



Il Sole sulla Terra: energia per il presente e il futuro?

Relatore:

Andrea Macchi
(CNR/INO, Pisa)

Evento:

Conferenza UNIDEL
Lucca
14 Ottobre 2022

Il Sole *scalda* la Terra ...



... ovvero: la *luce* solare trasporta energia dal Sole alla Terra

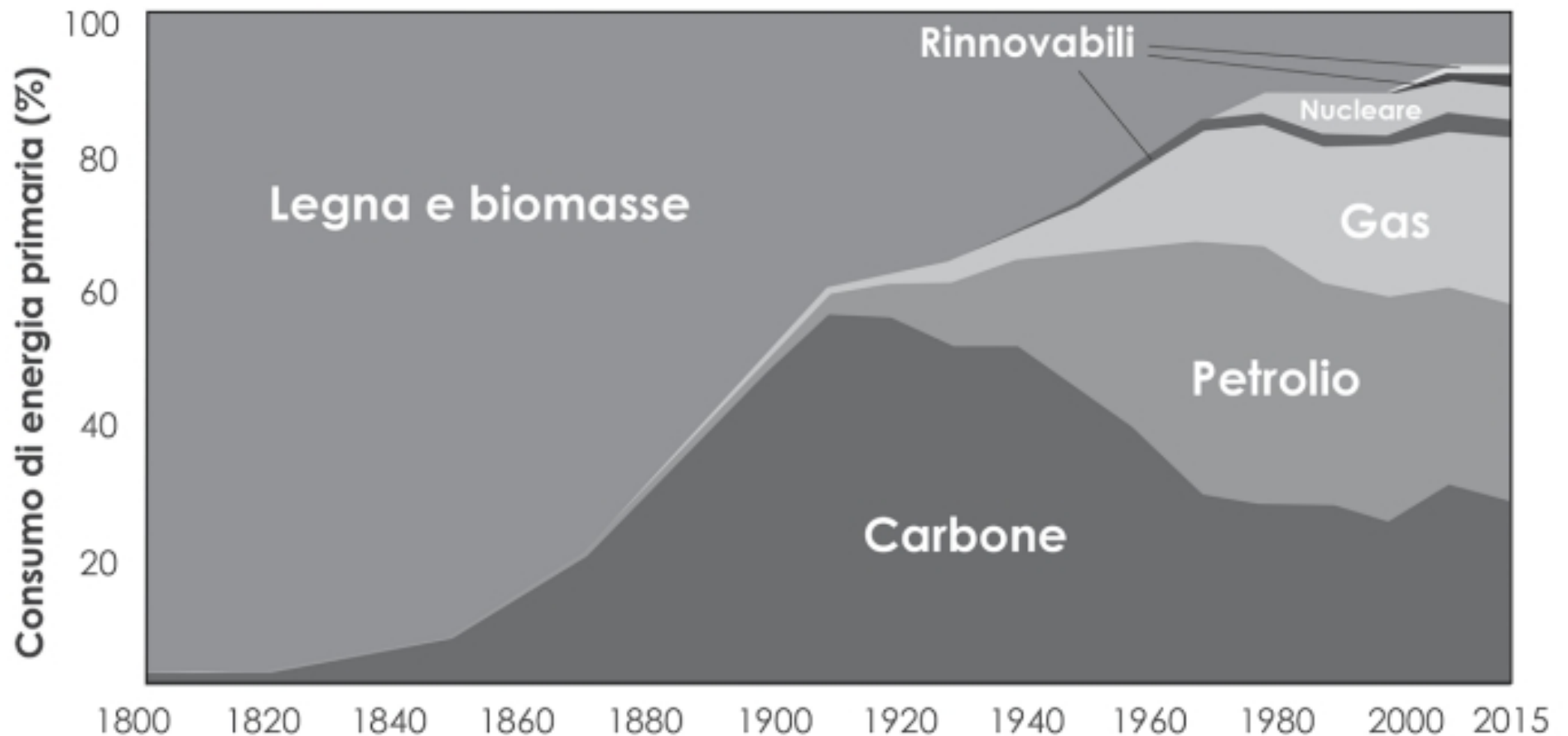
Utilizzo “diretto” dell’energia solare



Utilizzo “indiretto” e “ritardato” dell’energia solare



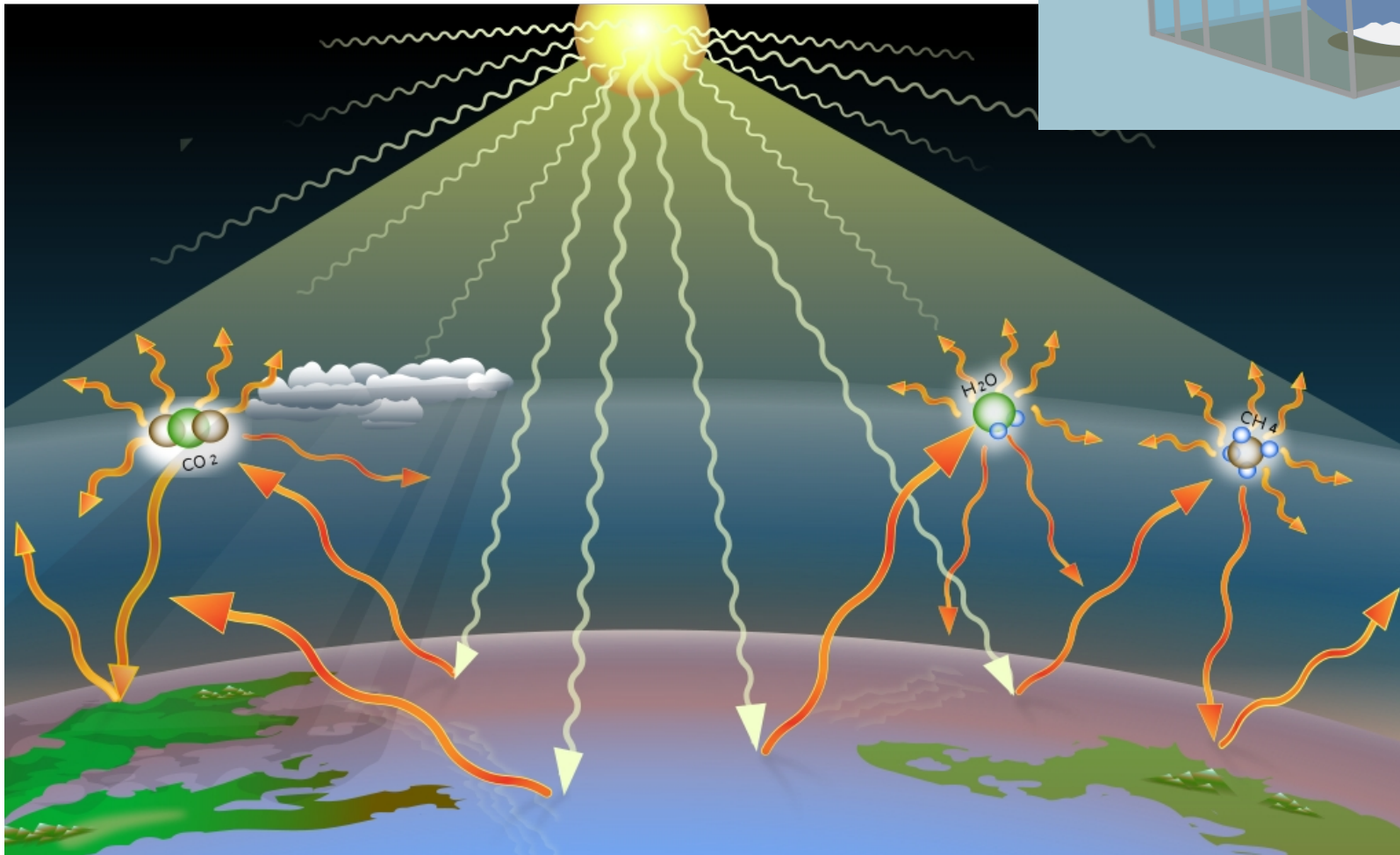
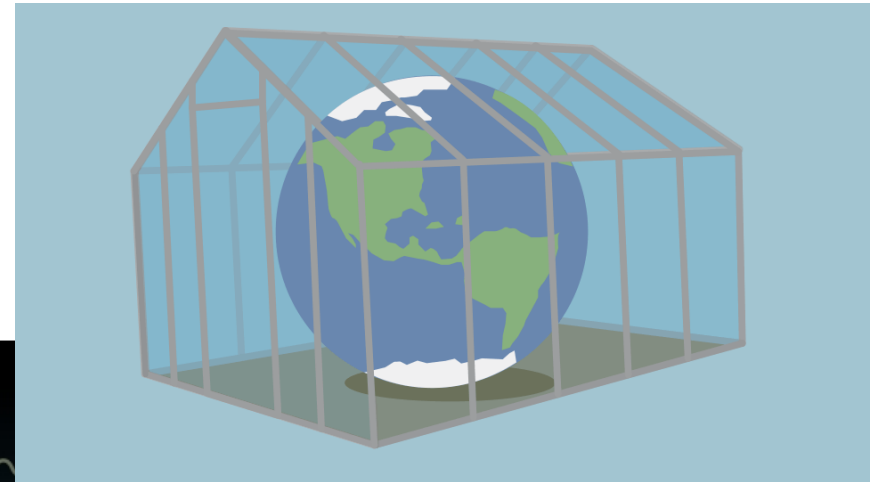
Evoluzione fonti energetiche nel tempo 1800-oggi



