



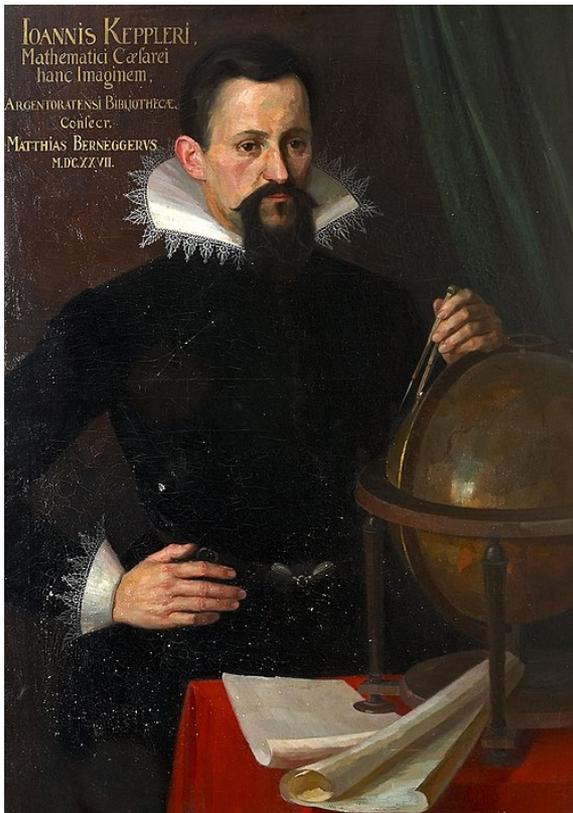
Heavy Light: come muovere (o frenare) oggetti con la pressione della luce

Andrea MACCHI

Fisica al Pub, Pisa, 04/02/2025

C'è vento nel cosmo?

Johannes Kepler (~1600):
osservazione della
cometa di Halley e altre
comete

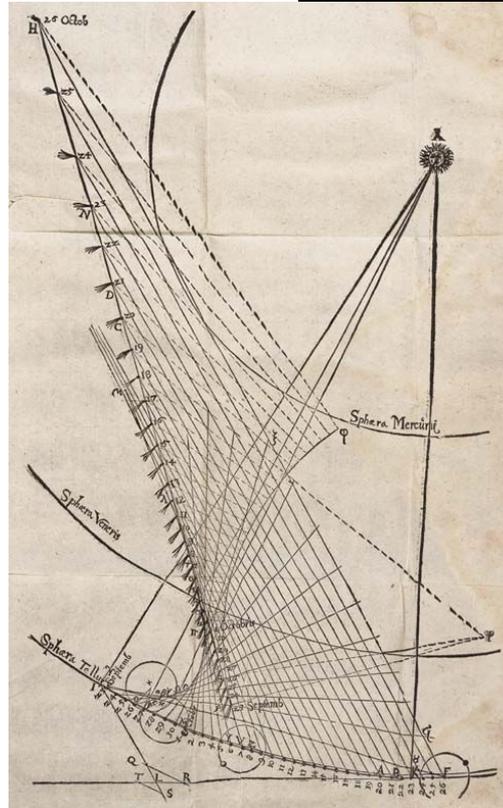
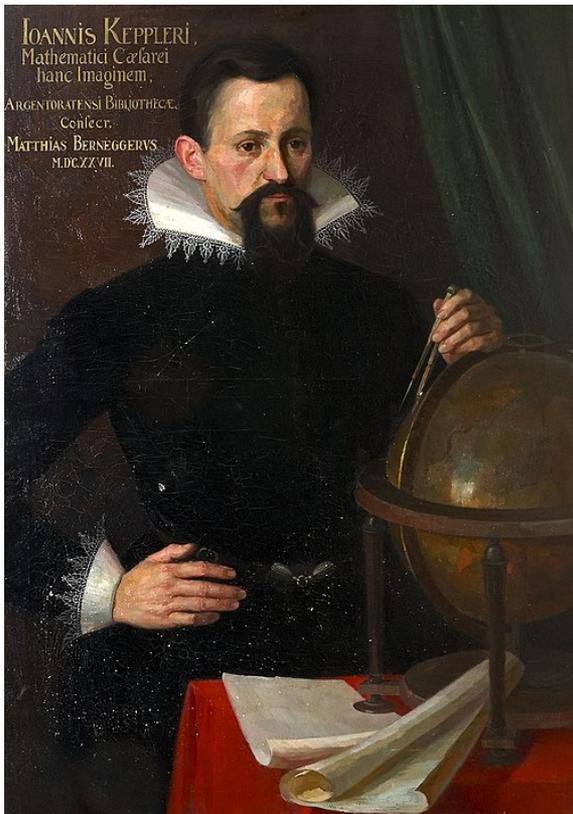
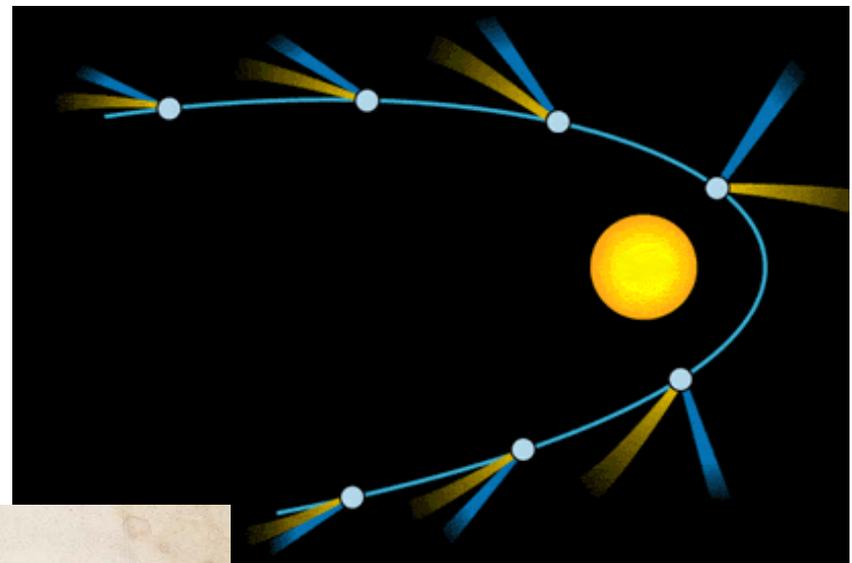


[Grazie a **Steve Shore** (UniPi) e V. Pavlik
per il vero ritratto di Keplero:
Physics Today **74**, 9-10 (2021)]

C'è vento nel cosmo?

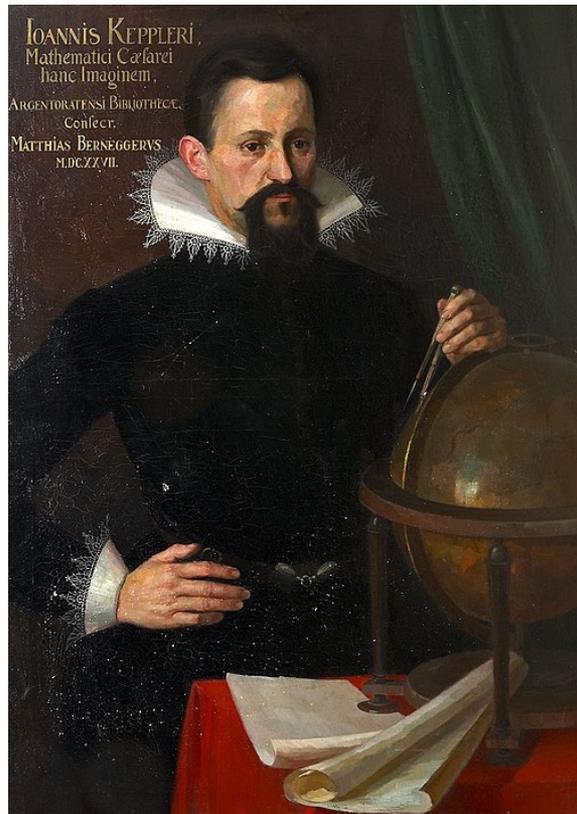
La coda delle comete è **opposta** alla posizione del Sole.

La **luce solare** agisce come un **vento**?



Traiettoria della cometa di Halley con posizione della coda, da: **J. Kepler**, "De Cometis Libellis Tres" (1617).

C'è vento nel cosmo?



Rivolto a **Galileo**:

“Non è improbabile che ci siano abitanti non solo sulla Luna ma anche su Giove [...]

Appena qualcuno scoprirà l'arte di volare, non mancheranno i coloni dalla nostra specie umana [...] Trovate navi e vele adatte ai venti celesti,

e qualche intrepido sfiderà quel vuoto ... ”
("Dissertatio cum Nuncio Sidereo", 1610)

La scoperta della pressione della luce

Predizione teorica:

James Clerk Maxwell, 1874
(teoria elettromagnetica della luce)



Adolfo Bartoli, 1876
(termodinamica della radiazione)



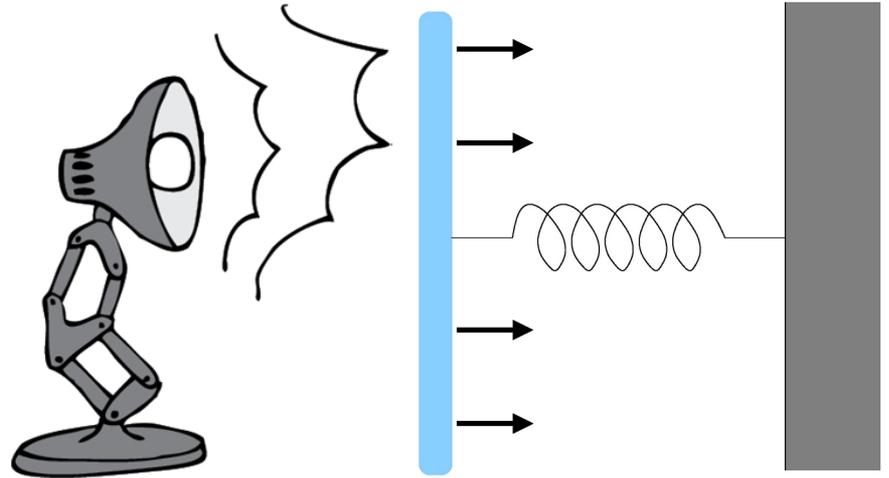
Verifica sperimentale:

Piotr N. Lebedev, 1899



La Pressione della Luce in una Formula

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

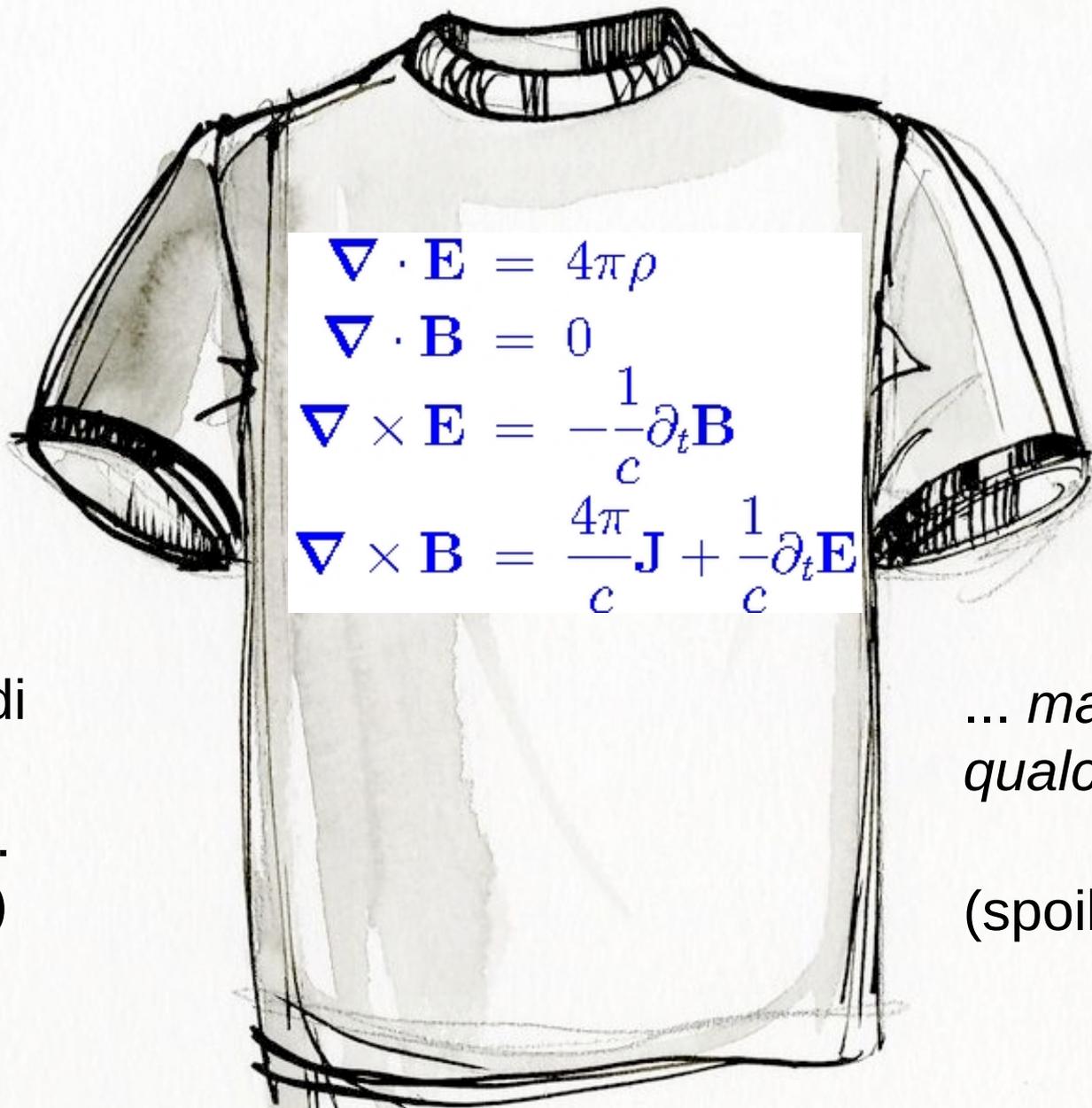


$$P = 2I / c$$

I : intensità della luce

(energia luminosa per unità di tempo e superficie)

c : velocità della luce (~300000 km/s)



Equazioni di
Maxwell
(unità c.g.s.
Gaussiane)

... *manca
qualcosa?*

(spoiler: *No*)

Basic T-shirt by David Ring, commissioned by Europeana Fashion – Fashion Museum Province of Antwerp.
https://commons.wikimedia.org/wiki/Commons:Europeana_Fashion_-_MoMu_-_Thesaurus_drawings

Leggi di Conservazione

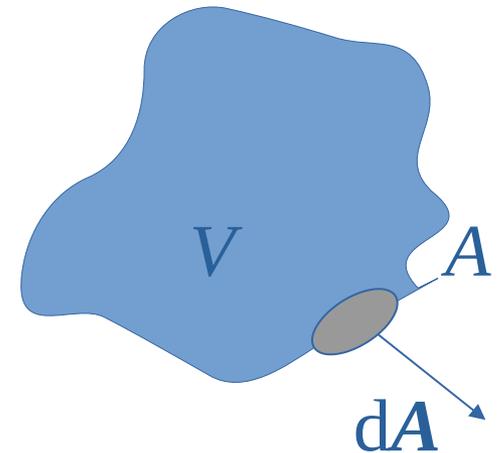
$$\begin{pmatrix} Q \\ U_{\text{EM}} \\ \mathbf{p}_{\text{EM}} \end{pmatrix} = \int_V \begin{pmatrix} \rho \\ u_{\text{EM}} \\ \mathbf{g}_{\text{EM}} \end{pmatrix} dV$$

carica
energia
quantità di moto

$$\frac{d}{dt} Q = -\Phi_A(\mathbf{J})$$

$$\frac{d}{dt} U_{\text{EM}} = -\Phi_A(\mathbf{S}) - \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{p}_{\text{EM}} = -\Phi_A(\mathbf{T}) - \int_V (\rho \mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV$$



La **Forza di Lorentz** è *inclusa* nelle equazioni di Maxwell!

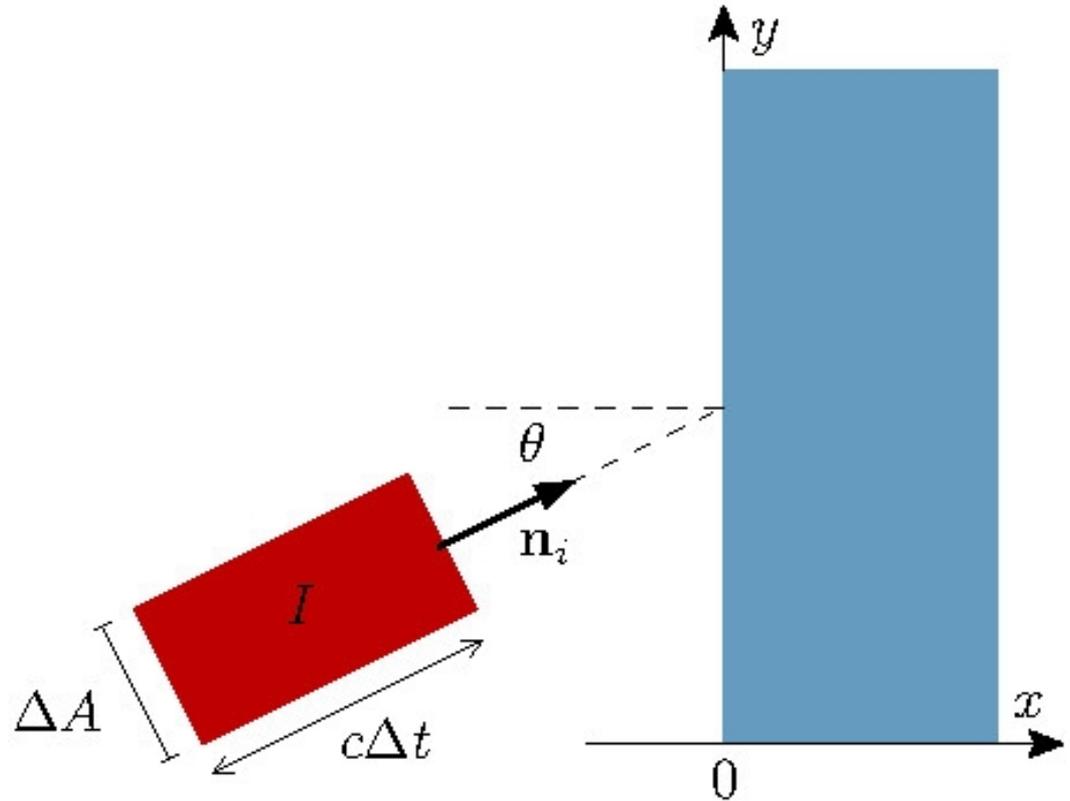
Calcolo della Pressione su una Superficie

