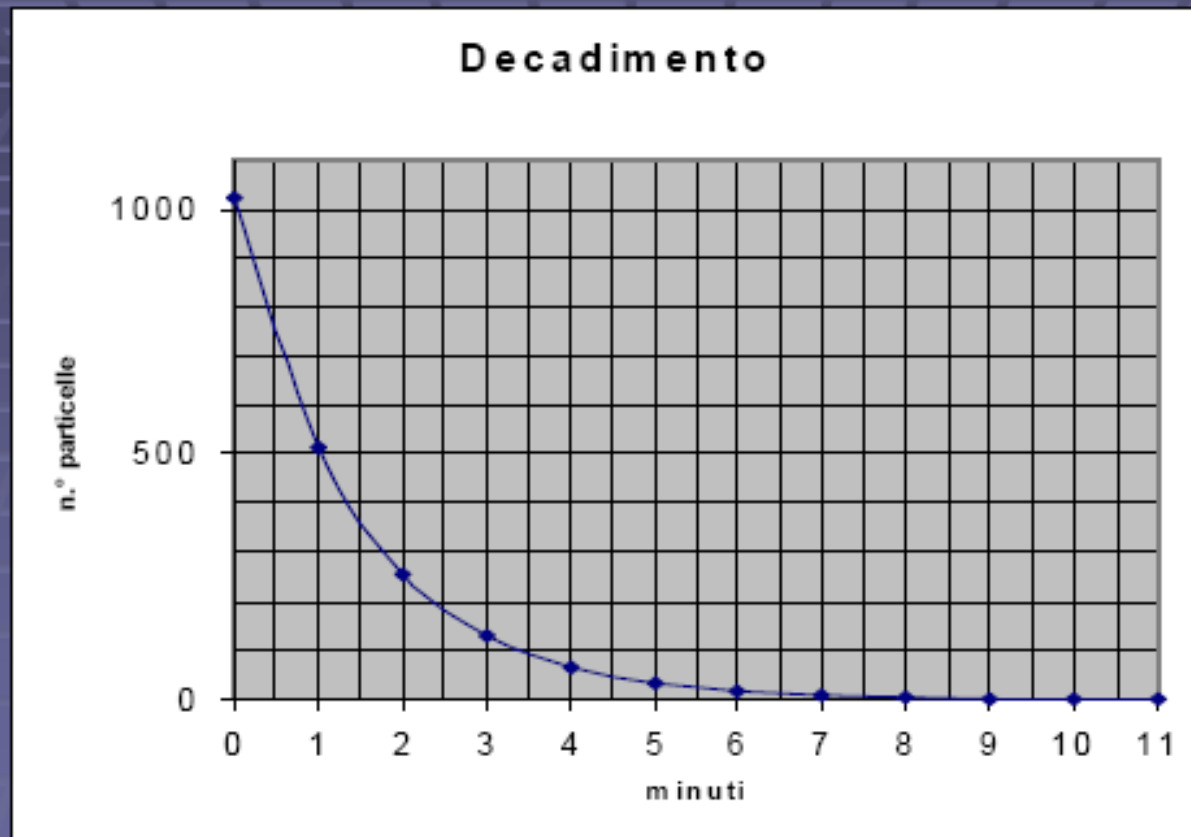
TEMPO DI DECADIMENTO

L'analisi del comportamento di questa diminuzione ha evidenziato che l'attività dimezza ad intervalli costanti e questo tempo è stato chiamato periodo di dimezzamento o $T_{1/2}$. Per esempio se abbiamo 1024 atomi di un ipotetico elemento radioattivo con periodo di dimezzamento di 1 minuto avremo:

1024 atomi a	T=	0
512 "	T=	1 min
256 "	T=	2 min
128 "	T=	3 min
64 "	T=	4 min
32 "	T=	5 min
16 "	T=	6 min
8 "	T=	7 min
4 "	T=	8 min
2 "	T=	9 min
1 "	T=	10 min
0 "	T=	11 min

Grafico del decadimento

TEMPO DI DECADIMENTO



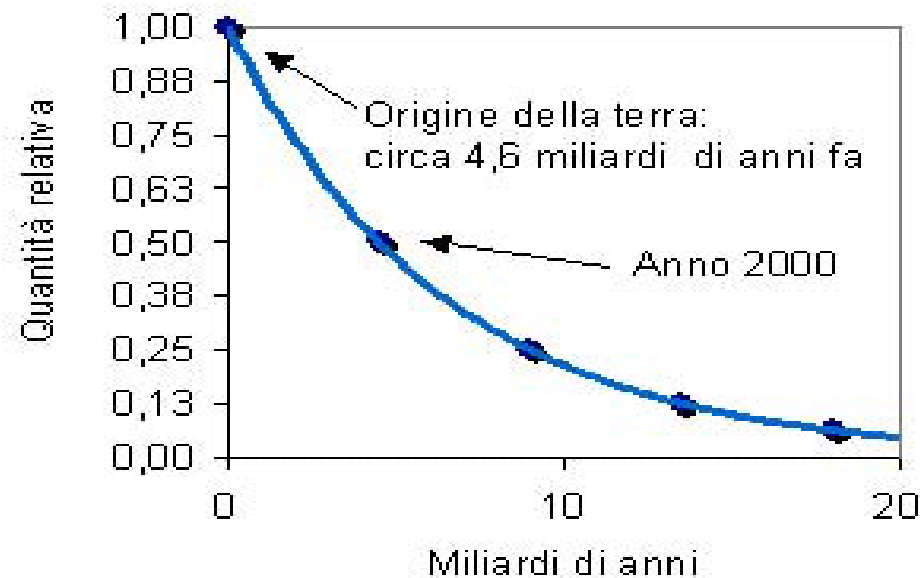


Legge del decadimento 2



- La trasformazione di un nucleo, che in termini tecnici viene definita “decadimento”, **segue delle leggi probabilistiche** con tempi che variano moltissimo da elemento a elemento e i cui valori sono dai milionesimi di secondo ai miliardi di anni!

Decadimento dell'U-238



^{238}U



$^{234}\text{Th} + 4\text{He}$

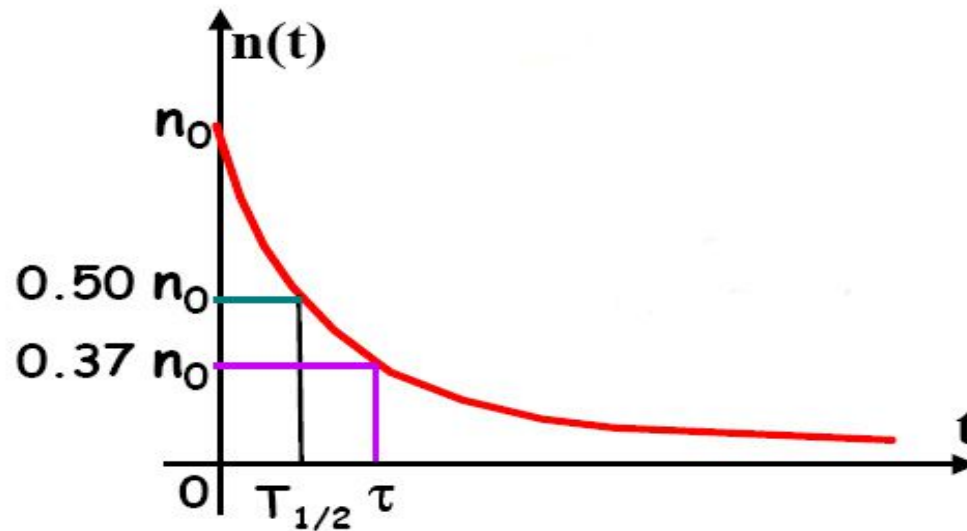
$t_{1/2} = 4.6$ miliardi di anni



Tempo di dimezzamento e vita media



- Vita media = tempo trascorso il quale rimane il 37% nei nuclei
- Tempo di dimezzamento = tempo trascorso il quale rimane il 50% dei nuclei



$$\tau = 0.693 T_{1/2}$$

$$\tau = 1/\lambda$$



Esempi di periodi di dimezzamento:

decadimento $T_{1/2}$

${}^3\text{H}$ (β)	12.33 anni
${}^{14}\text{C}$ (β)	5730 anni
${}^{40}\text{K}$ (β)	$1.28 \cdot 10^9$ anni
${}^{60}\text{Co}$ (β)	5.7 anni
${}^{137}\text{Cs}$ (β)	30 anni
${}^{131}\text{I}$ (β)	8 giorni
${}^{222}\text{Rn}$ (α)	3.82 giorni
${}^{235}\text{U}$ (α)	$7.04 \cdot 10^8$ anni
${}^{238}\text{U}$ (α)	$4.47 \cdot 10^9$ anni



4. Radioattività naturale ed artificiale

SORGENTI DI RADIAZIONE NATURALE

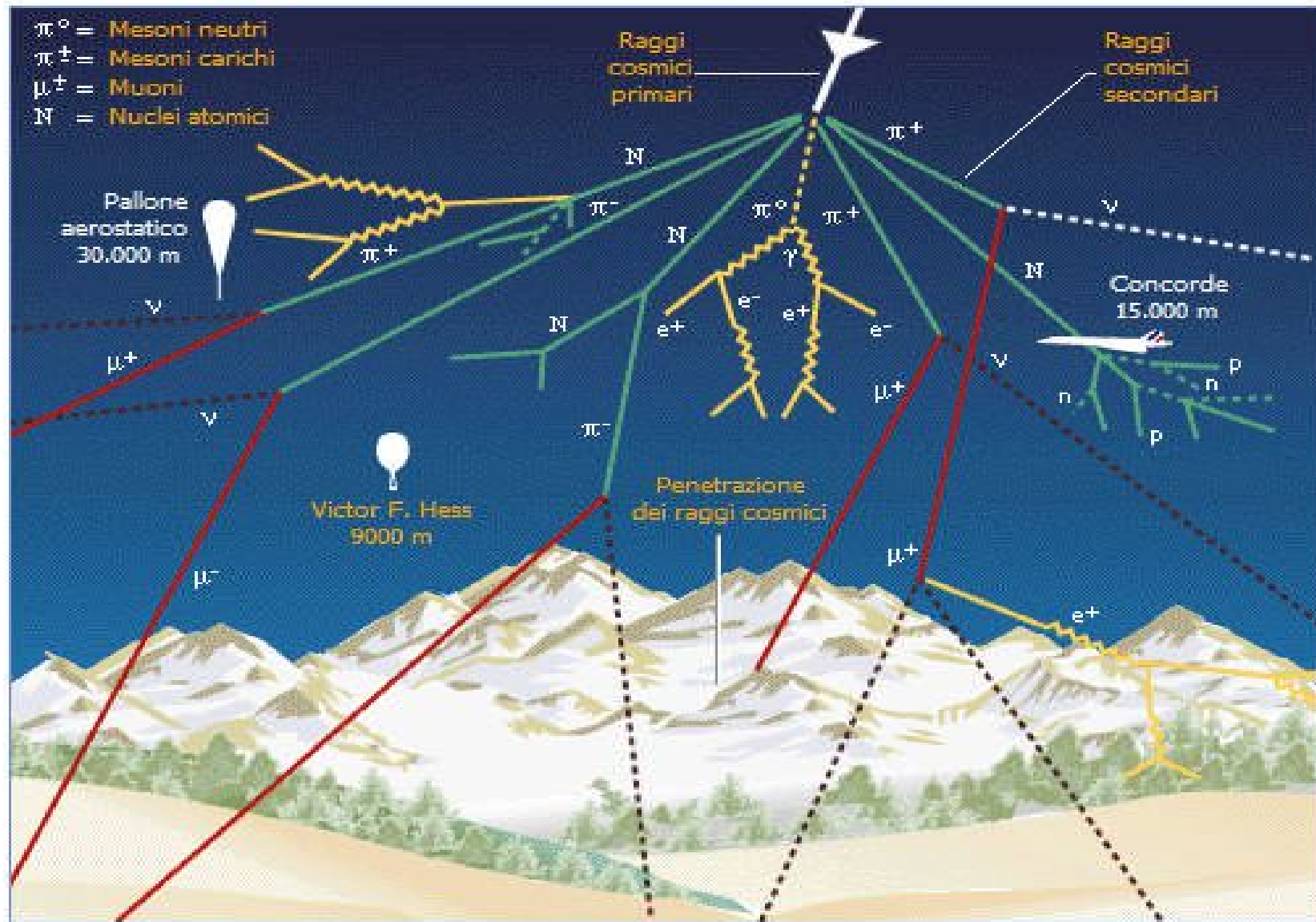
La radiazione naturale può essere suddivisa nei seguenti tre contributi:

- - **Radiazione cosmica** (al livello del mare) (circa 0.30 mSv/anno)
Flusso dei muoni circa 100/s m² (quasi tutti dovuti a muoni, poi e, p, n e gamma)
- - **Radiazione cosmogenica** (circa 0.01 mSv/anno)
(quasi tutto dovuto al C-14)
- - **Radiazione terrestre** (circa 3.00 mSv/anno)
- esterna 0.6 mSv/anno (fondo gamma) , interna 2.4 mSv/anno- (di cui 2 mSv/anno dovuto al solo Radon)
rad. Gamma rad. Alfa

Radiazione cosmica

- I raggi cosmici sono perlopiù di origine galattica, la componente principale (98%) è di natura adronica mentre il restante 2% è di natura leptonica (elettroni e muoni). La componente adronica è costituita da 88% di protoni, 11% di particelle α ed il restante da nuclei più pesanti. La radiazione cosmica primaria ha un'energia che si estende da 100MeV fino a 10^{14} MeV.
- Una seconda componente di radiazione cosmica ha origine dalla superficie solare. Essa è costituita da protoni con energie generalmente inferiori a 100 MeV e comunque raramente superiori a 10GeV. Questa componente può essere responsabile della dose in alta quota, al contrario il contributo al livello del mare è scarsamente significativo ed è dovuto solamente alla componente più energetica. Il campo magnetico terrestre modula l'intensità della radiazione cosmica. L'effetto prodotto è una maggiore intensità in corrispondenza dei poli ed una minore intensità in corrispondenza dell'equatore.
- L'interazione di particelle di alta energia produce sciame di particelle secondarie composti principalmente di protoni, neutroni, pioni e nuclei a basso numero atomico
- Si è stimata in circa 300 $\mu\text{S}/\text{anno}$ la dose dovuta alla radiazione cosmica al livello del mare all'aperto
- N.B. I raggi cosmici furono scoperti da Victor Hess nel 1912, tra di essi vi è la particella più elusiva che esista: il neutrino, ne arrivano dal Sole 10^{12} cm^2/s .
- Il flusso della radiazione cosmica dipende dall'altezza (max a circa 20 Km) e dalla latitudine (max all'equatore)- a 1500 m la dose raddoppia

I raggi cosmici



Radiazione cosmogenica

L'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera produce un certo numero di radionuclidi.

- L'elenco completo dei radionuclidi cosmogenici con tempi di dimezzamento superiori ad 1 giorno è riportato in tabella

<i>Element</i>	<i>Isotope</i>	<i>Half-life</i>	<i>Decay mode</i>
Cosmogenic radionuclides			
Hydrogen	³ H	12.33 a	beta (100%)
Beryllium	⁷ Be	53.29 d	EC ^a (100%)
	¹⁰ Be	1.51 10 ⁶ a	beta (100%)
Carbon	¹⁴ C	5730 a	beta (100%)
Sodium	²² Na	2.602 a	EC (100%)
Aluminium	²⁶ Al	7.4 10 ⁵ a	EC (100%)
Silicon	³² Si	172 a	beta (100%)
Phosphorus	³² P	14.26 d	beta (100%)
	³³ P	25.34 d	beta (100%)
Sulphur	³⁵ S	87.51 d	beta (100%)
Chlorine	³⁶ Cl	3.01 10 ⁵ a	EC(1.9%), beta (98.1%)
Argon	³⁷ Ar	35.04 d	EC (100%)
	³⁹ Ar	269 a	beta (100%)
Krypton	⁸¹ Kr	2.29 10 ⁵ a	EC (100%)

Tra i più importanti ricordiamo **H-3, Be-7, C-14 e Na-22**, i restanti sono trascurabili dal punto di vista radioprotezionistico. Le più recenti stime indicano la seguente stima di dose efficace annua: C-14: 12 µSv , Be-7: 0.03 µSv , Na-22: 0.15 µSv, H-3: 0.01 µSv

Radiazione di origine terrestre

- I Radionuclidi primordiali sono così chiamati in quanto hanno un tempo di dimezzamento che è paragonabile con l'età della terra (circa 5 miliardi di anni).
L'irradiazione esterna alla popolazione è dovuta principalmente alla radiazione gamma delle famiglie radioattive aventi come capostipite U-238 e Th-232 e dal radioisotopo K-40, **per oltre il 50% al solo Radon.**
- L'esposizione esterna è dovuta ai radionuclidi presenti in tracce nel suolo e nei materiali da costruzione.
Concentrazioni maggiori di radionuclidi si trovano in rocce di origine vulcanica e concentrazioni minori in rocce sedimentarie. Fanno eccezione alcuni tipi di argilla ed alcune rocce fosfatiche.

Le famiglie radioattive

- In natura è presente una grande varietà di elementi radioattivi, molti di questi discendono dal decadimento di uno stesso elemento più pesante definito capostipite; l'insieme di tutti i nuclidi che derivano dallo stesso capostipite costituiscono una famiglia o serie radioattiva. I nuclidi radioattivi variano di quattro unità il numero di massa durante i processi di decadimento alfa, mentre i decadimenti beta producono una sola variazione del numero atomico; questo permette di classificare le quattro serie in modo tale che tutti gli elementi della stessa famiglia possiedano un numero di massa che possa essere rappresentato dalla stessa formula:
- $A = 4n + m$ (n è un numero intero; $m = 0, 1, 2, 3$)

Le 4 famiglie

Nome della serie	Capostipite	Tempo di dimezzamento (y)	Elemento finale	Numero di massa (n è un intero)
Torio	^{232}Th	1.41×10^{10}	^{208}Pb	$4n$
Nettunio	^{237}Np	2.14×10^6	^{209}Bi	$4n + 1$
Uranio	^{238}U	4.47×10^9	^{206}Pb	$4n + 2$
Attinio	^{235}U	7.04×10^8	^{207}Pb	$4n + 3$

La legge empirica delle famiglie radioattive

- La famiglia del tipo “ $4n + 1$ ” è stata scoperta recentemente tra i radionuclidi artificiali, in realtà non è presente in natura perché i tempi di dimezzamento del Nettunio e di tutti i nuclei figli sono minori rispetto al tempo di vita della terra e ciò ha comportato la loro completa trasformazione nell'elemento finale (il Bismuto ordinario).

Tutti gli isotopi radioattivi contribuiscono al fondo di radioattività naturale ma l'effettivo pericolo per l'inquinamento negli ambienti chiusi è dovuto principalmente ad alcuni isotopi del Radon che decadono alfa. Tutte le famiglie generano isotopi di tale elemento, ma l'isotopo più significativo dal punto di vista radioprotezionistico è il **Rn-222** presente nella famiglia dell' Uranio -238.

