



3. Pressione della luce in azione: pinzette ottiche, raffreddamento di atomi, e acceleratori laser

Relatore:

Andrea Macchi
(CNR/INO, Pisa)

Evento:

Corso di formazione -
Fondazione

“I Lincei per la Scuola”
Scuola Normale Superiore,
Pisa, 27 Marzo 2024

A Proposito del Sistema Internazionale MKSA ...

Giovanni Giorgi (fisico)

(Lucca, 27 novembre 1871 –
Castiglioncello, 19 agosto 1950)

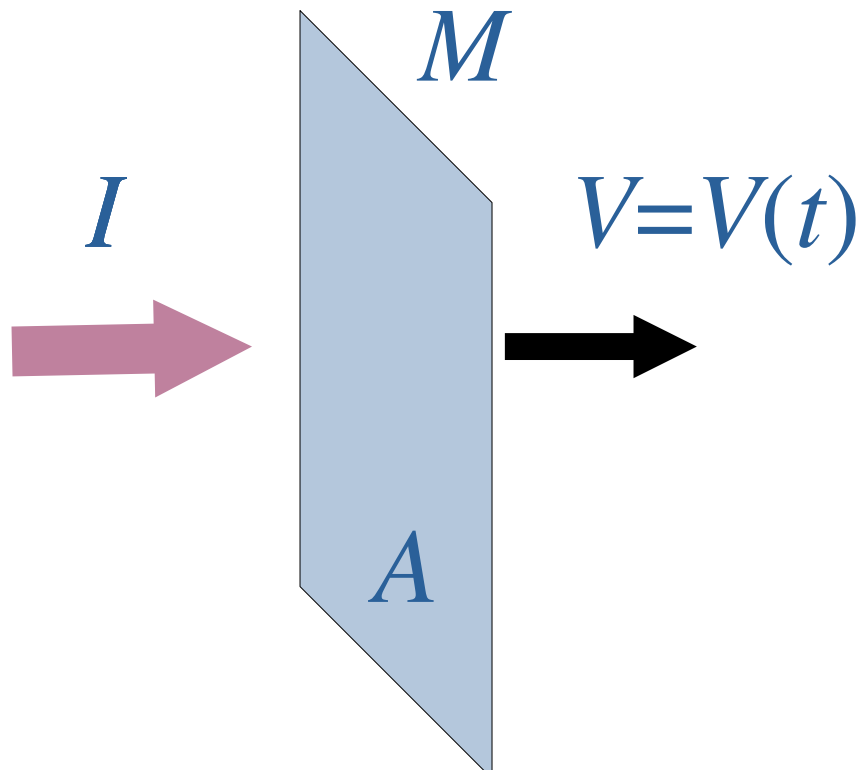
“Giorgi venne assunto in un concorso [all’Università di Cagliari] a cui partecipò Enrico Fermi, al quale venne preferito dalla commissione ...”



(Da Wikipedia)

“Nel 1935 fu adottato il "sistema Giorgi", noto anche con la sigla $MKS\Omega$, perché fu scelta, come quarta grandezza fondamentale, l'unità di misura della resistenza elettrica, l'ohm (Ω). Il sistema Giorgi è considerato il precursore del **Sistema internazionale di unità di misura (SI) [MKSA]**”

Specchio in Moto Relativistico



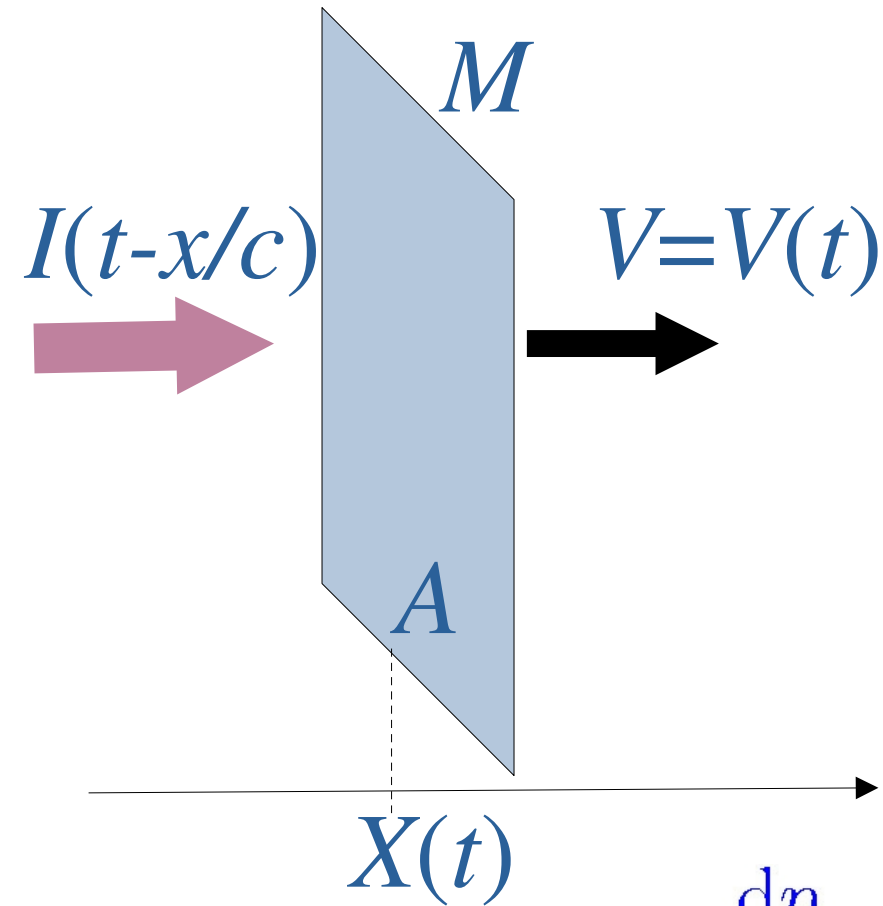
Se V non è piccola rispetto a c

- usare equazione relativistica del moto
- determinare pressione della luce su specchio in movimento
- ...

$$F = P_L A \quad P_L = P_L(I, V) \neq \frac{2I}{c}$$

$$\frac{dp}{dt} = F \quad V = \frac{pc^2}{E} = \frac{pc^2}{(p^2c^2 + M^2c^4)^{1/2}}$$

Specchio in Moto Relativistico a Propulsione Laser



Pressione da un impulso ("pacchetto") di luce propagante a velocità c e con durata finita:

- dilatazione del tempo di interazione (lo specchio "scappa" dall'impulso di luce)

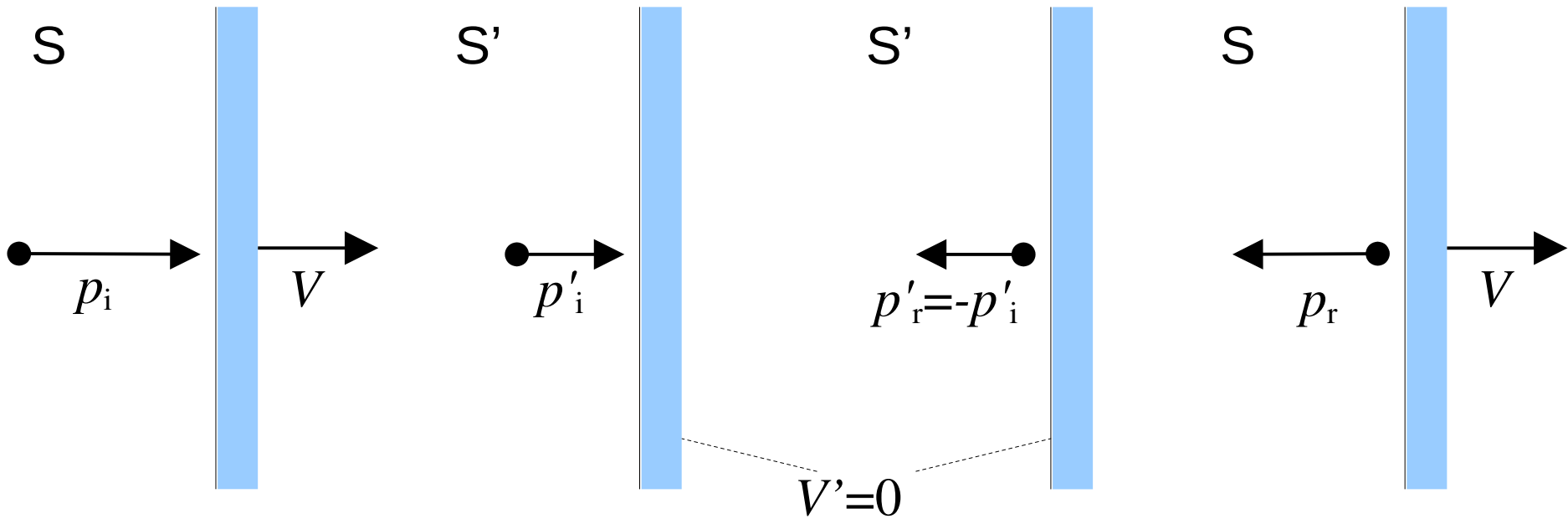
- effetto "ritardo" sulla pressione alla superficie

Equazioni accoppiate:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= F \propto I(t - X(t)/c) \\ \frac{dX}{dt} &= V \end{aligned}$$

Riflessione di Fotoni da Specchio in Moto

Usando le trasformazioni di Lorentz per il quadrivettore $(\omega, \mathbf{k}c)$ con $\omega = kc$ ovvero il q.v. energia-impulso $(E, \mathbf{p}c)$ per i fotoni



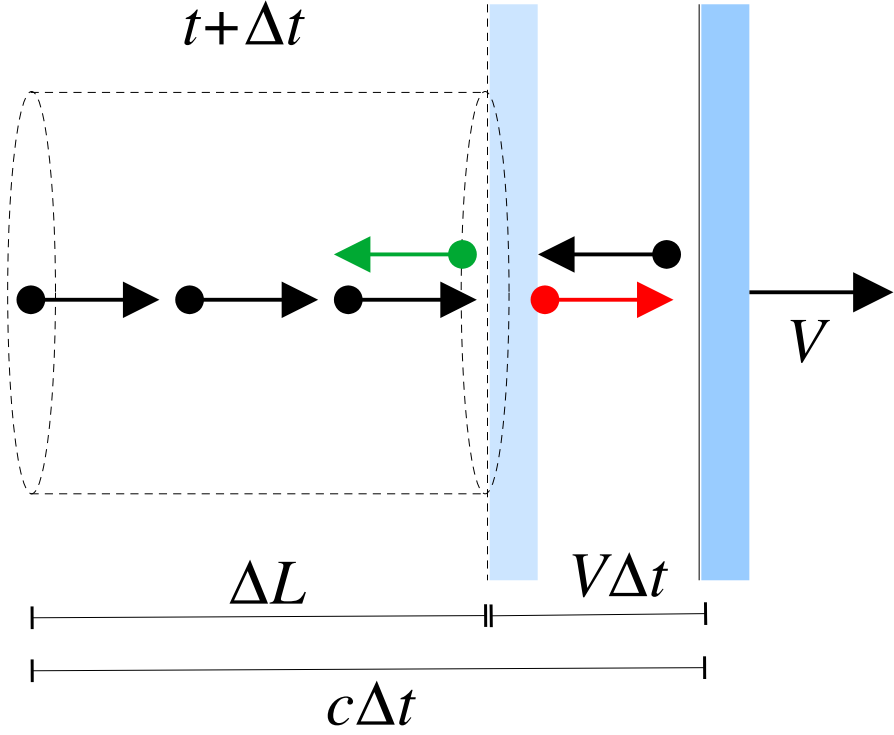
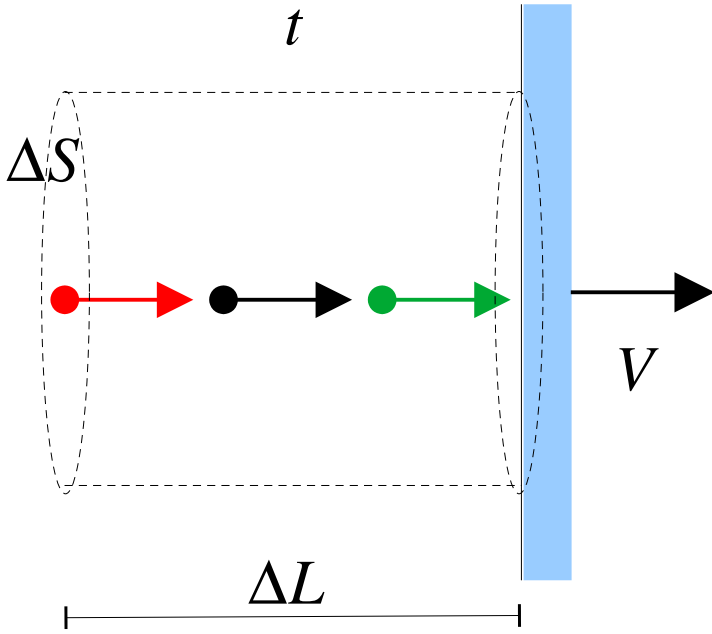
$$\omega'_i = \sqrt{\frac{1 - V/c}{1 + V/c}} \omega_i \quad \omega_r = \sqrt{\frac{1 - V/c}{1 + V/c}} \omega'_r = \frac{1 - V/c}{1 + V/c} \omega_i$$

$$p_i = \frac{\hbar\omega_i}{c} \quad p_r = \frac{\hbar\omega_r}{c} \quad \delta p = p_i - p_r = \frac{2}{1 + V/c} p_i$$

Effetto "di fuga" della parete

I fotoni che si riflettono nell'intervallo Δt sono compresi in un cilindro di lunghezza $\Delta L = c\Delta t - V\Delta t = c\Delta t(1 - V/c) = \Delta L_0(1 - V/c)$

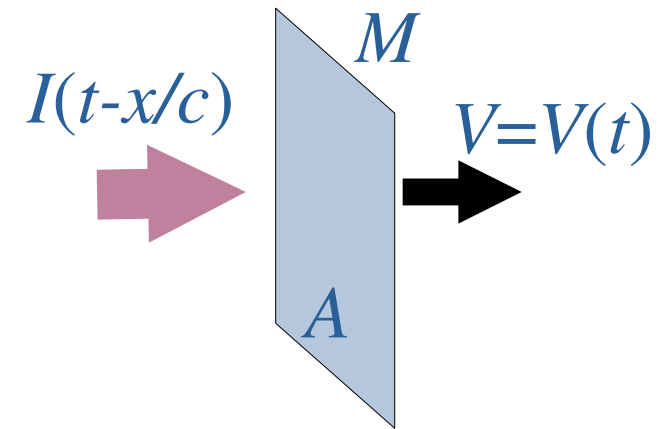
$$\Delta N = n\Delta S\Delta L = \Delta N_0(1 - V/c)$$



$$P = \frac{\Delta p \Delta N}{\Delta t \Delta S} = \frac{\Delta p_0 \Delta N_0}{\Delta t \Delta S} \left(1 - \frac{V}{c}\right)^2$$

$$= P_0 \left(1 - \frac{V}{c}\right)^2 \simeq P_0 \left(1 - 2\frac{V}{c}\right) \quad (V \ll c)$$

"Light Sail" Relativistica



$$\frac{d}{dt}(\gamma(V)V) = \frac{2}{(M/A)c} \frac{1 - V/c}{1 + V/c} I \left(t_r = t - \frac{X(t)}{c} \right)$$

$$\frac{d}{dt}X = V$$

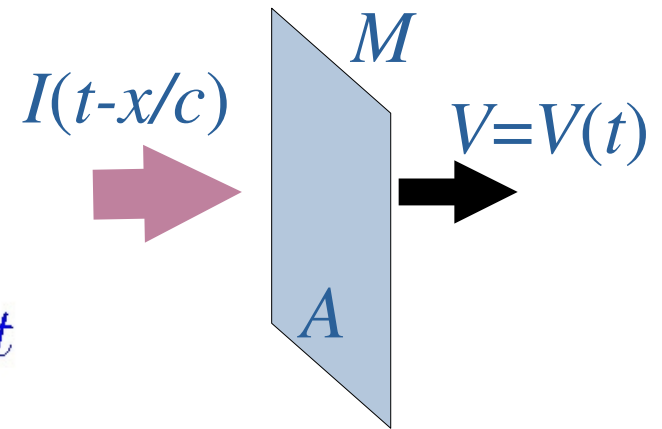
$$V = V(t) \quad X = X(t) \quad \gamma(V) = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \quad p = M\gamma(V)V$$

Soluzione (per un problema fisico simile):

L. D. Landau & E. M. Lifshits, *Teoria dei Campi*

(Editori Riuniti, 1976), cap. IX, par. 78, problema 7.

