



A vela con la luce, dal nanomondo alle stelle

Relatore:

Andrea Macchi
(CNR/INO, Pisa)

Evento:

Pianeta Galileo 2021
Istituto Russell-Newton,
Scandicci (FI)
30 Aprile 2021



All'Istituto Nazionale di Ottica del CNR ci occupiamo di scienze e applicazioni della

Luce

www.ino.cnr.it

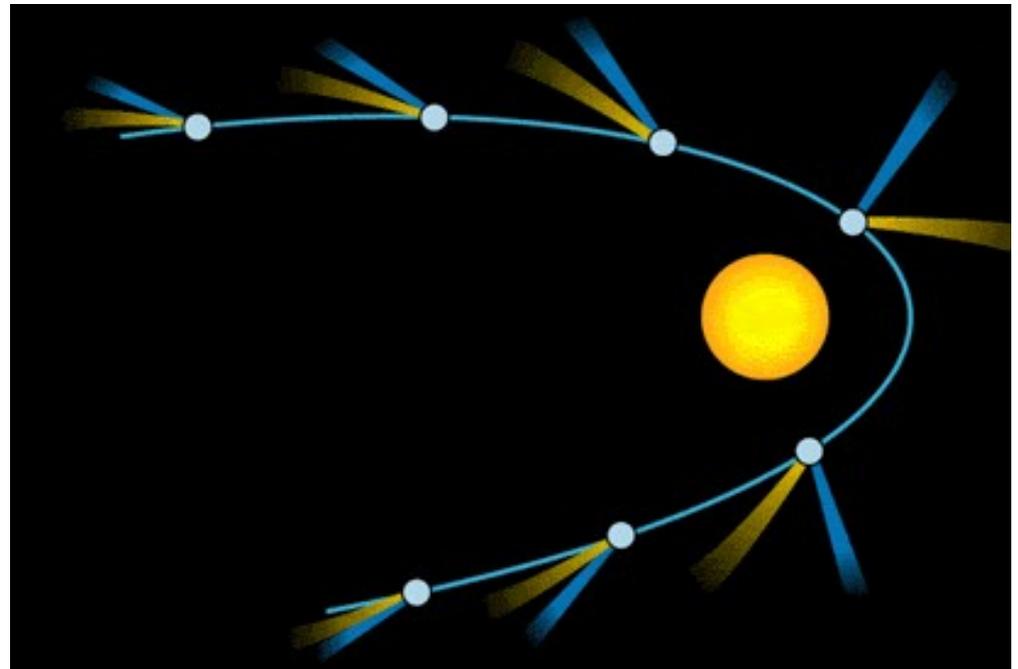
www.pi.ino.cnr.it

“La luce della scienza cerco e 'l beneficio”

(Leonardo da Vinci? o Galileo Galilei?)

C'è vento nello spazio?

1607. Johannes Kepler
(Keplero) osserva che
la coda delle comete è sempre
opposta al Sole e immagina
che la **luce del Sole** agisca
come un vento che le
“spazzi”



*“Trovate navi e vele
adatte ai venti celesti,
e qualche intrepido
sfiderà quel vuoto ...”*

*(Keplero,
Dissertatio cum
Nuncio Sidereo,
conversazione
con Galileo, 1610)*



"Mio caro Keplero, cosa si può dire dei principali filosofi [...] che rifiutano di osservare i pianeti, la luna e perfino il mio telescopio?"

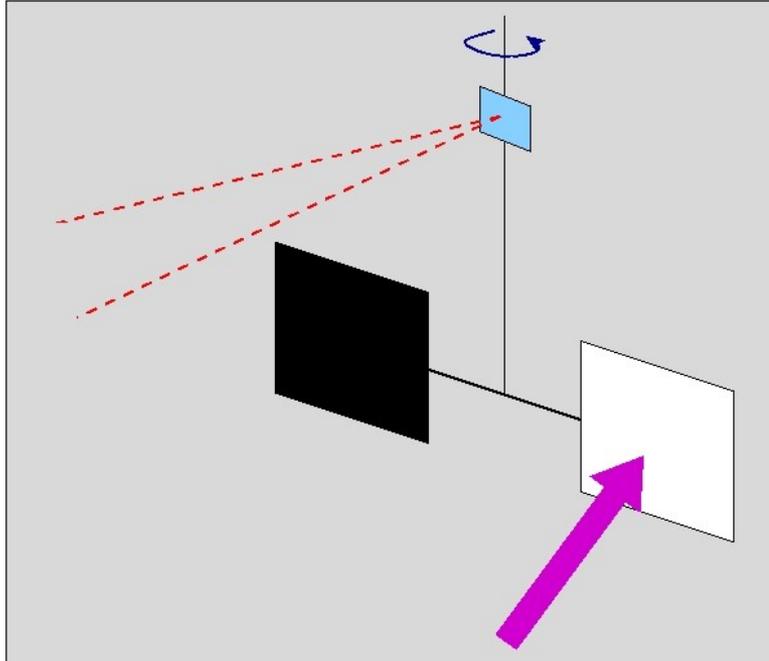
(Galileo, cit. in AA.VV., Il libro dell'astronomia, Gribaudo, 2017)

La scoperta della pressione della luce

James Clerk Maxwell, 1874
(teoria elettromagnetica della luce)



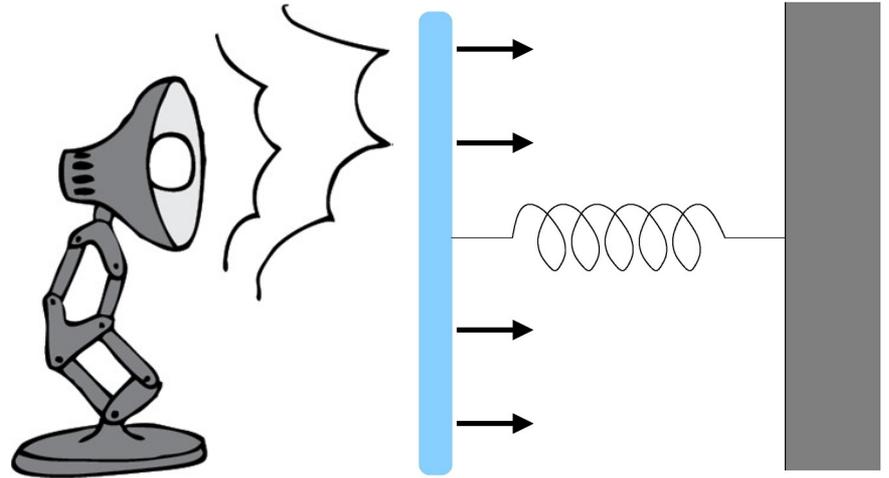
Adolfo Bartoli, 1876
(termodinamica della radiazione)



Verifica sperimentale:
Piotr N. Lebedev, 1899
(metodo del pendolo di torsione)

La pressione della luce in una formula

Forza per unità di superficie esercitata a incidenza perpendicolare su uno specchio perfettamente riflettente:



$$P = 2I / c$$

I : intensità della luce

(energia luminosa per unità di tempo e superficie)

c : velocità della luce (300000 km/s)

Quanto vale la pressione del Sole?

intensità della radiazione
solare sulla Terra

$$I \approx 1.4 \text{ kWatt/m}^2$$

$$\rightarrow I/c \approx 10^{-5} \text{ N/m}^2$$

$$\approx 10^{-10} \text{ atmosfere}$$



Osservazione:

il valore di I implica che su un tetto di alcuni m^2 in qualche ora si può raccogliere un'energia di alcuni **kilowattora**

($1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Watt} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ Joule}$)

e così contribuire alla bolletta elettrica di casa

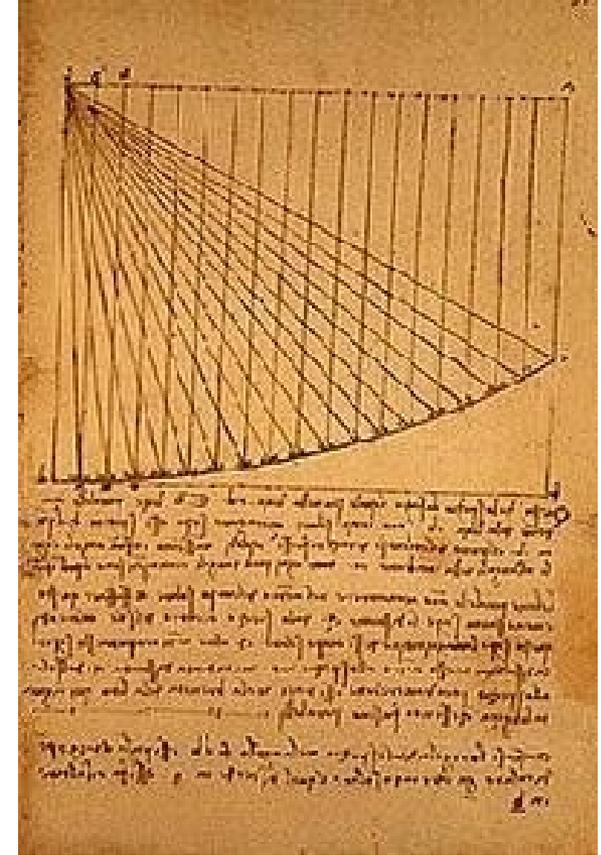
(o “bolletta della luce” ...)

Come aumentare l'intensità della luce ...

focalizzando la luce con specchi o lenti si può ottenere $\approx I \times 1000$ (la pressione rimane debole ...)



Specchi ustori di Archimede.
Giulio Parigi, ca. 1600. Museo d. Uffizi,
Stanzino delle Matematiche, Firenze



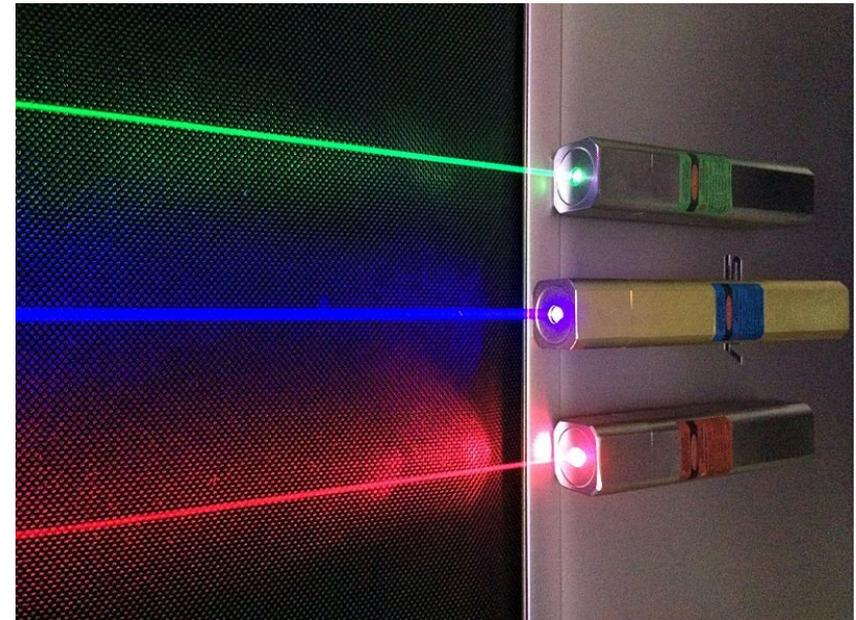
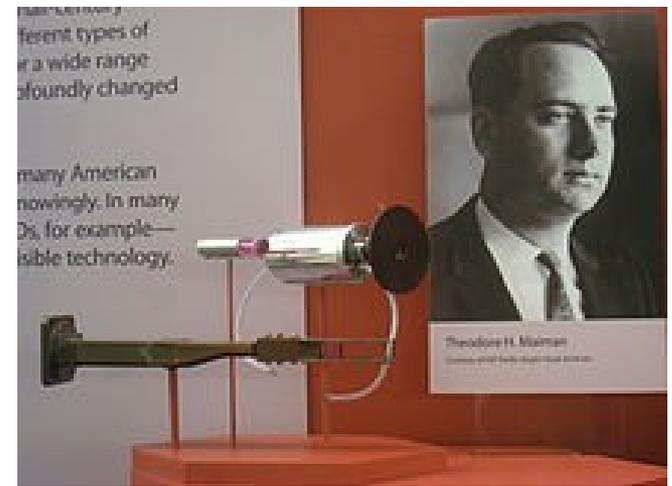
Leonardo da Vinci,
Codex Arundel
(1480-1518),
British Library, London.

