

Radiazioni Nucleari per Non Esperti

Roberto Ferrari

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Pavia

Bardi

8 maggio 2010



Radiazioni Nucleari per Non Esperti

1. Da dove vengono
2. Cosa fanno
3. Come possiamo sfruttarle

Le Radiazioni Nucleari

1. Da dove vengono

Unità di Misura

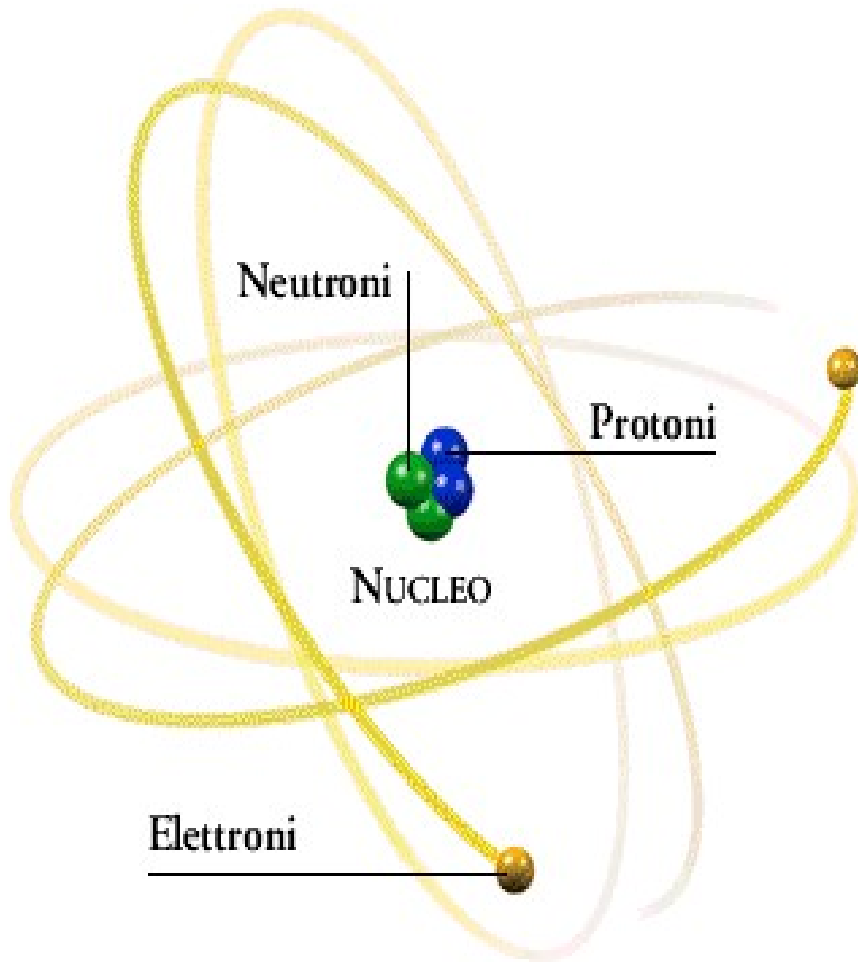
lunghezze	tempi	energie
Metro (m)	Secondo (s)	ElettronVolt (eV)

$$1 \text{ kWh} = \sim 22,5 * 10^{24} \text{ eV}$$

$$\text{Numero di Avogadro} = N_A = \sim 6,022 * 10^{23}$$

$$N_A * 1 \text{ eV} = \sim 0,026 \text{ kWh}$$

L' Atomo



"Sistema Planetario"

Nucleo (pesante) al centro

Elettroni (leggeri) su orbite
via via più lontane

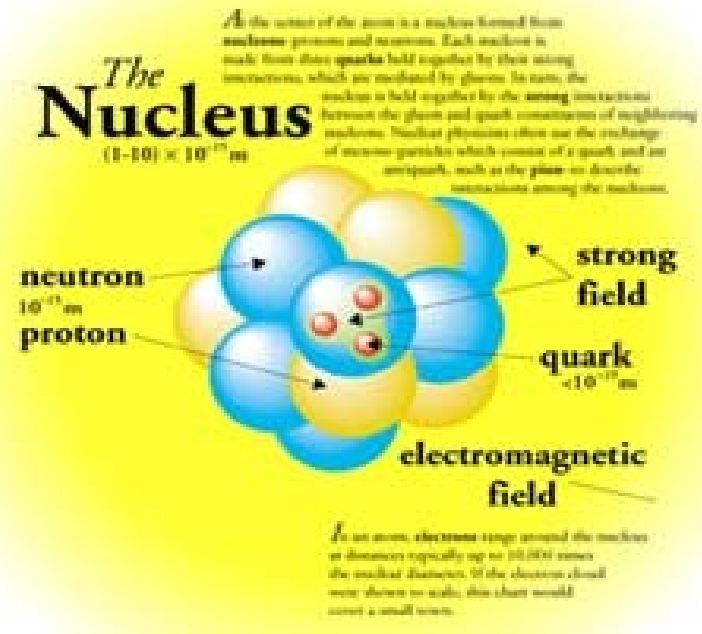
Il Nucleo

Sistema Planetario senza
sole al centro

Tanti pianeti ~ uguali
(protoni e neutroni),
disposti su orbite:

- 1) via via più esterne
- 2) molto vicine

Pianeti : Nucleoni
(protoni e neutroni)



Z protoni e N Neutroni

$A = Z + N$ nucleoni

Tipicamente $A \sim 2 Z$

Dimensioni

Dimensioni Nucleo = \sim (Dimensioni Atomo : 100000)

Se

Diametro Nucleo = 1 mm

Diametro Atomo = \sim campo da calcio

Dimensioni Uomo = \sim 10 x distanza Terra-Sole

L'atomo è molto molto molto molto piccolo,
Il nucleo è molto molto più piccolo

Materia

Massa (nucleo) $\sim 4000 \times$ Massa (elettroni)

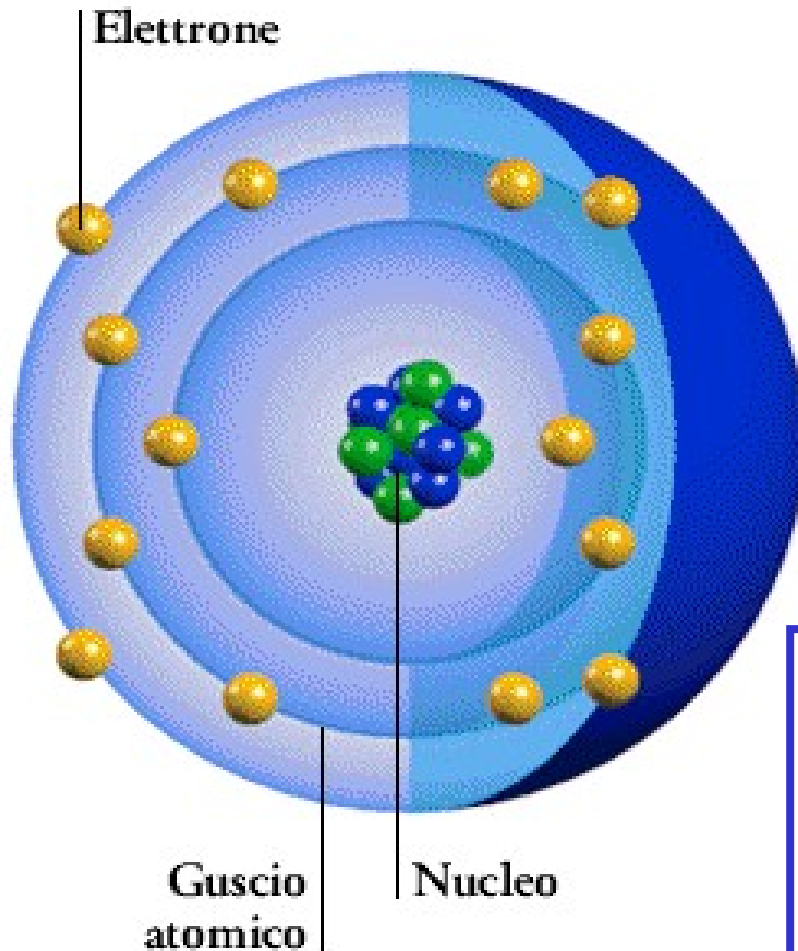
La materia è concentrata nel nucleo

Se la terra avesse densità di un nucleo, l'equatore sarebbe lungo $\sim 1,5$ km e non 40000

Densità nucleo = $\sim 10^{14}$ gr/cm³ (!!!)

Densità terra = $\sim 5,5$ gr/cm³

Cosa tiene assieme gli Atomi ?



Elettromagnetismo:

- + forze attrattive fra cariche opposte
- repulsive fra cariche con lo stesso segno

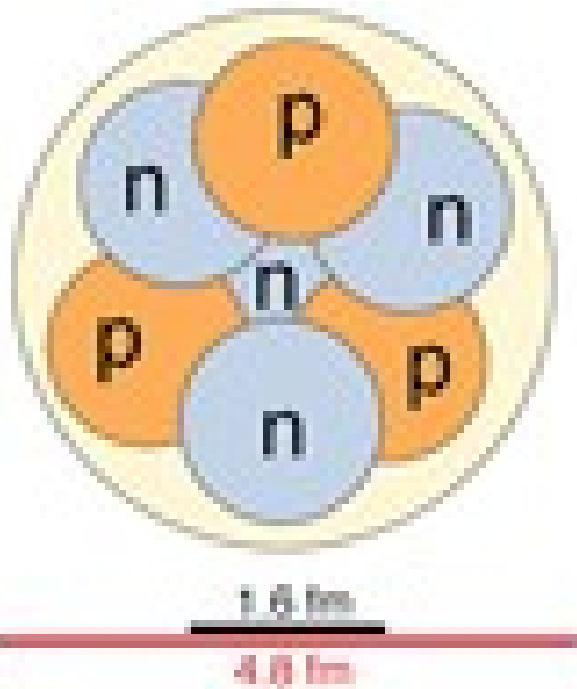
(pensate ai poli di due calamite)

Atomo di Idrogeno:

Forza di legame = ~ peso 0,01 mg

Piccola ?

Cosa tiene assieme i Nuclei ?



Elettromagnetismo:

forza repulsiva fra 2 protoni
a distanze nucleari

= ~ peso 20 kg (!!)

La "colla" nucleare:

Forza Nucleare Forte:

+ sempre attrattiva

+ 100 volte più intensa (~ 2 ton !!!!)

- si manifesta solo a distanze nucleari
(~ 1 fm)

Facciamo uno sforzo ... il Lavoro

Energia e Lavoro

Energia: capacità di compiere un lavoro

es. lanciare un corpo a 10 metri di altezza,
spaccare una pietra, fondere un chilo di
ghiaccio.

**Lavoro = trasferimento di energia da un corpo ad
un altro o da una forma ad un'altra**

Anche lavorando ... conserviamo l'Energia

L'Energia totale rimane sempre costante

1. Se lanciate un sasso verso l'alto, gli trasferite della energia (cinetica).
2. Mentre sale perde energia cinetica e guadagna energia gravitazionale.
3. Quando scende, il contrario

In assenza di attriti, la somma
energia cinetica + gravitazionale
è sempre uguale

Forme di Energia

Energia Cinetica

Energia Gravitazionale

Energia Elastica

Energia Termica

Energia Luminosa, Elettromagnetica

Energia Elettrica, Magnetica

Energia Chimica

Energia Nucleare

Di maggiore (più facili da sfruttare efficacemente) e di minore qualità (più difficili da sfruttare)

Energia Termica : forma particolarmente degradata di energia (!!)

Torniamo ai Nuclei

Stati stabili = \sim tanti neutroni (N) quanti protoni (Z)

Energie di legame = \sim 1-10 MeV / nucleone
= energia necessaria, in media, per liberare un nucleone

Per togliere un nucleone a un nucleo bisogna
compiere lavoro cioè fornire energia

Energia di legame del nucleo =
= energia necessaria per separare tutti i nucleoni

Difetto di Massa

Sommando le masse dei componenti, dovrebbe essere:

$$M_{\text{nucleo}} = Z M_p + N M_n$$

Sperimentalmente si misurano masse inferiori

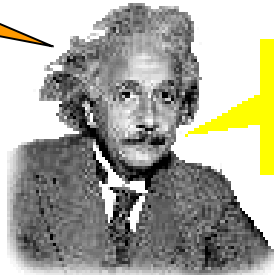
Difetto di Massa

ma:

Difetto di Massa = Energia di Legame

? Conservazione dell'Energia !

Equivalenza massa-energia



La massa è solo
una forma di
energia



Massa \rightarrow Energia
Energia \rightarrow Massa

Massa in quiete m_0 \rightarrow Energia di riposo $E_0 = m_0 c^2$



Una variazione ΔE di energia comporta una variazione Δm di massa:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \rightarrow \Delta m = \Delta E / c^2$$

Energia di legame \rightarrow Difetto di massa

Sorpresa:
la massa
non è costante!

Stabilità

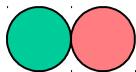
Nuclei più semplici:

Idrogeno (Z=1)

1_1H

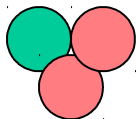


2_1H



Deuterio

3_1H

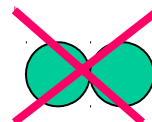


Trizio

→ instabile!

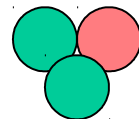
Elio (Z=2)

2_2He

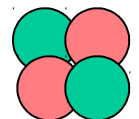


Non
esiste!

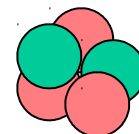
3_2He



4_2He



5_2He



→ instabile!

Decadimento Beta

Trizio (T) \rightarrow ^3He in ~ 12 anni (tempo di dimezzamento)

Neutrone \rightarrow Protone in ~ 15 minuti

Non spiegabile (non permesso!) dalle forze e.m. e forti.

Decadimento trizio [β^+]: $p \rightarrow n + e^+ + \nu$

Decadimento neutrone [β^-]: $n \rightarrow p + e^- + \nu$

Forze Nucleari Deboli (Pauli, Fermi)

ν = neutrino (?)

