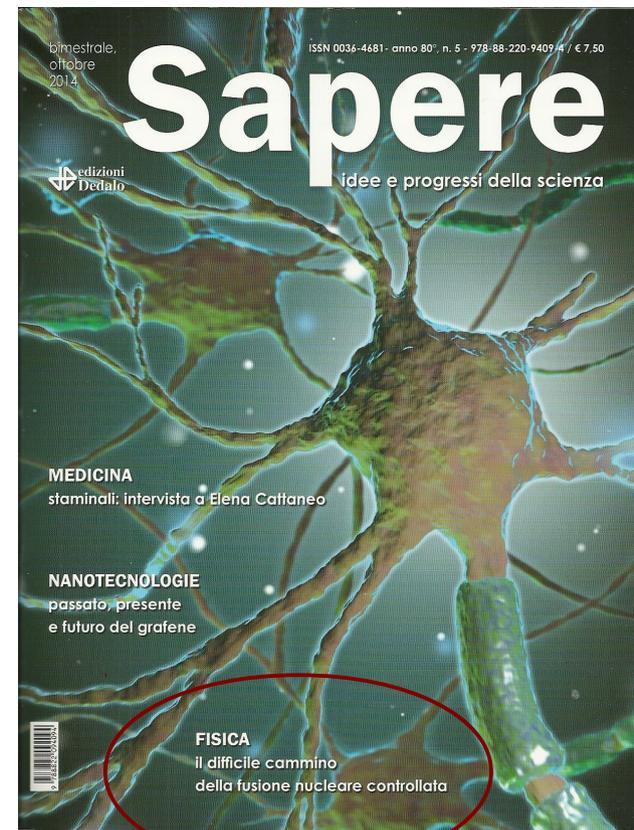


Il difficile cammino della fusione nucleare controllata

Andrea MACCHI

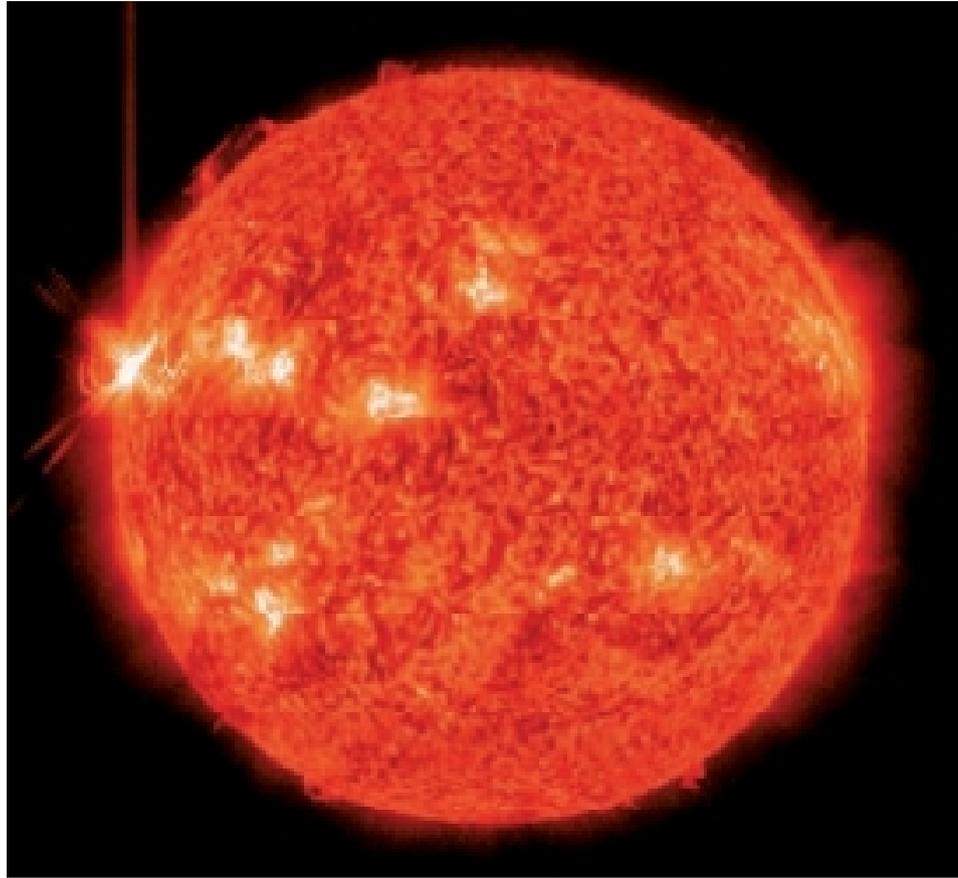
*Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto Nazionale di Ottica
(CNR/INO)*