"... [questo *laser*] è una soluzione in cerca di un problema"

I. d'Haenens a T. H. Maiman (1960)

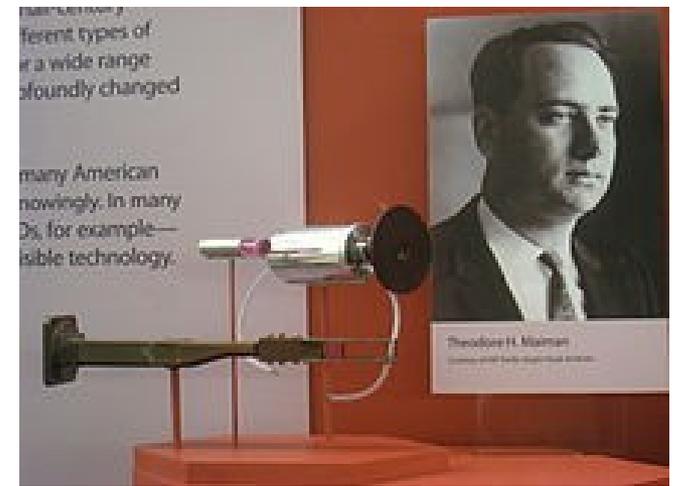
LASER:

luce artificiale coerente,
monocromatica,
direzionale,
amplificabile,
"concentrabile"
nello spazio e nel tempo



"... [questo *laser*] è una soluzione in cerca di un problema"

I. d'Haenens a T. H. Maiman (1960)

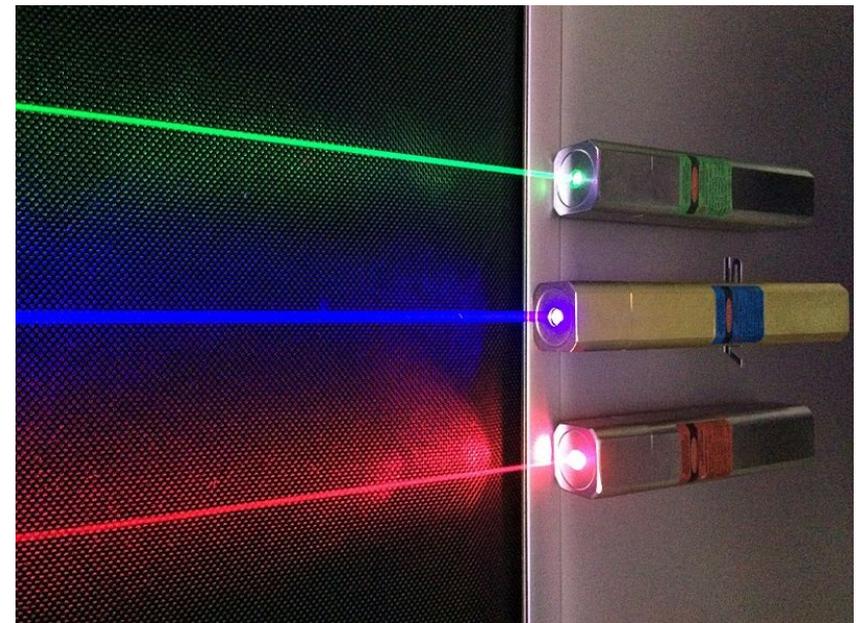


Record attuale di intensità
e pressione corrispondente:

$$I \approx 10^{27} \text{ Watt/m}^2$$

$$I/c \approx 3 \times 10^{13} \text{ atmosfere}$$

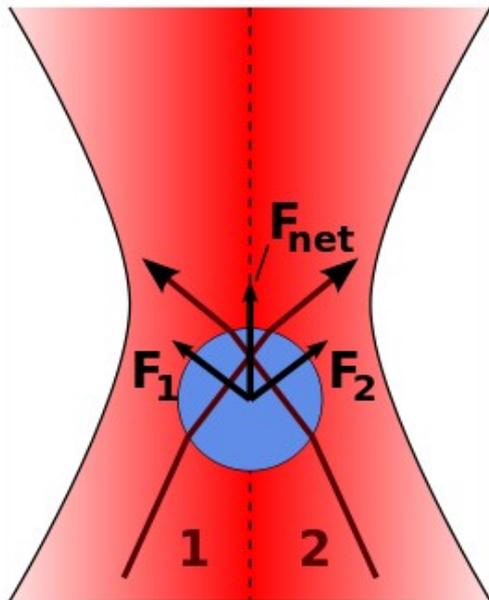
(il vostro puntatore ha solo un'intensità simile a quella solare ...)



Come spostare oggetti piccolissimi ...

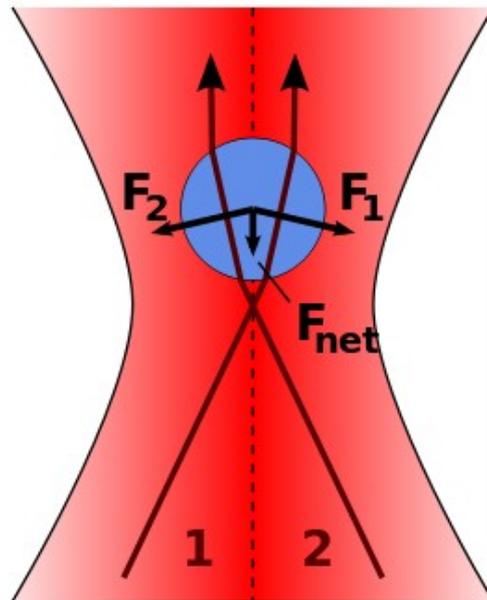
La luce di un laser può essere focalizzata su distanze **sub-micrometriche** (1 micron = 10^{-6} m) per spostare e/o confinare oggetti di piccole dimensioni:

Pinzette ottiche (“optical tweezers”)



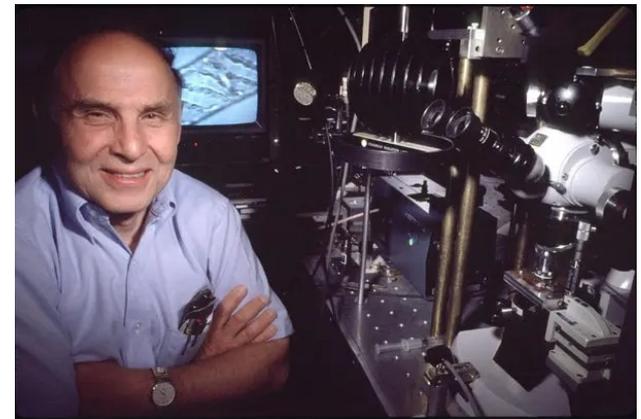
laser light in

intensity profile



laser light in

intensity profile



Arthur Ashkin (1970)
Premio Nobel 2018

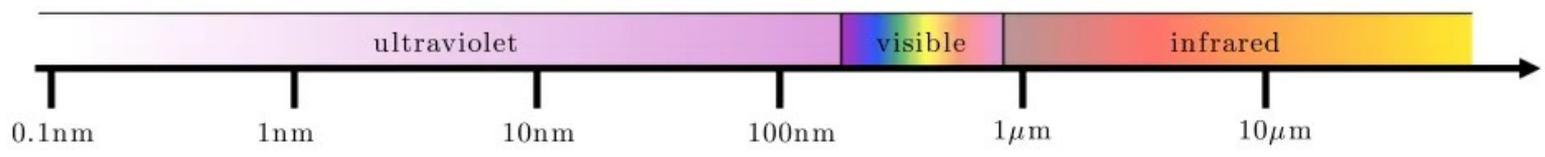
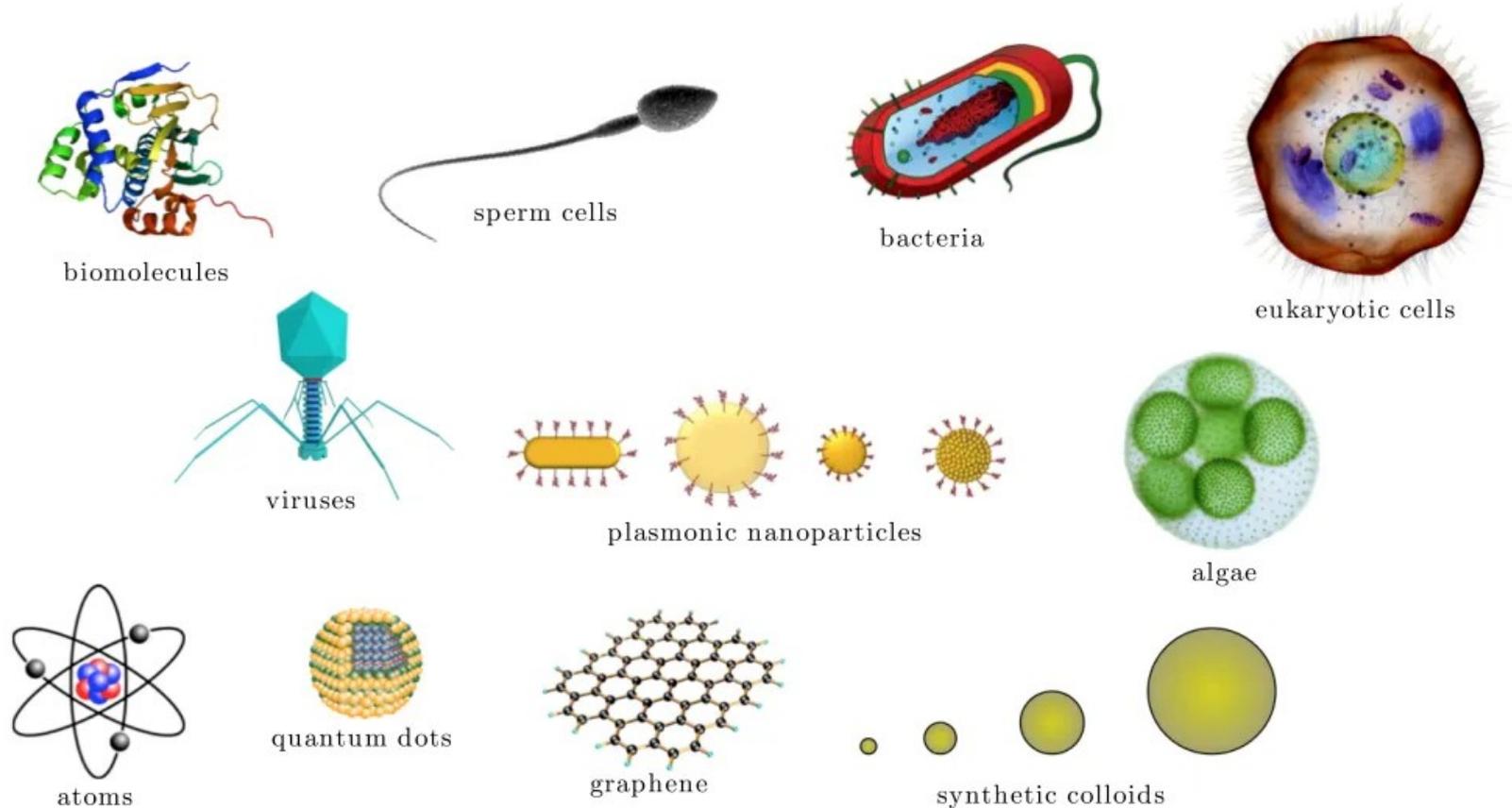
... ad esempio questi

