



# Il Sole sulla Terra: cos'è la fusione nucleare (e a che punto siamo per riprodurla)

**Relatore:**

Andrea Macchi  
(CNR/INO, Pisa)

**Evento:**

Liceo Classico  
Machiavelli  
Lucca  
Gennaio 2023

# Il difficile cammino della fusione nucleare controllata

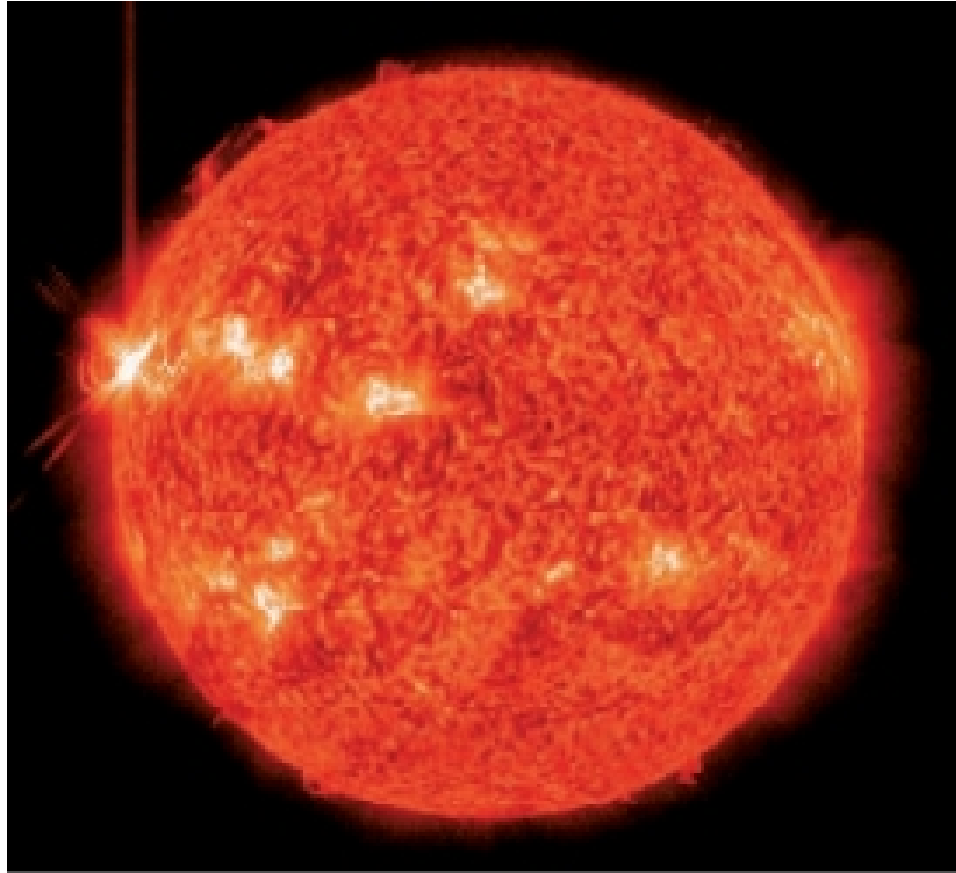
Esperimenti recenti rilanciano la fusione nucleare  
come sorgente illimitata di energia pulita, ma la sfida rimane lunga e difficile.

**Andrea Macchi,**  
fisico, Istituto  
Nazionale di Ottica

*Sapere n.5,,*  
settembre-ottobre  
2014



# 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

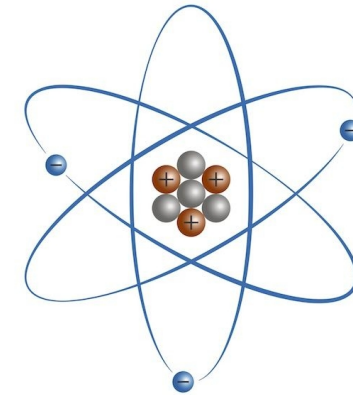
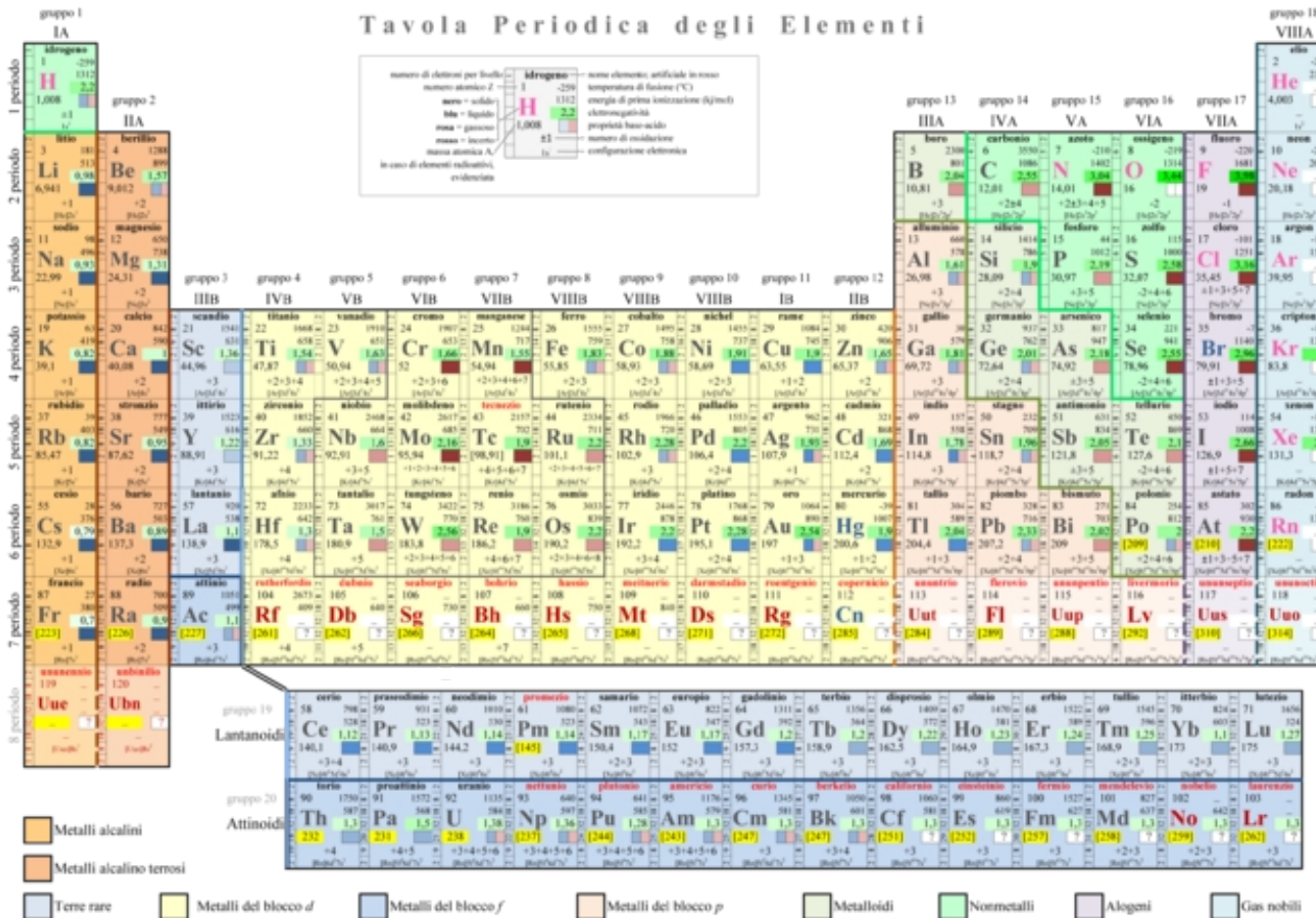


