



# GIORNALE DI ASTRONOMIA

Rivista di informazione, cultura e didattica  
della Società Astronomica Italiana



Fabrizio Serra editore  
Pisa · Roma

Dicembre 2019  
Vol. 45° · N. 4

## SOCIETÀ ASTRONOMICA ITALIANA

(già Società degli Spettroscopisti Italiani)

eretta Ente Morale con R. D. del 10 giugno 1939, n. 1229

Sede legale e segreteria: Largo E. Fermi 5, I 50125 Firenze, tel. +39 055 2752270

sait@arcetri.astro.it

www.sait.it

### CONSIGLIO DIRETTIVO PER IL TRIENNIO 2017-2019

*Presidente:* Ginevra Trinchieri · *Vice Presidente:* Flavio Fusi Pecci

*Consiglieri:* Angelo Angeletti, Angelo Antonelli, Patrizia Caraveo, Giuseppe Cutispoto, Massimo Mazzoni, Angela Misiano

*Segretario Amministratore:* Agatino Rifatto · *Vice Segretario:* Mazzucconi Fabrizio

### REVISORI DEI CONTI

*Revisori effettivi:* Alberto Righini, Giuseppe Del Grande

Le modalità e le quote di iscrizione alla Società Astronomica Italiana sono consultabili presso il sito Internet della Società [www.sait.it](http://www.sait.it).

I pagamenti possono essere effettuati con versamento sul c. c. postale n. 18575506 o con bonifico bancario sul conto IBAN IT3080616002839100000003642.

La Società Astronomica Italiana pubblica due periodici:

le «Memorie della Società Astronomica Italiana» dal 1920 e il «Giornale di Astronomia» dal 1975.

### GIORNALE DI ASTRONOMIA

Amministrazione e abbonamenti:

FABRIZIO SERRA EDITORE®

Casella postale n. 1, succursale n. 8, I 56123 Pisa

tel. +39 050 542332, fax +39 050 574888

fse@libraweb.net · [www.libraweb.net](http://www.libraweb.net)

*Uffici di Pisa:* Via Santa Bibbiana 28, I 56127 Pisa

*Uffici di Roma:* Via Carlo Emanuele I 48, I 00185 Roma

I prezzi ufficiali di abbonamento cartaceo e *Online* sono consultabili su [www.libraweb.net](http://www.libraweb.net).

*Print and Online official subscription rates are available at [www.libraweb.net](http://www.libraweb.net).*

I pagamenti possono essere effettuati con versamento sul c. c. postale n. 17154550 o tramite carta di credito (American Express, Carta Sì, Eurocard, Mastercard, Visa).

*Pubblicità:* per questo servizio rivolgersi alla *Fabrizio Serra editore®*. Le inserzioni pubblicitarie non implicano un giudizio di merito da parte della S.A.It.



Proprietà riservata · All rights reserved

© Copyright 2019 by

*Società Astronomica Italiana*

and

*Fabrizio Serra editore®*, Pisa · Roma.

A norma del codice civile italiano, è vietata la riproduzione, totale o parziale (compresi estratti, ecc.), di questa pubblicazione in qualsiasi forma e versione (comprese bozze, ecc.), originale o derivata, e con qualsiasi mezzo a stampa o internet (compresi siti web personali e istituzionali, [academia.edu](http://academia.edu), ecc.), elettronico, digitale, meccanico, per mezzo di fotocopie, pdf, microfilm, film, scanner o altro, senza il permesso scritto della casa editrice.

*Under Italian civil law this publication cannot be reproduced, wholly or in part (included offprints, etc.), in any form (included proofs, etc.), original or derived, or by any means: print, internet (included personal and institutional web sites, [academia.edu](http://academia.edu), etc.), electronic, digital, mechanical, including photocopy, pdf, microfilm, film, scanner or any other medium, without permission in writing from the publisher.*

# 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

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

[www.bo.astro.it/sait/giornale.html](http://www.bo.astro.it/sait/giornale.html)

Per informazioni rivolgersi alla Segreteria della  
Società Astronomica Italiana  
Largo E. Fermi 5, I 50125 Firenze  
tel. +39 055 2752270  
[sait@arcetri.astro.it](mailto:sait@arcetri.astro.it)

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

Fabrizio Bònoli, Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Via Ranzani 1, I 40127 Bologna  
tel. +39 051 2095701, fax +39 051 2095700  
[fabrizio.bonoli@unibo.it](mailto:fabrizio.bonoli@unibo.it)

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

Pubblicazione trimestrale  
Vol. 45° · N. 4 · Dicembre 2019



**Fabrizio Serra editore**  
Pisa · Roma

## Sommario

### Storia

- 2 Leonardo da Vinci  
(Anchiano, 15 aprile 1452 - Amboise, 2 maggio 1519)  
F. BÒNOLI
- 5 L'astronomia vinciana (1939)  
P. EMANUELLI (1889-1946)
- 10 L'astronomia in Leonardo (1938)  
R. MARCOLONGO (1862-1943)
- 12 Leonardo da Vinci e gli astronomi del suo tempo (1952)  
C. PEDRETTI (1928-2018)
- 18 Un aspetto poco conosciuto dell'attività di Leonardo da  
Vinci nel campo dell'ottica (1965)  
V. RONCHI (1897-1988)
- 25 Leonardo e la luce cinerea (1919)  
E. MILLOSEVICH (1848-1919)

### Astronomia e letteratura

- 27 Mitizzazioni e dissacrazioni poetiche delle scoperte astrono-  
miche  
A. BATTISTINI

### Astronomia oggi

- 31 Navigazione autonoma per operazioni di prossimità con  
oggetti spaziali non cooperativi  
V. PESCE (PREMIO 'GUIDO HORN D'ARTURO' 2019)
- 36 Formazione di galassie a disco con simulazioni numeriche  
cosmologiche: ruolo degli *outflow* galattici ed evoluzione  
chimica  
M. VALENTINI (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2019)
- 43 Tra le pieghe della Galassia  
E. POGGIO (PREMIO 'GIUSEPPE LORENZONI' 2019)
- 49 Le immagini di un giovane sistema planetario multiplo  
A. ZURLO (PREMIO 'GIUSEPPE LORENZONI' 2019: menzio-  
ne speciale)

### Didattica

- 51 Il *Premio Cosmos 2019* per la divulgazione scientifica

### Cent'anni fa (a cura di D. Randazzo, I. Chinnici)

- 55 Saluto ai lettori

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

- 59 Dicembre 1819: due secoli fa le prime osservazioni astrono-  
miche a Capodimonte  
E. OLOSTRO CIRELLA

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

- 63 L'immagine del buco nero nella galassia M87  
A. D'ERCOLE

### Biblioteca (a cura di A. Cappi)

- 71 G. ANSELMINI, *Alla scoperta della Luna. Storia, tradizioni, osser-  
vazione astronomica* (recens. di A. Simoncelli)
- 71 M. CAPACCIOLI, *Luna rossa. La conquista sovietica dello spazio*  
(recens. di M. Orlandi)
- 73 P. CARAVEO, *Conquistati dalla Luna. Storia di un'attrazione  
senza tempo* (recens. di M. Orlandi)
- 74 S. CAVINA, *Men on the Moon. An American History 1969-2019*  
(recens. di M. Orlandi)
- 76 J. M. PASACHOFF, A. FILIPPENKO, *The Cosmos. Astronomy in  
the New Millennium* (recens. di F. Bònoli)

### 78 Indici del volume 45 · 2019

### 79 Indice degli autori

### In copertina

La Luna di Leonardo da Vinci. I due piccoli schizzi (ca. 2 cm),  
realizzati a penna e inchiostro tra il 1505 e il 1508, compaiono in un  
angolo del *folio 310r* (già *112r-a*) del *Codice Atlantico* (Milano, Vene-  
randa Biblioteca Ambrosiana). [Si vedano all'interno gli articoli su  
Leonardo e l'astronomia]

# Leonardo da Vinci

Anchiano, 15 aprile 1452 - Amboise, 2 maggio 1519

Fabrizio Bònoli

Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

**F**RANCIA, Amboise, maniero di Clos Lucé, 2 maggio 1519: uno dei più grandi geni di tutta la storia dell'umanità si spegne all'età di 67 anni, per cause ancora oggi non del tutto chiarite (forse un evento cardiovascolare acuto).

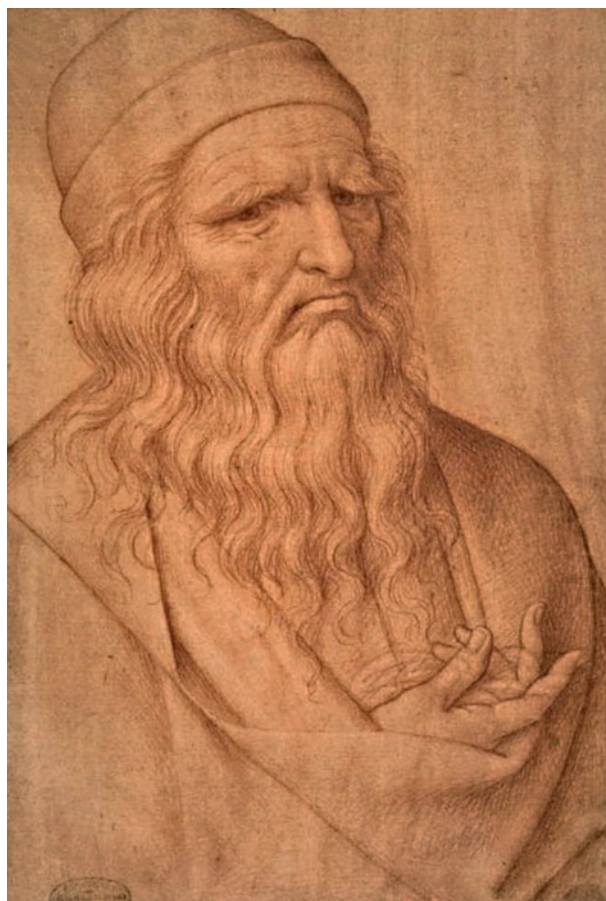
E così, a distanza di cinquecento anni, in questo 2019, in tutto il mondo si celebra la figura di Leonardo da Vinci.

Anche il «Giornale di Astronomia» non ha voluto passare sotto silenzio questo anniversario ed è quindi venuto naturale pensare a “Leonardo e l'astronomia”, ma qui è sorto un problema.

Un'enorme quantità di opere è stata scritta su Leonardo, la maggior parte, ovviamente, sull'attività artistica, ma un gran numero anche sulla produzione tecnica e scientifica. Tuttavia, quando si va ad esaminare cosa è stato scritto sui suoi interessi verso le cose del cielo, non si trovano molti lavori. Alcuni sono di dettaglio e relativi ai non molti, sparsi, cenni astronomici che si trovano nei suoi scritti; altri sono per lo più compilativi e collazionano quei pochi cenni. Altri ancora inseguono quei limitati spunti cercando di inserirli in un più vasto pensiero cosmico del personaggio; pensiero che pur non poteva essere molto diverso dalle idee dell'epoca e anche dalle nuove prospettive neoplatonizzanti fiorite nel corso del Quattrocento. Sono così sorte anche alcune suggestive ipotesi che hanno voluto vedere in Leonardo un anticipatore – di vari decenni – dell'eliocentrismo copernicano e addirittura – di più di un secolo – dell'invenzione del cannocchiale a lenti o perfino del telescopio a specchio. Suggestioni, dicevamo, in quanto si basano solo su alcune frasi, molte poche, scritte a margine dei fogli sui quali il genio vinciano buttava giù rapidamente i suoi pensieri, maggiormente mentre si occupava di questioni tecniche di ottica o del problema – ancora del tutto oscuro ai suoi tempi – della fisiologia della visione, estremamente importante per lo studio della prospettiva e per le sue opere artistiche.

Allo storico e al critico che facciano il mestiere loro e non vogliano trovar solamente occasioni di sonante oratoria – scrive Eugenio Garin in *Scienza e vita civile nel Rinascimento italiano* (1980, p. 58) – non pochi dei testi anche celebri di Leonardo appariranno alla fine piuttosto appunti buttati giù tra frettolose letture che conclusioni sottilmente ragionate; e rispetto alla validità del contenuto scientifico non di rado confusi e contraddittori.

Certamente, un'analisi completa del pensiero astronomico di Leonardo da Vinci a tutt'oggi pare man-



Da un recente studio, basato anche su questo disegno a sanguigna raffigurante Leonardo e attribuito a Giovan Ambrogio Figino (1553-1608: Venezia, Gallerie dell'Accademia, Gabinetto dei Disegni e Stampe, n. 834), in particolare dal dettaglio della mano destra, Davide Lazzeri, chirurgo plastico della Clinica Villa Salaria di Roma, e Carlo Rossi, neurologo dell'Ospedale di Pontedera, hanno concluso che la paralisi alla mano che colpì Leonardo pochi anni prima della morte sarebbe stata una lesione nervosa – nota come *claw hand* ('mano ad artiglio'), dovuta probabilmente a un trauma al nervo della mano – e non un ictus, come si era pensato in precedenza (D. LAZZERI, C. ROSSI, *The right hand palsy of Leonardo da Vinci (1452–1519): New insights on the occasion of the 500th anniversary of his death*, «Journal of the Royal Society of Medicine», May 2019).

La paralisi alla mano è testimoniata da una pagina del diario di viaggio del 10 ottobre 1517 di Antonio De Beatis, segretario particolare del cardinale Luigi d'Aragona che aveva fatto visita all'artista nel maniero di Clos Lucé: «da lui [messer Lunardo Vinci fiorentino, veggio de più de LXX anni, pictore in la età nostra eccellentissimo] per esserli venuta certa paralesi ne la dextra, non se può expectare più cosa bona [...] Et benché il predicto messer Lunardo non possa colorire con quella dolcezza che solea, pur serve ad fare desegni et insegnare a gli altri» (*Itinerario di monsignor ... Cardinale de Aragona mio signor, ... descritto per me donno Antonio de Beatis canonico Melfictano ...*, Biblioteca Nazionale di Napoli, ms.).

care e così il «Giornale di Astronomia» ha deciso non di proporre un'ulteriore raccolta di tutti quegli

accenni a cose e fenomeni celesti, bensì di riprodurre alcuni importanti articoli che hanno trattato, forse tra i primi, i rapporti tra Leonardo e l'astronomia e che possono ancora, pur se passati molti decenni dalla loro pubblicazione, essere di base per studi più organici.

I primi due, della fine degli anni Trenta del Novecento, sono di Pio Emanuelli, astronomo e storico dell'astronomia, e di Roberto Marcolongo, matematico e storico della scienza. Il primo, comparso nel prestigioso volume realizzato nel 1939, in occasione di una grande mostra milanese su Leonardo da Vinci; il secondo, pubblicato nel 1938 su *Sapere*, all'interno di un più vasto articolo su Leonardo scienziato, e riproposto poi in un numero speciale della stessa rivista nel 1952, per il quinto centenario della nascita.

Il terzo articolo, sempre del 1952, è di un giovanissimo Carlo Pedretti, che diventerà uno dei più grandi studiosi di Leonardo, commissionatogli da Guido Horn d'Arturo per la rivista «Coelum», e che comparirà anche nell'importante raccolta di *Studi vinciani* dello stesso autore, edita a Ginevra alcuni anni più tardi.

Segue l'articolo di uno dei maggiori ottici e storici dell'ottica italiani, Vasco Ronchi, pubblicato sulla rivista *Luce e immagini* del 1965, a completamento e aggiornamento di un suo più vasto lavoro sull'ottica di Leonardo, comparso nel volume del 1952 dell'Istituto Poligrafico dello Stato, a cura del 'Comitato Nazionale per le onoranze a Leonardo nel quinto centenario della nascita'.

Per finire, riproponiamo un breve scritto di cento anni fa dell'astronomo Elia Millosevich, dal volume dell'Istituto di Studi Vinciani per il IV centenario della morte dell'artista, in cui viene analizzata l'attribuzione a Leonardo della prima spiegazione corretta della luce cinerea.

