

Sicurezza in ambienti con rischio da radiazione

Ing. Luca de Ruvo

Servizio di Sicurezza Non
Convenzionale

Laboratori Nazionali di Legnaro – INFN

10/11/2022



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali di Legnaro



Indice

1. Cos'è la radiazione ionizzante: cenni alla struttura atomica e nucleare della materia e ai decadimenti
2. Esempi di campi di radiazioni naturali (cosmica, terrestre)
3. Esempi di applicazioni del nucleare: fissione (in breve cos'è un reattore) e fusione, attività svolte presso i nostri lab.
4. Come ci si protegge dalle radiazioni:
 - Introduzione al concetto di rischio
 - La radioprotezione (es. distanza/tempo/schermatura) e la Sicurezza Nucleare (es. difesa in profondità)

Prima parte

Cenni alla struttura atomica e nucleare della materia

Cos'è la radiazione ionizzante: l'atomo

L'atomo è formato da tre tipi di particelle

PROTONI = p^+

NEUTRONI = n

ELETTRONI = e^-

Formano il **NUCLEO**

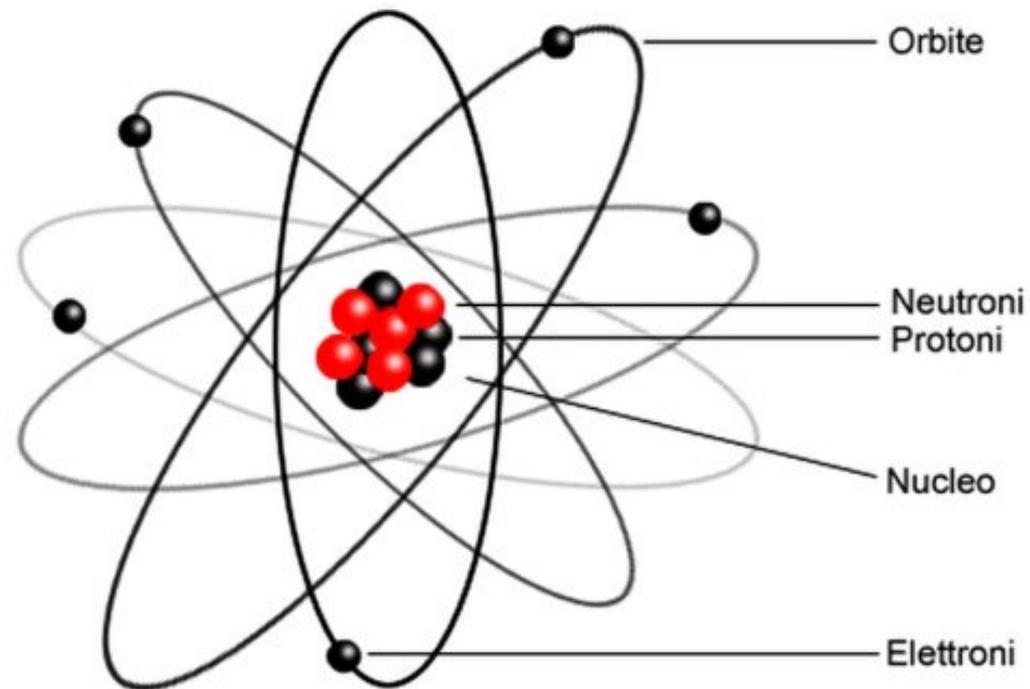
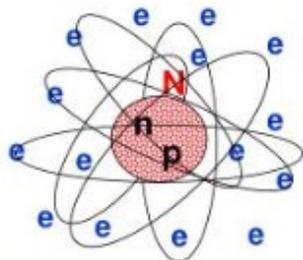
Formano la **NUBE ELETTRONICA**
che gira intorno al nucleo

❖ GLI **ELETTRONI** HANNO **CARICA NEGATIVA**

❖ I **PROTONI** HANNO **CARICA POSITIVA**

❖ I **NEUTRONI** NON HANNO CARICA

In ogni atomo gli **elettroni** sono tanti quanti sono i **protoni**, perciò l'atomo è **ELETTRICAMENTE NEUTRO**.



Cos'è la radiazione ionizzante: il nucleo

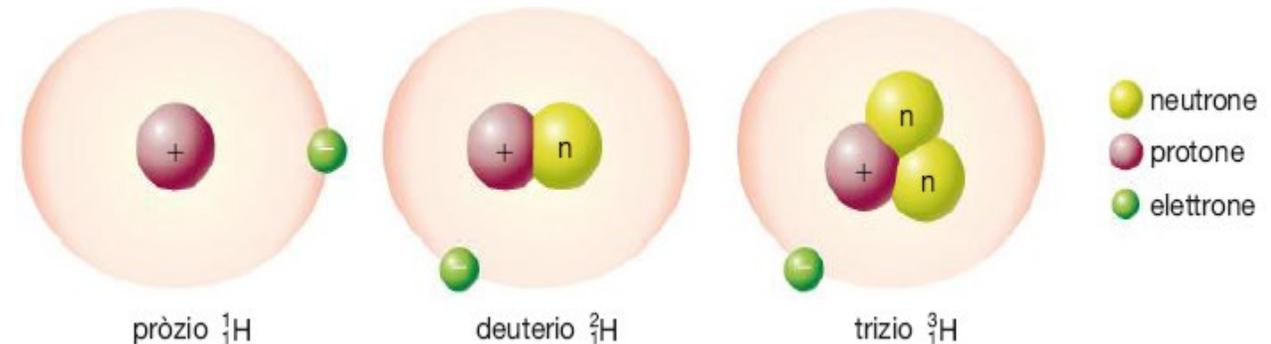
Il numero di protoni presenti nel nucleo di un atomo si chiama **numero atomico (Z)**. Se l'atomo è neutro, questo numero è uguale a quello degli elettroni.

Il **numero di massa (A)** è uguale alla somma del numero di protoni (Z) e del numero di neutroni (n) contenuti nel nucleo.

Il nucleo di un atomo di cui si conoscono Z e A è chiamato **nuclide**.

Gli **isotopi** sono atomi dello stesso elemento aventi le stesse proprietà chimiche ma masse diverse, perché contengono un diverso numero di neutroni.

I tre isotopi dell'idrogeno.



Gli isotopi hanno diverse proprietà fisiche.

Cos'è la radiazione ionizzante: il nucleo

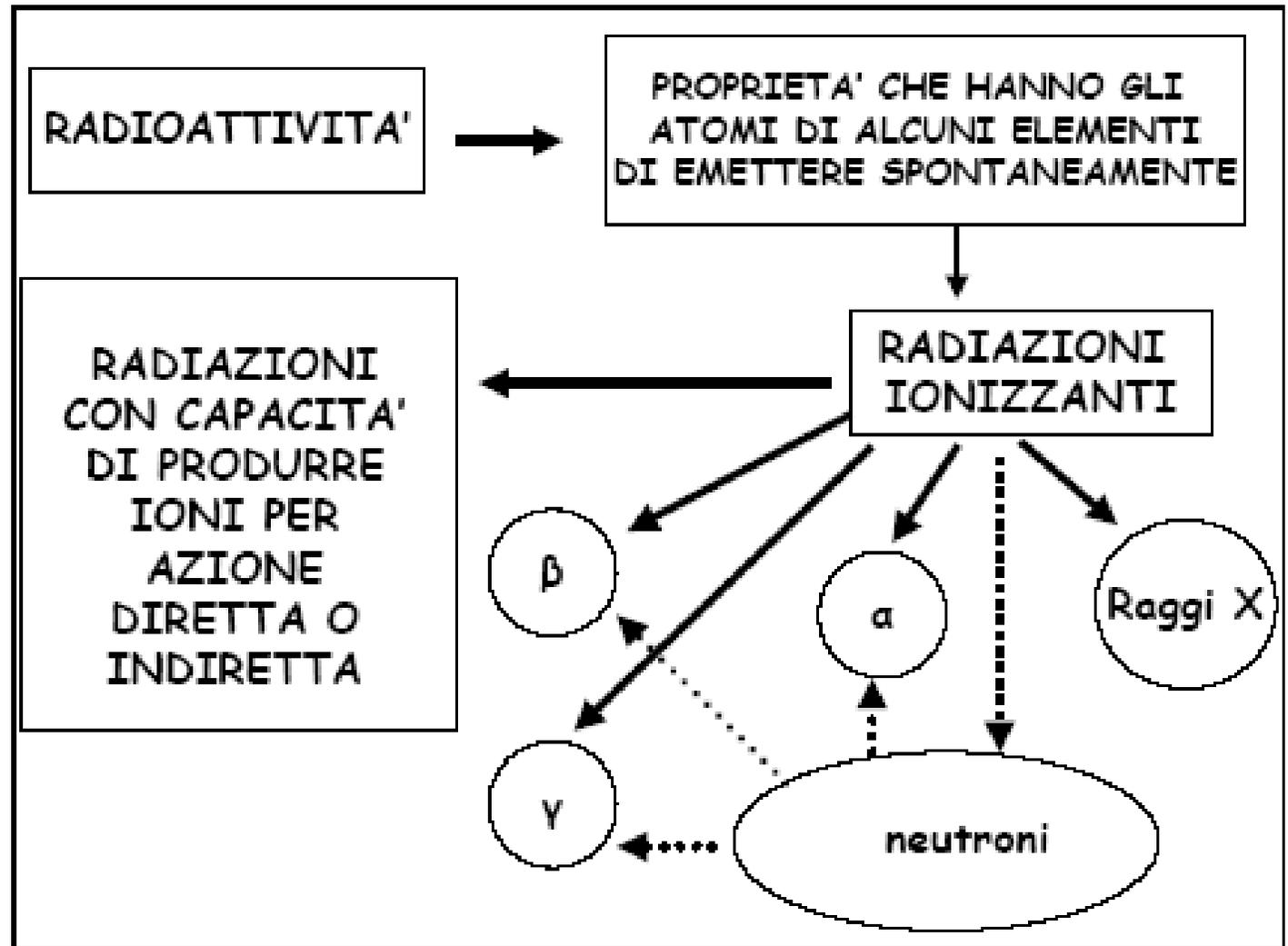
Tra i nucleoni, agisce una forza attrattiva molto grande, chiamata **forza nucleare forte**, che prevale nettamente sulle forze elettriche repulsive e consente al nucleo di non disintegrarsi. Alcuni isotopi, invece, sono instabili ed emettono spontaneamente una particella trasformandosi nel nucleo di un altro elemento.

Il **decadimento radioattivo** è un processo che trasforma il nucleo di un elemento nel nucleo di un elemento diverso.

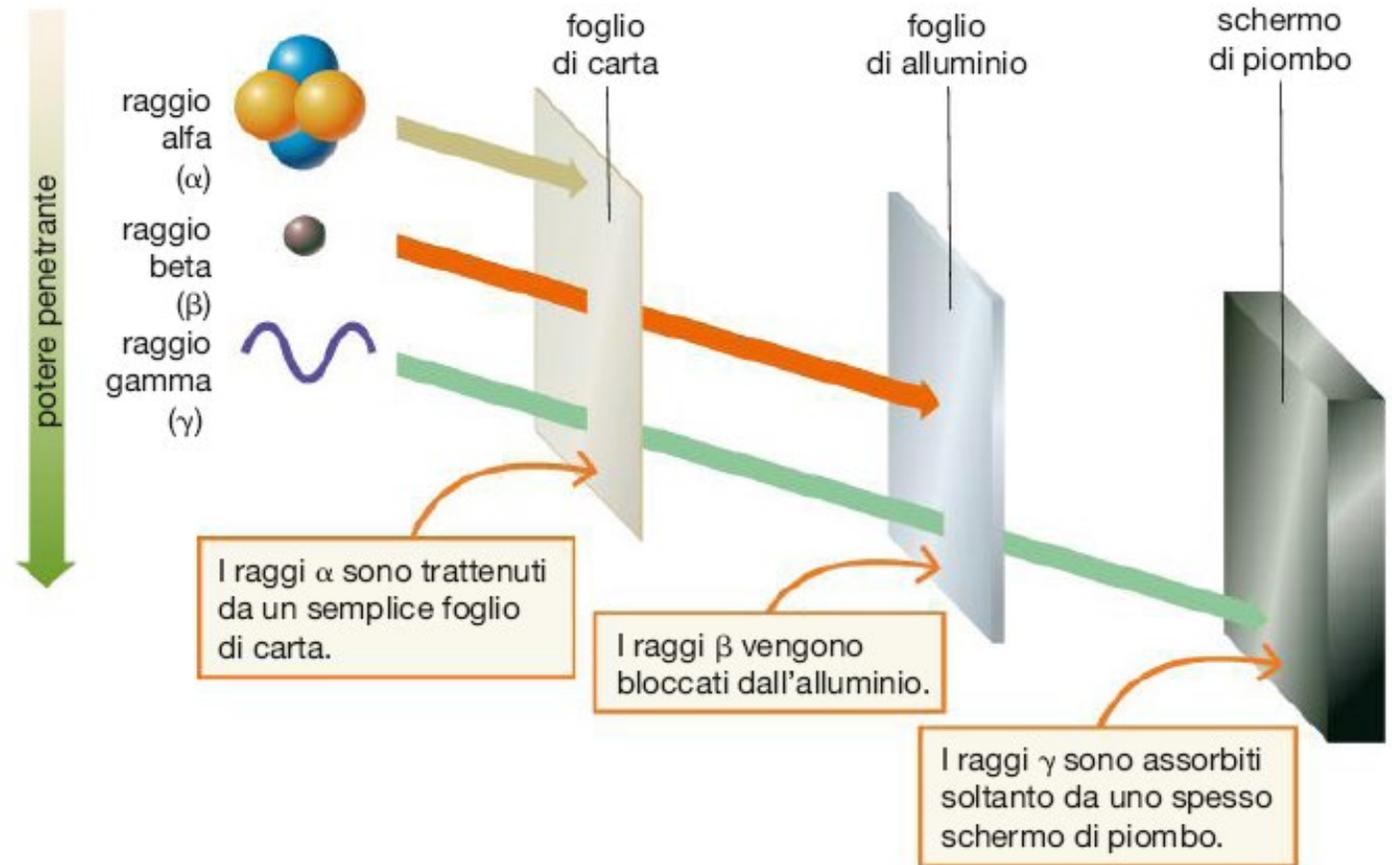
Il processo di emissione di radiazione viene scoperto nel 1896 da Antoine Henri Becquerel e denominato **radioattività**. Alcuni anni dopo gli studi di Becquerel e dei coniugi Curie, Rutherford dimostra che le radiazioni emesse dal nucleo di un elemento radioattivo sono di tre tipi differenti:

- **raggi alfa (α)**, costituiti da nuclei di elio (carica 2+, massa 4);
- **raggi beta (β)**, fasci di elettroni veloci, non hanno massa rilevante e portano una carica elettrica negativa;
- **raggi gamma (γ)**, radiazioni elettromagnetiche, come la luce e i raggi X, ma di frequenza ed energia ancora maggiori.

Radiazioni ionizzanti



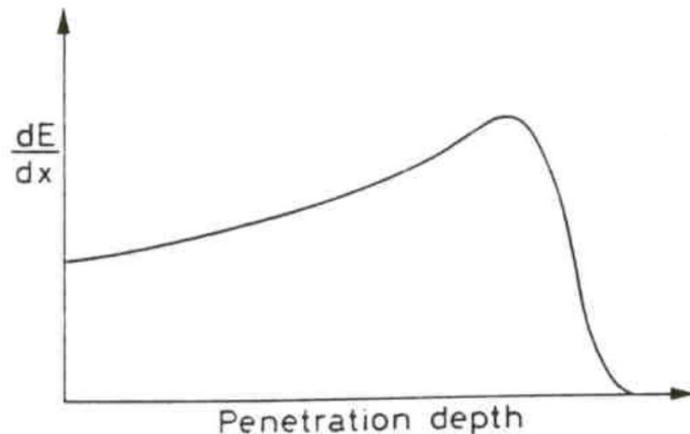
Cos'è la radiazione ionizzante: i decadimenti



L'interazione con la materia

- **Radiazione direttamente ionizzante**

Una particella rilascia tanta più energia nella materia, quanto più rallenta e si avvicina a fine corsa. Questa caratteristica è usata in radioterapia con adroni (fanno eccezione gli e-), per rilasciare una grande dose di radiazione in un tessuto maligno e non danneggiare i tessuti sani circostanti.



- **Radiazione indirettamente ionizzante**

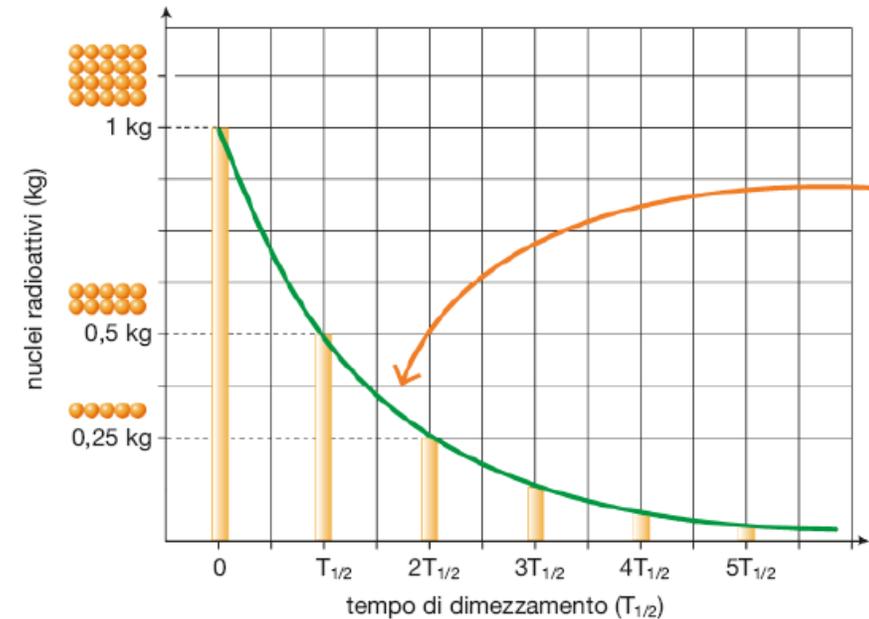
Al contrario delle particelle cariche, **neutroni e fotoni** non avendo carica non subiscono le numerose collisioni con gli elettroni atomici e quindi non sono continuamente rallentati. Essi possono essere assorbiti completamente in un'unica collisione (il neutrone da un nucleo, il fotone da un elettrone atomico o da un nucleo).

Al contrario delle particelle cariche, non esistono distanze che fotoni o neutroni non possano attraversare. L'assorbimento di neutroni e fotoni nella materia, e quindi l'attenuazione di un fascio, ha un **comportamento probabilistico**.

Cos'è la radiazione ionizzante: i decadimenti

Tutti i processi di decadimento evolvono nel tempo secondo uno stesso schema, descritto da una curva con andamento esponenziale decrescente, detta **curva di decadimento**.

Il tempo di dimezzamento (o emivita, $T_{1/2}$) è il tempo occorrente per ridurre alla metà la quantità di un isotopo radioattivo.



Trascorso un intervallo pari al tempo di dimezzamento, il numero dei nuclei ancora radioattivi è uguale alla metà di quelli presenti all'inizio.

Cos'è la radiazione ionizzante: la radioattività

Si definisce Radioattività la proprietà che hanno gli atomi di alcuni elementi di emettere spontaneamente radiazioni

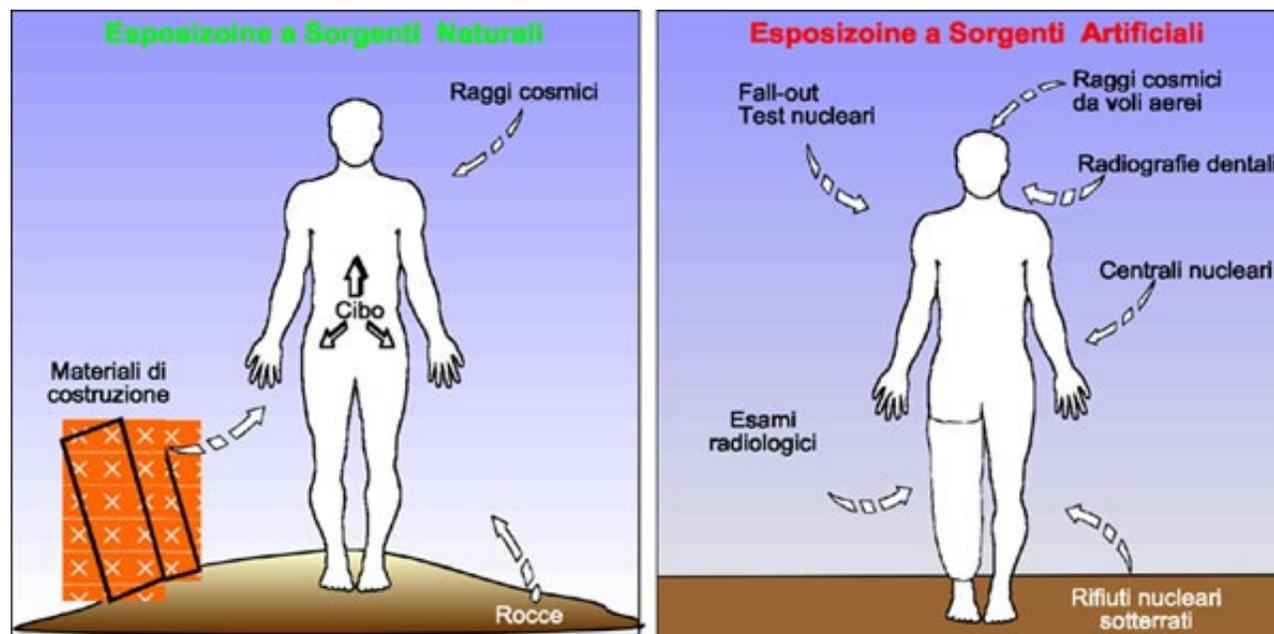
Becquerel = 1 disintegrazione al secondo

Un chilogrammo di granito ha una radioattività naturale di circa 1000 Becquerel	
Un litro di latte ha una radioattività naturale di circa 80 Becquerel	
Un litro di acqua di mare ha una radioattività naturale di circa 10 Becquerel	
Un individuo di 70 kg ha una radioattività dell'ordine di 8000 Becquerel, causata dalla presenza, nel corpo umano, di isotopi radioattivi naturali (in gran parte, potassio-40)	

Seconda parte

Campi di radiazione naturale

La radioattività naturale



Radon - 56%	Medicina nucleare - 4%
Raggi cosmici -8%	Interne - 10%
Terreno -8%	Altro - 1%
Prodotti di consumo - 3%	Radiografie - 10%

de Ruvo

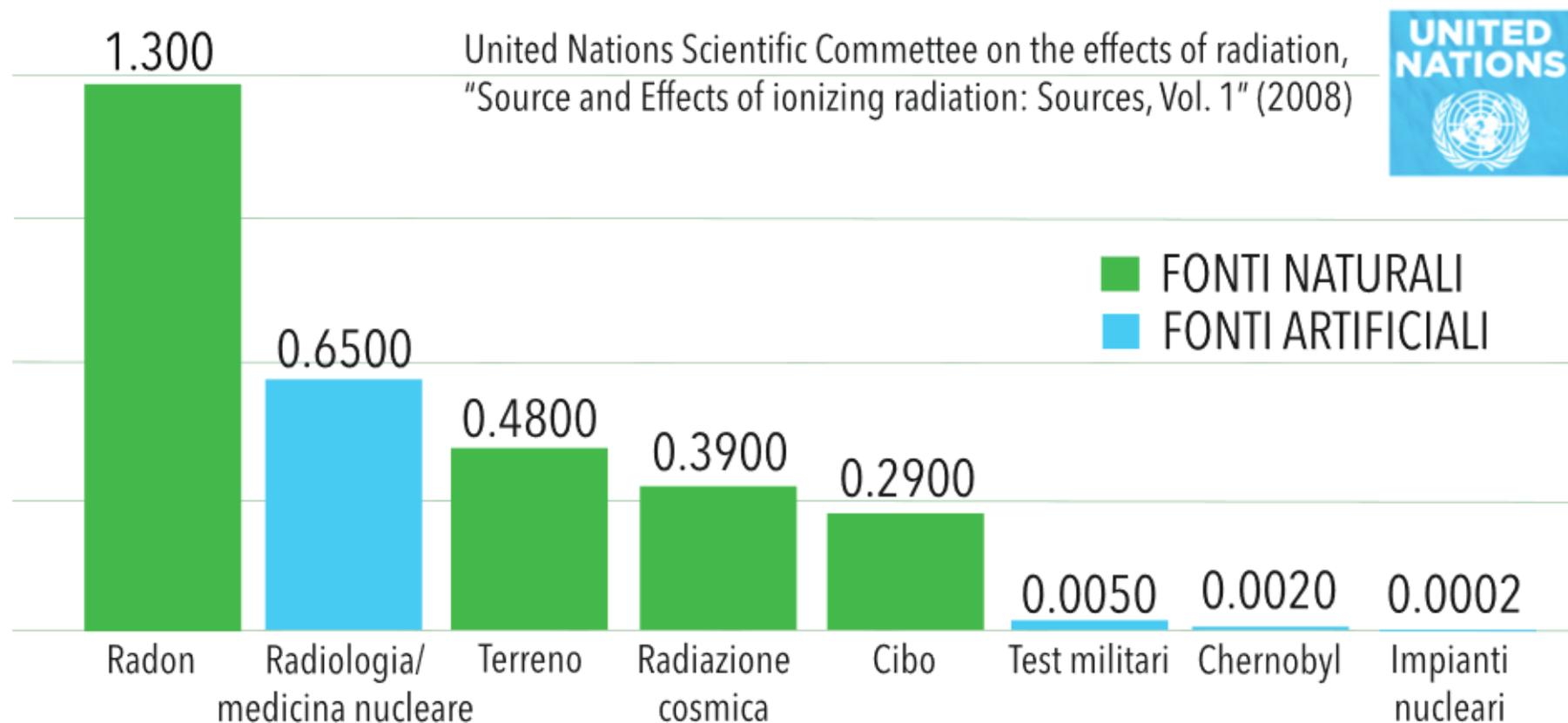
La radioattività naturale

L'entità del danno biologico dipende essenzialmente dalla cosiddetta **dose assorbita**, cioè dalla quantità di **energia depositata per unità di massa**, che viene misurata in **Grey** ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/Kg}$). La **dose equivalente**, che si misura in **Sievert** ($1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/Kg}$ come sopra), è invece ciò che misura il **danno effettivamente provocato all'organismo dalle radiazioni assorbite**, tenendo conto – oltre che dell'energia depositata – anche del tipo di radiazione (alfa, beta, gamma o neutroni). Da ultimo, la dose efficace (sempre misurata in Sievert) considera oltre a tutto ciò di cui sopra anche il tipo di tessuto biologico colpito, altro elemento che concorre all'entità del danno subito.