“Pacchetto” (impulso)
di durata Δt ,
sezione ΔA e intensità
 I contiene un'energia

$$U_i = I \Delta t \Delta A$$

e quindi una quantità
di moto

$$\mathbf{p}_i = (U_i/c)\mathbf{n}_i$$



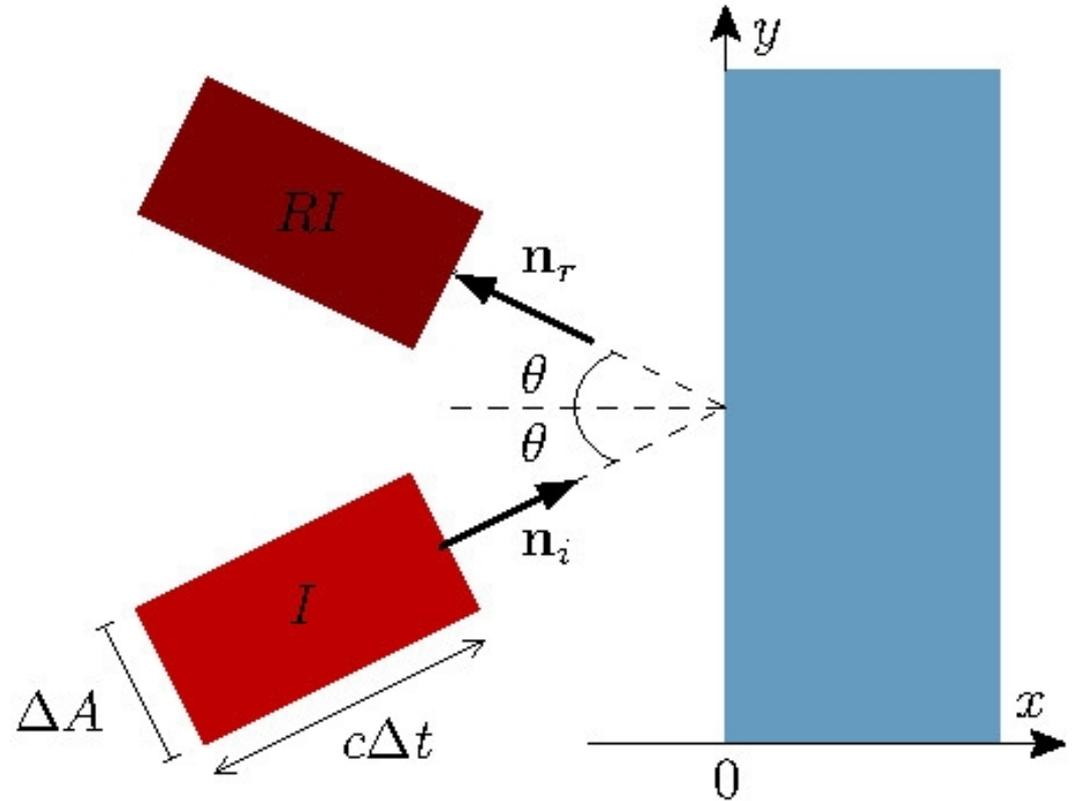
Calcolo della Pressione su una Superficie

Riflessione speculare su una superficie di riflettività $R < 1$ genera pacchetto riflesso di stessa durata Δt , e sezione ΔA , intensità RI , energia

$$U_r = RI \Delta t \Delta A$$

e quantità di moto

$$\mathbf{p}_r = (U_r/c)\mathbf{n}_r$$



Calcolo della Pressione su una Superficie

La superficie riceve una quantità di moto

$$\Delta \mathbf{p}_r = \mathbf{p}_r - \mathbf{p}_i$$

su un'area $(\Delta A / \cos\theta)$
in un tempo Δt

Pressione "normale":

$$P_x = \Delta p_x / (\Delta t \Delta A / \cos\theta)$$

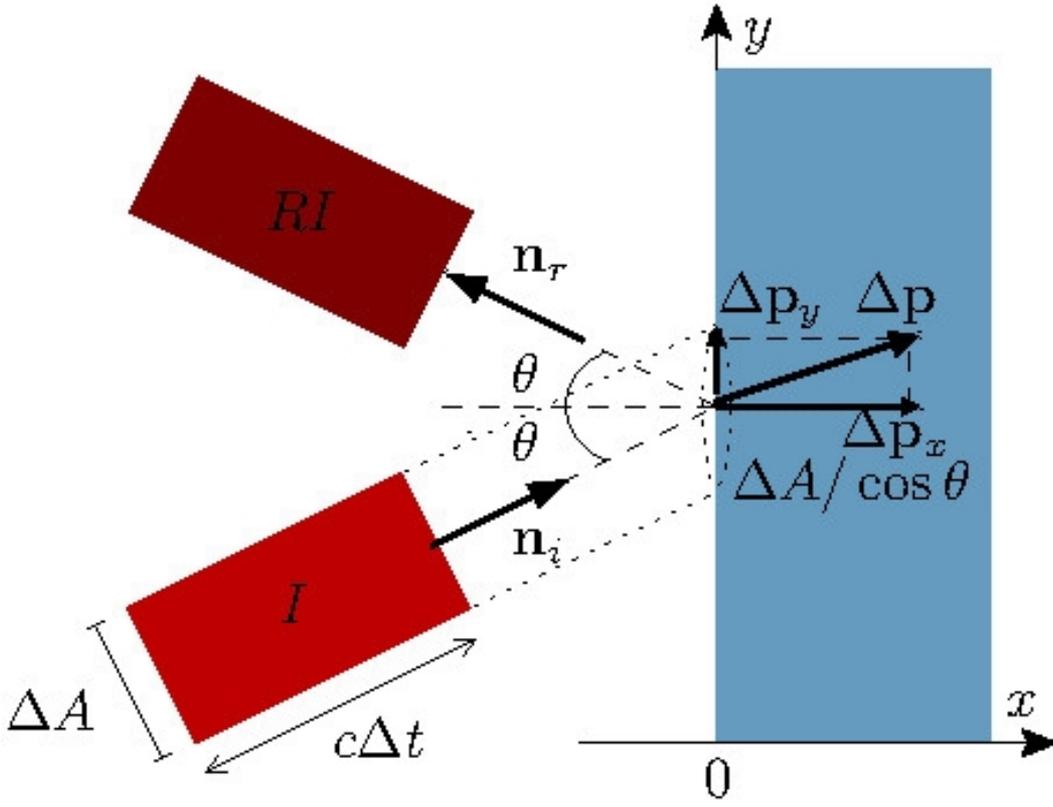
$$= (1+R)(I/c) \cos^2\theta$$

Pressione "tangenziale":

$$P_y = \Delta p_y / (\Delta t \Delta A / \cos\theta)$$

$$= (1-R)(I/c) \sin\theta \cos\theta$$

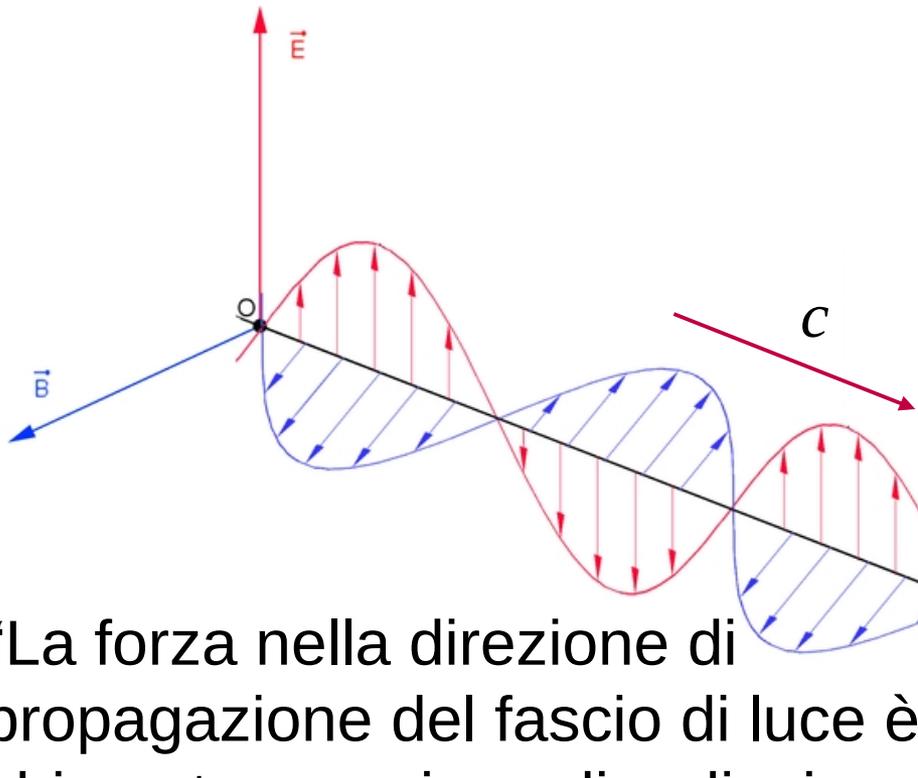
A incidenza normale ($\theta=0$) $P_x = (1+R)(I/c)$, $P_y = 0$



$$\Delta p_x = \Delta p \cos\theta$$

$$\Delta p_y = \Delta p \sin\theta$$

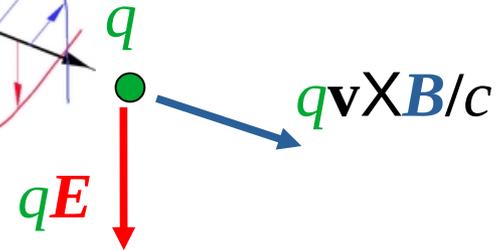
Una Definizione Fuorviante ...



Per un'onda piana $|\mathbf{E}|=|\mathbf{B}|$
L'onda agisce su una carica q
con la forza di Lorentz

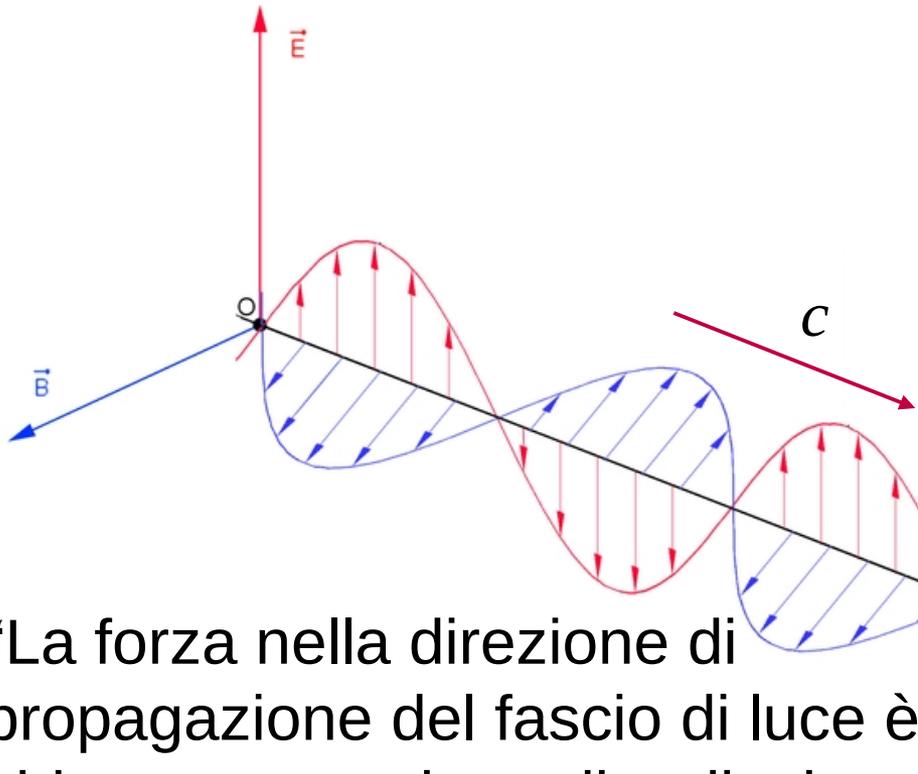
$$\mathbf{F}=q(\mathbf{E}+\mathbf{v}\times\mathbf{B}/c)$$

“La forza nella direzione di propagazione del fascio di luce è chiamata pressione di radiazione o della luce”



Ma la soluzione *esatta* mostra che *in media sul periodo*
 $\langle\mathbf{v}\times\mathbf{B}\rangle=0$!!!

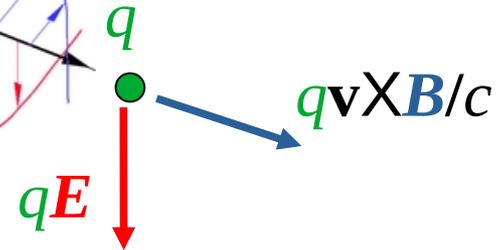
Una Definizione Fuorviante ...



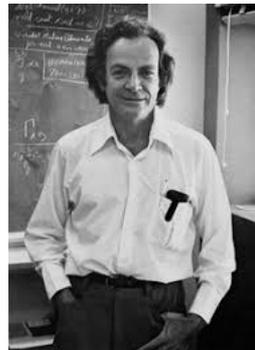
Per un'onda piana $|\mathbf{E}|=|\mathbf{B}|$
L'onda agisce su una carica q
con la forza di Lorentz

$$\mathbf{F}=q(\mathbf{E}+\mathbf{v}\times\mathbf{B}/c)$$

“La forza nella direzione di propagazione del fascio di luce è chiamata pressione di radiazione o della luce”



R. P. Feynman,
*The Feynman Lectures
on Physics I, 34-9*



Pressione su uno Specchio: Teoria Corpuscolare

Fotoni: particelle di massa nulla

Relazione generale tra velocità, energia e quantità di moto dalla teoria della relatività ristretta:

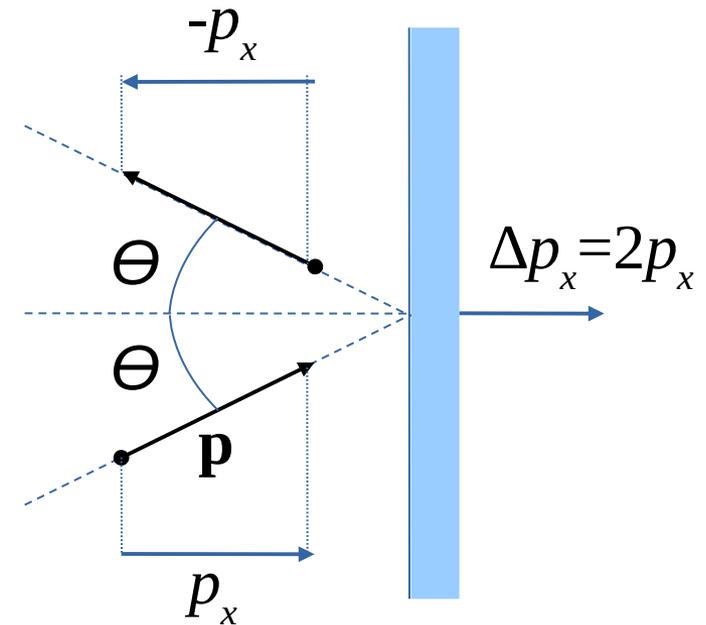
$$E = (m^2c^4 + \mathbf{p}^2c^2)^{1/2}$$
$$(\text{=} mc^2 + \mathbf{p}^2/(2m) - \mathbf{p}^4/(4m^3c^2) + \dots$$

per $p \ll mc$)

$$\mathbf{v} = \mathbf{p}c^2 / E$$

Per particelle con $m=0$:

$$p = E / c , \quad v = c$$



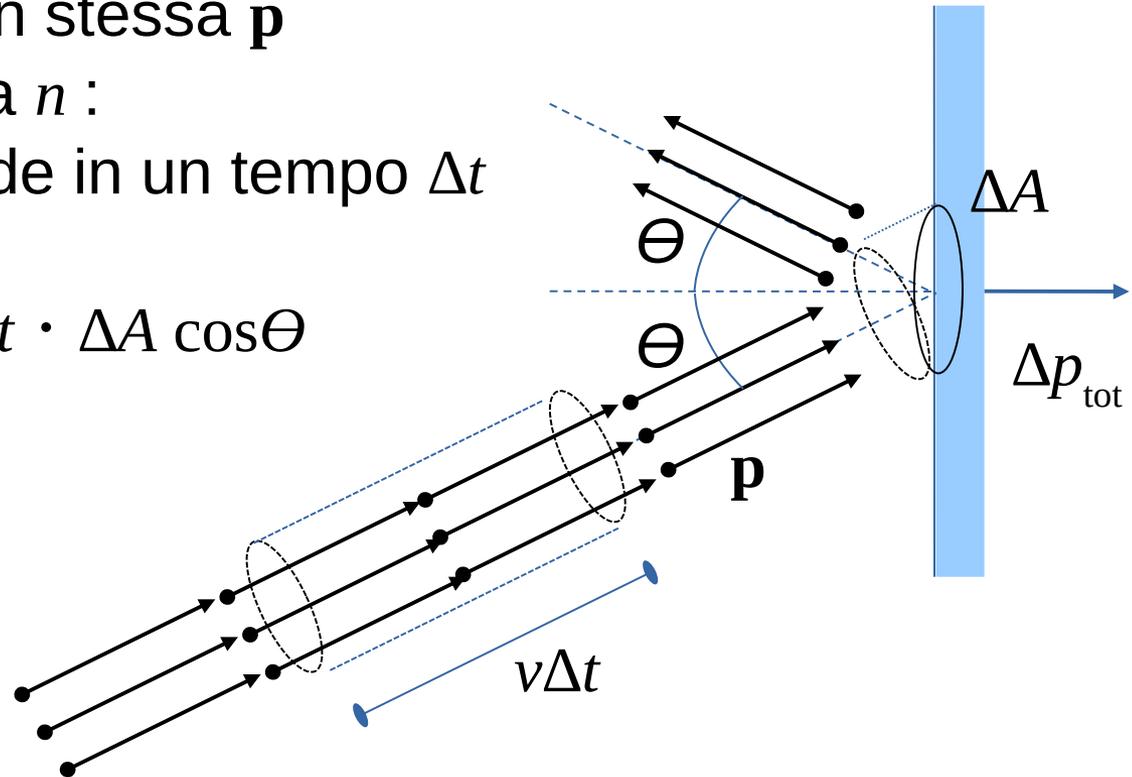
Riflessione da uno specchio
=
rimbalzo elastico del fotone

Pressione su uno Specchio: Teoria Corpuscolare

Flusso di fotoni con stessa \mathbf{p}
e densità numerica n :
su un'area ΔA incide in un tempo Δt
un numero totale

$$\Delta N = n \cdot v\Delta t \cdot \Delta A \cos\theta$$

velocità $v=c$



quantità di moto ceduta alla parete per Δt e ΔA

$$\Delta p_{\text{tot}} = 2p \cos\theta \cdot \Delta N = 2n(E/c) \cdot \Delta t \cdot \Delta A \cos^2\theta$$