Dipartimento di Fisica, Università di Pisa



Sapere, ottobre 2014

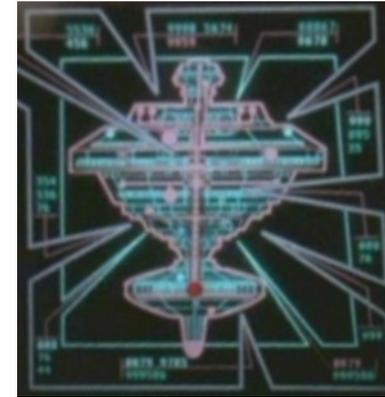
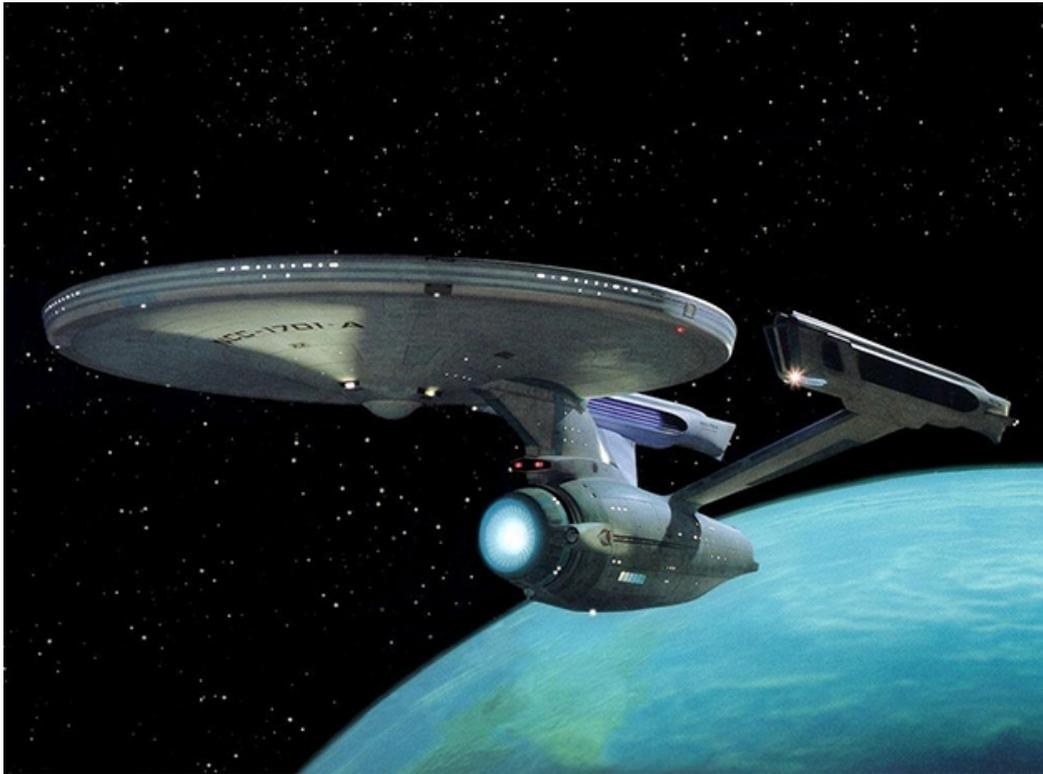
Il Sole in laboratorio



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 - I



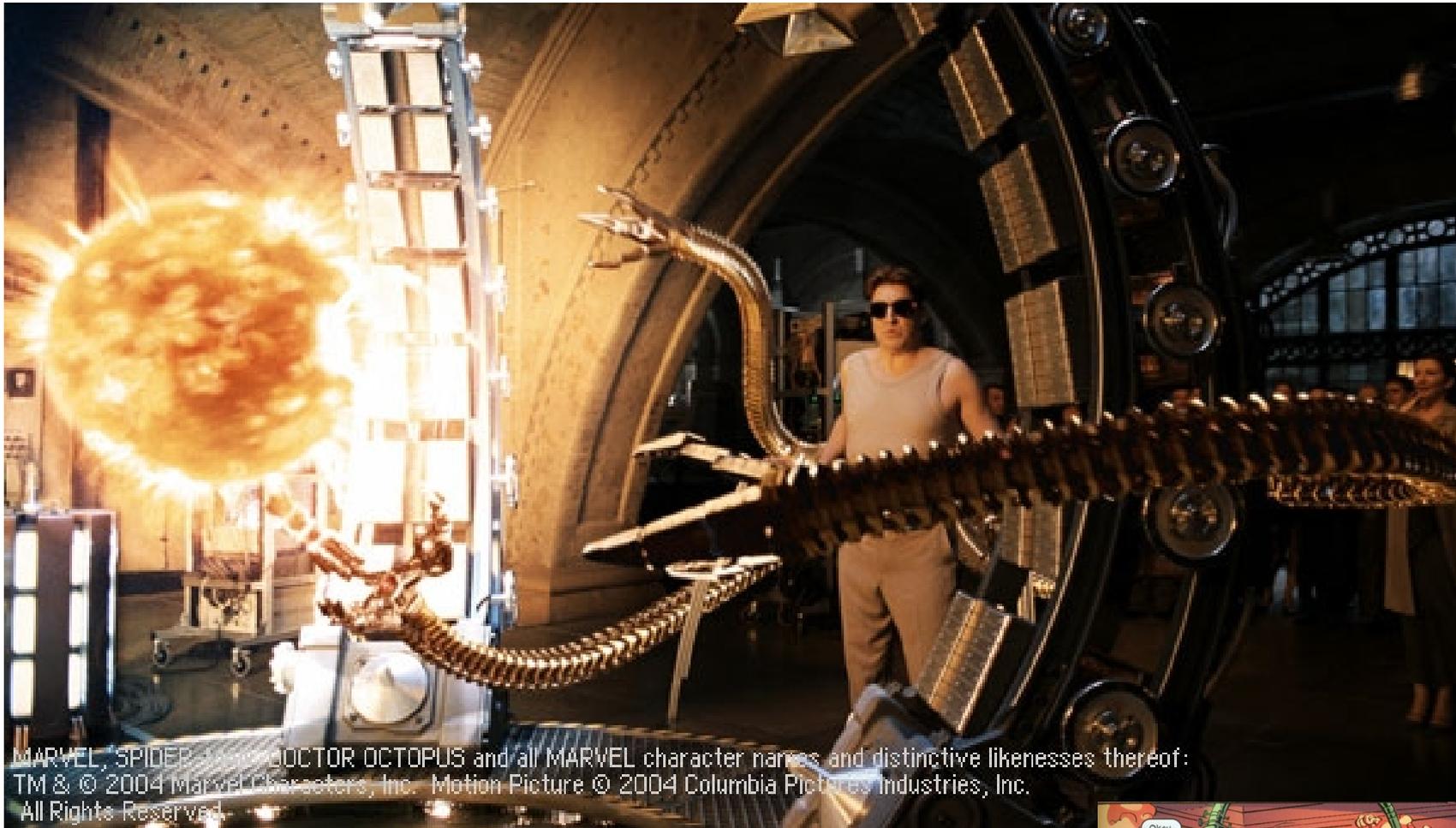
From:

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.”