da: N.Armadori, “Emergenza energia: non abbiamo più tempo” (Dedalo Edizioni, 2022)

Effetto serra

(gas serra: anidride carbonica, vapor d'acqua, metano)



fonte:
climatekids
.nasa.gov

fonte: A loose necktie, Wikipedia

ENERGIA = “capacità di compiere lavoro”

Quantità fisica fondamentale associata al moto e al calore (= moto microscopico)

prodotta o assorbita in processi chimici, cambiamenti di stato, reazioni nucleari, ...

Unità di misura dell'energia:

caloria (cal) = 4.18 Joule (J)

kilowattora (kWh) = 3.600.000 J = 860.000 cal

Ma l'ENERGIA si conserva?

Sì, ogni “utilizzo” o “consumo” di energia in realtà è una conversione tra forme diverse di energia

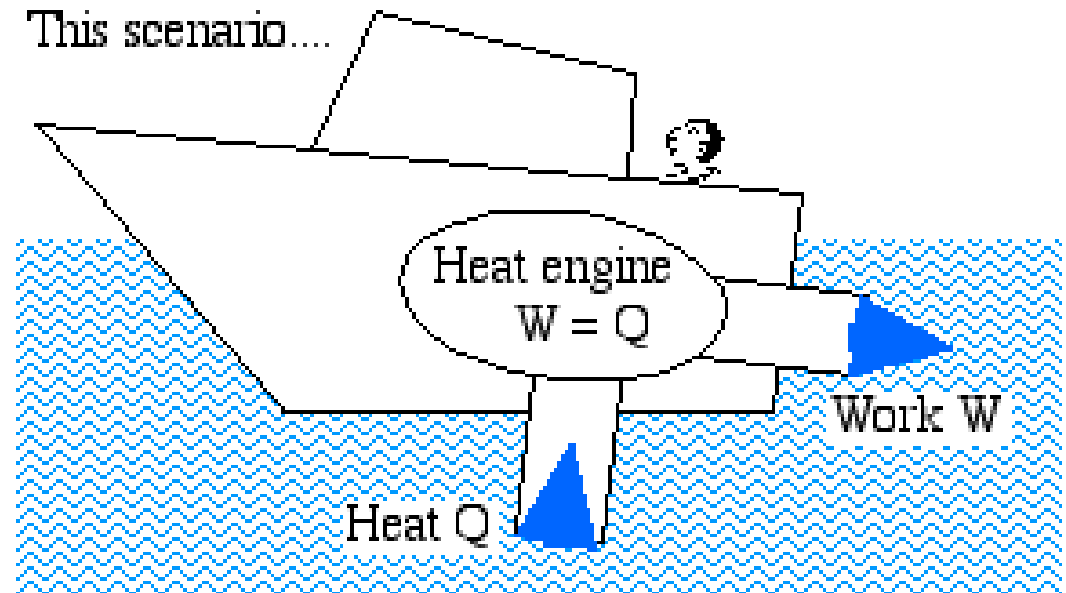
Ma la conversione di energia “ordinata” in **calore** ovvero “disordinata” è **irreversibile**

(Secondo Principio della Termodinamica)

Questo limita l'efficienza di ogni “motore” (ovvero “convertitore”) a meno del 100%

Kelvin-Planck Statement of the Second Law:

This scenario....



Energia di un corpo di 1kg che cade da 1m:

$$9.8 \text{ J} = 2.4 \text{ cal} = 0,000002726 \text{ kWh}$$

Consumo giornaliero medio corpo umano:

$$1.000 \text{ kcal} = 4.000 \text{ kJ} = 1.1 \text{ kWh}$$

Energia prodotta da 1 litro di benzina:

$$9.6 \text{ kWh} = 34.560 \text{ kJ} = 8.256 \text{ kcal}$$

Tipico consumo giornaliero abitazione media:

$$10 \text{ kWh} = 36.000 \text{ kJ} = 8.600 \text{ kcal}$$

Costo 1 kWh elettrico: ca. 0.2€ = 20€cent

POTENZA = energia (prodotta, erogata, utilizzata, ...) per unità di tempo

Unità di misura:

1 Watt (W) = 1 Joule / 1 secondo (s)

1 wattora (Wh) = 1 Watt X 1 h

= 1 Watt X 3600 s = 3600 J

1 kWh = 1000 Wh

Potenza media corpo umano = 50 W

Potenza media elettrodomestici = 100-1000 W

Quanta energia ci trasmette il Sole?

Intensità = Potenza per unità
di superficie

Intensità media della
radiazione solare sulla
superficie in Italia:

$$\approx 0.2 \text{ kWatt/m}^2$$

Ovvero: su 1 m^2 arriva in 1 ora
un'energia di 0.2 kWh

10m^2 in 10 ore di luce raccolgono 20 kWh ...



<http://www.weatherclipart.net>

Quanta superficie terrestre ci servirebbe?

Consumo elettrico Italia / anno: 300 miliardi kWh

Assumendo 10h di sole al giorno per 300 giorni questa energia verrebbe raccolta su **500 km²**

MA: l'efficienza di un pannello fotovoltaico è **20%**

→ **2500 km²**

(in prospettiva; efficienza **30%** → **1500 km²**)

Superficie tetti disponibili: 750 km²

(superficie comune/provincia di Lucca: 183/1900 km²)

(superficie autostrade: 150 km²)

Quanta superficie terrestre ci servirebbe?

Consumo totale Italia / anno: 1200 miliardi kWh
(include trasporti oltre a industria, agricoltura, utenze domestiche, servizi ...)

Assumendo 10h di sole al giorno per 300 giorni e un'efficienza del 20% questa energia verrebbe raccolta su **10000 km²**

(superficie Toscana: 22000 km²,
superficie Basilicata: 10070 km²)

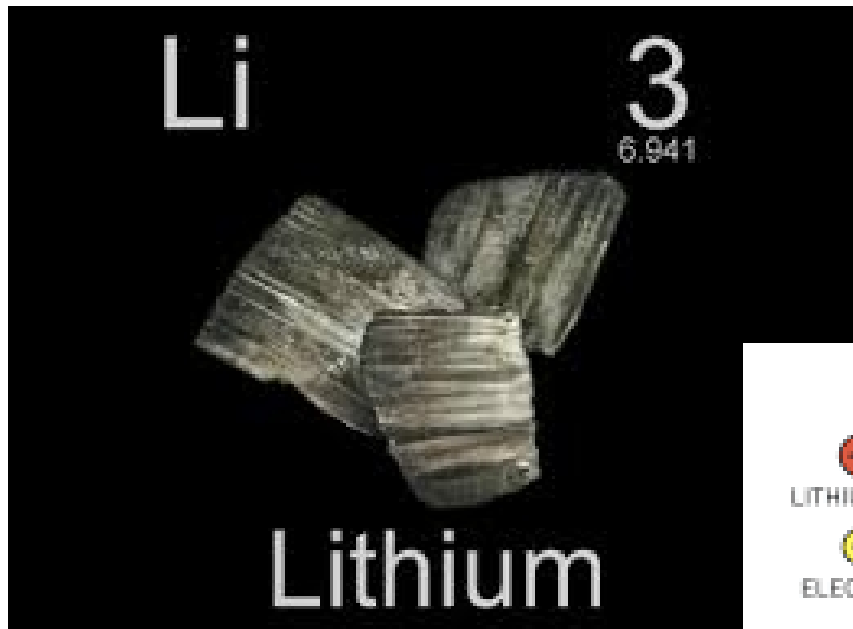
Problemi aperti

- **Variabilità** giornaliera/stagionale del flusso solare
- Bassa **intensità**
(fotovoltaico: $< 15 \text{ W/m}^2$, abitazione: $20-100 \text{ W/m}^2$,
industria (es. acciaieria) $300-900 \text{ W/m}^2$)
- Modesto “**ritorno energetico su investimento**”
= $(\text{Energia prodotta})/(\text{Energia usata})$
(fotovoltaico: 5-10, fonti fossili: 100)
- numero consumatori in **crescita**

