FUSIONE NUCLEARE

Realtà o Utopia

ALDAI 31 Maggio 2022

ENERGIA E SVILUPPO

Nel 2019 l' energia prodotta globalmente superava di 100 volte quella del modo preindustriale

500 volte nei paesi piu' ricchi

1/40.000 esimo della energia ricevuta dal sole

Quantità di per se' trascurabile nell' equilibrio energetico della Terra

Se la produzione avesse emissioni nulle o clima-neutre, non ci sarebbe nessuna alterazione del clima (1 millesimo di grado)

RIVOLUZIONE INDUSTRIALE

Il mondo e' cambiato:

Da energia prevalentemente animale (piu' piccole quantità di eolico ed idrico e legname)

Ad articolazione su due livelli

- Produzione localizzata con vari tipi di motori a combustione
- Produzione centralizzata con distribuzione capillare e prelievo al bisogno.

Sfruttamento dei combustibili fossili: quantità enormi, (ma finite) a basso costo

SVILUPPO DELLA CIVILTÀ

La disponibilità di energia, pressoché illimitata a basso costo ha liberato energie umane intellettuali per crescita di scienza e tecnica

Presupposto per una esplosione demografica

Che a sua volta innesca una crescita esponenziale dei consumi

In tempi storicamente brevi il modello diventa insostenibile, assai prima che si esauriscano i combustibili fossili

Un cambio del modello distribuzione e consumo locale comporterebbe un crollo della civiltà come la concepiamo attraverso guerre, carestie ed esodi biblici di popolazioni

FATTORI DI CRISI

Esaurimento delle risorse

- 100 anni per gas e petrolio
- 200/300 anni per il carbone
- 100/200 anni per l' Uranio

Anche se questi limiti potessero essere superati, la competizione per il controllo delle riserce scatenerà tensioni e potenziali guerre ben prima dell' esaurimento

FATTORI DI CRISI

Inquinamento globale

- Escludendo l' emissione di gas ad effetto serra: la produzione per combustione libera enormi quantità di sostanze nocive ed inquinanti, già oggi capaci di alterare la qualità di aria e acqua su scala continentale (Cina)
- E' poco noto che le centrali a carbone emettono piu' radioattività di qualunque altra sorgente naturale od artificiale, essendo gli isotopi presenti nella materia prima
- Quanto alle centrali nucleari a fissione, anche nel caso di future tecnologie ultra-sicure , pongono il problema dello stoccaggio e smaltimento delle scorie e del rischio catastrofe naturale o artificiale (guerra o terrorismo)

FATTORI DI CRISI

Conseguenze climatiche

- La produzione massiccia di alcuni gas puo' alterare l' equilibrio climatico
- La Co2 e' un elemento naturale indispensabile per la vita
- Senza Co2 la Terra sarebbe una palla di ghiaccio inanimata: l' effetto serra e' un elemento vitale
- E' inoltre il cibo dei vegetali, senza Co2 niente vegetali, niente animali niente uomo
- Il nostro corpo e' costituito all' 83% di Carbonio ed Ossigeno: siamo delle bombole di Co2 ambulanti
- Ma il troppo stroppia. La Co2 in eccesso in atmosfera impiega secoli per essere riassorbita. Nel frattempo il benefico effetto serra puo' diventare eccessivo

SOLUZIONE IDEALE

Produzione di energia priva di emissioni nocive

Scalabile dallo scooter alla grande centrale

A costi accessibili per tutte le nazioni

Potenzialmente illimitata

Senza intaccare le riserve naturali

MA E' POSSIBILE??????????

ENERGIA SOLARE

Occorre passare dall' uso della energia solare fossile a quello dell' energia istantanea

40.000 volte il fabbisogno. Grande abbondanza

Le soluzioni disponibili oggi:

Idroelettrico

Mareale

Fotovoltaico

Geotermico

Eolico

PROBLEMI

Stravolgimento ambientale (Dighe , parchi eolici e fotovoltaici ecc.)

Incontrollabilita' della fonte e produzione discontinua

La mina irrisolta delle batterie e del loro smaltimento

Il consumo di territorio

Competizione per il carburante sostituita dalla competizione per gli elementi rari

UN SOGNO: IL SOLE PORTATO SULLA TERRA

E=MC2

Piccole quantità di massa possono generare enormi quantità di energia

1 Grammo di **materia** e' pari alla energia di combustione di 3 tonnellate di petrolio o 12 di Carbone

Ma come si puo' trasformare massa in energia?

Come la pietra filosofale per ottenere l' oro

Con la liberazione della forza nucleare forte

Quella che tiene insieme i nuclei degli atomi

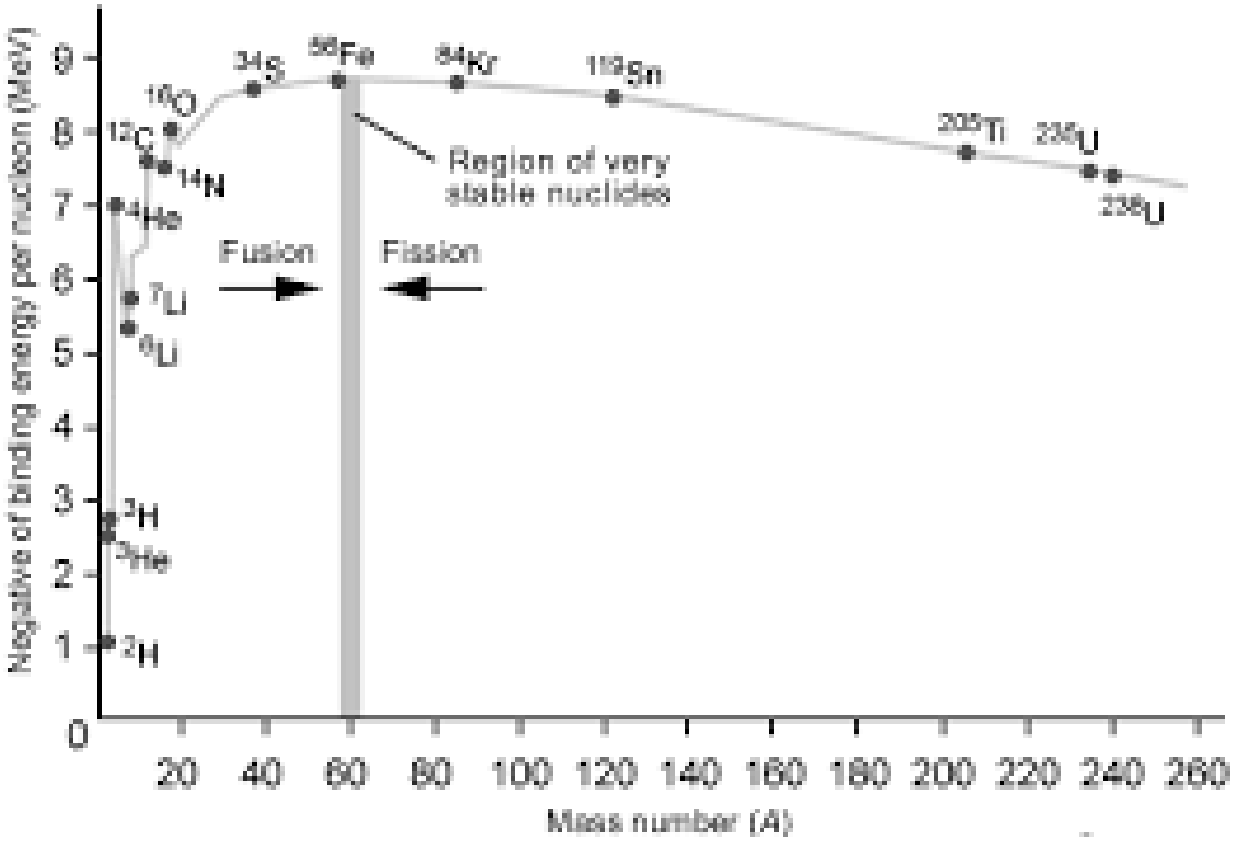
FORZA DI LEGAME NUCLEARE

A destra del Ferro I nuclei liberano energia per fissione (rottura)

A sinistra per fusione

L' energia di fusione e' di un ordine di grandezza superiore a quella di fissione