*L'esperimento di fusione del Dr Octopus  
in "Spiderman 2" (2004)*

©Marvel, Columbia Pictures

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

# A ogni elemento il suo numero



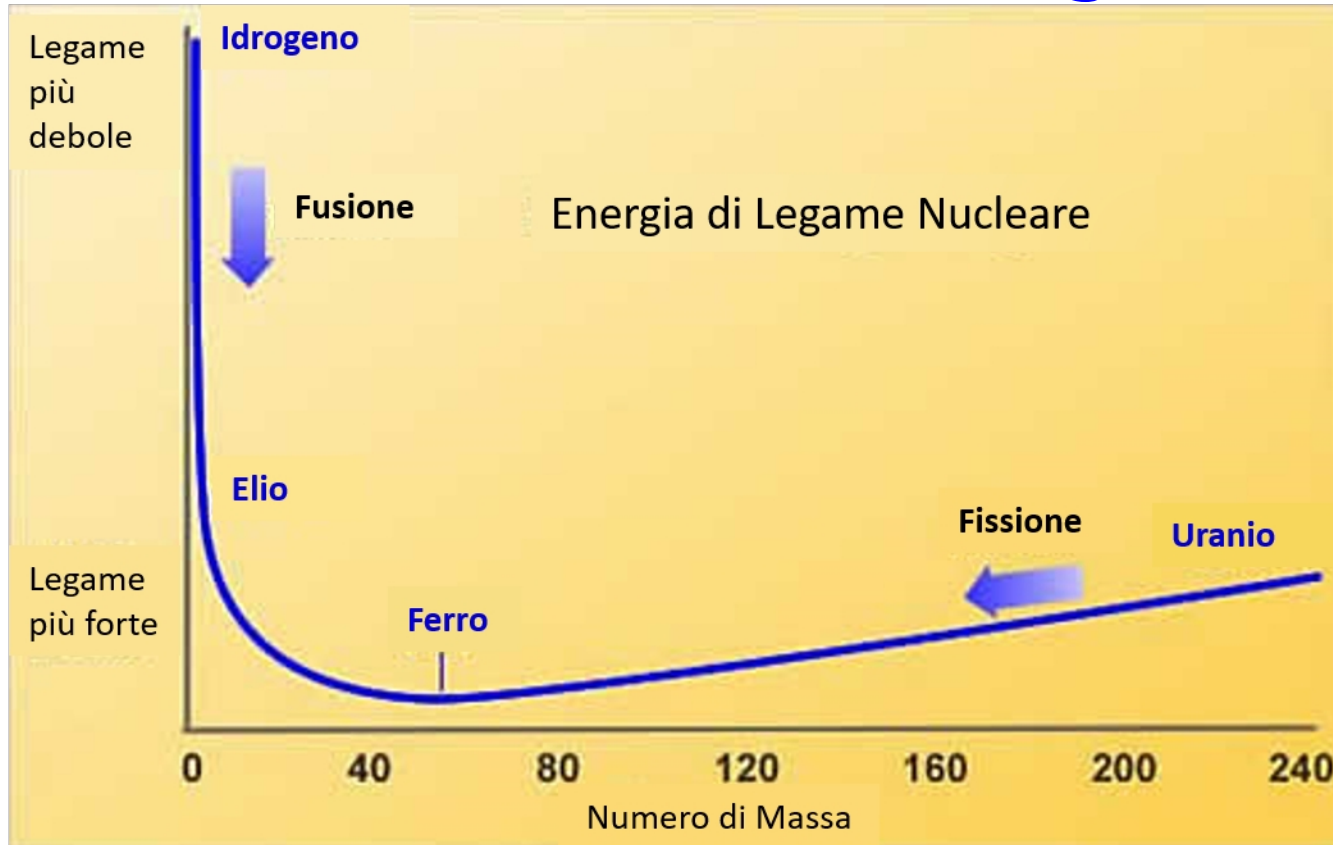
Atom structure

- Proton
- Neutron
- Electron

Rielaborazione a cura di Antonio Ciccolella - 2011

Ogni elemento della tavola è individuato dal numero intero dei **protoni** nel nucleo (o degli **elettroni** che vi orbitano intorno). Il numero di **neutroni** può invece variare per lo stesso elemento che quindi esiste in versioni più o meno “pesanti” (**isotopi**)

# La fabbrica degli elementi



Le **reazioni nucleari** trasformano i nuclei tra loro.

La **fusione** unisce due elementi per crearne uno più pesante.

La **fissione** spezza un elemento pesante per crearne due più leggeri.

Da: Science in School **51**, 15/01/2021, [www.scienceinschool.org](http://www.scienceinschool.org)

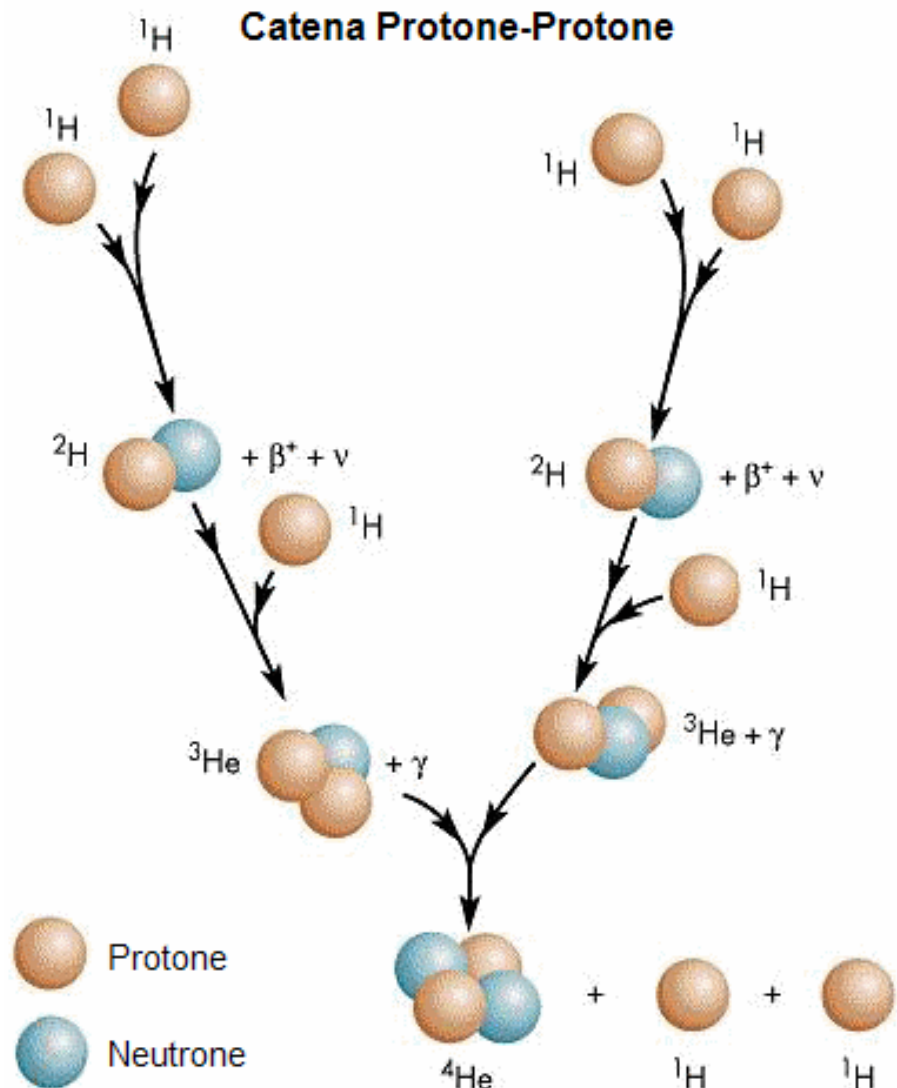
Le reazioni che creano elementi più "legati" liberano un'**energia** pari alla differenza delle "energie di legame" dei reagenti.

Le stelle fabbricano per **fusione** gli elementi sino al Ferro (*nucleosintesi stellare*)

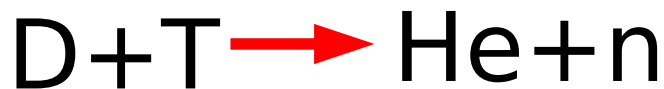
# Perché le stelle brillano

La **fusione** di elementi più leggeri del Ferro (Idrogeno, Elio, Litio, Boro, Carbonio, ...) oppure la **fissione** di elementi più pesanti (es. Uranio) liberano **energia**.