Come dicevamo, non si tratta di lavori recenti e quindi non compaiono qui (anche perché più facilmente reperibili) alcuni degli studi successivi, quali quello del 1987 di Gibson Reaves e dello stesso Carlo Pedretti,<sup>1</sup> che per primi discutevano gli schizzi leonardeschi del volto della Luna (si veda p.e. quello riportato in copertina di questo fascicolo); oppure quelli di Scott L. Montgomery del 1994<sup>2</sup> e di Stephen Pumfrey del 2011,<sup>3</sup> che confrontavano, rispettivamente, quello che è probabilmente il primo disegno naturalistico della Luna nella *Crocifissione* di Jan Van Eyck (della prima metà del Quattrocento) con quelli successivi di Leonardo descritti da Reaves e Pedretti, e la mappa lunare della fine del Cinquecento di William Gilbert (poi pubblicata sul postumo *De mundo nostro sublunari philosophia nova*) con i precedenti

disegni leonardeschi. E neppure gli studi del 2011 di Jaroslaw Włodarczyk sulla librazione lunare,<sup>4</sup> la cui scoperta era stata da alcuni erroneamente attribuita a Leonardo.

Da segnalare, infine, alcuni recenti lavori di Rodolfo Maffei,<sup>5</sup> oltre al volume del 2013 *Leonardo '1952' e la cultura nell'Europa del dopoguerra*, a cura di R. Nanni e M. Torrini ("Biblioteca leonardiana" di Olschki), dedicato all'analisi degli studi fatti nel 1952 in occasione del cinquecentenario della nascita, in cui lo storico della scienza e del pensiero Sven Dupré analizza, confermando in gran parte, i precedenti lavori di Vasco Ronchi; e anche *Leonardo da Vinci on Nature. Knowledge and Representation*, a cura di F. Frosini e A. Nova (il Mulino, 2015), che riporta gli atti di un importante convegno del 2013 al Kunsthistorisches Institut di Firenze.<sup>6</sup>

Il nostro lettore interessato potrà comunque divertirsi a cercare alcuni scritti su Leonardo e l'astronomia che sono comparsi in questi ultimi anni in rete, a partire dalla raccolta dei passi e dei frammenti astronomici tradotti in inglese da Jean Paul Richter e pubblicati nel 1888 in *The Notebooks of Leonardo da Vinci* (vedi la 'sitografia' qui sotto).

Per concludere, dal momento che negli articoli che qui riproduciamo sono citati i *Codici* leonardeschi, ci è parso di aiuto al lettore riportare l'elenco di questi e le località in cui sono conservati, con le date che ricoprono.

## I Codici di Leonardo da Vinci

- *Codice Atlantico* (Milano, Veneranda Biblioteca Ambrosiana): 1478-1519
- *Windsor Royal Collection* (Windsor Castle, Royal Library): 1478-1518
- *Codice Arundel 263* (London, British Library): 1478-1519
- *Codici dell'Istituto di Francia*: 12 mss. da A a M (Paris, Bibliothèque de l'Institut de France): 1487-1516
- *Codice Ashburnham*: fogli volanti oggi supplementi dei mss. A e B de l'Institut de France (Paris, Bibliothèque de l'Institut de France): 1487-1492
- *Codici Forster I, II, III* (London, Victoria and Albert Museum): 1487-1505

<sup>4</sup> JAROSLAW WŁODARCZYK, *Libration of the Moon, Hevelius theory, and its earlier reception in England*, Ivi, 42, 2011, pp. 1-25 (in particolare la nota 2).

<sup>5</sup> Qui ne citiamo due per tutti, sia per la critica del presunto copernicanesimo di Leonardo, sia per le numerose referenze al loro interno: RODOLFO MAFFEI, *L'equivoco del sole immobile: cosmologia di Leonardo tra disegni e testi*, in *Leonardo da Vinci, 1452-1519: Il disegno del mondo*, a cura di P.C. Marani e M.T. Fiorio, Skira, 2015, pp. 399-407; IDEM, *Quasi dentatae rotae: Leonardo disegna la Luna*, in *Leonardo da Vinci on nature: knowledge and representation*, a cura di F. Frosini e A. Nova, «Studi e ricerche», Kunsthistorisches Institut in Florenz, Max-Planck-Institut, 11, 2015, pp. 303-337.

<sup>6</sup> Un'ampia recensione degli atti di questo convegno, dove si può leggere anche una critica discussione sull'immagine di Leonardo nella storia della cultura e sulla sua mitizzazione costruita nei secoli, è in: ALESSIO PANICHI, *Spazzolare il mito contropelo. Alcune osservazioni a proposito di un recente volume su Leonardo da Vinci*, «Rinascimento», 58, 2018, pp. 347-367.

<sup>1</sup> GIBSON REAVES, CARLO PEDRETTI, *Leonardo da Vinci's drawings of the surface features of the Moon*, «Journal for the History of Astronomy», 18, 1987, pp. 55-58.

<sup>2</sup> SCOTT L. MONTGOMERY, *The first naturalistic drawings of the Moon: Jan Van Eyck and the art of observation*, Ivi, 25, 1994, 317-320.

<sup>3</sup> STEPHEN PUMFREY, *The Selenographia of William Gilbert: his pre-telescopic map of the Moon and his discovery of Lunar libration*, Ivi, 42, 2011, pp. 193-203 (in particolare la nota 2).

- *Codice sul volo degli uccelli* (Torino, Biblioteca Reale): 1506
- *Codice Trivulziano 2162* (Milano, Biblioteca Trivulziana del Castello Sforzesco): 1487-1490
- *Codici di Madrid I, II* (Madrid, Biblioteca Nacional de España): 1490-1508
- *Codice Leicester* (ex *Codice Hammer*) (Seattle, Bill Gates private collection): 1506-1510
- *Trattato della pittura* o *Codex Vaticanus Urbinas lat. 1270* (raccolta attribuita a Francesco Melzi: 1540) (Città del Vaticano, Biblioteca Apostolica Vaticana): 1480-1516

## Un po' di sitografia (al settembre 2019)

---

- *Codice Atlantico* alla Veneranda Biblioteca Ambrosiana di Milano:  
[www.ambrosiana.it/scopri/codice-atlantico/](http://www.ambrosiana.it/scopri/codice-atlantico/)  
<http://codex-atlanticus.it/#/>  
<http://sauvage27.blogspot.com/2015/11/codice-atlantico-leonardo-da-vinci.html>
- *Royal Collection* nel Castello di Windsor:  
[www.rct.uk/collection/people/leonardo-da-vinci-vinci-1452-amboise-1519#/type/subject](http://www.rct.uk/collection/people/leonardo-da-vinci-vinci-1452-amboise-1519#/type/subject)  
[www.nationalgeographic.com/culture/2019/05/queen-elizabeth-leonardo-da-vinci-exhibit-buckingham-palace/](http://www.nationalgeographic.com/culture/2019/05/queen-elizabeth-leonardo-da-vinci-exhibit-buckingham-palace/)
- *Codice Arundel 263* alla British Library di Londra:  
[www.bl.uk/manuscripts/FullDisplay.aspx?ref=Arundel\\_MS\\_263](http://www.bl.uk/manuscripts/FullDisplay.aspx?ref=Arundel_MS_263)
- *Carnets de l'Institut de France* alla Bibliothèque dell'Istituto a Parigi:  
[www.bibliotheque-institutdefrance.fr/content/les-carnets-de-leonard-de-vinci](http://www.bibliotheque-institutdefrance.fr/content/les-carnets-de-leonard-de-vinci)  
[www.photo.rmn.fr/](http://www.photo.rmn.fr/)
- *Codici Forster I, II, III* al Victoria and Albert Museum di Londra:  
[www.vam.ac.uk/articles/leonardo-da-vincis-notebooks](http://www.vam.ac.uk/articles/leonardo-da-vincis-notebooks)
- *The Notebooks of Leonardo Da Vinci*, tradotti da Jean Paul Richter nel 1888  
[https://en.wikisource.org/wiki/The\\_Notebooks\\_of\\_Leonardo\\_Da\\_Vinci/XV](https://en.wikisource.org/wiki/The_Notebooks_of_Leonardo_Da_Vinci/XV)  
[www.fromoldbooks.org/Richter-NotebooksOfLeonardo/](http://www.fromoldbooks.org/Richter-NotebooksOfLeonardo/)  
[www.gutenberg.org/ebooks/5000](http://www.gutenberg.org/ebooks/5000)
- *Codice Trivulziano 2162* nella Biblioteca Trivulziana del Castello Sforzesco a Milano:  
<https://trivulziana.milanocastello.it/it/content/il-libretto-dappunti-di-leonardo-da-vinci>
- *Codice sul volo degli uccelli* alla Biblioteca Reale di Torino:  
[www.museireali.beniculturali.it/opere/codice-sul-vo-lo-degli-uccelli/](http://www.museireali.beniculturali.it/opere/codice-sul-vo-lo-degli-uccelli/)
- *Codici di Madrid I, II* alla Biblioteca Nacional de España di Madrid:  
<http://leonardo.bne.es/index.html>
- *Codice Leicester* (ex *Codice Hammer*) nella collezione privata di Bill Gates a Seattle:  
<http://hammercodex.com/home>
- *Trattato della pittura* o *Codex Vat. Urb. lat. 1270* nella Biblioteca Apostolica Vaticana:  
[https://digi.vatlib.it/view/MSS\\_Urb.lat.1270](https://digi.vatlib.it/view/MSS_Urb.lat.1270)  
[https://archive.org/details/trattatodellapitooleon\\_o/page/294](https://archive.org/details/trattatodellapitooleon_o/page/294)
- Un sito molto accurato che raccoglie un gran numero di informazioni e studi su Leonardo:  
[www.leonardodavinci-italy.it/](http://www.leonardodavinci-italy.it/)

# L'astronomia vinciana (1939)<sup>★</sup>

Pio Emanuelli (1889-1946)

LEONARDO non può, sotto nessun aspetto né per nessuna ragione, essere considerato un astronomo. La sua *forma mentis*, di tendenza essenzialmente enciclopedica e di natura proclive alla saltuarità e alla frammentarietà, lo esclude senz'altro.

Se nello studio di un qualsiasi ramo dello scibile umano è necessario possedere una disciplina mentale fatta di ordine e di perseveranza, nello studio della scienza del cielo quella disciplina si impone in forma rigorosissima e con esigenze tutte proprie, il che si spiega con la vastità del campo di ricerca e con la difficoltà dei problemi da affrontare e da risolvere. L'astronomia richiede organicità di metodo, assiduità di applicazione, costanza di lavoro e soprattutto fermezza nel proseguire le indagini che, intorno ad un unico argomento, si debbono talora condurre per anni ed anni. Inoltre, la vita dell'astronomo deve essere, quanto più possibile, calma e serena. Leonardo, preso da mille lavori, i più disparati – egli è pittore, scultore, architetto e si occupa di arte militare, di idraulica, di anatomia, di meccanica, di botanica, di geologia, del volo degli uccelli e di altro ancora – costretto, per varie cause, a non poter godere la tranquillità di una dimora permanente e spesso con l'animo agitato per circostanze avverse e per l'invidia dei nemici, è forse la persona meno adatta ad applicarsi agli studi astronomici. La scienza del cielo assorbe tutta l'attività di chi vi si dedica e non permette divagazioni o assenze di sorta. Copernico, il grande astronomo quasi contemporaneo di Leonardo, giunse alla proclamazione della dottrina eliocentrica dopo un percorso di elaborazione che durò decenni e che tenne occupata la sua mente dagli anni della sua giovinezza fino alla morte. Fu una volta domandato a Newton come egli avesse potuto conseguire tanti e così mirabili risultati scientifici; rispose: pensando sempre ad un unico argomento. All'epoca di Leonardo viveva il celebre cosmologo italiano Paolo del Pozzo Toscanelli [1397-1482] ed era morto da poco il non meno celebre tedesco Giovanni Müller, detto Regiomontano [1436-1476]: basta una breve occhiata all'opera di questi due investigatori del cielo per rendersi conto delle qualità caratteristiche che guidavano il metodo di lavoro dell'astronomo del xv secolo. Nessuna di quelle qualità ci sembra riscontrabile in Leonardo.

Se Leonardo non fu un astronomo nel senso comune della parola, non fu tuttavia neppure del tutto

<sup>★</sup> Da: *Leonardo da Vinci. Edizione curata dalla mostra di Leonardo da Vinci in Milano*, Istituto Geografico de Agostini, Novara, 1939, pp. 205-208 (alcune precisazioni a cura della redazione del «Giornale di Astronomia» sono qui tra parentesi quadre).

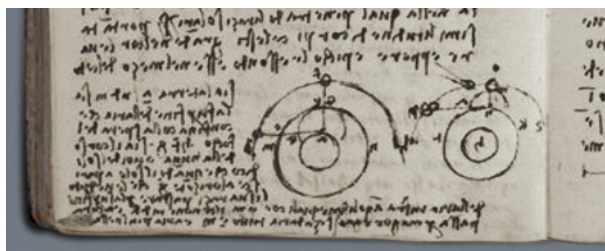


FIG. 1. Codice F, f. 25, dettaglio: studi per provare che la Terra è una stella. (Paris, Bibliothèque de l'Institut de France)

estraneo all'indagine e alla meditazione di qualche particolare problema della scienza astronomica.

★

Ai suoi tempi, il cannocchiale non esisteva ancora. Sembra quasi certo che questo prestigioso strumento sia di invenzione puramente italiana e che in Italia sia stato per la prima volta costruito sul finir del xvi secolo. Se questa supposizione, che è basata su una testimonianza degna di fede, corrisponde al vero, come tutto fa ritenere, si può concludere, con una probabilità confinante con la certezza, che all'epoca di Leonardo il cannocchiale non era stato ancora inventato. Questo non esclude che, a quel tempo, non si conoscessero le proprietà delle lenti concave e convesse e non si sapesse utilizzarle per la correzione e il miglioramento della vista. È molto probabile che «l'occhiale» di cui si serviva Leone X [1475-1521], cacciatore appassionato, per vedere distintamente in lontananza, durante i suoi svaghi venatori, non consistesse di una sola lente, ma di due, l'una biconcava che egli teneva vicino all'occhio, l'altra biconvessa che portava, a volontà, un poco più distante. È chiaro che, da questo artificio ottico all'invenzione del cannocchiale, il passo sarebbe stato brevissimo e la ragione per cui esso non sia stato allora compiuto costituisce uno dei tanti misteri da cui è avvolta la storia della scienza. Comunque sia, noi riteniamo che Leonardo, pur essendo a conoscenza delle proprietà delle lenti, non costruì né possedette mai un cannocchiale vero e proprio. Che se egli ne avesse avuto un esemplare a sua disposizione, non avrebbe mancato di rivolgerlo verso il cielo, almeno a titolo di curiosità. Avrebbe così anticipato di circa un secolo le memorabili scoperte celesti conseguite da Galilei nel 1609-10. Supporre che egli avesse inventato il cannocchiale e che poi non se ne fosse servito per guardare, almeno una volta la Luna, Giove e le stelle della Via Lattea, è un menomare l'altezza del genio di Leonardo, poiché si dovrebbe conclu-