FAMIGLIA DELL'URANIO-238

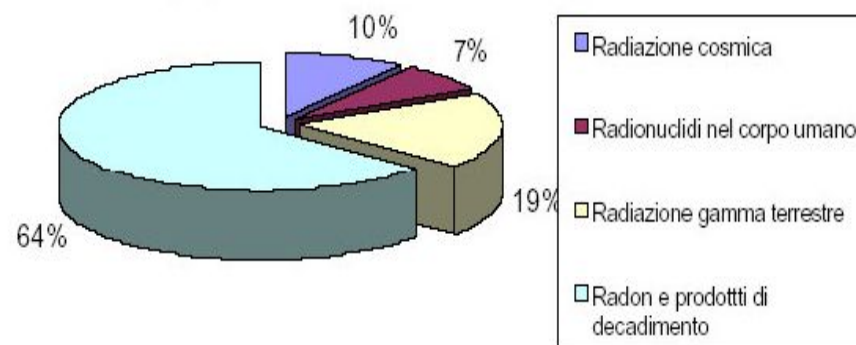
- L'Uranio -238 è un elemento molto comune presente nella crosta terrestre (abbondanza frazionaria circa 2-3 ppm-cioè 2-3 grammi per tonnellata-) e nonostante sia radioattivo è ancora presente in quantità notevole perché ha un tempo di dimezzamento paragonabile all'età della terra .
Nella tabella seguente viene descritta tutta la catena di decadimento della famiglia:

Nuclide	Simbolo	N	Tipo di decadimento	Tempo di dimezzamento
Uranio- 238	$^{238}_{92}\text{U}$	146	α	$4.47 \times 10^9 \text{ y}$
Torio-234	$^{234}_{90}\text{Th}$	144	β, γ	24.1 d
Protoattinio-234	$^{234}_{91}\text{Pa}$	143	β, γ	70.2 s
Uranio-234	$^{234}_{92}\text{U}$	142	α	$24.5 \times 10^4 \text{ y}$
Torio-230	$^{230}_{90}\text{Th}$	140	α	$75.4 \times 10^3 \text{ y}$
Radio-226	$^{226}_{88}\text{Ra}$	138	α, γ	$1.6 \times 10^3 \text{ y}$
Radon-222	$^{222}_{86}\text{Rn}$	136	α	3.8 d
Polonio-218	$^{218}_{84}\text{Po}$	134	α	183 s
Piombo-214	$^{214}_{82}\text{Pb}$	132	β, γ	1608 s
Bismuto-214	$^{214}_{83}\text{Bi}$	131	α, β, γ	1194 s
Polonio-214	$^{214}_{84}\text{Po}$	130	α	$164 \times 10^{-6} \text{ s}$
Piombo-210	$^{210}_{82}\text{Pb}$	128	α, β, γ	22.3 y
Bismuto-210	$^{210}_{83}\text{Bi}$	127	β	5 d
Polonio-210	$^{210}_{84}\text{Po}$	126	α	138.4 d
Piombo-206	$^{206}_{82}\text{Pb}$	124		Stabile

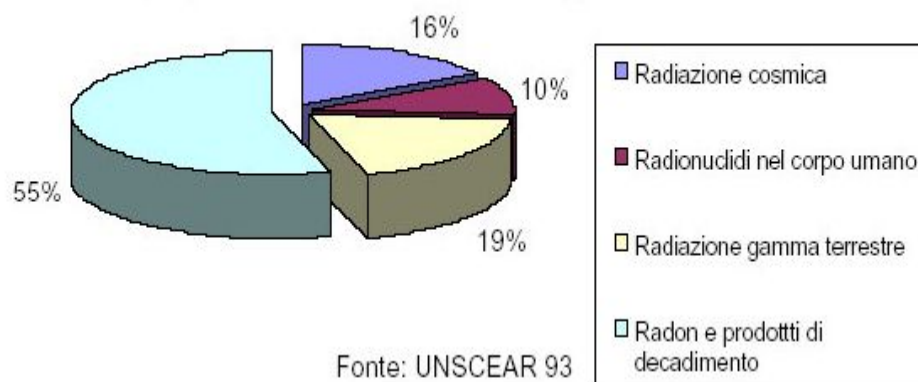


Dose annua da radiazione naturale

Ripartizione percentuale delle dosi assorbite dalla popolazione italiana da sorgenti naturali

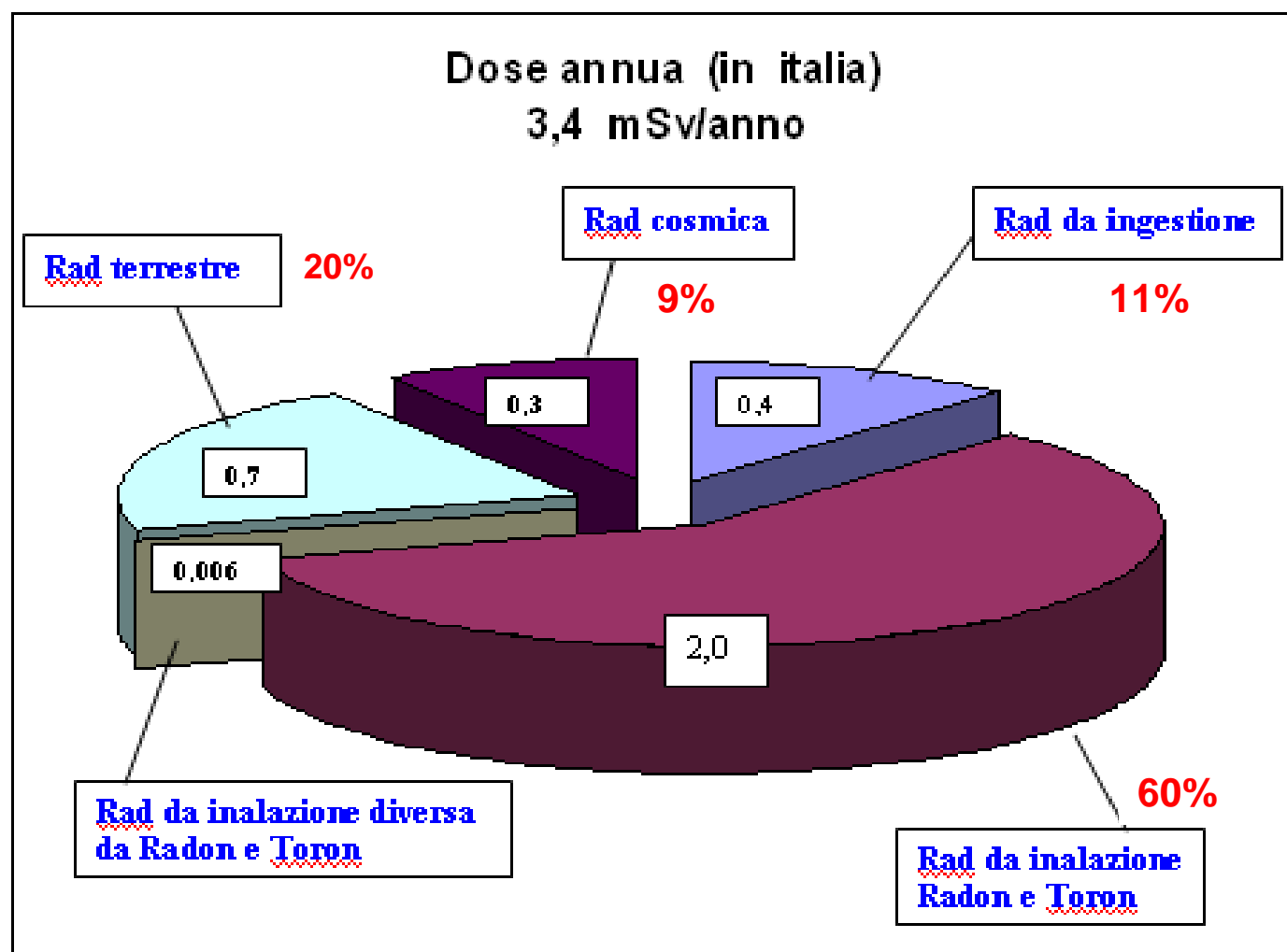


Ripartizione percentuale delle dosi assorbite dalla popolazione mondiale da sorgenti naturali



Fonte: UNSCEAR 93

Dose naturale annua in Italia



Dose media dovuta alle sorgenti naturali

- Radionuclidi primordiali presenti nei materiali della crosta terrestre fin dalla sua formazione: K-40, Rb-87, U-238, Th-232 e U-235
- Nell'aria la radiazione naturale è dovuta principalmente al radon ed al toron, gas 7.5 volte più pesanti dell'aria e tendono ad accumularsi nei locali chiusi, soprattutto pian terreno o scantinati e interrati.
- I materiali da costruzione quelli più radioattivi sono: il granito, la pietra pomice, il fosfato di gesso, il tufo e la pozzolana, ma la principale sorgente di radon rimane il terreno sottostante le case, (soprattutto le sue caratteristiche di porosità e permeabilità e grado di fessurazione).
- Il valor medio della concentrazione di radon nelle case italiane è di 77 Bq/mc che corrisponde ad una dose efficace di circa 2 mSv/anno.
- Anche le acque contengono quantità di radioattività, dovuta alle piogge ed alle acque di drenaggio; particolarmente radioattive sono le acque sulfuree
- Attraverso la catena alimentare entrano nel corpo sostanze radioattive come K-40, Ra-226, Ra-228, C-14, H-13.

Le sorgenti di radioattività - artificiale

1) Sorgenti impiegate in medicina: diagnostica e terapia

2) Sorgenti da ricadute degli esperimenti nucleari (fallout)

3) Sorgenti radioattive artificiali e applicazioni di uso comune

- rivelatori di incendio
- rivelatori di umidità e misuratori di contenuto di acqua
- misuratori di spessore
- misuratori di densità
- apparecchiature gammagrafie per la determinazione di difetti nelle saldature
- grandi irradiator per la sterilizzazione di derrate alimentari e prodotti medicali
- quadranti di strumentazione
- sistemi antistatici
- Leghe contenenti U e Th
- materiali dentali
- lenti ottiche
- oggetti in ceramica contenenti U e Th

Le sorgenti di radioattività artificiale

- Attualmente gli usi medici costituiscono la maggiore fonte di esposizione dell'uomo alle radiazioni ionizzanti.
- Le dosi individuali variano da zero, per coloro che non sono mai stati sottoposti ad esami radiologici, ad un valore massimo che può essere dell'ordine del Sv (cioè migliaia di volte la radiazione naturale)
- - la media italiana è di circa 1 mSv/anno-

Dosi medie assorbite dai pazienti in indagini tradizionali Rx

Tabella 5.2: Dosi mediamente assorbite dai pazienti nelle indagini radiodiagnostiche tradizionali

Tipo di esame	Equiv. dose efficace, mSv
Radiografia al torace	0,14
Estremità	0,06
Spina lombosacrale	1,7
Cranio	0,16
Tratto GI superiore	4,1
Urografia	3,1
Angiografia	6 - 8
Tomografia assiale computer.	FAC 4 - 10
Mammografia	<1
Fonte: UNSCEAR, 1993 ⁴⁴	
Esami dentali	0.01
Drenaggio biliare	40

Dosi medie assorbite dai pazienti in medicina nucleare

Tabella 5.3: Dosi mediamente assorbite dai pazienti in medicina nucleare

Tipo di esame	Età paziente anni	Attività somministrata MBq	Equiv.dose efficace, mSv
Ossa	0-9	380	9,5
	10-19	570	5,7
	> 20	790	6,3
Cervello	0 - 9	460	11,1
	10 - 19	690	7,6
	>20	962	8,7
Cardiovascolare	0 - 9	37 - 555	73 -14
	10 - 19	55 - 830	20 - 9,1
	>20	76 - 1156	17,5 - 9,8

Fonte: UNSCEAR, 1993⁴⁴

Dosi medie assorbite dai pazienti a livello mondiale

Tabella 5.4: Dosi medie assorbite dai pazienti a livello mondiale

Dose media annua Pro capite, mSv/persona	USA Italia Inghilterra	Cina Brasile	India Ecuador	Ruanda Senegal
Rx medici	1	0,1	0,04	0,04
Rx odonto	0,01	0,001	0,0003	0,0003
Diagnostica medicina nucleare	0,09	0,008	0,008	0,008
TOTALE DIAGNOSTICA	1,1	0,1	0,05	0,05
Radioterapia	0,7	0,2	0,03	0,02
Terapia medicina nucleare	0,004	0,0009	0,0009	0,0004
TOTALE RADIOTERAPIA	0,7	0,2	0,03	0,02
TOTALE	1,8	0,3	0,08	0,03
Fonte: UNSCEAR 1993 ⁴⁴				

Dosi efficaci medie annue in Italia

Tabella 12 - Dosi efficaci medie annue da sorgenti naturali ed artificiali in Italia.

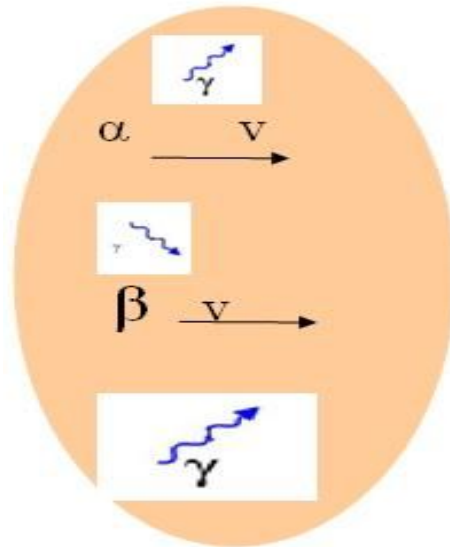
Categoria	Sorgente		Dose annuale media (mSv)
Fondo ambientale			3,1
di cui:	Raggi cosmici	esterna	0,30
	Radioisotopi cosmogenici	interna	0,01
	Radiazione terrestre	- esposizione esterna	0,58
		- esposizione interna escluso radon	0,23
		- esposizione interna da radon e suoi prodotti	2,0
Attività antropiche			1,1
di cui:	pratiche sanitarie, radiologia		1,00
	Televisori e computer (4 ore al giorno)		0,01
	Impianti nucleari		0,001
	Viaggi aerei		0,002
	Altre esposizioni di origine tecnologica		0,01
	fall-out di esperimenti nucleari		0,01
Totale			4,2

5. Grandezze radioprotezionistiche

Il problema fondamentale della radioprotezione

Campo di radiazione

Che effetto produce sull'uomo?



- Il problema fondamentale della radioprotezione è quello di stabilire l'effetto che produce un dato campo di radiazione sul corpo umano ed elaborare delle misure cautelative di protezione

- La soluzione non è semplice e i risultati conseguiti pur essendo ragionevolmente soddisfacenti non sono ancora conclusivi

Dosimetria

- Per descrivere le varie fasi dei processi di trasferimento di energia dalla radiazione ionizzante alla materia vengono definite le grandezze dosimetriche
- **Dosimetria**=disciplina che si occupa della misura dell'energia ceduta dalla rad. ioniz.
- **Gr. Dosimetrica = Gr. Radiometrica x cost. del mezzo**
- Gr. Radiometrica = descrive le proprietà del campo di radiazione
- Cost. del mezzo = descrive le caratteristiche del mezzo (densità, potere frenante,.....)

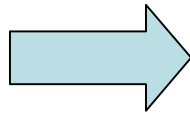
Grandezze radiometriche 1

Grandezze della sorgente

- 1) **Attività** $A = \frac{dN}{dt}$

L'attività è definita come il numero (dN) di trasformazioni nucleari (disintegrazioni) spontanee che avviene nel materiale considerato nel tempo dt.

A



Bq

(n° di disintegrazioni
nell'unità di tempo)

vecchia unità il Curie (Ci) che vale 37 GBq -

L'attività misura “quante radiazioni” escono da un dato materiale nell'unità di tempo, ma una grandezza più utile è l'**attività specifica** che è riferita all'unità di massa (**Bq/Kg**), di volume (**Bq/m³**) o di superficie (**Bq/m²**)

Alcuni valori esemplificativi

- ***Un chilogrammo di granito*** ***1000 Bq***
- ***Un litro di latte*** ***80 Bq***
- ***Un litro di acqua di mare*** ***10 Bq***
- ***Un individuo di 70 kg*** ***8000 Bq***

causata dalla presenza, nel corpo umano, di isotopi radioattivi naturali (in gran parte, potassio-40)

Grandezze radiometriche 2

Grandezze della sorgente

2) Solo per sorgenti di fotoni di tipo puntiforme si definisce la

- Costante gamma specifica (Γ)

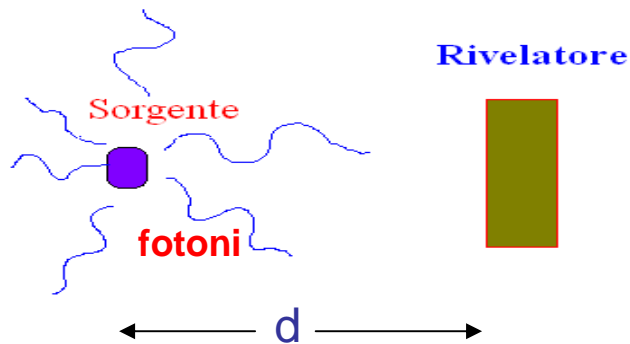
$$\Gamma = \frac{d^2}{A} \dot{X}$$

dove X è il rateo di esposizione

d è la distanza unitaria (1m)

tra la sorgente e il punto di misura

A è l'attività della sorgente



In sostanza questa costante definisce il rateo di esposizione dovuto ad una sorgente puntiforme di fotoni ad una distanza unitaria per unità di area attraversata

Grandezze radiometriche 3

Grandezze del campo di radiazione

1) Fluenza (o flusso) di particelle

$$\Phi = \frac{dN}{dA}$$

La fluenza di particelle definisce il numero di particelle che attraversano una sezione unitaria

2) Fluenza (o flusso) di energia delle particelle

$$\Psi = \frac{dE}{dA}$$

La fluenza di energia definisce l'energia che attraversa una sezione unitaria

Si definiscono altresì le rispettive intensità o ratei cioè quel valore della grandezza considerata nell'unità di tempo, che si indicano con un puntino sopra il simbolo $\dot{\Phi}$ e $\dot{\Psi}$

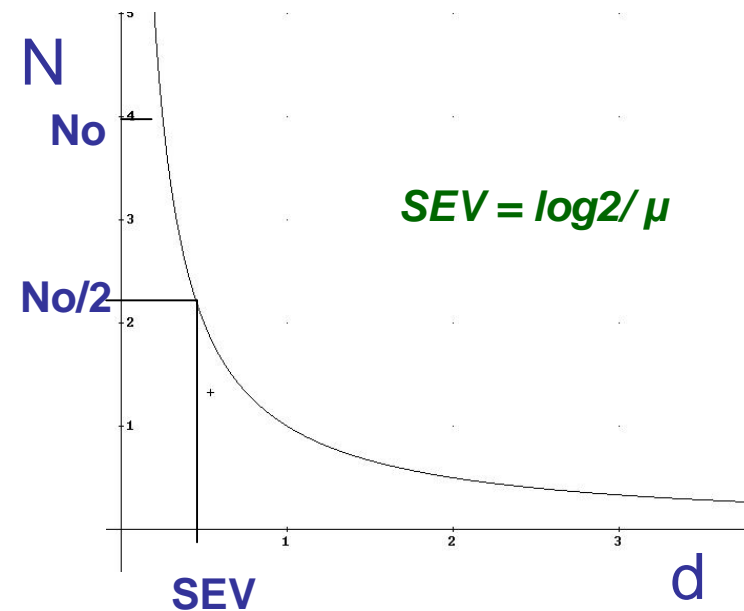
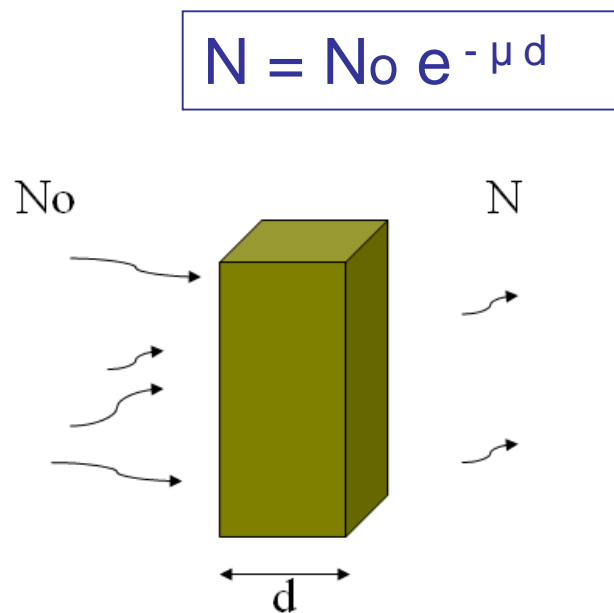
Grandezze che descrivono le proprietà del mezzo

- A) Particelle indirettamente ionizzanti (fotoni, neutroni, ...)