"Light Sail" Relativistica



$$t_r = t - \frac{X(t)}{c} \quad dt_r = \left(1 - \frac{V}{c}\right) dt$$

$$\frac{d}{dt_r} \left(\frac{1 + V/c}{1 - V/c} \right)^{1/2} = \frac{\gamma}{1 - V/c} \frac{dV}{dt_r} = \frac{2I(t_r)}{(M/A)c}$$

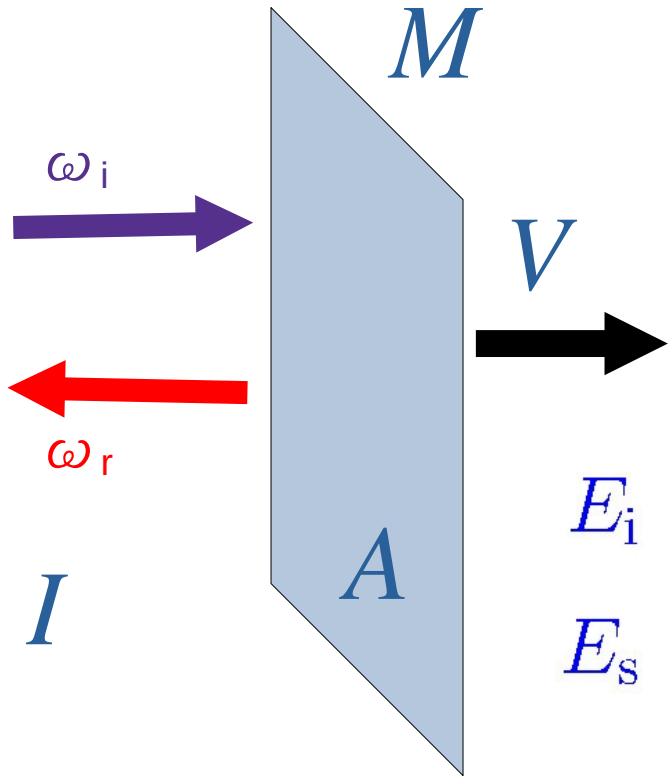
$$\left(\frac{1 + V(t_r)/c}{1 - V(t_r)/c} \right)^{1/2} = \frac{2}{(M/A)c^2} \int_0^{t_r} I(t') dt' \equiv \mathcal{F}(t_r)$$

$$\frac{V(t_r)}{c} = \frac{[1 + \mathcal{F}(t_r)]^2 - 1}{[1 - \mathcal{F}(t_r)]^2 - 1} \quad \frac{V_f}{c} = \frac{[1 + \mathcal{F}(\infty)]^2 - 1}{[1 - \mathcal{F}(\infty)]^2 - 1}$$

Per I costante

$$\gamma(t) = \sinh(u) + \frac{1}{4\sinh(u)} \quad u \equiv \frac{1}{3} \operatorname{arcsinh}(3\Omega t + 2) \quad \Omega \equiv \frac{2I}{(M/A)c^2}$$

Efficienza della Light Sail



Rapporto tra energia dello specchio e energia incidente per N fotoni riflessi alla velocità V

$$E_i = N\hbar\omega_i$$

$$E_s = N\hbar(\omega_r - \omega_i) = N\hbar \left(\frac{2V/c}{1 + V/c} \right) \omega_i$$

$$\eta \equiv \frac{E_s}{E_i} = \frac{2V/c}{1 + V/c} \quad \lim_{V \rightarrow c} \eta = 1$$

L'energia ceduta da ogni fotone aumenta con V
“Motore perfetto” nel limite $V \rightarrow c$.

INTERSTELLAR VEHICLE PROPELLED BY TERRESTRIAL LASER BEAM

By PROF. G. MARX

Institute of Theoretical Physics, Roland Eötvös University, Budapest

Was Marx right? or How efficient are laser driven interstellar spacecraft?

J. F. L. Simmons

Department of Physics and Astronomy, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, United Kingdom

C. R. McInnes

Department of Aerospace Engineering, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, United Kingdom

(Received 13 November 1991; accepted 20 February 1992)

The idea of a laser driven space vehicle capable of interinterstellar travel was raised 25 years ago. The original article by Marx [Nature **211**, 22–23 (1966)] presented a relativistic calculation that contained conceptual and numerical errors. Here the inconsistencies of the original article are corrected. Marx's calculations are generalized to the case where the laser is of variable power, and to the interesting case where the laser beam is recycled by means of mirrors. The obstacles to this form of interstellar travel appear insurmountable, but the calculations provide an excellent example of the application of relativistic ideas.

J. F. L. Simmons & C. R. McInnes,
American Journal of Physics **61**, 205 (1992)

Errore Chiama Errore

Errore di **Marx**:
 uso delle leggi di
 conservazione per un
 intervallo temporale dt
ma scordando l'effetto
 di dilatazione dei tempi

A light beam of constant intensity, I , coming from a terrestrial light source, is reflected by it. If the vehicle moves with the speed $c\beta$, the intensity of the reflected light, I' , turns out to be smaller than I . The momentum gained by the vehicle is $c^{-1}f(I+I')dt$, and the energy gained is $f(I-I')dt$ during the time interval dt , and the vehicle is accelerated from the velocity $c\beta$ to $c(\beta + d\beta)$.

The equations expressing momentum and energy conservation are:

$$\frac{I'f}{c^2} c dt + \frac{Mv}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{M(v+dv)}{\sqrt{1-(\beta+d\beta)^2}} - \frac{I'f}{c^2} c dt$$

$$I'f dt + \frac{Mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{Mc^2}{\sqrt{1-(\beta+d\beta)^2}} + I'f dt$$

Equazione **sbagliata** porta per caso allo stesso valore di V_f !

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1 + V/c}{1 - V/c} \right)^{1/2} = \frac{\gamma}{1 - V/c} \frac{dV}{dt} = \frac{2I(t)}{(M/A)c}$$

$$\frac{V(t)}{c} = \frac{[1 + \mathcal{F}(t)]^2 - 1}{[1 - \mathcal{F}(t)]^2 - 1}$$

$$t_r = t - X(t)/c \longrightarrow t$$

Errore Chiama Errore

J. L. Redding

[Nature **213** (1967) 588]:

corregge l'errore di Marx **ma** calcola incorrettamente

l'efficienza η

confrontando energie di laser e vela per lo

stesso intervallo di tempo nel sistema del laboratorio

The correct equations for δE and δp can be found by equating the energy radiated by the transmitter in time δt to the gain in energy of the mirror plus the increase in the incident and reflected radiant energy, allowing for the fact that in the time δt the volume of space occupied by the radiation has increased on account of the motion of the mirror.

One then finds that

$$\delta E = f\{(1 - \beta)I - (1 + \beta)I'\}\delta t \quad (1)$$

and

$$c\delta p = f\{(1 - \beta)I + (1 + \beta)I'\}\delta t \quad (2)$$

$$\eta \equiv \frac{E_s}{E_i} = \frac{2V/c}{1 + V/c}(1 - V/c)$$

$$\max(\eta) = 0.34 \quad V/c = 0.414$$

Attenzione ai Tempi (e ai Ritardi)!

World line: "linea d'universo"

$$t=t(x) \quad x=X(t)$$

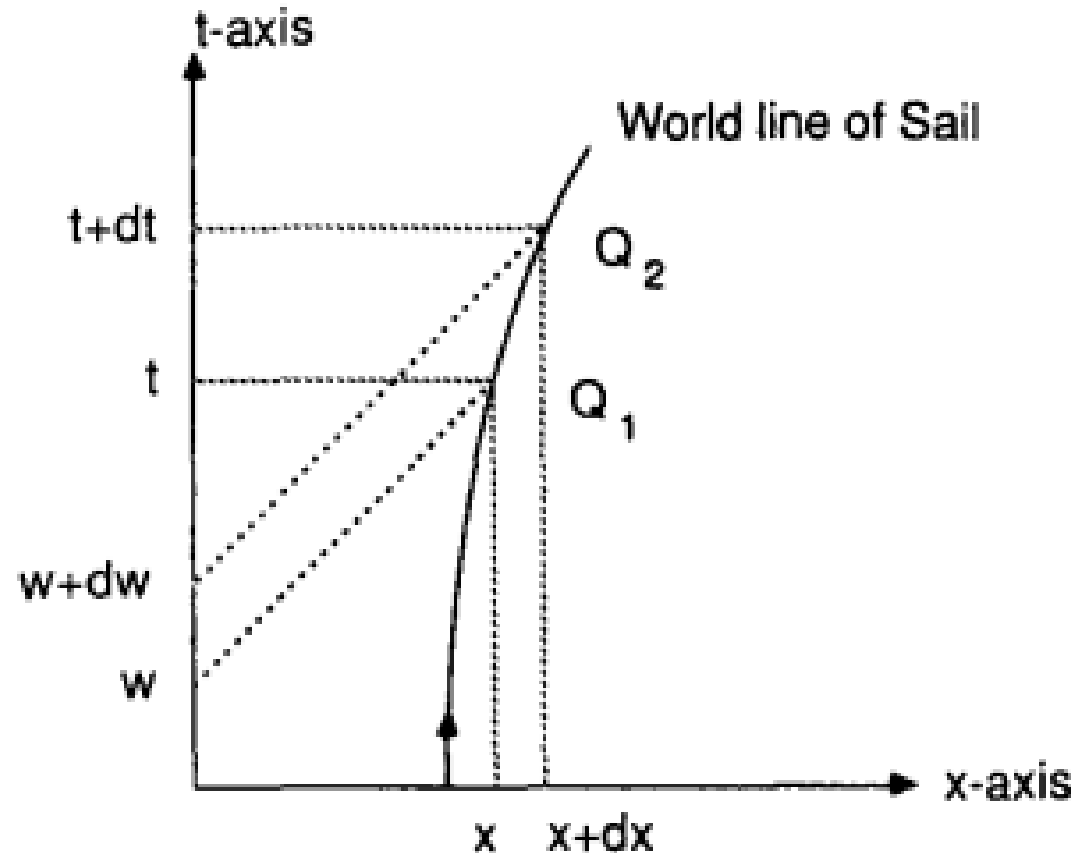
I fotoni che raggiungono la vela tra t e $t+dt$

(“eventi” Q_1 e Q_2)

sono stati emessi tra w e $w+dw$

($w=t_r = t-x/c$)

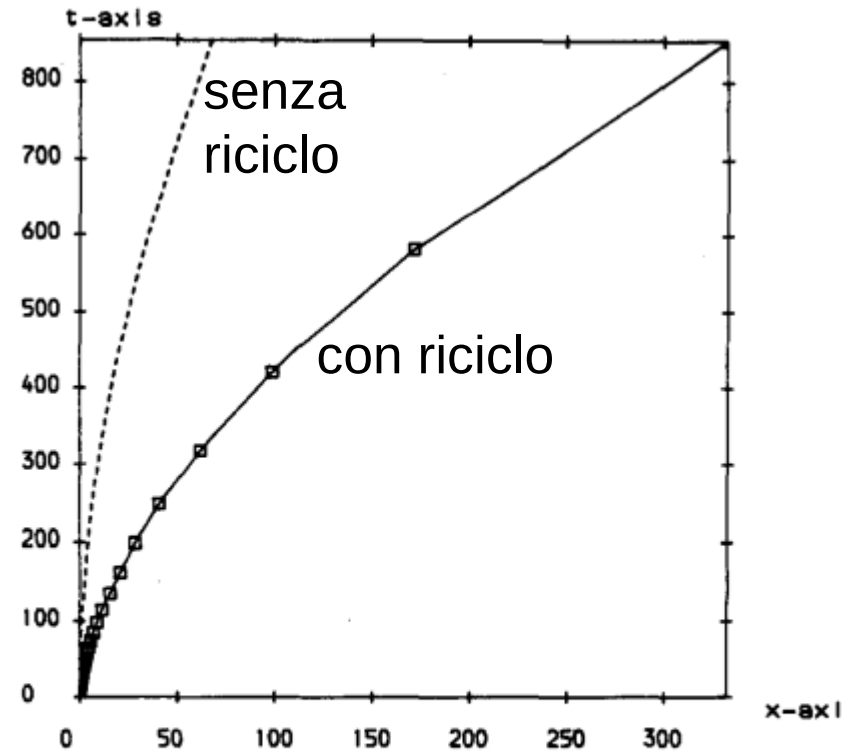
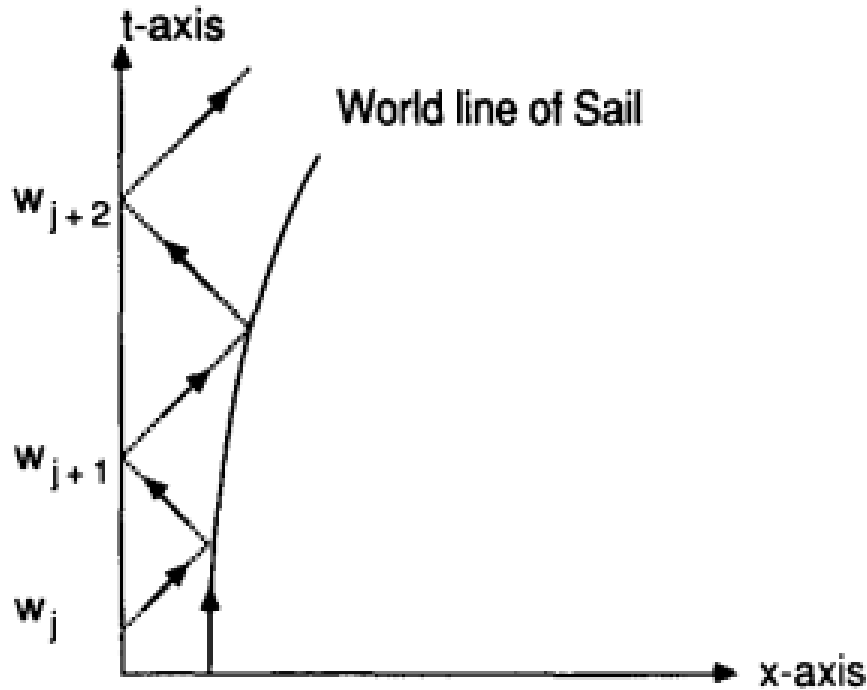
Le energie devono essere confrontate tra questi intervalli