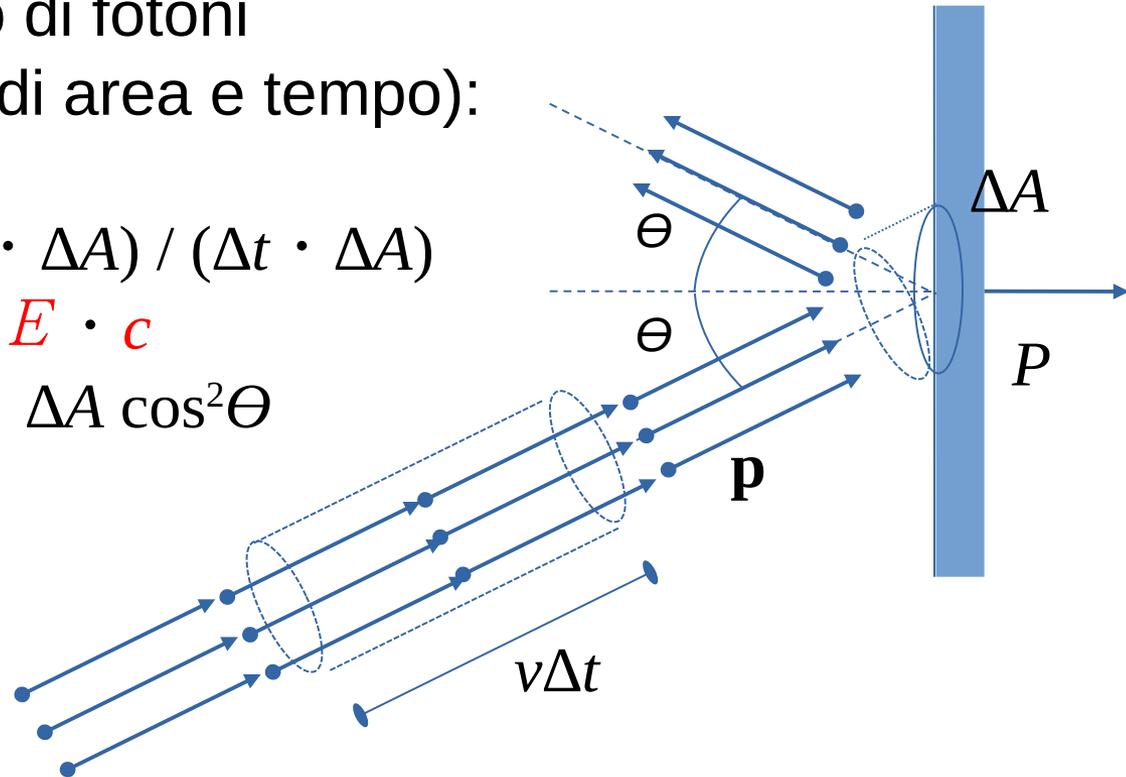
con $E=pc$ energia dei fotoni

Pressione su uno Specchio: Teoria Corpuscolare

Intensità del fascio di fotoni
(energia per unità di area e tempo):

$$I = (n \cdot E \cdot v\Delta t \cdot \Delta A) / (\Delta t \cdot \Delta A) \\ = n \cdot E \cdot c$$

$$\Delta p_{\text{tot}} = (2I/c) \cdot \Delta t \cdot \Delta A \cos^2\Theta$$



Pressione risultante (forza per unità di superficie)

$$P = \Delta p_{\text{tot}} / (\Delta t \cdot \Delta A) = (2I/c) \cos^2\Theta$$

A incidenza normale ($\Theta=0$) $P = 2I/c$

Quanto vale la pressione del Sole?

intensità della radiazione
solare sull'orbita Terrestre

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

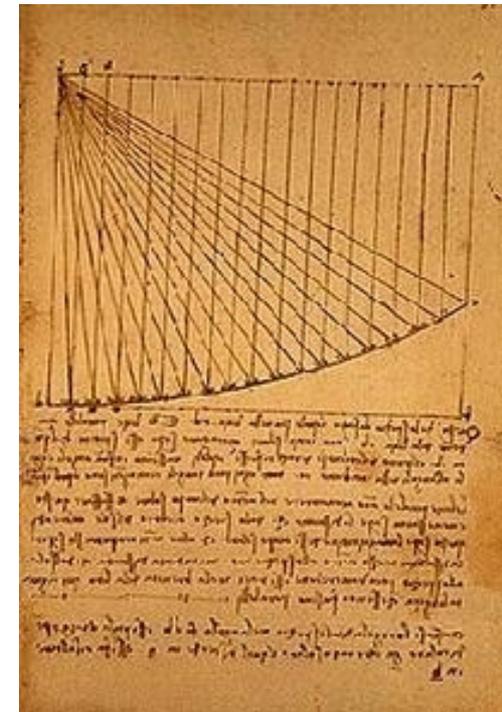
$$\rightarrow I/c \approx 10^{-5} \text{ N/m}^2$$

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

focalizzando la luce solare con specchi
o lenti si può ottenere

$$\approx I \times 1000 \rightarrow I/c \approx 10^{-7} \text{ atmosfere}$$

sempre piccola!



Leonardo da Vinci,
Codex Arundel (1480-1518)

Radiometro di Crookes (1870)



<https://youtu.be/Fkbfl37nwYA>

detto anche
“mulino a luce”
(*optical windmill*)

Una prova della
pressione della luce?

(*Spoiler: no*)

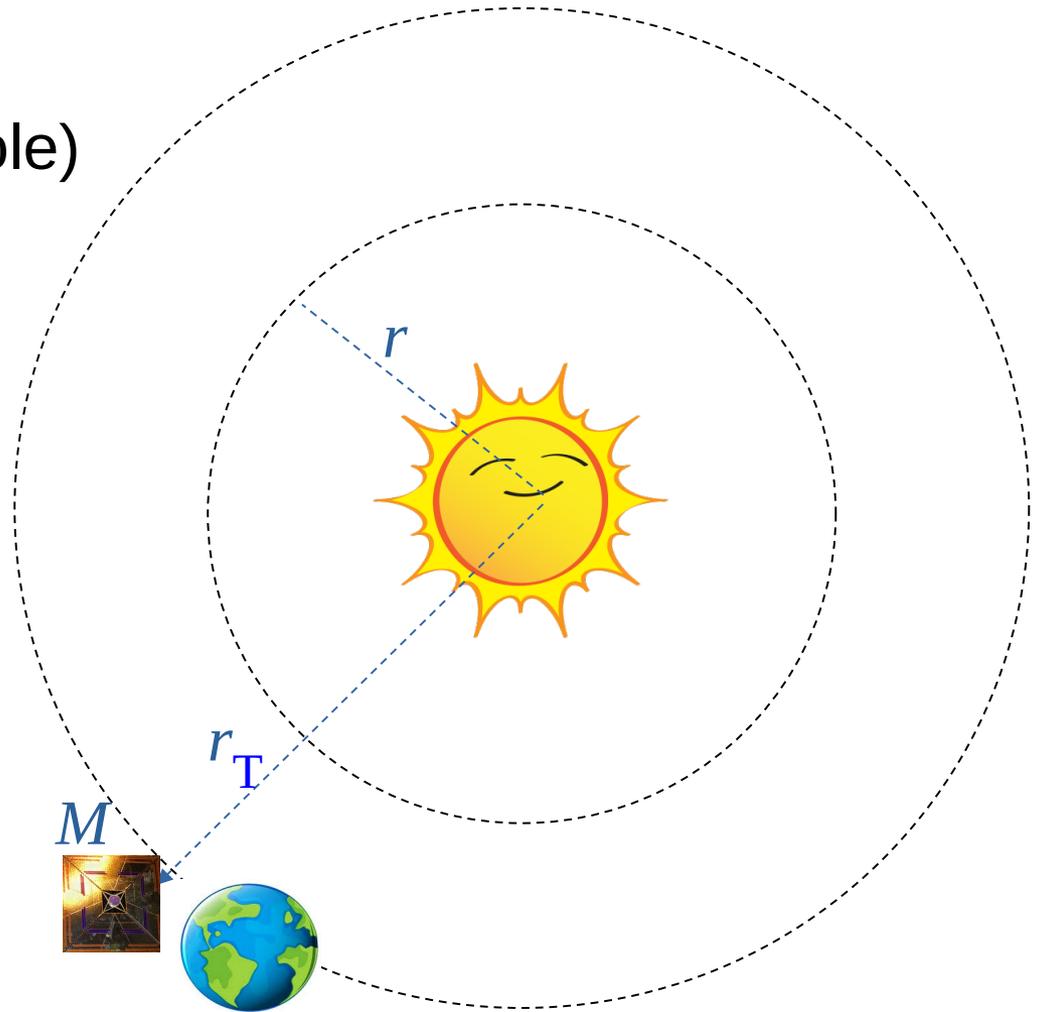
Light Sail: a Vela col Sole

Vela in partenza dall'orbita terrestre (distanza r_T dal Sole)

Potenza totale del Sole (indipendente da r)!

$$\begin{aligned} P_{\odot} &= I_{\odot}(r) \times \pi r^2 \\ &= I_{\odot}(r_T) \times \pi r_T^2 \end{aligned}$$

$$I_{\odot}(r) = I_T \frac{r_T^2}{r^2} \quad I_T = I_{\odot}(r_T)$$



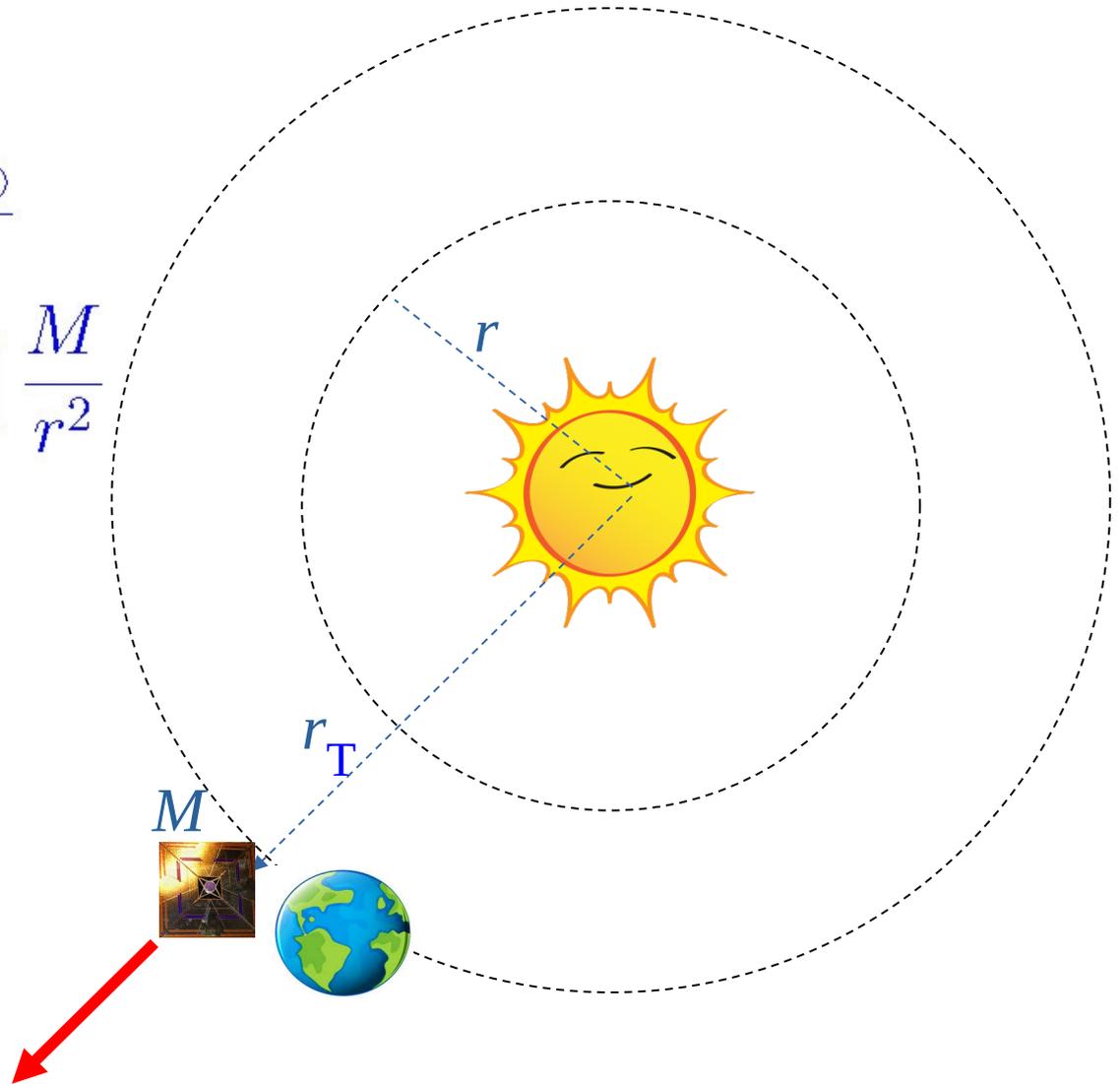
Light Sail: a Vela col Sole

Forza totale sulla vela

$$F = \frac{2I(r)}{c}A - G\frac{MM_{\odot}}{r^2}$$
$$= \left(\frac{2I_{\text{T}}r_{\text{T}}^2A}{Mc} - GM_{\odot} \right) \frac{M}{r^2}$$

La vela sfugge dalla gravità solare se

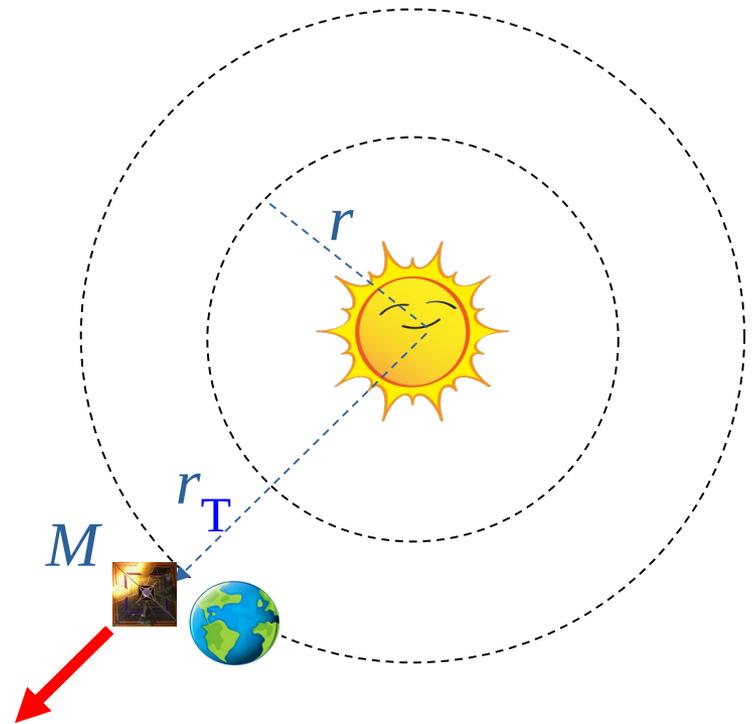
$$\frac{M}{A} < \frac{2I_{\text{T}}r_{\text{T}}^2}{GM_{\odot}c}$$



Light Sail: a Vela col Sole

Velocità finale v_f

(a_T : accelerazione iniziale)



$$F \equiv M a_T \frac{r_T^2}{r^2}$$

$$\frac{M v_f^2}{2} = \int_{r_T}^{+\infty} F dr$$

$$= M a_T r_T^2 \int_{r_T}^{+\infty} \frac{dr}{r^2} = M a_T r_T$$

$$v_f = \sqrt{2 a_T r_T} \quad a_T \equiv \frac{2 I_T A}{c M} - G \frac{M_\odot}{r_T^2}$$

Velocità di una Vela Solare

Grafene: $M/A = 7.6 \times 10^{-7} \text{ Kg/m}^2$

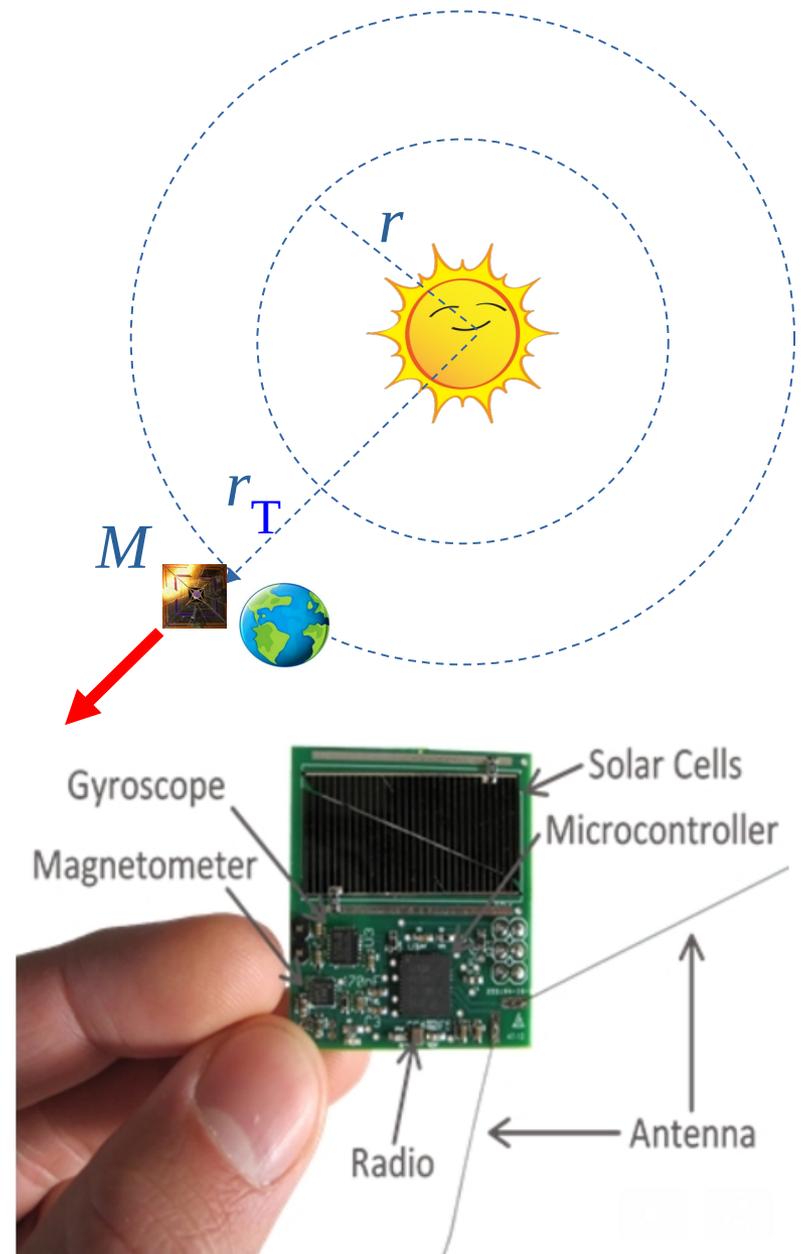
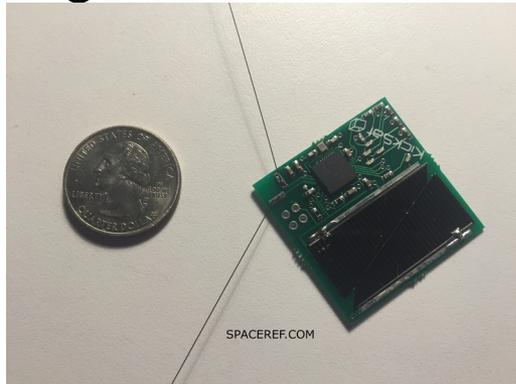
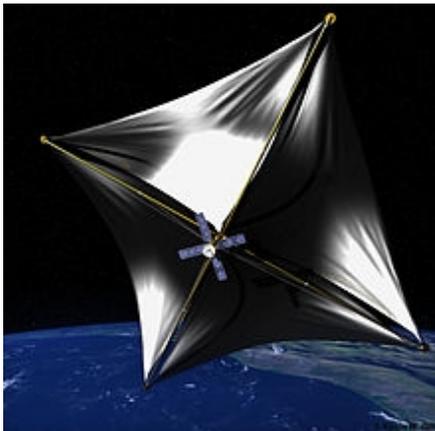
$v_f = 4.8 \times 10^{-3} c = 1.4 \times 10^6 \text{ m/s}$

$\approx 10^5$ la velocità del Voyager

Progetto di vela-sonda con strumentazione "on chip":

$M \approx 10 \text{ g}$, $A \approx 16 \text{ m}^2$

$M/A \approx 6 \times 10^{-4} \text{ Kg/m}^2$



breakthroughinitiatives.org

Viaggi interstellari?