Coeff. di attenuazione lineare μ (m^{-1})

e massico $k = \mu / \rho$ (m^2/Kg)

viene in genere adoperato il coeff. di attenuazione massico in quanto indipendente dallo stato fisico di densità del mezzo.



Dalla conoscenza del SEV dell'acqua si può stimare la penetrazione dei fotoni nel corpo, con energie di 0.1 MeV l'irradiazione non oltrepassa i 4 cm (distanza occorrente per arrivare agli organi profondi) mentre con 1 MeV raggiunge tutti gli organi

Grandezze che descrivono le proprietà del mezzo

- B) **Particelle direttamente ionizzanti ($\alpha, \beta, p..$)**

Questo tipo di particelle perde energia nel mezzo essenzialmente per ionizzazione ed eccitazione degli atomi (in ugual misura)

1) Potere frenante massico $k = \frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl} \quad (\text{Jm}^2/\text{Kg})$

Questa grandezza esprime la perdita di energia per unità di percorso nel mezzo considerato

La perdita di energia è la somma di due contributi: la perdita per collisione e quella per irraggiamento (Bremsstrahlung) quest'ultima diventa importante solo per energie dalle decine di Mev in poi

Grandezze che descrivono le proprietà del mezzo Il Range

- Solamente per le particelle ionizzanti si definisce il Range che è lo spessore del materiale nel quale una particella ionizz. perde tutta la sua energia cinetica.
- Se invece lo spessore del materiale è inferiore al Range la particella emergerà con energia residua pari alla differenza fra energia iniziale ed energia persa

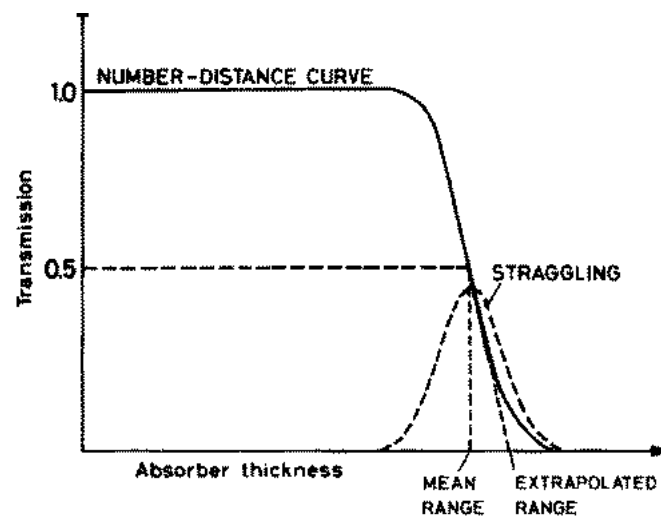


Fig 12.7 la trasmissione di un fascio in funzione dello spessore attraversato

Grandezze che descrivono le proprietà del mezzo

- La conoscenza del potere frenante non basta ad interpretare gli effetti della R.I. sulla materia vivente, occorre avere un'idea della distribuzione spaziale dell'energia trasferita. I secondari carichi messi in moto possono a loro volta ionizzare ed eccitare (raggi delta) solo che lo fanno ad una certa distanza rispetto al fascio primario

Grandezze che descrivono le proprietà del mezzo

Si introduce allora il

- **Potere frenante lineare ristretto:** $L_{\Delta} = \frac{dE}{dl}$ (J/m)
- Al fine di discriminare i due contributi e tener conto solo dei primari si introduce il LET (linear energy transfert) e si indica con il simbolo L_{Δ} dove il delta indica il valore che si intende considerare come energia max, ad es. se abbiamo il simbolo L_{100} significa: “considerare tutte le collisioni che comportano trasferimento di energia inferiori a 100 MeV”, essa rappresenta l’energia ceduta localmente nel mezzo

Penetrazione in aria ed energia dei raggi

- Range delle alfa a 1 MeV 0.04 m
- Range delle beta a 1 MeV 4 m
- SEV dei gamma a 1 MeV 400 m

Energia tipica di emissione delle varie particelle

alfa da 4 a 9 MeV

beta da 1 keV a 4 MeV

gamma da 10 keV a 10 MeV

(nei raggi cosmici si arriva a valori altissimi da 10^8 a 10^{20} eV)

Grandezze dosimetriche - 1

Grandezze relative al “deposito” di energia

Dalla conoscenza delle grandezze radiometriche e di quelle che descrivono le proprietà del mezzo, possiamo finalmente definire le grandezze veramente importanti per la dosimetria.

1) Dose assorbita (Gray) $D = \frac{dE}{dm} \quad (\text{J / Kg})$

2) Intensità di dose $\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (\text{J / Kg s})$

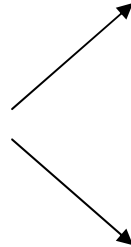
Tutti gli effetti indotti dalle radiazioni ionizzanti: si manifestano dopo che il mezzo ha ricevuto energia dal campo di radiazione per cui è naturale porre questa grandezza come parametro fondamentale della radioprotezione

La dose è quindi l'energia totale trasferita al mezzo da parte della radiazione ionizzante dovuta indifferentemente sia alla R. direttamente I. che alla R. non direttamente I.

Grandezze dosimetriche - 2

Grandezze relative al “trasferimento” di energia

Ribadiamo che la cessione di energia nel mezzo avviene sostanzialmente in due fasi



Energia che viene trasferita nel mettere in moto i secondari

Energia che i secondari cedono al mezzo

- 1. In prossimità del fascio incidente per energie basse (cluster)*
- 2. Ad una certa distanza dal fascio primario se l'energia è alta (raggi delta)*

Grandezze dosimetriche - 3

- Quando interessa descrivere solamente il trasferimento di energia ai secondari e trascurare l'energia di dissipazione di questi ultimi si usa la grandezza Kerma (energia ceduta per unità di massa)

$$K = \frac{dE_k}{dm}$$

Quindi mentre la dose tiene conto di tutta l'energia trasferita il Kerma tiene conto solo del trasferimento di energia ai secondari

Grandezze dosimetriche - 4

- Un'altra grandezza assai diffusa in dosimetria è **l'esposizione**

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (\text{C/Kg}) \quad \text{Attenzione vale solo per fotoni}$$

Si tratta della più antica fra le grandezze dosimetriche e descrive la capacità della radiazione elettromagnetica (fotoni x e gamma) di produrre ionizzazione in aria. dQ è il valore assoluto della carica totale degli ioni (di un solo segno) prodotti in aria quando tutti gli elettroni (positive e negativi) liberati dai fotoni nell'elemento di volume la cui massa è dm sono completamente arrestati.

Si usa ancora la vecchia unità di esposizione il Roentgen (R)

$$R = 0.258 \text{ mC/Kg}$$

L' importante relazione fra dose ed esposizione in aria è la seguente:

$$D = 8.7 \text{ mR}$$

Gli indicatori di rischio: la Dose Equivalente e la Dose Efficace

- Per legare la Dose assorbita all'eventuale danno biologico si introduce la grandezza radioprotezionistica più importante: la **Dose Equivalente** (H):

$$H = D \times Q \quad (\text{Sv})$$

dove D è la dose assorbita e Q è un opportuno fattore correttivo che tiene conto dell'effetto diverso che produce nel corpo radiazioni di diverso tipo.

Alcuni valori del fattore di peso Q

Radiazione	Q
Rad x, γ , β	1
Protoni con $E > 2\text{Mev}$	5
Neutroni con $E < 10\text{keV}$	5
Particelle α	20

Quindi ad es. essere sottoposti ad una dose di 1 Gy di raggi X espone ad un rischio di 1 Sv mentre la stessa dose se dovuta a raggi α espone ad un rischio di 20 Sv

La Dose Equivalente è la grandezza usata nella legislazione italiana - D.L. 241/2000 - per definire i valori limite nel caso di esposizioni omogenee al corpo

La Dose Efficace

- L'equivalente di dose si calcola su ogni singolo organo o tessuto, ma siccome la risposta è differente per organi diversi occorre introdurre un alto fattore di peso che tenga conto di questo fatto, si definisce quindi il fattore w che discrimina la diversa radiosensibilità dei diversi organi.

$$\text{Dose Efficace (E)} = w \times H \text{ (Sv)}$$

Se consideriamo l'intero corpo

Si ha che $w=1$ - quindi su tutto il corpo $H=E$

Tessuto o Organo	w
Gonadi	0.20
Colon	0.12
Midollo osseo	0.12
Polmone	0.12
Stomaco	0.12

Si definisce infine la Dose Impegnata ossia la dose efficace ricevuta da un organo in un determinato intervallo di tempo in seguito alla contaminazione di uno o più radionuclidi

Le grandezze radiologiche – (1)

INTRODUZIONE

Per poter valutare oggettivamente l'azione delle radiazioni ionizzanti, che sono di diverso tipo e di diversa origine, e per valutare in modo particolare la loro intensità e l'energia che cedono alla materia e ai tessuti biologici, nonché per misurare l'attività delle sostanze radioattive, sono state definite alcune grandezze e unità di misura.

Da capire

Una cosa è l'attività di una sorgente di radiazioni, un'altra cosa è la ionizzazione prodotta da una sostanza irradiata. L'attività si misura in **curie**, la ionizzazione si misura in **röntgen**.

GRANDEZZE

Dose di esposizione (röntgen, coulomb):

La dose di esposizione, che si misura in röntgen, si riferisce propriamente alle radiazioni elettromagnetiche (X e gamma) e riguarda la loro capacità di produrre ionizzazione. 1 **röntgen** (simbolo R) è la dose di radiazioni X (di energia pari a 250 keV) che in 1 cm³ di aria, a 760 mm di pressione e a 0 °C di temperatura, produce due miliardi di coppie di ioni. L'intensità della dose d'esposizione, cioè il rapporto fra la dose d'esposizione e il tempo d'esposizione, si misura in R/h (röntgen all'ora). La dose di esposizione, e in particolare la sua intensità, è l'indice che in seguito prenderemo maggiormente in considerazione per la sicurezza in caso di contaminazione radioattiva. Nel Sistema Internazionale (SI), la dose di esposizione si esprime in coulomb per kilogrammo. 1C/kg è la quantità di radiazioni X o gamma che produce coppie di ioni con una carica complessiva di 1 coulomb in un kilogrammo di aria pura e secca. Un röntgen è uguale a $2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg. Ciò significa che 1R di esposizione libera in ogni chilogrammo di aria $2,58 \cdot 10^{-4}$ coulomb di carica.

Nota:

La dose di esposizione è la grandezza più importante per i nostri scopi, che riguardano non solo l'individuazione di sorgenti radioattive, ma anche la misura della loro pericolosità.

Le grandezze radiologiche – (2)

Dose assorbita (rad, gray):

La dose assorbita è la quantità di energia che le radiazioni ionizzanti cedono alla materia per l'unità di massa della sostanza irradiata, cioè il rapporto tra l'energia delle radiazioni assorbita dalla materia e la massa di materia interessata. Tutto questo indipendentemente dal tipo di radiazione ionizzante. Come unità di dose assorbita si usa il **rad** (rate adsorbed dose) che corrisponde a un'energia di 100 erg assorbita per ogni grammo di materia. Un grammo di tessuto esposto a 1 röntgen assorbe ca. 93 erg. Nel SI la dose assorbita si misura in **gray** (Gy). 1 Gy è la dose che viene assorbita quando l'energia per unità di massa, ceduta alla materia da una radiazione ionizzante, è 1 joule per kilogrammo (1 J/Kg). 1 Gy è uguale a 100 rad.

La dose assorbita dipende sia dalle proprietà del materiale irradiato sia dal campo di radiazioni. Pertanto, se nell'aria una irradiazione di 1 röntgen corrisponde a 0,887 rad, nei tessuti molli del corpo umano la stessa irradiazione produce una dose assorbita di ca. un rad e nelle ossa da 1 a 3 rad.

Equivalente di dose (rem, sievert):

L'equivalente di dose è la dose di radiazioni ionizzanti che, assorbita dal corpo umano, produce un effetto biologico identico a quello prodotto nello stesso tessuto dall'assorbimento di raggi X o gamma. Questa grandezza è molto importante perché le radiazioni ionizzanti di caratteristiche diverse, come i raggi alfa o X, possono provocare effetti biologici diversi pur dando luogo alla stessa dose assorbita. Il valore dell'equivalente di dose si ottiene moltiplicando la dose assorbita per un fattore numerico caratteristico del tipo di radiazione ionizzante (fattore di qualità). L'equivalente di dose si misura in **rem** (röntgen equivalent man) ($1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \times \text{fattore di qualità}$) e indica la quantità di radiazioni ionizzanti che, a parità di altre condizioni, producono lo stesso effetto biologico di 1 röntgen. 1 rem è la dose biologica assorbita da un organismo vivente dovuta a 1 rad. L'unità di misura SI è il **sievert** (Sv) ($1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \times \text{fattore di qualità}$). 1 Sv è l'equivalente di dose che si verifica quando la dose di radiazioni assorbita, moltiplicata per un dato fattore adimensionato, è uguale a 1 J/kg. $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$. $1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv}$.

Le grandezze radiologiche – (3)

Efficacia biologica relativa (EBR):

Corrisponde al rapporto tra una dose in rad di raggi X standard, presa come riferimento, e la dose in rad delle radiazioni ionizzanti considerate che produce lo stesso effetto biologico. Si tratta di un parametro molto importante.

I raggi X, i gamma, gli elettroni e i raggi beta di qualsiasi energia hanno un valore EBR uguale a 1. I protoni e i raggi alfa hanno un valore EBR uguale a 10. I nuclei pesanti hanno un valore EBR uguale a 20. I neutroni hanno un valore EBR che varia da 2 a 10,5 a seconda dell'energia posseduta.

[Dose efficace:

Il danno prodotto dalla radiazione dipende dall'organo irradiato. Il rischio di cancro o di disordini genetici, a parità di dose equivalente, varia per organo. Perchè sono stati sviluppati dei fattori di peso W_T . La dose efficace, espressa anche essa in Sv, per un organo specifico è ottenuta moltiplicando la dose equivalente per quell'organo per il corrispondente fattore di peso. La dose efficace per il paziente è la somma delle dosi efficaci di tutti gli organi.]

Attività (curie, becquerel):

L'attività di una sostanza radioattiva è data dal numero di disintegrazioni nucleari prodotte nell'unità di tempo. Di solito, si usa misurare l'attività per unità di massa (o attività specifica) e per unità di volume (o concentrazione di attività). L'unità di misura è il curie (Ci), che esprime l'attività di un grammo di radio 226 e corrisponde a $3,7 \cdot 10^{10}$ disintegrazioni al secondo. Nel SI si usa il Becquerel. 1 Bq è l'attività di un radionuclide che decade spontaneamente subendo in media una disintegrazione al secondo. $1 \text{ Bq} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ci}$

Attenzione bene:

Poiché quello che interessa conoscere per la sicurezza è la ionizzazione prodotta da una sostanza irradiata, l'unità di misura da prendere principalmente in considerazione è il röntgen (R), non il curie. Il fatto che ai tempi del disastro di Cernobyl le tabelle di radioattività fossero tutte diffuse in curie (qualcuno ricorderà il famoso "nano curie"), la dice lunga sulla qualità dell'informazione.

Tabella sulle unità di misura

Unità di misura: tabelle di conversione

Unità di misura	Sistema Internazionale (SI)	Uso
Röntgen (R)	Coulomb/kg (C/kg)	si usa per la dose di esposizione
Rad (rad)	Gray (Gy)	si usa per la dose assorbita
Rem (rem)	Sievert (Sv)	si usa per la dose equivalente
Curie (Ci)	Becquerel (Bq)	si usa per l'attività
Ci/ml	Bq/m ³	si usa per la concentrazione di attività
Ci/g	Bq/kg	si usa per l'attività specifica

Equivalenze	
1 C/kg	3876 R
1 Gy	100 rad
1 Sv	100 rem
1 Bq	$2,7 \cdot 10^{-11}$ Ci

Equivalenze	
1 R	$2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg
1 rad	0,01 Gy
1 rem	0,01 Sv
1 Ci	$3,7 \cdot 10^{10}$ Bq

Esposizione

I raggi X e γ nella materia provocano ionizzazione, cioè creano **coppie di ioni carichi**.

Esposizione (dose irradiata) =
misura della ionizzazione prodotta da una radiazione in un materiale

Materiale di riferimento: **aria** (1 cm³, 0°C, 1 atm)

Unità di misura:

SI: C/kg

pratico: **Röntgen** \rightarrow 0.33 · 10⁹ C in 1 cm³ di aria a 0°C, 1 atm

1 R = 2.58 · 10⁻⁴ C/kg

- **DOSE ASSORBITA** Energia assorbita dal materiale irraggiato per unità di massa

$$D = dE/dm \text{ (J/Kg) Grey}$$

- **DOSE EQUIVALENTE** è la dose assorbita ponderata da un fattore di qualità Q che tiene conto del diverso effetto che tipi di radiazione diversa hanno rispetto alla materia irradiata

$$DE = D \times QF \text{ (J/Kg) Sievert}$$

Per fotoni X e gamma $Q=1$

Dose efficace

Ulteriore problema: la stessa dose equivalente assorbita in organi o tessuti diversi produce effetti/danni diversi!

Dose efficace = dose equivalente "pesata" a seconda del diverso impatto sugli organi:
 $Deff = w \cdot Deq = w \cdot QF \cdot D$

A ogni organo/tessuto si assegna un **fattore di peso w**.

