

Energia da fusione nucleare: schemi, risultati, prospettive

Stefano Atzeni

Dipartimento di Energetica, Università di Roma "La Sapienza" e CNISM

Seminario INFN Dipartimento di Fisica Università di Roma "La Sapienza" 23 gennaio 2009



Ringraziamenti

- immagini NIF: Lawrence Livermore National Laboratory
- immagini JET: EFDA-JET
- G. Mazzitelli (ENEA, Frascati) per alcune immagini
- A. Schiavi (Sapienza-CNISM) per discussioni e collab.



Sommario

- motivazioni della ricerca sulla fusione
- requisiti fisici generali
- fusione a confinamento magnetico: schemi, problemi e risultati, progetti e prospettive
- fusione a confinamento magnetico: schemi, problemi e risultati, progetti e prospettive
- commento conclusivo



Bibliografia (I)

su fusione magnetica e fisica dei plasmi

- J. Wesson, *Tokamaks*, 3rd Ed., Oxford University Press, 2004.
- R. Dendy (Ed.): *Plasma Physics*, Cambridge University Press, 1993.
- K. Miyamoto: Plasma Physics and Controlled Fusion, Taylor & Francis, 2006.

sulla fusione inerziale

- S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn, *The Physics of Inertial Fusion*, Oxford University Press, 2004 (paperback: 2009)
- J. D. Lindl: *Inertial Confinement Fusion*, Springer, New York, 1997. collezione di articoli sulla tecnologia della fusione inerziale
- Energy from Inertial Fusion, IAEA, Vienna (1995).

collezione di articoli sulle diagnostiche:

• P. E. Stott, A. Wootton, G. Gorini, E. Sindoni and D. Batani (Eds): *Advanced Diagnostics for Magnetic and Inertial Fusion*, Kluwer Academic, New York (2002).



Bibliografia (II)

un'interessante review:

• W. J. Nuttal (Ed.), *Fusion as an Energy Source; Challenges and Opportunities*, Institute of Physics Report, Sept. 2008 (http://www.iop.org/activity/policy/Publications/file_31695.pdf)

Invited talk alle maggiori conferenze su fusione e plasmi:

- EPS Plasma Phyiscs Conference: *Plasma Phys. Controll. Fusion* (Dec. issue)
- APS Plasma Physics Division: *Phys. Plasmas* (May issue)
- IAEA Fusion Energy Conference: Nucl. Fusion
- Inertial Fusion Science and Applications
- Simposium on Fusion Technology: *Fusion Technol*.



Un luogo comune un po' banale e un'*excusatio non petita*

• ricerca sulla fusione = *imbrigliare l'energia delle stelle*, ma

le stelle sono confinate dalla gravità e "bruciano" idrogeno a temperatura $T \approx 1$ keV, e

un reattore ha massa "piccola": non può contare sulla gravità per contenere il combustibile e deve sfruttare la reazione D-T, a T > 10 keV,

• *da cinquant'anni mancano sempre trent'anni* alla realizzazione del reattore a fusione: sì, ma le cose sono molto più difficili di quanto sembrassero e di strada se n'è fatta ...



Source: European Fusion Development Agency (EFDA)



- Combustibile primario praticamente inesauribile (deuterio e litio), diffuso, e a basso costo
- resa elevatissima (deuterio-trizio: 341 TJ/kg = 8 ktep/kg)
- sicurezza intrinseca (no criticità, energia nel reattore modesta)
- impatto ambientale modesto:
 - no gas serra
 - scorie radioattive nettamente inferiori a quelle di un reattore a fissione (vedi prossima fig.)
- modesti rischi di proliferazione (neutroni, ma non materiali fissili)

combustibile per reattore DT (D + T --> α + n + 17.6 MeV)

- D dall'acqua: 37 g di D per 1000 kg; costo attuale: 4000 \$/kg
- T per fertilizzazione del Litio, tramite neutroni rilasciati da DT;
 riserve di Li: 12 Mt nella crosta terrestre (produzione attuale 40 kt/anno)
 10¹¹ t nel mare

$$^{6}Li + n \rightarrow T + \alpha + 4.86$$
 MeV.
 $^{7}Li + n \rightarrow T + \alpha + n - 2.87$ MeV.



Radioattività residua ("scorie")





Costi e investimenti

- Costo dell'energia da fusione stimato leggermente superiore a quello dell'energia da fissione, ma con minor dipendenza dal mercato del combustibile e minori "externalities" (difficimente prevedibili) legate all'impatto ambientale e al ciclo del combustibile
- investimenti attuali:

<u>fusione magnetica</u>: poco meno di 1 G€/anno, distribuiti fra tutti i maggiori paesi industriali (+ India e Cina); <u>fusione inerziale</u>: circa 500 M€/anno (principalmente USA e Francia; impegno notevole anche in UK, Giappone, Cina) [termine di confronto: costo dell'energia elettrica prodotta in un anno: 1000 G€]



- reazioni termonucleari (no fascio-bersaglio, no fascio-fascio)
- temperatura $T \ge 10^8$ K (10 keV) ==> plasma
- confinamento:

la materia (plasma) reagente deve essere mantenuta a densità e temperature adeguate, e la sua energia deve essere "confinata" per un intervallo di tempo tale che l'energia prodotta ecceda quella spesa per mantenere le condizioni di reazione

due schemi principali:

confinamento magnetico e confinamento inerziale

anche per il più reattivo dei combustibili, T > 5 keV per compensare le perdite radiative





• confinamento magnetico:

plasma a bassa densità (10¹⁴-10¹⁶ cm⁻³), in condizioni quasi stazionarie, confinato da campi magnetici opportunamente configurati

• confinamento inerziale:

microesplosione di materia fortemente compressa, "confinata" dalla sua sola inerzia (e quindi per un intervallo di tempo $\tau \approx R/c_s$, dove *R* è la dimensione caratteristica della materia compressa *e* c_s è la velocità del suono).



macchine quasi-stazionarie, bilancio di potenza

bilancio di potenza (per unità di volume):

- perdite:
 - radiazione (bremsstrahlung) $\propto n^2 T^{1/2}$, dove n è la densità elettronica
 - altre, caratterizzate da un *tempo di confinamento (dell'energia)* τ : 3 *n T*/ τ (assumendo uguali densità e temperature per elettroni e ioni)
- input:
 - particelle α di fusione = (1/5) potenza di fusione $\propto n^2 \langle \sigma v \rangle$
 - riscaldamento *ausiliario*: (potenza di fusione)/Q

Q: moltiplicazione di energia $Q = \infty$: ignizione (*T* autostenuta) Criterio di Lawson: T = 10 - 20 keV $n\tau \ge 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$

$$m_{\rm E} = \frac{3k_{\rm B}T}{\frac{1}{4}((1/Q) + (1/5))Q_{\rm DT}(\sigma v) - C_bT^{1/2}}$$



confinamento magnetico

$$T = 10 - 20 \text{ keV}$$

 $n \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
 $\tau \approx 1 - 5 \text{ s}$

 $p = 2 n k_{\rm B} T = \beta \ {\rm B}^2/2\mu_0,$ $\cos\beta \le 0.1$



Fattore di merito $n\tau T$





Macchina toroidale



source: Chen, Introduction to Plasma Physics, 1974



Tokamak

- campo toroidale da magneti esterni
- campo poloidale da corrente indotta (plasma = secondario di un trasformatore)
- + campo verticale da magneti esterni



source: Pease, in Dendy 1993

Tokamak



Stellarator

• campo toroidale e poloidale da magneti esterni (elicoidali)



source: Pease, in Dendy 1993



Tokamak vs stellarator

Tokamak:

Stellarator:

- più semplice (assisimmetrico)
- miglior confinamento (almeno finora)
- intrinsecamente impulsato (corrente indotta)

ma si può generare corrente non induttiva, tramite iniezione di potenza ausiliaria (microonde, fasci di particelle) ma si può realizzare una struttura modulare

- stazionario

Stellarator modulare



schema di Weldenstein 7 AX, in costruzione a Greinswald (con notevoli ritardi e costi molto maggiori rispetto alle previsioni)



Diagnostiche (I)

plasmi da studiare:
$n \approx 10^{14} \mathrm{cm}^{-3}$
T = 0.1 - 20 keV
T = 5 - 15 T

L = 0.5 - 5 m

risoluzione necessaria

- $\Delta x = cm$
- $\Delta t = \mu s ms$
- conoscenza dettagliata della composizione

misure elettriche, magnetiche, di n_e , n_i , T_e , T_i , emissione di radiazione, fluttuazioni



Diagnostiche (II)

- sonde per misure elettriche e magnetiche
- interferometria, polarimetria, reflettometria per misure di densità elettronica
- scattering Thomson (multicanale), emissione di radiazione di ciclotrone per temperatura elettronica e funzione di distr. elettronica
- analisi dell'emissione di neutri, misure neutroniche, per temperatura ionica
- bolometria, tomografia X
- sonde, riflettometria, interazione con ioni pesanti, scattering i.r. per fluttuazioni



Fisica: problemi e risultati (I)

- equilibrio: compreso (MHD + controlli)
- stabilità macroscopica: OK (MHD + controlli, limiti operativi)
- stabilità microscopica: gran numero di processi diversi, alcuni non pienamente compresi e controllabili; richiede, in generale, teorie cinetiche e considerazione di geometria dettagliata
- Confinamento: <u>non compreso</u> (turbolenza, errori di campo, microinstabilità, ...)
 => <u>leggi di scala sperimentali</u>

$$\tau_E \propto \frac{I^2}{nT} f_{geom} = (3f_{geom})^{1/2} \frac{I}{(P_{input})^{1/2}}$$

o, quasi equivalentemente
$$\tau_E \propto \frac{I^{0.85} R^{1.2}}{(P_{input})^{1/2}} (a^{0.3} B^{0.2} R^{0.2} n^{0.1})$$

==> per migliorare il confinamento, aumentare dimensioni e/o corrente



• Nota:

Grande sforzo di simulazione

Grand challenge: problema cinetico (3+3) D, con topologia dei campi complessa, scale spazio-temporali multiple

Finora ausilio alla comprensione dei fenomeni, ma non previsioni accurate sul trasporto

Risultati molto promettenti per le interazioni fra particelle veloci e plasma

Confinement time scaling and extrapolation to ITER



courtesy of G. Mazzitelli, ENEA



Fisica: problemi e risultati (II)

- Riscaldamento ohmico (ηj): non sufficiente perché $\eta \propto T^{-3/2}$
 - ==> riscaldamento ausiliario:
 - neutri veloci (100 150 keV)
 - microonde (100 MHz 150 GHz), alle frequenze ciclotroniche o all'ibrida inferiore
- Particelle α:
 - frenamento coulombiano
 - interazione particelle onde? (v_α ≈ v_{alfven}) maggiore incognita fisica per una macchina ad alto Q ==> simulazioni; esperimenti scalati?
- interazione plasma-parete (sputtering, riscaldamento, ecc.)
- avvelenamento da impurezze ($P_{rad} \propto n_e < Z^2 >$)



Fisica: problemi e risultati (III)

• prestazioni "record" (tokamak JET):

- $n \tau T = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ s keV}$ (stesso valore ottenuto da JT60-SU)
- Q = 0.3 (per 1 s)
- $P_{fus} = 22 \text{ MW}$
- altre macchine, con bobine superconduttrici, operano con impulsi di decine di minuti
- su molte altre macchine studiati confinamento, interazione plasma-parete, ottimizzazione della configurazione magnetica, riscaldamenti ausiliari, ecc.

JET

raggio maggiore = 3 m, raggio minore = 1 m; B = 3.8 T, I = 7 MA, riscaldamento ausiliario (rf + neutri) fino a 50 MW





(courtesy of EFTA-JET)

Prossimo passo: ITER

Obiettivi:

- potenza di fusione: 500 MW
- $Q \ge 5$
- impulsi di $Dt \ge 400 s$

Parametri principali

dimensioni: JET x 2

 raggio maggiore: 6.2 m
 "raggio" minore: 2 m
 elongazione: 1.8

volume del plasma = 800 m^3

- corrente: 15 MA
- campo magnetico B: 5.3 T sull'asse

12 T sui conduttori

- magneti superconduttori
- riscaldamento ausiliario: 73 110 MW

ITER

- collaborazione internazionale (EU, Russia, JPN, USA, India, Cina, S. Corea)
- costi: ? (> 5 G€)
- tempo di realizzazione: 8 anni
- esperimenti in DT dopo 3-4 anni di operazione
- stato: predisposizione del sito (Cadarache, F)

Sperimentazione / Incognite

- confinamento
- interazione particelle α plasma
- *macroscopic disruptions*
- divertore
- carichi termici localizzati sulla prima parete



Dimensioni di un reattore

- Temperatura fissata (20 keV)
- Contenimento delle alfa => corrente
- stabilità, date corrente e rapporto di aspetto => campo toroidale
- campo toroidale e forma ==> pressione ==> densità
- densità e temperatura ==> densità di potenza
- riscaldamento e confinamento => dimensioni, potenza ausiliaria
- Vincoli alle dimensioni imposte sia da carico termico e neutronico sopportabile dalle pareti, sia dal confinamento

Casualmente, per campi di 5-10 T le due condizioni portano a valori molto simili



Da ITER al reattore

- Potenza di fusione x 6
- durata dell'impulso: da decine di minuti a ore (o stazionario)
- breeding del trizio (ITER non ha blanket)
- riduzione dei costi di impianto (?)
- affidabilità, durata, manutenzione (danneggiamento delle pareti, loro sostituzione con operazioni remote), riparabilità (magneti superconduttori all'interno del blanket
A Fusion Power Plant



A Lithium Blanket produces Tritium $D + T \rightarrow ^{4}He + n + Energy$ $n + ^{6}Li \rightarrow ^{4}He + T$

A heat exchanger in this blanket produces steam that drives turbines





Alcune macchine tokamak specializzate per lo studio di particolari aspetti di fisica o tecnologici

Concetti alternativi (stellarator, tokamak sferici, ...), che potrebbero portare a vantaggi ingegneristici (Macchine più compatte, intrinsecamente stazionarie, con campo più basso, ...)

Una facility (sorgente di neutroni) per studio di materiali (progetto IFMIF, acceleratore di deutoni, reazioni D-Li)



Alternative a ITER?

- operazione ad alto *Q* potrebbe essere dimostrata con macchine con campo magnetico più elevato e dimensioni notevolmente minori.
- Consentirebbero studi di fisica dei plasmi termonucleari non collisionali, con reazioni, interazione particelle α-plasma, etc. con costi e tempi presumibilmente notevolmente inferiori.
- Proposta in tale direzione: Ignitor (B. Coppi)
- Un reattore basato su macchine compatte ad alto campo non è però, almeno al momento, concepibile (carichi sulle pareti, durata della scarica, etc.)



- dimensioni: raggio maggiore: 1.32 m "raggio" minore: 0.47 m
- corrente: 11 MA
- campo magnetico B: 13 T sull'asse
- magneti superconduttori
- riscaldamento ausiliario: 15 MW
- Potenza di fusione: 100 MW

source: Detragiache, ENEA

FAST: una proposta italiana

L'associazione ENEA-EURATOM propone all'Europa FAST: tokamak di supporto ad ITER per

- Simulare la dinamica delle particelle α tramite ioni veloci accelerati con i sistemi di riscaldamento
- Studiare soluzioni tecniche per la prima parete rilevanti sia per ITER che per DEMO
- Studiare gli "scenari avanzati" per le operazioni allo stato stazionario

Operando in condizioni "simili" a quelle di ITER (cioè valori dei principali parametri adimensionali che caratterizzano il plasma prossimi a quelli di ITER)

courtesy of G. Mazzitelli, ENEA

FAST



Plasma Current	6.5 MA
B _T	7.5 T
Major Radius	1.82 m
Minor Radius	0.64 m
Elongation k ₉₅	1.7
Triangularity δ ₉₅	0.4
Safety Factor <i>q</i> ₉₅	3
<n></n>	$2 x 10^{20} \mathrm{m}^{-3}$
t _{pulse-Flat-top}	13 s
H&CD power	40 MW
ICRH: 30 MW	
ECRH: 4 MW	
LH: 6 MW	

Inertial confinement fusion (ICF)

- Fusion reactions
 - from a target containing a few mg of DT fuel
 - compressed to very high density (1000 times solid density)
 - and heated to very high temperature
- No external confinement => fuel *confined by its own inertia* ($t = R/c_s$ with c_s the sound speed and R linear dimension of the compressed fuel)

=> confinement parameter: nR or ρR

- Pulsed process: for energy production
 - burn targets at 1 10 Hz
 - (Target gain) * (efficiency) ≥ 10 150 7%

il "ciclo" energetico

il bersaglio deve "moltiplicare" l'energia assorbita per un fattore G = 100 (o forse 50)



The essential physical ingredients of ICF

• COMPRESSION, to increase burn during confinement phase density > 200 g/cm³ confinement: density * radius > 2 g/cm²

• HOT SPOT IGNITION, to use input energy efficiently 10 keV over a small "hot spot"

the standard approach: *central ignition* imploding fuel kinetic energy converted into internal energy and concentrated in the centre of the fuel



(see, e.g., S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn, The Physics of Inertial Fusion, Oxford University Press, 2004.)



Per ottenere elevato guadagno

- assorbire efficientemente l'energia del driver: intensità della radiazione incidente limitata, & radiazione verde o ultravioletta
 => guscio anziché sfera di combustibile
- minimizzare energia per comprimere: la compressione deve essere quasi isentropica
- minimizzare energia per riscaldare: ignizione localizzata
- massimizzare la resa (fractional burn) $\Phi =>$ confinamento elevato [$\Phi = \rho R/(\rho R+7)$, con ρ in g/cm³ e R in cm]



Condizioni di ignizione per la fusione inerziale



Hollow shell target, irradiated by a large number of overlapping beams





Laser power vs time

1-D "Flow chart"



key issues

- achieve efficiently adequate imposion velocity
- avoid preheating by shocks and hot electrons
- mantain nearly spherical symmetry
- limit dangerous effects of Rayleigh-Taylor instabilities

Irraggiamento, implosione, compressione, reazione



intervallo di tempo simulato = 25 ns

S. Atzeni, 1992



Zoom (in spazio e tempo): ignizione, compressione, esplosione

Densità Temperatura 0.15 mm 0,15 mm

intervallo di tempo simulato = 0.5 ns

S. Atzeni, 1992

Rayleigh-Taylor instability



Movie: deceleration-phase RTI, hot spot formation and ignition Multimode perturbation (rms amplitude at the end of the coasting stage = $1.5 \mu m$) Ion temperature (eV) map evolution



S. Atzeni and A. Schiavi, PPCF, 2004

Movie: deceleration-phase RTI, hot spot formation and ignition Multimode perturbation (rms amplitude at the end of the coasting stage = $1.5 \mu m$) Density (g/cm³) map evolution



A too large initial corrugation (rms amplitude 6 μm), amplified by RTI, makes hot spot formation impossible Temperature map evolution



Inertial confinement fusion A variety of basic physics processes and of space- and time-scales

- Laser matter (plasma) [or particle-beam plasma] interaction
- Plasma physics (including non-ideal plasma, partially degenerate plasma, partial ionization, etc.)
- Phase transitions (from cryogenic matter to hot plasma)
- Transport processes
- Radiative transfer
- Fusion reactions and product (charged products and neutrons) transport
- Mass density: $10^{-6} 10^3 \text{ g/cm}^3$
- Temperature: $10 3 \times 10^9 \text{ K}$

Time scales:

- Implosion: few 30 ns
- Ignition: few 100 ps
- Fluid instabilities: 0.1 1 ns
- Plasma instabilities: < 1 ps to ns

Space scales:

- Target size: few mm
- Compressed fuel: 0.1 mm
- Density scale-lengths: down to 1 μm
- Fluid modes: down to μm
- Plasma instabillities: Debye length, skin depth, ..

ICF involves extreme values of temperature, density and pressure





NOVA (LLNL), il più potente laser degli anni '80

(impulsi fino a 50 kJ)



Diagnostiche (I)



risoluzione necessaria

- $\Delta x = \mu m$
- $\Delta t = ps$

misure di densità, temperatura, "forma", posizione, parametro di confinamento



Diagnostiche (II)

- spettroscopia ottica e X
- backlighting ottico => streak
- backlighting X => streak
- scattering Thomson
- emissione di neutroni e imaging neutronico
- imaging con protoni veloci (emessi da altro laser-plasma)



- assorbimento, pressione ablativa, velocità di imposione: OK, limitando l'intensità del laser ($\leq 10^{15}$ W/cm²) e operando a $\lambda \leq 0.35$ µm
- raggiunte le velocità e pressioni necessarie
- simmetria: controllo possibile, con accurato posizionamento dei fasci
- stabilità: con opportune scelte progettuali si può limitare la crescita dell'instabilità di Rayleigh-Taylor, RTI (previsto dalla teoria, confermato da simulazioni, poi verificato sperimentalmente); è comunque necessario limitare drasticamente la disomogeneità e le irregolarità superficiali dei bersagli



Fisica: problemi e risultati (II)

- performance record (con laser a impulsi da 50 kJ):
 - densità: 1000 x densità solido
 - resa neutronica in accordo con previsioni di codici che includono mescolamento indotto da RTI.
 - pressione di ablazione > 100 Mbar
- qualche incertezza ancora su possibili effetti negativi delle instabilità parametriche (scattering Brillouin, Raman) che comunuqe si debbono evitare
- Si riuscirà a limitare il mescolamento indotto da RTI?
- $\rho R = 0.2$ g/cm² ==> per arrivare ai valori richiesti per l'ignizione ènecessario aumentare l'energia laser di un fattore 10-30



Prossimo passo: IGNIZIONE: su quali basi?

- I risultati sperimentali sommariamente citati
- Le simulazioni numeriche (che riproducono gli attuali esperimenti con buona precisione) e consentono di progettare in modo "affidabile" nuovi esperimenti
- La consapevolezza che, su scala maggiore, lo schema funziona
- La disponibilità di tecnologia laser, di strumentazione, etc.

National Ignition Facility, NIF (LLNL, USA)

- laser a vetro:Nd, con triplicazione di frequenza
- energia totale per impulso: 1.8 MJ ($\lambda = 0.35 \ \mu m$)
- potenza di picco: 500 TW
- 192 fasci, focalizzabili con errore < 50 μ m
- potenza (di ciascun *bundle* di fasci) programmabile nel tempo (range dinamico 1:100);
- funziona un pò meglio delle specifiche di progetto! (review NIC-JASON, La Jolla, 14-16 gennaio 2009)
- costruita fra il 1998 e il 2009; oggi operativa al 50%della potenza; opererà a piena potenza dall'estate 2010
- costo: 4 G\$; finanziata dal Defence Program del DoE (ora dalla NNSA del DoE)



Laser NIF



Lawrence Livermore National Laboratory

NIF: un laser da 2 MJ per la fusione, costruito presso il Lawrence Livermore National Laboratory

filmato dal sito del LLNL, realizzato durante la costruzione (ora praticamente conclusa)



NIF: schema del laser

filmato dal sito del LLNL:



NIF: camera di reazione (diametro: 10 m)

dal sito del LLNL:







Camera di reazione, qualche diagnostica e bersaglio





direct drive and indirect drive

In indirect drive, the fuel containing capsule is irradiated by thermal X-rays (200-300 eV), generated and confined in a cavity called hohlraum.

Pro: symmetry & stability; Con: lower efficiency


Simulazione di esperimento di ignizione



NIF ha come obiettivo minimo G = 10, ma potrebbe anche ottenere 100



Figure 4. Target gain (fusion energy gain) as a function of the driver energy for central spark ignition with direct and indirect implosion and for fast ignition (based on the LLNL chart).

from Mima and Nakai, 2004; data from Lindl (1995,1998; Tabak (1994), Key (2000) with ignition condition by Atzeni (1999)

Alternative ICF scheme - the fast ignitor: potentially higher energy gain; smaller laser, less stringent symmetry requirementss



- Scheme: M. Tabak et al., Phys. Plasmas 1, 1626 (1994).
- Ignition mechanism: S. Atzeni, Jpn. J. Appl. Phys. 34, 1980 (1995)
- Ignition requirements: S. Atzeni, Phys. Plasmas 6, 3316 (1999);
 S. Atzeni and M. Tabak, Plasma Phys. Controll. Fusion 47, B769 (2005)



Fast ignition

induced by a beam of 1.5 MeV electrons, delivering 25 kJ, in 16 ps, onto a spot of radius = 20 μ m.

Fusion yield: 13 MJ.





The advantages of fast ignition paid by the need for an ultra-intense (& efficiently coupled) driver

optimal parameters for density $\rho = 300 \text{ g/cm}^3$	
delivered energy	18 kJ
spot radius	20 µm
pulse duration	20 ps
delivered pulse power	0.9 PW
delivered pulse intensity	7.2 x 10 ¹⁹ W/cm ²

CPA laser can meet such requirements

A project for fast ignition: HiPER (#)

- goal: demonstrate laser-driven inertial fusion fast ignition
- tentative main parameters:
 - compression pulse: 250 kJ, few ns, $\lambda_c = 0.35 \ \mu m$, 60 beams
 - ignition pulse (CPA): 70 kJ, 15 ps, $\lambda_{ig} = 0.53 \ \mu m$
- (preferred) scheme: direct-drive compression, with cone-guided ignition beam
- construction cost: 900 M€
- status: design in progress, funded by STFC (UK), EU-FP
- (#) M. Dunne, Nature Phys. 2, 2 (2006);
 HiPER technical design report:http://www.hiper-laser.org/ S. Atzeni, D. Batani, L. A. Gizzi, Nuovo Saggiatore, 2007





artist's view

200-300kJ, 5nsec, 3ω



Esperimenti di ignizione (NIF):

Obiettivo: ignizione, con moltiplicazione G > 10, impiegando laser con rendimento dell'1% che effettuano pochi spari al giorno, usando bersagli che costano più di 1000 \$ ciascuno

Reattore:

Necessari: moltiplicazione G > 100, impiegando driver con rendimento del 10% che effettuano 5 spari al secondo, usando bersagli che costano meno di 1 \$ ciascuno!

crescita della potenza dei laser per la fusione



Uno dei molti concetti di reattore Sono in corso azioni di ricerca e sviluppo su tutti i componenti





Reference 6.4 MJ, 112-beam, quad-focused driver



Bunch length compression is integral part of HIF concept Driver efficiency ~ 45% → very low recirculating power fraction





Fusione inerziale e fusione magnetica

I pro della fusione inerziale:

- fenomeni di base compresi e simulabili senza modelli ad-hoc (almeno per lo schema classico)
- separazione fisica dei componenti del reattore
- possibilità di prima parete fluida
- impiego dei laser anche per esperimenti non fusionistici

contro

- grande "distanza" ignizione-reattore
- finora ridotta collaborazione internazionale

In comune tra fusione magnetica e inerziale

- tecnologie nucleari
- molta fisica dei plasmi e tecniche di misura



- esperimenti per la dimostrazione di fattibilità scientifica in corso di realizzazione (molto più avanzati per l'inerziale)
- dalla dimostrazione scientifica al reattore percorso lungo (soprattutto per l'inerziale, che però è "più giovane", ha maggiori ricadute tecnologiche e le cui facility possono essere impiegate per ricerche ad ampio spettro)
- le potenzialità della fusione sono comunque tali (e gli investimenti tutto sommato modesti) che ritengo si debba proseguire a meno che non emergano veri e propri show-stopper
- Artsimovich (coinventore del Tokamak) disse nel 1973
 "Fusion will be ready when society needs it". Concordo in parte. Ritengo siano necessari, oltre agli investimenti, sostanziali progressi nella fisica e nelle tecnologie.