10 milioni di volte superiore alla combustione chimica

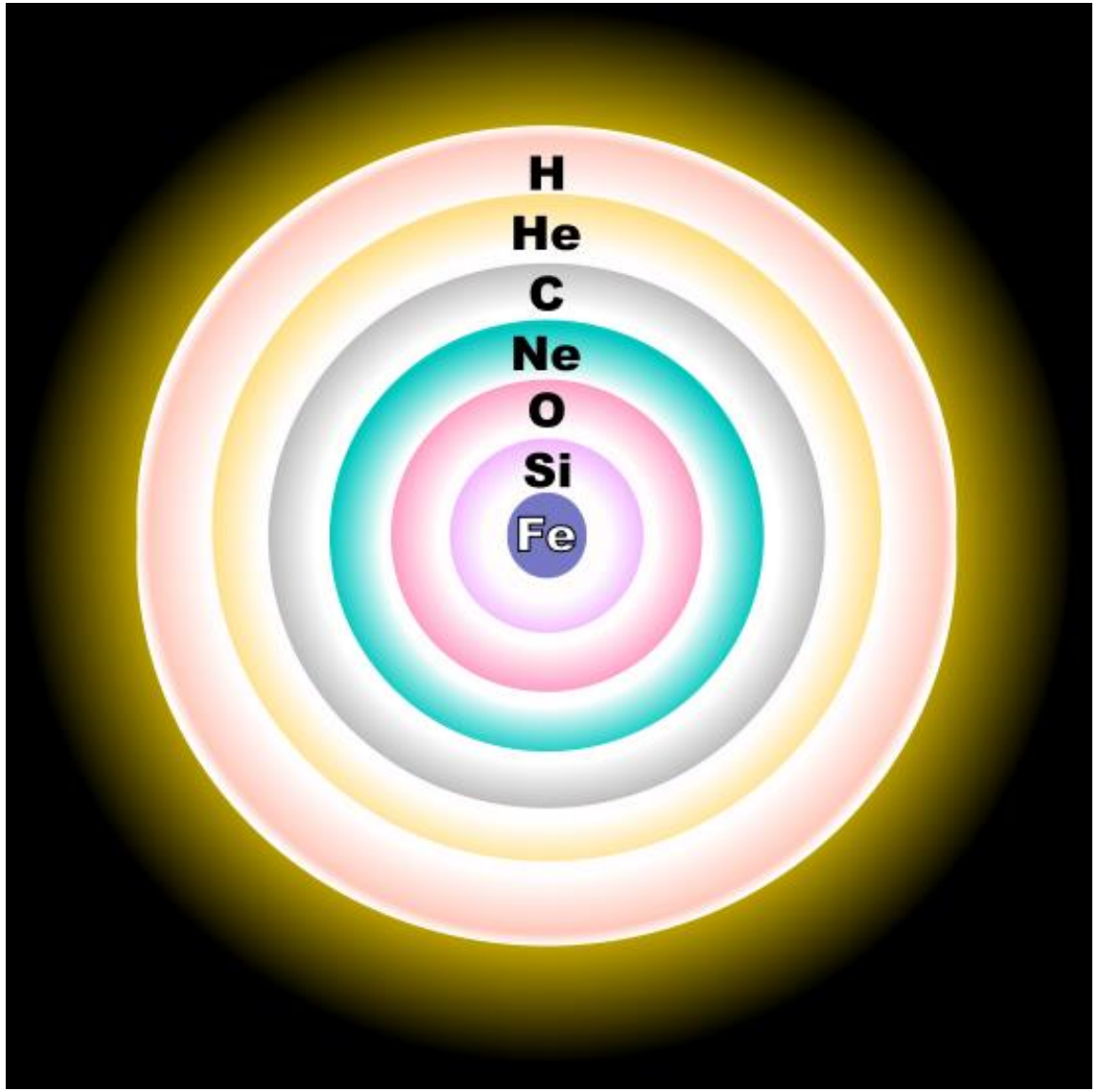


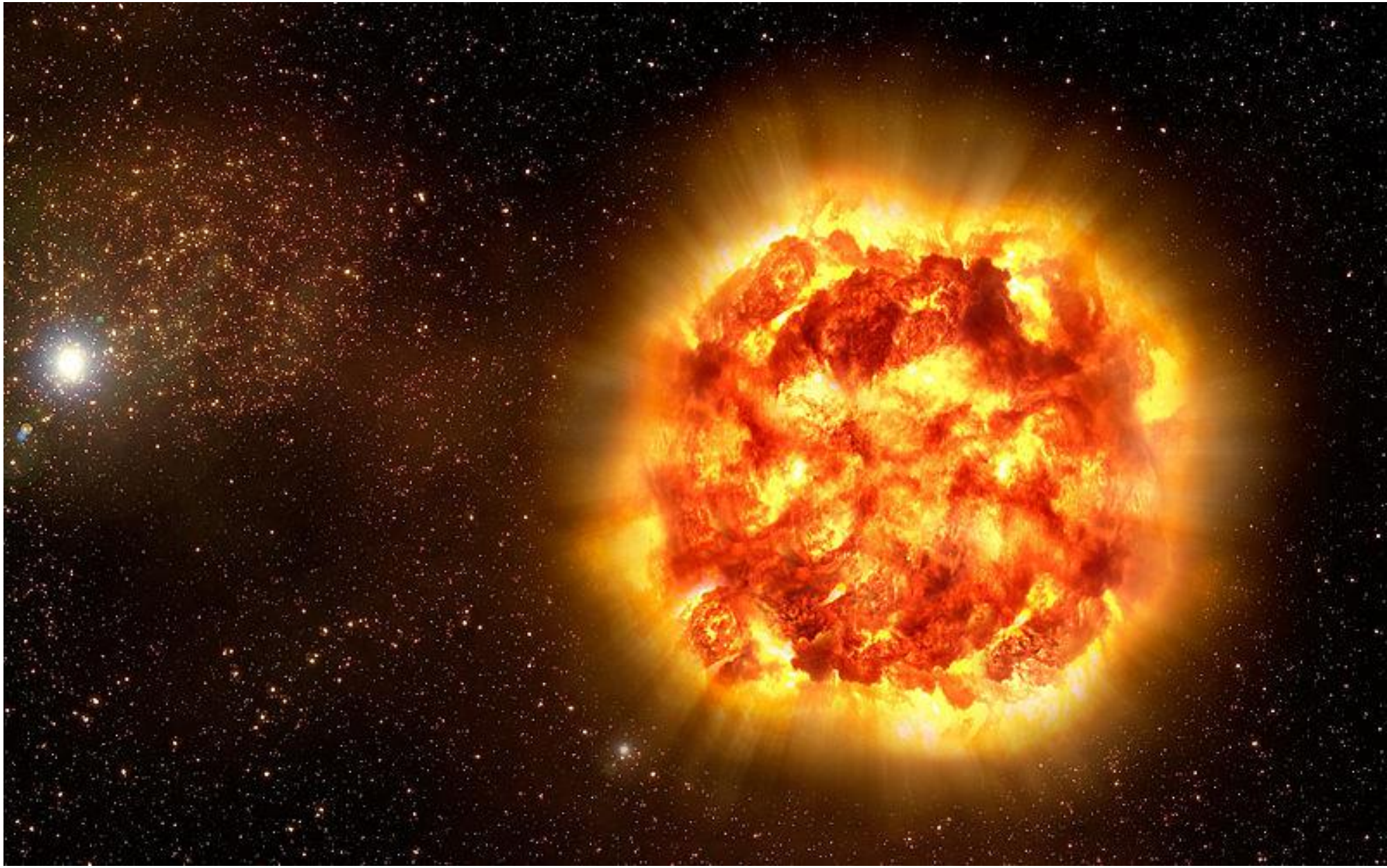
FUSIONE NELLE SUPERNOVAE

Aumentando pressione e temperatura si fondono nuclei sempre piu' pesanti

Con rilascio di energia sempre minore

Arrivati al Ferro l' energia diventa negativa e la stella implode



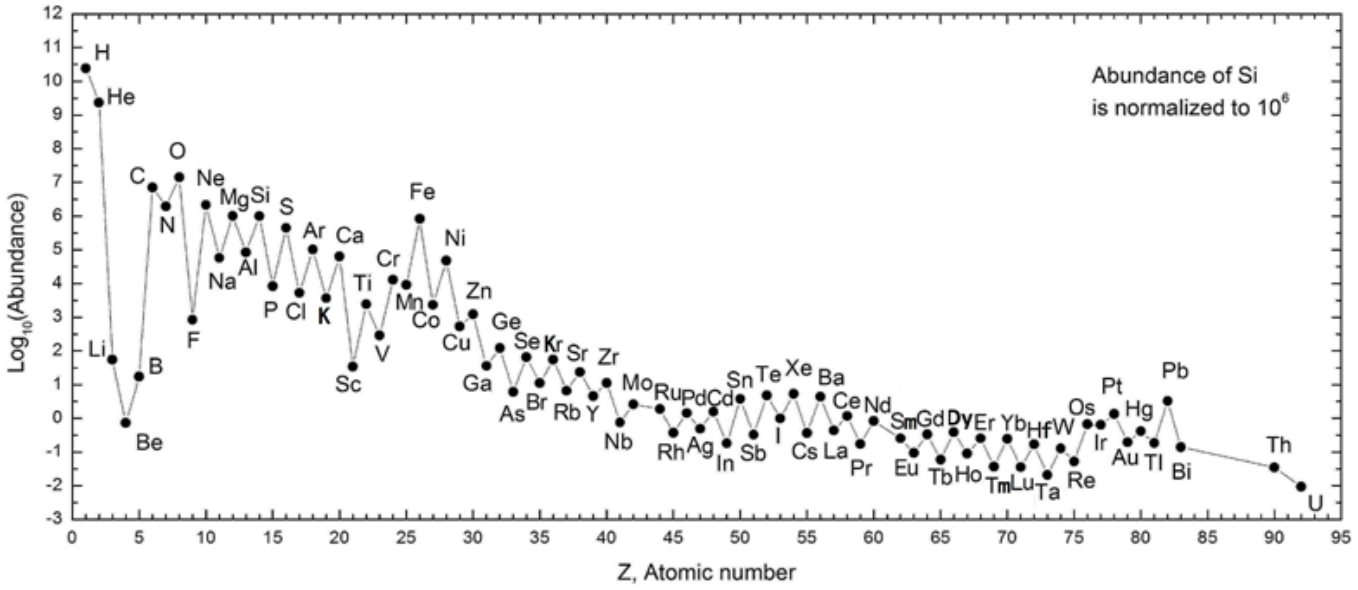


ABBONDANZA DEGLI ELEMENTI NEL SISTEMA SOLARE

Idrogeno (fusione) 1 milione di miliardi di volte piu' abbondante dell' Uranio (fissione)

Fusione : carburante illimitato con la resa piu' alta.

Questa e' la strada scelta dall' Universo



COME FUNZIONANO LE STELLE

Condensazione di nubi stellari

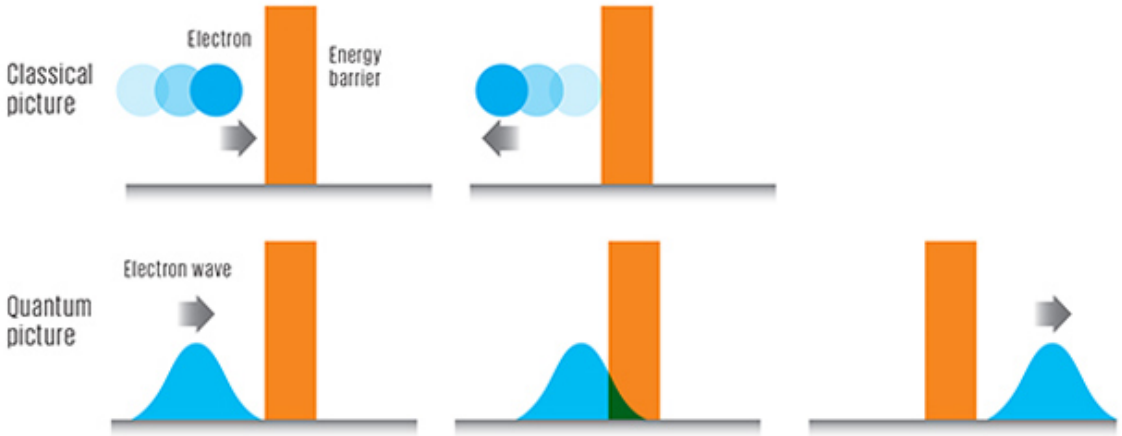
Al centro temperature e pressione crescenti

Repulsione elettrostatica dei protoni enorme

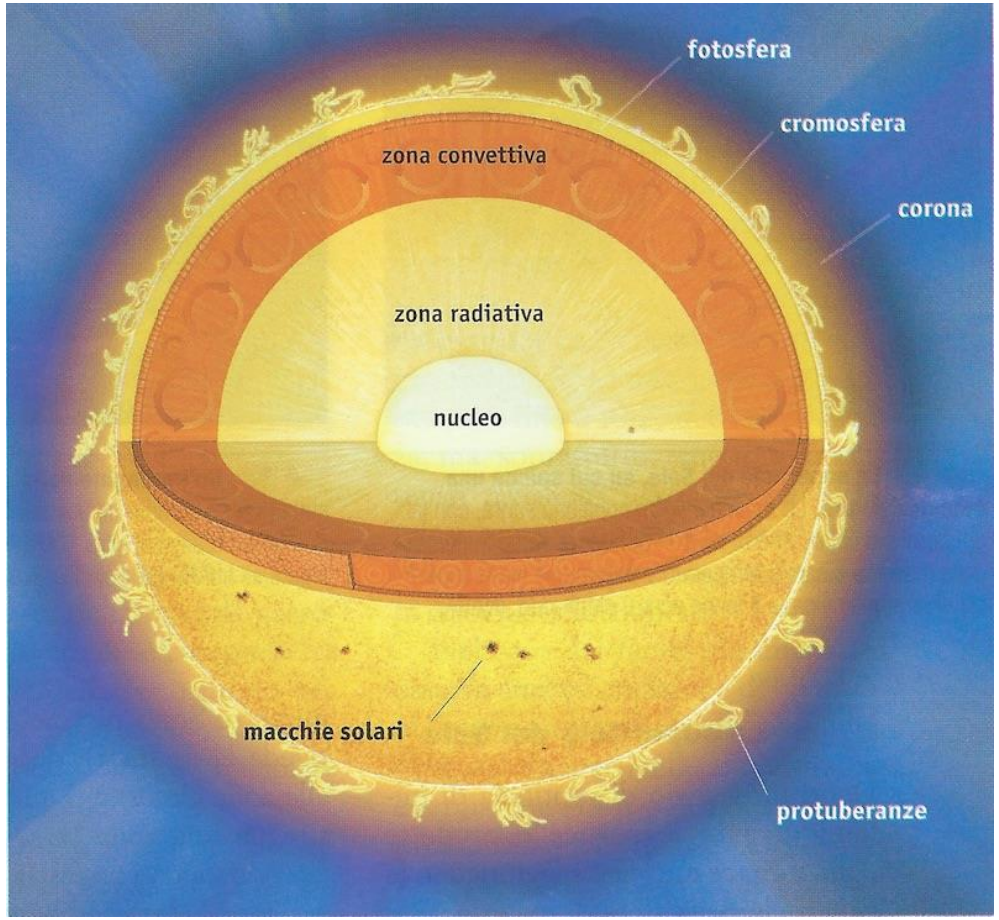
Effetto tunnel

Ogni tanto un protone supera la barriera e si aggiunge al nucleo

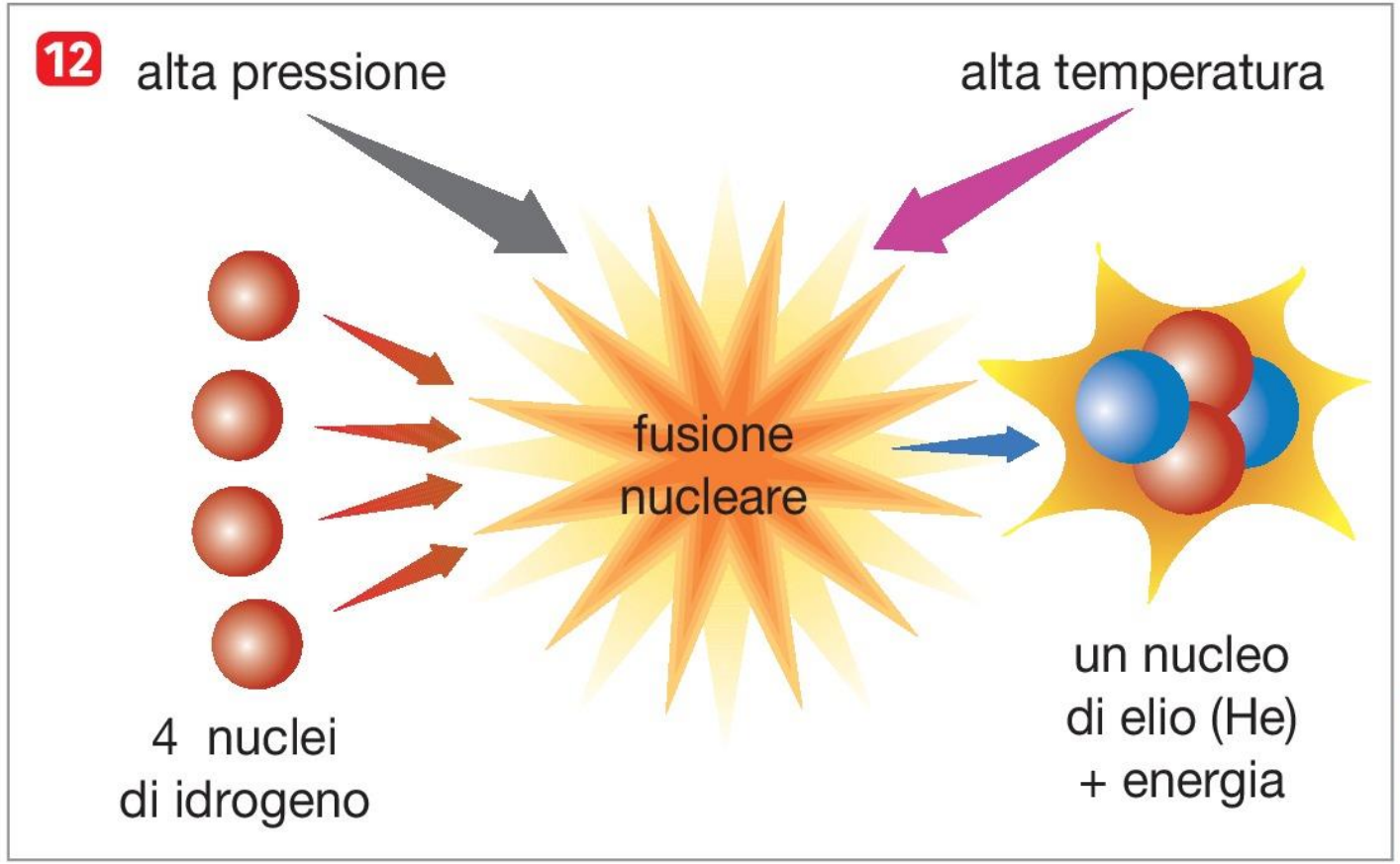
Avviene solo se pressione supera i 100 miliardi di atmosfere e i 10 milioni di gradi Kelvin