credit: Jones, Maragò, Volpe,
opticaltweezers.org

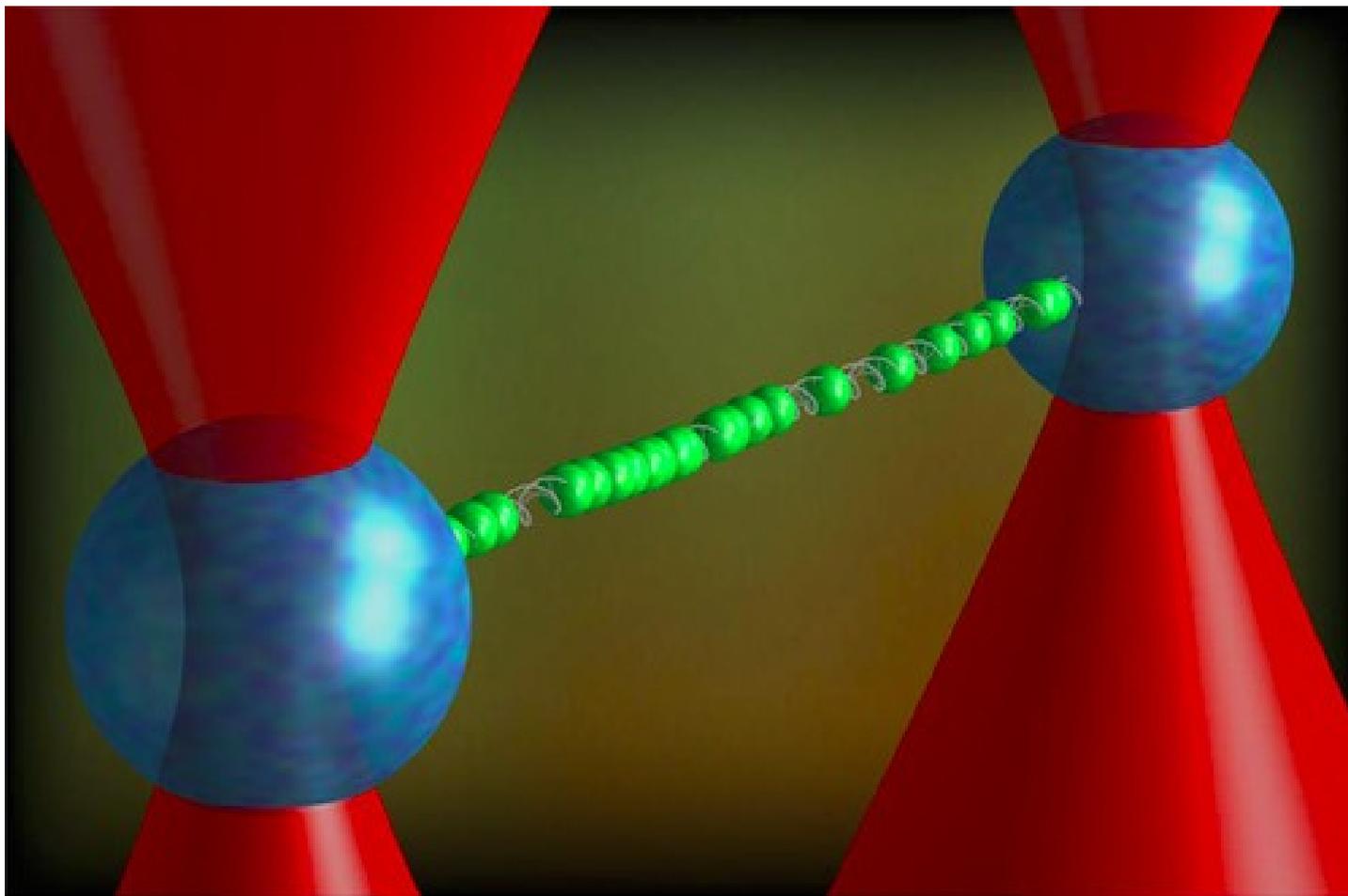
Rayleigh regime

Intermediate regime

Geometrical optics regime



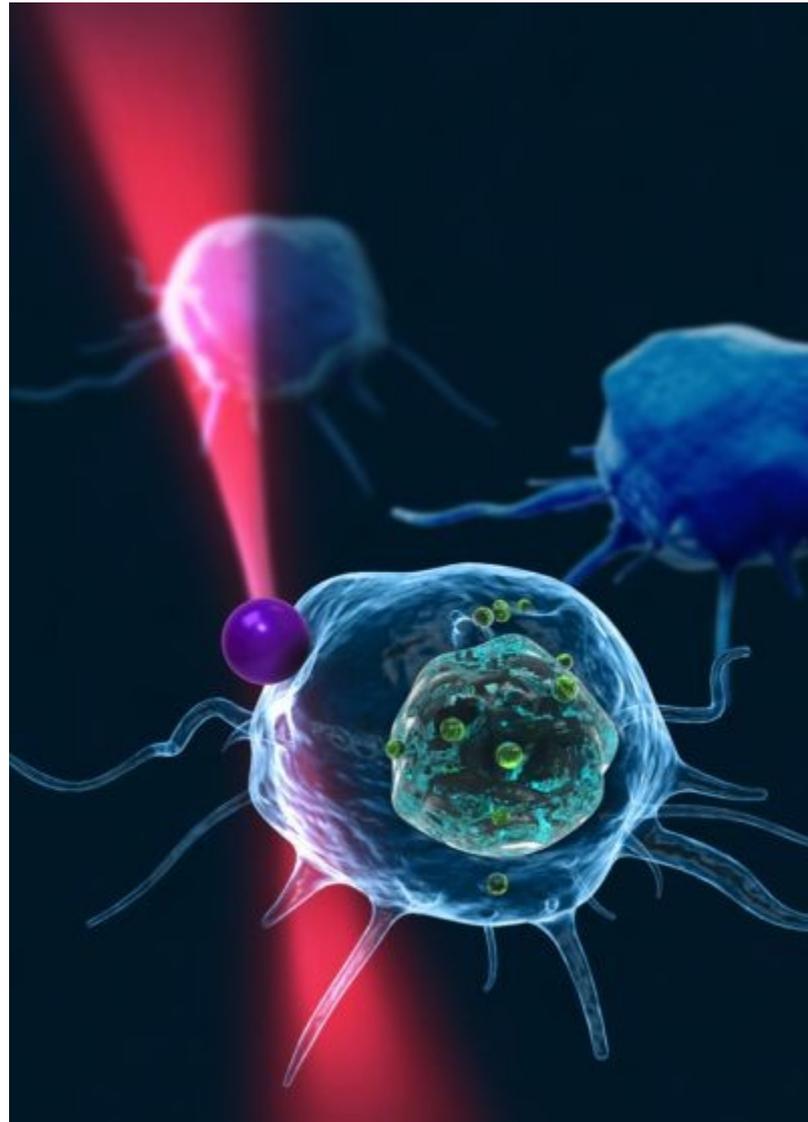
Un tiro alla fune col DNA



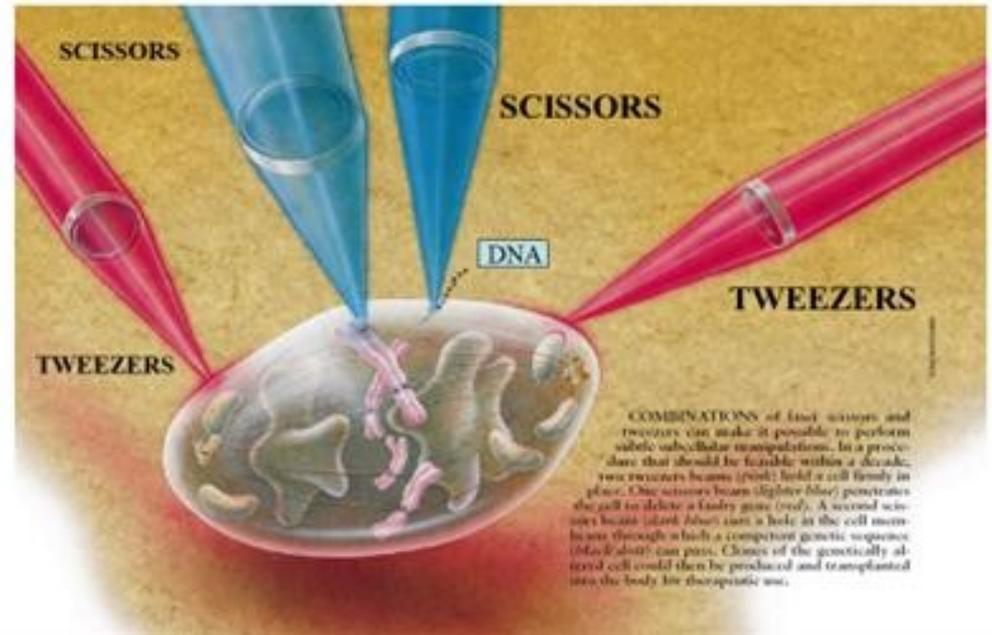
credit: I. Heller/VU Amsterdam

“[Nobel Prize: Laser as Tools](#)”, Physics Magazine 11 (2018) 100

Operazioni su singole cellule



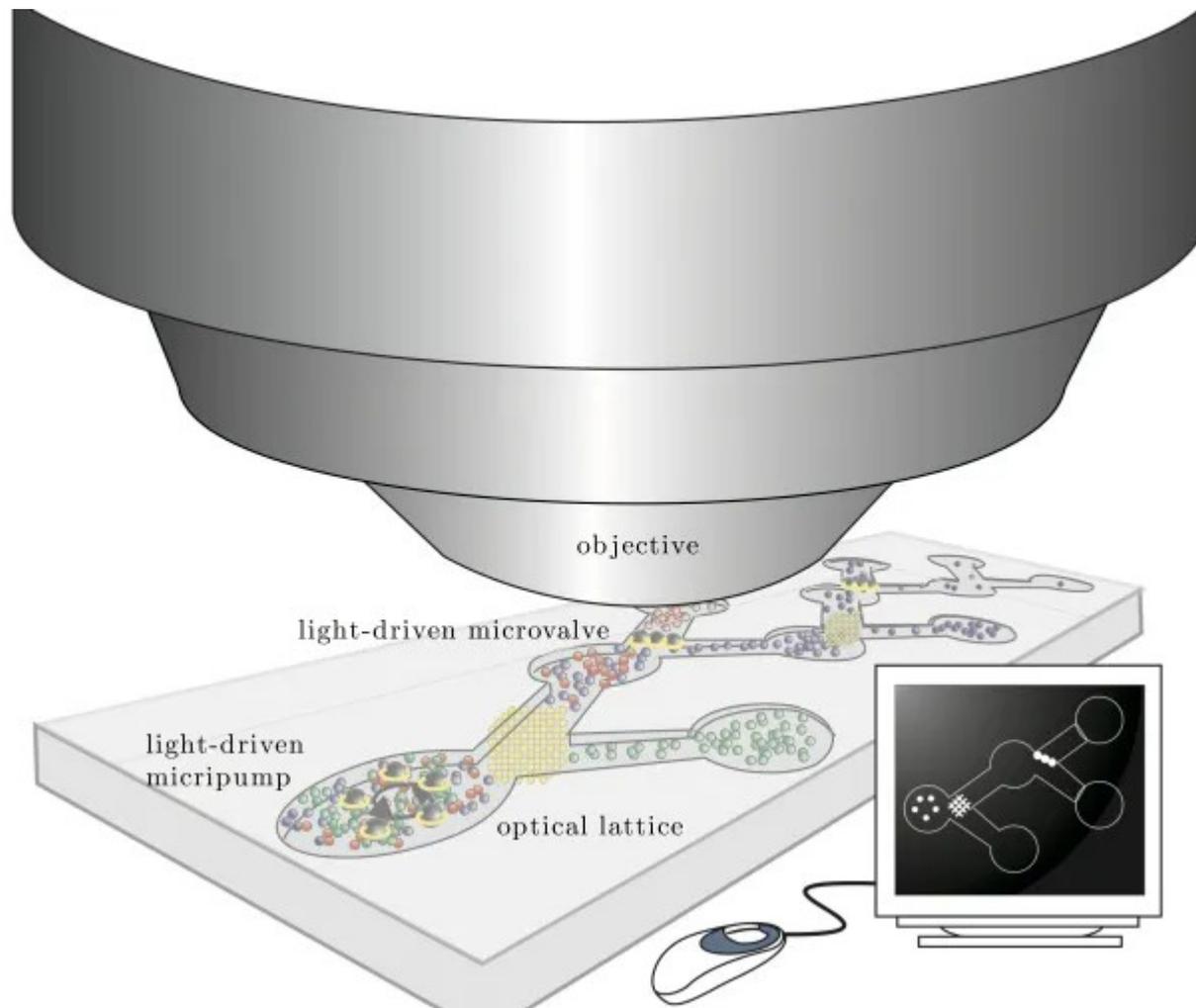
Laser Scissors & Tweezers



credit: [M. W. Berns](#), University of California Irvine

credit: [KAIST](#) (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

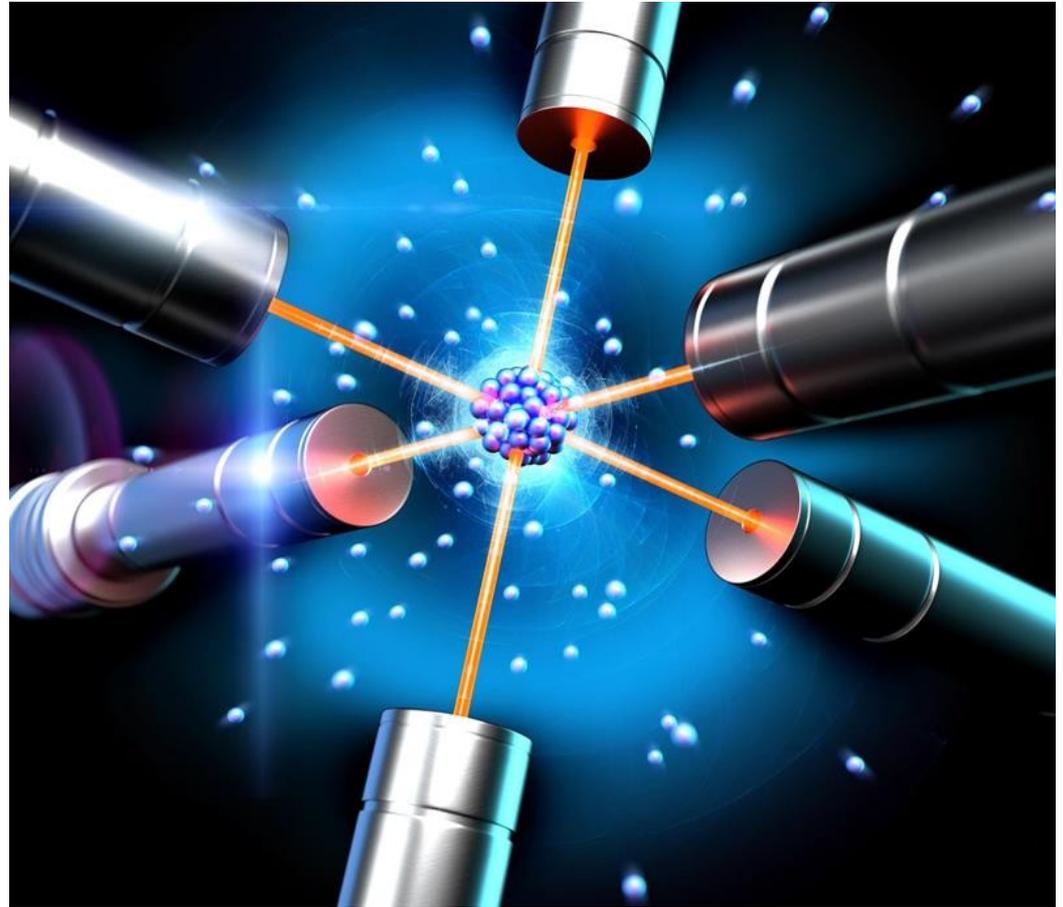
“Lab on a chip” - microlaboratori integrati



credit: Jones, Maragò, Volpe, opticaltweezers.org

Intrappolamento e raffreddamento di atomi

fasci laser opposti
“intrappolano”
atomi nello spazio e
ne favoriscono il
raffreddamento a
temperature
prossime allo zero
assoluto



