



A vela con la luce, dal cosmo al laboratorio e ritorno

Relatore:

Andrea Macchi
(CNR/INO, Pisa)

Evento:

Giornata Galileiana 2022
Università di Pisa
15 Febbraio 2022

Nel cielo di Natale 2021 ...



Cometa **Leonard**
(C 2021 A1)

foto di **Leo Gizzi** (CNR/INO)
Pisa, 3 Dicembre 2021, h. 06:01



foto di Steven Bellavia,
Southhold, NY, USA,
7 Dicembre 2021, h. 05:23
earthsky.org

Su alcuni giornali di Dicembre 2021 ...



PARTICLE THERAPY | RESEARCH UPDATE

Intense radiation pressure enables selective acceleration of carbon ion beams

07 Dec 2021

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

Mirror

Irish boffins' laser to help beat cancer

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.



d
a
s
t-
al
d
r-
y-
s
lf
>

Su alcuni giornali di Dicembre 2021 ...

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

... e qualche giorno fa su La Repubblica

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 

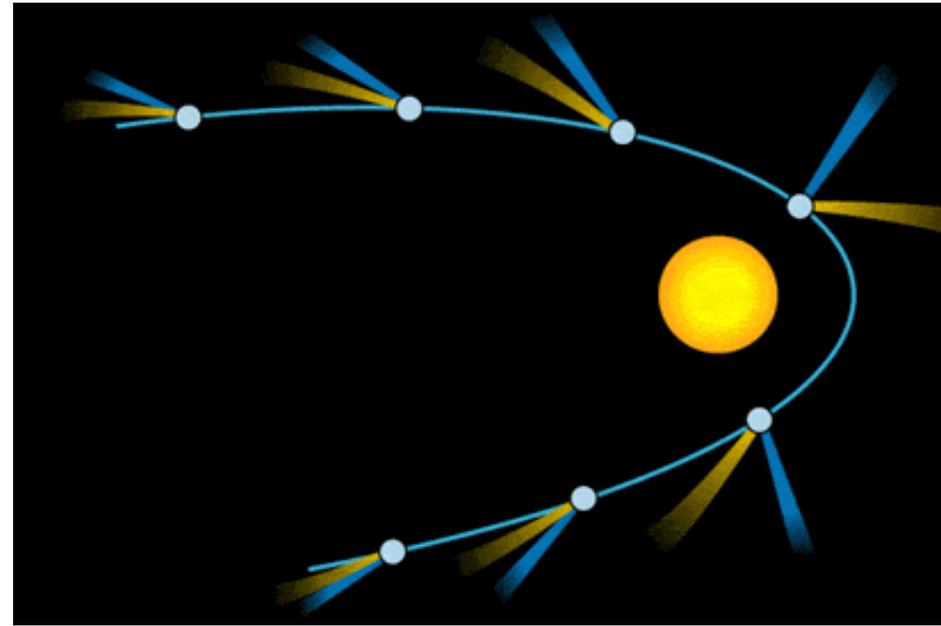
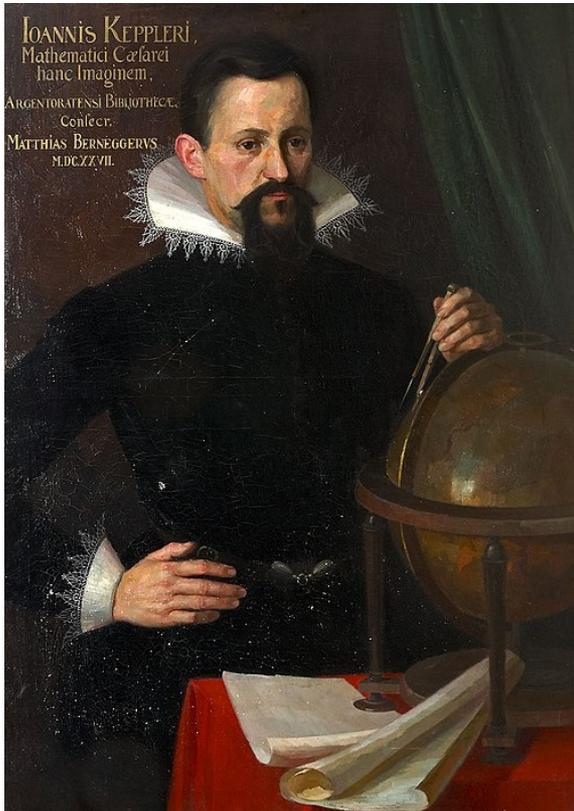
Published 2017 March 8 • © 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.

[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]”

Dalle comete al "vento di luce" nel cosmo

1607. **Keplero** osserva che la coda delle comete è sempre **opposta** alla posizione del Sole.



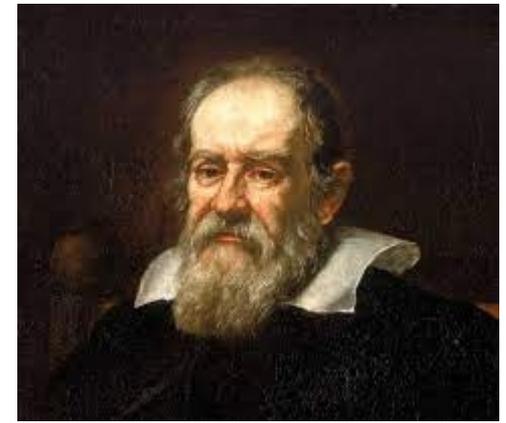
Ipotesi: la **luce solare** agisce come un **vento** "spazzando" la cometa

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

Parlandone con Galileo ...

"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)



"Trovate navi e vele adatte ai venti celesti, e qualche intrepido sfiderà quel vuoto ..."

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

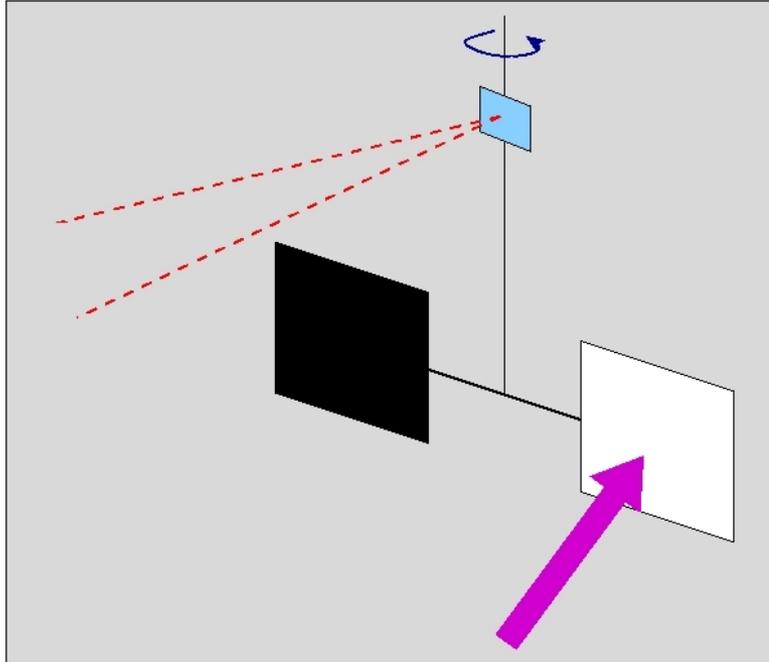


La scoperta della pressione della luce

James Clerk Maxwell, 1874
(teoria elettromagnetica della luce)



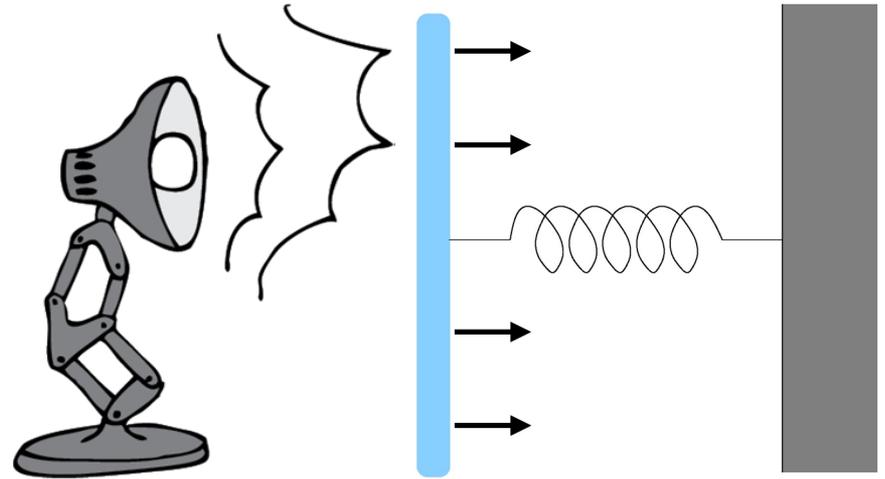
Adolfo Bartoli, 1876
(termodinamica della radiazione)



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

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

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

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



<http://www.weatherclipart.net>

Nota: il valore di I indica che 1 m^2 di tetto raccoglie in 1 ora un'energia di 1.4 **kilowattora**

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

Un pannello solare efficiente può alleviare la bolletta elettrica di casa (o “bolletta della luce” ...)

Viaggiare “alla leggera”



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



Viaggiare “alla leggera”



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

Per viaggiare sulla Terra la soluzione esiste da 6000 anni ...

(Luis Le Breton, *Piroga dei nativi dell'Isola Obalahou*)



Viaggiare “alla leggera”



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

... e nel frattempo abbiamo migliorato un po' la tecnologia!



Light Sail: astronavi leggerissime

progetto di veliero-sonda spaziale:

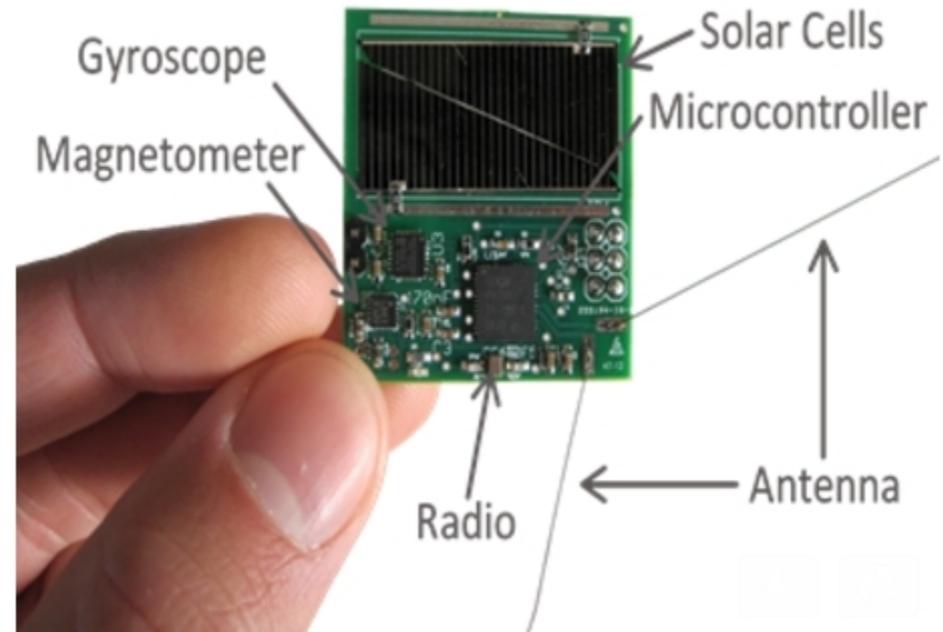
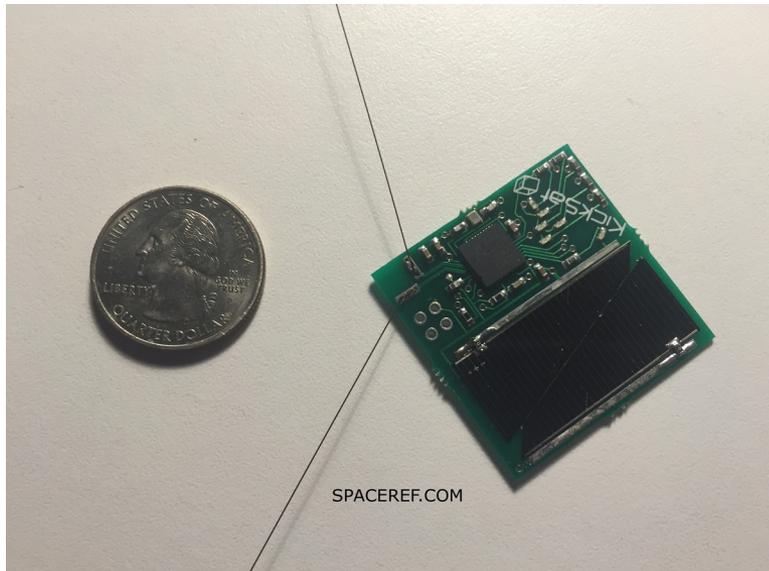
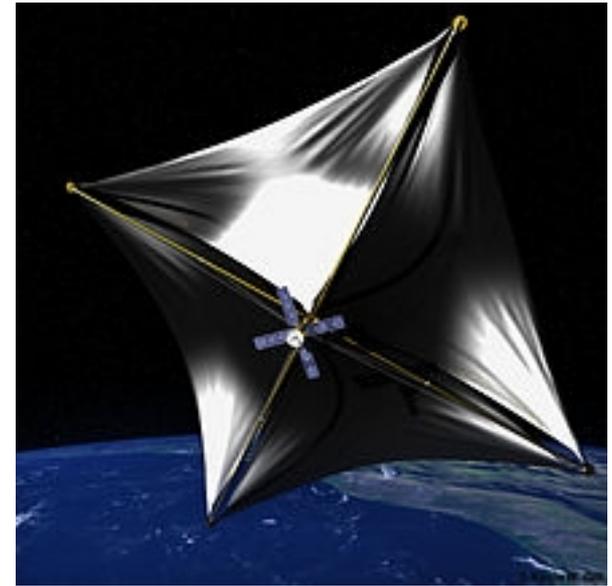
area: (4m)X(4m)

peso: ~ 10g

materiale: Grafene (C)

strumentazione minaturizzata (StarChip)

costo: ~ un iPhone



Viaggi extrasolari?

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

Alpha Centauri

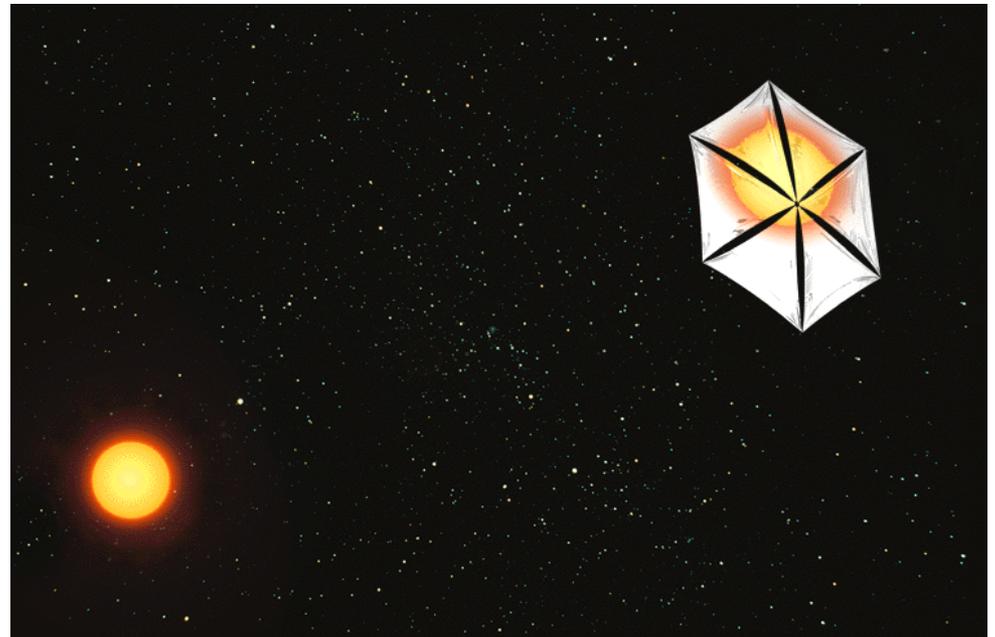
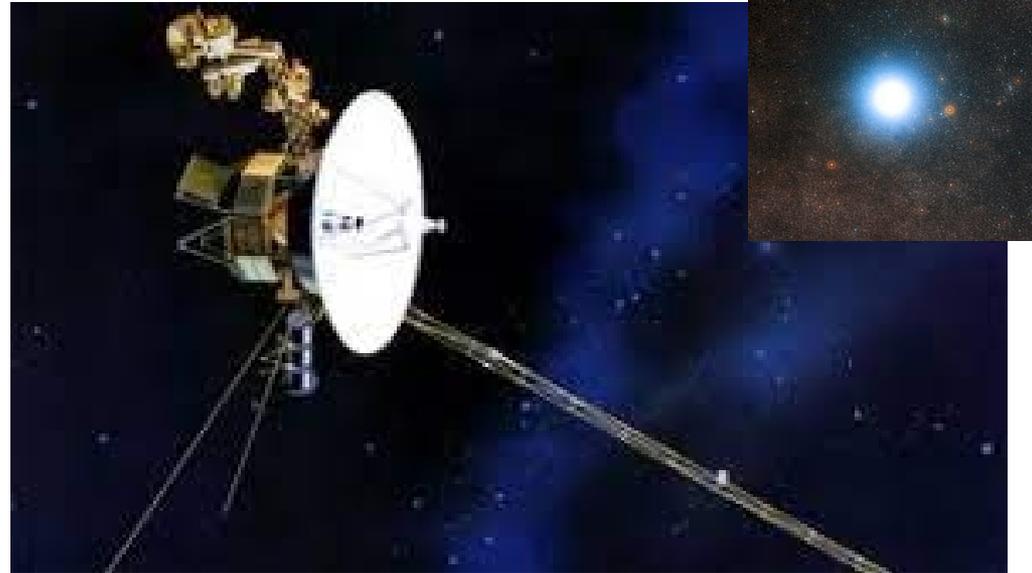
(~4 anni luce di distanza)

in **74000 anni**

Una vela di **10 grammi**
spinta dalla luce del Sole
può farcela in ~ **100 anni**

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

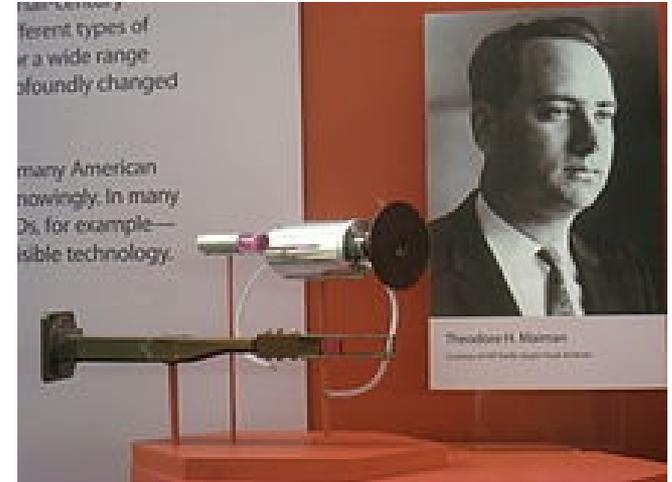
Velocità ancora maggiori
richiedono una **luce più**
intensa e artificiale ...



Luce superintensa

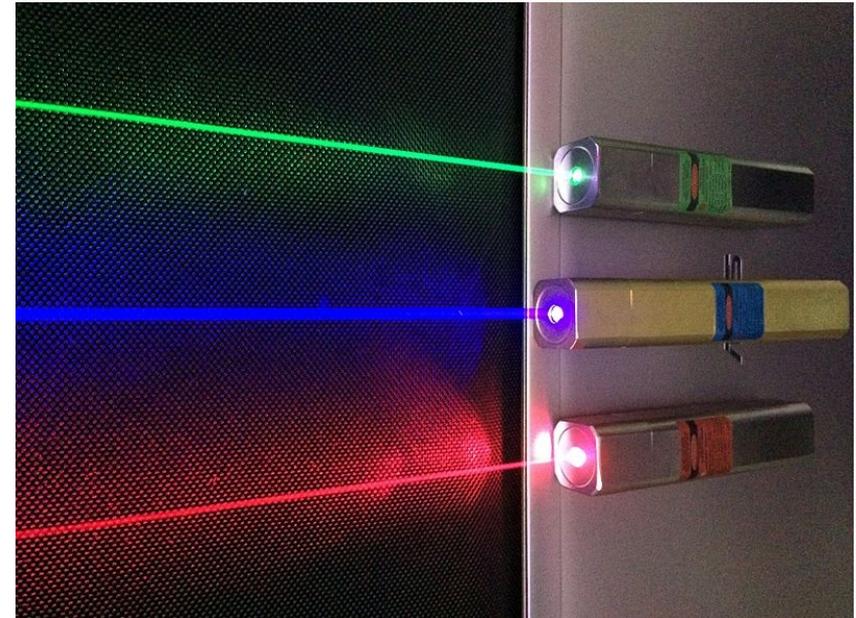
"... [questo *laser*] è una soluzione in cerca di un problema"

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



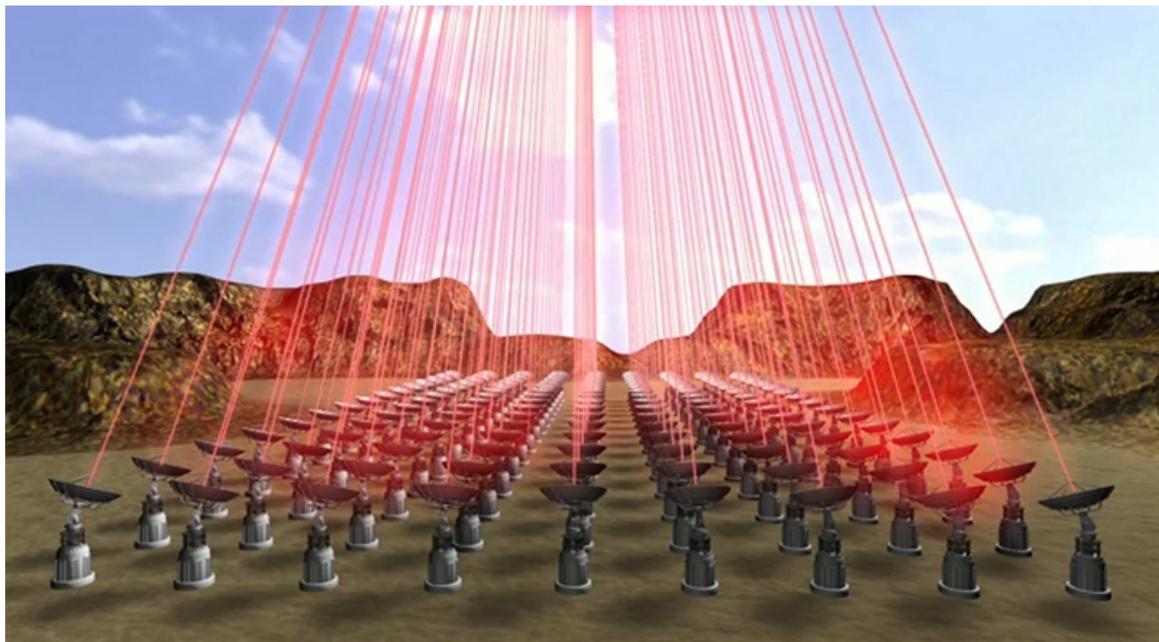
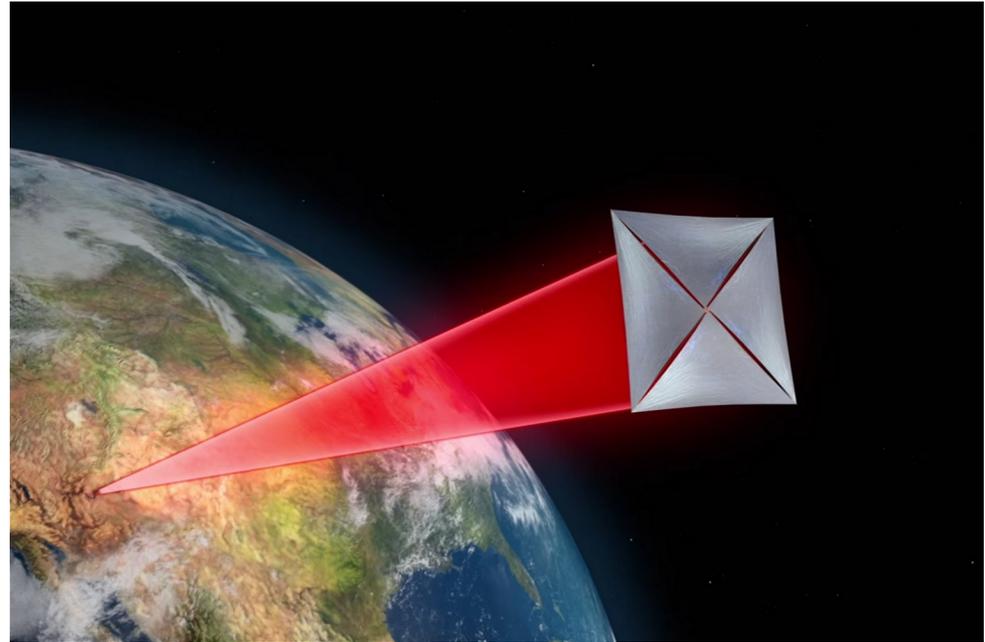
LASER:

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



Propulsione Laser?

idea di
R. L. Forward (1964),
G. Marx (1966):
costruire un **laser**
gigante per lanciare
velieri spaziali 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 ?



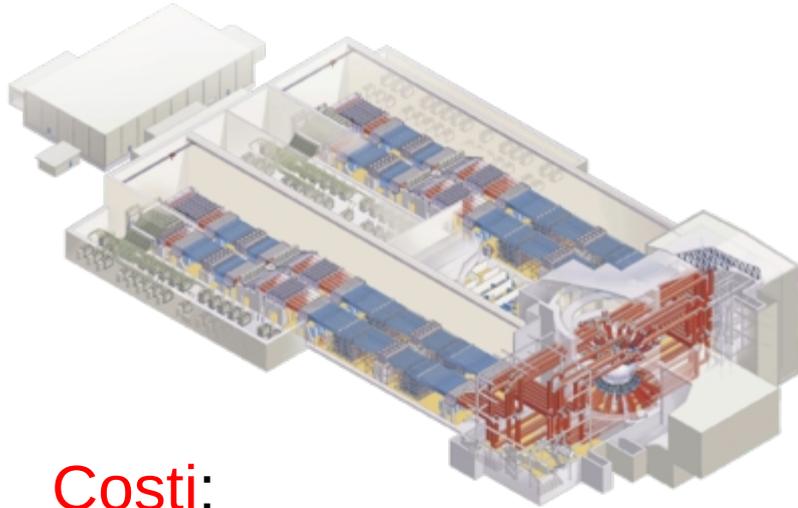
Yuri Milner Freeman Dyson
Stephen Hawking



Mark Zuckerberg

breakthroughinitiatives.org

Problema: il laser è “troppo” gigante



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

Costi:

~1 miliardo \$ (costruzione)

~1 milione \$/impulso

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



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”

Miniaturizzazione estrema:

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: *light sail* come acceleratore “da tavolo”

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

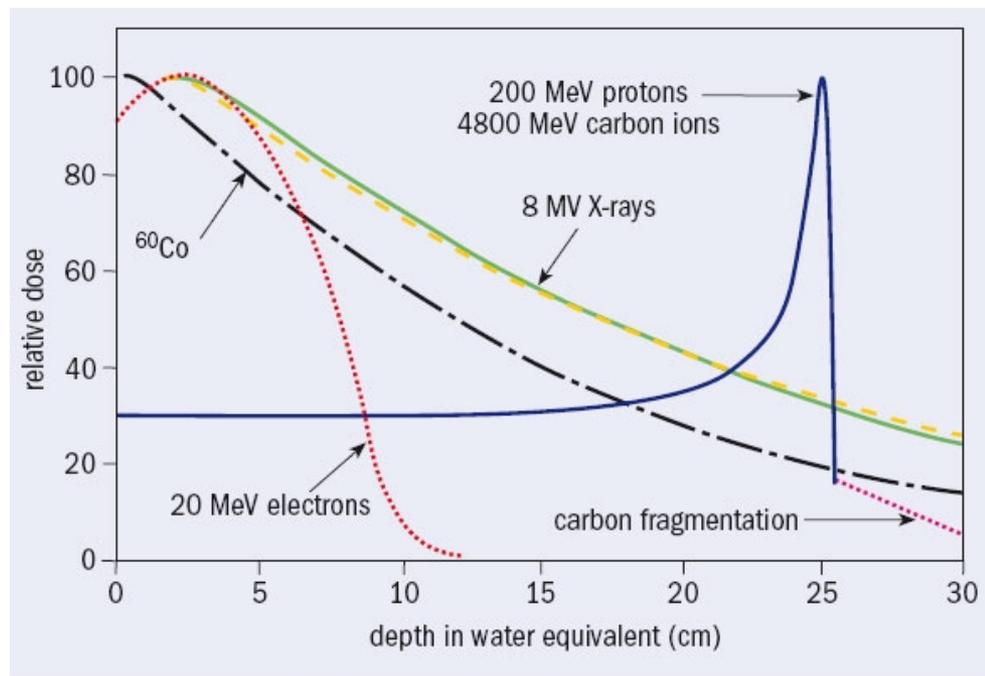
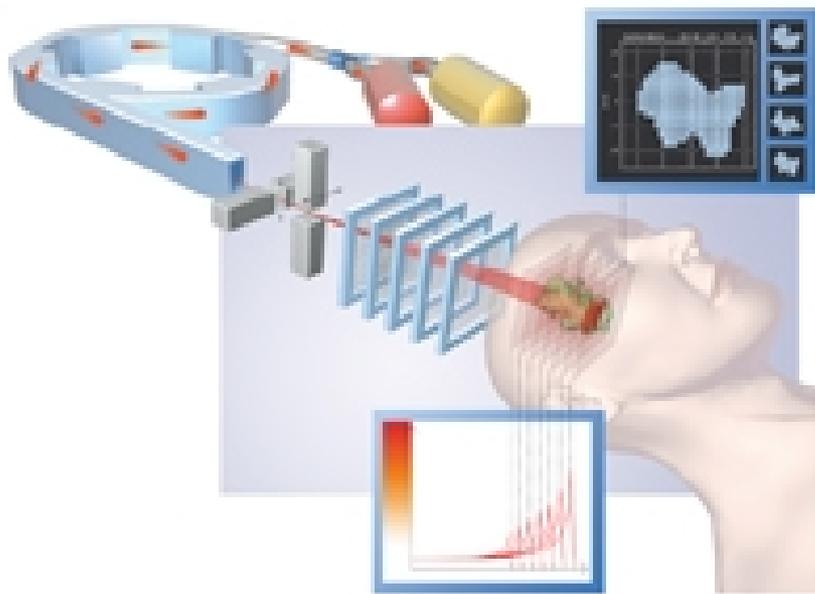
Basato sulla tecnica
di “Chirped Pulse
Amplification”
Premio Nobel 2018
(Donna Strickland
& Gerard Mourou)



Si può fare?!?

Perché un acceleratore laser “da tavolo”?

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



Una **radioterapia** con fasci di ioni (**adroterapia**) può distruggere tumori non operabili annidati in profondità in organi vitali riducendo i danni al tessuto sano circostante

Perché un acceleratore laser “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 “da tavolo”?

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



Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

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)

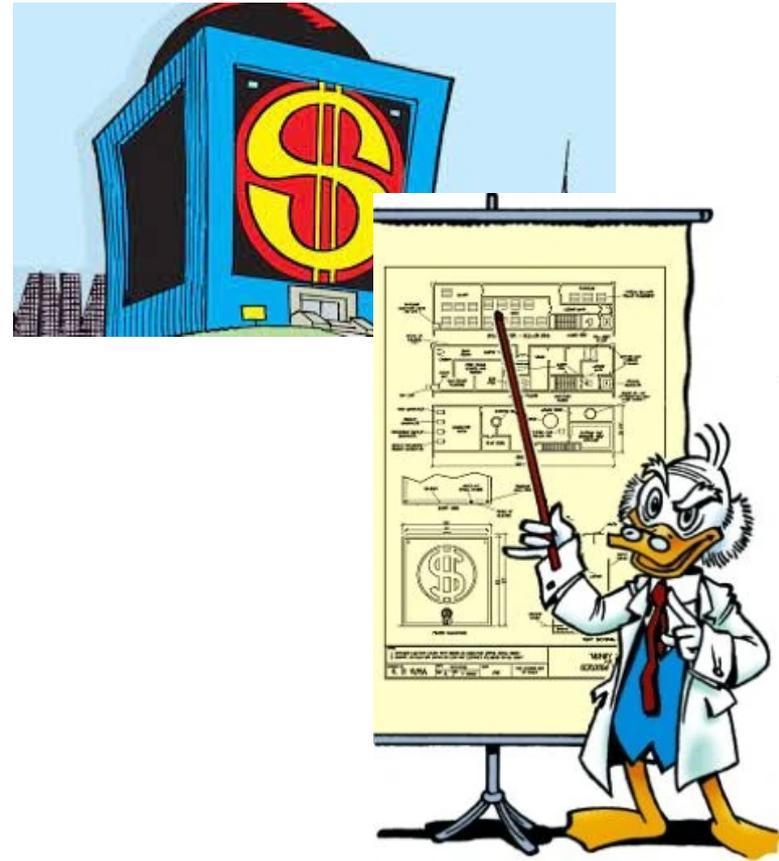
Studi preliminari suggeriscono vantaggi nell'uso di fasci impulsati di breve durata ed altissima intensità (o dose), ottenibili in particolare con accelerazione laser

E il viaggio verso le stelle... ?

Immaginiamo:

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

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

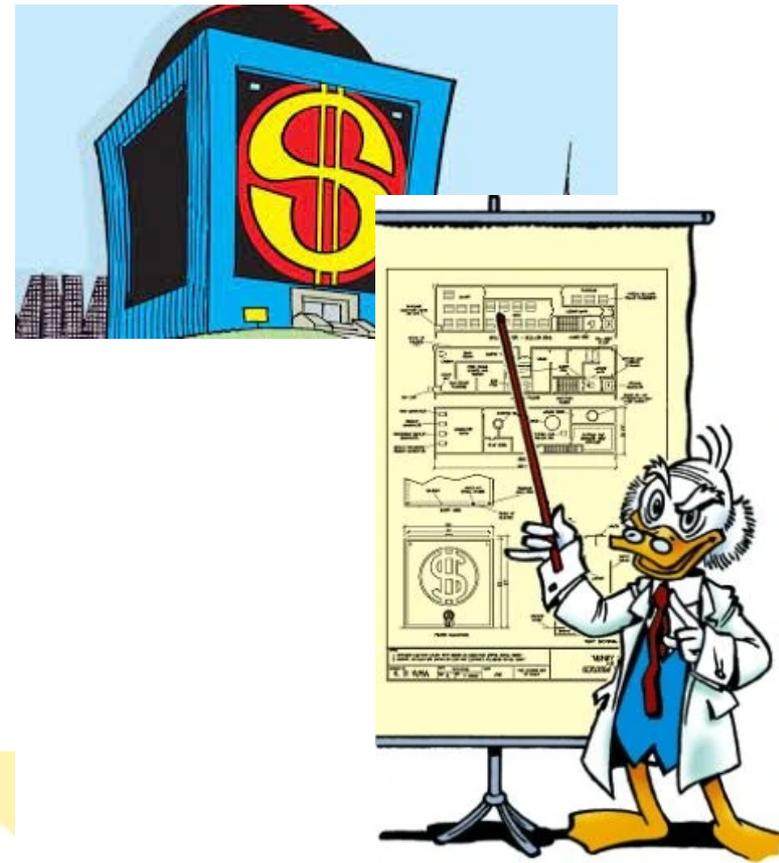


E il viaggio verso le stelle... ?

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)

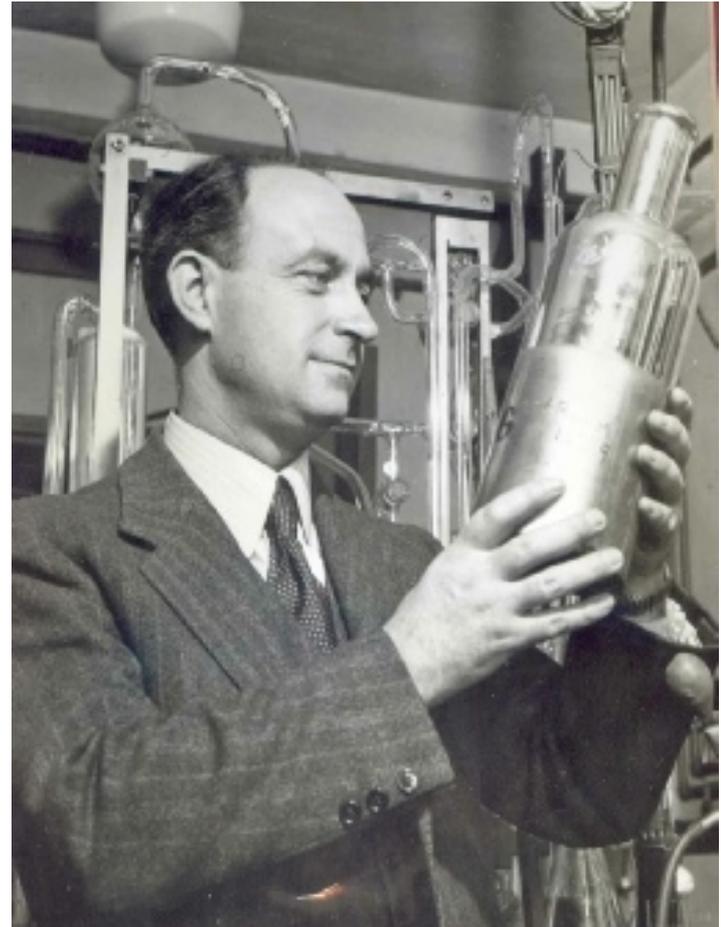
“Nessun pianeta potrebbe essere invaso da visitatori inaspettati dallo spazio esterno, il che può forse spiegare perché non c'è stata sinora alcuna evidenza di tali invasioni”

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

Quindi niente alieni amichevoli a Pisa (o Navacchio) ...



“L'ultimo terrestre”, regia di Gipi (2012)

... ma nemmeno alieni malintenzionati!

Grazie per l'attenzione!

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