Simmons & McInnes,
Am. J. of Phys. **61**, 205 (1992)

Riciclare l'Energia Riflessa

Uno specchio sulla Terra recupera la riflessione dalla vela

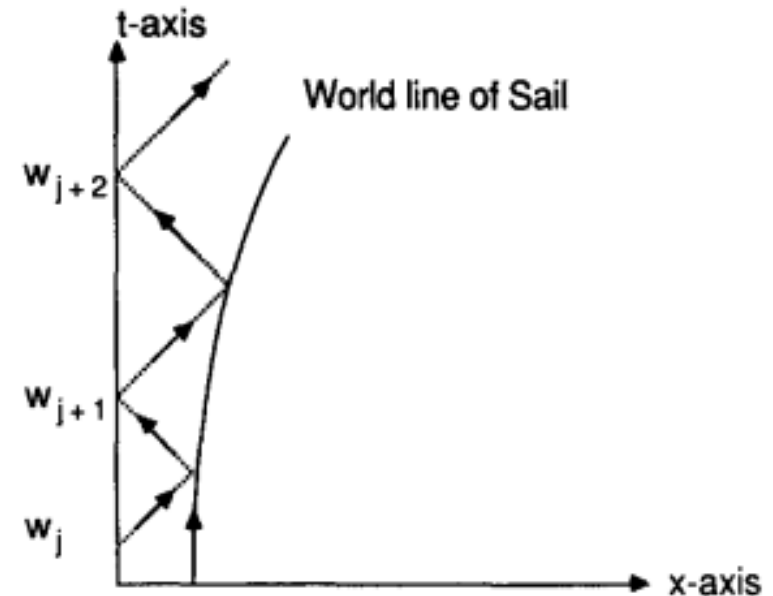


“Risolve” il problema della bassa efficienza iniziale

Fig. 3. World line of a 1000 kg sail driven by a 10^7 GW laser without recycling (dotted line) and with recycling (solid line). Boxes indicate reflections by the sail. Units for both t and x are seconds. The mean acceleration with recycling is about 3000 g.

Riciclare l'Energia Riflessa

Energia giunta
alla vela al
tempo
(ritardato) w_{j+2}
=



$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}(w_{j+2}) &= \mathcal{F}(w_{j+1}) \\
 &+ W_{\text{laser}}[w_{j+2} - w_{j+1}] \\
 &+ R[\mathcal{F}(w_{j+1}) - \mathcal{F}(w_j)]
 \end{aligned}$$

Energia a w_{j+1}

- + energia emessa tra w_{j+2} e w_{j+1}
- + energia riflessa tra w_{j+1} e w_j

Riciclare l'Energia Riflessa

Fibonacci sequence (*)
is everywhere!

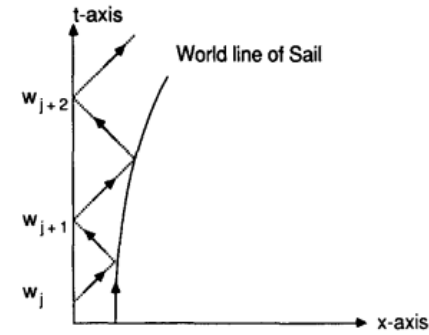


Figure 2 gives a schematic picture on the space-time diagram. The total output at w_{j+2} is simply the total output at w_{j+1} plus the additional output during w_{j+1} , w_{j+2} , and the energy reflected by the earth based mirror. The corresponding difference equations describing the motion of the vehicle are

$$e_{j+2} = e_{j+1} + \frac{e_{j+1} - e_j}{(e_{j+1} + 1)(e_j + 1)} + 2(w_{j+2} - w_{j+1}), \quad (13a)$$

$$w_{j+1} - w_j = 2x_j, \quad (13b)$$

$$x_{j+1} - x_j = \int_{w_j}^{w_{j+1}} \beta(1-\beta)^{-1} dw. \quad (13c)$$

An elegant analytic solution to Eqs. (13) in terms of the Fibonacci sequence can be found for the case where the power is turned off at some time w_0 . Writing $f_j = e_j + 1$ Eq. (13a) becomes

$$f_{j+1} + \frac{1}{f_j} = f_j + \frac{1}{f_{j-1}} = \alpha \text{ for } w_j > w_0, \quad (14)$$

where $\alpha = 4w_0 + 2$. This nonlinear difference equation can be linearized by writing $f_j = G_{j+1}/G_j$ to become

$$G_{j+2} - \alpha G_{j+1} + G_j = 0. \quad (15)$$

This is essentially the difference equation defining Fibonacci-type numbers and is easily solved to yield

$$G_j = A \left(\frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4}}{2} \right)^j + B \left(\frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 4}}{2} \right)^j. \quad (16)$$

Finally the solution for f_j may be written

$$f_j = \frac{2(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4})^{j+1} + 2b(\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 4})^{j+1}}{(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4})^j + b(\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 4})^j}, \quad (17)$$

where $b = B/A = (\sqrt{\alpha + 2} - 1)/(\sqrt{\alpha + 2} + 1)$.

(*) più esattamente una sequenza di **Lucas** ...

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

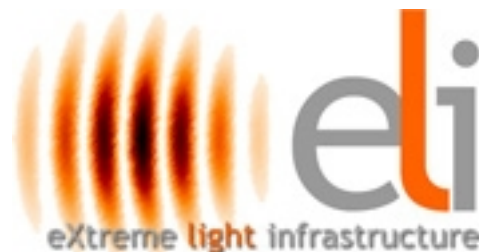
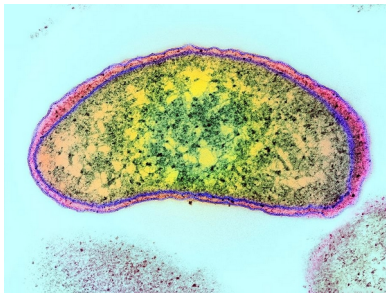
Impulso laser: energia ≈ 10 J
durata ≈ 10 femtosecondi $= 10^{-14}$ sec
focalizzabile su $\approx 10 \mu\text{m}^2 = 10^{-11} \text{m}^2$
 (“volume focale” \sim un batterio)

Intensità ottenibili

$$I \approx 10^{26} \text{ Watt/m}^2$$

$$\rightarrow I/c \approx 3 \times 10^{17} \text{ N/m}^2$$

$$\approx 3 \times 10^{12} \text{ atm}$$



Logo dell'infrastruttura europea sulla luce “estrema”:
pacchetto d'onda di pochi cicli

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

Impulso laser: energia ≈ 10 J
durata ≈ 10 femtosecondi $= 10^{-14}$ sec
focalizzabile su $\approx 10 \mu\text{m}^2 = 10^{-11} \text{m}^2$

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

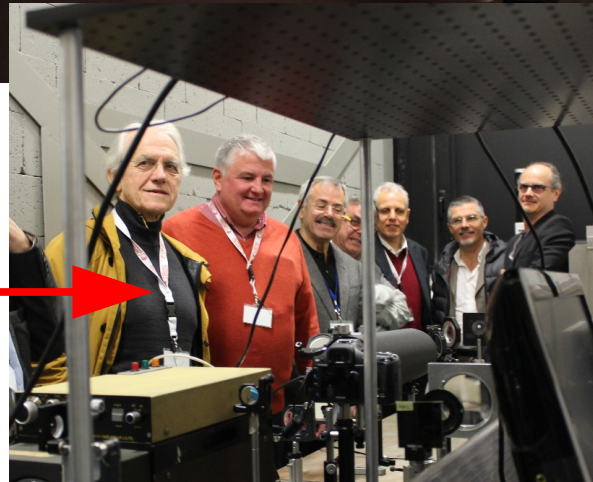
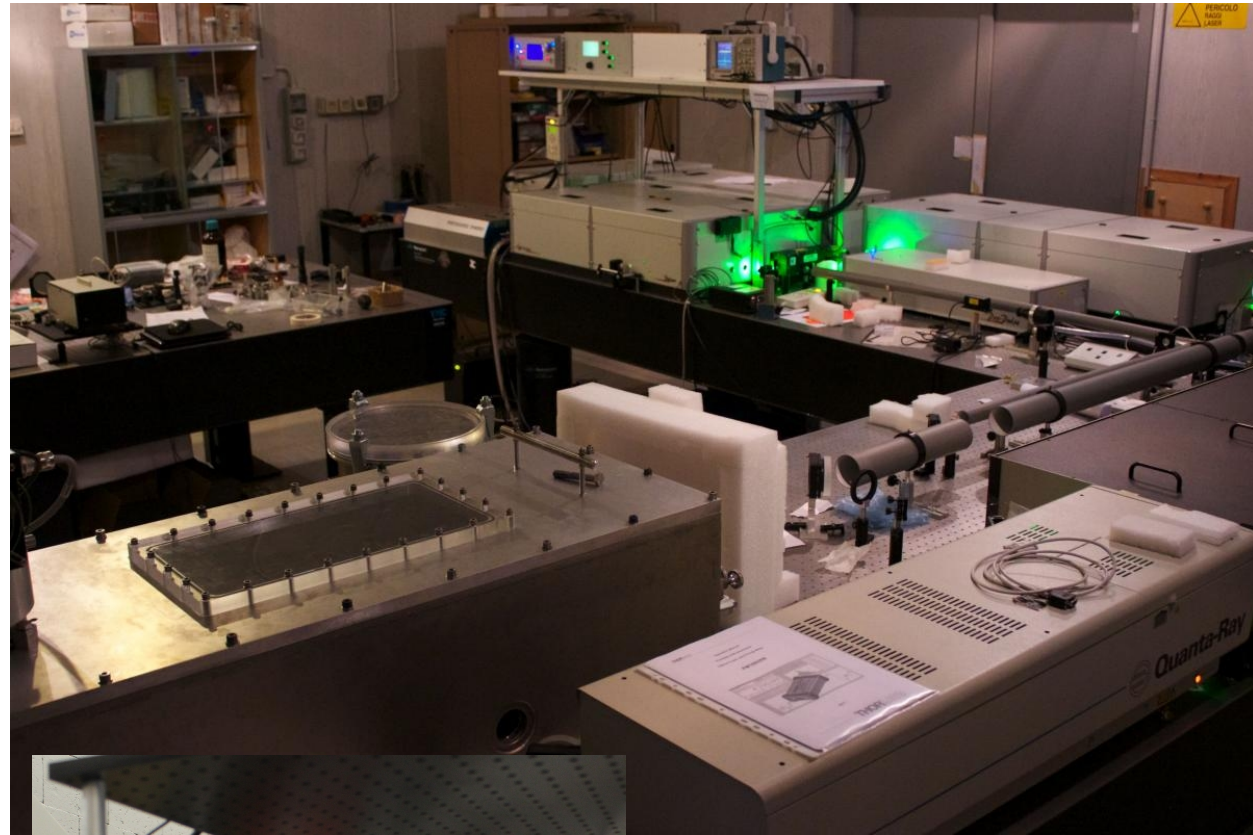


LHC al CERN (Ginevra):
27 km di circonferenza...

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

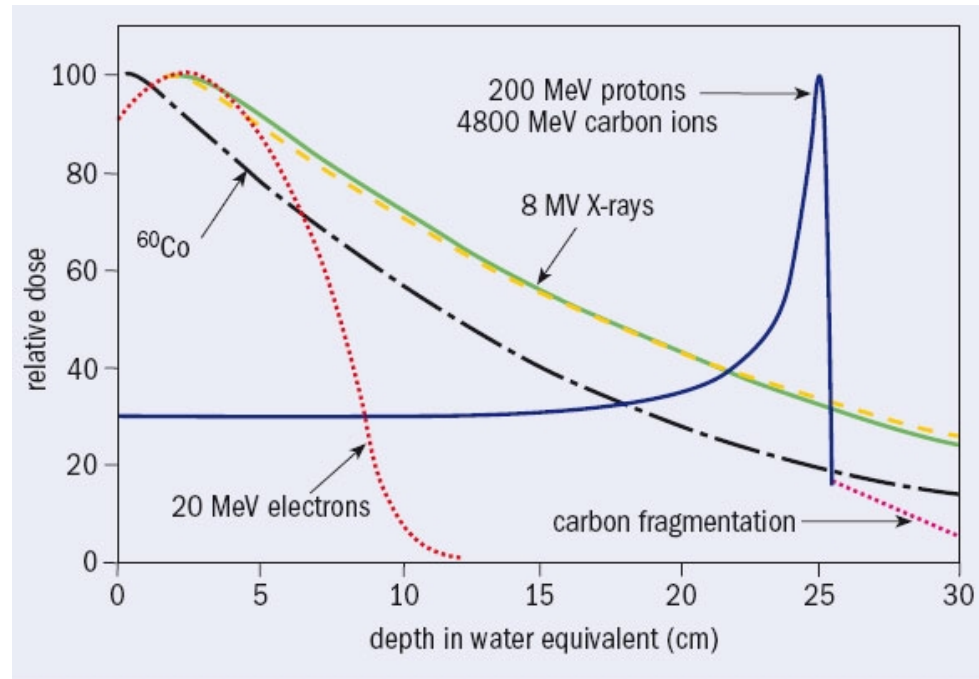
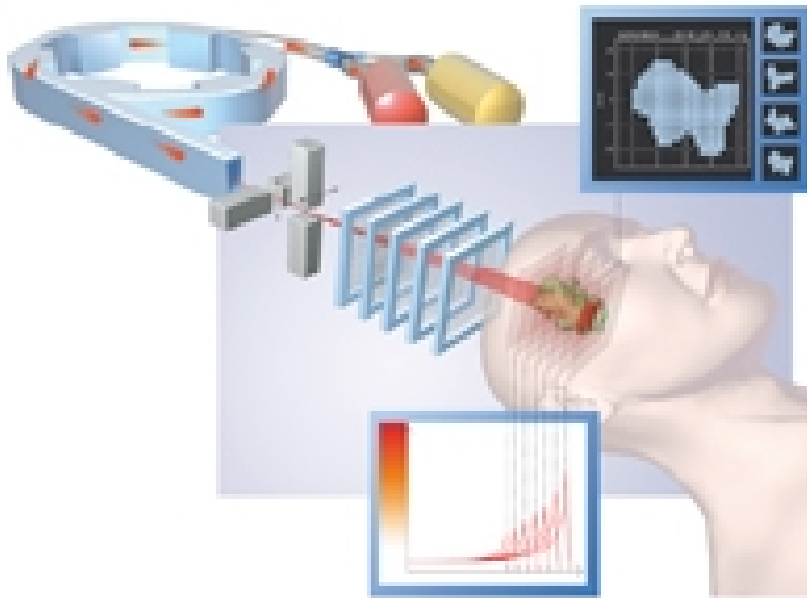
Sistema laser,
laboratorio ILIL,
CNR/INO, Pisa:
qualcosa come
NIF ... in scala
1:(1 milione)

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



Perché un acceleratore laser 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

Perché un acceleratore laser di ioni “da tavolo”?