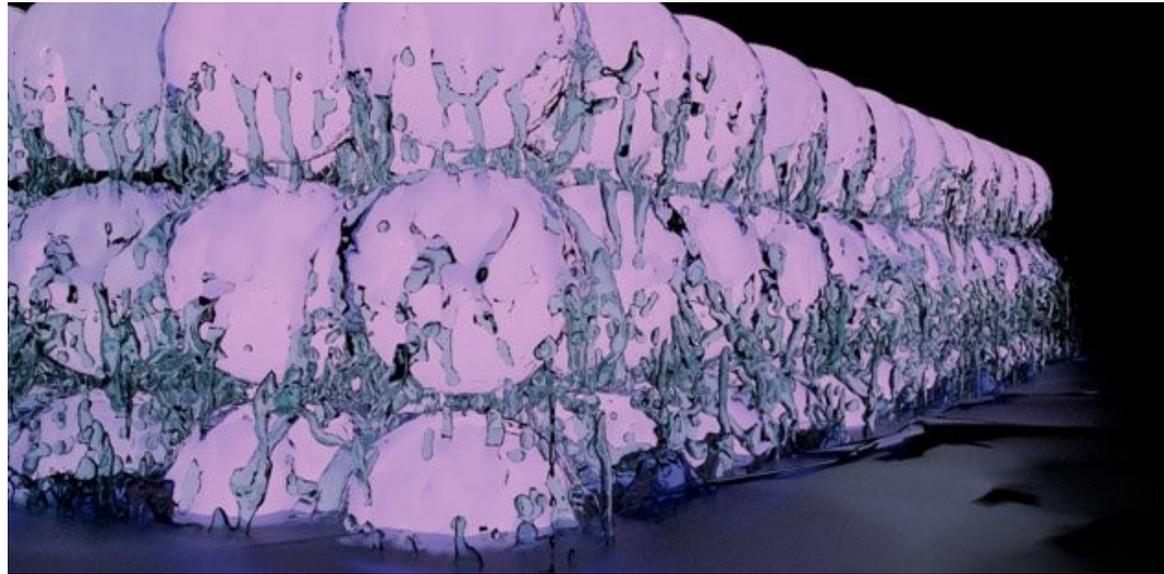
credit: newlelectronics.co.uk

Chu, Cohen-Tannoudj, Phillips,
Premio Nobel 1997



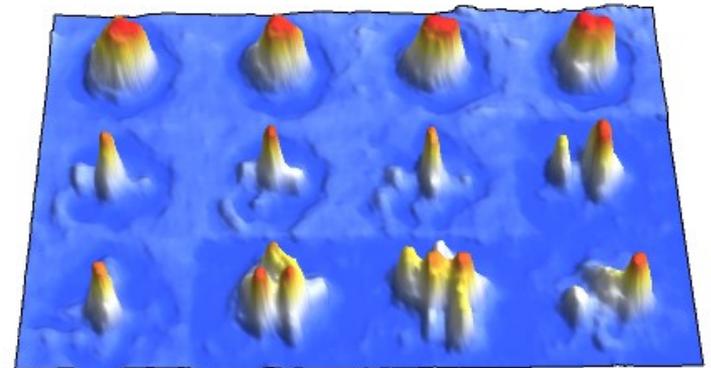
La strana materia superfredda

Effetti quantistici portano a stati di aggregazione “esotici” come il **supersolido** (fluido perfetto ma con struttura cristallina)



credit: J. Leonard, ETH Zurich

”I suoni del supersolido”
descrizione dell’esperimento a Pisa di
Luca Tanzi, (CNR/INO)
<https://www.scienzainrete.it/articolo/suoni-d-el-supersolido/luca-tanzi/2020-11-05>



Ritornando a **Keplero** ...

"... un giorno avremo velocità molto più grandi ... delle quali **la luce** sarà l'agente meccanico ... e viaggeremo verso la Luna, i pianeti, e **le stelle**"

Jules Verne, *Dalla Terra alla Luna* (1865)

I viaggi spaziali sono limitati dal peso del **motore** e del **carburante** necessari

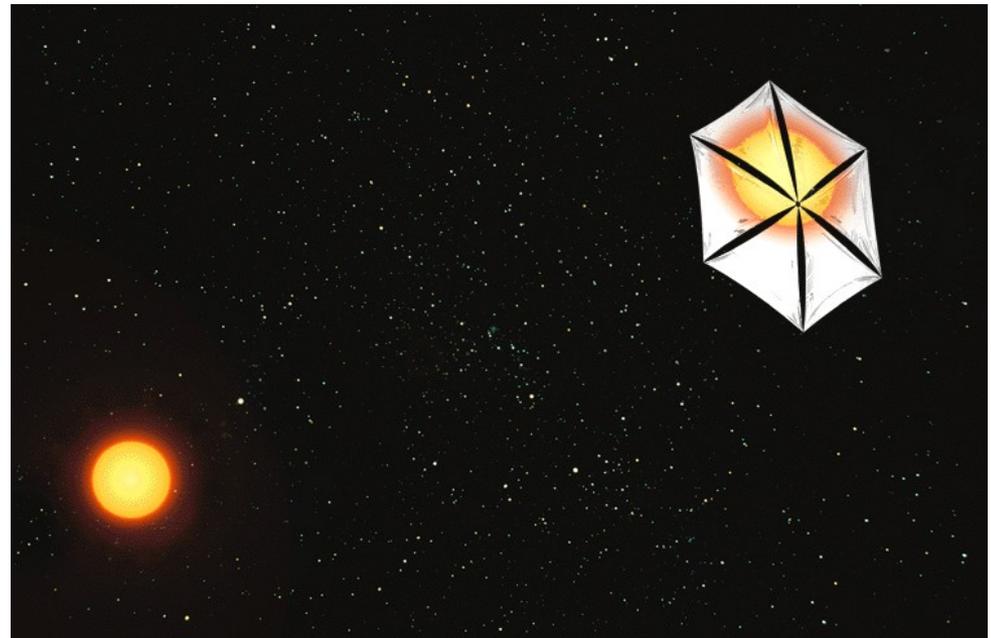


Ritornando a **Keplero** ...