La somma dei fattori di peso di tutti gli organi è 1 (su tutto il corpo: dose efficace = dose equivalente)

Organi	w
gonadi	0.20
midollo osseo	0.12
colon	0.12
polmone	0.12
stomaco	0.12
vescica	0.05
mammella	0.05
fegato	0.05
esofago	0.05
tiroide	0.05
cute	0.01
superfici ossee	0.01
altri tessuti (tot.)	0.05
totale	1.00

Dose impegnata

- La DOSE IMPEGNATA è la dose ricevuta da un tessuto o da un organo o dal corpo intero in un determinato intervallo di tempo, in seguito alla contaminazione di uno o più radionuclidi.

6) Effetti della radioattività sull'uomo

Effetti delle rad. ioniz. sull'uomo

- La scoperta dei danni da rad. ioniz. È dei primi anni del XX secolo (nel 1904 furono segnalate i primi eritemi ,le prime anemie e leucemie dovute ai raggi X) – **effetti deterministici**-
- Nel 1911 furono messi in evidenza 94 casi di tumori indotti da raggi X
- Negli anni '20 si constatò l'effetto tossico da ingestione di materiale radioattivo (operaie addette alla pittura dei quadranti di orologi (Sali di radio), minatori della Sassonia (radon))
- Nel 1922 fu stimato che almeno 100 radiologi morirono a causa del cancro indotto da radiazioni
- Alle fine degli anni '20 Muller mostrò che mutazioni genetiche avvenivano ai moscerini dell'aceto a seguito di irradiazione (**effetti genetici**)
- Nel 1955 si osservarono circa 200 casi di leucemia ai sopravvissuti di Hiroshima e Nagasaki, ossia un numero molto più alto di quello atteso (**effetti tardivi o stocastici**)

*Dopo circa 30 anni, **nel 1928, nacque il primo organo internazionale** avente lo scopo di elaborare e divulgare indicazioni e raccomandazioni finalizzate alla protezione dell'uomo contro le radiazioni ionizzanti (radioprotezione): l'**ICRP** (International Commission for Radiological Protection)*

Gli effetti biologici delle radiazioni ionizzanti

- Per capire l'origine del danno biologico delle radiazioni, occorre ritornare a quelle interazioni attraverso cui le radiazioni rilasciano energia al tessuto, ed in particolare a quello biologico.

Questa energia può eccitare e ionizzare gli atomi e le molecole del tessuto, mettendo in moto una serie di specie chimiche estremamente reattive ed aggressive: i radicali liberi. Siccome il tessuto biologico è composto in gran parte di acqua, i radicali liberi prodotti dalle radiazioni sono i seguenti:



- Queste specie chimiche, all'interno della cellula, possono aggredire le biomolecole responsabili della funzionalità cellulare, come il DNA. **Le conseguenze possono essere diverse:** la cellula **può morire, può riparare** la bio-molecola danneggiata neutralizzando il danno, **oppure può continuare a vivere e a riprodursi con un'alterazione**, che può essere determinante per la sorte dell'individuo. Nell'ultimo caso è possibile che la cellula cominci a riprodursi ad una velocità superiore ai valori normali, fino a dar luogo ad un tumore. Oppure, se la cellula modificata è coinvolta nel processo riproduttivo dell'individuo, l'alterazione può ripercuotersi sulle generazioni successive.

Classificazione dei danni

- Si parla di **danni somatici** quando riguardano solo l'individuo irraggiato, **genetici** quando interessano anche le generazioni future.
- Un altro tipo di classificazione è quella tra danni **deterministici** e danni **stocastici**.

Danni deterministici e stocastici

- **Danni deterministici:** sono i danni che si producono con sintomi organici evidenti e in stretto rapporto con l'esposizione, essi si manifestano in genere entro breve tempo, esiste una soglia al di sotto della quale non si hanno danni.

– danno immediato e certo –

- **Danni stocastici:** sono i danni somatici (cancro e leucemia) e genetici prodotti a distanza di tempo dall'esposizione che possono o meno presentarsi, si parla quindi solo di probabilità.

– danno tardivo e probabile -

Difficoltà degli studi epidemiologici

- **L'esistenza di una soglia di induzione al di sotto della quale è possibile escludere l'insorgenza di effetti deterministici ne permette un'efficace prevenzione, limitandone il campo di interesse essenzialmente a ristrettissime categorie di lavoratori o a condizioni incidentali estreme.**
- Le manifestazioni patogene indotte da radiazioni sono clinicamente distinguibili come tali, a livello del singolo individuo, solo nel caso degli effetti deterministici.
- . Esistono inoltre difficoltà oggettive nell'identificare, sulla base dei dati epidemiologici, gli effetti dell'irradiazione di una popolazione o di un gruppo di individui. I fattori che concorrono alle predette difficoltà sono molteplici: il tempo di latenza delle malattie radioindotte, la dimensione e l'oscillazione statistica dell'incidenza naturale delle stesse malattie, la scarsità di dati sull'incidenza naturale e l'effetto amplificatore dell'approfondimento delle tecniche diagnostiche.

Per tanti motivi, il riconoscimento diretto degli effetti di un'esposizione alla radioattività è problematico, a meno che non si tratti di un'esposizione tanto elevata da determinare effetti somatici immediati o effetti statistici evidenti.

Gli effetti delle basse dosi

- Alle basse dosi di radiazione - quelle confrontabili con le dosi derivanti dal fondo naturale - possono determinarsi esclusivamente effetti di tipo stocastico, con probabilità che si riduce al ridursi della dose assorbita. Al diminuire della dose la probabilità che si manifestino conseguenze diventa praticamente nulla, e gli effetti dell'irraggiamento non possono essere materialmente rilevati su base scientifica.
- Per avere comunque una base di valutazione - destinata più a progettare le misure di radioprotezione che a valutare i reali effetti sanitari dell'esposizione - gli organismi nazionali e sovranazionali di radioprotezione adottano l'ipotesi di proporzionalità lineare senza soglia già ricordata. Questa ipotesi ha permesso di determinare, per estrapolazione a partire dai dati ricavati per gli effetti alle alte dosi coefficienti di rischio, specificatamente destinati alle valutazioni "a priori" ai fini dell'applicazione dei principi della radioprotezione.
- Sulla base dei dati epidemiologici in occasione dei maggiori incidenti nucleari si è constatato che non è sottovalutabile il danno dovuto agli effetti psicologici e psicosomatici.

Linear Energy Transfer LET

➤ I raggi X liberano energia nei tessuti attraversati, provocando *ionizzazione* e quindi causano danno nelle cellule.

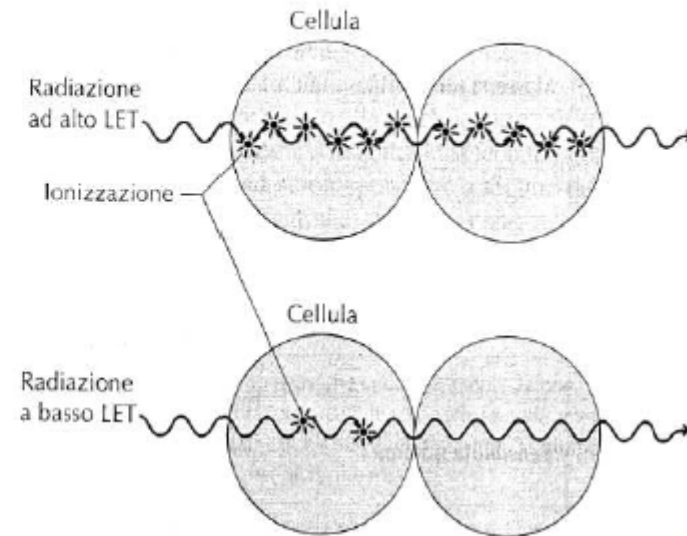
➤ Il LET (*linear energy transfer*), espresso in $\text{keV}/\mu\text{m}$, è una misura del trasferimento di energia al tessuto. Una radiazione ad alto LET cede notevoli quantità di energia in un breve percorso.

➤ Radiazioni ad alto LET presentano un maggiore effetto biologico, ma minima capacità di penetrare i tessuti poiché perdono la loro energia in distanze ridotte. Queste radiazioni provocano diverse ionizzazione all'interno di una singola cellula, provocando un danno. Sembra che siano necessarie almeno 2 o 3 ionizzazioni all'interno di uno stesso nucleo cellulare per determinare un effetto biologico.

➤ Le ionizzazioni di radiazioni a basso LET si distribuiscono su molte cellule e quindi non determinano danni significativi

➤ Le *particelle α , β ed i protoni sono radiazioni ad elevato LET*, cioè presentano valori nel range **10-200 $\text{keV}/\mu\text{m}$** per percorsi di alcuni millimetri di tessuto

➤ I *raggi X e γ sono radiazioni a basso LET*, con valori oscillanti tra **0.2 e 3 keV/mm** per percorsi di molti centimetri di tessuto



Tipi di danno cellulare

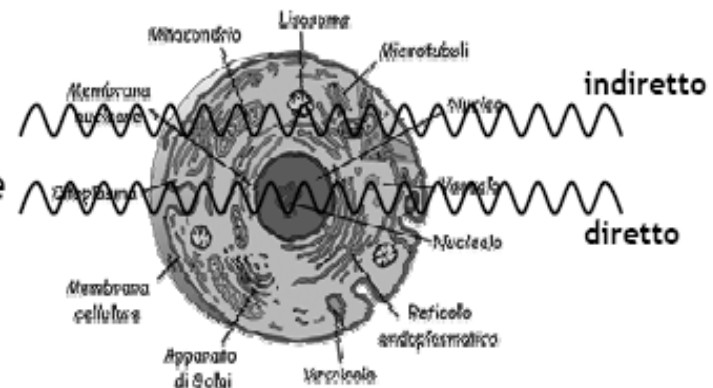
- neutroni termici, $E_0 < 1/10$ eV
- neutroni lenti, $1/10$ eV < $E_0 < 100$ KeV
- neutroni veloci, 100 KeV < E_0 < alcune decine di MeV
- neutroni ad alta energia, $E_0 > 100$ MeV

- Gli effetti biologici di radiazioni con diversi LET si confrontano in base alla loro *efficacia biologica relativa (RBE)*

γ	β	p	α	n lenti	n termici
1	1	10	20	10	3

- La possibilità di riparazione della cellula dipende
 - Numero di ionizzazioni e dall'intervallo di tempo in cui sono avvenute
 - Esposizione prolungate nell'arco di mesi o anni presenteranno effetti pari a circa metà di quelli da esposizioni di breve durata e ravvicinati avente dose analoga

- La cellula riparata continua a funzionare normalmente o si trasforma in una cellula anomala, che può riprodursi a velocità anomala diventando neoplastica (tumorale) o trasmettere il difetto alle generazioni future



- Danni di tipo diretto ed indiretto
 - *Tipo diretto*: la radiazione danneggia il nucleo cellulare
 - *Tipo indiretto*: la radiazione deposita energia all'esterno del nucleo

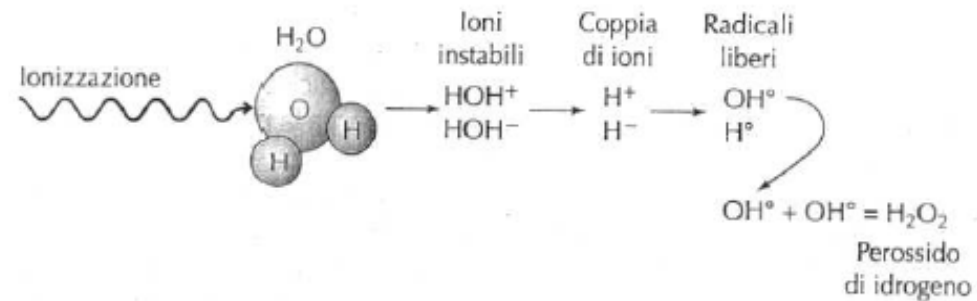
Effetti diretti

- L'effetto diretto si deve a radiazioni ionizzanti che depositano la propria energia entro il nucleo e rompono i legami molecolari del DNA
- Non è l'effetto dominante: la maggior parte dei danni cellulari da radiazione è costituita dagli effetti indiretti
- Le radiazioni a LET elevato hanno maggiore probabilità di provocare effetti di tipo diretto
- Radiazioni ad alto LET, se colpiscono il nucleo, danneggiano molte molecole di DNA, e la cellula perde di conseguenza la sua capacità di ripararsi
- Gli effetti diretti molto spesso determinano la morte della cellula



Effetti indiretti

- Nel processo indiretto, le radiazioni sono in grado di danneggiare la cellula producendo all'interno del *citoplasma* prodotti tossici intermedi che interagiscono col DNA nucleare



- Il principale prodotto tossico è quello imputabile alla *radiolisi dell'acqua*
 - Molecola dell'acqua scomposte in **radicali liberi** che presentano una notevole reattività chimica
 - Esempi di radicali: H_2O^+ , H_2O^\bullet , H^\bullet , OH^\bullet , H^+ , OH^- , H_2O^- , e^-
 - *I radicali liberi possono rompere i legami del DNA; hanno vita molto breve ma sufficiente a raggiungere il nucleo e a danneggiare le molecole di DNA; possono anche combinarsi e formare perossido di idrogeno, H_2O_2 , tossico per la cellula.*
- I radicali liberi vengono prodotti in maniera più abbondante in presenza di ossigeno. L'ossigeno è un agente radiosensibilizzante. Il citoplasma, composto principalmente di acqua, è riserva abbondante di ossigeno.
- Le cellule presenti all'interno di tessuti dotati di scarsa irrorazione sono più resistenti alle radiazioni perché hanno un minore apporto di ossigeno. Molti tumori sono radioresistenti perché non hanno un adeguato supporto ematico.

Radiosensibilità delle cellule

➤ **Legge di Bergonie e Tribondeau:**

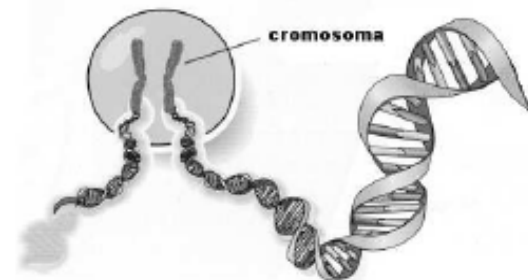
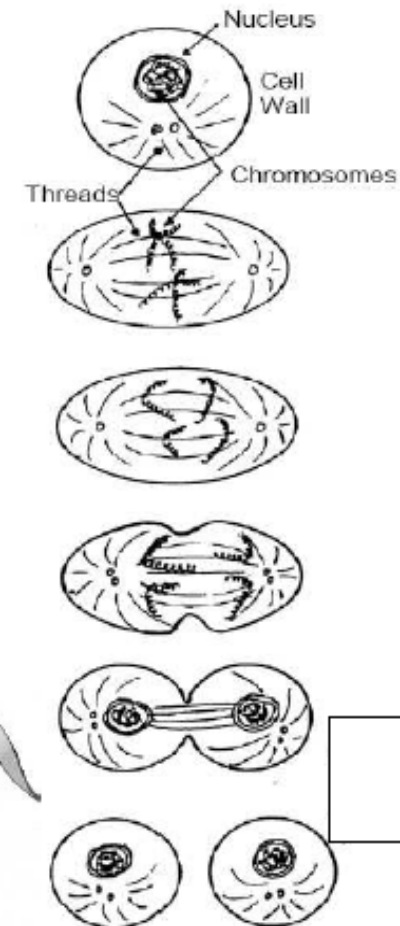
“la radiosensibilità di un tessuto è direttamente proporzionale all’attività mitotica ed inversamente proporzionale al grado di differenziazione delle sue cellule”

1. le cellule giovani o immature sono maggiormente radiosensibili; le cellule mature sono meno radiosensibili
2. Le cellule in rapida divisione sono maggiormente radiosensibili
3. Le cellule in rapida crescita sono maggiormente radiosensibili

- Il feto che contiene cellule giovani ed immature è molto sensibile alle radiazioni
- Le cellule nervose dell’encefalo e del midollo spinale sono più resistenti, perché una volta che si sono sviluppate non subiscono più divisioni cellulari
- I linfociti e le cellule delle gonadi sono maggiormente radiosensibili perché vanno incontro a divisioni cellulari rapide e sono in costante evoluzione

Fasi del ciclo cellulare

- M Mitosi (cellule somatiche)
Meiosi (cellule genetiche)
- G1 Fase precedente alla sintesi di DNA, crescita della cellula
- S sintesi del DNA
- G2 Fase di crescita della cellula a seguito della sintesi di DNA



Sensibilità alle radiazioni di alcune cellule tessuti ed organi

Massima sensibilità	Linfociti
	Gonadi
	Spermatogoni
	Ovogoni
	Tessuti emopoietici/eritroblasti
Media sensibilità	Intestino/cellule delle cripte intestinali
	Osso/osteoblasti
	Cute/cellule epiteliali
	Cristallino/cornea
	Tiroide
Minima sensibilità	Cellule muscolari
	Cellule nervose
	Midollo spinale
	Encefalo

Effetti deterministici

- L'esposizione ad alte dosi (>1 Gy), sia per irradiazione esterna che interna, determina l'insorgenza di diverse sindromi in rapporto all'entità della dose ricevuta (vedi seguito)
- **Effetti sulle gonadi**
 - 1-2 Gy sulle ovaie determinano sterilità temporanea e assenza di mestruazioni per 1-3 anni; 4 Gy: sterilità permanente
 - 0.1 Gy: oligospermia; 2.5 Gy sterilità per 2-3 anni; 4-6 Gy sterilità permanente
- **Effetti sulla cute**
 - Sede principale del danno è lo strato germinale dell'epidermide
 - Eritema temporaneo dovuto alla dilatazione dei capillari
 - Flittene con necrosi per deficit proliferativo dello strato germinale
- **Effetti sull'organismo in sviluppo**
 - Embrione e feto presentano in tutti i propri organi e tessuti un alto indice mitotico
 - 1 Gy nei primi 6 giorni di gravidanza determina la morte del 50% degli embrioni; i sopravvissuti si sviluppano regolarmente
 - Dal 9° al 60° giorno, meno mortalità ma elevato rischio di malformazioni
 - Raccomandazione alle donne in età feconda: sottoporsi ad esami radiologici esclusivamente nei primi 10 giorni del ciclo (DL 241/2000)



25. A radiation induced lesion on the thigh about 25 days after irradiation.



29. Bulla completely broken down and injury extended to index and middle fingers.

Alte dosi > 1 Gy (100 rad) in poche ore (1)

➤ Sindrome ematologica

- Per dosi dell'ordine di 1 Gy, gli effetti ematologici seguono dopo alcune settimane
- Riduzione del numero di eritrociti, leucociti, piastrine, linfociti; il che implica ridotte o annullate difese immunitarie
- I meccanismi di difesa dell'organismo cominciano a riprendersi dopo circa 30 giorni dalla data dell'esposizione. Se i meccanismi di difesa contro le infezioni sono ripristinati, ci si può attendere guarigione
- Rischio di morte per infezione nella fase precedente. Occorre tenere il paziente in ambiente controllato per evitare la possibilità di contrarre infezioni.