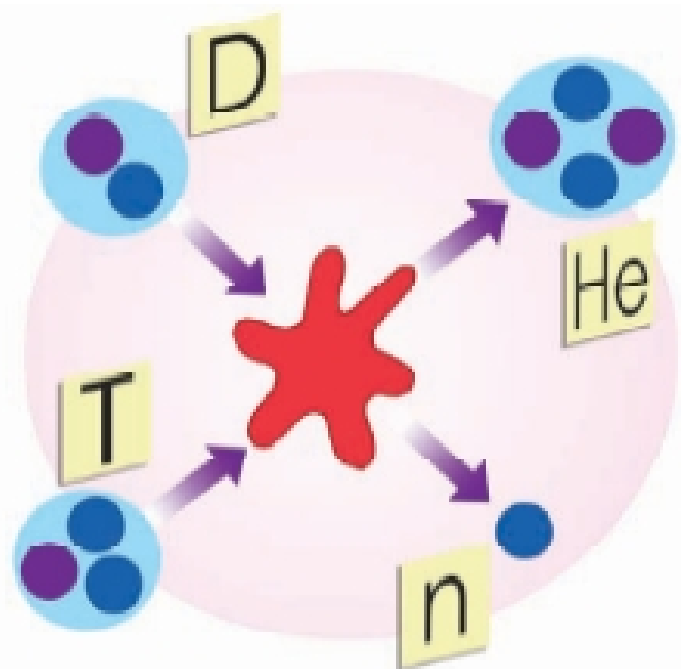
Il Sole produce energia soprattutto “fondendo” Idrogeno (H) in Elio (He).



# Quale reazione scegliere sulla Terra?



Fusione Deuterio-Trizio (isotopi di Idrogeno) in Elio (He) e un neutrone (n)



- “facilità” di accensione
- grande rendimento energetico
- abbondanza di Deuterio nell'acqua (Trizio viene “rigenerato” nel ciclo)

1 cc d'acqua --> 8 Kilowattora

(circa il consumo giornaliero di una casa)

- neutrone (n)
- protone (p)



= consumo di 1 anno!



# Come fare un bel fuoco



**Innesco:** fornire un'energia iniziale per "accendere" la combustione

**Ignizione:** far proseguire la combustione grazie all'energia da lei stessa liberata

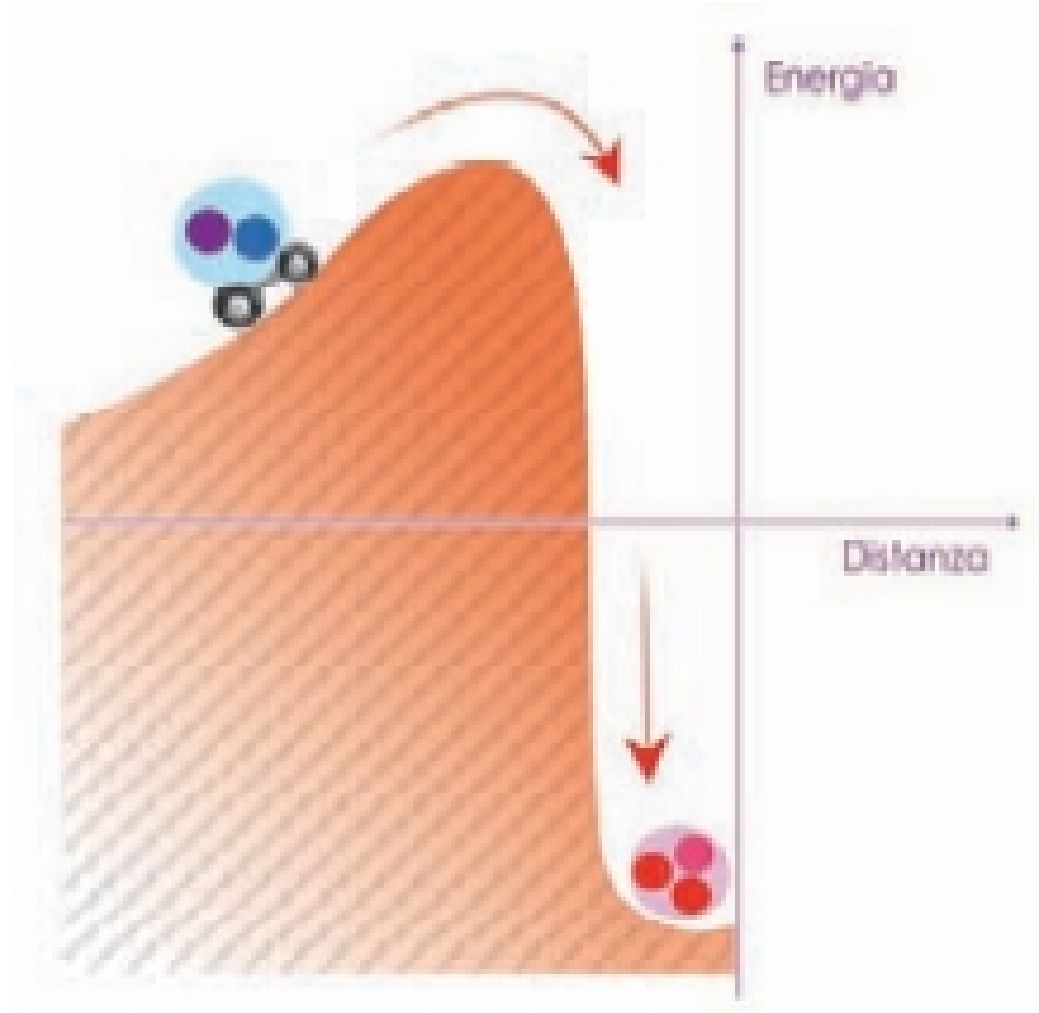
**Guadagno:** mantenere il combustibile ben "assemblato" per una combustione completa

# “Innescare” la fusione

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

Bisogna fornire ai nuclei una **velocità sufficiente** per superare la “collina”

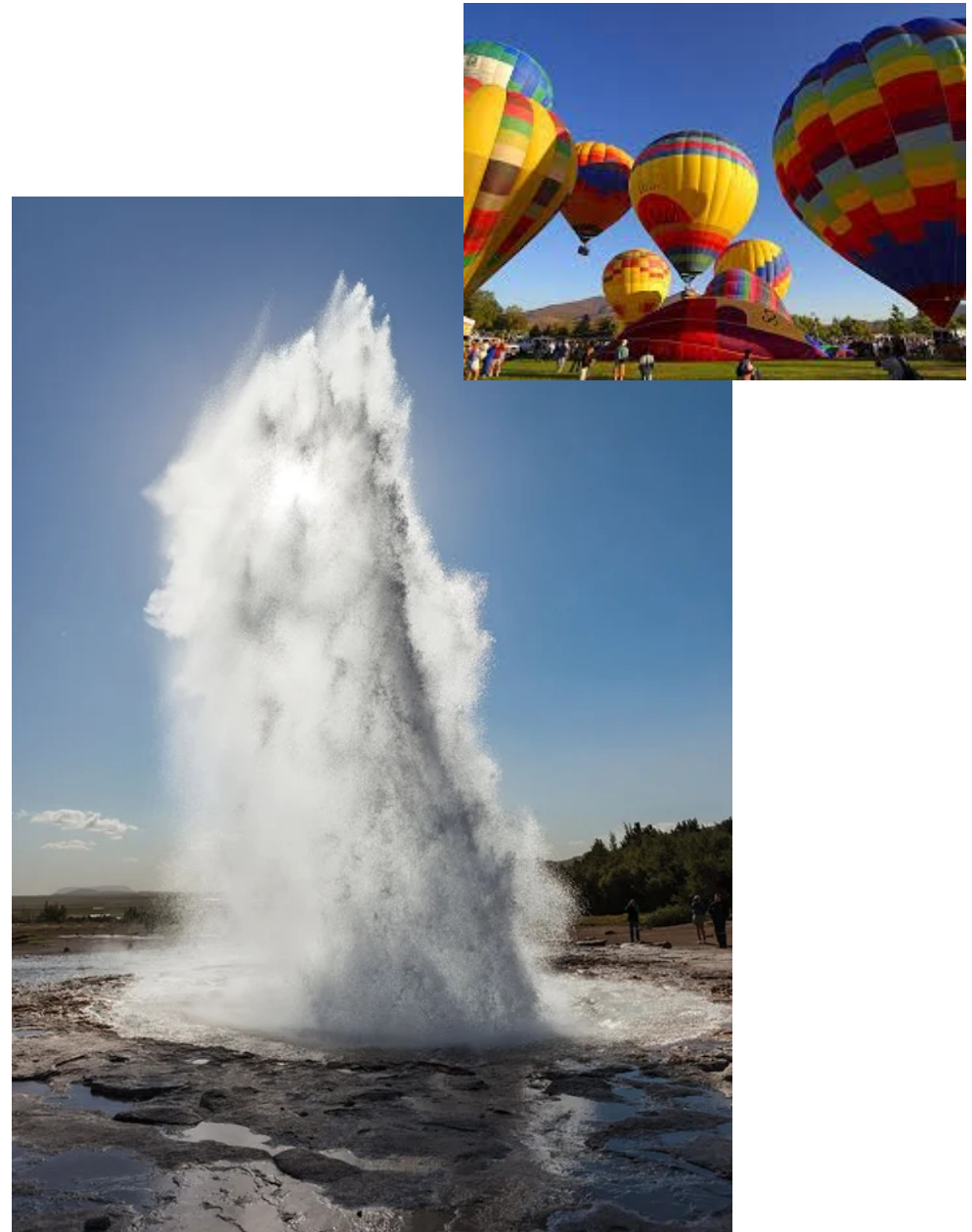
Ad esempio riscaldando la miscela D-T ad **alta temperatura**



# “Contenere” la fusione

Occorre mantenere la miscela D-T ad alte **densità** per aumentare la probabilità di “incontro” tra i nuclei.