Alla velocità del **Voyager**
(uscito dal sistema solare
nel 2013) raggiungeremmo

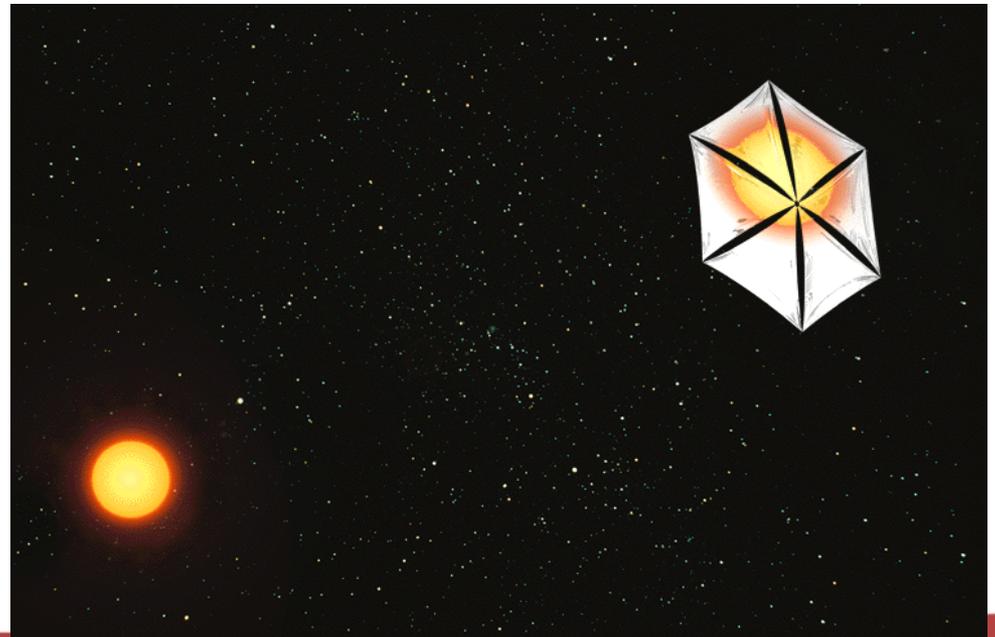
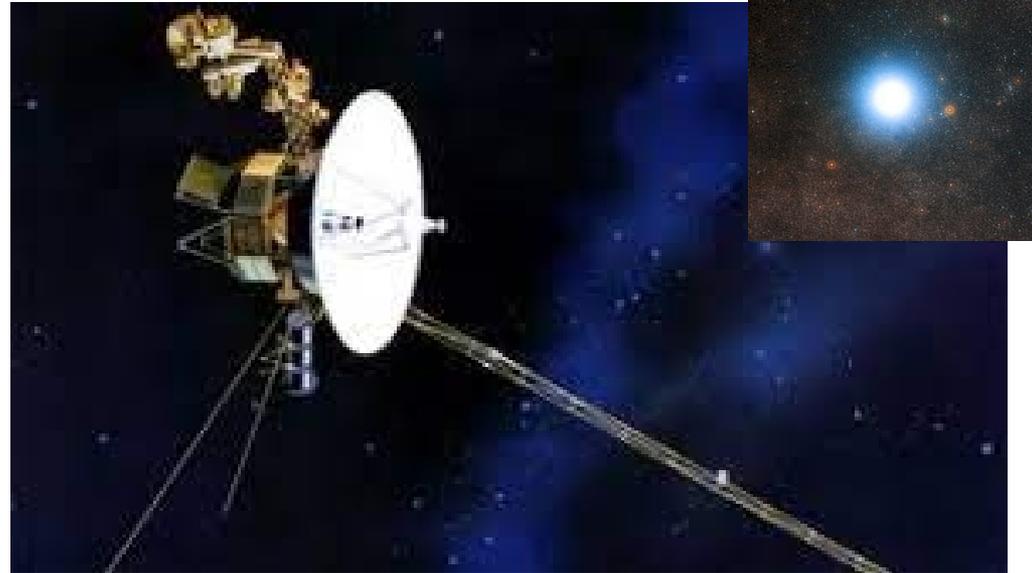
Alpha Centauri

(~4 anni luce di distanza)

in **74000 anni**

Una vela di **10 grammi**
spinta dalla luce del Sole
può farcela in ~ **100 anni**
frenando in arrivo con la
luce di Alpha Centauri

[R. Heller & M. Hippke,
The Astrophysical Journal
Letters **835** (2017) L32]



Pressione della Luce Laser

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

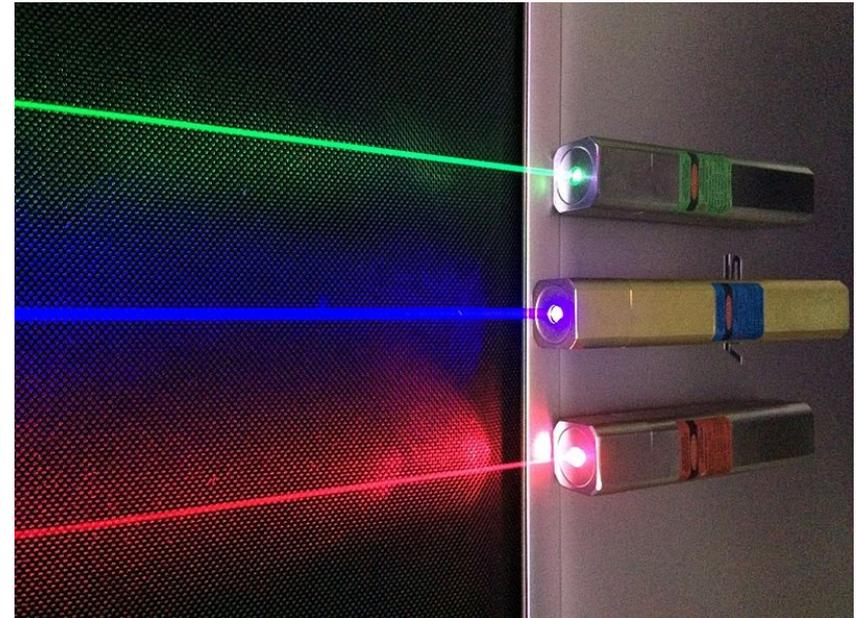
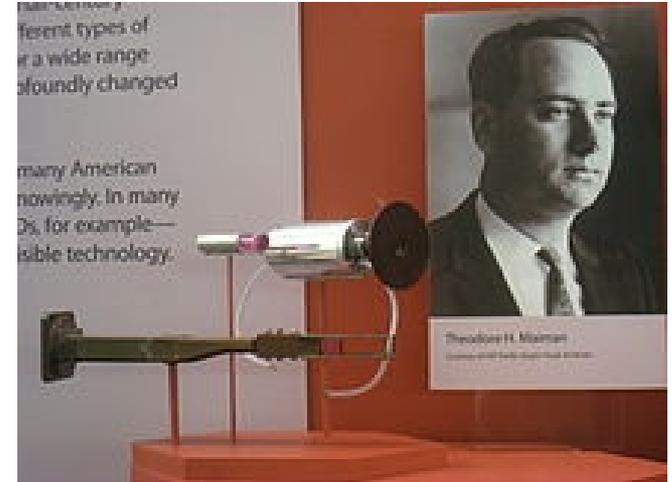
I. d'Haenens a T. H. Maiman (1960)

Un puntatore ha un'intensità simile alla radiazione solare

Record attuale di intensità e pressione corrispondente:

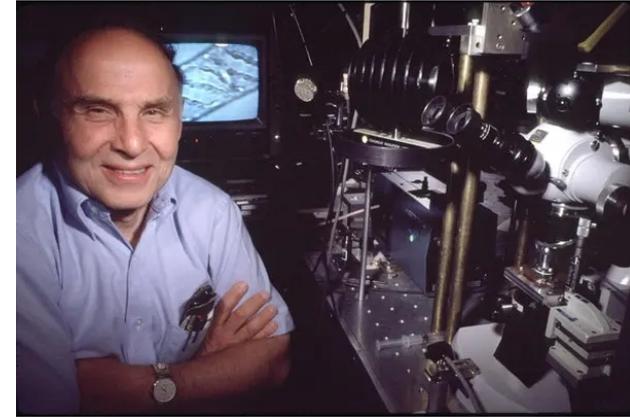
$$I \approx 10^{27} \text{ Watt/m}^2$$

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

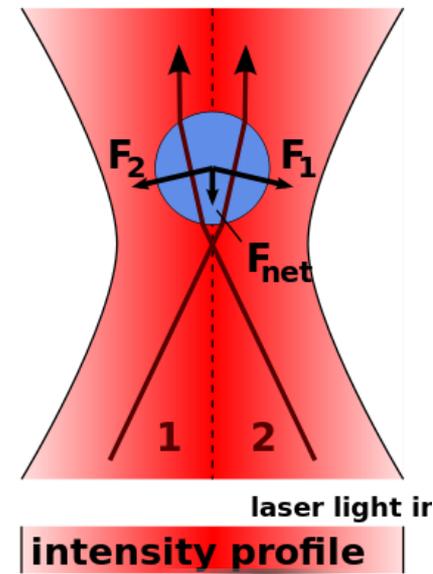
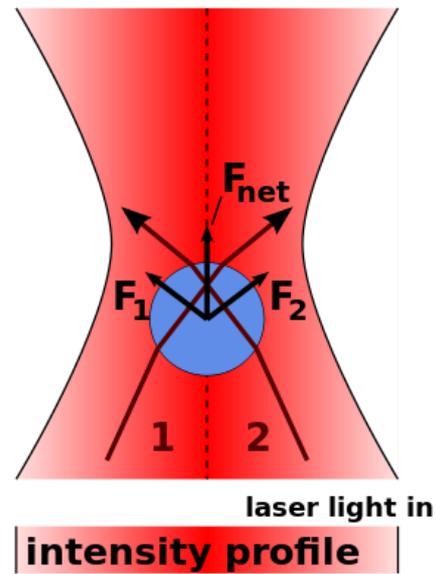
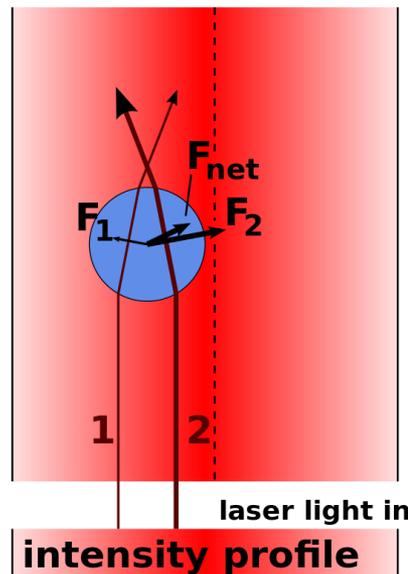
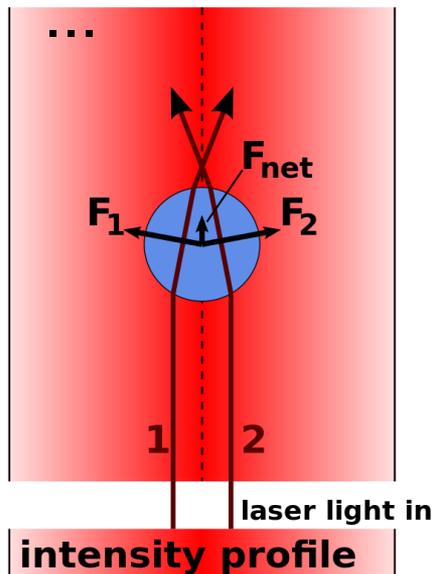


Optical Tweezers (“Pinzette Ottiche”)

La rifrazione della luce in un mezzo genera una forza di pressione. Manipolando spazialmente e temporalmente il profilo di un fascio laser si possono spostare in modo controllato oggetti (sub-)micrometrici ...



Arthur Ashkin (1970)
Premio Nobel 2018



credit: [Roland Koebler](#), wikimedia



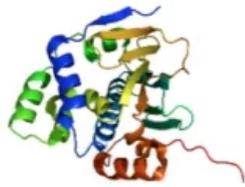
... ad esempio questi

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

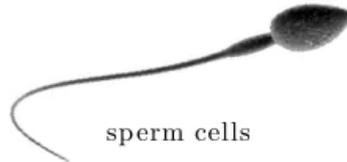
Rayleigh regime

Intermediate regime

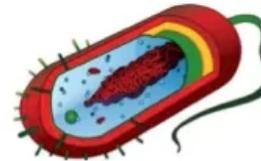
Geometrical optics regime



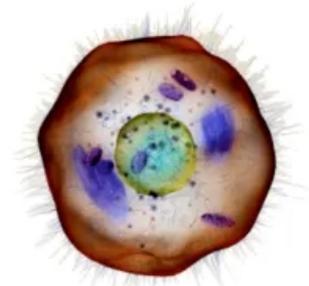
biomolecules



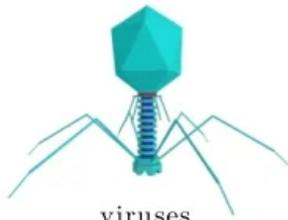
sperm cells



bacteria



eukaryotic cells



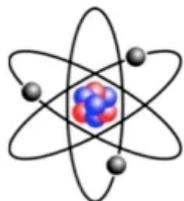
viruses



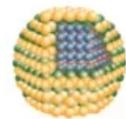
plasmonic nanoparticles



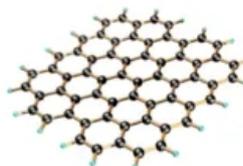
algae



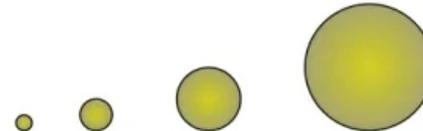
atoms



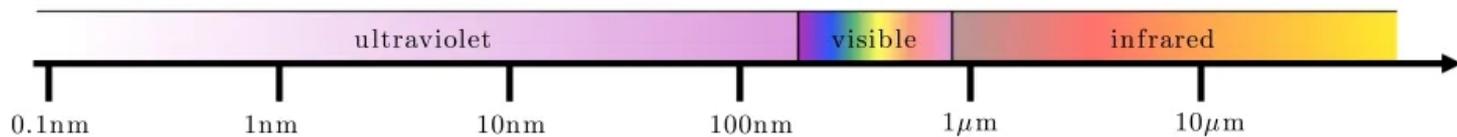
quantum dots



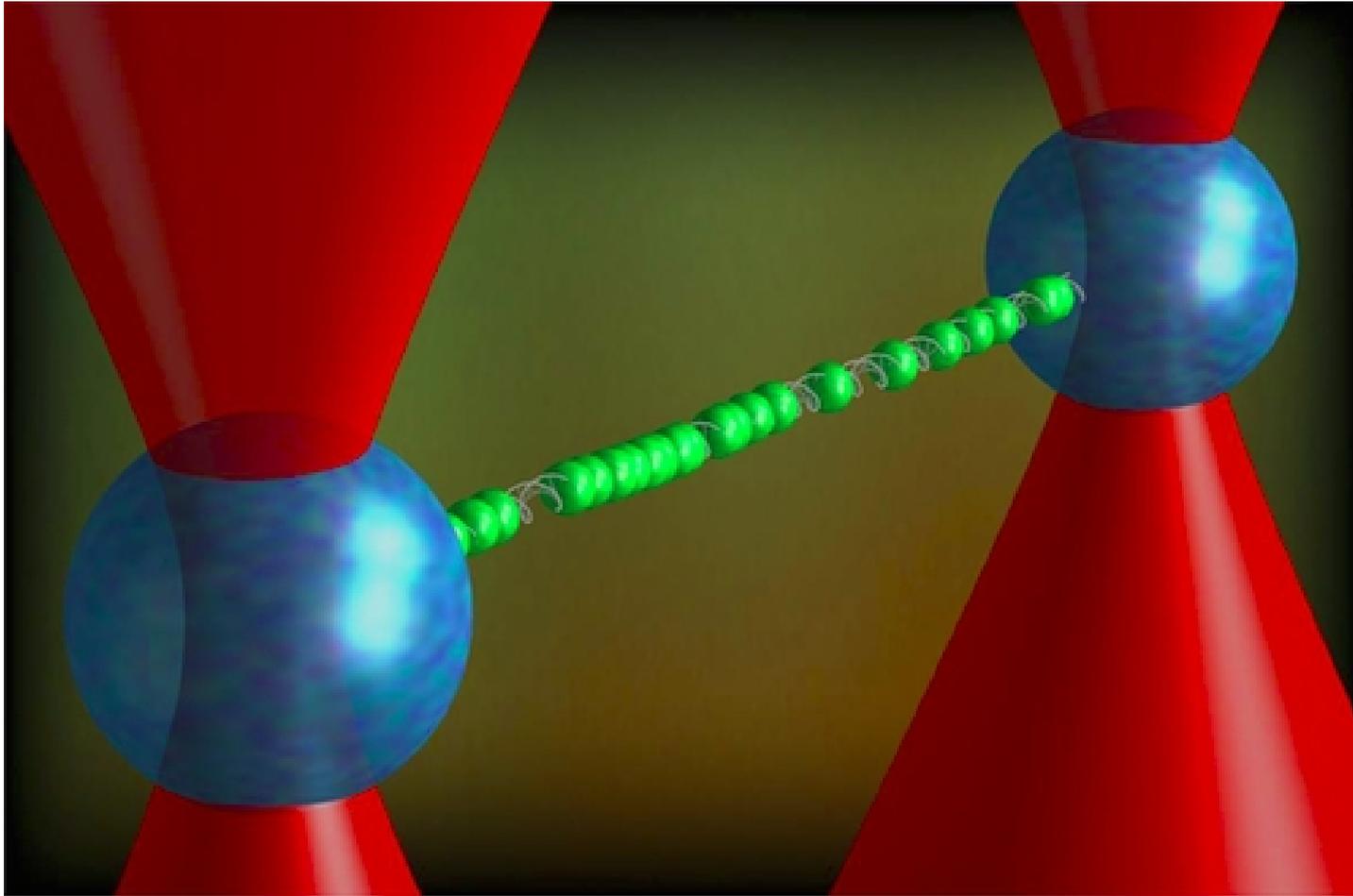
graphene



synthetic colloids



Un tiro alla fune col DNA

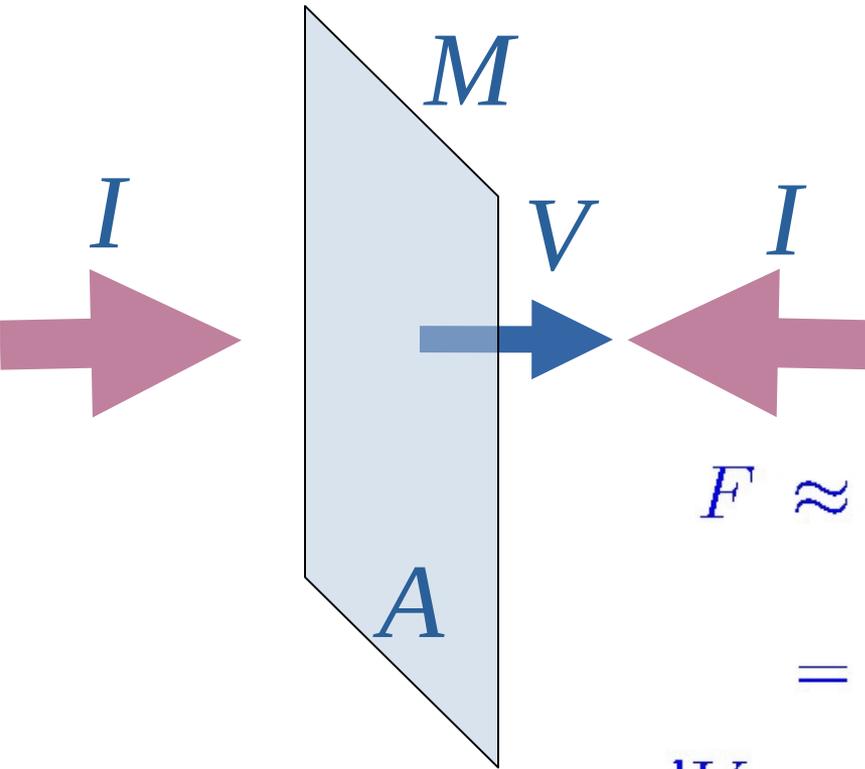


credit: I. Heller/VU Amsterdam

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

"Raffreddamento Laser" di uno Specchio

Su uno specchio in moto la pressione viene modificata dall'effetto Doppler.
Forza di due fasci opposti di eguale intensità I :