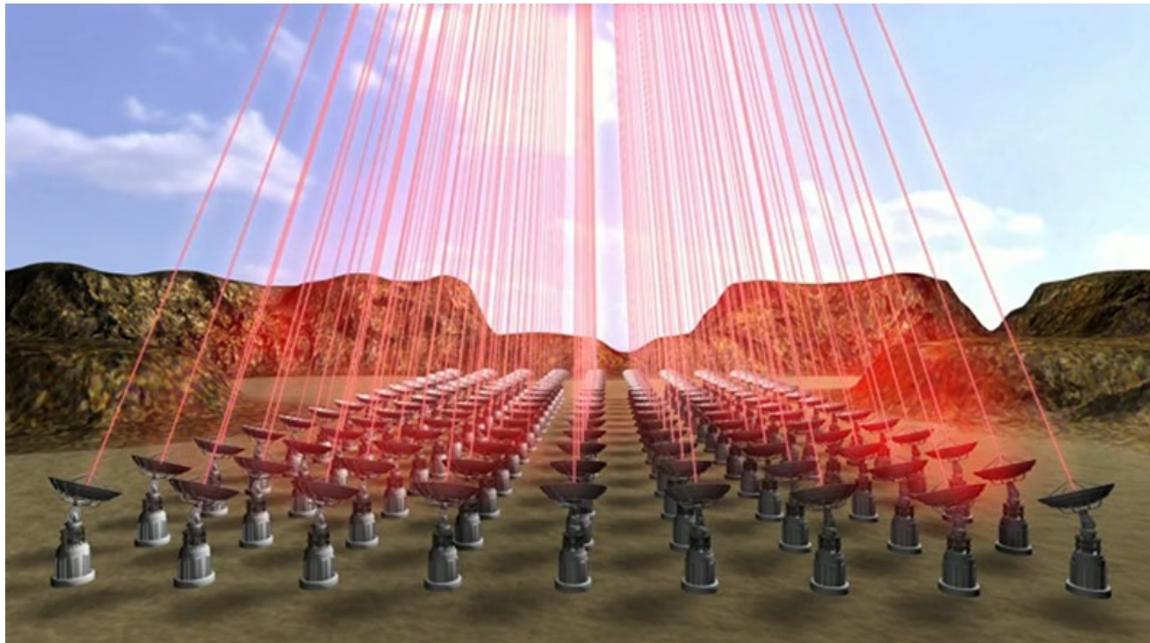
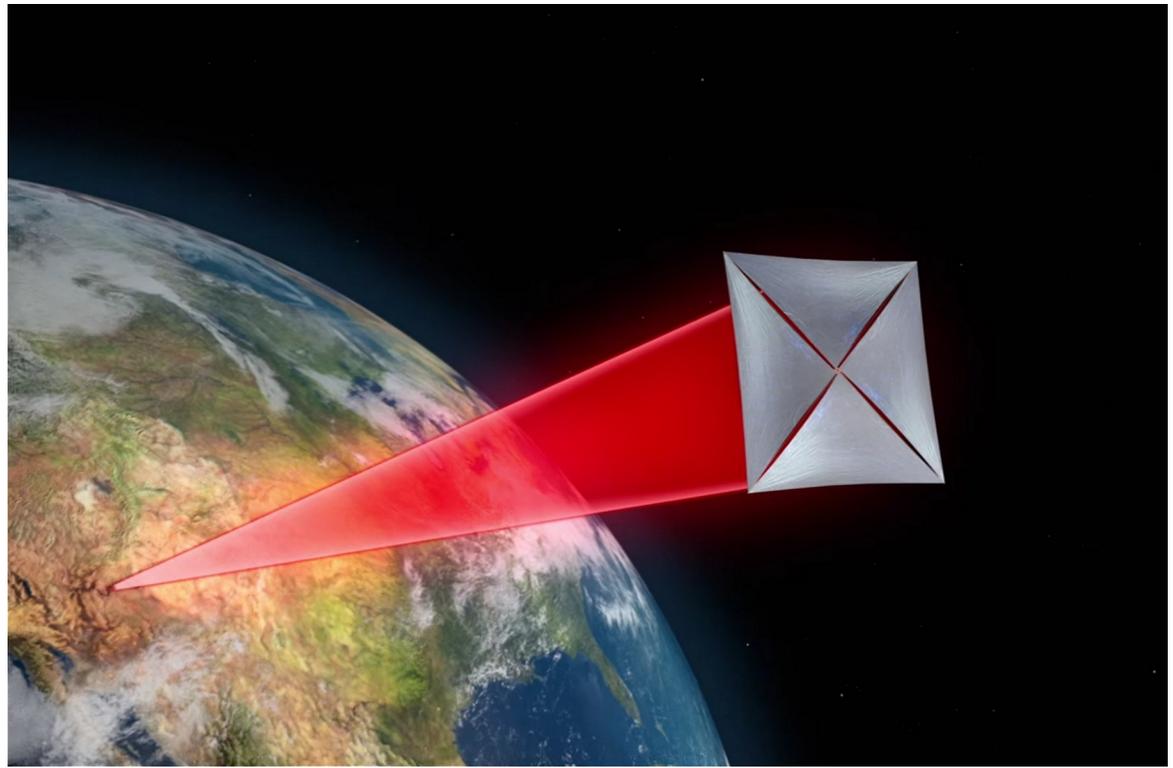
"... un giorno avremo velocità molto più grandi ... delle quali **la luce** sarà l'agente meccanico ... e viaggeremo verso la Luna, i pianeti, e **le stelle**"

Verne, *Dalla Terra alla Luna* (1865)

Spinta dalla luce solare una vela di **10 grammi** può raggiungere **Alpha Centauri** in circa **100 anni**



idea di
R. L. Forward (1964),
G. Marx (1966):
costruire un **laser**
gigante per
propulsione di vele
dalla Terra



Breakthrough Starshot (2016)

vele-sonda su α -Centauri in 20 anni ?



Yuri Milner Freeman Dyson
Stephen Hawking



Mark Zuckerberg

breakthroughinitiatives.org

Breakthrough Starshot (2016)

vele-sonda su α -Centauri in 20 anni ?



Yuri Milner Freeman Dyson
Stephen Hawking



Mark Zuckerberg

breakthroughinitiatives.org

L'astronave è leggerissima ...

vela-sonda (Light Sail):

area (4m)X(4m)

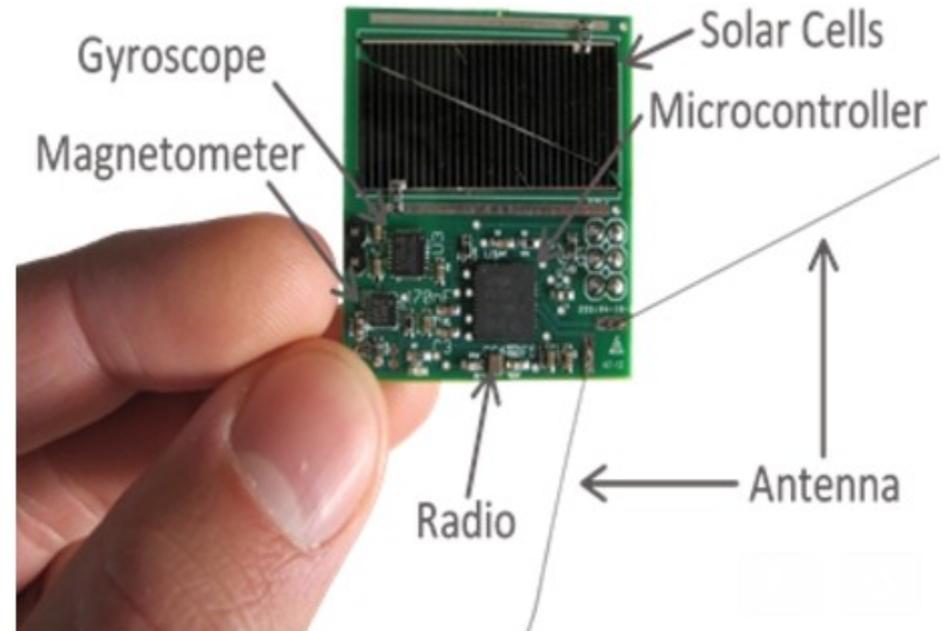
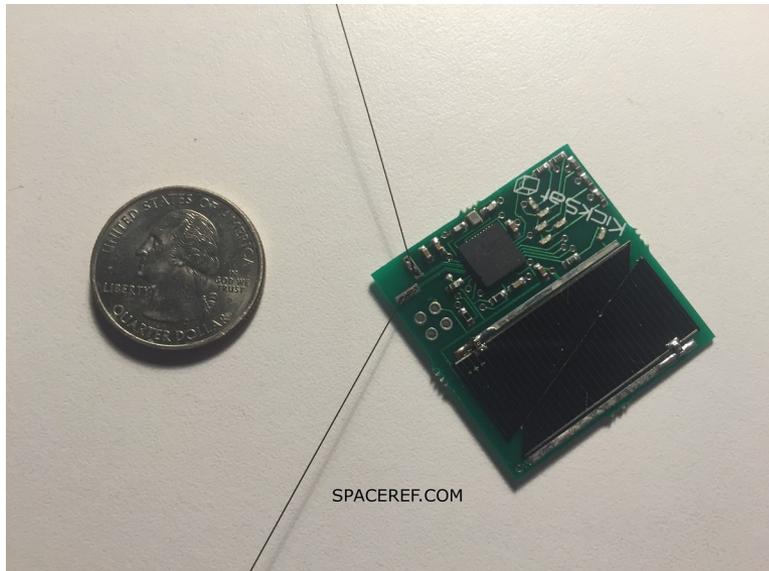
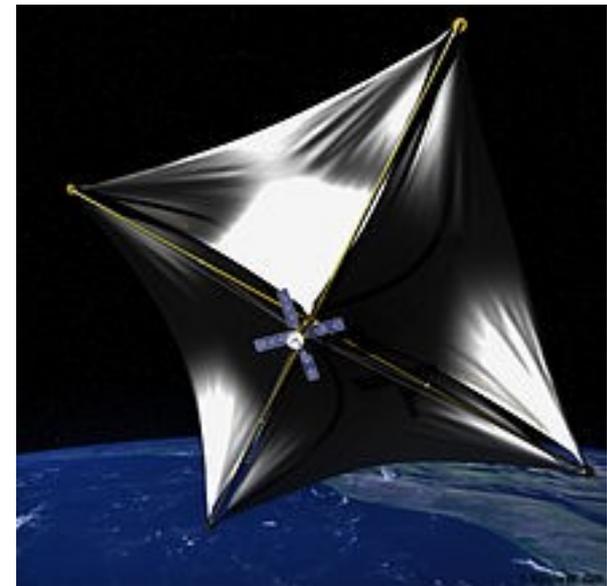
peso ~ 10g

materiale: Grafene (C)

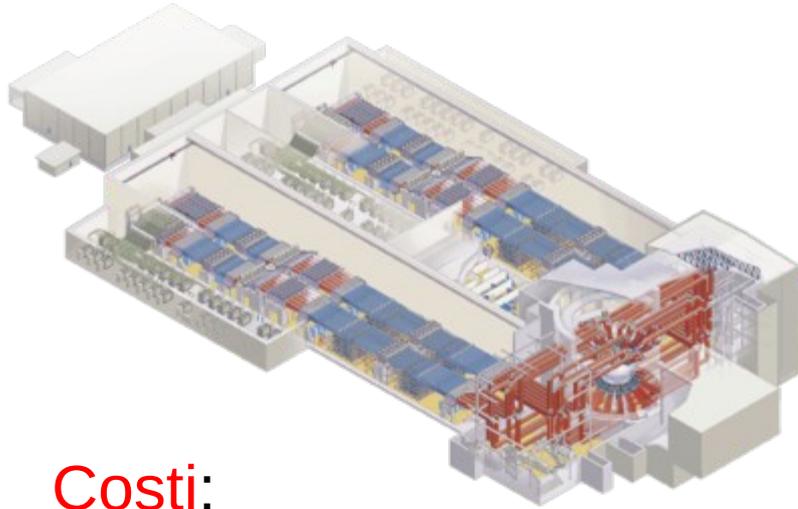
strumentazione minaturizzata

(StarChip)

costo: ~ un iPhone



... ma il laser è “troppo” gigante



Costi:

~1 miliardo \$ (costruzione)

~1 milione \$/impulso

set cinematografico per
[Star Trek](#) (2012)

Laser NIF (USA) produce
 $\approx 10^6$ Joule in $\approx 10^{-9}$ secondi
per un impulso al giorno
lasers.llnl.gov



Laser per Breakthrough Starshot: $\approx 10^{13}$ J in $\approx 10^2$ s
(> 1 milione di volte la scala di NIF)

Stima (ottimistica) costo costruzione: **~100 miliardi \$**

H. Milchberg, “Challenges abound for propelling interstellar probes”,
Physics Today (April 26, 2016)

Nel nostro piccolo: *light sail* come acceleratore “da tavolo”

Impulso laser: energia ≈ 10 J
durata ≈ 10 femtosecondi $= 10^{-14}$ sec

Vela: pellicola ultrasottile
(≈ 10 nanometri $= 10^{-8}$ m)

→ possibile accelerare a $V = 0.3c$
 $\approx 10^{-14}$ g di materia ($\approx 10^{14}$ protoni)
ad alta ripetizione (> 10 impulsi/sec)
su una lunghezza di ≈ 100 micron $= 0.1$ mm



LHC al CERN (Ginevra):
27 km di circonferenza...