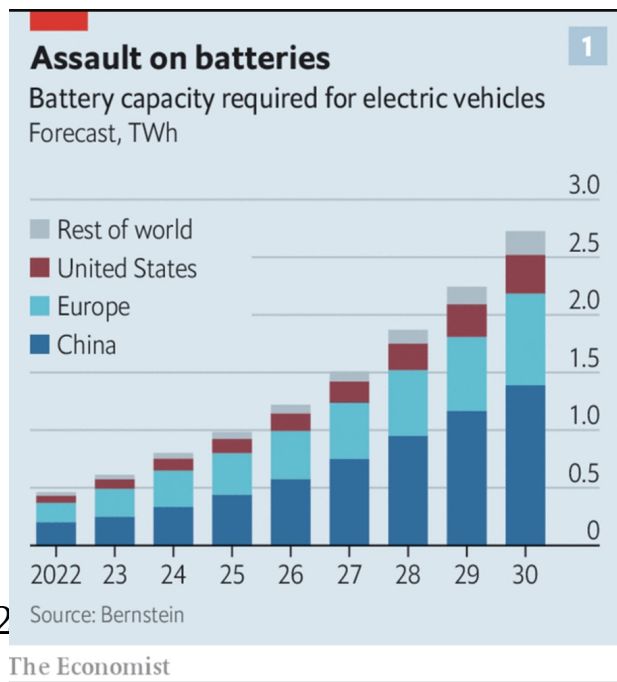
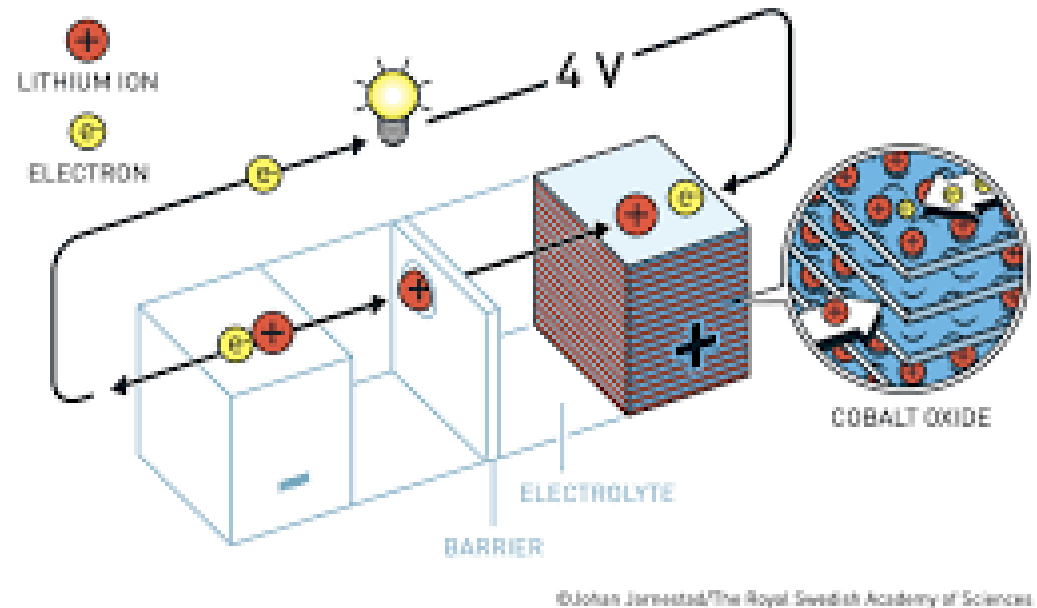
Necessario:

- maggiore **efficienza** (es. motori elettrici)
- **accumulo** energia solare (\rightarrow **batterie**)

LITIO: Il “petrolio bianco”

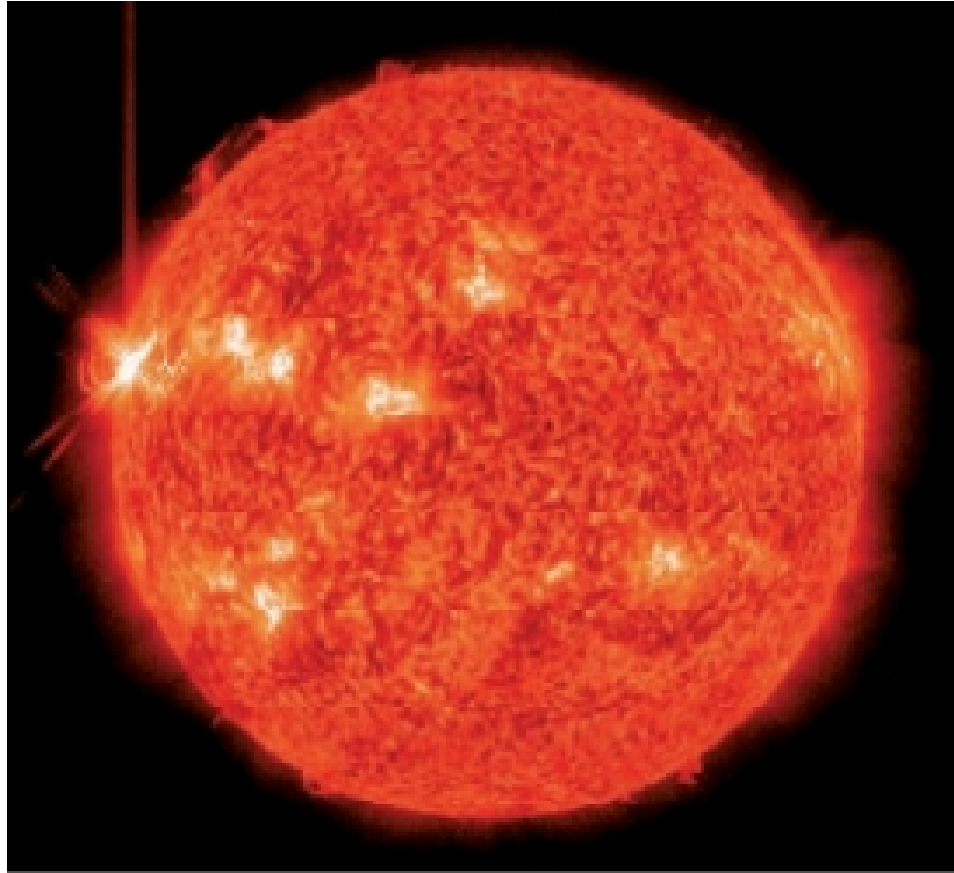


Batterie al Litio:
Premio Nobel per
la chimica 2019



Nuove esigenze di
sfruttamento di risorse
naturali ...

Il Sole in laboratorio



Il Sole e le stelle producono energia per **Fusione Nucleare** ovvero trasformando elementi leggeri principalmente Idrogeno in elementi più pesanti.

Possiamo riprodurre il processo sulla Terra?