Fusione nella cultura pop - II

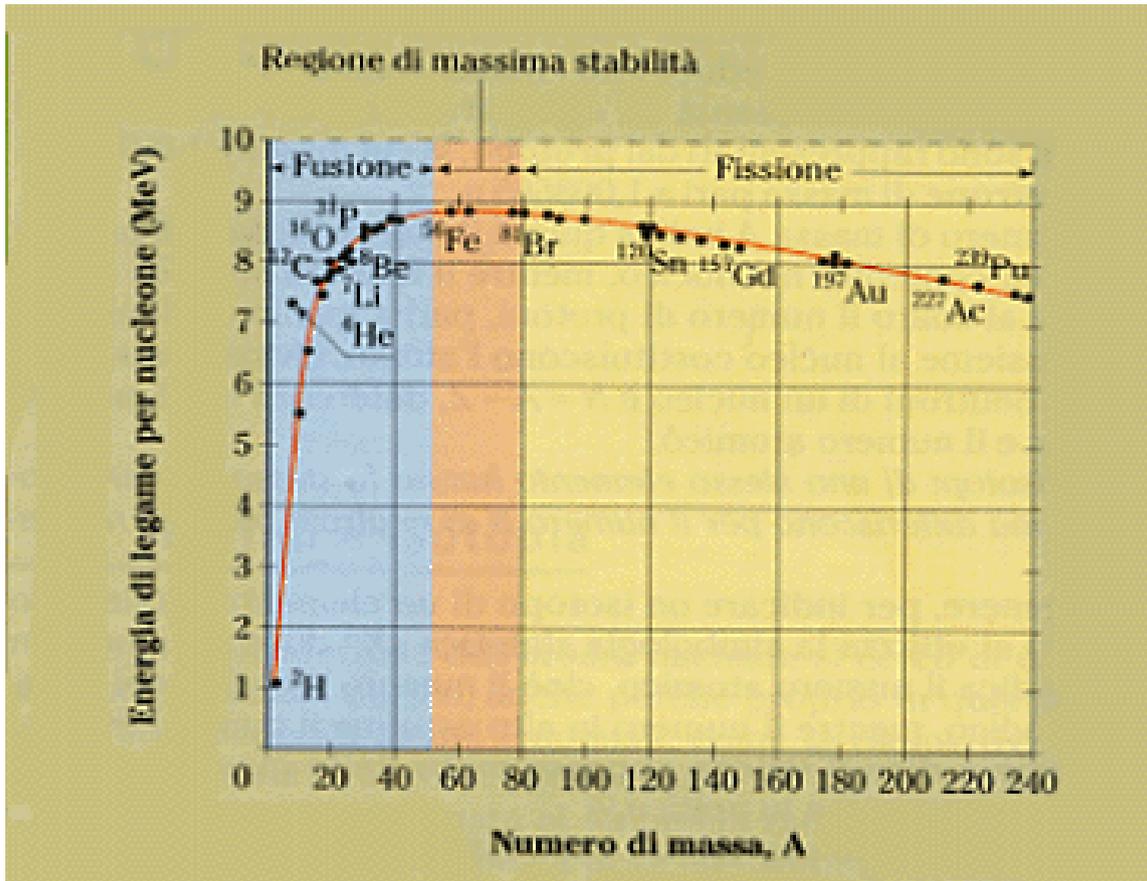


*L'esperimento di fusione del Dr Octopus
in "Spiderman 2" (2004)*

©Marvel, Columbia Pictures

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

Fusione vs. Fissione



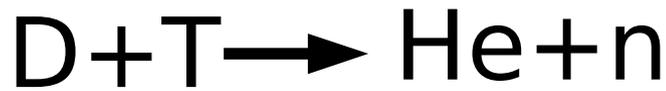
L'energia di legame di un nucleo è massima per il Ferro: la fusione libera energia se coinvolge elementi più leggeri

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 stellare**

Perché la fusione?



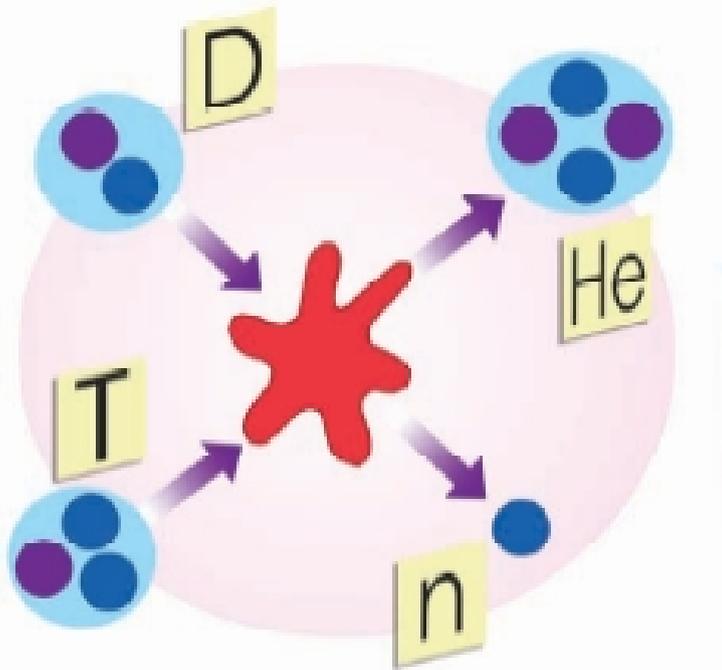
Fusione Deuterio-Trizio (isotopi dell'Idrogeno) per produrre Elio (He) più un neutrone (n)

- grande rendimento energetico
- +
- abbondanza il Deuterio nell'acqua:

1 goccia d'acqua --> 8 Kwh

= tipico consumo quotidiano di un'abitazione familiare

(= combustione di 1 Kg di carbon fossile)



● neutrone (n)

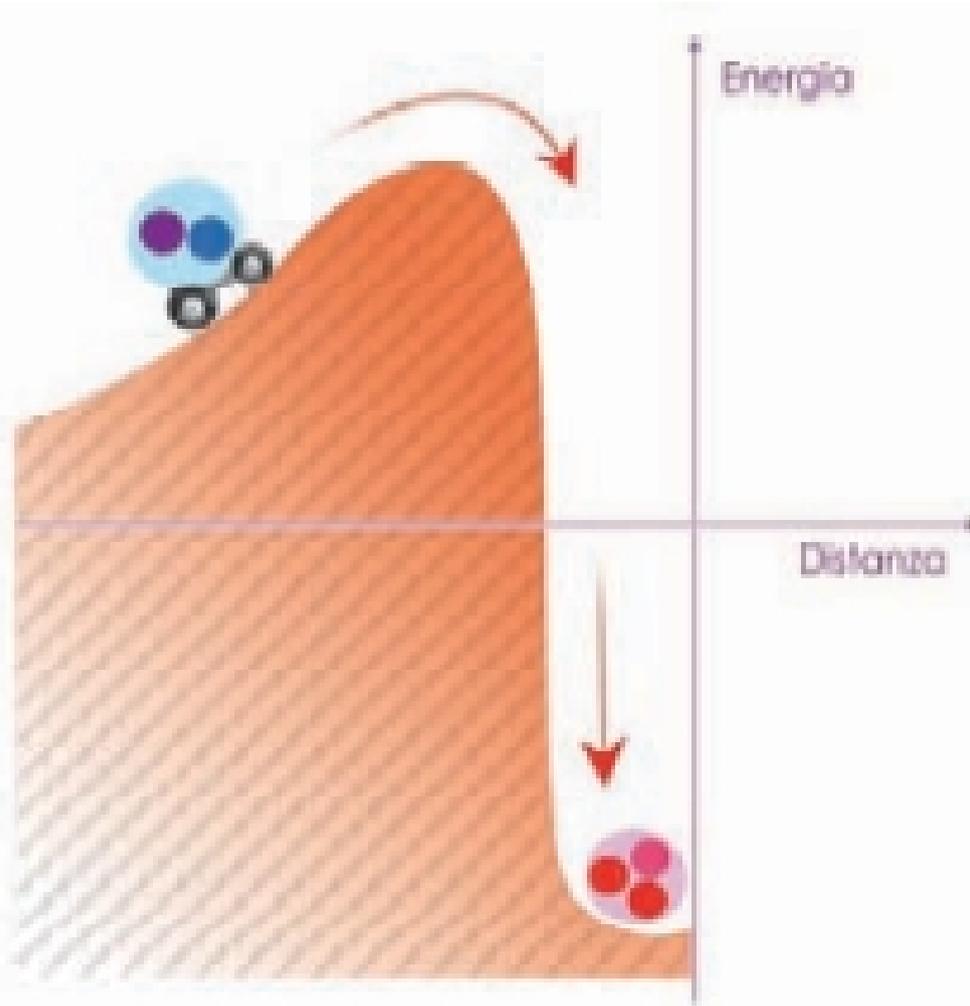
● protone (p)



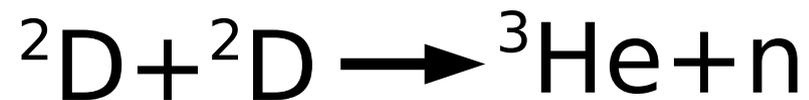
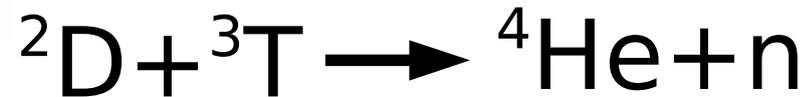
= consumo di 1 anno!

- impossibilità di reazioni incontrollate a catena
- limitato impiego e produzione di materiale radioattivo (Trizio prodotto durante il ciclo, scorie a vita media breve)

Come si ottiene?



Reazioni potenzialmente accessibili in laboratorio:



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, ad esempio accelerandoli usando campi elettrici

Fusione “domestica”



Fusore:

reattore per fusione
“in garage”
accelerando ioni con
campi elettrici

blogspot.com -
Will's Amateur Science
and Engineering:
“Fusion Reactor's First
Light!”
Feb. 2010

By William Jack /, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9389769>

Nel 2008, Taylor Wilson all'età di 14 anni ha prodotto reazioni di fusione con un simile dispositivo.

L'energia prodotta è però molto minore di quella impiegata ...

Fusione termonucleare

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

- 1) prendere quantità sufficiente di combustibile
 - 2) scaldare il combustibile ad alta temperatura (*), ovvero fornire energia cinetica ai nuclei sufficiente per avere un po' di reazioni di fusione
 - 3) autosostenere la reazione, ovvero usare parte dell'energia prodotta per mantenere sufficientemente alta la temperatura
 - 4) evitare che il combustibile “fugga”
- (*) temperatura **T** necessaria per “accendere” la reazione DT :

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

A queste temperature la materia si trova in uno stato completamente ionizzato, con elettroni slegati dai nuclei: *plasma* (stato del >99,9% della materia visibile nell'Universo)