➤ Sindrome gastrointestinale (GI)

- dosi elevate sono in grado di uccidere la maggior parte delle cellule staminali presenti nel tratto gastrointestinale
- Dopo la fase di latenza, il soggetto presenta diarrea ed infezioni; l'intestino non è più funzionale, ci può essere perdita di liquidi ed invasione batterica
- Tutto ciò capita nel momento in cui le difese immunitarie sono deboli (sindrome ematologica)

<i>Sindromi da irradiazione acuta nell'uomo</i>	
0,25 + 1 Gy	sopravvivenza virtualmente certa
1 + 2 Gy	sopravvivenza probabile <i>soglia della sindrome ematologica</i>
2 + 5 Gy	sopravvivenza possibile
5 + 6 Gy	sopravvivenza virtualmente impossibile
6 + 10 Gy	<i>sindrome gastrointestinale</i>
10 Gy e oltre	<i>sindrome neurologica</i>

➤ Sindrome del sistema nervoso centrale (SNC)

- L'irradiazione determina danno neuronale
- I meccanismi di regolazione corporea vanno incontro a malfunzionamento
- Dopo il periodo di latenza il soggetto perde coscienza e smette di respirare
- La presenza di questa sindrome è certezza di morte

- LD_{50/30} lethal dose :dose di radiazione cui l'intero corpo va sottoposto perché si produca morte nel 50% della popolazione esposta entro 30 giorni. Tale dose è uguale a 3 Gy in soggetti che non ricevono trattamento medico

Alte dosi > 1 Gy (100 rad) in poche ore (2)

- Per esposizione dell'intero corpo, i segni ed i sintomi clinici si presentano in 4 fasi

1. Fase prodromica
2. Periodo di latenza
3. Fase acuta
4. Fase conclusiva

- Fase prodromica

- segni come nausea, vomito, diarrea
- da pochi minuti a qualche ora dopo l'esposizione; maggiore è l'esposizione minore è il tempo di manifestazione dei segni
- possono durare poche ore o anche alcuni giorni

- Periodo di latenza

- il paziente sembra guarito, è privo di sintomi clinici e di segni di malattia. Esiste tuttavia un possibile danno cellulare in corso
- maggiore dose, minore periodo di latenza, che può durare alcune ore o alcuni giorni

- Fase acuta

- diversi effetti clinici; al crescere della dose si evidenziano 3 sindromi, che possono essere presenti contemporaneamente:

- ~2-5 Gy -> sindrome ematologica periodo di sopravvivenza ~ 45 giorni
- ~5-10 Gy -> sindrome gastrointestinale (GI) periodo di sopravvivenza ~ 12 giorni
- >10 Gy -> sindrome del sistema nervoso centrale (SNC) periodo di sopravv. ~ 2 giorni

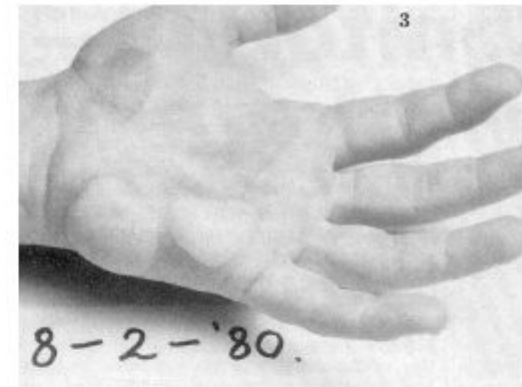
- Fase conclusiva: guarigione o morte

- dipende dall'entità e dalla distribuzione della radiazione, dalle condizioni di salute generali, dalla sensibilità alle radiazioni e dal trattamento medico
- *Nessun soggetto può sopravvivere per dosi superiori a 10 Gy (1000 rad); per 5-6 Gy la sopravvivenza è ancora possibile*



Effetti di irradiazione parziale

- L'esposizione di specifiche porzioni corporee è in grado di produrre effetti diversi da quelli dell'esposizione dell'intero organismo
- Si verificano effetti importanti, ma non letali, quali: eritema, alopecia, cataratta. Possono anche essere indotte neoplasie o leucemia.
- **Eritema**
 - Arrossamento della pelle a dosi di circa 6 gy e successiva evoluzione
- **Alopecia**
 - Perdita temporanea dei capelli, per dosi superiore a 3 Gy. Periodo di latenza alcune settimane. Ricrescita in circa 6 mesi
- **Cataratta**
 - Opacamenti del cristallino con dosi di 2 Gy. Esposizione nell'arco di mesi o anni con soglia di 10 Gy. Periodo di latenza di alcuni anni



Effetti stocastici

- L'esposizioni a "***basse dosi***" (< 0.2 Gy) di radiazioni ionizzanti non determina la comparsa di danni immediati, ma aumenta la probabilità statistiche di comparsa di danni a distanza
- Le malattie da radiazione non presentano diversità rispetto a quelle dovute a cause "naturali" e quindi la loro ***discriminazione*** è alquanto difficoltosa (i dati finora ottenuti si basano sull'aumento dell'incidenza di dette malattie)
- ***Caratteristiche principali:***
 - Non richiedono superamento di una dose-soglia
 - Riguardano solo una piccola frazione degli esposti con frequenza di comparsa proporzionale alla ***dose accumulata***
 - La gravità non dipende dalla dose in quanto sono del tipo ***tutto-o-nulla***
- Possono risultare in
 - Tumori e leucemie
 - Effetti genetici

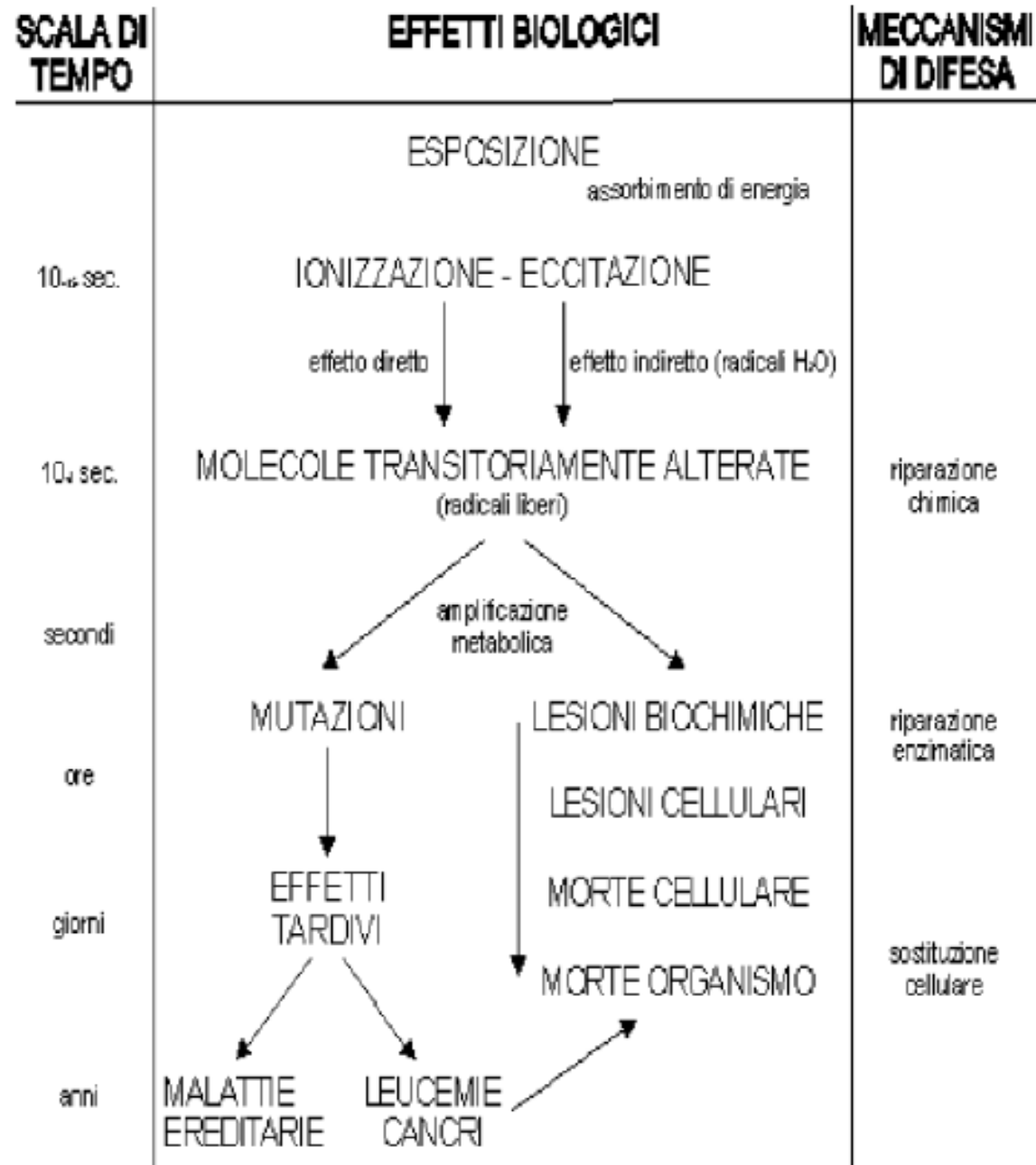
Bassa dose: tumori e leucemia

- A causa dei danni a carico del materiale cromatidico cellulare, le radiazioni ionizzanti possono indurre l'insorgere di tumori solidi e leucemie. Le radiazioni ionizzanti sono *agenti cancerogeni*.
- I tempi di latenza sono piuttosto lunghi: da pochi anni per le leucemie a oltre 20 anni per il carcinoma polmonare
- I dati attuali indicano un rischio di cancerogenesi di $1.25 \cdot 10^{-2}/\text{Sv}$: ad esempio una dose di 10 mSv comporta un rischio pari a $1.25 \cdot 10^{-4}$.

Bassa dose: effetti genetici

- Poiché le radiazioni provocano danni prevalentemente al DNA, è comprensibile che anche basse dosi di radiazione possano creare dei danni genetici che si evidenziano nella prole in prima o successive generazioni
- Le cellule germinali sono radiosensibili perché si tratta di cellule genetiche immature
- L'incidenza naturale di malformazioni (gravi, lieve, lievissime) è calcolata in 105'000 casi per milione di nati vivi
- Dose di raddoppio: 1 Gy (se 1 milione di genitori ricevessero la dose di 1 Gy si avrebbe il raddoppio delle malformazioni)
- Estrapolando si calcola che 10 mGy provocano 185 nuovi casi per milione, pari ad un incremento di 0.17% dei casi naturali

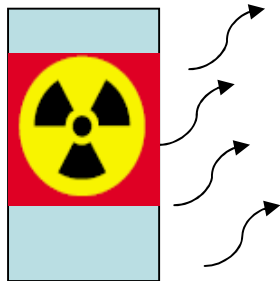




Dosi acute associati ad eventi incidentali

Dosi acute associate ad alcuni incidenti nucleari	(mSv)
Dose individuale massima determinata dall'incidente di <u>Three Mile Island</u> , nella regione circostante l'impianto	0,7
Dose individuale massima determinata dall'incidente di <u>Goyania</u>	7.000
Dose individuale massima determinata dall'incidente di <u>Chernobyl</u>	20.000
Dose media nelle aree più contaminate dell'URSS dovuta all'incidente di <u>Chernobyl</u> (intera vita)	35,7
Dose media alla popolazione italiana derivante dall'incidente di <u>Chernobyl</u> (intera vita)	1,6

Situazione incidentale
con rilascio di radioisotopi
nell'ambiente



Irraggiamento
esterno



Irraggiamento

interno (ingestione e
inalazione)



Relazione dose effetto

<i>Dose (Sv)</i>	<i>Effetto</i>
<i>< 0,25</i>	<i>nessuno</i>
<i>0,25 - 1</i>	<i>lievi alterazioni del sangue, nessun sintomo</i>
<i>1 - 2</i>	<i>notevoli alterazioni del sangue, nausea, emorragie intestinali</i>
<i>2 - 3</i>	<i>gravi emorragie, stato di prostrazione, bassa mortalità</i>
<i>3 - 8</i>	<i>morte dal 30% al 60% dei casi</i>
<i>> 8</i>	<i>morte nel 100% dei casi</i>

Due principi di protezione

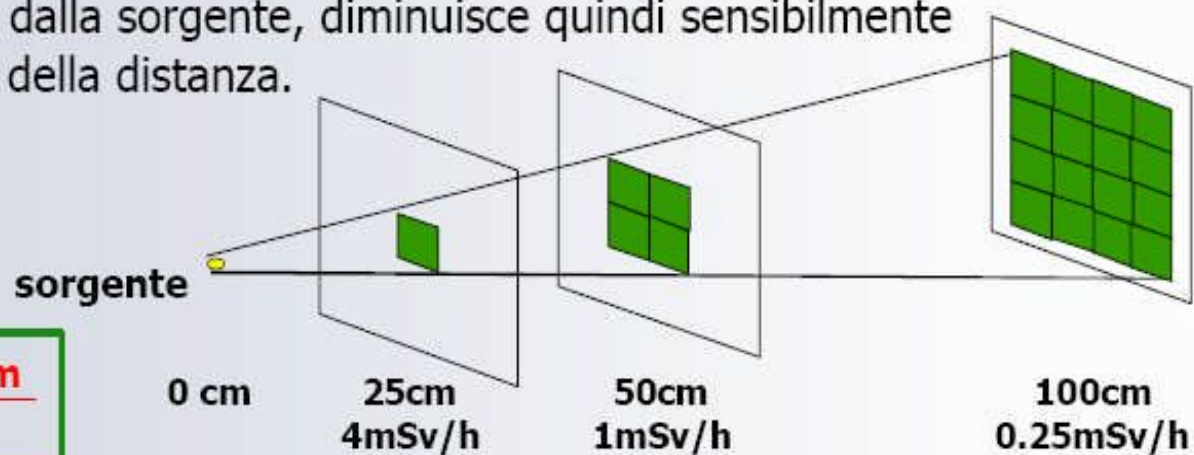
1. Ridurre il tempo di esposizione

L'esposizione alle radiazioni deve essere ridotta al tempo minimo indispensabile, ciò richiede una **minuziosa programmazione del lavoro**.

2. Aumentare la distanza dalla sorgente

L'esposizione alla radiazione è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente, diminuisce quindi sensibilmente all'aumentare della distanza.

$$\text{Dose } d = \frac{\text{Dose } 1\text{m}}{d^2}$$



7. La Radioprotezione

Nel 1928 nasce l'ICRP

- Dopo la scoperta della radioattività, ben presto ci si accorse che l'interazione delle radiazioni con il tessuto vivente causava degli effetti dannosi. Seguendo la storia, a partire dalla scoperta dei raggi X nel 1895 e della radioattività naturale nel 1896, nel 1897 si constatò che l'esposizione acuta a radiazioni poteva anche uccidere un essere umano. Nel 1902 venne riconosciuto per la prima volta un cancro radio-indotto. Nel frattempo le radiazioni erano già state utilizzate per curare i tumori: il primo trattamento di radioterapia oncologica risale infatti al 1899!
- Dopo circa 30 anni, nel 1928, nacque il primo organo internazionale avente lo scopo di elaborare e divulgare indicazioni e raccomandazioni finalizzate alla protezione dell'uomo contro le radiazioni ionizzanti (radioprotezione): l'ICRP (*International Commission for Radiological Protection*).

LE BASI E I PRINCIPI DELLA RADIOPROTEZIONE

- **Le basi scientifiche e i principi cardine**
- La radioprotezione è la disciplina applicata alla protezione dell'uomo e dell'ambiente dagli effetti dannosi delle radiazioni ionizzanti, una disciplina che si estrinseca in una serie di concetti, raccomandazioni, requisiti, tecnologie e modalità operative volti a proteggere la popolazione (individui in generale, lavoratori, soggetti sottoposti a pratiche mediche di diagnosi e cura facenti uso delle radiazioni ionizzanti).

Criteri generali

- La protezione dagli effetti delle radiazioni si fonda a livello generale sull'isolamento delle sorgenti radioattive dall'ambiente e dal contatto con l'uomo, e a livello particolare sull'adozione di pratiche, comportamenti, soluzioni progettuali, costruttive e tecnologiche atti a ridurre l'esposizione individuale e collettiva della popolazione in misura appropriata.

Assunzione del criterio dell'assenza di soglia

- L'assunzione fondamentale sulla quale si basano le raccomandazioni dell'ICRP è che non esiste dose per quanto piccola alla quale non sia associato un rischio, d'altra parte, non avrebbe senso cercare di ridurre a zero le dosi individuali - in quanto esiste sempre almeno la dose derivante dal fondo naturale , che oltretutto può variare ampiamente dall'una all'altra zona della Terra, come si è visto - l'ICRP non si può limitare a fissare semplici limiti di esposizione, il cui rispetto non potrebbe comunque soddisfare le esigenze di protezione, dal momento che non potrebbe né escludere la possibilità di danni stocastici, ancorché non rilevabili neanche su base statistica.

I tre principi

- Di qui discende la necessità di un sistema di protezione radiologica complesso, che secondo l'impostazione dell'ICRP è basato su tre principi generali: *il principio di giustificazione, il principio di ottimizzazione* e, solo in ultima istanza, *il principio di limitazione del rischio individuale.*

Il principio di giustificazione

- Il principio di giustificazione è lo stesso che si applica - consciamente o inconsciamente - a tutti i rischi derivanti da qualsiasi attività umana. Esso stabilisce che l'esposizione dell'individuo e della popolazione a dosi aggiuntive di radiazione è giustificabile solo se i benefici derivanti dalle pratiche che generano le dosi aggiuntive sono superiori all'insieme degli effetti negativi statisticamente prevedibili

Il principio di ottimizzazione

- Il principio di ottimizzazione stabilisce che - una volta comprovata la giustificazione - l'esposizione della popolazione deve essere mantenuta la più bassa ragionevolmente ottenibile (principio ALARA = *as low as reasonably achievable*) tenendo conto di fattori sanitari, economici e sociali.

Il principio di limitazione del rischio individuale

- Il principio di limitazione del rischio individuale si pone a valle dei due principi precedenti e afferma che le dosi individuali, anche se ammissibili sulla base dei principi di giustificazione e di ottimizzazione, non devono comunque eccedere specifici limiti determinati in modo tale da garantire che i rischi per la salute del singolo individuo non raggiungano livelli giudicati inaccettabili.

La determinazione dei limiti di dose

- Le valutazioni volte alla determinazione dei limiti di dose sono svolte dalla ICRP sulla base di approfondite analisi comparative fra il rischio - sull'arco dell'intera vita - di danno biologico associato all'assunzione di una determinata dose e i rischi sociali e individuali cui sono esposti gli individui della popolazione nella vita normale e nelle attività lavorative.

Limiti di dose – non considerando il fondo naturale -

	Lavoratori esposti	Lavoratori non esposti (popolazione in generale)
Dose efficace	20 mSv/anno	1 mSv/anno
Dose equivalente - al cristallino -	150 mSv/anno	15 mSv/anno
Dose equivalente - pelle ed estremità -	500 mSv/anno	50 mSv/anno

Classificazione dei lavoratori esposti

- A seconda dell'entità del rischio il lavoratore viene classificato in **categoria A** o in **categoria B**.
- Il lavoratore di **categoria A** è quello per cui l'ottimizzazione dell'organizzazione del lavoro **non può impedire** che corra il **rischio di superare in un anno solare** i seguenti valori di dose:
 - a) **6 mSv per esposizione globale** o di equivalente di dose efficace;
 - b) 45 mSv al cristallino
 - c) 150 mSv alla pelle
 - d) 150 mSv alle mani, avambracci piedi e caviglie.

Invece il lavoratore di **categoria B** è definito come esposto ad un rischio di ricevere una **dose compresa fra 1 e 6 mSv/anno**

In caso di emergenza agli operatori (vigile del fuoco, ecc..) è consentita una esposizione massima di 20 mSv in un sola volta per anno.

Infine per squadre di intervento speciali è previsto un limite di 100 mSv.

Preparazione alle emergenze

- Compito precipuo dell'APAT è quello di predisporre tutti gli strumenti necessari per poter convenientemente e tempestivamente fronteggiare le emergenze nucleari che dovessero verificarsi sia sul territorio nazionale che al di là delle frontiere, fornendo il necessario supporto tecnico alle autorità amministrative preposte alla gestione della predetta emergenza.

Limiti e sviluppi futuri (1)

- il Presidente dell'ICRP, il Prof. R. Clarke, diffuse un documento nel quale indica in via ipotetica una impostazione del quadro di base diversa rispetto all'attuale; scardinando il "Sistema di protezione radiologica", Clarke propose di abrogare alcune entità ritenute responsabili delle difficoltà in cui ci si veniva a trovare a seguito di una applicazione pedissequa ed acritica dei principi. Per superare tutto ciò secondo il Presidente dell'ICRP la panacea sarebbe quella di:
- Introdurre il sistema della dose "controllabile", una serie cioè di "livelli" di dose (anziché limiti) calibrati con riferimento al fondo naturale di 3 mSv, che possono essere ragionevolmente tenuti sotto controllo con un qualsiasi strumento. Da questa definizione sfuggirebbe solo la dose da fondo naturale a livello del suolo che evidentemente è una quantità fissa non modificabile.
- Adottare il principio che se il rischio di danno sanitario all'individuo più esposto è insignificante ("trivial") allora è insignificante anche il rischio complessivo indipendentemente da quante persone ne sono coinvolte. Ciò riporta quindi l'enfasi e l'attenzione primaria alla protezione individuale e porta ad eliminare il concetto di dose collettiva.

Limiti e sviluppi futuri (2)

- Abbandonare il principio di giustificazione dal momento che la radioprotezione non ha un ruolo di rilievo nelle decisioni politiche, decisioni per facilitare le quali questo principio era appunto stato formulato (si può sottolineare questo aspetto, ricordando l'esempio italiano in merito alla produzione di energia elettrica con centrali alimentate con combustibili fossili al posto di quelle nucleari).
- Trasformare l'acronimo ALARA, che sta dietro il principio di ottimizzazione, in ALARP sostituendo il termine "Achievable" con "Practicable", fatto che solo chi conosce bene l'inglese può compiutamente apprezzare.
- Abbandonare la distinzione tra "pratiche" ed "interventi"
- Tutto ciò consentirebbe tra l'altro di eliminare le distinzioni che ora vengono fatte tra dosi occupazionali, dosi mediche ed esposizione del pubblico. Con queste impostazioni il "Sistema di Protezione Radiologica" si ridurrebbe al seguente:
 - controllare la dose all'individuo rappresentativo del gruppo più esposto, nel senso di far sì che non venga superato il "livello" di azione (nuova denominazione di limite di dose);
 - assicurarsi che la dose risultante sia ALARP.

8. La sorveglianza fisica della radioprotezione

La figura dell'esperto qualificato

- **L'esperto qualificato** è -ai sensi del d.lgvo 241/2000 - persona che possiede le cognizioni e l'addestramento necessari per misurare le radiazioni ionizzanti, per assicurare l'esatto funzionamento dei dispositivi di protezione, per dare le istruzioni e le prescrizioni necessarie a garantire **la sorveglianza fisica della radioprotezione**.
- Per "**sorveglianza fisica**" si intende l'insieme dei dispositivi adottati, delle valutazioni, delle misure e degli esami effettuati, delle indicazioni fornite e dei provvedimenti formulati dall'esperto qualificato al fine di garantire la protezione sanitaria dei lavoratori e della popolazione; **essa deve essere effettuata** quando le attività svolte comportino **la classificazione delle aree** (controllate o sorvegliate) **e/o di lavoratori esposti**

I tre gradi dell'esperto qualificato

- L'esperto qualificato deve possedere i titoli di studio richiesti (diploma o laurea in discipline scientifiche) e, dopo aver superato un esame di abilitazione, è iscritto in uno speciale elenco depositato presso l'Ispettorato medico centrale del lavoro. Esistono tre gradi
- di abilitazione con diverse competenze
- - 1° grado: apparecchi radiologici che accelerano elettroni con tensione applicata $< 400\text{keV}$;
- - 2° grado: macchine radiogene con energia degli elettroni $< 10\text{ MeV}$, materie radioattive, incluse le sorgenti di neutroni con produzione media 10^4 neutroni/sec;
- - 3° grado: sorgenti di neutroni e impianti nucleari.
- L'abilitazione di 2° grado comprende anche quella di 1°; quella di 3° grado comprende anche quella di 2° e 1° grado.

Compiti dell'esperto qualificato

- L'esperto qualificato deve fornire al datore di lavoro, prima dell'inizio di qualsiasi attività con rischio da radiazioni ionizzanti, una consulenza in merito alla valutazione dei rischi che l'attività comporta e ai relativi provvedimenti di radioprotezione da adottare, redigendo apposita relazione.
- Rientrano tra le competenze dell'esperto qualificato una serie di fondamentali azioni organizzative generali della radioprotezione, le principali delle quali riguardano:
 - - la classificazione delle aree con rischio da radiazioni ionizzanti;
 - - la classificazione del personale ai fini della radioprotezione;
 - - la predisposizione delle norme interne di radioprotezione;
 - - la segnalazione mediante contrassegni delle sorgenti di radiazione;
 - - la predisposizione di un programma di informazione e formazione, finalizzato alla radioprotezione, allo scopo di rendere il personale edotto dei rischi specifici a cui è esposto.

Zona controllata – Dose tra 6 e 20 mSv/anno -

- Il D.Lgs. 241/2000 prescrive l'obbligo di classificare gli ambienti di lavoro sottoposti a regolamentazione per motivi di protezione contro le radiazioni ionizzanti. Le zone classificate possono essere zone controllate o zone sorvegliate .
- È classificata zona **controllata** ogni area di lavoro ove sussiste per i lavoratori ivi operanti il rischio di superamento di uno qualsiasi dei seguenti valori:
 - **6 mSv/anno** per esposizione globale;
 - 45 mSv/anno per il cristallino;
 - 150 mSv/anno per la pelle, mani, avambracci, piedi, caviglie

Zona sorvegliata – Dose tra 1 e 6 mSv/anno -

- E' classificata zona **sorvegliata** ogni area di lavoro, che non debba essere classificata zona controllata, ove sussiste per i lavoratori ivi operanti il rischio di superamento di uno qualsiasi dei seguenti valori:
 - ° **1 mSv/anno** per esposizione globale;
 - ° 15 mSv/anno per il cristallino;
 - ° 50 mSv/anno per la pelle, mani, avambracci, piedi, caviglie.

7. Il quadro normativo della radioprotezione

Quadro normativo 1

La radioattività negli stati dell' Unione Europea deve essere controllata in base alla Raccomandazione della Commissione Europea dell'8 giugno 2000, **n. 2000/473/Euratom** che prevede che venga applicato l'articolo 36 del trattato Euratom riguardante il **controllo del grado di radioattività ambientale allo scopo di determinare l'esposizione dell'insieme della popolazione** (G.U.C.E. serie L, del 27 luglio 2000, n.191).

Pertanto tutti gli Stati comunitari dovranno comunicare, periodicamente, le informazioni relative ai controlli dei livelli di radioattività, dotandosi di un'apposita rete di controllo diradata (3 in Italia) e di una fitta. **E' previsto che i controlli siano effettuati (conformemente alle specifiche dell'allegato I) per le particelle in sospensione, l'aria, le acque di scorrimento, le acque potabili, il latte e la dieta mista.**

La legislazione italiana, inoltre, prevede con il **D.L.17 marzo 1995, n. 230** (in supplemento ordinario n. 74, alla Gazzetta Ufficiale n. 136, del 13 giugno; "Attuazione delle direttive Euratom 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti") all'art. 104 il **Controllo sulla radioattività ambientale.**

Quadro normativo 2

- Fermo restando le competenze in materia delle regioni, delle province autonome e dell' ANPA,(ora APAT)
- **il controllo sulla radioattività ambientale e' esercitato dal Ministero dell'ambiente;**
- **il controllo sugli alimenti e bevande per consumo umano ed animale e' esercitato dal Ministero della sanità.**
- I Ministeri si danno reciproca informazione sull'esito dei controlli effettuati. Il complesso dei controlli è articolato in reti di sorveglianza regionale e reti di sorveglianza nazionale
- La gestione delle reti uniche regionali è effettuata dalle singole regioni, secondo le direttive impartite dal Ministero della sanità e dal Ministero dell'ambiente. Le regioni, per l'effettuazione dei prelievi e delle misure, debbono avvalersi, anche attraverso forme consortili tra le regioni stesse, delle strutture pubbliche idoneamente attrezzate. Le direttive dei Ministeri riguardano anche la standardizzazione e l'intercalibrazione dei metodi e delle tecniche di campionamento e misura

Quadro normativo 3

- **Le reti nazionali si avvalgono dei rilevamenti e delle misure effettuati da istituti, enti ed organismi idoneamente attrezzati (Agenzie Regionali)- E' in corso di definizione un criterio di appartenenza da parte dell'APAT -**
- Per assicurare l'omogeneità dei criteri di rilevamento e delle modalità di esecuzione dei prelievi e delle misure, relativi alle reti nazionali ai fini dell'interpretazione integrata dei dati rilevati, nonché per gli effetti dell'art. 35 del Trattato istitutivo della CEEA, sono affidate all' APAT le funzioni di coordinamento tecnico. A tal fine l' APAT, sulla base delle direttive in materia, emanate dal Ministero della sanità e dal Ministero dell'ambiente:
 - a) **coordina le misure effettuate dagli istituti, enti o organismi di cui sopra,** riguardanti la radioattività dell'atmosfera, delle acque, del suolo, delle sostanze alimentari e bevande e delle altre matrici rilevanti, seguendo le modalità di esecuzione e promuovendo criteri di normalizzazione e di intercalibrazione
 - b) **promuove l'installazione di stazioni di prelievamento di campioni e l'effettuazione delle relative misure di radioattività,** quando ciò sia necessario per il completamento di un'organica rete di rilevamento su scala nazionale, eventualmente contribuendo con mezzi e risorse, anche finanziarie
 - c) **trasmette,** in ottemperanza all'art. 36 del Trattato istitutivo della CEEA, le **informazioni relative ai rilevamenti effettuati.**
- Per quanto attiene alle reti nazionali, l'APAT provvede inoltre alla diffusione dei risultati delle misure effettuate
- **La rete di allarme gestita dal Ministero dell'interno (Vigili del fuoco) ai sensi della legge 13 maggio 1961, n. 469, concorre autonomamente al sistema di reti nazionali.**

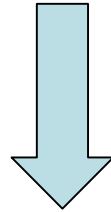
Quadro storico della normativa

- 1) **L. 3/12/1922 n.1336** - ispirata al campo minerario
- 2) **R.D. 29/7/1927 n.1443** - norme per la disciplina della ricerca nelle miniere
- 2) **R.D. 27/7/1934 n.1265** - preoccupazione sanitaria dell'uso terapeutico della rad.
- 3) **Trattato EURATOM** che istituisce la Comunità Europea dell'energia atomica (Roma 1957) – Viene recepito dall'Italia nel 1958 (in contemporanea con la CEE) – il trattato mira a contribuire alla formazione e allo sviluppo delle industrie nucleari europee, di fare in modo che tutti possano trarre beneficio dallo sviluppo dell'energia atomica e di garantire la sicurezza di approvvigionamento
- 4) **L 31/12/1962 n.1860** “Impiego pacifico dell'energia nucleare” (introduce un regime giuridico per detenzione, commercio impiego e trasporto di materiale radioattivo, esso conteneva una delega al Governo per l'emanazione di norme di sicurezza degli impianti e protezione della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti, che fu adempiuta con il D.P.R. 13/2/1964 n.185 (vengono istituiti organi centrali e periferici di coordinamento e di controllo delle materie radioattive).

Normativa attuale

D.Lgs. 17/3/1995 n.230 s.m.i.

“Protezione contro i rischi derivanti dalle r.i.”



D.Lgs. 241/00

Recepisce la Direttiva
EURATOM 29/96

**Modifica ed integra la norma precedente
Chiarendo varie responsabilità, funzioni e
procedure
Per garantire la protezione della popolazione
e dei lavoratori in cui vi siano
attività con esposizioni a radiazioni**



D.Lgs. 187/00

Recepisce la Direttiva
EURATOM 43/97

**Modifica in modo sostanziale
responsabilità, funzioni e procedure
per garantire
La protezione del paziente sottoposto
ad attività medica con impiego di r.i.**

Campo di applicazione - D.Lgs. 241/00

- La costruzione, l'esercizio e la disattivazione degli impianti nucleari
- Le pratiche che implicano un rischio dovuto a r.i. provenienti da sorgenti artificiali o da una sorgente naturale nei casi in cui i radionuclidi siano o siano stati trattati per le loro proprietà fissili
- Le attività lavorative diverse dalle "pratiche" di cui sopra ma che implicano presenza di sorgenti naturali di cui al Capo III bis
- Gli interventi in caso di emergenza radiologica o nucleare

Novità introdotte- dal D.Lgs.241/00 e 257/00

- Concetti di pratica e intervento
- Regime autorizzativo
- Impiego di Categoria A e B
- Grandezze dosimetriche operative
- Limiti di Dose
- Interventi di emergenza

D.Lgs. 241/00

Integrazioni e modifiche

- Organi (funzioni ispettive)
- Regime giuridico per importazione, produzione, commercio, trasporto e detenzione
- Regime autorizzativo per installazioni e particolari disposizioni per i rifiuti radioattivi
- Protezione sanitaria dei lavoratori e della popolazione
- Emergenza nucleare
- Norme penali

Art. 10 D.Lgs. 230/95 (invariato) “funzioni ispettive”

- Le funzioni ispettive sono attribuite all'ANPA (ora APAT)
- **Gli ispettori possono richiedere:**
 - dati, documentazioni, dimostrazione di efficienza delle apparecchiature
 - e possono procedere agli accertamenti necessari per garantire l'osservanza delle norme tecniche e di prescrizioni particolari
 - Devono rilasciare copia del verbale di ispezione

Art. 9 D.Lgs. 241/00
(sostituisce interamente l'art.22 del 230)
“Comunicazione preventiva pratiche”

- Comunicazione trenta giorni prima dell'inizio della detenzione di sorgenti di radiazioni a (questa denuncia viene definita “pratica”):
 - Comando Vigili del Fuoco
 - Agli organi del Servizio Sanitario Nazionale
 - **E ove di loro competenza a:**
 - Ispettorato Provinciale del Lavoro
 - Al Comandante di Porto e all'Ufficio di sanità marittima
 - Agenzie regionale e delle provincie autonome
- All'art. 4 dell'Allegato VII vengono indicate le condizioni per l'esenzione della comunicazione preventiva

Pratica e LD.Lgs. 269/94

- Questa denuncia (definita PRATICA) rappresenta anche il documento di valutazione dei rischi che il Datore di Lavoro è obbligato a redigere in base al D.Lgs 626/94.
- Per l'Università il Datore di Lavoro e Legale Rappresentante è il Rettore, che demanda poi i compiti ai Direttori di Dipartimento, sui quali quindi ricade la responsabilità operativa e gestionale.

Regime autorizzativo per installazioni e particolari disposizioni per rifiuti radioattivi

Arrtt. 28 e 29 D.Lgs.230/95
-Alegato IX del D.Lgs. 241/00 –

- **Categoria A:** nulla-osta preventivo dal Ministero dell'Industria e commercio e Artigianato
- **Categoria B:** Discipinate da norme Regionali che individuano autorità competenti e modalità del rilascio del nulla-osta

Decreto Legislativo 17 marzo 1995 n.230

Obblighi del Datore di Lavoro

I **datori di lavoro** ed i **dirigenti** che rispettivamente esercitano e dirigono le attività disciplinate dal presente decreto ed i **preposti** che vi sovrintendono devono, nell'ambito delle rispettive attribuzioni e competenze, attuare le cautele di protezione e di sicurezza previste dal presente capo e dai provvedimenti emanati in applicazione di esso.

Datori di lavoro Dirigenti e Preposti devono:

- a) provvedere affinché gli ambienti di lavoro in cui sussista un rischio da radiazioni vengano delimitati, segnalati, classificati in zone e che l'accesso ad essi sia adeguatamente regolamentato;
- b) provvedere affinché i lavoratori interessati siano classificati ai fini della radioprotezione
- c) predisporre norme interne di protezione e sicurezza adeguate al rischio di radiazioni e curare che copia di dette norme sia consultabile nei luoghi frequentati dai lavoratori, ed in particolare nelle zone controllate;

- d) fornire ai lavoratori, ove necessari, i mezzi di sorveglianza dosimetrica e di protezione, in relazione ai rischi cui sono esposti;
 - e) rendere edotti i lavoratori, nell'ambito di un programma di formazione finalizzato alla radioprotezione dei rischi specifici cui sono esposti, delle norme di protezione sanitaria, delle conseguenze derivanti dalla mancata osservanza delle prescrizioni mediche, delle modalità di esecuzione del lavoro e delle norme interne di cui alla lettera c);
 - f) provvedere affinché i singoli lavoratori osservino le norme interne di cui alla lettera c), usino i mezzi di cui alla lettera d) ed osservino le modalità di esecuzione del lavoro di cui alla lettera e);
 - g) provvedere affinché siano apposte segnalazioni che indichino il tipo di zona, la natura delle sorgenti ed i relativi tipi di rischio e siano indicate, mediante appositi contrassegni, le sorgenti di radiazioni ionizzanti, fatta eccezione per quelle non sigillate in corso di manipolazione;
 - h) fornire al lavoratore esposto i risultati delle valutazioni di dose effettuate dall'esperto qualificato, che lo riguardino direttamente, nonché assicurare l'accesso alla documentazione di sorveglianza fisica concernente il lavoratore stesso;
-

Decreto Legislativo 17 marzo 1995 n.230 Obblighi del Lavoratore

- a) osservare le disposizioni impartite dal datore di lavoro o dai suoi incaricati, ai fini della protezione individuale e collettiva e della sicurezza, a seconda delle mansioni alle quali sono addetti;
 - b) usare secondo le specifiche istruzioni i dispositivi di sicurezza, i mezzi di protezione e di sorveglianza dosimetrica predisposti o forniti dal datore di lavoro;
 - c) segnalare immediatamente al datore di lavoro, al dirigente o al preposto le deficienze dei dispositivi e dei mezzi di sicurezza, di protezione e di sorveglianza dosimetrica, nonché le eventuali condizioni di pericolo di cui vengono a conoscenza;
 - d) non rimuovere né modificare, senza averne ottenuto l'autorizzazione, i dispositivi, e gli altri mezzi di sicurezza, di segnalazione, di protezione e di misurazione;
 - e) non compiere, di propria iniziativa, operazioni o manovre che non sono di loro competenza o che possono compromettere la protezione e la sicurezza;
 - f) sottoporsi alla sorveglianza medica ai sensi del presente decreto.
-

Protezione sanitaria dei lavoratori

*Disciplinata dal Capo VII del 230/95 con le modifiche
introdotte dal 241/00*

- **Sorveglianza fisica (esperto qualificato)**
*(classificazione delle aree e del personale,
norme di radioprotezione, monitoraggio degli
ambienti di lavoro e ove occorre dosimetro
personale)*
- **Sorveglianza medica (medico autorizzato)**
(visite periodiche, libretto sanitario)

Decreto Legislativo 17 marzo 1995 n. 230

Sorveglianza Fisica

Il datore di lavoro deve assicurare la sorveglianza fisica per mezzo di esperti qualificati.

Persona che possiede le cognizioni e l'addestramento necessari sia per effettuare misurazioni, esami, verifiche o valutazioni di carattere fisico, tecnico o radiotossicologico, sia per assicurare il corretto funzionamento dei dispositivi di protezione, sia per fornire tutte le altre indicazioni e formulare provvedimenti atti a garantire la sorveglianza fisica della protezione dei lavoratori e della popolazione.

La sua qualificazione è riconosciuta secondo le procedure stabilite nel presente decreto

Decreto Legislativo 17 marzo 1995 n. 230

Sorveglianza Medica

Il datore di lavoro deve provvedere ad assicurare mediante uno o più medici la sorveglianza medica dei lavoratori esposti e degli apprendisti e studenti. Tale sorveglianza è basata sui principi che disciplinano la medicina del lavoro.

La sorveglianza medica dei lavoratori esposti che non sono classificati in categoria A è assicurata tramite medici competenti o medici autorizzati. La sorveglianza medica dei lavoratori di categoria A è assicurata tramite medici autorizzati.

Medico autorizzato: medico responsabile della sorveglianza medica dei lavoratori esposti, la cui qualificazione e specializzazione sono riconosciute secondo le procedure e le modalità stabilite nel presente decreto.

Monitoraggio individuale

Prevenzione

- Misure ambientali –carichi di lavoro
- dosimetri individuali
- misure di contaminazione (nel caso di sorgenti non sigillate)



Zone controllate e sorvegliate

- **Regolamentazione degli accessi**

- Segnaletica

- -indicatori acustici
e luminosi

- Norme di radioprotezione



LIMITI DI DOSE (D. LGS. 241/00)

	Lavoratori	Popolazione
Dose efficace	20 mSv/anno	1 mSv/anno
Dose equivalente		
Cristallino	150 mSv/anno	15 mSv/anno
Cute	500 mSv/anno	50 mSv/anno
Mani - piedi	500 mSv/anno	----

D.Lgs. 187/2000

Protezione del paziente

- ▣ esposizione di pazienti nell'ambito della rispettiva diagnosi o trattamento medico;
- ▣ esposizione di persone nell'ambito della sorveglianza sanitaria professionale;
- ▣ esposizione di persone nell'ambito di programmi di screening sanitario;
- ▣ esposizione di persone sane o di pazienti che partecipano volontariamente a programmi di ricerca medica o biomedica, in campo diagnostico o terapeutico;
- ▣ esposizione di persone nell'ambito di procedure medico-legali;
- ▣ esposizioni di persone che coscientemente e volontariamente, al di fuori della loro occupazione, assistono e confortano persone sottoposte a esposizioni mediche. (art. 1 comma 2 e 3)

D.Lgs. 187/00

RADIOPROTEZIONE DEL PAZIENTE

- novità -

- ▣ Giustificazione delle procedure
- ▣ **Ottimizzazione delle procedure**
- ▣ Funzioni e responsabilità
- ▣ **Formazione**

D.Lgs. 230/95 e s.m.i. (capo III-bis)

L'art. 10-bis prende in considerazione tra l'altro le "attività lavorative durante le quali i lavoratori e, eventualmente, persone del pubblico sono esposti a prodotti di decadimento del radon o del toron, o a radiazioni gamma o a ogni altra esposizione in luoghi di lavoro quali tunnel, sottovie, catacombe, grotte e, comunque, in tutti i luoghi di lavoro sotterranei"

In questi luoghi di lavoro devono essere effettuate misurazioni di concentrazione di gas radon a cura degli esercenti

D.Lgs. 230/95 e s.m.i.

- Le misure devono essere effettuate secondo linee guida emanate dalla sezione speciale della Commissione tecnica (artt. 10 ter e 10- septies)**
- Per le misurazioni, l'esercente si avvale di organismi riconosciuti ai sensi dell'art. 107, comma 3, o, nelle more dei riconoscimenti, di organismi idoneamente attrezzati (art. 10 ter)**

Temi affrontati nelle linee guida

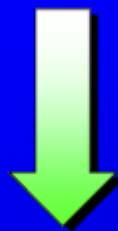
- Definizione di “luogo di lavoro sotterraneo”
(regolamenti edilizi comunali)
- Protocollo per le misure
(linee guida UK, Svezia, Irlanda)
- Requisiti minimi degli organismi che effettuano
le
misure (norme ISO 17025)

Luogo di lavoro "sotterraneo"

Deroga all'art. 8 del DPR 303/56

SOTTERRANEO: locale o ambiente con almeno 3 pareti interamente sotto il piano di campagna, indipendentemente dal fatto che queste siano o no a diretto contatto con terreno circostante

LUOGO DI LAVORO: locale dove il personale trascorre una frazione di tempo significativa



10 ore mensili

(no locali di servizio, spogliatoi, ambienti di passaggio)

ADEMPIMENTI PER L'ESPOSIZIONE AL RADON NEI LUOGHI DI LAVORO

Entro 24 mesi dall'inizio attività l'esercente effettua una campagna di misurazioni (con l'ausilio di un organismo riconosciuto) documentandole con una relazione finale.

Posto il Livello di azione a 500 Bq/m³ di attività di Radon media in un anno:

Se la misura è inferiore all' 80% del livello di azione (400 Bq/m³) l'obbligo è risolto e bisognerà ripetere le valutazioni con cadenza triennale o al variare delle condizioni di lavoro.

Se la misura è tra l'80% ed il 100% del livello di azione (400 ÷ 500 Bq/m³) l'obbligo si risolve con la ripetizione annuale della misura.

Se la misura supera il livello di azione (>500 Bq/m³) si dovrà:

1. Spedire agli Organi di controllo la relazione di misura
2. Incaricare un Esperto Qualificato per valutare la dose efficace
3. Verifica della dose efficace assorbita dai singoli lavoratori

ADEMPIMENTI PER L'ESPOSIZIONE AL RADON NEI LUOGHI DI LAVORO

Se la dose efficace è inferiore a 3mSv/anno l'obbligo si risolve con la ripetizione della misura con cadenza annuale.

Se la dose efficace è superiore o uguale a 3mSv/anno:

1. L'Esperto qualificato effettua la valutazione del rischio
2. L'esercente predispone le azioni di rimedio e, al termine delle stesse, ripete la misura

Se anche la nuova misura fornisce valori superiori a 3mSv/anno l'esercente è tenuto a mettere i lavoratori sotto protezione sanitaria, quindi a:

1. Incaricare l'Esperto Qualificato per la sorveglianza fisica
2. Incaricare il Medico per la sorveglianza medica dei lavoratori
3. Predispone ulteriori azioni di rimedio, quindi ripetere la misura

Protocollo di misura

N.° PUNTI DI MISURA

a) ambienti separati di dimensioni limitate

1 punto di misura per ogni locale

oppure

giustificata riduzione del numero di misure

in

caso elevato numero di ambienti

“analoghi”

b) ambienti di medie e grandi dimensioni

1 misura per ogni 100 m² di superficie

Protocollo di misura

PERIODO DI MISURA

Copertura dell'intero anno solare, suddiviso anche in più periodi di esposizione

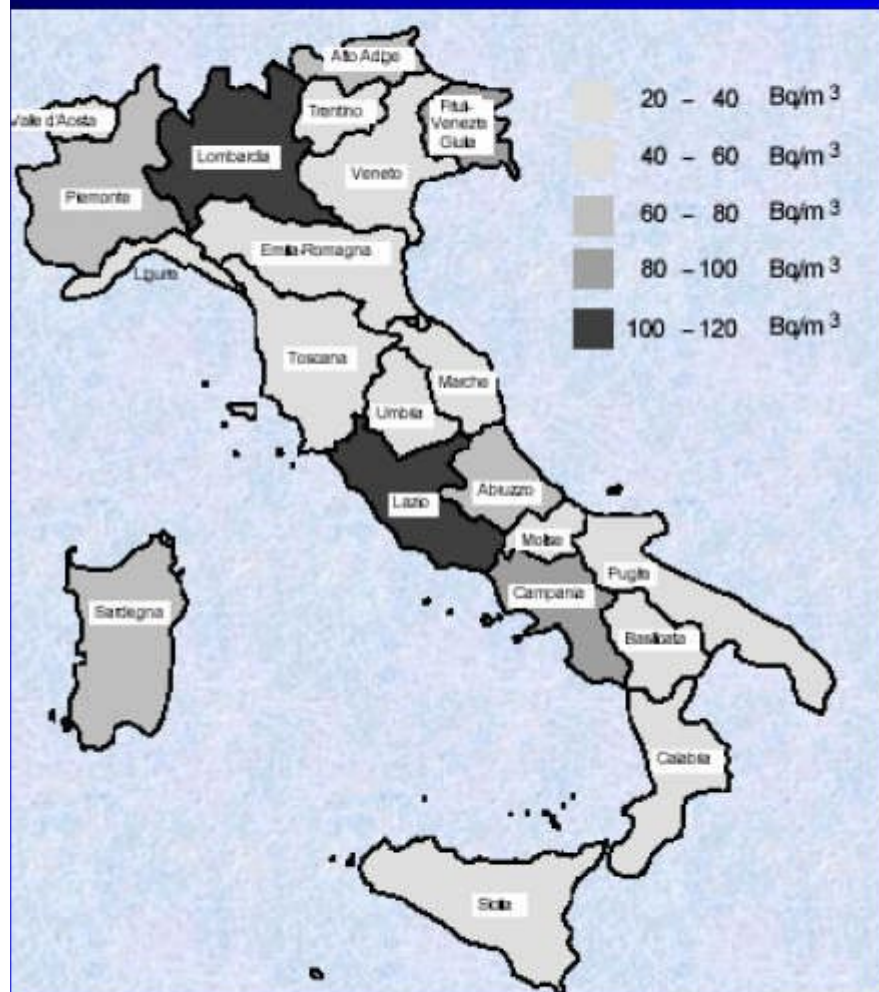
- **Il valore medio è costituito dalla media pesata semplice sui diversi periodi di esposizione**
- **La concentrazione media annua comprende sia il periodo diurno che quello notturno**
- **L'attuale conoscenza sui fattori di correzione stagionali non consente di utilizzare misure**

Protocollo di misura

TECNICA DI MISURA

- tecniche passive: rivelatori a tracce nucleari, rivelatori a elettrete (no carbone attivo)**
- sistemi noti alla comunità scientifica (per esempio quelli che hanno partecipato agli ultimi interconfronti NRPB www.nrpb.org)**
- taratura del metodo e controllo di qualità dei dati vanno posti alla base della affidabilità e riproducibilità**

Livelli di radon in Italia



- Indagine nazionale sulla esposizione alla radioattività naturale in un campione di 5000 abitazioni (1989/1997)
- **Media annuale** nazionale della concentrazione di radon: **70 Bq/m³**
- Percentuale di abitazioni con concentrazione
>200 Bq/m³: 4.1%
>400 Bq/m³: 0.9%

Lgs. 241/2000 prevede l'attivazione, nell'ambito della "Commissione a per la sicurezza nucleare e la protezione sanitaria" già istituita presso I.T., **di un'apposita "sezione speciale per le esposizioni a sorgenti naturali di radiazioni"**, cui sono stati assegnati una serie di compiti, il primo dei quali consiste nell'elaborare linee-guida sulle metodologie e sulle tecniche di misura più appropriate per le misurazioni di radon in aria nonché sulle valutazioni relative esposizioni.

Il funzionamento della suddetta "sezione speciale", composta da ventuno esperti in materia, doveva avvenire entro sei mesi dalla pubblicazione del D.Lgs. 241/2000 (il febbraio 2001) e le linee guida di cui sopra dovevano essere elaborate entro un anno (entro il febbraio 2002).

A tutt'oggi detta commissione ancora viene istituita e per colmare tale vuoto nel 2003 la conferenza delle regioni ha emanato opportune delle linee guida

8) Il monitoraggio in Italia

Monitoraggio della radioattività ambientale

- Un moderno sistema di radioprotezione della popolazione e dell'ambiente non può prescindere da un complesso sistema di controllo della radioattività nelle **matrici ambientali e alimentari**.
- In base alla normativa vigente, questo sistema è articolato in reti di sorveglianza regionale e **reti di sorveglianza nazionale (RESORAD)**.
Le funzioni di coordinamento tecnico di queste ultime sono affidate all'APAT.
- Tra le matrici ambientali più significative rientra certamente l'aria. I sistemi di misura delle concentrazioni della radioattività nell'aria hanno tuttavia una importanza rilevante anche per le problematiche dell'emergenza, specie per l'identificazione di emergenze transfrontaliere.

Controllo della radioattività ambientale

- Nel nostro paese il controllo sulla radioattività ambientale è regolato dal [Decreto Legislativo n. 230 del 17 marzo 1995](#) e dalle sue successive modifiche e integrazioni. Il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio esercita il controllo sull'ambiente, mentre il Ministero della Salute esercita il controllo sugli alimenti e bevande per il consumo umano e animale. Il complesso dei controlli è articolato in **reti di sorveglianza regionali e reti di sorveglianza nazionali**. La gestione delle reti uniche regionali è effettuata dalle singole regioni, mentre le reti nazionali si avvalgono dei rilevamenti e delle misure radiometriche delle Agenzie regionali e provinciali per la protezione dell'ambiente e di altri enti, istituti e organismi specializzati. Per garantire la qualità dei risultati, i soggetti della rete partecipano ad un programma di affidabilità, gestito dall'APAT con il supporto dell'Istituto di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti – INMRI dell'[ENEA](#), che consiste nella esecuzione di interconfronti periodici.

Schema delle reti



Reti di monitoraggio

- Il sistema di controllo della radioattività ambientale italiano si sviluppa attualmente in una serie di reti: le **Reti Regionali** di Sorveglianza della Radioattività Ambientale e le **Reti Nazionali** di Sorveglianza della Radioattività Ambientale. Queste ultime comprendono:
 - **Rete RESORAD** (coordinata dall'APAT) dei rilevamenti e delle misure effettuati dagli **istituti, enti ed organismi idoneamente attrezzati**;
 - **Reti APAT di allarme**: rete GAMMA (dose gamma in aria), rete REMRAD (particolato atmosferico);
 - **Reti di allarme del Ministero dell'Interno (così come recita art.1 della L.469 del 13-5-1961:**
Sono attribuiti al Ministero dell'interno: a) i servizi di prevenzione ed estinzione degli incendi e, in genere, i servizi tecnici per la tutela della incolumità delle persone e la preservazione dei beni anche dai pericoli derivanti dall'impiego dell'energia nucleare;)
- A queste vanno aggiunte le **reti di sorveglianza locale** della radioattività ambientale degli impianti per la produzione di combustibile nucleare, gli impianti per la produzione di energia nucleare, anche se in fase di dismissione, gli impianti di ricerca, gestite dal titolare dell'autorizzazione o del nulla osta o dagli esercenti secondo quanto prescritto dall'art. 54 del D.Lgs.230/95 e s.m.i.

LA RETE RESORAD

- Rete RESORAD (REte di SORveglianza della RADioattività)
- La Rete degli istituti, enti e organismi idoneamente attrezzati (RESORAD) consiste in un insieme di strutture che concorrono a **monitorare i punti di osservazione localizzati sul territorio nazionale**, opportunamente definiti secondo criteri geografici e climatologici, nonché sulla base di considerazioni concernenti la distribuzione della popolazione e le loro abitudini alimentari. La Rete analizza l'andamento spazio-temporale delle concentrazioni dei radioelementi nelle matrici dei diversi comparti ambientali ed alimentari interessati dalla diffusione della radioattività e dal suo trasferimento all'uomo. La sensibilità con cui si eseguono i rilevamenti rende la Rete atta a **rivelare tempestivamente eventi anomali**, come ad esempio nel giugno del 1998, quando la rete nazionale italiana fu in grado di evidenziare attraverso la rivelazione di una presenza anomala di radioattività in aria, l'incidente alla fonderia spagnola di Algeciras, nella quale era stata fusa una sorgente di Cs-137 con diffusione in atmosfera.

Rete REMRAD E GAMMA

L'incidente alla centrale nucleare di Cernòbyl ha messo in evidenza la necessità di disporre sia di strumenti idonei per l'interscambio di informazioni tra i diversi paesi che di un sistema automatico per il controllo della radioattività in aria.

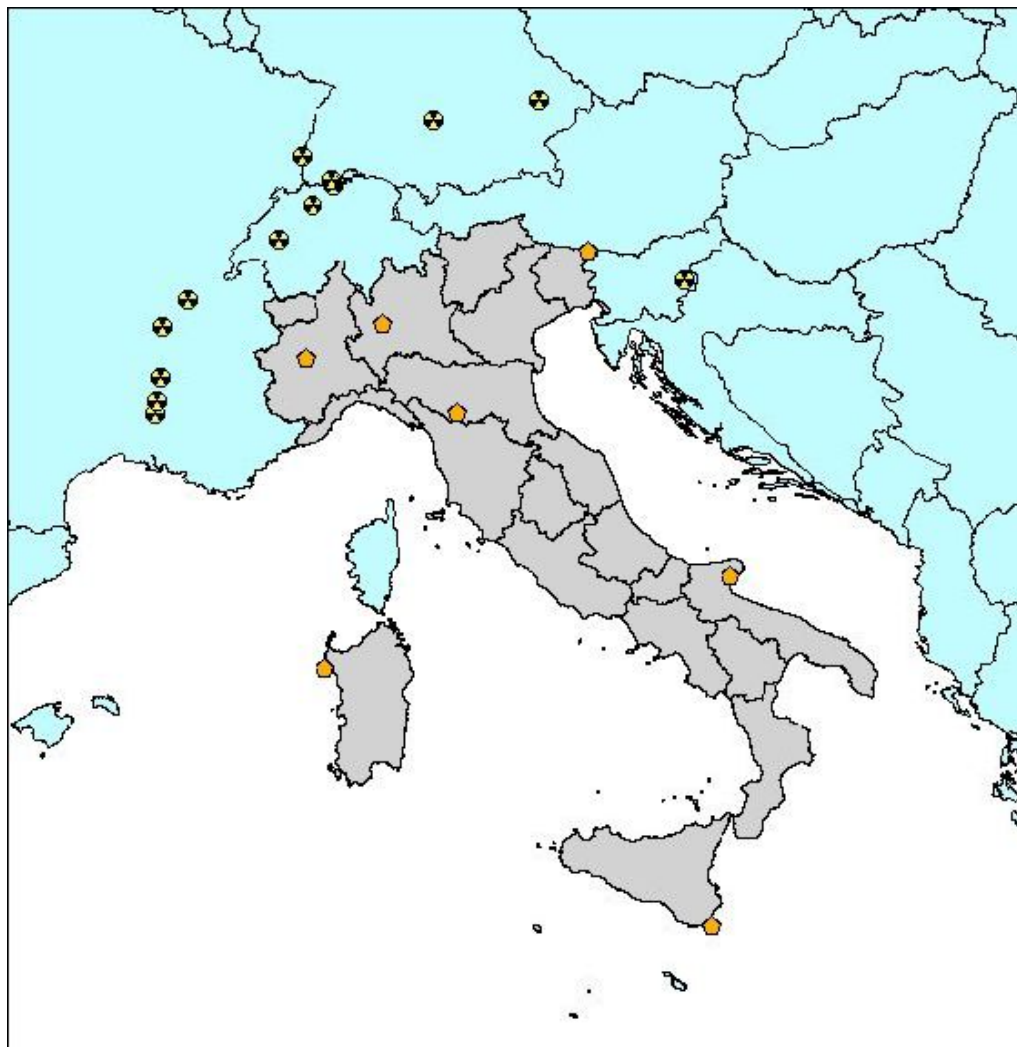
- **Ai fini di un monitoraggio continuo ed automatico della radioattività in aria sono state messe a punto dall'APAT due reti: la rete di allarme REMRAD (7 centraline) per la determinazione dei radionuclidi nel particolato atmosferico (rad. alfa, beta e gamma) e la rete GAMMA (50 centraline) per la determinazione della dose gamma in aria.**
- Questi strumenti contribuiscono in modo sostanziale al sistema di supporto tecnico alle attività del Centro di Elaborazione e Valutazione Dati (**CEVaD**), struttura tecnica del Dipartimento della Protezione Civile in caso di emergenza radiologica. Il Centro è composto da **esperti dell'APAT**, del Corpo Nazionale dei **Vigili del Fuoco**, dell'Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro, dell'Istituto Superiore di Sanità e del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, ed ha il **compito di valutare la situazione di emergenza in atto, la sua possibile evoluzione ed il conseguente impatto radiologico**. Partecipa all'attività del Centro anche due esperti di radioprotezione dei laboratori regionali per il controllo della radioattività ambientale, designati dalla Conferenza Stato-Regioni.