Fusione nella cultura pop - II

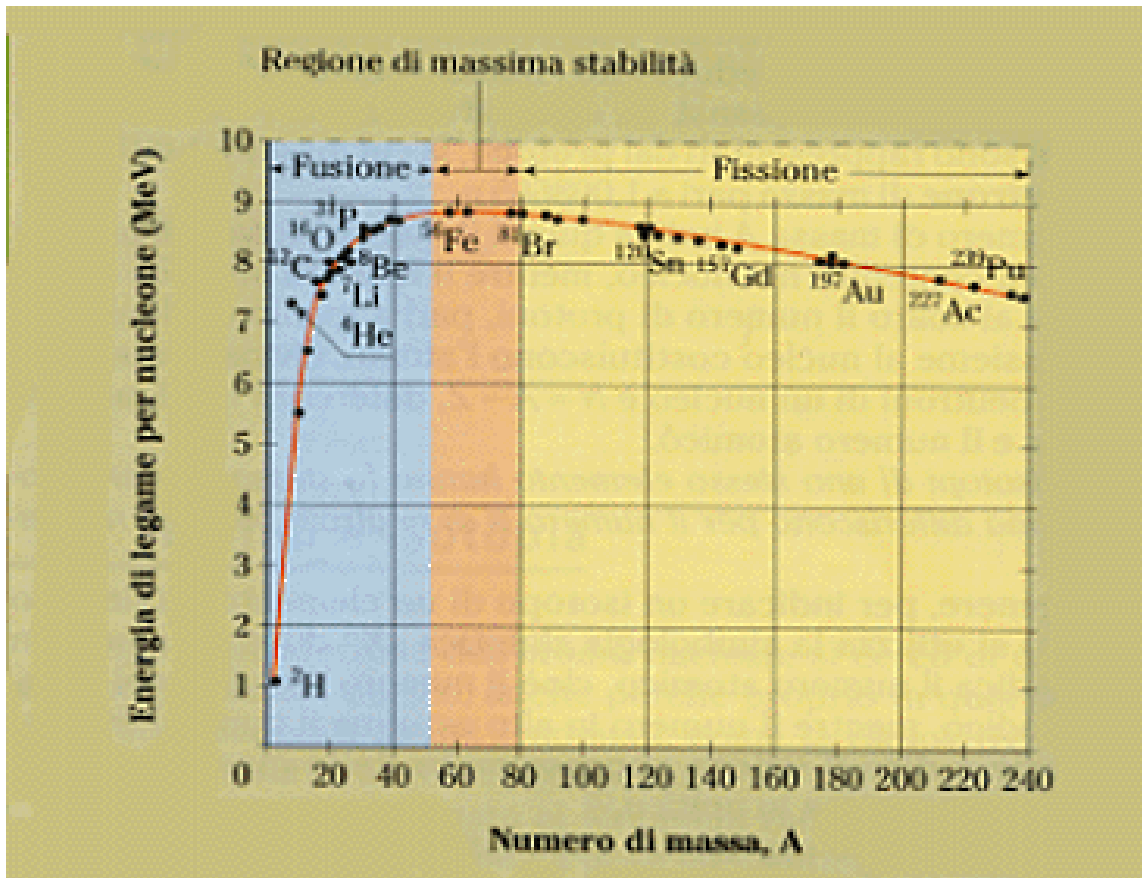


*L'esperimento di fusione del Dr Octopus
in "Spiderman 2" (2004)*

©Marvel, Columbia Pictures

Strip da: Amazing Spider-Man, #44 ©Marvel comics

Fusione vs. Fissione



L'energia di legame di un nucleo è massima per il Ferro: la fusione libera energia se coinvolge elementi più leggeri

Energia viene liberata anche "spezzando" elementi più pesanti del Ferro (e.g. Uranio):
Fissione Nucleare
(impianti "tradizionali")

Fisicamente.net , Roberto Renzetti

La dipendenza dell'energia di legame dal numero atomico rende conto dell'abbondanza relativa di elementi nell'Universo creati dalla **Nucleosintesi** nelle **stelle** (elementi leggeri) o in altri eventi "estremi" (elementi pesanti)

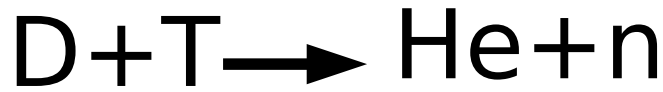
Ma da dove viene l'energia? ...

$$E=mc^2$$

La massa dei nuclei reagenti è maggiore di quella dei nuclei prodotti.

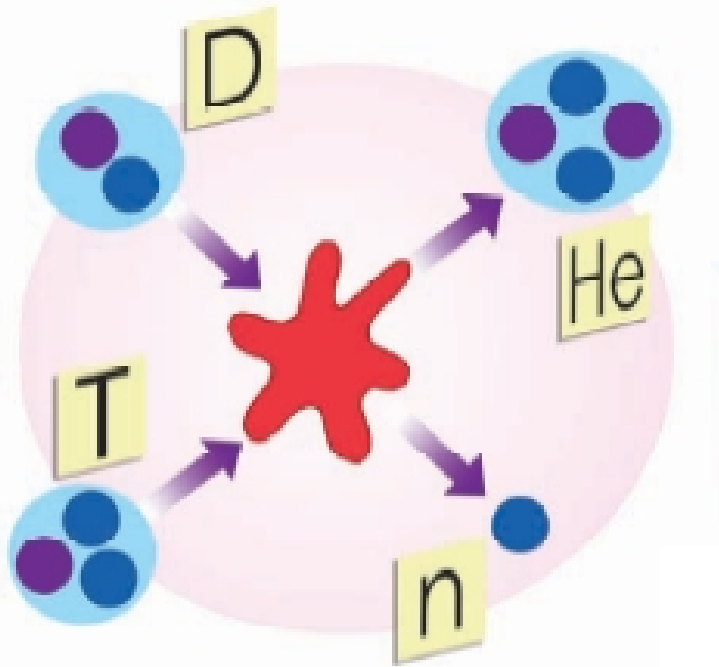
L'eccesso di “energia a riposo” si trasforma in energia cinetica dei prodotti.

Perché la fusione?



Fusione Deuterio-Trizio (isotopi dell'Idrogeno) per produrre Elio (He) più un neutrone (n)

- grande rendimento energetico
- +
- abbondanza di Deuterio nell'acqua
(Trizio prodotto nel ciclo)



1 cc d'acqua --> 8 KwH

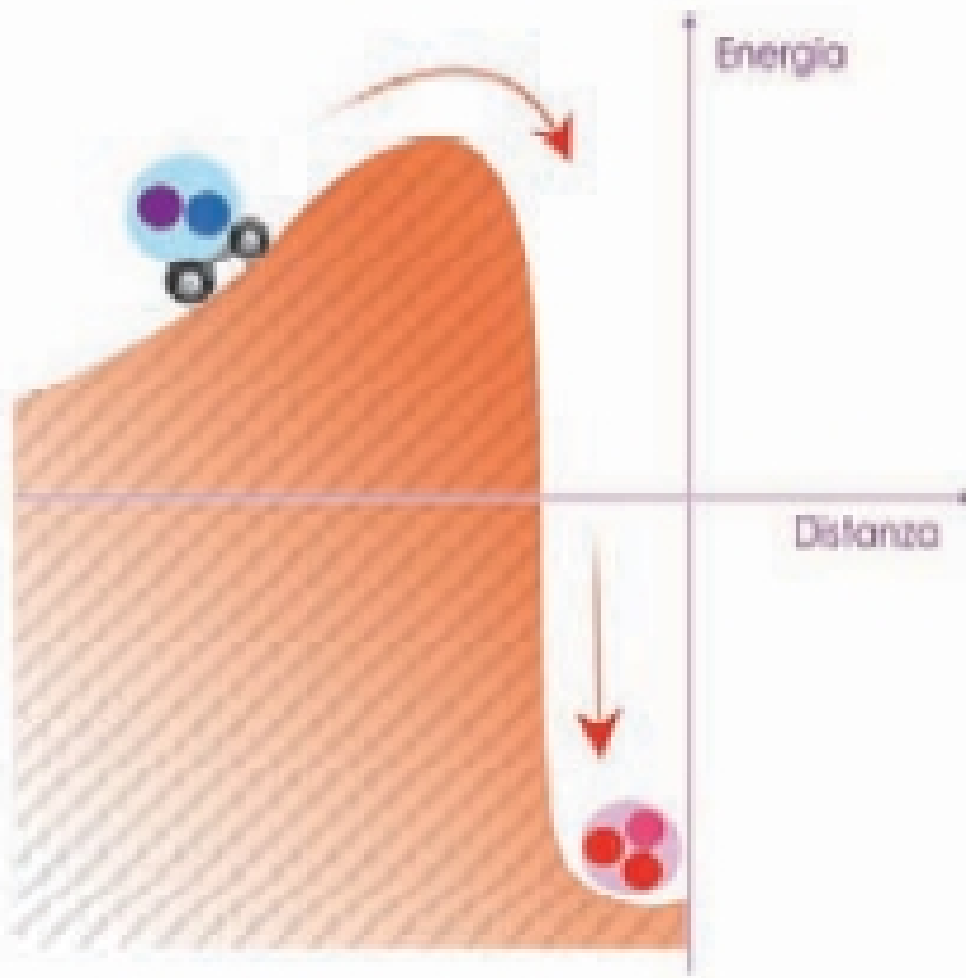
- neutrone (n)
- protone (p)



= consumo di 1
anno!