Ultra-High Dose Rate (FLASH) Radiotherapy: Silver Bullet or Fool's Gold?

Joseph D. Wilson^{1†}, Ester M. Hammond^{1†}, Geoff S. Higgins^{1†} and Kristoffer Petersson^{1,2†}*

¹ Department of Oncology, The Oxford Institute for Radiation Oncology, University of Oxford, Oxford, United Kingdom,

² Radiation Physics, Department of Haematology, Oncology and Radiation Physics, Skåne University Hospital, Lund, Sweden

Studi preliminari suggeriscono vantaggi nell'uso di fasci impulsati di breve durata ed altissima intensità (o dose), ottenibili in particolare con accelerazione laser

Perché un acceleratore laser di ioni “da tavolo”?

INTERNATIONAL JOURNAL OF RADIATION BIOLOGY
2022, VOL. 98, NO. 2, 127-135
<https://doi.org/10.1080/09553002.2022.2009143>



FLASH ultra-high dose rates in radiotherapy: preclinical and radiobiological evidence

Andrea Borghini^a , Cecilia Vecoli^a , Luca Labate^b , Daniele Panetta^a , Maria Grazia Andreassi^a , and Leonida A. Gizzi^b

^a CNR Institute of Clinical Physiology, Pisa, Italy ^b CNR National Institute of Optics, Pisa, Italy

(vedi anche L.A.Gizzi e M.G.Andreassi, *Sapere*, dicembre 2021)

Studi preliminari suggeriscono vantaggi nell'uso di fasci impulsati di breve durata ed altissima intensità (o dose), ottenibili in particolare con accelerazione laser

Work in Progress ...

PHYSICAL REVIEW LETTERS **127**, 194801 (2021)

Featured in Physics

Selective Ion Acceleration by Intense Radiation Pressure

A. McIlvenny^{1,†}, D. Doria^{1,2}, **L. Romagnani**^{1,3}, H. Ahmed^{1,4}, N. Booth⁴, E. J. Ditter⁵, O. C. Ettliger⁵,
G. S. Hicks⁵, P. Martin¹, G. G. Scott⁴, S. D. R. Williamson⁶, **A. Macchi**^{7,8}, P. McKenna⁶, Z. Najmudin⁵, D. Neely^{4,*},
S. Kar¹ and **M. Borghesi**^{1,‡}

¹Centre for Plasma Physics, Queens University Belfast, Belfast BT7 1NN, United Kingdom

²Extreme Light Infrastructure (ELI-NP) and Horia Hulubei National Institute for R & D in Physics and Nuclear Engineering (IFIN-HH), 30 Reactorului Street, 077125 Magurele, Romania

³LULI-CNRS, Ecole Polytechnique, CEA, Universit Paris-Saclay, F-91128 Palaiseau cedex, France

⁴Central Laser Facility, Rutherford Appleton Laboratory, Oxfordshire OX11 0QX, United Kingdom

⁵The John Adams Institute for Accelerator Science, Blackett Laboratory, Imperial College London, London SW7 2BZ, United Kingdom

⁶SUPA, Department of Physics, University of Strathclyde, Glasgow G4 0NG, United Kingdom

⁷Istituto Nazionale di Ottica, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR/INO), research unit Adriano Gozzini, Pisa 56124, Italy

⁸Dipartimento di Fisica Enrico Fermi, Università di Pisa, Pisa 56127, Italy

Physics

A New Trick to Make Short-Pulse Ion Beams

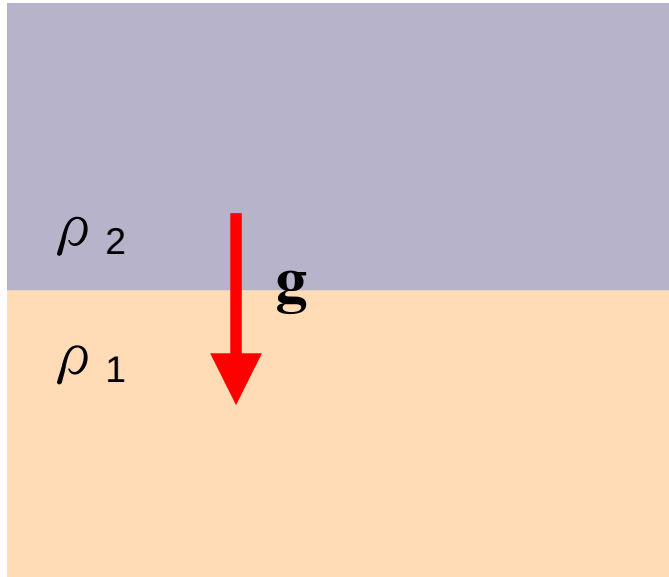
A new laser technique could lead to ultrashort-pulse, high-energy ion beams for medical use.

Mirror

Irish boffins' laser to help beat cancer

... ma con vari problemi ancora da risolvere ... (→)

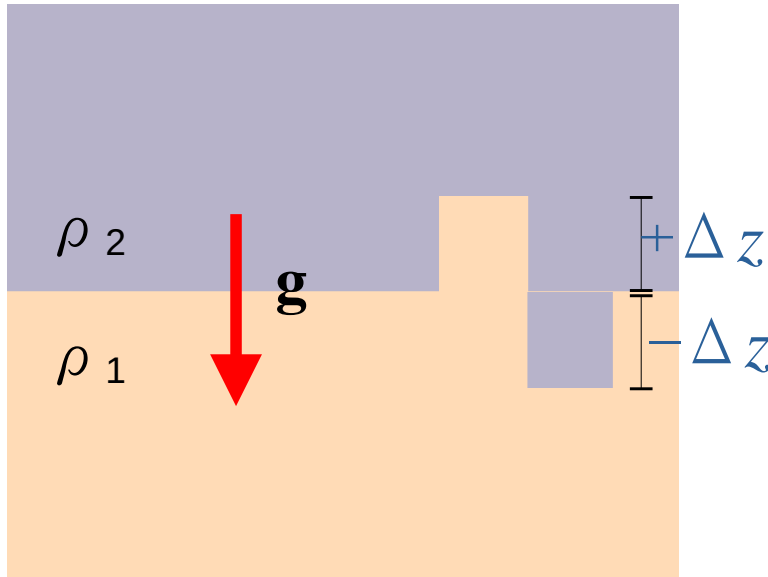
Instabilità di Rayleigh-Taylor



Fluido pesante (2) sopra
fluido leggero (1) nel campo
di gravità g

$$\rho_2 > \rho_1$$

Instabilità di Rayleigh-Taylor



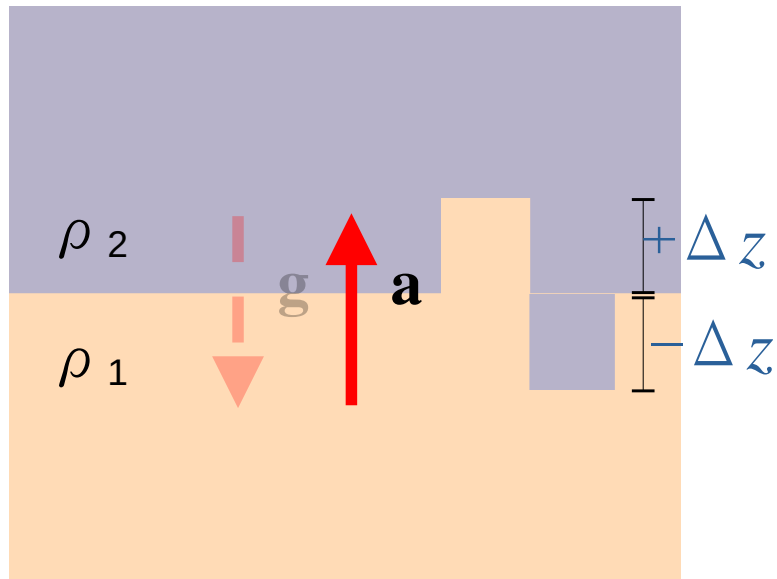
Fluido pesante (2) sopra fluido leggero (1) nel campo di gravità g :

Lo “scambio” di due elementi di fluido diminuisce l’energia: il sistema è **instabile**

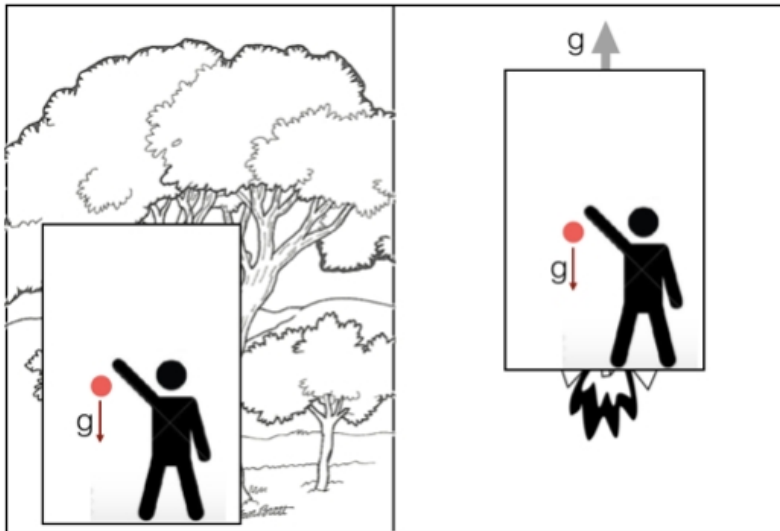
$$\Delta U \propto (\rho_1 - \rho_2)g\Delta z < 0$$



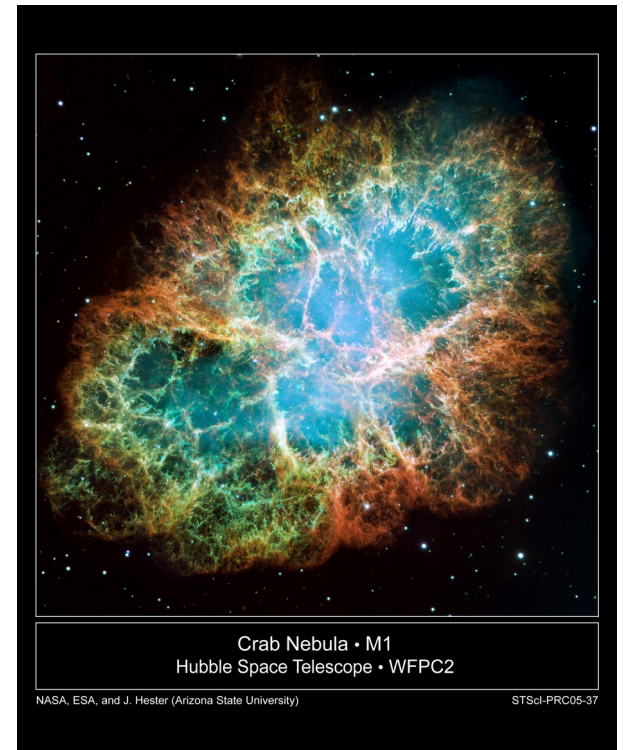
Instabilità di Rayleigh-Taylor



Per il Principio di Equivalenza l'instabilità si sviluppa anche se c'è accelerazione a dal fluido leggero (1) verso il fluido pesante (2)

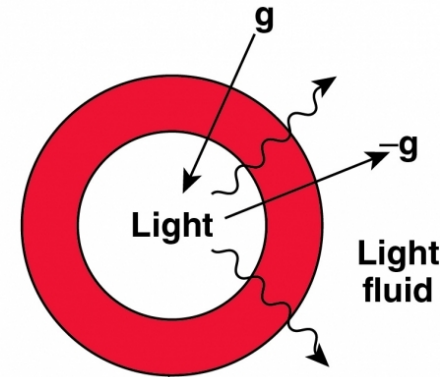
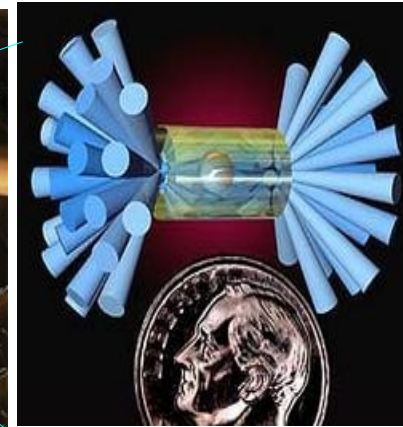
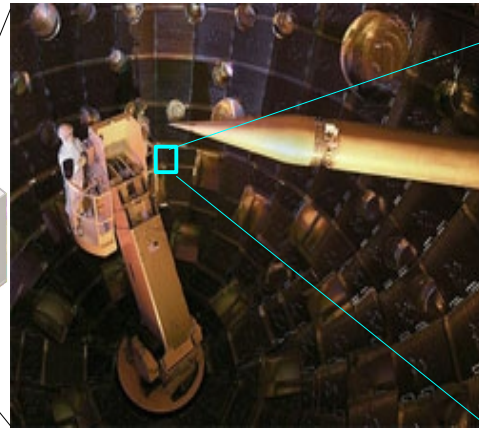
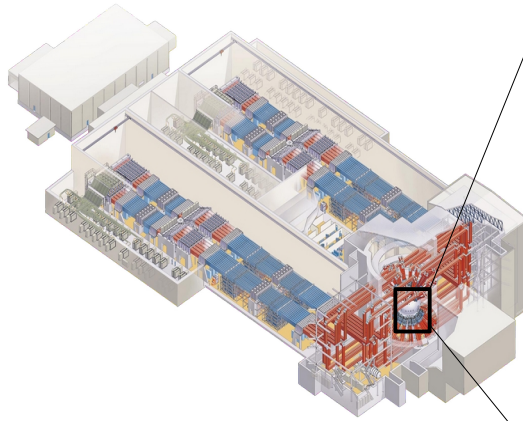


Francesca Ricci, "La Relatività Generale",
www.matematicamente.it



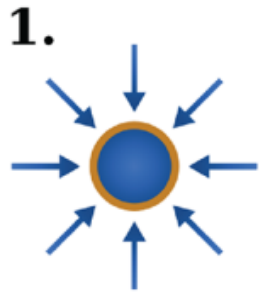
Crab Nebula • M1
Hubble Space Telescope • WFPC2
NASA, ESA, and J. Hester (Arizona State University) STScI-PRC05-37