Le stazioni automatiche

- La rete di allarme REMRAD è composta da stazioni automatiche, poste in siti dell'Aeronautica Militare, con la capacità di analizzare il particolato atmosferico raccolto su filtro con misure istantanee di concentrazione naturale e artificiale (alfa e beta emettitori) e determinazione dei radionuclidi gamma-emettitori mediante tecniche di analisi spettrometrica.



Stazione automatica di Tarvisio (UD)



Una tale rete, con compiti di pronto allarme, è attualmente composta da 7 stazioni automatiche poste in località di grande importanza meteorologica, scelte in modo tale da coprire le più probabili vie di ingresso nel paese della radioattività proveniente dalle centrali nucleari europee. Le località prescelte sono: Tarvisio (UD), Bric della Croce (TO), Vimodrone (MI), Capo Caccia (SS), Monte Cimone (MO), Monte S. Angelo (FG) e Cozzo Spadaro (SR).

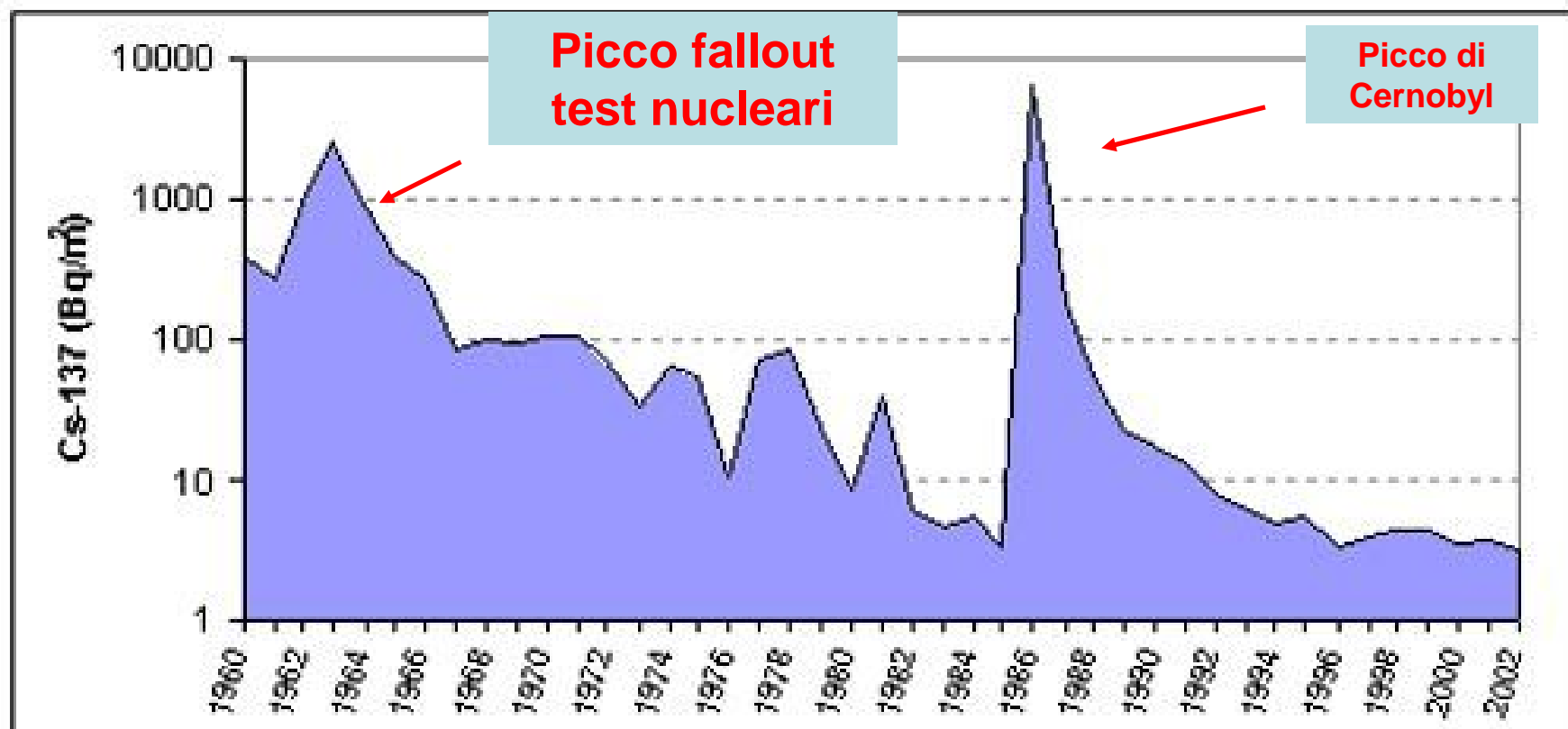
CAMPIONAMENTI

- **Schema di campionamento e misura della rete RESORAD**
- **Matrice Frequenza di prelievo Frequenza delle misure radiometriche Principali radionuclidi**
Particolato atmosferico Giornaliera Mensile Beta totale, Cs-137 Deposizioni umide e secche al suolo Mensile Mensile Cs-137, Be-7, Sr-90
Acqua potabile* Semestrale Semestrale Cs-137, Sr-90
Matrici dell'ambiente acquatico Semestrale Semestrale Cs-137, Sr-90
Carni Mensile Trimestrale Cs-137
Pesci Cs-137 Cereali e derivati Stagionale Stagionale Cs-137, Sr-90
Pasta Trimestrale Trimestrale Cs-137
Vegetali Stagionale Stagionale Cs-137, Sr-90
Frutta Stagionale Stagionale Cs-137
Latte Settimanale/Mensile Mensile Cs-137, Sr-90
**Non sono considerate tutte le misure previste ai sensi della direttiva del Consiglio 98/83/CE, del 3 novembre 1998, sulla qualità delle acque destinate al consumo umano, recepita in Italia dal D.L. 31/01*
- Le matrici considerate comprendono comunque tutte quelle espressamente indicate dalla Raccomandazione della Commissione Europea dell'8 giugno 2000 (aria, particolato atmosferico, acque superficiali, acqua potabile, latte, dieta mista).
- I dati prodotti annualmente sono inviati dalle Agenzie ad APAT e da questa alla Commissione Europea, che provvede a raccogliarli nella banca dati REM del [Joint Research Centre di Ispra](#).

Schema di campionamento e misura della rete RESORAD

Matrice	Frequenza di prelievo	Frequenza delle misure radiometriche	Principali radionuclidi
Particolato atmosferico	Giornaliera	Mensile	Beta totale, Cs-137
Deposizioni umide e secche al suolo	Mensile	Mensile	Cs-137, Be-7, Sr-90
Acqua potabile*	Semestrale	Semestrale	Cs-137, Sr-90
Matrici dell'ambiente acquatico	Semestrale	Semestrale	Cs-137, Sr-90
Carni	Mensile	Trimestrale	Cs-137
Pesci			Cs-137
Cereali e derivati	Stagionale	Stagionale	Cs-137, Sr-90
Pasta	Trimestrale	Trimestrale	Cs-137
Vegetali	Stagionale	Stagionale	Cs-137, Sr-90
Frutta	Stagionale	Stagionale	Cs-137
Latte	Settimanale/Mensile	Mensile	Cs-137, Sr-90

Andamento del Wet Deposition 1960-2002



La presenza di Cs -137 in aria è dovuta alla lenta ricaduta di quella parte prodotta durante i test nucleari del dopoguerra e durante l'incidente di Chernobyl che ha raggiunto gli strati più alti dell'atmosfera (stratosfera) e alla risospensione della parte depositata sul suolo nel corso degli anni.

Andamento del particolato atmosferico 1986-2002

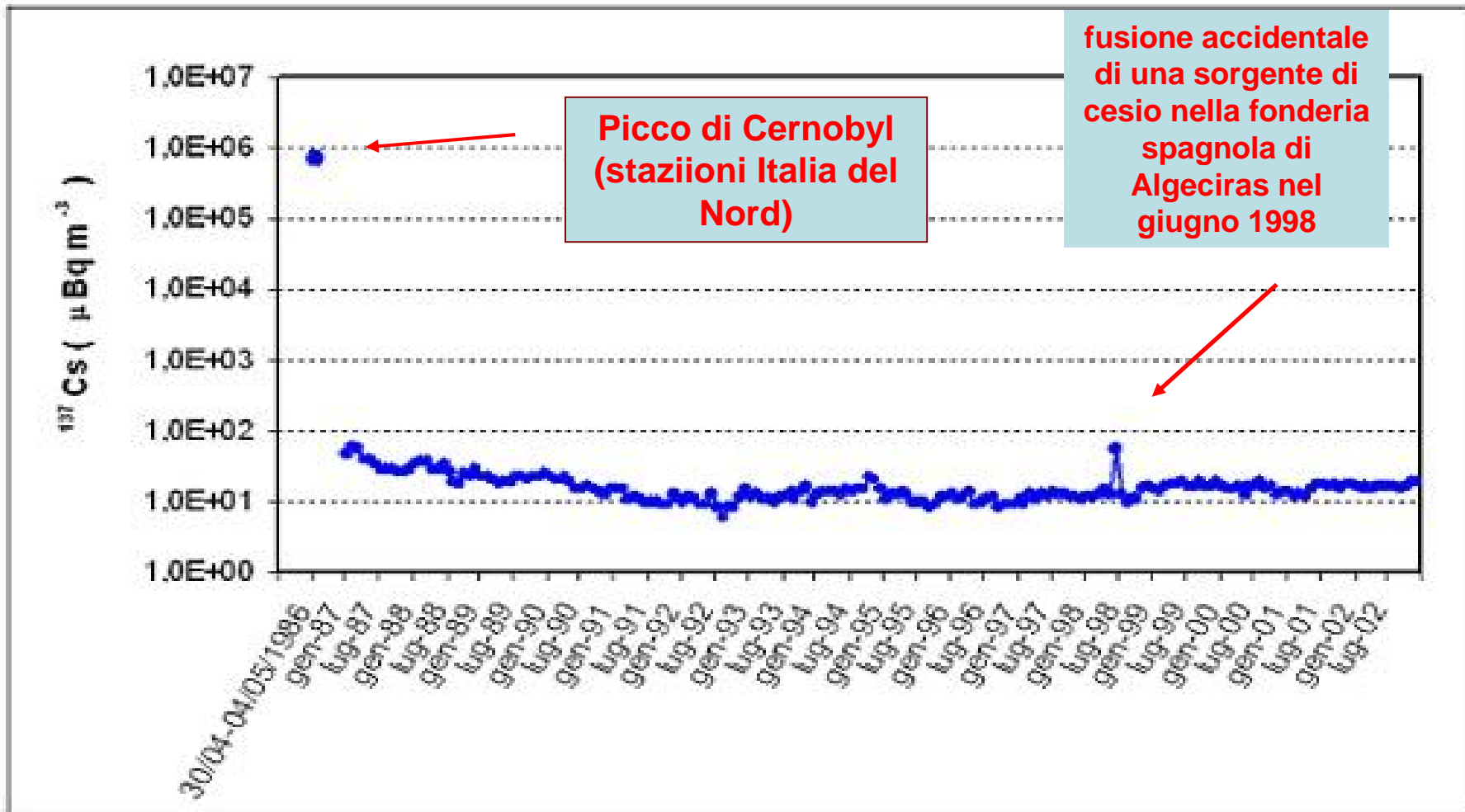


TABELLA A

TIPOLOGIA DEGLI ALIMENTI E QUANTITA' DI ESAMI DA EFFETTUARSI A CURA DELL'A.R.T.A. DI PESCARA E DELL'I.Z.S. DI TERAMO

ALIMENTI	Agenzia Regionale Tutela Ambientale- Pescara	Istituto Zooprofilattico Sperimentale di Teramo
	Numero esami	Numero esami
Latte vaccino	12	-
Latte in polvere	1	-
Carne bovina	8	8
Carne suina	2	4
Pollame	2	2
Lattuga	1	3
Patate	-	1
Fruita fresca	4	12
Grano duro	2	2
Grano tenero	2	2
Farina grano tenero	8	4
Pasta alimentare	4+4	4+4
Omogeneizzati	1	-
Pastina neonati	-	1
Particolato atmosferico	365	-
Deposizione al suolo	12	-
Molluschi	-	4
Funghi	4	8
TOTALE	432	59



Immagini del CRR di Pescara

Posizionamento dei filtri per la misura di radioattività in aria



Ricarica dell'azoto liquido



Vasche di decantazione del particolato per la misura di radioattività nel fallout



Il pozzetto per il posizionamento dei campioni



Stima della dose per inalazione

(dati reperiti in rete)

Calcolo Dose per inalazione anno 2005

Ipotesi per quanto riguarda
il volume di aria inalato in un anno
- ICRP 66,1994 -

Volume medi inalati (m ³ /anno)			
Età	<1anno	7-12anni	>17anni
Volume	1044	5585	8103

Particolato atmosferico

Radioisotopo	Attività unitaria (1)	quantità inalata	attività inalata	coeff. di conv. h(g) Sv/Bq (3)	Dose ingerita μSv/anno
	misurata (Bq/m ³)	in un anno (m ³)	Bq/anno		
Cs-137	0,00041	8103	3,3222	3,9x10 ⁽⁻⁸⁾	0,129
Cs-134	0,00061	8103	4,9428	2,0x10 ⁽⁻⁸⁾	0,010
I-131	0,00036	8103	2,9171	1,6x10 ⁽⁻⁹⁾	0,005

Totale radioattività artificiale accumulata
in un anno nel corpo per inalazione

0,144 μSv

(1) Avendo più misure di particolato si è calcolata la media

(2) Per motivi protezionistici si è utilizzato il valore più sfavorevole di h pari a 3,9x10⁽⁻⁸⁾ per il Cs-137
2,0x10⁽⁻⁸⁾ per il Cs-134 e 1,6 x 10⁽⁻⁹⁾ per lo I-131
(pag. 105 della G.U. n.104/L - D.L.241/2000)

Stima della dose per ingestione (dati reperiti in rete)

Ricordando che la dose massima per la popolazione è indicata dalla legge in 1 mSv, dai **risultati qui ottenuti si evince che possiamo liberamente respirare e mangiare senza preoccuparci della dose di radioattività che assorbiamo.**

**Calcolo dose annuale per la dieta
anno 2005**

Alimento	radioisotop	Attività unitaria ⁽¹⁾ misurata(Bq/Kg	Quantità ingerita ⁽²⁾ Kg (o L) per anno	Attività (ingerita) Bq
Pane	Cs-137	0,186	65,88	12,25
	Cs-134	0,189	65,88	12,45
	I-131	0,265	65,88	17,46
Pasta	Cs-137	0,168	34,80	5,85
	Cs-134	0,164	34,80	5,71
	I-131	0,306	34,80	10,65
Carne bovina	Cs-137	0,223	17,04	3,80
	Cs-134	0,176	17,04	3,00
	I-131	0,232	17,04	3,95
Carne suina e altre	Cs-137	0,233	9,48	2,21
	Cs-134	0,224	9,48	2,12
	I-131	0,440	9,48	4,17
Carne di pollo	Cs-137	0,236	12,48	2,95
	Cs-134	0,212	12,48	2,65
	I-131	0,217	12,48	2,71
Pesce	Cs-137	4,070	15,12	61,54
	Cs-134	0,173	15,12	2,62
	I-131	0,259	15,12	3,92
Latte (L)	Cs-137	0,171	76,80	13,13
	Cs-134	0,155	76,80	11,90
	I-131	0,189	76,80	14,52
Formaggi	Cs-137	0,165	14,64	2,42
	Cs-134	0,136	14,64	1,99
	I-131	0,205	14,64	3,00
Frutta fresca	Cs-137	0,181	92,40	16,72
	Cs-134	0,188	92,40	17,37
	I-131	0,361	92,40	33,36
Vino (L)	Cs-137	0,129	32,40	4,18
	Cs-134	0,105	32,40	3,40
	I-131	0,165	32,40	5,35

	Attività ingerita Bq/anno	coeff. di conv. h(g) Sv/Bq (3)	Dose ingerita μSv/anno
Totale Cs-137	125,05	1,3 * 10 ⁻⁸	1,63
Totale Cs-134	63,21	1,9 * 10 ⁻⁸	1,20
Totale I-131	99,09	2,2 * 10 ⁻⁸	2,18
Totale Co-60	59,54	3,4 * 10 ⁻⁹	0,20

Totale radioattività artificiale accumulata in un anno nel corpo, proveniente dalla dieta	5,21 μSv
--	-----------------

(1) Nel caso di alimenti con più misure si è calcolata la media
(2) Dati ISTAT 1996
(3) Vedi Tab. IV.4 (pag.122) della G.U. N.140/L DL n.241/2000

Il calcolo è stato fatto ipotizzando, in modo estremamente cautelativo, che la radioattività presente nei campioni fosse pari alla MAR, ossia alla minima attività che lo strumento può rivelare.

In effetti quando lo strumento indica come risultato non un valore preciso di Attività ma valori inferiori alla MAR significa che se un dato radioisotopo è presente potrebbe avere al massimo il valore indicato appunto dalla MAR.



p

γ

x

*Grazie per la
cortese attenzione*

β

α

n