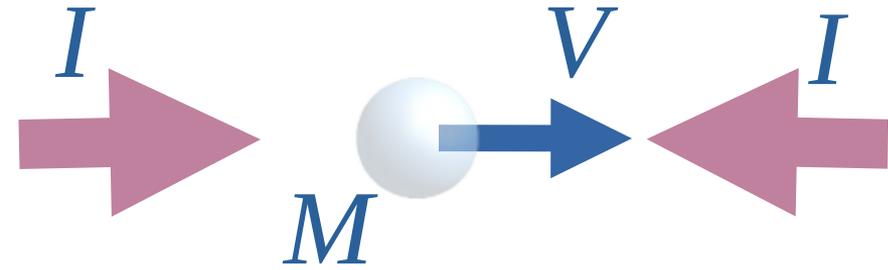


$$F \approx \frac{2IA}{c} \left(1 - \frac{2V}{c}\right) - \frac{2IA}{c} \left(1 + \frac{2V}{c}\right)$$
$$= -\frac{8IA}{c^2} V$$

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

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

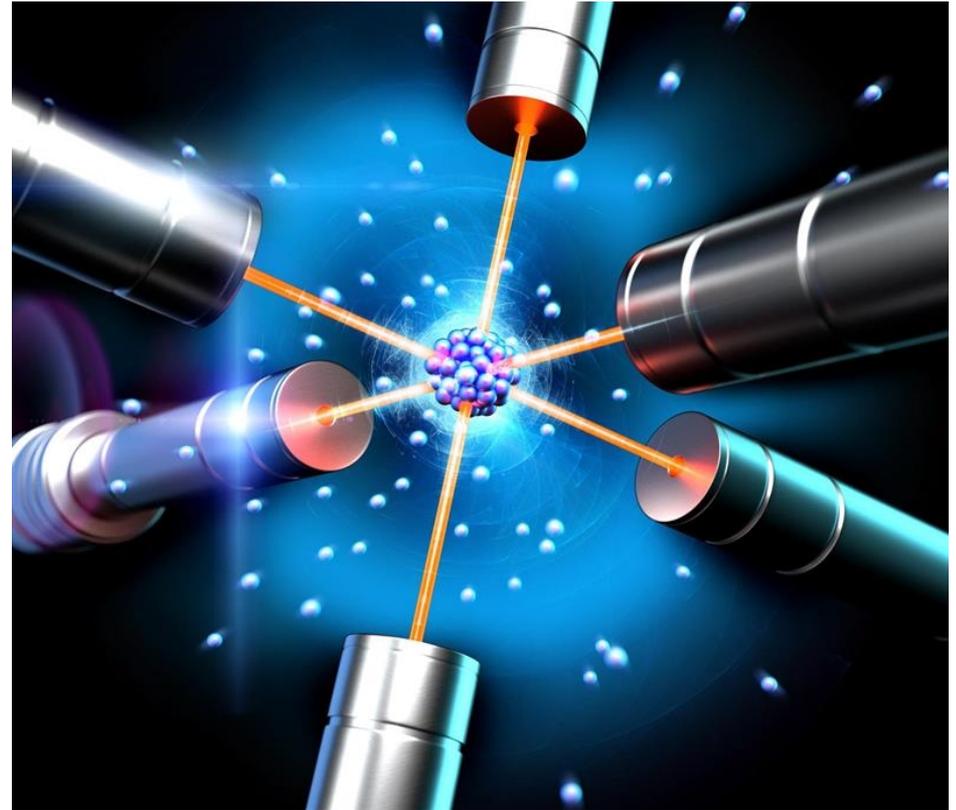
"Raffreddamento Laser" di Atomi



Raffreddamento di atomi
a temperature prossime
allo zero assoluto

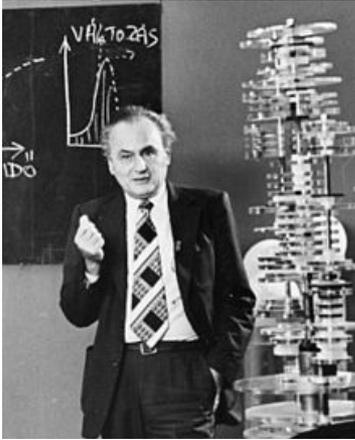
S. Chu, C. Cohen-Tannoudj,
W. Phillips,
Premio Nobel 1997

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

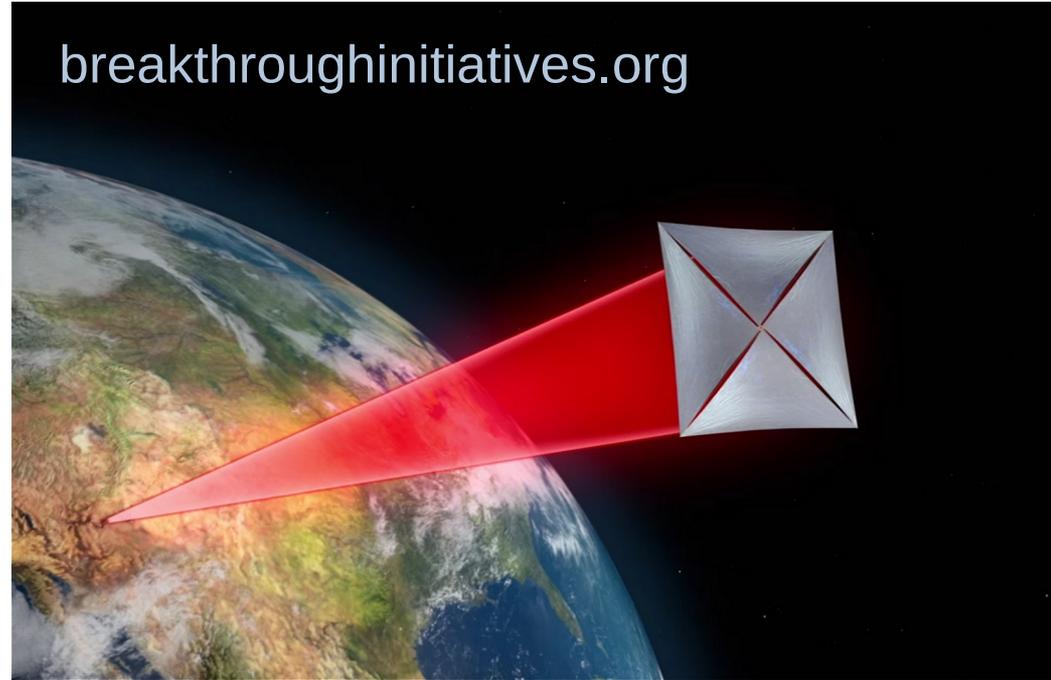


Velieri Stellari a Propulsione Laser?

Idea di György Marx
(1966) [*]: laser gigante
per propulsione da Terra



22



NATURE

JULY 2, 1966 VOL. 211

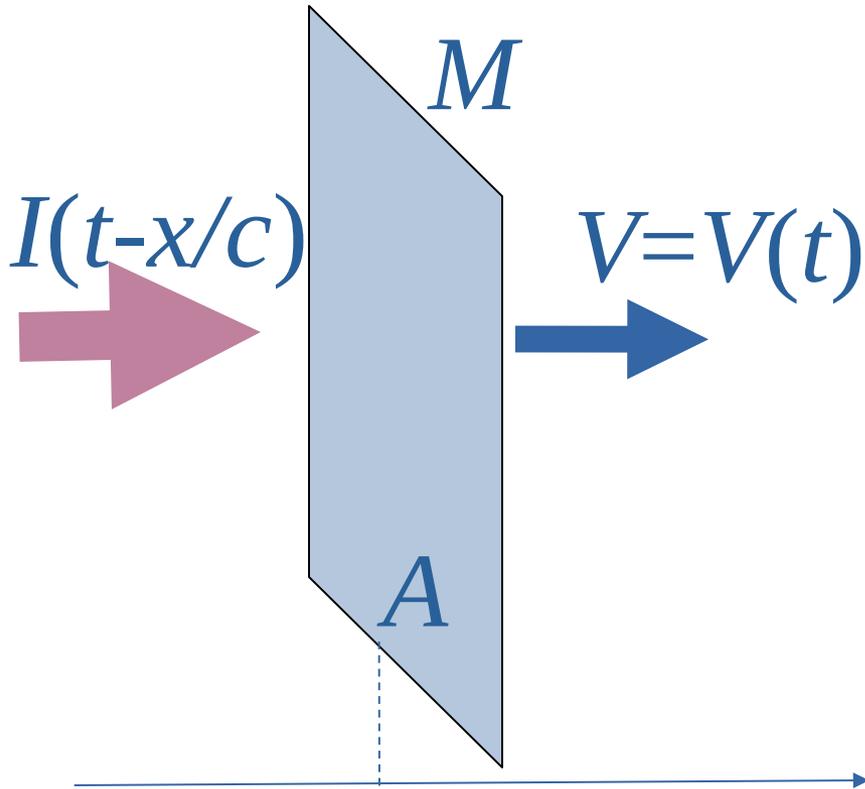
INTERSTELLAR VEHICLE PROPELLED BY TERRESTRIAL LASER BEAM

By PROF. G. MARX

Institute of Theoretical Physics, Roland Eötvös University, Budapest

[*] co-accreditato R. L. Forward (1964)

Specchio in Moto Relativistico



Tenendo conto di:

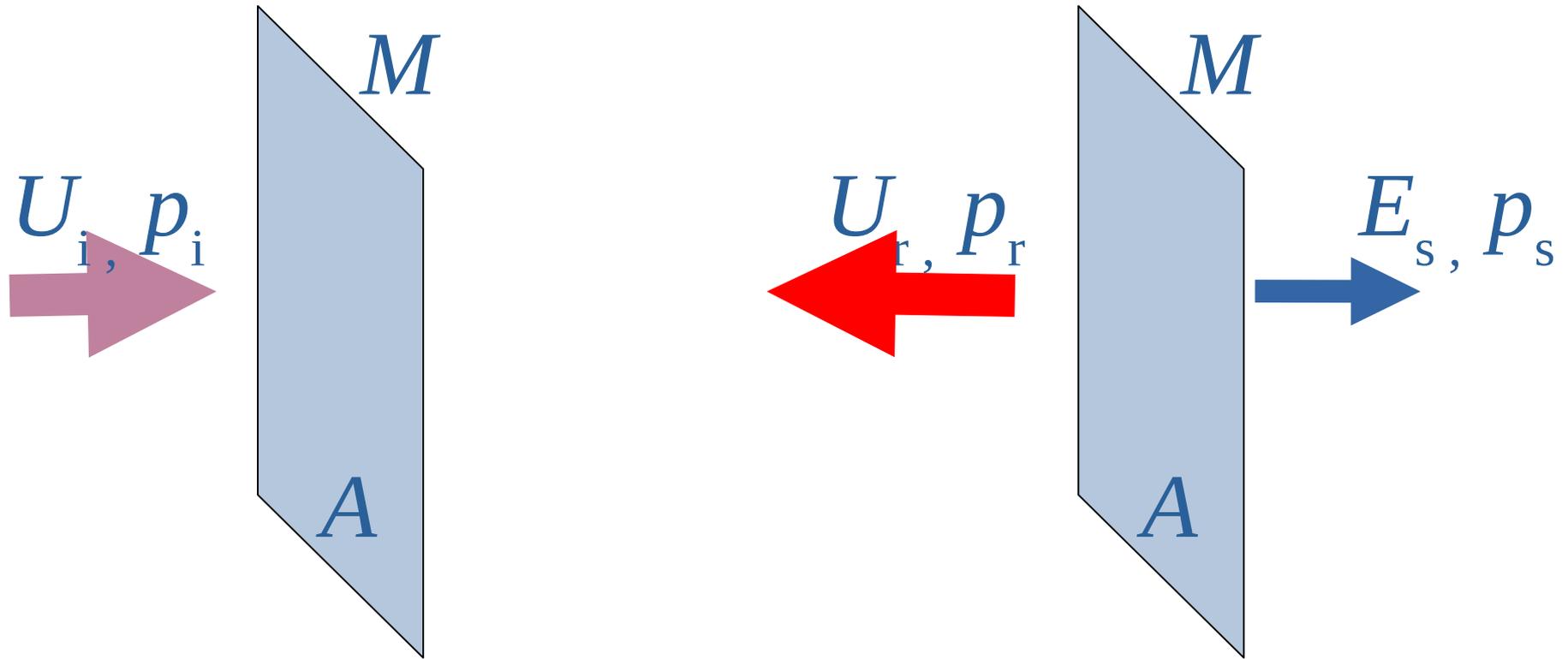
- modifica della pressione sulla superficie in moto
- dilatazione del tempo di interazione (lo specchio "scappa" dalla luce)
- effetto "ritardo" sulla pressione alla superficie

$$X(t) \quad \frac{dp}{dt} = \frac{2A}{c} I \left(t - \frac{X(t)}{c} \right) \frac{c - V}{c + V}$$

Equazioni accoppiate:

$$\frac{dX}{dt} = V = \frac{p}{M\gamma(V)} \quad \gamma(V) = \left(1 - \frac{V^2}{c^2} \right)^{-1/2}$$

Calcolo dalle Leggi di Conservazione



$$0 + p_i = p_s - p_r$$
$$Mc^2 + U_i = E_s + U_r$$

$$U_i = p_i c \quad U_r = p_r c$$
$$E_s = (p_s^2 c^2 + M^2 c^4)^{1/2}$$

Una Controversia

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.

Errori di calcolo e concettuali di Marx e di un suo "correttore"
(Redding, Nature **213** (1967) 588) rivisti e discussi in:
Simmons & McInnes, *American. J, Phys.* **61**, 205 (1992)
"Whatever his mistakes, at least Marx was more right than his critics!"

Breakthrough Starshot (2016)

vele-sonda su α -Centauri in 20 anni ?



Yuri Milner Freeman Dyson
Stephen Hawking



Mark Zuckerberg

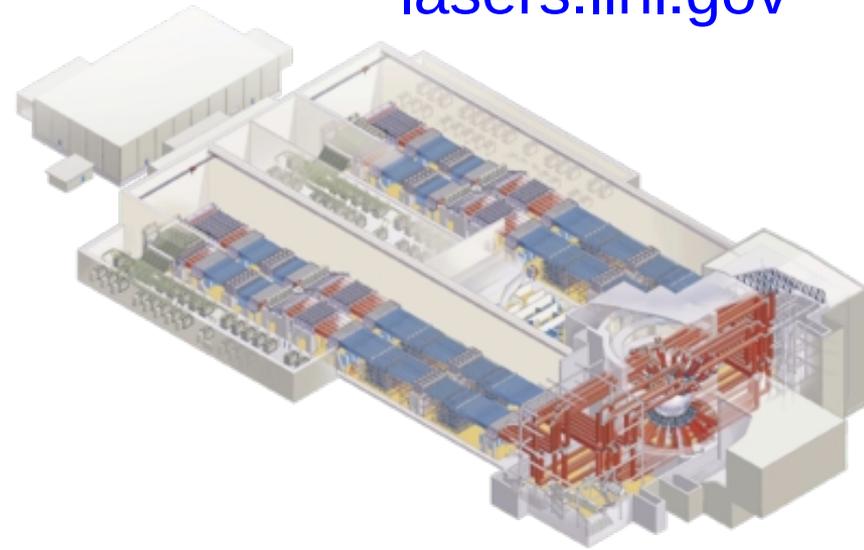
Le Scienze, 21/01/17 e 03/05/2017

Il Più Grande Laser al Mondo ...