<https://www.iaea.org/newscenter/multimedia/videos/measuring-radiation>

La radioattività naturale

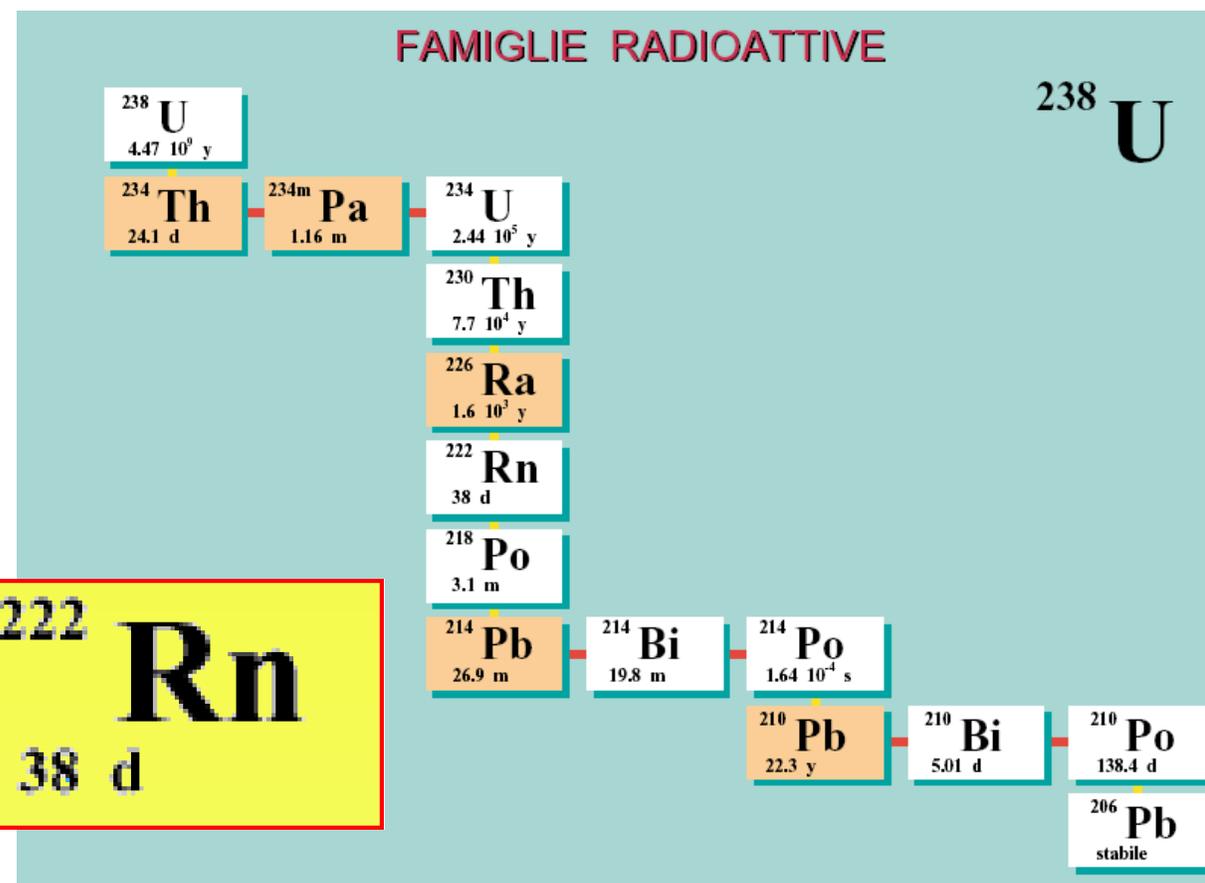
Istogramma delle diverse componenti del fondo di radioattività naturale (in verde), confrontate con i contributi artificiali (in azzurro). I dati numerici sono riportati in milliSievert per anno (mSv/y), e corrispondono ad un valore medio.



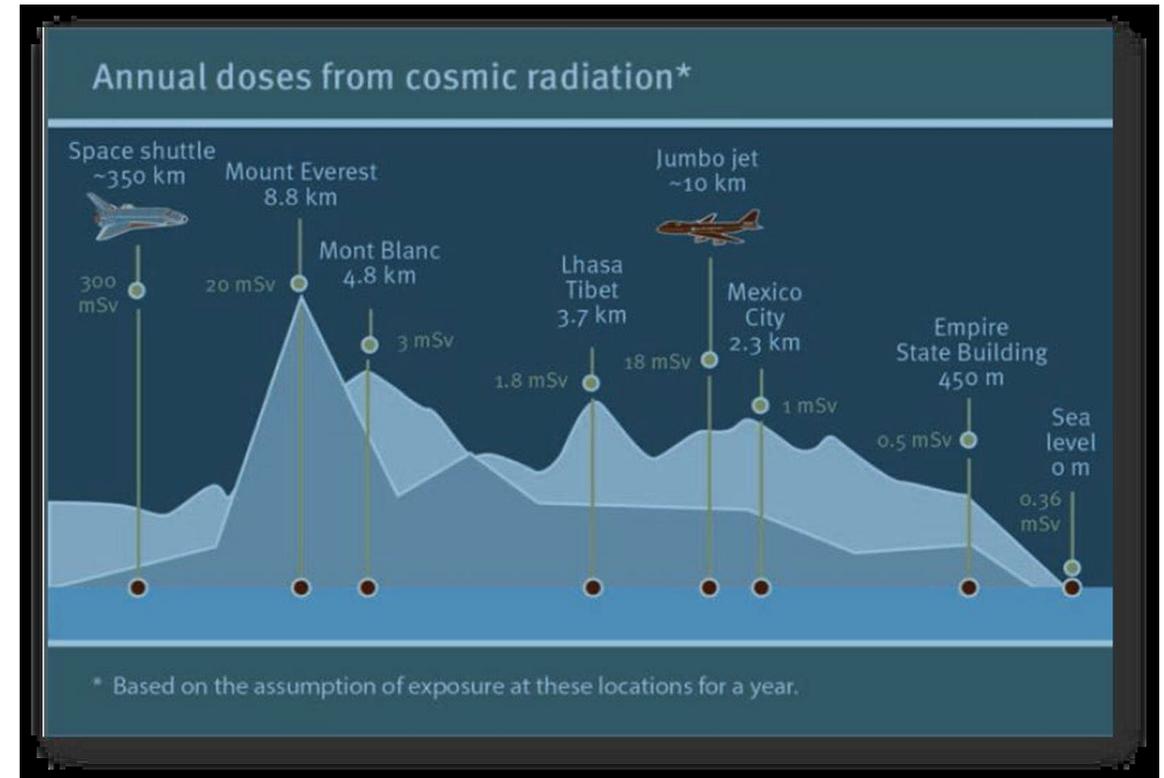
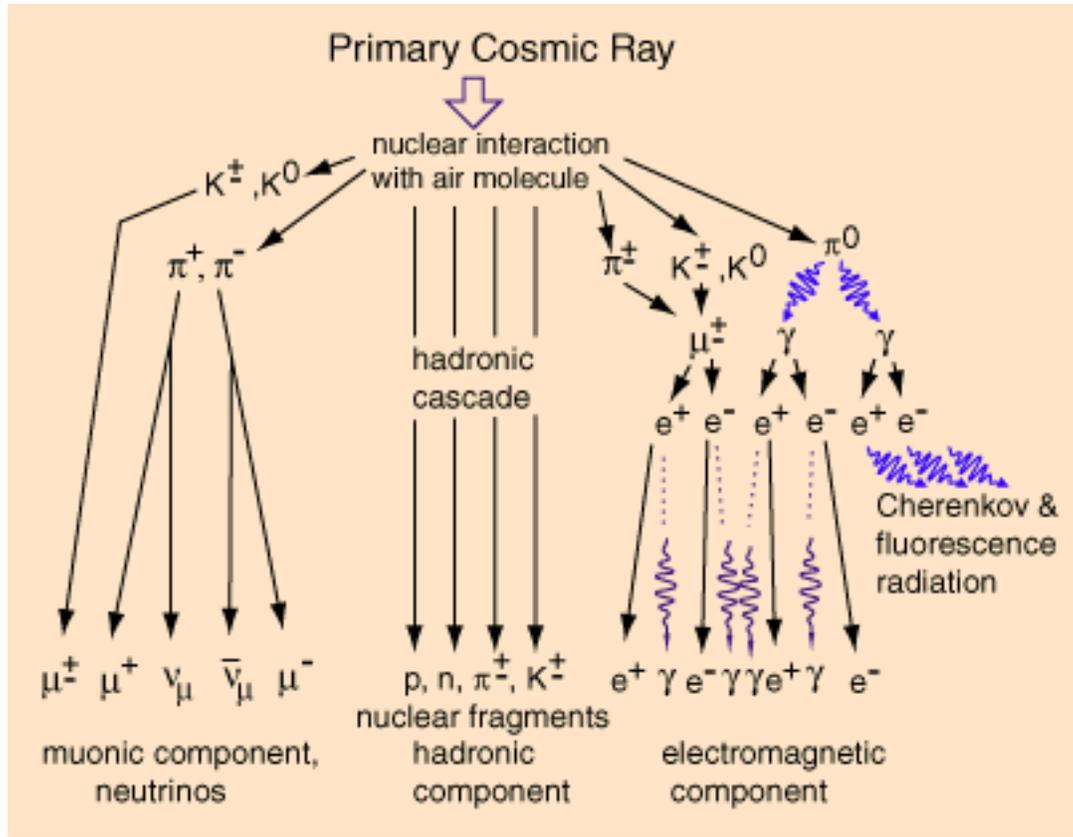
La radioattività naturale



<https://www.iaea.org/newscenter/multimedia/videos/radon-protect-your-health-at-home>



La radioattività naturale



La radioattività naturale



La radioattività naturale

Fenomeno	Banane equivalenti
Un'ora di fondo naturale	3 banane
Un'ora di fondo artificiale	0,5 banane
Un'ora su un aereo ad alta quota	50 banane
Radiografia ad un braccio	10 banane
Radiografia toracica	1000 banane
TAC a basso dosaggio	150000 banane
Mammografia	4000 banane
Un'ora a Ramsar (Iran)	15 banane
Massimo per un lavoratore*	700 banane all'ora
Un'ora per un "eroe di Chernobyl"	centinaia di milioni di banane



Terza parte

- Applicazioni del nucleare:
 - ✓ Fissione
 - ✓ Fusione
 - ✓ Il progetto SPES ai LNL

Energia dal nucleo

L'**energia nucleare** è l'energia che bisognerebbe spendere per separare i nucleoni uno dall'altro. La stessa quantità di energia è ceduta nel processo di aggregazione dei nucleoni che costituiscono il nucleo.

L'entità dell'energia nucleare di un nucleo corrisponde al **difetto di massa**, che è la differenza tra la somma delle masse dei nucleoni che si devono aggregare per formare un nucleo e la massa nucleare effettiva.