Ma ad alte temperature la materia si disaggrega (stato di gas o **plasma**) e tende a espandere il proprio volume diminuendo la propria densità



# Un problema caldo e denso

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

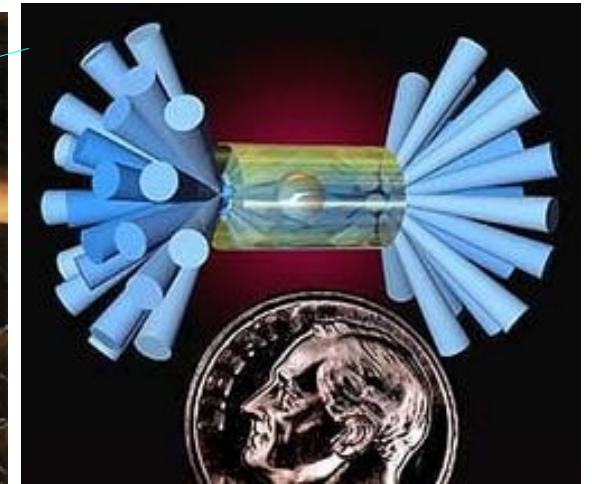
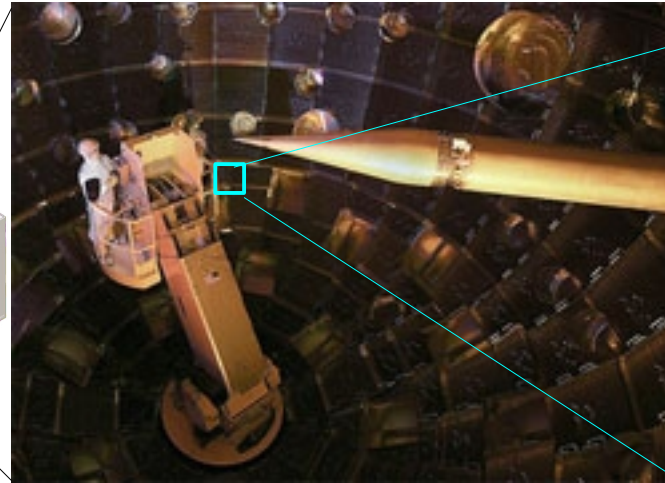
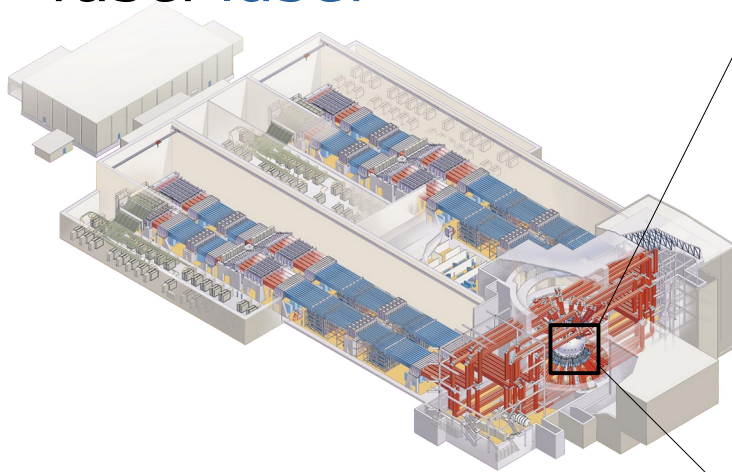
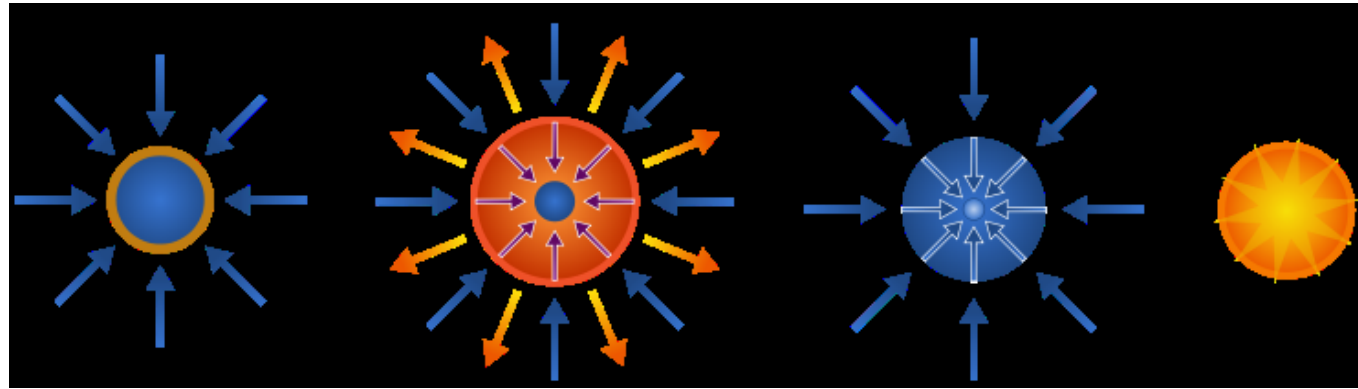
- 1) **scaldare** il combustibile ad alta temperatura (\*), ovvero fornire energia cinetica ai nuclei sufficiente per avere un po' di reazioni di fusione
- 2) mantenere il combustibile a **densità** sufficientemente alta e per **tempo** sufficientemente lungo contenendo gli effetti di rarefazione dovuti 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 :

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

# Fusione laser a “Confinamento Inerziale”

Una sferetta di D-T viene portata all'ignizione per “implosione” prodotta con fasci laser



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

2022: annuncio di prima ignizione al mondo e produzione di un'energia da fusione  $>1.5$  volte quella “immessa”

*(quindi, efficienza del 150% ??? ...)*



Lawrence Livermore National Laboratory ✓

@Livermore\_Lab · Segui



BREAKING NEWS: @ENERGY and @NNSAnews today announced the achievement of #FusionIgnition at @lasers\_llnl — a major scientific breakthrough decades in the making that will pave the way for advancements in national security and clean energy: [llnl.gov/news/national-...](https://llnl.gov/news/national-...)



4:38 PM · 13 dic 2022



The New York Times

SUBSC

## Scientists Achieve Nuclear Fusion Breakthrough With Blast of 192 Lasers

The advancement by Lawrence Livermore National Laboratory researchers will be built on to further develop fusion energy research.

**la Repubblica**  
L'annuncio Usa sulla fusione nucleare: "Una svolta ma ci vorranno 30 anni perché diventi realtà"

## **CORRIERE DELLA SERA**

Fusione nucleare, l'annuncio del dipartimento dell'Energia Usa: «Svolta storica: ricreate le condizioni di stelle e sole»

# E ora cosa manca?

Considerando che il sistema laser utilizza **energia elettrica** convertendone in luce una frazione  $< 0.5\%$  il "vero" guadagno energetico è  $< 0.01 = 1\%$  per impulso!