- impossibilità di reazioni incontrollate a catena
- limitato impiego e produzione di materiale radioattivo

Come si ottiene?



I nuclei hanno carica elettrica positiva e si respingono; la forza nucleare attrattiva domina solo a distanze brevi.

Occorre fornire ai nuclei energia cinetica necessaria per superare la “collina”

- **alta temperatura** per dare sufficiente energia ai nuclei
- **alta densità** per aumentare la probabilità di fusione

Un problema caldo e denso

Ricetta per produrre più energia di quella fornita per innescare la reazione:

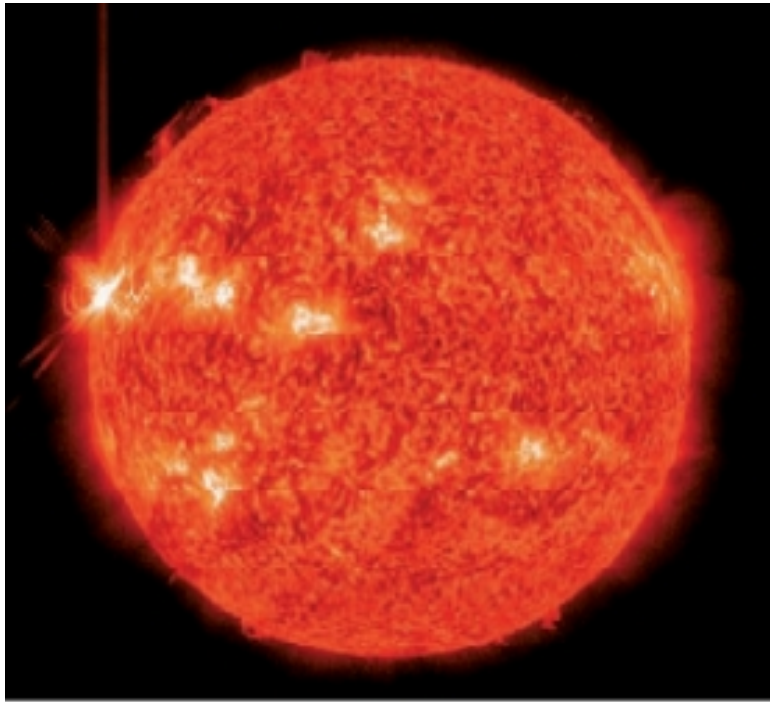
- 1) **scaldare** il combustibile ad alta temperatura (*), ovvero fornire energia cinetica ai nuclei sufficiente per avere un po' di reazioni di fusione
- 2) mantenere il combustibile a **densità** sufficientemente alta e per **tempo** sufficientemente lungo contenendo gli effetti di rarefazione dovuti all'alta temperatura (“**confinamento**”)
- 3) **autosostenere** la reazione, ovvero usare parte dell'energia prodotta per mantenere sufficientemente alta la temperatura (“**ignizione**”)

(*) temperatura necessaria per “ignire” la reazione DT :

$$T \approx 100.000.000 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Le dimensioni contano

- In assenza di confinamento il combustibile tende ad espandersi diminuendo densità e temperatura
- Al raffreddamento contribuisce fortemente l'emissione di radiazione elettromagnetica (come per ogni corpo caldo)



Il **Sole** (così come una **stella** generica) ha vantaggio delle grandi dimensioni: la materia è confinata dalla **gravità** e la radiazione è riassorbita all'interno

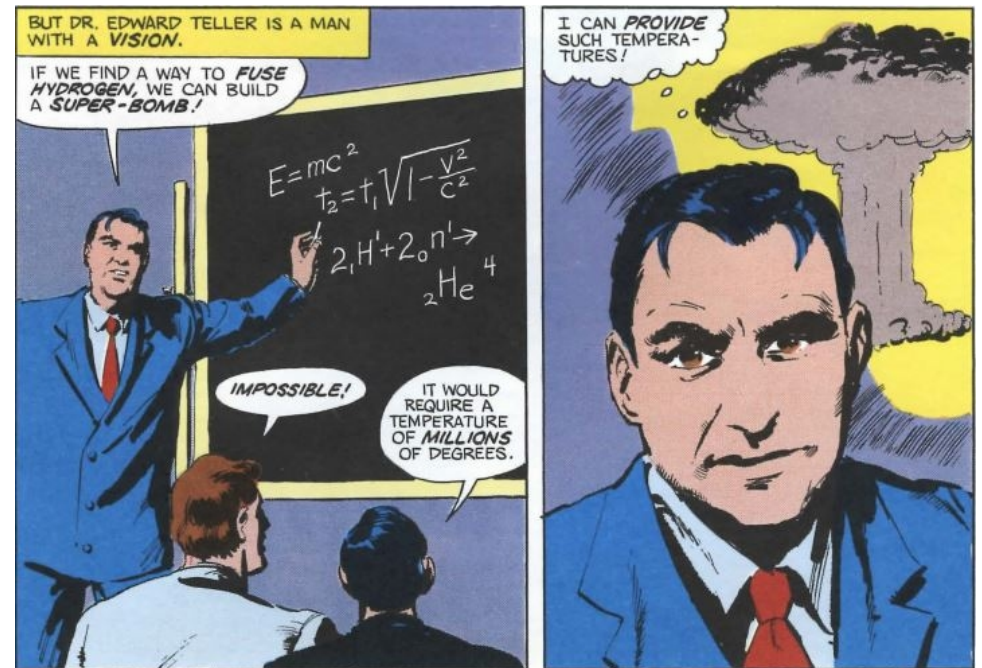
Il confinamento in versione “miniaturizzata” (rispetto al Sole!) è molto più difficile ...

Più facile la fusione “incontrollata” ...



Test “Ivy Mike” (1952) della bomba H (“all'idrogeno”) progettata da **E. Teller** e S.Ulam

Fusione DT innescata da una bomba atomica “primaria” a fissione



Esistono possibili applicazioni militari della ricerca in fusione controllata ma meno “critiche” della fissione (es: non c'è produzione di materiale fissile)



... che quella controllata

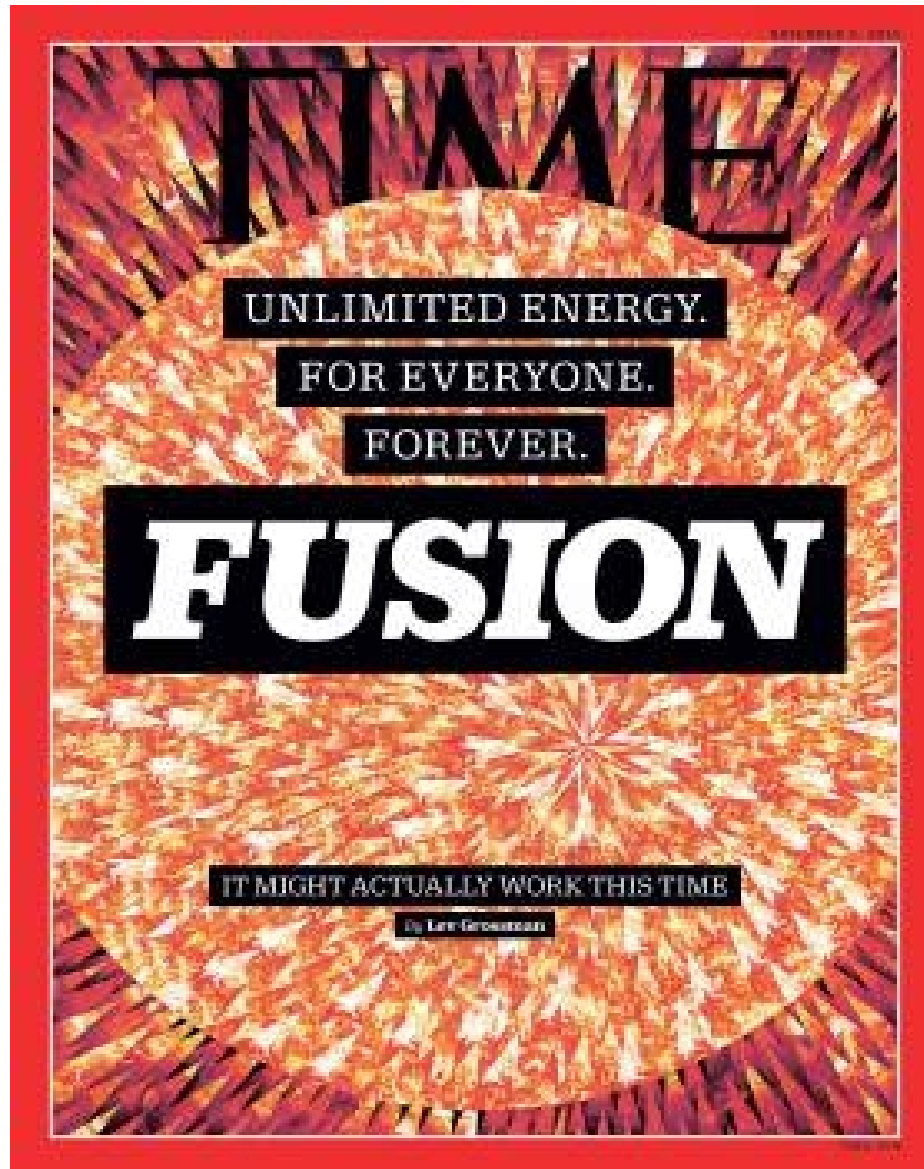
Alle temperature necessarie per la fusione materia si trova in uno stato di *plasma* (gas completamente ionizzato, stato del >99,9% della materia visibile nell'Universo)



Controllare un plasma è complicato
(è un mezzo tendenzialmente instabile ...)

“C'è il plasma di mezzo? Non funzionerà”
(E. Teller, sui primi progetti di fusione)

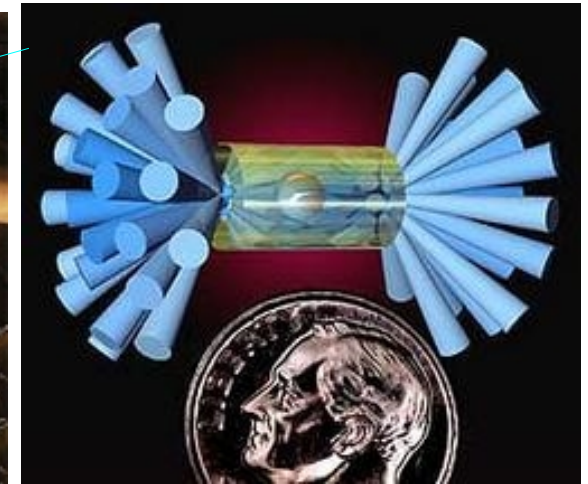
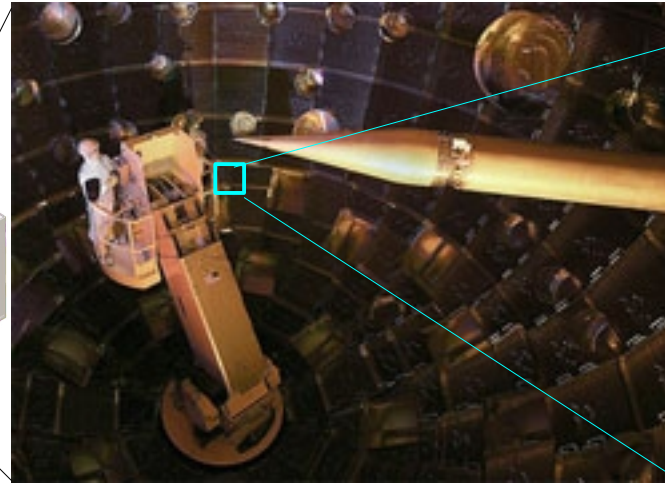
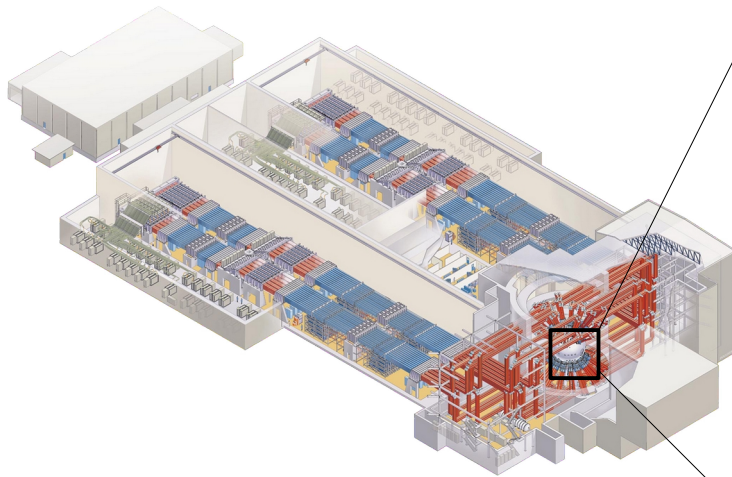
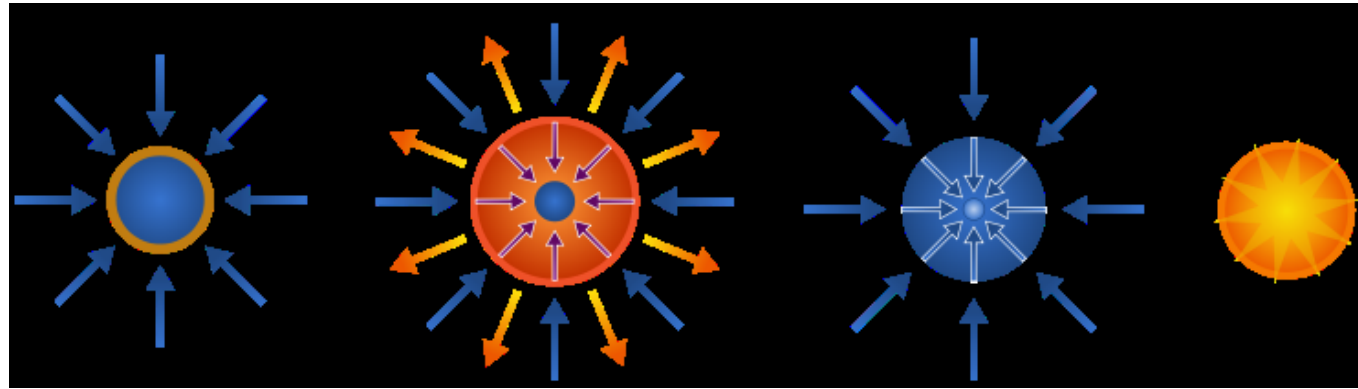
Nonostante le difficoltà ...



TIME, Ottobre 2015

Confinamento Inerziale

Principio: portare il combustibile all'ignizione comprimendo e scaldando con fasci laser



National Ignition Facility (USA), laser più grande mai costruito:

2022: **annuncio di prima ignizione al mondo**

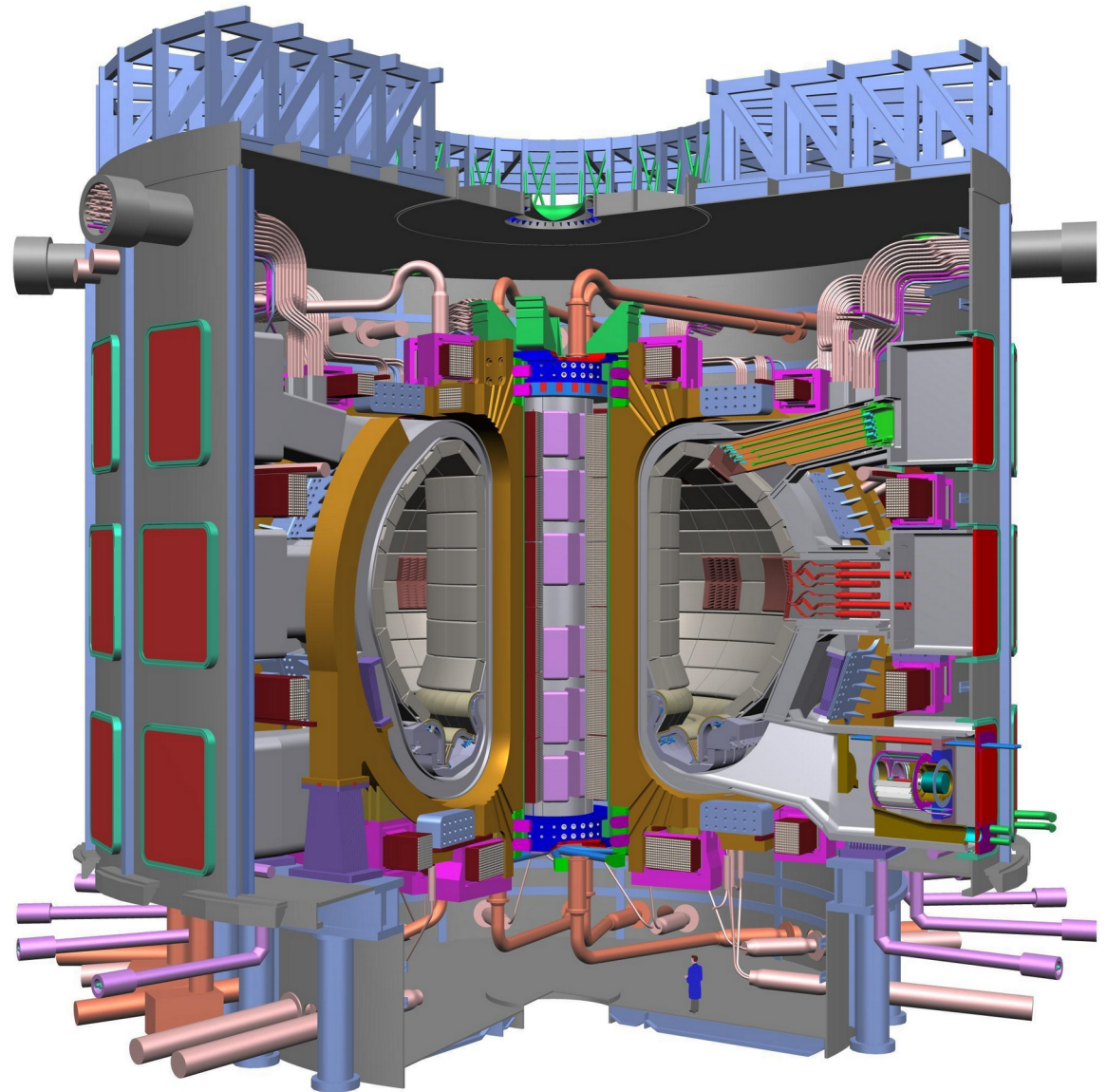
(controversie e critiche in corso ...)

Confinamento Magnetico

Principio: confinare il plasma usando **campi magnetici**

ITER (International
Thermonuclear
Experimental Reactor)

Proposto nel 1985
ignizione nel 2035 ?



“in costruzione” a Cadarache, Francia
www.iter.org

Il difficile cammino della fusione nucleare controllata

Esperimenti recenti rilanciano la fusione nucleare
come sorgente illimitata di energia pulita, ma la sfida rimane lunga e difficile.

Andrea Macchi,
fisico, Istituto
Nazionale di Ottica

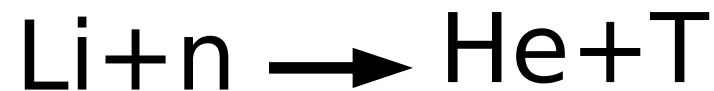
Sapere n.5,,
settembre-ottobre
2014



Problemi aperti ...

(oltre a riprodurre l'ignizione nello schema inerziale e con altri schemi ,,,)

- 1) aumentare (molto) l'efficienza e il guadagno energetico
- 2) comprendere la fisica dei plasmi all'ignizione
- 3) testare materiali contenitori sottoposti ad alto flusso di neutroni (con problemi di attivazione radioattiva)
- 4) recuperare energia dai neutroni e produrre Trizio in un mantello di Litio



5) ...

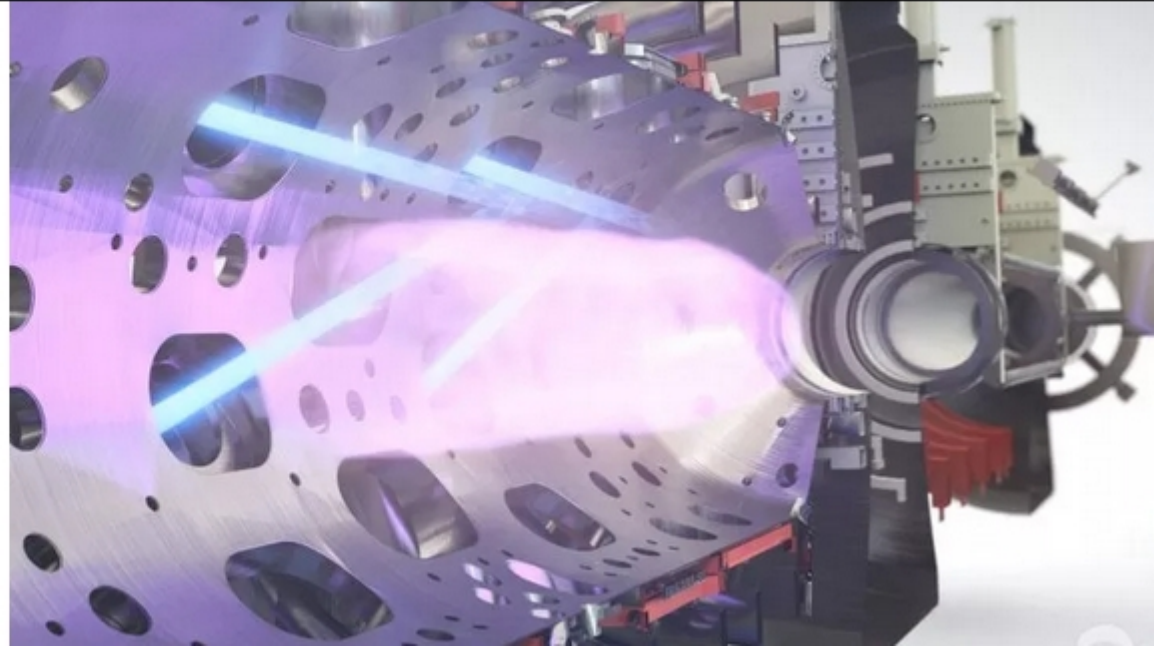
Fusione “privata”

Proliferazione di imprese e start-up sulla fusione (con finanziatori privati) in USA e Europa

ENERGIA



Un'azienda californiana sfrutta l'intelligenza artificiale di Google per la fusione nucleare



(La Repubblica, Febbraio 2022)

TAE technologies (tae.com)

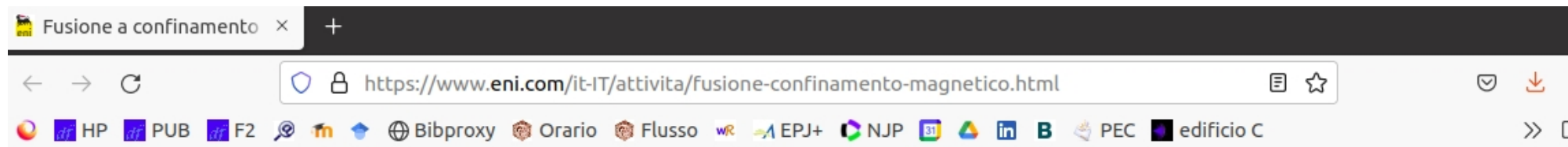
(Tokamak Energy, Marvel Fusion, Renaissance Fusion, First Light, HB11, Zap Energy, ...)

In Italia nel 2030???