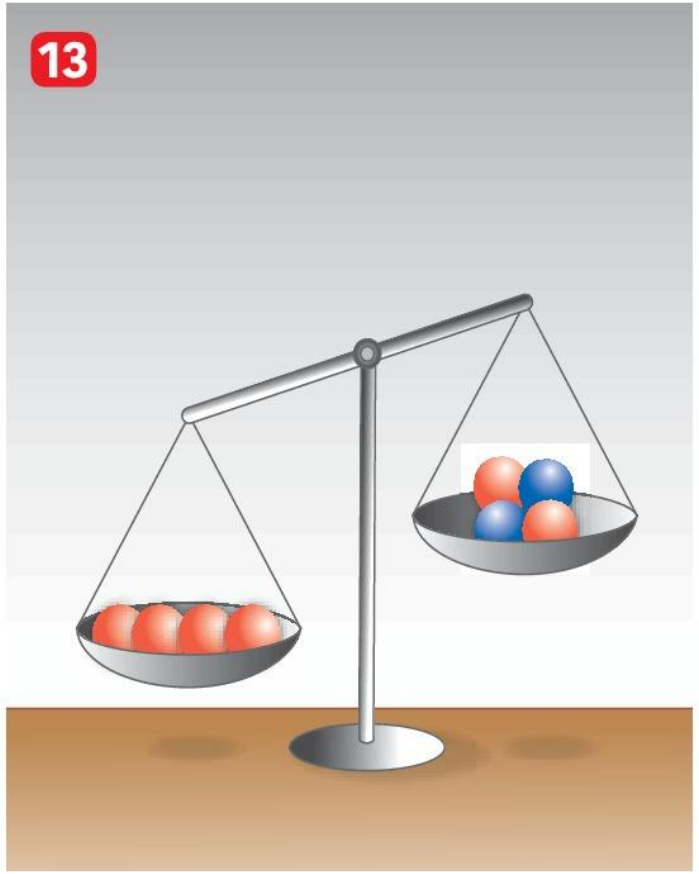


LA REAZIONE PRINCIPALE NELLE STELLE PICCOLE COME IL SOLE



LA REAZIONE PRINCIPALE NELLE STELLE PICCOLE COME IL SOLE





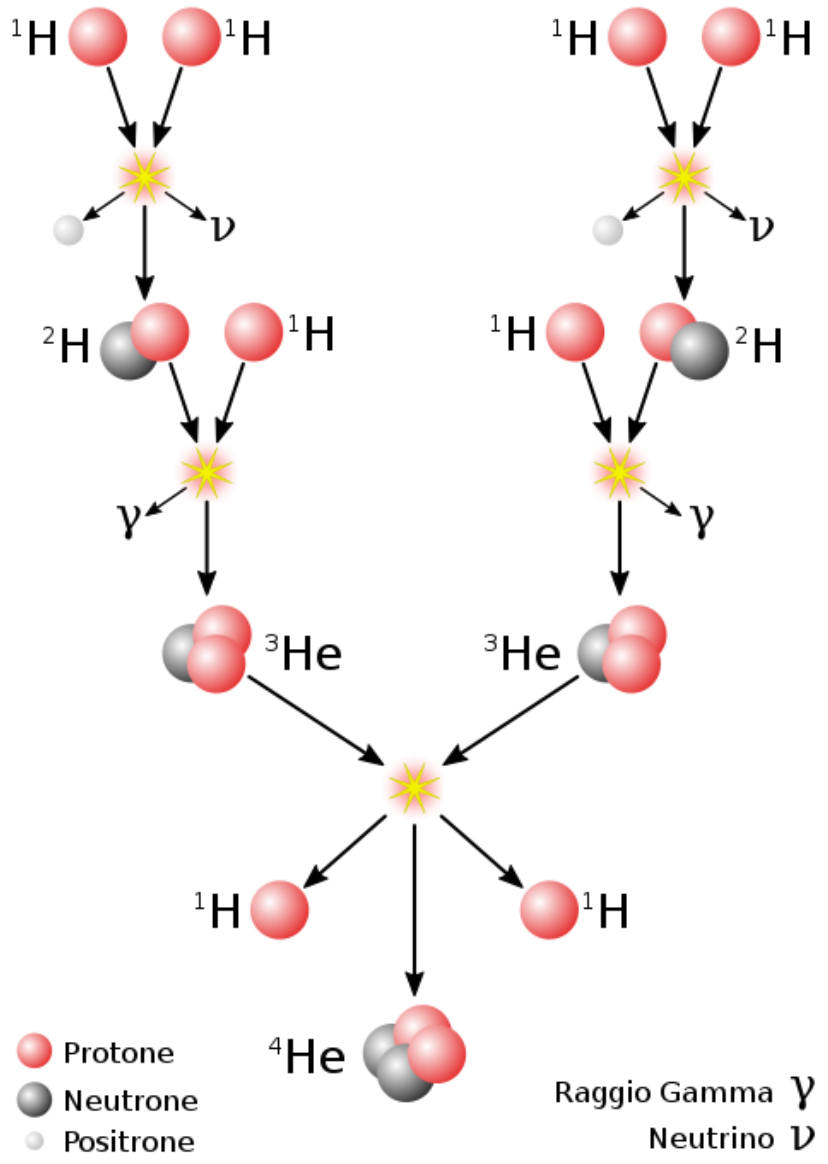
DETTAGLIO DELLA REAZIONE

Da Idrogeno si ottengono

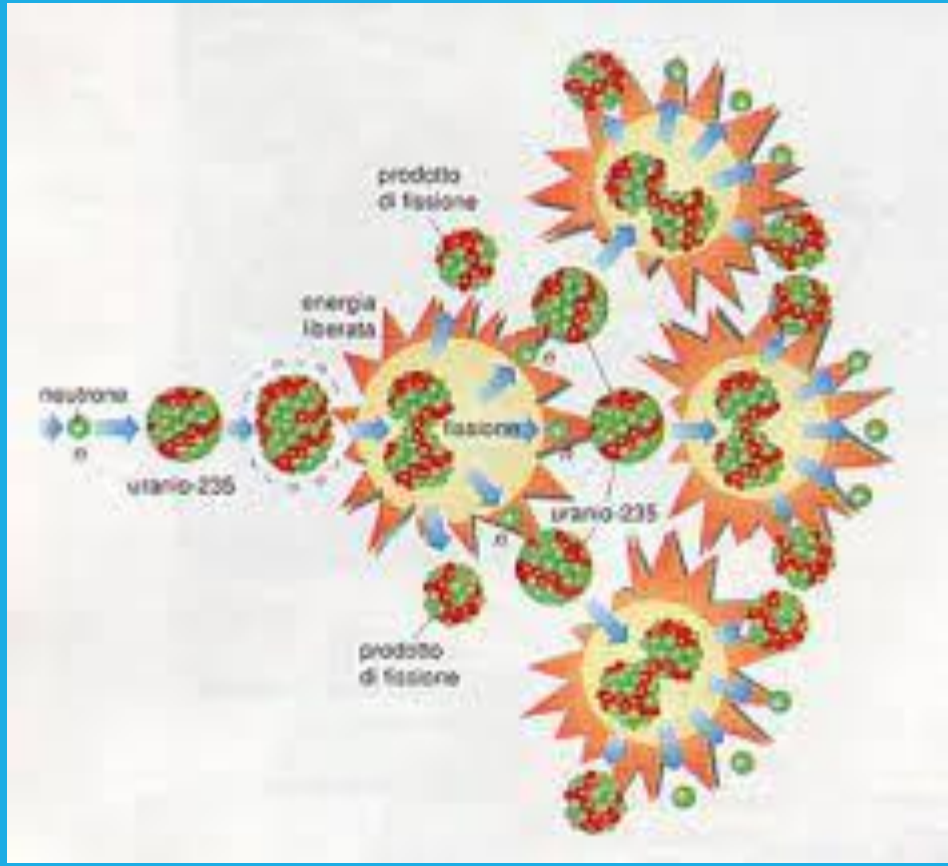
Elio

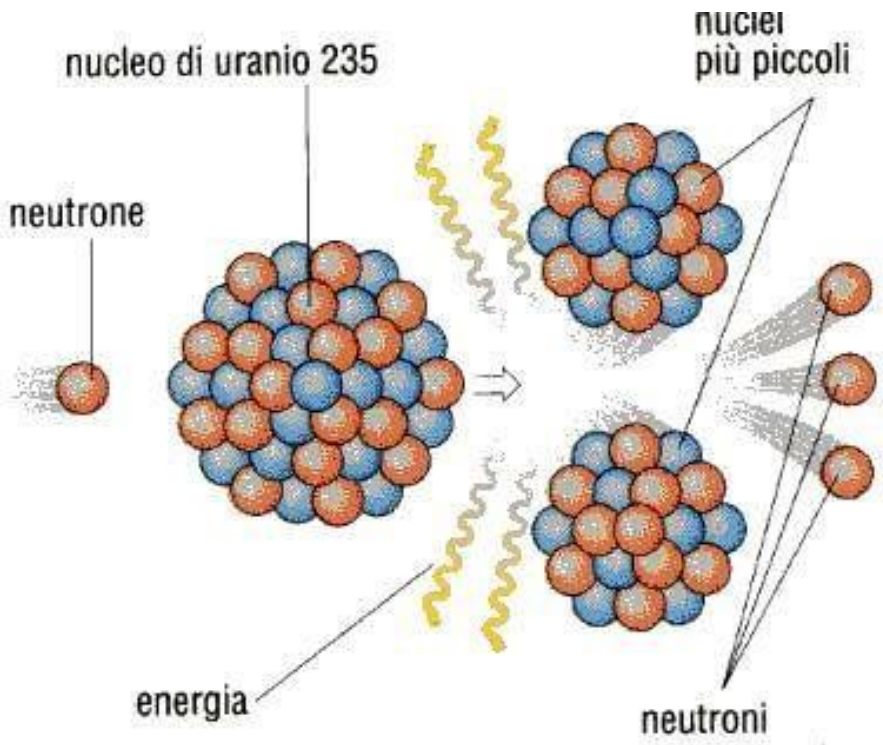
Neutrini

E Raggi Gamma



CONFRONTO CON FISSIONE





CONFRONTO FUSIONE

Reazioni seriali , impossibilita' di esplosione

Sezione d'urto piccolissima: temperature e pressioni altissime

Emissione di Elio inerte e innocuo, di neutrini e raggi gamma facilmente schermabili

FISSIONE

Reazioni a catena: triplica ad ogni stadio. Andamento esponenziale estremamente esplosivo

Grandissima sezione d' urto: reazione facile

Emissioni di neutroni ed elementi altamente radioattivi

CONFRONTO FUSIONE FISSIONE

Fusione processo naturale

Fissione assente in natura ad eccetto del decadimento radioattivo

Ma allora perche' non usiamo la Fusione?

Sfida tecnologica immensa:

Nel Sole 500 Miliardi di atmosfere e 10 milioni di gradi Kelvin

Il contenitore e' la gravita'

Alle nostre pressioni ci vorrebbe piu' di 1 Miliardo di gradi Kelvin

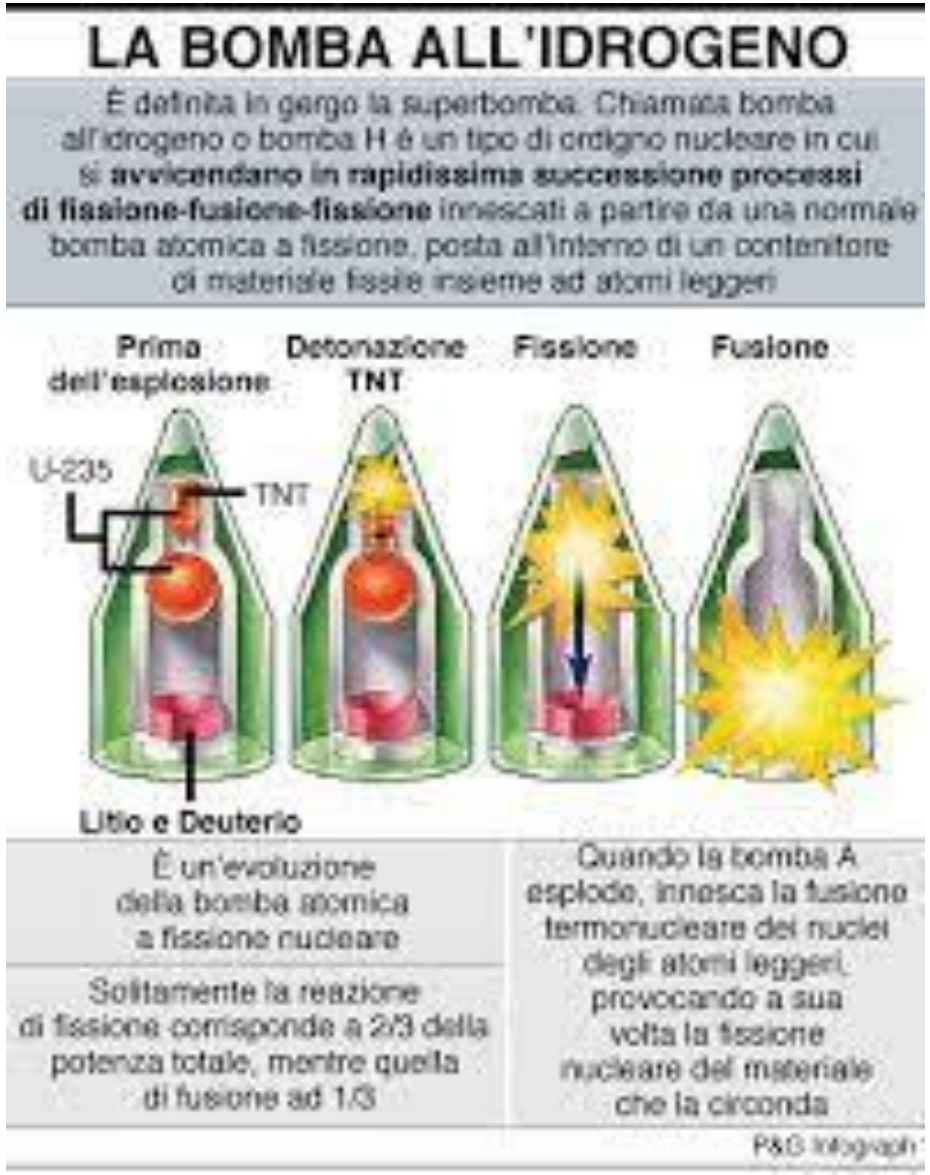
Il materiale terrestre piu resistente regge fino a 4.000 Kelvin

MISSION IMPOSSIBLE?

Gia' siamo in grado di scatenare una reazione di fusione nelle bombe ad Idrogeno

L' esplosione di una bomba a fissione crea le condizioni per la fusione

E' una reazione **incontrollabile** di circa 600 Nanosec di durata



VERSO LA FUSIONE AD USO CIVILE

Potenza controllabile con piccole quantità di carburante:

1 grammo per ciclo

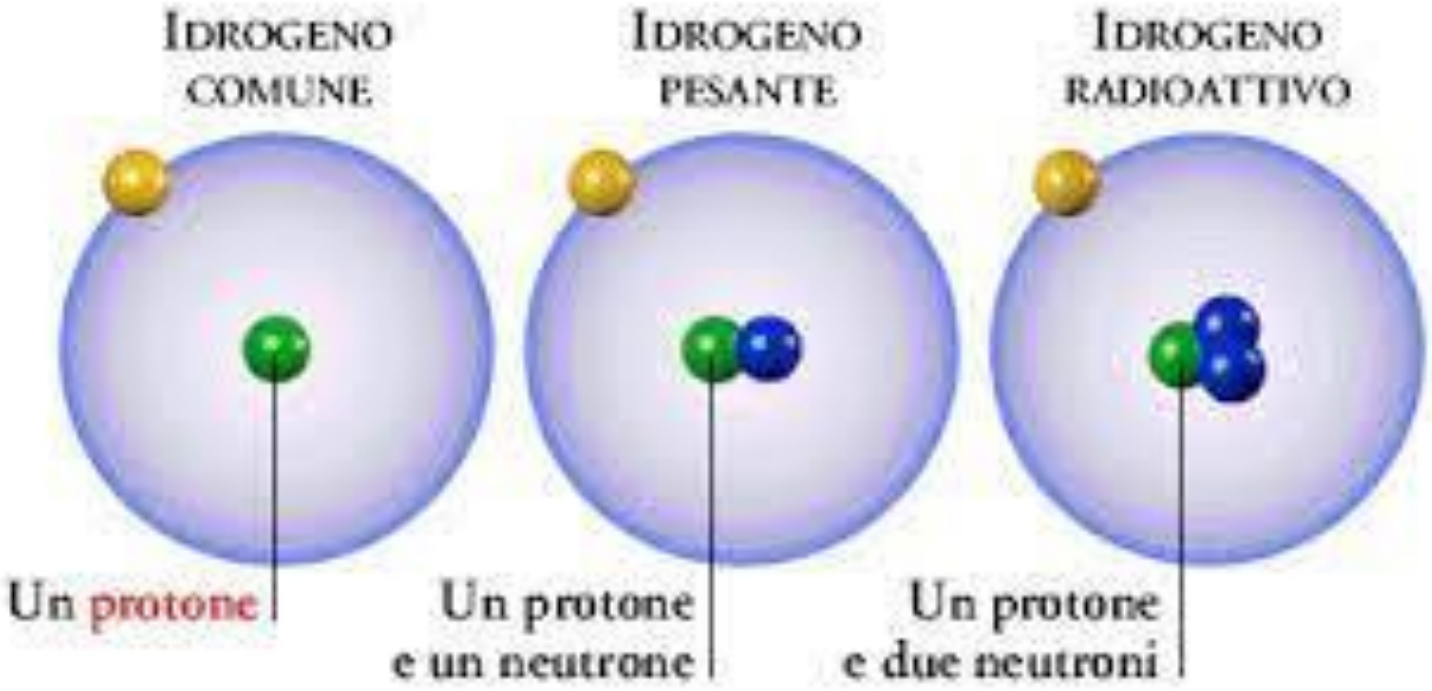
Confinamento immateriale:

- Magnetico
- Inerziale
- A Laser

Reazioni piu' facili di quelle solari

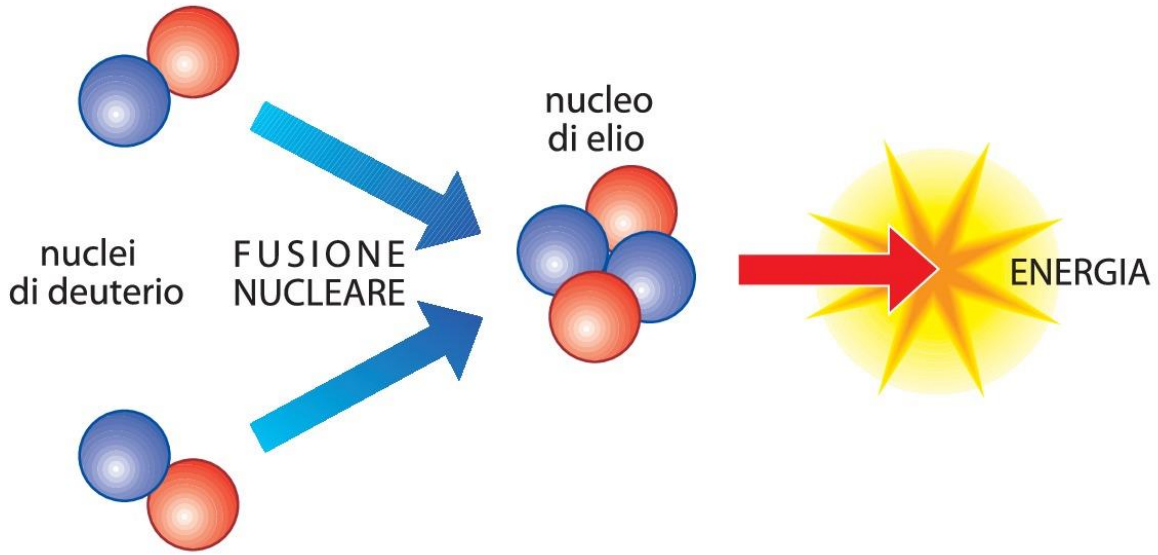
ISOTOPI:

IDROGENO
DEUTERIO
TRITIO

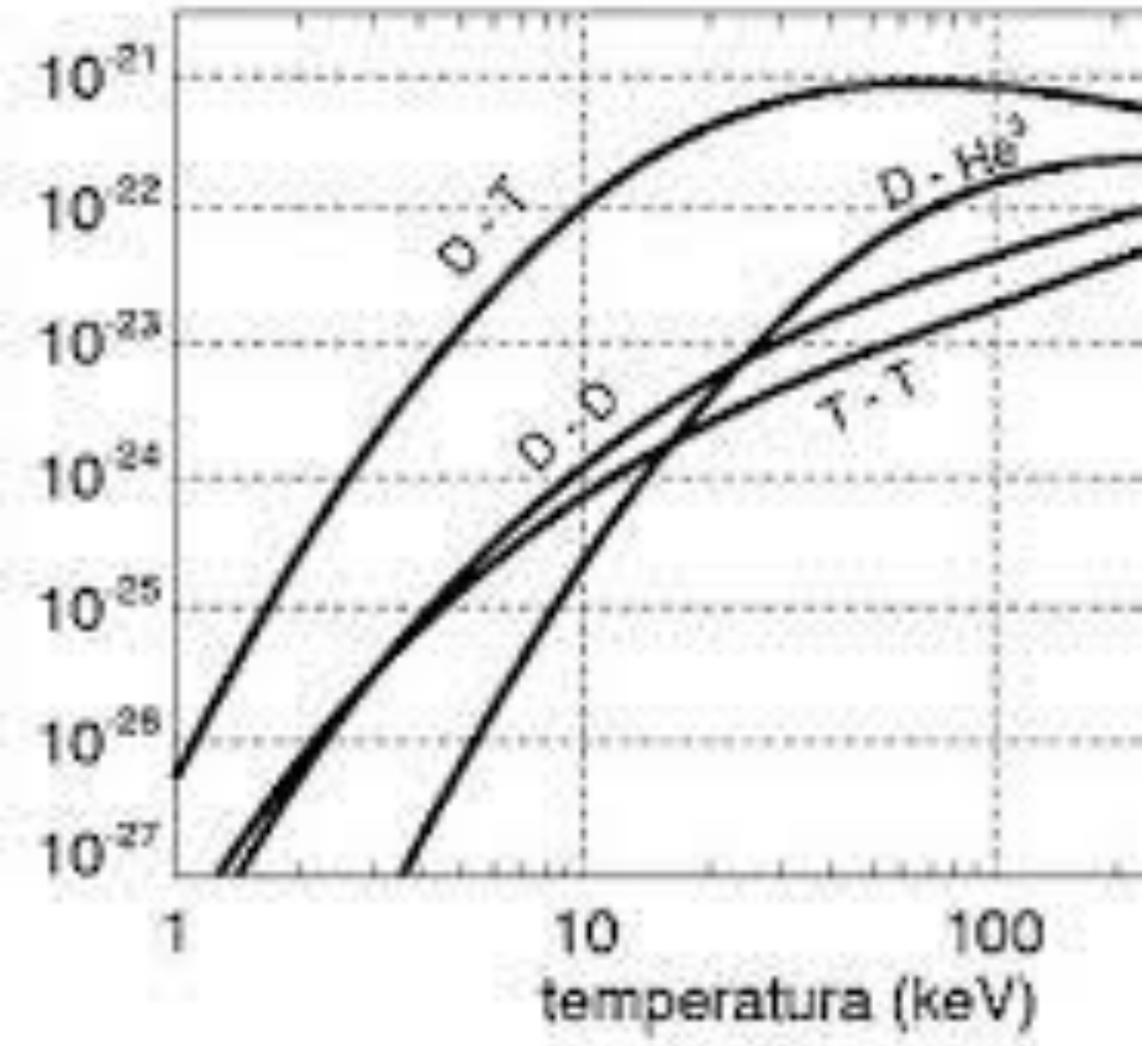


REAZIONE DEUTERIO-DEUTERIO

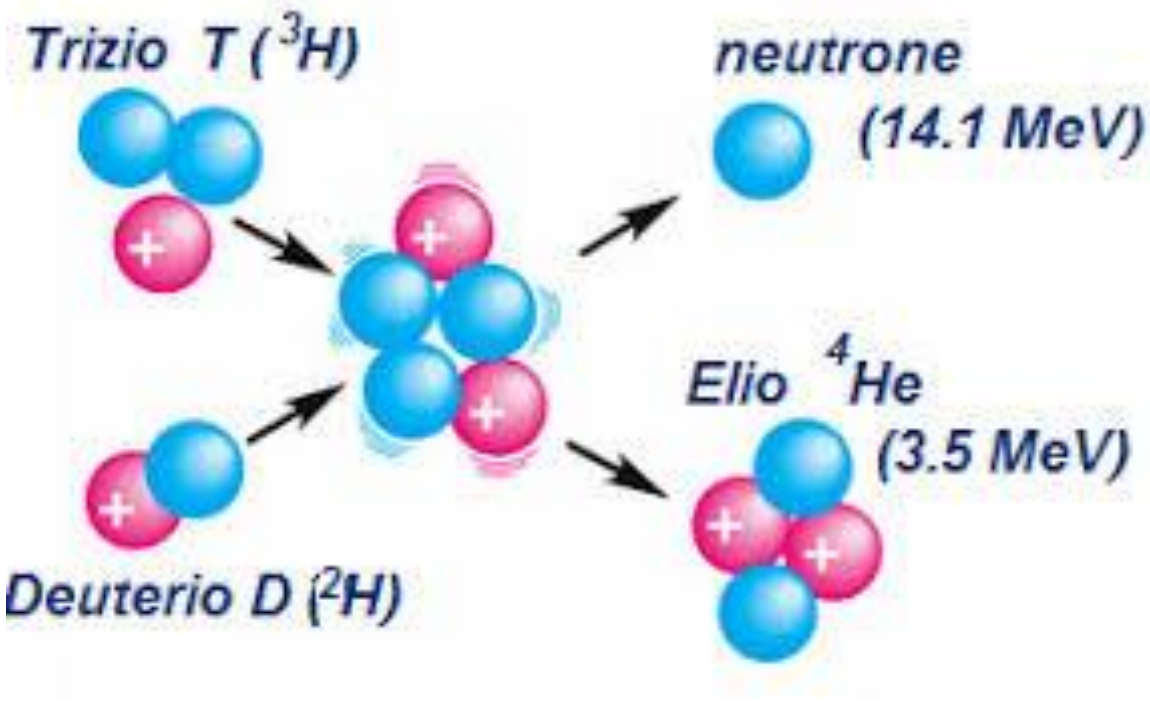
- La reazione piu' facile esistente in natura
- Avviene nelle nane rosse
- Deuterio molto abbondante
- 500 milioni di K
- Troppi: Non ancora alla nostra portata



QUALE E' LA PIU' FACILE IN ASSOLUTO? E' DEUTERIO-TRITIO



LA REAZIONE DEUTERIO-TRITIO



Molti svantaggi:

- Tritio non esistente in natura ed è radioattivo (decadimento 10 anni)
- Emissioni di neutroni veloci con conseguente radioattività (limitata, meno di un ospedale moderno)
- Problematica l' estrazione dell' energia
- Ambiente reattivo molto usurante per i materiali

Un grande vantaggio:

- Avviene a «soli» 100 milioni di gradi Kelvin
- E' ormai quasi routine di laboratorio

Inoltre:

- Radioattività di breve durata
- Resa energetica molto alta

CONDIZIONI DI EFFICACIA DI UN REATTORE

Accelerare il plasma di Idrogeno a velocita' relativistiche

Senza che tocchi mai la pareti

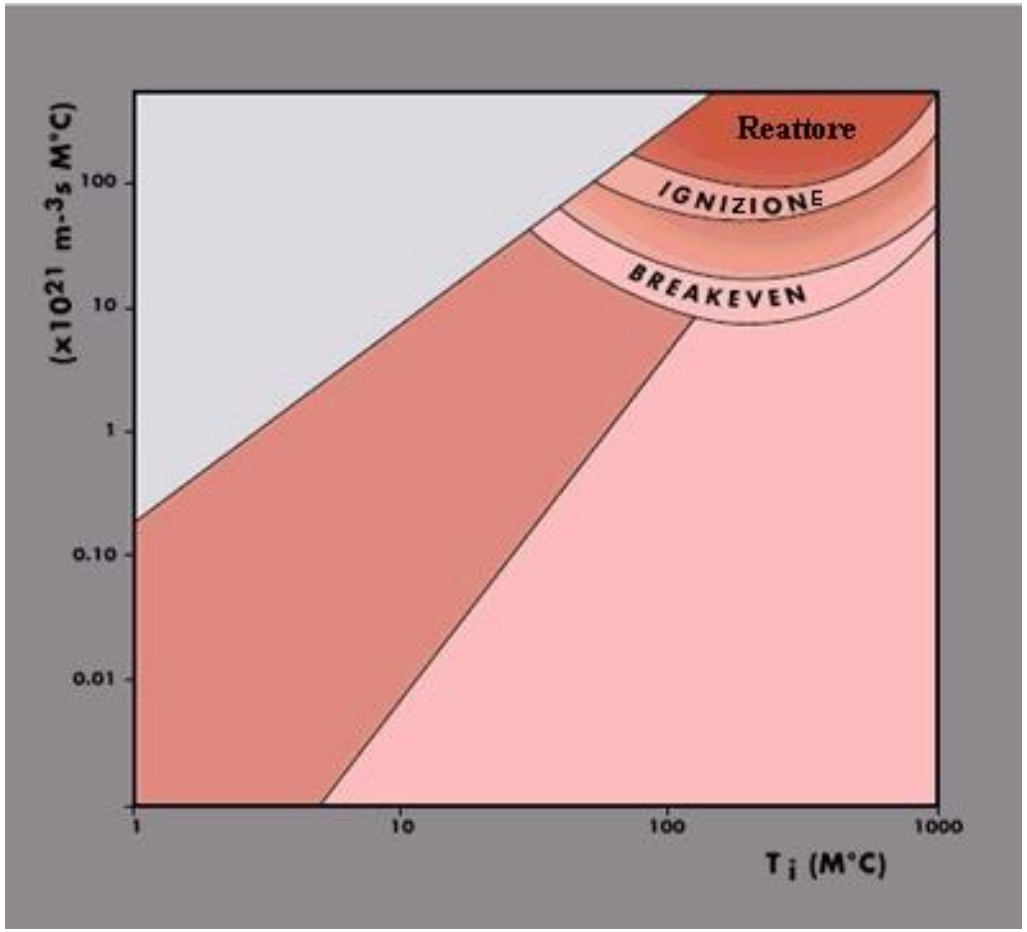
Assorbire i neutroni e ricavarne l' energia

Innescare una reazione stabile e continua (oggi record cinese di 1.000 secondi)

Ottenere piu' energia di quella consumata (target 10)

Costi paragonabili ad altri metodi

Nessun obbiettivo e' stato ancora raggiunto ma i progressi sono enormi



LA MADRE DI TUTTI I PROGETTI ITER

International Thermonuclear Experimental Reactor

Accordo tra 35 nazioni nel 2006 per il piu' grande progetto della storia umana.

Scopi ufficiali

- Produrre 500 MW di energia da fusione nucleare
- Operare su scala simile a quella di un impianto operativo
- Produrre un plasma Deuterio-Tritio auto sostentantesi per lunga durata
- Auto-Produrre e riciclare il Tritio necessario
- Dimostrare che la tecnologia e' sicura

COSA E' ITER?

A Caradache nel sud della Francia

Sito enorme

A gennaio 2022 lavori completati al 76%

Prima accensione nel 2025

Funzionamento completo nella prima metà del prossimo decennio

Seguirà DEMO che produrrà energia utilizzabile nel 2050

LA TECNOLOGIA SCELTA PER ITER

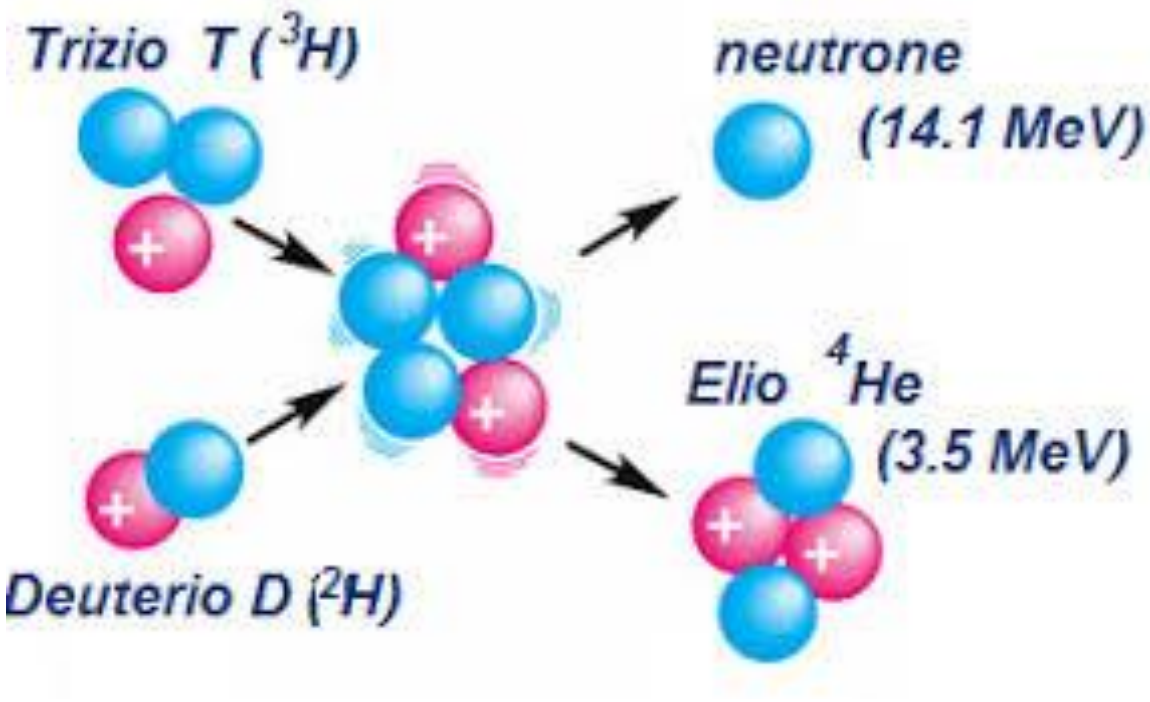
Fusione di Deuterio e Tritio

Confinamento magnetico a superconduttori

Produzione della fusione mediante Tokamak

Da ogni singola fusione 17,6 MeV, 10 milioni di volte la combustione

Carburante immesso 1 grammo alla volta



IL TOKAMAK CUORE DI ITER

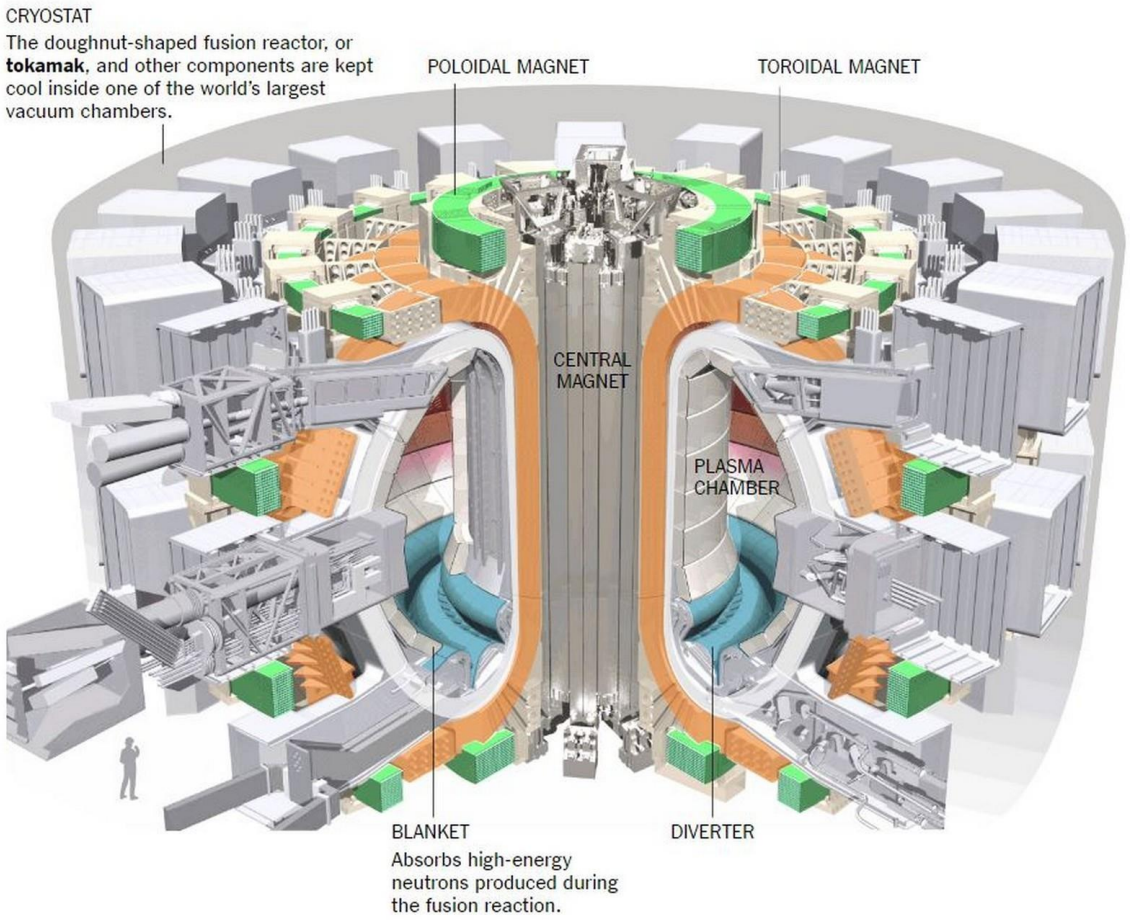
Camera toroidale

Avvolta in magneti toroidali e poloidali raffreddati a 4K

Plasma accelerato sino a 150 milioni di K

Strato assorbente i neutroni collettore di energia

Diverter per l' eliminazione dell' Elio di scarto



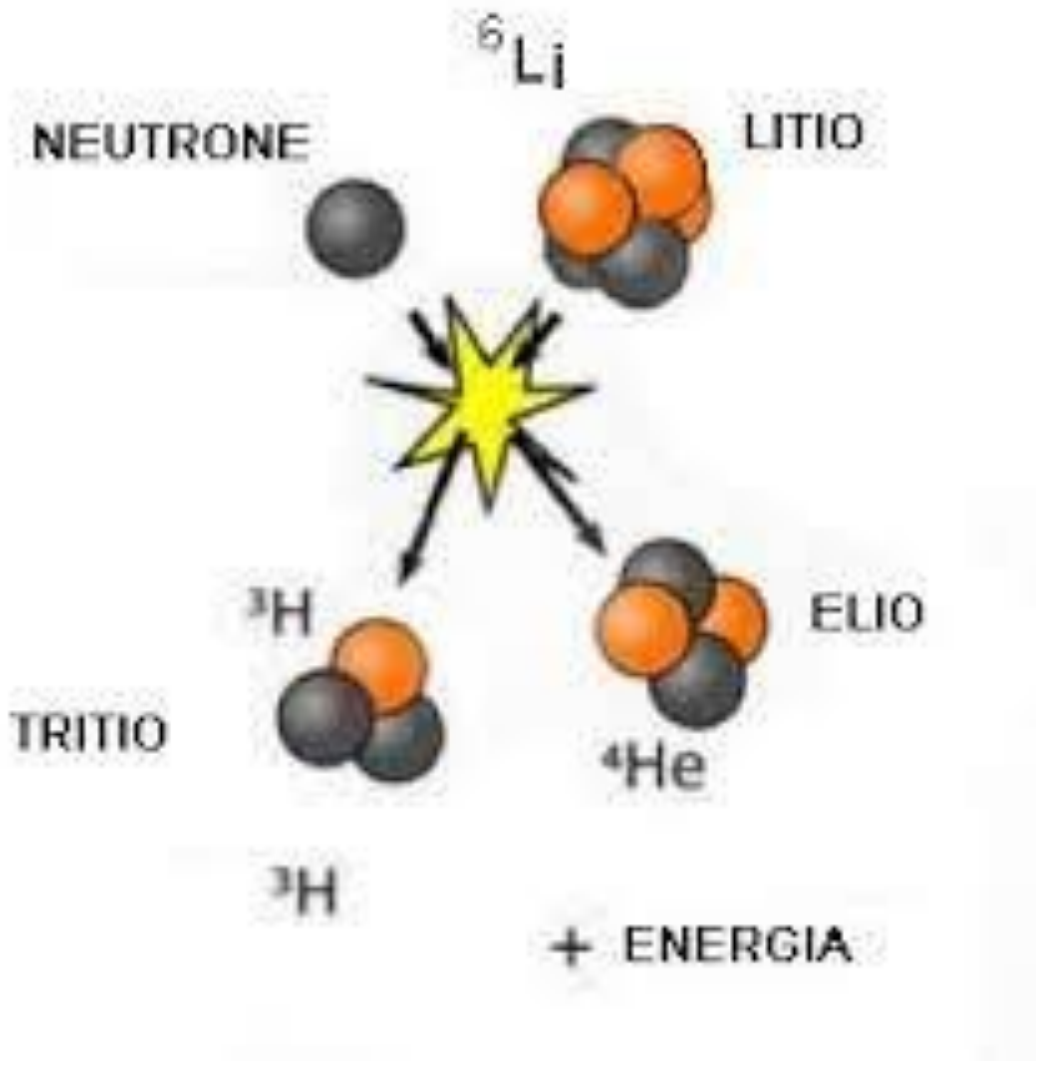
COME FUNZIONA IL TOKAMAK

Estrazione del deuterio dall' acqua di cui e' componente naturale allo 0,03%

Il deuterio di un piccolo lago puo' produrre piu' energia di tutte le fonti fossili e rinnovabili terrestri messe insieme

Tritio prodotto da reattori a fissione tipo CANDU (oggi 40KG all' anno)

In futuro da Litio miscelato nelle pareti



COME FUNZIONA IL TOKAMAK

Creare il vuoto nel Tokamak a 1 milionesimo di atm per eliminare ioni non desiderati

Raffreddamento dei magneti sino a 4 Kelvin con Elio liquido affinché' le bobine diventino super-conduttrici

Iniezione del carburante (1 grammo alla volta=4 ton di petrolio)

Riscaldamento a 150 milioni di K con magneti poloidali

I neutroni sono assorbiti da pannelli di Rame Acciaio e Berillio

L' Elio e' eliminato nel diverter fatto di Tungsteno.

Tutto il raffreddamento e' ad acqua

BILANCIO DELLA TECNOLOGIA TOKAMAK

Vantaggi

- La piu' vicina alla fusione controllata
- Ben conosciuta
- ITER a buon punto
- Pochi scarti radioattivi e di breve durata: dimezzamento in 10 anni
- 1000 volte meno della produzione di un ospedale in un anno
- Impossibilità di esplosione

Svantaggi

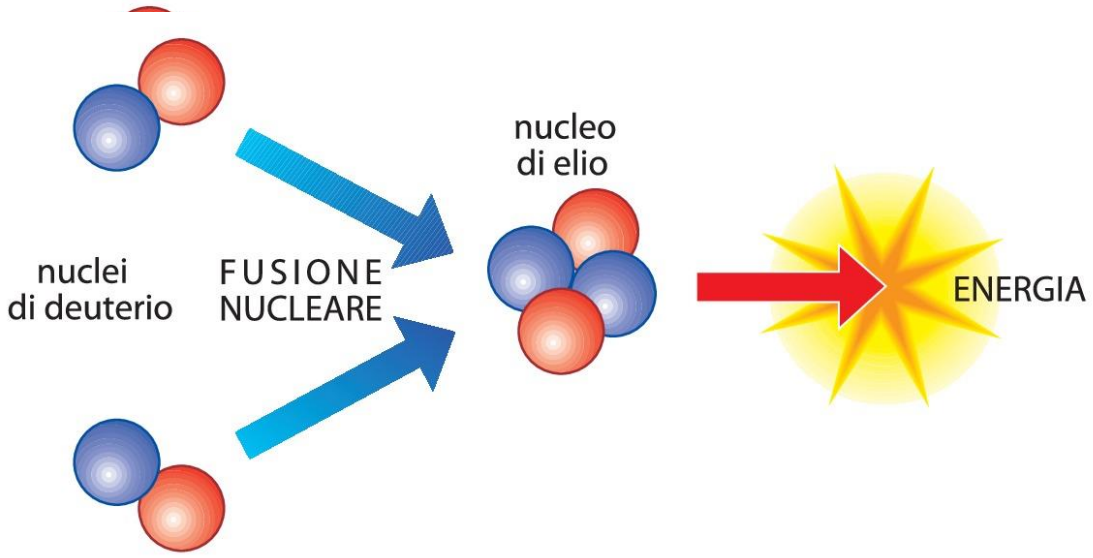
- Processo assai usurante per i materiali
- Il riscaldamento avviene con aumento di corrente, quindi forzatamente ha un andamento discontinuo
- Combustione a impulsi
- Richiede impianti enormi per funzionare
- Campo magnetico proporzionale alle dimensioni (limite di Greenwald)
- Investimenti di Miliardi di $

IN PROSPETTIVA PER FINE SECOLO

Reazione Deuterio-Deuterio

- Niente piu' radioattività
- Energia pulita e illimitata al 100%
- Indipendenza dal Tritio

Ma prima bisogna imparare



BIGLIETTO DA VISITA DI ITER

- Altezza edificio: 24 m
- Larghezza edificio: 30 m
- Massa del tokamak: 23 000 ton
- Massa della camera del plasma: 8 000 ton
- Raggio esterno del plasma: 6,2 m
- Raggio interno del plasma: 2 m
- Temperatura di plasma: $1,5 \times 10^8$ K
- Potenza in ingresso: 620 MW
- Potenza in uscita: 500-700 MW
- Volume del plasma: 837 m^3
- Superficie del plasma: 678 m^2
- Massimo campo magnetico toroidale al raggio maggiore del plasma: 11,8 T
- Durata dell'impulso di fusione: > 300 s
- Fattore di guadagno nell'energia da fusione (Parametro Q): 10

PROGETTI ALTERNATIVI

Progetti basati:

su superconduttori ad alta temperatura (non disponibili all' epoca dell' ideazione di ITER)

su Stellarator

sul confinamento inerziale

sul confinamento centrifugo

Su reazioni a-neutroniche (del tutto prive di radioattività)

SPARC LA SCOMMESSA ITALIANA

La nostra ENI ha investito su questo progetto in collaborazione con uno spin-off del MIT.

Utilizza superconduttori ad alta temperatura (77K punto di ebollizione dell' azoto liquido)

Raffreddamento molto meno costoso

Campi magnetici molto piu' intensi

Dimensioni piu' ridotte (1/40) di ITER

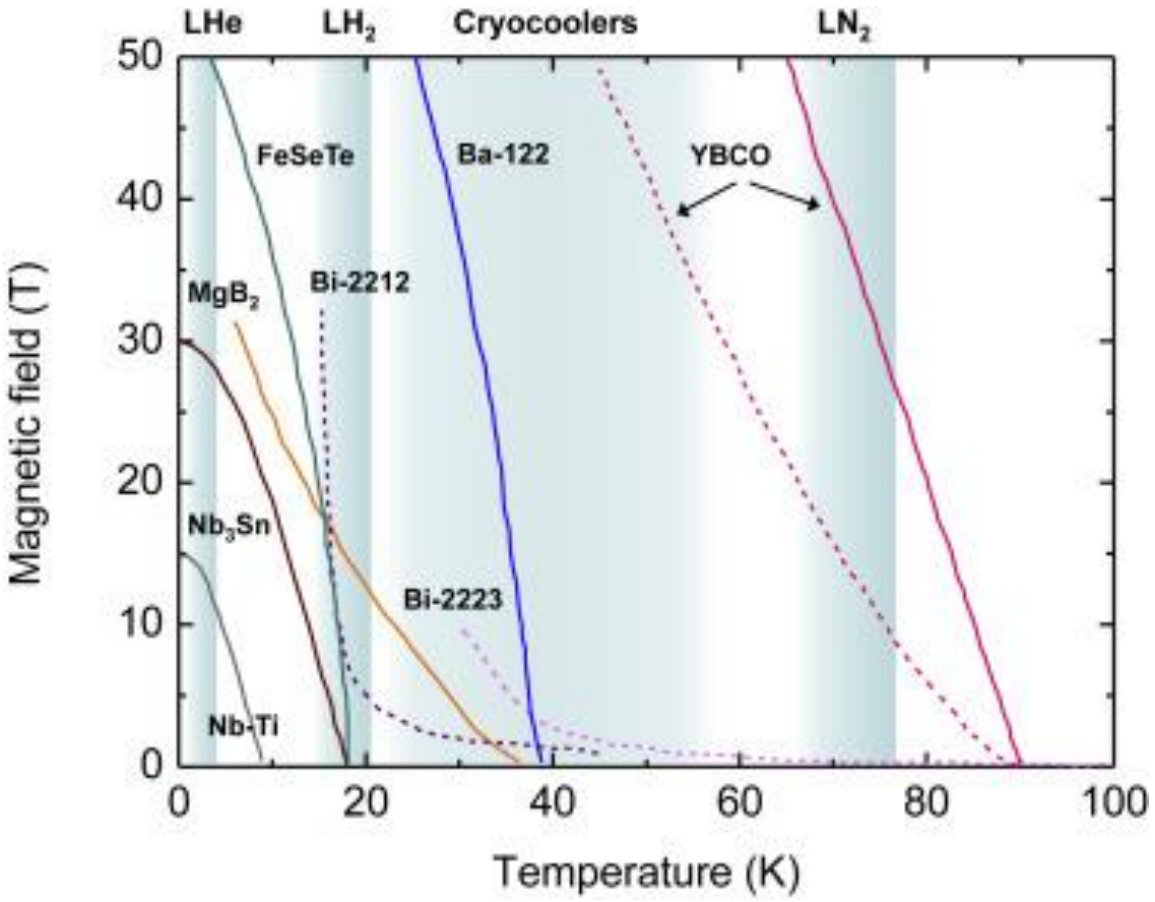
Accensione di prova nel 2025

Primo reattore commerciale nel 2033

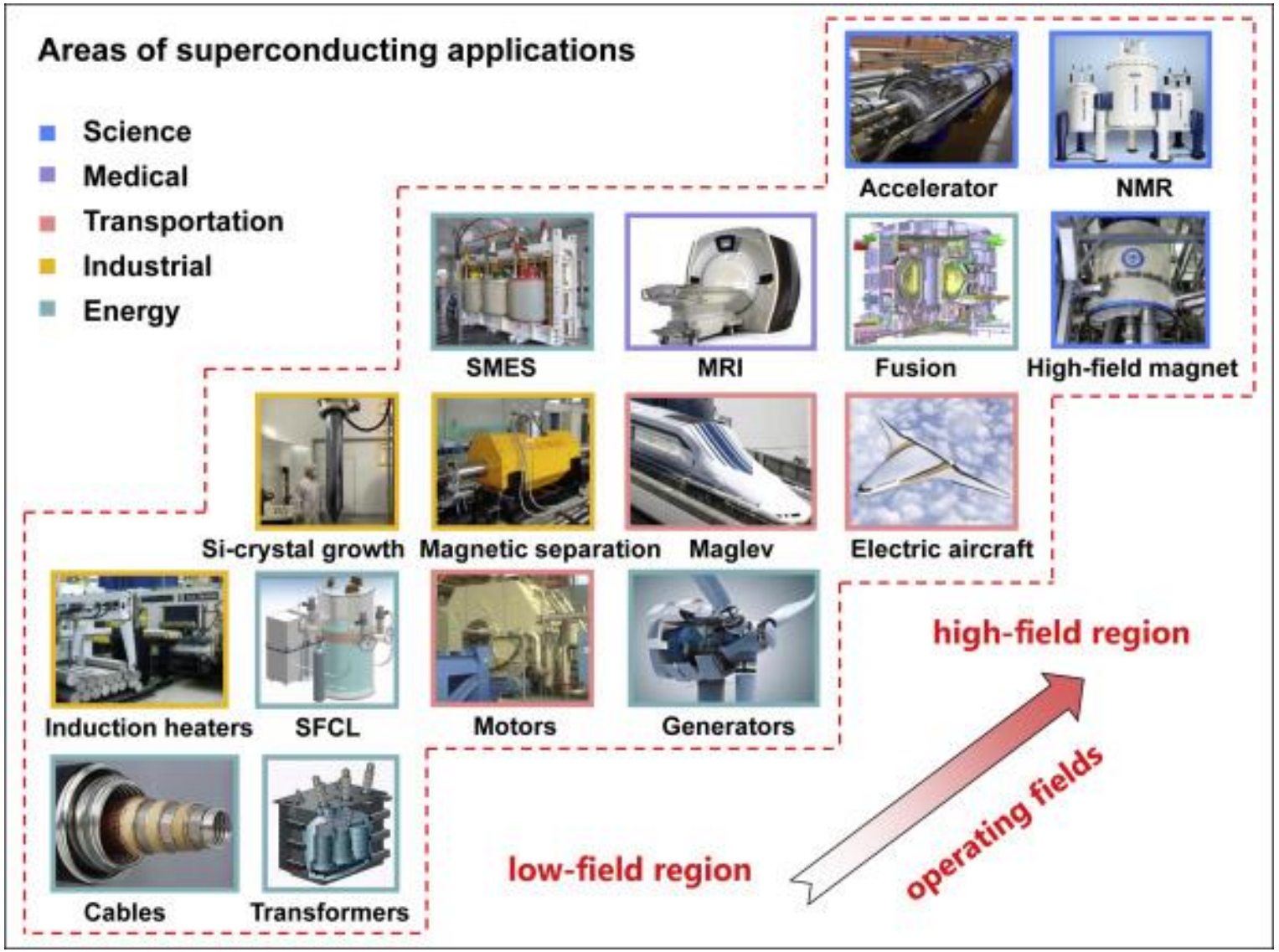
SPARC LA SCOMMESSA ITALIANA

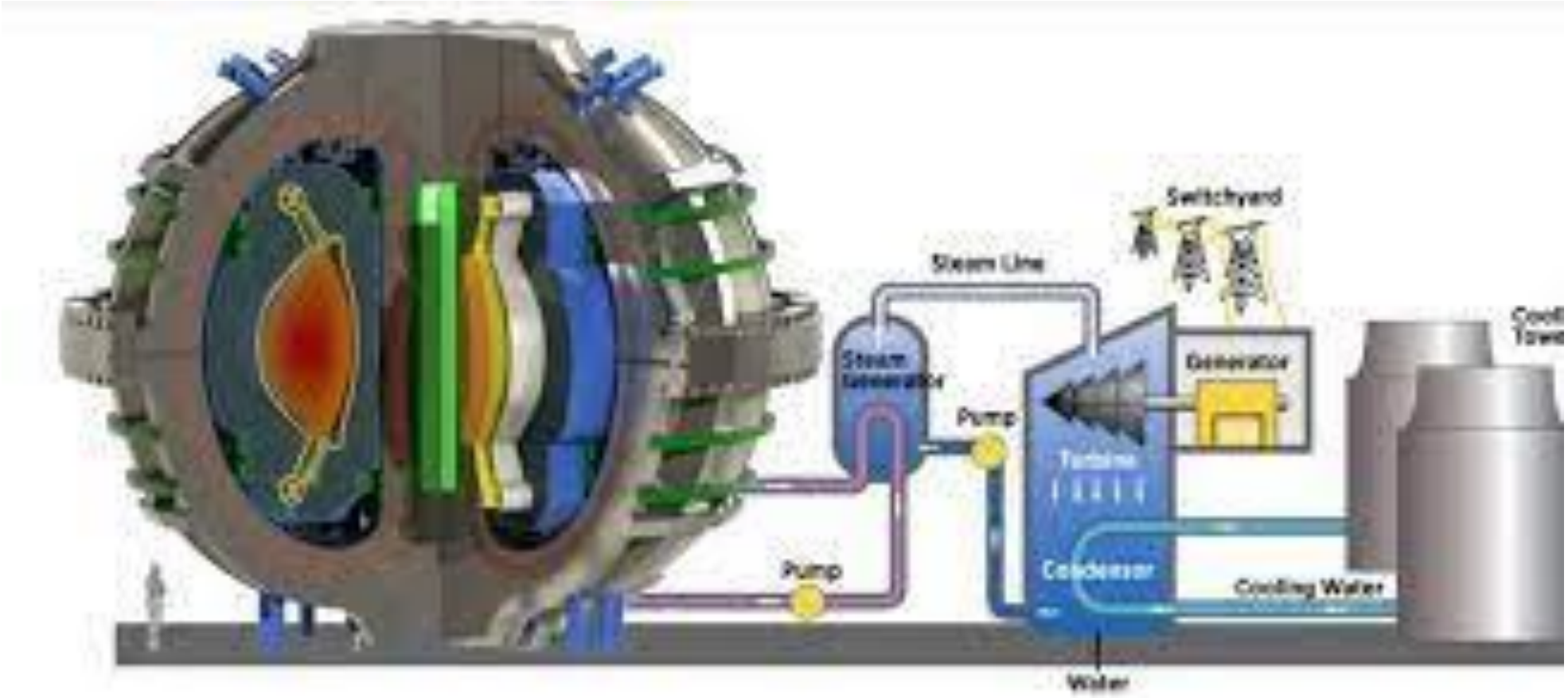
Superconduttori ad alta temperature

Progresso tecnologico piu' importante



RICADUTE APPLICATIVE




Switchyard
Steam Line
Generator
Pump
Turbine
Condenser
Cooling Water
Pump
Water

SPARC

STELLARATOR

Simile al Tokamak ma campo elicoidale

Vantaggi: plasma molto piu' stabile

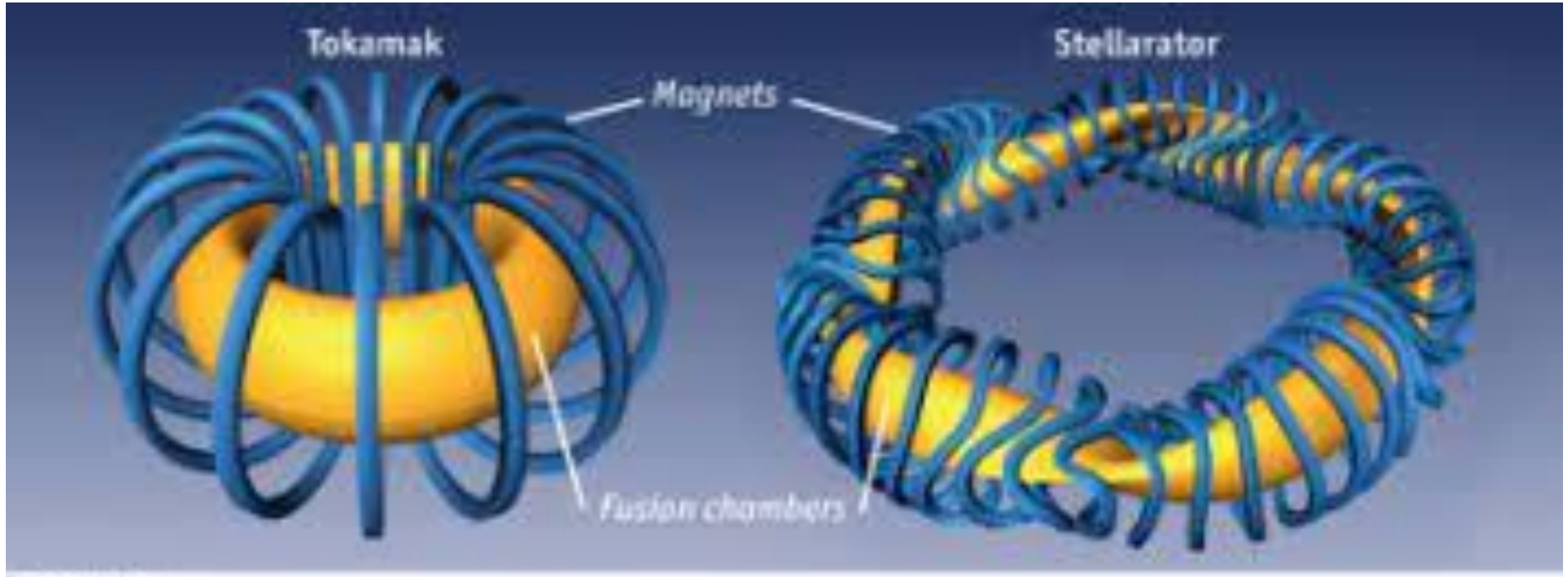
Limite di Greenwald 10 volte superiore

Riscaldamento continuo

Funzionamento costante

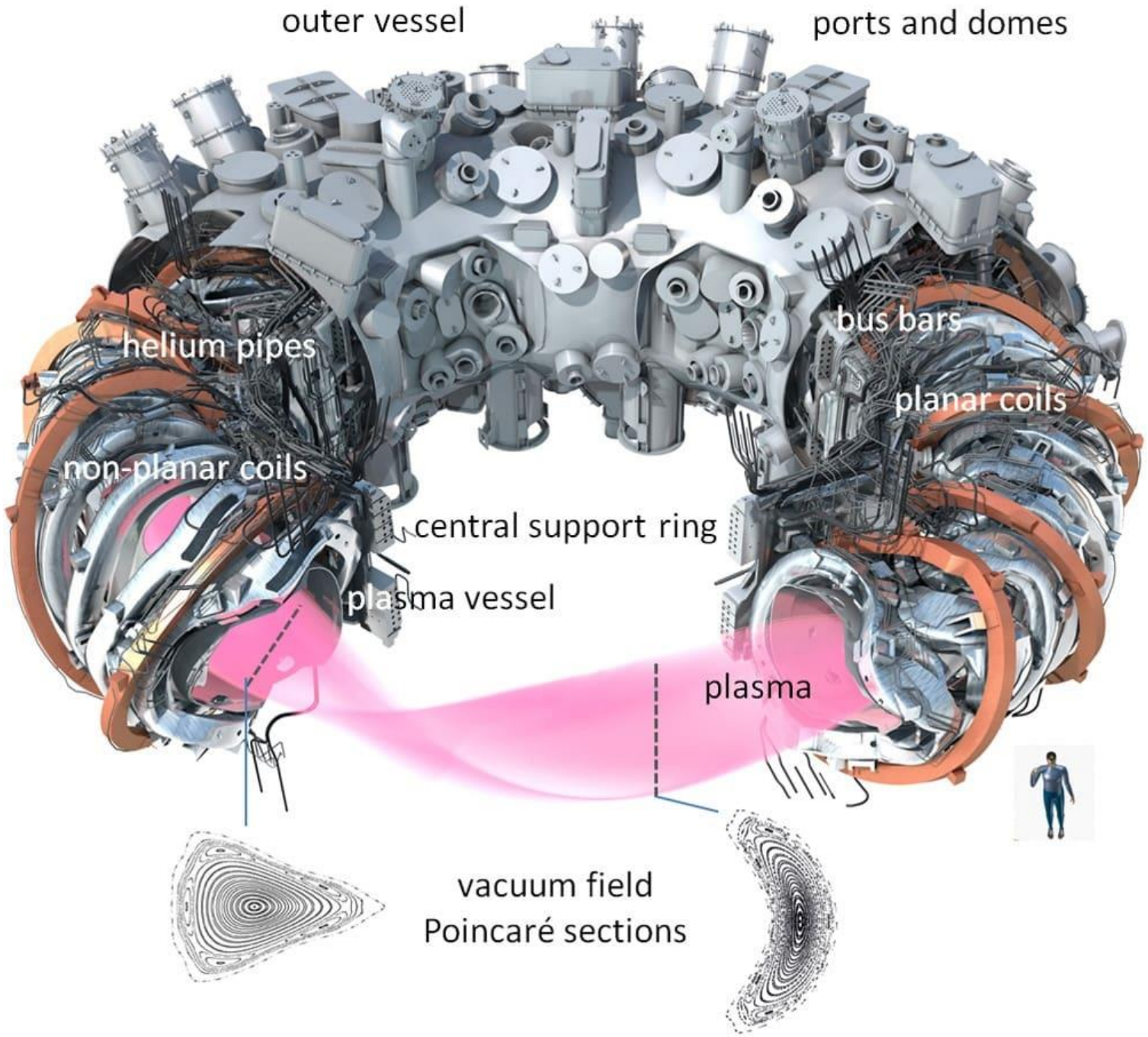
Svantaggi: ingegneristicamente molto complesso

E' la scelta della Germania



STELLARATOR

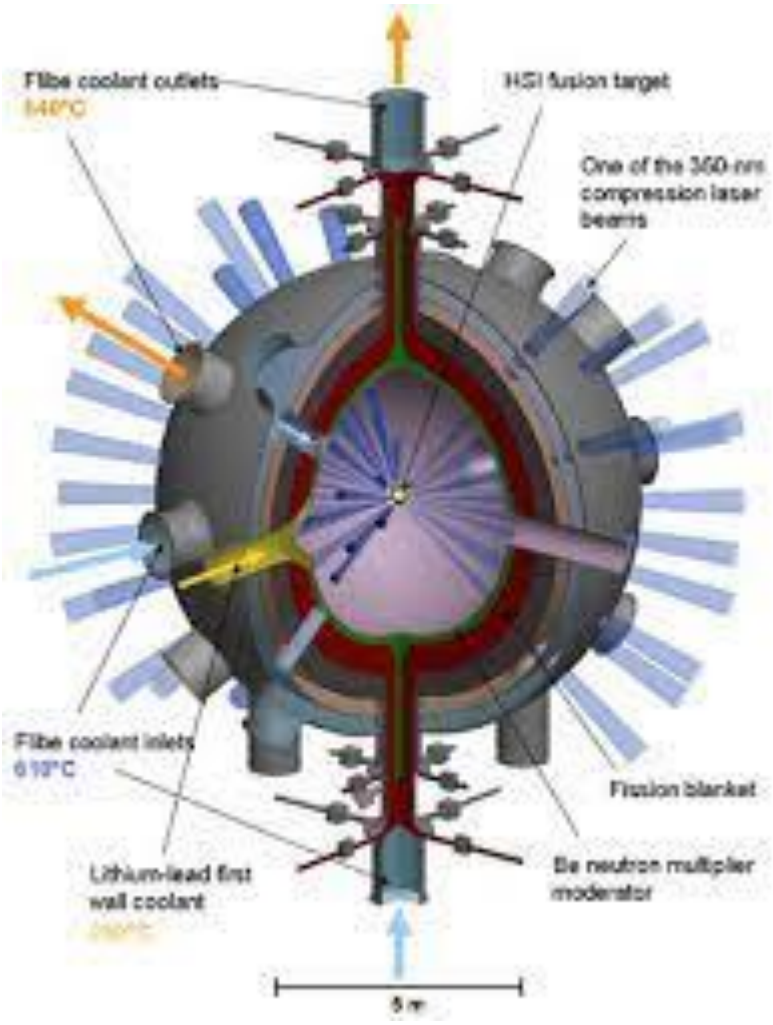
STELLARATOR

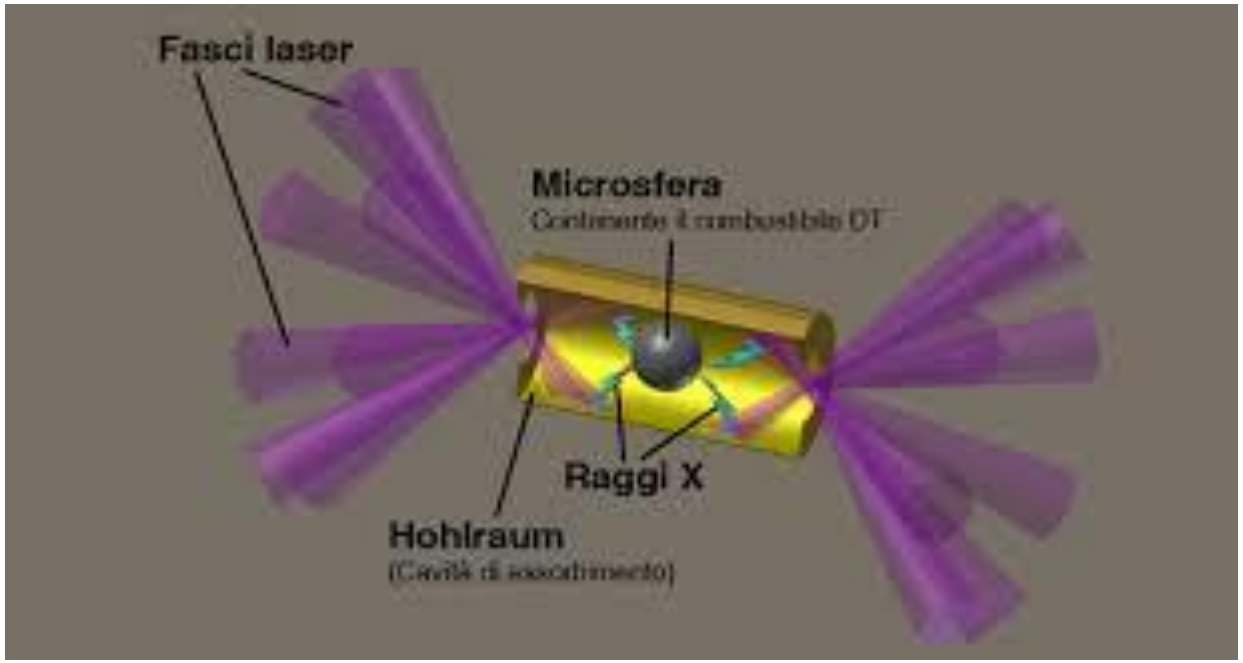


CONFINAMENTO INERZIALE

Principio completamente diverso:

- Bombardare con impulsi laser microsfere solide (< 4K) di Deuterio e Tritio
- Come la Bomba H (comprimere e scaldare con l'esplosione di una bomba A)
- Gli impulsi laser creano un riscaldamento esplosivo che fa fondere i nuclei contenuti nelle microsfere
- Sviluppato dagli USA in California al NIF (National Ignition Facility)
- 192 Laser
- Amplificazione estrema
- Potenza sviluppata in 50 picosecondi pari a quella di 10 milioni di centrali
- Raggiunto il pareggio
- Potenze prodotte molto modeste


Flibe coolant outlets
HSI fusion target
One of the 360 nm compression laser beams
Flibe coolant inlets
Fission blanket
Lithium-lead first wall coolant
Be neutron multiplier moderator


Fasci laser
Microsfera
Raggi X
Hohlraum

CONFINAMENTO CENTRIFUGO GENERAL FUSION CANADESE

Centrifugazione di Piombo e Litio fusi

Iniezione di pochi mg di deuterio tritio

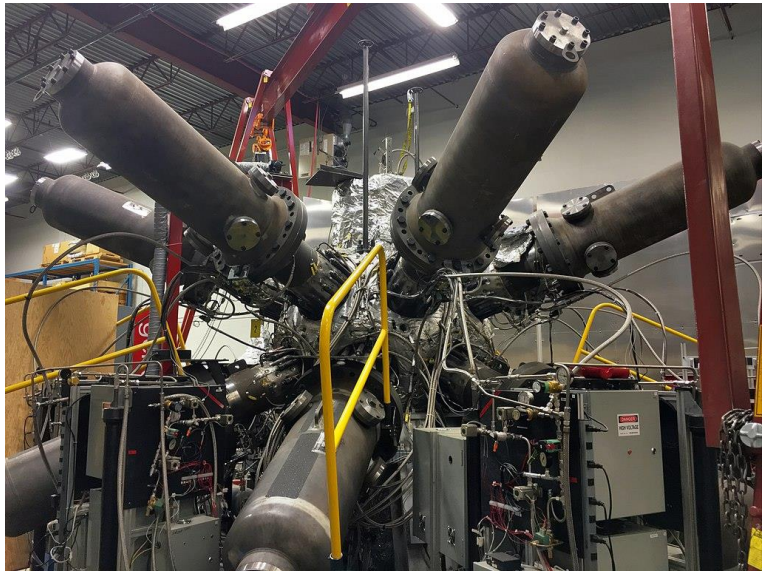
Collasso del vortice e compressione fino alla fusione

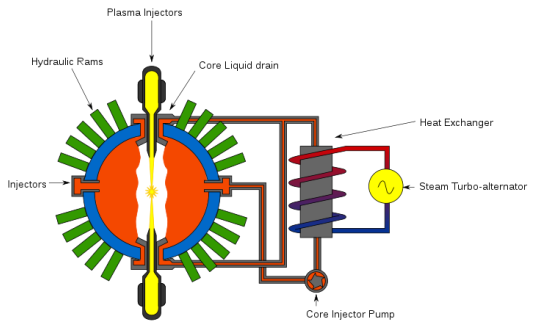
I neutroni interagiscono col Litio riformando il Tritio

I metalli liquidi estraggono il calore prodotto

In fase di prova i componenti

Primo prototipo nel 2025





PROGETTI A-NEUTRONICI

Reazioni a-neutroniche ad alta sezione d' urto

Non realizzabili con il confinamento magnetico

Reazioni aneutroniche ad alta sezione nucleare[1]										
isotopi	Reazione									
Deuterio - Elio-3	^{2}D	+	^{3}He	→		^{4}He	+	^{1}p	+ 18,3 MeV
Deuterio - Litio-6	^{2}D	+	^{6}Li	→	2	^{4}He			+ 22,4 MeV
Proton - Litio-6	^{1}p	+	^{6}Li	→		^{4}He	+	^{3}He	+ 4.0 MeV
Elio-3 - Litio-6	^{3}He	+	^{6}Li	→	2	^{4}He	+	^{1}p	+ 16,9 MeV
Elio-3 - Elio-3	^{3}He	+	^{3}He	→		^{4}He	+	2 ^{1}p	+ 12,86 MeV
Proton - Litio-7	^{1}p	+	^{7}Li	→	2	^{4}He			+ 17,2 MeV
Proton - Boron-11	^{1}p	+	^{11}B	→	3	^{4}He			+ 8,7 MeV
Protone - Azoto	^{1}p	+	^{15}N	→		^{12}C	+	^{4}He	+ 5,0 MeV

TAE TECHNOLOGIES: COLLISIONE DI ATOMI

Atomi non ionizzati

Sparati dalle due estremità

Niente neutroni

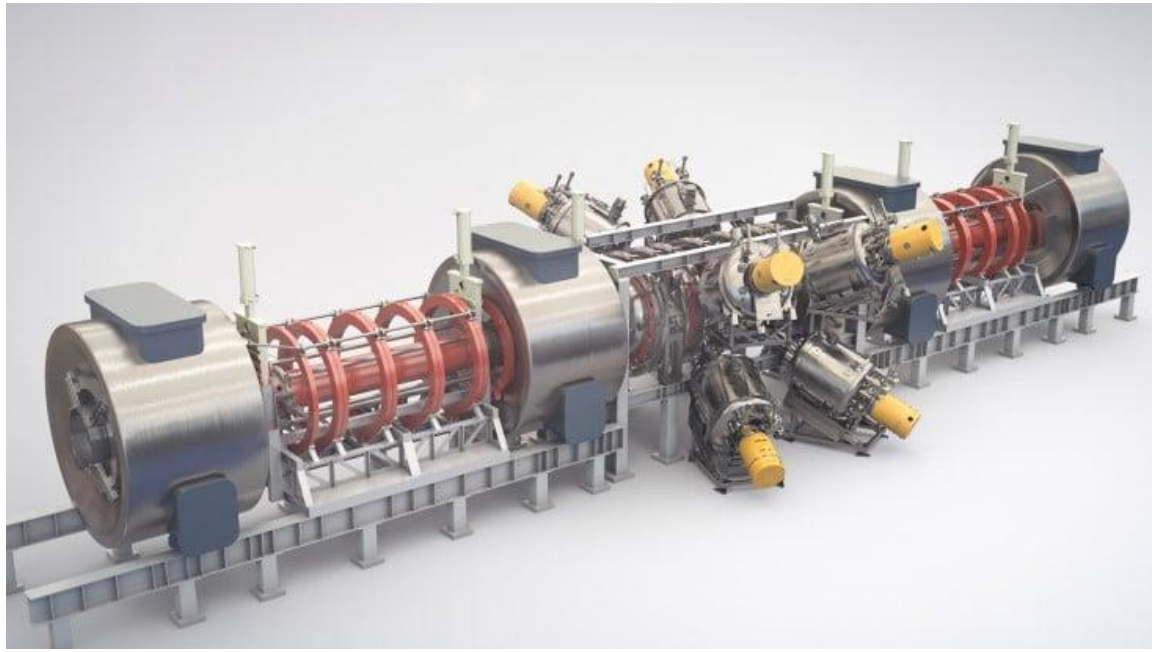
P-B11

3 miliardi di gradi

Conversione diretta per induzione

Progetto Da Vinci

Per il 2030



HB11 AUSTRALIANA: IDROGENO-BORO-11 CON LASER

Basse temperature

Protoni sparati con laser CPA

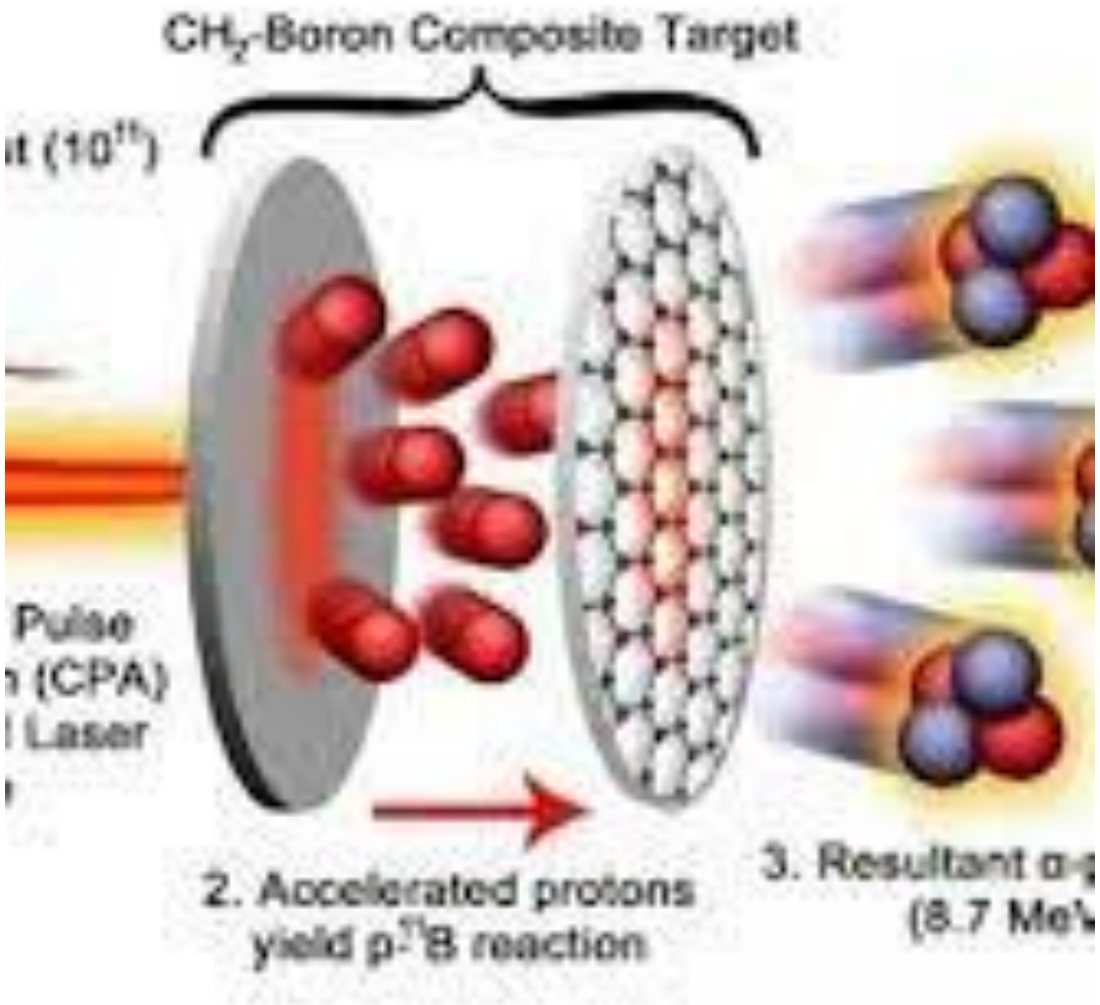
Produzione di solo Elio

Reazione a-neutronica

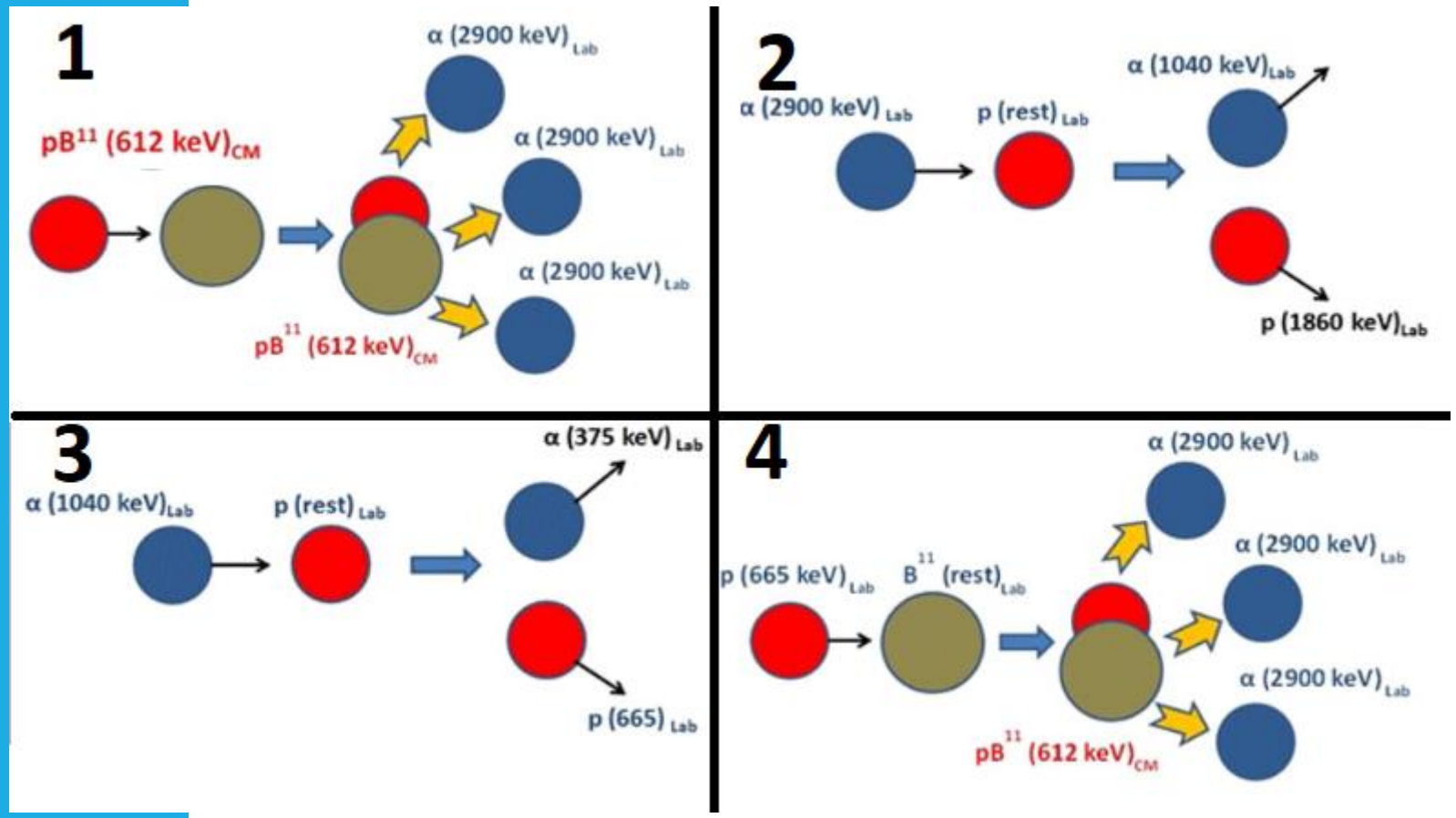
Macchinario relativamente semplice e scalabile

Piu' sicuro di una caldaia a gas

Per ora solo pochi Watt



REAZIONE IDROGENO BORO



CORSA ALLA FUSIONE

Incremento esponenziale di investimenti

Molti privati fra cui i magnifici tre, Gates, Bezos Musk

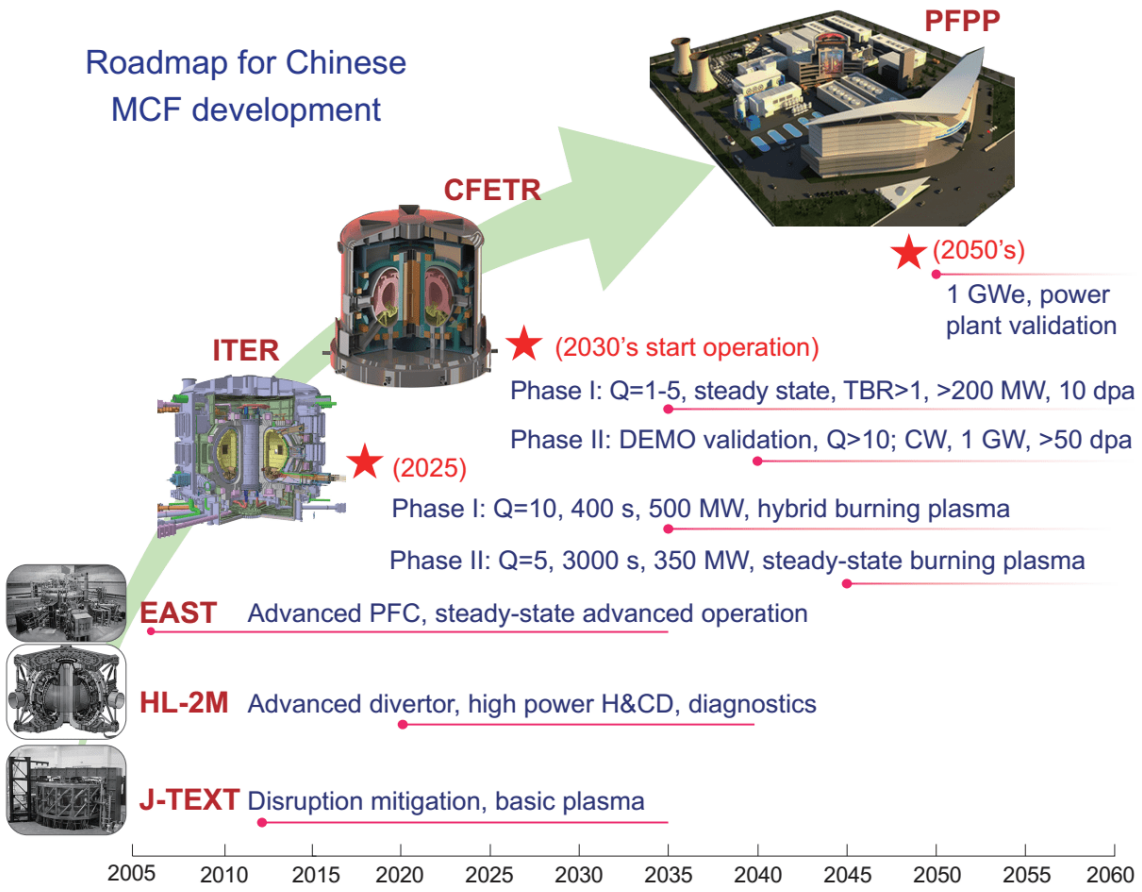
A fine 2021 ITER ha raccolto 22Miliardi$

Altri 2,4M$ su progetti alternativi

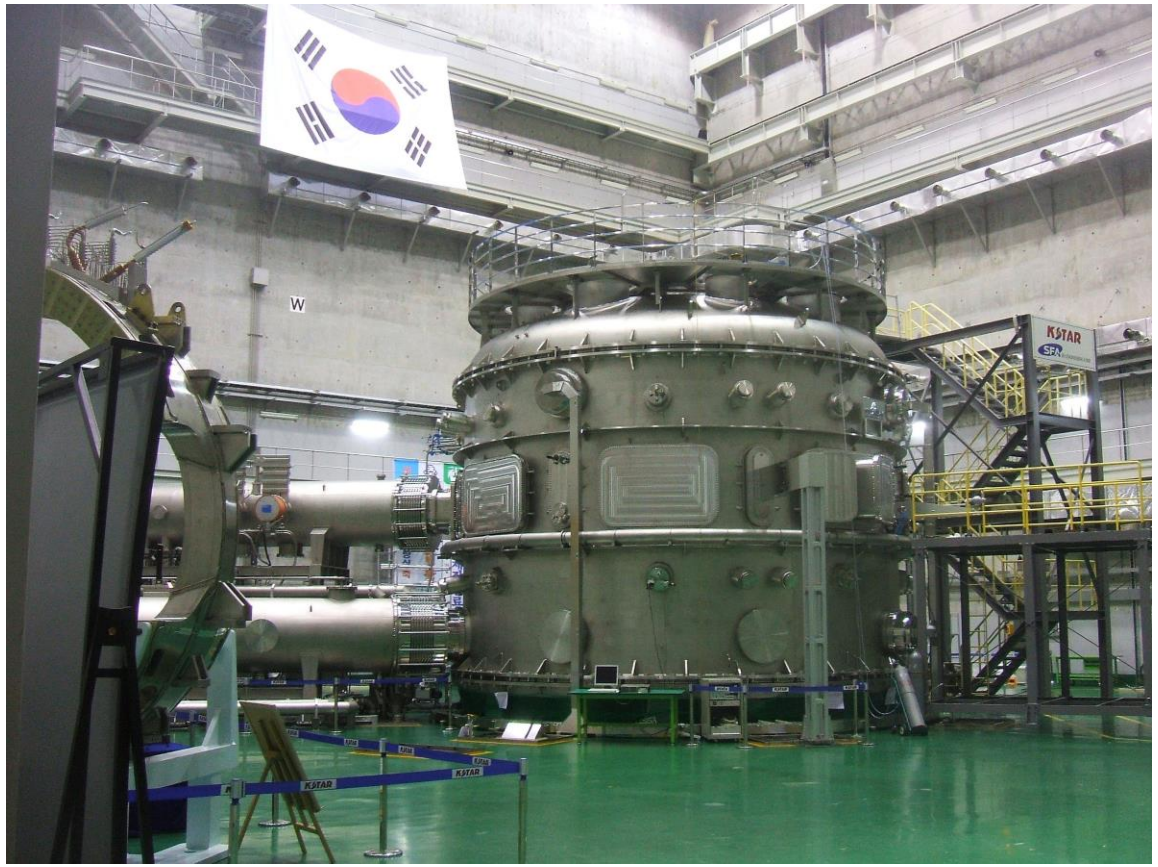
Corea e Cina progetti autonomi avanzati

CINA: RECORD DI ACCENSIONE (1000 SEC)

Punta sugli sviluppi di ITER



KOREA DEL SUD: KSTAR



CONCLUSIONI

La fusione nucleare come fonte di energia e' certamente realizzabile

Incognite:

- Costi a regime
- Tempi per la produzione su grande scala
- Rendimento o fattore di guadagno (Innesco molto dispendioso)

Aspetti positivi

- Difficoltà solo tecnologiche (teoria funziona)
- Diverse alternative
- Investimenti massicci (il Capitale ci crede)

CONCLUSIONI

Entro il 2040 piu' impianti DEMO

Entro il 2050 qualche prototipo con produzione commerciale

Graduale penetrazione nella seconda metà del secolo

Sviluppo di reazioni a-neutroniche

Fonte prevalente per la fine del secolo

Se SPARC funziona si guadagnano 10 anni e l' Italia e' co-proprietaria della tecnologia

TROPPO TARDI ?

NO

Si per i catastrofisti

Molto piu' probabilmente no.

Renderà obsolete le fonti di produzione attuali incluse le rinnovabili con un impatto territoriale e un impronta energetica assai minore

Avrà ricadute tecnologiche importanti come e forse piu'di quelle ottenute con l' invio dell'uomo sulla Luna

In tutti gli aspetti della vita quotidiana

Eliminerà il piu' importante motivo del contendere fra nazioni

La nostra migliore alternativa