Inoltre il sistema può produrre solo **1 impulso/laser giorno**

Occorre:

1) sviluppare **nuova tecnologia laser** a maggiore efficienza e capacità di ripetizione

2) aumentare l'**efficienza di combustione**  
(solo una piccola frazione di D-T viene effettivamente fusa)

3) recuperare l'energia contenuta nei **neutroni** e produrre il **Trizio** nel ciclo usando la reazione

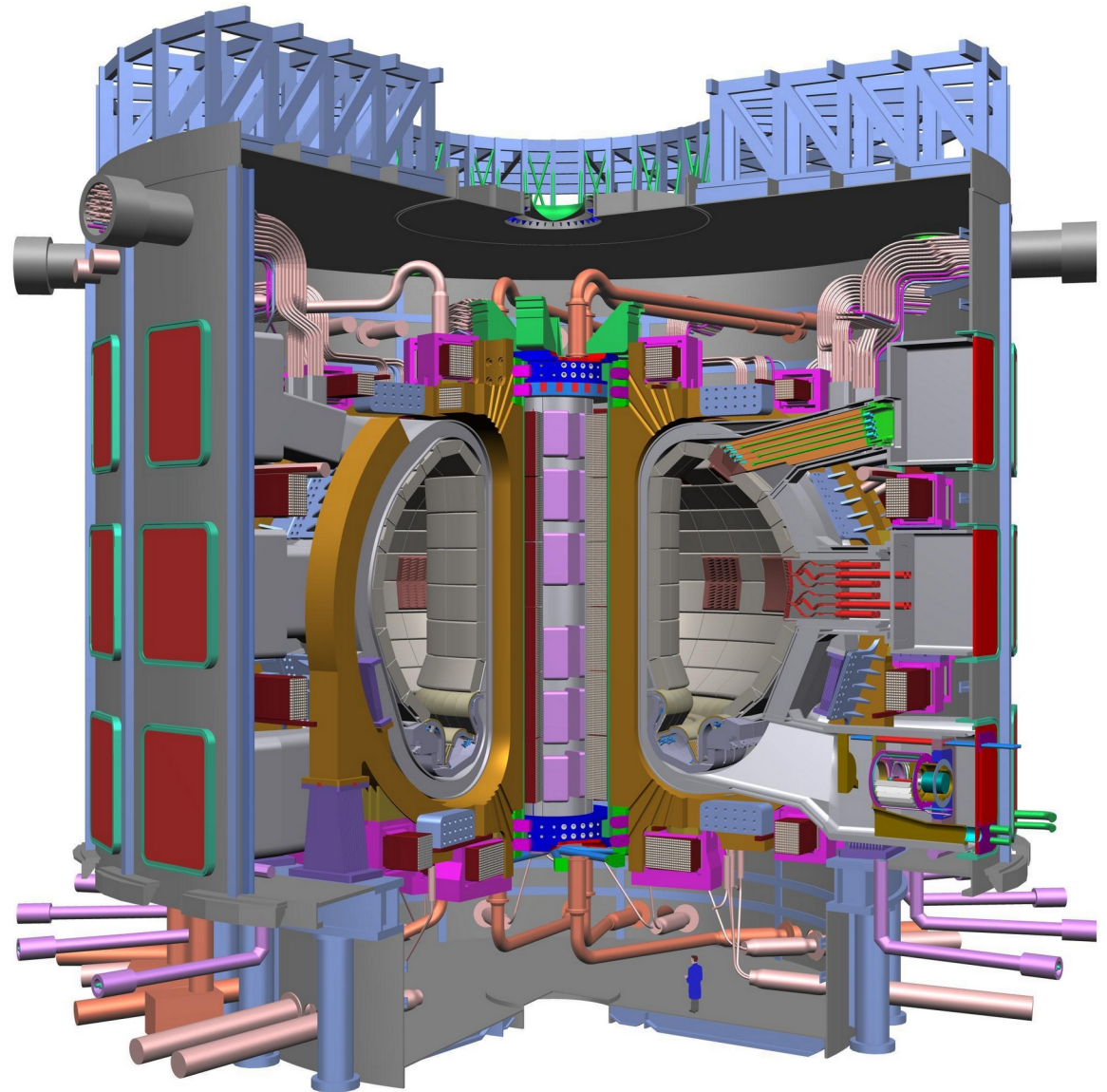


# Altro approccio: Confinamento Magnetico

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](http://www.iter.org)



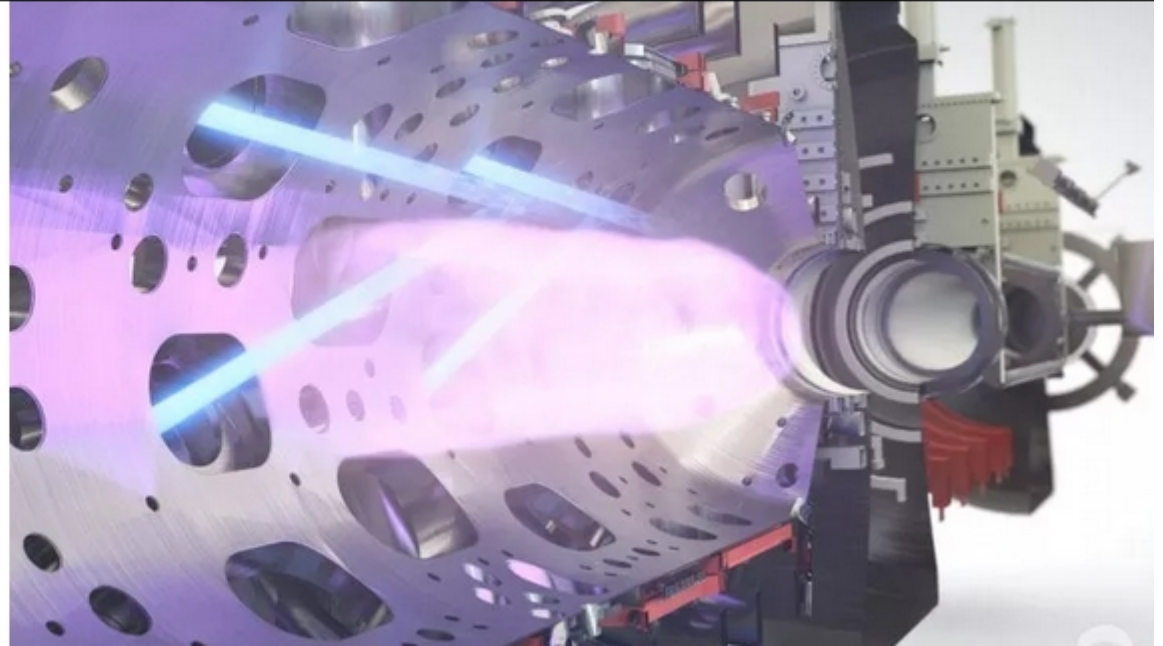
# Fusione “privata”

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**

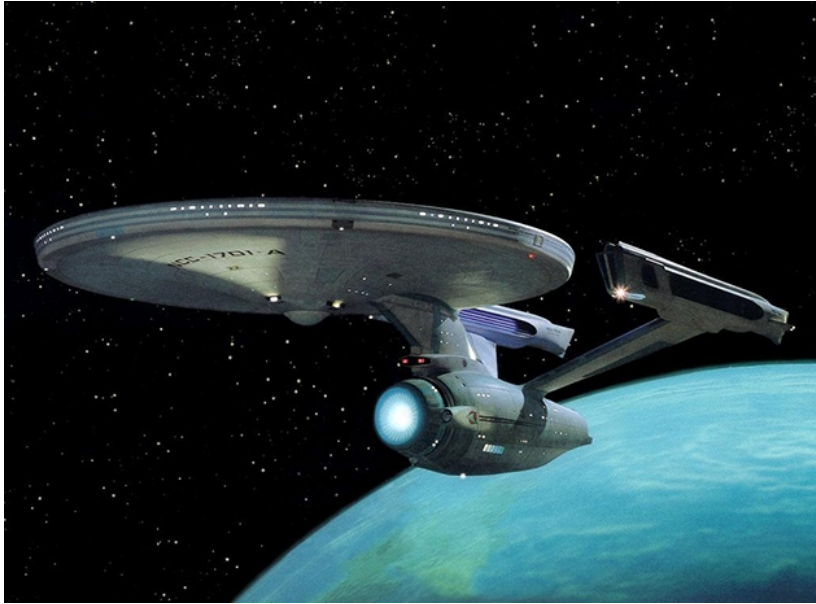


(La Repubblica, Febbraio 2022)

TAE technologies ([tae.com](http://tae.com))

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

# Sarà questo il futuro? ...

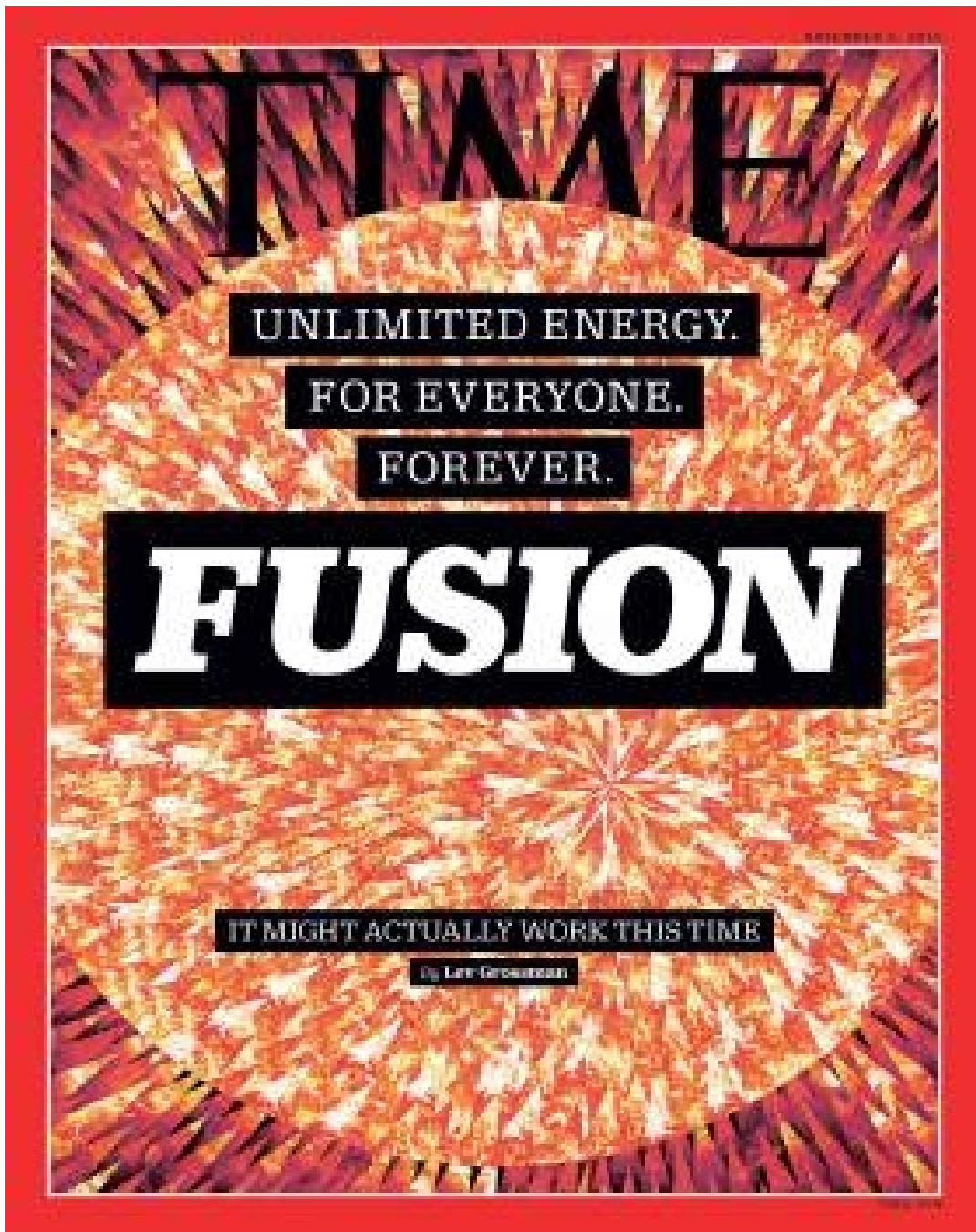


From:

Memory Alpha / Beta wiki  
il wiki di [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.”*



*Quindi è (forse)  
solo una questione  
di tempo ...*

*Ci sono domande?*

*(Intanto, grazie per  
l'attenzione!)*

TIME, Ottobre 2015

*andrea.macchi@cnr.it*

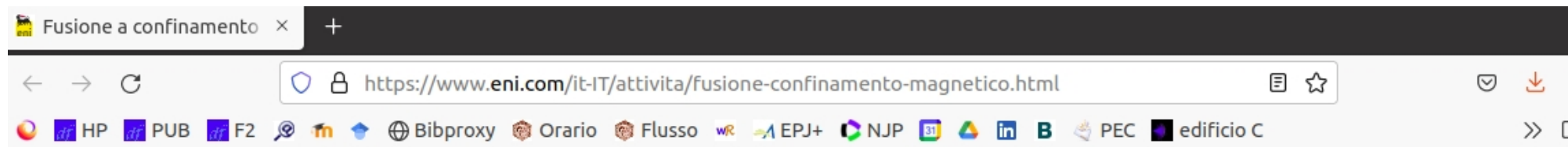
**CONTENUTI EXTRA**

# 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



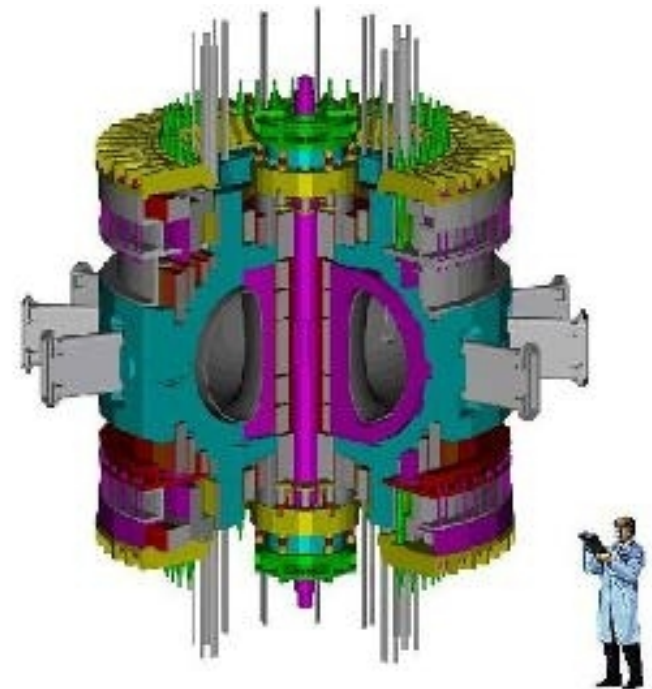
## Fusione a confinamento magnetico: l'energia che imita le stelle

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



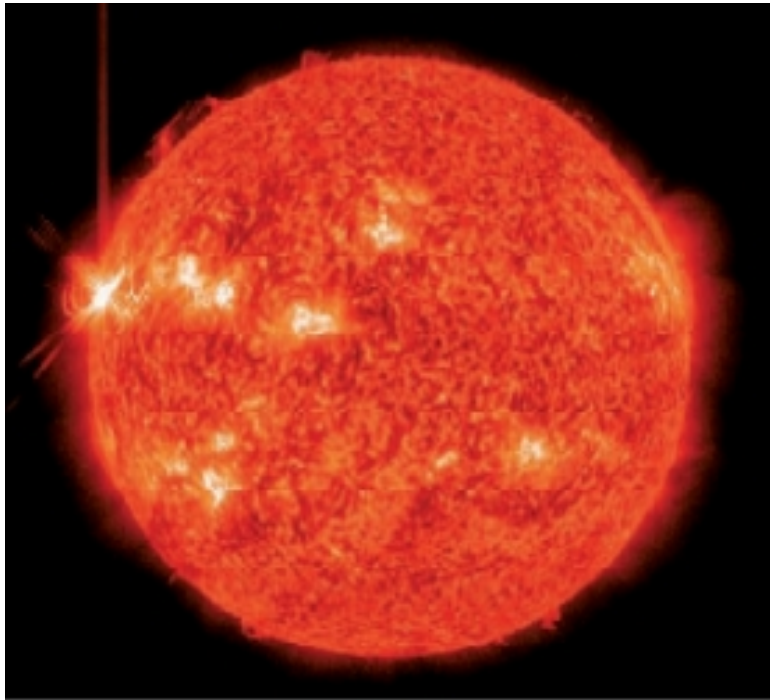
## La stretta nucleare di Putin e Berlusconi "Accordo con Russia, prima centrale in 3 anni"

(La Repubblica, 20 Aprile 2010)

[www.repubblica.it/esteri/2010/04/26/news/berlusconi-putin-3629213/](http://www.repubblica.it/esteri/2010/04/26/news/berlusconi-putin-3629213/)

# Il Sole come fa? 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

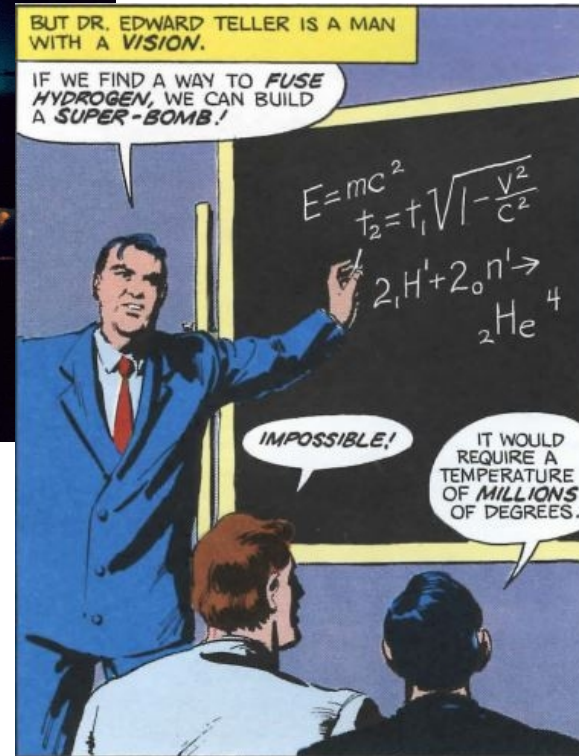
Il confinamento in versione “miniaturizzata” (rispetto al Sole!) è molto più difficile ...