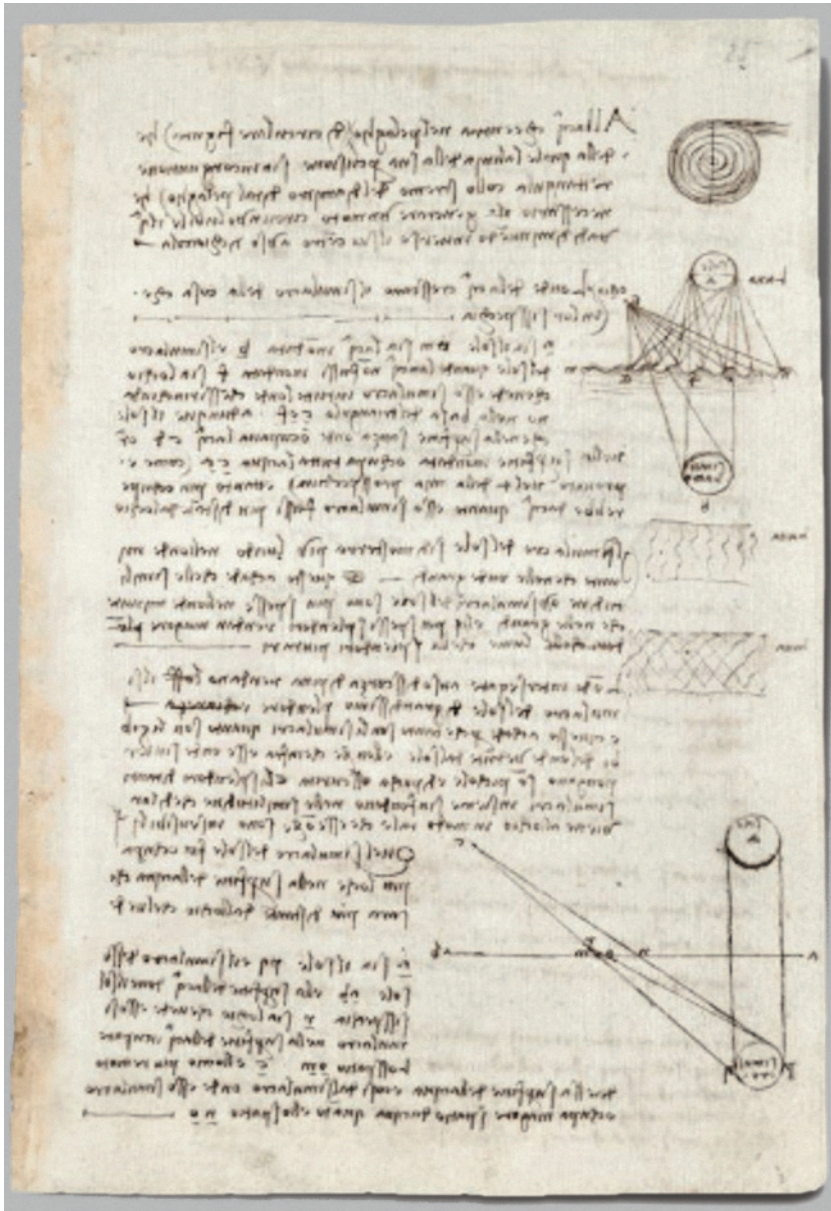


FIG. 2. *Codice Arundel*, f. 25r. Studi sulla riflessione della luce lunare e solare. (London, British Library)

dere che egli non avrebbe compreso né l'importanza né l'utilità di quello strumento. La notizia delle scoperte celesti che egli avrebbe inevitabilmente fatte per mezzo del cannocchiale, sarebbe corsa rapida per l'Italia e l'Europa, dovunque generando sorpresa ed entusiasmo e l'eco di quel memorabile avvenimento sarebbe giunta direttamente o indirettamente fino a noi. E ciò senza pregiudizio del ricordo che egli avrebbe potuto fissarne in uno dei suoi quaderni di appunti, che si può pur ammettere sia in seguito andato perduto. Poiché è altamente verosimile che di quelle straordinarie scoperte egli avrebbe fatto partecipi amici e conoscenti, i quali, a loro volta, ne avrebbero comunicata la notizia ad altre persone, specie se astronomi o comunque interessate negli studi astronomici. Ma la storia dell'astronomia non un indizio o un vago sospetto ci ha tramandato di quella presunta invenzione né delle scoperte cui avrebbe senza dubbio condotto.

Inoltre, rimarrebbe molto strano che Leonardo, il quale si occupava di arte militare e di strumenti bellici, non avesse compreso, fin dal primo istante dell'invenzione, quale potente ed inatteso aiuto avrebbe dato in guerra uno strumento che, come il cannocchiale, avrebbe fatto scorgere a distanza le milizie nemiche e i loro movimenti, invisibili ad occhio disarmato. E strano pure rimarrebbe che egli non ne avesse costruito più di un esemplare, per farne dono a principi e signorotti dell'epoca, sia a titolo di omaggio o di lucro. È pacifico che anche di questo la storia non avrebbe mancato di far cenno, sia pur in modo indiretto.

Tutto porta a concludere che Leonardo non ha inventato né quindi fatto uso del cannocchiale. Nei manoscritti di lui a noi pervenuti non v'è un'osservazione, celeste o terrestre, che possa, sia pur lontanamente, giustificare o appoggiare una tale supposizione. Nel *Codice Arundel*, fol. 104 recto, si vede uno schizzo della faccia della Luna, eseguito evidentemente ad occhio nudo e con l'impiego di qualche lente per migliorare la vista [FIG. 5]. Se a quel tempo Leonardo avesse conosciuto il cannocchiale, non uno schizzo di tal genere avrebbe disegnato, ma un qualche cosa che avrebbe rassomigliato ai primi e affrettati schizzi della superficie lunare che Galilei tratteggiò per il suo *Saggiatore*.

\*

Parecchi fenomeni celesti, grandiosi e del tutto visibili ad occhio nudo, apparvero durante la vita di Leonardo (1452-1519). Di essi, nessun cenno troviamo nei manoscritti vinciani. Ricordiamo, fra l'altro, la grande cometa dell'anno 1472 (Leonardo era allora ventenne) che fu osservata accuratamente dal celebre Regiomontano e quelle degli anni 1491, 1500, 1506 e 1516. La cometa del 1472, che i cronisti del tempo descrissero, secondo il loro stile abituale, come «orribile e spaventosa», si vide distintamente (il 21 gennaio 1472) di giorno, in piena luce solare, tanto era vivido il suo splendore. Aveva una coda molto lunga e la sua visibilità si protrasse per circa tre mesi. Non è possibile che Leonardo non l'abbia veduta, come pure non è possibile che egli non abbia veduto qualcosa degli eclissi di Sole e di Luna che accaddero in Italia e in Francia tra il 1460 e il 1518. Fra quelli di Sole, vanno ricordati gli eclissi del 1460, 1478, 1485,



1502, 1518, la cui fase massima fu, in Italia e in Francia, superiore ai 7 decimi.

Ma nei codici vinciani non si trovano riferimenti ad osservazioni astronomiche, vi si incontrano talvolta considerazioni e speculazioni di carattere astronomico. Leonardo non è sempre chiaro nel suo pensiero né su un dato argomento mantiene sempre il medesimo giudizio. Spesso si contraddice e non di rado presenta, come novità, cose che erano ben note. Le sue speculazioni astronomiche – salvo qualche eccezione di cui ora parleremo – non precorrono affatto le vedute che si avevano generalmente ai suoi tempi. La Terra trovasi, secondo Leonardo e secondo l'antica astronomia tolemaica ancora imperante nel xv secolo, al centro dei suoi elementi. Il Sole le gira intorno, come la Luna. Leonardo sostiene correttamente che il Sole è più grande in realtà di quanto esso appare e se la prende con Epicuro che riteneva il contrario. Ma Epicuro non ha fatto mai testo in astronomia né fra gli studiosi dell'antichità né, tanto meno, fra quelli del Medioevo e, ai tempi di Leonardo e molto prima ancora, era da tutti pacificamente ritenuto che il Sole fosse almeno più grande della Terra. Regiomontano, per esempio, verso il 1470, stimava il raggio angolare del Sole eguale a  $16'$  (valore abbastanza vicino al vero) con una parallasse di  $3'$  [in realtà è di  $8,79''$ ]. Ammettendo, con Tolomeo, che la circonferenza del globo terrestre fosse di 180 mila stadi e prendendo le misure di Regiomontano, la grandezza del Sole risultava considerevolmente più grande di quella della Terra. Del resto, nei vari trattati astronomici del tempo – trattati che portavano quasi tutti il nome generico di *Sphaera*, il più diffuso e il più rinomato dei quali era quello del Sacrobosco [ca. 1195-1256] – si leggeva che «*Sole in se continet Terrae magnitudinem 166*», ossia che il volume del Sole era 166 volte quello della Terra. Oggi noi sappiamo che, non 166, ma ben 1 milione e 300 mila è il rapporto che passa tra il volume del Sole e quello della Terra; la cifra di 166 era pertanto molto lontana dalla realtà, ma ciò non toglie che il concetto che il Sole fosse più grande del nostro globo non avesse avuto fin dal Medioevo la sua piena ed ufficiale accettazione e non fosse ai tempi di Leonardo comunemente ammesso e insegnato.

\*

La scintillazione delle stelle è un fenomeno a tutti noto. D'inverno,

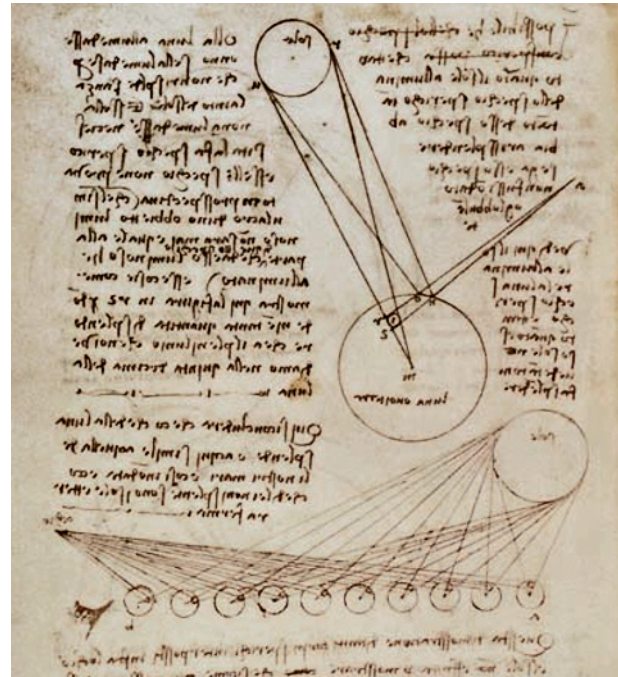


FIG. 3. Codice Arundel, f. 28v. Come la Luna riflette la luce del Sole. (London, British Library)

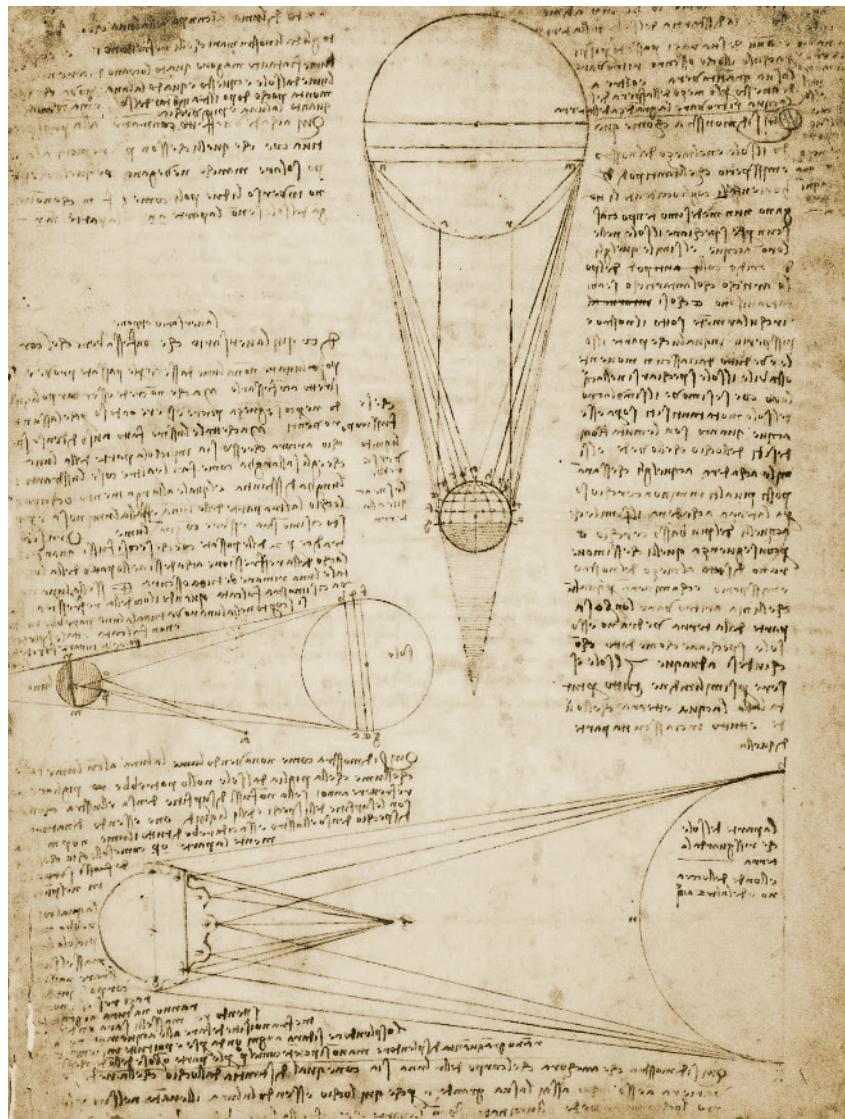


FIG. 4. Codice Leicester (ex Codice Hammer), f. 1r. Distanza del Sole dalla Terra e grandezza della Luna. (Seattle, collezione privata Bill Gates)

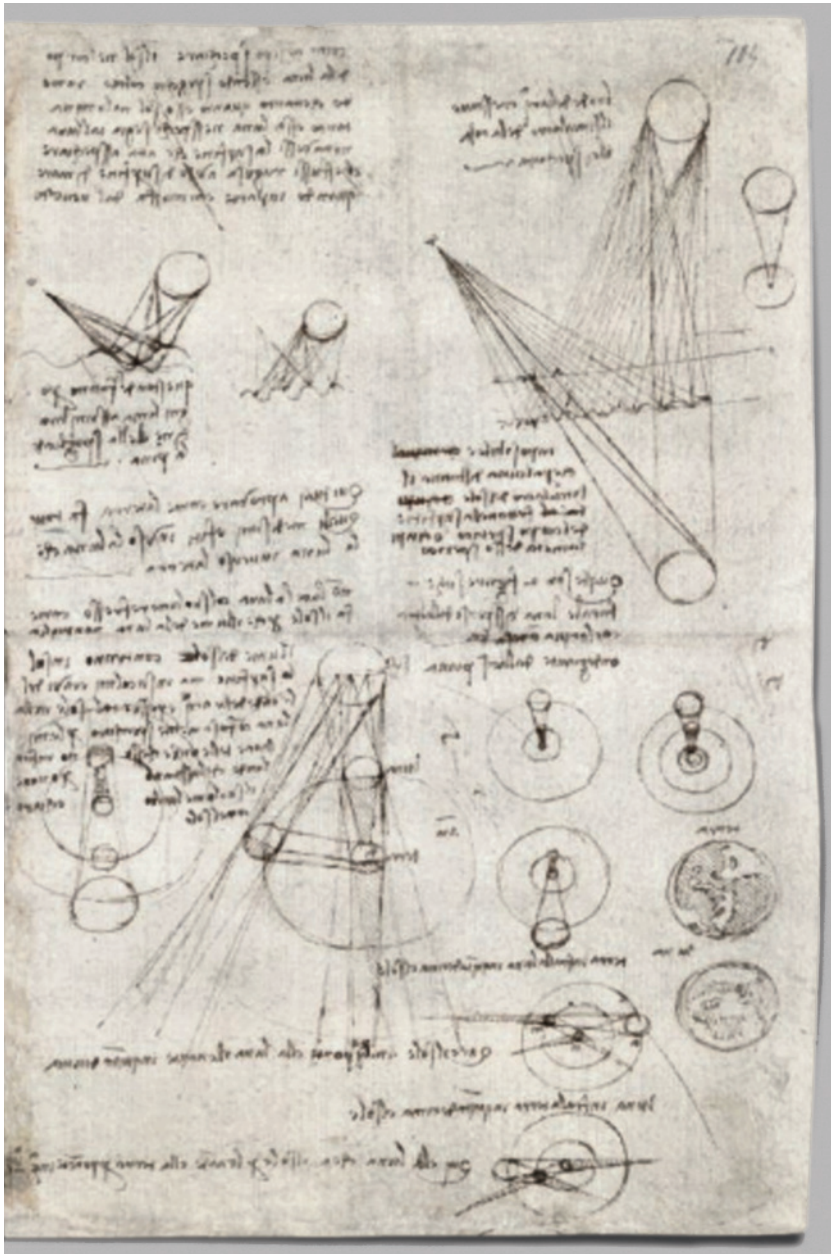


FIG. 5. *Codice Arundel*, f. 104r. Come il Sole si rispecchia sulla Luna. (London, British Library)

durante una notte fredda e serena, esso colpisce l'occhio di ogni osservatore che innalzi, sia pur a caso, lo sguardo alla volta celeste. Le stelle sembrano come diamanti, la cui luce sia in preda ad una scintillazione rapida, per l'invio intermittente di raggi luminosi. Aristotele ne diede una erronea spiegazione, attribuendone la causa alla debolezza della vista, in rapporto alla distanza delle stelle. Questa spiegazione fu da tutti accettata e tramandata senza discussione, fino a quando il grande filosofo arabo Averroè [Abū al-Walīd Muḥammad ibn Aḥmad Ibn Rushd; 1126-1198] ne diede una interpretazione molto prossima al vero, attribuendo il fenomeno della scintillazione all'atmosfera e alle sue irregolarità. Leonardo segue Aristotele quando dice:

In prima definisci l'occhio, poi mostra come il battere d'alcuna stella viene dall'occhio, e perché il battere d'esse stelle a più nell'una che nell'altra, e come li raggi delle stelle nascon dall'occhio.