Wolfgang Pauli - 4 Dicembre 1930

Care Signore e Signori Radioattivi,

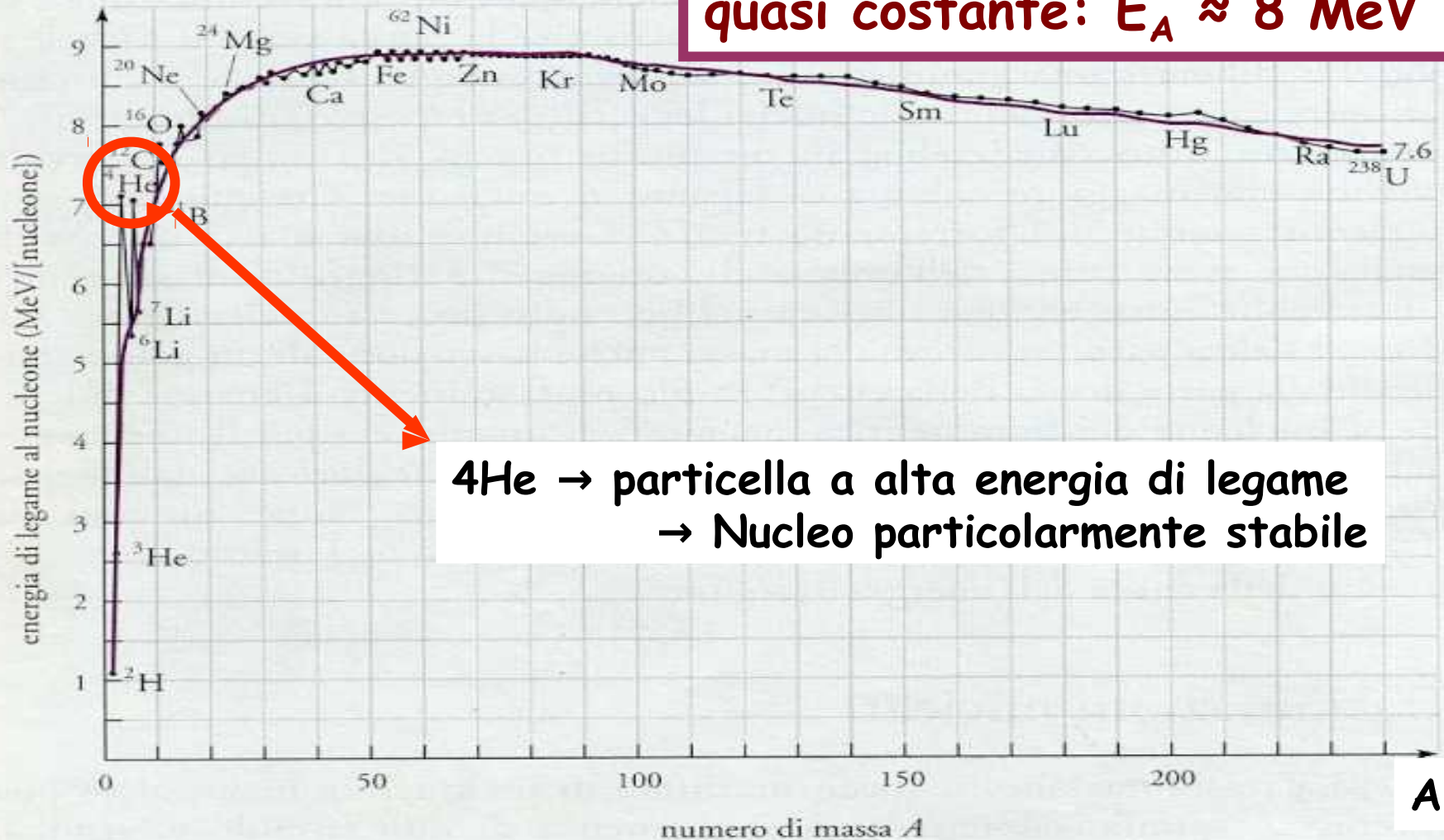
sono giunto a una disperata via di uscita [...] per salvare la legge della statistica e la legge dell'energia. Vale a dire la possibilità che possano esistere nel nucleo particelle elettricamente neutre, che chiamerò neutroni, [...] La massa dei neutroni dovrebbe essere dello stesso ordine di grandezza della massa degli elettroni [...]

Lo spettro β continuo diventerebbe allora comprensibile assumendo che nel decadimento β un neutrone venga emesso insieme all'elettrone, in modo che la somma delle energie del neutrone e dell'elettrone rimanga costante. Non oso per ora pubblicare nulla su questa idea e mi rivolgo a voi confidenzialmente, cari radioattivi, con la domanda di come si possa fornire la prova sperimentale di questo neutrone, nel caso dovesse avere un potere di penetrazione uguale o circa dieci volte maggiore rispetto a quello di un raggio γ . [...]

Ammetto che la mia via di uscita può apparire piuttosto improbabile a priori poiché se questi neutroni esistono li avremmo forse già visti da tempo. Ma solo chi osa riesce vincitore [...]

Energia di legame per nucleone

quasi costante: $E_A \approx 8 \text{ MeV}$



Qualche esempio

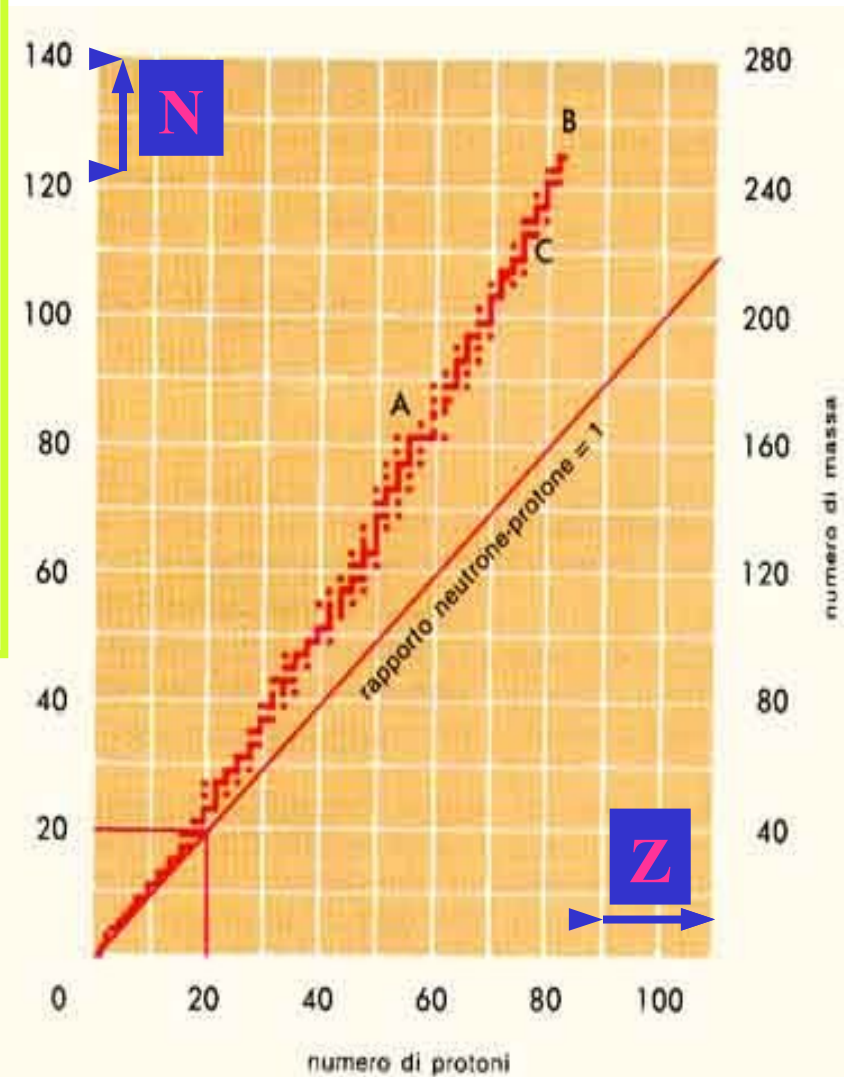
nucleo	B(MeV)	B/A (MeV)
${}^2\text{H}$	2.23	1.11
${}^4\text{He}$	28.29	7.07
${}^7\text{Li}$	39.24	5.61
${}^{12}\text{C}$	92.1	7.68
${}^{27}\text{Al}$	224.9	8.33
${}^{40}\text{Ca}$	342.0	8.55
${}^{127}\text{I}$	1072.3	8.44

Isotopi

Isotopi:

stesso numero di protoni Z
diverso numero di neutroni N
stessa specie chimica, diversa massa

- stabili (es. H, D)
- radioattivi (es. T)
(naturali e artificiali)



Stabilità dei nuclei:

Nuclei leggeri ($Z \leq 20$) $\rightarrow N = Z$

Nuclei pesanti ($Z > 20$) $\rightarrow N > Z$

Le Radiazioni Nucleari

2. Cosa fanno

RadioAttività

Diversi modi possibili di transizione a stati più stabili:

- Decadimenti Alfa (origine: forze n. forti)
- Decadimenti Beta (origine: forze n. deboli)
- Decadimenti Gamma (origine: forze elettromagnetiche)
- Emissione di neutroni, protoni, nuclei leggeri, e fissioni (origine: forze n. forti)

Meccanica quantistica (solo probabilità definite a priori):

- andamento esponenziale
- tempo di dimezzamento = 50% di probabilità di decadere
 $T_{1/2}$: Varia enormemente, da 10^{-10} a 10^{+10} s

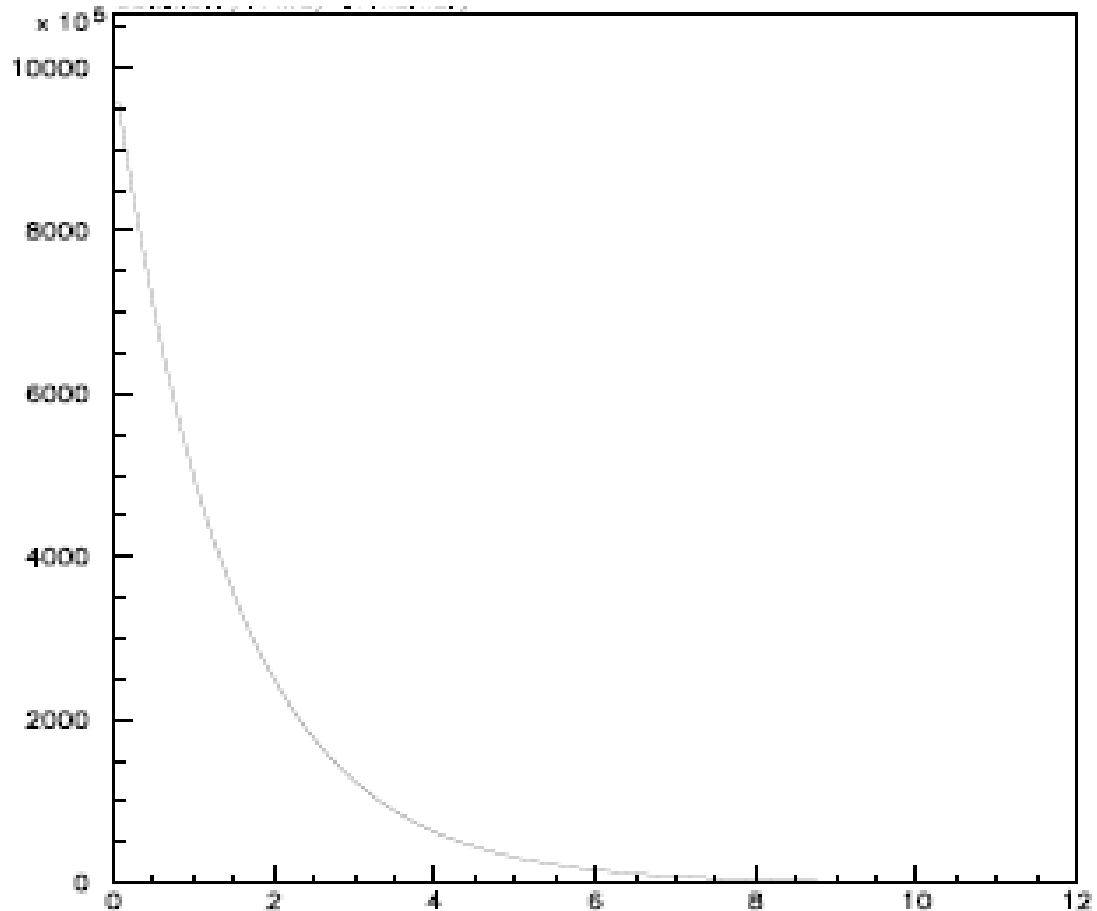
Vita Media

Dato 1 miliardo di nuclei N con un tempo di dimezzamento di 1h, quanti ce ne saranno ancora dopo 1, 2, 4, 8, 24 h ?

1h: 500 M (1/2)
2h: 250 M (1/4)
4h: 62 M (1/16)
8h: 4 M (1/256)
24h : 62 (1/16M)

Dopo 80 $T_{1/2}$:
 N_A nuclei $\rightarrow 0$

Dopo 100 $T_{1/2}$:
O(10-100 ton) $\rightarrow 0$



Elementi RadioAttivi Primordiali

[= presenti nella terra fin dalle origini]

Sono una quindicina, fra i quali, ad es:

^{40}K (potassio)	β	1,3 miliardi di anni
^{50}V (vanadio)	β	$1,4 \times 10^{17}$ anni
^{87}Rb (rubidio)	β	47 miliardi di anni
^{113}Cd (cadmio)	β	$9,3 \times 10^{15}$ anni
^{144}Nd (neodimio)	α	$2,3 \times 10^{15}$ anni
^{232}Th (torio)	α	14 miliardi di anni
^{235}U (uranio)	α	700 milioni di anni
^{238}U (uranio)	α	4,5 miliardi di anni

Torio e uranio: famiglie radioattive con decadimenti a cascata, con emissione anche di raggi γ e X

Gran parte dei radionuclidi primordiali prodotto nella catena di decadimento di:



fra cui anche l'unico gas radioattivo naturale, il Radon:



Nei graniti: 10 parti per milione (ppm) di uranio e torio
(1 grammo granito: ~ 8 disintegrazioni al secondo)

→ calore rilasciato nel granito della crosta terrestre:

= ~20000 centrali nucleari

e forse altrettanto nell'interno del pianeta

Radionuclidi Cosmogenici

[= prodotti dai raggi cosmici]

Sono una decina, fra i quali:

^3H (trizio)	β	12 anni
^{10}Be (berillio)	β	1,5 milioni di anni
^{14}C (carbonio)	β	5700 anni
^{36}Cl (cloro)	β	300mila anni
^{39}Ar (argon)	β	35 giorni

Corpo Umano

In un corpo umano di 70 kg:

$U \sim 0,1 \text{ mg}$, $Th \sim 0,1 \text{ mg}$, $^{40}\text{K} \sim 150 \text{ mg}$, $^{14}\text{C} \sim 20 \text{ ng}$

decine di migliaia di decadimenti al secondo:

~ 37000 da ^{40}K e ~ 3000 da ^{14}C

(se non ho sbagliato i conti)

→ da ognuno di noi:

~ 40 mila neutrini al secondo

che se ne vanno per il cosmo !

Radiazioni

Rilasciano la loro energia:

- 1) rompendo legami molecolari e atomici (ionizzazione)
- 2) "attivando" il materiale in cui interagiscono (se $E > 10 \text{ MeV}$)

Radiazioni cariche: β (beta), α (alfa), protoni
gran numero di piccole interazioni
perdita di energia continua
→ distanza finita

Radiazioni neutre: raggi X, raggi γ , neutroni
maggiore potere di penetrazione
produzione di particelle cariche
→ riduzione del flusso esponenziale

Attenuazione

Gamma : 50% di attenuazione in 10 cm di tessuto soffice

Alfa : si fermano in ~ 50 um di tessuto soffice

Beta : si fermano in ~ 5 mm di tessuto soffice

Protoni : si fermano in 10-20 cm di tessuto soffice

Neutroni : dipende dall'energia, dipende dal tessuto, alta penetrazione

Dispersione :

Flusso = numero particelle per mq

Sorgente puntiforme : il flusso diminuisce in proporzione
inversa al quadrato della distanza

$\text{Flusso}(1\text{cm}) = 100 * \text{Flusso}(10\text{cm}) = 10000 * \text{Flusso}(1\text{m})$

Assorbimento

Danno: rottura legami atomici o molecolari (DNA !)