# Fusione “incontrollata”: la bomba H



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

Fusione innescata da una bomba atomica “primaria” a fissione



- Nella fusione NON ci sono reazioni “a catena”:
- NON è possibile far denotare una bomba basata solo sulla fusione
  - una centrale a fusione NON può “esplodere”



# Plasma

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)



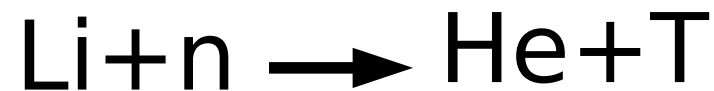
Controllare un plasma è complicato  
(è un mezzo tendenzialmente instabile ...)

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

# Problemi aperti ...

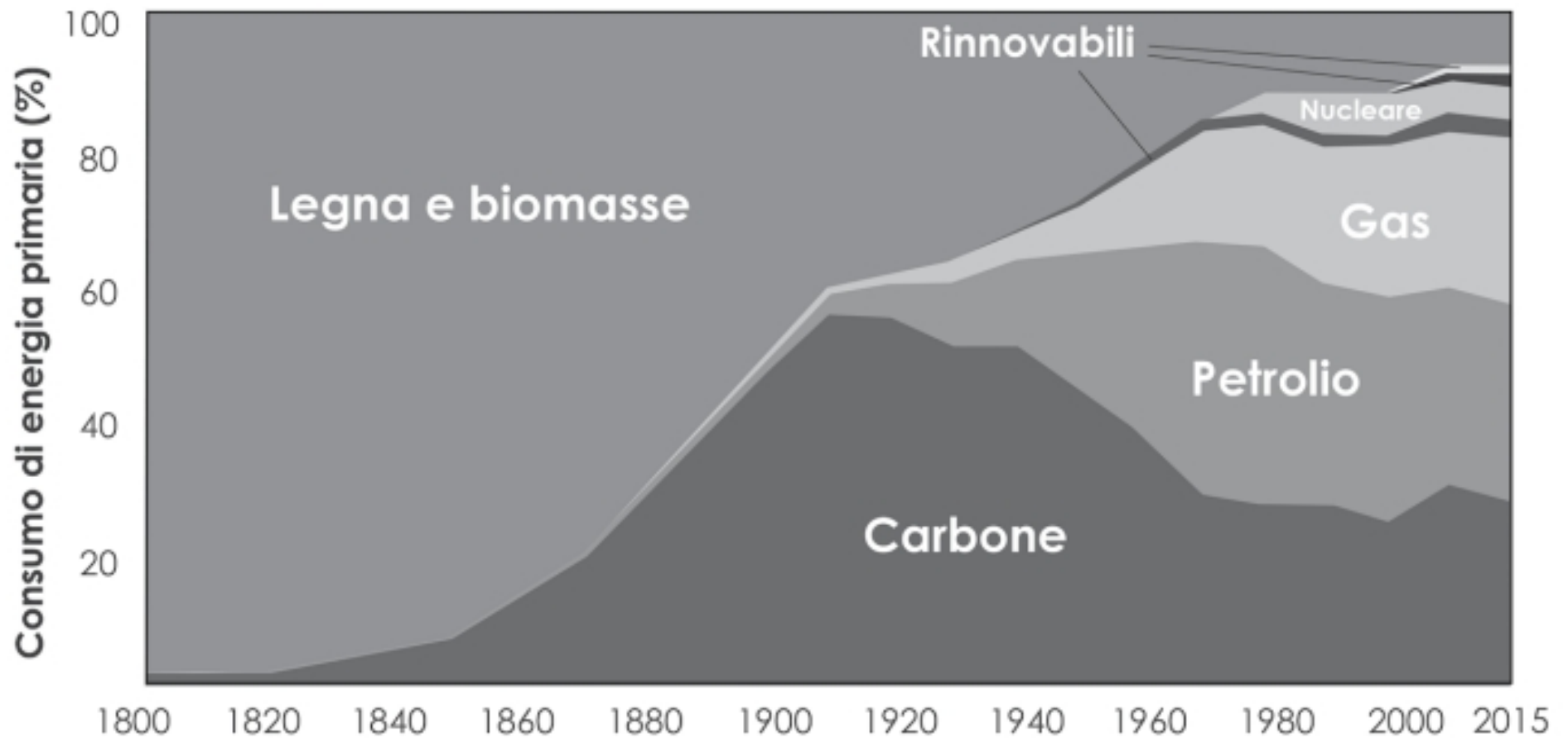
(oltre a riprodurre l'ignizione nello schema inerziale e con altri schemi ,,,)

- 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) ...

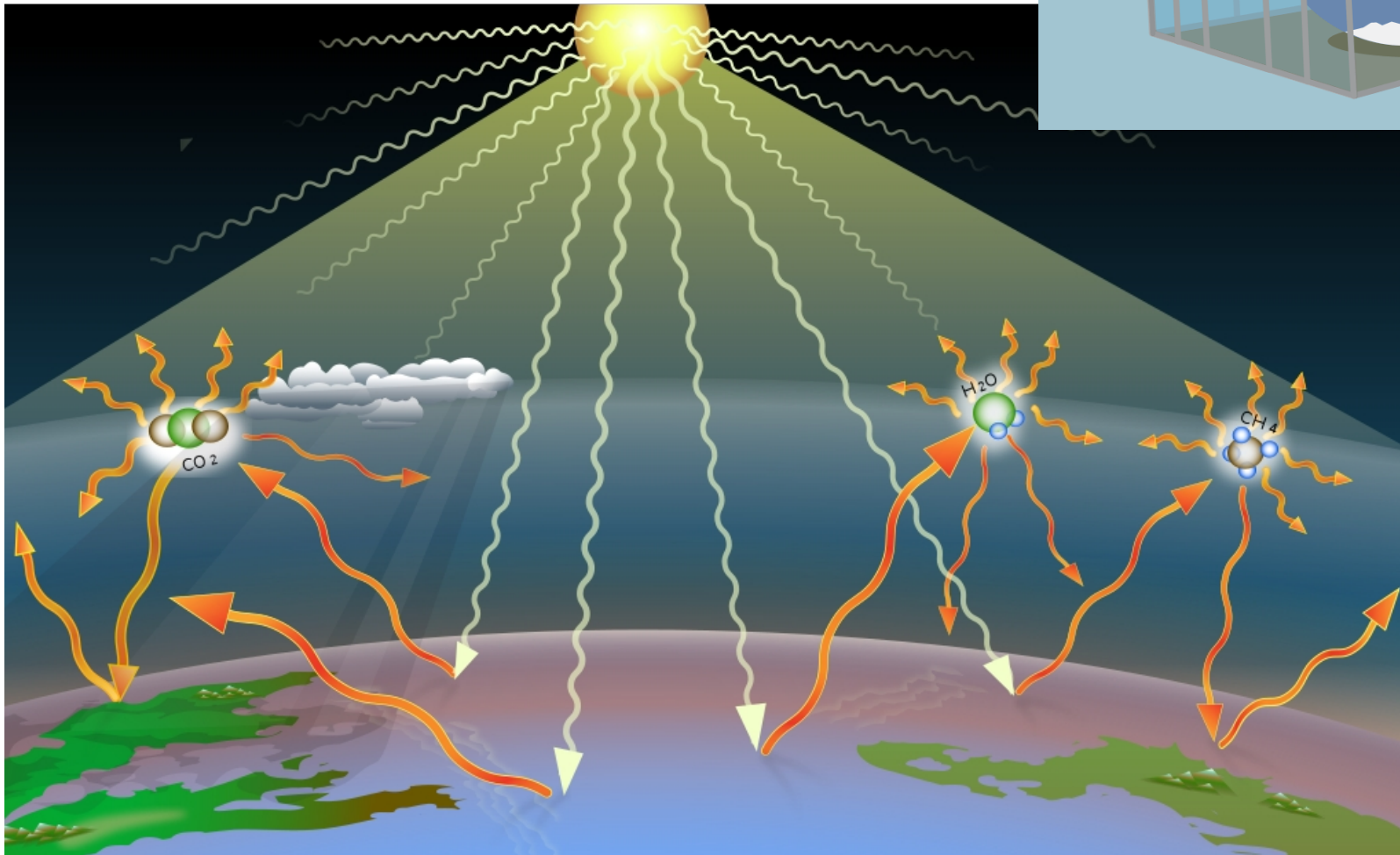
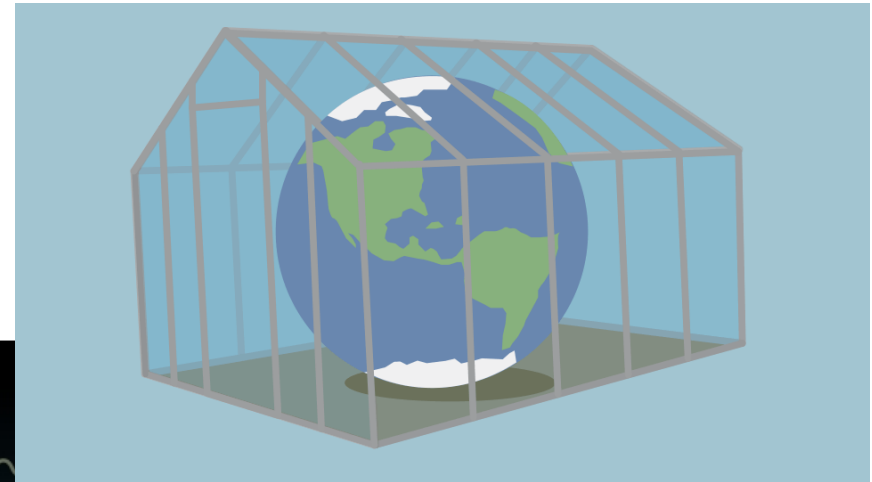
# Evoluzione fonti energetiche nel tempo 1800-oggi