Leonardo non conosceva quindi la spiegazione di Averroè né quella di Alhazen [Abū 'Alī al-Ḥasan ibn al-Ḥasan ibn al-Haytham; ca. 965-1039] e Vitellione [Erazmus Ciolek Witelo; ca. 1230-post 1280/ante 1314] e si atteneva all'opinione comune che si appoggiava all'autorità di Aristotele.

L'esame particolareggiato dei passi astronomici che si incontrano nei codici vinciani richiederebbe uno spazio molto più grande di quello concessoci in questa pubblicazione. Noi crediamo quindi opportuno limitarci ad illustrarne soltanto due, i quali, fra tutti quelli che si riferiscono ad argomenti astronomici, sono gli unici che dicono veramente qualche cosa di nuovo: due granelli d'oro in molta sabbia.

Ai tempi di Leonardo si riteneva che la Terra si trovasse al centro del Mondo, ferma ed immobile nei secoli: «*fundasti Terram super stabilitatem suam, non inclinabitur in saeculum saeculi*», dice il salmista. Niente movimento di rotazione diurna né di rotazione annua. È vero che già vi era stato un filosofo, il cardinale Nicolò di Cusa [Nikolaus Krebs von Kues; 1401-1464], il quale aveva sostenuto che la Terra si muoveva: ma le vedute del Cusano su questo punto non sembrano avere altro valore che quello di semplici speculazioni filosofiche o meglio metafisiche. D'altra parte, ci sembra molto dubbio che Leonardo abbia mai letto il *De docta*

*ignorantia* del Cusano ed esprimiamo questo dubbio, pur sapendo essere in contrasto con la tesi propagata da un maestro della storia della scienza, il Duhem [1861-1916], per il quale è certo che le opere e le idee del Cusano ebbero notevole influenza sulla mente di Leonardo. Comunque sia, Leonardo sostiene il moto diurno della Terra in un passo in cui parla della caduta dei corpi. Lo scritto di Leonardo è del 1510. Per quel che ci è noto, egli non ritornò mai più su questo importante soggetto. Per poco che egli lo avesse sviluppato, o almeno vi avesse insistito, avrebbe potuto dedurne altre brillanti conseguenze. Sul moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole egli tace e i disegni astronomici del *Codice Arundel*, fol. 104 *recto*, ci assicurano che non lo ammettevano.

Il secondo passo meritevole di segnalazione è quello riguardante la spiegazione della luce cinerea della Luna. Subito dopo il novilunio, si osserva, nella parte del disco lunare non direttamente illumina-

ta dal Sole, una luce, più o meno biancastra, che dal suo colore è detta cinerea. Le spiegazioni date dagli antichi sono assai scarse. Cleomede [ca. II sec. a.C.] l'attribuiva ad una qualche trasparenza del globo lunare. E benché questa interpretazione fosse in contrasto con quanto si osserva durante gli eclissi totali di Sole, pure godette generale approvazione per molti secoli, tanto che Vitellione vi insisteva ancora nel secolo XIII. Leonardo intuisce la vera causa del fenomeno e dice giustamente che essa consistette nella riflessione della luce che la Terra manda alla

Luna, dopo averla ricevuta dal Sole. Il ragionamento di Leonardo non è in tutto corretto ed è anzi falsa la premessa da cui parte, ma la conclusione cui giunge è esatta. Moestlin [Michael Mästlin; 1550-1631], il maestro di Keplero, pervenne più tardi alla stessa spiegazione di Leonardo.

Concludiamo dicendo che, se Leonardo non può essere considerato come un astronomo, pure le sue speculazioni su alcuni fenomeni celesti meritano di essere ricordate, senza tuttavia attribuire ad esse una eccessiva importanza.

---

**Pio Emanuelli** (Roma, 3 novembre 1889 - Roma, 2 luglio 1946) è stato astronomo e storico dell'astronomia. Laureato in Fisica, iniziò a lavorare alla Specola Vaticana, collaborando all'impresa internazionale della *Carte du ciel*. Nel 1922 ottenne per meriti la libera docenza in Astronomia fisica e descrittiva all'Università di Roma, dove fu ordinario di Storia dell'astronomia e si occupò di meccanica celeste e di eclissi solari, proseguendo osservazioni iniziate fin da adolescente. È stato segretario della Società Astronomica Italiana dal '25 al '28. Oltre a numerosi articoli scientifici, si dedicò a una vastissima opera di divulgazione astronomica, collaborando regolarmente alla storica rivista *Coelum*, al *Corriere della Sera*, all'*Almanacco scientifico e industriale* ed anche a riviste internazionali quali *Astronomische Nachrichten* e *Popular Astronomy*. La *Domus Galilaeana* di Pisa conserva nel *Fondo Pio Emanuelli* la sua ricca biblioteca e tutto il suo materiale archivistico.

# L'astronomia in Leonardo (1938)<sup>★</sup>

Roberto Marcolongo (1862-1943)

UN illustre astronomo italiano, Elia Millosevich [1848-1919], ha scritto che nei manoscritti vinciani appaiono sani concetti astronomici e, quasi d'intuito e di divinazione, grandi scoperte. Quasi 25 anni dopo la morte di Leonardo, appariva l'opera grandiosa di Copernico [1473-1543]; ed è ben nota l'influenza che su Leonardo ebbero le opere e le idee del cardinale Nicola da Cusa [1401-1464], ben a ragione ritenuto uno dei grandi precursori del sistema eliocentrico. E bastano poche, ma espressive citazioni di passi leonardiani.

Se guarderai le stelle, senza razzi, come si fa a vederle per un piccolo foro fatto colla stessa punta da la sottile agucchia e quel posto quasi a toccar l'occhio, tu vedrai esse stelle esser tanto minime, che nulla cosa pare esser minore; e veramente la lunga distanza dà loro ragionevole diminuzione, osserva che molte vi sono che son moltissime volte maggiori che la stella, cioè la Terra coll'acqua.

Or pensa quel che parrebbe essa nostra stella in tanta distanza. Mai non posso fare ch'io non biasimi molti di quelli antichi, li quali dissero che il Sole non aveva altra grandezza che quella che mostra; fra questi fu Epicuro. [Codici dell'Istituto di Francia, ms. F 6r]

E si diffonde con ragionamenti chiari e lampanti a provare la falsità dell'affermazione. Si occupa del calore solare, e scrive:

Dicono che il Sole non è caldo, perché non è di colore di foco; ma è molto più bianco e chiaro. E a questi si po' rispondere che, quando il bronzo liquefatto è più caldo, egli è più simile al color del Sole, e, quand'è men caldo, ha più color di foco. [Codici dell'Istituto di Francia, ms. F 24v]

E dopo aver citato le esperienze sopra ricordate<sup>1</sup> dello specchio concavo che riflette più caldi i raggi del foco, della palla di vetro piena d'acqua fredda, conclude che il simile accade pel Sole «che essendo lui caldo, passando per tali specchi freddi, refrette gran calore. Non lo splendore del Sole scalda, ma il suo natural calore».

Tutto proviene dal Sole: «il moto delli elementi nasce dal Sole: il caldo dell'universo è generato dal Sole; il lume e 'l caldo dell'universo vien dal Sole e 'l freddo e le ombre dalla privazione del Sole». I pianeti han pure lume dal Sole.

<sup>★</sup> Dal paragrafo *Astronomia*, in *Leonardo nel "Paradiso delle scienze matematiche"*. *Fisico/matematico, astronomo*, «Sapere», n. 95, 15 dicembre 1938; il testo qui riportato è preso dalla ristampa in «Sapere», 15 aprile 1952 (fascicolo fuori serie: *Quinto centenario della nascita di Leonardo da Vinci*), p. 12 (alcune precisazioni a cura della redazione del *Giornale di Astronomia* sono qui tra parentesi quadre).

<sup>1</sup> [Marcolongo si riferisce ai paragrafi precedenti di questo suo articolo, in cui ha trattato: *L'ottica e la visione, La camera oscura, Catottrica e diottrica, L'idrostatica, Calore, acustica, magnetismo*].



FIG. 1. Studi su mari, monti e moto della Luna. Particolare del folio 104r del Codice Arundel 263. (London, British Library)

Dicono (gli autori) di avere il lume da sé, allegando che se Venere o Mercurio non n'avessi il lume da sé, quando esso s'interpone in fra l'occhio nostro e il Sole, esse oscurerebbero tanto d'esso Sole, quanto esse ne coprano all'occhio nostro. E questo è falso.

La scintillazione delle stelle è un fatto fisiologico subbiiettivo. «Mostra come il battere d'alcuna stella viene dall'occhio; e perché il batter d'esse stelle è più nell'una che nell'altra; e come li razzi delle stelle nascan dall'occhio».

La Luna è una stella:

Tu nel tuo discorso hai a concludere la Terra essere una stella quasi simile alla Luna – e poi – mediante la sfera dell'acqua che in gran parte la veste, la qual piglia il simulacro del Sole e splende all'universo, sì come fan tutte le altre stelle, ci dimostra ancora lei essere una stella.

Stella qui è da prendersi nel senso di pianeta. Ed essa splende per virtù del Sole «e a' più remoti pare stella».

La Terra non è nel mezzo del cerchio del Sole, né nel mezzo del mondo, ma è ben nel mezzo de' sua elementi, compagni e uniti con lei; e essi stessi nella Luna quand'ella insieme col Sole è sotto a noi, questa nostra Terra coll'elemento dell'acqua parrebbe e farebbe officio, tal quale fa la Luna a noi. [Codici dell'Istituto di Francia, ms. F 25v]

Quasi tutte chiare e corrette e in opposizione alle molte stramberie dell'epoca, le idee di Leonardo sulla Luna e sui rapporti colla Terra, specialmente quelle consegnate nel *Codice Arundel*: «Se terrai osservate le particule delle macchie della Luna, tu troverai in quelle spesse volte gran varietà e di questo ho fatto pruova io stesso disegnanndole». E poi: «Qui si conclude che ciò che della Luna splende, è acqua simile

a quella de li nostri mari e così inondata e ciò che di lei non splende sono isole e terra ferma». Ed uno di questi disegni si è conservato nel *Codice Arundel*.

La Luna è un corpo opaco e solido e se per lo avversario è fatto trasparente, e non riceverebbe il lume del Sole.

La Luna non ha lume da sé, se non quanto ne vede il Sole tanto l'alumina. Della sua luminosità tanto ne vediamo quanto è quella che vede noi. E la sua notte riceve tanto di splendore, quanto è quello che le prestano le nostre acque nel rifletterli il simulacro del Sole.

E dopo ciò, sempre al foglio 94v del *Codice Arundel* [FIG. 2], Leonardo per primo dà la corretta spiegazione del lustro della Luna; cioè della cosiddetta luce «cinerea». <sup>2</sup> Come si sa, prima e dopo il novilunio sorgerà a ponente la Luna in crepuscolo serotino avanzato; ed essa si lascia ben vedere per intero perché la fase è completata da un luore cinereo che perdura alcuni giorni. Leonardo ne dà la ragione in una doppia riflessione della luce che, in maggior quantità, essa manda alla Luna dopo averla ricevuta dal Sole; con la osservazione che le fasi della Terra rispetto alla Luna sono reciproche a quella della Luna rispetto alla Terra.

La spiegazione di Leonardo è tanto più notevole ed ha maggior valore se si riflette che i suoi precursori e successori attribuivano il fatto alla trasparenza della Luna o alla sua fosforescenza o alla luce che essa riceveva dal pianeta Mercurio o da Venere, fino all'astronomo Riccioli (1598-1671). E per la spiegazione corretta bisogna giungere a Maestlin [1550-1631] (maestro di Kepler) e a Galileo nel *Sidereus Nuncius* (1610).

Per quanto infine riguarda la posizione della Terra nell'universo, senza alcun dubbio egli ben conosce la sua rotazione diurna e, come già fu detto, la

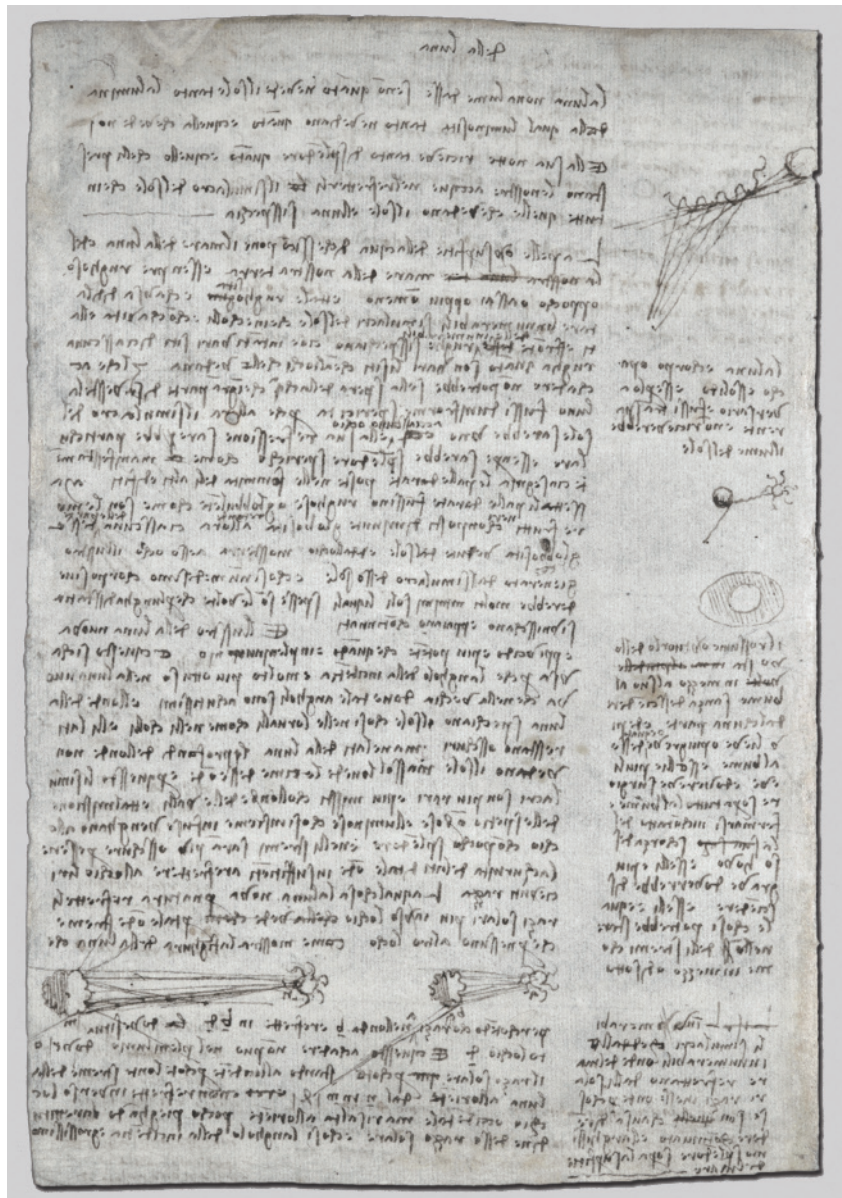


FIG. 2. Il folio 94v del *Codice Arundel* 263. (London, British Library)

ha applicata alla caduta dei gravi e alla spiegazione della loro deviazione dalla verticale.