National Ignition Facility (USA):
un impulso laser al giorno con
 $\approx 10^6$ Joule in $\approx 10^{-9}$ secondi

Costo: ~1 miliardo \$ (costruzione)
~1 milione \$/impulso
(produzione: ~1 impulso/giorno)

lasers.llnl.gov



13/12/2022

The New York Times

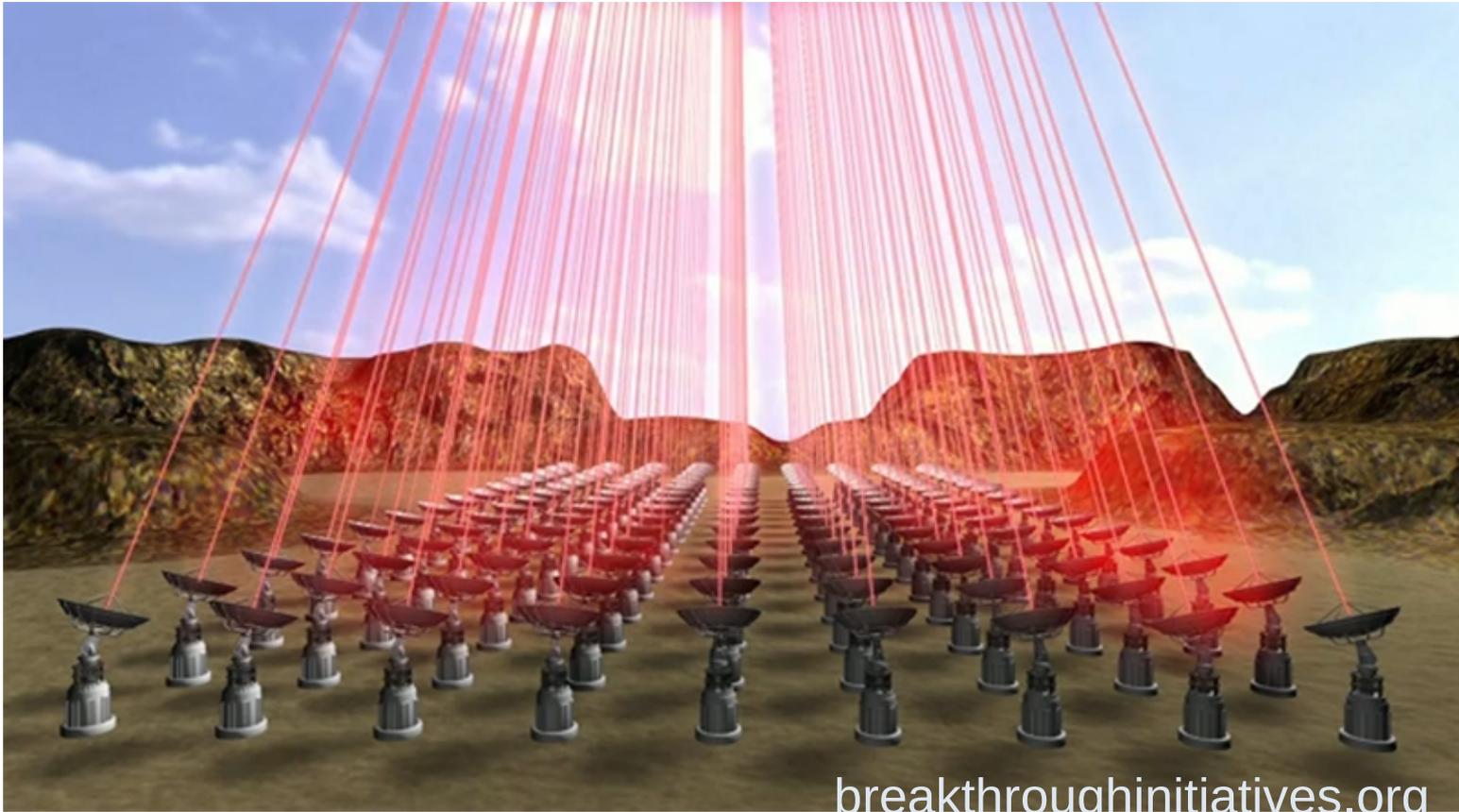
SUBSC

Scientists Achieve Nuclear Fusion Breakthrough With Blast of 192 Lasers

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

Usato per
"accendere"
la Fusione
Nucleare
per produrre
energia

Un Laser Troppo "Gigante"



Laser per Breakthrough Starshot: $\approx 10^{13}$ J in $\approx 10^2$ s
(> 1 milione di volte la scala di NIF - laser più grande al mondo)
Stima (ottimistica) costo: ~ 100 miliardi \$

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

Nel Nostro Piccolo: *Light Sail* “da Tavolo”

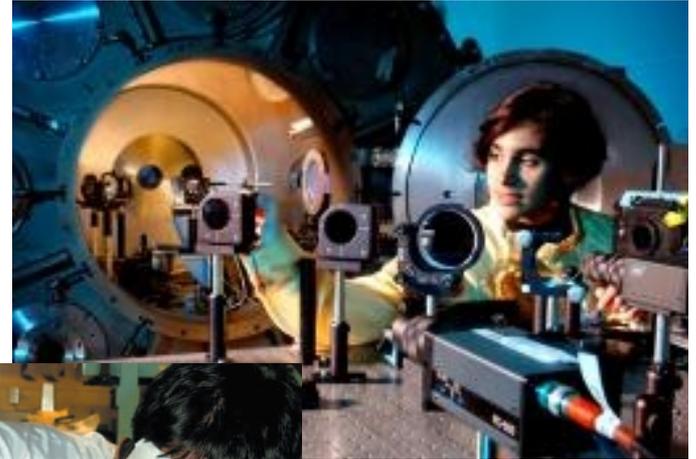
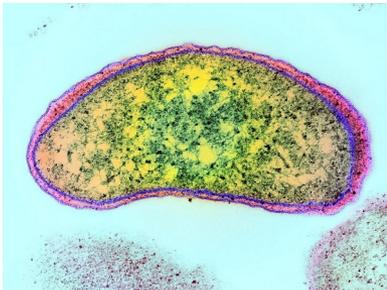
Impulso laser: energia ≈ 10 J
durata ≈ 10 femtosecondi $= 10^{-14}$ sec
focalizzabile su $\approx 10 \mu\text{m}^2 = 10^{-11} \text{m}^2$
 (“volume focale” \sim un batterio)

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* “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

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

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

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

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

\rightarrow possibile accelerare a $V=0.3c$

$\approx 10^{-14}$ g di materia ($\approx 10^{14}$ protoni)

ad alta ripetizione (>10 impulsi/sec)

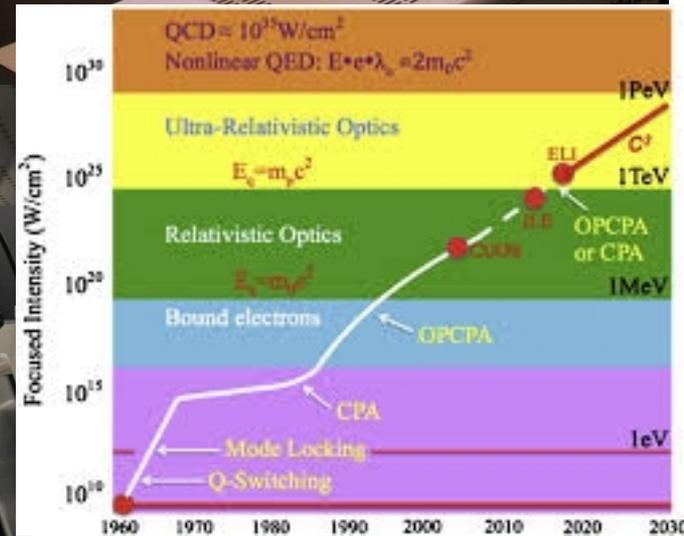
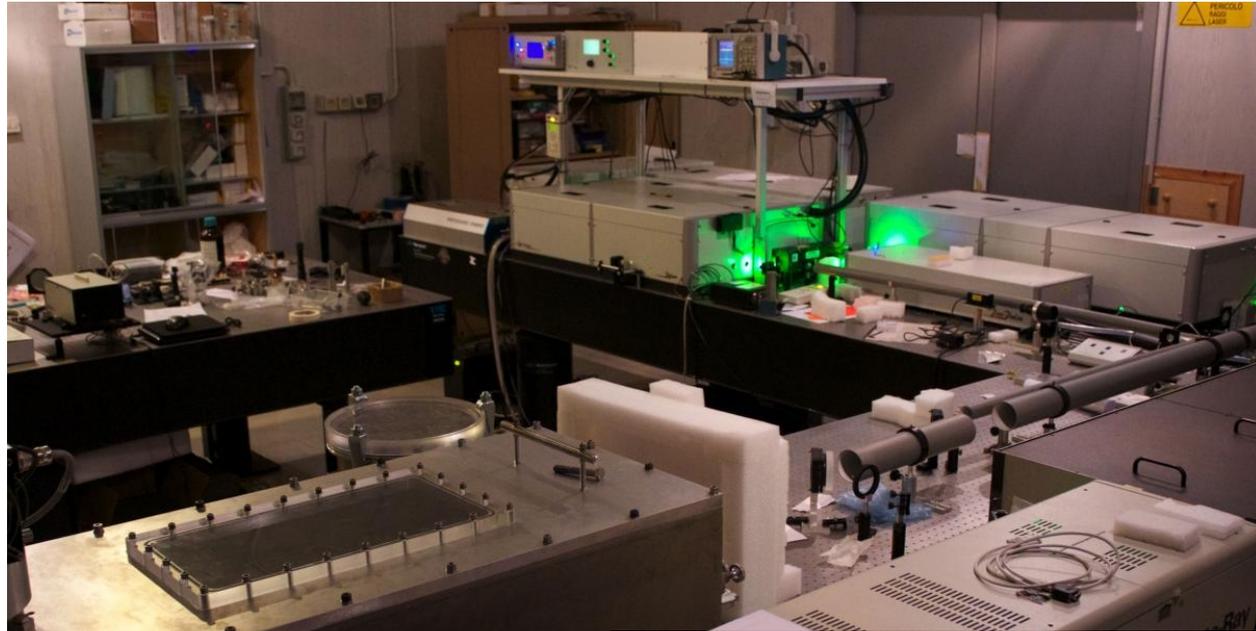
su una lunghezza di ≈ 100 micron $= 0.1$ mm



Nel Nostro Piccolo: *Light Sail* “da Tavolo”

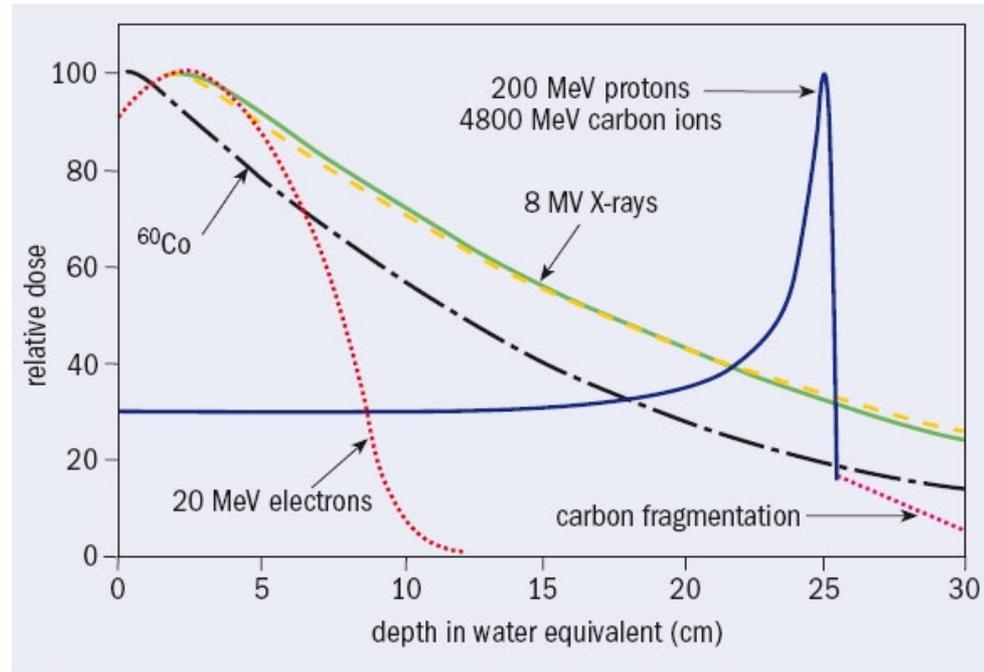
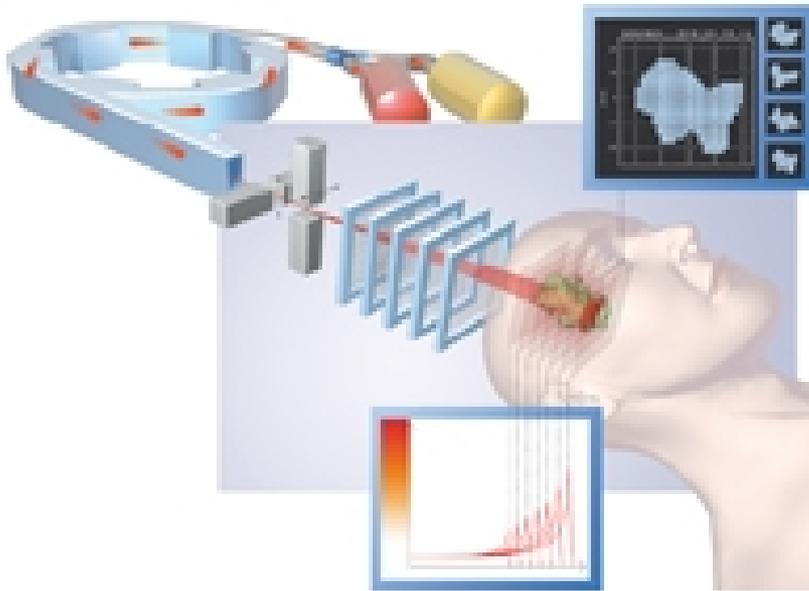
Sistema laser,
laboratorio ILIL,
CNR/INO, Pisa:
qualcosa come
NIF ... in scala
1:(1 milione)

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



Perché un Acceleratore Laser di Ioni?

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



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

Perché un Acceleratore Laser di Ioni?

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?

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)

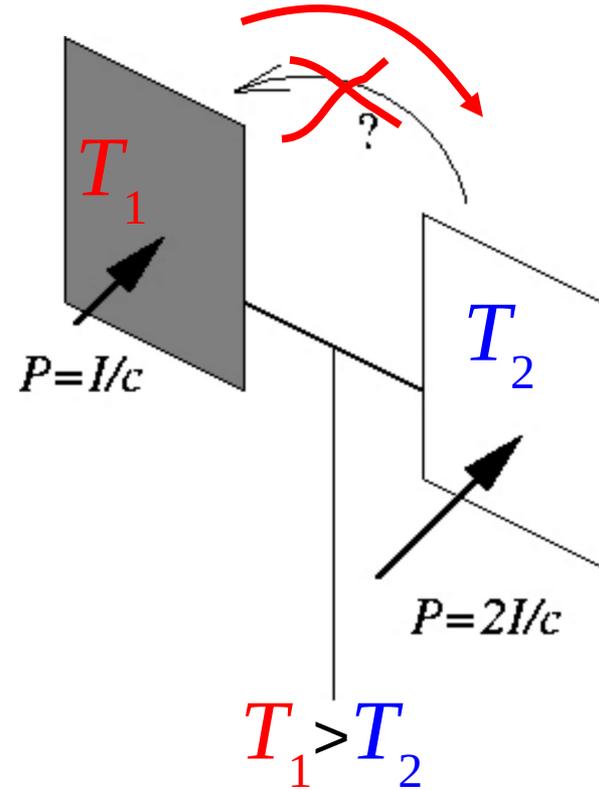
Studi preliminari suggeriscono vantaggi nell'uso di fasci impulsati di breve durata ed altissima intensità (o dose), ottenibili in particolare con accelerazione laser

Pressione della Luce vs. Termica

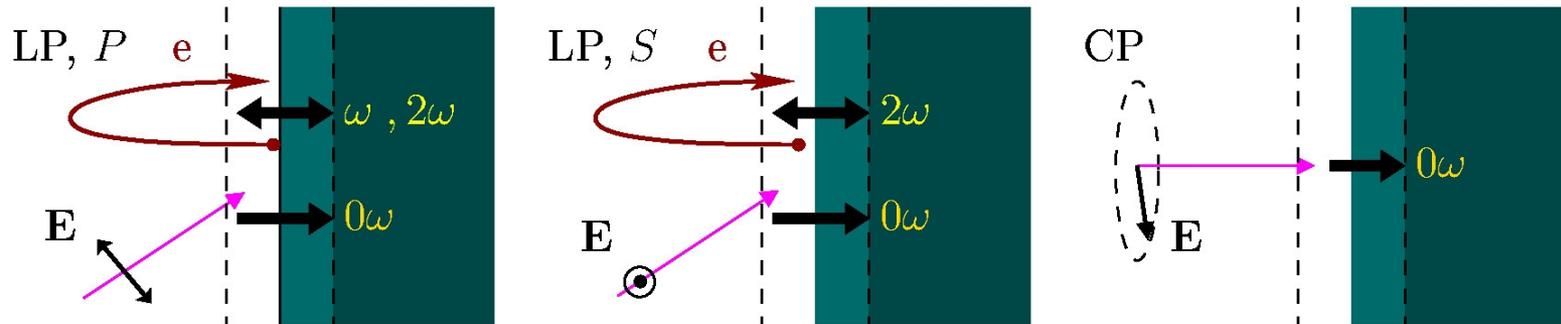
Mulino ottico:

la pressione della luce è doppia sulla superficie bianca ($R=1$) che sulla nera ($R=0$) MA il mulino gira nel senso opposto alla previsione!

Il maggior riscaldamento alla superficie nera causa differenze nella pressione termica nel gas circostante maggiori di quella della luce.



Riscaldamento Ridotto in Polarizzazione Circolare



Gli elettroni vengono scaldati da oscillazioni non-adiabatiche indotte dalle componenti oscillanti della forza di Lorentz, che sono nulle per polarizzazione circolare a incidenza normale
 AM, F.Cattani, T.V.Liseykina, F. Cornolti, *Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 185003
 + vari altri articoli ...

“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)

Polarization Dependence of Bulk Ion Acceleration from Ultrathin Foils Irradiated by High-Intensity Ultrashort Laser Pulses

C. Scullion,¹ D. Doria,^{1,*} L. Romagnani,² A. Sgattoni,^{3,†} K. Naughton,¹ D. R. Symes,⁴ P. McKenna,⁵
A. Macchi,^{3,6} M. Zepf,^{1,7} S. Kar,¹ and M. Borghesi^{1,‡}

¹Centre for Plasma Physics, School of Mathematics and Physics, Queen's University Belfast, Belfast BT7 1NN, United Kingdom

²LULI, École Polytechnique, CNRS, Route de Saclay, 91128 Palaiseau Cedex, France

³Istituto Nazionale di Ottica, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR/INO), Laboratorio Adriano Gozzini, 56124 Pisa, Italy

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

⁵SUPA, Department of Physics, University of Strathclyde, Glasgow G4 0NG, United Kingdom

⁶Dipartimento di Fisica Enrico Fermi, Università di Pisa, 56127 Pisa, Italy

⁷Helmholtz Institute Jena, 07743 Jena, Germany

Energie maggiori per polarizzazione circolare

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. Booth,⁴ E. J. Ditter,⁵ O. C. Ettlinger,⁵
G. S. Hicks,⁵ P. Martin,¹ G. G. Scott,⁴ S. D. R. Williamson,⁶ A. Macchi,^{7,8} P. McKenna,⁶ Z. Najmudin,⁵ D. Neely,^{4,*}
S. Kar,¹ 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

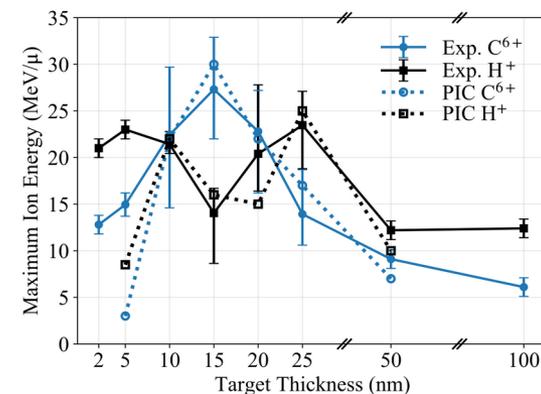
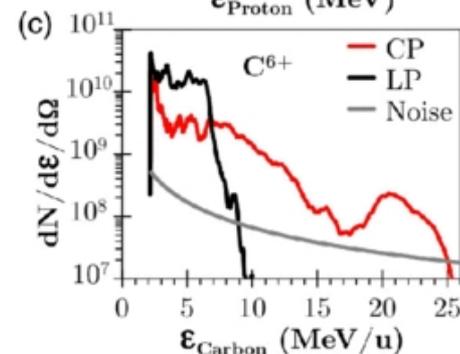
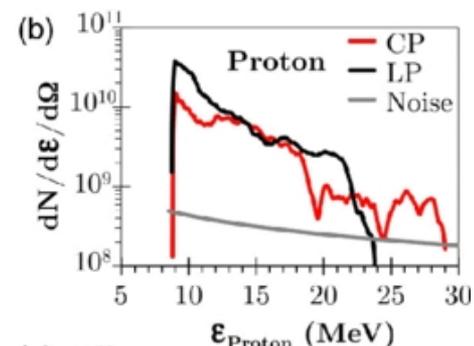
⁴Central Laser Facility, Rutherford Appleton Laboratory, Oxfordshire OX11 0QX, United Kingdom

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



Accelerazione "selettiva" di ioni di Carbonio

Interesse FLASH-stimolato ...