HOME > ENERGIA

Descalzi: "Con la fusione a confinamento magnetico avremo energia a bassissimo costo" (AGI, Giugno 2022)

L'ad dell'Eni a New York parla del progetto messo a punto dal Commonwealth Fusion System e che riguarda la realizzazione entro il 2030 di un reattore pilota per produrre energia pulita



Vuoi saperne di più? Fai una domanda

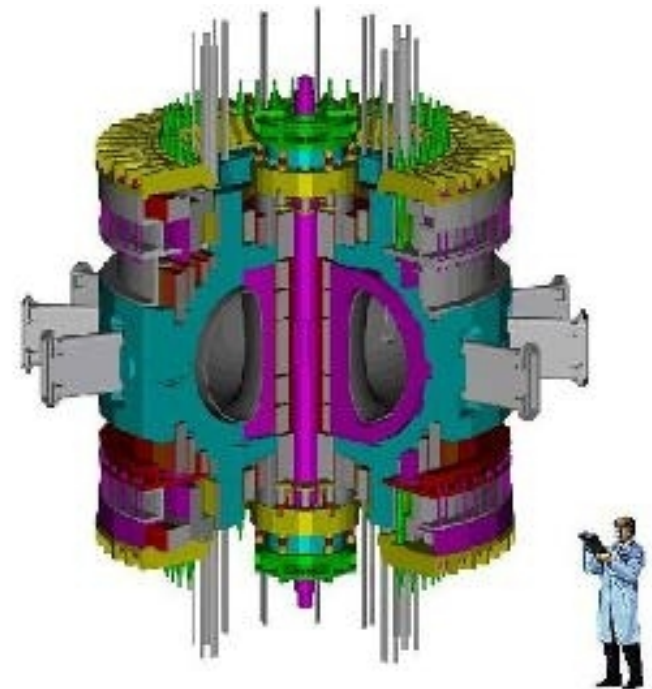
Fusione a confinamento magnetico: l'energia che imita le stelle

Una fonte di energia sicura, sostenibile e inesauribile: una possibile svolta nel percorso di decarbonizzazione che stiamo contribuendo a realizzare.

In Italia nel 2010...

IGNITOR: macchina più compatta ad alti campi magnetici proposta da Bruno Coppi (MIT)

Rilanciata nel 2010 dal MIUR come “progetto bandiera” italiano in collaborazione con la Russia



☰ MENU | 🔍 CERCA

la Repubblica

ABBONATI

GEDI SMILE

IL VERTICE

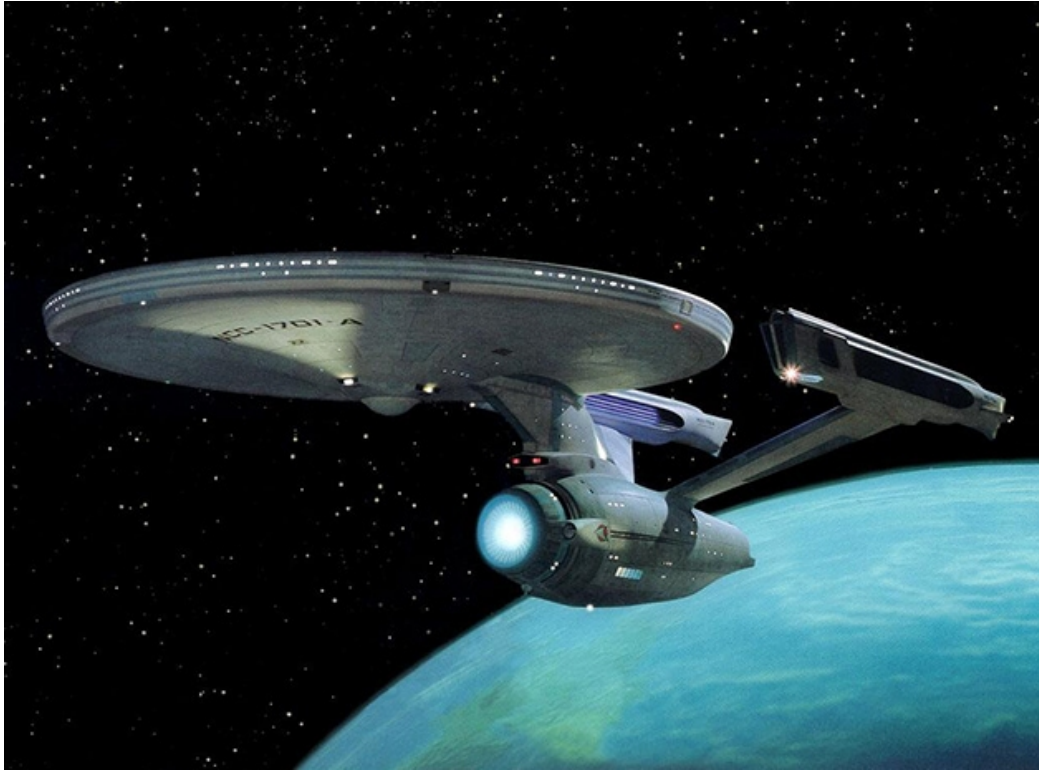


La stretta nucleare di Putin e Berlusconi "Accordo con Russia, prima centrale in 3 anni"

(La Repubblica, 20 Aprile 2010)

www.repubblica.it/esteri/2010/04/26/news/berlusconi-putin-3629213/

Sarà questo il futuro? ...



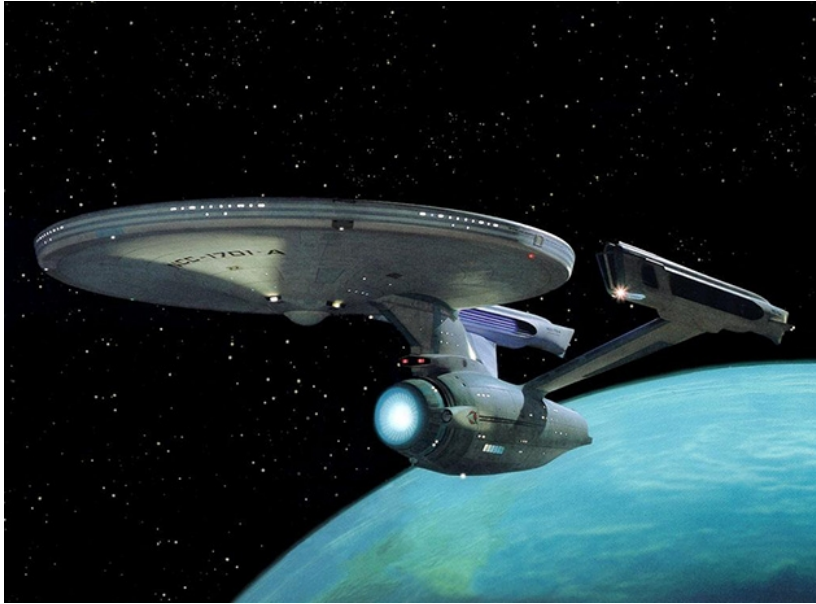
From:

Memory Alpha / Beta, the
wiki for [Star Trek](#)

(<http://memory-alpha.wikia.com>)

“For a number of years, humans were unable to create a sustained fusion reaction. As a result, humans used nuclear fission quite extensively during the 20th and 21st centuries. Humans were later able to create a sustained artificial fusion reaction, leading to the replacement of the older fission reactors. Fusion reactors became an everyday part of life in the United Federation of Planets. (...) On space vessels, nuclear fusion reactors provided power for general use, as well as for a ship's impulse drive. By the 24th century, fusion reactors had become small enough that many homes had their own fusion reactors to provide power for their occupants.”

Sarà questo il futuro? ...



From:

Memory Alpha / Beta, the
wiki for [Star Trek](#)

(<http://memory-alpha.wikia.com>)

*“Per molti anni, gli umani non furono in grado di creare una reazione di fusione nucleare controllata; di conseguenza **usarono la fissione nucleare estesamente durante il 20mo e 21mo secolo**, In seguito la fusione rimpazzò i vecchi reattori a fissione e i reattori a fusione divennero pare della vita quotidiana nella Federazione dei Pianeti Uniti. **Nel 24mo secolo**, i reattori a fusione erano diventati abbastanza piccoli che molte case avevano i propri.”*