La relazione che consente di calcolare l'energia nucleare a partire dal valore del difetto di massa di un nucleo deriva dalla **teoria della relatività** di Albert Einstein, che stabilisce un'**equivalenza tra massa ed energia**:

$$E = m \cdot c^2$$

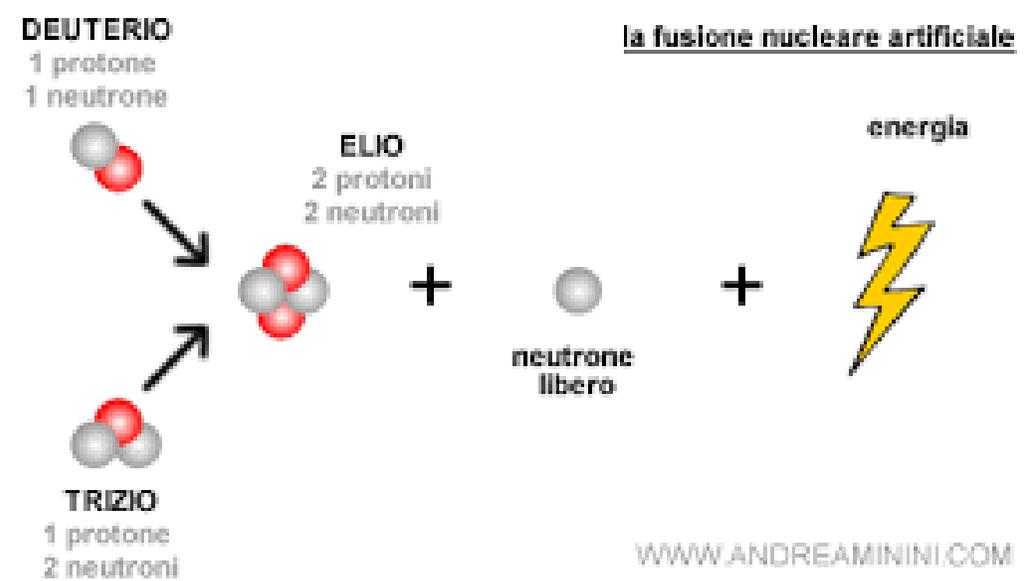
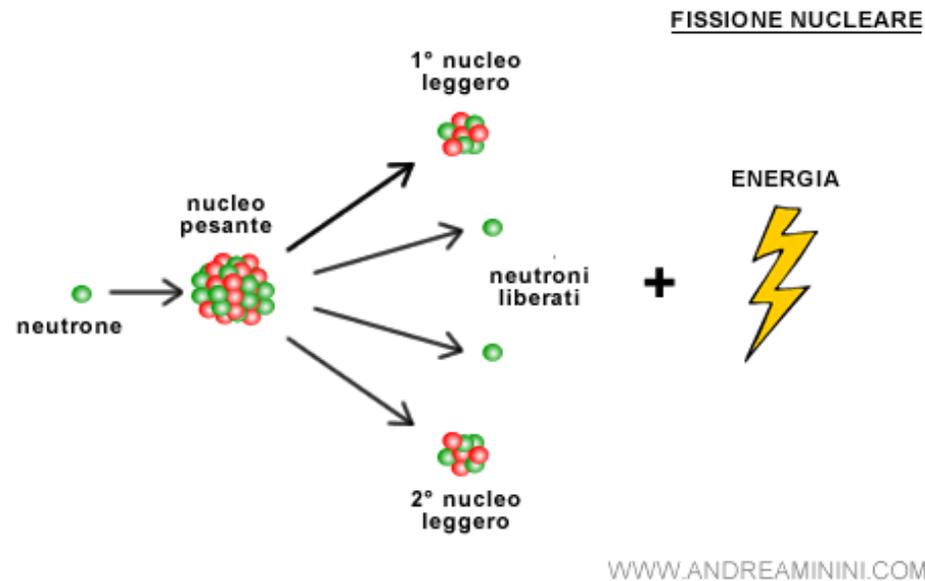
Energia dal nucleo

- Fissione: è quando si divide il nucleo di un atomo

- <https://www.youtube.com/watch?v=KOMfaGCrISY>

- Fusione: è quando si fondono insieme due nuclei di un atomo

- <https://www.raiply.it/video/2018/07/Come-funziona-la-fusione-nucleare-04072018-1c6c495a-a16c-41cd-8507-3c3efb50fb92.html>



Energia dal nucleo: perché conviene?

Chimica: trasformazioni di legami molecolari

COMBUSTIBILI FOSSILI:

1 Kg di legna	1 KWh
1 Kg di carbone	3 KWh
1 Kg di petrolio	9 KWh

Nucleare: trasformazioni di legami nucleari

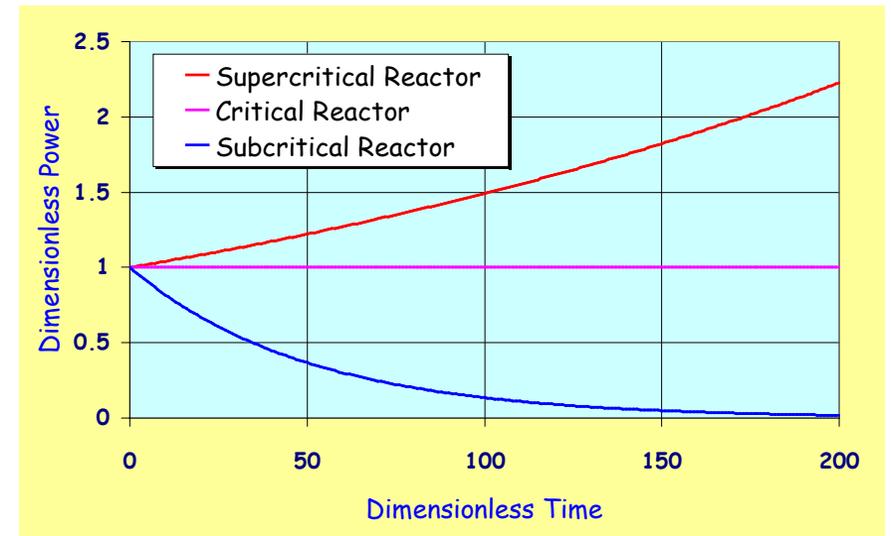
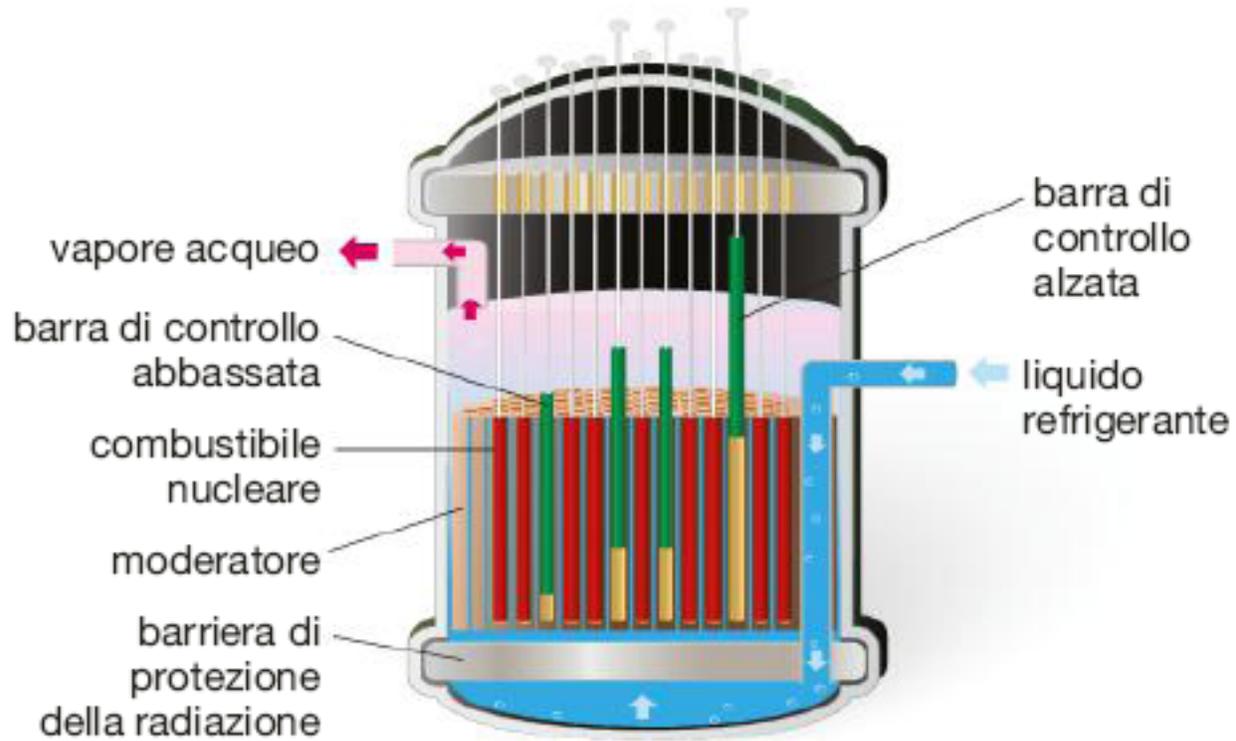
FISSIONE NUCLEARE:

1 Kg di uranio 5 milioni KWh

FUSIONE NUCLEARE:

1 Kg di deuterio 40 milioni KWh

Energia dal nucleo: reattore a fissione



REATTORE:

- combustibile (verde) scalda l'acqua pressurizzata
- control rods (grigie) assorbono i neutroni e controllano/spengono le reazioni di fissione

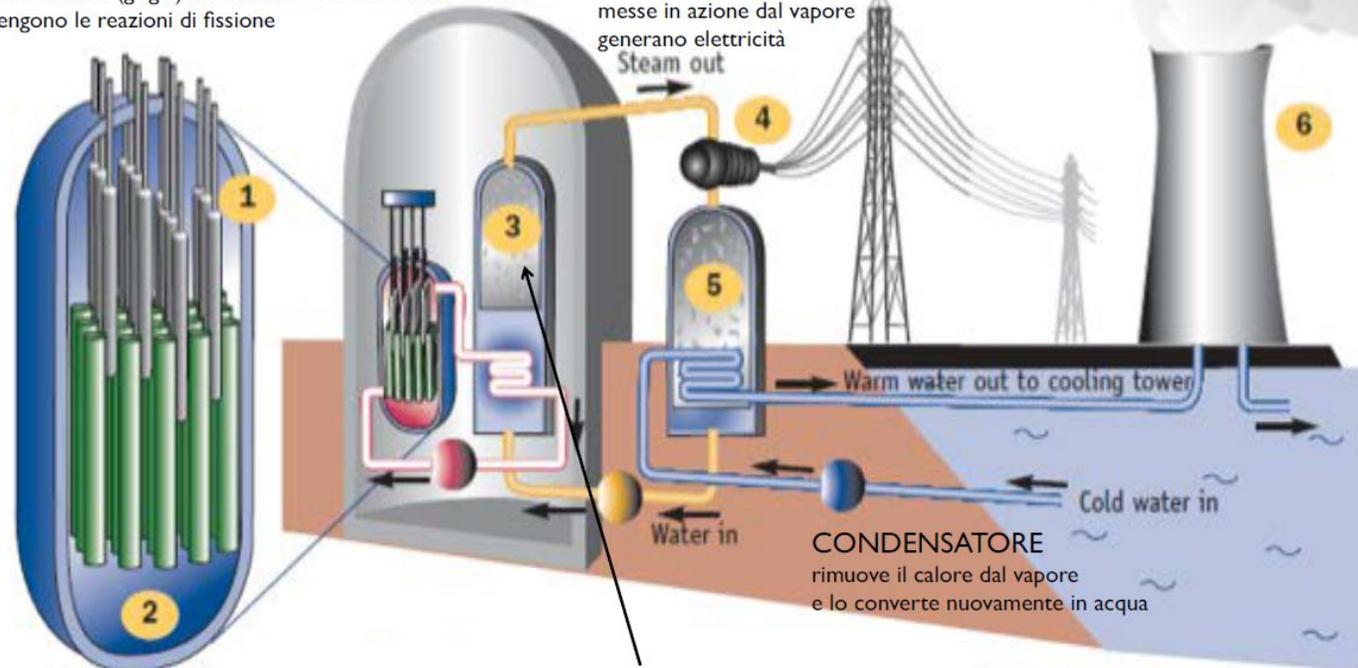
TORRE DI RAFFREDDAMENTO

rimuove il calore dall'acqua di raffreddamento fino a temperatura ambiente

TURBINE

messe in azione dal vapore generano elettricità

Steam out



ACQUA

funge da liquido di raffreddamento e da moderatore

SCAMBIATORE DI CALORE

genera vapore dall'acqua calda pressurizzata proveniente dal reattore attraverso un sistema di aspirazione

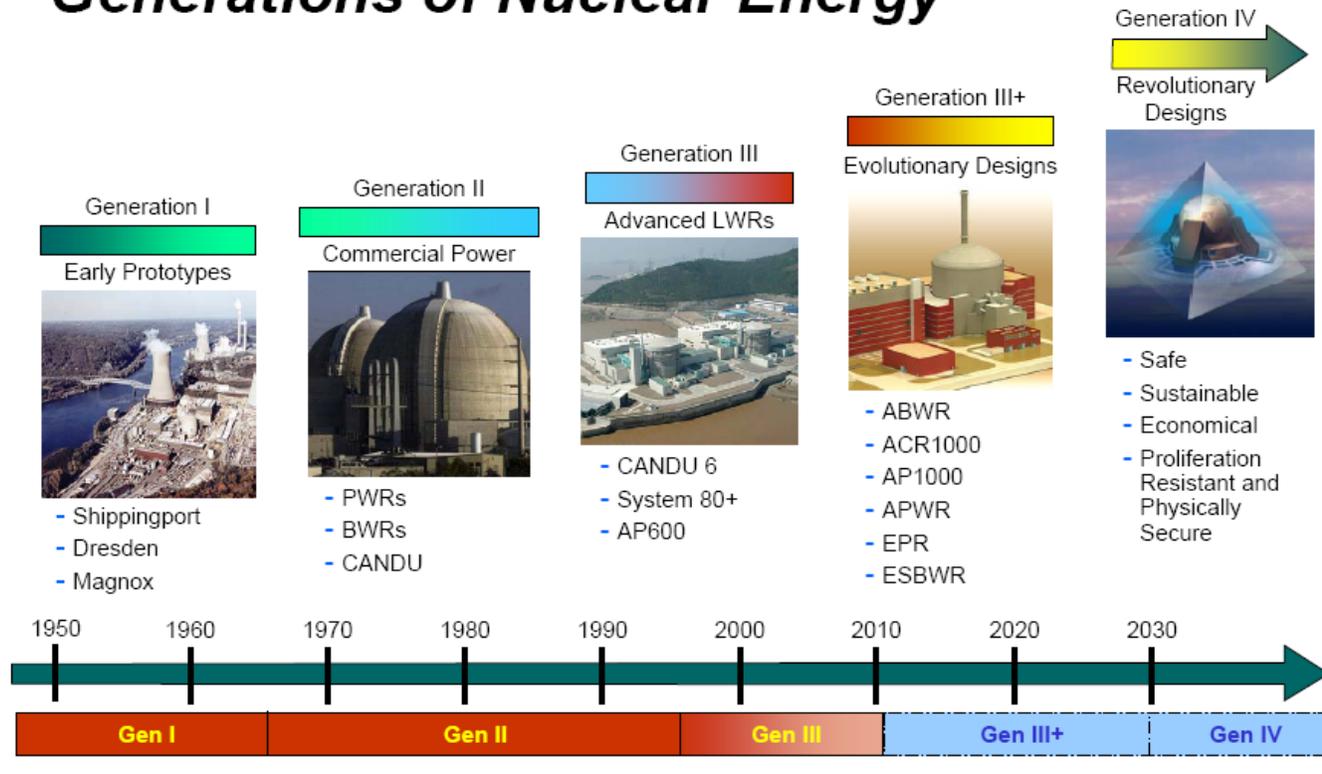
CONDENSATORE

rimuove il calore dal vapore e lo converte nuovamente in acqua

Energia dal
nucleo:
reattore a
fissione

<https://www.youtube.com/watch?v=D5xishTeuA>

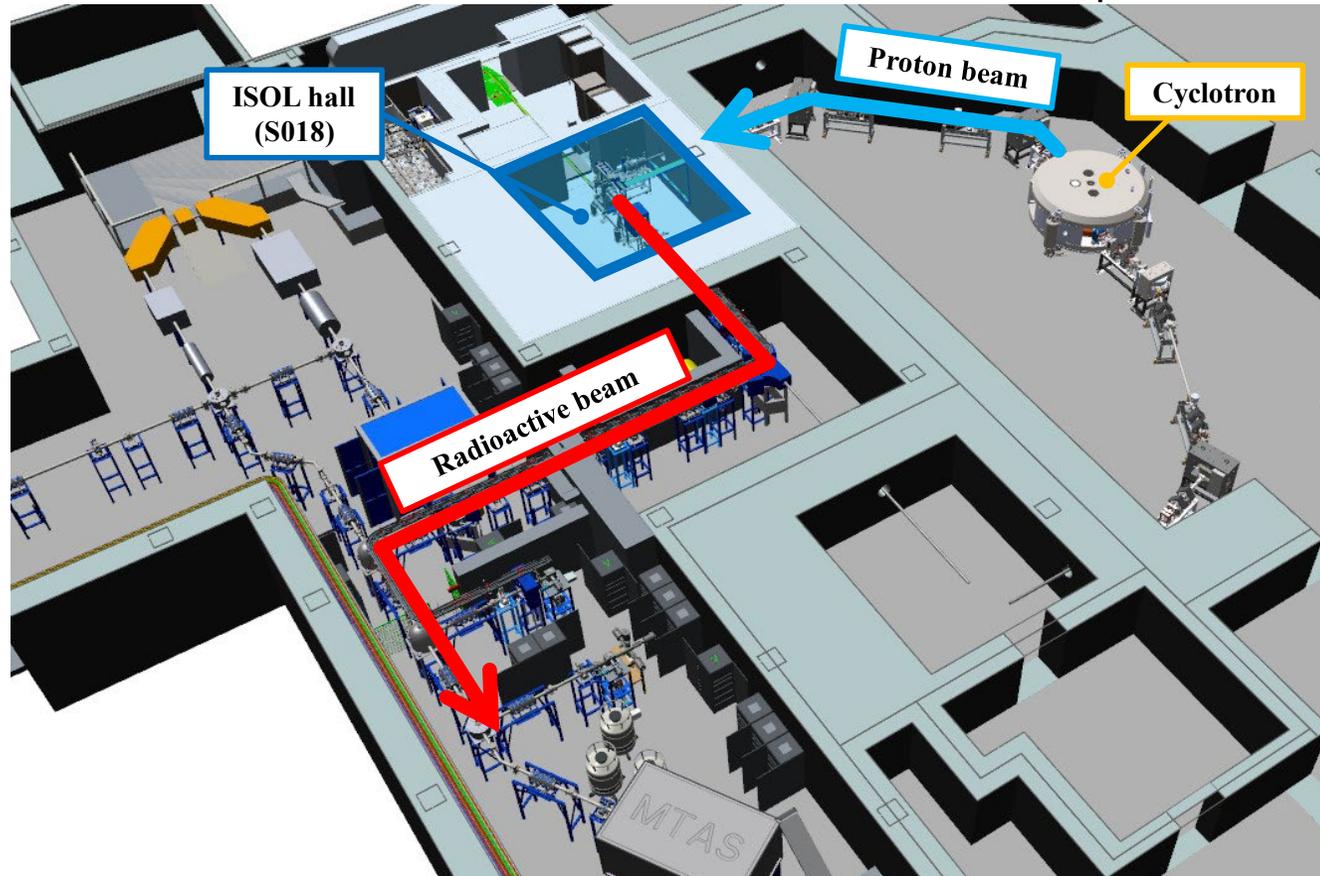
Generations of Nuclear Energy



La filiera della
fissione

Fisica nucleare ai LNL: SPES

Selective Production of Exotic Species





Fisica nucleare ai LNL: SPES

- **Ciclotrone**
 - Fascio protonico di energia fino a 70 MeV
 - Corrente 750 μ A
 - Potenza del fascio 52 kW

Fisica nucleare ai LNL: SPES

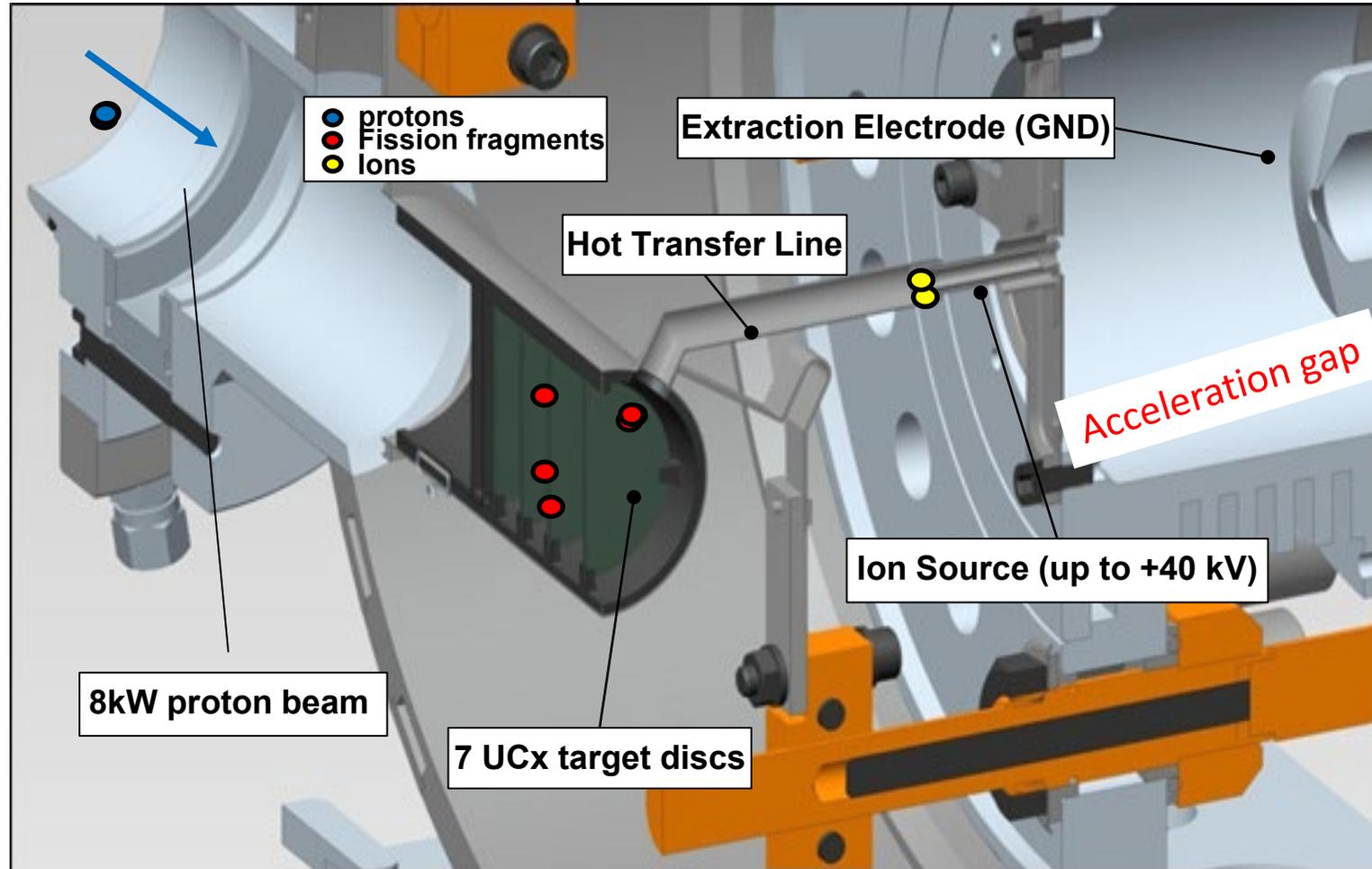
Front-end:

- Canale protonico
- Target Ion Source
- Canale radioattivo



Fisica nucleare ai LNL: SPES

Ion Separation On Line



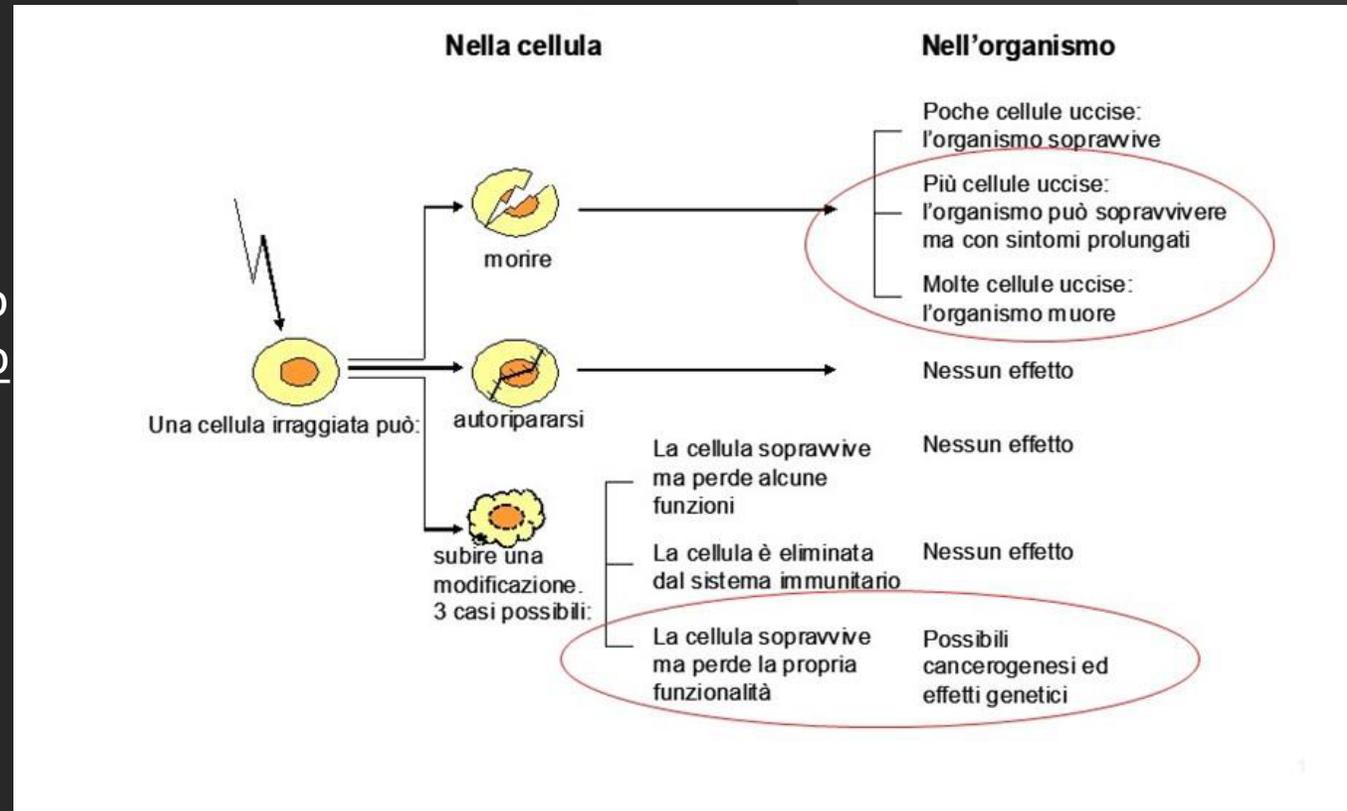
10/11/2022

Quarta parte

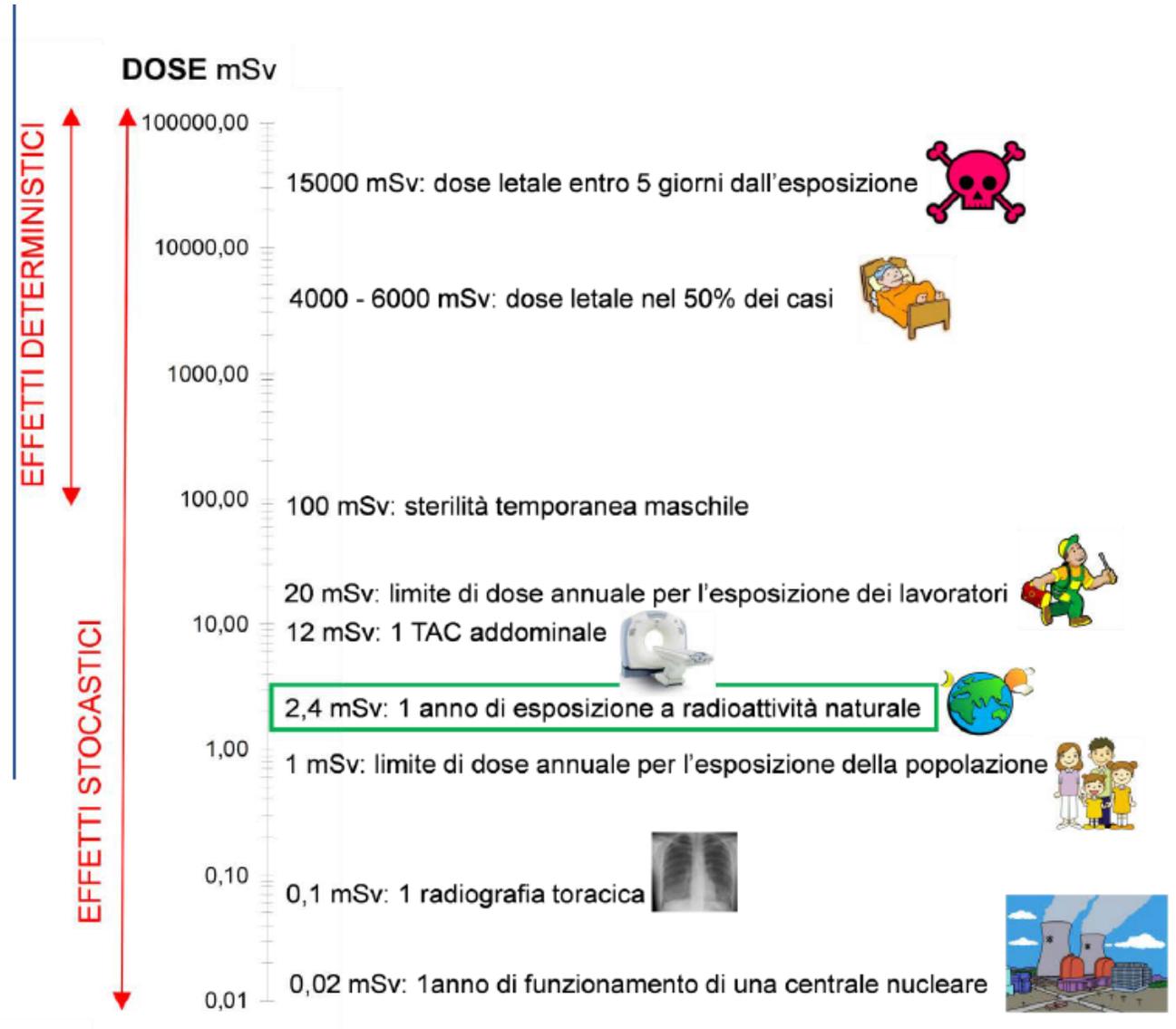
- La protezione dalle radiazioni:
 - ✓ Il concetto di rischio
 - ✓ La Radioprotezione
 - ✓ La Sicurezza Nucleare

La radiazione e la salute

Le radiazioni interagiscono con la materia cedendo energia agli atomi e alle molecole di cui è composta. Quando colpiscono un organismo vivente, le radiazioni sono in grado di spezzare i legami delle molecole di cui sono composte le cellule, che a loro volta formano organi e tessuti: in questo modo possono causarne la morte in breve tempo (ad esempio per necrosi cellulare, come nel caso delle ustioni da raggi) oppure danni a lungo termine, come l'insorgenza di tumori o malformazioni genetiche sui figli. L'entità del danno è proporzionale alla quantità di radiazione assorbita.



Effetti VS Dose



Il pericolo

il pericolo è:

- un concetto deterministico; è una situazione, oggetto, sostanza, etc. che per le sue proprietà o caratteristiche ha la capacità di causare un danno alle persone.
- una proprietà intrinseca (della situazione, oggetto, sostanza etc) non legata a fattori esterni.



Il rischio

Il rischio è:

- un concetto **probabilistico**
- utilizzato nell'ingegneria per la quantificazione della sicurezza di una attività umana, di una installazione industriale, ecc
- In campo tecnologico, supposte note la frequenza di un determinato evento dannoso e le conseguenze di questo evento, si definisce come il prodotto della frequenza (assunta come probabilità di avere quelle determinate conseguenze) per queste conseguenze:

$$R = P \times C$$



Rischio
oggettivo e
percepito

Confronto tra eventi che portano ad una probabilità di morte di 1 su milione:

**CONFRONTO FRA VARI TIPI DI RISCHIO
pari probabilità di morte**

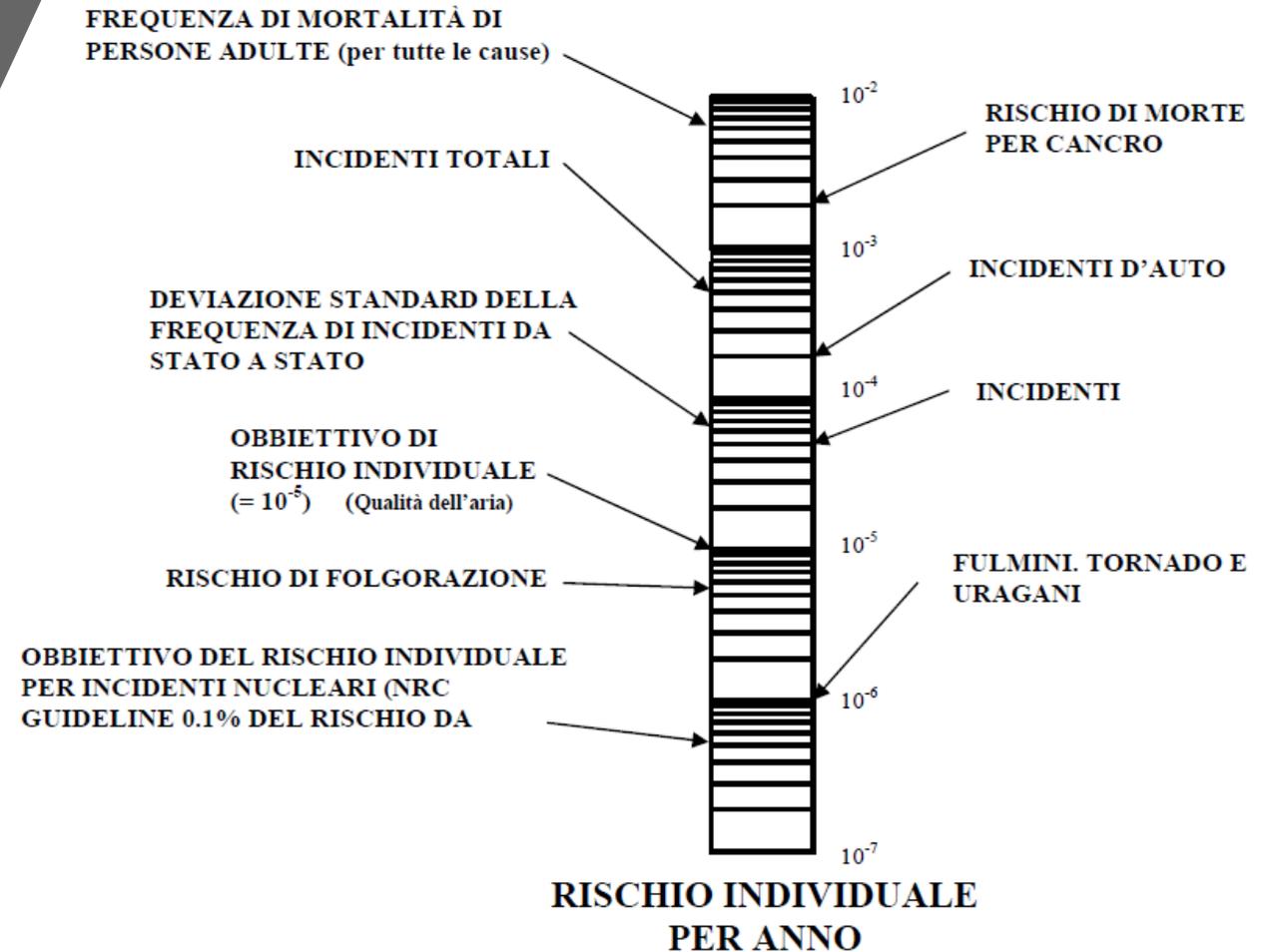
The infographic is divided into two main sections. The top section lists four risks: flying 1000 km, driving 90 km, living in a volcanic building, and working in an industry or mine. The bottom section lists three risks: smoking, climbing a mountain, and radiation exposure. Each risk is accompanied by a small illustration.

- Viaggiare 1000 km in aereo 
- Viaggiare per 90 km in automobile 
- Vivere 2 mesi in un edificio di tufo 
- Lavorare 10 giorni in un'industria
Lavorare 3 ore in una miniera 

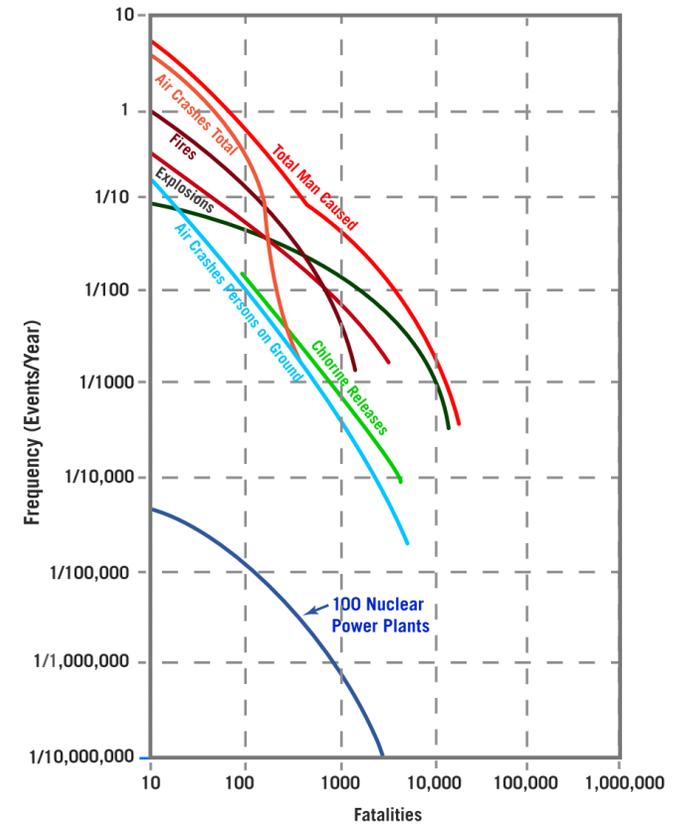
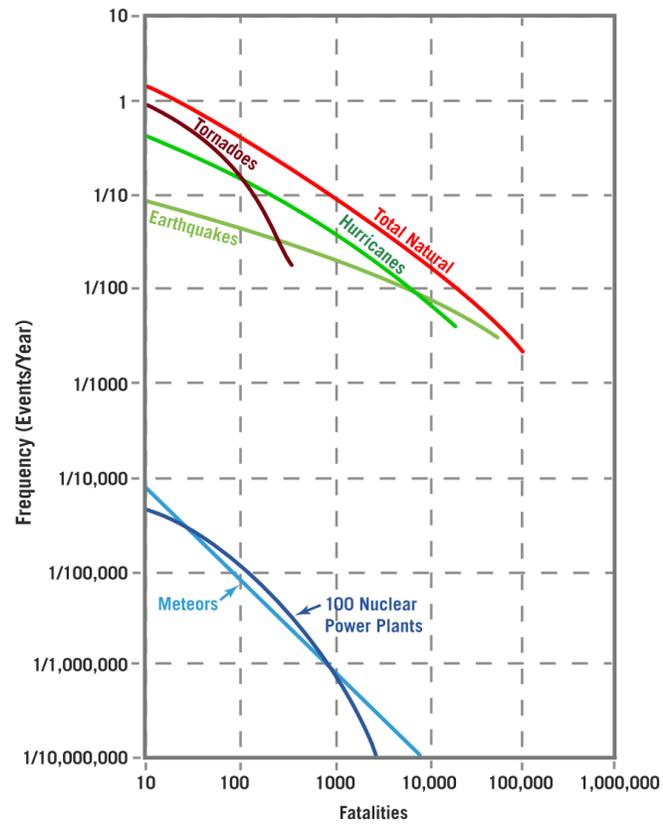
- Fumare da 1 a 3 sigarette al giorno 
- Scalare una montagna per 15 minuti 
- Vivere 20 minuti a 60 anni 

Assorbire una dose di 0.10 mSv

Rischio oggettivo e percepito



Il rapporto Rasmussen



Comparisons of natural and human-made hazards as depicted in WASH-1400's executive summary.
 (Graphs adapted from *The Reactor Safety Study*, NUREG-75/014)

I 6 passi per la sicurezza

Identificazione del pericolo

Valutazione del rischio

Definizione delle misure di salvaguardia

Identificazione dei requisiti di sicurezza

Progettazione

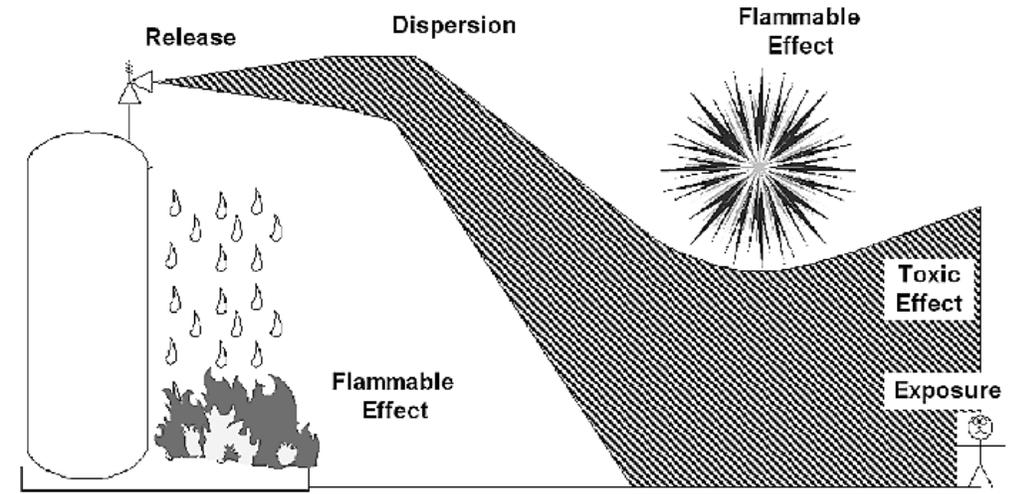
Implementazione sul campo

Analisi di sicurezza

Sistema di sicurezza

Analisi di sicurezza

- Identificazione del pericolo
- Valutazione del rischio
- Definizione delle misure di salvaguardia

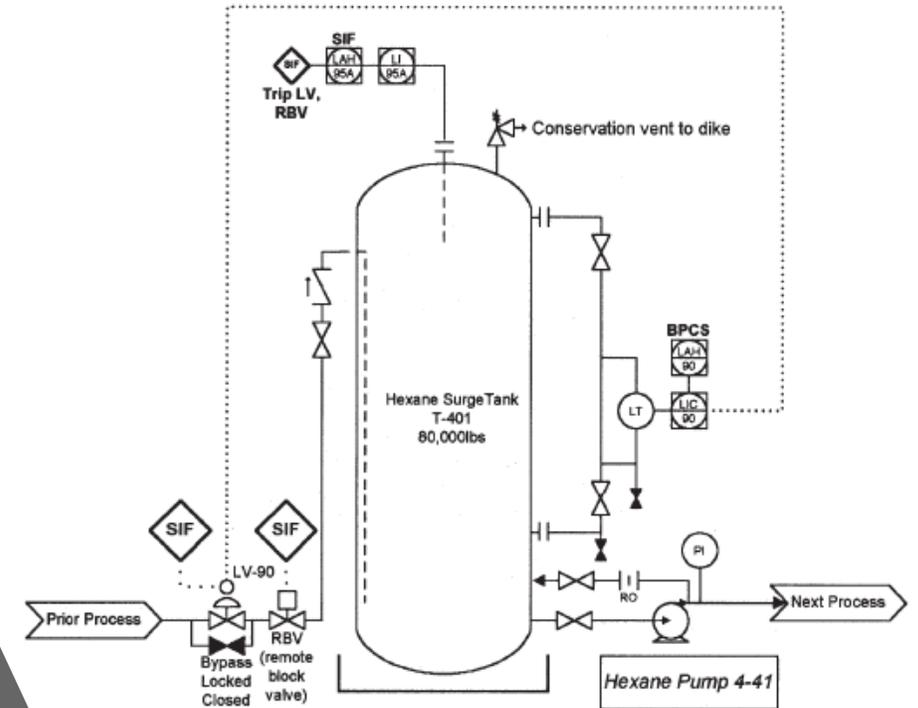


Scenario Number	Equipment Number	Scenario Title: Hexane Surge Tank Overflow. Spill not contained by the dike.	
1a			
Date:	Description	Probability	Frequency (per year)
Consequence Description/Category	Release of 10,000–1000,000 lb hexane outside the dike due to tank overflow and spill of hexane Severity Category 4		
Risk Tolerance Criteria (Category or Frequency)			
Initiating Event (typically a frequency)	Loop failure of BPCS LIC. (PFD from Table 5.1)		1×10^{-3}
Enabling Event or Condition			
Conditional Modifiers (if applicable)			
	Probability of ignition	N/A	
	Probability of personnel in affected area	N/A	
	Probability of fatal injury	N/A	
	Others	N/A	
Frequency of Unmitigated Consequence			1×10^{-3}
Independent Protection Layers			
	Dike (PFD from Table 6.3)	1×10^{-2}	
	SIF Candidate	1×10^{-2}	
Safeguards(non-IPLs)			
	Human intervention/BPCS		
Total PFD for all IPLs	Note: Including added IPL	1×10^{-4}	
Frequency of Mitigated Consequence			
Risk Tolerance Criteria Met? (Yes/No):			
Actions Required to Meet Risk Tolerance Criteria: Consider adding SIF (see Chapter 8)			
Notes			
References (links to originating hazard review, PFD, P&ID, etc.):			40
LOPA analyst (and team members, if applicable):			



Sistema di sicurezza

- Identificazione dei requisiti di sicurezza
- Progettazione
- Implementazione sul campo



La sicurezza in ambiente radiologico

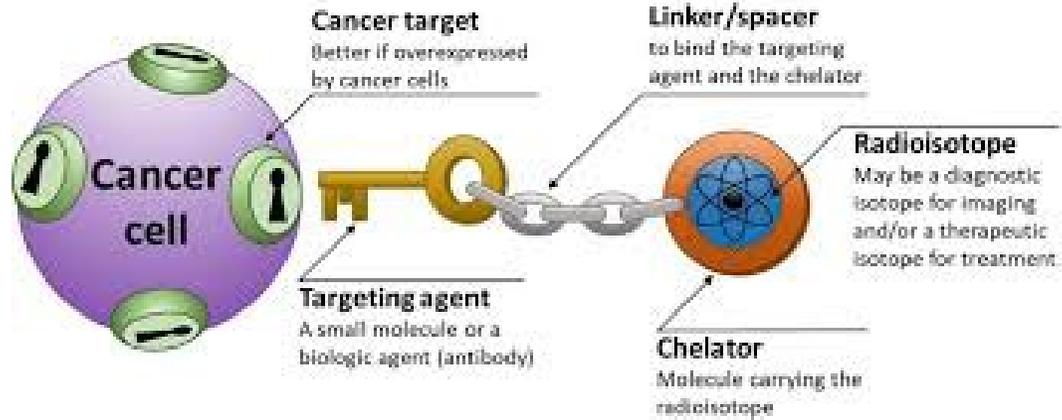
Obiettivo Generale: Proteggere popolazione e ambiente dagli effetti pericolosi delle radiazioni attraverso l'individuazione di salvaguardie.

Obiettivo di radioprotezione:

- Assicurare durante il normale funzionamento di un impianto che l'esposizione alla radiazione sia sempre sotto i limiti prescritti
- Mitigare l'esposizione estesa alle radiazioni generate in un incidente

Obiettivo tecnico di sicurezza:

- prevenire gli incidenti presi in considerazione nella progettazione di un impianto o apparato (DBA - Design Basis Accident);
- garantire che la probabilità di incidenti rilevanti sia estremamente ridotta.



La radioprotezione

La radioprotezione studia gli effetti delle radiazioni sugli organismi viventi ed elabora le strategie più adeguate per limitarli e tenerli sotto controllo, senza necessariamente rinunciare ai benefici che possono derivare dall'uso della radioattività (ad esempio in campo medico)

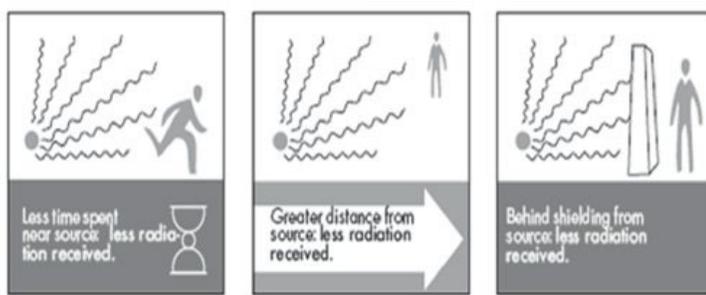
La radioprotezione: i 3 principi

Alla base di tutte le leggi sulla radioprotezione ci sono tre principi fondamentali:

- **giustificazione:** la scelta di utilizzare la radioattività deve essere motivata dall'impossibilità di trovare una soluzione alternativa, altrettanto valida;
- **ottimizzazione:** l'esposizione alle radiazioni deve essere mantenuta al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenuto conto dei fattori economici e sociali (principio ALARA – *As Low As Reasonably Achievable*);
- **limitazione delle dosi:** i valori limite stabiliti dalla legge non devono mai essere superati.

La radioprotezione: es. protezione esterna

1. **Tempo** (durata dell'esposizione): determina in maniera lineare, a parità di condizioni di esposizione, l'intensità dell'esposizione e conseguentemente del rischio radiologico;



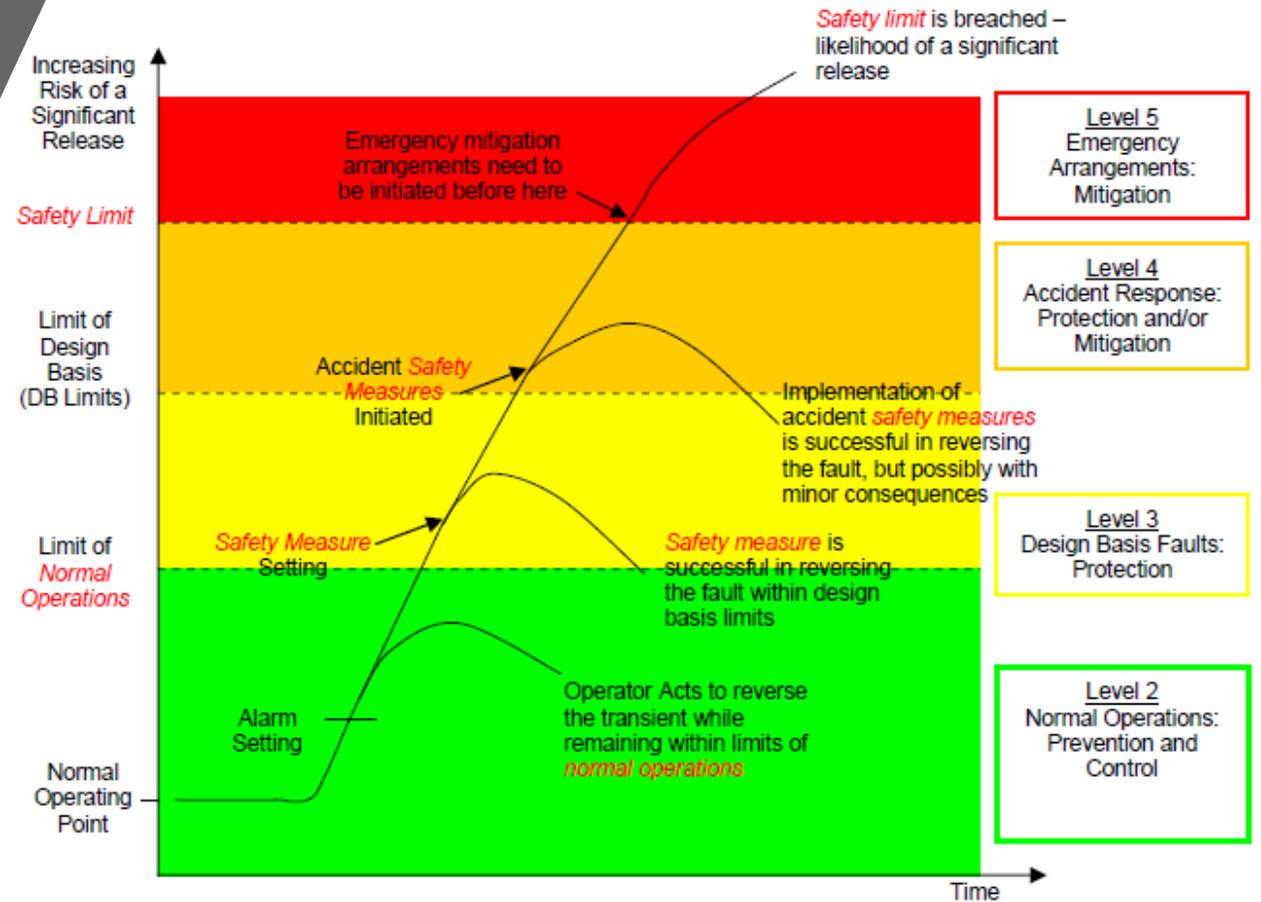
2. **Distanza**: la dose di radiazioni segue la legge dell'inverso del quadrato della distanza rispetto al punto di emissione:

$$D_1 r_1^2 = D_2 r_2^2$$

Dove D_1 è l'intensità di dose alla distanza r_1 dalla sorgente e D_2 è l'intensità di dose alla distanza r_2 dalla sorgente (esempio: passando dalla distanza di 1 m a quella di 2 m, l'intensità di dose si riduce di un fattore 4);

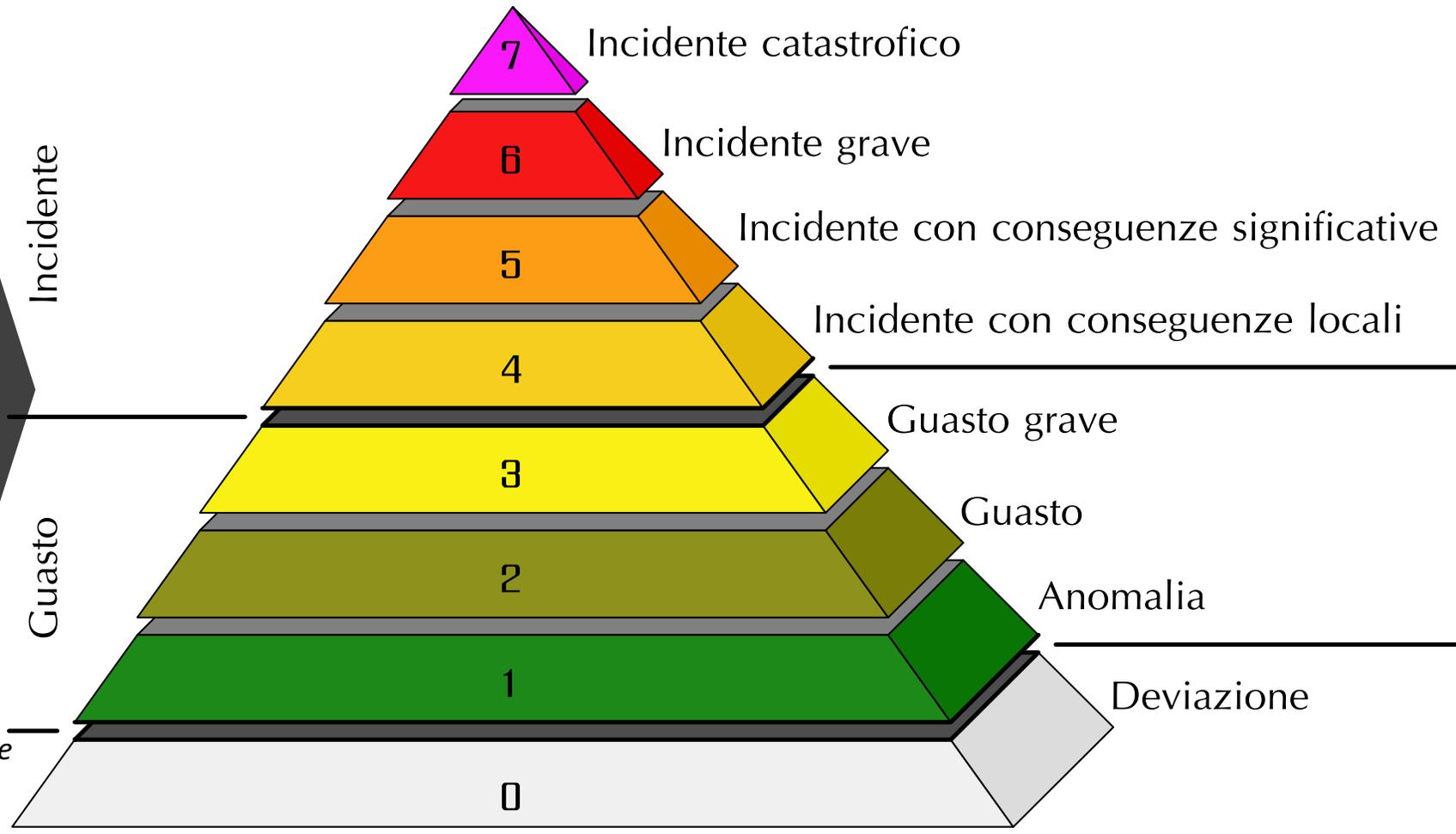
3. **Disponibilità di schermature**: La radiazione viene attenuata a seguito dell'interazione con il materiale con cui interagisce; pertanto, la dose da radiazione in un punto viene ridotta interponendo del materiale tra la sorgente e il punto d'interesse. La quantità e il tipo di materiale necessario dipende dal tipo di radiazione: ad esempio le radiazioni X sono penetranti e, nel caso di energie elevate, richiedono spessori considerevoli di piombo (Pb).

Evoluzione di un incidente



La scala INES

International Nuclear and radiological Event Scale



Regola d'oro: la Difesa in Profondità

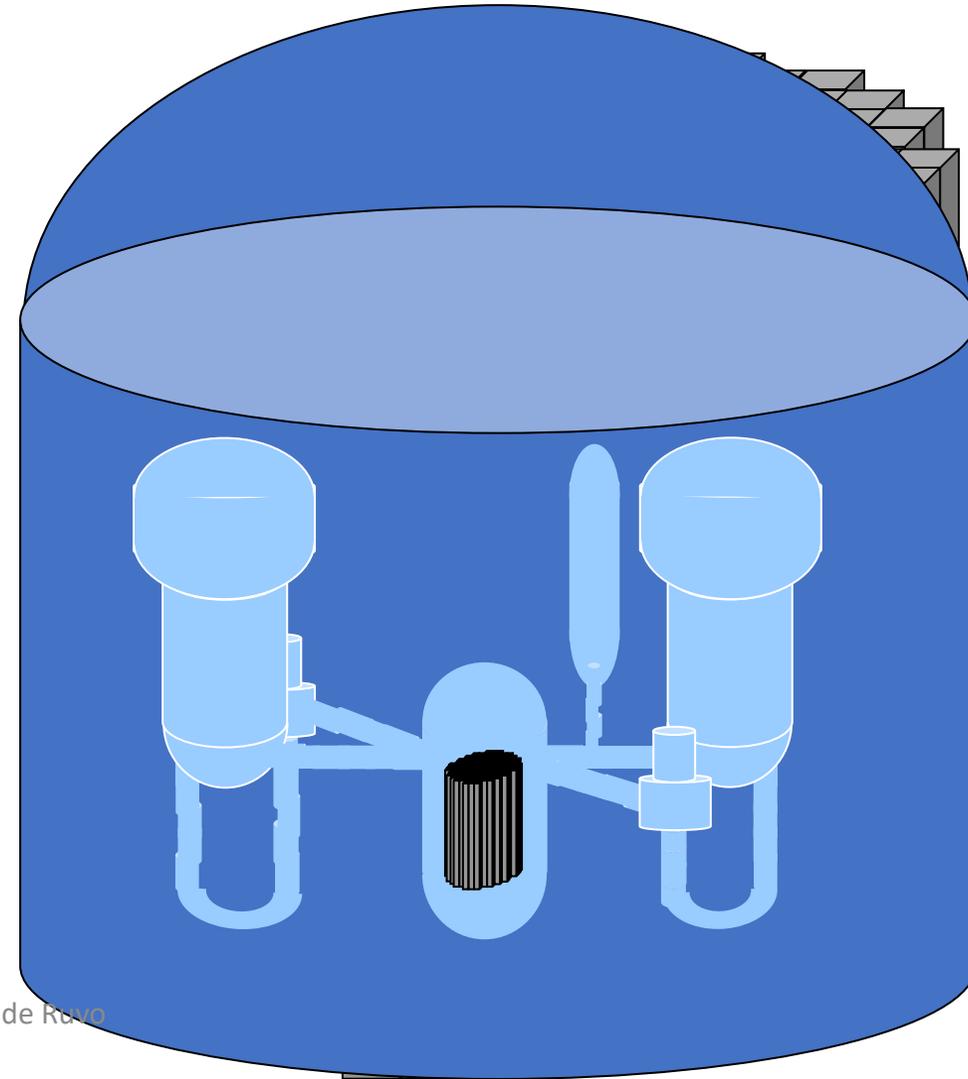
- Il principio delle barriere o della difesa in profondità mira a confinare più volte le sorgenti radioattive negli impianti nucleari. Analogamente agli strati di una cipolla, diverse barriere, indipendenti l'una dall'altra, garantiscono che il pericolo per le persone e per l'ambiente sia ridotto al minimo.



Filosofia di sicurezza di un reattore

*Barriere alla
radioattività:*

1. combustibile
2. incamiciatura
3. Sistema di refrigerazione
4. Edificio di contenimento



(da Lezioni di Sicurezza Nucleare - UNIPI – Prof. Mazzini)

La difesa in profondità

1. **Progettare** per il massimo di sicurezza in condizioni normali con elevati margini di tolleranza per i possibili malfunzionamenti (qualità, ispezionabilità, ridondanza, diversificazione...)
2. Assumere che gli incidenti possano accadere nonostante la cura adottata nel progetto, nella costruzione e nell'esercizio (MPS, sistema di controllo del processo)
3. Introdurre **sistemi di sicurezza** aggiuntivi basati sulla valutazione di incidenti ipotetici, nei quali avvenga il guasto simultaneo dei sistemi di protezione (Salvaguardie di sicurezza a presidio degli incidenti a base di progetto)
4. Gestire gli **eventuali incidenti gravi**
5. Gestire le **emergenze**

Grazie per
l'attenzione



"YOU'RE NOT VERY TRUSTING ARE YOU?"