Dose assorbita : Energia depositata per kg di materia

Dose equivalente (danno biologico), va moltiplicata per:

X, γ , β	1
protoni	5
α	20
neutroni	2,5-20 (dipende dall'energia)
nuclei ($A > 4$)	20

In generale più il rilascio è concentrato in pochi punti, più il fattore è alto. Si misura in Sievert (Sv).

Danno distribuito : maggiore capacità di recupero del corpo

Dose naturale media : 2.4 mSv / anno

Il Radon ^{222}R

Gas Pesante prodotto nel decadimento di ^{238}U

Filtra dal sottosuolo

Presente soprattutto negli scantinati

Concentrazione varia anche di 10 volte

→ Responsabile di dosi annue fra 0.4 e 4 mSv

(ma in alcune zone può arrivare a 50 mSv)

Per confronto:

contributo raggi cosmici ~ 0,5-1 mSv

corpo umano ~ 0,22 mSv

Sensibilità dei Tessuti

Non tutti i tessuti sono uguali !

Ad esempio:

Genitali : 0,20

Midollo osseo, polmoni, stomaco : 0,12

Fegato, tiroide : 0,05

Pelle : 0,01

N.B.: valori in costante aggiornamento (in generale al ribasso)

Dosi acute: effetti deterministici

Dosi basse: effetti probabilistici

→ Effetti di bassi dosaggi ancora poco conosciuti !

Effetti delle basse dosi

Dose mSv	Tempo di esposizione	Attività
0.05	anno	Bere acqua
0.08	anno	RX torace
0.10	anno	Occhiali (contengono torio)
0.10	anno	RX ai denti
0.39	anno	Radionuclidi in corpo
2	anno	Radiazione naturale
2.4	anno	Media impiegati settore industria nucleare
2.5	anno	Media minatori Uranio
5	anno	Equipaggio volo di linea a medie latitudini
10	anno	Dose max. minatori Uranio
20	anno	Limite attuale per minatori e impiegati nucl.
50	anno	Radiazione naturale in alcune regioni
100	anno	Incremento della probabilità di cancro dimostrato
350	cumulativa	Criterio per decidere lo spostamento della popolazione a Chernobyl
1000	cumulativa	+ 5% di probabilità di contrarre il cancro
1000	singola dose	Temporanea sindrome da radiazione: nausea, diminuzione globuli bianchi
5000	singola dose	Probabilità di morte del 50% in un mese

OK 3 mSv
anno

Cosa fa?

! 100 mSv
anno

☠ 1 Sv

Il Modello Lineare

Es:

Se una persona fuma 300 sigarette al giorno, dopo un anno muore.

Modello Lineare →

Se 300 persone fumano 1 sigaretta al giorno, di queste dopo un anno una muore per il fumo.

Con una sigaretta al giorno a tutti gli italiani, dopo un anno:

$50.000.000/300 = 170.000$ morti per il fumo

Questo non succede!

Taiwan (1983-2003)

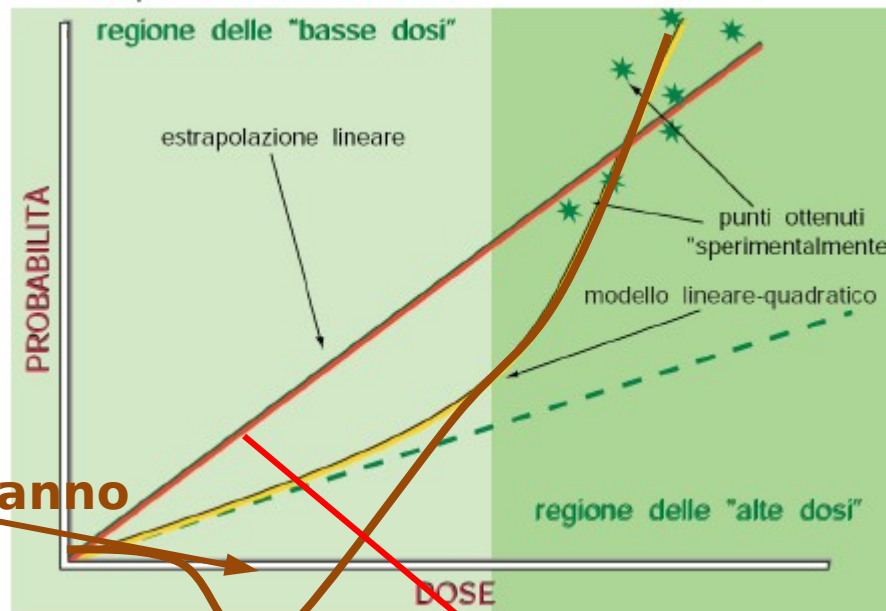
10000 Abitanti in 180 edifici contaminati (barre di ferro riciclato contenente ^{60}Co : $T_{1/2} \sim 5$ anni)

Dosi annue medie di 400 mSv per 20 anni

Un migliaio dosi medie circa 7 volte superiori

→ Morti per tumore e malformazioni congenite incredibilmente inferiori alla media

Effetti delle Basse Dosi



20-50 mSv/anno

Il risultato incredibile di Taiwan: 50 mSv/anno per 20 anni

Osservate Morti	MC	Popolazione non esposta Morti attese	MC attese	Modello Lineare Morti attese	MC
7	3	232	46	302	67

Chernobyl: I Dati

Emesso 400 volte più materiale radioattivo che a Hiroshima
(le esplosioni nucleari di prova degli anni 50-60: 100-1000 volte di più)

200mila persone al lavoro nelle prime fasi (liquidatori)
600mila in seguito

116mila abitanti nella zona "proibita" (in un raggio di 30 km)

210mila persone evacuate in altre zone contaminate

Il Disastro di Chernobyl

Chernobyl, Ucraina, 26 aprile 1986

Per un test: **interruzione del vapore + disattivazione sistemi di sicurezza**

reazione a catena incontrollata

→ **energia 100 volte superiore**

aumento di temperatura

→ **fusione del reattore**

aumento di pressione

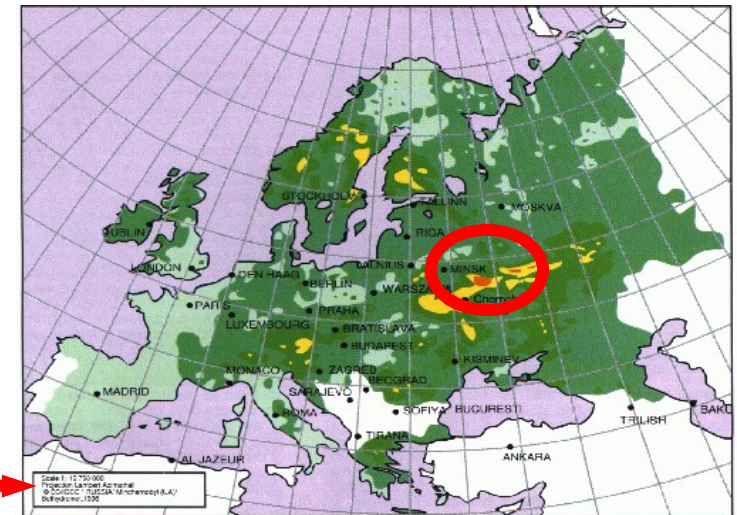
→ **esplosione del "tetto"**

incendio della grafite per 10 giorni

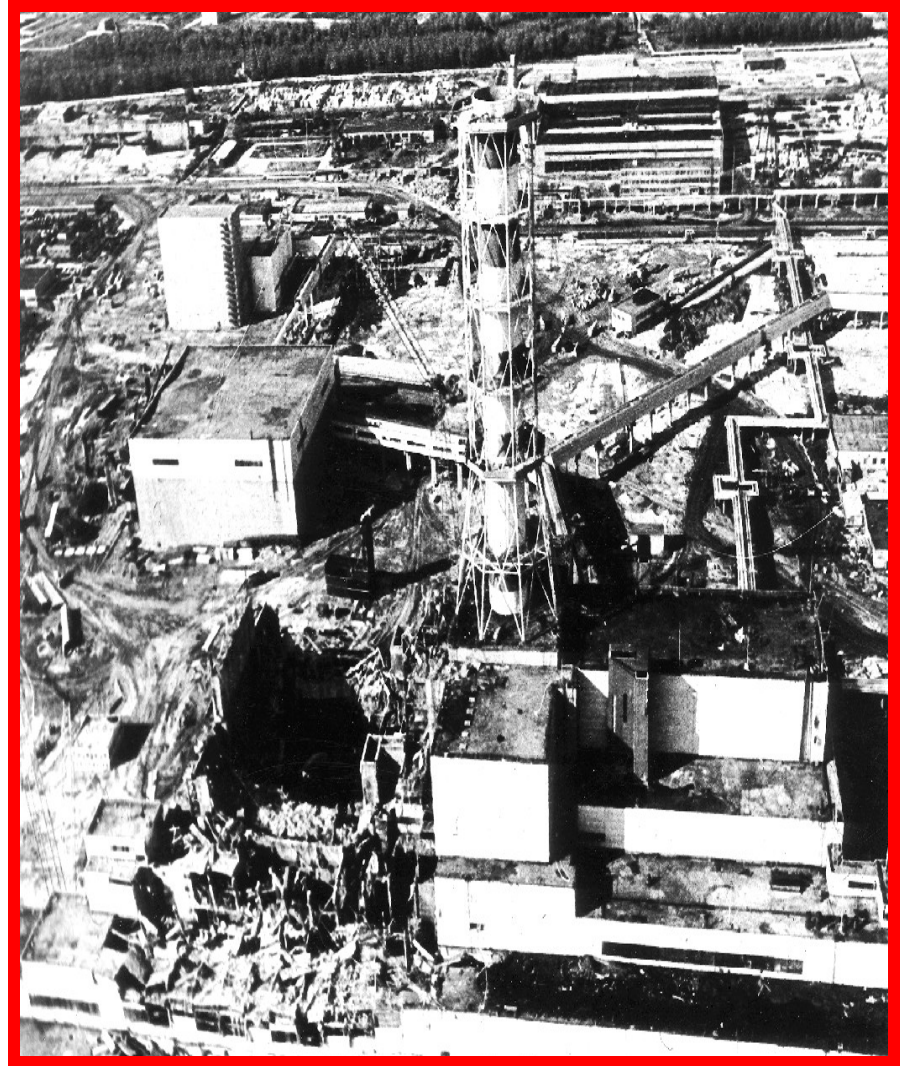
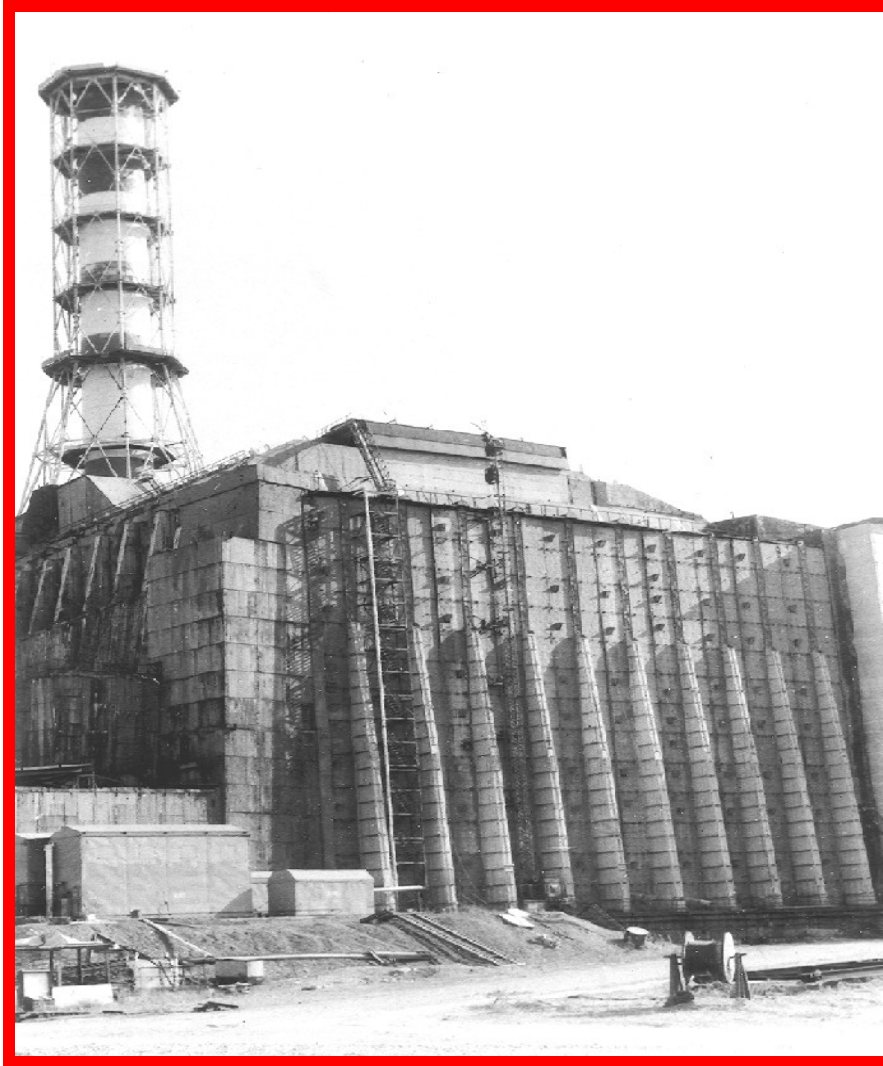
Nube radioattiva in tutta Europa:

$^{131}\text{I} \rightarrow T_{1/2} \approx 8 \text{ giorni}$

$^{137}\text{Cs} \rightarrow T_{1/2} \approx 30 \text{ anni}$



Chernobyl prima e dopo



Chernobyl: I Dati

Liquidatori:

- ~ 100 mSv circa 200mila persone
- ~ 250 mSv circa 20mila persone
- (~ 500 mSv una piccola percentuale)
- 134 con sindrome acuta da radiazioni
- 28 morti nei primi 3 mesi

Popolazione:

- >50 mSv circa 10mila abitanti della zona "proibita"
- (il 5% più di 100 mSv)
- 400 mila persone vissute in aree contaminate

Fondo naturale ~2-3 mSv / anno

Effetti Sanitari certi

Responso del United Nations Scientific Committee of the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR):

Risultati (sorprendenti e inattesi!!) dopo 20 anni:

4000 casi di cancro alla tiroide

Non c'è evidenza di altri tipi di tumori

Non c'è evidenza di un incremento delle leucemie

Non c'è evidenza di altre malattie e malformazioni genetiche

Siamo ancora un po' troppo ignorantelli

Effetti delle Basse Dosi

La conoscenza ancora troppo approssimativa

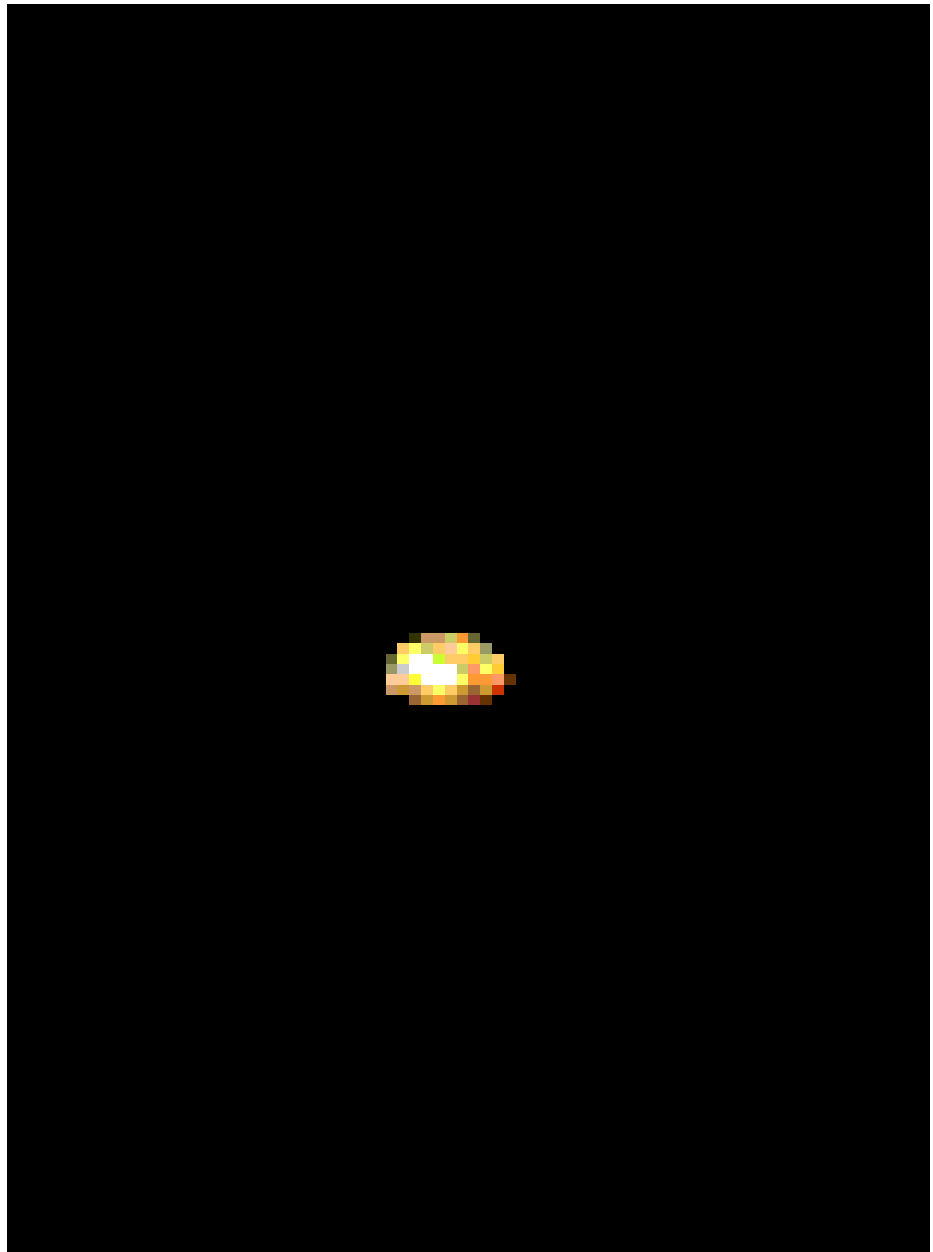
Pochi dati (per fortuna), in larga parte basati sullo studio dei sopravvissuti alle esplosioni su Hiroshima e Nagasaki

Limiti (in continuo aggiornamento) basati su assunzioni sempre e comunque estremamente prudenti

Le Radiazioni Nucleari

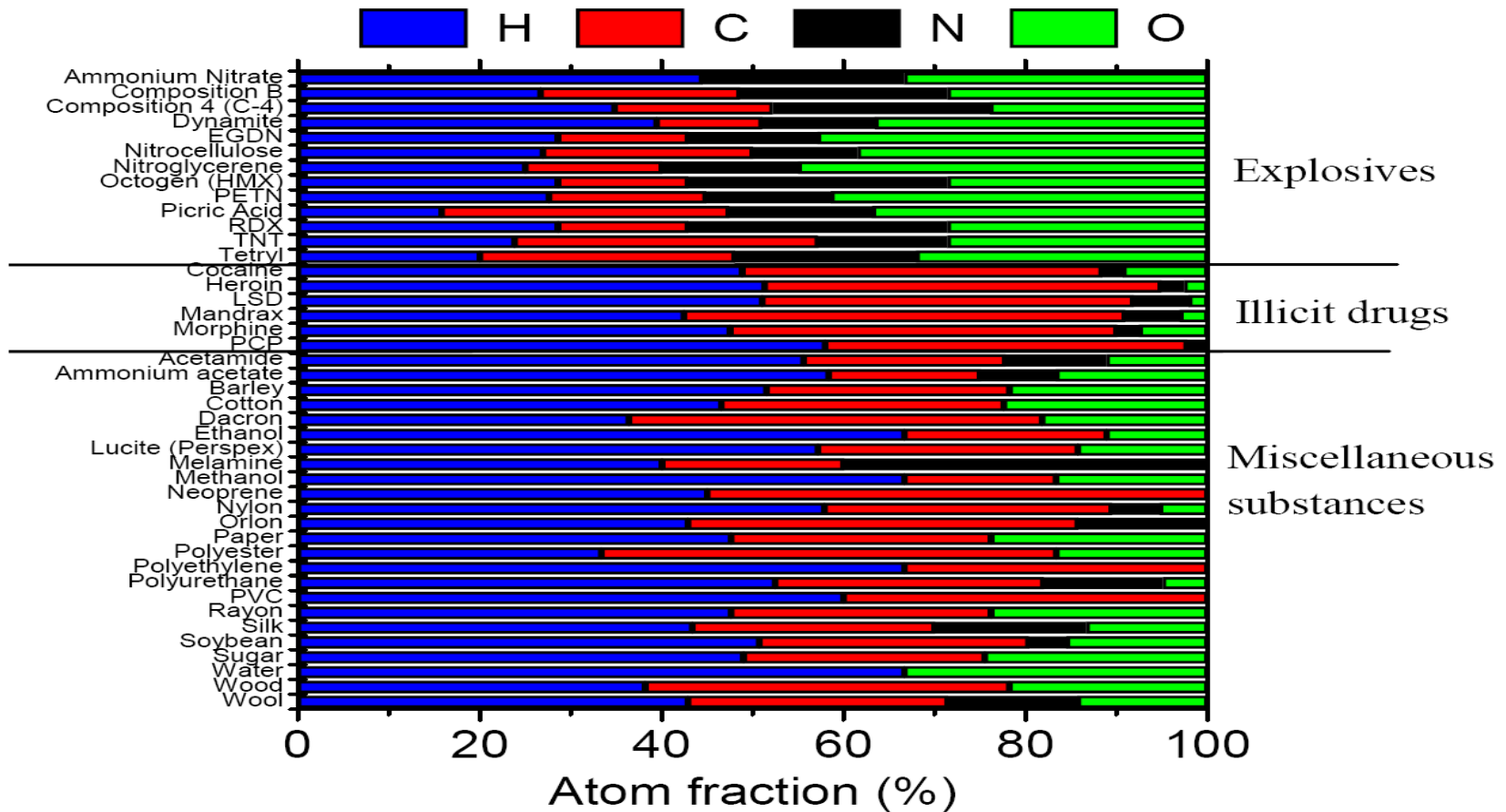
3. Come possiamo sfruttarle

**Meglio
evitare ...**

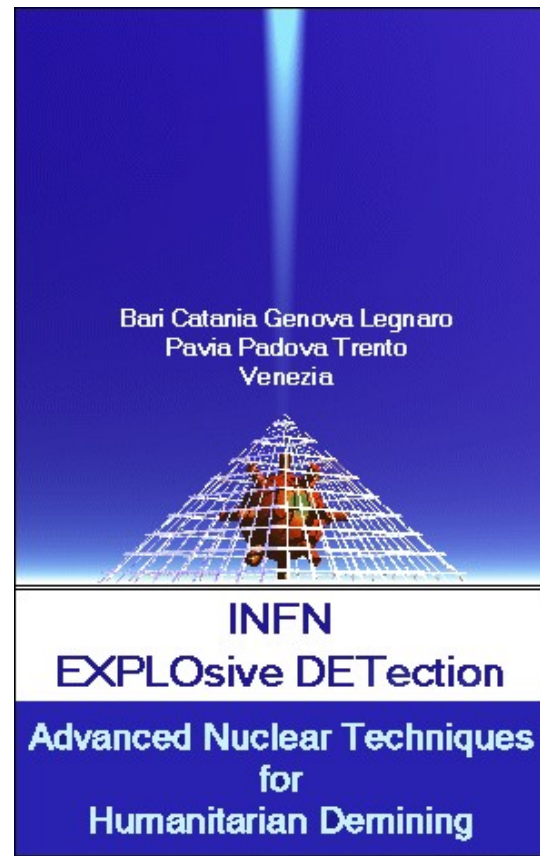


Identificazione Materiali

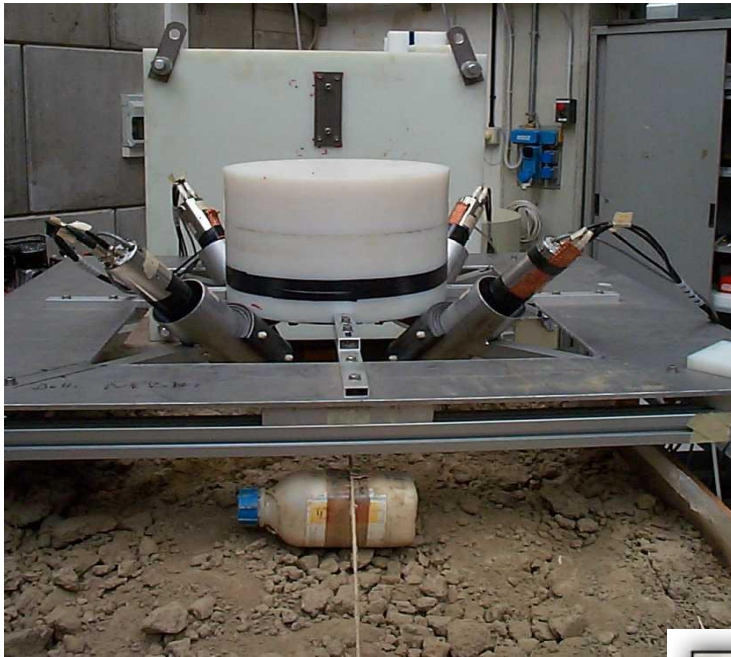
Composizione relativa (HCNO)



Ricerca Esplosivi (es. Mine Antiuomo)

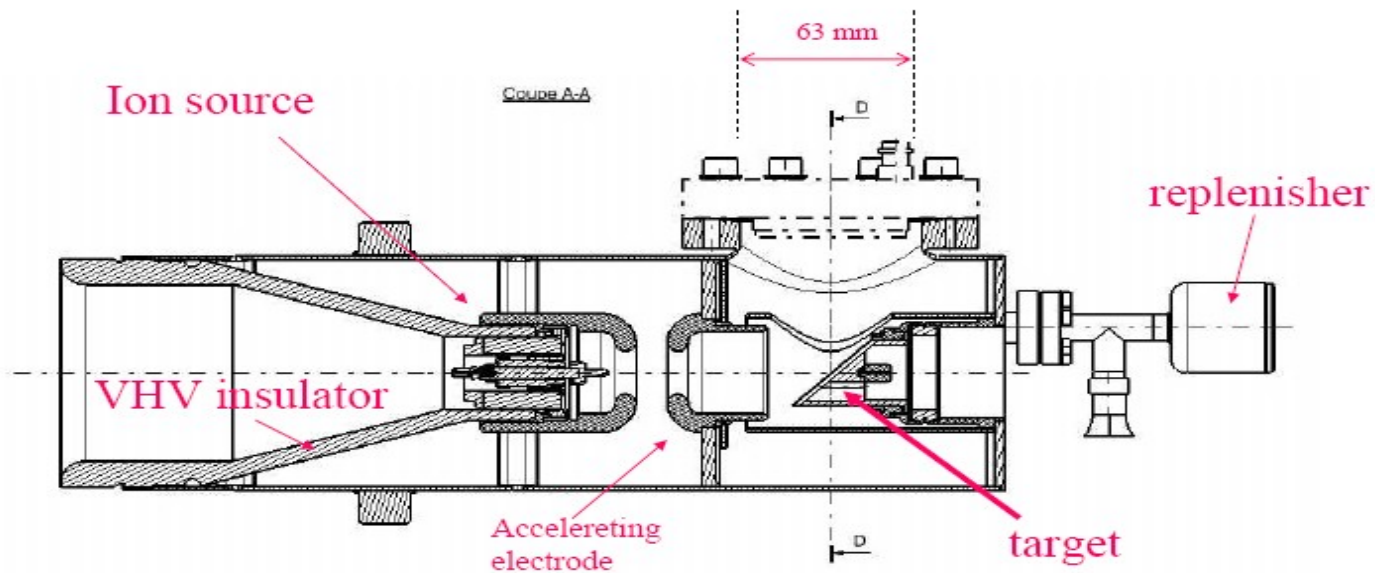


Sorgente di ^{252}Cf e Generatore di Neutroni Veloci



Generatore di Neutroni

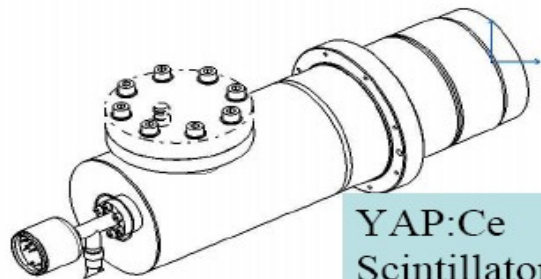
TPA tube SODERN design



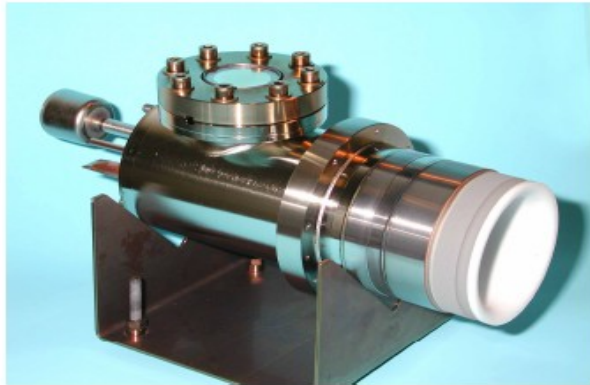
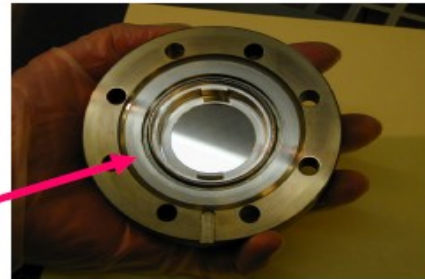
Le diamètre du corps du tube est de 109 mm

Le diamètre de la bride de support tube est de 140 mm

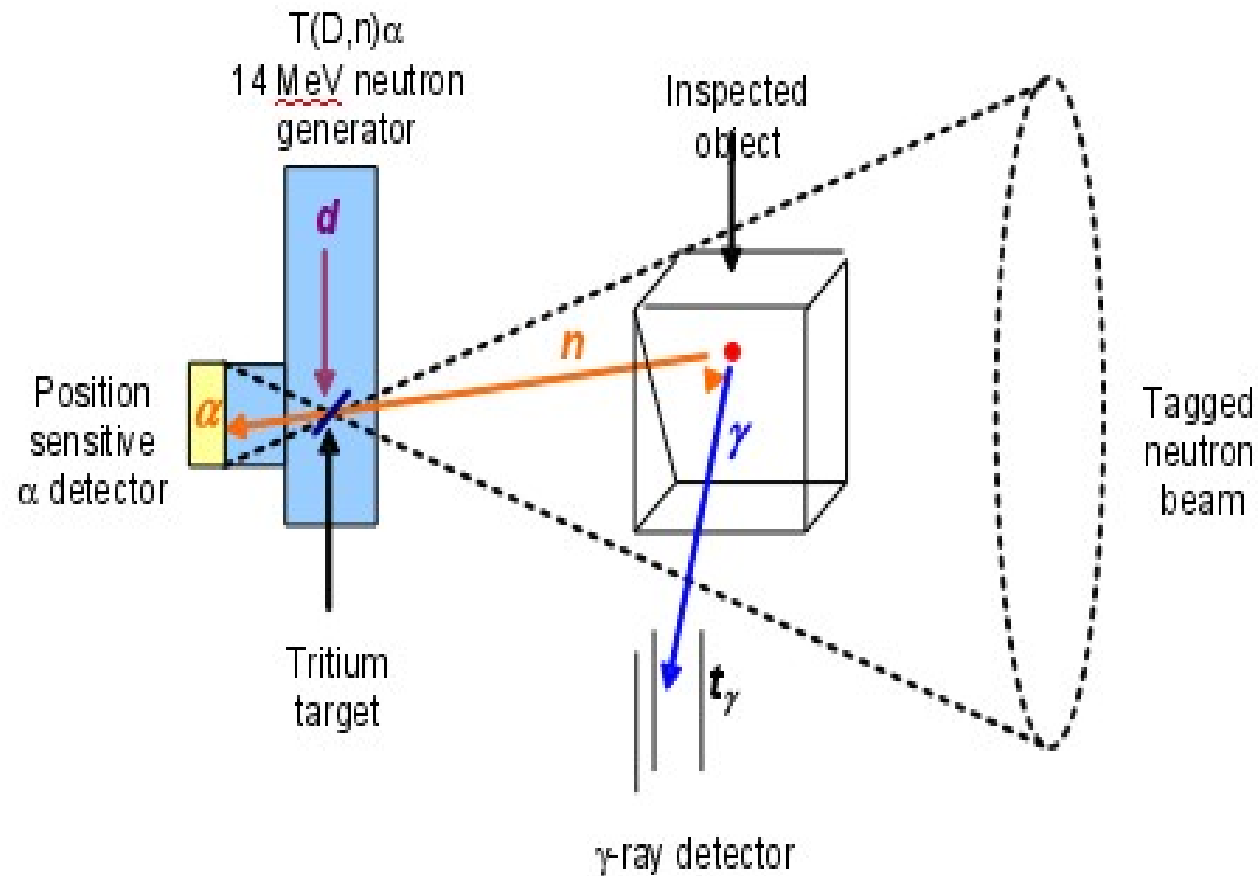
Rivelatore



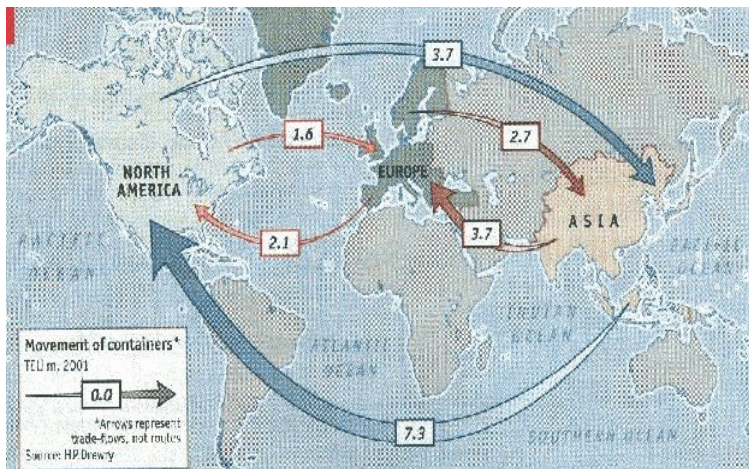
YAP:Ce
Scintillatore
(INFN-Pd design)



Tecnica della Particella Associata

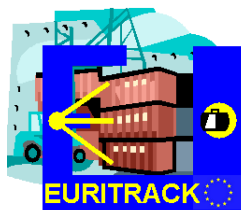


Sicurezza nei trasporti



Problema della **sicurezza dei trasporti marittimi** e della necessità di ispezionare in modo affidabile e rapido i containers (attualmente il **95%** dei trasporti marittimi avviene via mare, solo il **10%** è sottoposto a controlli). Rischio elevato.

Progetto Euritrack
(EU 6° Programma
Quadro)

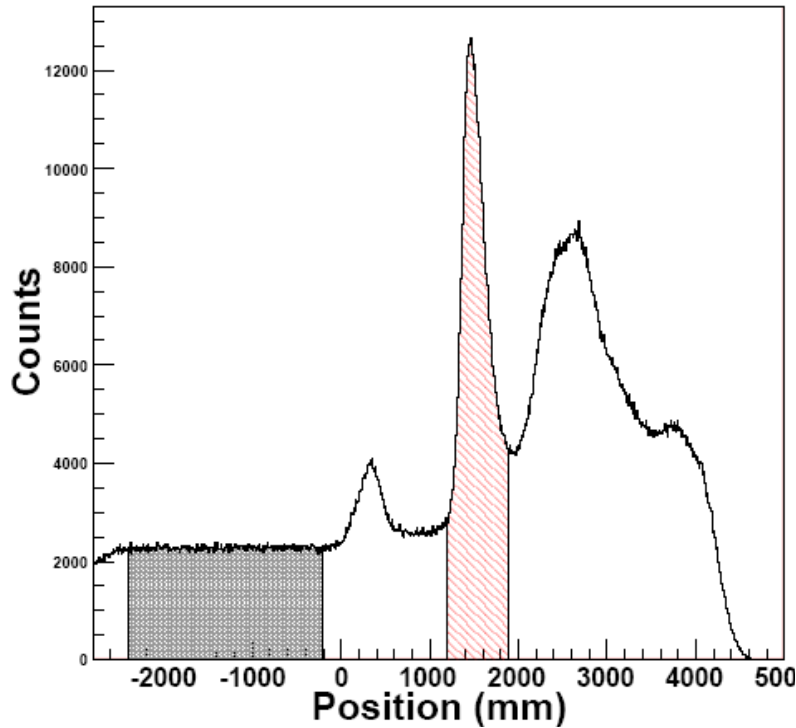


Tagged Neutrons Inspection System (**TNIS**), basato sulla tecnica della particella associata, per ispezionare containers.

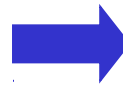


Spettri Misure

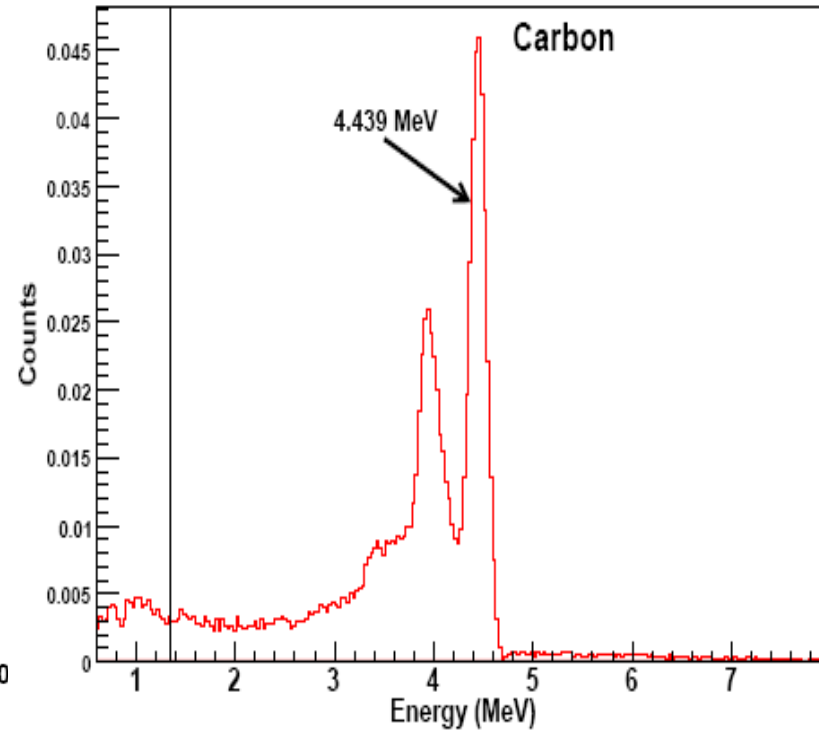
Position spectrum



Posizione



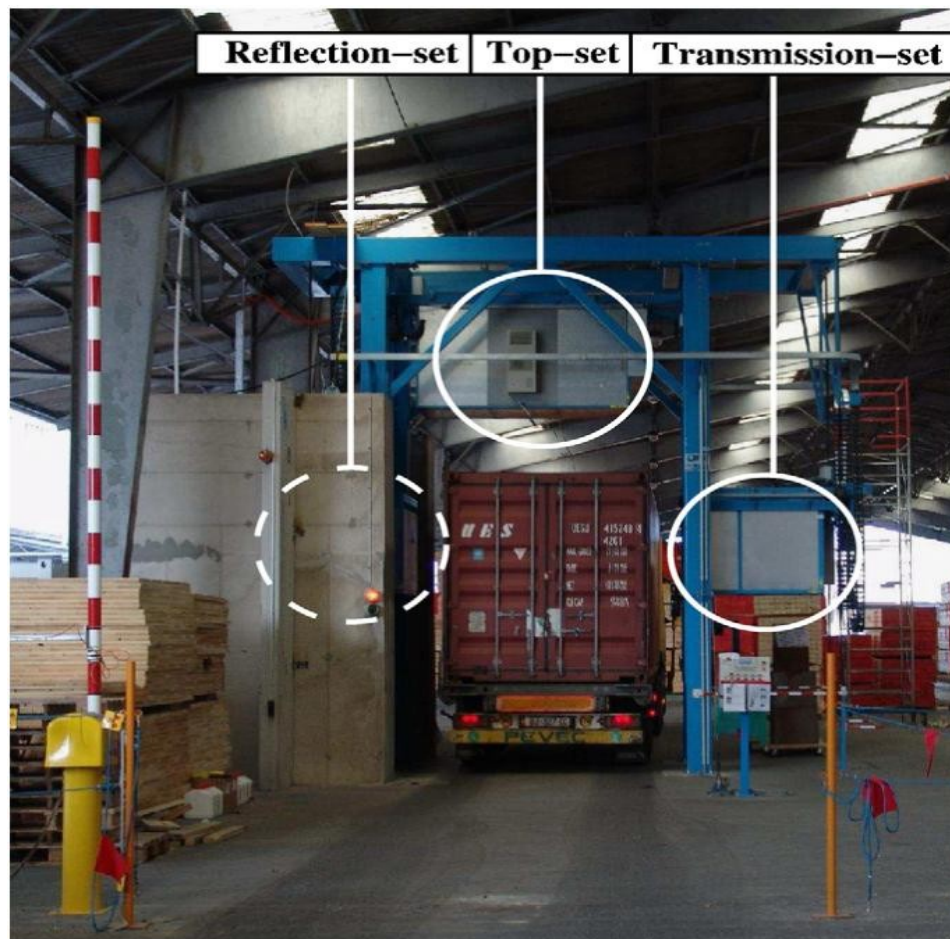
Energy spectrum



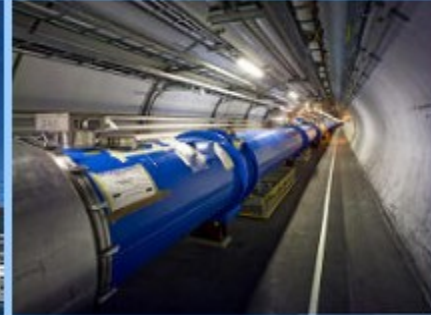
Identificazione sostanze



Setup Reale a Rijeka (Croazia)



Diagnostica e Terapia Oncologica



PHYSICS FOR HEALTH IN EUROPE WORKSHOP (Towards a European roadmap for using physics tools in the development of diagnostics techniques and new cancer therapies) 2-4 February 2010

CERN is pleased to announce the first workshop on *Physics for Health in Europe*, which will be held at CERN, Geneva, Switzerland, on 2- 4 February 2010.

The purposes of the workshop are to review the progress in the domain of physics applications in life sciences, stimulate the exchange between different teams and indicate the subjects most suitable for further studies in diagnosis and therapy. The workshop will explore synergies between physics and physics spin-offs to fight disease with a focus on radiobiology, accelerators, radioisotope production, detectors, and use of IT. Participants are invited to share their research, discuss challenges and new developments for building a Europe-wide perspective.

Produzione di Radio Farmaci

RadioNuclidi a breve vita media: ottimo strumento per terapia e diagnostica

Produzione:

- con reattori nucleari (neutroni)
- con acceleratori (ciclotroni) di protoni

Esempio: Tecnezio per scintigrafie/tomografie

PET: Tomografia a Positroni



Boron Neutron Capture Therapy

Radioterapia con neutroni

per es. contro tumori al fegato:

1. Iniezione di Boro 10 nel paziente
2. Espianto del fegato
3. Bombardamento con fasci di neutroni
4. Reimpianto del fegato

BNCT - Come Funziona

Il Boro si lega bene con le cellule tumorali

Assorbe facilmente un neutrone

Diventa radioattivo

Decadendo uccide la cellula tumorale

Sperimentata con successo al reattore
sperimentale dell'Università di Pavia

AdroTerapia Oncologica

Fasci di particelle (protoni e ioni carbonio) per la cura di tumori difficilmente operabili, radio-resistenti, ...

Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO)

A Pavia, inaugurazione il 15 febbraio 2010

3 sale, ~20000 sedute per ~3000 pazienti l'anno

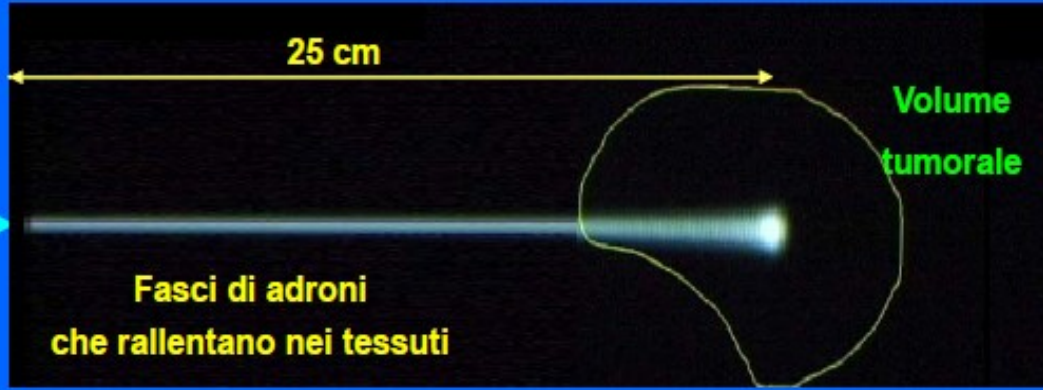
Tutta la parte di generazione e controllo dei fasci sviluppata dall'INFN.

Centro simile in costruzione in Austria (in collaborazione con CNAO, INFN, CERN, ...)

AdroTerapia

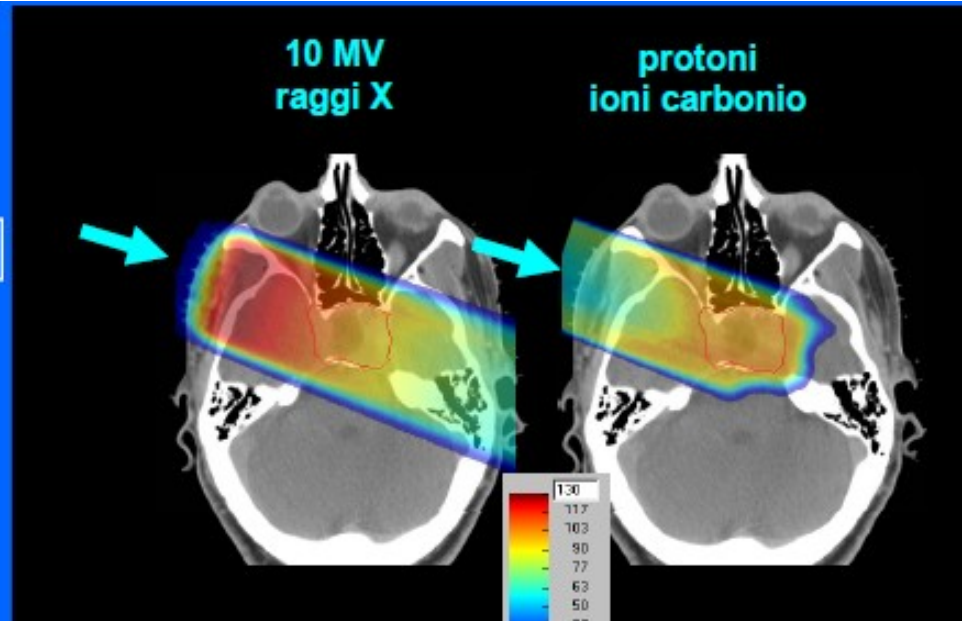
Per il controllo
dei tumori
radioresistenti
ioni carbonio
400 MeV*A

protoni
200 MeV

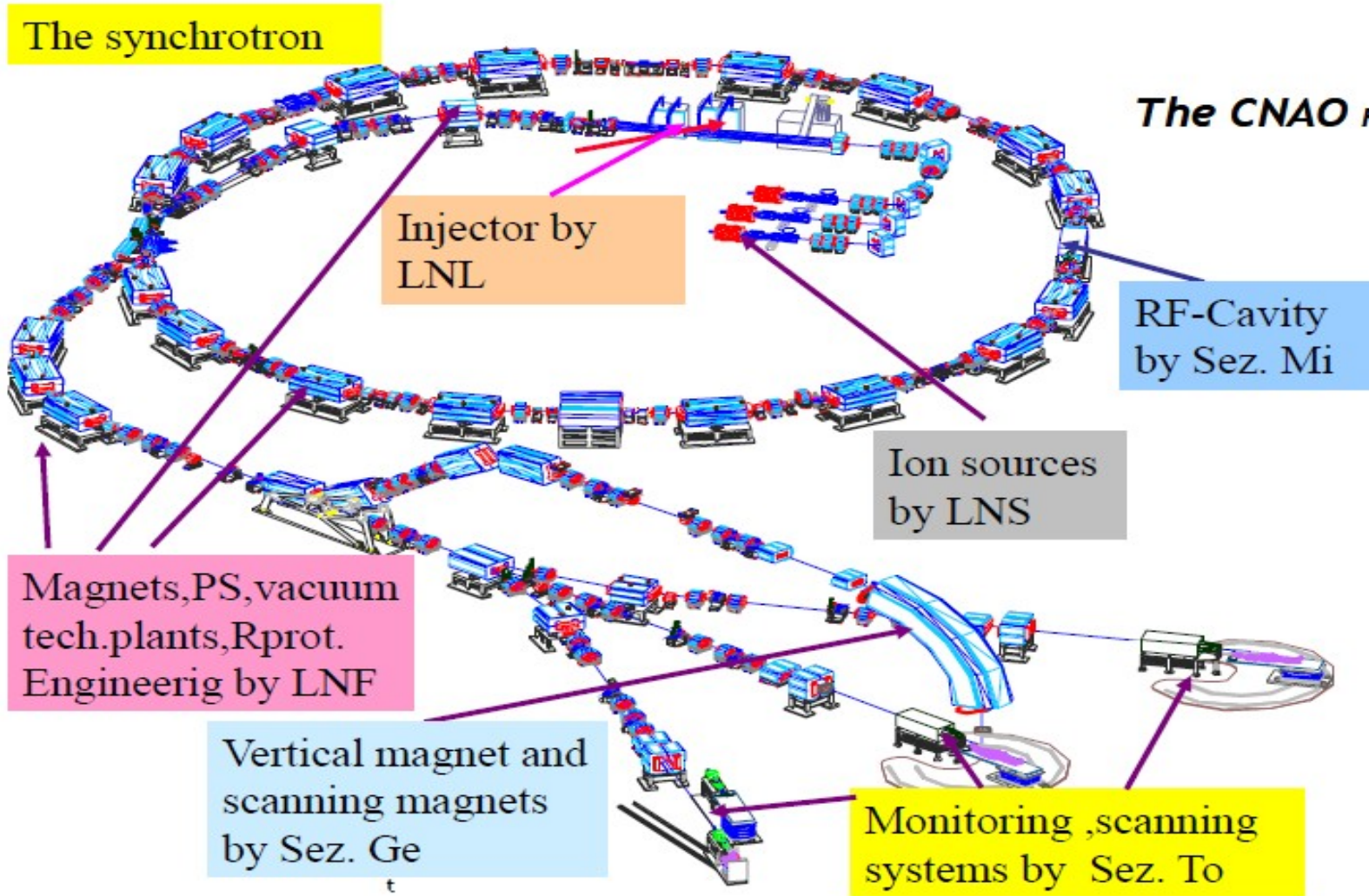


Vantaggi
Macroscopici:

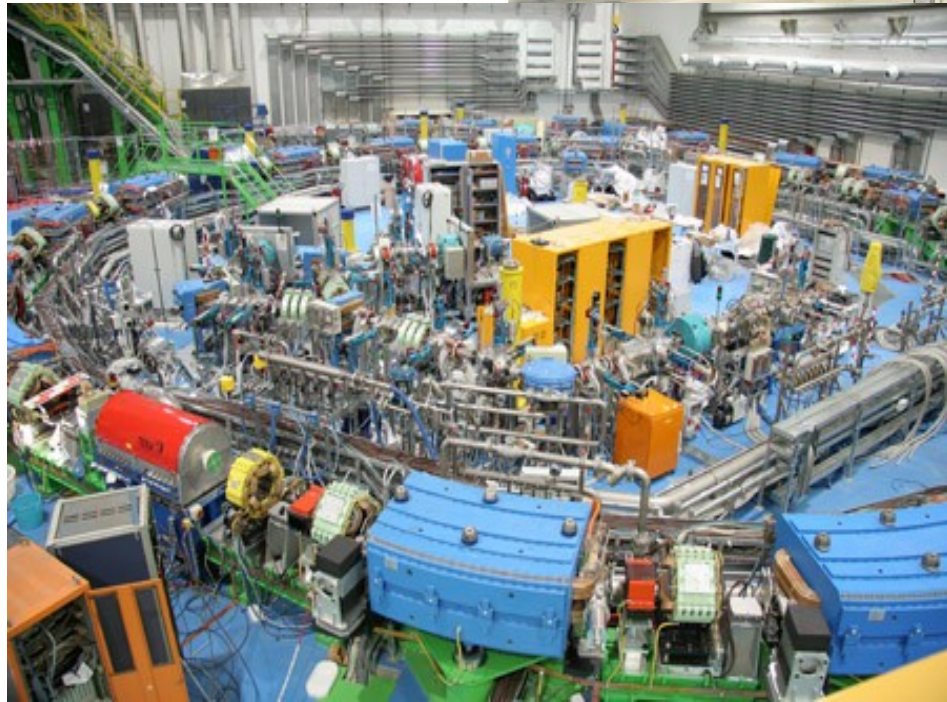
Confronto tra fasci singoli



CNAO / INFN



CNAO



A Catania (LNS) dal 2002

<http://lnsweb.lns.infn.it/CATANA/CATANA/>

CATANA WEB PAGES



**Centro di AdroTerapia e Applicazioni Nucleari
Avanzate**

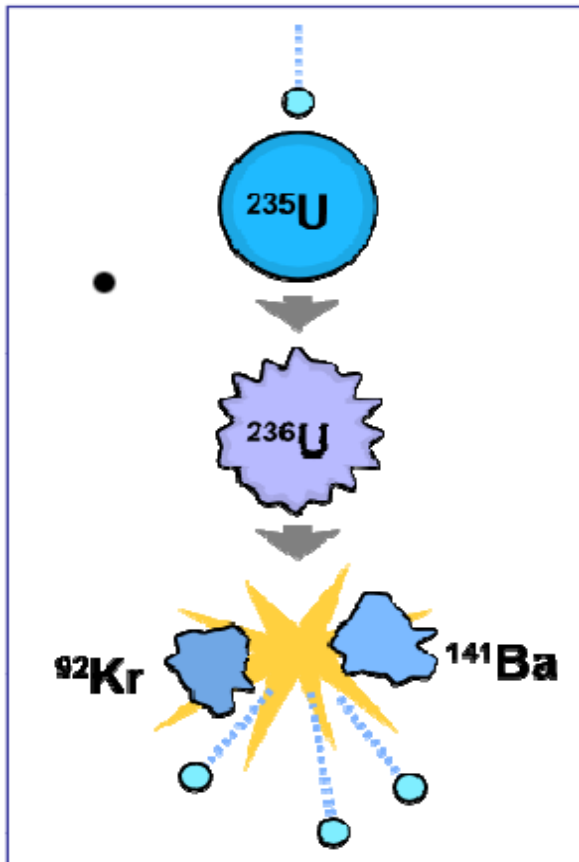
**The First Italian Protontherapy Center for
the ocular melanoma treatment**