In un passo dei fogli di Windsor [f. 132r] scrive: «Il Sole non si move»; ma in ogni modo su tale argomento non è facile dedurre conclusioni definitive. Delle dimensioni della Terra si è a varie riprese occupato con risultati sufficientemente esatti; e, con minor successo, della distanza e del diametro del Sole.

Ma tuttavia le poche cose accennate assicurano in ogni modo a Leonardo, se non un posto di primo ordine, certo una posizione notevolissima in questo ramo della filosofia naturale.

<sup>2</sup> [Vedi più avanti, in questo numero del «Giornale di Astronomia», l'articolo di Millosevich].

**Roberto Marcolongo** (Roma, 24 agosto 1862 - Roma, 16 maggio 1943) è stato un matematico, studioso di meccanica e di storia della scienza. Fu professore di Meccanica razionale all'Università di Messina e poi a quella di Napoli. Nel 1921 pubblicò *Relatività*, uno dei primi trattati sulla relatività speciale e generale, in cui sfruttava il calcolo differenziale assoluto senza coordinate, sviluppato insieme a Cesare Burali-Forti, in opposizione al calcolo differenziale assoluto con coordinate di Tullio Levi Civita e Gregorio Ricci-Curbastro. Fu socio dell'Accademia nazionale dei Lincei. Tra i suoi lavori di storia della scienza, si segnalano: *Il problema dei tre corpi da Newton (1686) ai nostri giorni*, del 1915, e *Leonardo artista scienziato*, del 1939, che raccoglie numerosi lavori precedenti.

# Leonardo da Vinci e gli astronomi del suo tempo (1952)<sup>★</sup>

Carlo Pedretti (1928-2018)

LE celebrazioni del quinto centenario della nascita di Leonardo da Vinci (1452-1519) hanno richiamato un interesse di circostanza intorno alla meravigliosa figura di artista-scienziato del nostro Rinascimento, ma la generalità degli scritti comparsi recentemente sembra essersi indirizzata ad una illustrazione divulgativa dell'opera vinciana, con la inevitabile superficialità che il carattere di simili scritti comporta. Stimiamo doveroso, per l'importanza del soggetto e per la serietà degli studi, di non adottare questa consuetudine, convinti come siamo che anche una semplice nota, pur che offra elementi e considerazioni nuove, possa costituire un effettivo contributo alle onoranze leonardesche. Le nostre appassionate ricerche intorno a Leonardo da Vinci ci hanno portato ad indagare un campo trascurato ed ancor tanto fertile, quello cioè dei contemporanei di Leonardo nelle opere dei quali è possibile rinvenire testimonianze sconosciute del genio leonardesco, e già abbiamo dato notizia di alcune di esse.<sup>1</sup> Pur con tali propositi limiteremo la nostra rapida trattazione ai rapporti di Leonardo con gli astronomi del suo tempo, alle opere di astronomia che egli conobbe e studiò, augurandoci che qualche nuova considerazione che ci sarà dato di esporre possa giovare a chi, in futuro, avrà in animo di dedicare uno studio completo all'argomento dell'astronomia in Leonardo.

★

La più antica testimonianza dell'interesse di Leonardo per l'astronomia è quella del Vasari, nella prima e seconda edizione delle sue *Vite* (1550 e 1568):

[...] tanti furono i suoi capricci che filosofando delle cose naturali attese a intendere le proprietà delle erbe, continuando et osservando il moto del cielo, il corso della Luna, et gli andamenti del Sole.

<sup>1</sup> Da: «Coelum», 1952, xx, pp. 133-139; riprodotto anche in CARLO PEDRETTI, *Studi vinciani: documenti analisi e inediti leonardeschi*, Librairie E. Droz, Genève, 1957, pp. 118-124 (alcune precisazioni a cura della redazione del *Giornale di Astronomia* sono qui tra parentesi quadre).

<sup>2</sup> CARLO PEDRETTI, *Nuovi documenti riguardanti Leonardo da Vinci. I - Il codice di Benvenuto di Lorenzo della Golpaja. I progetti di Leonardo per la macchina idraulica di Bernardo Rucellai. II - Il «De viribus quantitatis» di Luca Pacioli, «Sapere»*, 15 aprile 1952, fascicolo fuori serie, pp. 57-70.

Alcuni studiosi<sup>2</sup> hanno prospettato l'eventualità che la passione di Leonardo per lo studio del cielo risalga all'epoca giovanile, quando l'artista, desideroso di accostarsi alle indagini naturali, si sentiva portato a frequentare scienziati come Paolo Toscanelli (1397-1482) e Lorenzo Bonincontri (1409-1492 circa). Del primo, la cui fama era universalmente diffusa sia come cartografo sia come promotore di feconde indagini sulla Terra e nel cielo condotte col metodo della rigorosa osservazione scientifica,<sup>3</sup> è rimasta memoria in un appunto giovanile di Leonardo, e precisamente in un elenco di personaggi nel *fol. 12 verso-a* [ma è 42v] del *Codice Atlantico*. L'appunto di Leonardo appoggia l'ipotesi di relazioni che il giovane artista andava allacciando con uomini di scienza ricchi di cognizioni, ed altrettanto, purtroppo, di anni. E così che anche del Bonincontri, che intorno al 1475 spiegava nello studio fiorentino i concetti astronomici del poema di Manilio, è giusto pensare che Leonardo ebbe ad interessarsi, tanto più che alle sue lezioni accorrevano dotti da ogni parte d'Italia, perché da esse venivano divulgate idee particolarmente interessanti ricavate dalle lunghe esperienze toscaneliane, che furono il preludio di avvenimenti di fondamentale importanza, come la scoperta dell'America.<sup>4</sup>

I nomi di personaggi elencati da Leonardo in un foglio che risale al 1481-1482 circa, restano dunque a testimoniare la precoce dedizione del Vinci ai problemi di filosofia naturale, e quindi anche all'astronomia. Se fu, anzi, questa la ragione determinante della sua vocazione di scienziato, è altrettanto vero che lo studio del cielo non poté essere da lui in seguito coltivato con la medesima assiduità dedicata ad altre discipline. Le stesse condizioni di vita nelle quali ebbe a trovarsi, non potevano favorire quell'approfondimento in materia cui il suo ingegno, benché capace, non sarebbe stato pro-

<sup>2</sup> Cfr. MARIO BARATTA, *Leonardo da Vinci e i problemi della Terra*, Torino, Bocca, 1903, capitolo I: *Il Cielo*, pp. 3-4. Vedi anche: EDMONDO SOLMI, *Leonardo (1452-1519)*, Firenze, Barbera, 1900, p. 14.

<sup>3</sup> Il TOSCANELLI seguì il corso delle sei comete apparse negli anni 1433, 1449, 1450, 1457-I, 1457-II e 1472, annotando le loro posizioni con tanta precisione che mise in grado il CELORIA di calcolarne le orbite.

<sup>4</sup> Cfr. *La vita ed i tempi di Paolo Dal Pozzo Toscanelli, ricerche e studi di GUSTAVO UZIELLI, con un capitolo (VI) sui lavori astronomici del Toscanelli*, di GIOVANNI CELORIA, in *Raccolta di documenti e studi pubblicati dalla R. Commissione Colombiana ecc.*, parte V, vol. I, Roma, 1894.

clive, data l'indole di versatilità della sua mente. Leonardo coltivò l'astronomia in diversi periodi della sua vita, in mezzo a tante altre occupazioni; se ne entusiasmava per la vicinanza di persone che ad essa si erano dedicati completamente, ma poi le «circumstanze» lo portavano altrove ed egli necessariamente non poteva essere un astronomo, come oggi andrebbe inteso.<sup>5</sup>

★

Riportiamo il già citato appunto giovanile di Leonardo contenente i nomi di alcuni personaggi [FIG. 1]:

Quadrante di Carlo Marmocchi, Messer Francesco Araldo, Ser Benedetto da Cieparello, Benedetto de l'Abbaco, Maestro Pagolo Medico, Domenico di Michelino, El Calvo de li Alberti, Messer Giovanni Argiropulo.

Questi personaggi sono stati quasi tutti identificati dal Solmi.<sup>6</sup> Il «Maestro Pagolo Medico», come già abbiamo detto, corrisponde certamente al Toscanelli. A proposito di Carlo Marmocchi, che a noi interessa particolarmente per l'allusione a un quadrante astronomico, è possibile dare una precisazione. Il Solmi scriveva: «Con la parola 'quadrante di Carlo Marmocchi' Leonardo si riferisce ad un fiorentino, che si occupava di astrologia, e del quale non resta alcuna memoria»<sup>7</sup> aggiungendo altrove:

La nota vinciana 'quadrante di Carlo Marmocchi' può riferirsi tanto allo strumento astronomico col quale si conosce e calcola l'altezza delle stelle, quanto, come è più probabile, ad un trattato analogo a quello che Andalone del Negro fece sull'astrolabio (che spesso viene usato come sinonimo di quadrante) e che fu edito in Ferrara nel 1745.<sup>8</sup>

Nell'occuparci di un altro personaggio nell'ambito della produzione vinciana, cioè di Lorenzo della Golpaja [o della Volpaia] (1446-1512), un codice del quale, contenente invenzioni di Leonardo, abbiamo

<sup>5</sup> Tale è la premessa di PIO EMANUELLI, *L'astronomia vinciana*, pp. 205-208 dell'op.: *Leonardo da Vinci*, a cura della Mostra di Milano, Novara, De Agostini, 1939. Vedi anche BARATTA, *op. cit.*

<sup>6</sup> EDMONDO SOLMI, *Le fonti dei manoscritti di Leonardo da Vinci*, contributi in «Giornale storico della letteratura italiana», 1908, suppl. n. 10-11.

<sup>7</sup> SOLMI, *op. cit.*, p. 210, c. CXXVI.

<sup>8</sup> SOLMI, *op. cit.*, p. 255, c. CLX.

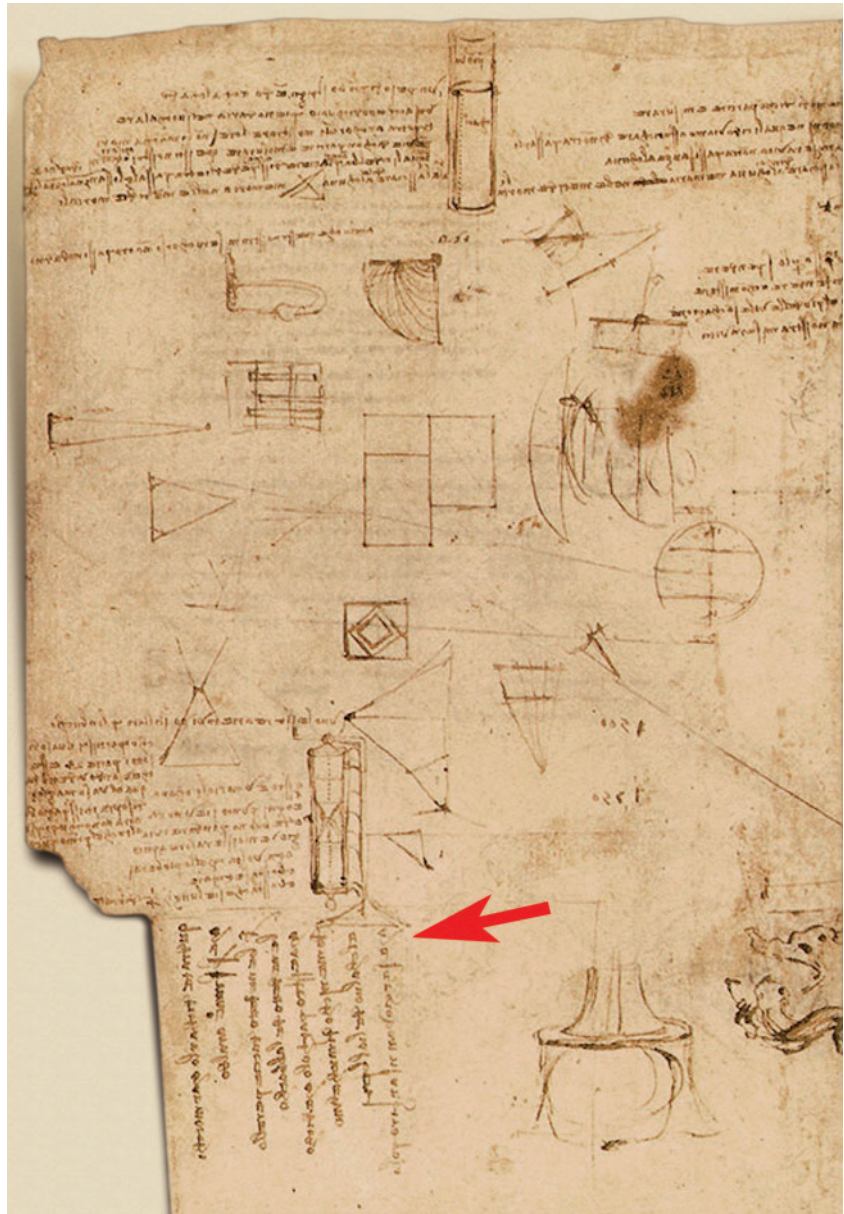


FIG. 1. *Codice Atlantico*, folio 42v. Il brano riportato nel testo è indicato dalla freccia rossa. (Milano, Veneranda Biblioteca Ambrosiana)

rinvenuto nella Biblioteca Marciana di Venezia,<sup>9</sup> ci è stato dato di incontrarci con Carlo Marmocchi in un documento dal quale si viene a sapere che nel 1500 era già defunto, e che era regolatore dell'orologio di Palazzo Vecchio a Firenze, nella qual mansione, in quell'anno, era stato appunto chiamato Lorenzo della Golpaja. Ecco il documento:

A. 1500, 17 iunii: *Elegerunt et deputaverunt magistrum Laurentium Benvenuti De Volpaia magistrum orologiorum, ad temperandum et mantenendum ordinatum et temperatum, sonantem et andantem orologium palatii populi florent. et dominorum florent. de die in diem loco Caroli Marmochii.*<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Ms. 5363, It. IV, 41, prov. Nani; cfr. JACOPO MORELLI, *I codici manoscritti volgari della Libreria Naniiana*, Venezia, Zatta, 1776, pp. 14-16, cap. x: *Libro di macchine diverse di Lorenzo della Volpaja Fiorentino, di Benvenuto, e di Fosino di lui figliuoli, e d'altri uomini d'ingegno.*

<sup>10</sup> *Regesta fiorentina*, pubblicato dal GAYE, *Carteggio inedito d'artisti*. Firenze, 1840, vol. 1, p. 509.

Non è quindi improbabile, data la professione del Marmocchi, che il quadrante cui allude Leonardo non sia uno strumento astronomico, bensì una mostra da orologio.

Ci pare ora opportuno, dacché ce se ne offre l'occasione, di parlare anche di Lorenzo della Golpaja,<sup>11</sup> contemporaneo ed amico di Leonardo, che per la sua professione di costruttore di orologi, aveva coltivato a lungo lo studio dei pianeti, come ne fa fede il suo codice, allo scopo di riprodurre il moto apparente in un ingegnoso e complicato planetario da lui realizzato in oltre venti anni di lavoro.

Mirabile uomo – scrisse di lui il Cellini<sup>12</sup> – un mostro di natura: mostrò tanto bene i segreti dei cieli che pareva che egli fussi lungamente vissuto nei cieli, et esercitando tal arte, si volse a far gli horiuoli, et in quella professione con tanto fondamento et diligenza oprò che perciò ne venne lodato da' più intendenti d'Italia.