Nel nostro piccolo: vela laser come acceleratore “da tavolo”

Sistema laser,
laboratorio ILIL,
CNR/INO, Pisa:
qualcosa come
NIF ... in scala
1:(1 milione)

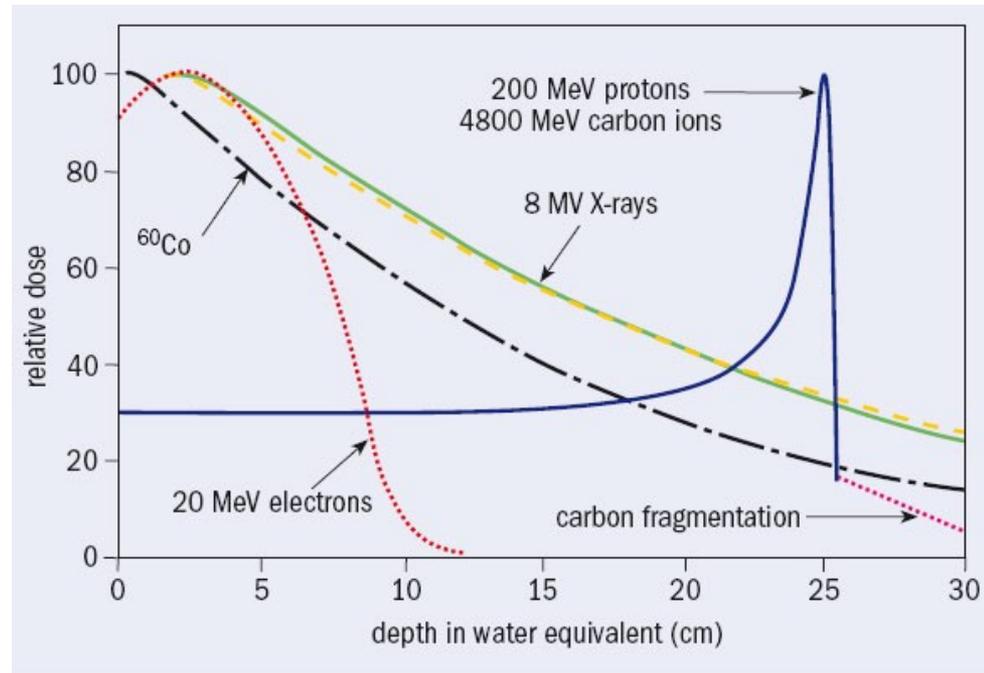
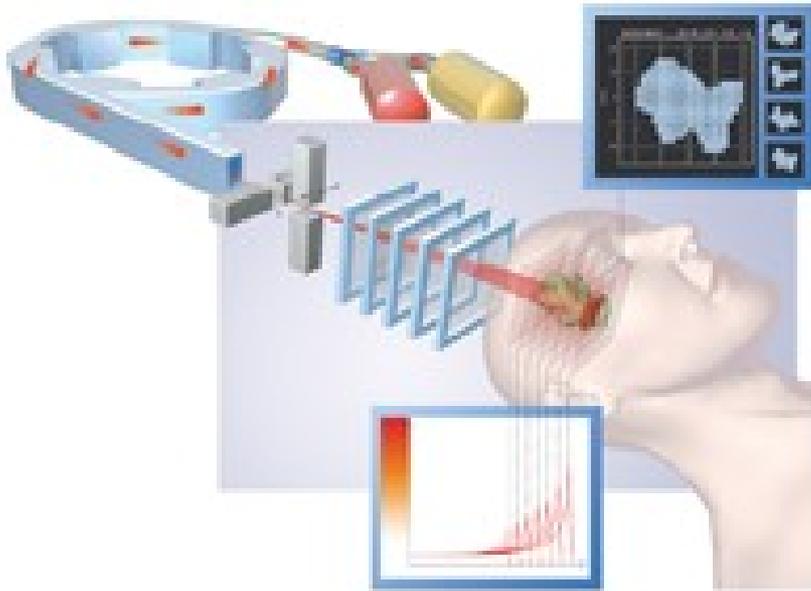
Basato sulla tecnica
di “Chirped Pulse
Amplification”
Premio Nobel 2018
(Donna Strickland
& Gerard Mourou)



Si può fare?!?

Perché un acceleratore di ioni “da tavolo”?

Un fascio di **ioni** deposita la propria energia nella materia in una regione estremamente più localizzata di raggi **X**, γ o **elettroni**



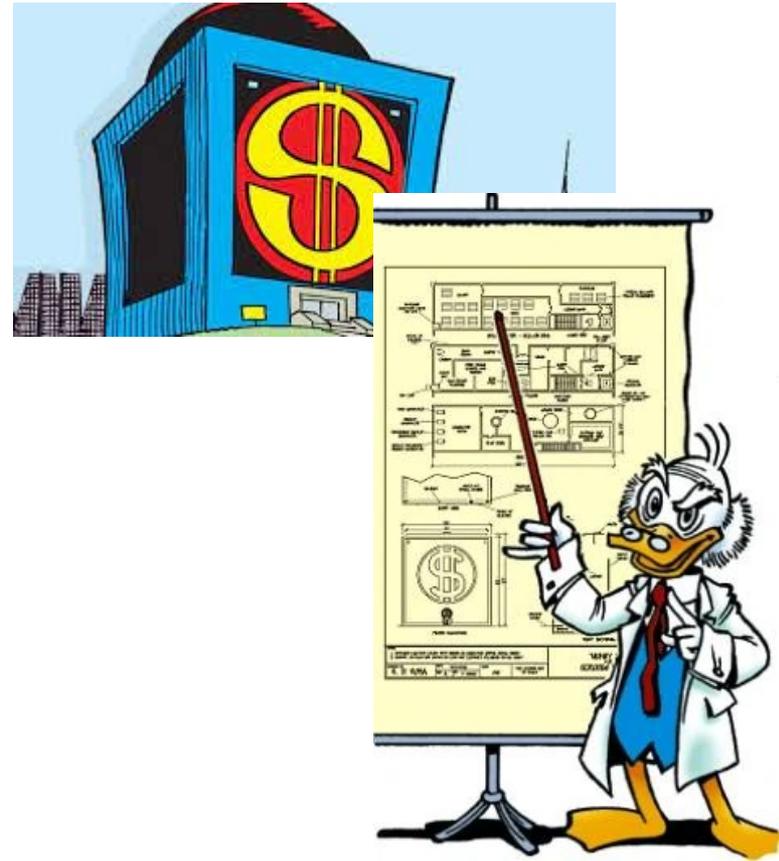
L'**adroterapia** usa fasci di ioni per distruggere tumori non operabili annidati in profondità in organi vitali

E il viaggio verso le stelle... ?

Immaginiamo:

- soldi trovati
- laser supergigante costruito
- tecnologia necessaria sviluppata
- ...

Siamo pronti a partire, ma rimane un **problema**

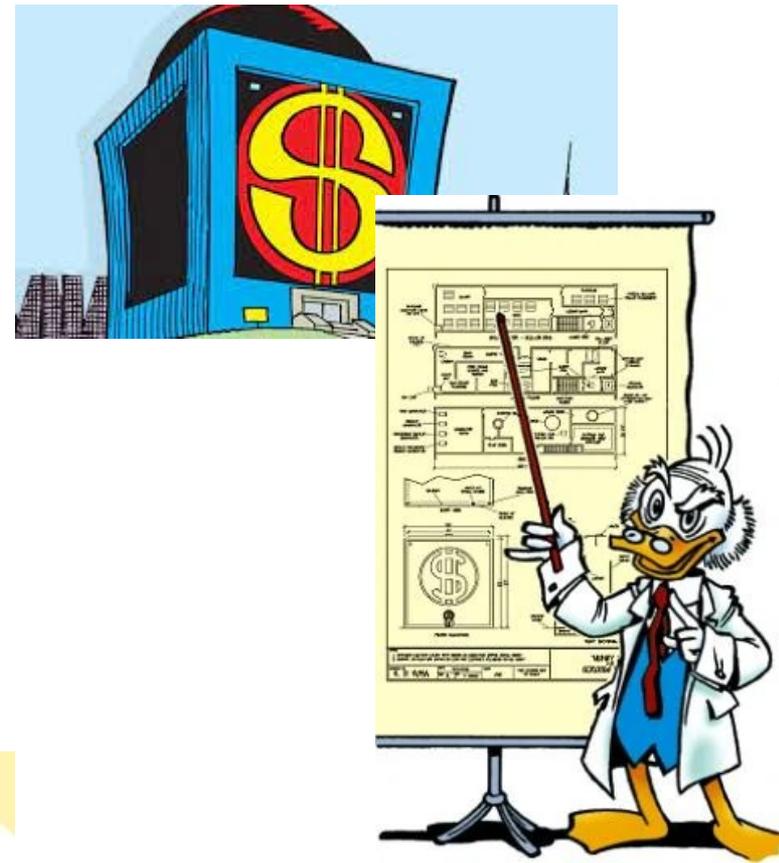


E il viaggio verso le stelle... ?

Immaginiamo:

- soldi trovati
- laser supergigante costruito
- tecnologia necessaria sviluppata
- ...

Siamo pronti a partire, ma rimane un **problema**



... come **fermarsi**
all'arrivo?

... e forse il problema non è solo nostro!

G. Marx (Nature, 1966):

“La propulsione laser dalla Terra non risolverebbe il problema di frenare all'arrivo a destinazione... ma se si fosse stabilito un contatto con esseri intelligenti su un altro pianeta, questi potrebbero frenare la nave partita dalla Terra [usando un altro laser gigante per rallentare la nave]”



da: F. Bandini, “Il mistero dei dischi volanti”
(Giunti & Nardini, 1971; Mursia, 2016)

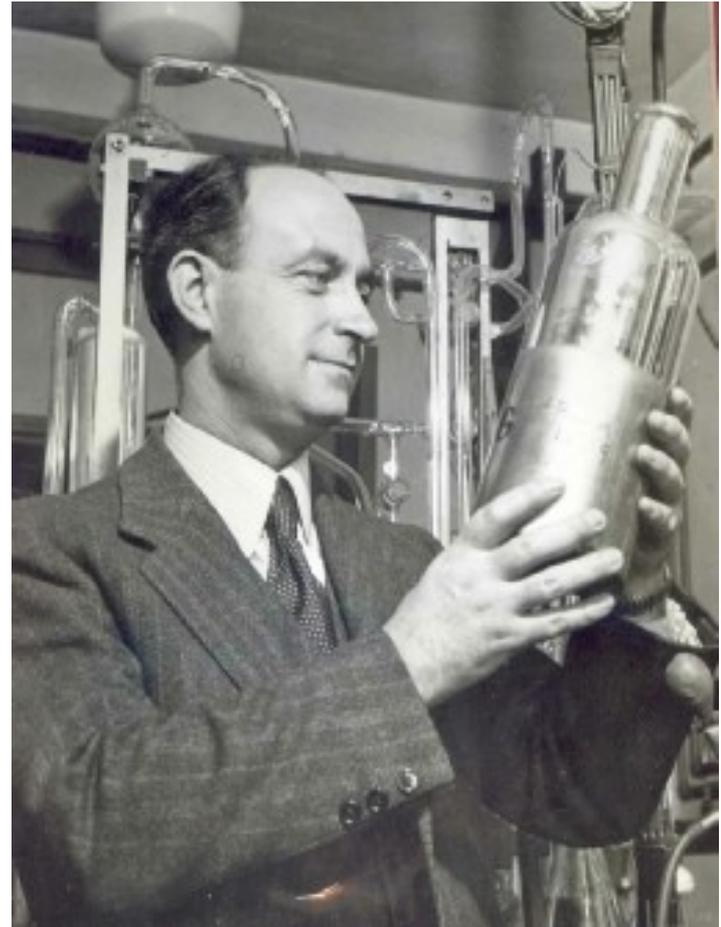
“Nessun pianeta potrebbe essere invaso da visitatori inaspettati dallo spazio esterno, il che può forse spiegare perché non c'è stata sinora alcuna evidenza di tali invasioni”

Questa è una possibile soluzione per il ...