PARTICLE THERAPY | RESEARCH UPDATE

Intense radiation pressure enables selective acceleration of carbon ion beams

07 Dec 2021

Mirror

Irish boffins' laser to help beat cancer

Physics Today **75**, 1, 19 (2022); <https://doi.org/10.1063/PT.3.4916>

A laser selectively kicks carbon out of a foil

Experiments and simulations show how the shape of a laser's profile determines which target atoms make up the resulting ion beam.



Physics

A New Trick to Make Short-Pulse Ion Beams

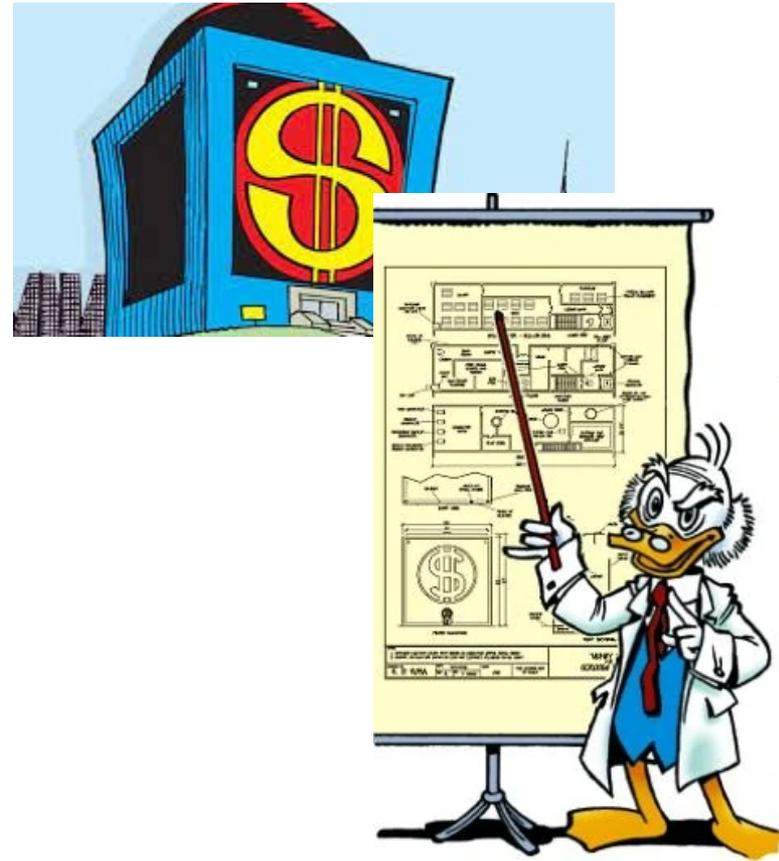
A new laser technique could lead to ultrashort-pulse, high-energy ion beams for medical use.

Dal Mediterraneo alle Stelle?

Immaginiamo:

- soldi trovati
- laser supergigante costruito
- tecnologia necessaria sviluppata

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

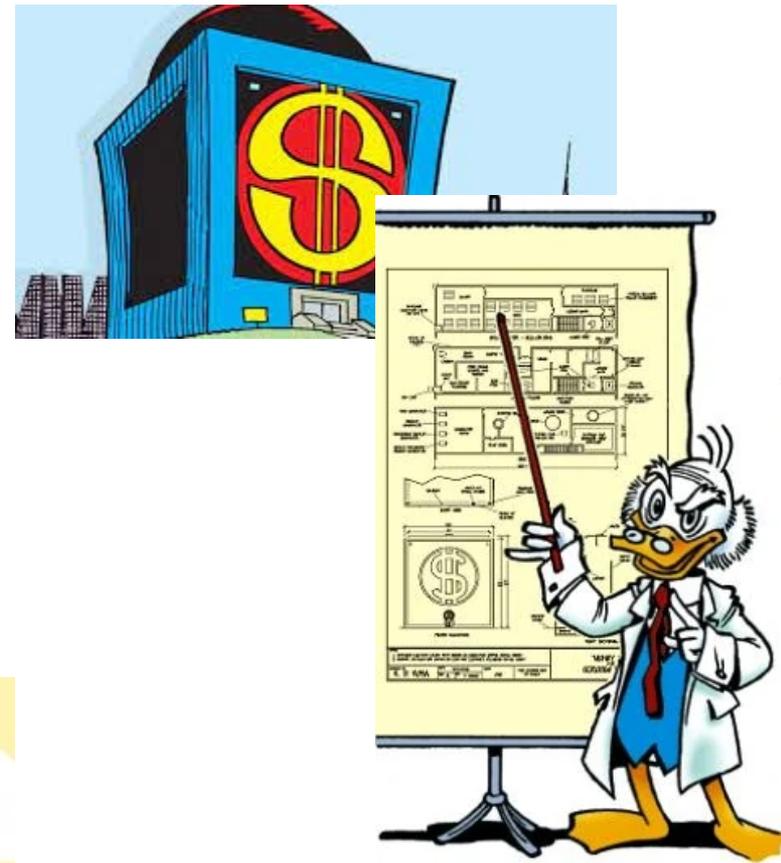


Dal Mediterraneo alle Stelle?

Immaginiamo:

- soldi trovati
- laser supergigante costruito
- tecnologia necessaria sviluppata

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



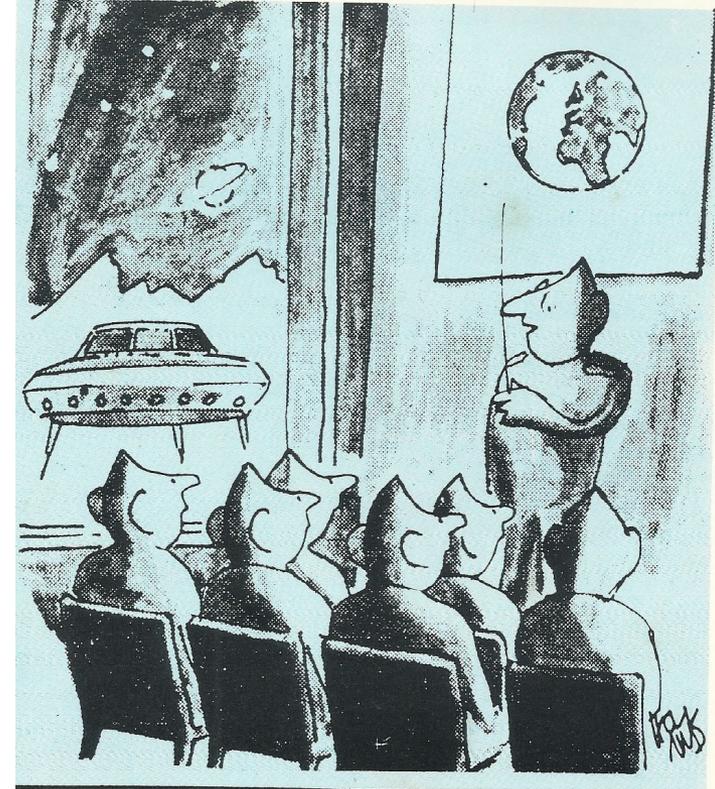
... come **fermarsi**
all'arrivo?

... 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]



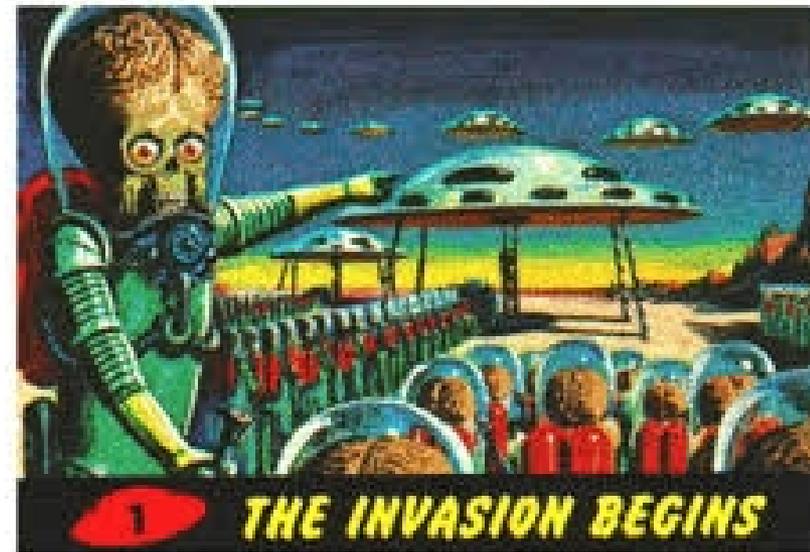
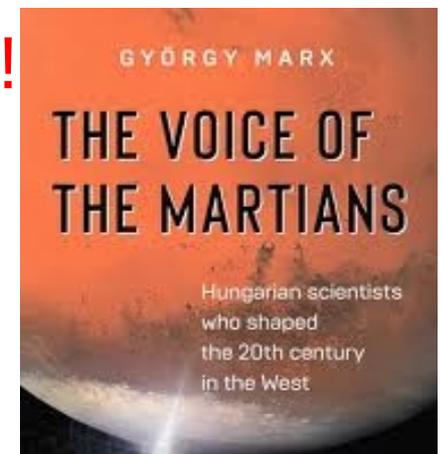
da: F. Bandini, “Il mistero dei dischi volanti”
(Giunti & Nardini, 1971; Mursia, 2016)

... 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]



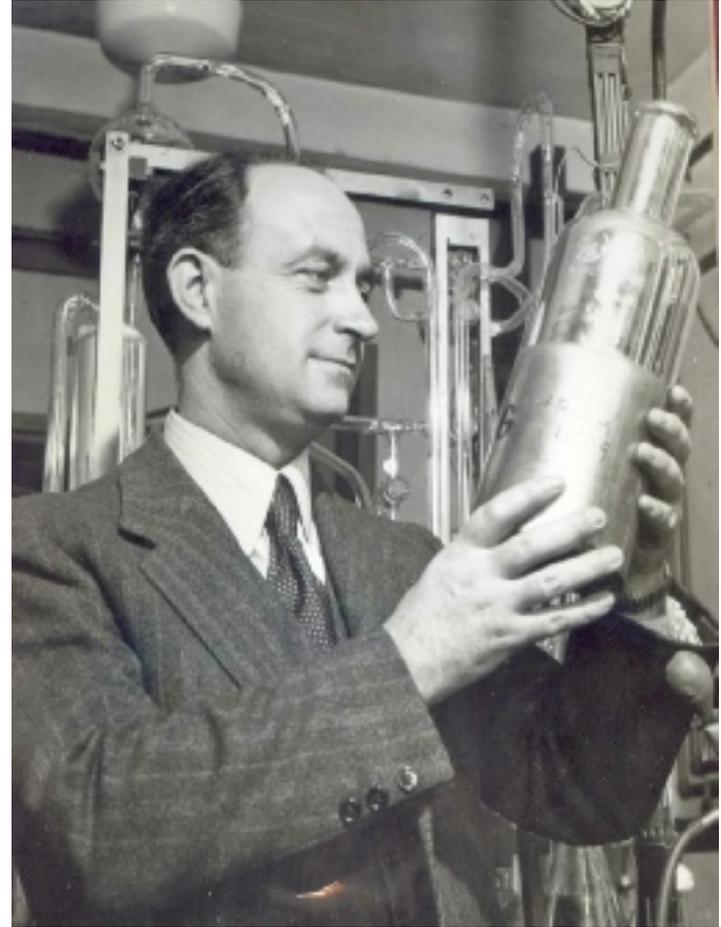
“Nessun pianeta potrebbe essere invaso da visitatori inaspettati dallo spazio esterno, il che può forse spiegare perché non c'è stata sinora alcuna evidenza di tali invasioni”

Questa è una Possibile Soluzione per il ...

Paradosso di Fermi

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

Enrico Fermi (1950)



... ma Forse gli Alieni Navigano Comunque!

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]”

Almeno Siamo al Sicuro da Invasori Ostili ...



BRIGHT
LA NOTTE EUROPEA DELLE RICERCATRICI E DEI RICERCATORI IN TOSCANA
28 - 29 SETTEMBRE 2018
ESIBIZIONI, ESPERIMENTI, SEMINARI, SPETTACOLI



**LA PRIMAVERA
DELLA RICERCA**

Una giornata dedicata alla scienza
per i cento anni del CNR

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

Andrea MACCHI
(CNR, Istituto nazionale di Ottica)



Altra Terra Dove Andare?

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

Anche se la propulsione laser consentirà viaggi interstellari **non** potremo **colonizzare** altri pianeti **ma** solo essere **accolti** da civiltà tecnologicamente avanzate quanto la nostra (e **disposte a farlo**)



Questo può ricordarci che ogni essere umano (e tutto il genere umano) è un potenziale migrante.

*“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)

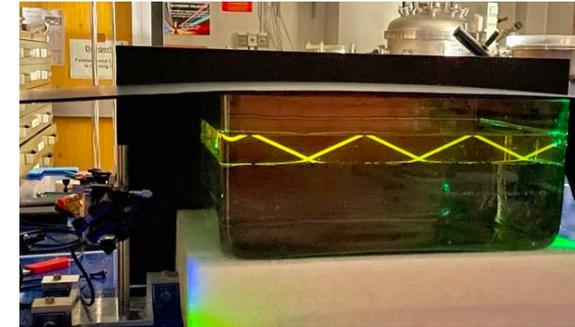
EXTRA SLIDES

Pressione dalla Rifrazione della Luce

La luce si “confina” nei mezzi con maggiore indice di rifrazione n (esempio: fibra ottica)

Cambio di direzione e intensità dei raggi

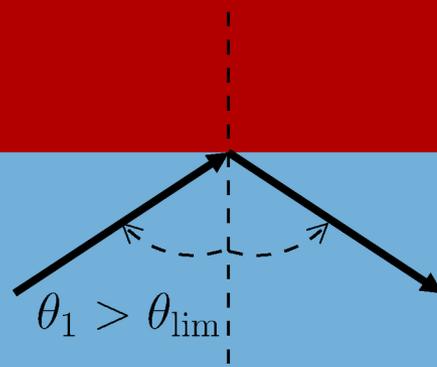
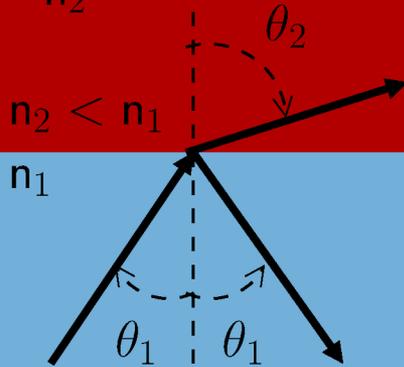
→ trasferimento di q.d.m. EM al mezzo



Dimostrazione pratica con strato di olio su acqua:
Simona Piccinini,
CNR/INO

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

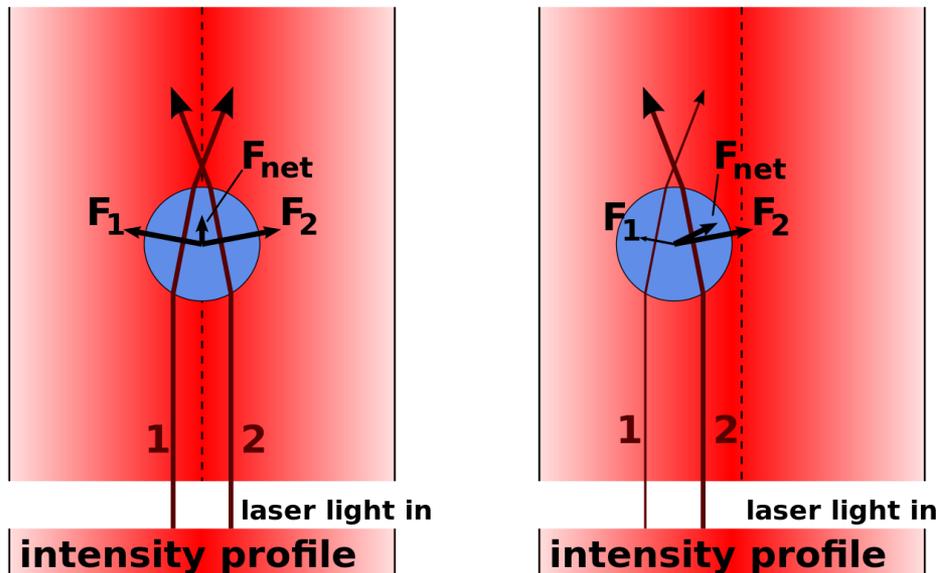
$$\sin \theta_{\text{lim}} = \frac{n_2}{n_1}$$



Legge di Snell e riflessione totale (“interna”)