Nel codice conservato nella Biblioteca Marciana di Venezia gli scritti di Lorenzo sono raccolti dal figlio Benvenuto della Golpaja. Vi si trova in più punti la descrizione del planetario accompagnata da disegni esplicativi e dalle indicazioni dei meccanismi; vi si trova perfino (fol. 29r) una nota datata 4 giugno 1504 per l'acquisto di materiale destinato a riparazioni o a mutamenti di ingranaggi. A quel tempo Leonardo era a Firenze, e aveva certamente riallacciato antiche amicizie, dopo il lungo periodo di assenza a Milano alla Corte sforzesca. A testimonianza dell'interesse di Leonardo per l'orologio che stava costruendo il Golpaja, è rimasto solo un disegno, nel *Codice Atlantico*, fol. 27 verso-a, ove è riprodotto uno schema di epiciclo del tutto identico a quelli adottati dal Golpaja nel suo planetario.

Il meccanismo scenico realizzato da Leonardo a Milano per una rappresentazione teatrale del moto dei pianeti aveva uno scopo puramente simbolico e mitologico: al centro dei pianeti era collocato Giove.<sup>13</sup> Qualche accenno si è conservato nei mss. vinciani di simili congegni, ma vi si trovano anche chiari disegni di meccanismi epicicloidali, con l'indicazione dei moti del Sole e di Venere.<sup>14</sup>

Fin dal 1484 in una lettera del Poliziano a Monsignor della Casa si ha notizia del planetario del Golpaja, e se ne ha una descrizione che, insieme con i dati forniti dal codice stesso, permette di interpretare con assoluta fedeltà la costruzione, le dimensioni,

e il funzionamento dello strumento.<sup>15</sup> Ben diffusa, a quei tempi, era la fama del planetario del Dondi, allora conservato nella Biblioteca di Pavia e descritto in numerosi codici,<sup>16</sup> ma quello del Golpaja, ben più complesso, aveva la singolare caratteristica di avere le sette sfere dei pianeti concentriche, con svolgimento di tutti i moti ottenuto da una unica fonte motrice, tale da potersi giustamente considerare un miracolo della tecnica e da giustificare l'ammirazione dei contemporanei, quali l'Albertini che nel 1510 ricordava quel «mirabile et artificioso orologio che mostra el corso del Sole et il moto di tutti i pianeti».<sup>17</sup> Il Vasari, ricordando alla metà del '500 l'orologio astronomico che si conservava ancora nel Palazzo del Duca Cosimo de' Medici, afferma che «le ruota dei pianeti camminano di continuo; il che è cosa rara, e la prima che fussi mai fatta di questa maniera».<sup>18</sup>

Duplici è la prova che conferma le relazioni di Leonardo col Golpaja. Già era stato rilevato che un accenno a un «Lorenzo» contenuto nel *Codice Arundel* di Leonardo potesse riferirsi al Golpaja,<sup>19</sup> ma non era stato rilevato che la maggior gloria di questo, cioè il planetario, costituisse un sufficiente motivo per giustificare un vivo interessamento da parte di Leonardo per l'artefice di così ingegnosa opera di meccanica. La prova decisiva dei rapporti di Leonardo col Golpaja è nel codice di questi, dove il Vinci è ricordato per ben tre volte. Numerose sono in tale codice, da noi trascritto e preparato per la pubblicazione,<sup>20</sup> le trattazioni di interesse astronomico, le descrizioni di strumenti, come astrolabi ed orometri, trovandosi tra l'altro una curiosa nota di previsioni atmosferiche dedotte dall'aspetto e dal colore della Luna (cfr. carta 23 verso).

\*

Leonardo da Vinci, nel dedicarsi allo studio del cielo, aveva certamente assimilato tutte le cognizioni già diffuse ai suoi tempi e nella maggior parte risa-

<sup>15</sup> Di ciò si sta occupando uno storico dell'orologeria, ANTONIO SIMONI, in uno studio che comparirà nella prefazione del codice.

<sup>16</sup> ANTONIO SIMONI, *Giovanni de' Dondi e il suo orologio dei pianeti*, estratto da «La Clessidra», anno VIII, n. 2, febbraio 1952.

<sup>17</sup> FRANCESCO ALBERTINI, *Memoriale di molte statue et picture sono nella inclita ciptà di Florentia ecc.*, Firenze, 1510, p. 17.

<sup>18</sup> G. VASARI, *Le vite* (1568), ed. del 1832-38, p. 314: *Vita di Alessio Baldovinetti*.

<sup>19</sup> GEROLAMO CALVI, *I manoscritti di L. da V. dal punto di vista cronologico, storico e biografico*, Bologna, 1925, p. 219; cfr. pure dello stesso A., *Introduzione al Codice Leicester* (1909), nota (3), p. XI, Il nome di Lorenzo della Golpaja risulta pure insieme con quello di Leonardo nell'elenco dei personaggi chiamati nel 1503 a Firenze per giudicare il luogo ove collocare il David di Michelangelo. Cfr. LUCA BELTRAMI, *Documenti e memorie riguardanti la vita e l'opera di L. da V. in ordine cronologico*, Milano, 1919, p. 83, doc. 135.

<sup>20</sup> *Il codice di Benvenuto di Lorenzo della Golpaja, conservato nella Biblioteca Nazionale di San Marco a Venezia, trascritto e annotato da CARLO PEDRETTI*, un volume di circa 300 pagg., in 8° gr., con facsimili delle figure, studio introduttivo, indice analitico e dei nomi, edizione numerata di 200 esemplari. Le sottoscrizioni per quest'opera. si ricevono presso la libreria antiquaria "Palmaverde", Bologna, Via Rizzoli, 4.

<sup>11</sup> Per maggiori notizie sulla vita del Golpaja vedi E. MORPURGO, *Dizionario degli orologiai italiani*, Roma, edizioni "La Clessidra", 1950, in 8°, di p. 240, cfr. pp. 201-203.

<sup>12</sup> B. CELLINI, *Trattati di oreficeria*, cfr. DOMENICO MARIA MANNI, *De florentinis inventis commentarium*, Ferrariae, 1731, pp. 63-66, ove sono riportati vari giudizi su Lorenzo della Golpaja.

<sup>13</sup> EDMONDO SOLMI, *La festa del «Paradiso» di Leonardo da Vinci e Bernardo Bellincione*. (13 gennaio 1490), «Archivio storico lombardo», XXXI, 1, 1904, pp. 75-89.

<sup>14</sup> LEONARDO, *ms. L dell'Institut de France*, fol. 92 verso e 93 recto, vedi riproduzione del primo in C. PEDRETTI, *op. cit.*, fig. 1, p. 57.



lenti all'antichità. «Farai un discorso delle grandezze di molte stelle secondo li autori», annota egli nel *Codice F*, fol 56 *recto*. In un noto elenco di libri al fol. 210 *recto* del *Codice Atlantico* egli menziona due volte un «Guidone» che da un recente autore<sup>21</sup> è stato riferito, pur con la riserva della possibilità di altri «Guidi», al *Guidonis de Cauliaco Cyrurgia, Venetiis*, 1498, o al *Micrologus de disciplina artis musicae* di Guido d'Arezzo. Ma senza dubbio, come già aveva interpretato il Solmi,<sup>22</sup> si tratta qui del celebre Guido Bonatti [ca. 1210-ca. 1298], autore dell'opera *Guido Bonatus de Forlivio. Decem continens tractatus Astronomiae*, edito per la prima volta nel 1491, poi ripubblicato nel 1506 ed ancora posteriormente.<sup>23</sup> «Che tal opera astrologica – commenta il Solmi – fosse posseduta dal Vinci è cosa naturale, prima per la gran fama del Bonatti, poi per le pregevoli nozioni di sonda astronomia e di altre scienze, che vi sono contenute». Per avvalorare ulteriormente questa ipotesi possiamo ora aggiungere un'altra considerazione. Nella Biblioteca Laurenziana di Firenze (*Cod. Plut. xx*, n. 30) si conserva manoscritta una traduzione italiana delle opere del Bonatti eseguita ai primi del '500 da Francesco Sirigatti, e da questi dedicata a Gino Capponi.<sup>24</sup> Il Sirigatti era un astronomo, traduttore del *Tractatus astronomiae* di Lucio Bellanti e autore di un libro di osservazioni celesti, scritto nel 1500 ed edito a Napoli nel 1531, cioè il *De ortu et occasu signorum*. Parla di lui Bernardino Baldi, *Cronica dei Matematici* (a. 1500, pag. 104); lo si trova più volte menzionato da Angelo Fabroni, *Historiae Academiae Pisanae* (1791-95) insieme con Luca Pacioli, il celebre matematico amico di Leonardo. Il Sirigatti era alla corte di Leone X, e a quel pontefice infatti dedicava la sua operetta stampata nel 1531. Egli era in quella corte probabilmente in qualità di astrologo, e tal sua qualità è confermata in altra circostanza, in una lettera di Monsignor Goro Gheri, Eletto di Fano, al duca Lorenzo de' Medici, in data primo di marzo 1516, dove è detto: «El Sirigatto mi è venuto a trovare et decto ch'io ricordi alla Exc.tia V.a, che non faccia facto d'arme da v a XII di questo mese»; «ma – soggiunge con sottile ironia il Gheri – quando venissi uno bel tracto che con ragione si vedesse da vincere e' nemici, io attenderei a quello che io vedessi in terra, et non in cielo».<sup>25</sup>

Nel fol. 190 *verso* del *Codice Arundel* di Leonardo si trova questa nota: «mostra al Sirigatto il libro e fatti dare la regola dell'orologio anello». Leonardo dimostra dunque di essere stato in rapporti col Sirigatti ed è quindi molto probabile che l'opera del Bonatti fosse stata da lui conosciuta anche nella traduzione dal Sirigatti stesso eseguita. Abbiamo già

<sup>21</sup> AUGUSTO MARINONI, *Leonardo da Vinci. Tutti gli scritti. Scritti letterari*. Milano, Rizzoli, 1952, vedi p. 241.

<sup>22</sup> EDMONDO SOLMI, *Le fonti*, cit., p. 105, c. xli.

<sup>23</sup> Cfr. BALDASSARE BONCOMPAGNI, *Della vita e delle opere di Guido Bonatti, astrologo e astronomo del secolo decimoterzo*, notizie raccolte da B. B., Roma, 1851.

<sup>24</sup> B. BONCOMPAGNI, *op. cit.*, pp. 68-73.

<sup>25</sup> B. BONCOMPAGNI, *op. cit.*, p. 153.

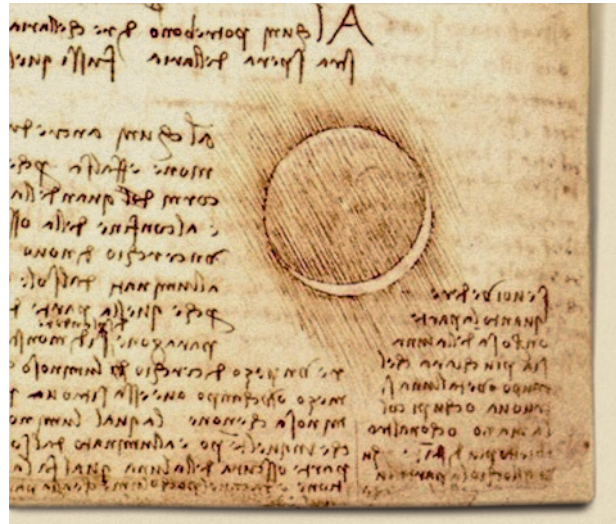


FIG. 2. Particolare del folio 2r del *Codice Leicester* (ex *Codice Hammer*) in cui viene presentata la spiegazione della luce cinerea (1506-1510). (Seattle, collezione privata Bill Gates) [Vedi l'articolo di Millosevich in questo fascicolo]

avuto occasione, altrove, di rilevare che l'appunto vinciano è stato sempre riportato più o meno esattamente – compreso in Solmi – privo dell'ultima parola che evidentemente veniva considerata indipendente, trattandosi di un elenco di oggetti e di persone, ma che invece fa proprio parte della frase come ce se ne può accertare dal fac-simile, nell'edizione del *Codice*,<sup>26</sup> permettendo così di stabilire a qual genere di orologio alludesse Leonardo. Gli orologi ad anello erano infatti piccoli orologi solari portatili, che Vitruvio chiama «viatorum pensile» (*De Architectura*, IX, c IX), nei quali la lettura facevasi tenendoli sospesi alla mano.

\*

Restano indubbiamente di grande interesse gli scritti vinciani riguardanti i problemi del cielo; non è recente l'ipotesi che egli avesse inventato un cannocchiale, ciò essendo stato sospettato fin dal Venturi nel 1796 e in seguito dall'Amoretti fino al Solmi e al Baratta.<sup>27</sup> Leonardo, però, nei pochi accenni a strumenti ottici per l'osservazione dimostra solo il proposito di ottenere l'ingrandimento delle immagini lontane mediante elementari artifici già conosciuti al suo tempo e nei suoi scritti e disegni non si conserva memoria di applicazione di lenti a un oculare. Lo strumento del fol. 1 *verso-bis* del *Codice Atlantico*,

<sup>26</sup> LEONARDO DA VINCI, *Il Codice Arundel 263 nel Museo Britannico*, pubblicato dalla R. Commissione Vinciana, Roma, Danesi, 1923-28, parte H.

<sup>27</sup> Cfr. G. B. DE TONI, G. B. Venturi e la sua opera vinciana. *Scritti inediti e l'Essai*, Roma, 1924, pp. 115-116. Vedi anche: G. B. VENTURI, *Essai sur les ouvrages phisicomathématiques de Leonard de Vinci*, Parigi, 1797, pp. 23-24. CARLO AMORETTI, *Memorie storiche sulla vita, gli studi e le opere di L. da V.*, Milano, 1804, p. 149; EDMONDO SOLMI, *Nuovi studi sulla filosofia naturale di L. da V. Il metodo sperimentale. L'astronomia. La teoria della. Visione*, Mantova, 1905, pp. 25 e segg.; M. BARATTA, *op. cit.*, pp. 4-6. [Vedi al riguardo l'articolo di Vasco Ronchi in questo fascicolo]

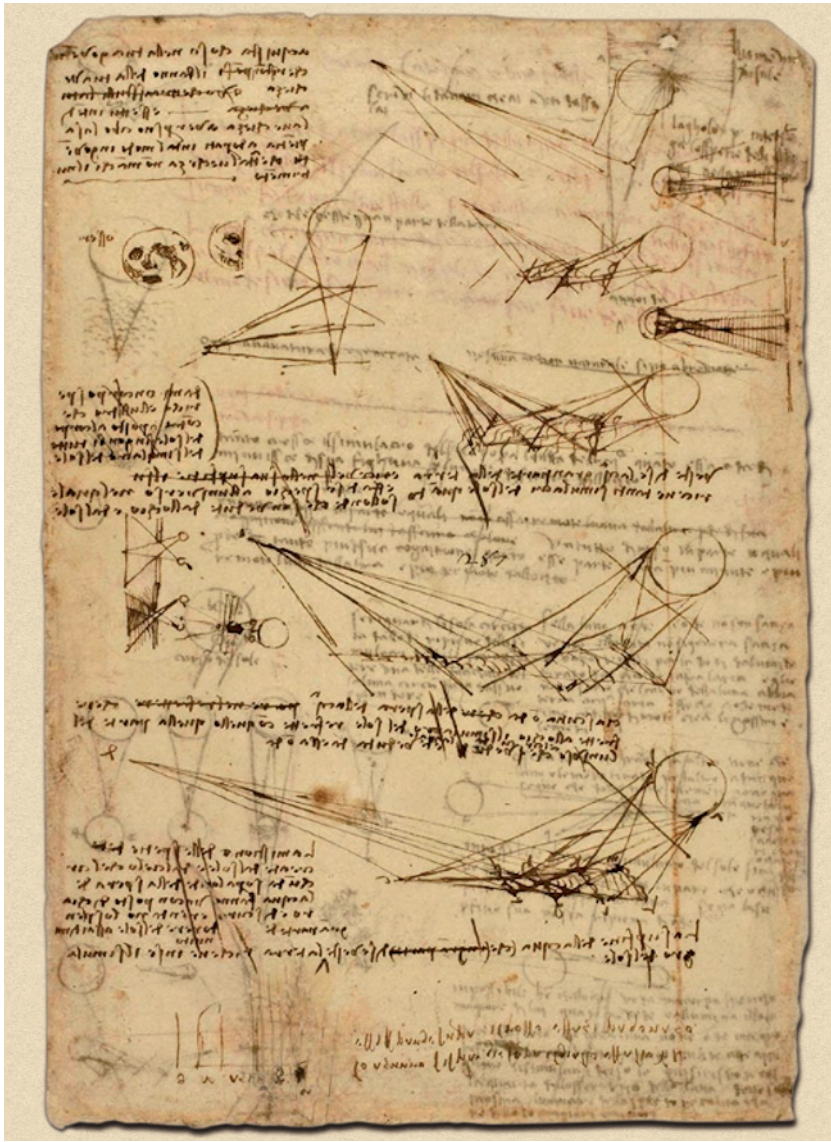


FIG. 3. *Codice Atlantico*, folio 310r (già 112r-a). Nell'angolo in alto a sinistra compaiono i due schizzi della Luna riprodotti qui in copertina. (Milano, Veneranda Biblioteca Ambrosiana)

da alcuni ritenuto un cannocchiale, è stato giustamente interpretato come un prospettografo.<sup>28</sup> L'«ochiale» del fol. 25r del *Cod. F*, già segnalato nel 1905 dal Solmi,<sup>29</sup> e ripresentato recentemente dall'Argentieri<sup>30</sup> come sensazionale scoperta del cannocchiale vinciano è invece una lente rettangolare. Di questo argomento si occuperà in modo esauriente in un prossimo articolo l'ing. Federico S. Bassoli.