Instabilità di Rayleigh-Taylor in Fusione Inerziale

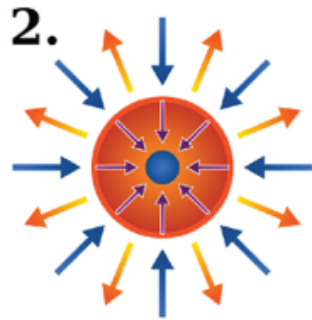


The stages of inertial confinement fusion

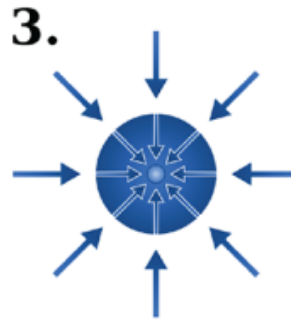
The blue arrows represent radiation; orange is blowoff; purple is inwardly transported thermal energy



1.
Laser beams or laser-produced X-rays rapidly heat the surface of the fusion target, forming a surrounding plasma envelope



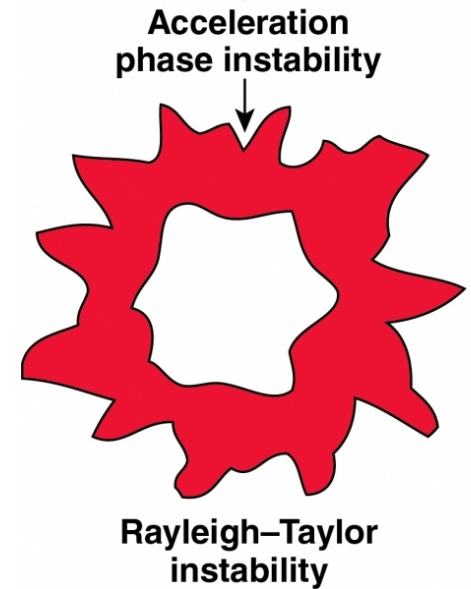
2.
Fuel is compressed by the rocket-like blowoff of the hot surface material



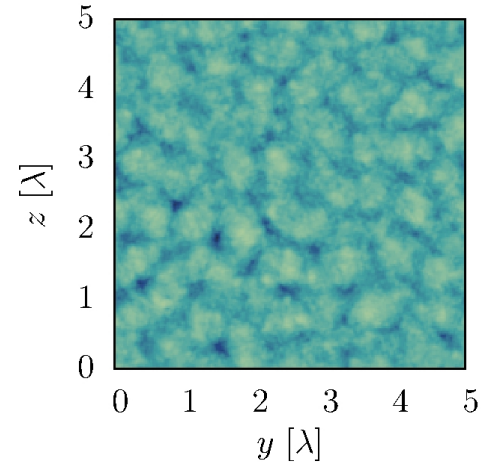
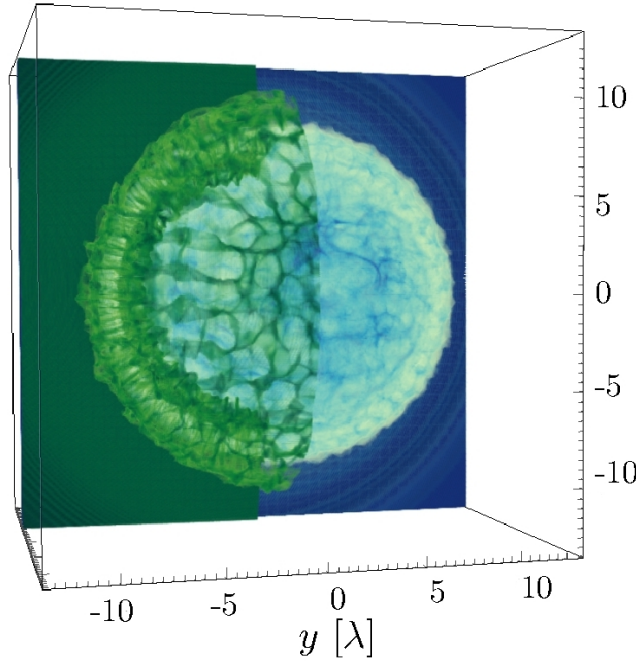
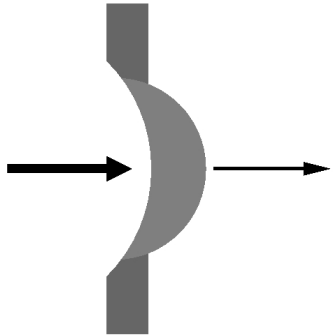
3.
During the final part of the capsule implosion, the fuel core reaches 20 times the density of lead and ignites at 100,000,000 °C



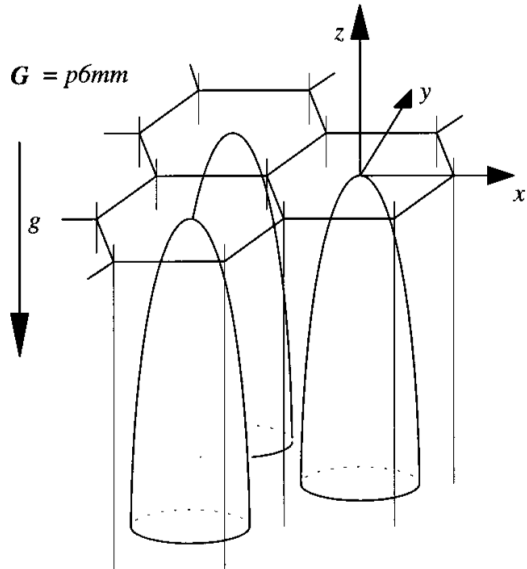
4.
Thermonuclear burn spreads rapidly through the compressed fuel, yielding many times the input energy



Instabilità R-T della *Light Sail* in simulazioni 3D



A. Sgattoni, S. Sinigardi,
L. Fedeli, F. Pegoraro,
A. Macchi,
Physical Review E
91 (2015) 013106



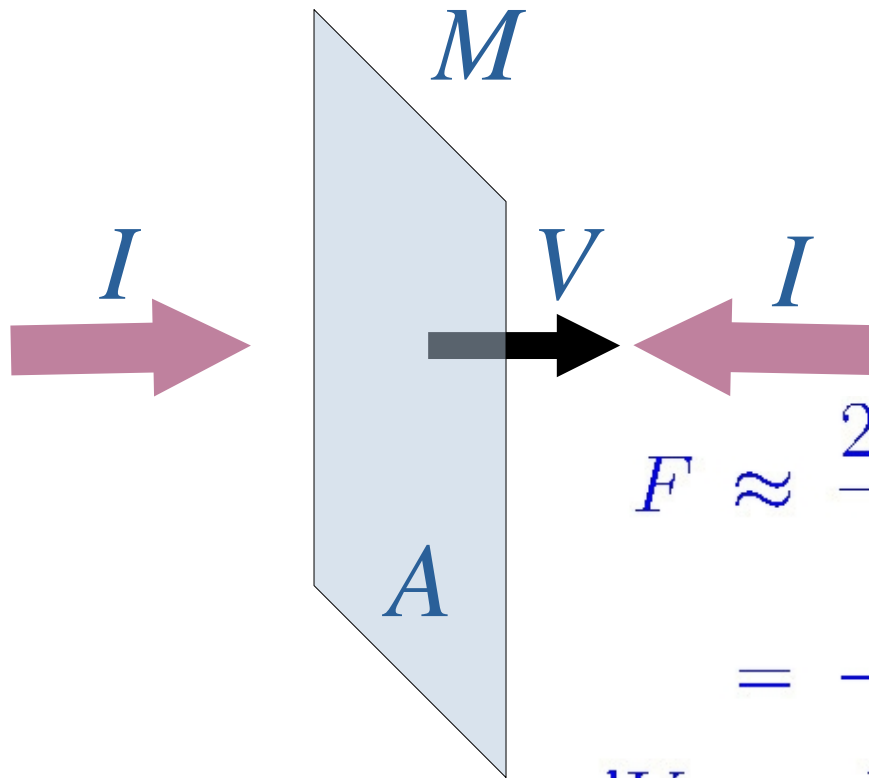
Increspature della vela con formazione di strutture esagonali: un esempio di “Rottura spontanea di simmetria”



S.I.Abarzhi, Physical Review E
59 (1999) 1729

"Raffreddamento Laser" di uno Specchio

Specchio in moto tra due fasci di luce contropropaganti di eguale intensità I

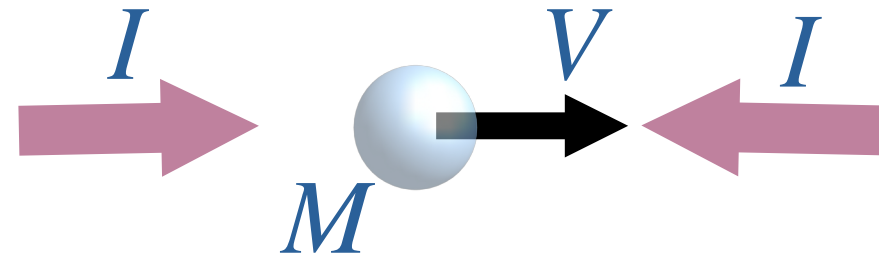


$$F \approx \frac{2IA}{c} \left(1 - \frac{2V}{c}\right) - \frac{2IA}{c} \left(1 + \frac{2V}{c}\right)$$
$$= -\frac{8IA}{c^2} V$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{F}{M} = -\alpha V \quad \alpha = \frac{8IA}{Mc^2}$$
$$V(t) = V(0)e^{-\alpha t}$$

La forza risultante è di tipo "viscoso" e stabilizza lo specchio

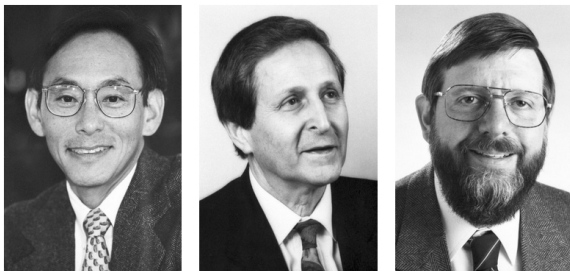
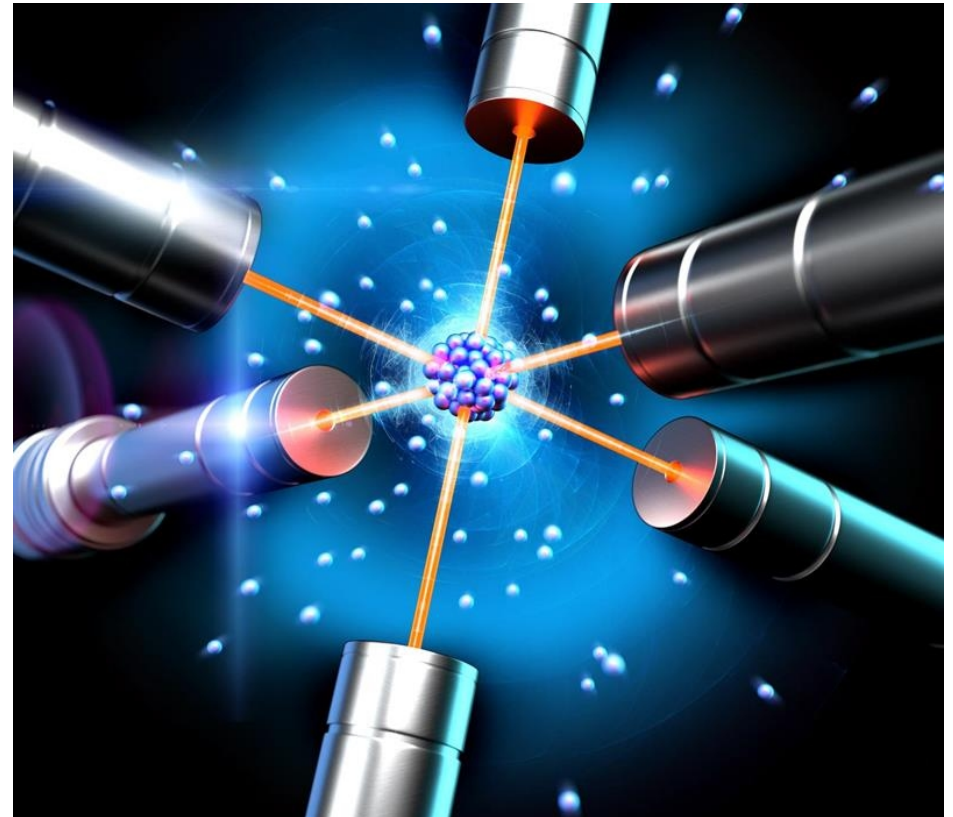
"Raffreddamento Laser" di un Atomo



Raffreddamento di atomi
a temperature prossime
allo zero assoluto

S. Chu, C. Vohen-Tannoudj,
W. Phillips,
Premio Nobel 1997

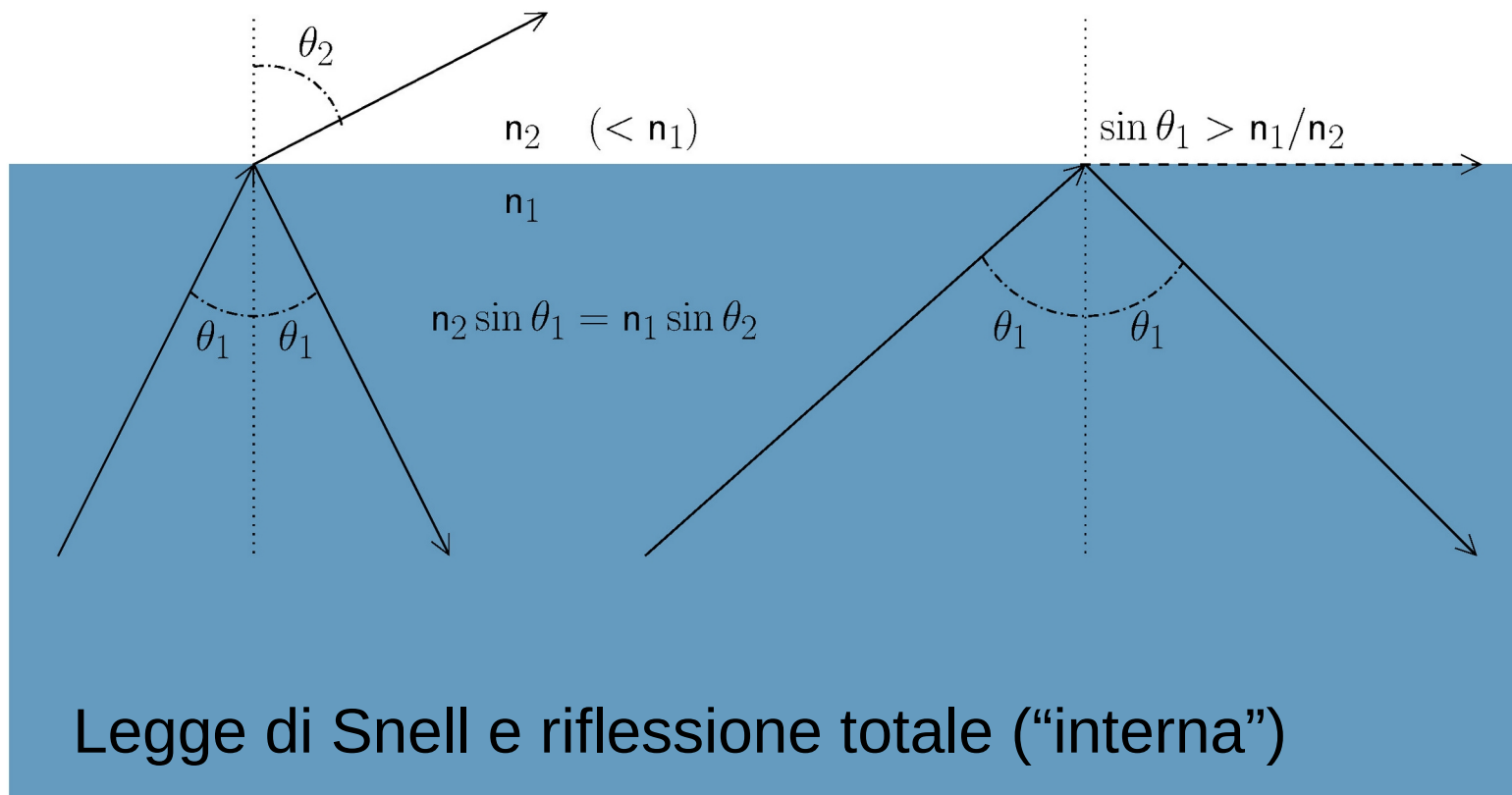
Stesso effetto su una particella
microscopica e sul singolo
atomo; generalizzabile in 3D



