

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

Andrea MACCHI

CNR, Istituto Nazionale di Ottica, sezione "Adriano Gozzini", Pisa  
andrea.macchi@ino.cnr.it

Il Natale 2021 è stato allietato dalla comparsa della cometa C/2021 A1 "Leonard" dalla lunga coda, ben visibile agli emuli di Galileo dotati di un buon telescopio. Negli stessi giorni, un esperimento condotto da un gruppo di ricerca della Queen's University di Belfast coordinato da Marco Borghesi e con diversi collaboratori (tra cui chi scrive)<sup>1</sup> è stato menzionato sui principali rotocalchi di Fisica<sup>2</sup> e su vari quotidiani nazionali con titoli del tipo «*Irish boffins' laser to help beat cancer*» (dall'*Irish Daily Mirror*), espressione un poco gergale traducibile in «il laser degli scienziati irlandesi aiuterà a battere il cancro». Poche settimane dopo, in un'intervista a La Repubblica<sup>3</sup>, l'astrofisico Abraham Loeb (già direttore del Dipartimento di Astronomia dell'Università di Harvard) non ha rifuggito il paragonarsi a Galileo nella sua ricerca di civiltà extraterrestri, sostenendo contro un diffuso scetticismo che l'osservazione nel 2017 col telescopio Oumuamua di un oggetto celeste "anomalo" per forma e traiettoria ne sia stato un indizio. Cosa lega questi tre eventi?

Il filo inizia a dipanarsi cinque secoli fa, quando Keplero (Johannes Kepler) rivolgendosi a Galileo scrive «Non è improbabile che ci siano abitanti non solo sulla Luna ma anche su Giove [...]» (eversivo e pericoloso parlare di questi temi all'epoca!) "Appena qualcuno scoprirà l'arte di volare, non mancheranno i coloni dalla nostra specie umana [...] Date navi e vele adatte per i venti celesti, ci saranno coloro che non si tireranno indietro da quella così vasta distesa"<sup>4</sup>. A quali "venti celesti" si riferiva? Keplero, che aveva già visto a sei anni la grande cometa del 1577, nel 1619 pubblica il *De Cometis Libellis Tres* sulle osservazioni delle comete del 1607 (la cometa di Halley) e del 1618, mostrando che la coda si orienta sempre in direzione opposta al Sole (e non è quindi una "scia" del moto come si potrebbe pensare), da cui l'idea che sia la radiazione solare a creare la coda spazzando la cometa. Oggi chiamiamo "vento solare" il flusso di particelle dal Sole che produce, tra l'altro, le aurore boreali interagendo col campo magnetico terrestre. Ma sappiamo anche che la luce esercita una forza meccanica sugli oggetti, come previsto in origine da James C. Maxwell sulla base della sua celebrata teoria elettromagnetica della luce e indipendentemente dal meno noto Adolfo Bartoli, fiorentino studente alla Scuola Normale Superiore e all'Università di Pisa, sulla base di argomenti termodinamici<sup>5</sup>. La forza per unità di superficie, ovvero la cosiddetta "pressione di radiazione" su un materiale riflettente risulta proporzionale al rapporto tra l'intensità della luce incidente e la sua velocità nel vuoto, ovvero la costante universale  $c$  pari a 299792 chilometri al secondo.

La pressione di radiazione dà la possibilità di navigare nello spazio spinti dalla luce del Sole<sup>6</sup>. Curiosamente, la prima proposta riconosciuta in tal senso è legata al viaggio interplanetario

---

1 A. McIlvenny et al., *Selective Ion Acceleration by Intense Radiation Pressure*, in «Physical Review Letters», 127 (2021) 194801.

2 Heather M. Hill, *A laser selectively kicks carbon out of a foil*, in «Physics Today» 75 (2022) pp. 1-19 (doi: 10.1063/PT.3.4916); Mark Buchanan, *A New Trick to Make Short-Pulse Ion Beams*, in «Physics» 14 (2021) p.153 (online, doi: 10.1103/Physics.14.153); Abigail Williams, *Intense radiation pressure enables selective acceleration of carbon ion beams*, in: «Physics World» December 07, 2021 (online)

3 Luca Fraioli, *Abraham "Avi" Loeb: 'Io astrofisico, a caccia di Ufo per dare un senso alla nostra umanità'*, in: «La Repubblica», 8 Febbraio 2022

4 Johannes Kepler, *Dissertatio cum Nuncio Sidereo*, Praga 1610, cap.VIII. La mia traduzione è basata sulla versione inglese riportata da Edward Rosen, *Kepler's Conversation with Galileo's Sidereal Messenger*, in *The Sources of Sciences* n.5, Johnson Reprint Corporation, New York & London 1965, p.39.

5 Adolfo Bartoli, *Il calorico raggiante e il secondo principio di termodinamica*, in «Il Nuovo Cimento» 15 (1884), pp.193-202.

di esseri viventi di origine aliena: si tratta dell'idea di Svante Arrhenius della radiopanspermia (1903) dovuta a piccole spore che si spostano tra i pianeti spinte dalla luce. Un semplice calcolo, alla portata di studenti alle prime armi con la Fisica a livello universitario<sup>7</sup>, mostra infatti che la forza esercitata dalla luce del Sole può eccedere l'attrazione gravitazionale dello stesso per corpuscoli micrometrici, accelerandoli verso l'esterno del sistema solare.

Nel corso del XX secolo concetti di vele solari sono stati discussi da diversi pionieri dell'astronautica. Il vantaggio sta ovviamente nella leggerezza di un'astronave non dotata né di motore né di combustibile; il peso è in effetti ciò che limita maggiormente le nostre possibilità di esplorazione spaziale. Da questo punto di vista, la definizione in Inglese di "Light Sail" è molto suggestiva essendo leggibile sia come "vela a luce" che come "vela leggera"! Tuttavia la pressione della luce solare decresce con l'inverso del quadrato della distanza da Sole (come la gravità) e in corrispondenza dell'orbita della Terra è solo un decimo di miliardesimo della pressione atmosferica alla superficie terrestre. Nonostante nello spazio la luce del Sole sia disponibile con continuità "24/7", ottenere le velocità necessarie a esplorare lo spazio in tempi umanamente accettabili richiede una leggerezza estrema del veliero. Qui entrano in gioco i grandi progressi recenti della fisica dei materiali e della microelettronica. Nel 2016 il progetto "Breakthrough Starshot" ha presentato "Starchip", un concetto di sonda spaziale dotato di una vela di grafene di 16 metri quadri (sostanzialmente le dimensioni di una normale vela per barche) e equipaggiata di strumentazione per misure e comunicazioni concentrata in una scheda di pochi centimetri al centro della vela; il tutto per un peso di circa 10 grammi. Un altro semplice calcolo mostra che partendo dalla Terra la sonda sarebbe spinta dalla luce solare sino a velocità dell'ordine di un duecentesimo di  $c$ , centomila volte maggiori della velocità raggiunta dalla sonda Voyager, di fatto il più veloce oggetto mai costruito dall'uomo e il primo a uscire dai confini del sistema solare nel 2013.

Possiamo allora mandare queste vele leggerissime sino ad Alpha Centauri, il trio di stelle più vicine al Sole a poco più di quattro anni luce di distanza, dove si sa dal 2016 che esistono pianeti orbitanti? Un calcolo un poco più raffinato dei precedenti<sup>8</sup> stima che una sonda Starship potrebbe accelerare con la luce del Sole e poi frenare all'arrivo grazie alla luce delle stelle di Alpha Centauri, impiegando per il viaggio circa 200 anni. Questo è un tempo brevissimo al confronto col Voyager (che se diretto verso Alpha Centauri impiegherebbe circa 75000 anni) ma lungo rispetto alla vita umana, rendendo difficile (anche psicologicamente) la gestione di una missione di tale durata. La stima è inoltre ottimistica e prescinde da irrisolti problemi tecnologici, tra i quali il fatto che la sonda dovrebbe iniziare ad accelerare in prossimità del Sole dove il vento solare è così intenso e caldo da poterla danneggiare e comprometterne il volo: insomma, l'ambizione di volare (a vela) oltre il Sole ci farebbe fare la fine di Icaro!

Per percorrere quattro anni luce in un tempo significativamente minore di un secolo occorre banalmente raggiungere velocità prossime a  $c$ . Questo richiede una sorgente luminosa assai più intensa del Sole e necessariamente artificiale. Ispirati dall'invenzione del laser (la "soluzione in cerca di un problema") nel 1960, l'ungherese György Marx e l'americano Robert L. Forward proposero indipendentemente l'idea di un laser gigante per accelerare dalla Terra un veliero solare. Marx calcolò il moto di una vela spinta dalla pressione della luce, col risultato promettente che più

---

6 Per ulteriori approfondimenti dell'autore e ulteriori riferimenti bibliografici sui viaggi interstellari a vela con propulsione laser si possono vedere: Andrea Macchi, *Vele laser, viaggi interstellari e civiltà extraterrestri*, in: «Sapere» (2020), n.3, pp. 30-35; *Perché gli alieni non possono atterrare a Lucca*, in: «Naturalmente - Fatti e Trame delle Scienze» (2021), online ([www.naturalmentescienza.it](http://www.naturalmentescienza.it)).

7 I "semplici calcoli" indicati qui e altrove nel testo sono stati proposti come esercizi per l'esame di elettromagnetismo al secondo anno nel corso di Laurea in Fisica a Pisa e poi raccolti in: Andrea Macchi-Giovanni Moruzzi-Francesco Pegoraro, *Problems in Classical Electromagnetism*, 2nd edition, Springer, Cham 2023. Il lettore interessato giudicherà se questa raccolta rende conto della fattibilità dei calcoli o piuttosto della cattiveria dei docenti.

8 R. Heller-M. Hippke, *Deceleration of High-velocity Interstellar Photon Sails into Bound Orbits at  $\alpha$  Centauri*, in: «The Astrophysical Journal Letters», 835 (2017) L32.

la velocità della vela aumenta più la conversione dell'energia luminosa in energia cinetica è efficiente<sup>9</sup>, fino al 100% nel limite ideale di velocità uguale a  $c$ . Le conclusioni erano del tutto speculative, dato che un sistema laser in grado di fornire l'energia richiesta per accelerare un oggetto macroscopico a velocità prossime a  $c$  era assolutamente oltre lo stato dell'arte all'epoca e la sua fattibilità era tutta da dimostrare<sup>10</sup>. Da allora lo sviluppo della tecnologia laser è stato impetuoso e oggi consente di convertire in luce un'energia mille miliardi di volte maggiore rispetto ai primi dispositivi. Forte di questi progressi, l'idea è stata riproposta nel 2016 dal sopraccitato progetto Starshot, con l'obiettivo di costruire un laser in grado di accelerare delle Starchip fino a circa un quinto di  $c$  e raggiungere Alpha Centauri in venti anni<sup>11</sup>.

Sfortunatamente un tale laser rimane ancora ben oltre l'attuale tecnologia. Al momento il laser più grande al mondo è operativo presso la National Ignition Facility (NIF) in California e ha acquisito notorietà consentendo la prima recente dimostrazione dell'accensione di una reazione termonucleare in laboratorio. Il laser NIF occupa uno spazio pari a circa tre campi di football, è costato circa un miliardo di dollari e produce un impulso di un miliardesimo di secondo al giorno al costo di circa un milione di dollari. Il laser necessario al progetto Starshot dovrebbe fornire un'energia pari a circa un milione di volte quella di NIF in un centinaio di secondi: in effetti dovrebbe essere un sistema composto da migliaia di laser sincronizzati. Al momento non sono note soluzioni tecnologiche per realizzare questo sistema, mentre una semplice (e ottimistica) stima dei costi indica almeno 100 miliardi di dollari, suggestivamente dell'ordine del costo totale del programma Apollo della NASA che portò i primi uomini sulla Luna<sup>12</sup>. Il tutto a prescindere da numerose incognite fisiche e sfide tecniche, che fanno apparire il progetto Starshot come estremamente difficile da realizzare nonostante il supporto iniziale all'iniziativa di personalità come Stephen Hawking e Freeman Dyson.

Se il viaggio interstellare è fuori portata, possiamo però sfruttare le vele laser per lo sviluppo di applicazioni potenzialmente utili attraverso una "miniaturizzazione" del concetto. Nel calcolo di Marx, il parametro rilevante è il rapporto tra l'energia del laser e la massa della vela: se diminuiamo sia l'energia che la massa per lo stesso fattore mantenendo invariato il loro rapporto, otterremo la stessa velocità finale. Troviamo così che, se prendiamo una vela di pochi micron di raggio e spessore di pochi nanometri, per farle raggiungere le stesse velocità previste per la Starchip ci basta un'energia più o meno pari a quella acquisita da un sassolino di dieci grammi gettato dalla Torre di Pisa. Impulsi laser di tale energia sono oggi producibili ad alta frequenza di ripetizione con impianti che occupano una normale stanza, come quello operativo presso la sezione pisana dell'Istituto Nazionale di Ottica del CNR, e possono produrre intensità estremamente elevate grazie alla brevissima durata degli impulsi: alcuni femtosecondi, cioè milionesimi di miliardesimi di secondo. I

---

9 G. Marx, *Interstellar Vehicle Propelled By Terrestrial Laser Beam*, in: «Nature», 211 (1966) pp.22–23. Curiosamente, la conclusione di Marx sull'efficienza dello specchio in moto relativistico era giusta ma fu ritenuta da alcuni erronea a causa di alcuni passaggi matematici non del tutto corretti (nonostante Marx fosse un fisico teorico di grande livello e il calcolo sia accessibile a studenti del secondo anno di Fisica). La questione è discussa in J. F. L. Simmons-C. R. McInnes, *Was Marx right? or How efficient are laser driven interstellar spacecraft?*, in: «American Journal of Physics» 61 (1992) pp.205-207, dove si trova anche un interessante calcolo relativo al possibile "riciclo" della luce usata per accelerare lo specchio che fa uso dei numeri di Fibonacci.

10 La questione non era (e non è) relativa solo all'energia necessaria, ma anche alla necessità per il fascio di luce laser prodotto a terra di rimanere focalizzato sulla vela mentre questa in fase di accelerazione percorre molti milioni di km. Questo è problematico a causa della diffrazione, cioè dell'allargamento del fascio con la distanza, e richiederebbe lo sviluppo di sorgenti laser a lunghezza d'onda assai piccola oltre che materiali riflettenti per tali lunghezze.

11 Ann Finkbeiner, *Inside the Breakthrough Starshot Mission to Alpha Centauri*, in: «Scientific American», December 22, 2016 (trad. it.: *Verso Alfa Centauri (quasi) alla velocità della luce*, in: «Le Scienze», 3 Maggio 2017).

12 H. Milchberg, *Challenges abound for propelling interstellar probes*, in: «Physics Today», April 26, 2016 (online, doi: 10.1063/PT.5.2035).

valori corrispondenti di pressione e di accelerazione sono di gran lunga i più alti mai generati in un laboratorio (in Inglese potremmo dire che “*light is heavy*”).

Delle possibili applicazioni di un siffatto acceleratore di materia, quelle in campo biomedico attirano il maggior interesse. L'idea è usare le nanovele come “proiettili” per distruggere tumori annidati in profondità in organi vitali e non trattabili chirurgicamente. Questo approccio radioterapico si fonda sulla proprietà che hanno gli ioni (rispetto a elettroni o raggi gamma) di depositare la propria energia in una regione ben localizzata, colpendo quindi il tumore con precisione ed evitando danni collaterali al tessuto sano circostante. Al momento la radioterapia con ioni (o adroterapia) è praticata in pochi centri che fanno uso di acceleratori tradizionali. Al confronto con questi ultimi, è importante sottolineare come le tecniche di accelerazione laser siano ancora lontane dalle prestazioni e dall'affidabilità necessarie per l'uso medico<sup>13</sup>. L'interesse verso gli acceleratori laser è stato però rilanciato dall'ipotesi che una radioterapia ad altissime dosi, depositate in tempi alquanto più brevi rispetto ai protocolli correnti, risulti più efficace (effetto “Flash”)<sup>14</sup>. L'ipotesi richiede conferme da studi dedicati con sorgenti in grado di fornire le dosi richieste, che nel caso della radioterapia con ioni di Carbonio si restringono a quelle basate sull'accelerazione laser. Questo giustifica l'interesse verso i risultati “irlandesi” citati nell'introduzione, che sfruttano il meccanismo della *light sail*.

Rimane da rivelare la connessione con la ricerca di intelligenze extraterrestri. Nel suo articolo, Marx era così convinto che i viaggi interstellari fossero possibili solo con vele a propulsione laser che anche un'ipotetica civiltà extraterrestre le avrebbe utilizzate per esplorare lo spazio e eventualmente tentare di invadere la Terra. Ma un'invasione inaspettata, notava Marx, sarebbe stata impossibile dato che l'astroveliero alieno non avrebbe potuto frenare una volta giunto in prossimità della Terra!<sup>15</sup> Per Marx questo argomento era una possibile spiegazione dell'assenza di ogni indizio di visite extraterrestri nella storia della Terra, ovvero una risposta al celebre *paradosso di Fermi*: «se l'Universo pullula di alieni, dove sono tutti quanti?» (in realtà questa era una battuta pronunciata a pranzo da Fermi, ma giustamente del “Papa Enrico” della fisica italiana non si butta via nulla). Il paradosso consiste nel contrasto tra l'assenza di ogni manifestazione di vita extraterrestre evoluta e la sua presunta alta probabilità di esistenza nell'universo, dato l'enorme numero di stelle simili al Sole e quindi di pianeti extrasolari.

Ma Marx non considerava né che gli extraterrestri potessero sfruttare la luce solare per frenare il proprio astroveliero, né un'ingegnosa proposta di Forward<sup>16</sup> per riuscire a rallentare la vela con lo stesso laser usato per accelerare (il che richiederebbe lenti speciali orbitanti e vele scomponibili, entrambe del diametro di centinaia di km). Per questo non si può escludere a priori che una civiltà superiore alle nostre e dotata di più ingenti risorse possa lanciare astrovelieri per l'esplorazione interstellare, il che ha stimolato Loeb a cercarne segnali dallo spazio. L'idea è che l'enorme rilascio di energia nel lancio possa generare una breve emissione elettromagnetica nell'intervallo di frequenza delle onde radio, così intensa da essere rilevabile anche a distanze extragalattiche. All'epoca della pubblicazione dell'articolo di Loeb<sup>17</sup> erano stati invero osservati nel

---

13 Per una rassegna specialistica sullo stato dell'arte con particolare riguardo alle applicazioni biomedicali: M. Borghesi-A. Macchi, *Laser-Driven Ion Accelerators: State of the Art and Applications*, in: Antonio Giulietti (editor), *Laser-Driven Particle Acceleration Towards Radiobiology and Medicine*, Springer, 2016, pp. 221-247.

14 Per una esposizione divulgativa a cura di ricercatori attivi nell'area pisana si può vedere: Leonida Antonio Gizzi e Maria Grazia Andreassi, *L'effetto FLASH: verso una nuova radioterapia contro i tumori*, in: «Sapere» (2021), n.6, pp. 16-20.

15 Suona divertente (e fa pensare a un intento ironico) che uno scienziato di nome Marx e residente “oltre cortina” si riferisse agli alieni come invasori ostili, immagine stereotipata ma assai popolare all'epoca negli Stati Uniti dove rappresentava una possibile allusione al pericolo comunista.

16 R. L. Forward, *Roundtrip Interstellar Travel Using Laser-Pushed Lightsails*, in: «Journal of Spacecraft», 21 (1984) pp.187-195.

17 Manasmi Lingam-Abraham Loeb, *Fast Radio Burst from Extragalactic Light Sails*, in: «The Astrophysical Journal Letters» 837 (2017) L23.

decennio precedente alcuni misteriosi “lampi” radio (“*fast radio burst*”) che hanno però poi trovato una spiegazione fisica non legata a tecnologie aliene. Questo, naturalmente, non esaurisce gli sforzi dell'ambizioso “Galileo project” coordinato da Loeb per «la sistematica ricerca scientifica di evidenza di manufatti tecnologici extraterrestri», nonostante la tentazione maliziosa di notare che il termine inglese “*artifact*” usato da Loeb possa significare sia “manufatto” che “artefatto”, cioè un risultato scientifico fasullo o ingannevole.

Le grandi difficoltà nell'esplorare direttamente lo spazio oltre i dintorni della Terra e nel cercare evidenze di vita extraterrestre non implicano che tali questioni non rimangano di interesse fondamentale per l'umanità, così come lo erano oltre sei secoli fa. Possiamo pensare che Galileo avrebbe avuto molto piacere che le navi adatte ai venti celesti immaginate da Keplero fossero state disponibili, così da consentire a chi non credeva nelle sue osservazioni di salire in cielo a verificare di persona, esperienza da consigliare oggi a chi mette in dubbio la forma stessa della Terra. Ma oggi come allora, purtroppo, «mio caro Keplero, cosa si può dire dei principali filosofi [...] che rifiutano di osservare i pianeti, la Luna e perfino il mio telescopio?»<sup>18</sup>.

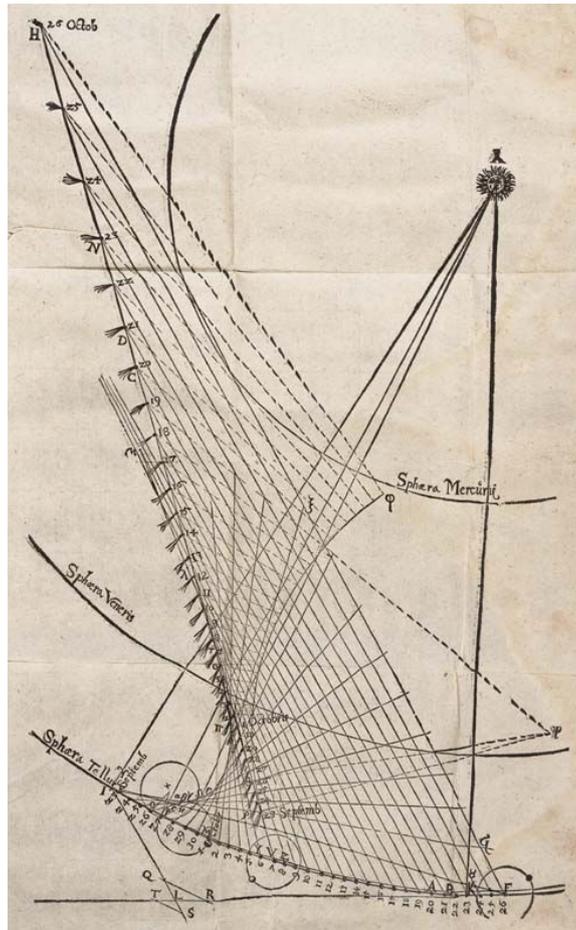
---

18 Citazione variamente attribuita a Galileo Galilei; si veda ad es. AA.VV., *Il libro dell'astronomia*, Gribaudo, 2017.

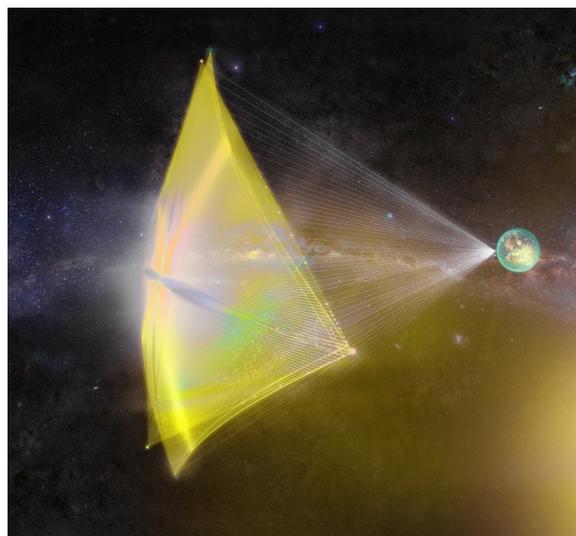
## ILLUSTRAZIONI



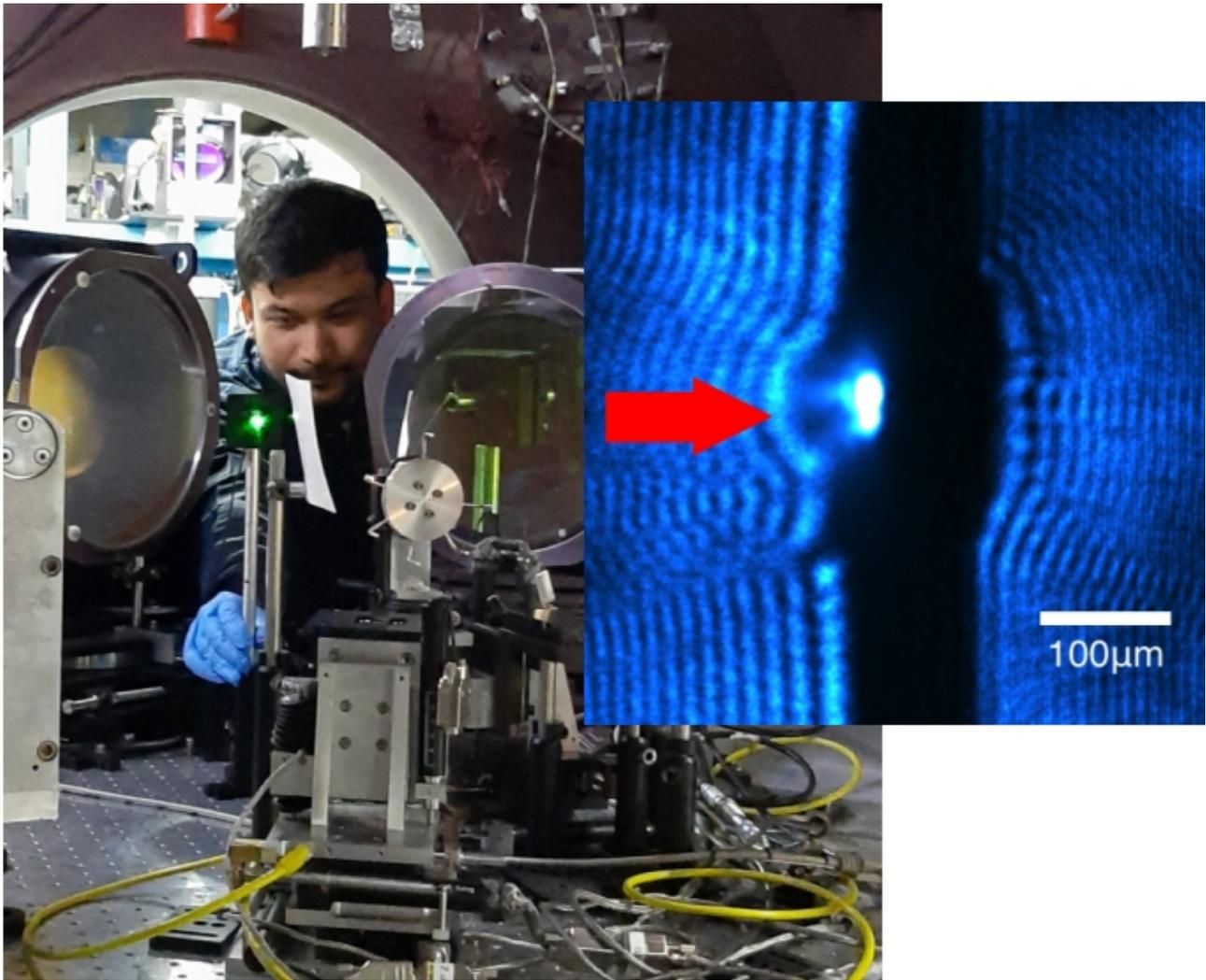
1) La cometa “Leonard” fotografata il 2 Gennaio 2022 da Christian Gloor,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2021\\_A1\\_\(LEONARD\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2021_A1_(LEONARD).jpg), riprodotta su licenza  
Creative Commons cc-by-2.0.



2) Disegno originale di Kepler, da *De Cometis Libellis Tres* (1619) che ricostruisce la traiettoria della cometa di Halley insieme all'orientazione della coda, che risulta sempre in direzione opposta alla posizione del Sole. (Immagine nel pubblico dominio, non soggetta a liberatoria per l'utilizzo.)



3) Visione artistica del concetto di vela spaziale a propulsione laser da sorgente posta dalla Terra, dal sito web del progetto "Breakthrough Starshot" (<https://breakthroughinitiatives.org/initiative/3>).



4) A sinistra, Jyotirup Sarma della Queen's University of Belfast (QUB) prepara un esperimento di accelerazione laser sistemando bersagli e strumenti nella camera d'interazione. A destra, una "ombroscoopia" di un bersaglio avente diametro di circa 100 micron colpito dall'impulso laser proveniente da sinistra; la zona luminosa indica l'interazione e si nota lo spostamento del bersaglio verso destra per effetto della pressione esercitata dal laser (immagini concesse da J. Sarma e da Aodhan McIlvenny, QUB).