Maggiore fondamento di attendibilità è nell'ipotesi che Leonardo possa essere pervenuto all'intuizione del sistema eliocentrico. Nei suoi primi schemi astronomici risalenti al periodo lombardo (1482-1500) si trova costantemente rappresentato il corso del Sole intorno alla Terra, rappresentazione che si mantiene anche nel periodo più avanzato

quando più intense erano le sue considerazioni sugli astri, vale a dire quando intorno al 1508-10, nei fogli del *Cod. Arundel*, *Cod. Leicester* [Ndr: ora *Codice Hammer*, Gates Collection, Seattle (Washington), USA] e *Cod. F*, svolgeva considerazioni sulla natura della Luna e sul corso della Terra. Ma a quest'epoca affiorano dai suoi scritti alcuni accenni che sembrano rivelare una decisiva svolta del suo pensiero. In una nota marginale di un foglio di anatomia,<sup>31</sup> facilmente riferibile al 1510, trovasi essenzialmente espresso il concetto eliocentrico «Il Sole non si muove» (e non «il Sole sta fermo») come è stato riportato da alcuni autori.<sup>32</sup> La frase potrebbe prestarsi, per una prudente ipotesi, ad altra interpretazione potendosi riferire a un simbolismo allegorico, frequente in Leonardo, di cui in questo caso non ci è offerta precisazione alcuna ma che sembra richiamarsi a quell'altra frase nel *Cod. Atl.*, fol. 300 recto b che dice: «Il Sole non vide mai nessuna ombra» (che astronomicamente, però, potrebbe chiarire il concetto dell'astro dotato di luce propria, di natura sostanzialmente diversa da quella di un pianeta come la Terra) e più ancora con le frasi: «Nulla occulta sotto il Sole» e «Verità: Sole».

Del resto la stessa «lauda al Sole» di Leonardo è in effetti un inno alla Virtù simboleggiata dall'astro lu-

minoso e sovrano, nel concetto dell'analogia neoplatonica tra Verità e Luce propugnata dalla filosofia di Marsilio Ficino.

Ma in mezzo a questo fermento filosofico e letterario del tempo che determinò il maturarsi della teoria copernicana, Leonardo pervenne a un momento di felice intuizione che gli pose la chiara visione della Terra spodestata dal centro dell'universo:

Come la Terra non è nel mezzo del cerchio del Sole – scrive egli nel *Cod. F*, fol. 41 verso (circa 1508) – né nel mezzo del mondo, ma è ben nel mezzo de' suoi elementi, compagni e uniti con lei, e chi stesse nella Luna, quand'ella insieme col Sole è sotto a noi, questa nostra Terra coll'elemento dell'acqua parrebbe e farebbe ofizio tal qual fa la Luna a noi.

<sup>28</sup> FEDERICO S. BASSOLI, *Un prospettografo di Leonardo*, in «Sapere», 15 aprile 1952 (fascicolo fuori serie), p. 76.

<sup>29</sup> EDMONDO SOLMI, *Nuovi studi*, cit., pp. 26-27.

<sup>30</sup> DOMENICO ARGENTIERI, *L'ottica di Leonardo*, Pagg. 405-436 dell'op. *Leonardo da Vinci*, a cura della mostra di Milano, Novara, 1939.

<sup>31</sup> LEONARDO, *Quaderni di Anatomia (Windsor) v*, fol. 25 recto [ma oggi è: *Windsor Royal Collection f. 132r*], La trascrizione diplomatica è la seguente: «El sol no si move».

<sup>32</sup> Cfr. ROBERTO MARCOLONGO, *Leonardo nel «paradiso delle scienze matematiche»*. *Fisico-matematico, astronomico*, in «Sapere», n. 95, 15 dicembre 1938, p. 368; nella ristampa del 15 aprile 1952 (fascicolo fuori serie, p. 12) la frase è stata da noi rettificata.

Quando Copernico formulava la struttura del suo sistema, Leonardo aveva già sostenuto il moto diurno della Terra dedotto dall'esperienza della caduta dei gravi: la sua osservazione in proposito contenuta nel *Cod. G* – e divulgata per la prima volta dal Venturi<sup>33</sup> – può costituire sufficiente indizio per appoggiare l'ipotesi di una conseguente convinzione sul moto eliocentrico, cui Leonardo, da tali premesse, si trovava in grado di pervenire. Può forse essere azzardato pensare che le idee di Copernico, che andavano consolidando asserzioni vagamente proposte fin dall'antichità fossero giunte per via indiretta a Leonardo, come farebbe sospettare la presenza del Copernico a Bologna al tempo in cui Luca Pacioli, l'amico di Leonardo, insegnava matematica in questa Università [Ndr: in realtà Pacioli insegnò a Bologna dal 1501, mentre Copernico aveva abbandonato la città nel 1500].

\*

Ben note sono le osservazioni di Leonardo sulla scintillazione delle stelle e sulla luce cinerea della Luna [FIG. 2].<sup>34</sup> I suoi tentativi di calcolare la distanza e le dimensioni del Sole («la misura del Sole promessami da Giovanni Francese»<sup>35</sup> annota nel *Codice Atlantico fol. 222 recto*), i disegni delle macchie lunari da lui eseguiti [FIGG.

<sup>33</sup> C. B. VENTURI, *Essai, cit., Fragmens tirés des manuscrits de Léonard de Vinci, I: De la descente des Corps graves, combinée avec la Rotation de la Terre*, pp. 7-8.

<sup>34</sup> ELIA MILLOSEVICH, *Leonardo e la luce cinerea*, nell'op.: *Per il IV Centenario dalla morte di L. da V. 2 maggio 1919*, Istituto di Studi Vinciani in Roma diretto da Mario Cermenati, Bergamo, 1919, pp. 17-19. La teoria vinciana della luce cinerea fu divulgata fin dal 1768 da JOSEPH DE LA LANDE, *Voyage d'un Francais en Italie fait dans les années 1765 et 1766* (Parigi, 1768), pp. 310-312, ove dichiara di avere avuto la notizia da Paolo Frisi a Milano. [Vedi l'articolo di Millosevich in questo fascicolo]

<sup>35</sup> Per «Giovanni Francese» corrispondente forse a Jean de Paris, vedi E. SOLMI, *Le fonti, cit.*, pp. 179-180, c. xciv.



FIG. 4. Il disegno della Luna di Leonardo, nel folio 674v del *Codice Atlantico*, che suggerì l'attribuzione dell'invenzione del cannocchiale. (Milano, Veneranda Biblioteca Ambrosiana)

3 e 4], e tante altre questioni che sarebbe troppo lungo il solo accennare.

Non inopportuno, comunque, potrà essere uno studio su Leonardo e l'astronomia che aggiorni quelli già compiuti dal Solmi e dal Baratta, senza contare i più antichi accenni di G.B. Venturi e di Guglielmo Libri. Utile contributo per la storia dell'astronomia, specialmente se accompagnato da una raccolta completa degli scritti leonardeschi che a tale scienza si riferiscono, potrebbe finalmente chiarire una posizione un po' equivoca in cui è venuta recentemente. a trovarsi la figura di Leonardo nei confronti dell'astronomia, specialmente ad opera di chi, con opposte esagerazioni, nega a lui ogni merito di originalità in questo campo o gli attribuisce decisamente concetti precorritori, ai quali, forse, egli giunse solo con il lampo dell'intuizione.

**Carlo Pedretti** (Casalecchio di Reno, 6 gennaio 1928 – Lamporecchio, 5 gennaio 2018) è considerato «senza dubbio il più grande studioso di Leonardo dei nostri tempi». Trasferitosi nel 1959 negli Stati Uniti, ha insegnato storia dell'arte italiana all'Università della California a Los Angeles, dove ha anche tenuto la cattedra di studi vinciani e ha diretto l'Armand Hammer Center for Leonardo Studies, la cui sede italiana è a Urbino. Nel 2013 è tornato in Italia, a Lamporecchio, dove ha diretto la Fondazione Rossana e Carlo Pedretti fino alla scomparsa, avvenuta un giorno prima del novantesimo compleanno. Ha fatto parte, tra le numerose altre istituzioni internazionali, della Commissione ministeriale per l'Edizione Nazionale dei Manoscritti e dei Disegni di Leonardo da Vinci e del Comitato Nazionale per la celebrazione dei 500 anni dalla morte di Leonardo (2019). È autore di una sessantina di libri e di circa seicento saggi e articoli sulla vita e l'opera di Leonardo da Vinci.

# Un aspetto poco conosciuto dell'attività di Leonardo da Vinci nel campo dell'ottica (1965)<sup>\*</sup>

Vasco Ronchi (1897-1988)

Più volte è stato studiato il lavoro che Leonardo da Vinci ha svolto nel campo dell'ottica. Alcuni studiosi si sono limitati a citare i brani dei *Codici* leonardeschi in cui vi sono delle frasi relative ad argomenti ottici e ne hanno dedotto che Leonardo si era occupato acutamente di tali argomenti. Però, per valutare l'effettivo valore del contributo leonardiano, è evidente che bisogna inquadrarlo nel quadro dell'ottica del suo tempo. Il che è molto difficile, perché solo da poco tempo è stato squarciato il velo con cui l'ottica medievale era stata accuratamente coperta. Per questo, oggi un esame critico dell'opera leonardiana nel campo dell'ottica assume un carattere quasi di novità, per quanto su Leonardo siano stati scritti moltissimi e dotti articoli e anche libri. Ma non mi risulta che l'ottica leonardiana sia stata analizzata criticamente prima della mia comunicazione *L'Optique de Léonard de Vinci*, al colloquio di Parigi del 1952 su Leonardo, in occasione del quinto centenario della sua nascita.<sup>1</sup>

Un'analisi più particolareggiata è stata pure da me esposta nel volume *Leonardo*, pubblicato a cura del Comitato Nazionale Italiano nel 1954, a chiusura delle onoranze per la ricorrenza suddetta.<sup>2</sup>

Specialmente in quest'ultima pubblicazione è riportata la documentazione dei brani leonardiani ed è tracciato un quadro sintetico dello stato dell'ottica nel periodo della vita di Leonardo. La conclusione a cui sono giunto come conseguenza di quell'esame, e dell'inserimento dell'opera leonardiana nel quadro dell'ottica del suo tempo, è stata riassunta con le parole seguenti:

I passi riportati, per quanto non siano i soli che, nei manoscritti leonardeschi, trattano di questioni ottiche, sono però sufficienti a dimostrare che in fatto di ottica Leonardo si è semplicemente adeguato alle cognizioni dominanti nel suo tempo.

Accintosi a studiare l'ottica, molto probabilmente per risolvere le non poche e non piccole questioni che gli si presentavano nel campo della pittura, egli si è trovato di

fronte a un pelago di misteri e a una teoria insoddisfacente e dissestata.

Dovendo far capo alla prospettiva, che imponeva la propagazione rettilinea per raggi formanti delle piramidi coi vertici nell'occhio, e dovendo far capo ai "simulacri" degli oggetti per rendersi conto dei fenomeni della visione, egli ha fatto uso degli uni e degli altri; ha cercato di rendersi conto della struttura dell'occhio e di far raddrizzare i simulacri penetrati nella pupilla; ha tentato di trovare la regola della rifrazione; ha provato a fare specchi e lenti ma ha finito col rinunciare a tutto.

I suoi sforzi erano veramente prematuri. In tutto questo lavoro sfortunato devesi per altro rilevare:

- 1) l'osservazione acuta, profonda e intelligente di una quantità di fenomeni ottici, sia fisiologici, sia psicologici, sia anche fisici;
- 2) un complesso di considerazioni originali circa la fotometria delle ombre;
- 3) una spregiudicatezza non indifferente per essersi occupato delle lenti, non come curiosità, ma come cose serie, in un tempo in cui esse erano ancora soggette alla congiura del silenzio dell'ambiente filosofico e scientifico.

Tutto sommato, però, non si può dire che l'ottica sia il campo in cui Leonardo ha raccolto i frutti migliori.

Così scrivevo tredici anni or sono e da allora ad oggi qualche fatto nuovo è intervenuto a modificare un po' il giudizio e la valutazione della condotta di Leonardo in questo campo. Particolarmente interessante è stata a questo proposito una ricerca condotta da Edward Rosen con tutta l'attenzione e lo scrupolo che egli ha sempre dimostrato in tutto il suo lavoro a sfondo storico.<sup>3</sup>

Già quindici anni or sono avevo ricostruito la storia delle lenti dalle loro origini fino al 1611, anno in cui per la prima volta ne fu fatta la teoria geometrica, per opera di Johannes Kepler, nella sua *Dioptrice*.

La mia ricostruzione ha incontrato molta sorpresa e anche molta diffidenza nell'ambiente della storia della scienza. Più che altro, direi che ha incontrato dell'incomprensione. Il che non mi meraviglia; perché, come ho avuto occasione di dire apertamente in varie occasioni, discutendo l'annoso e difficile problema dell'insegnamento della storia della scienza nelle scuole di ogni ordine e grado, per comprendere la storia di una scienza bisogna conoscere molto bene la scienza stessa, al suo stato attuale. E

\* Da: «Luce e immagini», n. 1137, 1965, pp. 133-140 (alcune precisazioni a cura della redazione del *Giornale di Astronomia* sono qui tra parentesi quadre).

<sup>1</sup> [V. RONCHI, *L'optique de Léonard de Vinci*, in *Léonard de Vinci et l'expérience scientifique au XVI<sup>e</sup> siècle*, Colloques internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 4-7 juillet 1952, Paris, 1953, pp. 115-120.]

<sup>2</sup> [V. RONCHI, *Leonardo e l'ottica*, in *Leonardo. Saggi e ricerche*, a cura del Comitato nazionale per le onoranze a Leonardo da Vinci nel quinto centenario della nascita, 1452-1952, Roma, 1954, pp. 159-185.]

<sup>3</sup> [E. ROSEN, *The invention of the eyeglasses*, «Journal of the History of Medicine and Allied Sciences», 1956, 11 (1), pp. 13-46, e 11 (2), pp. 183-218.]

non esito a dichiarare che se mi è stato possibile scoprire tante cose interessanti nella storia dell'ottica antica e medioevale, lo si deve al fatto che quando mi sono dedicato a quello studio, io avevo speso più di quindici anni nello studio approfondito dell'ottica moderna. E se nessun altro ha trovato prima di me quello che ho trovato io è proprio perché nessuno di quelli che si sono dedicati a questo studio possedeva una preparazione tecnica come la mia in questo campo.

Ma non basta aver scoperto degli avvenimenti interessanti e di notevole valore storico e filosofico; non basta averli scritti in maniera divulgativa e averne pubblicato la genesi e la critica: soltanto chi ha una formazione mentale adatta e anche una cultura specifica assai vasta e profonda può comprendere l'evoluzione naturale, logica, conseguente dei fatti narrati, e può "crederci".