Paradosso di Fermi

“Se l'Universo pullula di alieni, dove sono tutti quanti?”

Enrico Fermi (1950)



Per approfondire:

A. Macchi, “Vele laser, viaggi interstellari e civiltà extraterrestri”,
Sapere n.3 (2020) 30-35

Notte dei
ricercatori, 2018



Perché gli alieni non sono
ancora scesi a Navacchio?



Andrea MACCHI



Siamo almeno al sicuro
da visite indesiderate ...

Grazie per l'attenzione!

andrea.macchi@cnr.it
www.andreamacchi.eu



EXTRA SLIDES



"L'ultimo terrestre", regia di **Gipi** (2012)

Verso la fine dell'800
vari scienziati
(James C. Maxwell,
Adolfo Bartoli,
Piotr N. Lebedev)
confermano
l'esistenza del "vento di luce"



Potete osservarlo anche voi
usando il "mulino a luce" o
radiometro solare di Crookes

<https://youtu.be/Fkbf137nwYA>

Pressione dai quanti di luce (fotoni)

relazione tra quantità di moto p ed
energia E per particelle a massa nulla

$$p = E/c$$

Se N fotoni “rimbalzano” su uno
specchio di area A in un tempo Δt

$$I = NE / (A\Delta t)$$

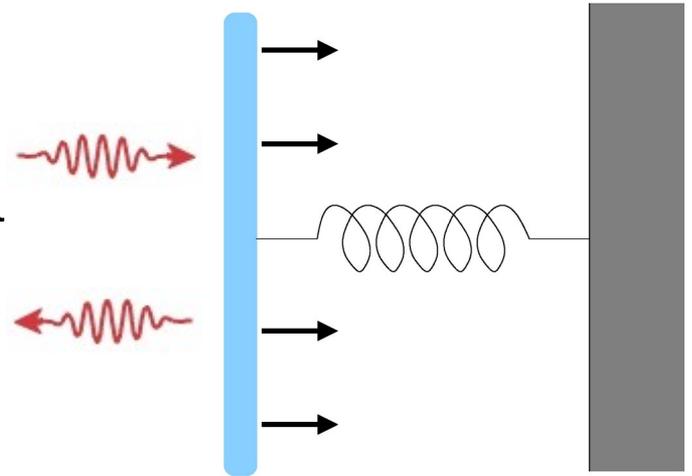
$$\Delta p = N(2p) = 2NE / c$$

forza risultante:

$$F = \Delta p / \Delta t = 2(NE / c) / \Delta t$$

pressione:

$$P = F/A = 2NE / (A\Delta t c) = 2I / c$$



Albert Einstein, 1905



Efficienza della vela a luce (*light sail*)

relazione tra frequenza ν (colore) della luce
e energia E del fotone

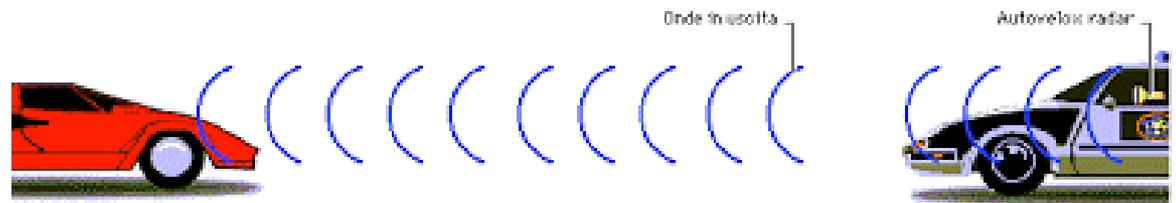
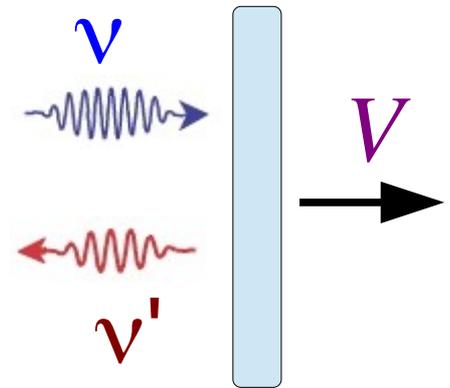
$$E = h\nu$$

effetto Doppler (“spostamento verso il rosso”)

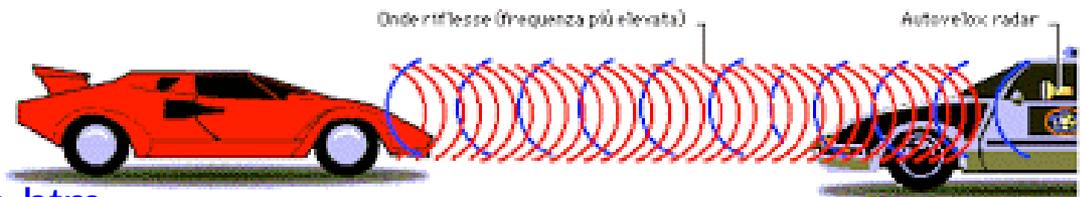
nella riflessione da vela in moto con velocità V

$$\nu' = \nu(1 - V/c) / (1 + V/c)$$

per $V \rightarrow c$, $\nu' \rightarrow 0$: tutta l'energia viene ceduta alla vela



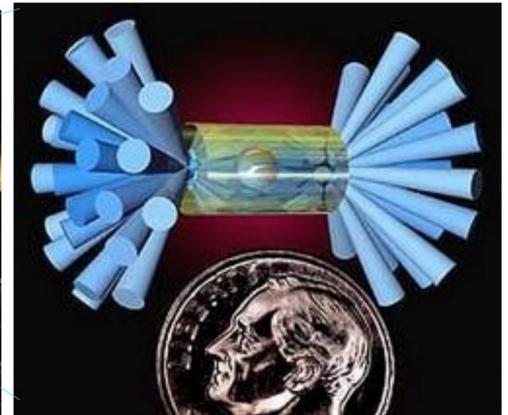
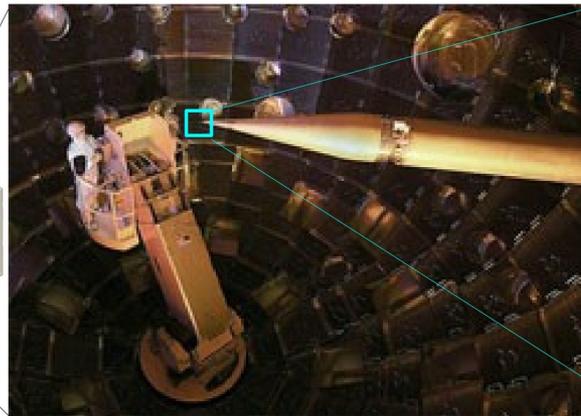
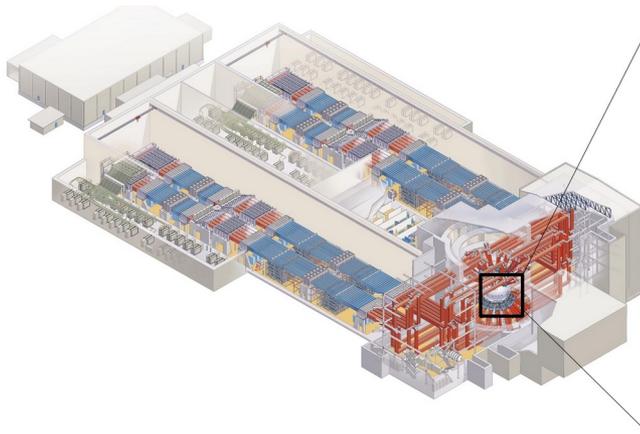
Autovelox Doppler



Fonte:

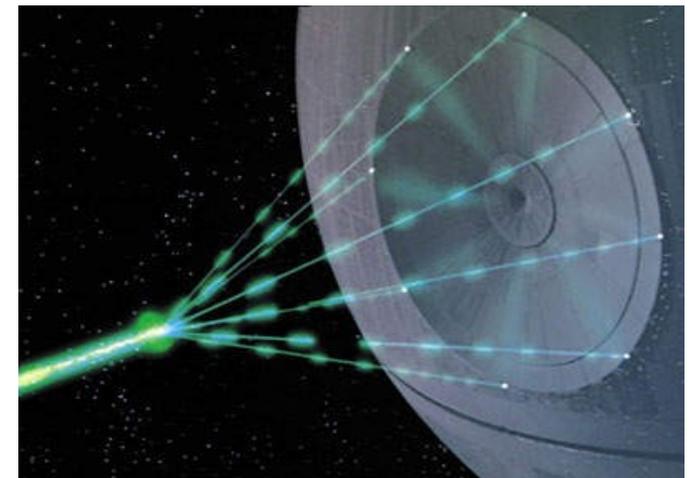
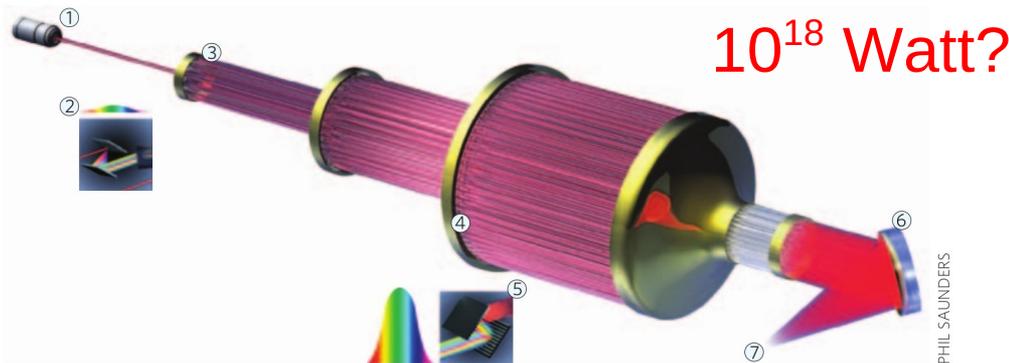
<http://users.libero.it/i3ltd/prova/fisica.htm>

Laser superintensivi (impulso ultrabreve: 10^{-8} - 10^{-14} sec)



National Ignition Facility (USA) per fusione nucleare (2012):
 $\approx 10^6$ Joule in $\approx 10^{-9}$ secondi ($\approx 10^{15}$ Watt) , uno sparo al giorno

Idea del laser “multifibra”: sincronizzazione in fase di $\approx 10^3$ fasci

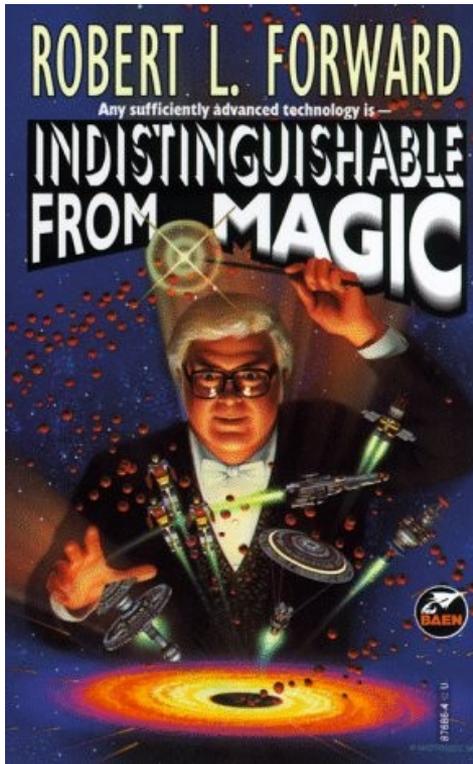


[Mourou et al, Nature Photonics 7 (2013) 258]

Viaggio ϵ -Eridani A/R

R. L. Forward (1984)

J. Spacecraft **21**, 187



“Ogni tecnologia sufficientemente avanzata è indistinguibile dalla magia”