Pressione dalla Rifrazione della Luce

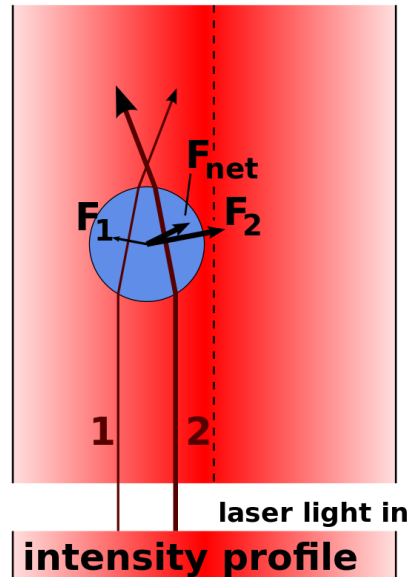
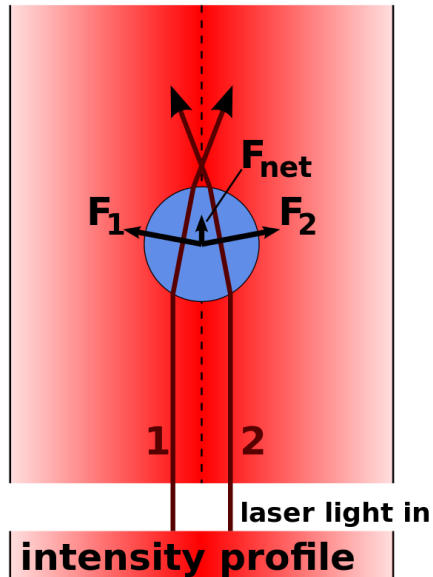
La luce cambia direzione passando tra mezzi con diverso **indice di rifrazione n** e tende a “confinarsi” nei mezzi con n maggiore (esempio: **fibra ottica**)

Il cambio di direzione e intensità dei raggi implica un trasferimento di q.d.m. elettromagnetica al mezzo \rightarrow pressione



Confinamento Ottico di (Sub-)Microparticelle

Per una particella dielettrica in un fascio laser la q.d.m. trasferita dai raggi più intensi genera una forza di richiamo verso l'asse

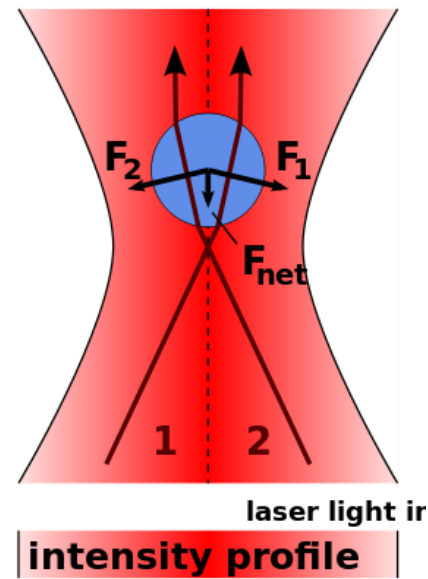
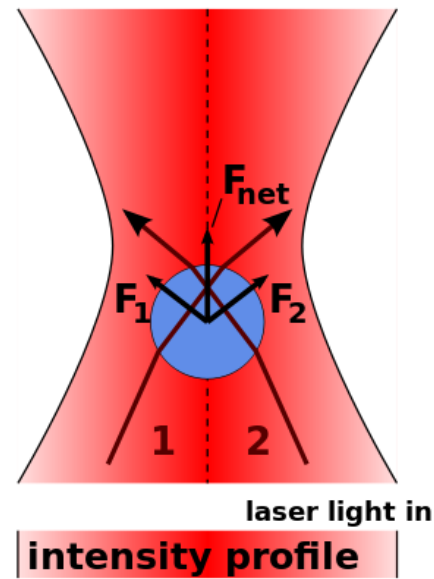
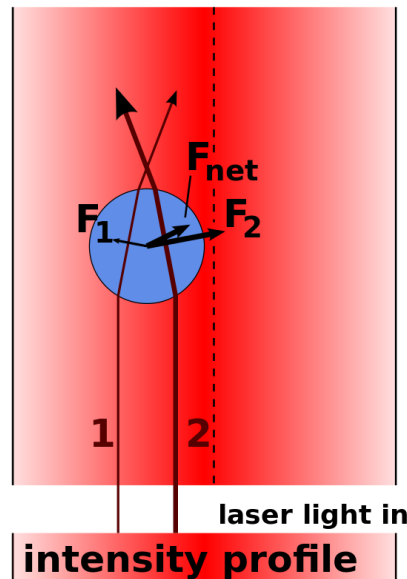
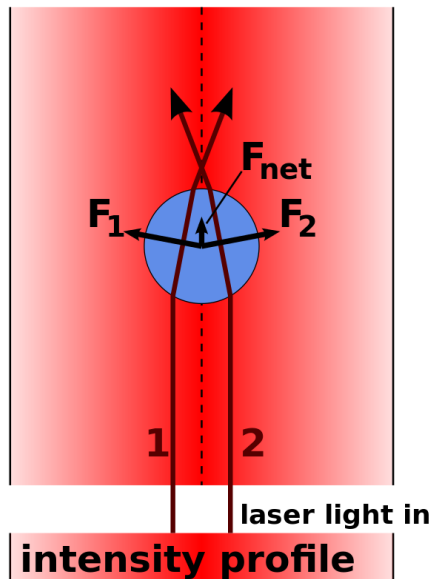


credit: [Roland Koebler](#), wikimedia

Confinamento Ottico di (Sub-)Microparticelle

Per una particella dielettrica in un fascio laser la q.d.m. trasferita dai raggi più intensi genera una forza di richiamo verso l'asse

Focalizzando il fascio laser si genera una forza di richiamo assiale che richiama la particella verso il fuoco

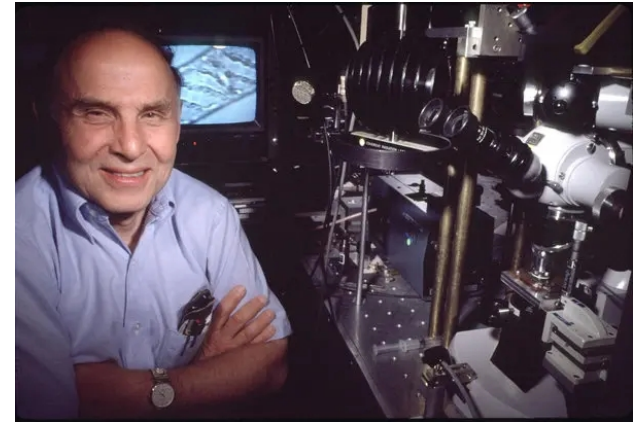


credit: [Roland Koebler](#), wikimedia

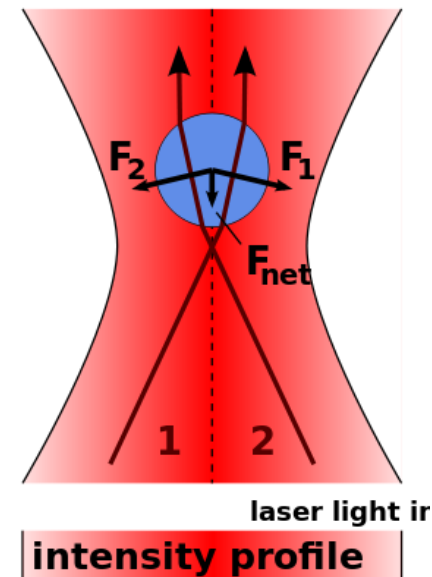
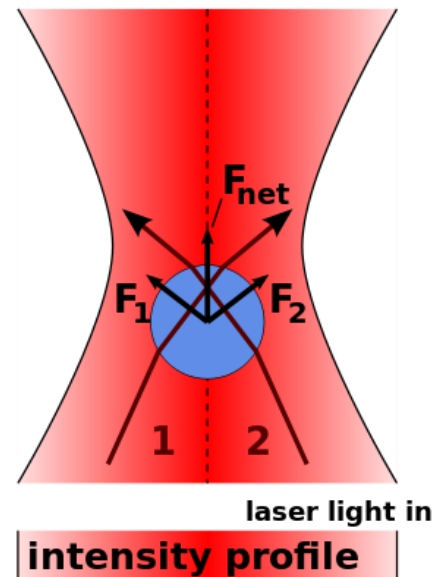
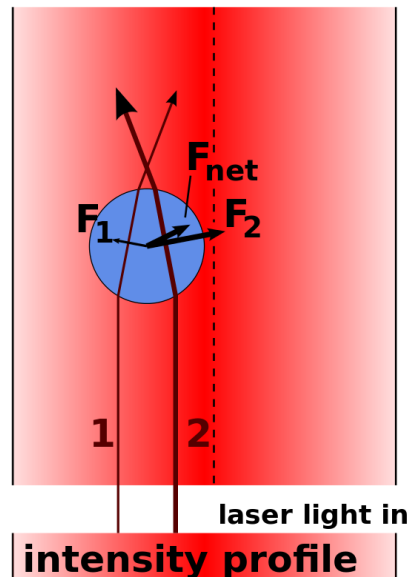
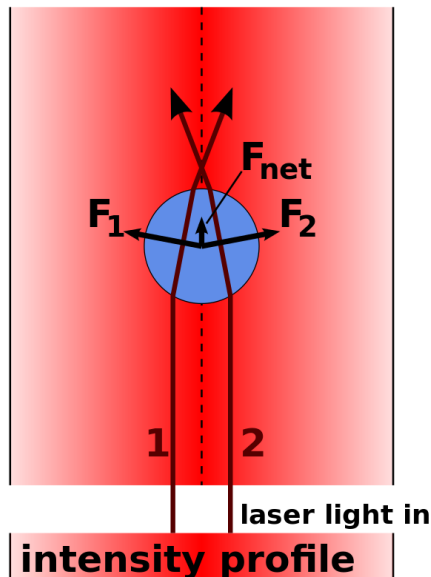
Pinzette ottiche (“optical tweezers”)

Manipolando spazialmente e temporalmente il profilo del fascio laser si possono spostare in modo controllato oggetti (sub-)micrometrici

...



Arthur Ashkin (1970)
Premio Nobel 2018



credit: Roland Koebler, wikimedia

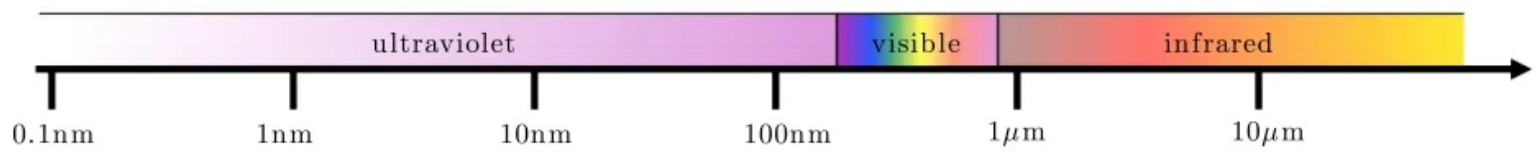
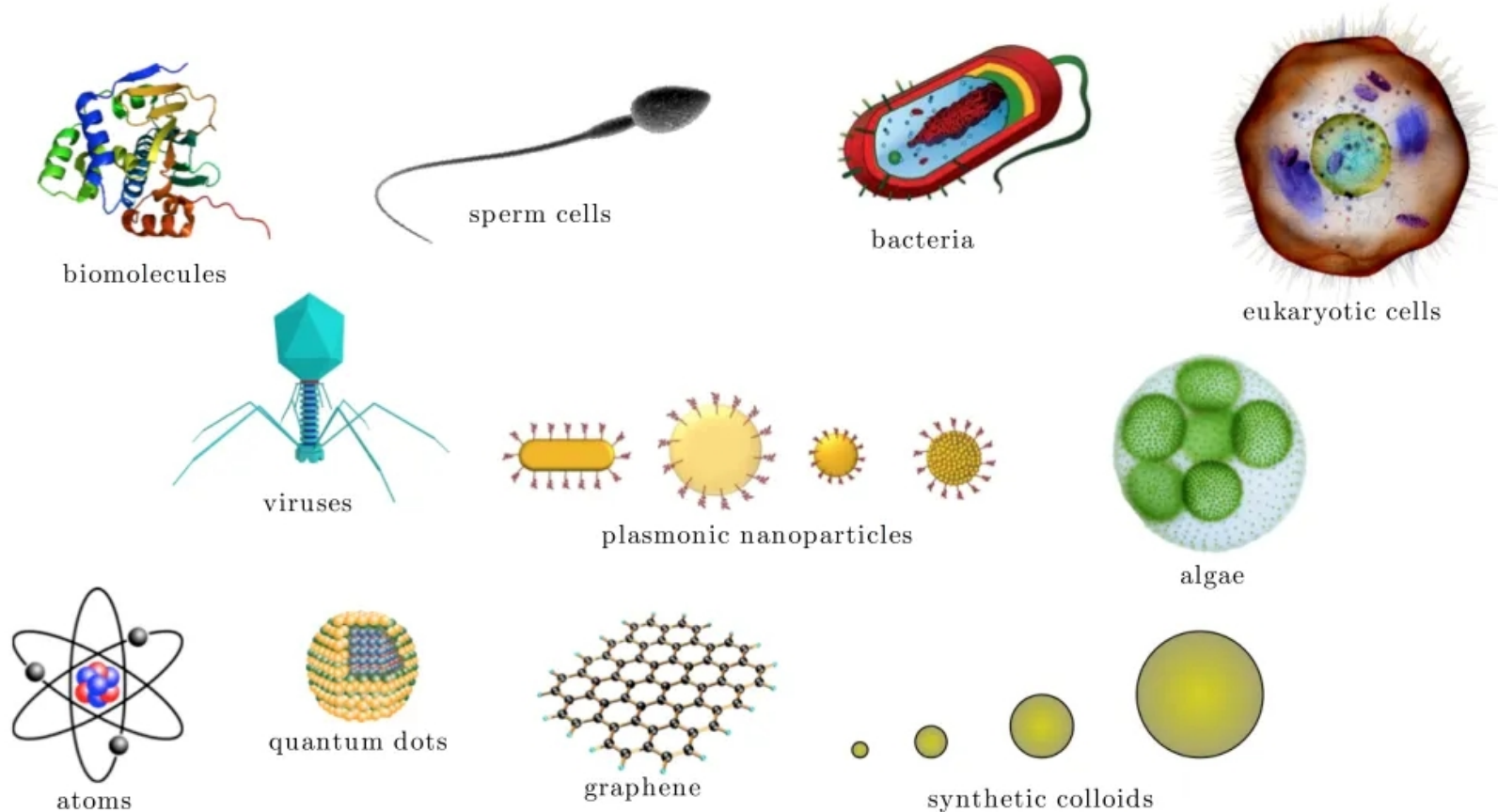
... ad esempio questi