J THE CATANA FACILITY 172 PATIENTS HAVE BEEN TI

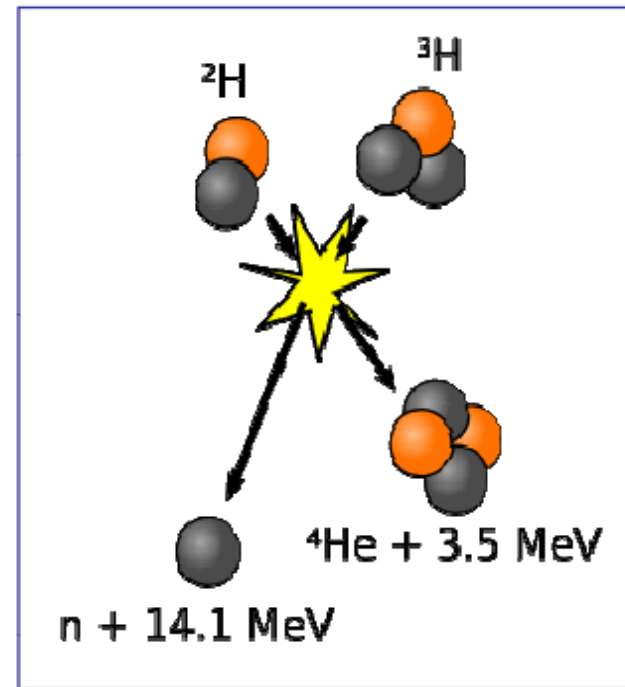


Produzione di Energia

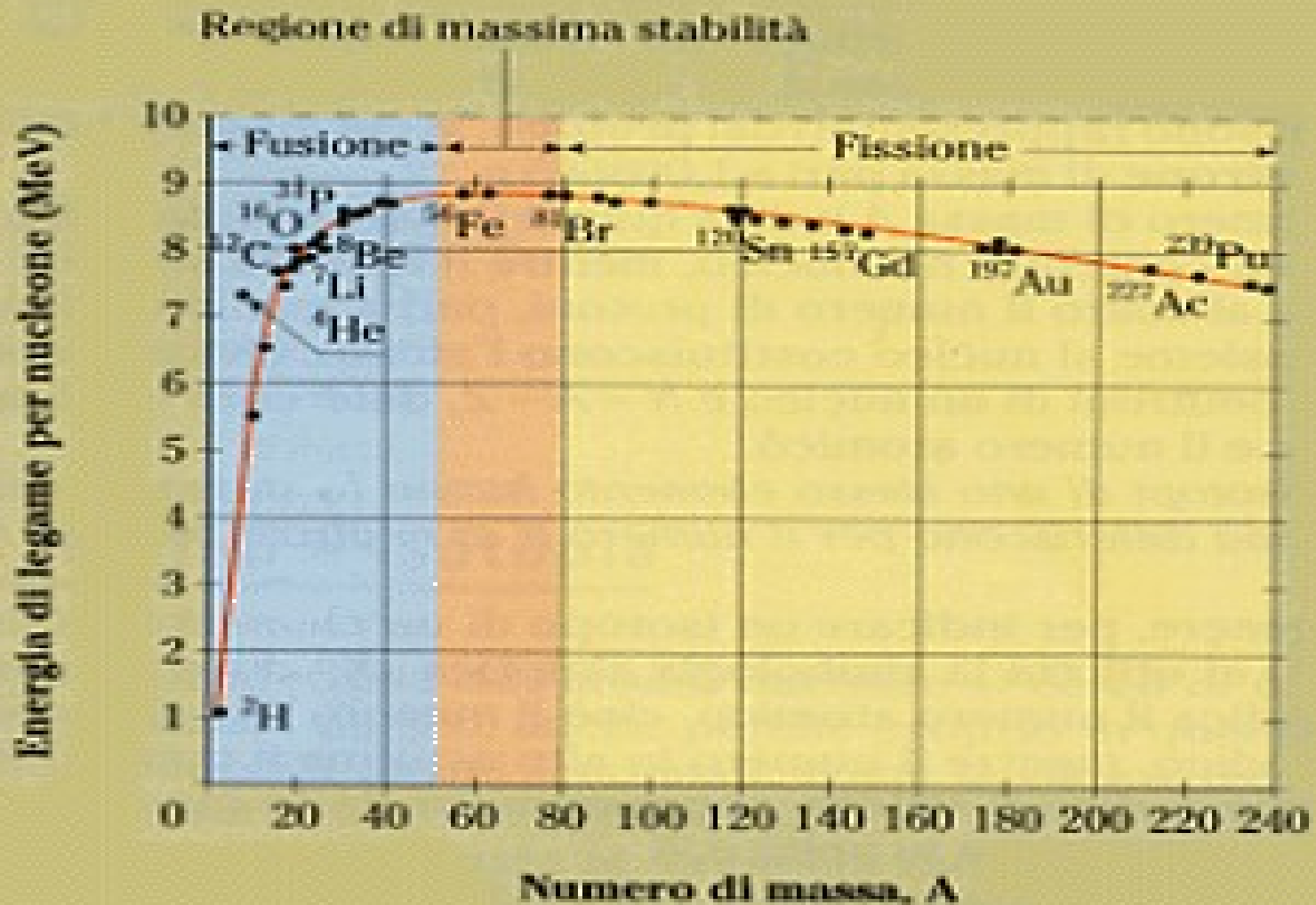
FISSIONE NUCLEARE



FUSIONE NUCLEARE



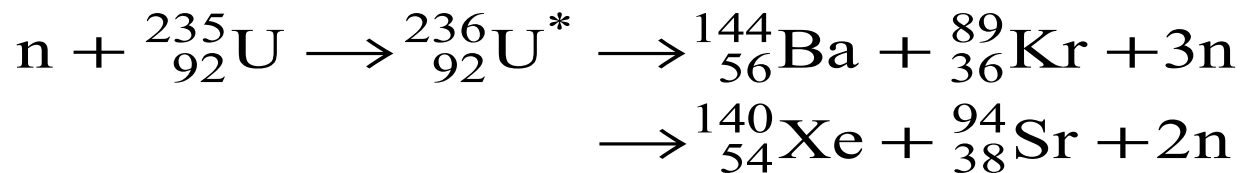
Fissione e Fusione



Fissione Nucleare



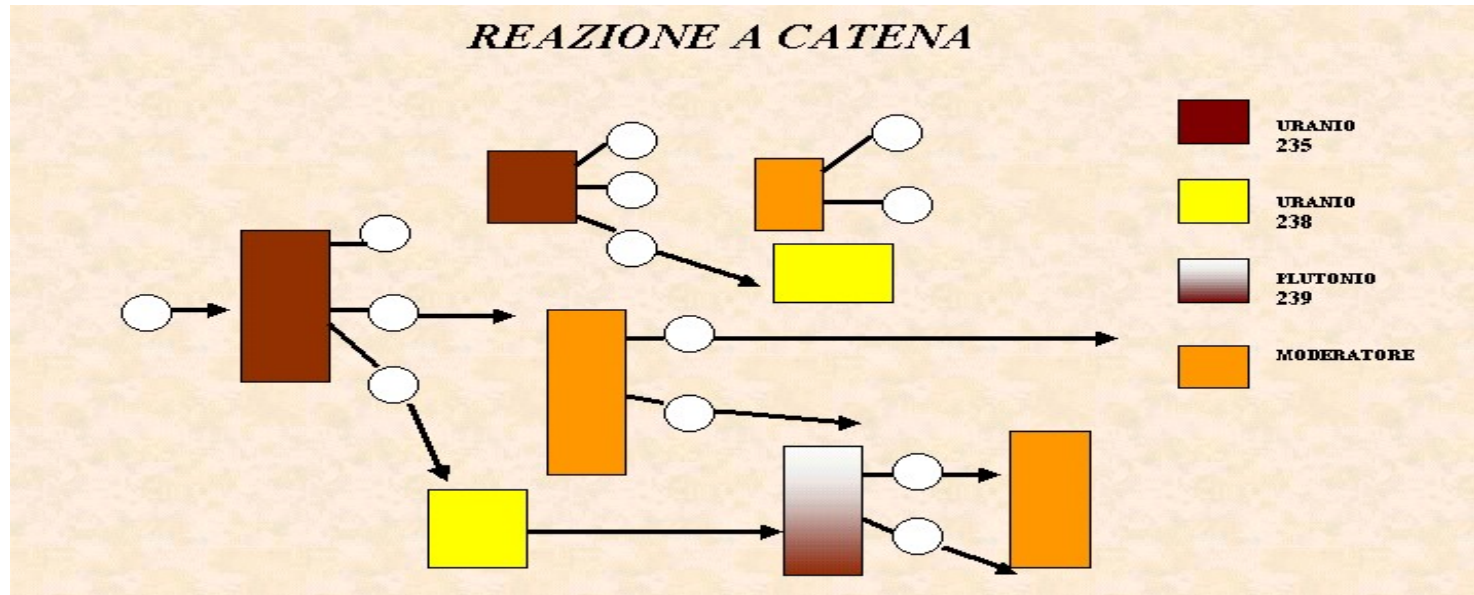
Nella fissione viene emessa **energia**



1g di fissione →
30000 kWh di energia
= consumo familiare
di 5 anni!!!

Reazioni a Catena

La fissione nucleare può avvenire con reazioni a catena.

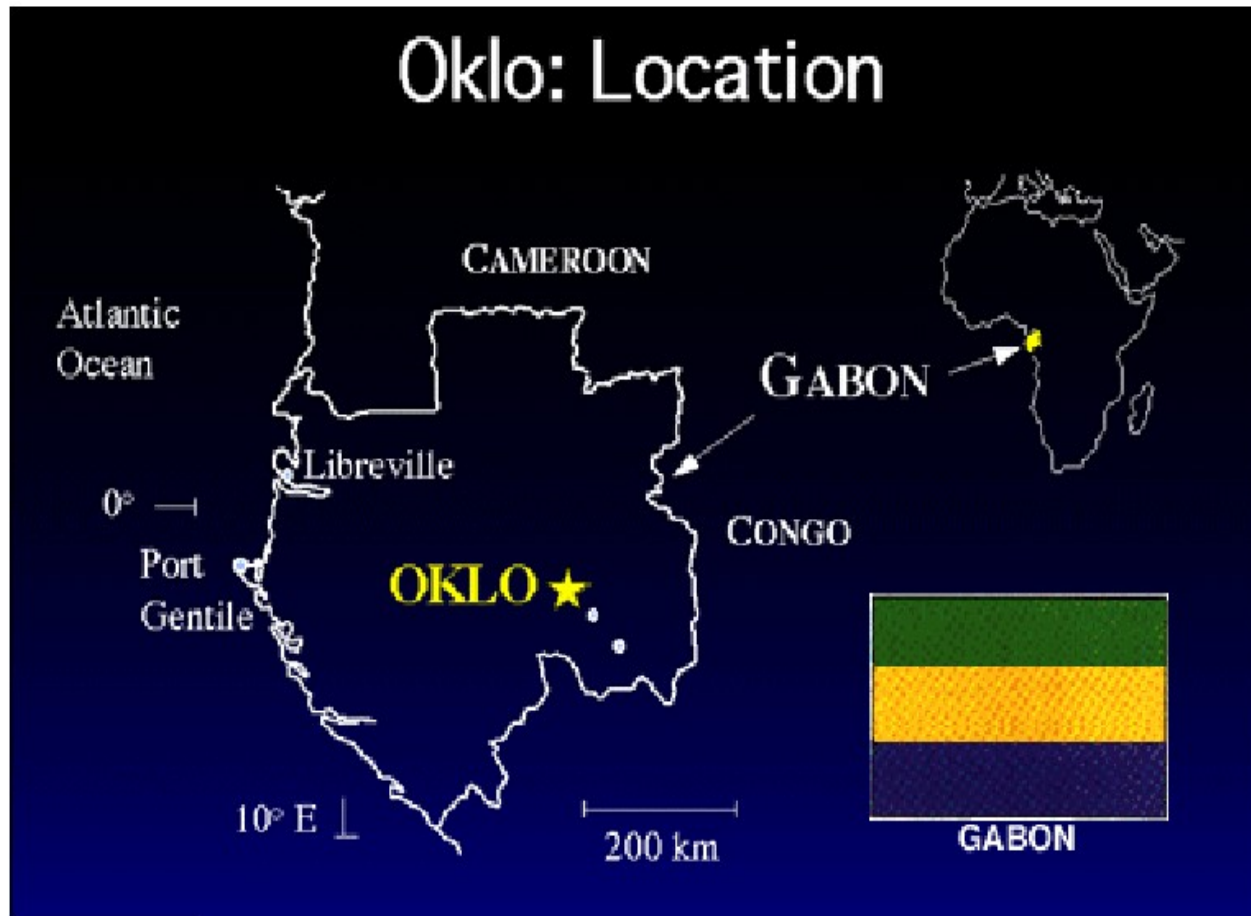


Se controllata, è una enorme sorgente di energia!



Se incontrollata, ha effetti devastanti!

Il Reattore n. 1 del Pianeta



Oklo

Requisiti per un reattore nucleare naturale:

Bassa concentrazione di assorbitori di neutroni

Alta concentrazione di moderatori (acqua)

Massa critica per sostenere la catena

Dove: Gabon

Quando: 1.7 miliardi di anni fa

Quanti reattori: almeno 17

Per quanto tempo: > 1 milione di anni a intermittenza

Potenza: ~ 20 kW_{th}

Consumo: > 6 ton ²³⁵U

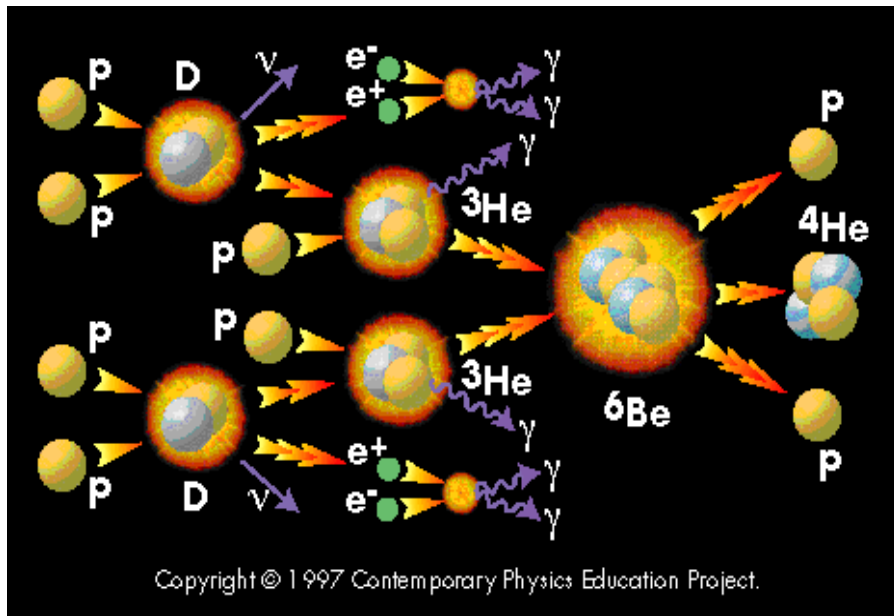
Energia prodotta: come ~ 3 anni di un impianto nucleare

Arricchimento combustibile: circa 3,7% ²³⁵U

Prodotti di Fissione: 5,4 ton + 1,5 ton Pu (mobilità pochi cm in 1,5 miliardi di anni)

Fusione Nucleare

2 nuclei leggeri → 1 nucleo più pesante



Nel Sole:

564,5 ton H → 560 ton He
4,5 ton → energia irradiata

ogni secondo

Fusione: Condizione di Ignizione

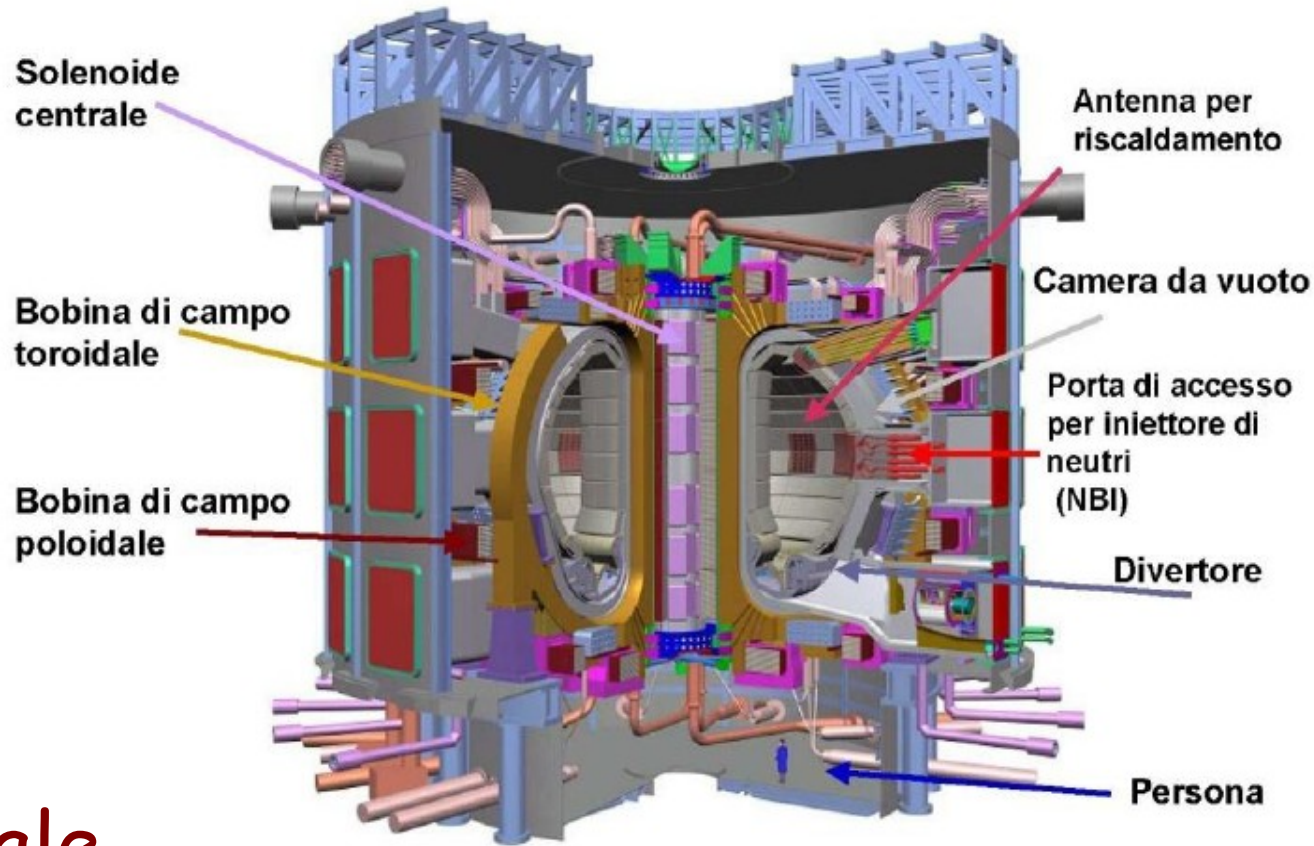
- Temperatura, densità e tempi di confinamento sufficienti a tenere la reazione in equilibrio (bilancio energetico = zero)

Servono ~ 200 milioni di gradi

Con meno di ~ 50 milioni di gradi la reazione si spegne rapidamente

Progetto ITER

UE, Cina, Giappone, Corea, Russia, USA



Il sole
artificiale

Tempi Possibili

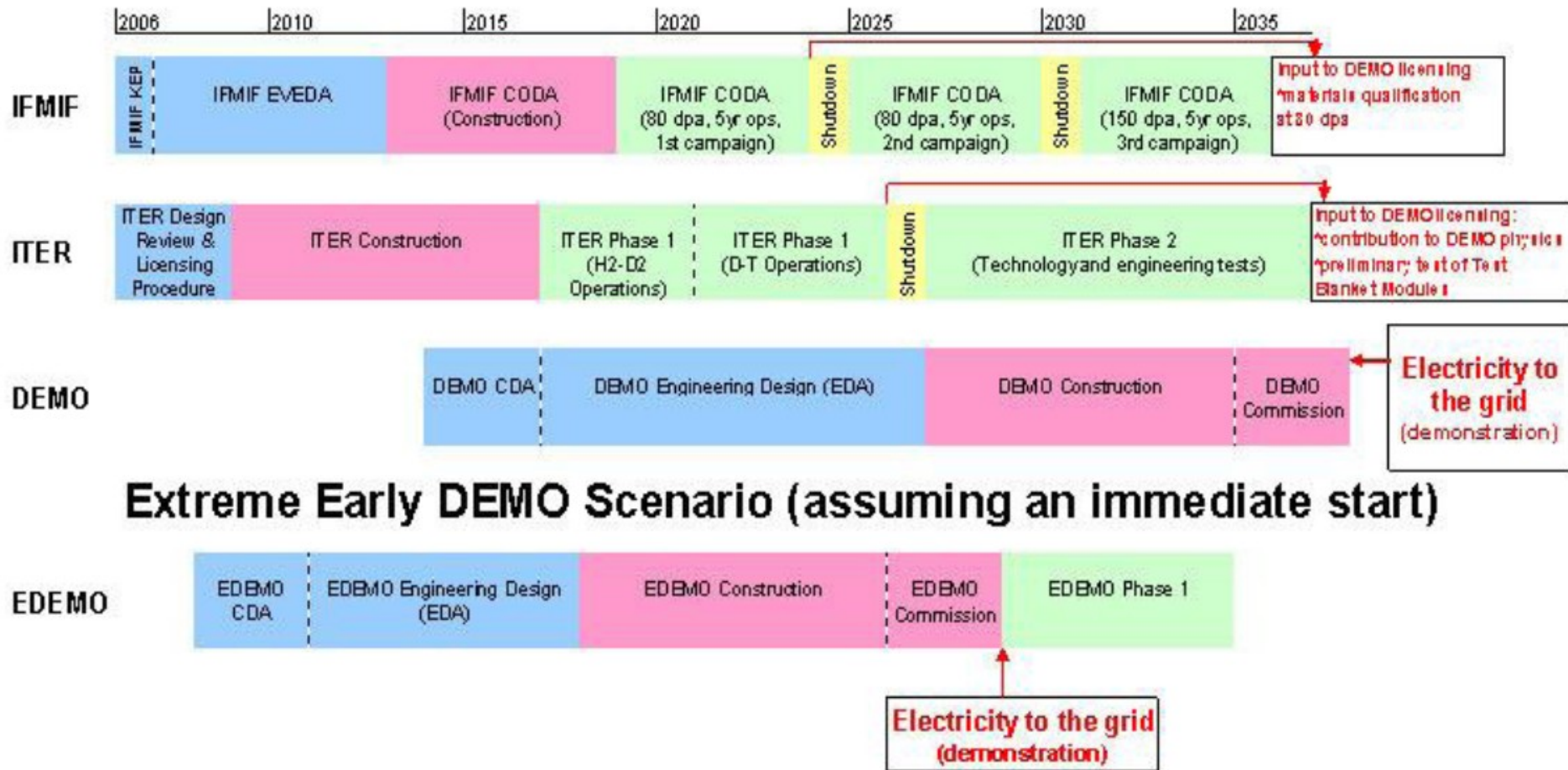
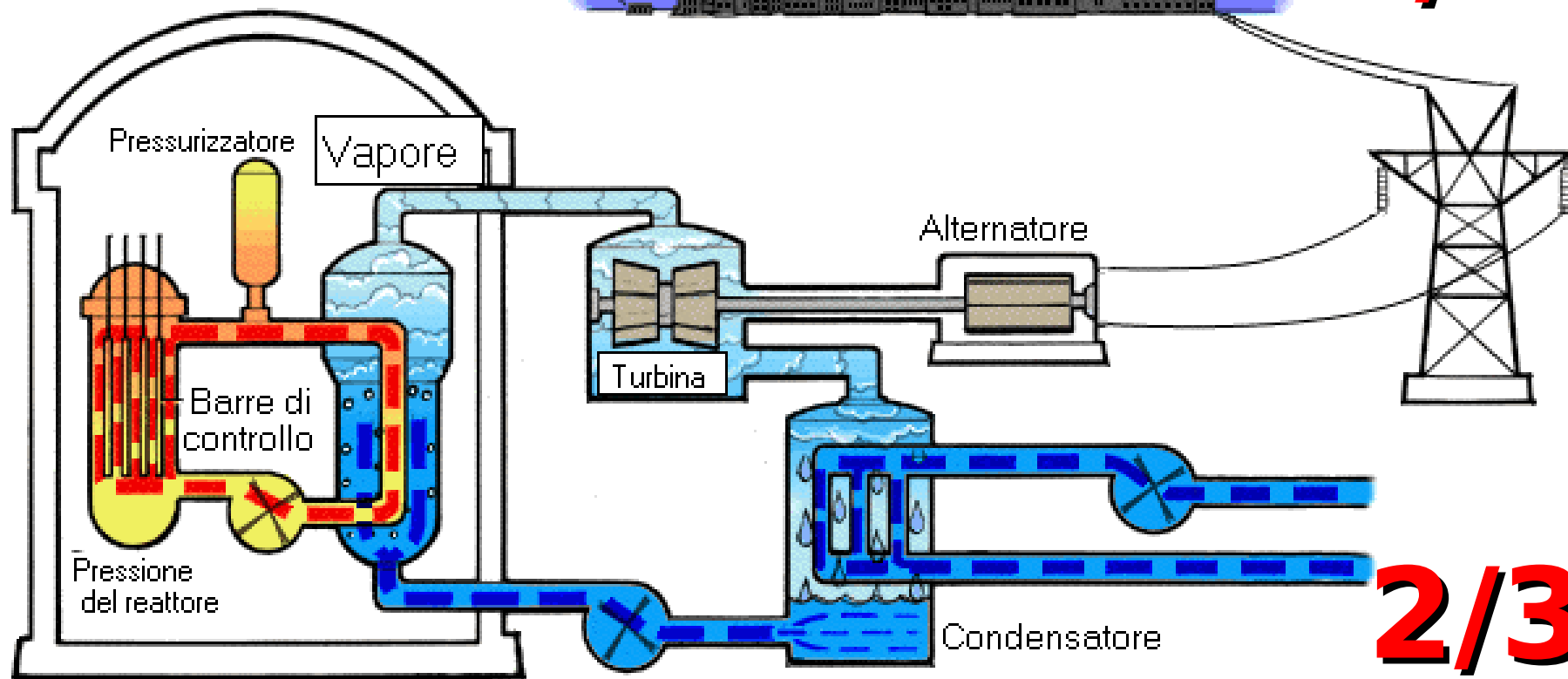


Fig.7.3: Programma di riferimento (*fast track*) e scenario “Early DEMO” della fusione.

Contenitore del nocciolo



1/3



2/3

DEMO
MODE





2/3

1/3



Impianti Nucleari di 2 Gen.

La prima generazione erano reattori sperimentali

Seconda generazione:

- reattori termici (PWR, BWR, LWGR, CANDU)
- reattori veloci (autofertilizzanti)

Tutte le centrali attualmente in funzione e quasi tutte quelle in costruzione sono di seconda generazione

Reattori Veloci

Non possono usare acqua (contiene idrogeno che rallenta i neutroni)

Usano metalli liquidi (es. sodio)

Di fatto hanno funzionato poco e male (SuperPhenix) e soprattutto a costi non competitivi

Reattori Termici

439 reattori in funzione nel mondo:

370 GW (16% elettrico, 6% totale, 30% el. Europa)

Tipologia:

- 22% ad acqua bollente (BWR)
- 66% ad acqua pressurizzata (PWR)
- 6% ad acqua pesante (CANDU)
- 3% moderati a grafite (LWGR) → Chernobyl
- 3% raffreddati a gas (AGR, CGR)

Impianti Nucleari di 3+ Gen.

EPR (European Pressurized Reactor)

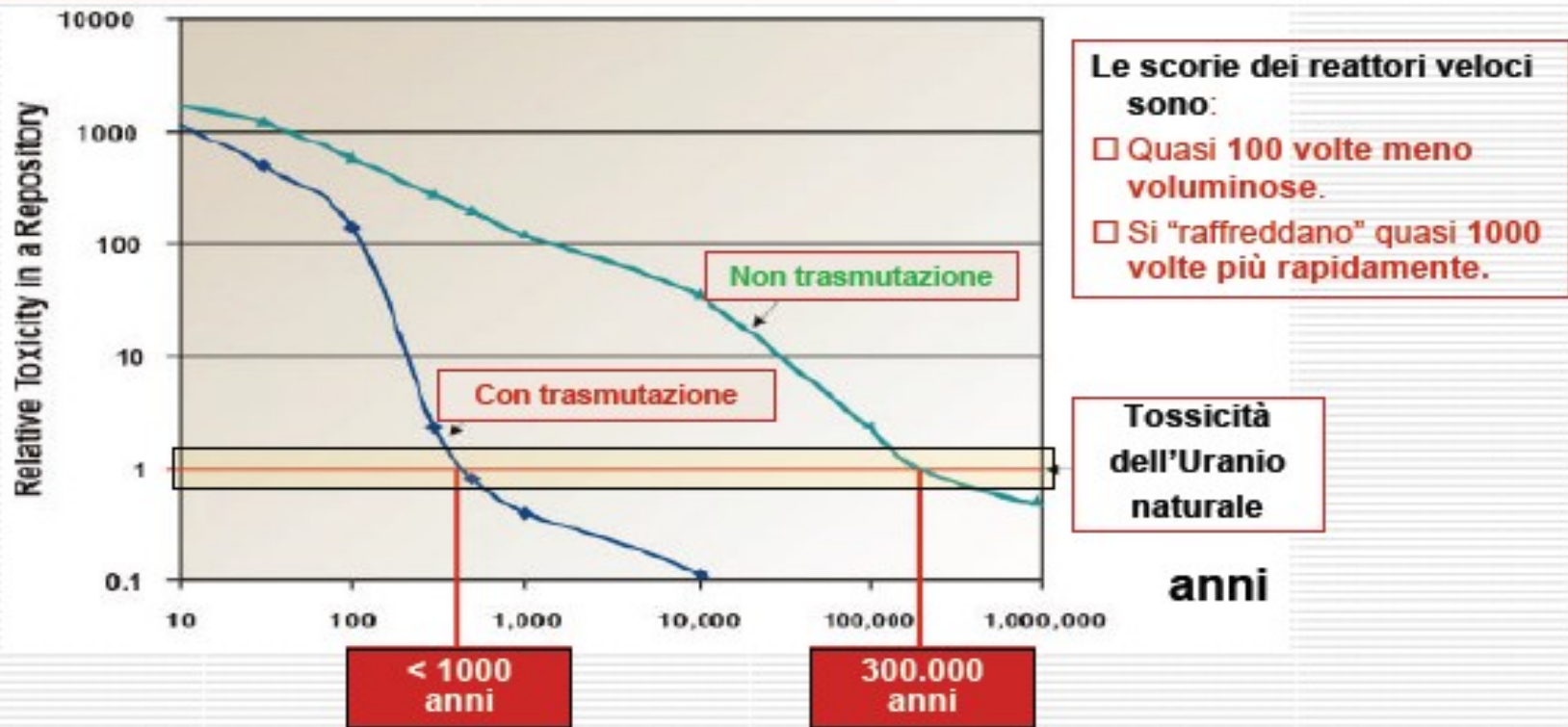
- ++ sicurezza
 - ++ vita
 - + efficienza (37%)
 - + risparmio uranio
 - + riduzione scorie a lunga vita
-
- nessun reattore EPR in funzione ancora
 - due in costruzione con tempi che si allungano (> 10 anni)
 - costi ancora non definitivi (criteri di sicurezza rivisti qualche mese fa)

OLKILUOTO 3 : 1600 MWe + 2700 MW termici
~ energia elettrica di una città ~ 2 M di abitanti



Quarta Generazione → ~30 Anni

Riguardo le scorie.



Una centrale da 1 GWe nel corso di un anno

	a Carbone	Nucleare
--	-----------	----------

Combustibile	1-2 milioni di ton 600 carri al giorno	100 ton 5 carri all'anno
Rifiuti	in loco e sparsi	tutti in loco
Quantità totale	7.000.000 ton	30 ton
Pericolosi	-----	2 ton
Da trattare	250.000 ton	20 ton
Rifiuti radioattivi	50 GBq	2 GBq

Scorie dei combustibili fossili: poco tossiche ma ingestibili e delocalizzate

Scorie nucleari: altamente tossiche ma gestibili (nel breve periodo) e localizzate

Datazioni

Volevo raccontare anche qualcosa sulle datazioni ma sono andato lungo ...



Temo di avervi massacrato un po'
troppo ...

Se anche non siete riusciti a
rimanere svegli:

Grazie per l'attenzione e la
pazienza