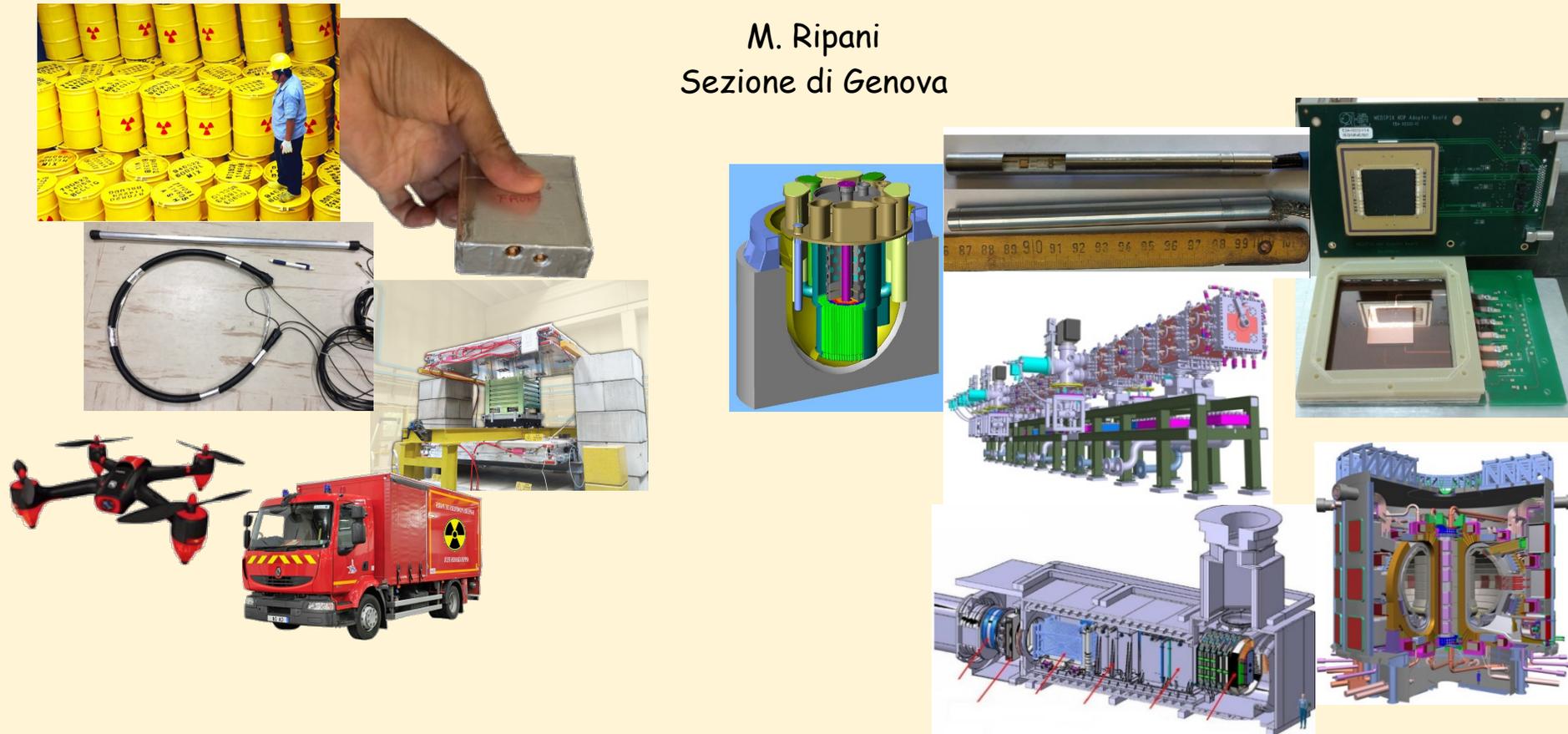
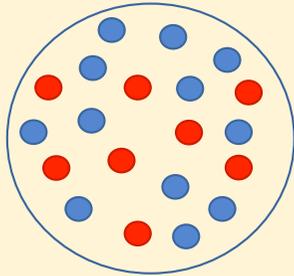


IL PROGETTO INFN_E: APPLICAZIONI DI RIVELATORI E TECNOLOGIE NEL CAMPO DELL'ENERGIA

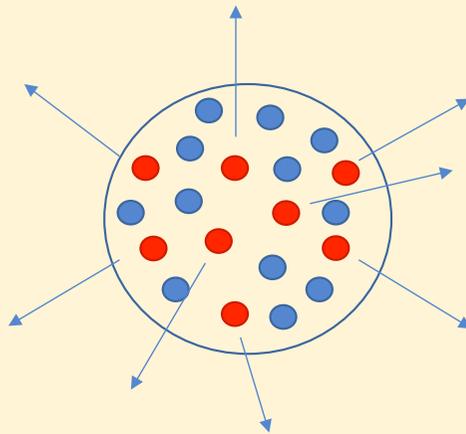
M. Ripani
Sezione di Genova



Il nucleo dell'atomo



- Protoni (carica elettrica positiva)
- Neutroni (no carica elettrica)



Cariche elettriche con lo stesso segno si respingono



I neutroni fanno da «colla» che tiene insieme il nucleo
(si chiama «forza nucleare forte»)

Più il nucleo è grande, più ha bisogno di neutroni

Per es., l'Ossigeno ha 8 protoni e 8 neutroni

Il Piombo più abbondante in natura ha 82 protoni e 126 neutroni

Ma esiste anche Piombo con 124 e 125 neutroni → «isotopi»

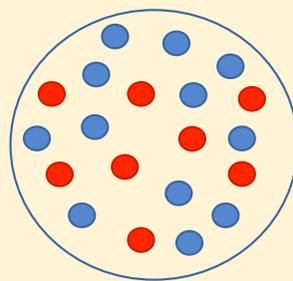
La radioattività



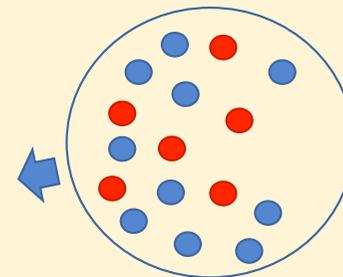
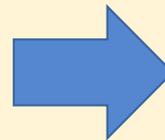
Certi nuclei atomici sono «instabili», cioè tendono a rompersi, liberando energia



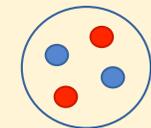
Decadimento alfa (α)



Uranio 238 (92 protoni, 146 neutroni)



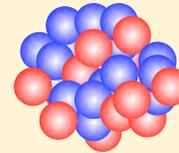
Torio 234 (90 protoni, 144 neutroni)



Elio (2 p, 2 n)

Elementi e isotopi

esistono molte specie *nucleari*

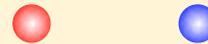


vengono catalogate con due numeri:

Z = numero di protoni, che determina la chimica



A = numero totale di nucleoni (protoni + neutroni)



- ciascuna specie nucleare è univocamente determinata dai suoi A e Z
- circa 1700 combinazioni (A, Z) note (specie)
- circa 300 stabili (minima energia: equilibrio)
- le rimanenti: radioattive (instabili)

alcune specie decadono in *secondi...*

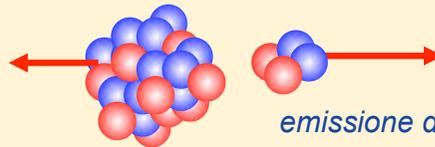


...altre in *milioni (o anche miliardi) di anni*

I tipi principali di radioattività



alfa



emissione di una particella alfa (= nucleo di Elio)



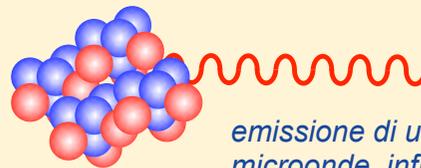
beta



un neutrone si trasforma in protone (oppure un nucleo con N neutroni e Z protoni si trasforma in un nucleo con $N-1$ neutroni e $Z+1$ protoni, emettendo un elettrone (particella beta) e un antineutrino)



gamma



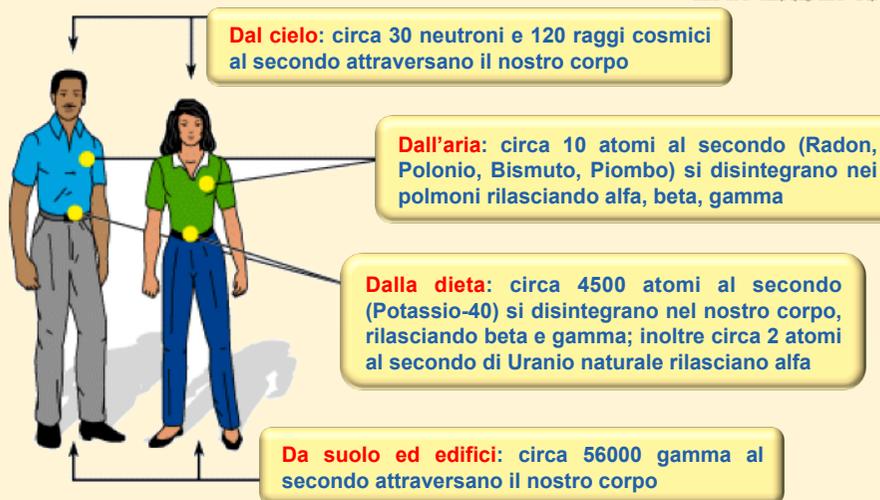
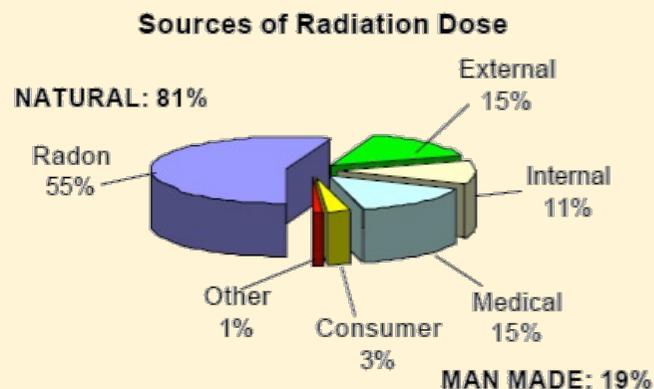
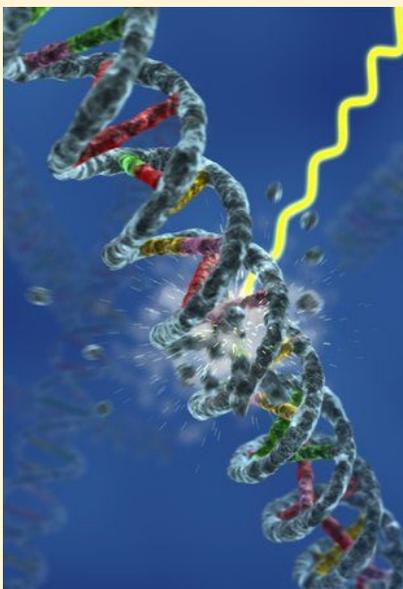
emissione di un raggio gamma (=fotone, come le onde radio, microonde, infrarosso, visibile, ultravioletto, raggi X: unica differenza la lunghezza d'onda o se preferite, l'energia)

Molto spesso, radiazione alfa e beta portano a formare nuclei in stati eccitati che decadono per radiazione gamma

Le radiazioni fanno parte della nostra vita sulla terra, assieme ai raggi cosmici

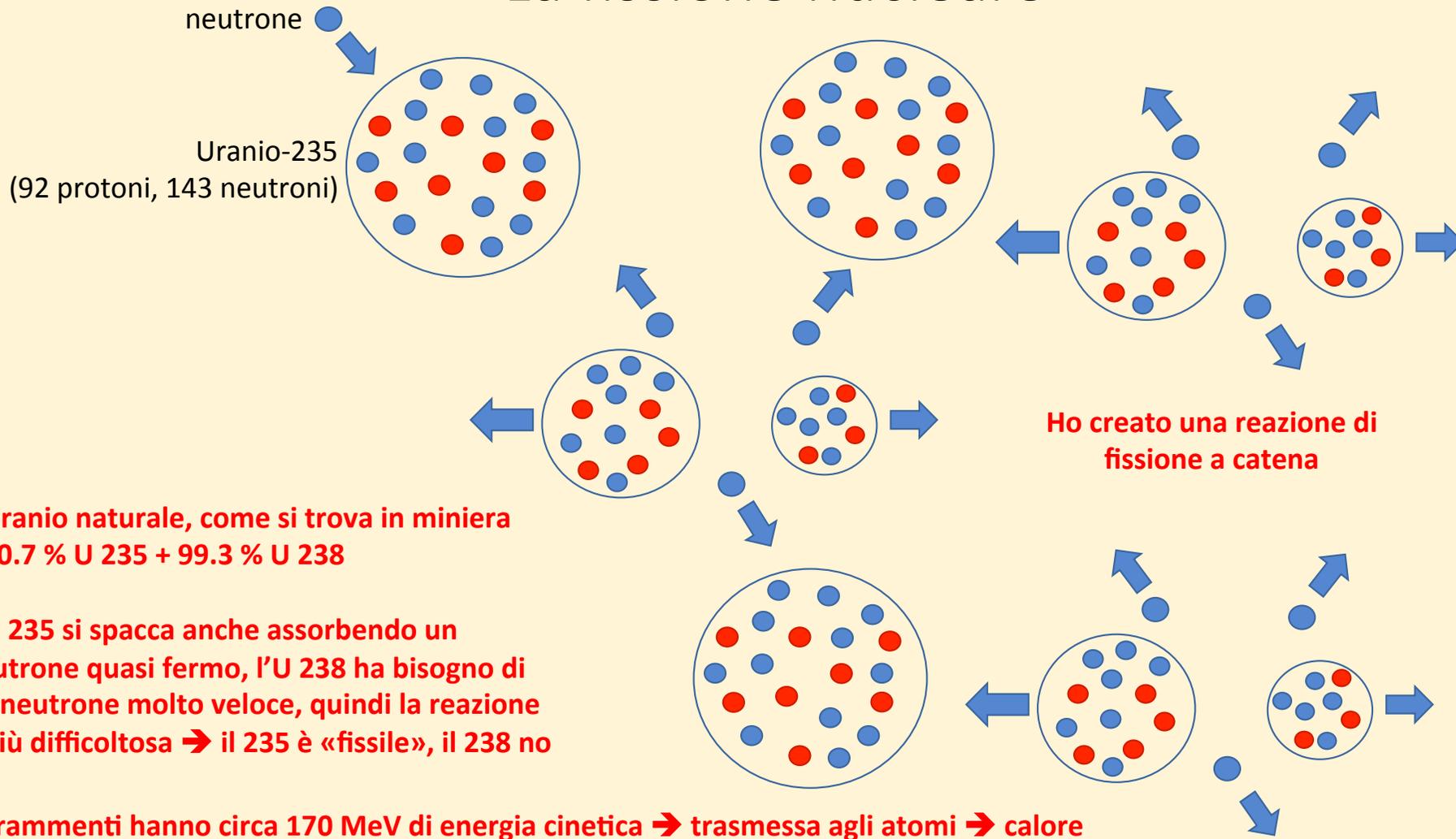
Le radiazioni intorno a noi

possono spezzare il DNA e causare mutazioni probabilmente gioca un ruolo nell'evoluzione

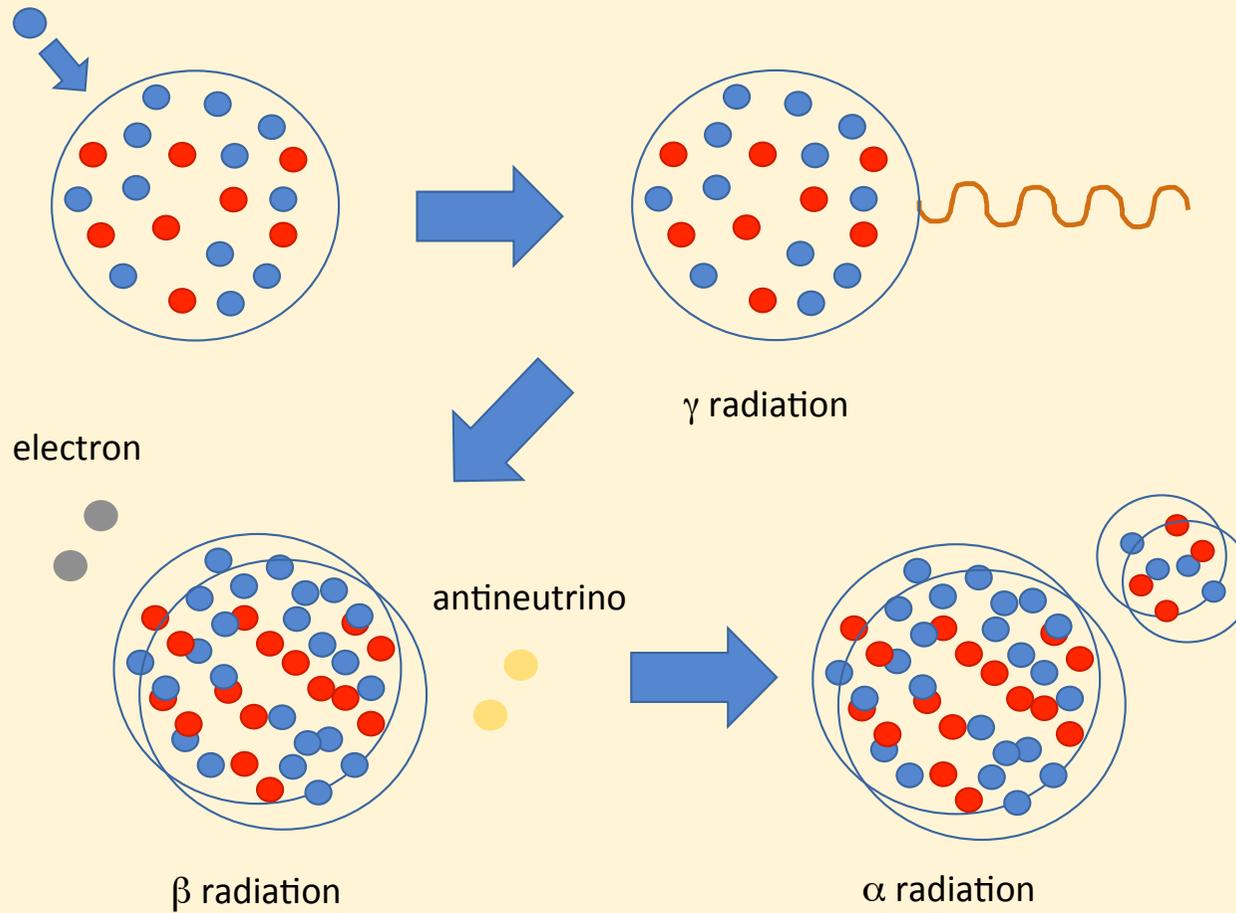


≈ 6000 disintegrazioni di Potassio-40 (^{40}K) al secondo per m^3 di acqua marina

La fissione nucleare



La cattura radiativa del neutrone



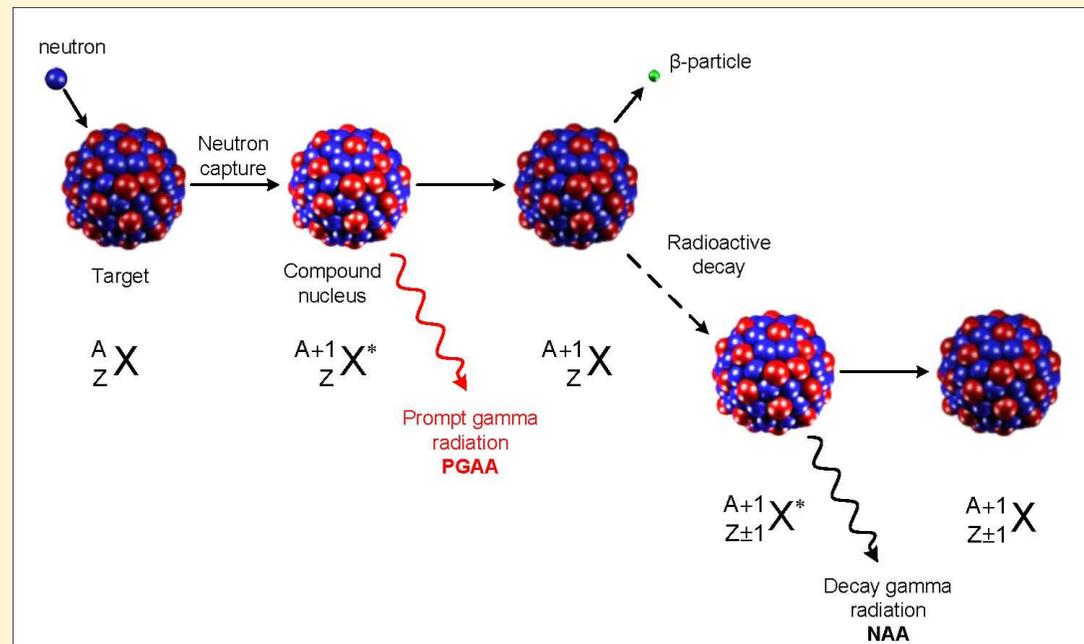
Energia nucleare e prodotti radioattivi

I due nuclei risultanti dalla fissione sono chiamati «**frammenti o prodotti di fissione**» → la maggior parte è **radioattiva**

Inoltre, abbiamo visto che è l'Uranio 235 che produce la fissione. **L'Uranio 238** invece con alta probabilità assorbe il neutrone, dando origine a una **catena di trasformazioni che produce elementi più pesanti, tra cui il Plutonio** (che non esiste in natura)

Il Plutonio però può anche dare origine a fissione, quindi può essere usato come combustibile

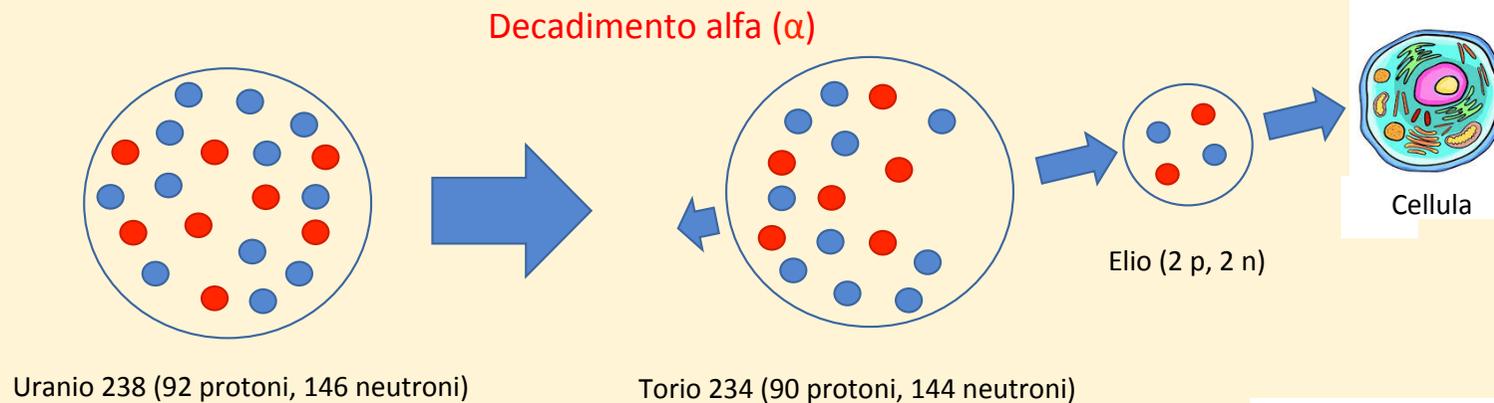
Anche altri materiali dell'impianto, sottoposti al flusso intenso di neutroni, possono diventare radioattivi (attivazione)



Effetti della radioattività nel tempo

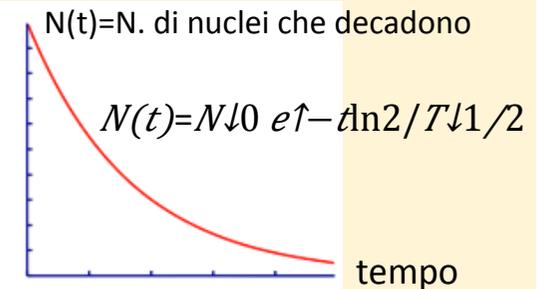
Il funzionamento del reattore crea sostanze radioattive, sia nel combustibile, sia nei materiali intorno

Radioattività vuol dire che «ogni tanto» un nucleo si disintegra, emettendo particelle dotate di energia (cinetica o elettromagnetica) → La radioattività può essere pericolosa per l'ambiente e gli esseri umani a causa del danno cellulare (per *esposizione diretta* oppure se le *sostanze vengono respirate o ingerite*)



«Ogni tanto» può essere un tempo che va da molto breve (frazioni di secondo) a molto lungo (anche milioni di anni).

Ogni sostanza radioattiva ha un tempo caratteristico $T_{1/2}$ in cui la sua radioattività si dimezza. Questo tempo può essere appunto molto breve o molto lungo.



Formazione degli elementi radioattivi nei reattori nucleari



Pu = Plutonio, che è fissile, quindi è un combustibile

U=Uranio

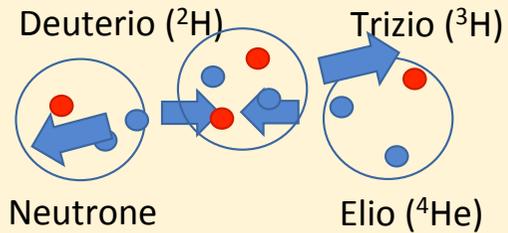
Molti Transuranici hanno tempi di dimezzamento molto lunghi

 Transuranici = Oltre l'Uranio

Prodotti di fissione Un neutrone viene catturato dall'U 238

Nucleo	T _{1/2} (anni)
Pu-239	24,000
Pu-242	3.7x10 ⁵
Am-241	433

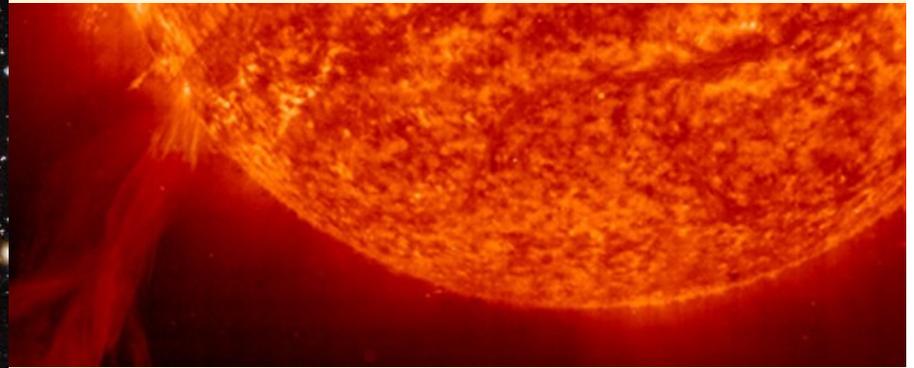
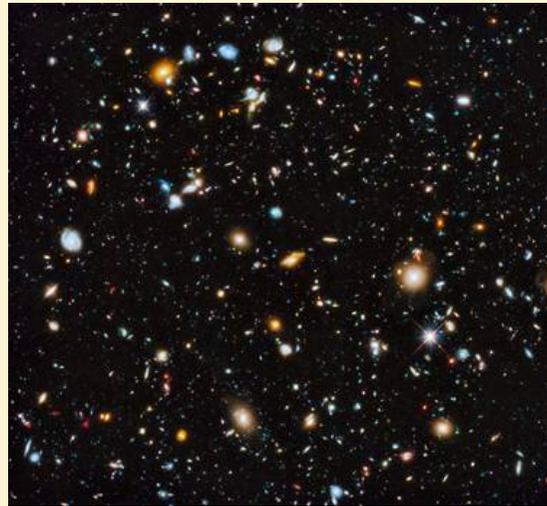
Fusione Nucleare



questa è detta **Fusione Nucleare**: è il meccanismo che alimenta le stelle
(in realtà non con D-T, per es. il sole funziona con la fusione $p+p \rightarrow D+e^++\nu$)

I neutroni hanno circa 14 MeV di energia cinetica → trasmessa per es. ad acqua intorno all'impianto → calore

I nuclei di Elio hanno circa 3 MeV → scaldano un po' il plasma



Non produce *direttamente* frammenti radioattivi
(però il Trizio è radioattivo e i neutroni attivano i materiali dell'impianto)
→ può fornire energia più pulita

al momento non sappiamo come costruire reattori che mantengano la reazione stabile a lungo

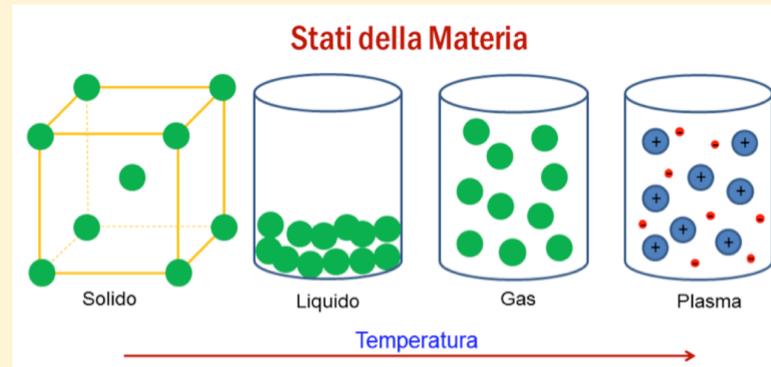
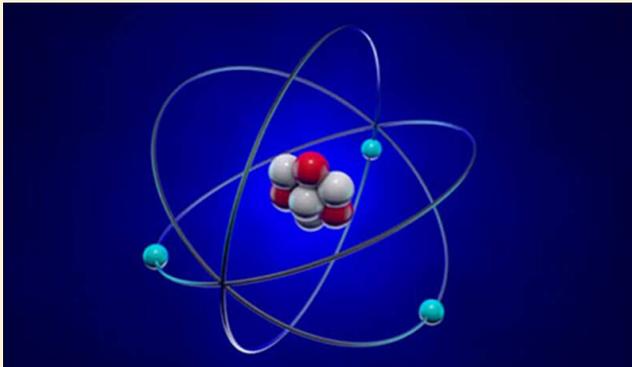


Ricerche in corso (JET, ITER, DEMO) non a breve termine

Condizioni per la fusione

Perché la fusione avvenga, **occorre superare la repulsione Coulombiana tra nuclei (positivi) → bisogna raggiungere temperature molto alte** → Devo scaldare il gas di Deuterio e Trizio a temperature di parecchi milioni di gradi

A queste temperature così alte, si crea un **plasma** → **un gas di elettroni e nuclei che si muovono ciascuno per conto loro**: si dice che gli atomi vengono *ionizzati* (questo avviene già a decine o centinaia di migliaia di gradi)



Inoltre, **il plasma è così caldo che va intrappolato (confinato) in modo da non toccare le pareti dell'impianto** → confinamento magnetico, oppure confinamento con laser di alta potenza («inerziale»)

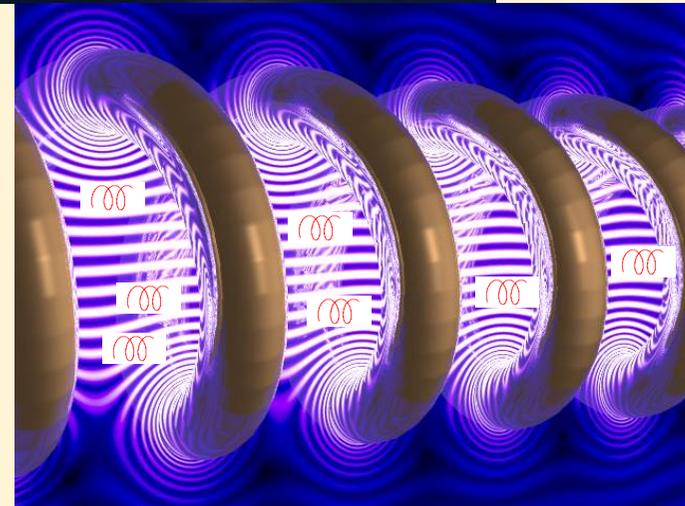
Il plasma

Anche una potente scarica elettrica può creare il plasma (è visibile perché emette luce)



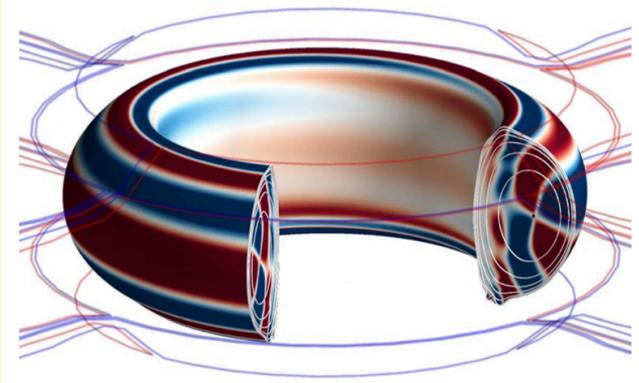
Per intrappolarlo, si possono usare forti campi magnetici

Dentro un campo magnetico, cariche elettriche positive e negative del plasma si muovono a spirale



Il reattore a fusione

Ma funziona meglio intrappolarlo dentro una ciambella (*tokamak*)



токамак, an acronym of either: "**т**ороидальная **к**амера с **м**агнитными **к**атушками"

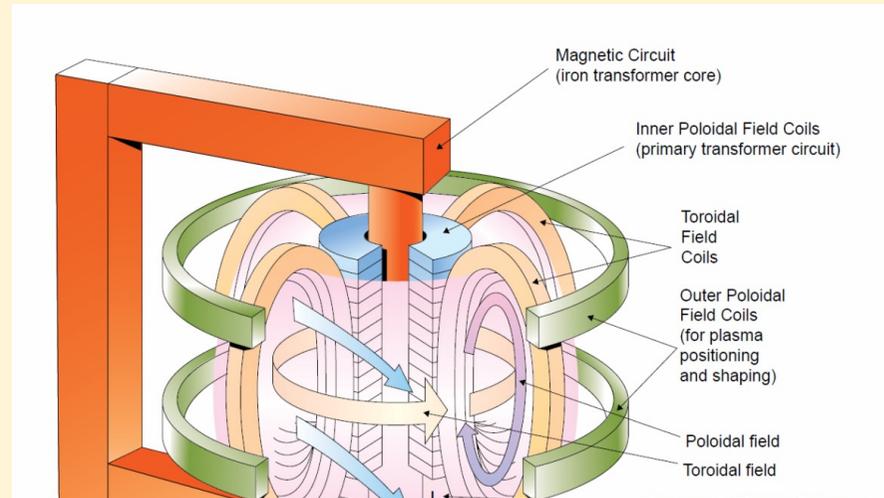
(*toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami*)

toroidal chamber with magnetic coils

or

"**т**ороидальная **к**амера с **а**ксиальным магнитным **п**олем" (*toroidal'naya kamera s aksial'nym magnitnym polem*)

toroidal chamber with axial magnetic field

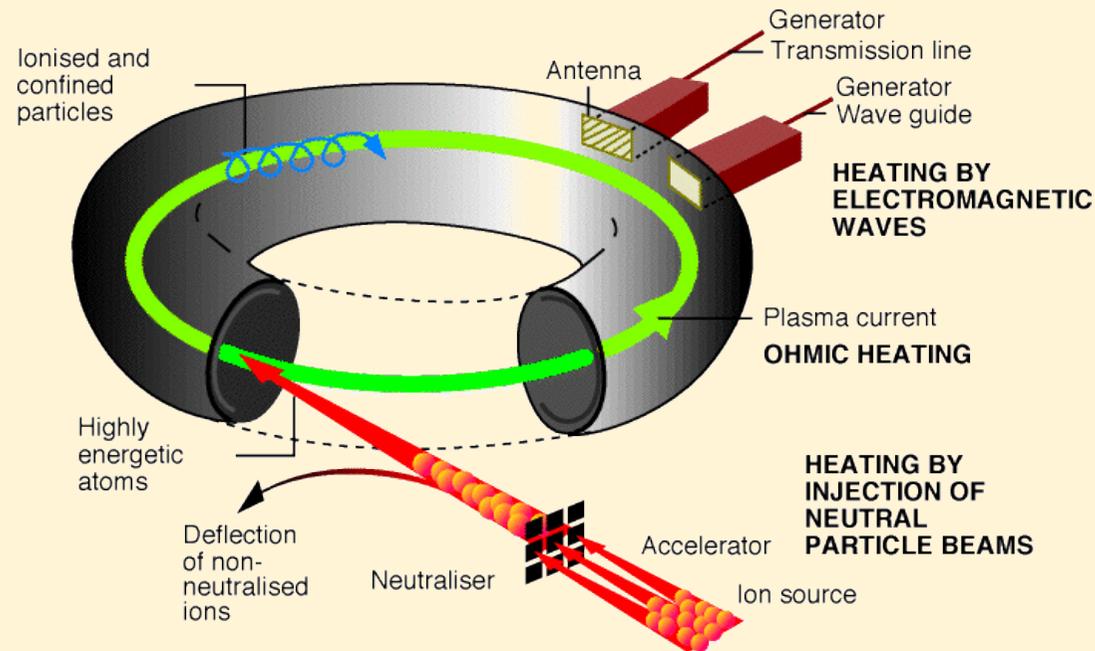


Ed eccone una reale...



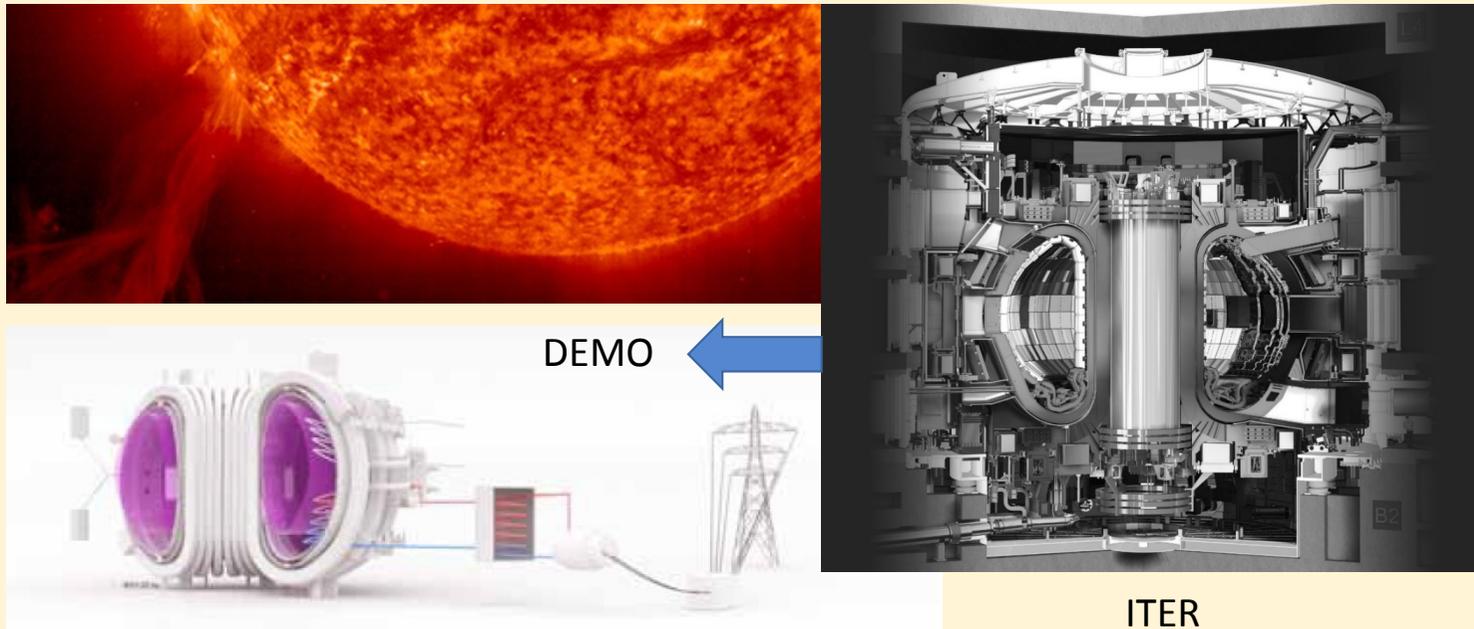
Riscaldamento del plasma

- T_{plasma} nei tokamak per fusione: **$\sim 100-150 \times 10^6$ gradi** per innescare la reazione di fusione $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$ (*)
- riscaldamento del plasma si ottiene principalmente per **effetto Ohm, RF e iniezione di atomi neutri** (Neutral Beam Injectors, NBI)



(*) L'impianto cinese Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST) ha stabilito un nuovo record mondiale nel 2021 raggiungendo una temperatura del plasma di 120 milioni di °C per 101 secondi e 160 milioni di °C per 20 secondi

La strada della fusione



La scaletta attuale per ITER...

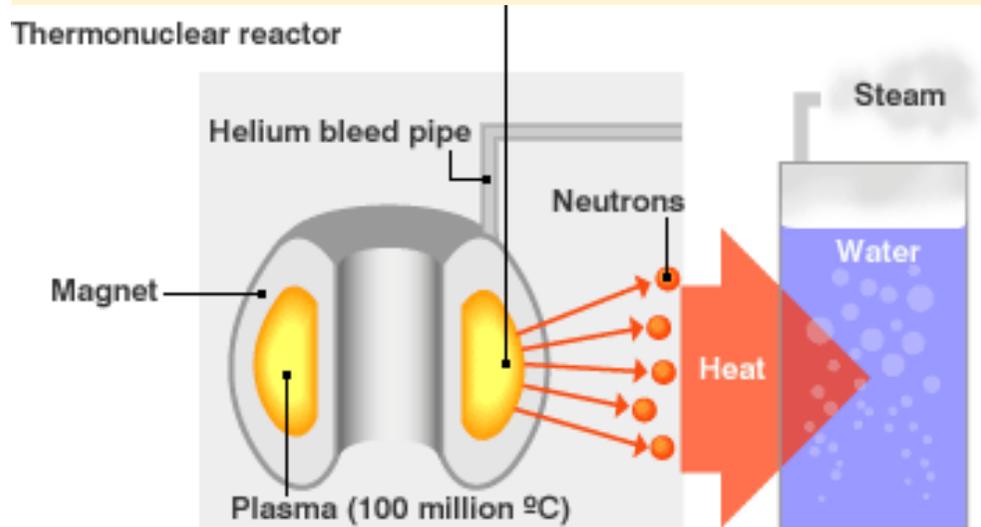
ST PAUL-LEZ-DURANCE, Francia (16 June 2016)

Concludendo uno sforzo biennale dell'Organizzazione ITER e delle sette Agenzie nazionali per stabilire un nuovo programma di riferimento, il Consiglio ITER ha approvato il Programma integrato aggiornato per il progetto ITER, che identifica la **data del primo plasma come dicembre 2025**

...e per DEMO

Nella strategia europea DEMO è l'unico passaggio tra ITER e una centrale elettrica a fusione commerciale. Per raggiungere **l'obiettivo della dimostrazione dell'elettricità da fusione entro il 2050**, la **costruzione di DEMO deve iniziare al più tardi all'inizio degli anni 2030**, per consentire l'inizio delle operazioni all'inizio degli anni 2040

Il problema dei materiali

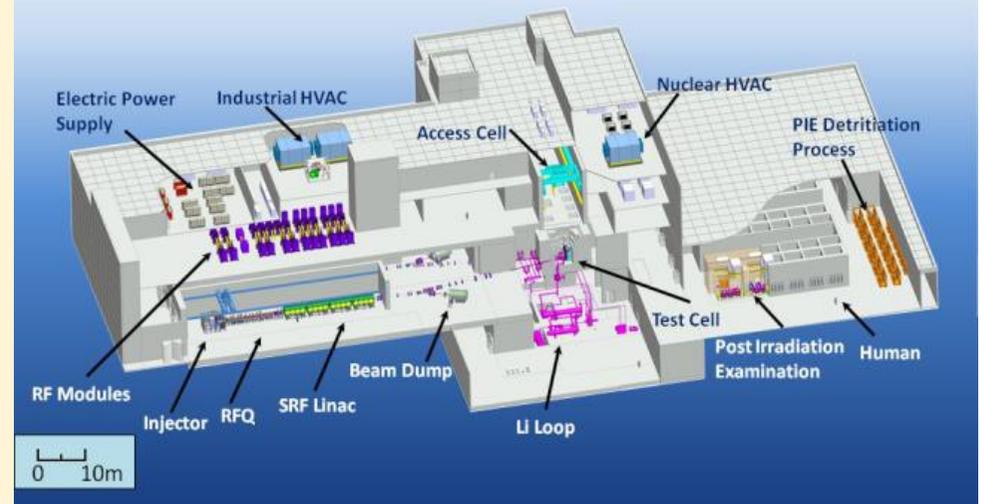


I materiali del reattore sono sottoposti a un grande stress (bombardamento di neutroni) → è necessario testarli

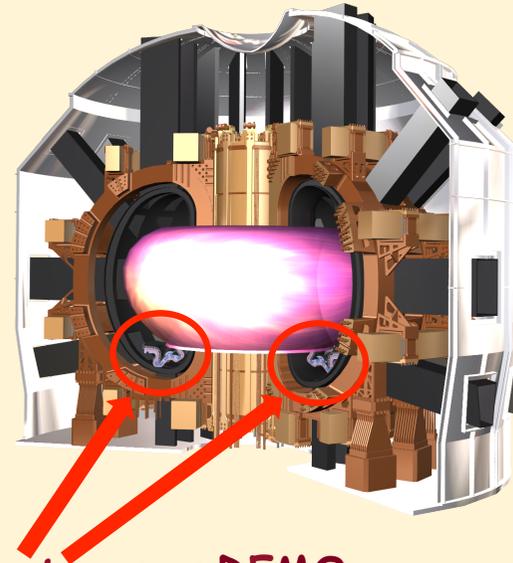
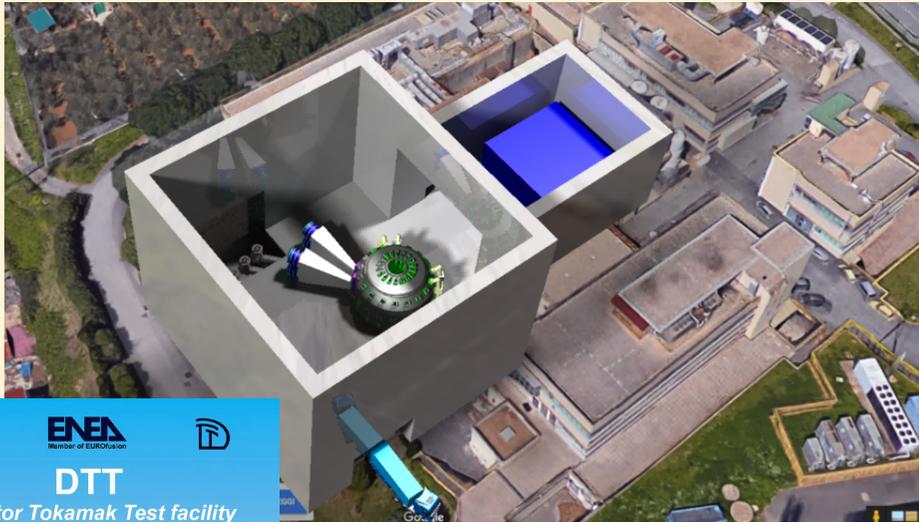
- IFMIF è un potente acceleratori di ioni deuterio (deutoni, 40 MeV e 125 mA → Potenza di fascio 5 MW !)
- I deutoni colpiscono un bersaglio di Litio liquido, producendo neutroni con intensità e spettro di energia simile a quello del reattore a fusione, permettendo di testare determinati materiali (es. tipi di acciaio)

I Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN hanno sviluppato tecnologie per IFMIF

IFMIF: International Fusion Materials Irradiation Facility

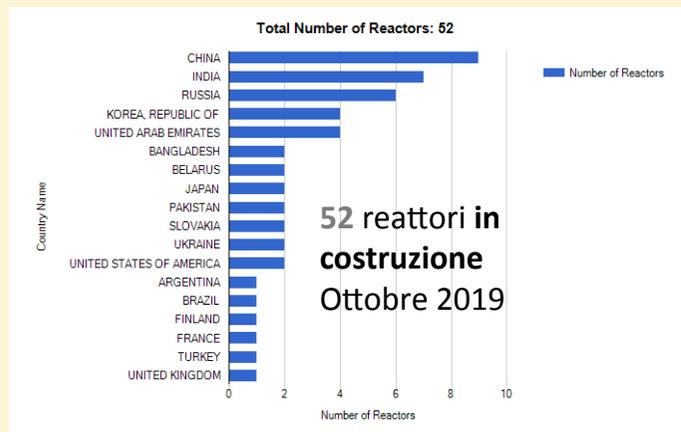
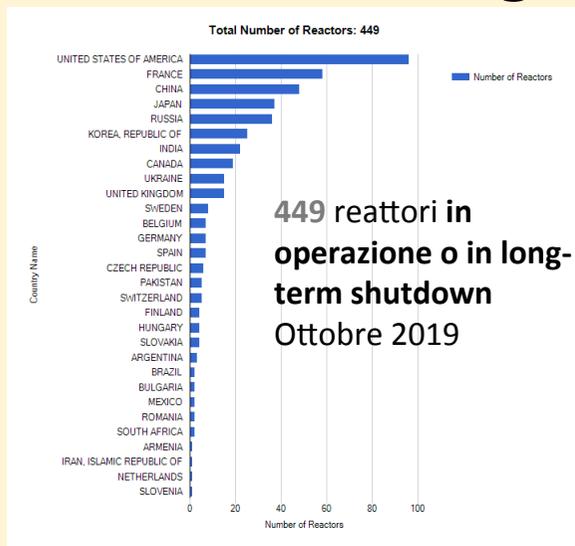


Il Divertor Tokamak Test (DTT) a Frascati

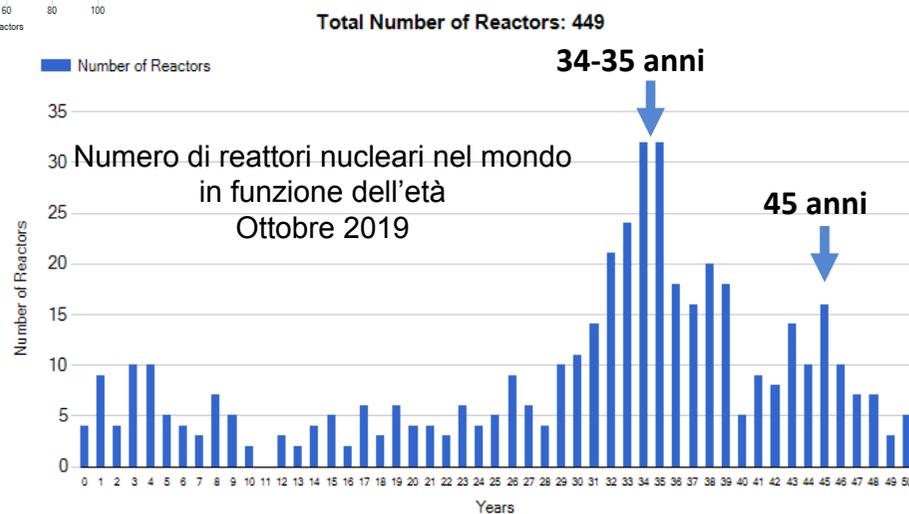
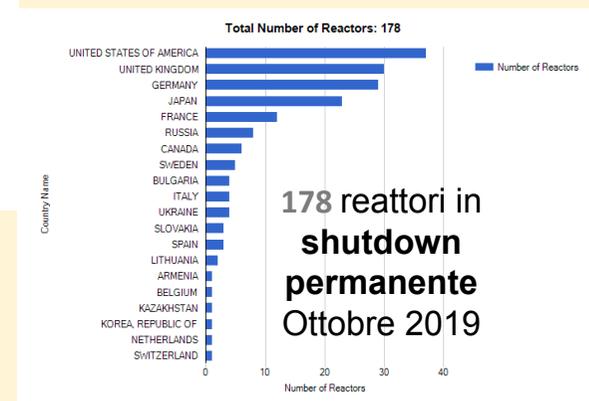


- Obiettivo: sviluppo del *divertore* per DEMO
- Divertore: il «tubo di scappamento» della fusione, assorbe gas che sfuggono al confinamento e elementi contaminanti che si accumulano durante la fusione
- ITER userà un approccio "tradizionale" che potrebbe non funzionare a DEMO
- oltre al divertore, varie possibili soluzioni adatte a DEMO potranno essere studiate a DTT

Energia nucleare da fissione nel mondo

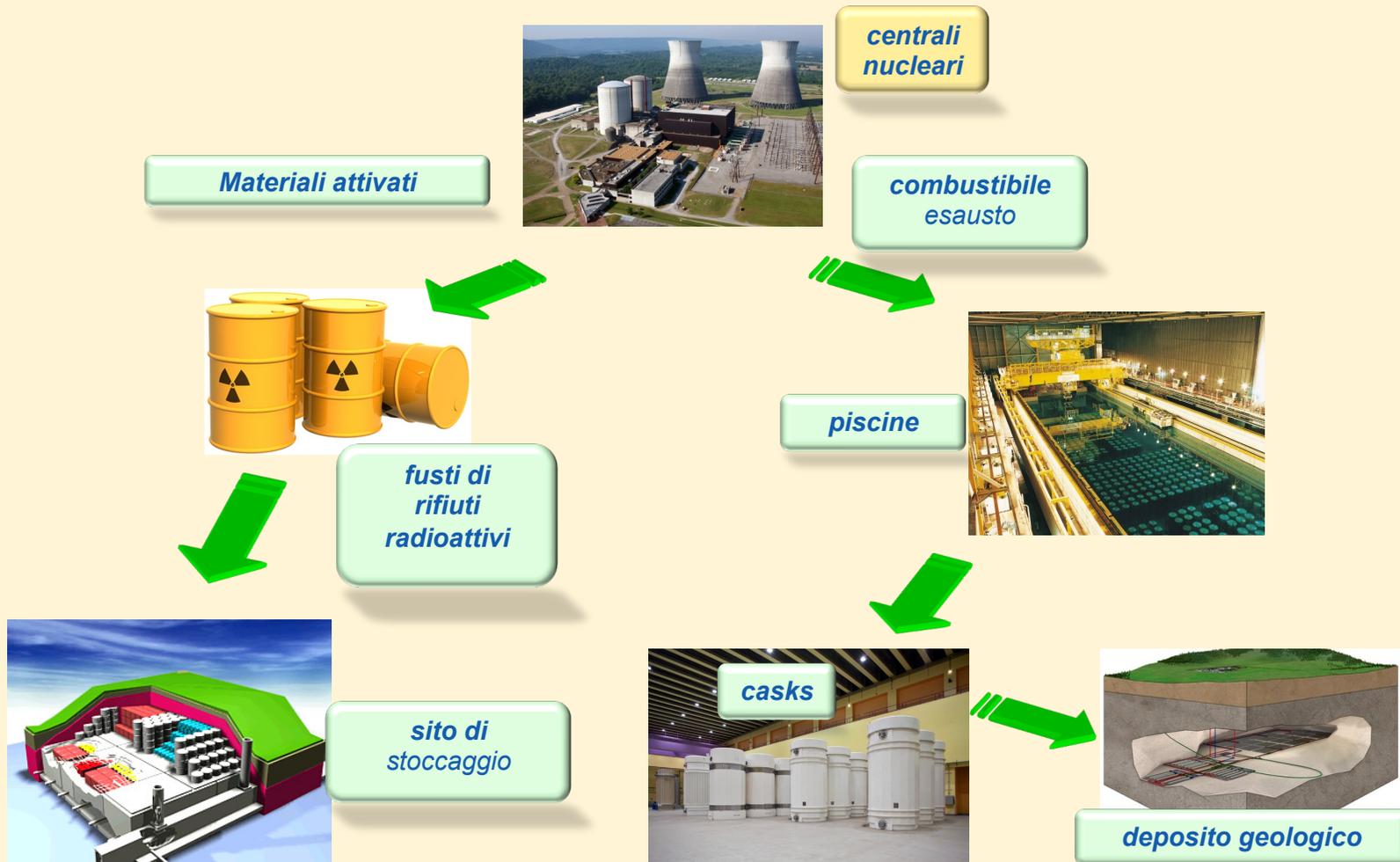


Fonte:
[IAEA Power Reactor Information System \(PRIS\)](#)



Alcuni paesi hanno deciso il "phase-out" (Belgio, Germania, Spagna, Svizzera)
Altri considerano 40 anni come tempo operativo massimo
(...anche se, nell'attuale situazione, c'è qualche ripensamento...)

Produzione di rifiuti radioattivi (dalla fissione)



Inventario mondiale dei rifiuti radioattivi

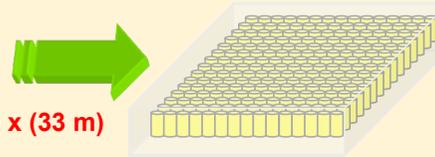
IAEA 2015

(Net-Enabled radioactive Waste Management DataBase, NEWMDB)

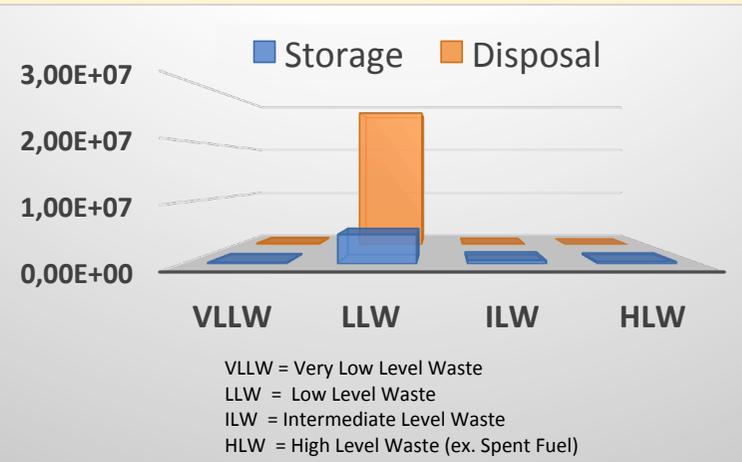
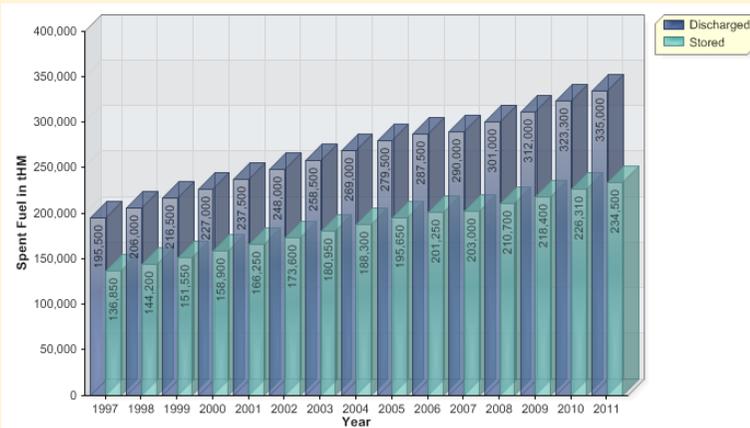
Totale \approx 33 milioni di m³

Equivalente a

(1 km) x (1 km) x (33 m)



Accumulo combustibile esaurito nel tempo (tonnellate)



Classificazione dipende da

- Attività
- Vita media radionuclidi
- Produzione di calore

Gestione dei rifiuti radioattivi



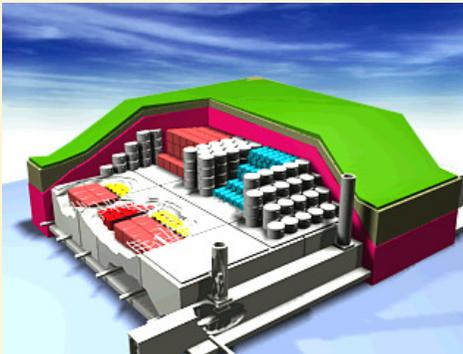
La situazione attuale

3 soluzioni principali per stoccaggio/smaltimento:

Stoccaggio "ad interim"



Smaltimento in depositi di superficie o semiinterrati (VLLW, LLW, ILW)



Smaltimento in depositi profondi o "geologico" (ILW, HLW)



Olkiluoto, Finlandia, il progetto più avanzato nel mondo



Disattivazione e gestione rifiuti



La richiesta → offrire strumentazione innovativa per il monitoraggio delle fasi di stoccaggio e trasporto



migliorare la gestione dei rifiuti nelle sue varie fasi



minimizzare l'intervento umano diretto (incidenti, errori umani, azioni criminali)



Migliorare la capacità di prevenire, individuare e intervenire su errore umano, incidente, furto, sabotaggio, accesso non autorizzato, trasferimento illegale, altre possibili azioni criminali



metodi convenzionali

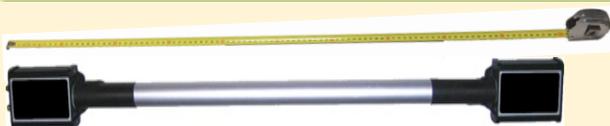
nuove tecnologie



Il progetto strategico INFN-E(nergia)

Monitoraggio radiologico

**contatore gamma unidimensionale
compatto a basso costo**



sviluppato con il supporto di
Ansaldo Nucleare



test in collaborazione con SOGIN (società italiana incaricata dello smantellamento degli impianti nucleari italiani e della realizzazione del Deposito Unico Nazionale)

Tecnologie sviluppate ai
Laboratori Nazionali del Sud
dell'INFN

**contatore di neutroni termici
compatto a basso costo**



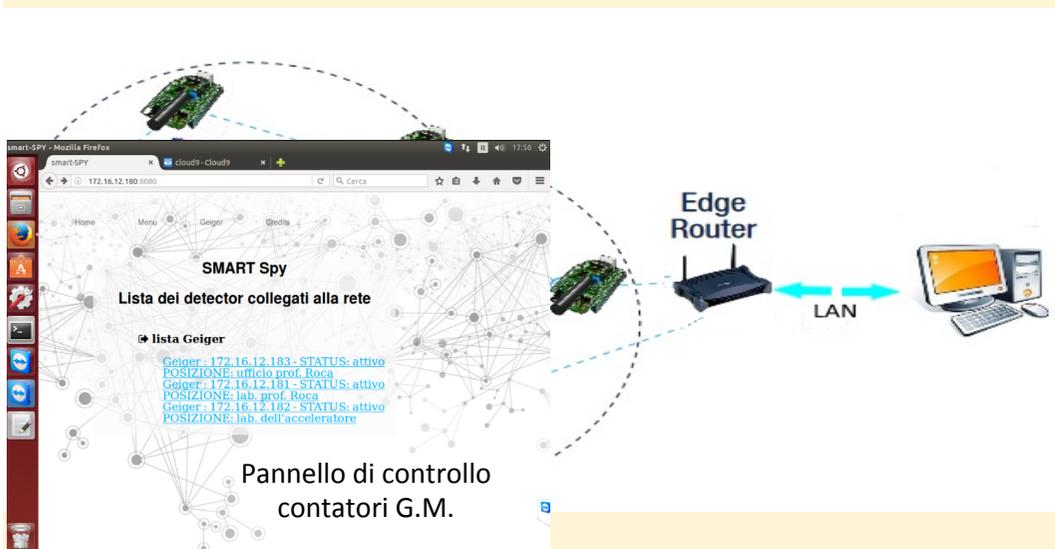
parzialmente supportato
dal JRC Ispra



test in collaborazione
con ZWILAG,
Svizzera



Sensori intelligenti e comunicazione senza fili



Smart_spy:
Rete di monitoraggio radiologico

Tecnologie sviluppate nella Sezione di Napoli dell'INFN e dal gruppo dell'Università della Campania

DRAGoN: Drone for Radiation detection of Gammas and Neutrons



Tecnologie sviluppate nelle Sezioni di Padova e Trento Institute for Fundamental Physics and Applications dell'INFN



Ispezioni coi raggi cosmici

Radiography

Top of the atmosphere

Tomography

Top of the atmosphere

a) Multiple Coulomb scattering

b)

c) Multiple Coulomb scattering

(a) **(b)**

μ_{in} μ_{out}

Tecnologie sviluppate nelle Sezioni INFN di Firenze, Napoli (applicazioni non energetiche)

Tecnologie sviluppate nella Sezione di Padova dell'INFN ma anche applicazioni non energetiche presso Università di Brescia, Università di Padova

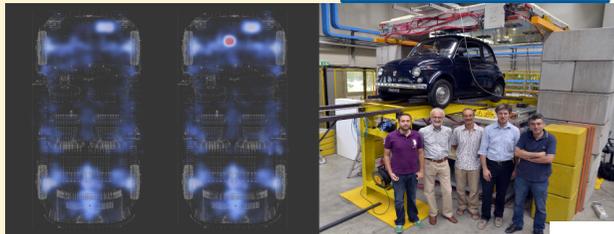
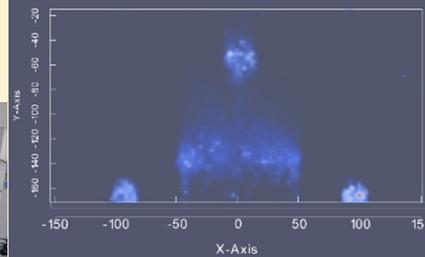
Dalle sorgenti orfane ai contenitori di combustibile esausto

Rivelazione di sorgenti
"orfane" (abbandonate nei rottami)

Test con **blocco di piombo** inserito in contenitore di rottami metallici

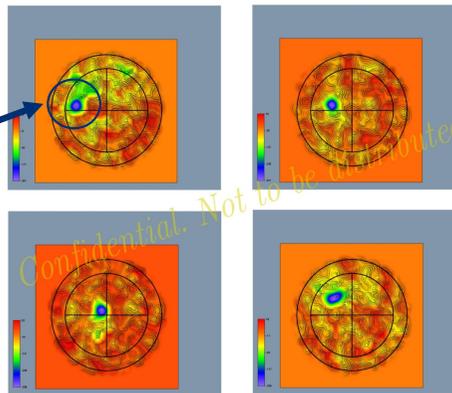


L'immagine rivela la struttura più densa in 5 min di presa dati



Simulazione di 1 hr di esposizione

Viene rivelata la sottrazione di un elemento di combustibile dal contenitore

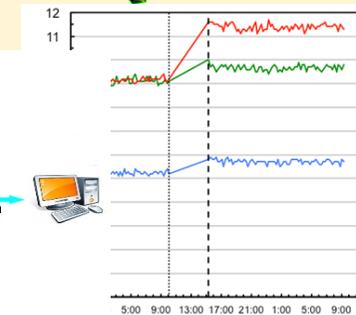
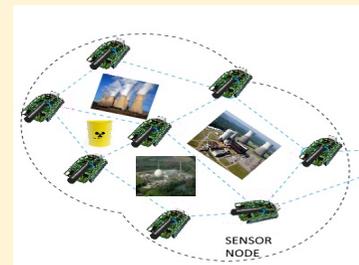


In sintesi: impronta radiologica

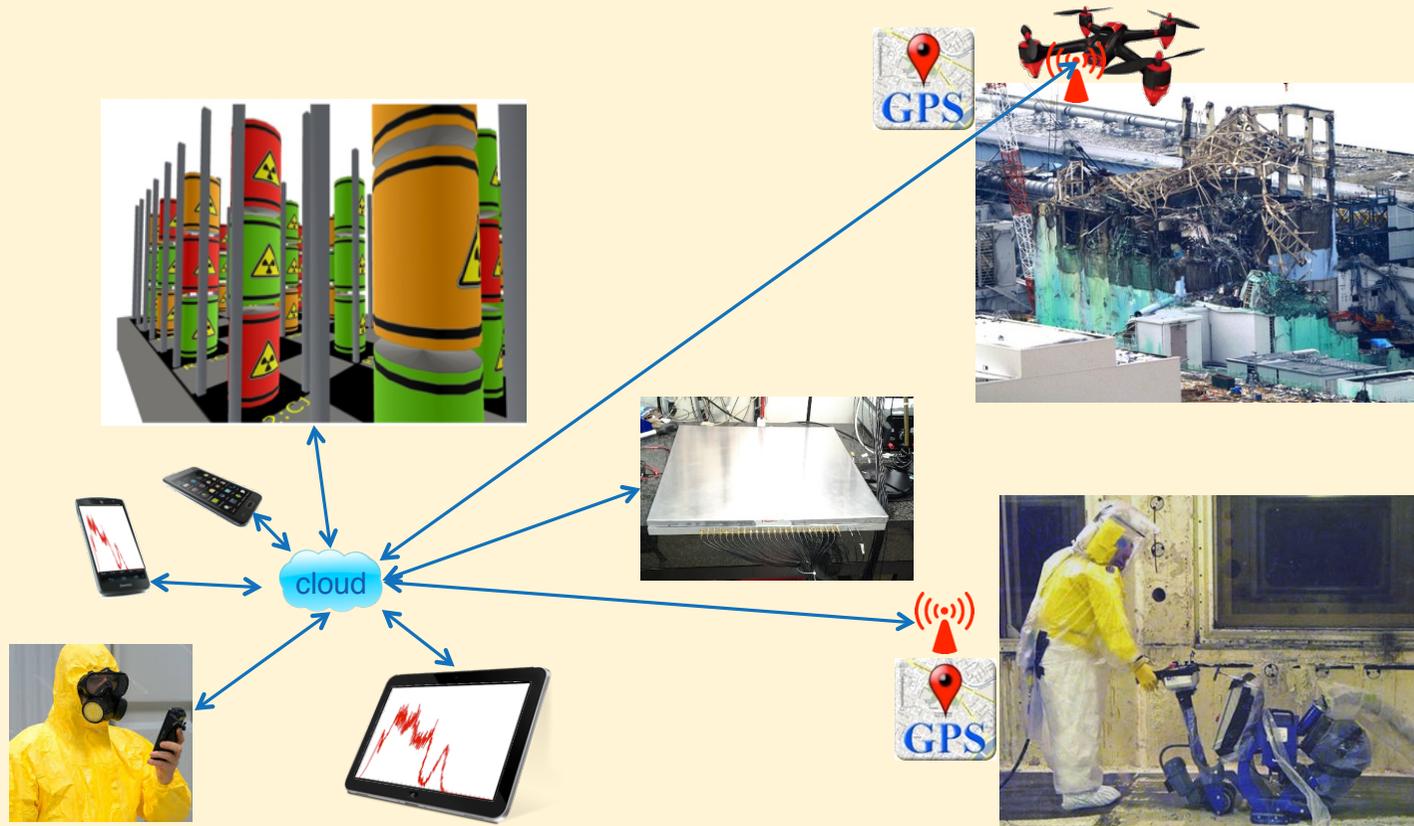
neutroni e gamma forniscono informazioni dall'interno



un cambiamento inatteso dei tassi di conteggio è un'indicazione di anomalia



In prospettiva



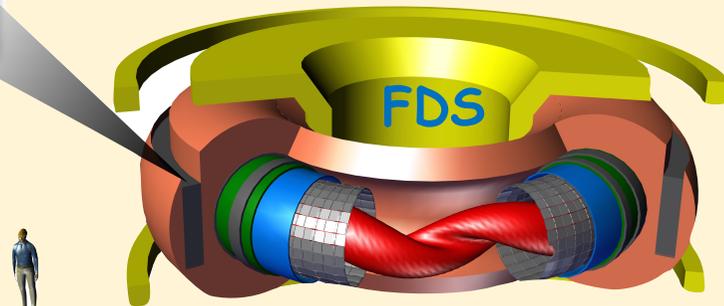
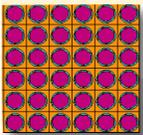
Incenerire invece che seppellire ?

Molti Transuranici hanno tempi di dimezzamento molto lunghi

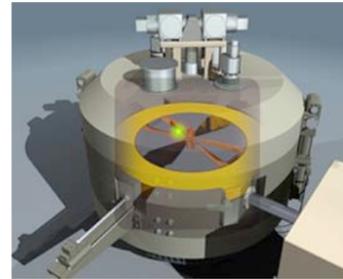
Nucleo	$T_{1/2}$ (anni)
Pu-239	24,000
Pu-242	3.7×10^5
Am-241	433

I neutroni veloci possono distruggere questi isotopi nei cosiddetti reattori veloci, **Accelerator Driven Systems (ADS)** o **Fusion Driven Systems (FDS)**

Combustibile per fissione



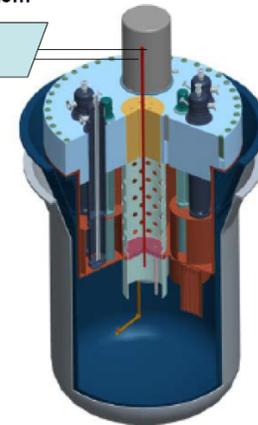
Reattore a fusione



Proton accelerator

Beam transport system

ADS



Subcritical reactor

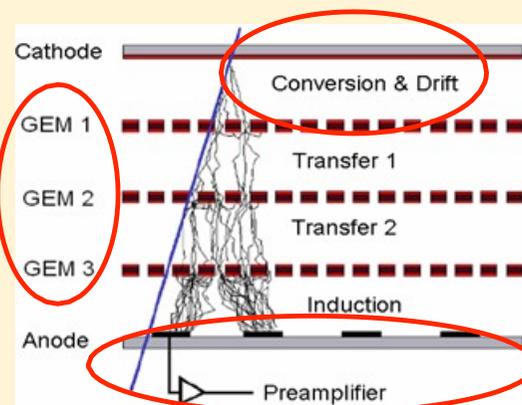
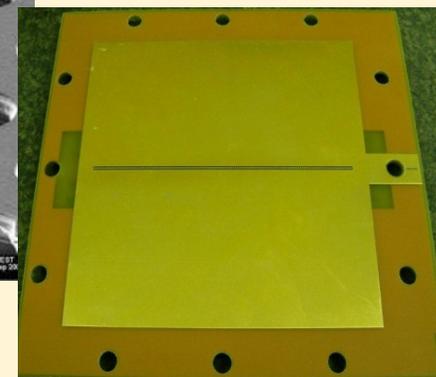
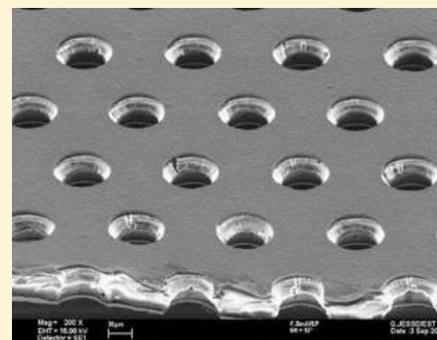
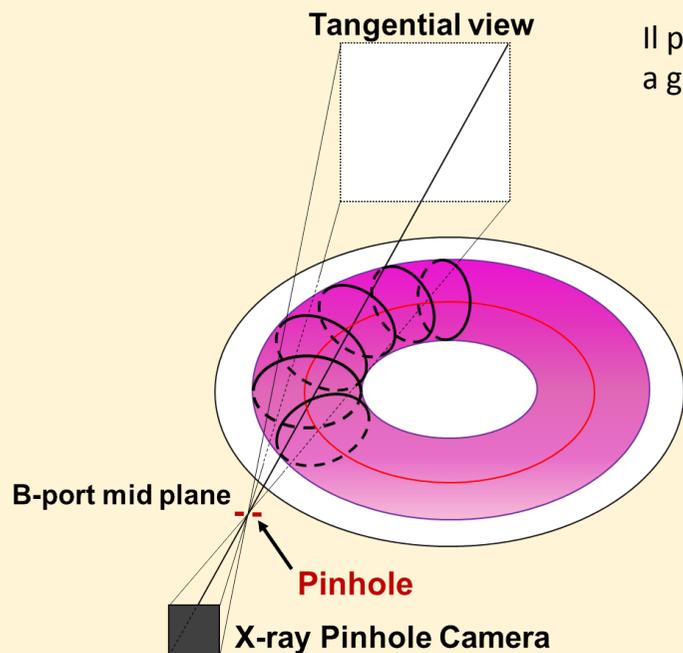
Nell'ADS, una sorgente intensa di neutroni veloci (acceleratore+bersaglio) tiene acceso un reattore veloce e lo controlla → i neutroni veloci distruggono i Transuranici per fissione

Nel FDS, la sorgente intensa di neutroni veloci è fornita da un impianto a fusione

Questa tecnologia è stata studiata dalla Sezione INFN di Genova

Fusione: immagini del plasma con rivelatori a gas

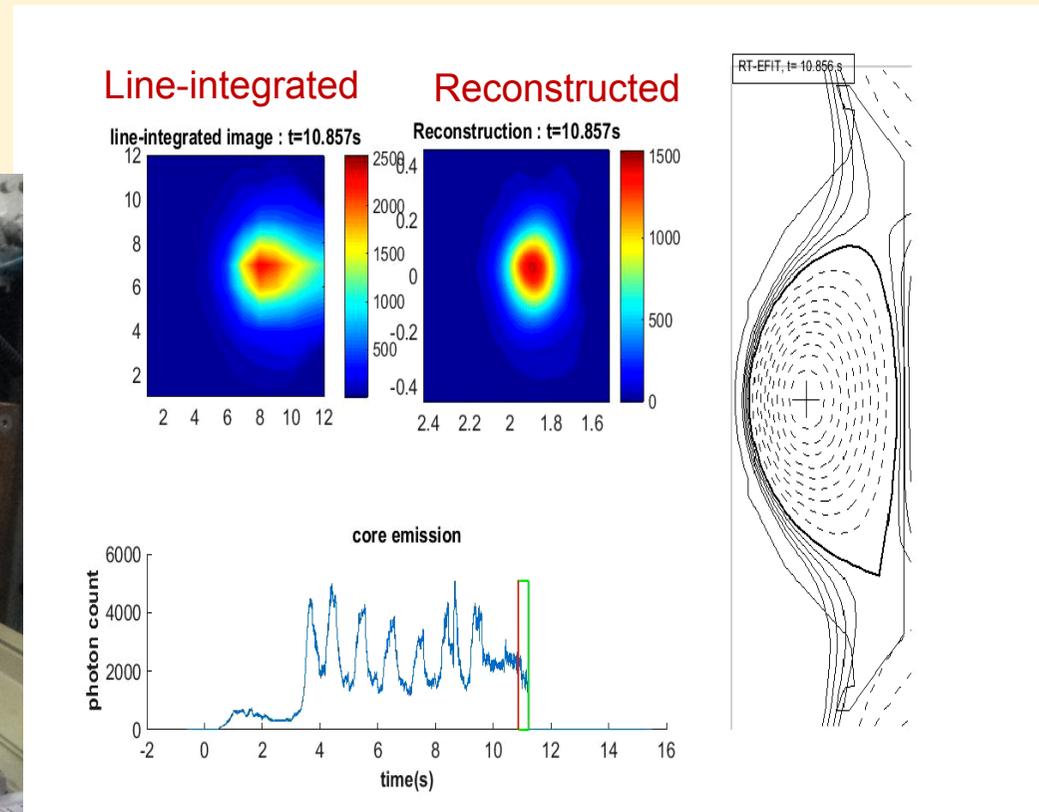
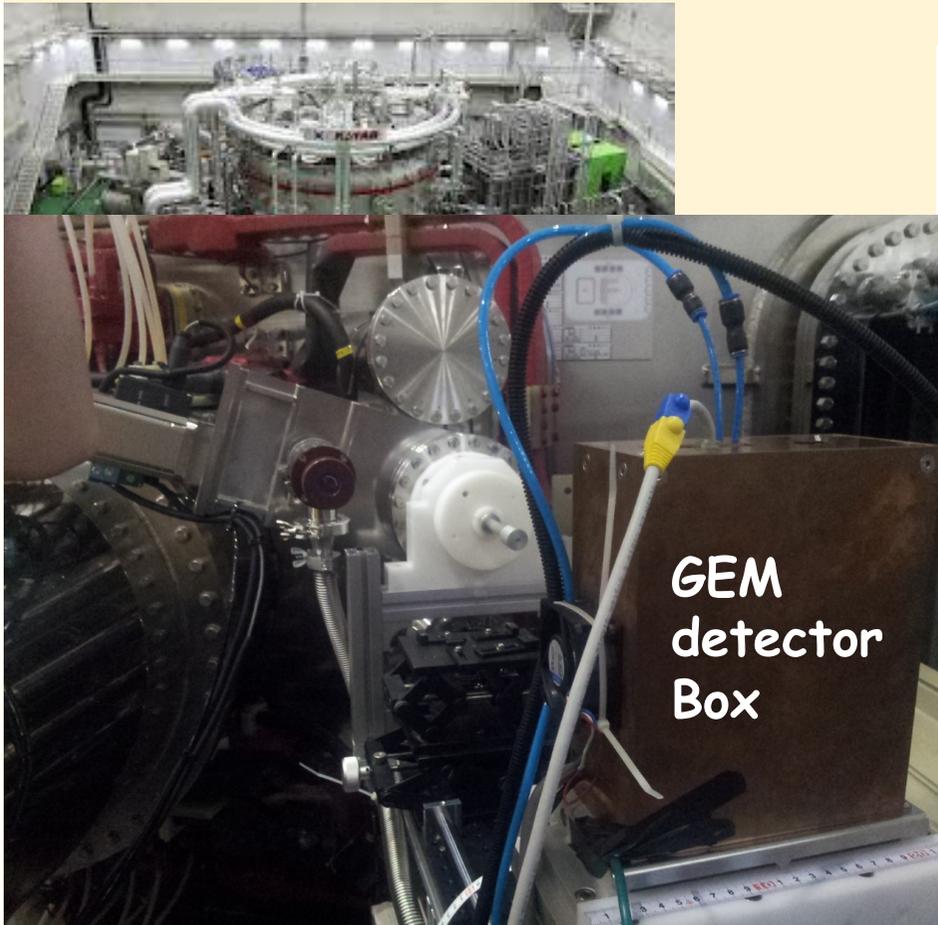
Il plasma emette raggi X che possono essere rivelati da rivelatori a gas detti «GEM» (Gas Electron Multiplier), con struttura a pixel



Tecnologia sviluppata ai
Laboratori Nazionali di
Frascati dell'INFN

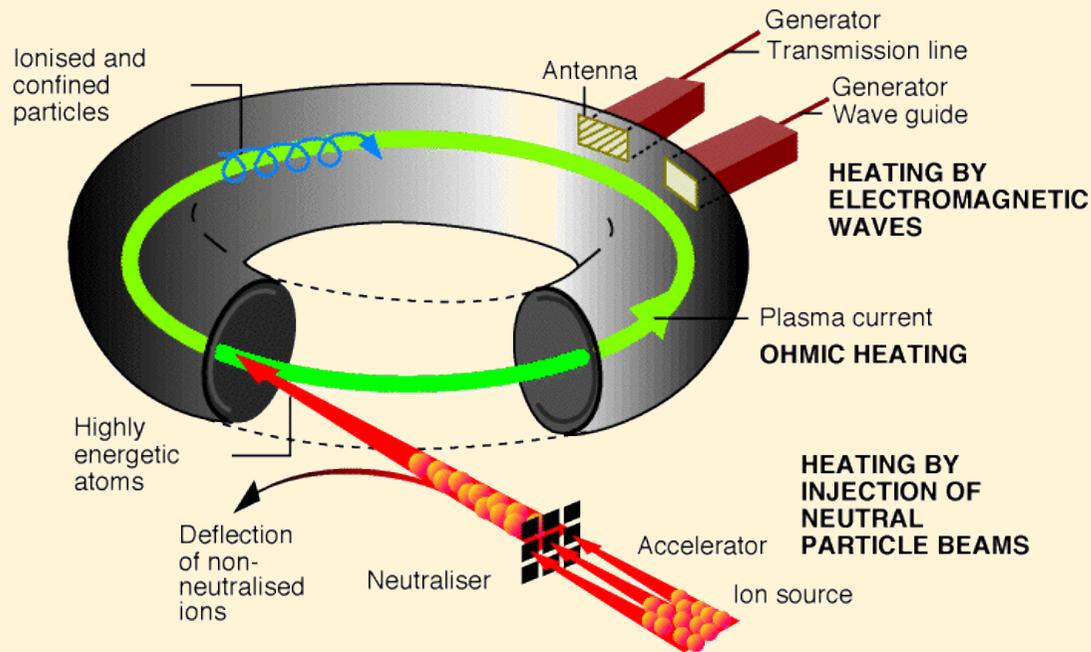
Immagini del plasma durante un impulso

Questo permette di girare dei brevi filmi come questo, misurato presso l'impianto **Korean Tokamak Kstar**



Riscaldamento del plasma: i fasci neutri

- T_{plasma} nei tokamak per fusione: **$\sim 100-150 \times 10^6$ gradi** per innescare la reazione di fusione $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$
- Il riscaldamento del plasma si ottiene tramite **effetto Ohm, Onde Elettromagnetiche (Radiofrequenze) e iniezione di atomi neutri** (Neutral Beam Injectors, NBI)



Le Radiofrequenze sono di due tipi:

- **Electron-Cyclotron Resonance Heating (ECRH)**, tipicamente a 170 GHz (frequenza di ciclone elettroni)
- **Ion-Cyclotron Resonance Heating (ICRH)**, tipicamente 60-90 MHz (frequenza di ciclone ioni)

$$f \downarrow L = zeB / 2\pi m$$

ze = carica elettrica

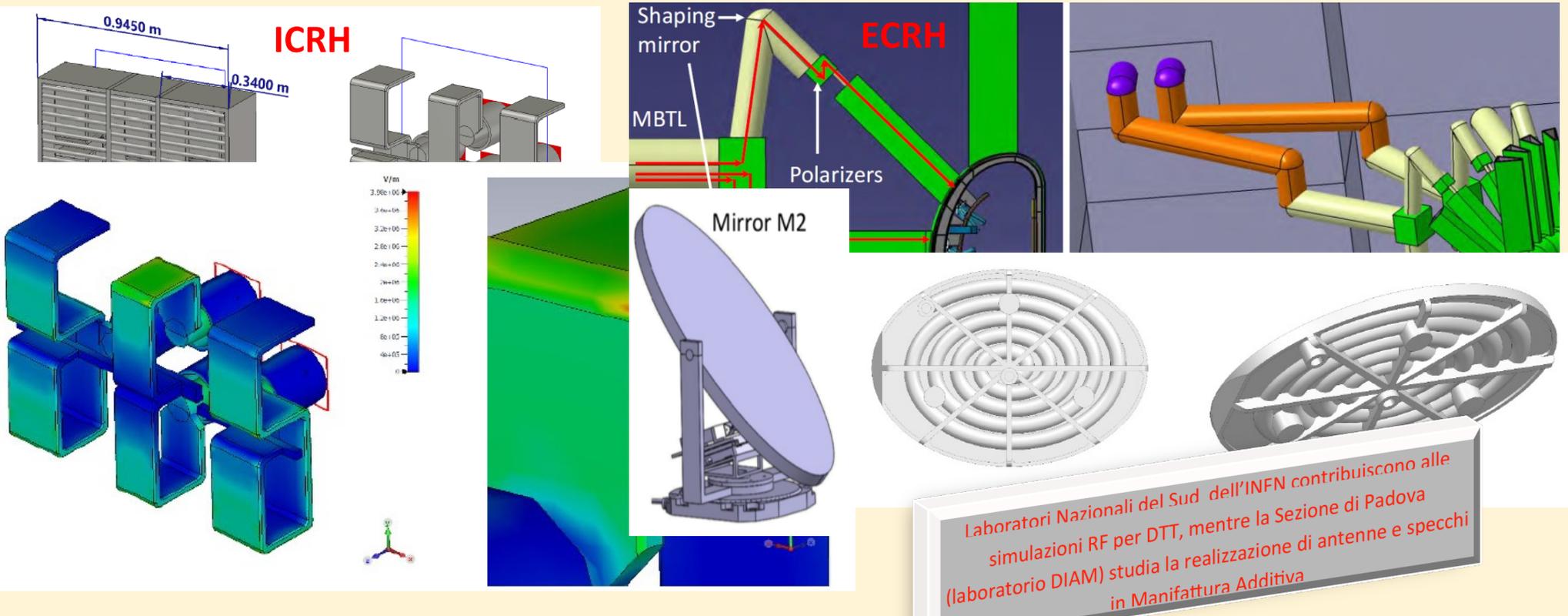
B = campo magnetico

m = massa (elettrone o ione)

I sistemi per la radiofrequenza

I sistemi che irradiano il plasma con la RF vanno ottimizzati per la massima trasmissione di potenza:

- Simulazioni della propagazione delle onde EM nel mezzo
- Studio della forma dell'antenna ICRH
- Studio degli specchi che danno maggiore flessibilità alla ECRH → anche come raffreddarli



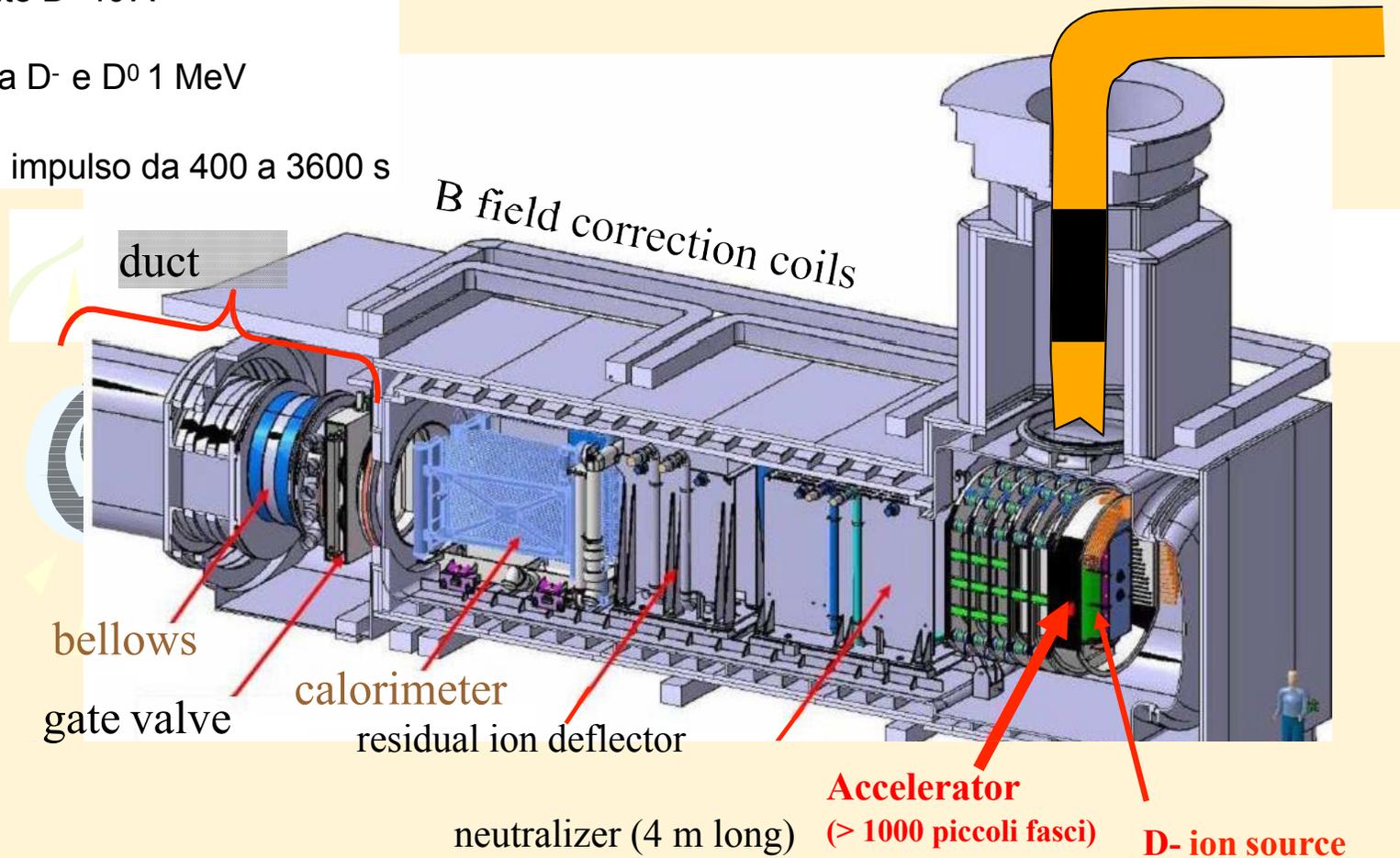
L'iniettore di atomi neutri

Corrente D⁻ 40 A

Energia D⁻ e D⁰ 1 MeV

Durata impulso da 400 a 3600 s

connections for source and accelerator



bellows

gate valve

calorimeter

residual ion deflector

neutralizer (4 m long)

Accelerator

(> 1000 piccoli fasci)

D- ion source

Le sorgenti di ioni negativi

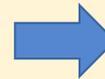
DEMO → un passo verso la produzione di elettricità

Ha bisogno di **più potenza esterna** →
In particolare **fasci neutri più potenti...**



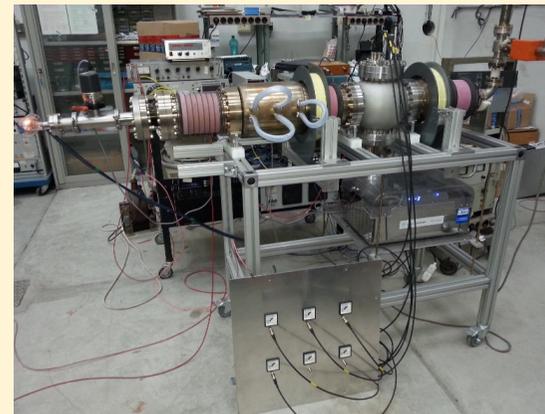
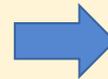
Tecnologia sviluppata ai Laboratori Nazionali di
Legnaro e alla Sezione di Bari dell'INFN

L'INFN ha costruito una sorgente di ioni negativi, NIO1, per
condurre esperimenti su questo componente base

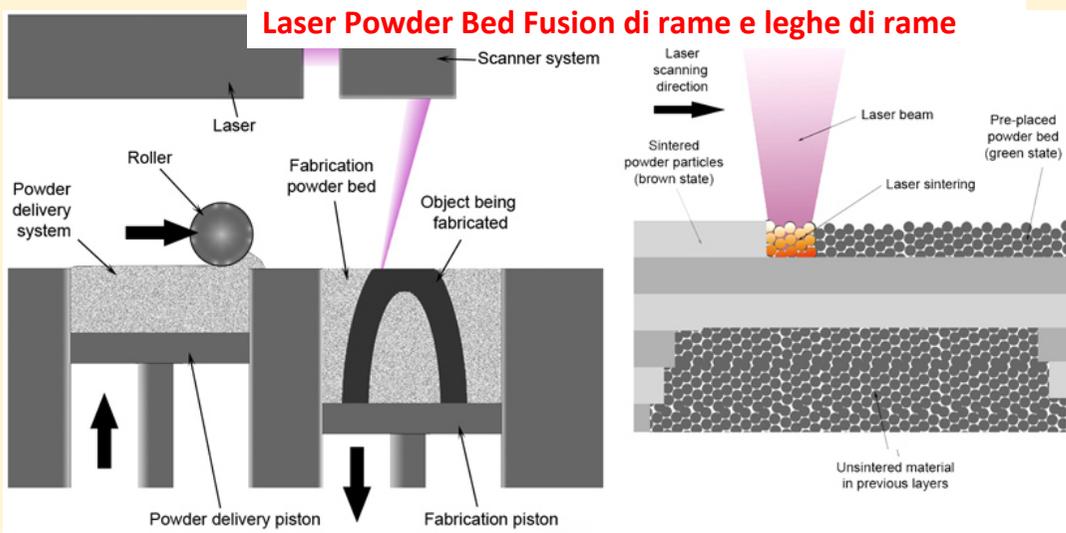


Recupero energia dal neutralizzatore

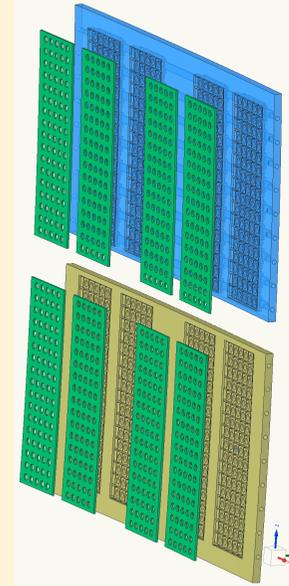
- Dal neutralizzatore emerge fascio neutro (60% del fascio originale) e ioni negativi e positivi (circa il 20% ciascuno)
- Gli ioni sono rimossi dal fascio neutro dal **Residual Ion Dump (RID)**, per mezzo di deflessione elettrostatica su un collettore
- Per **aumentare l'efficienza** è necessario recuperare l'energia dagli ioni decelerandoli prima che siano raccolti sul collettore
- Montato apparato di test con fascio di elettroni a Bari



Costruzione di componenti per la fusione in manifattura additiva

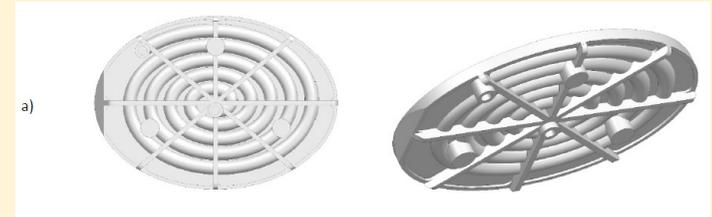


- **Acceleration Grids for Neutral Beam Injector systems**



- **370 W maximum Laser Power** (1070 nm)
- **Laser Spot $d = 80 \mu\text{m}$**

- **Steerable mirrors ECRH**



Conclusioni

- ✘ **Il mondo ha bisogno di energia**, soprattutto i paesi in via di sviluppo
- ✘ **L'energia nucleare** sarà ancora una delle fonti di «baseload» a **basse emissioni in molti paesi (compresi diversi nuovi)** per parecchi anni (e non solo baseload, vedi reattori di piccola taglia...)
- ✘ **Gli impianti a fusione** sono al centro di un programma di ricerca sperimentale molto intenso e **potrebbero diventare una nuova fonte di energia intorno al 2050**
- ✘ **La gestione dei rifiuti nucleari e la sicurezza** sono importanti anche per settori diversi dall'energia (per es. smaltimento di rifiuti dal passato e di rifiuti di origine medica e industriale)
- ✘ **Le competenze INFN** negli acceleratori e rivelatori di radiazione, ma anche **nuove competenze come la Manifattura Additiva**, vengono usate nel progetto INFN-E per fornire un contributo di **tecnologie innovative** con l'intento di portarle verso una **maggiore maturità**, possibilmente attraendo **finanziamenti esterni** (UE, fondi nazionali, ecc.) e attivando il **trasferimento tecnologico**