credit: P. H. Jones, O. M. Maragò,
G. Volpe, opticaltweezers.org

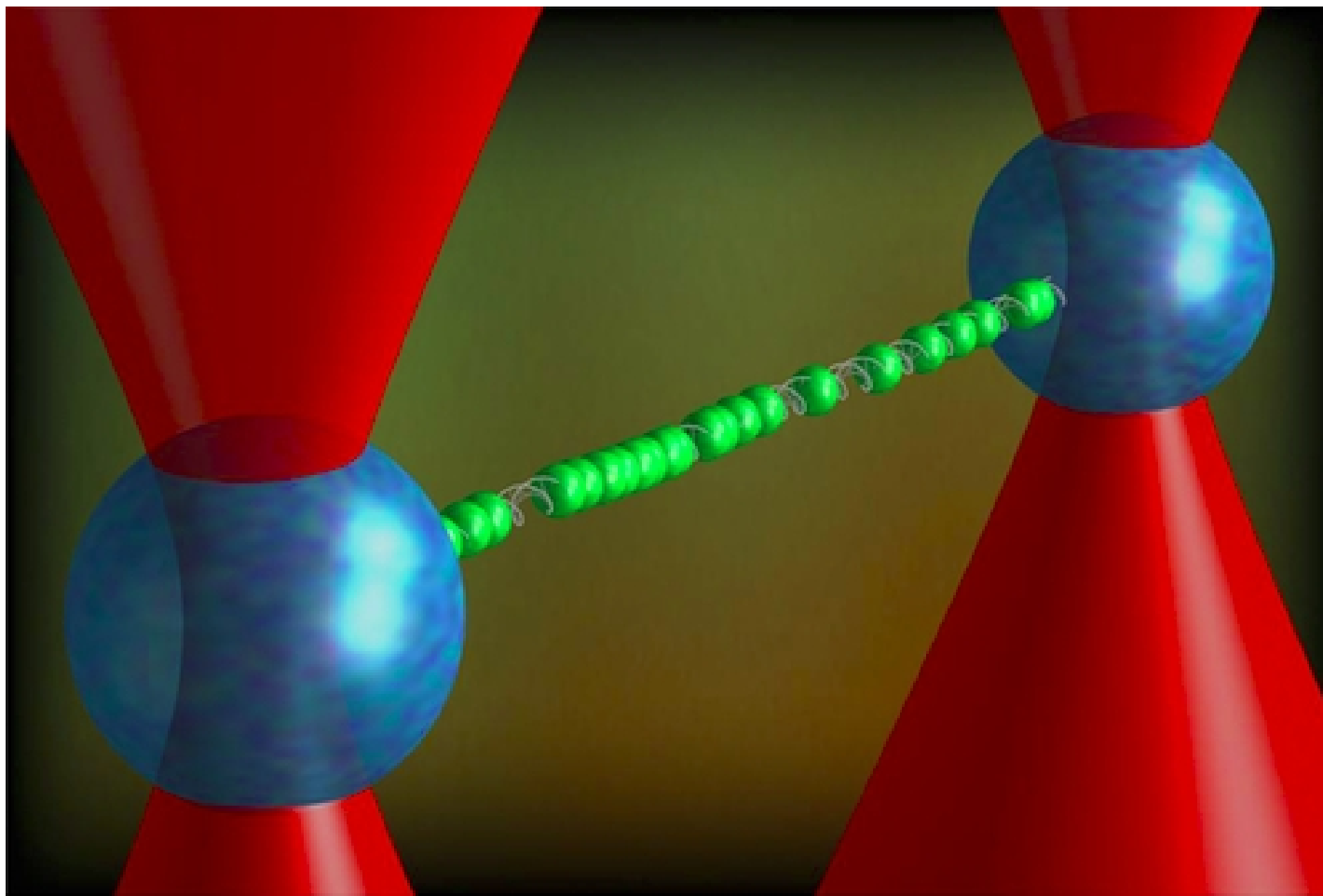
Rayleigh regime

Intermediate regime

Geometrical optics regime



Un tiro alla fune col DNA



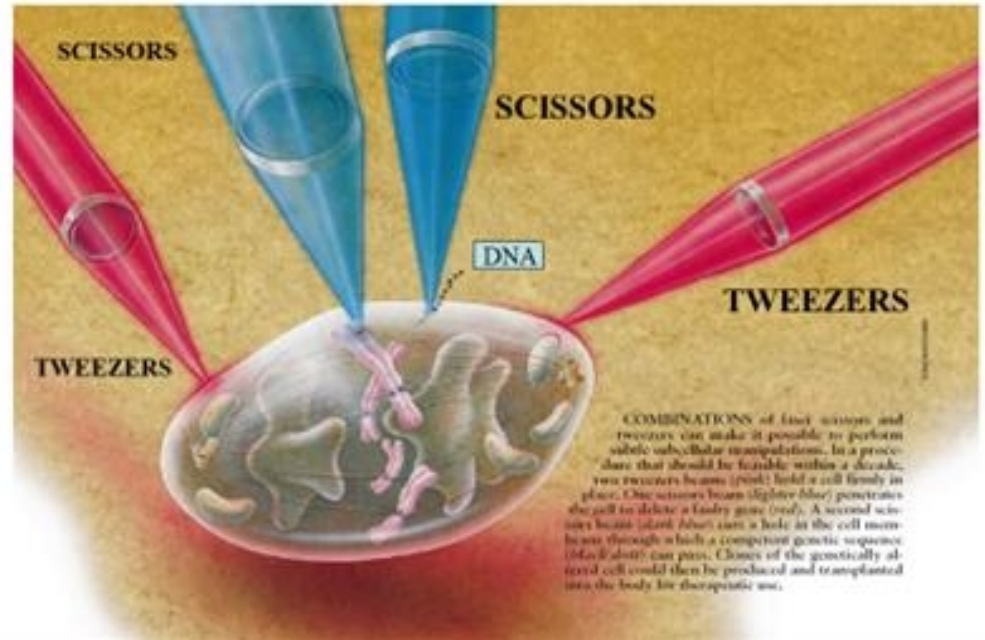
credit: I. Heller/VU Amsterdam

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

Operazioni su singole cellule



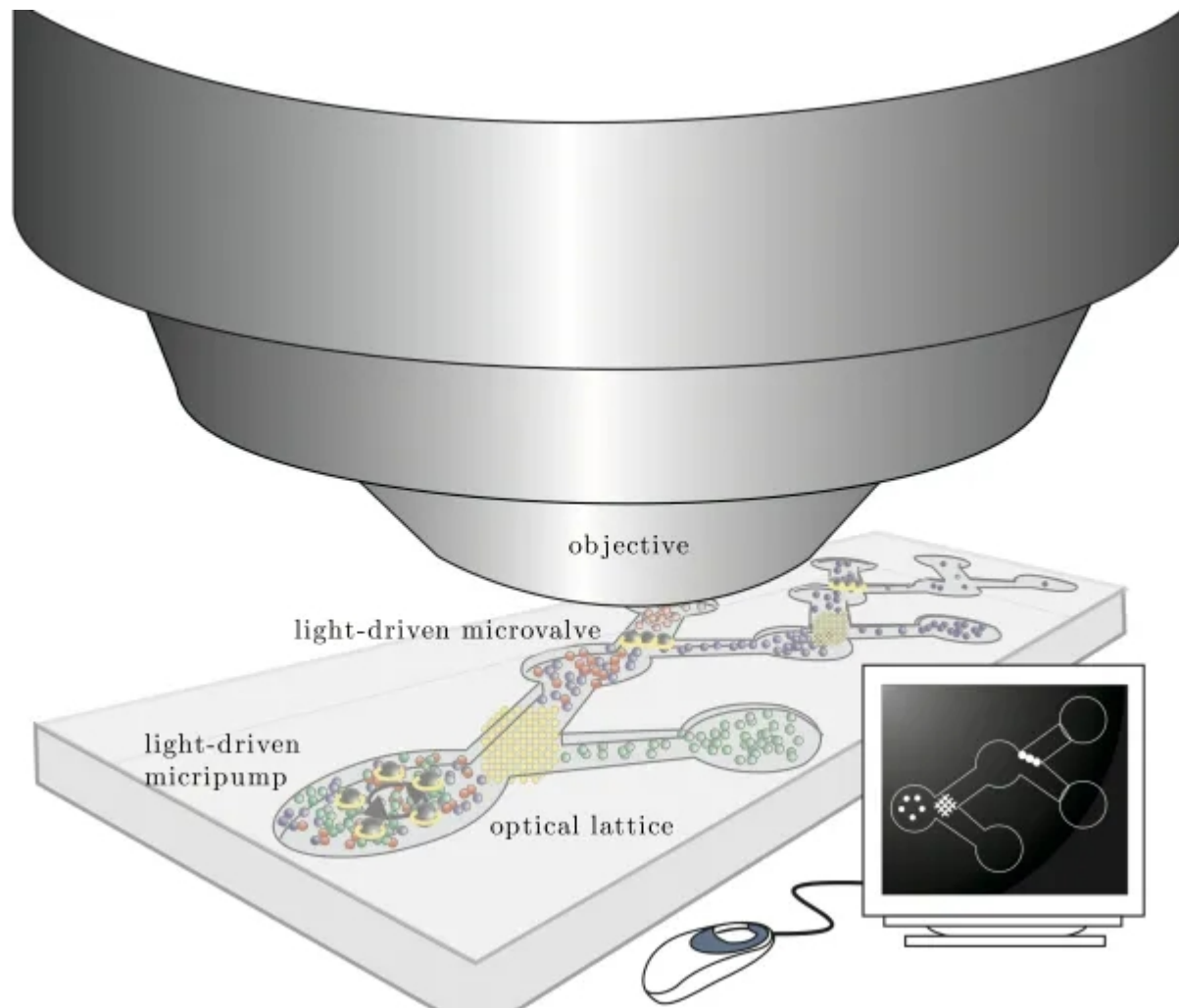
Laser Scissors & Tweezers



credit: **M. W. Berns**, University of California Irvine

credit: **KAIST** (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

“Lab on a chip” - microlaboratori integrati



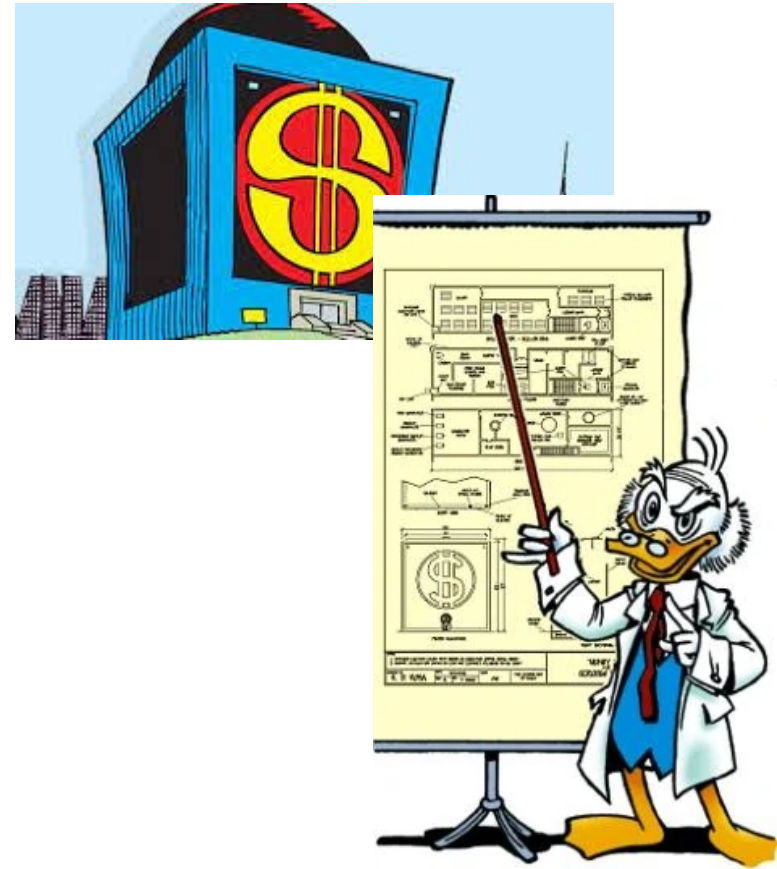
credit: Jones, Maragò, Volpe, opticaltweezers.org

E il viaggio verso le stelle... ?