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

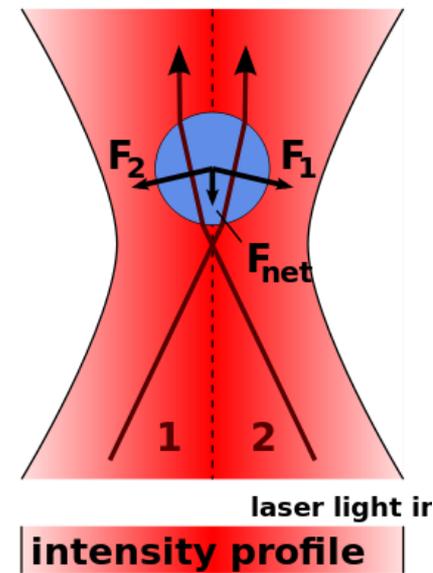
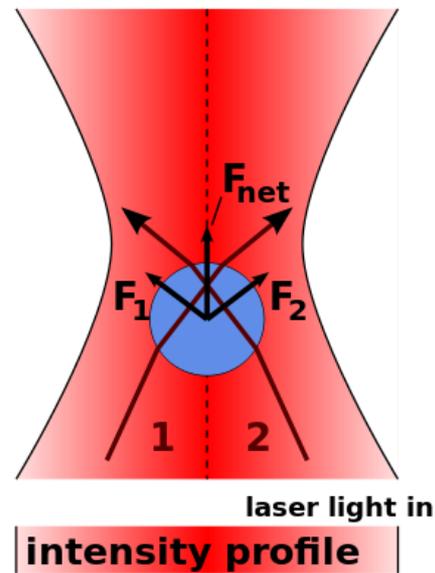
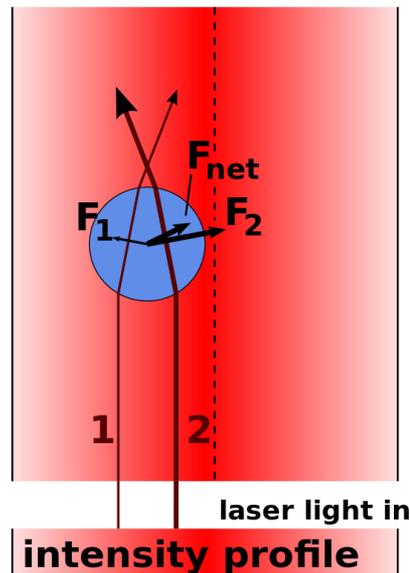
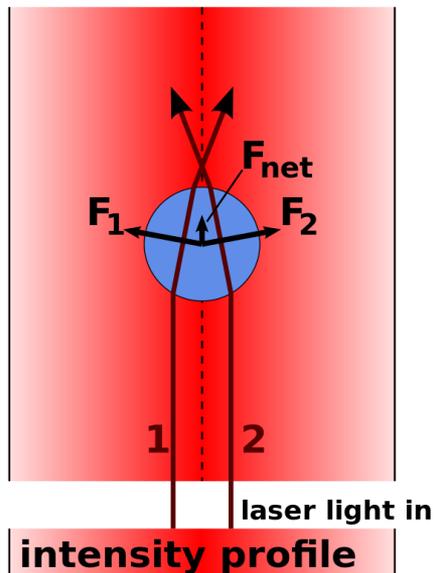


credit: [Roland Koebler](#), wikimedia

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

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 $t+dt$

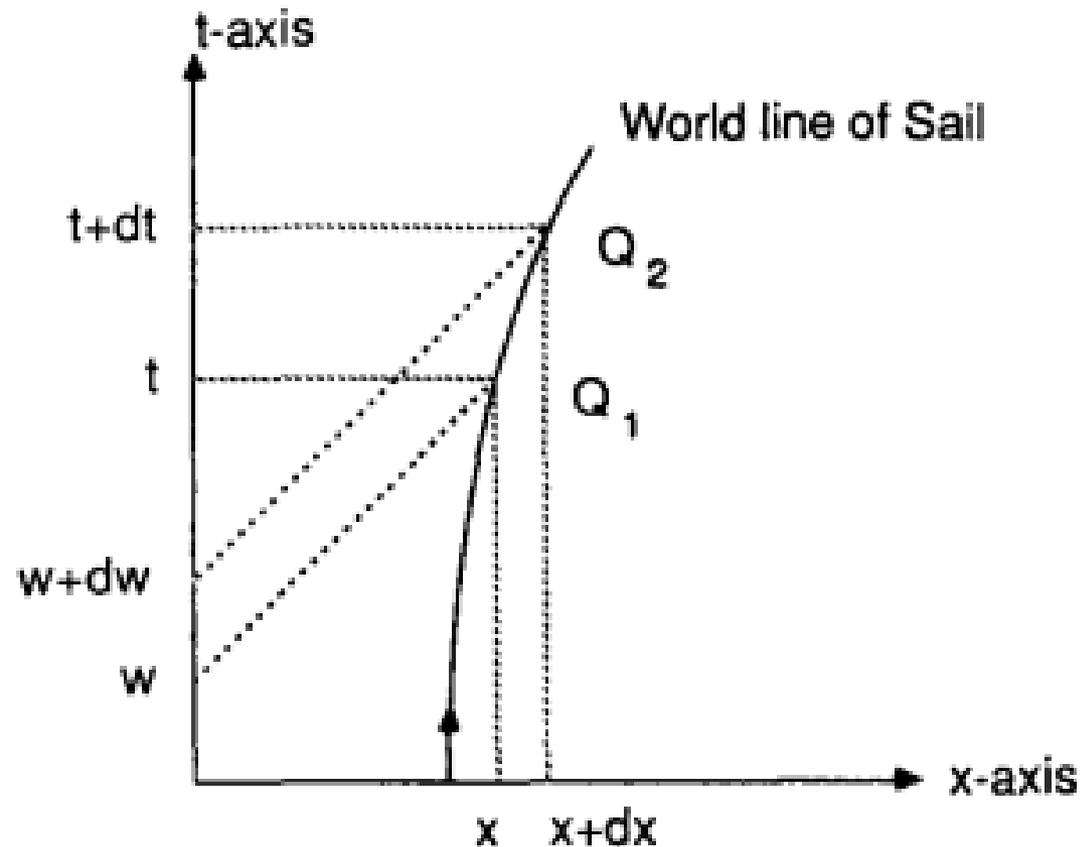
("eventi" Q_1 e Q_2)

sono stati emessi

tra w e $w+dw$

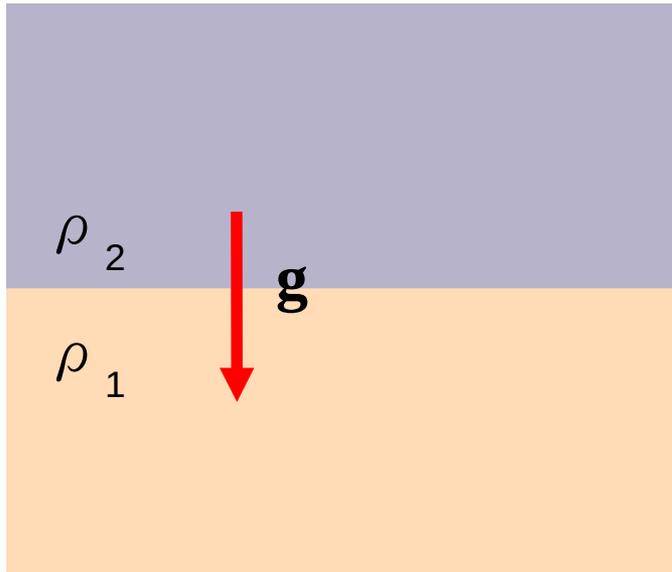
$$(w=t_r = t-x/c)$$

Le energie devono essere confrontate tra questi intervalli



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

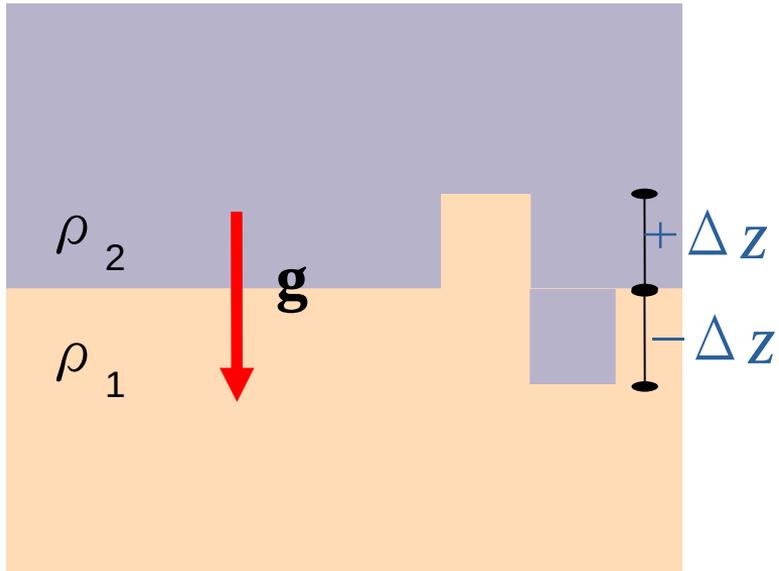
Instabilità di Rayleigh-Taylor



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

$$\rho_2 > \rho_1$$

Instabilità di Rayleigh-Taylor



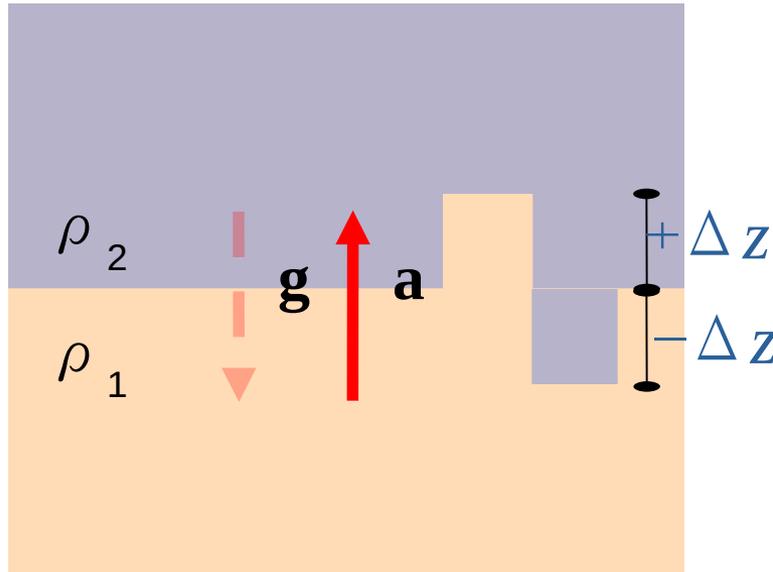
Fluido pesante (2) sopra fluido leggero (1) nel campo di gravità g :

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

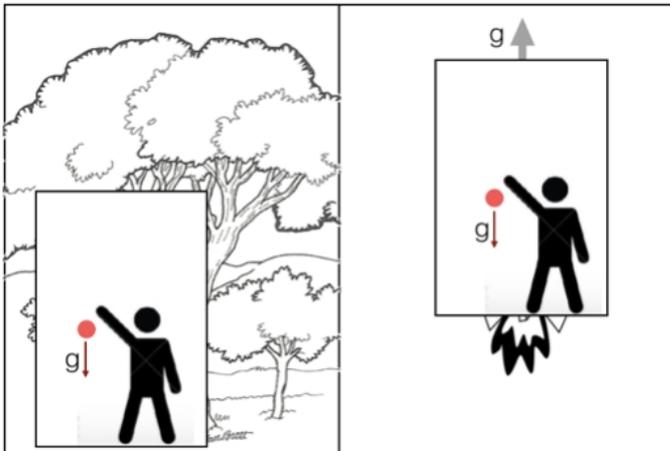
$$\Delta U \propto (\rho_1 - \rho_2)g\Delta z < 0$$



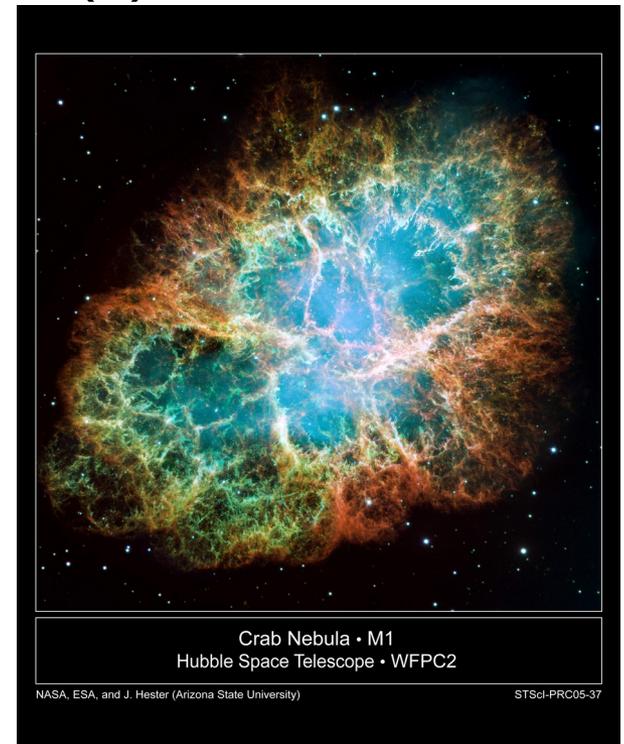
Instabilità di Rayleigh-Taylor



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

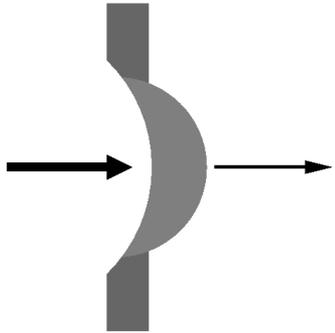


Crab Nebula • M1
Hubble Space Telescope • WFPC2

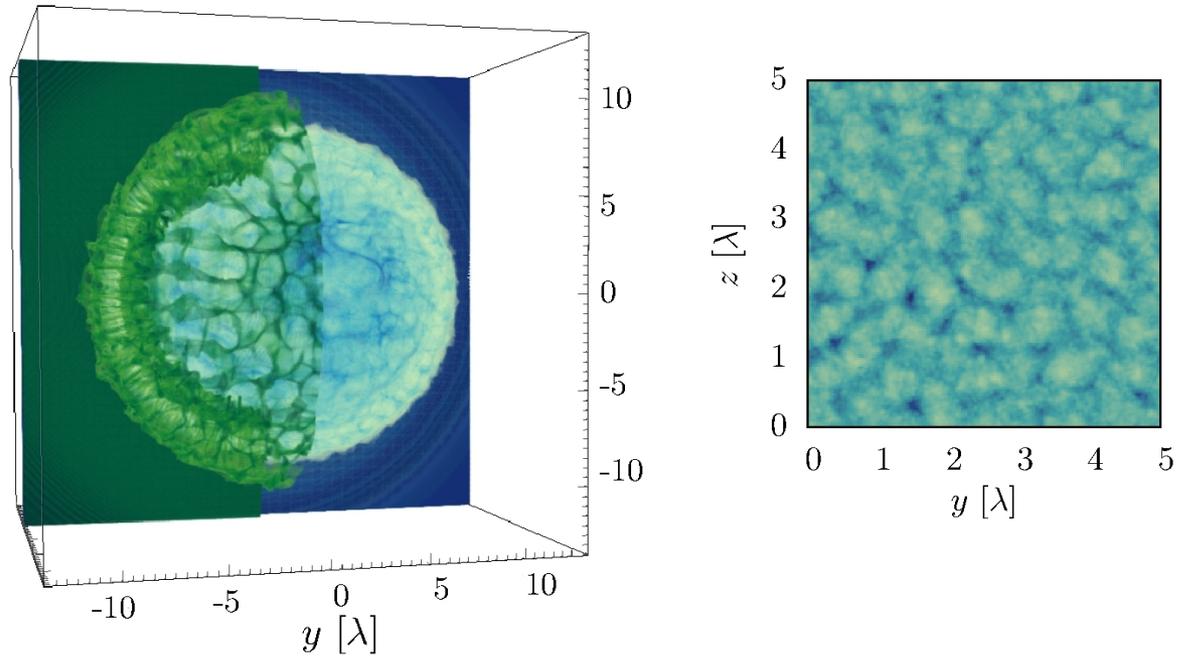
NASA, ESA, and J. Hester (Arizona State University)

STScI-PRC05-37

Instabilità R-T della *Light Sail* (simulazioni 3D)

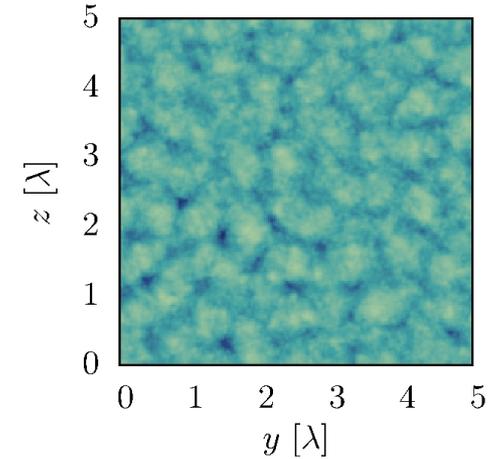
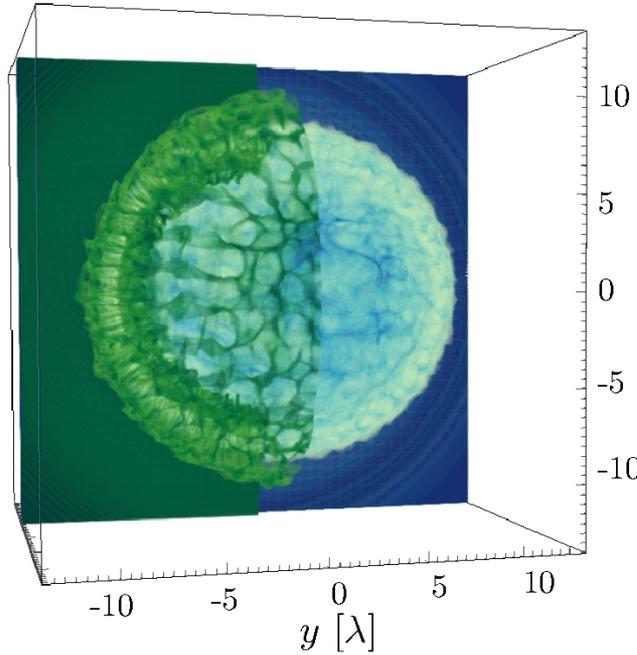
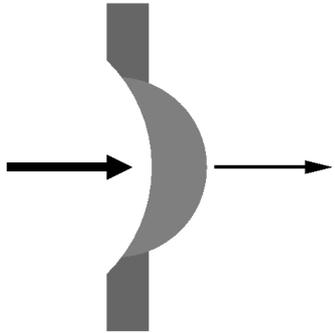


A. Sgattoni, S. Sinigardi,
L. Fedeli, F. Pegoraro,
A. Macchi,
Physical Review E
91 (2015) 013106

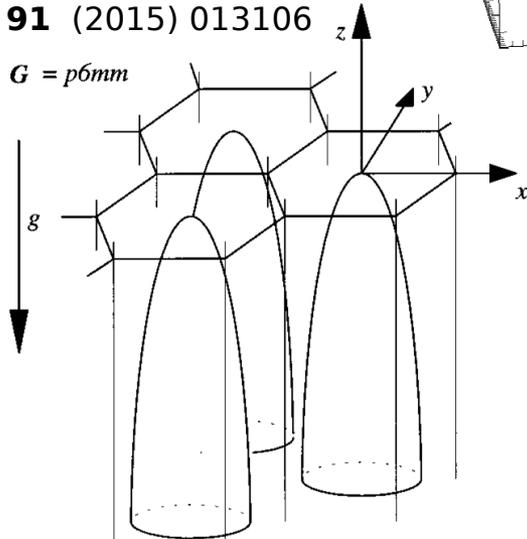


Sviluppo di increspature di dimensioni
 \sim lunghezza d'onda del laser per
"risonanza" con onde EM di superficie

Instabilità R-T della *Light Sail* (simulazioni 3D)



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



$$G = p\delta mm$$

Formazione di strutture esagonali: una
“Rottura spontanea di simmetria”



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

www.ino.cnr.it





ALLIES of LIGHT



CNR-INO

ISTITUTO NAZIONALE DI OTTICA
CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE