

GIORNALE DI ASTRONOMIA

Rivista di informazione, cultura e didattica
della Società Astronomica Italiana

**Pubblicato con il patrocinio
della Camera dei Deputati**

Direttore responsabile: Fabrizio Bònoli

Ufficio redazionale: Valentina Pagnan

Il Comitato di redazione è composto
dal Consiglio Direttivo della S.A.It

<http://giornaleastronomia.difa.unibo.it/>

Dal n. 1/2024 il *Giornale di Astronomia* è disponibile online al
sito www.sait.it/giornalediastronomia.html.

Per informazioni rivolgersi alla Segreteria della
Società Astronomica Italiana
Largo E. Fermi 5, I 50125 Firenze
tel. +39 055 2752270
segreteria@sait.it

I lavori sottoposti per la pubblicazione (redatti secondo le
istruzioni riportate in terza di copertina) devono essere
inviati direttamente al Direttore:

Fabrizio Bònoli
fabrizio.bonoli@unibo.it

Aut. del Tribunale di Roma del 15/1/1975 n. 155756

Pubblicazione trimestrale
Vol. 52° · N. 4 · Dicembre 2026



Fabrizio Serra · Editore
Pisa · Roma

Giornale di Astronomia, 2026, 4

Sommario

Storia

- 2 Bologna 1726: nasceva trecento anni fa la Specola dell'Istituto delle Scienze
F. BÒNOLI

Astronomia oggi

- 8 Fotoevaporazione esterna di dischi proto-planetari
R. ANANIA (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2026: menzione speciale)
- 17 La messa in servizio dello strumento NISP a bordo del satellite *Euclid*
F. COGATO (PREMIO 'GIUSEPPE LORENZONI' 2026)
- 25 Estrazione di ossigeno dalla regolite planetaria mediante riduzione carbotermica solido-gas per l'esplorazione della superficie lunare
A. DOTTORI (PREMIO 'GUIDO HORN D'ARTURO' 2026: menzione speciale)
- 30 MISTRAL: l'occhio ultra-freddo del Sardinia Radio Telescope
G. ISOPI (PREMIO 'GUIDO HORN D'ARTURO' 2026)
- 34 Venti cosmici: come i buchi neri influenzano il destino delle galassie
C. MARCONCINI (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2026)
- 40 Misurare l'universo primordiale con il satellite *LiteBIRD*: la sfida delle sistematiche strumentali
S. MICHELI (PREMIO 'GUIDO HORN D'ARTURO' 2026: menzione speciale)
- 45 La nostra Galassia in raggia gamma e neutrini. L'importanza delle sorgenti deboli
V. VECCHIOTTI (PREMIO 'GIOVANNI BIGNAMI' 2026)

Cieli d'inchiestro (a cura di A. Mandrino, M. Gargano, A. Gasperini)

- 50 Ritratto dell'astronomo da giovane: i primi 200 anni di Giovanni Battista Donati
S. BIANCHI, A. GASPERINI, D. GALLI

Telescopio letterario. Le utopie marziane tra Ottocento e Novecento (a cura di S. Badioli, A. Calanchi)

- 56 Presentazione

Spigolature astronomiche (a cura di A. D'Ercole)

- 58 Simmetrie e leggi di conservazione: il teorema di Noether. Storia di una donna straordinaria
A. D'ERCOLE

Biblioteca (a cura di A. Cappi)

- 66 S. A. BENNER, *Meet the Neighbors. Life on Mars and How to find it* (recens. di A. Calanchi)
- 68 E. CHAPMAN, *La prima luce. L'accensione delle stelle all'alba del tempo* (recens. di M. Bellazzini)
- 69 J.-P. LUMINET, *Les Origines du monde* (recens. di A. Cappi)
- 70 G. MASI, *Quando l'universo diventò infinito. Shapley, Curtis e la nascita del cosmo moderno* (recens. di A. Cappi)

Gli Incontri del «Giornale di Astronomia»

Indici del volume 52 · 2026

Indice degli autori

In copertina

Trecento anni della Specola dell'Istituto delle Scienze di Bologna. La torre della Specola spicca sul fondale del dipinto *Terrazzo nel locale della Pontificia Accademia di Belle Arti*, realizzato nel 1826 dall'artista bolognese Antonio Basoli (1774-1848). [Si veda l'articolo all'interno] (Si ringraziano le 'Collezioni d'Arte e di Storia della Fondazione Cassa di Risparmio in Bologna' per la gentile concessione dell'immagine)

Bologna 1726: nasceva trecento anni fa la Specola dell'Istituto delle Scienze

Fabrizio Bònoli

Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

In questo mese di dicembre dell'anno 1726 fu compito tutto ciò che apparteneva alla fabbrica dell'osservatorio. Fu fatto il cancello di ferro all'ingresso della sala o camera della Torretta. Furono murati nei due parapetti superiore, ed inferiore dell'osservatorio i ferri con fori a vite per adattarvi le antenne, o colonnette da reggere, e maneggiare i Cannocchiali lunghi, i quali insieme con gli altri strumenti si cominciarono a portare ed adoprare nella detta Camera. Fu anche compito il coperto della spaccatura posta in meridiano nella Camera destinata a collocarvi il semicircolo murale, il quale fu collocato appeso ai suoi ferramenti, e furono fatti gli uncini co' maniglion per aprire e serrare il detto coperto. Parimenti fu fatto e accomodato un portello con suo ferro per maneggiarlo ad uso di coprire, e scoprire il foro che dà il Sole alla meridiana nella detta Camera del Semicircolo, e furono segnate nei due ferri posti a' due capi della detta meridiana due tacche per le quali si stende nel piano del meridiano il filo, a cui si nota l'arrivo e l'esito della specie solare [...].¹ (FIG. 1).

Così si legge, per mano di Eustachio Manfredi (1674-1739), nel *Volume primo del registro delle osservazioni da farsi nell'Osservatorio astronomico dell'Istituto delle Scienze* (FIG. 2). In realtà, la Specola di Bologna, il cui completamento festeggia oggi i trecento anni, ha una storia che inizia diversi anni prima di quel dicembre 1726. È una storia che è stata lungamente studiata e che in queste pagine non possiamo percorrere in dettaglio. Mi limiterò, quindi, a una sommaria descrizione, rimandando alla vasta bibliografia sull'argomento.²

¹ L'Archivio storico del Dipartimento di Astronomia (da qui in poi AABO) conserva, presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, i documenti dell'astronomia bolognese, a partire dalla seconda metà del Seicento, costituendo la più antica raccolta di documentazione di un'istituzione astronomica italiana non privata. L'archivio è completamente riordinato e inventariato e largamente digitalizzato e consultabile online a: <https://archiviostoricoastronomia.unibo.it/home>.

² Mi limito qui a segnalare solo alcuni testi, rimandando per completezza alle referenze al loro interno: E. BAIADA, *Le carte settecentesche dell'archivio dell'Istituto di Astronomia dell'Università di Bologna*, Tesi di laurea in Fisica, Università di Bologna, AA 1976/1977; E. BAIADA, F. BÒNOLI, A. BRACCESI, *Museo della Specola* (catalogo italiano-inglese), Bologna University Press, 1995; E. BAIADA, A. BRACCESI, *Lo sviluppo della strumentazione astronomica dell'Osservatorio marsiliano e della Specola dell'Istituto delle Scienze di Bologna dal 1702 al 1815*, in *Gli strumenti nella storia e nella filosofia della Scienza*, a cura di G. Tarozzi, Ist. Beni Artistici Culturali Naturali Emilia-Romagna ed., vol. 10, 1983, pp. 77-126; A. BRACCESI, *Gli inizi della Specola di Bologna*, «Giornale di Astronomia», 4, 1978, pp. 327-350; A. BRACCESI, *Specificità e limiti dell'esperienza di lavoro della Specola di Bologna nel XVIII secolo*, «Giornale di Astronomia», 3-4,

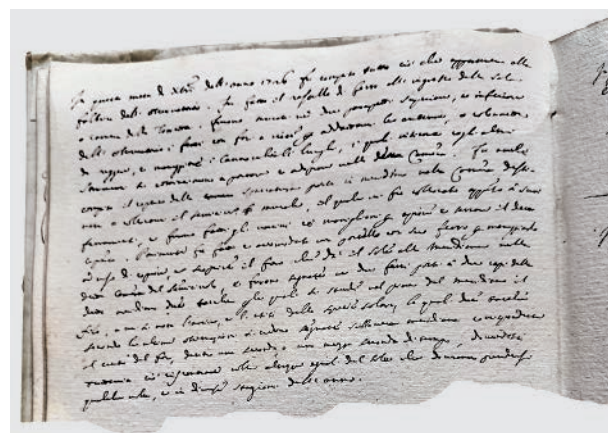


FIG. 1. L'attestazione del compimento della Specola dell'Istituto delle Scienze di Bologna compare nel quaderno delle osservazioni, per mano di Eustachio Manfredi, nella pagina successiva a martedì 31 dicembre 1726. (AABO, Serie "Osservazioni astronomiche" (da qui in poi Oa), sottoserie "3: Osservazioni Specola Istituto delle Scienze 1723-1844" (da qui in poi Oa3.1), Oa3.1, f. 36v)

Si rende necessario introdurre un personaggio, fondamentale, anzi, imprescindibile, per la nascita della Specola: il conte e generale Luigi Ferdinando Marsili (o Marsigli; 1658-1730).³ Appartenente a una famiglia aristocratica di Bologna, partecipò alla vita culturale della città, sotto la guida di personaggi come il matematico Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679), l'astronomo e fisico Geminiano Montanari (1633-1687), il medico Marcello Malpighi (1628-1694) e il botanico Lelio Trionfetti (1647-1722), e in corrispondenza con Giovanni Domenico Cassini (1625-1712), allora già a Parigi, e con il matematico Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) a Roma. Erano, tutti questi scienziati, particolarmente attenti alle ricerche sperimentali e all'ideale baconiano di una scienza che deve essere "utile". Marsili ebbe poi una lunga esperienza militare nelle guerre contro i turchi, dei quali fu anche prigioniero, e anche nella guerra di successione spagnola, conclusa-

1984, pp. 165-170; M. CAVAZZA, *L'Istituto delle Scienze: il contesto cittadino. La costruzione di una nuova "Casa di Salomone"*, in *L'Università a Bologna. Maestri, studenti e luoghi dal XVI al XX secolo*, a cura di G. P. Brizzi et al., Bologna, Silvana Ed., 1988, pp. 165-174.

³ G. FANTUZZI, *Memorie della vita del Generale Co: Luigi Ferdinando Marsigli*; Bologna, L. della Volpe, 1770; G. GULLINO, C. PRETI, Marsili, Luigi Ferdinando, in *Dizionario Biografico degli Italiani*, Roma, Istituto della Enciclopedia Italiana Treccani, Vol. 70, 2008, pp. 771-781; S. BELLÌ, *L'astronomia per la geografia: il caso Marsili*, «Memorie della Società Astronomica Italiana», 66, 1995, pp. 903-922.

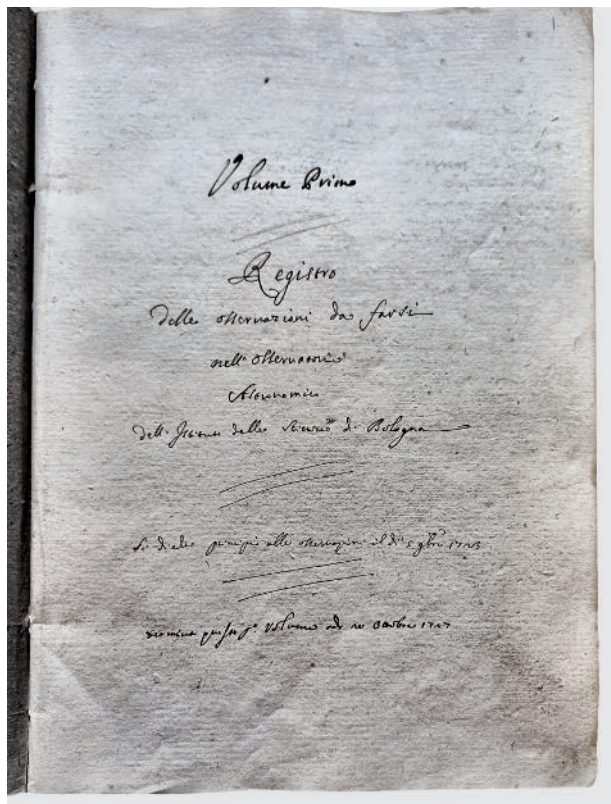


Fig. 2. La prima pagina del Volume Primo // Registro delle osservazioni da farsi nell'Osservatorio Astronomico dell'Istituto delle Scienze di Bologna // Si diede inizio alle osservazioni il dì 5 novembre 1723. (AABO, Oa3.1, f. 1)

si con un'infamante accusa, dalla quale fu però riabilitato. Convinto che solo la superiorità tecnica, della tecnica militare, aveva salvato l'Europa dai Turchi e che questa superiorità tecnica era strettamente legata alla superiorità scientifica e tecnologica dei paesi europei su quelli dell'Impero turco, nei suoi viaggi aveva prestato particolare attenzione all'agricoltura, al commercio, alla politica e alle strutture sociali che incontrava, e agli sviluppi tecnici che si andavano producendo nel resto d'Europa. Si era dedicato anche ad osservazioni astronomiche «in guerra viva e fra gl'incomodi delle marchie»: osservazioni pratiche, rivolte al miglioramento della conoscenza dei territori, funzionali quindi ai compiti militari. Tutte le sue opere, tra le quali le monumentali *Histoire phisque de la mer* (1725) e *Danubius Pannonico-Mysicus* (1726), rispondevano così alla volontà di approfondire la conoscenza della natura con metodi scientifici e per i suoi meriti fu nominato membro dell'Académie des Sciences e della Royal Society. Considerato il "padre dell'oceanografia moderna", il suo nome è stato dato al più grande vulcano sottomarino d'Europa, attivo nel Tirreno.

Tornato a Bologna, Marsili realizza come quella tensione che aveva animato la città nei decenni precedenti si era notevolmente affievolita e gli studi universitari si erano come rinchiusi in una stanca ripetizione di passati ricordi: bisognava risvegliare gli «abbandonati ingenij» con mezzi per «abilitarsi al

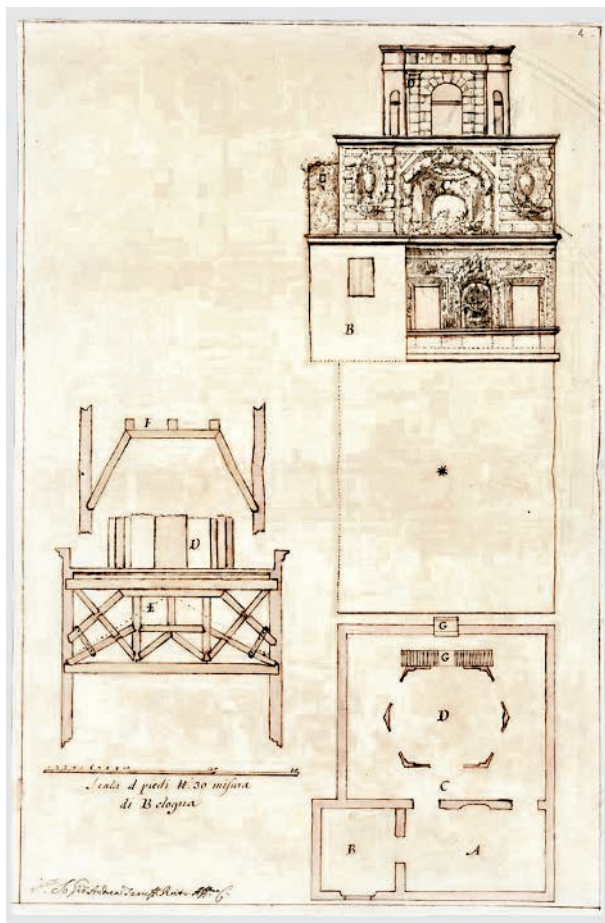


Fig. 3. La struttura della Specola marsiliana, con la torretta esagonale eretta sopra al terrazzo di Palazzo Marsili, nell'attuale via d'Azeglio. Di questa Specola non vi è più traccia da tempo. (AABO, "Serie storica Specola XVII-XIX secolo", Busta 2, "Osservazioni nelle Specole Marsigli, Davia, Montalto 1697-1725", SS-B02.5)

pubblico utile [e quindi] mantenere la Patria nel suo antico lustro degli studij».⁴

Dopo aver ospitato nel suo palazzo, dal 1704, gli studiosi che dal 1690 si erano raccolti nella locale Accademia degli Inquieti e avervi edificato una specola astronomica sotto la guida dei giovani Eustachio Manfredi e Vittorio Francesco Stancari (Fig. 3), per controversie con i suoi familiari, decise di donare alla città le collezioni naturalistiche, gli apparecchi di fisica, gli strumenti di astronomia e i libri che in lunghi anni aveva raccolto. La garanzia richiesta da Marsili al Senato bolognese era che il tutto

fosse donato a pubblico comodo [e che] gli fosse dato un luogo bastevole e conveniente a farne la distribuzione; che si formasse un elaboratorio chimico; stanze a proposito si destinassero ad una copiosa libreria; fosse eretta una specola; assegnati stipendi per li professori; stabiliti fondi per la provvista di libri, e di macchine per gli esperimenti fisici.⁵

Viene così stipulato, il 12 dicembre 1711, con rogito notarile dell'11 gennaio 1712, l'*Instrumentum donatio-*

⁴ L. F. MARSILI, *Punti per l'Accademia*, 3 ottobre 1702, in *Libro di più miei pensieri che mi venivano alla giornata*, Biblioteca Universitaria di Bologna, mss. Marsili, 83 B, cc. 79-83.

⁵ G. FANTUZZI, *op. cit.*, p. 229.

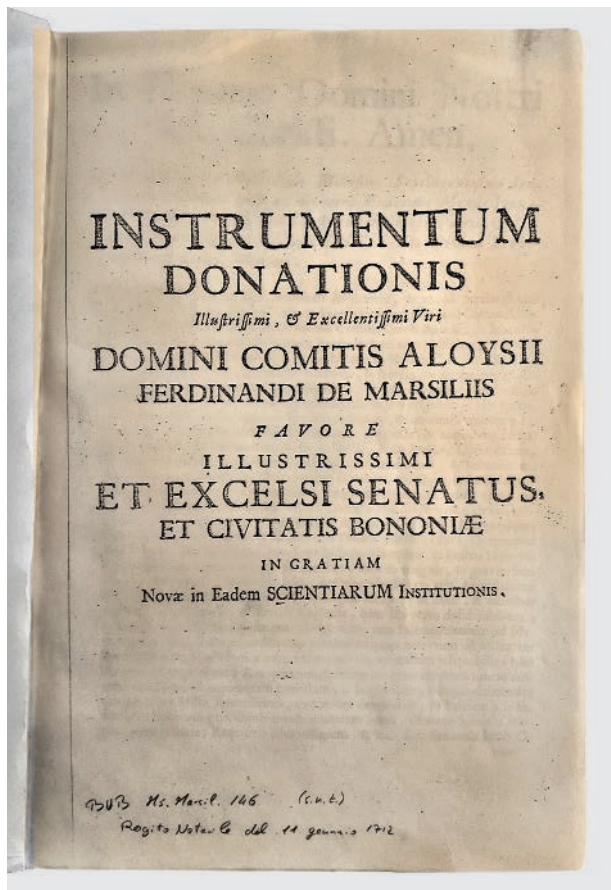


FIG. 4. *Instrumentum donationis illustrissimi, et excellentissimi viri Domini Comitis Aloysii Ferdinandi de Marsiliis favore illustrissimi et excelsi Senatus et civitatis Bononiae in gratiam novae in eadem Scientiarum Institutionis*, s.n.t. (ma stampato nel 1712). È l'atto notarile con cui nel 1711 Marsili donò al Senato di Bologna le sue collezioni scientifiche. Il volume riporta in 111 pagine un inventario dettagliato di tutti i beni. (Biblioteca Universitaria di Bologna, ms. Marsili 146)

nis (FIG. 4), con il quale nasce l'Accademia dell'Istituto delle Scienze di Bologna, con sede nel cinquecentesco palazzo del cardinale Giovanni Poggi e del fratello Alessandro, appositamente acquistato dal Senato (oggi sede del Rettorato dell'Università in via Zamboni 33). La stabilità e la robustezza dell'edificio avrebbero consentito la costruzione di una torre per le osservazioni astronomiche, imponente, salda e, all'epoca, distante dai disturbi del centro cittadino. Necessario fu il consenso del papa Clemente XI che contribuì con 2400 scudi.

L'Istituto delle Scienze non doveva essere solo un luogo in cui "discutere" di scienza – come avveniva nelle riunioni periodiche dell'Académie des Sciences parigina e della Royal Society londinese – ma soprattutto un luogo in cui "fare" scienza e anche presentarla al pubblico, mediante regolari lezioni e dimostrazioni degli esperimenti da parte degli stessi scienziati dell'Accademia, molti dei quali erano contemporaneamente professori dello Studio universitario. È a quel documento del 1711 che si deve allora far risalire l'origine della costruzione della Specola.

A conferma del progetto di un uso pratico dell'astronomia e delle osservazioni che dalla nuova

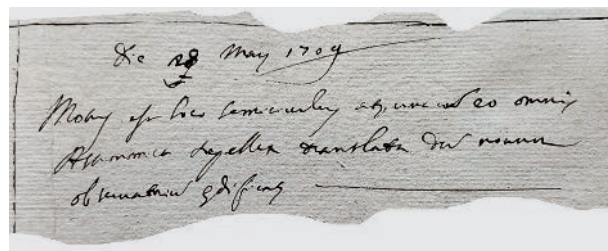


FIG. 5. L'appunto di mano di Manfredi nell'ultima pagina del *Diarium Observationum* che attesta la chiusura della Specola marsiliana il 28 maggio 1709. (AABO, Oa, sottoserie "1: Osservazioni Specola Marsiliana 1703-1709", Oa1.3, f. 22)

Specola si sarebbero potute compiere, il 30 agosto dello stesso 1711, Manfredi aveva scritto a Marsili, a Roma per l'incontro con il Papa:

Il frutto principale che si ricava dalle osservazioni astronomiche è la riforma della Geografia. Quella dell'Italia ne ha gran bisogno, essendo le carte del Magini tutte false nella graduazione, e molto peggiori di quelle, che si vanno tutto giorno pubblicando in Italia, e massime a Roma. L'impresa di emendare la Geografia dell'Italia richiede la residenza fissa di un Astronomo in un Osservatorio, come appunto sarà quello di V.E., e richiede di più il viaggio di uno, o di due altri Astronomi per le spiagge, e punti principali, che può finirsi in un paro d'anni.⁶

Inaugurata il 13 marzo 1714, l'Accademia dell'Istituto delle Scienze e delle Arti di Bologna divenne ben presto famosa a livello europeo, paragonata addirittura all'utopistica *New Atlantis* di Francis Bacon da Bernard le Bouyer de Fontenelle, segretario perpetuo dell'Académie parigina, nell'elogio di Marsili letto agli Accademici nel 1730:

*Dans ce Palais [...] on croit voir l'Atlantide du Chancelier Bacon exécutée, le songe d'un Savant réalisé. Il sera facile de juger qu'on n'a pas oublié un observatoire.*⁷

[In questo palazzo [...] sembra di vedere realizzata l'Atlantide del cancelliere Bacon, il sogno di uno scienziato divenuto realtà. Sarà facile constatare come non sia stato affatto dimenticato un osservatorio.]

I registri di osservazione della Specola marsiliana si erano interrotti, bruscamente, il 28 maggio 1709, con la seguente annotazione di mano di Eustachio Manfredi che mostra la speranza di riprendere presto le osservazioni nella nuova sede:

*Motus est loco semicirculus atque una cum eo omnis astronomica supellex translata dum novum observatorium aedificatur.*⁸

[Il semicerchio viene rimosso dalla sua sede e con esso si trasferisce tutta la strumentazione astronomica in attesa dell'edificazione di una nuova sede.] (FIG. 5)

⁶ G. FANTUZZI, *op. cit.*, p. 319.

⁷ B. LE BOUYER DE FONTENELLE, *Eloge de M. le Comte Marsigli, in Éloges des académiciens, avec l'histoire de l'Académie royale des sciences en 1699 ...*, A La Haye, chez Isaac Vander Kloot, 1740, II, pp. 417-436.

⁸ Per *semicirculus* si intende il grande semicerchio murale da 3 m di diametro di Domenico Lusverg del 1704, oggi esposto nel Museo della Specola assieme ad altri strumenti della Specola marsiliana.

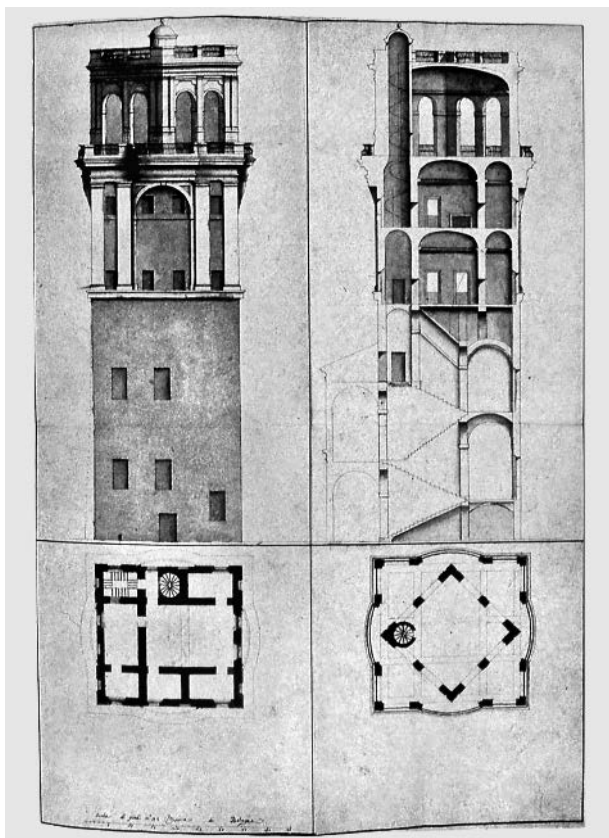


FIG. 6. Prospetto, sezione e pianta di quello che è probabilmente il primo progetto della Specola, attribuito a Giuseppe Antonio Torri. (Archivio di Stato di Bologna, Fondo Assunteria d'Istituto, *Diversorum*, B 4, n. 2)

Ma l'astronomo dovrà attendere ancora molti anni. Infatti, per varie vicende, come la morte nel 1713 dell'architetto Giuseppe Antonio Torri, cui l'anno precedente era stato commissionato il progetto della Specola (FIG. 6), e soprattutto per l'aumento delle spese di costruzione, si dovettero cessare i lavori. Scrive Manfredi, nella seconda pagina del primo quaderno delle osservazioni dalla Specola, per ricordare quanto avvenuto in quegli anni:

La fabbrica dell'osservatorio dell'Istituto delle Scienze ebbe principio col medesimo Istituto l'anno 1712, ma essendo poi stata per molti anni interrotta, quando non era per anco in istato di servire all'uso di alcuna osservazione celeste, convenne al Professore, nelle occasioni che si presentavano di farne, cercare ora un luogo, ora un altro nel Palazzo dell'Istituto, e talvolta anco fuori di questo, per iscoprire quella parte del cielo che gli occorreva, quindi è che a riserva di qualche eclissi, poco o null'altro gli riuscì in questo tempo d'osservare. L'anno 1722 si mise mano di nuovo alla fabbrica, si fecero i tre appartamenti della Torre, e questa si alzò fino al piano del primo terrazzo, su cui posa la Torretta; la quale fu poi costruita nel seguente anno 1723, rimanendo tuttavia senza lastrico, e senza parapetto tanto il suo terrazzo, quanto l'altro superiore della Torretta.⁹

Grazie a una nuova donazione del Papa di 15.000 scudi, ottenuta da Marsili, i lavori erano potuti ri-

⁹ AABO, Oa3.1, f. 2r.



FIG. 7. 1724: la Specola sopra Palazzo Poggi risulta ancora incompiuta in questo particolare della grande pianta prospettica a volo d'uccello in 12 fogli, *Incoscenografia di Bologna* (Bologna, G. P. Longhi, 1724), realizzata da Matteo Borboni nel 1638 e aggiornata nel 1724, due anni prima che la torre venisse completata.

prendere nel 1722, sotto la direzione di Carlo Francesco Dotti, architetto e capomastro dell'Istituto, per il quale aveva disegnato anche la grande biblioteca, che verrà realizzata più tardi. Il Dotti modificò il progetto del suo predecessore, semplificando i motivi barocchi, secondo il suo personale stile architettonico, e conferendo alla torre un aspetto severo, quasi neo-medievale.¹⁰ (FIG. 7)

Prosegue ancora Manfredi, che dall'ottobre al dicembre 1724 aveva cercato di compiere alcune osservazioni, ma che è sempre più disperato per i ritardi nei lavori, nonostante Innocenzo XIII avesse ordinato di concludere la fabbrica dell'Osservatorio per il 1725, così che potesse essere visitata dagli stranieri che si sarebbero recati a Roma per l'Anno Santo:

Si interrompono di nuovo le osservazioni per la difficoltà di farle seguitare; non essendo per anco stata assegnata all'Astronomo l'abitazione, e [...] mancando diversi altri comodi, non essendo per anco situate a luogo le porte e finestre della Torretta.¹¹

Durante la lenta e laboriosa costruzione della torre, gli strumenti astronomici provenienti dalla Specola marsiliana erano stati riposti in una delle stanze site al primo piano del palazzo, quella di fronte allo scalone d'accesso alla torre.¹² Incaricato con altri accademici dall'Assunteria di redigere i testi delle iscrizioni murali per tutte le Stanze dell'Istituto, Manfredi propose per quella, provvisoria, dell'astronomia il seguente distico:¹³

¹⁰ D. LENZI, *Le trasformazioni settecentesche*, in *Palazzo Poggi: da dimora aristocratica a sede dell'Università di Bologna*, a cura di A. Ottani Cavina, Bologna, Nuova Alfa Editoriale, 1988, pp. 58-78.

¹¹ AABO, Oa3.1, f. 23v.

¹² [F. M. ZANOTTI], *De Bononiensi Scientiarum et Artium Instituto. De origine Instituti. Cap. 1*, in «De Bononiensi Scientiarum et Artium Instituto atque Academia Commentarii», Tomo I, Bononiae, Ex typographia Laelii a Vulpe, 1731, pp. 6-7. La digitalizzazione completa dell'edizione dei «Commentarii» conservata presso l'allora biblioteca del Dipartimento di Astronomia è accessibile a <https://historica.unibo.it/entities/journalfonds/2ad85d2b-fe3c-43cb-894f-1b5d96472b4c>.

¹³ Archivio di Stato, Fondo Assunteria d'Istituto, *Diversorum*, B 18, n. 36; si veda anche n. 13.



FIG. 8. Sezione della Specola e dell'Istituto delle Scienze, tratta da *Dell'origine e de' progressi dell'Istituto delle Scienze di Bologna ... compilata da Giuseppe Gaetano Bolletti*. (Bologna, L. della Volpe, 1751)

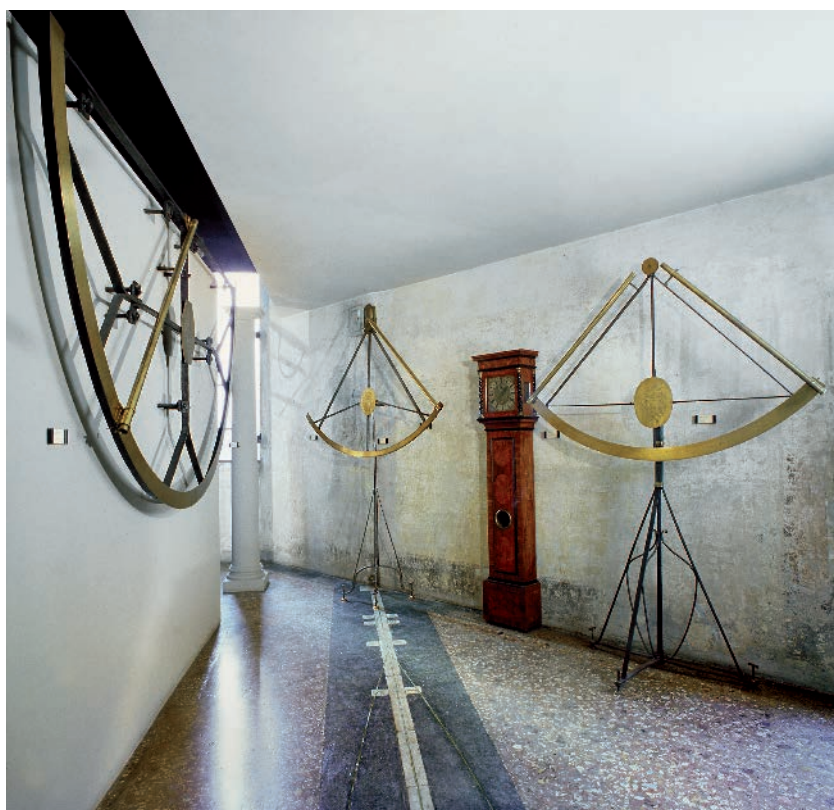


FIG. 9. Alcuni degli strumenti della Specola marsiliana, installati all'inizio del 1727 nella Sala meridiana della Specola dell'Istituto delle Scienze. Nella foto, il lato sud-ovest della stanza (nell'allestimento della fine del Novecento) con, a sinistra, il grande semicircolo murale di Domenico Lusverg, a destra i due quadranti mobili, sempre di Lusverg, del 1702 e 1703, e l'orologio a pendolo di Daniel Quare del 1701. Nel pavimento, la linea meridiana filare nel rifacimento di Ercole Lelli del 1742, con l'analemma che consente di ottenere il tempo solare medio dal tempo solare vero al mezzogiorno; sulla parete, in fondo e in alto, la lanterna in ottone che protegge l'occhio della meridiana. All'epoca il soffitto in legno era apribile.

Haec tibi mente dabunt astrorum evolvere cursus organa / sublimi mox statuenda loco.

¹⁴ E. BAIADA, F. DI PALMA, *Quando la scienza polemizzava in versi latini, «Saecularia Nona»*, 9, 1989, pp. 20-23.

¹⁵ E. MANFREDI, *Istituzioni astronomiche*, Bologna, Lelio dalla Volpe, 1749, p. XI.

[Questi strumenti, che presto saranno trasportati in un posto più elevato, permetteranno alla tua mente di comprendere come si svolge il corso degli astri.]

Di tutte queste iscrizioni, di cui in Archivio di Stato sono rimasti solo i testi manoscritti, non si è più trovata traccia alcuna e quindi quasi sicuramente non vennero poi realizzate.¹⁴

Manfredi riuscì a bloccare la proposta di alcuni Assunti dell'Istituto che volevano la torre più alta della cattedrale di San Pietro in Bologna, con la certezza che questo avrebbe nuovamente rallentato i lavori. E così, «A dì 29 Aprile 1726 finalmente ebbe l'astronomo il comodo di venire ad abitare nell'Istituto» e, come si legge nella nostra citazione iniziale, «In questo mese di dicembre dell'anno 1726 fu compito tutto ciò che apparteneva alla fabbrica dell'osservatorio». (FIG. 8)

Occorsero però alcuni mesi ancora per sistemare gli strumenti provenienti dall'osservatorio Marsiliano, con alcuni altri donati dai cardinali locali Sebastiano Antonio Tanari e Giovanni Antonio Davia, e nella metà del 1727 Manfredi poté finalmente iniziare quelle ricerche che lui stesso definiva «frutti non disprezzabili che ritrae dall'astronomia la civil società».¹⁵ (FIG. 9)

«Frutti» che dalla metà del Seicento avevano favorito la nascita di un gran numero di osservatori astronomici, non più, come era stato fino ad allora, raccolte private e strumenti di lavoro di un singolo studioso o astronomo di corte o per l'insegnamento universitario, ma istituzioni pubbliche:

Così come Rodolfo il Glabro aveva scritto che alla fine del primo millennio «la terra si era ricoperta di un candido mantello di chiese», ora si può dire che rapidamente l'Europa si riempì di un «mantello» di torri astronomiche.¹⁶

Compito degli astronomi era migliorare la cartografia, la geodesia, la navigazione, per ottenere il perfezionamento nella misura e nella rappresentazione dei territori, il miglioramento

¹⁶ F. BÒNOLI, *La nascita dei moderni osservatori*, in *Galileo. Immagini dell'universo dall'antichità al telescopio*, a cura di P. Galluzzi, Firenze, Giunti, 2009, pp. 276-287.

delle rotte negli oceani, la descrizione dei nuovi luoghi da esplorare: tutte discipline nelle quali – allora come adesso – non si poteva prescindere dalle conoscenze e dalle tecniche astronomiche, con un rapporto, così, tra scienza, potere e attività produttive quanto mai evidente e diretto.

Proprio per questi scopi, nel 1666, Luigi XIV aveva istituito l'Académie Royale des Sciences e il conseguente Observatoire Royal, affidato pochi anni dopo a Giovanni Domenico Cassini, mentre nel 1675 la Royal Society nominò John Flamsteed Astronomer Royal per l'erigendo Osservatorio nel parco di Greenwich. E poi, contemporanei della Specola bolognese nei primi anni del Settecento, a Berlino, Uppsala, San Pietroburgo.

Non a caso, a Eustachio Manfredi non era affidato solo l'Osservatorio, per le “utili” osservazioni astronomiche, ma anche la Stanza militare dell'Istituto delle Scienze, con l'incarico delle lezioni di balistica – se mi è concesso, un “pallino” di Marsili, come abbiamo visto – ed era da tempo anche Sovrintendente alle acque per i numerosi problemi idraulici e territoriali nello Stato della Chiesa e con i suoi confinanti. Negli atti della donazione si legge:

Il governo dell'Osservatorio, e della Stanza Militare, si dovrà dare all'astronomo, che di continuo facci le osservazioni Celesti, secondo l'anno istituito, che sarà stabilito nell'Accademia delle Scienze, e pure alcuni giorni della settimana insegnerà le fortificazioni, ed Artiglieria con gli aiuti degli esquisiti libri, che sono nella libreria, e dei tanti modelli, e cannoni esistenti nella Stanza propria [...].¹⁷

E così, oltre agli altri impegni,¹⁸ l'astronomo si dedicò alle sue amate «osservazioni Celesti», ottenendo risultati che lo faranno accogliere nelle principali società scientifiche europee e faranno della Specola dell'Istituto delle Scienze di Bologna, terminata proprio trecento anni or sono, una delle più apprezzate del Settecento in tutta Europa ... ma questa è un'altra storia.

¹⁷ Archivio di Stato di Bologna, Fondo Assunteria d'Istituto, *Diversorum*, B 7.

¹⁸ U. BALDINI, *Manfredi, Eustachio*, in *Dizionario Biografico degli Italiani*, Roma, Istituto della Enciclopedia Italiana Treccani, Vol. 68, 2007, pp. 668-676; F. BÒNOLI, *Manfredi, Eustachio*, in *Biographical Encyclopedia of Astronomers*, Th. Hockey Edt., New York, Springer, 2007, pp. 733-735, <https://link.springer.com/referencework/10.1007/978-1-4419-9917-7> (aggiornato nel 2026 per l'edizione online in preparazione).

Fabrizio Bònoli, Socio onorario della SAIt e direttore del «Giornale di Astronomia», già professore associato in Storia dell'astronomia presso l'Università di Bologna, è attualmente *Alma Mater Honorary Professor*.

Fotoevaporazione esterna di dischi proto-planetari★

Rossella Anania

School of Physics, Trinity College Dublin, Ireland

Introduzione

L'INTERESSE verso lo studio di pianeti al di fuori del Sistema solare è cresciuto esponenzialmente da quando, nel 1995, Michel Mayor e Didier Queloz annunciarono la scoperta di 51 Pegasi b, il primo pianeta extrasolare orbitante attorno a una stella simile al Sole. Capire come nascono i pianeti è uno degli obiettivi primari dell'astrofisica moderna. Il numero di esopianeti confermati supera attualmente quota 8000. Molti di questi esopianeti hanno massa simile a quella di Giove ma orbitano molto vicino alla loro stella, noti come *Hot Jupiters*, altri hanno massa maggiore della Terra ma sono situati a distanza minore dalla loro stella, noti come *Super Earths*.

Data l'enorme varietà di esopianeti, è naturale domandarsi il motivo alla base di questa diversità, quali siano i processi fisici che portano alla formazione dei pianeti, e quanto il Sistema solare sia unico all'interno della nostra Galassia. Le risposte a queste domande vanno cercate a monte, nei luoghi in cui i pianeti nascono: i dischi protoplanetari. Questi sono strutture di gas e polvere che circondano le stelle appena nate e che rappresentano, letteralmente, il materiale da costruzione dei pianeti. Comprendere le caratteristiche e l'evoluzione di questi dischi è quindi fondamentale per comprendere come i pianeti, compresi quelli del Sistema solare, si formano e acquisiscono le loro proprietà. Le prime immagini dirette di questi oggetti risalgono agli anni Novanta, quando l'Hubble Space Telescope catturò le sagome a forma di cometa dei cosiddetti *proplyds* nella Nebulosa di Orione (pannello a sinistra in FIG. 1), dischi protoplanetari che, «scoperti» dalla radiazione ultravioletta emessa dalle stelle massicce vicine, assumono questa forma peculiare allungata con la cuspidi rivolta verso la stella massiccia che li sta irradiando. Il radio-interferometro ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) ha poi rivoluzionato lo studio della formazione planetaria quando, dal 2014 in poi, a partire dalle spettacolari immagini del disco attorno a HL Tauri, ha reso possibile l'osservazione della polvere dei dischi, rivelando che questi presentano sottostrutture (anelli, spirali, asimmetrie), che potrebbe-

ro essere causate da pianeti che si stanno formando (pannello a destra in FIG. 1).

Per comprendere come i dischi protoplanetari evolvono e connettere con la popolazione osservata di esopianeti, bisogna includere un elemento essenziale: l'impatto dell'ambiente di formazione stellare in cui nascono. La maggior parte delle stelle nella nostra Galassia si forma in densi ammassi che presentano un elevato numero di stelle massicce (di tipo spettrale O e B) che emettono intensa radiazione ultravioletta (UV). Quando la radiazione UV raggiunge i dischi proto-planetari vicini, il materiale situato nelle regioni più esterne del disco, essendo gravitazionalmente meno legato alla stella centrale, viene trascinato dai venti foto-evaporativi e disperso. Di conseguenza, il disco viene eroso progressivamente dall'esterno verso l'interno, riducendo la possibilità di formare pianeti nelle sue zone più esterne e influenzando la composizione dei pianeti che si formeranno in seguito. Questo processo è noto come fotoevaporazione esterna ed è stato storicamente proposto per spiegare le immagini rilasciate dal telescopio spaziale Hubble di dischi protoplanetari ora noti come *proplyds*, al centro della Nebulosa di Orione, circondati da una nube di gas ionizzato a forma di cometa con la cuspidi rivolta verso la stella massiccia più vicina.

Grazie a programmi osservativi condotti, ad esempio, con il telescopio ALMA, possiamo ora osservare intere popolazioni di dischi ad alta risoluzione per misurare la loro massa, estensione e composizione chimica, con una galleria che comprende più di 2000 oggetti. Uno dei problemi fondamentali è però che la maggior parte dei dischi osservati ad alta risoluzione sono quelli nelle regioni di formazione stellare più vicine a noi (in un raggio di circa 200 pc dal Sole), come Taurus, Lupus o Chamaeleon, che si trovano in ambienti relativamente tranquilli, con poche stelle OB. Tuttavia, questi ambienti quieti non sono affatto rappresentativi: la maggioranza delle stelle nella nostra Galassia si forma in regioni a densità stellare molto più alta, con molte più stelle OB e dove il flusso di radiazione UV sentito da un disco può arrivare ad essere centinaia o migliaia di volte superiore a quello delle regioni vicine al Sole. In altre parole, il campione di dischi su cui basiamo gran parte della nostra comprensione della formazione planetaria è fortemente distorto. Di conseguenza, per rispondere alla domanda: «Come avviene tipicamente la formazione dei pianeti nella Galassia?», è necessario comprendere come la radiazione UV influenza la

* L'Autrice presenta qui i contenuti essenziali delle ricerche svolte nel corso del Dottorato di Ricerca che le sono valse la menzione speciale al "Premio Pietro Tacchini" della SAIt per l'anno 2026 · XXI edizione; premio assegnato alle migliori tesi di Dottorato di carattere astrofisico.

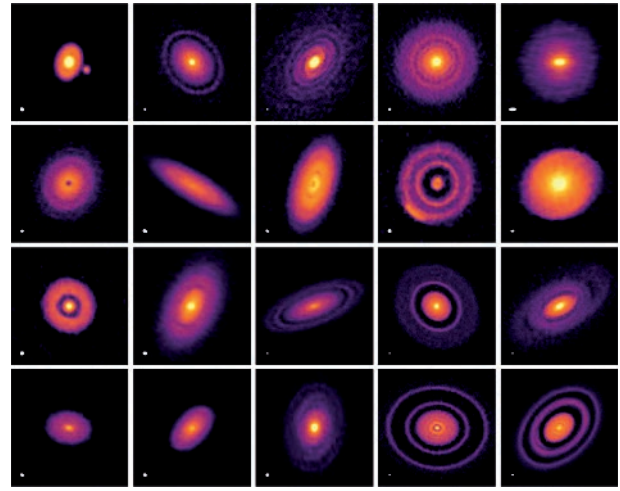
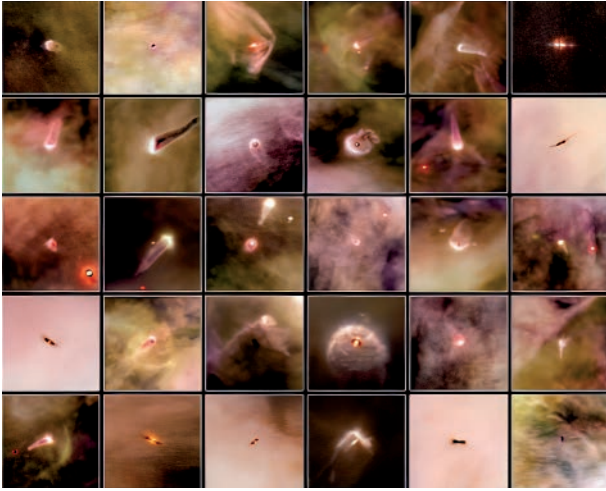


Fig. 1. Sinistra: Dischi protoplanetari nel cuore della Nebulosa di Orione come visti nello spettro del visibile dal telescopio spaziale Hubble (RICCI *et al.* 2008). Destra: Dischi protoplanetari nelle regioni di formazione stellare vicine, come visti usando il radio-interferometro ALMA (DSHPARP SURVEY, ANDREWS *et al.* 2018a).

struttura e dinamica dei dischi protoplanetari. Il progetto della mia tesi di dottorato, *Assessing the role of external photoevaporation of protoplanetary discs in nearby star-forming regions*, discussa presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano (relatore prof. Giovanni P. Rosotti, co-relatore dott. Andrew J. Winter), affronta questo problema fondamentale.

In questo articolo riportiamo un'introduzione sui meccanismi base dell'evoluzione dei dischi e il modello fisico dei venti foto-evaporativi e i risultati principali ottenuti nella tesi, incluso il ruolo della fotoevaporazione esterna nei dischi situati nella regione di formazione stellare Upper Scorpius, e un nuovo metodo per calcolare con accuratezza mai raggiunta prima il flusso UV a cui sono soggetti i dischi nelle regioni di formazione stellare vicine.

L'evoluzione dei dischi protoplanetari: le basi

Le stelle nascono in nubi molecolari giganti, regioni di gas (soprattutto idrogeno molecolare) e polvere, con masse tipiche di 10^4 – 10^6 masse solari e dimensioni di decine o centinaia di parsec. All'interno di queste nubi, piccole sottostrutture dense (*Molecular Cloud Cores*) collassano sotto la propria gravità quando la pressione termica non basta più a contrastarla e da qui nascono le stelle. Poiché queste strutture dense e compatte ruotano, per conservare il momento angolare durante il collasso il materiale non cade tutto direttamente sulla protostella, ma si appiattisce a formare un disco circumstellare, detto anche disco di accrescimento a causa del processo che porta il gas presente in esso ad accrescere sulla stella centrale. In circa dieci milioni di anni, parte del gas del disco viene accresciuto sulla stella, parte viene disperso, e parte contribuisce a formare pianeti gassosi, mentre la polvere subisce processi come collisione, frammentazione, e coagulazione a formare planetesimi di dimensio-

ni dell'ordine del km e successivamente pianeti (ARMITAGE, 2013).

Il meccanismo principale che spiega l'evoluzione dei dischi protoplanetari è noto come “accrescimento viscoso”. L'idea di fondo è che il gas del disco ruota in orbite quasi kepleriane, con gli strati più interni che girano più velocemente di quelli esterni. Se immaginiamo il disco come diviso in anelli concentrici di gas attorno alla stella, lo scorrimento differenziale dovuto alla rotazione kepleriana degli anelli genera attrito tra anelli adiacenti (una viscosità) che trasferisce momento angolare verso l'esterno del disco. Per cadere verso la stella il gas deve liberarsi del proprio momento angolare e lo fa proprio grazie a questo scorrimento viscoso: la maggior parte della massa migra verso l'interno e finisce sulla stella, mentre una piccola frazione di materiale si sposta verso l'esterno, portando via il momento angolare in eccesso. Formalmente, assumendo un disco geometricamente sottile (con estensione verticale molto inferiore rispetto a quella radiale) ed assi-simmetrico, questa fisica si può tradurre in un'equazione di diffusione per la densità superficiale del disco, $\Sigma(R, t)$, che lega la sua evoluzione temporale alla viscosità cinematica ν e al raggio R :

$$\partial \Sigma / \partial t = (3/R) \partial / \partial R [R^{1/2} \partial / \partial R (\nu \Sigma R^{1/2})]$$

Questa equazione ammette alcune soluzioni analitiche istruttive di cui quella più comunemente usata dei modelli numerici di evoluzione dei dischi è la cosiddetta *Self-similar solution* (LYNDEN-BELL, PRINGLE, 1974) ottenuta assumendo che la viscosità scali come una legge di potenza del raggio. In questo caso, la massa del disco decresce nel tempo come una legge di potenza ($M_d \propto t^{-1/2(2-\gamma)}$), mentre il raggio caratteristico del disco cresce nel tempo: il disco tende quindi ad allargarsi mentre perde massa verso la stella centrale. Questo comportamento (dischi che crescono in dimensione mentre invecchiano) è una firma tipica dell'evoluzione puramente viscosa, e sarà un punto di riferi-

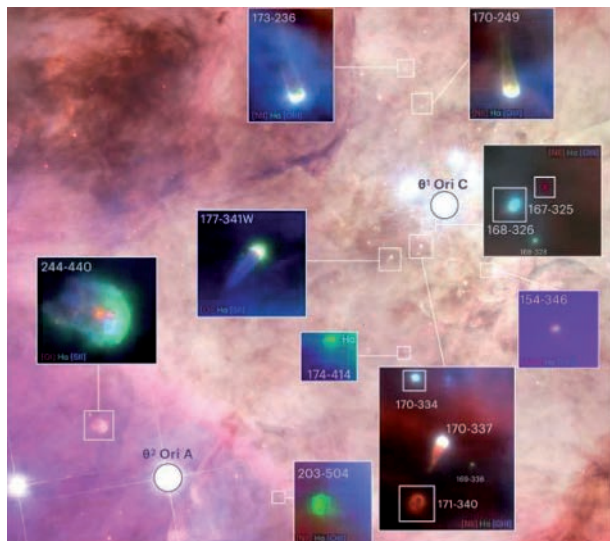


FIG. 2. *Proplyds* al centro della Nebulosa di Orione (ARU *et al.* 2024).

mento cruciale quando, più avanti, confronteremo questa previsione con quanto osservato in regioni evolute come Upper Scorpius.

Un problema aperto rimane però: da dove viene, fisicamente, questa viscosità? La risposta più diffusa in letteratura chiama in causa la turbolenza nel disco, generata da instabilità idrodinamiche, magnetoidrodinamiche o gravitazionali. Poiché la natura esatta di questa turbolenza resta dibattuta, gli astrofisici usano da mezzo secolo una parametrizzazione elegante, dovuta a SHAKURA e SUNYAEV (1973): la viscosità viene scritta come $\nu = \alpha cs H$, dove cs è la velocità del suono, H è lo spessore verticale del disco, e α è un parametro adimensionale, $\alpha \leq 1$, che racchiude, di fatto, tutta la nostra ignoranza sulla vera natura della turbolenza. Il fatto che α debba assumere un valore inferiore a 1 deriva dal fatto che la viscosità è definita come il prodotto tra una misura scala di lunghezza ed una misura scala di velocità. Visto che la misura scala di lunghezza della turbolenza non può essere maggiore allo spessore del disco H , e la misura scala della velocità non può essere superiore alla velocità del suono cs , questo implica che, definendo ν come $\alpha cs H$, α deve essere minore di 1. Vincoli osservativi e modelli di evoluzione dei dischi indicano valori tipici di $\alpha \sim 3 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-4}$.

Accanto al gas, che costituisce circa il 99% della massa del disco e ne governa la dinamica, c'è la polvere che, pur essendo minoritaria in massa, domina l'opacità ed è per questo la componente più facile da osservare alle frequenze che coprono dall'infrarosso al millimetrico. I grani di polvere di dimensione piccola seguono la dinamica del gas e se ne distaccano man mano che collidendo tra di loro crescono progressivamente. L'interazione tra gas e polvere nel disco provoca una sedimentazione della polvere verso il piano mediano del disco per effetto della gravità, e un trasporto radiale verso l'interno a causa della resistenza aerodinamica esercitata dal gas, che orbita a una velocità leggermente sub-kepleriana.

È in questo ambiente dinamico che i planetesimi, e infine i pianeti, si formano (per una review, vedi BIRNSTIEL, 2024).

Il ruolo dell'interazione con l'ambiente di formazione stellare: fotoevaporazione esterna di dischi protoplanetari

L'idea che l'intensa radiazione UV emessa da stelle massicce potesse troncare i dischi deriva dalle osservazioni condotte nei primi anni Novanta con l'Hubble Space Telescope che, nel cuore della Nebulosa di Orione (ONC, Orion Nebula Cluster), dove si trovano le stelle massicce dell'Ammasso del Trapezio, rivelò globuli di gas ionizzato con una struttura allungata a forma di goccia o di cometa, con la coda sempre orientata in direzione opposta alla stella più luminosa e massiccia della regione, θ^1 Orionis C (FIG. 2, ARU *et al.*, 2024). O'Dell e collaboratori coniarono per questi oggetti il termine *proplyd* nel 1993 (da *proto-planetary disc*), ipotizzando che si trattasse di dischi protoplanetari le cui zone più esterne venissero ionizzate e spazzate via dall'intensa radiazione UV delle vicine stelle OB. Questa spiegazione era supportata dal diametro di questi oggetti che è molto simile a quello del Sistema solare, dal fatto che la stella centrale ospitante il disco non emette una radiazione UV abbastanza intensa da provocare la ionizzazione del gas come osservata, e dal peculiare orientamento degli oggetti rispetto alla stella più massiccia del Trapezio. L'ipotesi venne consolidata ulteriormente nel 2005, quando Smith e collaboratori mostrarono che circa l'80% dei *proplyds* mostrava emissione termica nell'infrarosso, dovuta alla polvere presente nel disco, che correlava negativamente con la distanza da θ^1 Orionis C, indice del fatto che i dischi più vicini alla stella massiccia, essendo illuminati da una radiazione UV maggiore, disperdono la loro polvere più velocemente e quindi emettono meno radiazione. Successivamente, è stato mostrato che anche nella regione di Sigma Orionis e Lambda Orionis dischi più vicini alle stelle massicce che dominano il campo di radiazione UV presentano flussi di emissione infrarossa più bassi rispetto ai dischi situati a distanze maggiori da esse (ANSELLE, 2020; MAUCÒ 2023). La radiazione infrarossa traccia la polvere presente in un disco di dimensione dell'ordine del millimetro, e quindi il fatto che dischi in prossimità delle stelle OB emettano di meno a queste lunghezze d'onda è evidenza dell'effetto della fototevaporazione esterna.

Il fenomeno di fotoevaporazione esterna nel disco avviene quando la radiazione UV proveniente da una stella massiccia vicina riscalda gli strati superficiali del disco, aumentando la velocità del suono locale del suo gas. Quando questa energia termica diventa comparabile all'energia gravitazionale che lega il disco alla sua stella centrale, il materiale del disco non è più vincolato e può sfuggire, dando origine a un vento termico (per una review, vedi WIN-

TER, HAWORTH, 2022). Si definisce così il “raggio gravitazionale” del sistema, il punto oltre il quale il gas termicamente scaldato può liberarsi dall’attrazione della stella:

$$R_g = GM^* / cs^2 \approx 140 (M^*/M_\odot)(T/100\text{K})^{-1} \text{ au.}$$

A seconda dell’energia dei fotoni coinvolti nel processo, si distinguono due regimi. I fotoni EUV (*extreme-ultraviolet*, energie superiori a 13.6 eV, sufficienti a ionizzare l’idrogeno) scaldano il gas fino a circa 10.000 K, producendo un fronte di ionizzazione molto vicino alla superficie del disco. Questo è il regime tipico dei classici *proplyds* dell’ONC (vedi FIG. 2 per una galleria dei *proplyds* nell’ONC). Misurando la distanza del fronte di ionizzazione dalla stella centrale, si può calcolare il tasso di perdita di massa relativo al disco, che è dell’ordine di 10^{-7} – 10^{-8} masse solari all’anno per i *proplyds* nell’ONC. I fotoni FUV (*far-ultraviolet*, tra 6 e 13,6 eV), non abbastanza energetici da ionizzare l’idrogeno, ma sufficienti a dissociare le molecole e a riscaldare il gas fino a poche centinaia o migliaia di Kelvin, producono invece un vento prevalentemente neutro, che si origina più in profondità nel disco e attraversa una regione di foto-dissociazione (PDR) prima di raggiungere il fronte di ionizzazione. Il flusso FUV, tipicamente più debole ma molto più comune del flusso EUV estremo, non produrre necessariamente *proplyds* e per questo l’effetto della fotoevaporazione esterna a flussi FUV inferiori necessita di modelli e future osservazioni per essere studiato. Per quantificare l’intensità della radiazione UV si usa convenzionalmente l’“unità di Habing” (HABING 1968), G_0 , ovvero il flusso FUV medio misurato nel mezzo interstellare locale, nei pressi del Sole, integrato tra 912 e 2400 Å. I classici *proplyds* dell’ONC vivono a flussi superiori a qualche migliaio di G_0 ; ma studi statistici sulla distribuzione delle stelle giovani nella Galassia mostrano che l’ambiente di formazione stellare più comune, quello a metà strada tra un ammasso come l’ONC e uno molto più ricco come Westerlund 1, corrisponde a flussi FUV tipici nell’intervallo 100–10.000 G_0 , un regime intermedio, meno spettacolare dei *proplyds* ma in cui l’effetto della fotoevaporazione esterna sulle proprietà e la dinamica dei dischi potrebbe non essere trascurabile. Infatti, modelli numerici come la griglia FRIED (FUV Radiation Induced Evaporation of Discs, sviluppata da HAWORTH *et al.*, 2019) hanno mostrato che tassi di perdita di massa dell’ordine di 10^{-9} – 10^{-8} masse solari all’anno possono essere prodotti anche a flussi FUV moderati, 10–100 G_0 . Questi sono valori non trascurabili se confrontati con i tassi di accrescimento tipici dei dischi giovani (10^{-8} – 10^{-11} masse solari all’anno). La fotoevaporazione esterna può quindi competere, in molte situazioni realistiche, con l’accrescimento viscoso dei dischi nel determinare quanta massa rimane disponibile per formare pianeti. Nel vento fotoevaporativo può essere trascinato anche la polvere, ma solo fino a una certa dimensione massima dei grani, determinata dall’equilibrio tra la forza di trascinamento del

vento e la gravità stellare (come spiegato nel lavoro di FACCHINI *et al.*, 2016). Se nel disco esistono già delle sottostrutture di polvere, come ad esempio gli anelli osservati da ALMA, queste possono sopravvivere alla fotoevaporazione purché si trovino entro il raggio di troncamento prodotto dal vento.

AGE-PRO e l’influenza della fotoevaporazione esterna sui dischi protoplanetari in Upper Scorpius

AGE-PRO (ALMA survey of Gas Evolution in PROtoplanetary discs) è un programma osservativo condotto con il telescopio ALMA (ZHANG *et al.*, 2025) pensato per comprendere l’evoluzione del gas dei dischi protoplanetari nel tempo. AGE-PRO ha osservato trenta dischi distribuiti in tre regioni di formazione stellare vicine (a distanze inferiori a 200 pc dal Sole) e di età diversa: Ophiuchus (meno di 1 milione di anni), Lupus (età intermedia, 1-3 milioni di anni) e Upper Scorpius (fase avanzata dell’evoluzione, circa 4-6 milioni di anni). L’obiettivo era fornire misure robuste di massa e raggio (estensione) del gas e confrontare questi dati con le predizioni di modelli teorici di evoluzione dei dischi, per determinare il meccanismo dominante della loro evoluzione. I risultati di AGE-PRO, pubblicati in un numero speciale dell’*Astrophysical Journal* e in un comunicato stampa dell’Università degli Studi di Milano, hanno mostrato che la massa del gas decresce già nei primi milioni di anni (tra Ophiuchus e Lupus), mentre tra Lupus e Upper Scorpius la massa mediana non cambia in modo significativo. Le dimensioni del disco di gas, misurate dal raggio che racchiude il 90% dell’emissione della riga di ^{12}CO , aumentano invece dal valore mediano di Lupus (~ 74 au) a quello di Upper Scorpius (~ 110 au), un comportamento che sembrerebbe confermare l’aspettativa dell’evoluzione puramente viscosa, in cui il disco tende a «espandersi» nel tempo. Eppure, quest’ultima potrebbe non essere l’interpretazione corretta. Il lavoro di TRAPMAN e collaboratori (2020, 2022) ha precedentemente mostrato che i dischi di Upper Scorpius appaiono sistematicamente più piccoli di quanto previsto dai modelli di evoluzione dei dischi puramente viscosi, indipendentemente dal valore assunto per la viscosità, e anche i modelli di evoluzione basati su venti MHD, dove l’accrescimento avviene in seguito alla rimozione di momento angolare e materiale del disco attraverso le linee di campo magnetico del disco, faticano a riprodurre le dimensioni osservate senza ricorrere a condizioni iniziali dei dischi poco plausibili. Il sospetto è che manchi un ingrediente fisico che spieghi la rimozione aggiuntiva di materiale nei dischi evoluti in Upper Scorpius. La fotoevaporazione esterna è un candidato particolarmente plausibile in Upper Scorpius, perché questa regione fa parte dell’associazione OB di Scorpius-Centaurus, che conta in totale un centinaio di stelle massicce di cui una cinquantina sono proprio situate in

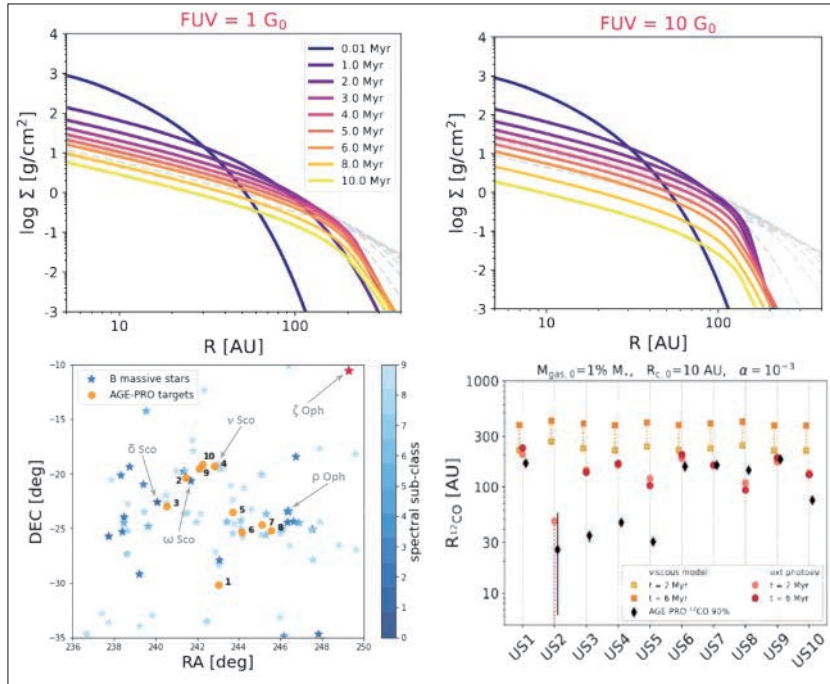


FIG. 3. Prima riga: Evoluzione della densità superficiale di un disco protoplanetario nel tempo, nel caso di accrescimento viscoso (linee grigie) e con l'inclusione dell'effetto della fotoevaporazione esterna (linee colorate) quando la radiazione UV esterna è bassa (1 G₀) o moderata (10 G₀, simile a quella calcolata per la regione di Upper Scorpius). Seconda riga, pannello a sinistra: coordinate celesti dei 10 oggetti inclusi in AGE-PRO nella regione di Upper Scorpius (in arancione) e delle stelle OB vicine (in gradazioni di blu). Seconda riga, pannello a destra: confronto tra i raggi in gas dei dischi osservati da AGE-PRO in Upper Scorpius (in nero) e le predizioni di un modello di accrescimento viscoso (in arancione e giallo) e con l'inclusione della fotoevaporazione esterna (in rosso e rosa). (Tratto da Anania *et al.* 2025)

Upper Scorpius e potrebbero emettere abbastanza radiazione UV da troncare i dischi vicini.

L'obiettivo del lavoro presentato da ANANIA *et al.* (2025) in una pubblicazione su *Astronomy & Astrophysics* è proprio determinare se l'inclusione della fotoevaporazione esterna nel modello viscoso di evoluzione dei dischi fosse in grado di spiegare i raggi e le masse in gas dei dischi in Upper Scorpius, ottenuti dalle osservazioni di AGE-PRO. In questo lavoro, per ciascuno dei dieci dischi del campione AGE-PRO in Upper Scorpius, è stato calcolato il flusso FUV sentito alla posizione del disco sommando il contributo di tutte le stelle O e B nei dintorni (FIG. 3). Conoscendo il tipo spettrale delle stelle, è infatti possibile calcolare la loro luminosità nel regime di frequenze FUV (CASTELLI, KURUCS, 2004) e, considerando la distanza di ogni oggetto dalle stelle OB, il flusso FUV è proporzionale al rapporto tra la luminosità FUV e il quadrato della distanza dalle OB. I dieci dischi di AGE-PRO in Upper Scorpius sperimentano flussi FUV mediani compresi tra 2 e 12 G₀, valori modesti, lontanissimi dalle migliaia di G₀ dei classici *proplyds*.

La domanda principale rimane quindi: «Come evolvono masse e raggi dei dischi protoplanetari se esposti ad una radiazione FUV esterna simile a questi valori?». Per rispondere a questa domanda sono state condotte simulazioni numeriche di dischi protoplanetari che evolvono viscosamente e sotto l'effetto della fotoevaporazione esterna. La densità su-

perficiale del disco evolve nel tempo seguendo l'equazione:

$$\frac{\partial \Sigma_g}{\partial t} = \left(\frac{3}{R} \right) \frac{\partial}{\partial R} [R^{1/2}] \frac{\partial}{\partial R} (\nu \Sigma_g R^{1/2}) - \Sigma'_{\text{ext}},$$

in cui il primo termine a destra indica la classica evoluzione viscosa e il secondo termine è il tasso di perdita di massa per unità di superficie dovuto alla fotoevaporazione esterna. I due processi (accrescimento viscoso e fotoevaporazione) operano su scale temporali molto diverse: il vento fotoevaporativo agisce su tempi scala dinamici, ordini di grandezza più brevi del tempo scala viscoso, per cui accoppiare i due termini in modo pienamente autoconsistente è computazionalmente difficile. Questo problema viene risolto approssimando il calcolo del secondo termine con un'interpolazione numerica di una griglia di modelli (FRIED, HAWORTH *et al.* 2019, 2023) i cui valori sono stati precedentemente calcolati. Il codice numerico usato, Dustpy (rilasciato da STAMMLER, BIRNSTIEL nel 2022), simula l'evoluzione 1D del disco usando una griglia radiale. In questo codice è

stato implementato l'effetto della fotoevaporazione esterna interpolando la griglia FRIED (HAWORTH *et al.*, 2019, 2023) in cui, data la massa della stella, il flusso FUV e il valore della densità superficiale del disco ad ogni raggio, è possibile ottenere il tasso di perdita di massa dovuto alla fotoevaporazione esterna. Questo termine viene poi implementato nell'equazione dell'evoluzione del disco.

Usando queste simulazioni numeriche, in questo lavoro è stato dimostrato che anche valori di flusso FUV tra 1 o 10 G₀ potrebbero alterare la massa e la dimensione dei dischi all'età di Upper Scorpius. FIG. 3 presenta l'evoluzione della densità superficiale di un disco sottoposto all'effetto della fotoevaporazione esterna nel caso in cui il flusso FUV sia pari ad 1 e 10 G₀, rispettivamente, mostrando che il disco viene troncato e si restringe. Questo causa una diminuzione della massa, del raggio e della vita di un disco rispetto al caso di evoluzione puramente viscosa.

Sono state quindi condotte simulazioni da confrontare con le osservazioni di AGE-PRO: sono state impostate le condizioni iniziali dei dischi considerando la massa stellare nota dei 10 oggetti in Upper Scorpius di AGE-PRO (compresa tra 0,1 e 0,6 masse solari), la massa iniziale dei dischi (che è a noi ignota) è stata fatta variare tra 1% e 10% della massa stellare, per la viscosità del disco sono stati testati valori tipici di 10⁻², 10⁻³, e 10⁻⁴, e l'estensione iniziale del disco (anch'essa a noi ignota) è stata fatta variare tra 10 e 100 au. I risultati delle simulazioni lasciate evol-

vere fino a raggiungere un'età dei dischi simile a quella di Upper Scorpius, tra 3 e 6 milioni di anni, sono stati confrontati con le masse e i raggi misurati dalle osservazioni di AGE-PRO. Il risultato principale è che il modello puramente viscoso “non riesce” a riprodurre le dimensioni del gas osservate in Upper Scorpius, mentre l'aggiunta della fotoevaporazione esterna porta il modello in accordo, entro un fattore due, con sette dei dieci dischi osservati (FIG. 3). Anche per la massa del gas, il modello con fotoevaporazione riproduce meglio le osservazioni. Questi risultati mostrano un punto di svolta per la teoria di evoluzione dei dischi, avendo dimostrato che anche un flusso FUV modesto, dell'ordine di poche unità o decine di G_0 , se agisce per milioni di anni, lascia un'impronta osservabile (anche se solo indirettamente per ora, non avendo osservazioni dirette di *proplyds* a questi valori) sulle dimensioni e sulle masse dei dischi.

Un'implicazione estremamente importante dei risultati mostrati in questo lavoro è che non si possono confrontare le proprietà medie di regioni di formazione stellare diverse basandosi sulla sola età. Upper Scorpius non può essere trattata semplicemente come la versione di Lupus ad età avanzata perché il suo livello di irraggiamento, anche se moderato, gioca un ruolo fondamentale e non trascurabile nel plasmarne le proprietà dei dischi.

Un nuovo metodo per calcolare il flusso FUV

Conoscere la quantità di radiazione UV che raggiunge una stella giovane e il suo disco è essenziale per comprendere l'effetto che la fotoevaporazione esterna può avere sui dischi. Il flusso FUV alla posizione di una stella, come visto nella sezione precedente, si calcola sommando il contributo delle singole stelle OB vicine

$$F_{\text{FUV}} = \Sigma [L_{\text{FUV},m} / (4\pi |x_{\text{disco}} - x_m|^2)],$$

dove $L_{\text{FUV},m}$ è la luminosità FUV della singola stella massiccia e $|x_{\text{disco}} - x_m|$ è la sua separazione dal disco in questione. La limitazione principale di questo calcolo consiste nel calcolo della distanza reale tra le stelle, in uno spazio tridimensionale. Infatti, la posizione delle stelle proiettata nel piano del cielo (nelle coordinate di ascensione retta e declinazione) è nota con estrema accuratezza, mentre la componente lungo la linea di vista (la distanza delle stelle dalla Terra) è di solito molto più incerta e si ottiene dalla parallasse misurata dal satellite Gaia. Per le stelle brillanti come quelle di tipo spettrale OB, la misura della parallasse può essere particolarmente incerta. Inoltre, per coppie di stelle molto vicine tra loro l'incertezza sulla parallasse può essere paragonabile, o persino superiore, alla separazione fisica reale, e questo si propaga di conseguenza in un flusso FUV molto incerto, visto che quest'ultimo dipende dall'inverso della distanza al quadrato. Questo problema viene affrontato nel lavoro ANA-

NIA *et al.* (2025b) pubblicato su *Astronomy & Astrophysics*, in cui viene proposto un metodo innovativo per calcolare il flusso FUV con l'accuratezza migliore che può essere raggiunta al momento.

Per tenere conto dell'incertezza sulla misura della parallasse durante il calcolo del flusso FUV, un possibile approccio si basa sul semplice campionamento Monte Carlo della parallasse di ciascuna stella, considerando il valore mediano e l'incertezza riportata dal catalogo Gaia. Invertendo la misura della parallasse si ottiene la distanza di ciascuna stella in unità di lunghezza e, calcolando la distanza di ciascuna stella con disco dalle stelle OB e inserendo questo valore nel calcolo del flusso FUV, si ottiene poi un valore mediano e un'incertezza sul flusso. Tuttavia, questo metodo tende sistematicamente a “sottostimare” il flusso FUV, perché il campionamento casuale Monte Carlo esplora un intervallo troppo ampio di possibili distanze, e la separazione tra le stelle OB e le stelle con disco risulta artificialmente sistematicamente più grande di quella reale (FIG. 4). Un metodo alternativo a quello precedente, che è generalmente il più utilizzato in letteratura, consiste nel calcolare la distanza in uno spazio 3D proiettando la distanza 2D tra due stelle nel piano del cielo alla distanza media della loro regione di formazione stellare. Questo metodo è spesso utilizzato quando le stelle hanno una parallasse misurata, in quanto alcune sono troppo o troppo poco brillanti per strumenti come Gaia per poter ottenere una misura fotometrica, o quando la misura esistente della parallasse è troppo incerta da poter essere utilizzata. Questo metodo, tuttavia, sovrastima il valore reale del flusso FUV producendo un limite superiore (FIG. 4). Il metodo proposto in questo lavoro sfrutta invece la geometria della regione di formazione stellare di cui fanno parte le stelle con disco e le stelle OB per calcolare in modo statistico la distanza 3D più probabile tra di loro. In particolare, assumendo che una regione di formazione stellare sia statisticamente isotropa (cioè che non ci siano direzioni privilegiate nello spazio tridimensionale), la sua “funzione di densità locale”, cioè la distribuzione normalizzata della separazione tra coppie di stelle che fanno parte della regione, misura la probabilità che due stelle di trovino ad una determinata distanza. Usando il teorema di Abel, si può passare dalla funzione di densità locale in uno spazio 2D (che può essere calcolata facilmente date le coordinate celesti) alla corrispondente espressione in uno spazio 3D. Di conseguenza, si ottiene una stima della distanza 3D più probabile tra ogni coppia di stelle, che può essere inserita nell'equazione del flusso FUV per calcolarne il valore più probabile corrispondente e la sua incertezza. In pratica, la geometria statistica dell'intero *cluster* di stelle viene utilizzata per determinare in modo più accurato la vera distanza tra le stelle in tre dimensioni, che è normalmente ignota. Questo metodo è stato validato su cataloghi sintetici di ammassi stellari dove la posizione reale delle stelle è

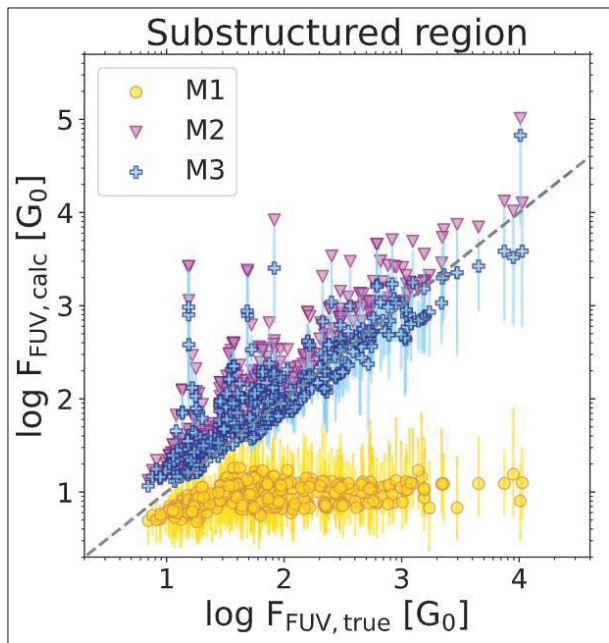


FIG. 4. Validazione del nuovo metodo per calcolare il flusso FUV utilizzando una popolazione sintetica di stelle. M1: flussi FUV ottenuti calcolando la distanza 3D tra le stelle tramite una selezione Monte Carlo della parallasse utilizzando i valori di parallasse ed errore forniti da Gaia. M2: flussi FUV ottenuti calcolando la distanza 3D tra le stelle come la distanza 2D tra di esse proiettata alla distanza media della loro regione di formazione stellare. M3: flussi FUV ottenuti utilizzando il nuovo metodo proposto, dove la geometria della regione viene sfruttata per determinare il valore più probabile della distanza 3D tra le stelle. M3 riproduce meglio i valori di flusso FUV attesi. (ANANIA *et al.*, 2025).

nota per costruzione, mostrando l'accuratezza guadagnata rispetto ai metodi precedentemente utilizzati (FIG. 4). Di conseguenza, il metodo è stato applicato a un campione di più di 1500 stelle con dischi in sette regioni di formazione stellare entro circa 200 parsec dal Sole (tra cui Upper Scorpius, Lupus, Taurus, ρ Ophiuchi, Chamaeleon I e II, e Corona Australis), e diverse sottoregioni del complesso di Orione e di Serpens, che raggiungono distanze fino a circa 500 parsec dal Sole (FIG. 5). Questo catalogo è pubblicamente disponibile online.

Un risultato di questo lavoro riguarda il ruolo delle stelle di tipo B ed A. Queste sono normalmente considerate poco rilevanti rispetto alle ben più luminose stelle O; tuttavia, quando si trovano in prossimità di un disco possono contribuire in modo determinante al flusso FUV totale, in quanto il flusso FUV dipende solo linearmente dalla luminosità FUV delle stelle massicce, invece dal quadrato della distanza.

Lo stesso metodo è stato poi esteso all'intero complesso di Orione, la regione di formazione stellare attiva più vicina a noi che ospita un numero cospicuo di stelle O e B, producendo una mappa del flusso FUV sperimentato dalla popolazione di stelle nella regione. Quest'ultimo catalogo è attualmente pubblicato nel lavoro ANANIA *et al.* (2026). Storicamente, Orione è stata associata ad un alto livello di radiazione UV, soprattutto data la presenza di *proplyds*. Tuttavia, questo studio mostra che il comples-

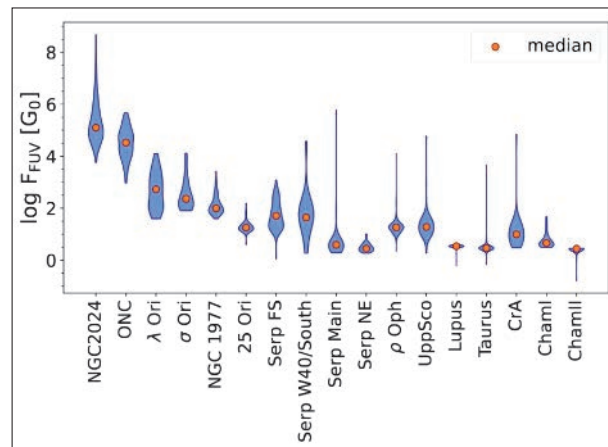


FIG. 5. Distribuzione dei flussi FUV per le regioni di formazione stellare vicine al Sole investigate in ANANIA *et al.* (2025). I valori sono stati ottenuti utilizzando un nuovo metodo per calcolare il flusso FUV e il catalogo che include questi valori è ora pubblicamente consultabile.

so di Orione è invece solo moderatamente irradiato, con la maggior parte della popolazione stellare illuminata da flussi FUV inferiori a 100 Go. Circa il 35% della popolazione mostra flussi FUV tra 100 e 10000 Go, valori tipici per stelle giovani nella nostra Galassia. Orione ha quindi potenzialità per essere esplorato in futuro con lo scopo di investigare le condizioni tipiche di formazione dei pianeti. Soltanto il 5% della popolazione stellare presenta flussi FUV simili a quelli dei *proplyds*, e quindi Orione non è la regione indicata per lo studio dell'evoluzione dei dischi in ambienti estremi, dove invece regioni più massicce come Carina sono più adatte.

Conclusioni

Comprendere la dinamica e l'evoluzione dei dischi protoplanetari è fondamentale per capire come si formano i pianeti e cosa determina le proprietà che essi acquisiscono. Il lavoro presentato mostra che l'ambiente di formazione stellare ha un effetto non trascurabile sulle proprietà dei dischi protoplanetari. In particolare, visto che la maggior parte delle stelle nella nostra Galassia si forma in ammassi in cui sono presenti molte stelle massicce (di tipo stellare O e B) che emettono intensa radiazione UV, la fotoevaporazione esterna dei dischi causata dall'interazione con questa radiazione UV è un effetto estremamente importante da considerare. Dischi esternamente irradiati vengono troncati ed erosi dall'esterno verso l'interno. Questo causa una perdita di massa, una diminuzione dell'estensione dei dischi e un accorciamento della loro vita, con conseguenze sulla formazione dei pianeti perché essi avranno meno materiale con cui formarsi, oltre che una composizione chimica potenzialmente diversa. Storicamente, il fenomeno della fotoevaporazione esterna è associato ai *proplyds* nella Nebulosa di Orione, che mostrano una peculiare forma a goccia che li distingue dai classici dischi protoplanetari os-

servati nelle regioni vicine. Questi oggetti sono illuminati da una radiazione UV molto più alta rispetto a quelli nelle regioni vicine, il che porta alla domanda fondamentale della tesi «Possiamo davvero trascurare la fotoevaporazione esterna quando la radiazione UV è inferiore a quella che ci permette di osservare i classici *proplyds*?»

I risultati della mia tesi mostrano che, in base ai parametri della stella e del disco, l'evoluzione dei dischi può essere significativamente influenzata dalla radiazione UV esterna anche a flussi FUV moderati e bassi (1-10 Go). Infatti, nella regione di Upper Scorpius, i raggi dei dischi sono molto più piccoli di quelli osservati in altre regioni, come ad esempio Lupus, e questo non può essere spiegato con la sola evoluzione temporale da dischi più giovani, come in Lupus, a dischi evoluti, come in Upper Scorpius. Il classico modello di accrescimento viscoso dei dischi non può spiegare raggi così piccoli come quelli visti in Upper Scorpius, ma includendo l'effetto della fotoevaporazione esterna i modelli concordano meglio con le osservazioni di raggi e masse.

Calcolare il flusso FUV in modo accurato è fondamentale per determinare l'effetto della fotoevaporazione esterna. La mia tesi ha presentato un nuovo metodo per calcolare il flusso FUV tenendo conto della fonte di incertezza maggiore presente nel calcolo, ovvero la distanza dalle stelle OB in uno spazio tridimensionale. Questo nuovo metodo consiste nel considerare la geometria della regione di formazione stellare come appare nel cielo e l'assunzione di isotropia per interpretare statisticamente la distribuzione delle stelle in uno spazio tridimensionale, calcolando quindi la distanza 3D più probabile tra le stelle. Questo metodo è stato usato per fornire un catalogo del flusso FUV alla posizione di più di 1500 stelle con disco nelle regioni vicine e per la popolazione stellare del Complesso di Orione, che conta più di 8600 stelle.

Va riconosciuto che al di fuori dei *proplyds*, quindi flussi FUV estremi, non esiste a oggi una prova diretta dell'azione della fotoevaporazione esterna nei regimi di flusso FUV intermedio, a valori inferiori di 1000 Go, che caratterizzano la maggioranza dei dischi nelle regioni di formazione stellare vicine al Sole. Tuttavia, le evidenze indirette raccolte in questa tesi, come le dimensioni del gas inferiori alle attese in Upper Scorpius, insieme ai modelli di evoluzione dei dischi, forniscono il materiale di partenza per approfondire questo argomento e cercare prove osservative dirette in futuro per sostenere queste evidenze indirette e i modelli numerici. Le prospettive di sviluppo su questo fronte includono l'identificazione di traccianti più diretti del vento fotoevaporativo, come ad esempio l'emissione di carbonio atomico neutro (CI), prodotta dalla fotodissociazione del CO nel gas rarefatto del vento, e la cinematica non kepleriana del CO nelle regioni più esterne del disco, firma dinamica attesa in presenza di un deflusso di materia radiale anziché di un moto orbitale.

In conclusione, i risultati ed i metodi forniti in questo lavoro offrono strumenti importanti per la comunità scientifica mirati a comprendere sia come tipicamente i dischi protoplanetari evolvono nella nostra Galassia che il ruolo dell'ambiente di formazione stellare in cui nascono.

Referenze bibliografiche

- ANANIA, R., ROSOTTI, G. P., GÁRATE, M., *et al.*, 2025a, *The ALMA Survey of Gas Evolution of Protoplanetary Disks (AGE-PRO). VIII. The Impact of External Photoevaporation on Disk Masses and Radii in Upper Scorpius*, «The Astrophysical Journal», 989, 8.
- ANANIA, R., WINTER, A. J., ROSOTTI, G., *et al.*, 2025b, *A novel method for estimating the far-ultraviolet flux, and a catalogue for disc-hosting stars in nearby star-forming regions*, «Astronomy & Astrophysics», 695, A74.
- ANDREWS, S. M., HUANG, J., PÉREZ, L. M., *et al.*, 2018a, *The Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP). I. Motivation, Sample, Calibration, and Overview*, «The Astrophysical Journal Letters», 869, L41.
- ANSDELL, M., HAWORTH, T. J., WILLIAMS, J. P., *et al.*, 2020, *An ALMA Survey of λ Orionis Disks: From Supernovae to Planet Formation*, «Astronomical Journal», 160, 248.
- ARMITAGE, P. J., 2013, *Astrophysics of Planet Formation*, Cambridge University Press.
- ARU, M. L., MAUCÓ, K., MANARA, C. F., *et al.*, 2024, *Kaleidoscope of irradiated disks: MUSE observations of proplyds in the Orion Nebula Cluster I. Sample presentation and ionization front sizes*, «Astronomy & Astrophysics», 687, A93.
- BIRNSTIEL, T., 2024, *Dust Growth and Evolution in Protoplanetary Disks*, «Annual Review of Astronomy and Astrophysics», 62, 157.
- CASTELLI, F., KURUCZ, R. L., 2004, *Is missing Fe I opacity in stellar atmospheres a significant problem?*, «Astronomy & Astrophysics», 419, 725.
- FACCHINI, S., CLARKE, C. J., BISBAS, T. G., 2016, *External photoevaporation of protoplanetary discs in sparse stellar groups: the impact of dust growth*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 457, 3593.
- HABING, H. J., 1968, *The interstellar radiation density between 912 Å and 2400 Å*, «Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands», 19, 421.
- HAWORTH, T. J., CLARKE, C. J., 2019, *The first multidimensional view of mass loss from externally FUV irradiated protoplanetary discs*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 485, 3895.
- LYNDEN-BELL, D., PRINGLE, J. E., 1974, *The evolution of viscous discs and the origin of the nebular variables*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 168, 603.
- MAYOR, M., QUELOZ, D., 1995, *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*, «Nature», 378, 355.
- MAUCÓ, K., MANARA, C. F., ANSDELL, M., *et al.*, 2023a, *Testing external photoevaporation in the σ -Orionis cluster with spectroscopy and disk mass measurements*, «Astronomy & Astrophysics», 679, A82.
- O'DELL, C. R., WEN, Z., HU, X., 1993, *Discovery of New Objects in the Orion Nebula on HST Images: Shocks, Compact Sources, and Protoplanetary Disks*, «The Astrophysical Journal», 410, 696.

- RICCI, L., ROBERTO, M., SODERBLOM, D. R., 2008, *The Hubble Space Telescope/Advanced Camera for Surveys Atlas of Protoplanetary Disks in the Great Orion Nebula*, «Astronomical Journal», 136, 2136.
- SHAKURA, N. I., SUNYAEV, R. A., 1973, *Black holes in binary systems. Observational appearance*, «Astronomy & Astrophysics», 24, 337.
- SMITH, N., BALLY, J., SHUPING, R. Y., *et al.*, 2005, *Thermal Dust Emission from Proplyds, Unresolved Disks, and Shocks in the Orion Nebula*, «Astronomical Journal», 130, 1763.
- STAMMLER, S. M., BIRNSTIEL, T., 2022, *DustPy: A Python Package for Dust Evolution in Protoplanetary Disks*, «The Astrophysical Journal», 935, 35.
- TRAPMAN, L., ROSOTTI, G., BOSMAN, A. D., *et al.*, 2020, *Observed sizes of planet-forming disks trace viscous spreading*, «Astronomy & Astrophysics», 640, A5.
- TRAPMAN, L., TABONE, B., ROSOTTI, G., ZHANG, K., 2022a, *Effect of MHD Wind-driven Disk Evolution on the Observed Sizes of Protoplanetary Disks*, «The Astrophysical Journal», 926, 61.
- ZHANG, K., PÉREZ, L. M., PASCUCCI, I., *et al.* 2025, *The ALMA Survey of Gas Evolution of PROtoplanetary Disks (AGE-PRO). I. Program Overview and Summary of First Results*, «The Astrophysical Journal», 989, 1.
- WINTER, A. J., HAWORTH, T. J., 2022, *The external photoevaporation of planet-forming discs*, «European Physical Journal Plus», 137, 1132.

Rossella Anania ha conseguito il diploma di Laurea Triennale (2020) e Magistrale (2022) in Fisica presso l'Università degli Studi di Milano, con relatore prof. Giuseppe Lodato. Ha successivamente conseguito il dottorato in Fisica, Astrofisica e Fisica Applicata sempre presso l'Università degli Studi di Milano nel dicembre 2025. Nella sua tesi di dottorato, *Assessing the role of external photoevaporation in protoplanetary discs in nearby star-forming regions*, ha studiato l'effetto della fotoevaporazione esterna sulla dinamica ed evoluzione dei dischi protoplanetari. Ha pubblicato i suoi risultati in tre articoli scientifici a primo nome e attualmente conta 17 pubblicazioni come co-autrice. Attualmente ha una posizione come Postdoctoral Research Fellow al Trinity College Dublin, Irlanda, e si occupa di modelli analitici e numerici per lo studio di popolazioni di dischi protoplanetari e cinture di planetesimi.

La messa in servizio dello strumento NISP a bordo del satellite *Euclid**

Fabrizio Cogato

INAF · Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio, Bologna

È COMPLESSO riassumere in maniera efficace un progetto scientifico come la missione *Euclid*, frutto del lavoro svolto da migliaia di persone nell'arco di quasi vent'anni: dalle prime proposte presentate all'Agenzia Spaziale Europea nel 2007 fino alle operazioni scientifiche attualmente in corso, passando per il lancio del satellite, avvenuto nel luglio 2023. La selezione degli argomenti presentati in questo articolo riflette dunque la prospettiva dalla quale l'autore ha avuto modo di conoscere la missione *Euclid*. In particolare, nelle settimane immediatamente successive al lancio, l'autore ha partecipato in prima persona alla messa in servizio dello strumento NISP (*Near-Infrared Spectrometer and Photometer*), lavorando presso lo *European Space Operations Centre* (Darmstadt, Germania), il centro dell'Agenzia Spaziale Europea responsabile delle operazioni dei satelliti in volo. Proprio dai risultati ottenuti durante questa fase nasce l'opportunità di raccontare ai lettori del «Giornale di Astronomia» alcuni aspetti della missione *Euclid*.

Conosciamo l'universo in cui viviamo?

Il Novecento ha consegnato alla scienza un modello cosmologico standard in grado di descrivere con pochi parametri una grande varietà di fenomeni, tra cui l'espansione accelerata del cosmo e la crescita delle strutture cosmiche su grande scala. Allo stesso tempo, tale descrizione mette in luce i limiti della cosmologia contemporanea. Stelle, pianeti, polveri, atomi e organismi viventi sono composti di materia ordinaria, la quale rappresenta però appena il 5% del contenuto energetico del cosmo. Il restante 95% è invece attribuito a due componenti, comunemente dette 'oscure', la cui natura fisica rimane tuttora sconosciuta.

A differenza della materia ordinaria, la 'materia oscura' non emette né assorbe radiazione elettro-

magnetica. Pur rappresentando la componente dominante di galassie, gruppi e ammassi di galassie, la materia oscura non può essere osservata direttamente: la sua presenza può essere dedotta soltanto dagli effetti gravitazionali che esercita sulla materia ordinaria. Fu proprio in questo modo che, nel 1933, l'astronomo svizzero Fritz Zwicky ne ipotizzò l'esistenza studiando l'ammasso della Chioma. Analizzando le velocità delle galassie che lo compongono, l'astronomo constatò che queste si muovevano troppo rapidamente perché la sola materia ordinaria potesse mantenerle gravitazionalmente legate. Per spiegare lo stato di equilibrio dell'ammasso, Zwicky postulò quindi la presenza di una componente aggiuntiva di materia, che definì 'oscura'. Nei decenni successivi, ulteriori evidenze emersero da osservazioni indipendenti, consolidando l'idea della presenza nel cosmo di una nuova forma di materia, invisibile ma capace di rivelarsi attraverso i suoi effetti gravitazionali.

La seconda componente, denominata 'energia oscura', è invece ritenuta responsabile dell'espansione accelerata dell'universo. Alla fine degli anni Novanta, due gruppi di ricerca indipendenti analizzarono un campione di supernovae di tipo Ia per ricostruire la storia dell'espansione cosmica. Queste particolari esplosioni stellari possiedono infatti una luminosità intrinseca 'standardizzabile' dalla quale è possibile derivare un indicatore di distanza: quanto più debole appare la supernova, tanto più lontana essa si trova. Confrontando le distanze così misurate con quelle attese sulla base del *redshift*,¹ entrambi i gruppi osservarono che le supernovae si trovavano sistematicamente più lontane di quanto previsto in un universo composto esclusivamente di materia, nel quale l'attrazione gravitazionale esercitata dalla componente di materia avrebbe dovuto rallentare progressivamente l'espansione cosmica. Le osservazioni indicarono quindi che, nella storia recente dell'universo, l'espansione era entrata in una fase di

* In questo articolo, l'Autore presenta i contenuti essenziali delle ricerche che gli hanno valso la menzione speciale al "Premio Giuseppe Lorenzoni" per l'anno 2026. Il premio, dedicato a Giuseppe Lorenzoni per ricordare la sua opera in campo astrofisico, è stato istituito nel 2017 dalla SAIT e dall'INAF · Osservatorio Astronomico di Padova, in occasione dei 250 anni della fondazione della Specola di Padova, ed è volto a premiare il miglior articolo scientifico di carattere astrofisico di un giovane, pubblicato nel triennio precedente.

¹ Il *redshift* può essere intuitivamente paragonato al cambiamento di tono della sirena di un'ambulanza quando questa si allontana. Nel caso cosmologico, l'espansione dell'universo fa aumentare progressivamente la distanza tra le galassie e, durante il viaggio dalla sorgente all'osservatore, dilata la lunghezza d'onda della luce emessa, spostandola verso il rosso. Una volta assunto un modello cosmologico, la misura del *redshift* permette di ricavare la distanza attesa della sorgente e di confrontarla con quella determinata attraverso metodi indipendenti, come quelli basati sull'osservazione delle supernovae di tipo Ia.

accelerazione e fornirono le prime evidenze osservative dell'accelerazione cosmica, contribuendo all'affermazione del concetto di energia oscura, la cui presenza è oggi sostenuta da numerose analisi indipendenti.

Nel modello cosmologico standard, materia ed energia oscura rappresentano rispettivamente circa il 25% e il 70% del contenuto energetico dell'universo. Nonostante il ruolo fondamentale che esse ricoprono, la loro natura fisica rimane ignota: non è noto quali particelle costituiscano la materia oscura né se l'energia oscura corrisponda all'energia del vuoto, derivi da una componente dinamica oppure segnali la comprensione ancora incompleta della gravità su scala cosmologica. Numerosi articoli pubblicati sul «Giornale di Astronomia» hanno approfondito i tanti temi della cosmologia moderna; tra i più recenti, i contributi di AMENDOLA (2020), NIPOTI (2022), CIRELLI (2022) e DELLA VALLE (2024) offrono prospettive complementari su materia oscura, energia oscura ed espansione cosmica.

La cosmologia di precisione

Nonostante sia trascorso più di un secolo dalla formulazione delle basi teoriche e dallo sviluppo delle fondamentali osservative della cosmologia moderna, lo scenario odierno appare ancora tutt'altro che completo. Per compiere ulteriori progressi non è sufficiente ottenere immagini più nitide o osservare oggetti sempre più remoti: occorre ricostruire la storia dell'universo attraverso osservazioni profonde di vaste porzioni di cielo e analisi statistiche capaci di misurare i parametri cosmologici con precisioni dell'ordine del percento. L'oggetto dell'indagine non è quindi la singola sorgente, ma popolazioni composte da miliardi di galassie, utilizzate come traccianti dell'evoluzione delle strutture cosmiche e della geometria dell'universo. Ciò rende la cosmologia contemporanea una scienza di precisione, in cui la quantità dei dati non può prescindere da una conoscenza accurata degli errori ad essi associati. Comprendere la natura delle componenti oscure dell'universo richiede infatti un'enorme quantità di osservazioni e una rigorosa caratterizzazione degli effetti di disturbo introdotti dalla strumentazione, dalle tecniche osservative e dai metodi di analisi utilizzati per estrarre dai dati grezzi il segnale cosmologico di interesse.

In questo contesto, l'elemento chiave è la collaborazione. Obiettivi scientifici sempre più ambiziosi richiedono strumentazione e infrastrutture di crescente complessità, realizzabili soltanto attraverso lo sforzo di migliaia di persone all'interno di una catena di processi ben definita. Dalla formulazione teorica del problema alla progettazione dei sistemi ottici, meccanici ed elettronici, fino alla definizione della strategia osservativa e delle procedure di acquisizione e analisi dei dati, ogni grande progetto scientifico contemporaneo nasce dalla cooperazio-

ne tra università, istituti, agenzie e industrie, spesso riuniti in grandi consorzi internazionali.

È interessante notare come anche i metodi d'indagine adottati per rispondere alle domande fondamentali sull'evoluzione dell'universo seguano una logica collaborativa. Un singolo osservabile non è infatti sufficiente a raggiungere la precisione richiesta dalle moderne analisi cosmologiche. Ciò significa che non basta analizzare le supernovae di tipo Ia, la distribuzione delle galassie o la radiazione cosmica di fondo, ma occorre integrare le informazioni fornite da ciascun metodo d'indagine, sfruttando la complementarità degli osservabili per ridurre le incertezze, controllare gli effetti sistematici e ottenere così un quadro quanto più chiaro, completo e affidabile possibile. La cosmologia di precisione è dunque una scienza fondata sulla collaborazione, non soltanto tra persone e istituzioni, ma anche tra misure e metodi differenti.

Euclid: un esempio di cooperazione

La missione spaziale *Euclid* offre un esempio emblematico di questa duplice dimensione collaborativa della cosmologia contemporanea. La sua realizzazione è il risultato dello sforzo coordinato di migliaia di scienziate e scienziati provenienti da numerosi Paesi europei e non. *Euclid* è infatti una missione dell'Agenzia Spaziale Europea sviluppata e operata in stretta collaborazione con *Euclid Consortium*: una vasta collaborazione internazionale che riunisce oltre duemila persone e coinvolge circa 350 tra istituti di ricerca, università e agenzie nazionali. La strategia scientifica della missione si fonda sulla combinazione di metodi d'indagine complementari, capaci di studiare l'universo da prospettive differenti e di superare, attraverso la loro analisi congiunta, i limiti intrinseci delle singole misure. *Euclid* non studia quindi le proprietà dell'universo attraverso l'analisi di un singolo fenomeno, bensì sfrutta la complementarità tra l'effetto di lente gravitazionale debole (o *weak lensing*) e il raggruppamento delle galassie (o *galaxy clustering*).

Durante il viaggio verso l'osservatore, la luce proveniente da una galassia lontana è influenzata dal campo gravitazionale della materia distribuita lungo la linea di vista. Il campo gravitazionale di grandi strutture cosmiche, come gli ammassi di galassie, devia il percorso dei fotoni producendo piccole deformazioni nell'immagine apparente della sorgente. Analizzando statisticamente le deformazioni di un numero enorme di galassie, il *weak lensing* permette così di ricostruire la distribuzione complessiva della materia lungo la linea di vista. Il *galaxy clustering* studia invece la distribuzione tridimensionale delle galassie. Le galassie infatti formano una complessa rete di filamenti, nodi e vuoti, nota come 'rete cosmica', la cui struttura ed evoluzione forniscono informazioni sulla storia dell'espansione cosmica e sulla crescita delle perturba-



FIG. 1. Il satellite *Euclid* durante i test di compatibilità elettromagnetica condotti pochi mesi prima del lancio. Il satellite misura circa 4,7 m di altezza e 3,7 m di diametro. Nella parte superiore sono visibili il telescopio, dotato di uno specchio primario di 1,2 m di diametro, e il modulo di carico utile, che ospita gli strumenti scientifici VIS e NISP. Nella parte inferiore si trova il modulo di servizio, che contiene i sistemi necessari all'alimentazione, al controllo d'assetto, alle telecomunicazioni e alla gestione dei dati. La grande struttura laterale funge da schermo per la radiazione solare e da supporto per i pannelli fotovoltaici. (Crediti: ESA - Manuel Pedoussaut)

zioni di densità sotto l'azione della gravità. I due metodi sono fortemente complementari e la loro analisi congiunta consente di ridurre le ambiguità dei modelli, controllare gli effetti sistematici e ottenere vincoli cosmologici più robusti di quelli ricavabili dall'analisi separata dei singoli osservabili.

Il satellite *Euclid* (FIG. 1) rappresenta perciò una manifestazione concreta ed esemplare del carattere collaborativo della cosmologia contemporanea in cui persone, competenze, strumenti, metodi e osservazioni differenti vengono integrati in un unico esperimento concepito per affrontare alcune delle principali questioni ancora aperte sulla natura del cosmo. Per tutti i dettagli della missione e delle attività della collaborazione si rimanda alla sezione Sitografia, dove sono indicati alcuni dei principali siti di riferimento.

Gli strumenti a bordo del satellite

Per sfruttare al massimo la complementarità tra *weak lensing* e *galaxy clustering*, la missione *Euclid* deve misurare con estrema precisione le proprietà di un numero enorme di galassie distribuite su una vasta porzione del cielo. La strategia osservativa prevede infatti di esplorare, nell'arco di sei anni, circa 14 mila gradi quadrati (pari a circa un terzo dell'intera volta celeste) e di costruire un campione di miliardi di sorgenti. Per farlo, il satellite è stato progettato attorno a due strumenti scientifici che osservano simultaneamente lo stesso campo di vista, pari a cir-

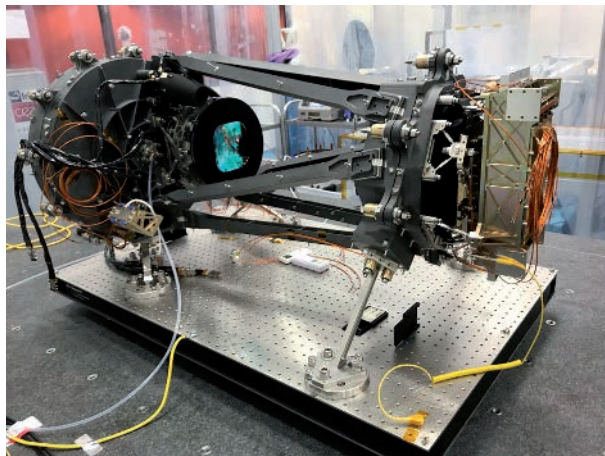


FIG. 2. Il modello di volo dello strumento NISP completamente assemblato prima dell'applicazione dell'isolamento termico multistrato. Nella fotografia, gli elementi ottici e i meccanismi che ospitano filtri e *grism* si trovano nella parte sinistra dello strumento, mentre il piano focale è collocato all'estremità opposta. Lo strumento ha dimensioni dell'ordine del metro, mentre il piano focale misura circa 15 × 15 cm. (Crediti: *Euclid* Consortium & NISP instrument team)

ca 0,54 gradi quadrati (quasi tre volte l'area apparente della Luna piena). Si tratta di un campo di vista eccezionalmente ampio per un telescopio spaziale: in una singola osservazione *Euclid* copre un'area circa duecento volte maggiore di quella osservata da *Hubble Space Telescope* (HST) e da *James Webb Space Telescope* (JWST). La differenza riflette una diversa filosofia osservativa: mentre HST e JWST sono osservatori concepiti per programmi scientifici molto diversificati e spesso rivolti allo studio dettagliato di singole sorgenti o regioni circoscritte, *Euclid* è stato progettato per realizzare rapidamente e in modo uniforme la mappa di una vasta porzione del cielo.

L'architettura degli strumenti di *Euclid* è stata quindi definita per misurare con estrema precisione le proprietà fisiche di miliardi di galassie. Poiché le deformazioni prodotte dall'effetto di *weak lensing* sono estremamente piccole, lo strumento VIS (*Visible Camera*) è stato progettato per ottenere immagini ad alta risoluzione nella banda visibile, mantenendo una risposta strumentale estremamente stabile così da distinguere le deformazioni reali prodotte dalla distribuzione di materia lungo la linea di vista da quelle artificiali introdotte dallo strumento stesso. Per studiare il *galaxy clustering*, non è però sufficiente misurare con grande precisione la posizione delle sorgenti sulla volta celeste. È necessario ricavare la distanza di ciascuna sorgente attraverso il *redshift* cosmologico. Lo strumento NISP (FIG. 2), attraverso le sue due modalità osservative, è stato concepito proprio per ricostruire la distribuzione delle galassie all'interno della rete cosmica. In modalità fotometrica misura il flusso delle galassie in tre bande del vicino infrarosso e, combinando queste osservazioni con quelle dello strumento VIS e di alcuni osservatori terrestri, contribuisce alla determinazione del *redshift* di miliardi di sorgenti. In mo-

EARLY COMMISSIONING TEST IMAGE, NISP INSTRUMENT

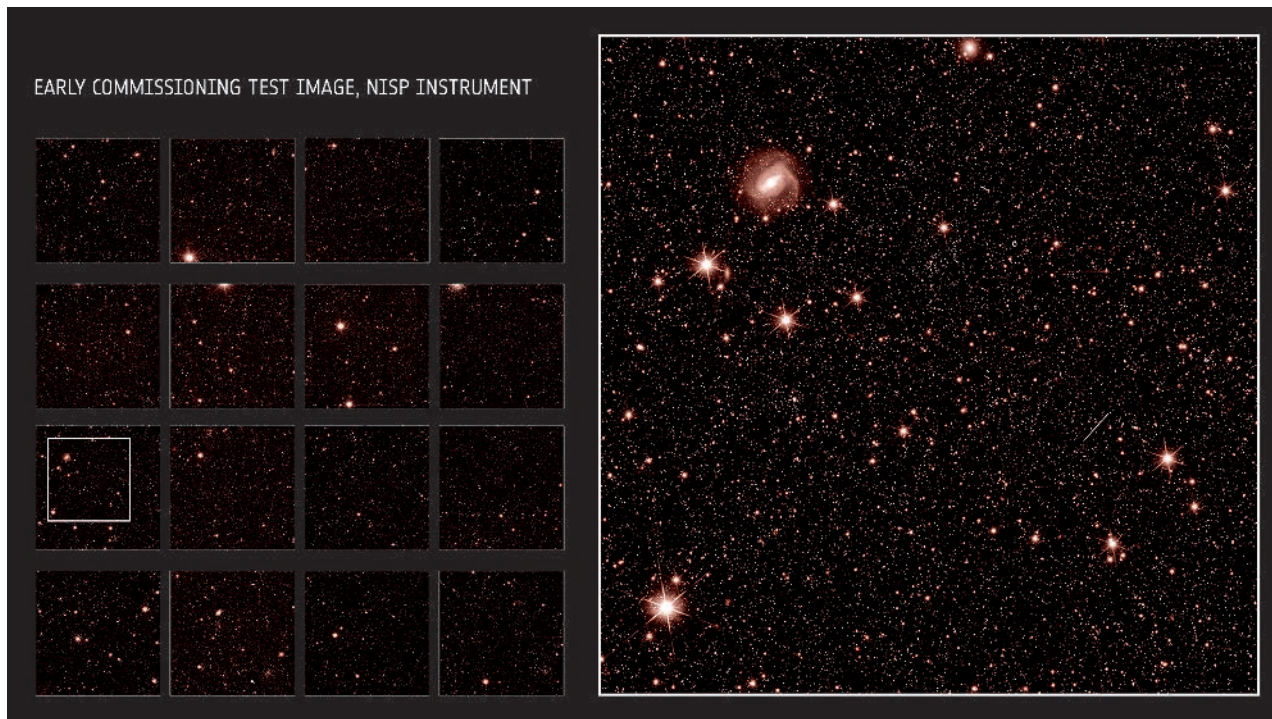


FIG. 3. Immagine fotometrica acquisita da NISP durante le prime fasi del *commissioning* di *Euclid*. A sinistra è mostrato l'intero campo di vista dello strumento. Le separazioni tra le varie porzioni dell'immagine corrispondono agli spazi fisici presenti tra i sedici rivelatori del piano focale. Il riquadro bianco indica la porzione mostrata ingrandita a destra, nella quale è visibile una regione prossima alla Grande Nube di Magellano con numerose sorgenti stellari e galassie, tra cui la galassia 2MASX J05571041-6750268. L'immagine è mostrata nella sua forma grezza, prima delle procedure di calibrazione ed elaborazione scientifica, e presenta quindi anche artefatti e tracce prodotte dal passaggio di particelle energetiche attraverso i rivelatori. (Crediti: ESA / *Euclid* / *Euclid Consortium* / NASA)

dalità spettroscopica, invece, disperde la luce delle galassie e misura la posizione di specifiche righe di emissione, in particolare la riga $H\alpha$ dell'idrogeno, determinando il *redshift* di decine di milioni di oggetti con una precisione superiore a quella della stima fotometrica.

In sintesi, lo strumento VIS misura con estrema precisione la forma e la posizione angolare delle galassie, mentre lo strumento NISP contribuisce a determinarne il *redshift*. In soli sei anni, *Euclid* è perciò in grado di mappare la distribuzione di miliardi di galassie all'interno del tessuto spazio-temporale, trasformando un'enorme quantità di immagini e spettri di galassie in vincoli sempre più stringenti sulle proprietà fisiche di materia ed energia oscura.

Quantità e qualità

Per raggiungere i suoi obiettivi scientifici, lo strumento NISP adotta due modalità osservative distinte: la fotometria, che misura il flusso delle sorgenti in ampie bande di lunghezza d'onda, e la spettroscopia, che ne scompone la luce per identificare particolari righe di emissione o assorbimento. In modalità fotometrica (FIG. 3) NISP utilizza tre filtri nel vicino infrarosso, che coprono complessivamente l'intervallo compreso tra circa 0,95 e 2 micrometri. In modalità spettroscopica (FIG. 4) NISP impiega particolari elementi ottici chiamati *grism*, ottenuti

combinando un prisma e un reticolo di diffrazione.² Per le osservazioni di NISP vengono utilizzati tre *grism*, distinti convenzionalmente in due *grism* 'rossi', sensibili tra circa 1,21 e 1,89 micrometri, e un *grism* 'blu', sensibile tra circa 0,93 e 1,37 micrometri. Questi elementi disperdono la luce delle sorgenti nelle diverse lunghezze d'onda e permettono a NISP di realizzare una spettroscopia 'senza fenditura', o *slitless*, grazie alla quale tutti gli oggetti presenti nel campo di vista vengono osservati contemporaneamente e ciascuno produce il proprio spettro sul piano focale. Questa tecnica consente di acquisire simultaneamente gli spettri di un numero molto elevato di sorgenti, ma comporta anche il rischio che gli spettri di oggetti vicini si sovrappongano sul piano focale, rendendo più difficile l'identificazione delle righe spettrali. Per limitare questo problema, i *grism* di NISP disperdono la luce lungo direzioni differenti. Infatti, osservazioni ripetute con differenti direzioni di dispersione e puntamenti leggermente spostati modificano la posizione delle sorgenti nel campo e permettono di distinguere con maggiore affidabilità gli spettri delle singole galassie.

In entrambe le modalità osservative, la luce raggiunge lo stesso piano focale, costituito da un mo-

² Il reticolo, inciso direttamente su una superficie del prisma, disperde la luce nelle diverse lunghezze d'onda, mentre il prisma rifrange il fascio risultante. La combinazione dei due elementi ottici permette così alla luce dispersa di raggiungere lo stesso piano focale utilizzato per le osservazioni fotometriche.

saico di sedici rivelatori disposti in una configurazione quattro per quattro (FIG. 3), per un totale di circa 67 milioni di pixel. Il materiale fotosensibile di ciascun sensore è una lega di tellururo di mercurio e cadmio, particolarmente adatta alla rivelazione della radiazione nel vicino infrarosso. La tecnologia di questi sensori presenta inoltre una caratteristica fondamentale: il segnale registrato da ciascun pixel può essere letto ripetutamente durante l'esposizione senza dover trasportare la carica accumulata verso i registri di lettura, come avviene invece nei tradizionali sensori CCD (*Charge-Coupled Device*). Un'esposizione non corrisponde quindi a una singola immagine acquisita al termine del tempo di integrazione, bensì a una sequenza di letture consecutive, durante le quali la carica accumulata cresce progressivamente formando una rampa di segnale, la cui inclinazione permette di ricavare il flusso della sorgente osservata. Questa tecnica, chiamata *up-the-ramp sampling*, presenta numerosi vantaggi. In particolare, la sequenza di immagini consente di ridurre il rumore di lettura e identificare segnali spuri prodotti, per esempio, dal passaggio di una particella energetica attraverso il sensore.

Lo strumento NISP adotta sequenze di acquisizione differenti per fotometria e spettroscopia, corrispondenti rispettivamente a circa 80 e 400 fotogrammi per osservazione. Questa strategia ha però un costo significativo in termini di volume dei dati prodotti: per ogni campo osservato, NISP effettua quattro acquisizioni spettroscopiche e dodici fotometriche, generando complessivamente oltre 2500 fotogrammi. Considerando che *Euclid* osserva circa venti campi al giorno, nell'arco di ventiquattro ore NISP produce più di 50 mila fotogrammi grezzi per un volume di dati dell'ordine di 20 mila gigabit al giorno.³ La mole di dati prodotta non rappresenterebbe di per sé un problema, se non fosse che, nel complesso dei vincoli operativi della missione, *Euclid* dispone di appena 290 gigabit al giorno per trasmettere i dati generati da NISP. È qui che emerge una delle caratteristiche più originali dello strumento: elaborare i dati direttamente a bordo del satellite prima di trasmetterli a Terra. In pratica, a ogni osservazione, due unità dedicate ricevono la sequenza di immagini provenienti dal piano focale e, per ciascuno dei circa 67 milioni di pixel, misurano l'inclinazione della rampa di segnale, ricavando direttamente a bordo del satellite una stima del flusso luminoso incidente. Il volume giornaliero dei dati viene così ridotto a circa 248 gigabit, rientrando nei vincoli operativi del satellite.

L'elaborazione dei dati a bordo non rappresenta perciò un'aggiunta accessoria, ma una vera e propria tecnologia abilitante, senza la quale la strategia osservativa di *Euclid* non sarebbe realizzabile nella forma prevista. È importante sottolineare, tuttavia,

³ Si tratta di una quantità impressionante, se confrontata con quella trasmessa da altri osservatori spaziali, come HST (circa 20 gigabit al giorno) e JWST (circa 500 gigabit al giorno).

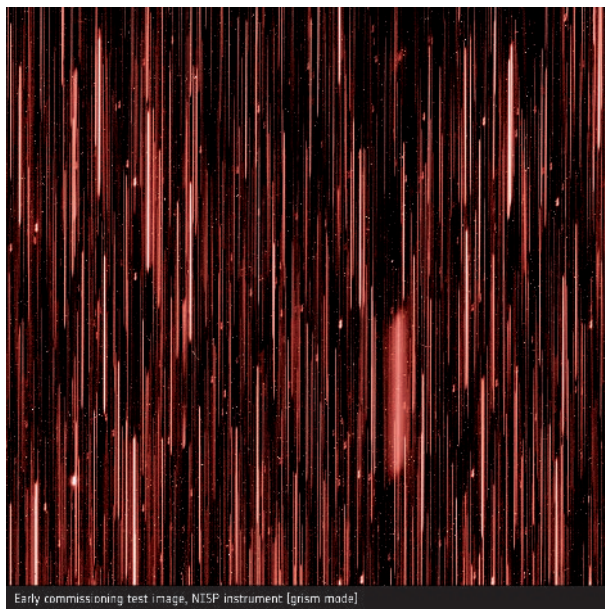


FIG. 4. Osservazione spettroscopica della regione di cielo evidenziata e ingrandita in FIG. 3, acquisita da NISP durante il *commissioning* di *Euclid*. La dispersione simultanea della luce delle sorgenti mostra le caratteristiche tipiche della spettroscopia *slitless*. Anche questa immagine è mostrata nella sua forma grezza, prima delle procedure di calibrazione ed elaborazione scientifica. (Crediti: ESA / *Euclid* / *Euclid Consortium* / NASA)

che le sequenze di immagini non vengono trasmesse integralmente e che, di conseguenza, non è possibile verificare direttamente eventuali anomalie verificatesi durante l'acquisizione e l'elaborazione a bordo. Per questa ragione, oltre al flusso incidente, l'algoritmo calcola per ogni pixel un parametro denominato *quality factor*, che fornisce una misura della qualità della stima effettuata a bordo. Questo parametro è sensibile ad anomalie di vario genere, come il passaggio di particelle energetiche attraverso il sensore o altri disturbi di natura elettronica. Le mappe del *quality factor* vengono quindi trasmesse a Terra insieme a quelle del flusso, permettendo di individuare a posteriori le misure meno affidabili da escludere dall'analisi scientifica.

La capacità di calcolo delle unità di NISP è modesta rispetto a quella di molti processori commerciali. L'elettronica destinata allo spazio deve infatti rispondere a requisiti molto diversi da quelli di un comune dispositivo terrestre: deve consumare poca energia, funzionare per anni senza possibilità di manutenzione e di sostituzione dei componenti, garantire un comportamento estremamente affidabile e prevedibile, oltre a resistere all'ambiente radiativo dello spazio. L'innovazione tecnologica di NISP non risiede perciò nelle prestazioni eccezionali dei singoli componenti, bensì nella progettazione integrata dello strumento, dell'elettronica e degli algoritmi di gestione ed elaborazione dei dati, concepiti fin dall'origine come parti di un unico sistema capace di soddisfare contemporaneamente i severi vincoli operativi e gli ambiziosi requisiti scientifici di *Euclid*. Sensori, elettronica di lettura e algoritmi di bordo sono stati infatti concepiti come elementi di



FIG. 5. Il razzo sulla rampa della *Cape Canaveral Space Force Station*, in Florida, poche ore prima del lancio. Il satellite *Euclid* è alloggiato nella parte superiore del razzo, all'interno della carenatura protettiva posta sopra il secondo stadio, che lo protegge durante l'attraversamento dell'atmosfera. Dopo il distacco della carenatura e la separazione dal secondo stadio, *Euclid* ha iniziato il viaggio verso il secondo punto lagrangiano del sistema Sole-Terra. (Crediti: ESA – S. Corvaja)

un'unica catena di rilevamento del segnale, che ha inizio con l'assorbimento dei fotoni nel materiale fotosensibile e la conseguente generazione di cariche elettriche, prosegue attraverso l'amplificazione e la conversione del segnale da analogico a digitale e termina quando l'algoritmo produce, per ciascun pixel del piano focale, una stima del flusso incidente e della qualità dei dati elaborati a bordo.

Le prestazioni scientifiche di *NISP* sono dunque il risultato di una filosofia progettuale all'avanguardia, nella quale l'integrazione di ottica, sensori, elettronica, algoritmi e strategia osservativa permette di misurare le proprietà di miliardi di galassie con la precisione richiesta dagli obiettivi cosmologici di *Euclid*, pur operando entro inevitabili vincoli operativi, come la limitata capacità di calcolo e trasmissione dei dati. In questo senso, lo strumento *NISP* rappresenta uno degli esempi più significativi dello stato dell'arte della moderna strumentazione spaziale: non è il singolo componente più sofisticato a rendere possibile l'esperimento, ma l'equilibrio tra tutti gli elementi del sistema. È infatti attraverso una progettazione coordinata che un'enorme quantità di informazione può essere trasformata in dati scientifici della qualità necessaria ad affrontare alcune delle domande più complesse della cosmologia contemporanea.

Piccoli contributi: grandi risultati

Il 1° luglio 2023 il satellite *Euclid* è stato lanciato dalla *Cape Canaveral Space Force Station* (FIG. 5). Dopo la separazione dal razzo, *Euclid* ha iniziato un viaggio di circa un milione e mezzo di chilometri, durato all'incirca un mese, verso una particolare orbita at-

torno al 'secondo punto lagrangiano' del sistema Sole-Terra, caratterizzata da condizioni termiche e osservative particolarmente stabili. Prima di poter avviare le attività scientifiche, ogni sistema del satellite doveva però passare attraverso la 'fase di messa in servizio' (o *commissioning phase*) per essere acceso e configurato per le operazioni di volo. Per lo strumento *NISP*, le operazioni di *commissioning* iniziarono poche ore dopo il lancio con l'attivazione dell'unità responsabile del controllo dello strumento, seguita da una delicata fase di raffreddamento necessaria a portare ciascuna componente alla rispettiva temperatura operativa. Uno dei momenti più delicati arrivò intorno alla metà di luglio, quando il piano focale era ormai prossimo alla propria temperatura operativa di circa -180°C . I sedici rivelatori furono accesi in sequenza, con il

controllo preliminare di tensioni, correnti e assorbimenti di potenza dell'elettronica e la successiva applicazione delle configurazioni necessarie alle osservazioni scientifiche. Furono quindi acquisite le prime immagini di verifica: nessuna galassia, nessuna stella, soltanto il segnale elettronico prodotto dalla catena di rilevamento del segnale. A prima vista potevano sembrare immagini prive di interesse scientifico, ma per il personale coinvolto nelle operazioni del piano focale erano estremamente preziose, in quanto consentivano di verificare il corretto funzionamento dell'intera catena, dalla generazione della carica nei sensori fino all'elaborazione a bordo e alla successiva trasmissione dei dati.

Nell'ambito delle attività di *commissioning*, il principale contributo dell'autore ha riguardato la configurazione del piano focale, e in particolare la regolazione della tensione responsabile del livello elettronico da cui ha inizio la rampa di segnale misurata da ciascun pixel. Impostare correttamente questo livello è fondamentale per sfruttare al meglio le proprietà dei sensori, evitando che la rampa raggiunga prematuramente la saturazione e garantendo, al tempo stesso, una misura accurata dei segnali più deboli. I valori di regolazione nominali erano stati determinati durante le campagne di laboratorio per la caratterizzazione dello strumento, ma le effettive condizioni operative resero necessaria una nuova calibrazione direttamente in volo. Durante il *commissioning* furono quindi misurate nuovamente le risposte dei sensori e regolate le tensioni di riferimento, fino a definire la configurazione ottimale del piano focale, la stessa attualmente utilizzata durante le operazioni nominali della missione *Euclid*. Questo racconto mostra bene che il *commissioning* non consiste semplicemente nell'ac-

cendere lo strumento dopo averlo portato in orbita. Questa fase implica la verifica, una per una, delle funzionalità sviluppate durante le fasi di progettazione e costruzione dello strumento, la caratterizzazione del loro comportamento effettivo nelle condizioni di volo e l'accertamento della conformità di ciascuna componente ai requisiti scientifici della missione. Alla regolazione dei parametri del piano focale seguirono infatti numerose altre attività: dalla verifica della stabilità termica dei sensori e degli elementi ottici fino alla caratterizzazione della risposta fotometrica (FIG. 3) e spettroscopica (FIG. 4) dello strumento.

Se confrontato con l'enorme quantità di lavoro necessaria per concepire, progettare, costruire e portare un satellite nello spazio, il contributo di una singola persona al *commissioning* di un sottosistema può apparire minuscolo. E, in effetti, lo è. Prima dell'accensione in volo del piano focale erano trascorsi quasi vent'anni di progettazione, simulazioni, campagne di laboratorio, integrazione, verifiche, sviluppo degli algoritmi e preparazione delle operazioni scientifiche. Eppure, una missione complessa funziona proprio perché ciascun contributo, per quanto circoscritto, diventa indispensabile nel momento in cui viene integrato con tutti gli altri. Regolare la tensione di riferimento di un sensore, comprendere l'origine di un malfunzionamento dell'algoritmo di bordo o verificare il corretto allineamento del sistema ottico che conduce la luce fino al piano focale sono attività che, a prima vista, possono sembrare molto distanti dalle grandi domande su materia ed energia oscura con cui questo articolo è iniziato. Tuttavia, i grandi risultati scientifici nascono dall'unione di contributi piccoli ma essenziali. In fondo, «per fare un tavolo ci vuole un fiore».⁴

Un ambiente non così tranquillo

L'idea dello spazio profondo come un ambiente vuoto, freddo e oscuro è spesso fuorviante. Anche a un milione e mezzo di chilometri dalla Terra, il satellite *Euclid* è continuamente investito da particelle energetiche di origine solare, costituite prevalentemente da protoni. Nella maggior parte dei casi il loro effetto sulle osservazioni è limitato e può essere facilmente riconosciuto ed escluso dall'analisi scientifica dei dati. Tuttavia, nei periodi di maggiore attività solare, quello che potrebbe sembrare un effetto secondario può trasformarsi in un vero e proprio problema operativo. L'attività solare può infatti produrre fenomeni esplosivi, come le espulsioni coronali di massa (LIBERATORE, 2024) che, quando investono la Terra, possono generare spettacolari aurore anche a latitudini insolitamente basse, oltre ad avere effetti significativi sulle infrastrutture tec-

nologiche. Un esempio è quanto avvenuto nel maggio 2024, durante una delle più intense tempeste geomagnetiche degli ultimi decenni (ALTAMORE, 2026), che provocò anche disturbi ai sistemi di navigazione satellitare e alle comunicazioni radio, anomalie nelle reti elettriche e interferenze con le operazioni di numerosi satelliti in orbita.

In seguito alla fase di messa in servizio dello strumento, l'autore si è occupato proprio dello studio degli effetti delle particelle energetiche di origine solare sui sensori di NISP. A questo scopo, la risposta del *quality factor* è stata analizzata su un intervallo di circa tre mesi, sfruttando la capacità di questo parametro di fornire un'indicazione sulla qualità dei dati elaborati a bordo. Infatti, quando una particella energetica attraversa il sensore, deposita una certa quantità di energia producendo cariche spurie che possono alterare l'acquisizione. Il *quality factor* è sensibile a queste anomalie e consente quindi di ottenere una stima indiretta del numero di particelle energetiche che raggiungono il piano focale di NISP attraverso il conteggio dei pixel che presentano valori anomali. L'utilità di questo indicatore diviene particolarmente evidente se si considera, ad esempio, che nel marzo 2024 un prolungato periodo di intensa attività solare provocò un forte aumento del flusso di protoni solari, causando anche ritardi inattesi nel trasferimento dei dati scientifici verso la memoria centrale del satellite e interferendo con le normali operazioni dello strumento NISP. Più in generale, l'esperienza di *Euclid* ha mostrato che le particelle energetiche possono compromettere le singole osservazioni e persino limitare temporaneamente le operazioni del satellite. Durante il *commissioning*, per esempio, l'elevato numero di segnali spuri nelle immagini dei sensori del sistema di guida fine compromise il corretto riconoscimento delle stelle di riferimento, causando difficoltà nel mantenimento del puntamento del satellite e limitando temporaneamente le attività scientifiche.

È un dettaglio apparentemente lontano dalle questioni di cosmologia, ma rappresenta perfettamente la complessità dello scenario in cui una missione spaziale del calibro di *Euclid* deve operare. Per osservare le galassie più remote dell'universo non basta costruire un telescopio estremamente sensibile: occorre comprendere, controllare e tenere sotto continua osservazione una quantità enorme di dettagli, ciascuno dei quali può influenzare la qualità delle misure con cui *Euclid* studia la natura di materia ed energia oscura.

Conclusione

L'obiettivo di questo articolo è dunque richiamare l'attenzione del lettore su un aspetto della ricerca che rimane spesso sullo sfondo. Contribuire al progresso scientifico non implica necessariamente occuparsi direttamente delle domande fondamentali che non hanno ancora trovato risposta. Significa

⁴ G. RODARI, *Ci vuole un fiore*, musica di S. ENDRIGO e L. BACALOV, in S. ENDRIGO, *Ci vuole un fiore*, Milano, Dischi Ricordi, 1974.



FIG. 6. L'ammasso di galassie di Perseo osservato da *Euclid*. La scena copre un'area corrispondente all'intero campo di vista del satellite e comprende circa mille galassie dell'ammasso, insieme a oltre centomila sorgenti sullo sfondo. L'immagine combina le osservazioni dello strumento VIS con quelle fotometriche nel vicino infrarosso dello strumento NISP. La capacità di osservare contemporaneamente un numero così elevato di galassie su un ampio campo di vista permette a *Euclid* di ricostruire la struttura della rete cosmica e la distribuzione della materia nell'universo. (Crediti: ESA / *Euclid* / *Euclid Consortium* / NASA; elaborazione dell'immagine: J.-C. Cuillandre, CEA Paris-Saclay, G. Anselmi)

spesso concentrarsi su una parte circoscritta del problema per comprenderla nei minimi dettagli, mettendo a frutto le conoscenze acquisite per ottenere un risultato accurato e affidabile, capace di contribuire concretamente al lavoro dei propri collaboratori. Dalle spettacolari immagini astronomiche, ottenute dalla combinazione delle osservazioni degli strumenti VIS e NISP (FIG. 6), fino ai vincoli cosmologici ricavati dall'analisi delle proprietà di miliardi di galassie, la missione *Euclid* opera proprio grazie a una concatenazione di contributi circoscrit-

ti ma fondamentali. In questo senso, anche un contributo apparentemente minuscolo può diventare parte essenziale di un lavoro collettivo la cui portata, proprio per la complessità e la molteplicità dei contributi coinvolti, è spesso difficile persino da valutare pienamente.

Sitografia

EUCLID ITALIA: www.euclid-italia.org/
 EUCLID CONSORTIUM: www.euclid-ec.org/
 ESA EUCLID MISSION: www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Euclid

Referenze bibliografiche

- A. ALTAMORE, *Aurore boreali osservate a bassa latitudine*, «Giornale di Astronomia», 52, 1, 2026, pp. 23-27.
 L. AMENDOLA, *A che punto è la notte? La cosmologia venti anni dopo*, «Giornale di Astronomia», 46, 1, 2020, pp. 2-8.
 M. CIRELLI, *La materia oscura: un nuovo tipo di particelle tutte da scoprire*, «Giornale di Astronomia», 48, 1, 2022, pp. 19-27.
 M. DELLA VALLE, *L'espansione del cosmo e la misura della costante di Hubble*, «Giornale di Astronomia», 50, 3, 2024, pp. 2-14.
 A. LIBERATORE, *Natura degli tsunami solari e relazione con le espulsioni coronali di massa*, «Giornale di Astronomia», 50, 4, 2024, pp. 25-30.
 C. NIPOTI, *Anomalie gravitazionali: materia oscura o nuove leggi fisiche?*, «Giornale di Astronomia», 48, 1, 2022, pp. 12-18.
Lettere consigliate
 A. CIMATTI, *L'universo oscuro. Viaggio tra i più grandi misteri del cosmo*, Roma, Carocci, 2020.
 P. FERRI, *Volare oltre il cielo. I segreti dell'esplorazione spaziale*, Milano, Cortina ed., 2025.
 R. PENROSE, *Dal Big Bang all'eternità. I cicli temporali che danno forma all'universo*, Milano, Rizzoli, 2011.

Fabrizio Cogato è un ricercatore a tempo determinato presso l'Istituto Nazionale di Astrofisica, dove lavora alla preparazione al lancio della missione PLATO dell'Agenzia Spaziale Europea. Nel 2026 ha conseguito il dottorato in Astrofisica e Cosmologia presso l'Università di Bologna e ha ricevuto il Premio 'Giuseppe Lorenzoni' della SAIT. La sua attività di ricerca riguarda le tecnologie per la scienza dello spazio, la combinazione di osservazioni cosmologiche indipendenti, lo studio dei fenomeni transienti e l'impiego di tecniche innovative per la divulgazione scientifica.

Estrazione di ossigeno dalla regolite planetaria mediante riduzione carbotermica solido-gas per l'esplorazione della superficie lunare

Alice Dottori

Politecnico di Milano

Il programma Artemis e le iniziative internazionali per l'esplorazione spaziale hanno un obiettivo specifico: stabilire una presenza umana permanente e sostenibile sulla Luna. A differenza delle missioni Apollo, concepite come esplorazioni di breve durata, il nuovo paradigma richiede infrastrutture in grado di operare per anni e di supportare l'attività degli astronauti. In questo contesto, il trasporto di ogni singolo chilogrammo di materiale dalla Terra alla superficie lunare ha un costo proibitivo e limita drasticamente le capacità delle missioni. Per ridurre la dipendenza dalla Terra, la soluzione risiede nel concetto di *In-Situ Resource Utilisation* (ISRU) [1], ossia nell'identificazione, nell'estrazione e nell'utilizzo delle risorse presenti e direttamente disponibili sulla superficie lunare. Tra tutte le risorse necessarie al supporto vitale e alla propulsione, l'ossigeno e l'acqua rivestono un ruolo particolarmente critico.

La regolite lunare

La quasi totalità della superficie lunare è ricoperta da uno strato sabbioso: la regolite. La regolite nasce da diversi fenomeni, tra cui l'impatto di meteoriti, e può raggiungere profondità superiori a 10 m [2]. La sua composizione e le sue proprietà fisiche possono essere estremamente localizzate. In generale, si distinguono le regioni più pianeggianti della superficie, i *maria* e le regioni delle *highlands* lunari.

L'ossigeno è l'elemento più abbondante nella regolite, costituendone circa il 40-45% in peso. Questo ossigeno, tuttavia, non è libero, ma è legato chimicamente all'interno di ossidi e minerali, come l'ilmenite (FeTiO_3), il pirosseno, l'olivina e l'anortite. Per estrarlo, è necessario rompere questi forti legami chimici mediante processi ad alta energia.

Nelle fasi di sperimentazione terrestre, a causa della scarsità e dell'importanza dei campioni riportati dalle missioni Apollo e Luna, vengono impiegati dei simulanti, ovvero delle copie della regolite lu-

nare che replicano alcune proprietà specifiche come la composizione mineralogica, la dimensione dei grani o le proprietà fisiche. Presso i laboratori del Politecnico di Milano, la sperimentazione si avvale di simulanti come il NU-LHT-2M, progettato per replicare fedelmente la composizione mineralogica degli altipiani lunari (*Lunar Highlands*), prodotto dalla NASA [3,4], di altri simulanti commerciali certificati che replicano specifici minerali e le caratteristiche dei *maria* lunari, e di campioni di sabbia vulcanica prelevata dall'Etna attraverso una collaborazione con l'Università di Padova [5], la cui granulometria e composizione basaltica offrono un eccellente analogo per lo studio dei suoli lunari mariani.

I processi per l'estrazione dell'ossigeno

Esistono diverse metodologie per l'estrazione dell'ossigeno, ispirate a processi metallurgici terrestri. Tra queste troviamo processi di elettrolisi in sali fusi o di regolite fusa, e riduzioni termochimiche con idrogeno, carbonio o metano, che operano con la regolite in forma solida o fusa, a seconda del processo specifico [6,7]. I diversi processi differiscono per la resa di estrazione dell'ossigeno, le temperature di lavoro, i componenti aggiuntivi necessari e i minerali con cui operano.

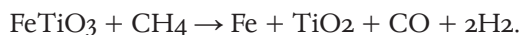
La riduzione carbotermica di regolite solida con metano gassoso

Il processo carbotermico solido-gas si distingue dagli altri processi termochimici per l'estrazione dell'ossigeno per la sua capacità di operare a temperature inferiori al punto di fusione della regolite, mitigando i problemi legati alla corrosione dei reattori e semplificando la gestione dell'impianto, e per la sua applicabilità rispetto alla composizione mineralogica del materiale da ridurre.

Il ciclo chimico si basa sull'uso del carbonio, introdotto sotto forma di metano gassoso (CH_4) come agente riducente [7]. A temperature comprese tra i 1000 °C e i 1150 °C, il metano fluisce attraverso un letto di regolite solida innescando quindi la riduzione degli ossidi metallici presenti: il carbonio si lega all'ossigeno presente nella regolite formando monossido di carbonio (CO) e diossido di carbonio (CO_2), mentre l'idrogeno viene rilasciato sotto for-

* In questo articolo sono presentati i contenuti essenziali delle ricerche svolte dall'Autrice nel corso del Dottorato di Ricerca, che le sono valse la menzione speciale al "Premio Guido Horn d'Arturo" della SAIT e di EIE GROUP per l'anno 2026 - VIII edizione; premio assegnato alla miglior tesi di Dottorato in area scientifico-tecnologica applicata all'astronomia, astrofisica o scienza dello spazio.

ma di H₂. L'equazione globale semplificata per la riduzione dell'ilmenite, ad esempio, può essere descritta come



I gas prodotti (CO e H₂) vengono successivamente convogliati in un secondo stadio, operante a temperature molto più basse (circa 250 °C) e in presenza di un catalizzatore, dove avvengono le reazioni di metanazione della CO e, se presente, della CO₂, ottenendo così metano e acqua [8]. Il metano viene così rigenerato e può essere reimmesso nel ciclo primario (rendendo il processo a ciclo chiuso per quanto riguarda il reagente principale), mentre l'acqua viene condensata ed estratta in uno stadio dedicato. Dall'acqua, attraverso un processo di elettrolisi, si possono ottenere idrogeno (riciclabile) e ossigeno puro.

Caratterizzazione sperimentale del processo carbotermico

Sulla Terra, la riduzione carbotermica è ampiamente utilizzata in ambito metallurgico per estrarre metalli o le loro leghe dai minerali grezzi. In queste applicazioni industriali, il prodotto desiderato è il metallo, mentre i gas derivanti dall'ossidazione del carbonio (CO e CO₂) costituiscono un prodotto di scarto. Per l'applicazione spaziale, il monossido di carbonio diventa il prodotto principale e cambia il materiale da ridurre, poiché la regolite è una combinazione di diversi minerali.

L'impianto sperimentale

Per poter arrivare alla dimostrazione e, successivamente, allo sfruttamento del processo carbotermico sulla superficie della Luna, è necessario prima validarlo in condizioni di laboratorio sulla Terra. A questo scopo, il gruppo ASTRA-Lab del Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali del Politecnico di Milano ha progettato, assemblato e testato un impianto dimostrativo per validare il processo fino all'estrazione dell'acqua liquida [9].

L'impianto si compone di un reattore principale commerciale, resistente alle alte temperature, in grado di contenere il campione di simulante, di scaldarlo fino alla temperatura di processo e di consentire il flusso dei gas di reazione. Un sistema di flussimetri regola l'immissione della miscela di gas riducenti (metano e idrogeno). I gas prodotti entrano in un secondo reattore di dimensioni minori, che contiene un catalizzatore a base di nichel e supporta la reazione di metanazione. I prodotti di quest'ultima passano attraverso un condensatore progettato e realizzato presso i laboratori del Politecnico che, immerso in un freezer, raggiunge una temperatura di -50°C, permettendo la solidificazione del vapore acqueo e la sua separazione dal resto della miscela, che viene bruciata all'esterno del laboratorio per ragioni di sicurezza. Un Gas Cromatografo (GC), ca-

librato per la misurazione di idrogeno, metano, CO e CO₂, consente il monitoraggio della miscela gassosa ogni circa 20 minuti a valle della riduzione carbotermica, in modo da controllare l'evoluzione della presenza di monossido di carbonio nel tempo. L'evoluzione della CO permette di ricostruire la massa teorica di ossigeno estratta e definire quindi la resa del processo, calcolata come la massa di ossigeno estratta rispetto alla massa di ossigeno originariamente disponibile nel batch di materiale di partenza. Il prodotto fondamentale del processo è la massa d'acqua raccolta nel condensatore, misurata al termine di ogni ciclo di riduzione.

Risultati

La validazione del processo

In una prima fase sperimentale, il processo è stato validato con il simulante delle *highlands* lunari NULHT-2M, dimostrando la fattibilità dell'estrazione dell'acqua. La campagna di test ha inoltre permesso l'ottimizzazione dei parametri di processo con l'obiettivo di massimizzare la quantità di acqua prodotta da 1 kg di simulante di regolite, come la temperatura del materiale solido, la durata del processo, la percentuale di metano nel flusso in ingresso. Questa fase di caratterizzazione è stata effettuata nell'ambito di un progetto finanziato dall'Agenzia Spaziale Europea e in collaborazione con ONB-Italia nel 2020/21 [10].

Inoltre, è stato investigato l'effetto della temperatura di riduzione carbotermica: più essa è vicina alla temperatura di fusione del materiale solido, maggiore sarà l'estrazione di ossigeno, con il rischio di avere delle parziali fusioni del materiale e quindi di complicare la rimozione del materiale solido alla fine del processo. La campagna sperimentale ha permesso di testare la durata del processo: in condizioni standard, dopo 80 ore di riduzione di 50 g di regolite si è raggiunta un'estrazione nulla di ossigeno. Infine, è stato dimostrato che la granulometria del materiale da ridurre non incide sulla resa del processo, rimanendo all'interno della distribuzione dimensionale standard della regolite.

L'effetto di diversi materiali

Una seconda campagna sperimentale, effettuata nell'ambito del processo ORACLE finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana, ha consentito una maggiore caratterizzazione del processo di riduzione carbotermica, rispetto alla sua resa di estrazione dell'ossigeno, utilizzando materiali solidi diversi. Per farlo, diversi simulanti di regolite lunare sono stati testati alle stesse condizioni di processo. I risultati di questa fase hanno evidenziato che i materiali ricchi di ossidi di ferro o di titanio, come i simulanti dei *maria* lunari o l'ilmenite, presentano prestazioni migliori, con una resa di estrazione dell'ossigeno di un ordine di grandezza superiore rispetto a quella

dei materiali più ricchi di silicati, come i simulanti delle *highlands* lunari e l'anortosite.

Una strategia per ottimizzare lo sfruttamento della regolite, in una visione più ampia dell'utilizzo delle risorse sulla superficie lunare, è stata identificata grazie a una collaborazione all'interno del Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali [11]. I risultati sperimentali del processo carbotermico dimostrano che le componenti ferrose, e quindi magnetiche, della regolite hanno rese superiori rispetto alla componente non metallica, che, di contro, essendo più chiara, presenta prestazioni migliori nei processi di *Additive Manufacturing* e di stampa 3D. Per questo, introdurre uno stadio preliminare al processo in cui con un magnete si dividono le due componenti può essere una soluzione efficiente per ottimizzare lo sfruttamento del materiale, andando a fornire ad ogni processo successivo il materiale più adeguato.

L'uso di campioni di sabbia vulcanica raccolti sull'Etna ha evidenziato l'impatto tecnologico della presenza di componenti amorfi e vetrosi nella regolite. Le prestazioni di estrazione dell'ossigeno di questi campioni sono molto simili a quelle dei simulanti delle *highlands* lunari, ma la componente vetrosa può reagire con i materiali ceramici dei reattori, rendendo la gestione dell'eshausto estremamente complessa [4]. Questo fornisce informazioni fondamentali in preparazione al test di riduzione carbotermica sulla superficie lunare, con regolite raccolta in loco, in cui la componente amorfa è presente in misura significativa. La scelta dei materiali dei componenti a contatto con la regolite sarà decisiva per garantire l'integrità del reattore in tutte le fasi del processo e la sua riuscita.

L'effetto della quantità di metano gassoso

La seconda parte della caratterizzazione del processo carbotermico riguarda la percentuale di metano nella miscela in ingresso alla riduzione.

Le indagini termodinamiche confermano che il metano gassoso agisce come un reagente nettamente superiore alla grafite solida, grazie al suo maggiore potenziale chimico e alla maggiore facilità di diffusione all'interno del letto poroso. Tuttavia, l'uso del metano comporta sfide specifiche legate al bilancio del carbonio. Durante il processo ad alta temperatura, il metano si dissocia depositando carbonio solido (coke) sui grani di regolite. Se da un lato questo carbonio depositato contribuisce attivamente alla riduzione degli ossidi, dall'altro un accumulo eccessivo rischia di incapsulare i grani, riducendo l'area superficiale esposta e bloccando la reazione. Per ovviare a questo problema, i test di laboratorio hanno validato una strategia di alternanza dei flussi: a fasi di miscela in cui viene flussato metano insieme all'idrogeno, che favoriscono l'accumulo di carbonio e la riduzione, si alternano fasi di lavaggio in cui viene flussato idrogeno puro. L'idrogeno reagisce con il coke in eccesso, liberan-

do nuovamente la superficie dei grani e garantendo che la reazione proceda ottimizzando l'estrazione totale di ossigeno. Questa strategia è in grado di estendere la durata del processo in condizioni standard, ma andando ad aumentare la percentuale di metano nel flusso, le durate delle fasi di lavaggio risultano essere sempre maggiori.

Modellazione numerica della regolite: il Metodo agli Elementi Discreti (DEM)

Un'ulteriore sfida fondamentale per l'implementazione delle tecnologie ISRU è la manipolazione fisica della regolite. La sua natura non coesiva, unita a un'estrema abrasività, rende la progettazione di meccanismi tradizionali altamente soggetta all'usura e ai guasti operativi. Pertanto, lo studio sperimentale deve essere necessariamente affiancato da robuste simulazioni numeriche [12].

Modellazione numerica

Inizialmente, la ricerca si è avvalsa del metodo degli elementi finiti (FEM) tramite software commerciali come COMSOL Multiphysics per condurre simulazioni termomeccaniche, tra cui quelle relative alla raccolta della regolite mediante perforazione rotativa (*rotary drilling*). Tuttavia, l'approccio al continuo tipico del FEM ha mostrato evidenti limitazioni: non è in grado di rappresentare accuratamente le ampie deformazioni caratteristiche dei materiali granulari, con conseguenti cedimenti frequenti della mesh di calcolo.

Per superare queste limitazioni, è stato sviluppato un modello ad alta fedeltà basato sul Metodo agli Elementi Discreti (DEM), utilizzando il software *open source* Chrono DEM-Engine. Questo framework permette di simulare milioni di particelle singole e di tenere traccia simultaneamente del contatto meccanico (attraverso modelli come Hertz-Mindlin), della conduttività termica all'interno del letto granulare e delle complesse interazioni elettrostatiche dovute alla fotoemissione e all'ambiente di radiazione lunare [13].

Simulazioni dell'unità di gestione della regolite (RMU)

Le simulazioni DEM sono state fondamentali per validare le operazioni della catena di sfruttamento, dal setacciamento in condizioni di bassa gravità al carico del materiale nel reattore e alla sua interazione con il fluido. Viste le risorse computazionali richieste, sono state effettuate simulazioni in scala ridotta, pur mantenendo le proprietà fondamentali, al fine di supportare il design dei singoli componenti e delle operazioni sulla superficie lunare.

Il setacciamento e controllo dimensionale

Le prime analisi si concentrano sull'interazione tra un setaccio e un flusso di regolite, con l'obiettivo di

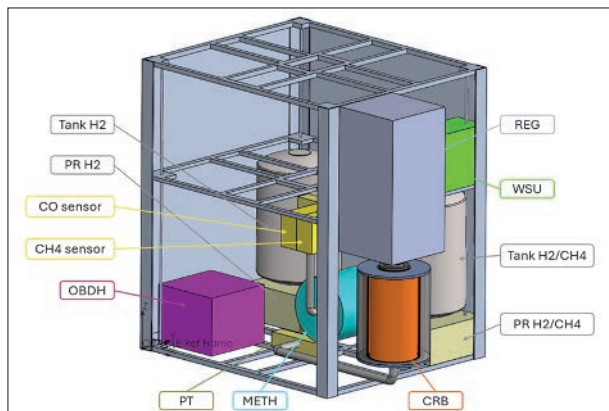


FIG. 1. Progetto del prototipo lunare dell'impianto carbotermico.

eliminare i grani più grandi per prevenire l'ostruzione dei condotti successivi. L'analisi numerica ha rivelato che le semplici oscillazioni sinusoidali in una singola direzione (*sine wave*) risultano insufficienti a garantire un flusso passante adeguato sulla Luna. Le strategie di vibrazione basate su *pattern* multidirezionali (Lissajous) e su segnali modulati in frequenza (*chirp*) si sono dimostrate nettamente superiori nel prevenire l'ostruzione delle maglie dei setacci, fenomeno noto come *mesh blinding*.

Il caricamento del reattore

Per quanto riguarda le operazioni di caricamento, le simulazioni hanno evidenziato che l'orientamento verticale del reattore è un parametro critico. Inclinare il reattore oltre i 20° rispetto alla direzione della gravità lunare comporta non solo una significativa perdita di particelle, ma anche una deposizione non uniforme del letto di regolite, con il rischio di compromettere la distribuzione dei flussi di gas nella successiva fase di reazione.

La fluidodinamica del letto

Ulteriori simulazioni accoppiate CFD-DEM (fluidodinamica computazionale unita agli elementi discreti) hanno indagato lo stato fluidodinamico del letto granulare all'interno del reattore carbotermico, ovvero se il letto rimane fisso durante il processo o se invece si fluidizza. La fluidizzazione del letto può favorire l'interazione tra i grani di regolite e i gas, anche se non ha un effetto dimostrato sulle prestazioni di estrazione dell'ossigeno. L'analisi ha stabilito che, operando alle condizioni nominali di flusso gassoso richieste dalla missione, il letto di regolite rimane in uno stato fisso (*fixed bed*), come in condizioni di laboratorio sulla Terra.

Architettura dell'impianto sperimentale lunare

La validazione terrestre, per quanto essenziale, non può replicare simultaneamente tutte le condizioni spaziali, come l'esatta combinazione di vuoto spin-

to, radiazione cosmica e gravità pari a un sesto di quella terrestre. Emerge quindi la necessità di una dimostrazione in ambiente lunare per innalzare il Technology Readiness Level (TRL) del processo. A questo scopo risponde il progetto ORACLE (Oxygen Retrieval Asset by Carbothermal-reduction in Lunar Environment), il cui obiettivo è realizzare un dimostratore di volo in grado di processare in sequenza due lotti di regolite da 30 grammi direttamente sulla superficie lunare [14]. L'intero design del payload è subordinato ai rigidi vincoli di una tipica piattaforma lander CLPS (Commercial Lunar Payload Services): una massa massima del sistema pari a 15 kg e un budget di potenza disponibile limitato a 168 W.

Design dell'impianto lunare

Per rispettare questi parametri stringenti, l'architettura dell'impianto è stata ingegnerizzata in sei sottosistemi funzionali miniaturizzati e interconnessi, visibili nella rappresentazione in FIG. 1 [14]. Il sottosistema carbotermico (CRB) è il cuore del processo: ospita la camera di reazione ad alta temperatura e le resistenze primarie, elementi necessari per raggiungere e mantenere le condizioni richieste dalla riduzione carbotermica. Il sottosistema di metanazione (MET) è l'unità a bassa temperatura che ospita il letto catalitico per la sintesi dell'acqua. Il sottosistema di separazione dell'acqua (WSU) consiste nell'unità criogenica incaricata del recupero e dello stoccaggio dell'acqua prodotta. Il sottosistema fluido (FLD) comprende la rete di valvole e tubazioni che gestisce lo stoccaggio e l'erogazione di metano e idrogeno, nonché dei prodotti delle reazioni. Il sottosistema di gestione della regolite (REG) è incaricato delle delicate operazioni di pesatura e di caricamento dei lotti. E infine il sottosistema di monitoraggio e controllo (MCS), che consiste nell'elettronica deputata alla rilevazione dei dati scientifici, al controllo di potenza e all'identificazione autonoma dei guasti.

Sfide tecnologiche e soluzioni implementate

La prima fase di progettazione ha consentito di verificare la fattibilità del sistema entro i limiti richiesti, pur evidenziando alcune criticità.

Gestione termica e controllo della potenza

Mantenere il reattore primario alle temperature operative sulla superficie lunare, nel rispetto del budget di potenza imposto, richiede soluzioni precise. Le simulazioni termiche effettuate durante il dimensionamento del sottosistema carbotermico hanno individuato, come soluzione migliore, una strategia di isolamento combinata: 30 mm di aerogel di carbonio avvolti da 25 strati di isolamento multistrato (MLI). Questo design minimizza le perdite termiche e protegge l'elettronica di bordo, i serbatoi di gas, il condensatore e tutti i sistemi "freddi" adiacenti. Inoltre, per non superare mai i picchi di assorbimento imposti dal lander, l'erogazione di po-

tenza alle bobine riscaldanti è regolata tramite modulazione a larghezza di impulso (PWM), garantendo un riscaldamento controllato ed efficiente.

Il caricamento a lotti sovrapposti (stacked batch)

Per raddoppiare il ritorno scientifico della missione minimizzando al contempo la complessità e il peso meccanico, è stata implementata una strategia innovativa per la gestione del secondo ciclo di reazione: lo *stacked batch*. Invece di prevedere un sistema di scarico attivo per la regolite esausta (che richiederebbe guarnizioni complesse in grado di operare a 1000 gradi nel vuoto), il secondo lotto da 30 grammi viene semplicemente caricato all'interno del reattore, depositandolo sopra il primo lotto già processato. Test specifici in laboratorio hanno confermato che il materiale esausto sul fondo funge da filtro permeabile, senza ostruire né inibire in alcun modo i flussi di gas del secondo ciclo.

La criticità della separazione dell'acqua

Durante le campagne di test terrestri, si è evidenziato un elevato rischio di formazione di ghiaccio (*icing*) all'ingresso del condensatore, con conseguente blocco dei flussi di gas dell'impianto. Per ovviare a questo problema nell'ambiente spaziale, l'unità wsu del modello di volo adotta una particolare configurazione a «dito freddo» (*cold finger*). La condensazione dell'umidità prodotta dal metanatore avviene in modo mirato su specifiche superfici refrigerate. Periodicamente, per quantificare l'estrazione, il dito freddo viene debolmente riscaldato al di sopra di 0 °C, consentendo lo scioglimento del ghiaccio. L'acqua liquida gocciola e si accumula in un serbatoio sottostante isolato, dove viene misurata mediante sistemi di *imaging* e misura del volume o della massa.

Conclusioni

L'estrazione dell'ossigeno dalla regolite tramite il processo carbotermico solido-gas ha dimostrato la sua validità teorica e sperimentale. Grazie a un approccio sinergico che unisce sperimentazione fisica in reattori ad alta temperatura, chimica cinetica e modellazione numerica avanzata, stiamo superando le sfide ingegneristiche necessarie per scalare questa tecnologia. Il passaggio dalla scala di laboratorio ai futuri impianti pilota sulla superficie lunare trasformerà in una realtà concreta l'ambizione di una base permanente nell'orbita cislunare e sulla Luna, supportando il lavoro di astronauti e macchine sulla superficie del nostro satellite.

Referenze bibliografiche

- [1] G. B. SANDERS, W. E. LARSON, *In-situ resource utilization (ISRU) capabilities for Lunar exploration*, «Advances in Space Research», 50, 2012, pp. 1-15.
- [2] G. HEIKEN, V. DAVID, F. B. M., *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*, G. H. Heiken, D. T. Vaniman, B. M. French, Eds. Cambridge University Press, 1991.
- [3] D. B. STOESER, S. A. WILSON, D. L. RICKMAN, *Design and specifications for the highland regolith prototype simulants NU-LHT-1M and -2M*, «NASA Technical Report» TM-2010-216438.
- [4] G. MELCHIORI *et al.*, *Volcanic deposits from Mount Etna (Italy) as high-fidelity Lunar simulants for in-situ resource utilization (ISRU) applications*, «Materials Today Advances», 29, 678, 2026, pp. 100.
- [5] L. SCHLÜTER, A. COWLEY, *Review of techniques for in-situ oxygen extraction on the Moon*, «Planetary and Space Science», 181, Feb. 2020.
- [6] C. SCHWANDT, J. A. HAMILTON, D. J. FRAY, I. A. CRAWFORD, *The production of oxygen and metal from Lunar regolith*, «Planetary and Space Science», 74, pp. 49-56, 1 Dec. 2012.
- [7] I. TROISI, P. LUNGH, M. LAVAGNA, *Oxygen extraction from lunar dry regolith: Thermodynamic numerical characterization of the carbothermal reduction*, «Acta Astronautica», 199, 2022, pp. 113-124.
- [8] S. S. SCHREINER, L. SIBILLE, J. A. DOMINGUEZ, J. A. HOFFMAN, *A parametric sizing model for Molten Regolith Electrolysis reactors to produce oxygen on the Moon*, «Advances in Space Research», 57, no. 7, pp. 1585-1603, 2016.
- [9] J. PRINETTO *et al.*, *Terrestrial demonstrator for a low-temperature carbothermal reduction process on Lunar regolith simulant: Design and AIV activities*, «Planetary and Space Science», 225, 618, 2023, pp. 105.
- [10] A. DOTTORI, I. TROISI, and M. LAVAGNA, *Demonstration of the low temperature carbothermal process for producing oxygen from Lunar regolith: Terrestrial test campaign*, «Planetary and Space Science», 266, 2025, pp. 106-154.
- [11] M. ISACHENKOV *et al.*, *Integrated approach for water production and additive manufacturing using magnetically-beneficiated Lunar regolith*, in 75th International Astronautical Congress (IAC 2024), 2024.
- [12] S. LANFRANCO, A. DOTTORI, and M. LAVAGNA, *Multi-physics modelling of planetary regolith: To investigate instruments-soil interaction in support of design and operations*, «Planetary and Space Science», 2025.
- [13] R. ZHANG *et al.*, *Chrono dem-engine: A discrete element method dual GPU simulator with customizable contact forces and element shape*, «Computer Physics Communications», 300, 2024, pp. 109-196.
- [14] A. DOTTORI *et al.*, *Lunar pilot plant payload design toward in situ demonstration of oxygen extraction by carbothermal reduction*, in Aerospace Europe Conference 2023 - Joint 10th EUCASS - 9th CEAS Conference, 2023, pp. 1-17.

Alice Dottori ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Aerospaziale presso il Politecnico di Milano nel 2026. La sua ricerca si concentra sullo sfruttamento di risorse *in situ* (ISRU), in particolare sull'estrazione di ossigeno dalla regolite lunare tramite processi carbotermici e sulla modellazione numerica (DEM) di materiali granulari in ambiente spaziale.

MISTRAL: l'occhio ultra-freddo del Sardinia Radio Telescope*

Giovanni Isopi

Sapienza Università di Roma

I NOSTRI occhi, gli unici strumenti con cui l'essere umano ha scrutato il firmamento per millenni, ci hanno permesso di ottenere una buona conoscenza dell'universo sfruttando la radiazione che definiamo "visibile", composta da fotoni con una lunghezza d'onda compresa tra 400, corrispondenti al violetto, e 750 nanometri, corrispondenti al rosso. In questa banda dello spettro elettromagnetico emettono prevalentemente le stelle come il nostro Sole: è per questo che i nostri occhi si sono evoluti, per funzionare al meglio sotto la luce della nostra stella, ed è per questo che siamo così sensibili alla luce proveniente anche dalle altre stelle più lontane. Si tratta però di una finestra estremamente ristretta rispetto all'ampissima varietà di fotoni che permeano l'universo: non possiamo vedere le onde radio emesse dal plasma caldissimo che viene lanciato nello spazio intergalattico da un buco nero supermassiccio, così come non possiamo vedere l'emissione termica delle nubi di polvere freddissima in cui si stanno formando le nuove stelle, che quindi appaiono come sagome scure che si stagliano sulla Via Lattea.

Con l'avanzare della tecnologia, siamo riusciti inizialmente a riprendere i fotoni visibili con maggiore sensibilità rispetto all'occhio umano, per poi espanderci al di fuori dello spettro visibile, esplorando gradualmente l'universo che fino a quel momento era invisibile ai nostri occhi. Oggi siamo in grado di vedere sostanzialmente tutti i "colori" dell'universo: a lunghezze d'onda maggiori del rosso troviamo l'infrarosso vicino, medio e lontano, per poi passare alla radiazione millimetrica, le microonde e infine le onde radio. A lunghezze d'onda minori del violetto abbiamo gli ultravioletti, i raggi X e i raggi gamma. Ogni genere di radiazione, chiaramente, necessita di tecnologie specifiche per essere osservata. Per la luce visibile utilizziamo dei cristalli di silicio opportunamente trattati, in modo che producano degli elettroni quando vengono colpiti da fotoni: sono i sensori che tipicamente usiamo nelle macchine fotografiche digitali e nei telefoni. Le onde radio, avendo una lunghezza d'onda maggiore e quindi un'energia minore rispetto alla luce visibile,

non riescono a liberare elettroni colpendo il silicio, quindi devono essere captate in un modo diverso. Dato che oscillano più lentamente dei fotoni ottici, possono essere osservate misurando direttamente la corrente oscillante che inducono in un conduttore: questo dispositivo altro non è che un'antenna, un oggetto con cui abbiamo a che fare tutti i giorni nella nostra vita quotidiana. Per captare la debolissima emissione radio proveniente dallo spazio, con il passare del tempo, abbiamo costruito antenne sempre più grandi e potenti, i radiotelescopi, in grado di osservare segnali miliardi di volte più tenui rispetto ai tipici segnali radio che vengono scambiati dai nostri telefoni.

Nel cuore della Sardegna si trova il radiotelescopio più grande d'Italia, il Sardinia Radio Telescope (SRT): questo gigante metallico, gestito dall'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), è una gigantesca antenna con un diametro di 64 metri, alto 70 metri e pesante 3000 tonnellate, progettato per osservare il cielo nel radio con una sensibilità senza precedenti in un intervallo di frequenze estremamente ampio. Il telescopio è infatti sensibile a onde radio tra 70 centimetri e 3 millimetri di lunghezza d'onda. Per osservare le diverse bande di onde radio utilizza una flotta di ricevitori progettati per operare con la massima efficienza e sensibilità in un range specifico di frequenze. Una caratteristica comune di tutti questi ricevitori è essere composti da un numero piccolo di *pixel*, o *feed* in gergo. Di conseguenza, realizzare un'immagine del cielo radio richiede molto tempo: bisogna scansionare striscia dopo striscia le regioni di cielo di interesse, ricostruendo poi a posteriori l'immagine radio.

Nel 2020, il Sardinia Radio Telescope si è aggiudicato un finanziamento PON (Piano Organizzativo Nazionale), che aveva come scopo l'*upgrade* del telescopio per renderlo sensibile fino alla radiazione millimetrica, a 3 millimetri di lunghezza d'onda (o 100 GHz di frequenza, grandezza che piace di più ai radioastronomi). Per osservare al meglio la radiazione millimetrica, si è pensato di costruire uno strumento molto ambizioso: un ricevitore sensibile alla radiazione a 3mm di lunghezza d'onda, ma con centinaia di pixel, per poter mappare grandi aree di cielo in molto meno tempo rispetto ad un radiometro "classico". Questo progetto, guidato da un team di circa 30 persone che unisce l'Università Sapienza di Roma e l'Istituto Nazionale di Astrofisica di Cagliari di cui faccio parte, ha preso il nome di MI-

* In questo articolo sono presentati i contenuti essenziali delle ricerche svolte dall'Autore nel corso del Dottorato di Ricerca, che gli sono valse il "Premio Guido Horn d'Arturo" della SAIT e di EIE GROUP per l'anno 2026-VIII edizione; premio assegnato alla miglior tesi di Dottorato in area scientifico-tecnologica applicata all'astronomia, astrofisica o scienza dello spazio.

STRAL, come il vento Maestrale che soffia sulla Sardegna. Il progetto MISTRAL è stato il focus della mia tesi di dottorato, e ho avuto la fortuna di seguire l'evoluzione dell'esperimento da quando era solo un progetto CAD, lavorando a diversi aspetti di questa complessa macchina, fino all'emozionante momento della "prima luce", quando abbiamo ripreso le prime immagini del cielo.

I ricevitori radio tipicamente hanno pochi pixel perché è piuttosto difficile miniaturizzare il sistema di antenne e amplificatori che trasducono le onde radio in un segnale elettrico digitalizzabile e analizzabile. Per MISTRAL è stata scelta una tecnologia di *detector* differente, simile a quella utilizzata dai telescopi che osservano la radiazione cosmica di fondo, che necessitano di migliaia di rivelatori ultra-sensibili per mappare grandi aree di cielo. Si tratta dei *rivelatori a induttanza cinetica* (KIDS, o Kinetic Inductance Detectors, in inglese), sensori superconduttori sensibili alla radiazione millimetrica. Questi rivelatori possono essere resi molto piccoli, nel nostro caso sono grandi solo 3 millimetri, quanto i fotoni stessi che devono assorbire. Grazie alle loro piccole dimensioni, si riescono a stampare centinaia di KIDS su un solo wafer di silicio. Nel nostro caso, il team Sapienza ha progettato una matrice di ben 400 sensori, fabbricata dall'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie del Centro Nazionale delle Ricerche, che accoppiati al Sardinia Radio Telescope coprono un campo inquadrato di 4 arcminuti. Per avere un'idea di quanto sia piccola l'area coperta in cielo, la Luna piena e il Sole hanno un diametro di 30 arcminuti. Si tratta comunque di un campo inquadrato notevole per un ricevitore millimetrico.

Nel mondo reale, però, tutto ha un prezzo: per avere questo livello di miniaturizzazione, è stato scelto di rinunciare alle capacità spettroscopiche dei *detector*. I KIDS quindi raccolgono tutta la radiazione in una banda tra 77 e 103 GHz, ma non sanno distinguere il "colore" dei singoli fotoni, non potendo quindi effettuando spettroscopia. È il prezzo da pagare per una sensibilità elevata su ampie aree di cielo. I rivelatori sono composti da uno strato di titanio e alluminio spesso pochi nanometri, che deve essere raffreddato fino a temperature estremamente basse per poter funzionare come superconduttore. Una parte fondamentale di MISTRAL è che lo rende unico rispetto agli altri ricevitori di SRT è il sistema criogenico sub-kelvin, che permette di raffreddare i *detector* fino a una temperatura di soli 200 millikelvin, appena 0,2 gradi sopra lo zero assoluto, sfruttando un refrigeratore a elio liquido. Per raggiungere temperature così basse, il criostato è costruito a strati come una cipolla, che sono via via sempre più freddi, minimizzando qualsiasi ingresso di calore dal mondo esterno. Tutto il sistema pesa oltre 200 kg e, se svuotato delle sue componenti interne, la *shell* esterna rossa può ospitare una persona in piedi al suo interno. Per massimizzare la qualità delle immagini prodotte da MISTRAL, all'interno del criostato si trova anche un innovativo sistema quasi-ottico



FIG. 1. Il Sardinia Radio Telescope durante una notte di osservazioni di *commissioning* con MISTRAL, mentre scansiona la nebulosa di Orione. (Foto dell'autore)

composto da due lenti di silicio a una temperatura di 4 kelvin, che correggono le aberrazioni del telescopio permettendo di ottenere immagini definite su tutto il campo inquadrato di 4 arcminuti. L'alta frequenza permette anche di osservare dettagli senza precedenti del cielo radio. La risoluzione di un telescopio è infatti direttamente proporzionale alla lunghezza d'onda osservata, e inversamente proporzionale al diametro del telescopio: a parità di diametro, aumentando la frequenza, si aumenta anche il livello di dettaglio osservato. Nel caso di MISTRAL, si ottiene una risoluzione di 12 secondi d'arco: tre volte meglio dei ricevitori precedentemente installati su SRT.

Nel 2023, dopo tre anni di lavoro e un'intensa fase di test in laboratorio, MISTRAL era pronto per essere installato sul telescopio. La campagna di installazione è durata quasi una settimana e ha richiesto l'intervento di diversi ricercatori e ricercatrici della Sapienza per installare in sicurezza lo strumento al fuoco gregoriano del telescopio, posto esattamente al centro della grande antenna. Prima di puntare effettivamente MISTRAL verso il cielo è stato necessario attendere ancora diversi mesi, perché altri *upgrade* del telescopio erano ancora in corso, e perché bisognava testare e validare da cima a fondo tutto il sistema criogenico.



FIG. 2. MISTRAL installato nella camera gregoriana del Sardinia Radio Telescope. Nel riquadro, il *wafer* di MISTRAL prima di essere installato all'interno del criostato. (Crediti: G. Pettinari, CNR/IFN)

Tra 2024 e 2025, finalmente, siamo entrati nel cuore della fase di *commissioning*, la fase di collaudo sul cielo propedeutica all'apertura delle *call for proposals* dedicate alla comunità scientifica. Lo scopo del *commissioning* era validare tutti i sottosistemi del ricevitore una volta installato al telescopio e dimostrare che fosse in grado di produrre immagini di alta qualità del cielo millimetrico. Questa fase ha richiesto un grande lavoro del team di *commissioning*, perché si trattava delle prime osservazioni in assoluto a queste frequenze mai tentate dal Sardinia Radio Telescope: dovevamo imparare a usare non solo il nostro ricevitore, che di per sé è una sfida vista la sua innovatività, ma anche l'intero radiotelescopio recentemente aggiornato. All'aumentare della frequenza, quindi al diminuire della lunghezza d'onda, le tolleranze meccaniche e ottiche diventano molto più stringenti per poter ottenere immagini di qualità. Se prima SRT osservava fino a 1 cm di lunghezza d'onda, MISTRAL ha testato le sue prestazioni a 3 millimetri, richiedendo quindi un livello di precisione mai tentato prima. Il finanziamento PON comprendeva anche un *upgrade* della superficie dell'antenna, composta da oltre 1000 pannelli mobili, che possono essere individualmente posizionati per minimizzare la rugosità della superficie. Per osservare con successo con MISTRAL, è necessaria una rugosi-

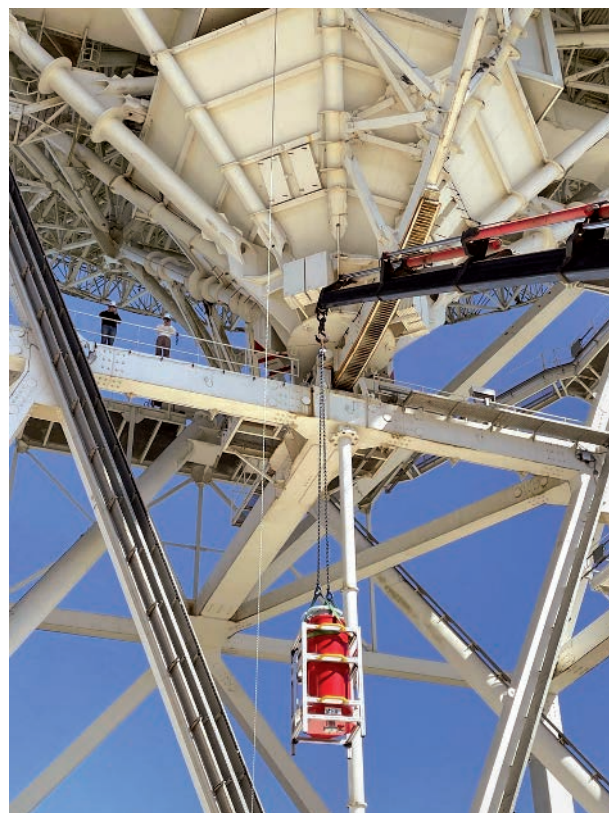


FIG. 3. Il criostato a 40 metri di altezza mentre viene caricato nella *elevation room* del radiotelescopio. (Crediti: A. Coppolecchia)

tà globale di 200 micron: l'intera antenna di 64 metri doveva essere liscia entro lo spessore di 4 capelli umani sovrapposti. Questo ha richiesto un lungo lavoro di ottimizzazione da parte del team di SRT, che ha messo a punto sofisticati sistemi di metrologia per misurare e correggere ogni piccola deformazione dell'antenna.

Dopo innumerevoli notti insonni e un totale di circa 400 ore complessive di osservazione, passate ad ottimizzare la sinergia tra MISTRAL e il Sardinia Radio Telescope, sono arrivate le prime, emozionanti immagini di prima luce.

Nel dicembre 2024, MISTRAL è stato puntato verso il nucleo della grande nebulosa di Orione, uno degli oggetti *deep-sky* più luminosi e iconici del cielo, ben noto tra gli astrofili e gli astrofotografi, distante 1300 anni luce dalla Terra. In luce visibile si possono osservare intricate volute di gas ionizzato dalle caldissime stelle del Trapezio. In banda millimetrica invece si osserva sia la radiazione termica della polvere fredda all'interno della nebulosa, sia la cosiddetta radiazione di *free-free*, dovuta agli elettroni liberi nel mezzo interstellare che vengono accelerati dalla carica elettrica dell'idrogeno ionizzato, emettendo quindi radiazione elettromagnetica. Si tratta di una radiazione completamente invisibile in banda ottica, che può quindi essere osservata solo con i radiotelescopi (FIG. 4).

A febbraio 2025 è stata osservata la radiogalassia Virgo A, una gigantesca galassia ellittica posta nell'ammasso della Vergine, a 54 milioni di anni luce da

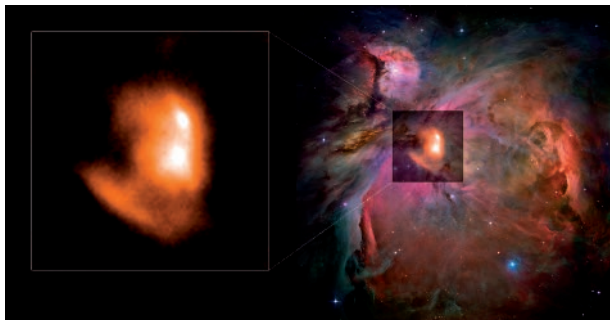


FIG. 4. La Grande Nebulosa di Orione ripresa da MISTRAL. (Crediti: MISTRAL commissioning team / INAF)

noi. Al suo interno si nasconde il buco nero M87 A*, un buco nero supermassiccio pesante quanto oltre 5 miliardi di Soli. Questo buco nero è stato fotografato direttamente nel 2019 dalla collaborazione Event Horizon Telescope, sfruttando una rete di radiotelescopi disposti su tutto il globo terrestre, sintetizzando un telescopio grande quanto la Terra stessa tramite la tecnica di interferometria. MISTRAL da solo non può osservare direttamente il buco nero, ma è in grado di mappare con grande dettaglio i getti che si espandono per migliaia di anni luce dal centro della galassia, che brillano di luce di sincrotrone dovuta agli elettroni che spiraleggiano a velocità prossime a quella della luce intorno alle linee di campo magnetico galattico (FIG. 5).

Nella sessione di aprile 2025, l'ultima prima che arrivasse l'estate, stagione più umida e inadatta alle osservazioni radio ad alta frequenza, è stato osservato il resto di supernova Cassiopea A, uno degli oggetti più luminosi del cielo in banda radio. Cassiopea A ha la forma di un anello che brilla di luce di sincrotrone, dovuta allo shock della supernova che, impattando contro il mezzo interstellare, lo riscalda a temperature di milioni di kelvin. All'interno, brividi di gas turbolento producono filamenti, che possono essere osservati grazie all'alta risoluzione di MISTRAL accoppiato al Sardinia Radio Telescope (FIG. 6)

Questa prima luce rappresenta solo l'inizio del viaggio alla scoperta del cielo millimetrico dal Sardinia Radio Telescope. La banda intorno ai 3 mm di lunghezza d'onda è infatti estremamente interessante per l'astrofisica e per la cosmologia. A 3 mm si possono osservare alcuni tra i processi più energetici dell'universo, come la radiazione di sincrotrone nei resti di supernova o nei dintorni dei buchi neri supermassicci. Si possono anche osservare nel dettaglio le regioni di formazione stellare, mappando sia la radiazione di *free-free* che l'emissione termica della polvere interstellare. Ma si può anche osservare

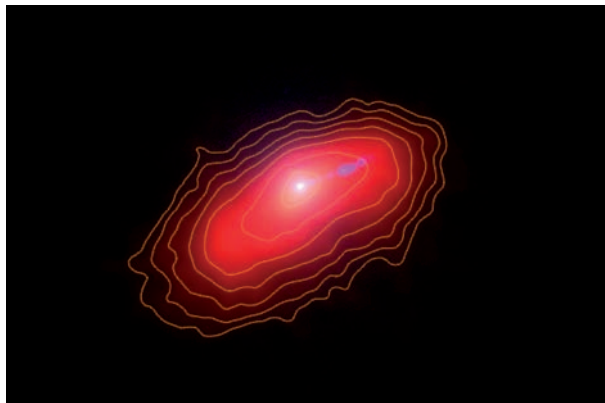


FIG. 5. La galassia Virgo A ripresa da MISTRAL. (Crediti: MISTRAL commissioning team / INAF)

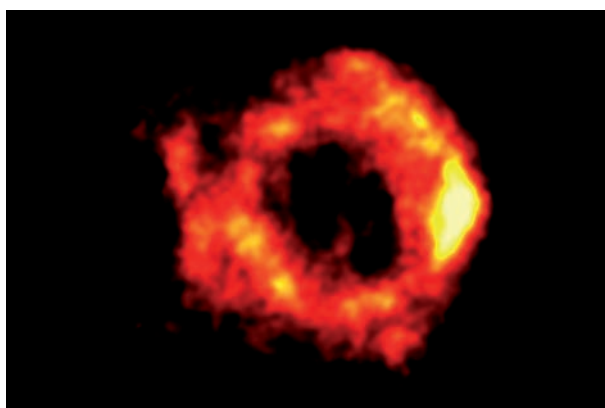


FIG. 6. Il resto di supernova Cassiopea A ripreso da MISTRAL. (Crediti: MISTRAL commissioning team / INAF)

molto più lontano: la radiazione cosmica di fondo ha la sua massima emissione intorno a 150 GHz, e MISTRAL può potenzialmente osservarne le sue anisotropie. Un tipo di anisotropia di grande interesse è l'effetto Sunyaev-Zeldovich termico, dovuto ai fotoni della CMB che impattano contro gli elettroni altamente energetici che compongono l'atmosfera degli ammassi di galassie, acquisendo energia. Ciò che si osserva è una sorta di "buco" freddo nella CMB, che viene utilizzata sostanzialmente come uno sfondo luminoso per mappare la distribuzione della materia barionica nell'universo. MISTRAL sarà in grado di osservare questo segnale, mappando quindi la struttura a grande scala dell'universo, detta ragnatela cosmica o *cosmic web*, producendo dati complementari a quelli acquisiti dalle altre *survey* cosmologiche. Una volta completato il *commissioning*, MISTRAL sarà aperto alle proposte osservative di tutta la comunità scientifica: queste prime immagini sono quindi solo un assaggio della scienza che questo strumento produrrà nel corso dei prossimi anni.

Giovanni Isopi è attualmente assegnista di ricerca presso il gruppo di cosmologia sperimentale dell'Università Sapienza di Roma. Durante il suo dottorato di ricerca ha lavorato al ricevitore MISTRAL e vari altri esperimenti di cosmologia, con un interesse particolare allo studio degli ammassi di galassie e dell'emissione radio della polvere interstellare. Astrofilo fin da piccolo, è anche appassionato di astrofotografia e divulgazione astronomica.

Venti cosmici: come i buchi neri influenzano il destino delle galassie

Cosimo Marconcini

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Firenze INAF · Osservatorio Astrofisico di Arcetri

Un legame tra scale molto diverse

Al centro di quasi tutte le galassie si trova un buco nero supermassiccio, con una massa che può raggiungere milioni o miliardi di volte quella del Sole. Per la maggior parte del tempo questi oggetti rimangono relativamente silenziosi. In alcune fasi, però, il gas presente nella galassia spiraleggia verso il centro e forma attorno al buco nero un disco di materiale incandescente. Prima di venire inghiottita, la materia libera enormi quantità di energia sotto forma di radiazione: il nucleo della galassia diventa allora un nucleo galattico attivo, o AGN, dall'inglese *Active Galactic Nucleus*.

Un AGN può essere così luminoso da competere con la luce prodotta da tutte le stelle della galassia che lo ospita. Quando si studia l'evoluzione delle galassie, tuttavia, la domanda più interessante non riguarda soltanto quanto sia luminoso il nucleo, ma dove vada a finire tutta questa energia e quali conseguenze possa avere sull'ambiente circostante.

Le stelle nascono dal gas freddo presente nelle galassie. Se l'attività del buco nero riesce a riscaldarlo, renderlo più turbolento o addirittura espellerlo, ciò può modificare profondamente la capacità della galassia di formare nuove stelle e di evolvere. Questo insieme di processi prende il nome di «*feedback* da AGN» ed è una delle idee centrali dell'astrofisica extragalattica moderna: un oggetto estremamente compatto come il buco nero supermassiccio al centro può contribuire a regolare l'evoluzione di una struttura estesa per decine di migliaia di anni luce (FABIAN 2012).

Non si tratta soltanto di un'ipotesi teorica. Le simulazioni cosmologiche necessitano di meccanismi capaci di limitare la crescita delle galassie più massicce, mentre le osservazioni mostrano una stretta relazione tra le proprietà dei buchi neri supermassicci e quelle delle galassie che li ospitano. Inoltre, l'energia potenzialmente liberata durante la caduta di materiale verso il centro è enorme rispetto a quella necessaria a perturbare il gas nella galassia: anche trasferirne una piccola frazione può avere importanti conseguenze.

Rimane però una domanda fondamentale: in che modo l'energia prodotta nelle immediate vicinanze del buco nero riesce a raggiungere le enormi scale della galassia? Una delle risposte più promettenti è rappresentata dai venti galattici: grandi flussi di gas spinti verso l'esterno dall'attività del nucleo. Questi venti vengono lanciati nelle regioni più interne, dove il campo gravitazionale e la radiazione dell'AGN sono estremi, e possono poi propagarsi attraverso il mezzo interstellare fino a migliaia di anni luce di distanza.

Non esiste, però, un unico tipo di vento. Il gas coinvolto può trovarsi in condizioni fisiche molto diverse. Una parte è estremamente ionizzata e raggiunge temperature elevate; altre componenti sono più fredde e possono essere osservate sotto forma di gas atomico o molecolare. Anche le velocità coprono un intervallo enorme. Nei pressi del buco nero sono stati osservati venti che raggiungono frazioni significative della velocità della luce, mentre su scale galattiche il materiale si muove tipicamente a centinaia o migliaia di chilometri al secondo (KING, POUNDS 2015).

Il punto cruciale è che questi venti costituiscono un possibile ponte tra due scale apparentemente inconciliabili. L'energia viene liberata in una regione piccolissima attorno al buco nero, ma il gas messo in movimento può trasportare questa energia fino ai bordi della galassia e, in alcuni casi, essere addirittura espulso nello spazio intergalattico. Durante questo viaggio il vento può urtare nubi di gas, comprimerle, riscaldarle, oppure spingerle verso l'esterno. In alcuni casi può quindi ostacolare la formazione di nuove stelle; in altri, almeno localmente, la compressione del gas potrebbe perfino favorirla.

Capire quale di questi processi prevalga richiede misure affidabili della geometria, della velocità, della massa e dell'energia dei venti. Ed è proprio qui che nasce una delle principali difficoltà osservative: il cielo ci mostra la galassia proiettata in due dimensioni, mentre il vento si muove in uno spazio tridimensionale.

Il problema della terza dimensione

Osservare un vento non significa automaticamente conoscerne le proprietà reali. Un telescopio misura la posizione del gas sul piano del cielo e, attraverso lo spostamento Doppler delle righe spettrali, la

* L'Autore presenta qui i contenuti essenziali delle ricerche svolte nel corso del Dottorato di Ricerca che gli sono valse il "Premio Pietro Tacchini" della SAIT per l'anno 2026-xxi edizione; premio assegnato alle migliori tesi di Dottorato di carattere astrofisico.

componente della sua velocità lungo la linea di vista. Manca però la terza dimensione.

Un esempio quotidiano aiuta a comprendere il problema. Se un'automobile si muove quasi perpendicolarmente alla nostra linea di vista, la componente della sua velocità diretta verso di noi è piccola anche se la velocità reale è elevata. Per i venti galattici accade qualcosa di analogo: due venti fisicamente identici, osservati con inclinazioni differenti, possono apparire come fenomeni molto diversi. Se non si conosce la geometria del sistema, si rischia quindi di sottostimare la velocità del gas e, di conseguenza, la quantità di energia trasportata.

È importante affrontare questa sfida perché l'energia cinetica del gas dipende dal quadrato della sua velocità. Un errore nella ricostruzione dell'inclinazione del vento può quindi produrre un errore ancora maggiore nella stima della sua energia. Allo stesso modo, una struttura che appare piccola sul cielo può in realtà essere molto più estesa se è orientata in parte lungo la linea di vista.

Esiste poi una seconda difficoltà. Il mezzo interstellare non è una distribuzione liscia e uniforme, ma è formato da nubi e filamenti con densità molto diverse. Le immagini ottenute con i telescopi moderni mostrano strutture irregolari, spesso molto lontane dai coni perfetti rappresentati negli schemi dei libri di testo. Questa complessità può avere origini differenti: il gas potrebbe possedere una cinematica realmente caotica, oppure un campo di velocità relativamente semplice potrebbe apparire complicato perché vengono osservate soltanto le nubi che, in una determinata posizione e a una determinata velocità, emettono abbastanza luce da essere rilevate.

A queste difficoltà si aggiungono gli effetti dello strumento. La risoluzione spaziale mescola la luce proveniente da regioni vicine e quella spettrale limita la capacità di separare nubi con velocità simili. Un modello fisico deve quindi riprodurre non soltanto la geometria e il moto del gas, ma anche il modo in cui questi verrebbero effettivamente osservati dal telescopio.

Da queste esigenze nasce MOKAD3D, acronimo di *Modelling the Outflows Kinematics in AGN in 3D*, un modello tridimensionale sviluppato per sfruttare le informazioni contenute nei cubi di dati prodotti dagli strumenti di ultima generazione e ricostruire la geometria e la cinematica intrinseca del gas (MARCONCINI *et al.* 2023).

MOKAD3D: ricostruire un vento galattico nube per nube

MOKAD3D sfrutta i dati ottenuti con gli spettrografi a campo integrale. A differenza di uno spettrografo tradizionale, che osserva soltanto una piccola regione o una fenditura della galassia, questi strumenti forniscono uno spettro in ogni elemento dell'immagine. Il risultato è un «cubo di dati»: due dimensioni

descrivono la posizione sul cielo, mentre la terza contiene l'informazione spettrale. Per ogni regione è quindi possibile stabilire quali righe vengono emesse dal gas, quanto sono intense e, grazie all'effetto Doppler, con quale velocità il materiale si muove lungo la linea di vista.

È come disporre contemporaneamente di migliaia di piccoli spettri corrispondenti a ogni regione del campo di vista. Da un singolo cubo si possono costruire mappe dell'intensità delle righe, della velocità media del gas e della sua turbolenza. Queste mappe mostrano con grande dettaglio la struttura dei venti, ma da sole non risolvono il problema della proiezione.

MOKAD3D rappresenta il gas attraverso un grande insieme di nubi fittizie distribuite nello spazio tridimensionale. Viene scelta una geometria plausibile – per esempio un cono che si apre a partire dal nucleo della galassia – e alle nubi viene assegnato un campo di velocità. Il modello viene quindi proiettato nella direzione dell'osservatore, come se fosse visto dallo stesso punto di vista della galassia reale, e trasformato in un cubo artificiale direttamente confrontabile con i dati.

Un elemento centrale del metodo è il confronto posizione per posizione e velocità per velocità. La distribuzione dell'emissione non viene imposta come uniforme o descritta da una semplice funzione matematica: sono i dati stessi a determinare quali regioni del modello debbano contribuire maggiormente all'emissione osservata. Questo permette di tenere conto della natura irregolare e filamentosa del mezzo interstellare senza attribuire automaticamente ogni struttura luminosa a una variazione della cinematica.

Il modello incorpora inoltre gli effetti della risoluzione spaziale e spettrale dello strumento. In questo modo il confronto avviene tra il dato reale e ciò che il telescopio osserverebbe se la galassia avesse la geometria e la cinematica ipotizzate dal modello. È un passaggio fondamentale: un modello ideale, osservato con risoluzione infinita, non può essere confrontato correttamente con dati reali che hanno necessariamente una risoluzione limitata.

I test su dati simulati, nei quali le proprietà tridimensionali del vento sono note in partenza, hanno mostrato che questo approccio è in grado di recuperare con buona accuratezza geometria e velocità. Nelle applicazioni alle galassie reali emerge inoltre un risultato importante: immagini e mappe di velocità apparentemente molto complesse possono essere riprodotte con un semplice e ordinato moto radiale. Una parte della complessità osservata può quindi derivare dalla distribuzione irregolare delle nubi illuminate dall'AGN, piuttosto che da un campo di velocità intrinsecamente caotico.

Separare questi effetti è essenziale perché la velocità intrinseca del gas entra direttamente nella stima dell'energia e quindi nell'impatto dei venti sulla galassia che li ospita. La ricostruzione tridimensionale non rappresenta quindi soltanto un modo più reali-

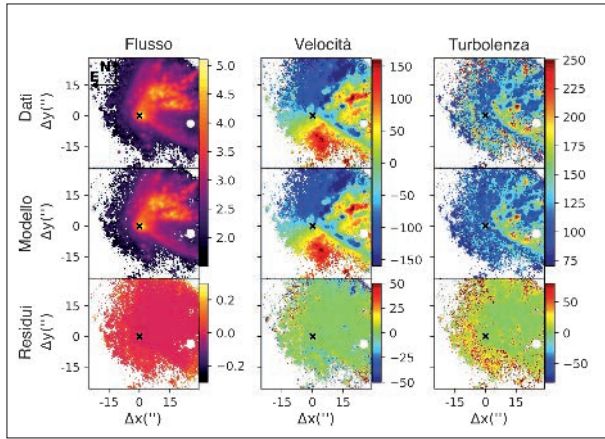


FIG. 1. Esempio delle capacità di MOKAD3D applicato alla galassia Circinus. Dall'alto verso il basso sono mostrati i dati osservati, il modello tridimensionale e la differenza tra i due. Le tre colonne rappresentano rispettivamente la distribuzione del gas ionizzato, la sua velocità lungo la linea di vista e la dispersione delle velocità, legata alla complessità dei moti del gas. La somiglianza tra le prime due righe mostra come un modello tridimensionale relativamente semplice possa riprodurre strutture osservate molto irregolari. La croce indica la posizione del nucleo galattico attivo.

stico di visualizzare un vento, ma uno strumento per trasformare le osservazioni in quantità fisiche confrontabili con le previsioni teoriche.

La FIG. 1 mostra le capacità di MOKAD3D nel riprodurre le mappe di flusso, velocità e turbolenza del gas nella vicina galassia Circinus. I dati della galassia (prima riga) sono correttamente riprodotti dal modello (seconda riga) come confermato dai pannelli dei residui, ottenuti sottraendo il modello ai dati (terza riga).

Un'accelerazione a migliaia di anni luce dal buco nero

Una volta ricostruita la geometria tridimensionale, diventa possibile affrontare una domanda ancora più interessante: come cambia la velocità del vento mentre questo attraversa la galassia? Per molti anni le osservazioni sono state spesso riassunte assegnando a ogni vento una singola velocità media. Ma un vento che si estende per migliaia di anni luce all'interno della galassia interagisce con molto materiale e non ha necessariamente la stessa velocità ad ogni distanza.

MOKAD3D è stato applicato sistematicamente a dieci galassie attive relativamente vicine, osservate con MUSE, lo spettrografo a campo integrale installato al Very Large Telescope dell'ESO in Cile. La vicinanza di queste sorgenti permette di raggiungere un'elevata risoluzione spaziale e di seguire il moto del gas su scale molto più piccole di quanto sia possibile nelle galassie lontane.

Invece di descrivere ciascun vento con una singola velocità media, i coni di gas sono stati suddivisi in regioni concentriche e la velocità intrinseca è stata ricostruita in funzione della distanza dal nucleo. È emerso un comportamento sorprendentemente

comune. Nella parte interna, fino a una distanza dell'ordine di un kiloparsec – circa 3.200 anni luce – la velocità rimane quasi costante o diminuisce leggermente. Più lontano il vento accelera rapidamente e, in poche migliaia di anni luce, può raggiungere velocità più del doppio rispetto a quelle delle regioni interne (MARCONCINI *et al.* 2025).

L'aspetto più interessante è che questa accelerazione, mostrata in FIG. 2, avviene molto lontano dal luogo in cui il vento viene originariamente lanciato. Il gas non riceve quindi tutta la propria spinta soltanto nelle immediate vicinanze del buco nero: l'interazione con il mezzo interstellare continua a modificarne il moto su scale galattiche.

Queste osservazioni, presentate per la prima volta in MARCONCINI *et al.* 2025, richiamano da vicino uno dei modelli teorici più accreditati per la propagazione dei venti prodotti dagli AGN. Un vento estremamente veloce, originato nelle regioni più interne attorno al buco nero, urta il gas della galassia e genera una regione di materiale molto caldo. Nelle zone più vicine al nucleo questo gas può raffreddarsi in maniera efficiente, perdendo gran parte dell'energia termica sotto forma di radiazione. Il materiale continua a muoversi, ma la spinta è legata soprattutto alla quantità di moto trasferita dal veloce vento iniziale. A distanze maggiori il raffreddamento diventa meno efficace. L'energia del vento rimane allora intrappolata nel gas caldo, che forma una bolla in rapida espansione. La pressione di questa bolla agisce come un pistone e fornisce una spinta aggiuntiva al materiale circostante. Il vento entra così in un regime nel quale l'energia viene conservata in modo molto più efficiente (KING, POUNDS 2015).

La transizione tra i due regimi produce un andamento molto simile a quello ricostruito nelle osservazioni: una fase interna a velocità quasi costante, seguita da una rapida accelerazione su scale dell'ordine del kiloparsec (vedi FIG. 2). Il confronto tra dati e teoria fornisce quindi un importante indizio sul meccanismo attraverso cui l'energia dell'AGN viene trasferita al mezzo interstellare.

Il risultato ha anche una conseguenza osservativa meno intuitiva ma cruciale. La parte più esterna del vento, sebbene sia la più veloce e quella che trasporta più energia, è spesso quella che emette meno e quindi la più difficile da osservare. All'aumentare della distanza dal nucleo diminuisce infatti il numero di fotoni ionizzanti che raggiunge il gas, e la luminosità delle righe si riduce. Osservazioni meno profonde, o osservazioni di galassie molto lontane, possono quindi rilevare soprattutto la componente interna, più luminosa ma più lenta, perdendo proprio la fase che può avere un impatto maggiore sulla galassia.

Questo effetto può cambiare l'interpretazione del rapporto tra il buco nero e la galassia. Se viene misurata soltanto la parte più brillante del vento, esso può apparire troppo lento per sfuggire alla gravità della galassia. Includendo la fase accelerata,

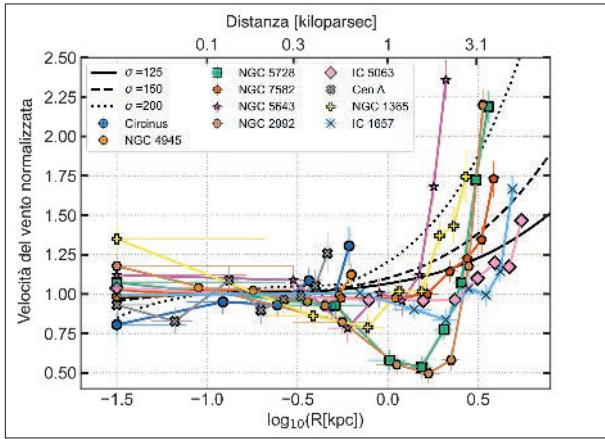


FIG. 2. Come cambia la velocità dei venti galattici allontanandosi dal buco nero centrale. Ogni colore rappresenta una diversa galassia attiva e la velocità è espressa rispetto al valore medio misurato entro circa 3.200 anni luce (1 kiloparsec) dal nucleo. Nelle regioni interne la velocità rimane quasi costante o diminuisce leggermente; a distanze maggiori, invece, molti dei venti mostrano una rapida accelerazione, arrivando in alcuni casi a più che raddoppiare la propria velocità. Le linee nere mostrano le previsioni di modelli teorici della propagazione dei venti prodotti dai nuclei galattici attivi.

invece, in diversi sistemi il gas raggiunge velocità tali da poter superare la velocità di fuga e arrivare nelle regioni più esterne. Il *feedback* può quindi andare oltre il semplice rimescolamento del gas vicino al nucleo e contribuire a ridurre il serbatoio di materia disponibile per la formazione stellare. La FIG. 3 mostra proprio il rapporto tra la velocità del vento e la velocità minima per sfuggire all'attrazione gravitazionale della galassia. Un rapporto maggiore di 1, come mostrato in FIG. 3, suggerisce che il gas intrappolato nel vento verrà espulso dalla galassia e non potrà partecipare alla formazione di nuove stelle.

Questa conclusione suggerisce anche una cautela importante quando si studia l'universo lontano. Le galassie osservate a grandi distanze sono viste quando l'universo era molto più giovane, ma sono anche molto più deboli e difficili da osservare. Se la componente più energetica dei venti è sistematicamente la più debole, la parte più importante potrebbe sfuggire alle osservazioni. Comprendere con precisione i sistemi vicini diventa allora essenziale anche per interpretare le galassie delle epoche cosmiche più remote.

Guardare attraverso la polvere: il ruolo di JWST

Le osservazioni nel visibile hanno permesso di costruire gran parte del quadro appena descritto, ma raccontano inevitabilmente soltanto una parte della storia. Le regioni centrali delle galassie attive contengono spesso grandi quantità di polvere. I minuscoli grani assorbono e diffondono la luce visibile e possono nascondere proprio le zone nelle quali l'AGN interagisce più intensamente con il gas.

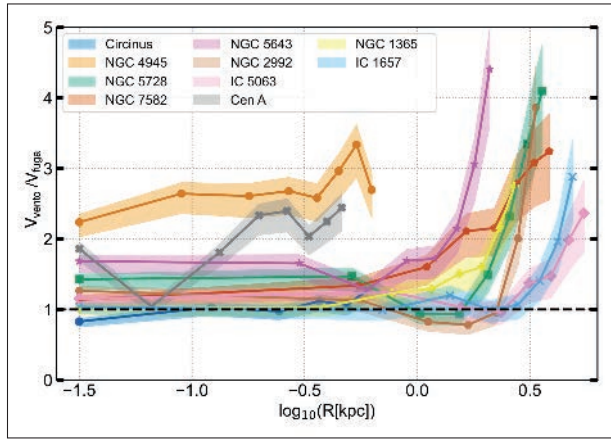


FIG. 3. Il destino del gas trasportato dai venti. Il grafico mostra, per le diverse galassie del campione, il rapporto tra la velocità del vento e la velocità necessaria per sfuggire all'attrazione gravitazionale della galassia. La linea tratteggiata corrisponde a un rapporto pari a 1: al di sopra di questa soglia il gas possiede una velocità sufficiente per raggiungere le regioni più esterne della galassia e, potenzialmente, abbandonarla. L'accelerazione osservata a grandi distanze dal nucleo porta molti dei venti al di sopra di questa soglia, mostrando come l'attività del buco nero possa contribuire a rimuovere dalla galassia parte del gas disponibile per formare nuove stelle.

È qui che il telescopio spaziale James Webb Space Telescope (JWST) offre un grande vantaggio rispetto agli strumenti ottici. Infatti, JWST osserva nel regime spettrale dell'infrarosso, dove l'effetto della polvere è molto più debole, permettendo così di osservare simultaneamente numerose righe prodotte da gas in condizioni fisiche molto differenti e scoprire meccanismi invisibili al regime ottico. Alcune di queste righe provengono da ioni che richiedono fotoni estremamente energetici e sono quindi indicatori diretti dell'influenza del nucleo attivo; altre appartengono all'idrogeno molecolare caldo e permettono di studiare una componente del gas che nel visibile rimane quasi completamente nascosta.

L'importanza di questa nuova finestra spettrale è evidente, per esempio, in NGC 1068, una delle galassie attive più note e studiate del cielo. Si trova a circa 45 milioni di anni luce ed è abbastanza vicina da consentire di distinguere strutture di poche centinaia di anni luce attorno al nucleo. Per decenni è stata considerata una delle migliori galassie per studiare l'interazione tra un buco nero attivo e il gas della galassia. Con JWST, tuttavia, è diventato possibile osservare questa regione con un dettaglio spettroscopico prima irraggiungibile.

In un'unica osservazione con JWST è stato possibile tracciare le proprietà di vari tipi di gas che rispondono in maniera molto diversa all'energia emessa dal nucleo. È proprio questa ricchezza di informazioni a rendere il medio infrarosso particolarmente potente: invece di osservare una sola componente del vento, si possono confrontare numerosi traccianti dello stesso fenomeno.

Le mappe ottenute con JWST (MARCONCINI *et al.* 2026) mostrano che il gas fortemente ionizzato forma un bicono che parte dal nucleo e si estende per centinaia di anni luce. Le righe del medio infrarosso

osservate con JWST e quelle ottiche con MUSE mostrano strutture cinematiche molto simili, indicando che stanno seguendo componenti differenti dello stesso vento. La ricostruzione con MOKAD3D fornisce velocità dell'ordine di migliaia di chilometri al secondo e permette di ricostruire nello spazio la forma del bicono, ottenendo la posizione 3D di ciascuna nube di gas spinta dal vento.

Il confronto tra le diverse lunghezze d'onda rivela però qualcosa di ancora più interessante. Il gas molecolare è distribuito in modo molto diverso dal gas ionizzato e presenta una cavità nella regione immediatamente attorno al nucleo. La spiegazione più plausibile è che il vento ionizzato e l'intensa radiazione dell'AGN stiano distruggendo il materiale molecolare proprio nelle zone lungo il percorso del vento. In altre parole, l'effetto del nucleo non si limita a mettere in movimento il gas già ionizzato, ma può modificare la composizione stessa del mezzo interstellare.

Le osservazioni nel medio infrarosso permettono inoltre di distinguere le regioni in cui il gas è ionizzato direttamente dalla radiazione dell'AGN da quelle in cui prevalgono gli *shock*. In NGC 1068 emerge una fascia in cui gli *shock* sembrano dominare l'eccitazione del gas, coerente con una regione nella quale il vento interagisce con il disco della galassia. In queste zone il gas viene compresso e riscaldato, lasciando una firma diversa da quella prodotta dalla sola radiazione del nucleo.

Anche la densità del gas racconta la stessa storia. Alcune righe osservate da JWST sono sensibili alla densità degli elettroni liberi e permettono di costruire mappe dettagliate. Le regioni più dense non coincidono semplicemente con la posizione del buco nero, ma compaiono in condensazioni poste lungo il percorso del vento, proprio dove l'interazione con il disco può comprimere il materiale. Emergono così due facce del *feedback*: non solo il gas spinto dal vento viene in parte spazzato via, riducendo il serbatoio di materiale per formare nuove stelle, ma si osservano anche regioni in cui l'impatto del vento sul disco galattico causa la formazione di strutture compatte che potranno ospitare nuove stelle.

NGC 1068 mostra quindi in maniera particolarmente efficace perché JWST rappresenti un salto di qualità. Il vantaggio non consiste soltanto nel «vedere attraverso la polvere», ma nel poter osservare simultaneamente molte specie atomiche e molecolari, ricostruire densità, ionizzazione e cinematica del gas. Il vento smette così di apparire come una singola struttura e diventa un fenomeno fisico che lascia tracce diverse in tutte le componenti della galassia.

Un fenomeno da osservare a tutte le lunghezze d'onda

Il caso di NGC 1068 mette in evidenza una lezione importante: nessun singolo telescopio e nessuna singola riga spettrale possono descrivere da soli un

vento galattico. Ogni intervallo dello spettro elettromagnetico rivela una componente differente del fenomeno.

Le osservazioni nei raggi X permettono di sondare i venti più vicini al buco nero, spesso caratterizzati da velocità enormi, prossime a quella della luce. Il visibile è particolarmente efficace per seguire il gas ionizzato su scale di decine di migliaia di anni luce. Il medio infrarosso penetra nelle regioni oscurate e permette di osservare sia gas altamente ionizzato sia gas molecolare caldo. Le onde millimetriche, infine, rivelano il gas molecolare più freddo, cioè il principale serbatoio da cui si formano nuove stelle.

Mettere insieme queste osservazioni significa provare a seguire lo stesso trasferimento di energia dall'origine fino alle conseguenze finali. Se un vento nasce vicino al buco nero e attraversa il disco, dovrebbe lasciare una sequenza di firme: il gas può accelerare, essere compresso, diventare più turbolento, cambiare stato di ionizzazione o perdere la propria componente molecolare. È proprio confrontando queste diverse tracce che si può capire quanta energia venga effettivamente trasferita alla galassia.

Questo approccio permette anche di evitare una semplificazione molto diffusa. Il feedback non deve necessariamente corrispondere a un'espulsione di tutto il gas. Una galassia può essere influenzata dal proprio nucleo, anche se gran parte del materiale rimane gravitazionalmente legato. Aumentare la turbolenza del gas, riscaldarlo o distruggere le nubi molecolari più dense può già cambiare profondamente la possibilità di formare nuove stelle.

Allo stesso tempo, il vento non agisce in un ambiente immobile. Il mezzo interstellare ha una propria struttura, ruota con la galassia, contiene nubi con densità differenti. Il risultato osservato è quindi il prodotto dell'interazione tra il vento e un ambiente complesso. La propagazione può essere più facile in alcune direzioni e rallentata in altre; lo stesso vento può produrre effetti diversi a poche centinaia di anni luce di distanza.

È questa complessità a rendere le galassie vicine così preziose. In esse è possibile separare spazialmente regioni che, a distanze cosmologiche, finirebbero nello stesso pixel. Le leggi fisiche ricostruite nell'universo locale diventano quindi una chiave per interpretare ciò che osserviamo nell'universo primordiale, quando galassie e buchi neri stavano crescendo molto più rapidamente. I sistemi lontani raccontano le prime fasi di questa coevoluzione; quelli vicini permettono di comprenderne i meccanismi con un livello di dettaglio impossibile alle grandi distanze.

Un quadro che si completa

Il *feedback* da AGN nasce da una straordinaria sproporzione di scale: l'energia viene prodotta in una regione piccolissima attorno a un buco nero, mentre

le sue conseguenze possono estendersi per decine di migliaia di anni luce. Dimostrare che questa connessione avvenga realmente richiede quindi molto più della semplice rivelazione di un vento. Occorre ricostruirne la struttura tridimensionale, misurarne la velocità intrinseca e capire come il gas reagisce mentre il vento attraversa la galassia.

La modellizzazione tridimensionale mostra quanto gli effetti di proiezione e la distribuzione irregolare delle nubi possano modificare l'aspetto osservato di un vento. Una volta corretti questi effetti, il profilo di velocità ricostruito in diverse galassie rivela un'accelerazione su scale dell'ordine del kiloparsec, in accordo con modelli nei quali il vento può passare da una propagazione dominata dalla quantità di moto a una più efficiente nel conservare l'energia.

Un secondo elemento fondamentale è che la componente più energetica può essere anche la più difficile da osservare. Ciò che appare più luminoso non coincide necessariamente con ciò che trasporta più energia. Questo aspetto diventa particolarmente importante nello studio delle galassie lontane, dove sensibilità e risoluzione limitano la possibilità di rivelare le regioni più deboli dei venti.

JWST aggiunge ora una nuova dimensione al problema. Osservando nel medio infrarosso è possibile penetrare la polvere e seguire contemporaneamente gas con stati di ionizzazione e temperature molto diverse. Il caso di NGC 1068 mostra che il vento può essere studiato non soltanto attraverso il suo moto, ma anche attraverso le variazioni di densità, gli *shock* e la trasformazione delle componenti molecolari che incontra lungo il percorso.

Le prossime osservazioni dovranno collegare con sempre maggiore precisione le scale più pic-

cole, dove i venti vengono lanciati, con quelle galattiche, dove il *feedback* diventa direttamente misurabile. Sarà essenziale combinare raggi X, ottico, infrarosso e onde millimetriche per seguire tutte le fasi del gas e determinare quanta parte dell'energia liberata dal buco nero riesca effettivamente a raggiungere il mezzo interstellare.

È proprio questa connessione tra scale apparentemente inconciliabili a rendere il problema così affascinante. Un buco nero non si limita ad accrescere materia: durante le sue fasi attive restituisce energia all'ambiente circostante. Ricostruire il viaggio di questa energia, dalle regioni immediatamente vicine al buco nero fino alle periferie della galassia, significa comprendere uno dei processi che hanno contribuito a costruire la popolazione di galassie osservata nell'universo attuale.

Referenze bibliografiche

- FABIAN, A. C., *Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback*, «Annual Review of Astronomy and Astrophysics», 50, 2012, 455-489.
- KING, A., POUNDS, K., *Powerful Outflows and Feedback from Active Galactic Nuclei*, «Annual Review of Astronomy and Astrophysics», 53, 2015, 115-154.
- MARCONCINI, C. et al., *MOKAD3D: An innovative approach to 3D gas kinematic modelling. I. Application to AGN ionised outflows*, «Astronomy & Astrophysics», 677, A58, 2023.
- MARCONCINI, C. et al., *Evidence of the fast acceleration of AGN-driven winds at kiloparsec scales*, «Nature Astronomy», 9, 2025, 907-915.
- MARCONCINI, C. et al., *MIRACLE III. JWST/MIRI expose the hidden role of the AGN outflow in NGC 1068*, «Astronomy & Astrophysics», 712, A94, 2026.

Cosimo Marconcini ha conseguito il dottorato di ricerca in Astrofisica presso l'Università degli Studi di Firenze. La sua ricerca si concentra sullo studio dei nuclei galattici attivi e dei venti prodotti dai buchi neri supermassicci, attraverso osservazioni spettroscopiche e modelli tridimensionali. In particolare, studia l'impatto di questi fenomeni sull'evoluzione delle galassie e il legame tra l'accrescimento dei buchi neri e l'ambiente che li circonda.

Misurare l'universo primordiale con il satellite *LiteBIRD*: la sfida delle sistematiche strumentali*

Silvia Micheli

Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie (LPSC), Grenoble, France.

QUANDO osserviamo il cielo non vediamo soltanto oggetti lontani nello spazio, ma anche lontani nel tempo. La luce ha infatti una velocità finita e, per quanto grande essa sia, impiega del tempo per raggiungerci. Guardare una galassia a milioni o miliardi di anni luce significa quindi osservarla com'era nel passato. La radiazione più antica, e quindi più lontana, che riusciamo ad osservare è la radiazione cosmica di fondo, o CMB, dall'inglese *Cosmic Microwave Background*.

La CMB permea tutto l'universo e si osserva come una debole radiazione diffusa, proveniente da tutte le direzioni del cielo, con un picco di intensità nella regione delle microonde dello spettro elettromagnetico. Essa costituisce una delle più importanti osservabili a disposizione della cosmologia moderna. La sua scoperta, avvenuta nel 1965 da parte di Arno Penzias e Robert Wilson e che valse loro il Premio Nobel nel 1978, ha fornito una delle prime conferme dell'idea di un universo inizialmente molto caldo e denso. Oggi sappiamo che la CMB proviene da un'epoca in cui l'universo aveva circa 380.000 anni. Prima di allora, la materia formava un plasma caldo e opaco, nel quale i fotoni interagivano continuamente con gli elettroni. Quando l'universo si raffreddò abbastanza da permettere la formazione dei primi atomi neutri, la radiazione poté finalmente propagarsi liberamente, iniziando il lungo viaggio che la porta fino a noi.

Oggi sappiamo anche che la CMB non è perfettamente uniforme, ma presenta delle variazioni di temperatura dell'ordine di una parte su centomila dette anisotropie. Queste anisotropie derivano dalle condizioni presenti nell'universo primordiale che, attraverso l'azione della gravità, hanno portato nel tempo alla formazione delle strutture che osserviamo oggi nell'universo, come galassie e ammassi di galassie. La missione statunitense COBE fornì nel 1992 la prima evidenza delle anisotropie di temperatura della CMB su larga scala. Con il satellite WMAP, all'inizio degli anni Duemila, la qualità delle mappe

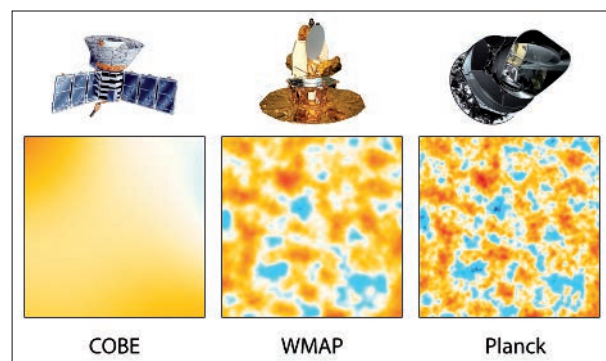


FIG. 1. I tre pannelli mostrano l'evoluzione delle mappe della CMB attraverso tre generazioni di esperimenti. La stessa regione di cielo è rappresentata con la risoluzione raggiunta da COBE/DMR (1989-1993), WMAP (2001-2010) e Planck (2009-2013) (NASA/JPL-Caltech/ESA).

è migliorata ulteriormente, permettendo di determinare con grande precisione numerosi parametri cosmologici, ovvero le quantità che ci permettono di descrivere la composizione, l'età e l'evoluzione dell'universo. Infine, la missione Planck dell'Agenzia Spaziale Europea ha portato questa misura a un livello di accuratezza senza precedenti, come rappresentato in FIG. 1.

Questi esperimenti hanno contribuito a consolidare quello che oggi chiamiamo modello cosmologico standard. Secondo questo modello, l'universo sarebbe composto principalmente da materia oscura ed energia oscura, oltre alla materia ordinaria che costituisce stelle, pianeti e tutto ciò che possiamo osservare direttamente. Questo modello descrive con successo una grande quantità di osservazioni cosmologiche. Tuttavia, restano aperti alcuni interrogativi sulle primissime fasi della storia cosmica: che cosa è accaduto nei primi istanti dopo il Big Bang? Come sono state generate le perturbazioni primordiali che in seguito hanno dato origine a tutta la struttura dell'universo?

Una delle ipotesi più accreditate per rispondere a queste domande è quella dell'inflazione cosmica, una fase di espansione esponenziale estremamente rapida avvenuta nei primi istanti di vita dell'universo. L'inflazione permette di spiegare alcune delle proprietà fondamentali dell'universo osservato, come la sua omogeneità su grande scala, e prevede anche la produzione di onde gravitazionali primordia-

* In questo articolo sono presentati i contenuti essenziali delle ricerche svolte dall'Autrice nel corso del Dottorato di Ricerca, che le sono valse la menzione speciale al "Premio Guido Horn d'Arturo" della SAIT e di EIE GROUP per l'anno 2026-VIII edizione; premio assegnato alla miglior tesi di Dottorato in area scientifico-tecnologica applicata all'astronomia, astrofisica o scienza dello spazio.

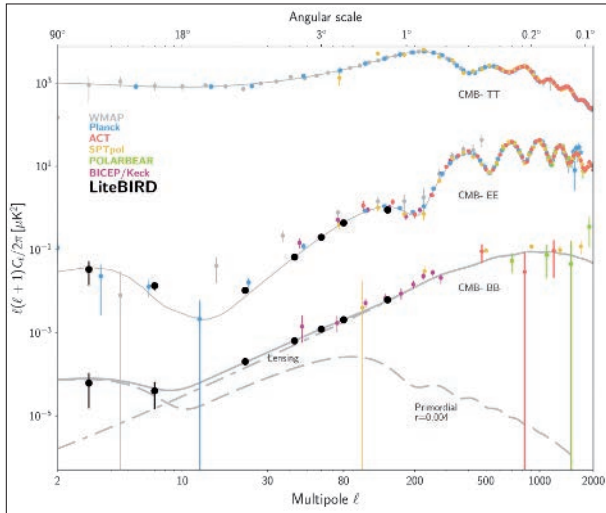


FIG. 2. Spettri di potenza della CMB per le anisotropie di temperatura (TT), la polarizzazione di tipo E (EE) e di tipo B (BB). Le linee mostrano le previsioni del modello cosmologico standard, mentre i punti colorati rappresentano le misure disponibili e i punti neri la sensibilità prevista per LiteBIRD (LiteBIRD Collaboration 2020).

li. Queste onde gravitazionali avrebbero lasciato una traccia nella polarizzazione della CMB.

La polarizzazione della CMB

La CMB presenta un grado di polarizzazione lineare, una proprietà della radiazione legata all'orientamento delle oscillazioni del suo campo elettrico. La polarizzazione della CMB può essere descritta attraverso due componenti, chiamate *modi E* e *modi B*. Senza entrare nei dettagli del formalismo matematico, ci basti sapere che queste due componenti hanno proprietà e origine fisica diverse e sono pertanto utili per studiare fenomeni differenti. Gli oggetti che studiamo, infine, sono i loro spettri di potenza angolare, che quantificano come l'ampiezza delle anisotropie è distribuita alle diverse scale angolari, cioè alle diverse dimensioni caratteristiche delle strutture presenti sulla volta celeste (FIG. 2).

I *modi E* sono stati osservati da diversi esperimenti e costituiscono ormai una componente ben consolidata della cosmologia della CMB. Anche i *modi B* sono stati osservati, ma il segnale misurato finora è principalmente prodotto dal *lensing* gravitazionale.¹ I *modi B* primordiali, invece, rappresentano una delle misure più ambiziose della cosmologia contemporanea. La loro osservazione sarebbe una forte evidenza della presenza di onde gravitazionali generate durante l'inflazione e quindi offrirebbe una finestra osservativa unica sulle primissime fasi dell'universo.

L'ampiezza attesa di questo segnale è descritta attraverso un parametro chiamato *tensor-to-scalar*

¹ Il *lensing* gravitazionale provoca la distorsione dello spettro delle fluttuazioni della polarizzazione della CMB nel cammino verso di noi a causa della presenza di materia interposta. L'effetto è quello di "confondere" le proprietà delle polarizzazioni, convertendo parte dei *modi E* in *modi B*.

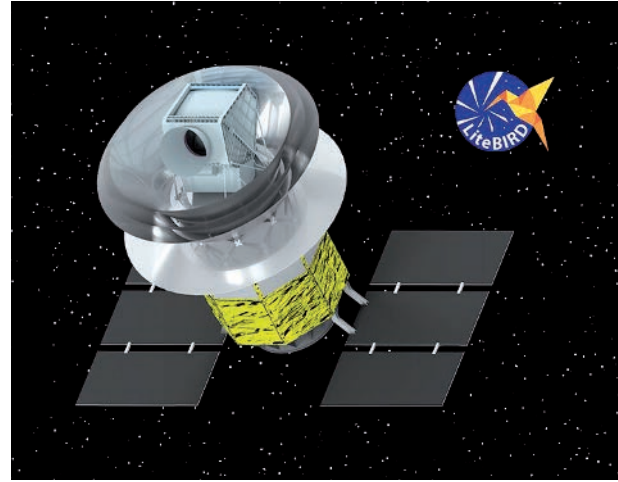


FIG. 3. Rappresentazione artistica del satellite LiteBIRD (JAXA).

ratio, r , che misura quanto è importante il contributo delle onde gravitazionali primordiali rispetto alle altre perturbazioni che hanno prodotto le anisotropie della CMB. I futuri esperimenti di polarizzazione della CMB mirano a raggiungere una sensibilità dell'ordine di $r = 10^{-3}$ o migliore. La difficoltà in questo tipo di misure non è più soltanto di raccogliere più fotoni o costruire un rivelatore più sensibile, ma di essere certi che ciò che interpretiamo come segnale cosmologico non sia invece prodotto, almeno in parte, da emissioni galattiche ed extragalattiche o dallo strumento stesso.

La missione LiteBIRD

In questo contesto si inserisce LiteBIRD, una futura missione spaziale della Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). L'obiettivo principale della missione è proprio misurare la polarizzazione della CMB su tutto il cielo e alle grandi scale angolari, dove ci aspettiamo di trovare il debolissimo segnale dei *modi B* generato durante l'inflazione. Per raggiungere questo obiettivo, LiteBIRD osserverà il cielo in un ampio intervallo di frequenze, circa da 34 a 448 GHz. L'utilizzo di molte bande di frequenza è infatti fondamentale per distinguere la CMB dalle emissioni (polarizzate e non) della nostra Galassia, che hanno caratteristiche diverse al variare della frequenza.

Per effettuare una misura così delicata è necessario impiegare tecnologie estremamente sensibili. Tra queste ci sono i *Transition-Edge Sensors*, o TES, rivelatori superconduttori progettati per misurare variazioni piccolissime del segnale ricevuto. Il principio di funzionamento dei TES sfrutta le proprietà dei materiali superconduttori. Quando la temperatura del materiale si trova vicino alla transizione tra lo stato superconduttore e quello normale, anche una piccola variazione di temperatura può produrre una variazione significativa della resistenza elettrica. Questo rende il dispositivo estremamente sensibile alle variazioni del segnale ricevuto.

LiteBIRD utilizzerà inoltre una *Half-Wave Plate*, o *HWP*, una lamina che ruota davanti ai rivelatori, realizzata con materiali in grado di modificare lo stato di polarizzazione della radiazione incidente. In altre parole, la rotazione della *HWP* trasforma l'informazione sulla polarizzazione in una variazione periodica del segnale misurato dal rivelatore. Questa modulazione aiuta a separare il segnale polarizzato da molte altre forme di contaminazione.

Limiti della cosmologia di precisione: le sistematiche strumentali

Ogni strumento scientifico, però, è inevitabilmente imperfetto. Un telescopio può avere una risposta leggermente diversa a seconda della frequenza della radiazione, un rivelatore può non rispondere in maniera perfettamente proporzionale al segnale ricevuto, un elemento ottico può trasmettere o assorbire una piccola quantità di radiazione in più rispetto a quanto previsto.

Quando si studiano segnali molto deboli, queste imperfezioni, che chiamiamo sistematiche strumentali o effetti sistematici, possono diventare rilevanti. È utile innanzitutto distinguere le sistematiche dal rumore. Quest'ultimo è una componente casuale della misura. Se osserviamo lo stesso fenomeno molte volte, possiamo in linea di principio ridurre l'effetto combinando le osservazioni. Una sistematica è invece una distorsione prodotta dallo strumento o dalla procedura di osservazione che può ripetersi in modo coerente. Aumentare semplicemente il numero di osservazioni non è quindi sufficiente a eliminarla. Inoltre, se questa contaminazione ha proprio le caratteristiche del segnale cosmologico di interesse, il rischio è quello di interpretare un effetto strumentale come una proprietà dell'universo.

Per questo motivo, prima ancora che un satellite venga lanciato, è necessario studiare in dettaglio come le imperfezioni dello strumento possano propagarsi fino all'analisi cosmologica. Questo significa sostanzialmente sviluppare dei codici con cui costruire uno strumento virtuale e studiarne il comportamento. Si possono quindi introdurre artificialmente diverse imperfezioni e seguire il loro effetto lungo tutta la catena di analisi, dalla misura iniziale fino alla stima dei parametri cosmologici, per verificare i limiti del satellite ancor prima che venga lanciato.

Interazione di più effetti sistematici

Possiamo pensare ora a cosa succede nel concreto ad un esperimento come *LiteBIRD*. Numerosi studi, anche in eredità delle passate missioni per *CMB*, spaziali e non, sono condotti per individuare e correggere gli effetti sistematici più critici. Tra questi, per esempio, imperfezioni nel puntamento del tele-

scopio, nella sua risposta angolare o nella rotazione delle *HWP*. Sulla base di questi studi, ci siamo domandati cosa succede se più effetti si combinano tra loro. In particolare, quando due componenti non ideali del sistema, la *HWP* e i *TES*, interagiscono tra loro.

Come abbiamo già capito, una *HWP* reale non è perfetta. Durante la rotazione può, per esempio, emettere una piccola quantità di radiazione termica. Inoltre, i due assi ottici della lamina possono avere proprietà leggermente differenti. Di conseguenza, la quantità di radiazione che raggiunge i rivelatori non rimane necessariamente costante durante la rotazione. Questo effetto può produrre una variazione periodica del segnale che arriva ai *TES* (il carico ottico). Per le condizioni considerate negli studi di *LiteBIRD*, lo sbilanciamento tra i due assi ottici della *HWP* può essere significativo. Inoltre, questa variazione è periodica e legata alla rotazione della *HWP*; essa compare quindi a una frequenza ben definita, il doppio della frequenza di rotazione della lamina. Nel seguito ci riferiremo a questo segnale come *HWP synchronous signal*, o *HWPSS*. La sua struttura periodica rende il segnale, almeno in linea di principio, riconoscibile e modellabile. Tuttavia, la situazione diventa più complessa quando l'*HWPSS* si combina con le non idealità dei detector.

I *TES*, infatti, sono progettati per lavorare in una regione molto delicata della loro curva di risposta. Se la variazione del carico ottico è troppo grande, il rivelatore può essere spinto verso una regione in cui la sua risposta non è più perfettamente lineare e, nel peggiore dei casi, verso la saturazione. In condizioni ideali, potremmo immaginare che se il segnale in ingresso raddoppia, anche la risposta del rivelatore raddoppi. Un *TES* reale, invece, può mostrare una relazione più complessa tra il segnale incidente e quello misurato. È proprio questa non linearità che può alterare i nostri dati. Infatti, la non linearità del *TES* "mescola" le frequenze presenti nel segnale facendo sì che una contaminazione che inizialmente si trovava lontano dalla banda di interesse possa produrre nuove componenti proprio nella regione in cui cerchiamo il segnale polarizzato della *CMB*! Questo comportamento è mostrato in *FIG. 4*.

Questo è il punto centrale del lavoro presentato in questo articolo: le sistematiche non possono sempre essere studiate una alla volta. Nel contesto di misure ad altissima precisione, l'interazione tra più componenti non ideali può generare effetti di contaminazione non banali e non trascurabili. Charamente, questa osservazione è importante anche al di là del caso specifico di *LiteBIRD*, e si può applicare a qualunque esperimento che miri a una tale precisione!

Il ruolo delle simulazioni prima del lancio

Per studiare questi effetti sistematici e capire come poterli mitigare prima del lancio della missione è

necessario capire come la contaminazione si propa-ghi attraverso tutta la catena di analisi.

Per questo è stato sviluppato un simulatore in grado di generare dati temporali realistici contaminati dalle non idealità della HWP e dalla risposta non lineare dei TES. A questo punto, il dato simulato può essere trattato come un vero dato sperimentale: viene trasformato in mappe sintetiche, analizzato insieme alle altre componenti del cielo e utilizzato per valutare l'impatto finale sulla misura cosmologica.²

Questo approccio permette di rispondere a una domanda molto concreta: se lo strumento fosse affetto da una determinata imperfezione, quanto cambierebbe la nostra misura di r ? Quale sarebbe la sua incertezza? Per rispondere a questa domanda, è stata sviluppata una *pipeline* per propagare le sistematiche fino alla stima del parametro r . In questo modo è possibile confrontare diverse configurazioni dello strumento e determinare quale livello di controllo sia necessario per mantenere l'impatto della contaminazione al di sotto della soglia richiesta dalla missione. Ad esempio, i risultati del nostro studio mostrano che, nel caso più conservativo considerato, il parametro che descrive la non linearità dei TES deve essere noto e controllato entro un livello di circa $2 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Un risultato di questo tipo permette di trasformare una simulazione in un requisito concreto per la calibrazione dello strumento. Prima del lancio sarà quindi necessario calibrare fino a questo livello di accuratezza la risposta dei rivelatori e verificare sperimentalmente che il loro comportamento sia compatibile con i requisiti.

Nonostante questo tipo di simulazioni temporali complete rappresentino il modo più accurato per descrivere la propagazione delle sistematiche, esse hanno un costo computazionale molto elevato. Una singola giornata di osservazioni simulata, per esempio, può contenere una quantità enorme di dati. Se vogliamo studiare non una sola configurazione, ma decine di possibili valori dei parametri strumentali, ripetere ogni volta una simulazione temporale completa può diventare impraticabile. Per questo motivo abbiamo sviluppato anche un approccio complementare, basato direttamente sulla costruzione di mappe del cielo. L'idea è costruire dei modelli che descrivano la contaminazione prodotta dalla combinazione delle imperfezioni della HWP e della non linearità dei TES. Invece di simulare ogni volta l'intera evoluzione temporale del segnale, possiamo così generare direttamente il *pattern* che una determinata sistematica produrrebbe nella mappa finale.³ È quindi possibile esplorare rapidamente molte configurazioni dello strumento e indi-

² Il codice del simulatore per *LiteBIRD* è disponibile pubblicamente al sito https://github.com/litebird/litebird_sim, insieme alla sua documentazione aggiornata.

³ Questi modelli sono stati confrontati con le simulazioni temporali complete, verificando che riproducessero correttamente i livelli di contaminazione.

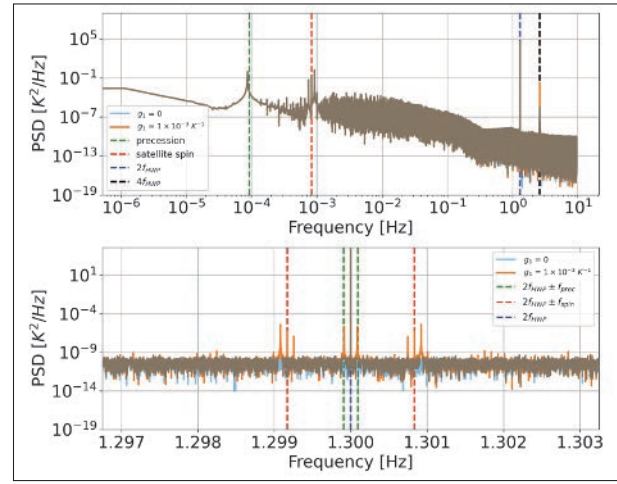


FIG. 4. Impatto delle sistematiche di HWP e TES sullo spettro in frequenza dei dati simulati. In azzurro, i dati nel caso di risposta dei *detector* ideale. In arancione, i dati nel caso di risposta non lineare. Le linee verticali tratteggiate mostrano alcune frequenze caratteristiche dello strumento. Il pannello inferiore mostra un ingrandimento intorno alle frequenze della seconda armonica dell'HWPSS (MICHELI *et al.* 2024).

viduare quelle compatibili con gli obiettivi scientifici della missione. Questa metodologia si è rivelata particolarmente utile durante la revisione del progetto della missione nel corso del 2025, che ha richiesto di semplificare il design del telescopio mantenendo gli obiettivi scientifici originali. Con questo approccio è stato inoltre possibile derivare dei requisiti strumentali congiunti sulla HWP e sulla non linearità dei TES.

Abbiamo infine studiato anche come mitigare la contaminazione direttamente nell'analisi dei dati. Non sempre, infatti, le sistematiche possono essere eliminate completamente in fase di progettazione o calibrazione. È quindi altrettanto importante studiare come riconoscerle e rimuoverle durante l'analisi dei dati. La periodicità dell'HWPSS permette di identificare e modellare le componenti associate alle armoniche della rotazione della lamina, mentre procedure iterative di *map-making*⁴ consentono di separare progressivamente il segnale cosmologico dalla contaminazione. Le simulazioni mostrano che queste strategie possono ridurre significativamente il segnale spurio anche in presenza di variazioni nel tempo delle condizioni operative della HWP.

Sommario e prospettive future

Lo studio delle sistematiche strumentali mostra quanto sia importante simulare le osservazioni di un telescopio durante la sua fase di progettazione. Per una missione complessa come *LiteBIRD*, le simulazioni permettono di riprodurre il segnale cosmo-

⁴ Gli algoritmi di *map-making* trasformano i dati temporali in mappe del cielo, utilizzando le informazioni sul puntamento del telescopio per proiettare il segnale sui pixel di cielo osservati.

gico, le emissioni della nostra Galassia, il rumore e le imperfezioni dello strumento, seguendone gli effetti fino all'estrazione dei parametri cosmologici. In questo modo è possibile individuare le principali criticità e derivare requisiti strumentali concreti per la costruzione e la calibrazione. In particolare, questo studio ha mostrato come sia necessario caratterizzare non solo l'impatto delle singole sistematiche, ma anche la loro combinazione. Tale processo è essenziale anche per trovare il giusto compromesso tra sensibilità e fattibilità strumentale.

L'obiettivo principale di *LiteBIRD* sarà la ricerca dei *modi B* primordiali nella polarizzazione della CMB per ottenere nuove informazioni sulla fisica dell'inflazione e sulle condizioni dell'universo primordiale. Ma la grande sensibilità e la copertura dell'intero cielo renderanno i suoi dati preziosi anche per molte altre applicazioni: la misura della polarizzazione potrà essere utilizzata, ad esempio, per studiare la birifrangenza cosmica, fenomeno che potrebbe fornire indicazioni su forme di nuova fisica, mentre le osservazioni a diverse frequenze permetteranno di caratterizzare con maggiore precisione le emissioni della nostra Galassia e quindi di studiare la polvere, l'emissione di sincrotrone e i campi magnetici galattici. Un ruolo importante sarà infine svolto dalla sinergia con gli altri esperimenti CMB. *LiteBIRD* osserverà il cielo dallo spazio, garantendo una misura su tutto il cielo e un'ampia coper-

tura in frequenza, mentre gli esperimenti da Terra, come Simons Observatory o il South Pole Telescope, possono raggiungere una risoluzione angolare maggiore e studiare con particolare dettaglio le piccole scale. La combinazione di queste informazioni permetterà di sfruttare i punti di forza delle diverse osservazioni e di ottenere una visione più completa della CMB e delle sue contaminazioni. In questo senso, *LiteBIRD* non sarà un esperimento isolato, ma parte di una rete di osservazioni complementari che contribuiranno insieme alla prossima generazione di ricerca cosmologica e astrofisica.

Referenze bibliografiche e letture consigliate

- LiteBIRD COLLABORATION, *Probing Cosmic Inflation with the LiteBIRD Cosmic Microwave Background Polarization Survey*, «Progress of Theoretical and Experimental Physics», 4, 2023.
- S. MICHELI et al., *Systematic effects induced by half-wave plate differential optical load and TES nonlinearity for LiteBIRD*, «Proceedings of Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy XII. SPIE», 2024, pp. 1024-1034.
- A. BALBI, *La musica del Big Bang: Come la radiazione cosmica di fondo ci ha svelato i segreti dell'universo*, Germany, Springer, 2007, p. 230.
- P. DE BERNARDIS, *Osservare l'universo*, Bologna, il Mulino, 2010, p. 160.

Silvia Micheli è ricercatrice post-doc a Grenoble, presso il Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie. Si occupa di analisi dati per esperimenti di radiazione cosmica di fondo, studiando in particolare le sistematiche strumentali e le procedure di calibrazione. Ha conseguito il dottorato di ricerca in Astronomy, Astrophysics and Space Science presso l'Università Sapienza di Roma nel 2025.

La nostra Galassia in raggia gamma e neutrini. L'importanza delle sorgenti deboli*

Vittoria Vecchiotti

INAF · Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Firenze
Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University, Cina

Introduzione

QUANDO con i nostri occhi guardiamo il cielo notturno, riusciamo a vedere solo una piccola parte dei fotoni che vengono dalla nostra Galassia. I nostri occhi sono sensibili solo a una piccola porzione della radiazione elettromagnetica, quella che chiamiamo luce visibile. La nostra Galassia però emette radiazioni in un intervallo di energia molto più ampio, fino a raggiungere altissime energie. I fotoni più energetici, o raggi gamma, sono prodotti in ambienti estremi, come in esplosioni di supernovae (la fine della vita di una stella), nei resti di queste esplosioni, in stelle di neutroni in rapida rotazione, le cosiddette pulsar, e in molti altri fenomeni astrofisici.

Nella nostra Galassia abbiamo una varietà di cosiddette sorgenti che sono capaci di accelerare particelle cariche, principalmente protoni, fino a energie enormemente superiori a quelle raggiungibili nei più potenti acceleratori costruiti dall'uomo. Una volta accelerate, queste particelle possono scontrarsi col materiale presente intorno alla sorgente, quale ad esempio il gas interstellare, costituito prevalentemente da idrogeno atomico e molecolare. Da queste collisioni vengono prodotte nuove particelle, tra le quali raggi gamma e neutrini (vedi FIG. 1), che rappresentano preziosi messaggeri delle condizioni fisiche presenti nelle vicinanze della sorgente. Queste particelle al contrario dei protoni che li hanno generati, non posseggono una carica elettrica. Per questo motivo attraversano la Galassia seguendo traiettorie pressoché rettilinee, senza essere deviate dai campi magnetici Galattici. Perciò, quando, eventualmente, raggiungono il nostro pianeta conservano ancora l'informazione sulla direzione lungo la quale sono stati prodotti, permettendoci di individuare la posizione delle loro sorgenti.

I nostri occhi non ci permettono di vedere questi fotoni così energetici. Per osservare queste particelle sono necessari strumenti appositamente progettati, i così detti rivelatori di particelle che rappresentano veri e propri occhi alternativi capaci di estendere la nostra vista ben oltre il visibile. Tra

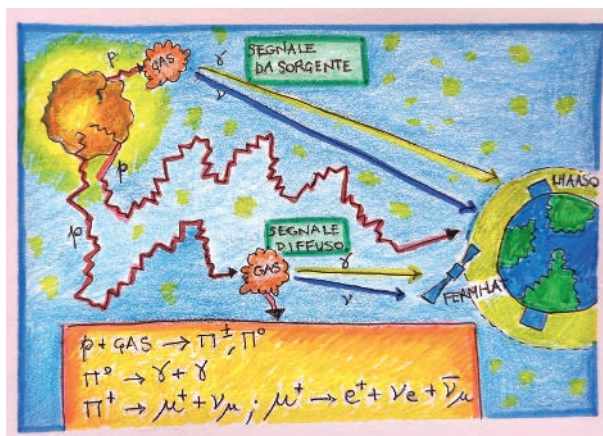


FIG. 1. Rappresentazione schematica di come i raggi cosmici, prevalentemente protoni (p), accelerati dalle sorgenti, possano interagire con il gas interstellare nelle vicinanze della sorgente oppure entrare nell'ambiente Galattico. In questo secondo caso, a causa del campo magnetico turbolento della Galassia, i raggi cosmici procedono lungo una traiettoria diffusiva, simile a un *random walk*. Durante la loro propagazione possono interagire con il gas interstellare oppure raggiungere la Terra ed essere rivelati, perdendo tuttavia l'informazione sulla posizione della sorgente che li ha prodotti. Le interazioni con il gas producono diverse particelle secondarie, tra le quali pioni carichi e neutri, che decadendo producono a loro volta neutrini e raggi gamma, rispettivamente. Queste particelle, essendo elettricamente neutre, si possono propagare attraverso la Galassia senza essere deviate dai campi magnetici e raggiungere la Terra, dove possono essere rivelate.

questi abbiamo, per esempio, Fermi-LAT, un rivelatore installato a bordo di un satellite, che permette di osservare il cielo nei raggi gamma alle energie del GeV (10^9 eV), circa un miliardo di volte maggiori dell'energia dei fotoni della luce visibile.

A energie circa mille volte maggiori di quelle di Fermi-LAT, dell'ordine del TeV, e fino a un milione di volte maggiori, dell'ordine del PeV, entrano invece in gioco strumenti come Tibet-AS γ e il potente rivelatore LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory), costruiti a terra, a oltre 4000 metri di quota sull'altopiano tibetano per osservare raggi gamma e raggi cosmici.

Ad energie confrontabili con quelle osservate da Fermi-LAT, Tibet-AS γ e LHAASO, che sono quelle su cui si focalizza principalmente la mia ricerca, il cielo appare leggermente diverso da quello visibile ai nostri occhi. Dobbiamo immaginare la nostra Galassia come un disco sottile, all'interno del quale si trovano la maggior parte delle sorgenti. Vista di fianco, la Galassia appare quindi come una fascia

* L'Autrice presenta qui i contenuti essenziali delle ricerche che le sono valse il Premio congiunto SAIT-SIF "Giovanni Bignami" per l'anno 2026-IX edizione, destinato a un giovane ricercatore.

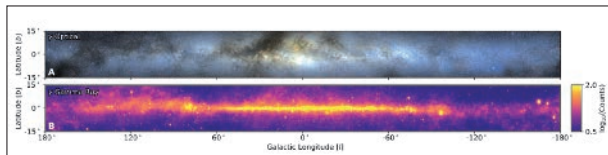


FIG. 2. La figura, tratta da ICECUBE COLLABORATION (2023), rappresenta la Via Lattea osservata nell'ottico (pannello in alto) e alle energie dei raggi gamma osservati da Fermi-LAT (pannello in basso). Il segnale è rappresentato in funzione della longitudine (l) e latitudine (b) Galattiche. Il valore $b = 0$ corrisponde al piano Galattico, mentre valori positivi e negativi di b indicano rispettivamente le regioni al di sopra e al di sotto del piano Galattico. Il centro Galattico si trova nella direzione $l = 0$, $b = 0$ mentre lungo l ci si sposta lungo il piano Galattico, allontanandosi dalla direzione del centro verso destra o verso sinistra. L'intensità del colore rappresenta l'intensità del segnale proveniente da quella determinata direzione.

sottile, corrispondente al piano Galattico. Nel pannello in basso di FIG. 2 è mostrata la distribuzione del segnale gamma lungo il piano galattico, rappresentato dal valore di latitudine $b = 0$, e nelle regioni immediatamente al di sopra e al di sotto di esso. La scala di colore rappresenta l'intensità del segnale gamma in corrispondenza di una data direzione. Si può notare come il piano Galattico risulti molto luminoso: è la ben nota Via Lattea, dove sono concentrate la maggior parte delle sorgenti astrofisiche. Si nota anche la presenza di una componente diffusa, distribuita intorno al piano Galattico. Questa componente diffusa non è correlata con la posizione di nessuna sorgente ma si trova in corrispondenza del materiale interstellare.

Abbiamo già anticipato che particelle cariche vengono accelerate da sorgenti e a seguito della collisione con il gas producono raggi gamma e neutrini. Dopo essere stati accelerati dalla sorgente, i raggi cosmici non rimangono confinati al suo interno. Una parte di queste particelle, infatti, riesce a fuggire dalla sorgente che le ha prodotte iniziando un lungo viaggio attraverso la Via Lattea.

Una volta fuggiti, i protoni si ritrovano in un ambiente con un campo magnetico di circa $3\mu G$, più di un milionesimo più piccolo del campo magnetico di una calamita da frigorifero. Sebbene questo campo magnetico possa sembrare estremamente debole, è tuttavia sufficiente a modificare il moto dei raggi cosmici. Particelle cariche in presenza di un campo magnetico non procedono in linea retta ma seguono una traiettoria elicoidale lungo la linea di campo magnetico. Se il campo magnetico fosse perfettamente uniforme, il moto delle particelle sarebbe relativamente semplice. Tuttavia, la nostra Galassia è un ambiente turbolento, il che significa che oltre alla componente regolare, il campo magnetico presenta numerose fluttuazioni distribuite su scale spaziali molto diverse. Queste fluttuazioni fanno sì che i raggi cosmici non abbiano semplicemente una traiettoria elicoidale, ma, in corrispondenza di esse, le particelle possono cambiare direzione. In particolare, questo succede quando il raggio dell'orbita elicoidale di un raggio cosmico diventa confrontabile con la dimensione di una di queste fluttuazioni. Ta-

le processo si ripete innumerevoli volte durante il viaggio nella Galassia. Il risultato è che il moto dei raggi cosmici diventa così detto diffusivo, come quello di una particella che si muove nell'aria. I raggi cosmici cambiano direzione continuamente e la traiettoria assume l'aspetto di un così detto *random walk* (cammino casuale) come si può vedere dalla traiettoria rossa in FIG. 1. Per questo motivo, i raggi cosmici perdono completamente memoria della sorgente che li ha generati.

Queste particelle cariche, durante il loro processo diffusivo, possono essere portate in regioni con presenza di gas interstellare e interagire e produrre a loro volta raggi gamma e neutrini; non saranno associate con nessuna sorgente e per questo, questa componente viene chiamata diffusa. Lo studio della componente diffusa è fondamentale per capire come i raggi cosmici vengono trasportati nella nostra Galassia, tuttavia è anche molto difficile da misurare.

In generale un rivelatore di particelle, come ad esempio LHAASO, misura tutti i raggi gamma che arrivano da una certa regione di cielo. Questi raggi gamma includono sia quelli da sorgente, sia quelli da diffuso. Come distinguerli? Le sorgenti sono in generale più brillanti e si riconoscono perché tanti fotoni risultano localizzati in una specifica regione più o meno estesa. Quindi è relativamente facile distinguere il segnale di sorgenti luminose dal segnale diffuso. Ma cosa succede quando la sorgente non è luminosa?

Nella nostra Galassia abbiamo tante sorgenti luminose che siamo in grado di rivelare, ma quante sono le sorgenti deboli? Le sorgenti deboli sono molto difficili da rivelare e per questo il loro segnale viene confuso con il segnale diffuso. In altre parole, le misure di diffuso sono contaminate dalla presenza di fotoni prodotti da sorgenti deboli, così dette non risolte dal rivelatore, il che costituisce un problema nell'interpretazione dei dati del diffuso: se questo segnale non risolto non viene correttamente quantificato si rischia di arrivare a conclusioni errate sul trasporto dei raggi cosmici.

Nel mio lavoro, guardando al catalogo di sorgenti osservate dall'esperimento H.E.S.S. con energie dell'ordine del TeV e assumendo alcune proprietà di queste sorgenti, è stato possibile predire quantitativamente il contributo proveniente da questa componente non risolta, che poi abbiamo applicato a vari dati dimostrando che l'aggiunta della componente non risolta riesce effettivamente ad alleviare alcune tensioni emerse tra teoria e dati.

Hardening dello spettro dei raggi cosmici

Oggigiorno, grazie a vari esperimenti, abbiamo ottenuto una misura dello spettro dei raggi cosmici fino a energie dell'ordine di 10^{20} eV. Per avere un'idea, 10^{20} eV è confrontabile con l'energia di una palla da tennis di 50 g che si muove con una velocità di circa

90 km all'ora. Lo spettro indica essenzialmente quante particelle colpiscono un centimetro quadro di superficie al secondo per una data energia a terra. Ovviamente, man mano che l'energia cresce abbiamo sempre meno particelle. Questa relazione viene descritta da una legge a potenza con un determinato indice spettrale. Il valore dell'indice spettrale indica infatti quanto rapidamente decresce il numero di particelle con l'energia. Un indice spettrale più grande indica che il numero di particelle per centimetro quadro decresce rapidamente al crescere dell'energia, un indice spettrale più piccolo indica una decrescita lenta del numero di particelle.

Nella teoria standard di propagazione dei raggi cosmici, si assume che il processo di diffusione abbia le stesse proprietà in ogni parte della nostra Galassia. In altre parole il comportamento di tutte le particelle può essere descritto in maniera macroscopica senza necessità di andare a investigare regione per regione. Questo andrebbe a significare che lo spettro dei raggi cosmici che viene misurato a terra dai rivelatori, dovrebbe essere rappresentativo dello spettro dei raggi cosmici nell'intera Galassia. Tuttavia recenti analisi da parte dell'esperimento Fermi-LAT hanno invece mostrato una dipendenza dell'indice spettrale dalla distanza dal centro galattico. In FIG. 3, infatti, viene riportata la misura dell'indice spettrale in funzione della distanza dal centro Galattico. Quello che ci saremmo aspettati è un valore costante e uguale a quello misurato a terra, dove la Terra è piazzata approssimativamente a 8.5 kpc di distanza dal centro galattico.

Tuttavia osserviamo che l'indice spettrale diminuisce spostandoci verso il centro Galattico (vedi punti rossi in FIG. 3). Questo comportamento viene chiamato *hardening* dell'indice spettrale dei raggi cosmici e potrebbe effettivamente indicare un comportamento dei raggi cosmici nella nostra Galassia non predetto all'interno di modelli standard di propagazione. Dove per modelli standard intendiamo la diffusione uniforme nell'intera Galassia. Tuttavia è importante capire come le misure di Fermi-LAT sono state ottenute per poter capire se questa conclusione è effettivamente veritiera. Le misure di Fermi-LAT sullo spettro dei raggi cosmici, vengono indirettamente derivate da misure sui raggi gamma diffusi, che, come già anticipato sono direttamente prodotti dall'interazione dei raggi cosmici con il gas interstellare. Per questo motivo è relativamente facile ricavare informazioni sui raggi cosmici dai raggi gamma diffusi.

Ma, come abbiamo anticipato, nelle misure di raggi gamma diffusi c'è sempre una contaminazione del segnale da parte di sorgenti poco luminose. E l'analisi di Fermi ha considerato questa componente trascurabile. Nel mio lavoro, mi sono occupata di includere la componente di sorgenti deboli nell'interpretazione dei dati di Fermi. Ed effettivamente quanto abbiamo scoperto è che includere questa componente fa sì che le misure di indice spettrale in funzione della distanza diventino più

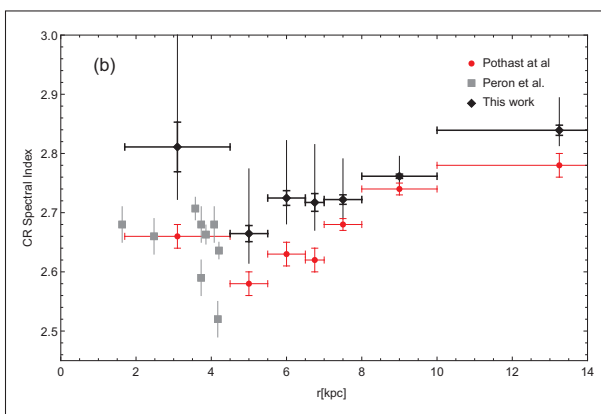


FIG. 3. FIG. tratta da VECCHIOTTI *et al.* (2022a). Valore dell'indice spettrale dei raggi cosmici in funzione della distanza dal centro Galattico, espressa in kiloparsec (kpc). Un kiloparsec corrisponde a circa 200 milioni di volte la distanza tra la Terra e il Sole. In questo grafico la Terra è situata a circa 8,5 kpc dal centro Galattico. I punti rossi, con le relative barre di errore, rappresentano i valori dell'indice spettrale ricavati dall'analisi dei dati Fermi-LAT, considerando trascurabile il contributo delle sorgenti non risolte. I punti neri rappresentano invece i risultati ottenuti includendo il contributo delle sorgenti non risolte. I punti grigi rappresentano una misura indipendente ottenuta dai dati di Fermi-LAT, che non include a sua volta il contributo delle sorgenti non risolte.

compatibili con il valore misurato a terra (vedi punti neri in FIG. 3).

Tibet-Asy

Abbiamo già visto quanto sia importante tenere conto della componente di sorgenti non risolte, deboli, nell'interpretazione dei dati del diffuso. Nel 2021 il rivelatore di particelle Tibet-Asy ha per la prima volta fornito una misura del diffuso Galattico di raggi gamma tra circa 100 TeV e 1 PeV (10^{15} eV), raggiungendo così energie tra le più elevate mai osservate per la radiazione gamma proveniente dalla nostra Galassia.

La misura è stata effettuata in due diverse regioni del piano Galattico. Nella FIG. 4 sono mostrate, in particolare, due regioni: una regione che intercetta una parte più interna e quindi più ricca di bracci a spirale della Galassia, dove si concentrano maggiormente gas e sorgenti, e una più esterna, dove queste componenti sono meno abbondanti. Come ci aspetteremmo, il segnale osservato, rappresentato dai punti rossi in FIG. 5, è molto più intenso nella regione interna rispetto a quella esterna. Questo è dovuto principalmente alla maggiore densità di gas interstellare, il quale, infatti, rappresenta il bersaglio dei raggi cosmici, che, interagendo con esso, producono raggi gamma diffusi. La linea grigia continua rappresenta il contributo atteso dal solo diffuso Galattico, calcolato utilizzando il modello standard per la distribuzione e propagazione dei raggi cosmici. Tuttavia, come si può vedere, questo contributo non è sufficiente a spiegare tutti i dati: rimane un eccesso di emissione (i dati sono sopra al modello) che il modello non riesce a riprodurre.

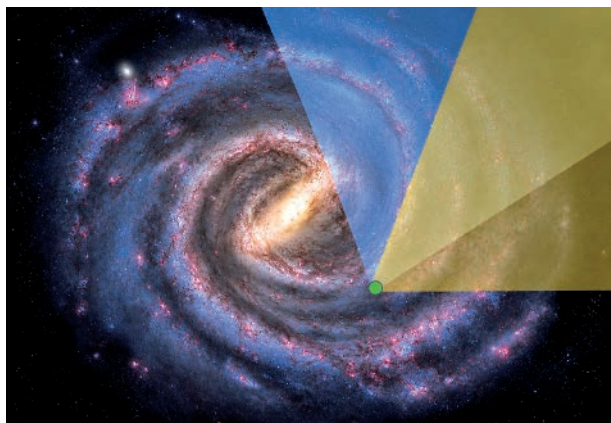


FIG. 4. Rappresentazione artistica della nostra Galassia vista dall'alto, tratta da Wikipedia, con i tipici bracci a spirale. La sfera verde rappresenta in maniera approssimativa la posizione della Terra. Le due sezioni a torta, in blu e giallo, che si sovrappongono, rappresentano approssimativamente le due regioni del cielo osservate da Tibet-AS γ .

Una possibilità che è stata presa in considerazione per spiegare questa discrepanza è quella dell'*hardening* dello spettro dei raggi cosmici verso il centro della Galassia, che abbiamo già incontrato in precedenza. In questo scenario, i raggi cosmici avrebbero uno spettro più duro (quindi un indice spettrale più piccolo) verso il centro Galattico. Questo implica che ci aspettiamo una maggiore abbondanza di raggi cosmici verso il centro Galattico che nelle regioni esterne. Un numero maggiore di raggi cosmici si traduce automaticamente in una maggiore produzione di raggi gamma diffusi.

Il risultato di questo modello è rappresentato dalla linea grigia tratteggiata in FIG. 5. Si può notare che, nella regione interna (pannello a), il segnale gamma diffuso previsto dall'ipotesi di *hardening* è maggiore rispetto al caso standard, proprio come ci aspetteremmo se ci fosse un eccesso di raggi cosmici ad alta energia verso il centro Galattico. Nella regione esterna (pannello b), invece, le due previsioni sono compatibili: lontano dal centro della Galassia, infatti, il modello con *hardening* torna a prevedere una popolazione di raggi cosmici comparabile a quella del modello standard.

Anche questa spiegazione, tuttavia, non è sufficiente a riprodurre completamente i dati di Tibet-AS γ . Ed è qui che torna in gioco ciò che abbiamo discusso all'inizio: le sorgenti non risolte. Se aggiungiamo al diffuso Galattico anche il contributo di una popolazione di sorgenti troppo deboli per essere individuate singolarmente, otteniamo la curva verde mostrata in FIG. 5, che rappresenta quindi la somma del diffuso prodotto dall'interazione dei raggi cosmici con il gas interstellare nel caso standard e dell'emissione proveniente dalle sorgenti non risolte.

Il confronto con i dati mostra che questo contributo aggiuntivo permette di spiegare naturalmente l'emissione che mancava nei modelli precedenti. Non è quindi necessario immaginare che tutto ciò che osserviamo come «diffuso» provenga realmente

da un'emissione diffusa e uniforme: una parte del segnale può essere la luce di moltissime sorgenti individuali, troppo deboli per essere riconosciute una per una. L'aggiunta del segnale da sorgenti non risolte ci ha permesso di spiegare i primi dati sperimentali di raggi gamma ad altissime energie.

Neutrini

Abbiamo già anticipato che l'interazione tra raggi cosmici e gas interstellare, oltre a produrre raggi gamma, produce anche neutrini, i quali, al contrario dei raggi gamma, sono particelle molto elusive, in quanto interagiscono molto raramente con la materia e per questo motivo sono molto difficili da rivelare. Basti pensare che solo nel 2023 IceCube ha fornito la prima evidenza di una componente diffusa di neutrini proveniente dalla nostra Galassia.

Per rivelare queste particelle abbiamo bisogno di strumenti giganteschi: per poter osservare un neutrino, infatti, è necessario che questo interagisca all'interno del rivelatore. Quindi, per aumentare la probabilità che ciò avvenga, sono stati costruiti rivelatori con volumi enormi. Questo è il caso di IceCube situato nel ghiaccio al polo sud con un volume di circa un chilometro cubo. È proprio grazie ad IceCube che abbiamo avuto la prima misura di neutrini Galattici.

Così come per i raggi gamma, ci aspettiamo che i neutrini siano prodotti sia all'interno di sorgenti, sia durante la propagazione dei raggi cosmici attraverso la Galassia. Ci aspettiamo quindi che il segnale osservato da IceCube possa essere descritto come la somma di un contributo proveniente dalle sorgenti e di un contributo diffuso.

Come già abbiamo fatto per i raggi gamma, possiamo confrontare con i dati i due diversi modelli per la componente diffusa: quello standard e quello che prevede un *hardening* dello spettro dei raggi cosmici verso il centro della Galassia. Quello che scopriamo è che il modello con *hardening*, rappresentato dalla banda rossa nel pannello b di FIG. 6, passa esattamente sopra i dati di IceCube, rappresentati dalla banda magenta, lasciando pochissimo spazio, se non addirittura nessuno, a un contributo aggiuntivo legato alle sorgenti mentre il modello standard (pannello a di FIG. 6), invece, lascia spazio a una componente di neutrini prodotta dalle sorgenti. Questo risultato pone quindi una domanda interessante: è plausibile che non ci sia alcun contributo significativo di neutrini prodotto dalle sorgenti della nostra Galassia proprio nel periodo in cui le stiamo osservando?

Se le sorgenti di alta energia che osserviamo producessero principalmente raggi gamma attraverso processi leptonici (interazioni di elettroni con campi elettromagnetici), che non producono neutrini, allora l'assenza di un contributo significativo da sorgenti sarebbe meno sorprendente e il modello con *hardening* non sarebbe necessariamente da escludere.

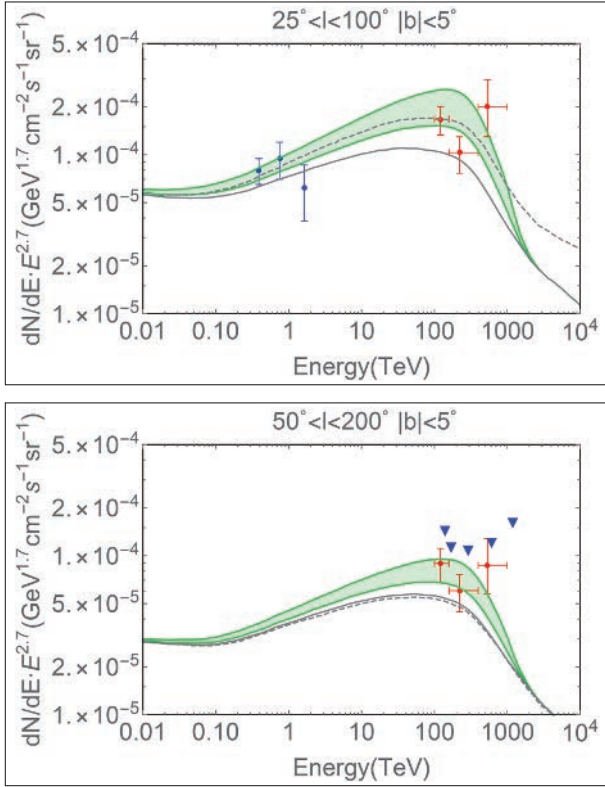


FIG. 5. Nella figura, adattata da VECCHIOTTI et al (2022b), è rappresentato il flusso dei raggi gamma in funzione dell'energia nella regione del cielo interna (pannello a, sopra) e in quella esterna (pannello b, sotto) osservate da Tibet-AS γ . Per flusso si intende il numero di particelle di una data energia che attraversa un'area di un centimetro quadro in un secondo. I punti rossi rappresentano i dati del diffuso gamma misurato da Tibet-AS γ . I punti blu a più bassa energia nel pannello a sono derivati dal rivelatore ARGO-YBJ, mentre i triangoli blu nel pannello b rappresentano limiti superiori derivati dal rivelatore CASA-MIA. La linea grigia tratteggiata rappresenta la predizione teorica del diffuso gamma calcolata nel caso con *hardening* dello spettro dei raggi cosmici verso il centro Galattico. La linea continua grigia rappresenta invece il diffuso gamma calcolato nel caso di propagazione standard dei raggi cosmici. La banda verde rappresenta infine la somma del diffuso standard e del contributo delle sorgenti non risolte.

In generale non possiamo ancora escludere completamente il caso con *hardening* in favore del modello standard di propagazione dei raggi cosmici. Abbiamo bisogno di nuove misure di neutrini che, combinate ai raggi gamma, ci aiutino sempre più a descrivere il trasporto dei raggi cosmici nella nostra Galassia e le potenti sorgenti che la popolano.

Referenze bibliografiche

ICECUBE COLLABORATION, «Science», 380 (6652), 2023, pp. 1338-1343.

Vittoria Vecchiotti è una Marie Skłodowska-Curie Global Postdoctoral Fellow presso l'INAF · Osservatorio Astrofisico di Arcetri e il Tsung-Dao Lee Institute di Shanghai. In precedenza, è stata ricercatrice post-dottorato presso l'Università Norvegese di Scienza e Tecnologia (NTNU). Ha conseguito il dottorato di ricerca in Fisica delle Astroparticelle presso il Gran Sasso Science Institute (GSSI) nel 2023. Combinando dati multi messaggeri provenienti da esperimenti quali LHAASO e IceCube, studia l'emissione diffusa di raggi gamma e neutrini Galattici di alta energia e il contributo di sorgenti galattiche non risolte. Si occupa inoltre della ricerca di Pevatroni Galattici.

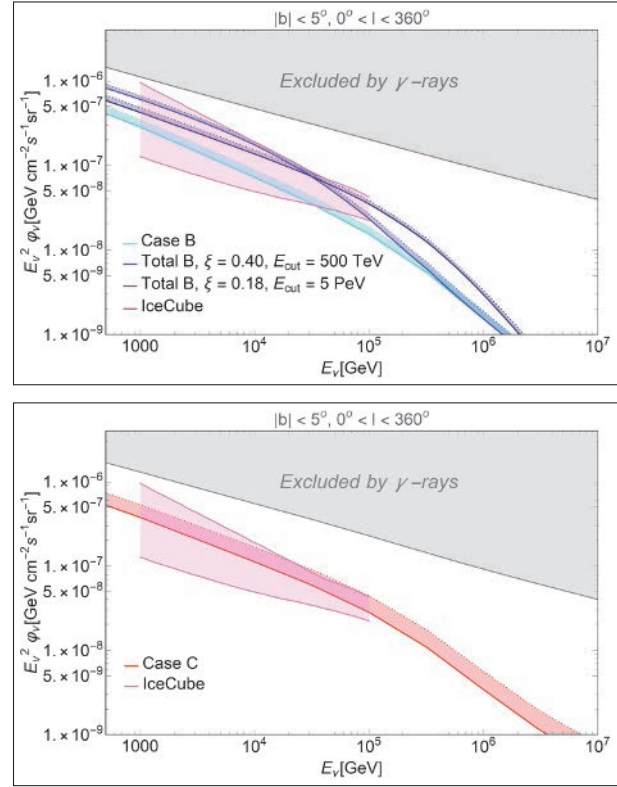


FIG. 6. Nella figura, tratta da VECCHIOTTI et al. (2023), è rappresentato il flusso dei neutrini in funzione dell'energia sul piano Galattico. La banda magenta rappresenta la misura dei neutrini Galattici fornita dall'esperimento IceCube. Nel pannello a (sopra), la banda ciano, denominata Caso B, rappresenta il contributo dei neutrini diffusi calcolato assumendo una propagazione standard dei raggi cosmici. Le due bande blu scuro rappresentano invece la somma del contributo diffuso standard e di quello prodotto dalle sorgenti Galattiche. Nel pannello b (sotto), la banda rossa, denominata Caso C, rappresenta invece il contributo dei neutrini diffusi calcolato assumendo una propagazione dei raggi cosmici con *hardening* verso il centro Galattico.

VITTORIA VECCHIOTTI, GIULIA PAGLIAROLI, FRANCESCO LORENZO VILLANTE, *The contribution of Galactic TeV pulsar wind nebulae to Fermi large area telescope diffuse emission*, «Communication Physics», 5, 161, 2022a.

VITTORIA VECCHIOTTI, FLAVIO ZUCCARINI, FRANCESCO LORENZO VILLANTE, GIULIA PAGLIAROLI, *Unresolved Sources Naturally Contribute to PeV Gamma-Ray Diffuse Emission Observed by Tibet AS γ* , «The Astrophysical Journal», 928, 19, 2022b.

VITTORIA VECCHIOTTI, FRANCESCO LORENZO VILLANTE, GIULIA PAGLIAROLI, *Unveiling the Nature of Galactic TeV Sources with IceCube Results*, «The Astrophysical Journal Letters», 956, L44, 2023.

Ritratto dell'astronomo da giovane: i primi 200 anni di Giovanni Battista Donati

Simone Bianchi, Antonella Gasperini, Daniele Galli

INAF · Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Firenze

IL 16 dicembre 2026 segna il bicentenario della nascita di Giovanni Battista Donati, una delle figure fondamentali dell'astronomia italiana dell'Ottocento. Celebre in tutto il mondo per la scoperta della grande cometa del 1858 e per essere stato un pioniere nell'uso della spettroscopia applicata allo studio degli astri, Donati fu anche la mente lungimirante a cui si deve la nascita dell'Osservatorio di Arcetri e delle Officine Galileo. Eppure, dietro l'autorevole scienziato, si cela un percorso umano e intellettuale giovanile meno noto, ma fondamentale per comprenderne appieno la maturazione professionale: lo ricostruiamo qui aiutandoci con uno scritto che il padre dell'astronomo fece avere al fisico Silvestro Gherardi (1802-1879), preside dell'Istituto Tecnico di Firenze e amico di Donati, e che Gherardi passò a Celestino Schiaparelli (1841-1919), aiuto alla cattedra di arabo elementare all'Istituto di Studi Superiori di Firenze, affinché la facesse infine pervenire a suo fratello, il ben noto Giovanni Virginio (1835-1910). La comunicazione, all'indomani dell'improvvisa morte per colera di Donati, avrebbe dovuto appunto servire a ricostruirne la biografia prima della sua venuta all'Osservatorio di Firenze. Fortunatamente per noi, Celestino seguì i consigli di Gherardi e trascrisse il testo senza «tralasciare molte particolarità di nessun conto». Quando non indicato espressamente, ci riferiremo a questa fonte (FIG. 1: IL DOCUMENTO).

Il nostro astronomo nacque dunque a Pisa il 16 dicembre 1826, nella casa avita all'angolo fra piazza

Padella (rinominata, dopo la sua morte, piazza Donati, intitolazione che conserva tuttora) e piazza Sant'Omobono, nella parrocchia di San Frediano del centro cittadino (FIG. 2); fu battezzato il giorno successivo con il roboante nome di Giovanni Battista Ireneo Eusebio Filippo Raffaello. Il padre Pietro Donati (1797-1880) aveva seguito le orme di suo padre Silvestro (1750-1823), laureandosi a Pisa in diritto civile e canonico (*in utroque iure*) nel 1817¹ ed esercitando la professione di legale. La madre di Giovanni Battista, Luisa Cantini (1803-1870), era figlia di Filippo (1763-1826), esponente di un'antica famiglia di setaioli (commercianti di seta) fiorentini.² Di Pietro e Luisa ci rimane una colorita descrizione: lui appare serio, preso dal suo ruolo, «sempre vestito in soprabito nero e stajo [cappello a cilindro] e con cravatta nera, rigirata più volte al collo»; lei invece, la «Sora Gigia» doveva essere più vivace, «fiorentina spaccata, assai loquace e assai isterica, bassa, secca e allampanata, con due occhietti piccoli che bucano, ornata, immancabilmente, di scialle e di veletta quando usciva».³

Con ogni probabilità Luisa fu presentata a Pietro dal fratello di lei, Carlo Cantini (1796-1837), laureato anche lui a Pisa nel 1817 *in utroque iure* e quindi compagno di studi di Donati padre: i due giovani dottori dovrebbero inoltre essere gli stessi Pietro Donati di Pisa e Carlo Cantini di Firenze, «studenti [praticanti] in legge con l'avvocato Salvi», i cui nomi fu-

¹ Per i laureati a Pisa si veda D. BARSANTI, V. PALLOTTA, P. PISANTI, *Lauree dell'Università di Pisa 1737-1861*, Università degli studi di Pisa, 1995.

² M. SCARDOZZI, *Per l'analisi del ceto commerciale fiorentino nella prima metà dell'ottocento: i setaioli*, «Quaderni storici», Nuova Serie, 24, 70 (1), aprile 1989, pp. 235-268.

³ Le due descrizioni, forse riferite ad un'età più tarda, e quella successiva della domestica, vengono da *L'astronomo pisano* G. B. Donati, «Il Ponte di Pisa», 34, 47, 18-19/12/1926.

* In questa rubrica, iniziata nel n. 1/2012 e giunta al numero 55, i curatori intendono presentare «frammenti di passato» provenienti dagli archivi astronomici, sia per aumentare la conoscenza degli archivi stessi, sia perché quei «frammenti» ci possano raccontare una sia pur breve storia degli uomini che, nelle nostre istituzioni, si sono dedicati allo studio del cielo.

rono trovati dalla polizia granducale in una lista di associati alla Carboneria, all'indomani dei moti liberali del 1820-21.⁴ Dopo il matrimonio, celebrato nella città della sposa nel 1824, i coniugi Donati-Cantini andarono a risiedere a Pisa, dove trascorsero il resto della loro esistenza. La coppia ebbe numerosi figli (ne abbiamo rintracciati 11 fra il 1825 e il 1846 negli atti dello Stato Civile di Toscana)⁵ ma solo pochi di loro vissero più di qualche anno: Giovanni Battista, appunto, Giuseppe (1831-1888) e Carlo (1833-1908). Un altro fratello, Antonio (1840-1855) morì quindicenne durante una delle frequenti epidemie ottocentesche di colera, quasi un triste presagio della fine che toccherà all'astronomo nel 1873. Completava la famiglia una domestica, Maria Angiola Spera, quasi coetanea del padre di Donati, originaria della città di Massa, «che era veramente una macchietta. L'Angiola vestiva invariabilmente il suo costume massese [...]. Pareva una mascherina: ma non si faceva processione per la città che di dietro al baldacchino non si vedesse pomposa Angiola dei Donati, come tutti la chiamavano, con tanto di candela accesa».

Il piccolo Bista (come lo chiamavano familiari e amici) all'età di 7 anni fu affetto da una malattia al ginocchio destro, un «tumore bianco» (artrite tuberculare) che, malgrado primitivi salassi con l'applicazione di sanguisughe, «che il bambino si attaccava da sé col mezzo di bicchierini», andò in suppurazione e gli causò fortissimi dolori, al punto da indurre «la madre a supplicare Iddio perché finissero con la vita quelle crudeli pene». Fortunatamente, l'infiammazione passò, lasciandogli comunque una leggera

⁴ Su Carlo Cantini, si veda il necrologio in «Gazzetta di Firenze», 3/3/1838, p. 4. L'associazione di Carlo Cantini e Pietro Donati alla Carboneria toscana è documentata in: A. BARETTA, *Le società segrete in Toscana nel 1° decennio dopo la restaurazione. 1814-1824*, Torino, Unione Tipografica Editrice Torinese, 1912.

⁵ Le notizie anagrafiche qui citate su Donati e i suoi familiari sono state ricostruite consultando i seguenti documenti: Registro dei battesimi di Pisa, 1750, 1797, 1826. Registro dei battesimi di Firenze, 1763, 1796, 1803; Stato civile di Toscana, Comunità di Pisa, atti di nascita 1825, 1826, 1829, 1831, 1833, 1835, 1837, 1838, 1840, 1843, 1846; atti di morte 1828, 1830, 1837, 1839, 1844, 1847, 1855; Censimento della parrocchia di S. Frediano a Pisa, 1841. Comunità di Firenze, atti di morte 1826, 1837; atti di matrimonio 1824; Censimento di Firenze, 1810-11. Stato civile italiano, Comune di Pisa, atti di morte 1870, 1880, 1888, 1908.

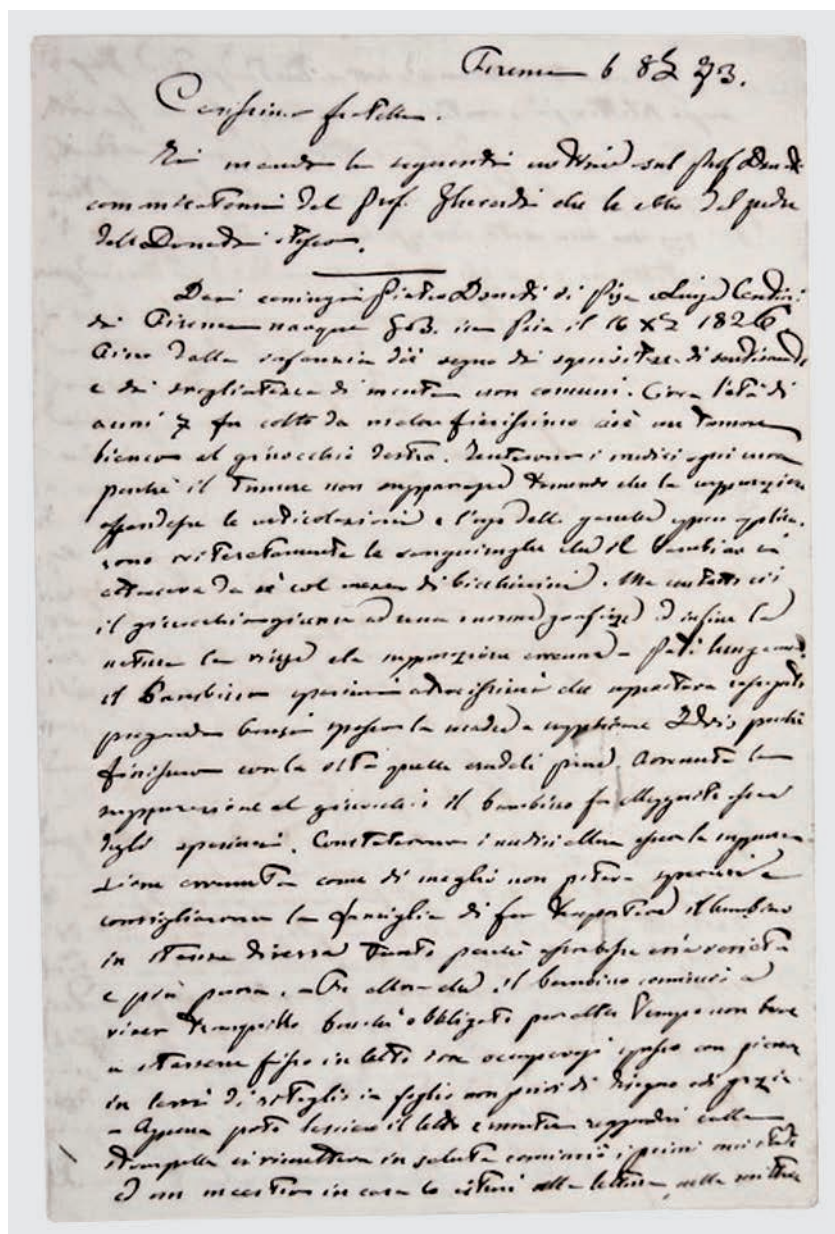


FIG. 1. IL DOCUMENTO: lettera di Celestino Schiaparelli a Giovanni Virginio Schiaparelli, Firenze, 6/10/1873, Archivio storico dell'Osservatorio astronomico di Brera, "Corrispondenza Scientifica" cart. 146, n. 43. Il testo biografico su Donati, con il titolo "Appunti da servire a una biografia del professore GioBatta Donati, dall'epoca della sua nascita, fino alla sua chiamata (nel 1852) all'osservatorio astronomico di Firenze", è conservato anche nel Fondo Gherardi, Biblioteca Trisi di Lugo, busta 20, n. 102001.

zoppia. Durante la convalescenza, costretto a letto, lo troviamo dedito a «lavori di ritaglio in foglio non privi di disegno e di grazia». Sempre relegato in casa, «reggendosi sulla stampella», iniziò con un maestro privato i suoi primi studi; nel tempo libero, invece, amava costruire piccoli altari (e il presepe a Natale) «con qualche maestà, con gusto di architettura e con effetto di prospettiva», oltre che piccoli armadi e bauli di cartone o legno, dotati «di congegni e segreti di scoperta difficilissima». Per realizzare questi ultimi, il padre lo aveva fornito di piccoli arnesi da falegname, «che apprese di per sé a maneggiare con maestria tutta sua e con dimostrazione di talento non dubbio per i lavori meccanici».

Ristabilita la salute, intorno ai 12 anni (nell'anno scolastico 1838-39) Donati iniziò a frequentare la



FIG. 2. La casa natale dell'astronomo, in Piazza G. B. Donati a Pisa, evidenziata da una lapide celebrativa apposta nel 1926 durante le celebrazioni del primo centenario dalla nascita dell'astronomo (S. BIANCHI et al., *In morte di un astronomo: il "monumento" a Giovan Battista Donati*, «Giornale di Astronomia», 4, 2015, pp. 24-33).

scuola pubblica del Seminario e Collegio Arcivescovile di Pisa. Proprio in quegli anni, il padre Pietro diventava vice cancelliere (e poi cancelliere) della Curia stessa. Al Collegio, detto di Santa Caterina, Giovanni Battista studiò italiano e latino; per la geometria, invece, fece studi personali con Giuseppe Tabani, direttore di un Istituto privato. L'insegnante rimase sorpreso dal talento mostrato dal giovane nel risolvere problemi di geometria e matematica.⁶ Pietro Donati assecondò volentieri questa inclinazione del figlio maggiore, malgrado forse avesse preferito che seguisse le orme della professione familiare: si consolerà comunque con gli altri figli, Giuseppe e Carlo, che diventeranno, rispettivamente, sostituto procuratore generale e notaio.

Grazie al governo del granduca Leopoldo II (1797-1870), la Toscana di quegli anni stava avviando un processo di ammodernamento e liberalizzazione, visto con favore dai fautori di un'Italia unita. Un esempio di questo corso fu la prima Riunione degli scienziati italiani, tenutasi a Pisa nel 1839 (e la terza

⁶ In un altro ricordo narrato dal padre a Silvestro Gherardi, il giovane Donati è raffigurato come una sorta di novello Giotto: «Non potendo partecipare ai soliti giuochi da fanciulli, si divertiva a disegnare figure, il più spesso geometriche, col gessetto sopra una piccola lavagna. Veduti una volta questi disegni dal cel.mo Prof. O. F. Mossotti, ve ne farà subito ottimo presagio per l'infelice fanciullo, ne consigliò e promosse l'istruzione matematica [...]» (Manoscritto di S. Gherardi inviato a G. V. Schiaparelli, ottobre 1873, Archivio storico dell'Osservatorio astronomico di Brera, «Corrispondenza Scientifica», cart. 146, n. 42). In realtà, come rettificò in seguito Celestino Schiaparelli, Ottaviano Fabrizio Mossotti, futuro professore di Donati, non risiedeva ancora a Pisa in quel tempo, e il padre l'aveva confuso con un altro *Cimabue* (lettera a Giovanni Virginio Schiaparelli, Firenze, 13/12/1873, INAF - Archivio storico dell'Osservatorio astronomico di Brera, «Corrispondenza Scientifica», cart. 146, n. 45).

tenuta a Firenze nel 1841). L'Università stessa di Pisa si rinnovò, su impulso del Provveditore (e poi Soprintendente agli Studi del Granducato di Toscana) Gaetano Giorgini (1795-1874), matematico e ingegnere. Furono chiamate all'insegnamento figure illustri in vari campi del sapere, anche dall'"estero", come il romagnolo Carlo Matteucci (1811-1868), noto internazionalmente per le sue ricerche di fisica ed elettrofisiologia; e altre già «compromesse» per le loro idee, come il matematico, fisico e astronomo Ottaviano Fabrizio Mossotti (1791-1863) che, invisato alla polizia austriaca dopo i moti del 1820-21, aveva passato lunghi periodi fuori d'Italia. Oltre all'ampliamento del corpo docente, nel 1840-41 la riforma Giorgini vide una riorganizzazione delle facoltà e l'introduzione di nuovi corsi di laurea che attirarono a Pisa un gran numero di studenti. Fra le nuove lauree c'era quella in Scienze matematiche applicate, una sorta di antesignana di Ingegneria,⁷ che ebbe un gran numero di iscrizioni,⁸ come ogni altro corso dopo la riforma, aveva una durata di cinque anni.

Proprio a Matematiche applicate si iscrisse il diciassettenne Giovanni Battista, non prima, però di aver superato gli esami di ammissione in «lingua latina e retorica» e in geometria e aritmetica nel novembre 1843, poco prima dell'inizio dell'anno accademico 1843/44.⁹ Nel suo primo anno, Donati frequentò due corsi che erano obbligatori per ogni tipo di laurea: Filosofia Razionale, insegnata da Luigi Corradini (1794-1864) della Facoltà di Filosofia e Filologia (ovvero Lettere); e Fisica, materia della Facoltà di Scienze Naturali, insegnata da Matteucci. Matteucci, però, aveva quell'anno preso un congedo per malattia¹⁰ e l'insegnamento era affidato ad un altro fisico, Luigi Pacinotti (1807-1889). Le altre due materie del primo anno erano Algebra, insegnata da Giuseppe Doveri (1792-1857), e Geometria

⁷ I corsi di studio previsti dalla riforma Giorgini per le Università di Pisa e Siena erano regolamentati dalla «Notificazione» del 2/6/1841, pubblicata in T. MOZZANI, *L'Università degli Studi di Siena dall'anno 1839-40 al 1900-901*, Siena, 1902, pp. 18-26. Con un'ulteriore Notificazione del 4/4/1845, venne modificato il regolamento del corso di Scienze matematiche applicate, il Granduca «volendo provvedere alla migliore istruzione di quei Giovani che desiderano d'essere insigniti del titolo d'Ingegnere Laureato» (Archivio di Stato di Pisa, Fondo 13bis, Università di Pisa, II versamento – da qui semplicemente ASPI 13bis – Regolamenti, notificazioni e circolari dal 1814 al 1859, Sez. A.II.7, n. 31).

⁸ D. BARSANTI, *Il corpo studentesco*, in *Storia dell'Università di Pisa*, Vol. 2*, 1737-1861, Università di Pisa, Edizioni Plus, 2000, pp. 1005-44.

⁹ L'esame di latino era sia orale che scritto: a Donati toccò in sorte la traduzione di un brano dell'Eneide. I verbali di tutti gli esami di Donati, da quello di ammissione, a quello finale di laurea e alla cerimonia di conferimento del titolo di dottore, si trovano in ASPI 13 bis, Processi verbali di esami e lauree nelle diverse facoltà, da D.I.174, Anno Accademico 1842/43, a D.I.179, Anno Accademico 1847/48. Per l'ammissione si richiedevano anche, oltre ad una certificazione sugli studi pre-universitari, un certificato di buona condotta rilasciato dal parroco ed un certificato di assenza di condanne e procedimenti legali. Per i primi due, le firme dei dichiaranti furono vidimate dal vice cancelliere arcivescovile, il padre Pietro, appunto (*ibidem*, Sez. D.I.2, Documenti per l'ammissione agli studi, anno scolastico 1842-43).

¹⁰ Si veda F. TOSCANO, *Per la scienza, per la patria: Carlo Matteucci, fisico e politico nel Risorgimento italiano*, Sironi, 2011.

e Trigonometria, da Guglielmo Martolini (1810-1885).¹¹ Queste due cattedre appartenevano invece alla Facoltà di Scienze matematiche (come le altre successive, quando non specificato altrimenti), e costituivano materia d'esame per ottenere il titolo di Baccelliere, necessario per passare al secondo anno.

Al secondo anno il regolamento prevedeva la continuazione delle lezioni di Algebra, sempre con Doveri, e Fisica, questa volta con il titolare Matteucci; c'erano poi Geometria Analitica con Pietro Obici (1804-1849) e Chimica con Raffaele Piria (1814-1865), della Facoltà di Scienze Naturali.¹² Nell'anno accademico 1845/46, il terzo, Donati seguì Geometria descrittiva, con Martolini, Calcolo differenziale e integrale, con Giovanni Maria Lavagna (1812-1870) e Fisica tecnologica e Meccanica sperimentale, con Luigi Pacinotti; le ultime due materie continuavano anche al quarto anno, e a queste si aggiungeva Matematiche applicate alla Meccanica e all'Idraulica, insegnata all'inizio dal titolare della cattedra, Obici, e poi portata a termine da Mossotti in vece di supplente. Infine, nell'ultimo anno d'università, il 1847-48, Donati seguì la seconda parte di Matematiche applicate, sempre con Mossotti supplente, insieme ad un altro corso di cui Mossotti era titolare, Fisica Matematica, Meccanica Celeste e Geodesia, e infine Istituzioni Fisico Matematiche dell'arte dell'ingegnere, con Martolini.

Del Donati studente universitario ci viene raccontato che sapeva ben organizzarsi nello studio, dedicando a questo un tempo non eccessivo «perché la sua salute ancora malferma non consentivagli una troppo lunga applicazione e perché mai fu alieno dalle oneste ricreazioni e dai guadagnati riposi che gli erano anche consigliati dalla famiglia e dai medici». Gli studenti dovevano affrontare un esame al termine di ciascun anno, come già visto per quello di Baccellierato del primo anno. Gli argomenti d'esame erano estratti a caso e riguardavano le materie insegnate nel corso dell'anno; i professori esaminatori, in numero di tre, erano quelli che effettivamente insegnavano le materie. Donati fu un ottimo studente, e passò tutti gli esami con piena approvazione dei tre esaminatori, ottenendo anche

«il plauso» (la lode), ma sempre «alla pluralità dei due terzi dei votanti» (ovvero con due professori favorevoli e uno contrario).¹³ Giovanni Battista non solo studiava le materie universitarie, ma anche inglese e francese, e aiutava inoltre i suoi colleghi più giovani nella preparazione degli esami, «opera nella quale fu visto ben volentieri esercitarsi dai suoi professori per la utilità manifesta che ne ritrovavano gli alunni». Trovò anche tempo per studiare musica e divenne «un suonatore discreto di violino».

Proprio con il violino sembra si stesse trastullando la mattina dell'8 giugno 1848, prima di recarsi a sostenere l'esame finale per ottenere la laurea dottorale: a chi, fra i suoi familiari, gli faceva notare che il tempo stringeva, Giovanni Battista rispose che non c'era da preoccuparsi: le scienze da lui studiate erano non a caso chiamate esatte, «talché occorreva invero non ritardare né manco anticipare di un attimo il presentarsi per divenire dottore». L'esame iniziò alle 9:30 e vide il futuro astronomo primo di tre candidati. Come da regolamento, l'esame era pubblico e dovevano essere presenti tutti i professori della Facoltà. Fra questi, ne venivano scelti quattro, che esaminavano il candidato su argomenti estratti a caso riguardanti le materie d'esame: per la laurea in Matematiche applicate erano Fisica tecnologica e Meccanica sperimentale, Matematiche applicate alla Meccanica e all'Idraulica, Istituzioni Fisico Matematiche dell'arte dell'ingegnere.¹⁴ Gli esaminatori erano i già incontrati Lavagna e Doveri (che era anche priore, ovvero preside, della Facoltà), poi Gaspare Botto (1811-1892) nuovo titolare di Geometria analitica, e infine il matematico Giovanni Barsotti (1799-1870) che generalmente viene indicato come titolare del corso di Matematiche applicate alla Meccanica e all'Idraulica dopo la morte di Obici a partire dall'anno accademico 1849-50, ma che evidentemente era già stato assunto all'Università. Donati ottenne l'approvazione all'unanimità, ma questa volta senza plauso (solo 2 voti favorevoli su 4). Nel primo pomeriggio dello stesso giorno, nel Palazzo arcivescovile di Pisa, si tenne la *collazione di laurea*: fu Barsotti a conferire, a Donati e ad altri 14 studenti di scienze matematiche applicate, le insegne dottorali.

Non erano sicuramente presenti all'esame e alla *collazione* quei professori che più influirono sulla carriera di Donati: Mossotti, Pacinotti e Matteucci. Questi erano infatti partiti nell'aprile precedente

¹¹ La frequenza dei corsi era obbligatoria e verificata durante ogni anno accademico. Dalle «note degli scolari intervenuti [...] alle lezioni» (ASPI 13bis, Sez. D.I. 144-148) si possono accertare i corsi frequentati da Donati ed eventuali osservazioni sul suo profitto: ad esempio, nonostante Corradini lamentasse la scarsa partecipazione degli studenti di matematica alle sue lezioni di Filosofia Razionale, Donati è ricordato come «molto studioso». I corsi seguiti nei primi due anni sono quelli indicati nel regolamento del 1841, mentre quelli dal 1845/46 seguono le modifiche introdotte nel 1845 per gli studenti che già avevano iniziato gli studi di matematiche applicate (cit. nota 7). Nel 1843-44, Donati risulta inoltre aver seguito un altro corso della Facoltà di Filosofia e Filologia, quello di Letteratura con Flaminio Severi (1810-1860), non previsto dai regolamenti.

¹² Dal secondo all'ultimo anno Donati frequenta anche classi di Esercizi di Disegno all'Accademia delle Belle Arti di Pisa, previste dai nuovi regolamenti del 1845 e certificate nei registri di presenza dal direttore dell'Accademia, l'architetto e ingegnere Alessandro Gherardesca (1777-1852).

¹³ Per le procedure di esame adottate nelle Università di Pisa e Siena si veda anche T. MOZZANI, *L'Università degli Studi di Siena* (cit. nota 7).

¹⁴ Materie, quindi, più da ingegnere che da scienziato come Donati sarebbe poi diventato. Da notare comunque che la laurea, più teorica, in Scienze matematiche e fisiche, seguiva un corso di studi quasi identico, con l'eccezione delle materie dell'esame finale: al posto di Fisica Tecnologica e Meccanica Sperimentale, Fisica Matematica e Meccanica Celeste; invece di Istituzioni Fisico Matematiche dell'arte dell'ingegnere, Calcolo differenziale e integrale. Era anche possibile, sostenendo due esami finali, ottenere entrambe le lauree, come fece il matematico Enrico Betti (1823-1892) che fu amico di Donati.

per i campi di battaglia lombardi della Prima Guerra d'Indipendenza: Mossotti e Pacinotti, rispettivamente, comandante e capitano di compagnia del Battaglione Universitario di volontari toscani; Matteucci come commissario civile per il governo granducale, che almeno inizialmente appoggiò l'iniziativa. Una decina di giorni prima, il 29 maggio, il Battaglione Universitario, insieme a truppe regolari toscane e del Regno delle due Sicilie, aveva combattuto a Curtatone e Montanara contro gli austriaci riuscendo solo a rallentarne l'avanzata, permettendo però poi la vittoria piemontese a Goito. Invece, Matteucci manteneva i contatti fra la Toscana, il Regno di Sardegna e i ribelli lombardi. Ritornarono tutti in Toscana solo nella seconda metà di giugno. Gli eventi si susseguirono poi velocemente: il Granduca – ritornato sotto l'ala asburgica – fuggì a Gaeta a inizio 1849 e l'esercito austriaco, vittorioso in Lombardia e Piemonte, invase la Toscana in maggio, ponendo fine ad un'effimera repubblica. Con il ritorno di Leopoldo II a Firenze, nel luglio 1849, ebbe fine la parentesi liberale che tanto aveva giovato, fra le altre cose, al progresso dell'Università di Pisa.

Nonostante questi frangenti, ci possiamo comunque immaginare il nostro futuro astronomo, fresco dottore, intento a cercarsi un'occupazione. All'inizio dei suoi studi universitari il regolamento prevedeva che i dottori in scienze matematiche applicate potessero fregiarsi del titolo di «Ingegnere laureato», necessario per concorrere ad impieghi nel «Corpo degl'Ingegneri d'Acque e Strade» (il Genio civile del Granducato). Purtroppo per il nostro, però, le nuove disposizioni del 1845 richiesero in aggiunta la frequenza di due anni dell'Accademia delle Belle Arti di Firenze: solo i laureati fino alla fine del 1847 potevano far valere le vecchie prescrizioni. Nel gennaio 1849 Donati, insieme ad alcuni compagni di corso, provò a far ricorso contro queste nuove regole, ma invano.¹⁵

A febbraio 1849, secondo il manoscritto, il giovane fu ammesso alla Scuola Normale di Pisa, curiosamente (a meno di errori del padre) a metà anno accademico. La Normale, che aveva lo scopo di formare i professori delle scuole superiori toscane, era stata istituita dal Governo granducale alla fine del 1846 e aveva aperto l'attività nell'anno accademico 1847/48; almeno nel nome, ricalcava l'istituto aperto a Pisa dal governo francese nel 1813 come succursale dell'École Normale di Parigi, e che sopravvisse solo fino alla Restaurazione. La Scuola granducale durava tre anni ed era aperta a studenti che avessero ottenuto almeno la Licenza (titolo conferito con l'esame universitario del terzo anno); il convitto spettava agli studenti di Filologia e Filosofia, mentre quelli di Scienze Fisico-Matematiche erano detti *aggregati* e risiedevano fuori dall'istituto. Modifiche al regolamento nel secondo anno accademico della scuola avevano richiesto la laurea per gli studenti

aggregati in scienze e matematiche, che per accedere dovevano sostenere un esame scritto e uno orale in aritmetica, geometria, trigonometria, algebra e fisica, valutati dai professori di quelle materie all'Università. Una volta ammessi, gli aggregati avrebbero dovuto seguire corsi teorici e laboratori di fisica, chimica e storia naturale, ripetendo quindi in parte e approfondendo gli studi già fatti per ottenere la laurea, sia sotto la guida dei professori Universitari che grazie a professori *Ripetitori* dipendenti dalla Normale stessa. Inoltre, gli studenti dovevano settimanalmente assistere a conferenze ed esercitarsi a insegnare gli argomenti scientifici che facevano parte del programma dei licei e dei ginnasi. Come all'Università, si accedeva all'anno successivo dopo aver superato un esame, mentre quello finale consisteva in un «saggio di magistero pratico», ovvero una serie di lezioni da tenersi in una scuola superiore associata alla Normale.¹⁶

Non è stato possibile trovare altre informazioni certe sul corso di studi di Donati alla Normale, anche se il padre ci fa sapere che «compì gli studi di perfezionamento e magistero e [...] subì gli esami prescritti sempre con pienissimo plauso». Forse faceva parte del percorso alla Normale la frequentazione del laboratorio di Fisica Tecnologica di Pacinotti, dove lo troviamo, almeno nell'anno accademico 1849/50, dedito a confrontare risultati sperimentali sul moto dei fluidi con le formule teoriche. Donati faceva questi esperimenti con Enrico Galli (1820-?), nativo di Pisa e laureato in Matematiche applicate nel 1842, Ripetitore della Normale negli anni 1850/52. Per loro e per altri giovani dottori che frequentavano il suo laboratorio, Pacinotti aveva chiesto una gratificazione.¹⁷ A questo proposito, il padre ricorda che Giovanni Battista «fu caro ai professori che gli furono maestri e in ispecie al prof. Pacinotti che lo tenne per qualche anno a lavorare nel gabinetto da lui diretto di fisica tecnologica. E fu carissimo all'illustre Mossotti», con cui forse durante la Normale ebbe modo di riprendere lo studio della Meccanica Celeste, lezioni già seguite durante l'ultimo anno universitario, ma che probabilmente non aveva approfondito perché non costituivano materia d'esame per la sua laurea «ingegneristica». Comunque siano andate le cose, Donati viene ricordato fra i più illustri alunni della Scuola nel periodo granducale, ottenendo l'abilitazione all'insegnamento nel 1851.¹⁸

Solo a questo punto della vita di Giovanni Battista il manoscritto ricorda «l'ardente suo desiderio di dedicarsi più specialmente allo studio del Cielo»,

¹⁶ Ricaviamo queste informazioni da T. TOMMASI, N. SISTOLI PAOLI, *La Normale nel periodo granducale*, in *La Scuola Normale di Pisa dal 1813 al 1945. Cronache di un'istituzione*, Cap. II, Pisa, ETS, 1990.

¹⁷ C. LUPERINI, Luigi Pacinotti (1807-1889) professore di Fisica dell'Università di Pisa, Tesi di Dottorato in Storia della Scienza, Università di Pisa, AA 2010-11.

¹⁸ Notizie storiche sulla R. Scuola Normale Superiore di Pisa, in *Annali della Scuola Normale Superiore di Pisa, Classe di Scienze*, 1 serie, volume 1, 1871.

¹⁵ *Le Assemblee del Risorgimento, Toscana*, Vol. II, Roma, Tipografia della Camera dei Deputati, 1911, p. 656.



FIG. 3. Giovan Battista Donati in una fotografia probabilmente risalente ai primi anni della sua attività come astronomo. L'immagine, forse ritagliata da una fotografia più grande, è stata pubblicata sulla copertina del volume: G. FODERÀ SERIO E D. RANDAZZO, *Astronomi italiani dall'Unità d'Italia ai nostri giorni: un primo elenco*, Firenze, Società Astronomica Italiana Editore, 1997. Non è stato possibile risalire alla collocazione dell'originale: forse qualcuno dei lettori di questa rubrica può aiutarci a rintracciarlo?

stimolato forse dall'aver ripreso le lezioni con Mossotti. Curioso l'espedito scelto per trovare una professione in astronomia: «Avea pensato per soddisfare tal brama di ricorrere al mare giacché vedeva difficile fuor di una nave il trovar mezzi e modi ad osservazioni astronomiche». Questo primo interesse per l'astronomia nautica, necessaria per la determinazione della posizione e del tempo in mare, evidenzia la sua familiarità e predisposizione per il calcolo matematico. Al fine di essere imbarcato come addetto alla navigazione astronomica, si era fatto presentare al capitano di una nave della marina militare statunitense, probabilmente attraccata nel vicino porto di Livorno, ma non era stato preso a causa dei suoi problemi al ginocchio. Non scoraggiato, aveva intenzione di ritentare con ufficiali di altre marine militari quando Mossotti, «avendo ben conosciuto la forza e l'indole dell'ingegno di Lui si adoperò spontaneamente e riuscì a farlo chiamare a coadiuvare l'Amici nei lavori astronomici dell'Osservatorio del Museo di Firenze». (FIG. 3)

Fu così che, il 1° agosto 1852, Donati venne assunto come apprendista astronomo della Specola di Firenze, allora diretta da Giovanni Battista Amici

(1786-1863). Da allora la sua vita si spostò a Firenze, ma sempre con un occhio ai suoi trascorsi pisani: Mossotti rimase a lungo la sua principale guida scientifica, dai suoi primi lavori di ricerca di comete e calcolo delle loro orbite fino ai pionieristici studi di spettroscopia stellare;¹⁹ Matteucci lo spronò a farsi conoscere pubblicando articoli sulla sua creatura editoriale, *Il Nuovo Cimento*, e da senatore del nuovo Regno d'Italia, Ministro della Pubblica Istruzione e direttore del Museo di Fisica e Storia Naturale di Firenze, lo sostenne nella progettazione del nuovo Osservatorio di Arcetri;²⁰ Luigi Pacinotti, e suo figlio, il più celebre Antonio (1841-1912) – per breve tempo aiuto astronomo a Firenze con Donati – vennero invece coinvolti inizialmente nella creazione di un'officina meccanica per la costruzione di strumenti scientifici (le future Officine Galileo) diretta da Giuseppe Poggiali (1820-1892), meccanico che già aveva collaborato col laboratorio di Fisica Tecnologica pisano, e sotto la supervisione scientifica del nostro astronomo e di Tommaso del Beccaro (1825-1900), suo compagno di studi (e primo della classe!) a Pisa.²¹

IL DOCUMENTO (vedi didascalia FIG. 1)

Lettera di Celestino Schiaparelli a Giovanni Virginio Schiaparelli, Firenze, 6/10/1873, Archivio storico dell'Osservatorio astronomico di Brera, "Corrispondenza Scientifica", cart. 146, n. 43.

Simone Bianchi è primo ricercatore INAF all'Osservatorio Astrofisico di Arcetri. Si occupa dello studio delle polveri nel mezzo interstellare delle galassie a spirale e della loro origine. Si interessa, inoltre, della storia dell'Osservatorio di Arcetri e della sua strumentazione.

Daniele Galli è astronomo all'Osservatorio Astrofisico di Arcetri. Si occupa di formazione stellare e materia interstellare. È attivo anche nella divulgazione dell'astronomia e si interessa alla storia dell'Osservatorio.

Antonella Gasperini: si veda sotto nelle biografie dei curatori.

¹⁹ D. GALLI, A. GASPERINI, S. BIANCHI, *Dalla meccanica celeste alla spettroscopia stellare. Corrispondenza fra Giovanni Battista Donati e Ottaviano Fabrizio Mossotti*, «Atti della Fondazione Giorgio Ronchi», Anno 68, n. 1, 2013.

²⁰ S. BIANCHI, D. GALLI, A. GASPERINI, 'Il primo Osservatorio Astronomico d'Italia'. *La nascita dell'Osservatorio di Arcetri (1861-1873)*, «Il Colle di Galileo», Vol. 1, 1-2, 2012, pp. 55-70.

²¹ C. LUPERINI, *op. cit.*; A. MESCHIARI, *Come nacque l'Officina Galileo di Firenze. Gli anni 1861-1870*, Firenze, Fondazione Giorgio Ronchi, 2005, p. 85.

Agnese Mandrino è responsabile della Biblioteca e dell'Archivio storico dell'Osservatorio Astronomico di Brera a Milano.

Mauro Gargano, laureato in Astronomia presso l'Università di Padova, è primo tecnologo dell'INAF e responsabile del Museo degli Strumenti Astronomici presso l'Osservatorio di Capodimonte, dove si occupa anche di studi storici sull'astronomia e di iniziative per la tutela e la valorizzazione delle collezioni dell'Ente con l'Unità Scientifica Centrale - Valorizzazione della Conoscenza dell'INAF. È segretario della Società Italiana degli Storici della Fisica e dell'Astronomia (SISFA).

Antonella Gasperini è responsabile MAB (Musei Archivi Biblioteche) della USC INAF Valorizzazione della conoscenza. È coinvolta in molte iniziative e progetti per la conservazione e la valorizzazione del patrimonio storico astronomico italiano ed è autrice di pubblicazioni di storia dell'astronomia.

Presentazione

No, non scriveremo di omini verdi con le antenne, e nemmeno dei progetti umani di *terraforming*. L'obiettivo di questa rubrica è portare alla luce antichi tesori dimenticati – ancora no, non il misterioso volto su Marte o tracce di un ipotetico DNA extraterrestre, ma un nucleo ben solido e inconfutabile di romanzi utopici americani di fine Ottocento-inizi Novecento che, dopo molti anni di oblio, tornano oggi a sorprenderci con le loro acute osservazioni, con i loro legittimi timori, con la loro competenza tecnologica. Sono storie che parlano di società-modello sul Pianeta Rosso, di alieni generosi e gentili, di parità di genere, di pace, di esseri umani disposti ad ascoltare consigli su come evitare l'autodistruzione del proprio pianeta. Parole come invasione, colonizzazione, terraformazione, sono del tutto assenti. Al contrario, si parla di stelle, astri, pianeti, telescopi, in modo tale che la scienza si traduce in divulgazione e la divulgazione in narrazione, mettendo in luce l'importanza culturale, simbolica e sociale dell'astronomia nella costruzione dell'identità e nella definizione di umanità.

La nostra sarà un'esplorazione dell'immaginario: i romanzi verranno analizzati dal punto di vista di un'utopia cosmica che vede i vari pianeti (e soprattutto Marte) dialogare con le scienze applicate, la radio, le sedute spiritiche, la religione, il progresso urbano sostenibile e istanze profemministe. Contrariamente a quanto si potrebbe credere, Marte è presente nei testi di numerosi autori e autrici da molto prima che nascesse la fantascienza. Nello specifico, si parla già di Marte nell'Ottocento e addirittura uno dei primi romanzi che vedremo è scritto da due donne, e questo sfata un luogo comune, ovvero che l'utopia e la fantascienza siano generi prevalentemente se non esclusivamente maschili. Uno dei primi studi di un certo spessore è quello di Vernon Louis Parrington,¹ che comprende nell'edizione del 1964 anche una sezione intitolata *Mars and Utopia*. In seguito, Lyman Tower Sargent² tentò un confronto tra le utopie britanniche e quelle americane, citando fra i temi ricorrenti i diritti delle donne, la condanna del capitalismo (senza che prevalga necessariamente la propaganda socialista), la

religione, la convinzione che la tecnologia possa aiutare (e non contrastare) l'utopia, l'importanza dell'educazione, la paura della corruzione in una società democratica.

Se nella letteratura popolare (americana) di fine Ottocento Marte si poneva come una terra utopica, nella realtà si stavano già gettando i primi semi di proseguimento (seppur nello Spazio) della conquista del territorio da parte dei coloni e degli immigrati nel Nuovo Mondo. Come hanno bene evidenziato Bignami e Sommariva³ nel 2015, il progetto di terraformare Marte «è simile [...] a quello adottato dai padri pellegrini per il finanziamento della colonia del Massachusetts». In ogni caso, è ben chiaro a tutti che gli americani, guidati in epoca puritana dall'*errand* (missione) – «*wee shall be made a story and a by-word through the world*», dichiarò John Winthrop nel 1630⁴ – e in epoca repubblicana dal *Manifest Destiny* (l'espressione fu coniata nel 1845 dal giornalista John O'Sullivan sulla *Democratic Review*), e passando attraverso la *transplantation* (con cui nel Settecento J. Hector St. John de Crèvecoeur suggerì la nuova "razza" nata nel grembo dell'Alma Mater d'America)⁵ e la grande epopea del West (la Frontiera, la corsa all'oro), a fine Ottocento devono ricalcolare il progetto espansionistico su scala verticale (i grattacieli, la corsa allo Spazio) e mondiale (le guerre mascherate da esportazione della democrazia o missioni di pace). Così riconvertiti, i pionieri diventano tecnici, politici e astronauti... e dopo la Luna, l'obiettivo più vicino è Marte.

Ma andiamo per ordine. Sulla scia di *Eureka* di Edgar Allan Poe (1848),⁶ e grazie alle osservazioni degli astronomi, dilaga negli anni a seguire una vera e propria "Mars Mania". Non può stupirci: nel 1877 Asaph Hall scopre i due satelliti di Marte e, nel frattempo, Percival Lowell fonda il suo Osservatorio a Flagstaff, in Arizona: per quindici anni si dedica a osservare il Pianeta Rosso, e sarà sepolto su questa stessa collina nel 1916. È vero, prende qualche abbaglio a causa della traduzione sbagliata dei "canali" di Schiaparelli, ma si può solo immaginare l'euforia dei lettori che nel 1909 si trovarono in mano un volume intitolato *Mars and Its*

³ GIOVANNI BIGNAMI, ANDREA SOMMARIVA, *Oro dagli asteroidi e asparagi da Marte*, Milano, Mondadori, 2015, pp. 114-15.

⁴ JOHN WINTHROP, *A Model of Christian Charity* (1630), in <http://history.hanover.edu/texts/winthmod.html>.

⁵ JOHN HECTOR ST. JOHN DE CRÈVECOEUR, Letter III, *What Is an American*, in *Letters from an American Farmer* (1782), <http://xroads.virginia.edu/~hyper/CREV/letter03.html>.

⁶ Si veda nel sito degli *Incontri* del «Giornale di Astronomia» l'incontro del 25 maggio 2023 con ALBERTO CAPPI, *La cosmologia moderna di Edgar Allan Poe*: www.youtube.com/watch?v=NlOC_X866F4.

* Inizierà dal prossimo anno questa nuova rubrica, i cui contenuti sono descritti dalle autrici in questa presentazione.

¹ VERNON LOUIS PARRINGTON, *American Dreams. A Study of American Utopias* (1947), Russell & Russell 1964.

² LYMAN TOWER SARGENT, *English and American Utopias: Similarities and differences*, «The Journal of General Education», 28, 1, Spring 1976, pp. 16-22.

Canals e dedicato a «G. V. Schiaparelli, the Columbus of a New Planetary World». K. M. Doyle Lane⁷ si è occupata in modo approfondito degli astronomi americani (e in particolare di Lowell e del suo influsso sulla cultura popolare americana tra Ottocento e Novecento), sottolineando la loro creazione di una geografia fisica e culturale di Marte.

Inoltre, sia gli scrittori sia gli scienziati utilizzarono Marte come arena su cui proiettare le preoccupazioni geofisiche, climatologiche e anche socioeconomiche che iniziavano ad affliggere il nostro pianeta. È così che, a fine Ottocento, prima che le fotografie satellitari mostrassero una cruda realtà fatta di territori desertici e rocciosi, alcuni scrittori e scrittrici scelsero Marte come luogo su cui far convergere tutto ciò che il genere umano rischiava di perdere o non aveva ancora ottenuto. Scelsero cioè di raffigurare il Pianeta Rosso assecondando la loro immaginazione, i loro desideri, le loro istanze politiche. Nulla a che vedere, insomma, con la letteratura che sarebbe venuta dopo – quella di *Astounding Stories*, delle saghe interplanetarie, delle invasioni, delle guerre interstellari.

I romanzi che vedremo (pubblicati da fine Ottocento ai primi anni del Novecento) sono un ponte non solo fra passato e presente (futuro?) ma anche fra il cielo così come viene visto, studiato, esplorato dalla scienza e come invece viene descritto e narrato nella “finzione” letteraria popolare. In quanto appartenenti a un’epoca priva dei media che oggi conosciamo (fatta eccezione per i giornali e gli almanacchi), costituiscono una potente testimonianza del pensiero, delle

speranze e delle ansie che accompagnarono un periodo molto vivace per quanto riguarda le invenzioni e le sperimentazioni scientifiche. Accanto al progresso tecnologico, tuttavia, si sviluppavano le teorie pseudoscientifiche, lo spiritismo, lo spiritualismo, il creazionismo, l’omeopatia, l’antropologia razziale, e tutto confluisce in questi scritti dove la planetologia diventa un modo di affrontare il cambiamento sociale e di gestire le sfide di una civiltà in continua evoluzione. Inoltre, il dibattito sui canali aveva acceso gli animi: come ricorda Fusco,

La notizia di canali artificiali sulla superficie di Marte eccitò moltissimo la fantasia popolare e si cominciò immediatamente a parlare di civiltà evolute e intelligenti che abitavano il pianeta rosso. Contagiati dalla stessa euforia, anche illustri studiosi sostennero l’esistenza di civiltà aliene che, per sopperire ai loro problemi di siccità, avrebbero realizzato imponenti opere di ingegneria idraulica per trasportare l’acqua dalle zone polari a quelle equatoriali di Marte.⁸

Apriranno la rubrica i primi due volumi (in ordine cronologico), *Mars Revealed, or Seven Days in the Spirit Worlds* (anon. – Henry Gaston 1880) e *Bellona’s Husband* di Hudor Genone (pseudonimo di William James Roe 1887) e il progetto coprirà diversi anni, generi, stili, ma entro i confini della letteratura utopica ambientata nello Spazio, in particolare su Marte, ovvero senza sfiorare nella fantascienza, nel fantasy, nella distopia o nel sensazionalismo. Saranno invece inclusi i tre testi dell’astronomo Percival Lowell, che, pur non appartenendo alla *fiction*, rivestono un ruolo di primo piano nell’immaginario – non solo scientifico – del tempo.

Sarà un piacere accompagnarvi nell’osservazione e nell’esplorazione di questi luoghi non troppo immaginari!

⁷ KRISTINA MARIE DOYLE LANE, *Imaginative Geographies of Mars: The Science and Significance of the Red Planet, 1877-1910*, M. A. Dissertation, Supervisor Ian R. Manners, The University of Texas at Austin, August 2006.

⁸ SILVANO FUSCO, *La falsa scienza*, Roma, Carocci, 2013, p. 28.

Simonetta Badioli (Francia), dott.ssa in Lingue e letterature straniere e traduttrice, ha una Laurea magistrale in Traduzione editoriale ed è appassionata di Letteratura angloamericana e in particolare di femminismo e *gender studies*. Attualmente iscritta a un corso di Laurea in Scienze e tecniche psicologiche, ha un Master di primo livello in Disturbi della personalità. È autrice e traduttrice professionista per diverse case editrici. Nel 2021 ha curato per Le Lettere l’edizione italiana di *Paralleli pericolosi* di Alice Ilgenfritz Jones ed Ella Merchant (titolo originale: *Unveiling a Parallel. A Romance*, 1893), il primo romanzo americano interamente ambientato su Marte, da cui insieme ad A. Calanchi ha tratto una performance tenutasi al festival “Sci Fi Universe” a gennaio 2026: <https://scifiuniverse.it/sci-fi-universe-2026/fotogallery/#sabato>; <https://scifiuniverse.it/2025/11/25/il-primo-romanzo-marziano-alla-sci-fi-universe-2026-con-simonetta-badioli-e-alessandra-calanchi/>. Sempre insieme ad Alessandra Calanchi, e con il supporto prezioso di Valerio Malimpensa, ha fondato il canale YouTube “womencomingfrommars”, www.youtube.com/@donnechevengonodamarte. (simonettabadioli66@gmail.com)

Alessandra Calanchi (Italia), PhD, docente universitaria di Letteratura angloamericana, ha dedicato gran parte dei suoi studi più recenti alle rappresentazioni letterarie del pianeta Marte. Le sue pubblicazioni in questo ambito includono alcuni volumi (vedi sotto) e i seguenti saggi: “An Eco-Critical Cultural Approach to Mars Colonization”, with A. Farina and R. Barbanti, in *Forum for World Literatures Studies*, June 2017; “Eco-men from the Outer Space? Mars and Utopian Masculinities in the *fin-de-siècle*”, in R. Cenamor, ed, *Ecomasculinities in Real and Fictional North America: The Flourishing of New Men*, 2019; “Green Studies for the Red Planet? A lesson from the past”, in R. Ferrari e L. Giovannelli (eds) *A Green Thought in a Green Shade*, 2020; “An Interplanetary Transplantation, or Reloading the Anthropocene on the Red Planet”, in *Green Letters. Studies in Ecocriticism*, 2021; “De-colonizing the Earth to Re-enact Colonialism on Mars. New Forms of ‘Transplantation’ in Outer Space”, in *Iperstoria*, 22/2023; “Out of Exception, into Emergency: Fast-forward to Earth Zero”, in *RSA Journal. Sites of Emergency. States of Exception*, 2022; “Fin de Siècle, Fin du Globe: Mars Invaders and the End of Beauty as a Transatlantic Phenomenon”, in *Synergies*, 4/2023; “‘Renewed in health’: Meeting Giordano Bruno on planet Mars”, *Between*, 27/2024. Ha partecipato a diversi convegni della Mars Society e di Ascolta (INAF). Volumi: www.amazon.it/Marziani-stelle-strisce-1969-2019-primi/dp/8899913781; www.mimesisedizioni.it/libro/9791222305363. (alessandra.calanchi@uniurb.it)

Simmetrie e leggi di conservazione: il teorema di Noether. Storia di una donna straordinaria

Annibale D'Ercole

IL concetto di simmetria è familiare a ciascuno di noi (p.e., riconosciamo facilmente la simmetria di un fiocco di neve), tuttavia, se dovessimo esprimerlo in maniera coerente e generale saremmo in difficoltà. Una definizione di simmetria con queste caratteristiche è stata data dal grande matematico (e non solo) Hermann Weyl (1885-1955): una cosa è simmetrica se è possibile apportarvi qualche cambiamento lasciandone immutato l'aspetto. Un semplice esempio è dato dal cerchio raffigurato in FIG. 1a che, anche se ruotato attorno al suo centro di un angolo θ , mantiene la stessa configurazione e possiede, pertanto, una simmetria rotazionale; tale simmetria è detta *continua* perché vale per qualunque valore di θ . Al contrario, il triangolo equilatero in FIG. 1b ha una simmetria valida solo per rotazioni con angoli multipli di 120° .

Applicando la definizione di Weil possiamo introdurre le simmetrie non solo nella geometria ma anche nella matematica. Se ad esempio operiamo un cambiamento in un'equazione senza che si producano differenze, l'equazione può dirsi simmetrica. Consideriamo l'equazione $y = x$; dopo aver operato il cambio di segno di x , otteniamo $y = -x$. Ovviamente le due equazioni sono diverse. Se però consideriamo l'equazione $y = x^2$, il cambio di segno non



Emmy Noether, circa 1900-1910, autore sconosciuto. (cortesia: Emiliana e Monica Noether)

produce alcun effetto giacché $y = (-x)^2 = x^2$. Possiamo allora dire che questa equazione è simmetrica rispetto al cambio di segno di x (si veda la FIG. 2).

La definizione di Weil ci permette di applicare il concetto di simmetria anche in campo fisico. Immaginiamo di effettuare un determinato espe-

* Questa rubrica – iniziata nel 1999, e che ha superato i 100 numeri – si propone di presentare in modo sintetico e, per quanto possibile, autoconsistente argomenti che stanno alla base della conoscenza astronomica, spesso trascurati nella letteratura divulgativa, in quanto ritenuti di conoscenza generale oppure troppo difficili o troppo noiosi da presentare a un pubblico non specialistico. Questi “fondamenti di astronomia”, volutamente trattati in uno spazio limitato, possono essere letti a due livelli; eventuali approfondimenti per i lettori che desiderino ampliare la conoscenza dell'argomento vengono esposti in carattere corsivo e incorniciati. Si suggerisce questa rubrica, quindi, a studenti dei vari tipi e livelli di scuole. Le *Spigolature astronomiche* si possono trovare anche in rete, nel sito Web del *Giornale di Astronomia*, <http://giornaleastronomia.difa.unibo.it/giornale.html>.

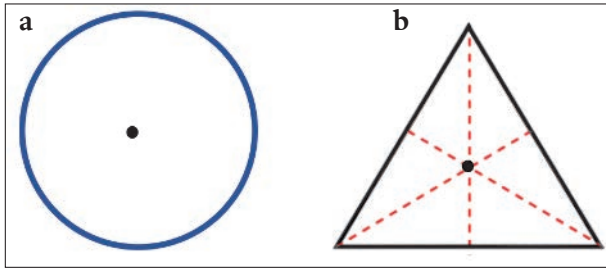


FIG. 1. Due semplici esempi di simmetria geometrica. a) Il cerchio mostra sempre lo stesso aspetto per un valore qualunque dell'angolo di rotazione θ attorno al suo centro. b) Il triangolo equilatero possiede angoli di 60° e l'incrocio delle sue bisettrici (linee rosse tratteggiate) individua il suo baricentro rispetto al quale ha una simmetria per rotazione per angoli che siano multipli di 120° , ossia $\theta = n \times 120^\circ$ (dove n è un numero intero). Il cerchio ha anche una simmetria assiale (o di riflessione) rispetto ad un qualunque diametro mentre il triangolo ha una simmetria assiale rispetto a ciascuna delle bisettrici.

rimonto e di ripeterlo dopo aver traslato altrove il nostro apparato sperimentale; in entrambi i casi otteniamo lo stesso risultato. Questo significa che le leggi della fisica non cambiano, e dunque sono *simmetriche per traslazione*. Se invece di traslare il nostro apparato sperimentale lo ruotiamo, p.e. di 90° , di nuovo otteniamo lo stesso risultato e dunque le leggi fisiche sono anche *simmetriche per rotazione*. Come ultimo esempio, supponiamo di ripetere l'esperimento dopo un certo lasso di tempo; avremo ancora lo stesso risultato a dimostrazione che le leggi della fisica sono anche *simmetriche rispetto a "traslazioni" temporali*.

Quanto abbiamo appena detto è certamente vero ma risulta alquanto generico. Per capire meglio l'effetto della presenza (o della mancanza) di simmetria in un contesto fisico consideriamo la FIG. 3 in cui sono raffigurati tre semplici esempi collegati a tre leggi fondamentali che si applicano a sistemi fisici isolati (in mancanza di attrito): la *conservazione della quantità di moto*, del *momento angolare* e dell'*energia*.

Immaginiamo di impartire una velocità iniziale v ad una palla da biliardo di massa m conferendogli pertanto una quantità di moto $q = mv$ (FIG. 3a). Se il tavolo è perfettamente liscio e privo di attrito, la quantità di moto e l'energia (cinetica) $K = 0.5mv^2$ si conservano; inoltre la traiettoria rettilinea della palla è indipendente dal fatto che il punto di partenza sia x_1 oppure x_2 . Se invece il tavolo è vecchio e malandato e presenta qua e là delle imperfezioni, la palla non seguirà una traiettoria rettilinea e, pur mantenendo lo stesso valore di velocità e di energia (l'ipotesi di assenza di attrito rimane valida), la sua quantità di moto non rimarrà invariata¹ (FIG. 3a'). È importante notare, per quel che diremo in seguito, che in questo caso l'andamento della quantità di moto e della traiettoria variano al variare del punto di partenza.

¹ Ricordiamo che l'impulso è un vettore e per rimanere costante è necessario che non varino né il valore della velocità né la direzione del moto.

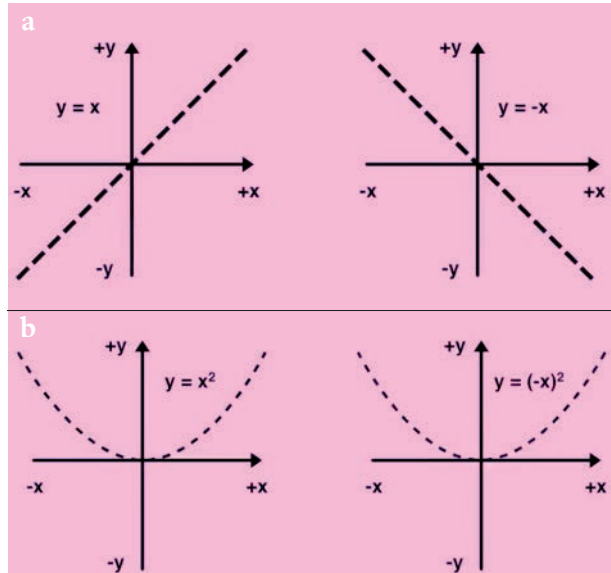


FIG. 2. Simmetrie in matematica. a) La funzione $y = x$ cambia se ad x si sostituisce $-x$. b) La funzione $y = x^2$ non cambia a seguito della stessa sostituzione e dunque è simmetrica (relativamente all'asse delle ordinate) rispetto al cambio di segno $x \rightarrow -x$.

La FIG. 3b illustra un tavolo privo di attrito al cui centro è posto un perno collegato ad una estremità di una sottile asta di lunghezza r libera di ruotare attorno ad esso. All'estremità opposta l'asta è collegata ad un oggetto di massa m al cui confronto la massa dell'asta è trascurabile. Una volta impartita inizialmente una velocità v all'oggetto, esso continuerà a seguire una traiettoria circolare mantenendo costante la sua velocità angolare $\omega = v/r$. Durante il moto vengono conservate l'energia (cinetica) $K = 0.5mv^2$ e il momento angolare $L = mrv$. Se il piano è inclinato (FIG. 3b') la velocità e l'altezza da terra h dell'oggetto variano lungo il percorso, ma l'energia totale $E = K + U$ si conserva, con l'energia potenziale pari a $U = mgh$ (dove $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità); il momento angolare L , invece, non è costante e varia continuamente in accordo con la variazione di v .

Veniamo infine alla FIG. 3c. Vi è raffigurato un pendolo che, in assenza di attrito al perno a cui è appeso, oscilla trasformando continuamente energia cinetica in energia potenziale (e viceversa) ma mantenendo costante l'energia totale $E = K + U$. Immaginiamo di interrompere le oscillazioni e di far ripartire il pendolo ad un tempo $t_2 > t_1$. A parità di ampiezza iniziale l'energia del pendolo rimarrà la stessa di quella che il pendolo aveva in precedenza. Se però, per qualche motivo (p.e. ossidazione), sulla superficie del perno nel tempo si sono prodotte delle scabrosità (sia pure microscopiche), le oscillazioni partite a t_2 si smorzano progressivamente per via dell'attrito e l'energia del pendolo non si conserva.²

Sebbene gli esempi esposti possano sembrare banali, essi rivelano qualcosa di profondo. Per poterlo

² Naturalmente l'energia meccanica persa dal pendolo viene dissipata sotto forma di calore a causa dell'attrito.

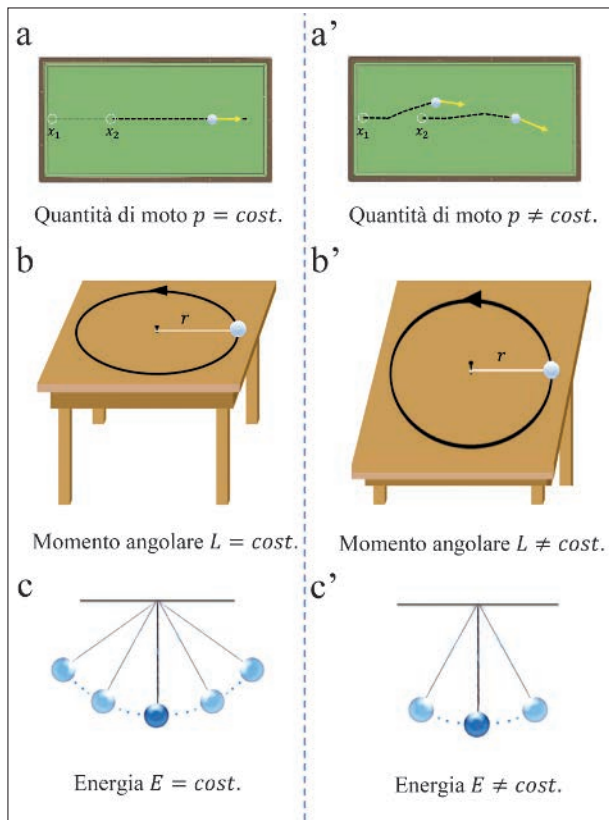


FIG. 3. Simmetrie in fisica. Nei pannelli a sinistra (a, b, c) sono illustrate tre situazioni in cui si evidenzia, nell'ordine, la conservazione di q , L ed E come conseguenza, rispettivamente, di simmetria rispetto alla traslazione spaziale (omogeneità dello spazio), alla rotazione (isotropia dello spazio) e alla traslazione temporale. Nei pannelli di destra (a', b', c') queste simmetrie sono assenti e le conservazioni delle quantità fisiche sopra elencate vengono a mancare.

capire è necessario guardare a tali esempi con uno sguardo diverso e ricorrere ad un diverso paradigma.

Torniamo alla FIG. 3a. Traslare il punto di partenza da x_1 a x_2 non altera q e questo, in base alla definizione di Weil, significa che la *quantità di moto rimane la stessa perché questo sistema fisico è simmetrico per traslazioni*. Questa "indifferenza" rispetto al punto di partenza deriva dal fatto che tutti i punti sono uguali, ossia che lo spazio è *omogeneo*. Nel caso illustrato in FIG. 3a' il tavolo è usurato; pertanto lo spazio è *disomogeneo*, non vi è più simmetria e q non si conserva.

Analogamente, la continua variazione di direzione dell'asta durante la rotazione mostrata in FIG. 3b non altera il valore di L e pertanto il *momento angolare è costante perché questo sistema fisico è simmetrico per rotazioni*. In altre parole, non esiste una direzione preferita e l'universo è lo stesso in ogni direzione, ossia è *isotropo*.³ Se lo spazio avesse una direzione privilegiata che frena o accelera la rotazione, non ci sarebbe simmetria e il momento angolare non sarebbe costante; questo è quello che accade nella metafora del piano inclinato illustrato in FIG. 3b'.

Giungiamo infine alla FIG. 3c. L'esperienza ci dice che nulla cambia nel comportamento del pendolo se lo facciamo "partire" oggi o domani; pertanto

³ In cosmologia l'isotropia implica l'omogeneità.

la sua *energia è costante per via della simmetria rispetto alle traslazioni temporali* (anche negli esempi di FIG. 3a e FIG. 3b l'energia si conserva per lo stesso motivo); tutti gli istanti sono uguali e il tempo, al pari dello spazio, è *omogeneo*. In presenza di attrito (FIG. 3c') la simmetria si rompe e l'energia non si conserva.

La TABELLA 1 riassume la relazione tra simmetria e legge di conservazione nei tre casi fin qui discussi. Sottolineiamo che le simmetrie sono tutte di tipo continuo (cfr. FIG. 1).

Probabilmente il lettore a questo punto si chiederà perché mai non limitarsi agli "attrezzi del mestiere" normalmente insegnati a scuola per illustrare le leggi di conservazione, invece di ricorrere al concetto di simmetria. Quando, perché e da chi è stato introdotto tale concetto in fisica? Per rispondere a queste domande dobbiamo introdurre un personaggio straordinario, la matematica tedesca Amalie Emmy Noether (23 marzo 1882, Erlangen, Germania – 14 aprile 1935, Bryn Mawr, PA, USA) la quale, nonostante il suo assoluto rilievo, risulta perlopiù sconosciuta agli studenti di fisica che escono dall'università (compreso, a suo tempo, chi scrive).

La nostra storia inizia nel 1915. In quell'anno, all'università di Göttingen, Einstein (1879-1955) tenne un ciclo di conferenze riguardanti la nuova teoria su cui stava lavorando e che sarebbe diventata la teoria della relatività generale. La teoria era ancora incompleta e non riproduceva una legge fondamentale della fisica, ossia la conservazione dell'energia. Tra il pubblico c'era David Hilbert (1862-1943), il più autorevole matematico del suo tempo, che rimase colpito dalla teoria e provò lui stesso ad affrontare il problema,⁴ ma senza riuscire a trovare una soluzione di carattere generale. Hilbert allora invitò Noether a trasferirsi presso l'università di Göttingen perché potesse aiutarlo grazie alle sue competenze sulle simmetrie e sulla teoria degli invarianti.⁵

In verità, da giovane Emmy venne indirizzata ad attività più consoni ad una donna dell'epoca, come lo studio del pianoforte e di inglese e francese, per le quali ottenne una certificazione per poter insegnare in scuole femminili. Ma Emmy era intenzionata a seguire le orme del padre, professore di matematica all'università di Erlangen. In quanto donna, dovette ottenere un permesso speciale per poter seguire le lezioni senza peraltro riuscire ad avere l'ammissione ufficiale. Nel 1903 trascorse poi un semestre a Göttingen dove apprese le tecniche di simmetria in geometria. Nel frattempo la legge cambiò e poté immatricolarsi a Erlangen per poi conseguire il dottorato con lode nel 1907. Tuttavia, l'abilitazione all'insegnamento era ancora negata

⁴ Provocatoriamente Hilbert era dell'opinione che «la fisica è troppo difficile per essere lasciata ai fisici».

⁵ La teoria degli invarianti riguarda lo studio di polinomi che rimangono inalterati sotto l'azione di particolari trasformazioni. Si tratta di individuare quantità il cui valore è indipendente dal sistema di coordinate.

SIMMETRIA	LEGGE DI CONSERVAZIONE
Simmetria rispetto alla traslazione lineare	Conservazione della quantità di moto
Simmetria rotazionale	Conservazione del momento angolare
Simmetria rispetto alla traslazione temporale	Conservazione dell'energia

TAB. 1.

alle donne ed Emmy si limitò ad aiutare il padre a seguire i suoi dottorandi (naturalmente a titolo gratuito). Nonostante questo, pubblicò diversi lavori divenendo una dei massimi esperti in materia di simmetria. Come abbiamo detto, nel 1915 Hilbert convinse Emmy a trasferirsi a Göttingen ma, nonostante la sua autorevolezza, non riuscì a convincere l'università a darle una posizione ufficiale perché i soldati di ritorno dalla guerra si sarebbero ritrovati a dover imparare da una donna (sic), al che Hilbert obiettò: «ma questa è un'università, non uno spogliatoio!». Emmy tenne comunque lezioni con l'*escamotage* di farle a nome di Hilbert. Solo nel 1919, all'età di 37 anni, divenne *Privatdozent* a titolo gratuito, ma riuscì a sopravvivere⁶ grazie ad una piccola rendita familiare. Dal 1923, su interessamento di Hilbert, poté finalmente ricevere un modesto stipendio (inferiore a quello degli uomini). Ma questa tranquilla condizione non durò a lungo.

Emmy era nata con due stigmi; il primo, come abbiamo visto, era essere nata donna, il secondo era essere nata ebrea. Con l'ascesa del nazismo nel 1933 venne licenziata dall'Università, ma continuò ugualmente ad insegnare a casa sua. Successivamente, tuttavia, decise di accettare un'offerta da parte della Bryn Mawr, un'università americana per donne della Pennsylvania dove continuò ad insegnare fino alla sua morte avvenuta nel 1935 a soli 53 anni per via di un tumore. Einstein, vedendo che il *New York Times* aveva liquidato la sua prematura scomparsa con un trafiletto, prese carta e penna e fece pubblicare sul quotidiano un tributo divenuto famoso, in cui decretò che Noether era stata «il più significativo genio creativo matematico mai prodotto da quando le donne erano state ammesse ad una educazione superiore» (si veda la pagina del *New York Times* con la lettera di Einstein alla fine della presente *Spigolatura*).

La sconfinata ammirazione di Einstein per Emmy è facilmente comprensibile. Torniamo infatti a quel fatidico anno 1915. Il fatto che due giganti quali Hilbert ed Einstein, ciascuno per suo conto, non riuscissero a risolvere il problema dell'energia dà una misura di quanto impervia fosse la difficoltà. Il seguente semplice esempio dà un'idea del tipo di

impasse: dalle equazioni di Einstein risulta che se in uno spazio vuoto lanciamo una pietra, questa non continua a muoversi lungo una traiettoria rettilinea conservando la sua energia; essa, invece, è destinata a rallentare fino a fermarsi, e la sua energia scompare (discuteremo in dettaglio questo punto nel livello avanzato).

Einstein (al pari di Hilbert) stava tentando di forzare la conservazione dell'energia manipolando le tecniche matematiche, ma commise un errore che non sfuggì ad Emmy la quale cominciò a chiedersi se la teoria di Einstein e la conservazione dell'energia fossero compatibili. Emmy allora attaccò il problema da un diverso punto di vista sfruttando le sue conoscenze su simmetrie e invarianti. E fu così che riuscì a dimostrare che la conservazione dell'energia segue dalla simmetria per traslazioni temporali. In uno spazio vuoto e statico la pietra dell'esempio precedente continua a viaggiare conservando la sua energia. Dal momento che le equazioni di Einstein mostravano invece che l'universo è dinamico⁷ (può contrarsi o espandersi a seconda delle condizioni), viene meno l'invarianza per traslazione temporale, e di conseguenza anche la conservazione dell'energia (insomma, Einstein stava cercando di risolvere un falso problema). Come si legge in una lettera indirizzata ad Hilbert, Einstein rimase assai impressionato dalle capacità di Emmy. Ed in effetti il suo contributo ha reso la relatività generale una teoria coerente.

La teoria di Emmy trova una concreta verifica in campo cosmologico tramite l'evoluzione della radiazione di fondo prodotta dal Big Bang che pervade l'intero universo (descritta in dettaglio nella *Spigolatura* n. 84 del fascicolo n. 2/2022). Circa 380.000 anni dopo l'esplosione iniziale la radiazione cosmica aveva uno spettro il cui picco era in corrispondenza della lunghezza d'onda $\lambda_{\text{max}} \sim 10^{-6}$ m. Da allora l'universo (la cui età attuale è 13,7 miliardi d'anni) si è espanso di circa 1100 volte e la lunghezza d'onda si è "stirata" di conserva arrivando ad essere $\lambda_{\text{max}} \sim 10^{-3}$ m (FIG. 4), passando così dall'iniziale spettro visibile all'attuale spettro delle microonde che oggi osserviamo. I singoli fotoni hanno

⁶ Edmund Landau, un cattedratico di Göttingen, che pure era un matematico di fama mondiale, riconobbe pubblicamente che la Noether era un genio matematico superiore. Si narra che disse: «Mi vergogno di occupare un posto quando c'è chi (Emmy Noether) è molto più bravo di me», sottolineando l'ingiustizia del sistema accademico del tempo.

⁷ Un secolo fa era opinione comune che l'universo dovesse essere statico. Pertanto Einstein, – nel 1917, ossia due anni dopo la pubblicazione della relatività generale – inserì nelle equazioni una costante, la *costante lambda* Λ , il cui effetto è quello di rendere statico lo spazio. Alla fine degli anni Venti del Novecento venne scoperta l'espansione dell'universo ed Einstein rigettò Λ , definendola, secondo George Gamow, «il più grande errore della mia vita».

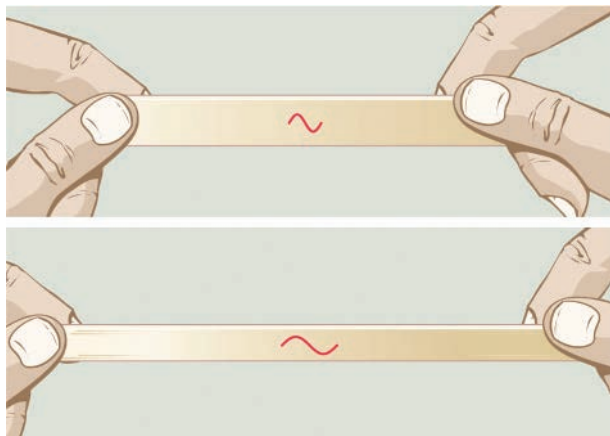


FIG. 4. Allungamento di una banda elastica (che simula l'espansione di uno spazio unidimensionale) e conseguente aumento della lunghezza d'onda di una sinusoide che vi è rappresentata (che simula la radiazione contenuta nello spazio).

un'energia $E = hc/\lambda$, dove $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ è la costante di Planck e $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ è la velocità della luce. Dal momento che il numero dei fotoni è rimasto lo stesso mentre la loro energia si è ridotta di un fattore 1000 (ossia il rapporto tra la lunghezza d'onda iniziale e quella odierna), se ne conclude che il 99,9% dell'energia della radiazione è scomparsa a causa dell'asimmetria temporale dovuta all'espansione dell'universo.⁸

Nel 1918, tre anni dopo aver “dato una mano” ad Einstein, Emmy perfezionò il suo lavoro e pubblicò uno dei più significativi risultati della fisica moderna. Data la sua importanza il suo enunciato merita di essere incorniciato:

Teorema di Noether: per ogni simmetria continua di un sistema fisico esiste una corrispondente grandezza che si conserva.

Prima del teorema di Noether, le leggi di conservazione erano considerate fatti empirici o conseguenze tecniche delle equazioni di Newton, ma mancava una spiegazione profonda sul perché solo certe quantità fisiche si conservano e altre no. Emmy unificò tutto in un unico principio matematico, mostrando come ogni legge di conservazione nasce da una simmetria continua della natura (la TABELLA 1 riporta alcuni semplici esempi di collegamento tra simmetrie e leggi di conservazione). La cosa notevole è che il teorema funziona anche al contrario: se si trova una simmetria, si può prevedere una quantità conservata.

Nonostante un certo oblio occorso dopo la morte di Emmy, nella seconda metà del secolo scorso, con l'avvento delle teorie quantistiche di campo, il

⁸ Il motivo per cui l'energia appare costante nella nostra quotidianità e negli esperimenti di laboratorio è dato dal fatto che il tempo scala dell'espansione cosmica è enormemente più lungo del tempo scala relativo all'attività umana, sicché in questo breve periodo gli effetti dell'espansione sono trascurabili.

teorema di Noether ha assunto una posizione centrale nella fisica moderna. Infatti, anche in queste teorie è possibile trovare delle simmetrie (ben più astratte di quelle discusse qui) che si associano a leggi di conservazione come, ad esempio, la conservazione della carica elettrica. Ma anche l'unificazione dell'elettromagnetismo e della forza debole (quest'ultima regola i decadimenti radioattivi), oppure la formulazione e la scoperta dei *quark* o del *bosone di Higgs* (cui abbiamo dedicato la Spigolatura 52 nel n. 4 del 2012) derivano tutte dal teorema di Noether.

Questo teorema rimane uno dei contributi più profondi della scienza moderna, e lo dobbiamo alle straordinarie qualità di genio, perseveranza e resilienza di Emmy Noether che fu capace di vivere ed operare “controcorrente” rispetto ai tempi che le furono dati da abitare.

Una metafora spesso utilizzata per descrivere l'universo in espansione è data da un panettone che lievita prima e durante la cottura. A causa della lievitazione il panettone si espande e le uvette contenute si allontanano le une dalle altre. È importante sottolineare che questo allontanamento avviene nonostante le uvette (le galassie) non si muovano rispetto all'impasto (lo spazio) ma si muovano con esso. Fuor di metafora, una particolare galassia “vede” tutte le altre allontanarsi da lei e si potrebbe pensare che sia al centro dell'espansione, ma in realtà è solo una questione di “prospettiva”. Ogni altra galassia vede le altre allontanarsi da sé, e dunque sono tutte equivalenti e nessuna occupa una posizione speciale. Le osservazioni ci dicono che su larga scala (~ 300 milioni di anni luce) le galassie sono mediamente distribuite in maniera omogenea (ossia uniforme) ed isotropa (ossia uguale in tutte le direzioni); la velocità attuale di recessione v_H con cui una galassia si allontana dalla nostra è direttamente proporzionale alla sua distanza d da noi. In questo consiste la legge di Hubble-Lemaître che si esprime come

$$v_H(t_0) = H(t_0) d \equiv H_0 d, \quad (1)$$

dove t_0 è l'età attuale dell'universo e $H(t)$ è detta costante di Hubble.⁹ Analogamente agli acini di uvetta, le galassie distanti che si allontanano da noi non si muovono nello spazio ma con lo spazio (che si espande seguendo la legge di Hubble-Lemaître).¹⁰ Il moto delle galassie dovuto unicamente all'espansione dell'universo è detto flusso di Hubble.

⁹ A dispetto del nome, il valore della costante di Hubble varia nel tempo. In particolare $H_0 \equiv H(t_0)$, indica il valore attuale.

¹⁰ A differenza dell'uvetta nel panettone, le galassie possono avere moti peculiari rispetto allo spazio dovuti ad attrazioni gravitazionali locali (ad esempio, la galassia di Andromeda si sta avvicinando alla Via Lattea invece di allontanarsi). Su scale cosmologiche, tuttavia, questi moti sono trascurabili.

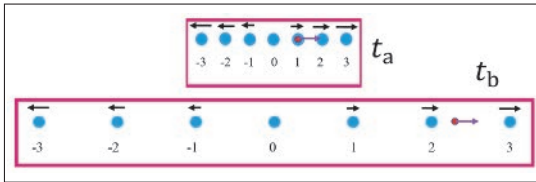


FIG. 5. Banda elastica – su cui sono evidenziati alcuni punti azzurri – che simula un universo unidimensionale in espansione rappresentato in due tempi diversi t_a , e $t_b > t_a$. Scegliendo arbitrariamente il punto “0” come origine del nostro riferimento, lo stiramento uniforme dell’elastico (in entrambe le direzioni) lascia fermo tale punto mentre gli altri si allontanano verso destra e verso sinistra con velocità di recessione v_H (indicate dalle frecce nere) proporzionali alla distanza da “0” secondo la legge di Hubble-Lemaître [eq. (1)]. Il punto rosso rappresenta un oggetto lanciato dalla posizione “1” con una velocità fisica v_f rappresentata dalla freccia amaranto. L’oggetto supera “2” ma non riesce a raggiungere “3” che ha una velocità sostanzialmente uguale alla sua (si veda il testo e FIG. 6).

Se all’istante attuale t_0 la distanza tra due punti dello spazio è d_0 , ad un tempo arbitrario t sarà $d(t) = \alpha(t) d_0$: pertanto abbiamo $\alpha(t) < 1$ per $t < t_0$, $\alpha(t_0) = 1$ per $t = t_0$ e $\alpha(t) > 1$ per $t > t_0$. Per ricostruire l’andamento temporale dell’espansione dell’universo è dunque necessario capire la dipendenza dal tempo del fattore di scala $\alpha(t)$. Nell’ambito del modello standard, in un periodo compreso tra la fine dell’inflazione e circa 47.000 anni, l’universo è dominato dalla radiazione e $\alpha(t) \propto t^{1/2}$. Durante i successivi $9,8 \times 10^9$ anni la densità (energetica) della materia supera quella della radiazione e abbiamo $\alpha(t) \propto t^{2/3}$. Al termine di questa fase prevale la densità dell’energia oscura che accelera l’espansione e si ottiene l’andamento esponenziale $\alpha(t) \propto \exp(H_0 t)$.¹¹

Ora che abbiamo richiamato alcuni concetti di fondo della moderna cosmologia cerchiamo di chiarire quanto affermato nel livello base, ossia che un oggetto scagliato in un universo vuoto in espansione è destinato a fermarsi (vedremo in che senso) invece di mantenere costante la sua velocità come previsto dalla prima legge di Newton. Per farlo ci baseremo su un modello di universo estremamente semplificato e alquanto rozzo ma adatto al nostro scopo.

La FIG. 5 è un simulacro unidimensionale dello spazio cosmologico rappresentato da una banda elastica che si estende nel tempo e su cui alcuni punti sono marcati con pallini azzurri per evidenziare come si distanziano durante lo stiramento seguendo la legge di Hubble-Lemaître. Volendo isolare l’effetto dell’espansione sul moto di un oggetto, assumiamo che l’universo sia vuoto per evitare una qualunque influenza gravitazionale. Introduciamo inoltre un’ulteriore semplificazione ipotizzando che l’espansione sia lineare nel tempo, ossia $\alpha(t) \propto t$; questo significa che al tempo $t = 2$ la banda ha rad-

doppiato la sua lunghezza rispetto a quando il tempo era $t = 1$ (l’unità temporale è arbitraria).

Immaginiamo ora che un oggetto lanciato dal punto “1” si allontani verso destra con una velocità fisica v_f che rimane costante perché nessuna forza agisce su di esso (FIG. 5). Se l’universo fosse statico il proiettile si muoverebbe unicamente attraverso lo spazio con una velocità peculiare $v_p = v_f$. Dal momento, però, che l’universo si espande, la velocità complessiva è data da

$$v_f = v_H(t) + v_p(t), \quad (2)$$

dove $v_H(t)$ è la velocità di recessione locale¹² con cui il proiettile si muove con lo spazio in espansione, mentre $v_p(t)$ indica la velocità con cui il proiettile si muove rispetto ai punti dello spazio locale.

Se v_f è sufficientemente alta il proiettile è in grado di superare i punti più vicini a “0”; tuttavia, avanzando, incontra punti dell’elastico che si muovono in avanti con velocità $v_H(t)$ sempre più alta (per la legge di Hubble-Lemaître) e rispetto ai quali il proiettile appare rallentare progressivamente (benché v_f rimanga costante). Alla fine il proiettile raggiunge un punto dell’elastico che si muove sostanzialmente alla sua stessa velocità. Pertanto, la velocità rispetto all’elastico è diventata nulla e il proiettile si muove con l’elastico seguendo il flusso di Hubble. In conclusione, il proiettile è fermo rispetto allo spazio locale ma continua a seguirne l’espansione (come gli acini nel panettone). In altre parole, data la costanza di v_f , per compensare la crescita nel tempo di $v_H(t)$ è necessario che $v_p(t)$ diminuisca [eq. (2)]. Tramite semplici passaggi matematici mostreremo nei prossimi due paragrafi come, in questo nostro particolare modello, risulta $v_p(t) \propto 1/t$. I lettori particolarmente refrattari alla matematica possono saltare questi paragrafi e riprendere dai successivi in cui i concetti fin qui esposti vengono commentati in forma grafica tramite la FIG. 6.

Per capire come $v_p(t)$ tenda a zero nel tempo dobbiamo prima stabilire l’andamento temporale di $H(t)$. L’espansione lineare dell’universo implica che la velocità $v_H = H(t) d(t)$ di tale espansione è costante in ogni punto (ma diversa da punto a punto, FIG. 5) e che pertanto il tempo impiegato da due punti per distanziarsi (a partire dal Big Bang) di una quantità $d(t)$ è dato da $t = d(t)/[H(t) d(t)]$, da cui si ottiene $H(t) = 1/t$; pertanto in questo semplice modello la costante di Hubble coincide con l’inverso del tempo cosmico.

Supponiamo ora che dal punto “1” venga lanciato un proiettile al tempo t_1 . Dal momento che

¹¹ Per una più comoda lettura della formula adottiamo la convenzione $\exp(x) \equiv e^x$.

¹² Qui per “locale” si intende il punto in cui si trova il proiettile.

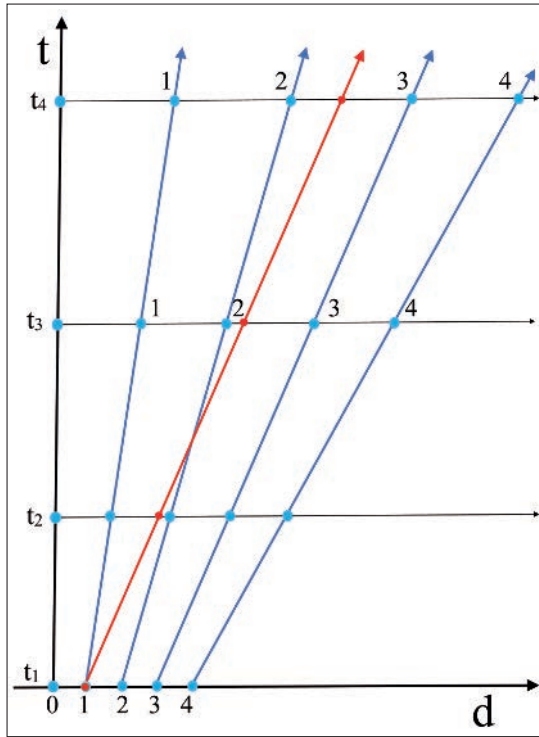


FIG. 6. Diagramma spaziotemporale del nostro universo unidimensionale. In ascissa abbiamo lo spazio (che coincide con l'elastico infinitamente esteso) su cui sono indicati alcuni punti come in FIG. 5 (qui abbiamo rappresentato solo i punti a destra di "0"). In ordinata abbiamo il tempo cosmico. Le linee diagonali che partono dai punti segnati rappresentano le loro rispettive linee di universo. Maggiore è la distanza d dei punti, maggiore è l'inclinazione di tali linee. L'inclinazione è una misura della velocità, e la velocità cresce con la distanza secondo la legge di Hubble-Lemaître. La disposizione "a raggiera" delle linee di universo rappresenta il flusso di Hubble. Le linee orizzontali collocate ai tempi t_2 , t_3 e t_4 mostrano la posizione dell'elastico (e rispettivi punti) a tali tempi. Il pallino rosso sovrapposto a "1" al tempo t_1 rappresenta il proiettile in movimento la cui linea di universo è indicata dalla freccia rossa la quale mostra chiaramente che quest'ultimo è destinato a rimanere tra i punti "2" e "3" e a "mimetizzarsi" nel flusso di Hubble.

l'universo è vuoto e non c'è alcuna gravità che modifichi v_f , l'equazione del moto del proiettile è semplicemente

$$d(t) = d_1 + v_f(t - t_1). \quad (3)$$

Possiamo esplicitare l'eq. (2) mediante le eqq. (1) e (3) e sottrarre la velocità di recessione (calcolata nel punto in cui si trova il proiettile) per ottenere $v_p(t)$:

$$v_p(t) = v_f - H(t)[d_1 + v_f(t - t_1)] = v_f \left(1 - \frac{t - t_1}{t}\right) - \frac{d_1}{t},$$

dove, nel secondo passaggio, abbiamo tenuto conto della relazione $H(t) = 1/t$. Otteniamo così

$$v_p(t) = \frac{v_f t_1 - d_1}{t} \propto \frac{1}{t}. \quad (4)$$

Quanto fin qui discusso può essere illustrato mediante il grafico in FIG. 6. L'ascissa "coincide" con l'elastico che simula il nostro universo ad un tempo arbitrario t_1 e su cui sono stati evidenziati (mediante pallini azzurri, come in FIG. 5) alcuni punti a diverse distanze d dall'origine scelta arbitrariamente nel punto "0". In ordinata abbiamo il tempo cosmico: il piano $d-t$ rappresenta pertanto lo spazio-tempo del nostro universo. Se l'universo fosse statico – se cioè l'elastico non venisse stirato – ogni punto rimarrebbe fermo nello spazio; ma dal momento che il tempo scorre, ogni punto segue una traiettoria nello spazio-tempo detta linea di universo. Nel caso statico queste linee sono parallele all'ordinata (la quale, per inciso, coincide con la linea di universo di "0"). Se l'elastico si espande, i suoi punti si spostano verso destra e le loro linee di universo risultano ovviamente inclinate verso destra. Queste traiettorie si mantengono rettilinee in base all'ipotesi di espansione lineare [$a(t) \propto t$] e la loro inclinazione è tanto maggiore quanto maggiore è la distanza d dei punti a cui appartengono; l'inclinazione è infatti una misura della velocità di recessione di un punto¹³ e questa aumenta con la distanza in base alla legge di Hubble-Lemaître. L'insieme del moto di ciascun punto dello spazio lungo la propria linea di universo rappresenta il flusso di Hubble.

Assumiamo ora che un'astronave spari da "1" un proiettile che ovviamente si muoverà lungo l'unica dimensione spaziale, ossia l'ascissa. La sua velocità è data da all'eq. (2); dal momento che v_f è costante la linea di universo del proiettile [indicata in rosso in FIG. 6] è anch'essa una retta. A titolo di esempio, in FIG. 6 tale retta ha la stessa pendenza della linea di universo del punto "3"; pertanto il proiettile supererà i punti più vicini ma non giungerà mai a "3". Se con $\Delta_{2,3} \propto t$ indichiamo la distanza tra i punti "2" e "3" che aumenta linearmente con il tempo, e con $\Delta_{p,3} = \text{cost.}$ la distanza (che rimane costante) tra "3" e il proiettile, risulta $\Delta_{p,3}/\Delta_{2,3} \approx 1/t$, una formula che richiama l'eq. (4) e che in effetti ci dice la stessa cosa: il proiettile non oltrepassa "3" e la sua velocità si avvicina percentualmente sempre più alla velocità locale di espansione (quella di "3") fino a confondersi con il flusso di Hubble come se non fosse mai stato lanciato. In altre parole, alla fine si avrà $v_f \approx v_H$, l'energia cinetica impartita inizialmente andrà persa, e il proiettile risulterà fermo rispetto alla regione di spazio che lo circonda.

¹³ Come si vede in FIG. 6, a parità di intervallo temporale, p.e. $t_2 - t_1$, una linea più inclinata corrisponde a un percorso spaziale maggiore.

Letters to the Editor

THE LATE EMMY NOETHER.

Professor Einstein Writes in Appreciation of a Fellow-Mathematician.

To the Editor of The New York Times:

The efforts of most human beings are consumed in the struggle for their daily bread, but most of those who are, either through fortune or some special gift, relieved of this struggle are largely absorbed in further improving their worldly lot. Beneath the effort directed toward the accumulation of worldly goods lies all too frequently the illusion that this is the most substantial and desirable end to be achieved; but there is, fortunately, a minority composed of those who recognize early in their lives that the most beautiful and satisfying experiences open to humankind are not derived from the outside, but are bound up with the development of the individual's own feeling, thinking and acting. The genuine artists, investigators and thinkers have always been persons of this kind. However inconspicuously the life of these individuals runs its course, none the less the fruits of their endeavors are the most valuable contributions which one generation can make to its successors.

Within the past few days a distinguished mathematician, Professor Emmy Noether, formerly connected with the University of Goettingen and for the past two years at Bryn Mawr College, died in her fifty-third year. In the judgment of the most competent living mathematicians, Fraeulein Noether was the most significant creative mathematical genius thus far produced

since the higher education of women began. In the realm of algebra, in which the most gifted mathematicians have been busy for centuries, she discovered methods which have proved of enormous importance in the development of the present-day younger generation of mathematicians. Pure mathematics is, in its way, the poetry of logical ideas. One seeks the most general ideas of operation which will bring together in simple, logical and unified form the largest possible circle of formal relationships. In this effort toward logical beauty spiritual formulae are discovered necessary for the deeper penetration into the laws of nature.

Born in a Jewish family distinguished for the love of learning, Emmy Noether, who, in spite of the efforts of the great Goettingen mathematician, Hilbert, never reached the academic standing due her in her own country, none the less surrounded herself with a group of students and investigators at Goettingen, who have already become distinguished as teachers and investigators. Her unselfish, significant work over a period of many years was rewarded by the new rulers of Germany with a dismissal, which cost her the means of maintaining her simple life and the opportunity to carry on her mathematical studies. Farsighted friends of science in this country were fortunately able to make such arrangements at Bryn Mawr College and at Princeton that she found in America up to the day of her death not only colleagues who esteemed her friendship but grateful pupils whose enthusiasm made her last years the happiest and perhaps the most fruitful of her entire career.

ALBERT EINSTEIN.

Princeton University, May 1, 1935.

The New York Times

Published: May 4, 1935
Copyright © The New York Times

La lettera di Albert Einstein inviata il 1° maggio 1935 all'editore del «The New York Times», in segno di apprezzamento di Emmy Noether, e pubblicata il 4 maggio successivo.

Annibale D'Ercole si è laureato in Fisica all'Università di Roma "La Sapienza". Astronomo associato presso l'INAF · Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS), si occupa di simulazioni numeriche di idrodinamica, applicate alle nebulose e al gas interstellare delle galassie. È autore di numerosi articoli divulgativi pubblicati presso questa e altre riviste.

Meet the Neighbors

Life on Mars and How to find it

Steven A. Benner

Allen Lane (Penguin books), 2026

Copertina rigida, pp. 416, € 42,70

ISBN 9780241808306

www.penguin.co.uk/about/publishing-houses/penguin-press/allen-lane

NON sono molte le ragioni che io possa addurre per assumermi l'onere e l'onore di questa recensione. Infatti, non sono né un'astrobiologa né una chimica o una geologa, ma provengo dagli studi linguistici, letterari e culturali. Tuttavia, la quantità di volte che nel testo in oggetto appare la parola *culture*, 46 per l'esattezza; lo spazio dato alla linguistica; l'elevato numero di film (tra cui *Jurassic Park*, *Contact* e *The Martian*) e serie tv citate; e la menzione del grandissimo David Bowie che chiede alla generazione degli anni Settanta «se c'è vita su Marte», mi hanno convinta a scrivere con qualche minima cognizione di causa un commento a questo libro davvero molto intrigante su diversi livelli. C'è un terzo motivo: il mio primo libro, pubblicato molti anni fa subito dopo la laurea con contributi dell'Università e del CNR, si intitolava *Vicini lontani. Solitudine e comunicazione nel romanzo americano*: e ritrovare il tema del vicinato in un libro dedicato a Marte (il pianeta alle cui rappresentazioni letterarie ho dedicato gli anni più recenti della mia ricerca) era una tentazione troppo forte perché io potessi ignorarla.

Steven A. Benner, l'autore di *Meet the Neighbors. Life on Mars and How to Find It* ("Incontriamo i nostri vicini. Vita su Marte e come trovarla"), è un celebre chimico, paleogenetista e astrobiologo che ha iniziato la sua carriera come professore alla Harvard University, l'ha proseguita presso la ETH di Zurigo e poi all'Università della Florida, finché ha fondato il Westheimer Institute of Science and Technology (TWIST). Insignito di numerosi premi, collaboratore della NASA, e uno dei massimi conoscitori del funzionamento del DNA, è stato definito da Carolyn Gramling «a science fiction writer's dream»,¹ che potremmo tradurre come «il sogno di qualsiasi scrittore di fantascienza divenuto realtà». Da parte sua Robert Zubrin, il presidente della Mars Society, saluta il libro come «terrific» e «impressive», elogiando il coraggio con cui Benner dichiara che non solo è quasi certo che ci sia vita su Marte,

ma che la vita potrebbe aver avuto origine su Marte prima che sulla Terra.²

Di fatto, Benner nutre un profondo interesse per l'origine della vita prima ancora che per lo spazio, e in particolar modo per le condizioni necessarie a sostenere il modello del cosiddetto "mondo dell'RNA", secondo cui l'RNA autoreplicante sarebbe il precursore della vita sulla Terra. Inoltre, ha identificato alcuni elementi fondamentali per la formazione dei carboidrati e la stabilizzazione dell'RNA, ipotizzando che Marte potesse presentare condizioni più favorevoli rispetto alla Terra per la sua produzione iniziale, anche se più recentemente ha convenuto che i modelli della Terra primordiale, caratterizzati da terraferma e acqua intermittente, presentino condizioni sufficienti (ma non tante quanto Marte) per il suo sviluppo. Lo stesso RNA conserva e trasmette informazioni, partecipa direttamente alla costruzione delle proteine e può svolgere attività catalitica (agendo come un vero e proprio enzima accelerando specifiche reazioni chimiche senza subire alterazioni permanenti), rivelandosi di fatto un ponte tra informazione e materia vivente. Le strutture molecolari "universali" nei sistemi viventi, indipendentemente dalla loro genesi, sono state definite da Benner *biosignatures* (firme biologiche o biofirme) un termine che preferisce a "forme di pre-vita".

Il libro è suddiviso in venti capitoli, ciascuno corredato di illustrazioni e soprattutto di una parte finale che comprende un breve riassunto, le personalità citate, e le parole e i concetti chiave. A questo si aggiunge un'ampia bibliografia e un altrettanto dettagliato indice dei nomi. Stiamo parlando infatti di un testo scientifico a tutti gli effetti, bilanciato però da un linguaggio in parte divulgativo, comprensibile dai non esperti, molto proiettato sulle nuove generazioni, con numerosi consigli di tipo metodologico (anche in chiave ironica e divertente), redatto in uno stile che ricorda le lezioni universitarie. Insomma, nel leggerlo ci si sente un po' studenti o colleghi, tanta è la volontà dell'autore di coinvolgerci nella comprensione della sua tesi con passione ed empatia. È vero, di tanto in tanto spuntano le formule – com'è giusto che sia – ma Benner le spiega con cura e precisione, usando tanti linguaggi diversi (e qui esprimo tutta la mia ammirazione) che vanno appunto dal cinema alla linguistica alla cultura *tout court*, in modo che tutti, ma proprio tutti, capiscano dove vuole andare a parare. La sua tesi, già annunciata nel titolo, è molto semplice ma difficile da di-

¹ www.research.ufl.edu/publications/explore/v10n1/story1.html.

² www.marssociety.org/news/2026/07/16/did-life-begin-on-mars-book-review-by-dr-robert-zubrin.

mostrare: c'è vita su Marte. Nel corso del libro, l'autore non si limita a ipotizzare o a dichiarare, ma semina a piene mani fonti autorevoli (altro motivo di ammirazione) atte a confermare/smentire le varie ipotesi. Ovvio che non stiamo parlando di vita "intelligente" (per quello rimando al SETI, www.seti.org) ma di microorganismi adatti o adattati alle condizioni estreme del pianeta (estremofili). Fa abbastanza effetto che a un certo punto si chieda «possiamo mangiare i marziani?», ma questa domanda ci serve sia ad abbandonare il paradigma dell'alieno antropomorfizzato a cui ci hanno abituati la letteratura e il cinema, sia a desiderare – forse – di ridefinire il nostro rapporto con ciò che è vita (per esempio scegliendo un'alimentazione priva di proteine animali).

Il percorso che ci propone Benner parte dalla missione Viking (1976-1977) che, pur mostrando evidenze di una vita microbica sul pianeta, si conclude con un nulla di fatto, tanto che nel 2005 gli studenti si sarebbero trovati a studiare un manuale in cui si dichiarava il fallimento della missione stessa. L'interesse per Marte si riaccese nel 1999 (con la nascita del NASA Astrobiology Institute), ma non abbastanza perché il progetto fosse ripreso: i risultati dei Viking 1 e 2 non furono reinterpretati, ma continuarono a essere ignorati. Il motivo? Nella comunità scientifica, dove pure si sollecitano innovazione e originalità, si rischia di finire per conformarsi al consenso piuttosto che problematizzare ciò che non si capisce fino in fondo. Questo vale ancor più se ci spostiamo nel campo della *cultura* mediatica. Per questo, Benner raccomanda di verificare sempre le fonti e di saper adottare perfino posizioni antitetiche per sviluppare il senso critico.

Se la vita è una «conseguenza della chimica universale» e l'universo è «gravido di vita», come scrive Benner, di conseguenza non dovrebbe esservi alcuna ragione per non proseguire l'esplorazione spaziale alla ricerca di tracce di vita, seppur consapevoli che non ne avremo mai la "certezza" – una condizione che non esiste nella scienza – ma solo un'elevata probabilità "oltre ogni ragionevole dubbio". Come vediamo, anche il linguaggio legale si insinua tra le pagine del libro, richiamando al contempo la celebre frase di Sherlock Holmes sulla probabilità.³ Purtroppo, però, chi aderisce a un vecchio paradigma fatica ad accettarne uno nuovo. Lo si è visto nella storia dell'astronomia (e non solo), con personaggi bruciati come eretici o tacciati di ciarlataneria: «Gli scienziati che propongono un cambiamento di paradigma non sono generalmente ritenuti eroi, almeno non nell'immediatezza». Certo che a volte si compiono errori – i "canali" di Schiaparelli o la pre-

sunta scoperta del pianeta Vulcano – ma per Benner vale sempre la pena proseguire nelle ricerche, e ne sono valide testimonianze astronomi come Percival Lowell o Eugène Antoniadi da un lato, e scrittori come H. G. Wells o Edgar Rice Burroughs dall'altro.

In un'alternanza curiosa, a seconda delle ripetute osservazioni e dei risultati che si succedono nelle varie missioni successive (Mariner 9, Mars Observer, Mars Global Surveyor), Marte appare ora vivo, ora morto – quasi un "gatto di Schrödinger" spaziale. Il fatto è, secondo Benner, che la comunità scientifica continua a ragionare in modo «terracentrico» come se gli alieni parlassero inglese. Inoltre, gli strumenti inviati nel corso degli anni non sono progettati per analizzare il terreno o il clima, e non prevedono esperimenti sulla possibilità di vita, né missioni di *sample return*. Nel frattempo, escono però articoli scientifici che tengono attiva la discussione sulle possibili biofirme marziane. Alcuni elementi chimici vengono descritti come "anomali" in quanto non ci si aspetterebbe di trovarli e quindi si presuppone siano contaminazioni terrestri. Ma Benner non ha dubbi: le sonde Viking 1 e Viking 2, durante l'analisi dei campioni di suolo marziano prelevati nelle pianure di Chryse Planitia e Utopia Planitia mediante gascromatografia-spettrometria di massa (GC-MS), rilevarono tracce di clorometano (CH_3Cl) e diclorometano (CH_2Cl_2). All'epoca tali composti furono interpretati come probabili contaminanti di origine terrestre e non vennero considerati prove sufficienti della presenza di molecole organiche marziane.⁴

Vale la pena ricordare che Benner, in una presentazione per un *workshop* della NASA del 2024, precisò che il Viking aveva rilevato tracce sia di freon sia di metilcloruro, ma distinse chiaramente le due cose: il freon era stato rilevato durante il viaggio verso Marte e attribuito a contaminazione dello strumento; invece, il clorometano non era stato rilevato durante il viaggio e quindi poteva, almeno in linea di principio, avere un'origine marziana.⁵ Nel 2008, la missione Phoenix identificò nel suolo marziano la presenza di perclorati (ClO_4). Questa scoperta portò finalmente a una reinterpretazione dei risultati della missione Viking. Durante il riscaldamento dei campioni all'interno dello strumento, la decomposizione dei perclorati può liberare specie altamente ossidanti e cloruranti che degradano le sostanze organiche eventualmente presenti e ne trasformano una piccola parte in clorometano (CH_3Cl) e diclorometano (CH_2Cl_2). Pertanto, tali composti potrebbero essere stati prodotti durante l'analisi strumentale e non rappresentare necessariamente molecole presenti originariamente nel suolo marziano. Eppure, commenta Benner, persiste ancora una certa riluttanza a proseguire la ricerca di vita su Marte per al-

³ Sherlock Holmes è citato più volte nel testo. La frase «Quando hai eliminato l'impossibile, ciò che rimane, per quanto improbabile, deve essere la verità» (ARTHUR CONAN DOYLE, *Il segno dei quattro*, ripresa in *Star Trek, The Next Generation*) potrebbe essere riformulata, secondo la visione di Benner, rovesciandola come «Quando non puoi raggiungere la verità ti devi accontentare delle probabilità».

⁴ Vedasi anche www.jpl.nasa.gov/news/missing-piece-inspires-new-look-at-mars-puzzle.

⁵ sma.nasa.gov/docs/default-source/event-docs/updated-benner-planetary-protection-workshop-presentation-2024-10-30.pdf.

meno un altro decennio. Si è puntato piuttosto sugli esopianeti, quando avremmo a disposizione un pianeta che possiamo raggiungere con più facilità. Fin dal Sojourner (1996), e poi con Spirit e Opportunity (2004), si è dimostrata almeno, se non la *extant life* (vita presente nella forma attuale), la quasi certezza che *ci sia stata* vita su Marte, anche se, ripetiamolo, gli strumenti non erano destinati in particolare a questa ricerca.

Il rover Curiosity, lanciato nel 2011 e atterrato su Marte nel 2012 nell'ambito della missione Mars Science Laboratory, aveva il compito di studiare la geologia e il clima del pianeta e verificare se in passato fossero esistiti ambienti abitabili e raccogliere dati utili alle future missioni di esplorazione umana. Nel corso della missione ha identificato numerose molecole organiche nelle rocce sedimentarie del cratere Gale e ha inoltre rilevato la presenza di boro, un elemento chimico ritenuto importante per alcuni processi della chimica prebiotica. I riscontri ottenuti dalla missione hanno fornito solide evidenze che, miliardi di anni fa, il cratere Gale ospitava laghi e corsi d'acqua persistenti, confermando che Marte possedeva in passato ambienti favorevoli alla vita microbica.⁶ Perseverance, lanciato nel 2020 e atterrato su Marte nel febbraio 2021, è tuttora operativo. I risultati ottenuti dalle missioni Viking, Phoenix, Curiosity e Perseverance delineano un quadro sempre più convincente del fatto che Marte in passato era ricco di acqua liquida e caratterizzato da ambienti potenzialmente abitabili. Questo, sostiene Benner, dovrebbe dare la motivazione sufficiente per fare dell'esplorazione marziana una priorità – scientifica, sociale, culturale. Se non la si pensa così, non ha senso – prosegue – progettare altre missioni.

L'approccio biochimico dello studioso è evidente. Per far comprendere ai lettori come gli sviluppi della biotecnologia negli ultimi cinquant'anni consentano di fare inferenze sulle possibili sequenze di geni e proteine appartenenti alla preistoria della Terra e di Marte, Benner si serve di una comparazione con la linguistica storica, «che ricostruisce le lingue antiche individuando somiglianze nelle lingue moderne che da esse discendono». In particolare, fare inferenze sulla vita antica è analogo al processo che i linguisti usano per ricostruire parole in una lingua oggi estinta, potendo così anche fare ipotesi e congetture sui dettagli dell'ambiente culturale e sociale di cui erano espressione. Ecco così che una spiegazione “non ortodossa” come questa, proveniente cioè da un diverso campo disciplinare (come altre volte può esserlo il cinema, o la musica, o i media), permette a Benner di far comprendere in modo più lato e sfaccettato il suo obiettivo, che consiste nel ridirezionare la ricerca verso un più attento e dettagliato studio di Marte al fine di studiarlo come un habitat e non come un mondo arido.

⁶ Vedasi anche www.jpl.nasa.gov/news/mars-rock-ingredient-stew-seen-as-plus-for-habitability; science.nasa.gov/mission/msl-curiosity/science-highlights.

Da un lato, la visione di Benner mi spaventa, in quanto rischia di andare a braccetto con gli intenti per nulla ecologici dei tycoons che sognano colonie e resort di lusso sul pianeta, trivellazioni invasive e sfruttamento dissennato delle risorse. La sua implicita amicizia con Zubrin – a sua volta legato a Elon Musk – ne è una (sia pur debole) prova. D'altro lato, comprendo bene che dal punto di vista chimico e biogenetico la sfida di trovare altre forme di vita, passate o presenti o future, su un altro pianeta, può non essere un mero capriccio dei servitori del capitale, ma essere dovuta a quello spirito che anima la ricerca autentica, a quella spinta che la scienza non può ignorare, soprattutto quando certi risultati importanti sono stati nascosti o fraintesi.

Ai lettori, sicuramente molto più esperti di me, l'ardua sentenza. Personalmente, ritengo che le domande con cui ci lascia Benner siano ancora più suggestive delle sue dichiarazioni. Saremo in grado di riconoscere come “vita” una biologia molecolare diversa dalla nostra, per quanto strana potrà sembrarci, quando la incontreremo? E cosa significa veramente “vita”? Quali sono i rapporti fra “vita” e reazioni chimiche? E qual è il legame fra reazione chimica e informazione? L'evoluzione darwiniana ha senso in termini non geocentrici? Il volume farà discutere. Spero che verrà tradotto e commentato, perché da qualunque parte lo si guardi, è veramente interessante. Fosse anche solo perché parla di *Star Trek*.

ALESSANDRA CALANCHI

Steven A. Benner è chimico, biologo sintetico, paleo genetista e astrobiologo. Ha lavorato all'Università di Harvard, all'ETH di Zurigo e all'Università della Florida. Nel 2005 ha fondato lo Westheimer Institute for Science and Technology presso la Foundation for Applied Molecular Evolution in Florida. Nel 2023 gli è stata conferita la Medaglia Harold Urey dalla International Astrobiology Society per i suoi studi sull'origine della vita.

★

La prima luce L'accensione delle stelle all'alba del tempo

Emma Chapman

Adelphi (Biblioteca Scientifica), 2026

Copertina flessibile, pp. 301, € 28,00

ISBN 9788845940781

www.adelphi.it

FRA letture personali e la sufficientemente assidua collaborazione a queste pagine, ho finito per accumulare una certa esperienza sulla letteratura di divulgazione scientifica. I prodotti che giocano a diventare bestseller internazionali sono tutti di provenienza anglosassone e aderiscono a un modello che è stato certamente di grande successo ma, a mio parere, comincia a mostrare la corda, mi pare si sia trasformato in uno stereotipo, una specie di gabbia. Davvero mi viene da immaginare un

autore eccezionalmente dotato e originale che magari ha partorito un *De Rerum Natura* dei giorni nostri o semplicemente un trattato chiaro ma molto rigoroso e focalizzato. Immagino il nostro ipotetico autore, chiamiamolo Jack, per semplicità, che viene convocato negli uffici della prestigiosa casa editrice newyorkese e il suo editor che gli fa quel che si dice un discorsetto, gentile ma fermo: «Allora Jack, nessuno dice che tu non abbia fatto un buon lavoro, abbiamo tanto apprezzato il tuo approccio innovativo, ma se posso parlare francamente se lo pubblichiamo così non lo legge nemmeno tua madre». E poi, appoggiando un ponderoso volume sulla scrivania di ebano: «Qui c'è il nostro compendio degli aneddoti sugli scienziati famosi. Ora te lo porti a casa e riscrivi il tuo libro in modo che contenga almeno due succosi aneddoti per capitolo, estratti da questo repertorio. E, per l'amor del cielo, un po' di spirito! Di qualcosa di simpatico, fai qualche battuta. Non c'è bisogno che tu emuli Mark Twain, le freddure da scuole medie andranno benissimo!».

Ora io non so se l'editor di Emma Chapman le abbia fatto questo tipo di discorso o meno, quel che è certo è che l'autrice si è attenuta a queste indicazioni con grande diligenza. Non mi pare che ne sia sortita un'opera particolarmente memorabile, ma un accettabilissimo prodotto nell'ambito di questo modello. Ho apprezzato l'originalità del punto di vista, sia per il tema, le prime stelle, sia per l'attenzione alla radioastronomia che raramente è protagonista in questo tipo di opere.

L'interesse per le prime fasi della storia evolutiva dell'universo e della materia in esso contenuta è ovviamente assai forte. In astrofisica ci sono due vie per studiare epoche tanto remote. Si può cercare di trovare e analizzare galassie sempre più lontane, giacché lontano nello spazio significa lontano nel tempo. Secondo il modello cosmologico correntemente accettato, quando osserviamo una galassia a $redshift\ z = 6,0$ la vediamo come era circa un miliardo di anni dopo il big-bang, 12,7 miliardi di anni fa. Oggi, per mezzo dello James Webb Space Telescope, siamo in grado di studiare galassie in epoche ancora più remote, a $z > 10$. L'altra via per viaggiare nel tempo consiste nel ricercare stelle o sistemi stellari vicini che siano nati in quelle epoche remote: le informazioni sullo stato della materia in quel tempo restano registrate in alcune loro caratteristiche fisiche misurabili, come ad esempio la composizione chimica delle stelle. Ne *La prima luce* l'autrice ci fa percorrere entrambe le strade, mostrando una sincera fascinazione per questa sorta di archeologia cosmica, una parte molto importante della ricerca cosmologica e astrofisica contemporanea.

MICHELE BELLAZZINI

Emma Chapman è *Royal Society Dorothy Hodgkin Research Fellow* presso l'Università di Nottingham. Studia l'epoca della reionizzazione ed è coinvolta sia nel Low Frequency Array (LOFAR) nei Paesi Bassi che nel futuro

Square Kilometre Array (SKA) in Australia. Nel 2014 ha vinto il premio *Jocelyn Bell Burnell* dell'Institute of Physics (noto in precedenza come *Very Early Career Female Physicist Award*) e nel 2018 le è stata conferita la medaglia *Athena* della *Royal Society* per la sua azione che ha portato a modifiche su scala nazionale delle regole contro le molestie sessuali nell'istruzione superiore. Collabora con il *Guardian*, partecipa a trasmissioni radiofoniche della BBC e interviene regolarmente a eventi pubblici.

★

Les Origines du monde

Jean-Pierre Luminet

Bouquins, 2026

Copertina flessibile, pp. 1034, € 34,00

ISBN 9782382926840

www.editis.com/maisons/bouquins

MERITA di essere segnalata questa antologia in francese di testi sull'origine dell'universo, tratti da opere che appartengono alla mitologia, alla filosofia, alla letteratura e alla scienza. L'autore è l'astrofisico francese Jean-Pierre Luminet, specialista dei buchi neri e della topologia dell'universo, che ha una vena artistica e ha scritto anche poesie e romanzi. Il libro è pubblicato nella collezione *Bouquins*, dove si trovano generalmente raccolte di opere di scrittori antichi e moderni; questi volumi si caratterizzano per l'elevato numero di pagine (*Les Origines du monde* arriva a 1034) e al tempo stesso per il prezzo molto contenuto e la mole abbordabile, grazie a pagine un po' di carta velina e trasparenti (ma va detto che il testo rimane ben leggibile). Questa antologia contiene una breve introduzione dell'autore (nove pagine), dove si sottolinea come il titolo, con "origini" al plurale, si contrapponga al celebre quadro di Gustave Courbet, *L'Origine du Monde*, e alluda alla pluralità delle concezioni dell'origine dell'universo elaborate dalle varie culture nel corso della storia e nelle diverse discipline. Seguono i testi, che sono suddivisi in quattro parti: ogni parte ha una introduzione dell'autore di alcune pagine, ed è suddivisa in capitoli, ciascuno a sua volta con una breve introduzione. I testi dei vari capitoli sono talvolta corredati da note dello stesso Luminet. Le parti trattano i seguenti temi: *i miti della creazione*, con una selezione di storie dell'origine elaborate da diversi popoli; *prime cosmogonie scientifiche*, dove ritroviamo Platone, Aristotele e Lucrezio (quest'ultimo in rappresentanza della cosmogonia di Democrito ed Epicuro), e via via Cartesio, Newton, Swedenborg, Buffon, ed altri noti e meno noti, fino ad arrivare a Poincaré e... Théophile Moreux, popolare divulgatore francese della prima metà del xx secolo; *cosmologie moderne*, dove compaiono i grandi nomi della cosmologia del xx secolo, Einstein, Friedmann, Lemaître e diversi altri, fino ai contemporanei Andrei Linde, Alex Vilenkin e Carlo Rovelli; *cosmogonie letterarie*, con testi che vanno dal medioevo all'età moderna,

tra i cui autori ritroviamo John Milton, Edgar Allan Poe, Camille Flammarion, Raymond Queneau. Il libro si chiude con l'elenco dei testi citati e i crediti, e l'indice dei capitoli.

Ho due osservazioni da fare.

La prima è che la parte sulle cosmogonie letterarie è dominata dagli autori francesi. È naturalmente comprensibile che l'autore abbia maggiore familiarità con la propria letteratura, e la privilegi rivolgendosi ai lettori francesi, ma francamente non mi sembra aggiungano molto a questa raccolta (se non a manifestare l'erudizione dell'autore) i componimenti di Guillaume de Bartas o di Théodore Agrippa d'Aubigny, che ripropongono essenzialmente la Genesi biblica.

La seconda osservazione è che in un'opera molto vasta e generale l'autore non può essere ovviamente un profondo conoscitore di tutti i temi e di tutti gli autori; nel nostro caso, Luminet è senz'altro un esperto per quanto riguarda la cosmologia moderna, ma è inevitabile che in altri campi (mitologia, letteratura) dipenderà da altri studi e fonti secondarie, e potranno esserci imprecisioni o inesattezze. Eppure l'impressione del lettore sarà che Luminet sia specialista di tutto: commenta infatti e dà giudizi in prima persona senza citare nessuno degli studi fatti da altri, studi sui quali si deve essere basato (potrei dare come esempio qualcosa che conosco molto bene, ovvero il testo tratto da *Eureka* di Edgar Allan Poe, e confrontare i commenti e giudizi di Luminet con il mio articolo del 1994, ma preferisco astenermi dato che non potrei essere obiettivo). In alcune note Luminet cita solo qualcuno dei propri libri (ma eccezionalmente, presentando *La petite cosmologie portative* di Raymond Queneau, cita Italo Calvino), e alla fine si limita a dare la bibliografia delle opere da cui i testi sono stati tratti. Capisco che si tratta di un libro divulgativo già molto voluminoso, e che Luminet assume il ruolo dell'insegnante che non può appesantire la propria lezione con le citazioni, ma ritengo che sarebbe stato utile inserire in una bibliografia o nelle note almeno due o tre libri o articoli (di altri studiosi s'intende) per capitolo, rivolti a chi volesse approfondire l'argomento.

Comunque, l'interesse di quest'opera risiede nel rendere fruibile al lettore che sappia leggere il francese una grande quantità di testi spesso affascinanti, rivelando anche autori e opere dei quali poteva non essere a conoscenza. Se si è interessati all'argomento (e chi non è interessato alle origini del mondo?) la panoramica offerta da questa antologia interdisciplinare è dunque senz'altro consigliabile.

ALBERTO CAPPI

Jean-Pierre Luminet è direttore di ricerca emerito del CNRS presso il Laboratorio di Astrofisica di Marsiglia. Ha lavorato sui buchi neri, sulla topologia dell'universo e ha proposto un modello di spazio finito. Ufficiale dell'Ordine delle Arti e delle Lettere, ha ricevuto numerosi premi internazionali e un asteroide (5523) porta il suo nome. La sua opera, che unisce scienza, storia, musica e arte, com-

prende una quarantina di libri, tra cui saggi, romanzi e raccolte di poesie, tradotti in quindici lingue.

★

Quando l'universo diventò infinito

Shapley, Curtis e la nascita del cosmo moderno

Gianluca Masi

Castelvecchi (Qbit), 2026

Copertina flessibile, pp. 216, € 18,50

ISBN 9791256146819

www.castelvecchieditore.com

Ho avuto modo diverse volte di criticare su queste pagine l'uso superficiale e aneddotico della storia della scienza che si riscontra in molti libri divulgativi. Diciamo subito che questo libro di Gianluca Masi non è tra questi, e fa dunque piacere leggere un libro divulgativo che affronta la storia dell'astronomia e la tratta in maniera seria (per fare un esempio, non presenta Copernico come colui che ebbe l'idea del sistema eliocentrico ma menziona prima l'ipotesi eliocentrica di Aristarco).

Lo scopo del volume è enunciato nel titolo: l'autore si prefigge di raccontare come siamo arrivati alla nostra visione di un universo infinito e in espansione (noto qui che effettivamente le osservazioni attuali sono compatibili con uno spazio infinito, ma per la verità non ne possiamo essere certi; ad ogni modo possiamo dire che l'universo osservabile è enormemente più piccolo di quanto si trova oltre l'orizzonte cosmologico). Si tratta essenzialmente della storia di come è nata l'astronomia extragalattica, di come si è arrivati a comprendere come una parte delle nebulose rivelate dai telescopi siano immensi sistemi di stelle paragonabili alla nostra Via Lattea, e di come l'insieme delle galassie non sia statico ma in espansione.

Direi che le caratteristiche essenziali del testo sono la scorrevolezza e la semplicità, l'interesse alla biografia scientifica degli astronomi e non a dettagli aneddotici, e la prospettiva prettamente astronomica, focalizzata sulle osservazioni e i telescopi. Non ci sono pretese di spiegare la relatività o la meccanica quantistica, che vengono lasciate nel sottofondo e date per scontate. Una scelta secondo me opportuna, anche se mette inevitabilmente un po' in ombra l'interazione fra teoria, tecnologia, osservazione e sperimentazione, perché permette di mantenere il libro in dimensioni contenute e lo rende accessibile davvero a chiunque.

Tra un capitolo e l'altro si trova un breve intermezzo, tipicamente di un paio di pagine, nel quale l'autore ci parla di sé, di come si è appassionato all'astronomia, e di alcuni significativi episodi delle sue osservazioni astronomiche. Questo aggiunge un tocco personale ed emotivo che risulterà familiare a chi ha la passione per il cielo stellato.

Il primo capitolo, *La scalata del cosmo*, è una sintesi storica della storia dell'astronomia dall'antichità a Newton. Il secondo capitolo, *Il riscatto delle ne-*

bulae, segue le fondamentali osservazioni e i risultati di William Herschel (e della sorella Caroline). Il terzo capitolo, *Nuove Frontiere*, descrive le osservazioni di William Parsons, terzo conte di Rosse, col suo telescopio *Leviatano*, e la nascita della spettroscopia astronomica, con i contributi di Huggins e Secchi, la determinazione del moto delle stelle attorno al centro della Via Lattea da parte di Kapteyn e il suo modello della Galassia, la scoperta della relazione periodo-luminosità delle Cefeidi da parte di Henrietta Leavitt, la misura spettroscopica delle velocità delle nebulose a spirale da parte di Vesto Slipher, e le osservazioni di Adrian van Maanen che erroneamente si convinse di aver rivelato un moto di rotazione delle spirali. Nel quarto capitolo, *I protagonisti*, vengono presentati in particolare i lavori di Harlow Shapley e Heber Curtis, che sono protagonisti nel capitolo successivo, *Il grande dibattito*, dedicato al loro celebre confronto pubblico sulla natura delle nebulose a spirale svoltosi il 26 aprile 1920 a Washington. Nel sesto capitolo, *La sentenza*, entra in gioco Edwin Hubble, che dimostra tramite le Cefeidi la natura extragalattica delle nebulose a spirale. Nel settimo capitolo, *Ultimo atto*, il più breve (otto pagine) si menziona la scoperta dell'espansione e la nascita della cosmologia moderna. Il libro si chiude con la bibliografia che include, divise per capitoli, le fonti utilizzate dall'autore e l'indice dei nomi. In una nota finale Masi segnala inoltre che sul sito www.gianlucamasi.it «sono disponibili numerose illustrazioni, fotografie e documenti originali relativi alle vicende e ai personaggi descritti in questo libro».

Voglio solo fare un'osservazione, si tratta di un dettaglio, riguardo alla scoperta dell'effetto Doppler nelle stelle. L'autore dà un certo credito ad Huggins perché «aveva comunque dimostrato che era finalmente possibile misurare spostamenti nel senso della profondità», «nonostante le sue misure

non sempre fossero coerenti» e avesse concluso che «Sirius si stesse allontanando dal Sole» mentre «oggi sappiamo che Sirius si sta in realtà avvicinando». Non critico l'autore riguardo a queste affermazioni, perché la storiografia (sostanzialmente anglosassone) ha costruito questo mito e le fonti cui ha attinto offrono proprio questa visione. Ma avendo esaminato i primi tentativi di misura dell'effetto Doppler nelle stelle, posso affermare che è stato Angelo Secchi il primo a cercare di rivelare questo effetto, mentre William Huggins, venuto dopo, ne ha ignorato il lavoro e lo ha screditato. Quanto alle misure di Huggins, confrontandole con quelle attuali risulta evidente che erano irrimediabilmente sbagliate e che Huggins non aveva il controllo degli errori, contrariamente a quanto affermava (per chi fosse interessato alla vicenda, rimando al mio intervento sul canale *YouTube* della Società Astronomica Italiana dedicato agli *Incontri del Giornale di Astronomia*).⁷

In conclusione, il libro di Masi rende disponibile in italiano una introduzione accessibile e ben documentata all'affascinante storia di come siamo arrivati a scoprire, per parafrasare Hubble, il regno delle galassie e ci siamo infine ritrovati di fronte all'insondabile immensità dell'universo.

ALBERTO CAPPI

Gianluca Masi si è laureato in fisica all'Università La Sapienza e ha conseguito il dottorato di ricerca in Astronomia all'Università Tor Vergata a Roma. È curatore scientifico al Planetario di Roma e ha fondato il *Virtual Telescope Project*. Ha firmato oltre mille contributi scientifici e partecipato alla scoperta di decine di asteroidi, numerose stelle variabili, tre pianeti extrasolari e diverse *supernovae*. L'asteroide (21795) è stato denominato "Masi" in suo onore.

⁷ www.youtube.com/live/h_JiCe6J8w?

Alberto Capi è astronomo associato dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF) presso l'Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS). Il suo lavoro di ricerca è centrato sullo studio degli ammassi di galassie e sulla cosmologia osservativa.

Gli Incontri del «Giornale di Astronomia»

IL «Giornale di Astronomia» è nato nel 1975 come rivista di informazione, cultura e didattica per soddisfare a uno dei fini della *Società Astronomica Italiana*: «promuovere la diffusione scientifica nel nostro paese». L'idea era – e ha continuato ad essere – quella di fornire a persone interessate all'astronomia e desiderose di approfondire la loro cultura scientifica un'informazione seria, sicura e aggiornata sugli studi astronomici, con articoli divulgativi di rassegna e di messa a punto ad opera di astronomi professionisti.

Il «Giornale di Astronomia» dedica ampio spazio ad argomenti di didattica e di analisi storica e si occupa anche di quel vasto campo interdisciplinare che è proprio dell'astronomia, evidenziandone e discutendone la presenza in gran parte degli aspetti culturali. In altre parole, si tratta del legame tra la scienza del cielo e le altre discipline, non solo scientifiche, quali arte, letteratura, filosofia, religione, società.

A causa del positivo riscontro presso il pubblico di questa linea editoriale e su proposta del Presidente della SAIT Roberto Buonanno, il Consiglio Direttivo ha deciso nel 2022 di allargare l'esperienza del *Giornale* presentando in rete, a cadenza regolare, alcuni dei temi pubblicati che hanno avuto maggiore interesse, con delle brevi chiacchierate tenute dagli autori che potranno interloquire col pubblico.

Di norma l'ultimo giovedì del mese, alle 17:00 per una mezz'ora o poco più, un astronomo, uno storico della scienza, un'insegnante o altri vi intratteranno su questo tipo di argomenti.

L'indirizzo web dell'*Incontro*, in diretta streaming su YouTube, viene fornito sulla pagina della SAIT (www.sait.it) qualche giorno prima dell'evento e via e-mail a chi lo chiede alla segreteria della *Società* (segreteria@sait.it).

2023

- 26 gennaio con FABIO GADDUCCI: *Le edizioni italiane e francesi della "Grande burla lunare"*.
- 23 febbraio con LICIA TROISI: *L'altro da sé: due millenni di alieni*.
- 30 marzo con RAFFAELLA SCHNEIDER: *Donne e scienza: si riparte dalle bambine*.
- 27 aprile con AGNESE MANDRINO: *Sotto lo stesso cielo? Gli astronomi e le leggi razziali in Italia*.
- 25 maggio con ALBERTO CAPPI: *La cosmologia moderna di Edgar Allan Poe*.
- 29 giugno con RAFFAELE GRATTON: *Formazione dei sistemi planetari: cosa sappiamo ad oggi e cosa ci piacerebbe sapere*.
- 28 settembre con ALESSANDRO PAPITTO: *Il cielo come orologio e bussola, dalle meridiane alle pulsar*.
- 26 ottobre con GIULIANO GIUFFRIDA: *Il "Diagramma dell'Orizzonte" e la nascita dell'astronomia araba*.

- 30 novembre con FLAVIA MARCACCI e SARA TAGLIALAGAMBA: *Leonardo, la Luna, la nuova scienza*.

2024

- 25 gennaio con MARCELLA MARCONI: *La storia di formazione della Via Lattea: cosa ci raccontano le RR Lyrae*.
- 23 febbraio con GIANGIACOMO GANDOLFI: *«De fabricanda universi figura»: le volte astrali del Rinascimento*.
- 28 marzo con MARCO CASTELLANI: *Edu INAF, tra scienza e letteratura*.
- 18 aprile con MAURO CENTRONE: *L'arte di creare stelle*.
- 30 maggio con MASSIMO DELLA VALLE: *Le esplosioni di Supernova e l'origine della vita*.
- 27 giugno con MARCO SALVATI: *Domande scomode sul tempo*.
- 26 settembre con AGNESE MANDRINO: *Gli archivi della Società degli Spettroscopisti Italiani e della Società Astronomica Italiana: nuove fonti per la storia*.
- 24 ottobre con ANNA MARIA LOMBARDI: *Il cielo dalla Luna, un sogno astronomico di Keplero*.
- 28 novembre con GABRIELE GHISELLINI: *Oceani di luce*.
- 19 dicembre con ALBERTO CAPPI: *Le prime misure della velocità radiale delle stelle: revisione critica di una storia controversa*.

2025

- 30 gennaio con ILEANA CHINNICI: *Cerere Ferdinanda: storia di una scoperta*.
- 27 febbraio con FRANCESCA MATTEUCCI: *Archeologia della nostra Galassia usando le abbondanze chimiche come fossili*.
- 27 marzo con GIUSEPPE BONO: *I trent'anni che rivoluzionarono l'astrofisica*.
- 24 aprile con AMEDEO BALBI: *La fisica dei mondi abitabili*.
- 29 maggio con ANDREA COMASTRI: *Buchi Neri: un problema di estrema gravità*.
- 26 giugno con LUCIANO BURDERI: *L'esistenza degli Dei. Come il Paradosso dei Gemelli ed il Principio Copernicano forniscono una "soluzione relativistica" al Paradosso di Fermi: «Dove sono tutti quanti?»*.
- 25 settembre con IVAN AGOSTINELLI: *Ottica adattiva e intelligenza artificiale*.
- 30 ottobre con ALDO ALTAMORE: *Il carteggio Armellini-Gemelli*.
- 27 novembre con CESARE GUAITA: *Marte: molecole organiche naturali o biologiche?*

2026

- 8 gennaio con PATRIZIA CARAVEO: *Donne fra le stelle*.
- 29 gennaio con AGNESE MANDRINO e FABRIZIO BÒNOLI: *Astronomi e fantasmi*.

- 26 febbraio con LUCIO ANGELO ANTONELLI: *A caccia dei fotoni più energetici del Cosmo. L'astronomia Cherenkov dalle origini al CTAO.*
- 26 marzo con CRISTINA PUZZARINI: *La chimica tra le stelle. Come spettroscopia e meccanica quantistica ci raccontano il mezzo interstellare.*
- 30 aprile con ANNALISA CALAMIDA: *La vita delle stelle vista dal Telescopio Spaziale Hubble.*
- 28 maggio con ANGELO ADAMO: *Sonora è la notte. I concerti per notte stellata e orchestra di John Cage.*
- 25 giugno con I VINCITORI DEL 'PREMIO G.V. SCHIAPARELLI': *Le onde gravitazionali al concorso Schiaparelli.*

- 24 settembre con ADRIANO FONTANA: *Habitable World Observatory: verso il futuro grande telescopio spaziale.*
- 29 ottobre con MARCO FACCINI: *Il Sole non basta! La doppia vita del Filtro Magneto-Ottico MOF: evoluzione di un'eccellenza italiana dalla fisica solare all'ottica adattiva con le stelle laser.*

Gli incontri sono successivamente resi disponibili sul canale YouTube della Società Astronomica Italiana: www.youtube.com/@sait-societaastronomicaita3911/streams.

Astronomia oggi

- L'enorme eco radio della formazione di un ammasso di galassie (A. BOTTEON), 2026, vol. 52, n. 1, p. 5 (PREMIO 'GIUSEPPE LORENZONI' 2025)
- La popolazione galattica delle Pulsar Wind Nebulae ai raggi gamma (M. FIORI), 2026, vol. 52, n. 1, p. 5 (PREMIO 'GIUSEPPE LORENZONI' 2025: menzione speciale)
- Il battito cardiaco delle galassie (M. D'ONOFRIO, C. CHIOSI), 2026, vol. 52, n. 2, p. 12
- L'Archivio Digitale Scientifico ESO: riflessioni attorno alla materia digitale (S. ROMANI), 2026, vol. 52, n. 2, p. 16
- Il Grande Attrattore: origine, significato e interpretazione di un termine cosmologico (C. PIANTA), 2026, vol. 52, n. 3, p. 2
- Fotoevaporazione esterna di dischi proto-planetari (R. ANANIA), 2026, vol. 52, n. 4, p. 8 (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2026: menzione speciale)
- La messa in servizio dello strumento NISP a bordo del satellite *Euclid* (F. COGATO), 2026, vol. 52, n. 4, p. 17 (PREMIO 'GIUSEPPE LORENZONI' 2026)
- Estrazione di ossigeno dalla regolite planetaria mediante riduzione carbotermica solido-gas per l'esplorazione della superficie lunare (A. DOTTORI), 2026, vol. 52, n. 4, p. 25 (PREMIO 'GUIDO HORN D'ARTURO' 2026: menzione speciale)
- MISTRAL: l'occhio ultra-freddo del Sardinia Radio Telescope (G. ISOPI), 2026, vol. 52, n. 4, p. 30 (PREMIO 'GUIDO HORN D'ARTURO' 2026)
- Venti cosmici: come i buchi neri influenzano il destino delle galassie (C. MARCONCINI), 2026, vol. 52, n. 4, p. 34 (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2026)
- Misurare l'universo primordiale con il satellite *LiteBIRD*: la sfida delle sistematiche strumentali (S. MICHELI), 2026, vol. 52, n. 4, p. 40 (PREMIO 'GUIDO HORN D'ARTURO' 2026: menzione speciale)
- La nostra Galassia in raggia gamma e neutrini. L'importanza delle sorgenti deboli (V. VECCHIOTTI), 2026, vol. 52, n. 4, p. 45 (PREMIO 'GIOVANNI BIGNAMI' 2026)

Astronomia e società

- Il cielo non lo possono bombardare. La storia di Maysoon, astrofila di Gaza (N. IANNASCOLI, G. COVONE), 2026, vol. 52, n. 1, p. 2
- Un incontro tra cinema e radiotelescopi: Antonioni, *Deserto rosso* e la Croce del Nord (G. VETOLANI), 2026, vol. 52, n. 2, p. 2
- Laudatio* per il conferimento del Dottorato di Ricerca *Honoris Causa* alla prof.ssa Angela Misiano (R.C. BARBERI), 2026, vol. 52, n. 3, p. 6
- Magnifico Rettore ... (A. MISIANO), 2026, vol. 52, n. 3, p. 8

Astronomia e letteratura

- L'identità di genere letterario: il lascito umanistico di Galileo Galilei (A. ADAMO), 2026, vol. 52, n. 3, p. 10

Didattica

- Le comete nei cieli antichi (F. GINANNESCHI), 2026, vol. 52, n. 1, p. 28
- Concorso nazionale 'Paolo Maffei' – I edizione 2025-26 (C. BALDO, A. ZIGIOTTO, T. BARBI, G. BIOSA, S. IANNILLI, E. RUBINO), 2026, vol. 52, n. 2, p. 33
- La misura delle distanze astronomiche. Proposta di una attività didattica in astrofisica (M. CITTÀ, A.M. CANGELOSI, M. GENCHI), 2026, vol. 52, n. 3, p. 28
- Tunguska: ricostruire un cataclisma spaziale (F. GINANNESCHI), 2026, vol. 52, n. 3, p. 37

* Gli indici di tutte le annate del «Giornale di Astronomia» sono disponibili in rete all'indirizzo <http://giornaleastronomia.difa.unibo.it/indici.html>

Storia

- Vita ed eredità di Paolo Maffei, a cento anni dalla nascita (R. NESCI), 2026, vol. 52, n. 1, p. 16
- Aurore boreali osservate a bassa latitudine (A. ALTAMORE), 2026, vol. 52, n. 1, p. 23
- Massimiliano d'Asburgo e la nascita dell'Osservatorio Astronomico di Trieste (P. MOLARO), 2026, vol. 52, n. 2, p. 25
- Professione: astronoma. Il caso dell'Osservatorio di Torino (G. BERNARDI), 2026, vol. 52, n. 3, p. 19
- Bologna 1726: nasceva trecento anni fa la Specola dell'Istituto delle Scienze (F. BÒNOLI), 2026, vol. 52, n. 4, p. 2

Cieli d'inchiostro (a cura di A. MANDRINO, M. GARGANO, A. GASPERINI)

- Il padiglione del cerchio meridiano di Repsold: documenti e immagini di un ambizioso progetto di modernizzazione (M. GARGANO), 2026, vol. 52, n. 1, p. 34
- Julia Margaret Cameron e Sir John Herschel, il sodalizio tra due innovatori alle origini della fotografia (T. MACALUSO), 2026, vol. 52, n. 2, p. 48
- L'epistolario Piazzzi-Oriani (I. CHINNICI, A. MANDRINO), 2026, vol. 52, n. 3, p. 43
- Ritratto dell'astronomo da giovane: i primi 200 anni di Giovanni Battista Donati (S. BIANCHI, A. GASPERINI, D. GALLI), 2026, vol. 52, n. 4, p. 50

Telescopio letterario. Le utopie marziane tra Ottocento e Novecento

- (a cura di S. BADIOLI, A. CALANCHI)
Presentazione, 2026, vol. 52, n. 4, p. 56

Rubrica dei lettori

- La visibilità a occhio nudo delle Pleiadi (G. VANIN), 2026, vol. 52, n. 3, p. 42

Spigolature astronomiche (a cura di A. D'ERCOLE)

- Rifrazione, onda evanescente ed effetto tunnel (A. D'ERCOLE), 2026, vol. 52, n. 1, p. 39
- Il concetto di tempo in fisica (A. D'ERCOLE), 2026, vol. 52, n. 2, p. 52
- Il concetto di tempo nella storia (A. D'ERCOLE), 2026, vol. 52, n. 3, p. 46
- Simmetrie e leggi di conservazione: il teorema di Noether. Storia di una donna straordinaria (A. D'ERCOLE), 2026, vol. 52, n. 4, p. 58

Biblioteca (a cura di A. CAPPÌ)

- A. ASPECT, *Se Einstein avesse saputo. Dalle rivoluzioni quantistiche a una nuova idea di realtà* (recens. di A. Cappi), 2026, vol. 52, n. 3, p. 54
- P. ATTIVISSIMO, *Ritorno sulla Luna. Dal sogno dell'Apollo alla sfida di Artemis* (recens. di A. Cappi), 2026, vol. 52, n. 3, p. 54
- S. A. BENNER, *Meet the Neighbors. Life on Mars and How to find it* (recens. di A. Calanchi), 2026, vol. 52, n. 4, p. 66
- E. BERGER, *La rivoluzione SpaceX. Elon Musk e la conquista di Marte* (recens. di A. Cappi), 2026, vol. 52, n. 1, p. 48
- A. BETTINI, *Galileo Galilei, genio policromo. Fisico, astronomo, filosofo, scrittore, ingegnere, matematico, filologo, musicista e pittore* (recens. di P. Molaro), 2026, vol. 52, n. 1, p. 49
- A. CALANCHI, *Trent'anni su Marte. Contro-narrazioni dell'invasione aliena (1880-1911)* (recens. di A. Cappi), 2026, vol. 52, n. 2, p. 59
- A. CARBOGNANI, *Destinazione spazio profondo. Verso Proxima e Barnard per esplorare nuovi pianeti* (recens. di G.M. Stirpe), 2026, vol. 52, n. 3, p. 56
- N. CARTWRIGHT, *La scienza vista da una filosofa* (recens. di A. Cappi), 2026, vol. 52, n. 1, p. 51
- E. CHAPMAN, *La prima luce. L'accensione delle stelle all'alba del tempo* (recens. di M. Bellazzini), 2026, vol. 52, n. 4, p. 68

- C. CRAWFORD *et al.*, *Luna. Dal sogno all'esplorazione* (recens. di G.M. Stirpe), 2026, vol. 52, n. 2, p. 60
- A. FERRERO, *Rimasti a Terra. Eroi ed eroine dimenticati dell'avventura spaziale* (recens. di A. Calanchi), 2026, vol. 52, n. 3, p. 57
- P. FERRI, *Ai confini dell'universo. Dalle sfere celesti all'esplorazione spaziale* (recens. di S. Caviuoti), 2026, vol. 52, n. 2, p. 60
- V. GIACOMOTTO-CHARRA, S. NONY, *La Terre plate. Généalogie d'une idée fausse* (edizione italiana *La Terra piatta. Genealogia di un malinteso*) (recens. di A. Cappi), 2026, vol. 52, n. 2, p. 61
- S. KUNA BALLERO, *Rapsodia Marziana. Scienza, fiction e ideologia nell'immaginario di Marte* (recens. di A. Cappi), 2026, vol. 52, n. 2, p. 63
- J.-P. LUMINET, *Les Origines du monde* (recens. di A. Cappi), 2026, vol. 52, n. 4, p. 69
- G. MASI, *Quando l'universo diventò infinito. Shapley, Curtis e la nascita del cosmo moderno* (recens. di A. Cappi), 2026, vol. 52, n. 4, p. 70
- C. ROVELLI, *Sull'eguaglianza di tutte le cose. Lezioni americane* (recens. di A. Cappi), 2026, vol. 52, n. 1, p. 53
- C. ROVELLI, *La cattiva coscienza dei fisici. Ci sono atomiche sufficienti a bruciare viva l'umanità, e stiamo litigando* (recens. di A. Cappi), 2026, vol. 52, n. 3, p. 59
- Gli Incontri del «Giornale di Astronomia»**
2026, vol. 52, n. 1, p. 55; n. 2, p. 65; n. 3, p. 61; n. 4, p. 72

Indice degli autori

- A. ADAMO, n. 3, p. 10
A. ALTAMORE, n. 1, p. 23
R. ANANIA, n. 4, p. 8
S. BADIOLI, n. 4, p. 56
C. BALDO, n. 2, p. 33
R.C. BARBERI, n. 3, p. 6
T. BARBI, n. 2, p. 33
M. BELLAZZINI, n. 4, p. 68
G. BERNARDI, n. 3, p. 19
S. BIANCHI, n. 4, p. 50
G. BIOSA, n. 2, p. 33
F. BÒNOLI, n. 4, p. 2
A. BOTTEON, n. 1, p. 5
A. CALANCHI, n. 3, p. 57; n. 4, p. 56, p. 66
A. M. CANGELOSI, n. 3, p. 28
A. CAPPI, n. 1, p. 48, 51, 53; n. 2, p. 59, 61, 63; n. 3, p. 54, 59; n. 4, p. 69, p. 70
S. CAVUOTI, n. 2, p. 60
I. CHINNICI, n. 3, p. 43
C. CHIOSI, n. 2, p. 12
M. CITTÀ, n. 3, p. 28
F. COGATO, n. 4, p. 17
G. COVONE, n. 1, p. 2
A. D'ERCOLE, n. 1, p. 39; n. 2, p. 52; n. 3, p. 46; n. 4, p. 58
M. D'ONOFRIO, n. 2, p. 12
A. DOTTORI, n. 4, p. 25
M. FIORI, n. 1, p. 5
D. GALLI, n. 4, p. 50
M. GARGANO, n. 1, p. 34
A. GASPERINI, n. 4, p. 50
M. GENCHI, n. 3, p. 28
F. GINANNESCHI, n. 1, p. 28; n. 3, p. 37
N. IANNASCOLI, n. 1, p. 2
S. IANNILLI, n. 2, p. 33
G. ISOPI, n. 4, p. 30
T. MACALUSO, n. 2, p. 48
A. MANDRINO, n. 3, p. 43
C. MARCONCINI, n. 4, p. 34
G. MICHELI, n. 4, p. 40
A. MISIANO, n. 3, p. 8
P. MOLARO, n. 1, p. 49; n. 2, p. 25
R. NESCI, n. 1, p. 16
C. PIANTA, n. 3, p. 2
S. ROMANI, n. 2, p. 16
E. RUBINO, n. 2, p. 33
G.M. STIRPE, n. 2, p. 60; n. 3, p. 56
V. VECCHIOTTI, n. 4, p. 45
G. VETTOLANI, n. 2, p. 2
A. ZIGIOTTO, n. 2, p. 33