Immaginiamo:

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

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

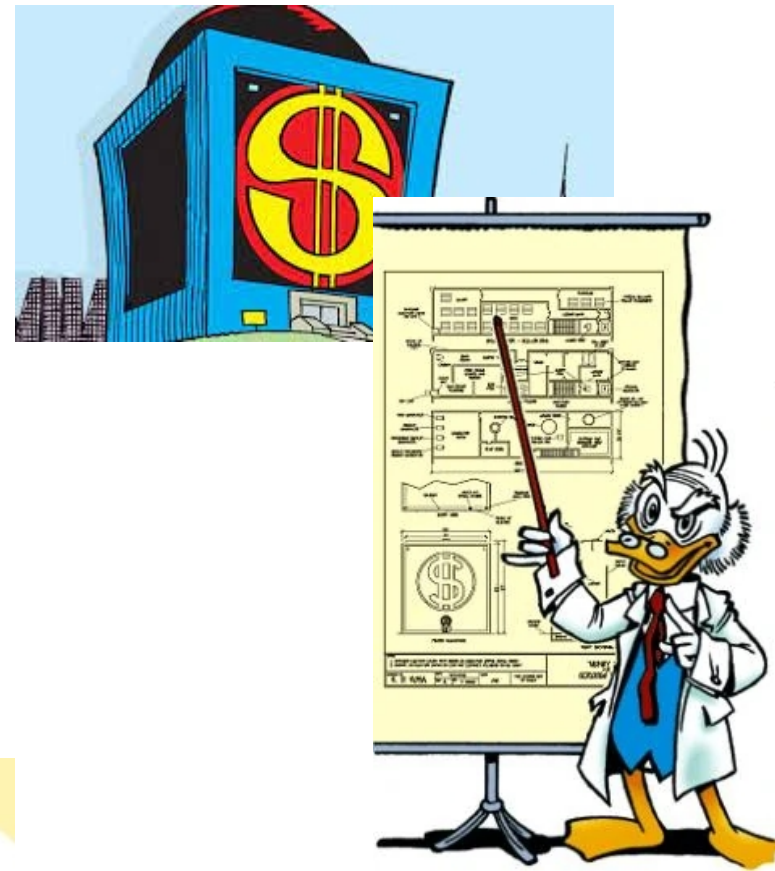


E il viaggio verso le stelle... ?

Immaginiamo:

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

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

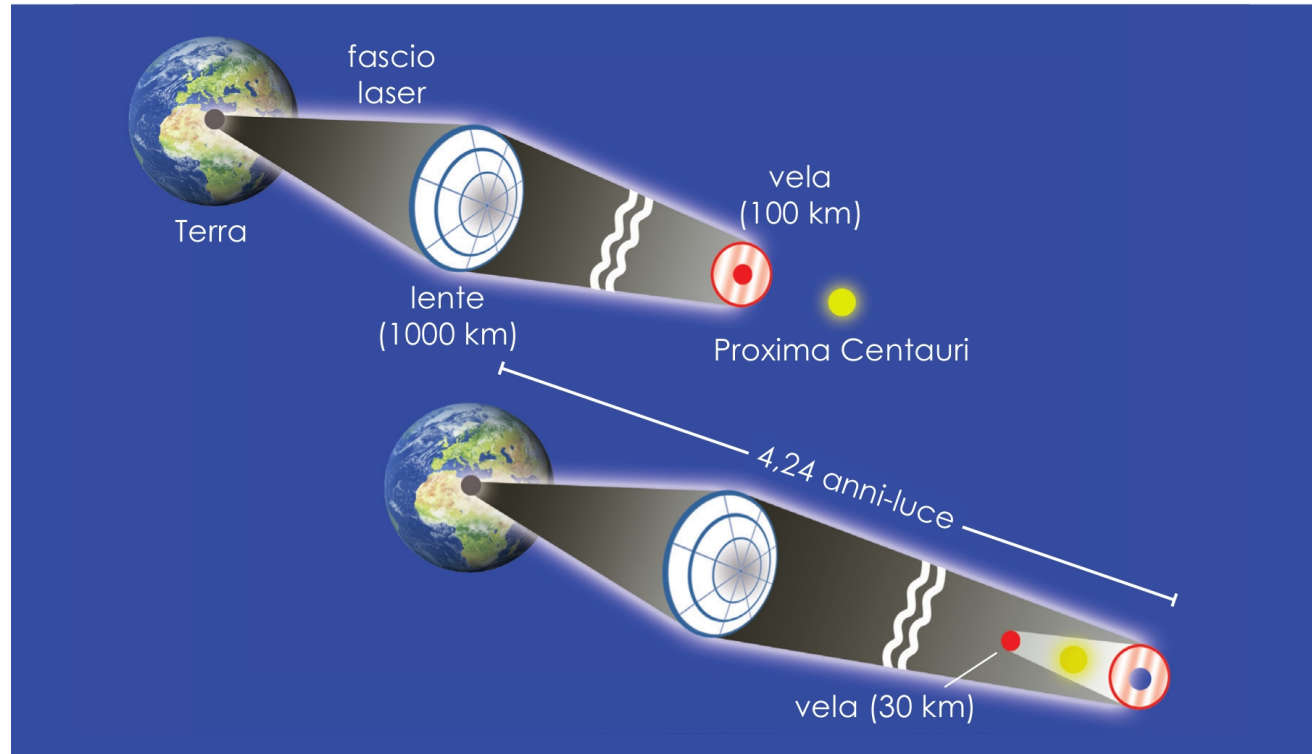
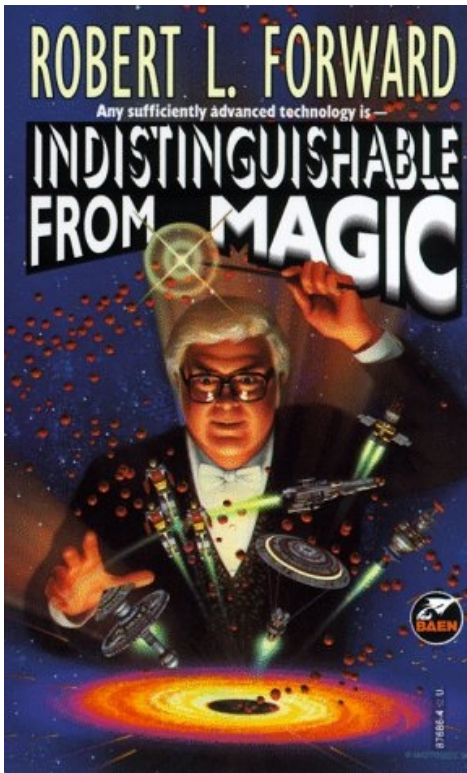


... come **fermarsi**
all'arrivo?

Una soluzione per viaggio A/R ...

R. L. Forward

Journal of Spacecraft
21 (1984) 187



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

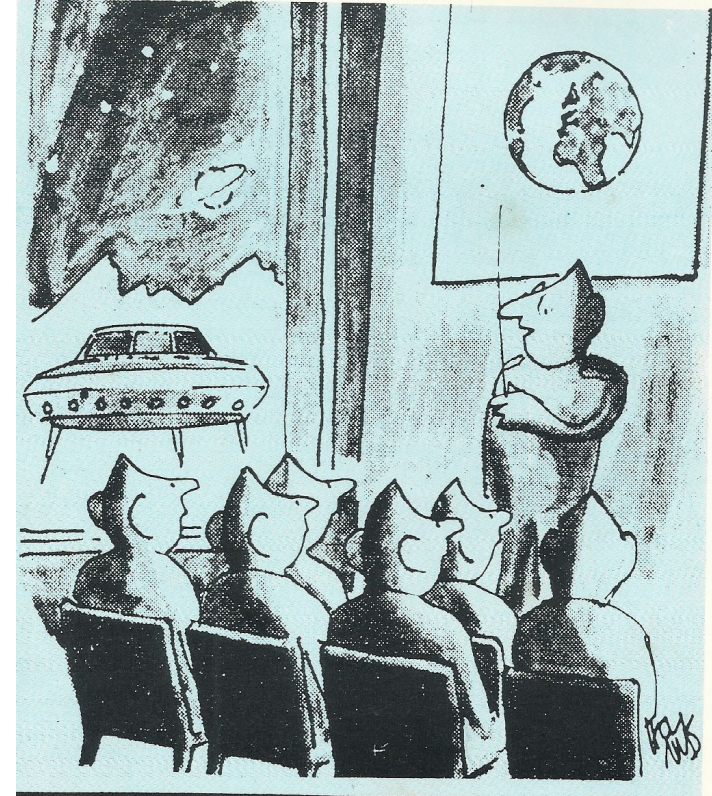
“Ogni tecnologia sufficientemente avanzata è indistinguibile dalla magia”

... 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)

... 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]



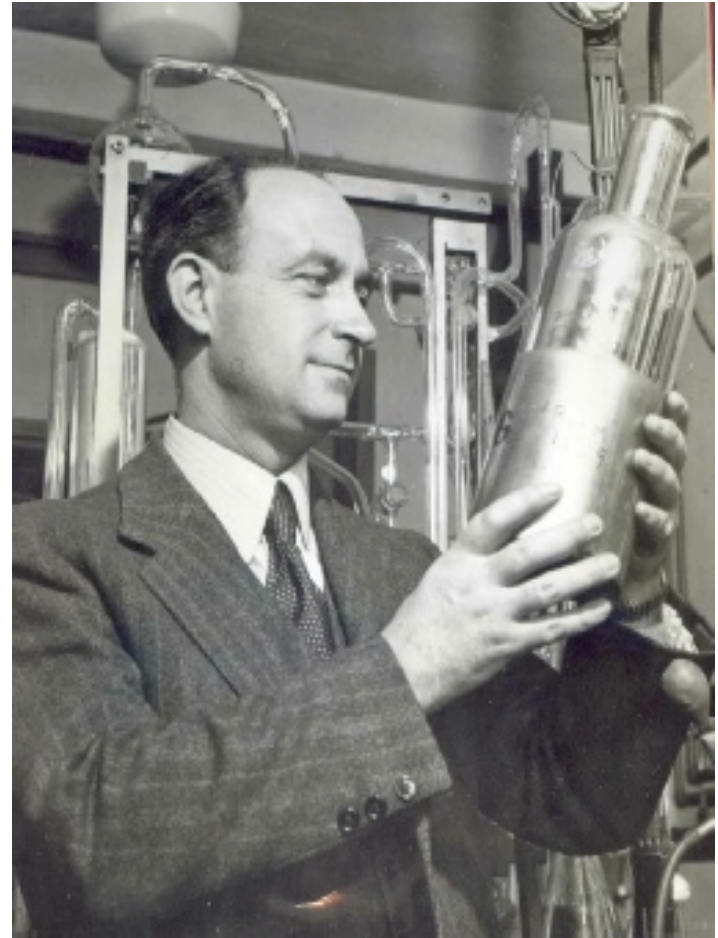
“Nessun pianeta potrebbe essere invaso da visitatori inaspettati dallo spazio esterno, il che può forse spiegare perché non c'è stata sinora alcuna evidenza di tali invasioni”

Questa è una possibile soluzione per il ...

Paradosso di Fermi

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

Enrico Fermi (1950)



... se gli Alieni navigano già!

Abraham "Avi" Loeb: "Io astrofisico, a caccia di Ufo per dare un senso alla nostra umanità"

Nonostante gli scetticismi, lo scienziato studia le forme di vita aliena all'Università di Harvard: "Mi criticano, ma cosa c'è di più importante per il nostro futuro?"

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS



Fast Radio Bursts from Extragalactic Light Sails

Manasvi Lingam^{1,2}  and Abraham Loeb² 

Published 2017 March 8 • © 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.

[The Astrophysical Journal Letters, Volume 837, Number 2](#)

“Esaminiamo la possibilità che i *fast radio bursts* [lampi radio] abbiano origine dall'attività di *civiltà extragalattiche* ... dalla Propulsione di grandi *light sails* [vele a luce]”

Notte dei
ricercatori, 2018



Perché gli alieni non sono
ancora scesi a Navacchio?

Andrea MACCHI



Siamo almeno al sicuro
da visite indesiderate ...



LA PRIMAVERA
DELLA RICERCA

Una giornata dedicata alla scienza
per i cento anni del CNR

PERCHÉ UN ALIENO NON PUÒ ATTERRARE A LUCCA (NÉ A PISA)?

Andrea MACCHI
(CNR, Istituto nazionale di Ottica)



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Area della Ricerca di Pisa

100
LA RICERCA
VENUTA
DAL
FUTURO

Il Centenario del CNR è realizzato con il contributo della
Presidenza del Consiglio dei Ministri e con il patrocinio di Rai
RAI

Evento per il Centenario CNR, Pisa, Maggio 2023
Tematica: "Pace e Diplomazia Scientifica"

Altra Terra dove andare?

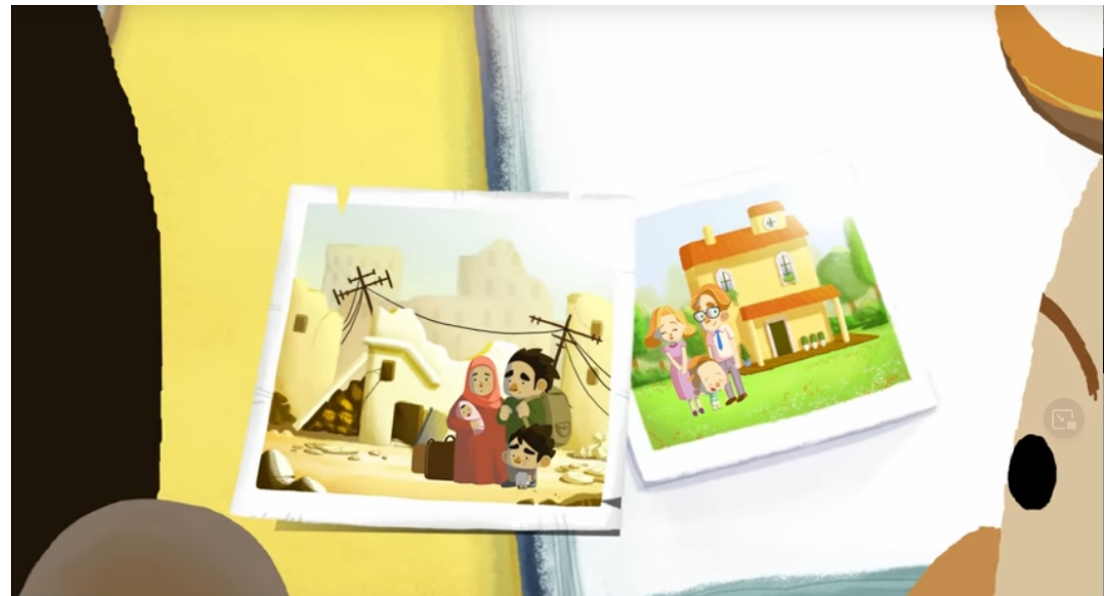
“Sono convinto che per l’uomo sia arrivato il momento di lasciare la Terra” (Stephen Hawking, 2017)

Se la propulsione laser è l’unica tecnologia futuribile per il viaggio interstellare **non** potremo **colonizzare** altri pianeti **ma** solo essere **accolti** da civiltà avanzate tecnologicamente quanto la nostra (e **disposte a farlo**)



*“Dedicato a tutti
quelli che stanno
scappando”*

*(Gabriele Salvatores,
Mediterraneo, 1992)*



*“Pensa a quanti bambini stanno per arrivare.
Pensa a questa avventura, tra speranza e paura.
Mediterraneamente, pensa a quella gente.
Senza Confini”*

*(Mediterraneamente, 60° Zecchino d'Oro,
Giuliano Ciabatta, 2017)*