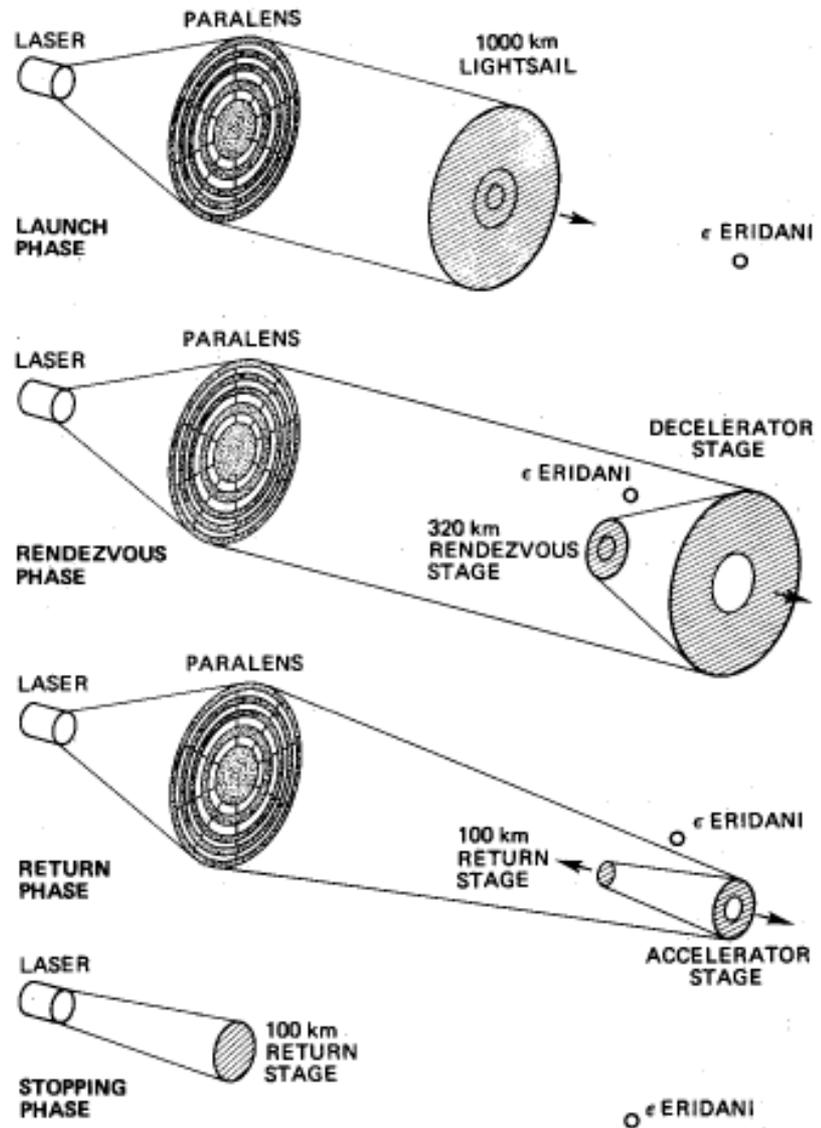
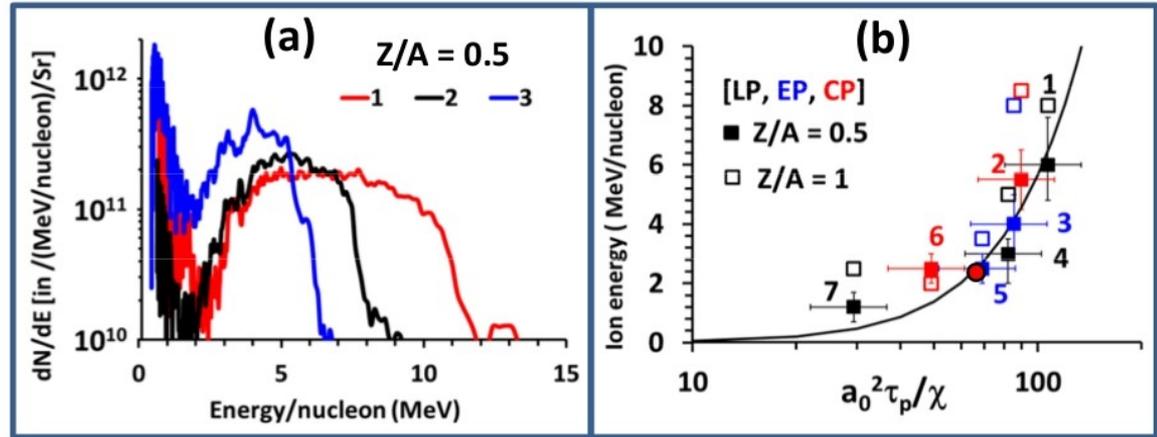


Fig. 5 Propulsion phases of roundtrip interstellar travel using laser-pushed lightsails.

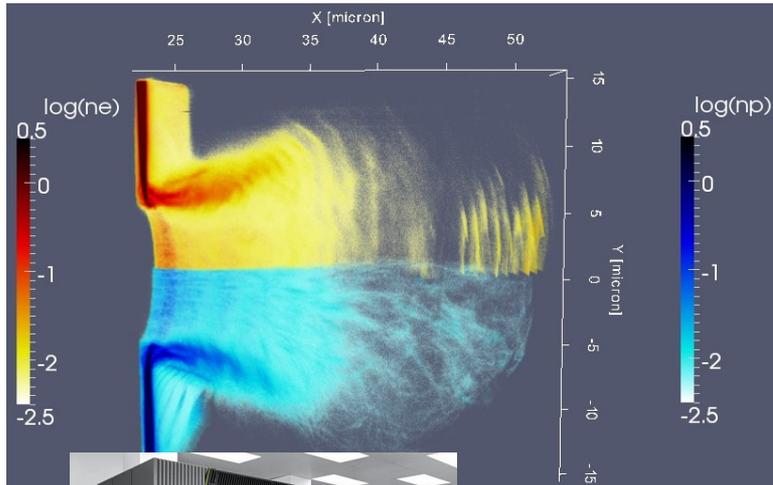
I nostri strumenti



esperimenti



S. Kar et al, Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 185006



simulazioni
numeriche

carta e penna

$$I \rightarrow \quad V = \beta c \quad \frac{d}{dt}(\gamma\beta) = \frac{2I(t-X/c)}{\rho c^2} R(\omega) \frac{1-\beta}{1+\beta}$$

$$\omega \rightarrow \quad \frac{dX}{dt} = \beta c \quad \omega' = \omega \left(\frac{1-\beta}{1+\beta} \right)^{1/2}$$

$$\gamma(t) = \sinh(u) + \frac{1}{4\sinh(u)}$$

$$u = \frac{1}{2} \operatorname{asinh}(3\beta t + 2)$$

I nostri prodotti (carta, carta, carta ...)

PRL 103, 085003 (2009)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
21 AUGUST 2009

“Light Sail” Acceleration Reexamined

Andrea Macchi,^{1,2,*} Silvia Veghini,² and Francesco Pegoraro²

¹CNR/INFN/polyLAB, Pisa, Italy

²Dipartimento di Fisica “Enrico Fermi,” Università di Pisa, Largo Bruno Pontecorvo 3, I-56127 Pisa, Italy

(Received 13 May 2009; published 18 August 2009)

APPLIED PHYSICS LETTERS 105, 084105 (2014)



High energy gain in three-dimensional simulations of light sail acceleration

A. Sgattoni,^{1,2,a)} S. Sinigardi,^{2,3,4} and A. Macchi^{2,5}

¹Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano, Milano, Italy

²CNR, Istituto Nazionale di Ottica, u.o.s. “Adriano Gozzini,” Pisa, Italy

³Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna, Bologna, Italy

⁴INFN sezione di Bologna, Bologna, Italy

⁵Dipartimento di Fisica “Enrico Fermi,” Università di Pisa, Pisa, Italy

REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 85, APRIL–JUNE 2013

Ion acceleration by superintense laser-plasma interaction

Andrea Macchi[†]

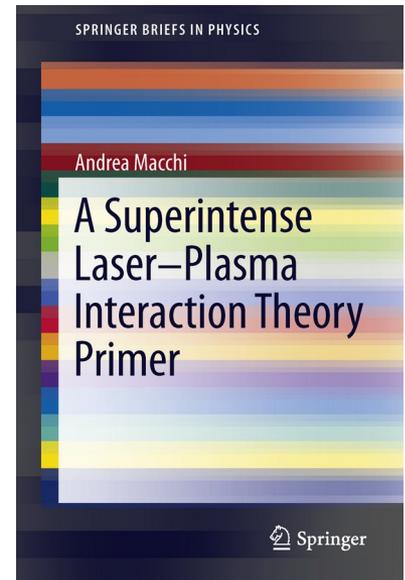
Istituto Nazionale di Ottica, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR/INO),
U.O.S. “Adriano Gozzini,” Pisa, Italy,
and Department of Physics “Enrico Fermi,” University of Pisa,
Largo Bruno Pontecorvo 3, I-56127 Pisa, Italy

Marco Borghesi[†]

Centre for Plasma Physics, The Queen’s University of Belfast,
BT7 1NN Belfast, United Kingdom
and Institute of Physics of the ASCR, ELI-Beamlines Project,
Na Slovance 2, 18221 Prague, Czech Republic

Matteo Passoni[†]

Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano, Via Ponzio 34/3, I-20133 Milan, Italy



High Power Laser Science and Engineering, (2014), Vol. 2, e10, 6 pages.

© Author(s) 2014. The online version of this article is published within an Open Access environment subject to the Creative Commons Attribution licence <<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0>>.

doi:10.1017/hpl.2014.13

Theory of light sail acceleration by intense lasers: an overview

Andrea Macchi

National Institute of Optics, National Research Council (CNR/INO), Research Unit “Adriano Gozzini”,
Department of Physics “Enrico Fermi”, University of Pisa, Largo Bruno Pontecorvo 3, I-56127 Pisa, Italy

IOP PUBLISHING

PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED FUSION

Plasma Phys. Control. Fusion 50 (2008) 124033 (9pp)

doi:10.1088/0741-3335/50/12/124033

Radiation pressure acceleration by ultraintense laser pulses

Tatiana V Liseykina^{1,2}, Marco Borghesi³, Andrea Macchi^{3,4,5} and Sara Tuveri⁵

¹ Max Planck Institute for Nuclear Physics, Heidelberg, Germany

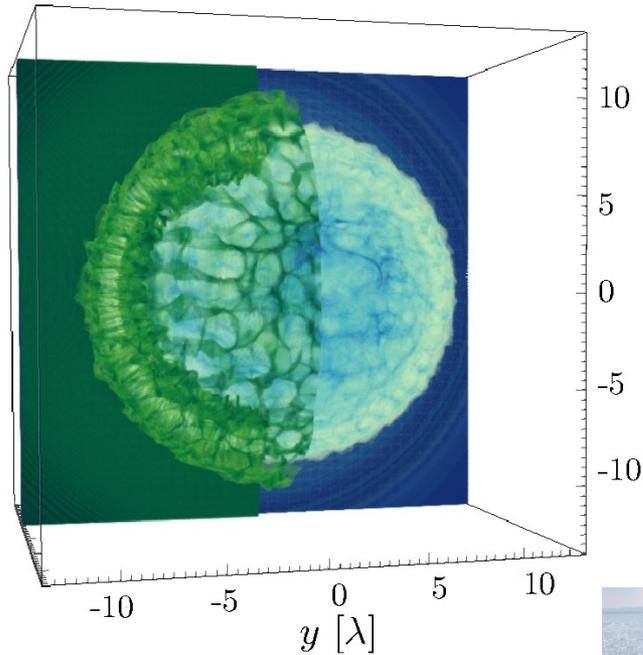
² Institute of Computational Technologies SD RAS, Novosibirsk, Russia

³ School of Mathematics and Physics, the Queen’s University of Belfast, Belfast, UK

⁴ polyLab, CNR-INFN, Pisa, Italy

⁵ Dipartimento di Fisica “Enrico Fermi”, Università di Pisa, Pisa, Italy

Un problema solo fra tanti ...



“Rottura” della vela a causa dell'instabilità di Rayleigh-Taylor con formazione di strutture esagonali