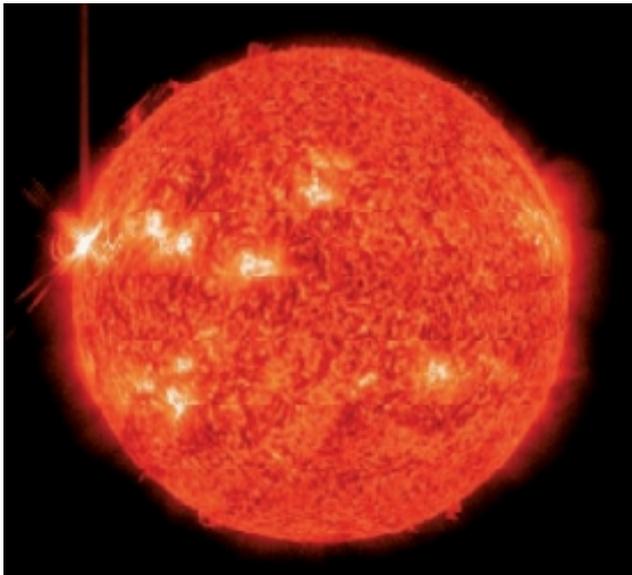
Un problema caldo e denso: le dimensioni contano

Condizione di autosostenimento (**ignizione**) della reazione DT dipende da densità **n**, temperatura **T**, e tempo di confinamento **τ** :

$$n \tau > f(T)$$

$$f(T) \approx 10^{14} \text{ cm}^3\text{s} \text{ per } T \approx 10^8 \text{ K}$$

Il plasma tende ad espandersi e a raffreddarsi per emissione di radiazione (come ogni corpo caldo)



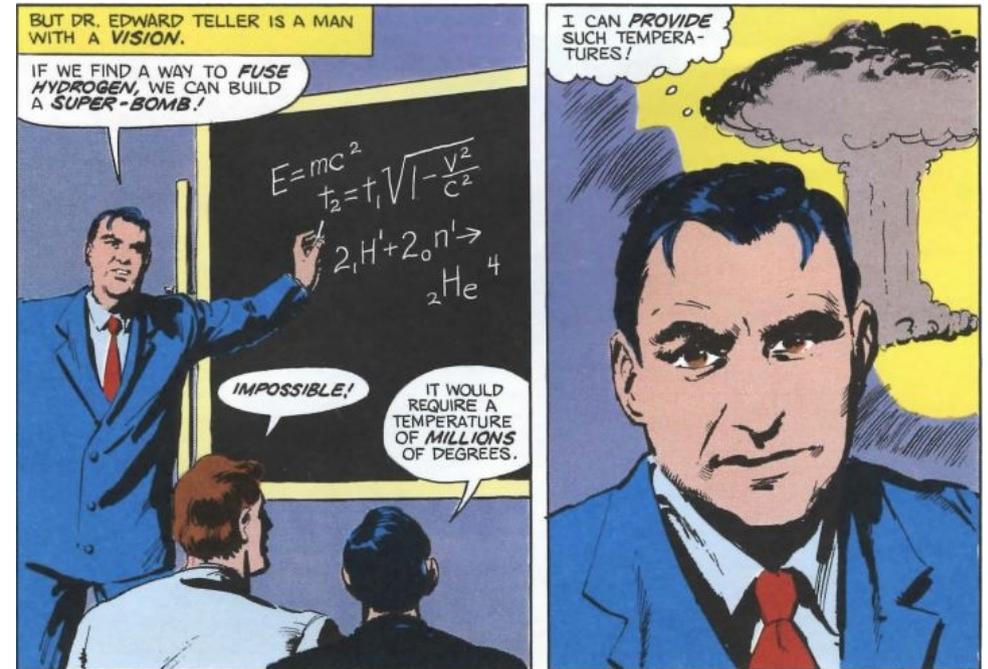
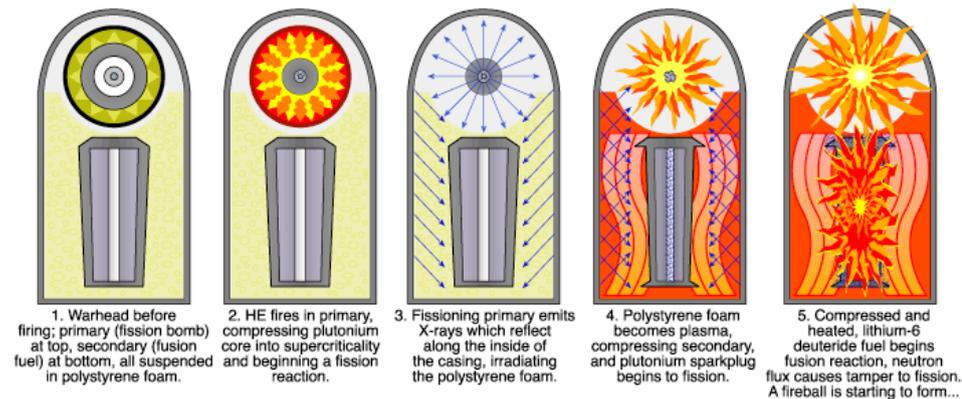
Una stella ha il grande vantaggio delle dimensioni: la materia è confinata dalla gravità e la radiazione è riassorbita all'interno

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

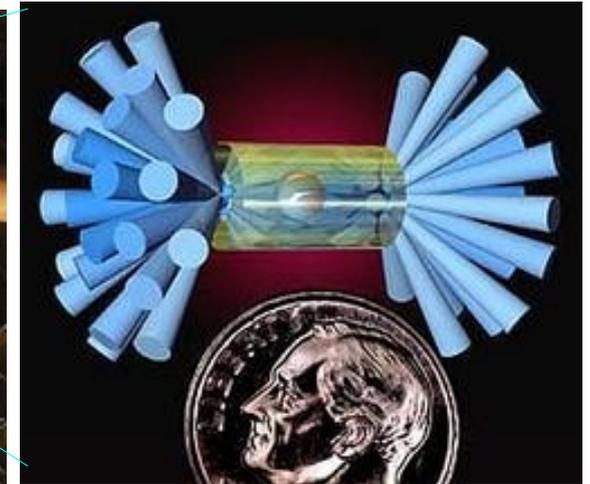
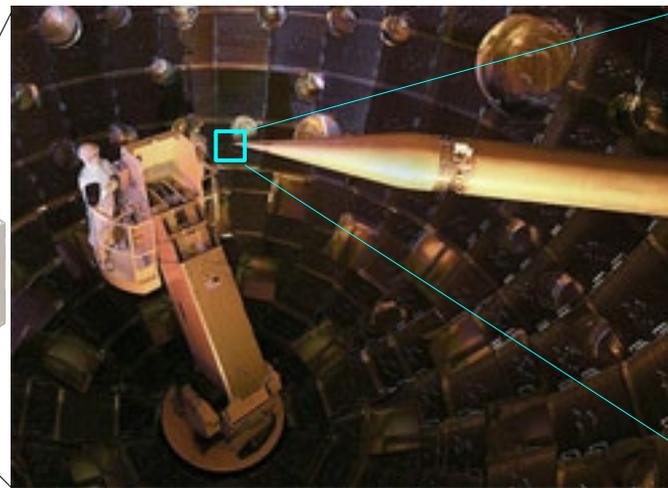
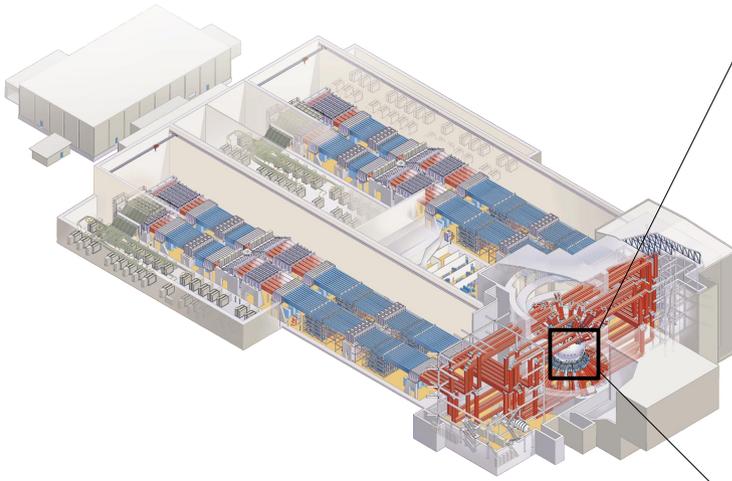
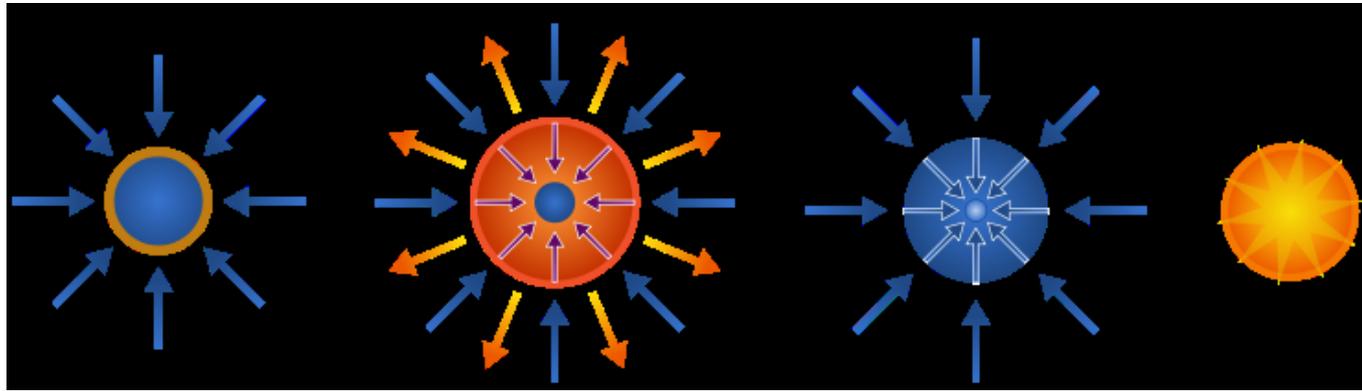


Fusione DT innescata da una bomba atomica “primaria” a fissione

- Il rapporto storico tra fusione “militare” e “civile” è innegabile, ma
- i rischi di proliferazione (produzione di materiale nucleare) sono trascurabili
 - bombe con tecnologia a “sola fusione” non sono realizzabili

Confinamento Inerziale

Principio: creare un plasma a $n=10^{23}$ cm⁻³ per $>10^{-9}$ sec usando fasci laser per comprimere e scaldare il combustibile



National Ignition Facility (USA):
usando il laser più grande al mondo,
nel 2014 è stata raggiunta una
condizione di "pareggio" (*breakeven*)
tra l'energia depositata sulla capsula
di DT e l'energia prodotta da fusione



Confinamento Magnetico

Principio: confinare un plasma a $n=10^{14} \text{ cm}^{-3}$ per $>1 \text{ sec}$ usando **campi magnetici** per intrappolare le particelle

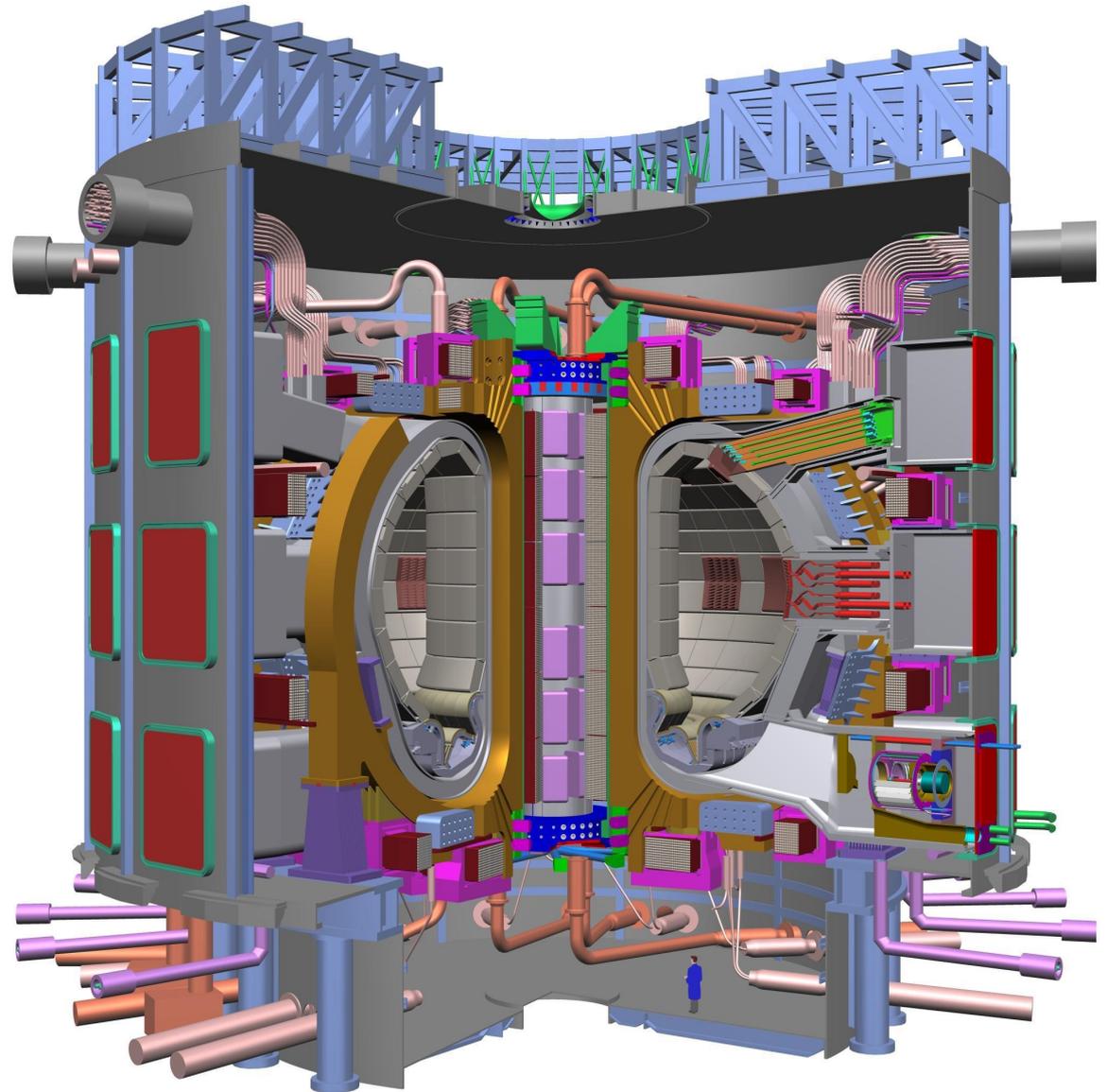
ITER

(International
Thermonuclear
Experimental
Reactor)

Proposto nel 1985

Scopo: **ignizione**
(~2030 ?)

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



Confinamento Magnetico

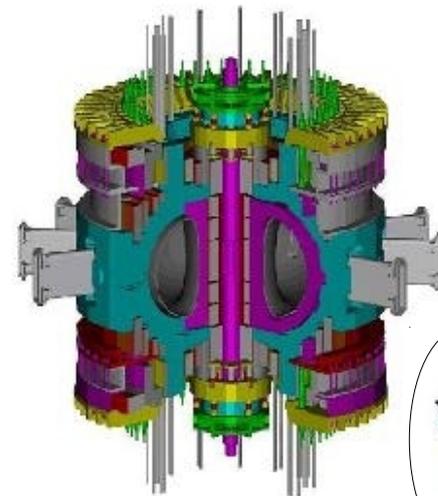
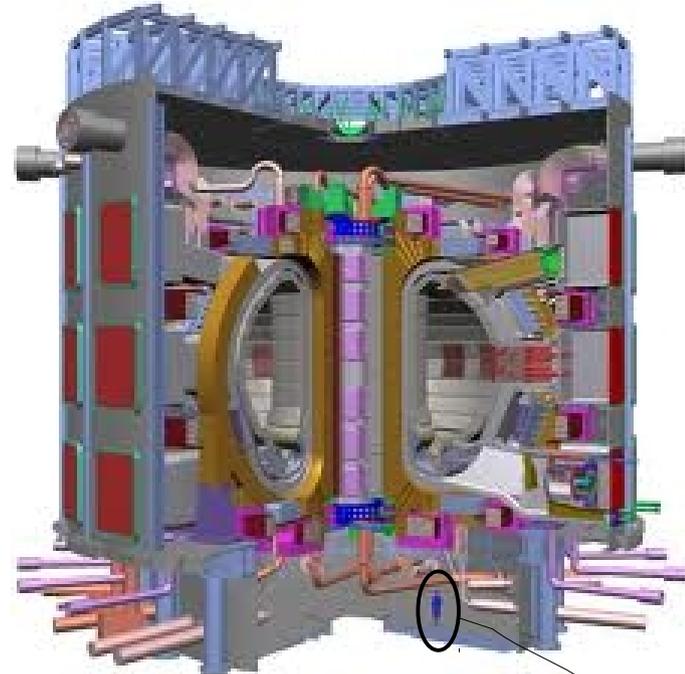
Principio: confinare un plasma a $n=10^{14} \text{ cm}^{-3}$ per $>1 \text{ sec}$ usando **campi magnetici** per intrappolare le particelle

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

Nessuna notizia recente sullo stato del progetto ...



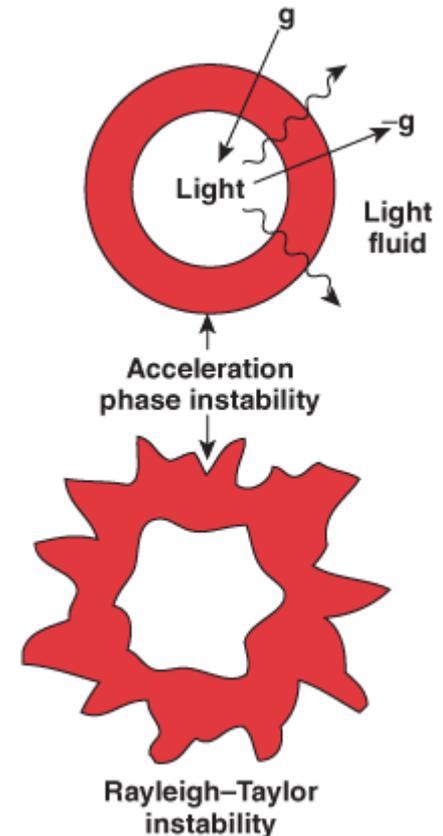
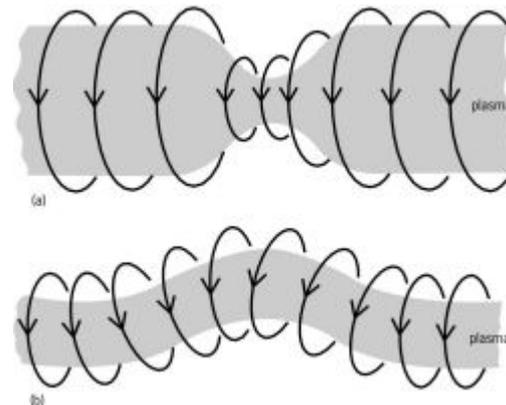
La Legge di Murphy dei plasmi

“Se qualcosa può andare storto, lo farà”
(Legge di Murphy, vecchia come l'umanità)

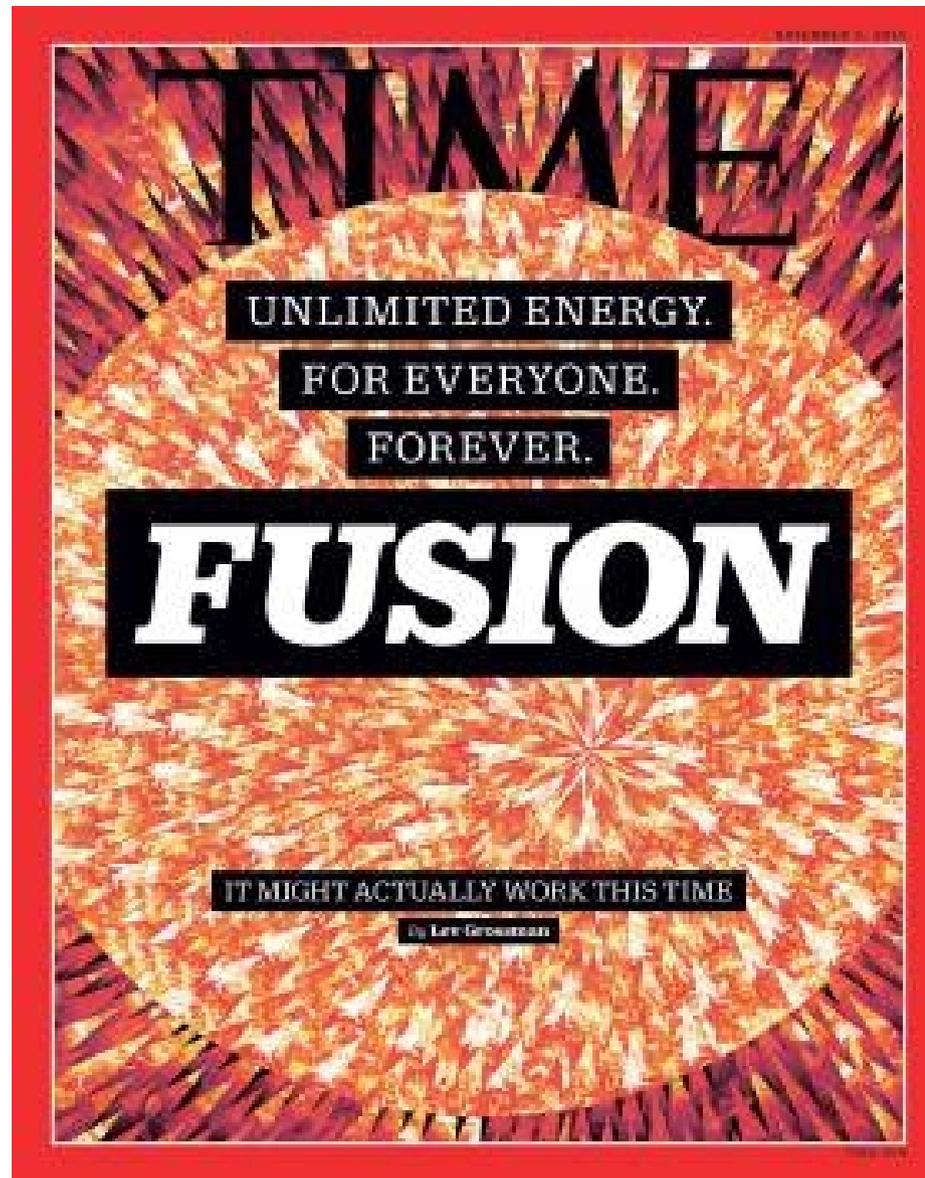
“Se è un plasma, è instabile”
(vecchia come la scoperta dei plasmi)

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

Problema di fondo:
complessità del sistema
(coinvolge elettromagnetismo,
idrodinamica, fisica
nucleare, ... accoppiati con
problemi di ingegneria e
tecnologia)



Nonostante le difficoltà ...



TIME, Ottobre 2015