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

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  $1 \text{ m}^2$  arriva in 1 ora  
un'energia di  $0.2 \text{ kWh}$

$10\text{m}^2$  in 10 ore di luce raccolgono  $20 \text{ kWh}$  ...



<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 km<sup>2</sup>**

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

→ **2500 km<sup>2</sup>**

(in prospettiva; efficienza **30%** → **1500 km<sup>2</sup>** )

Superficie tetti disponibili: 750 km<sup>2</sup>

(superficie comune/provincia di Lucca: 183/1900 km<sup>2</sup>)

(superficie autostrade: 150 km<sup>2</sup> )

## 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 km<sup>2</sup>**

(superficie Toscana: 22000 km<sup>2</sup>,  
superficie Basilicata: 10070 km<sup>2</sup>)

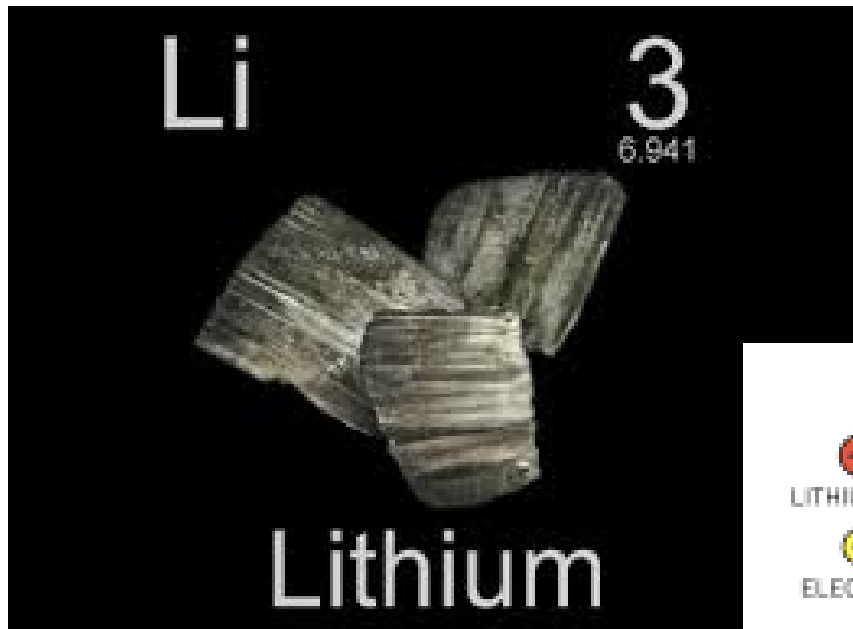
## Problemi aperti

- **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**

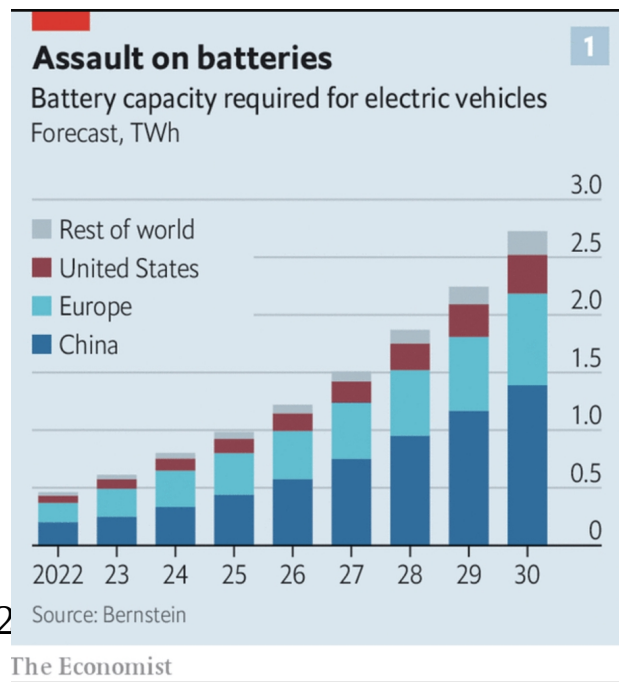
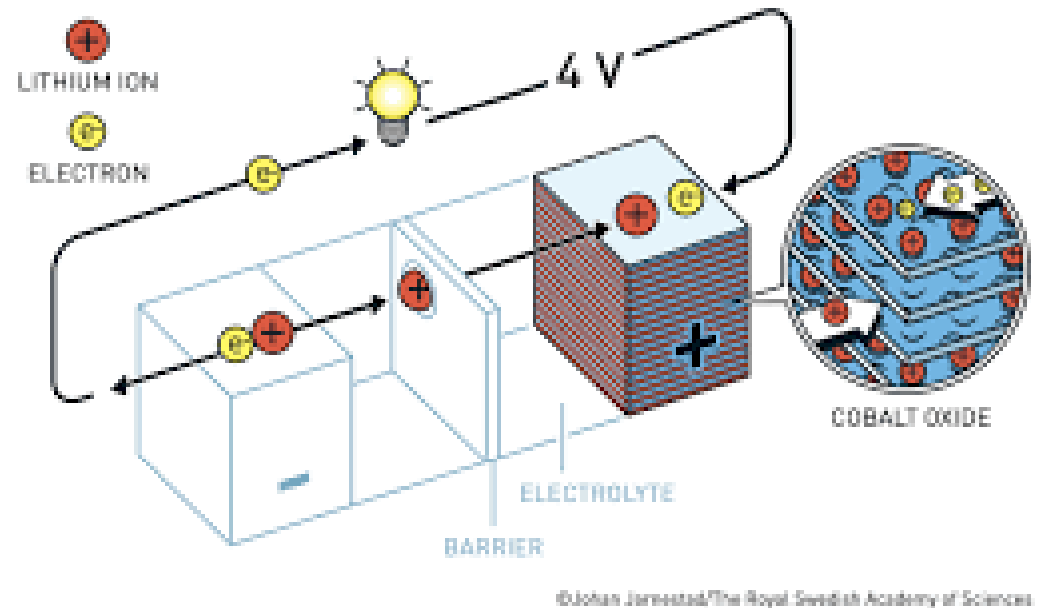
## Necessario:

- 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 ...

# Utilizzo “diretto” dell’energia solare



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