Ciò che io ho messo in evidenza è veramente paradossale per la persona di cultura moderna generica; dal mio punto di vista invece è paradossale che fenomeni così importanti siano stati coperti di oblio e completamente trascurati. Dico questo perché una conseguenza di queste premesse si riscontra proprio nella valutazione dell'opera di Leonardo nel campo dell'ottica, come ora vedremo.

\*

Le mie ricerche di storia delle lenti ebbero origine nel 1942, in occasione del terzo centenario della morte di Galileo. Vent'anni fa sapevo che sulla "invenzione" delle lenti da occhiali sul finire del secolo XIII erano stati compiuti innumerevoli studi e ne conoscevo le conclusioni, più o meno come si usano raccontare nei testi di ottica. Sapevo anche che da pochi decenni la storia di Salvino Armato degli Armati era stata dimostrata falsa:<sup>4</sup> uno scherzo di cattivo genere combinato nel XVII secolo, Nonostante questo incidente, ero convinto che ormai sulla questione degli occhiali si sapesse tutto quello che si poteva sapere, almeno in base ai documenti esistenti e noti. Qualche cosa di nuovo eventualmente poteva venir fuori dal ritrovamento di qualche nuovo documento storico.

Lo stesso credevo che si potesse dire per l'invenzione del cannocchiale. Io non avevo approfondito la questione, appunto perché credevo che ormai tutto fosse noto al riguardo. Avevo letto, qualche "storia" del cannocchiale e a dire la verità ero rimasto un po' deluso dalle notizie piuttosto contrastanti che si trovavano nei vari articoli; ma ritenevo che ciò rappresentasse tutto quello che si poteva dire al riguardo. Dopo tutto, è noto che a proposito di tutte le invenzioni vi è sempre qualche punto interrogativo a cui non si sa dare risposta, perché il più delle volte l'invenzione si è svolta nel segreto di un laboratorio.

<sup>4</sup> G. ALBERTOTTI, *Ulteriori ricerche e studi intorno alla storia degli occhiali*, Roma, 1925.

Però, quando nel 1942, ricorrendo il terzo centenario della morte di Galileo, mi fu richiesto di collaborare alla sua celebrazione, dal momento che ero Direttore dell'unico Istituto di Ottica di Italia, e per giunta situato proprio sul colle di Arcetri a circa un chilometro dalla casa ove egli trascorse gli ultimi dieci anni della sua vita, in stato di confino dopo la condanna subita a Roma nel 1633, la mia attenzione fu portata proprio sul collegamento fra l'invenzione degli occhiali e quella del cannocchiale e mi proposi di ricostruire il passaggio dalla prima alla seconda. Veramente credevo che un argomento così importante fosse stato già sviscerato da altri cultori dell'ottica e della storia dell'ottica e che per trovare un tale collegamento fosse sufficiente trovare la trattazione fatta da qualche valente predecessore.

Più che altro mi colpì un fatto: perché erano stati necessari ben trecento anni per arrivare a mettere una lente dietro un'altra per fare un cannocchiale? Ecco una domanda che non avevo mai trovato: non mi risultava che nessuno l'avesse posta, e tanto meno che qualcuno vi avesse risposto.

Si pensi bene: trecento anni sono un periodo ben lungo; trecento anni durante i quali le lenti si sono sviluppate, si sono diffuse, si sono perfezionate; alle lenti per correggere la presbiopia si sono aggiunte quelle per correggere la miopia; e mai nessuno aveva trovato la maniera di metterne due di seguito, in modo da vedervi ingrandite e distinte le figure degli oggetti lontani. Non era una cosa naturale; vi doveva essere una ragione.

Bisognava dunque ricostruire il ragionamento fatto da chi aveva costruito il primo cannocchiale e trovare le ragioni, tecniche (o anche scientifiche) per cui quel ragionamento non era stato fatto prima. Erano ragioni teoriche o pratiche?

Una volta posta questa domanda, subito si è presentata un'altra domanda, a cui non sapevo dare una risposta: quale è stato il ragionamento che ha portato all'invenzione delle lenti da occhiali? Perché sono state introdotte nell'uso soltanto quelle per la presbiopia e soltanto più tardi si sono trovate quelle per la miopia? Anche su questioni così importanti, il silenzio degli storici era completo. Tutti si limitavano, a riportare documenti da cui risultava che le lenti erano in uso, che avevano una montatura fatta in un modo piuttosto che in un altro, ma sulla loro genesi, sulla loro vera storia scientifica e tecnica il silenzio era totale, assoluto. Perché?

Porre queste domande e trovare un mondo nuovo, sconosciuto, dimenticato, è stata la stessa cosa. Man mano che svolgevo la mia indagine, passavo di sorpresa in sorpresa. Come ho già riferito ampiamente e con la documentazione del caso in altre occasioni, la situazione si può riassumere nel quadro seguente.

L'ottica del secolo XIII non conosceva né la legge della rifrazione né tanto meno il funzionamento di una lente. Non si sapeva descrivere neppure la rifrazione attraverso ad una superficie piana e tanto meno attraverso ad una superficie sferica; ancor meno

dunque attraverso un disco limitato da due superfici sferiche. Non si sapeva in che cosa consistesse la causa della presbiopia: non vi era dunque nessuna, assolutamente nessuna direttiva che portasse a mettere un dischetto di vetro davanti a un occhio presbite per correggerlo. Non vi era dunque neppure una direttiva teorica qualsiasi che portasse a mettere un disco di vetro a facce cave davanti a un occhio miope per correggerlo, perché non si sapeva a che cosa era dovuta la miopia e non si sapeva quale effetto ottico poteva avere un disco di vetro a facce cave.

Quindi non vi è dubbio che l'invenzione delle lenti da occhiali è stata fatta per caso. La risposta alla domanda "perché le lenti convergenti correggono la presbiopia e quelle divergenti la miopia" è stata data per la prima volta nel 1604: trecentoventi anni dopo che le lenti sono entrate nell'uso.

E il cannocchiale? Lo stesso. Quando si è cominciato a costruire cannocchiali, non vi era nessuna teoria delle lenti. Il cannocchiale è nato per tentativi. Chi ha fatto questi tentativi?

Si delineava ora lo sfondo più interessante del quadro; l'atteggiamento dell'ambiente scientifico e filosofico, atteggiamento decisamente ostile alle lenti. Esse sono state rifiutate dall'ambiente dello studio. Per ben trecentoventicinque anni, totalmente; poi per un altro mezzo secolo in via di liquidazione delle vecchie idee, ormai demolite, ma non abbandonate, specialmente da parte dei matematici e dei filosofi che in gioventù avevano imparato a "non fidarsi" delle lenti.

Ecco una considerazione che ha incontrato molta incredulità da parte degli storici della scienza. Sembra incredibile che l'ambiente scientifico e filosofico di tutto il mondo civile, per un periodo così lungo, sia rimasto inerte di fronte al nuovo ordigno che metteva le persone anziane in condizione di veder bene da vicino come quando erano giovani, e inoltre metteva i miopi in condizioni di veder bene da lontano, come se fossero normali. Sembra incredibile; ma più ci si addentra nella storia dell'ottica del tardo medioevo, più la ricostruzione viene confermata e precisata. Chi riesce a mettersi nei panni di un matematico della fine del XIII secolo o dei secoli successivi, spogliandosi di quelli che gli sono stati messi addosso nella scuola della sua gioventù, deve arrivare alla conclusione che il suo modo di ragionare era logico al massimo grado.

Ogni scienziato, ogni filosofo, prima di esser tale, è uno studente: impara a scuola certe regole, certi principii, che si presentano a lui con tutta l'autorità dei maestri, e della tradizione dei testi classici. Ognuno ne resta convinto; ognuno resta convinto di esser depositario della verità.

Quando si sente interpellare rispetto a una novità, quando gli viene richiesto di giudicare un'invenzione, ogni scienziato che si rispetti mette la novità a confronto con le regole e coi principii del passato; se il confronto è ragionevole, la novità viene accolta e inquadrata nella scienza tradizionale; se tra questa

e la novità vi è incompatibilità, la novità viene dichiarata assurda e condannata a morte.

Questa prassi è inevitabile. Se gli uomini di scienza non la seguissero, vorrebbe dire che non sono convinti della verità della loro scienza, che non sono in buona fede, che non sono scienziati, ma ciarlatani che non hanno capito la loro scienza; se la professano senza esserne convinti, sono dei mercenarii. Ma gli uomini di scienza di tutti i tempi non sono né ciarlatani né mercenarii. Essi professano la loro scienza con convinzione profonda. E rigettano senza un istante di esitazione le novità incompatibili con la loro scienza.

Così hanno fatto i matematici della fine del XII secolo e dei secoli successivi: hanno rigettato le lenti, perché erano incompatibili con la loro scienza. Era la scienza delle "specie" e dei "raggi visuali". Le lenti non potevano conciliarsi con questa scienza. La filosofia di quell'epoca richiedeva che la verità scientifica doveva esser il frutto di un controllo per mezzo di tutti i sensi, specialmente del tatto. La vista da sola non era sufficiente, non meritava fiducia, perché in troppi casi dimostrava di dare indicazioni contrarie alla verità, come si poteva constatare mediante il tatto. Per esser sicuri della verità, bisognava "toccare con mano"; seppure anche così qualche dubbio si potesse sempre avanzare.

Quando uno di questi filosofi, medioevali si è trovato fra le mani una lente, ha dovuto constatare:

- 1) che non era giustificabile in base né alla teoria delle "specie" né a quella dei "raggi visuali";
- 2) che faceva vedere delle figure certamente diverse da quelle confermabili dal tatto.

La conclusione non poteva essere che una: le lenti non sono un mezzo di osservazione razionale e degno di fiducia.

Che cosa vi è di strano in tutto ciò? Niente: tutto è naturale, logico, inevitabile. Sarebbe stato stranissimo invece se i matematici del tardo medioevo, esaminata una lente, avessero gridato al miracolo e avessero concluso subito, senza la minima esitazione, che essi erano ignoranti, che la loro scienza non valeva nulla, che le figure viste attraverso le lenti erano la verità indiscutibile, mentre quello che loro risultava dal toccare con mano era una volgare constatazione priva di significato e di valore.

Eppure molti storici della scienza, di fronte alla dimostrazione della condotta di quei matematici che respinsero le lenti e che, più tardi, si rifiutarono recisamente di guardare nel cannocchiale, sono rimasti incerti, increduli, e non hanno minimamente pensato che la loro titubanza di fronte a questa ricostruzione riproduceva proprio la titubanza dei matematici medioevali di fronte alle lenti: ne era quasi, direi, una dimostrazione.

Posso andare oltre, in questo senso: come i matematici medioevali restavano perplessi e diffidenti di fronte alle lenti, perché non ne sapevano comprendere il funzionamento ottico, perché non sapevano giustificarle tecnicamente, proprio allo stesso modo

gli storici restano perplessi di fronte alla ricostruzione sopra riassunta perché non sanno giudicare tecnicamente la difficoltà di spiegare il funzionamento di una lente con le premesse filosofiche e le cognizioni scientifiche del tardo medio evo, perché non conoscono le teorie delle “specie” e dei “raggi visuali”, in poche parole perché non conoscono l’ottica medievale, ma ragionano in base ai canoni dell’ottica attuale, trasportandola al secolo XIII.

D’altra parte, si deve riconoscere che gli stessi storici della scienza che di fronte alla ricostruzione della condotta dei matematici medievali, come è stata riassunta qui sopra, mostrano un certo scetticismo o almeno una certa perplessità, debbono riconoscere che non sono in grado assolutamente di dare una risposta alle domande che ho esposto poco sopra circa l’evoluzione delle idee a proposito delle lenti e circa il passaggio dalle lenti per occhiali al cannocchiale.

Edward Rosen, ben noto per l’accuratezza delle sue ricerche di carattere storico, quasi direi per la pedanteria con cui vuole assicurarsi di ogni sua affermazione, quando lesse quello che io avevo scritto a proposito dei trecento anni di silenzio assoluto dell’ambiente scientifico circa le lenti, ritenne forse un po’ troppo drastica questa mia affermazione, e forse anche eccessiva la qualifica di “assoluto” data a quel silenzio. Io ho parlato addirittura di “congiura del silenzio” dei matematici e dei filosofi circa le lenti che gli artigiani continuavano a mettere sul mercato, con grande soddisfazione dei clienti sempre più numerosi. Qualcuno ha rilevato che si poteva parlare di “congiura del silenzio” soltanto se essa fosse stata veramente organizzata volutamente; ma è evidente che ciò non è possibile nell’ambiente scientifico, perché se si arrivasse a un passo del genere, vorrebbe già dire che si riconosce l’importanza della novità e vi sarebbe stato certamente chi non avrebbe aderito alla congiura. La congiura di cui io parlavo era evidentemente una rappresentazione figurata della situazione; fenomeno del resto che si è verificato anche in altre circostanze. Tornando al Rosen, egli ha condotto un’indagine accuratissima per trovare tutti coloro che nei secoli XIV, XV e XVI hanno scritto qualche cosa circa le lenti. La conclusione della sua indagine si trova a pag. 203-204 della sua memoria dal titolo a *The invention of eyeglasses*, pubblicata nel 1956 nel vol. XI del *Journal of History of Medicine and Allied Sciences*. Ne riportiamo la traduzione integrale.

Eliminando Arnolfo da Villanova come pure Bernard Gordon, resta che Guy de Chauliac, un terzo professore a Montpellier; fu il primo scrittore medico che parla di occhiali. Nella *Chirurgia Magna*, che egli terminò nel 1363, Guy scrive: «E se queste cose non serviranno, si deve ricorrere agli occhiali di vetro o di berilli (*ocularios vitri aut berillorum*)». L’opera di Guy fu dapprima stampata in una traduzione francese (Lyon, 1478) che esprimeva la sua raccomandazione così: «*auculaires de voyre ou de bericle*» (fol. A 4r). L’espressione diventa più accessibile nella traduzione riveduta di Lione del 1520: «*oculaires de verre*» (fol. 285v);

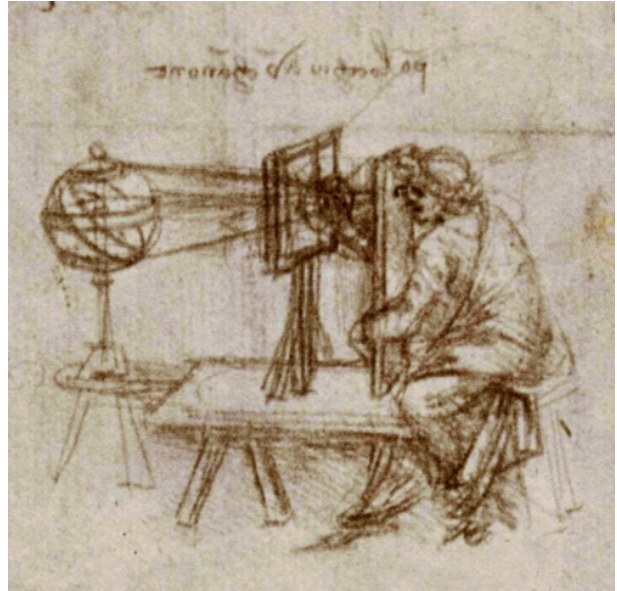


FIG. 1. Il “prospettografo”: dettaglio del folio 5r (386v a) del Codice Atlantico (1480 ca.). (Veneranda Biblioteca Ambrosiana, Milano)

ed in seguito, nella traduzione riveduta di Lione del 1580, la denominazione appare in francese moderno: «*lunettes de verre*» (p. 529). Come dimostrano queste espressioni dialettali, Guy adopera «*oculaires*» per indicare «occhiali».

Circa dieci anni dopo, il Petrarca, quasi all’inizio della sua autobiografia, *Lettera ai Posterì*, scrive: «per molto tempo ho avuto una vista molto acuta, che, contrariamente alle mie speranze, mi ha abbandonato quando ho superato i sessant’anni di età, cosicché con mia grande noia ho dovuto ricorrere all’aiuto degli occhiali (*ocularium auxilium*). Nella sua ottantatreesima *Novella*, Franco Sacchetti (c. 1330 - c. 1400) fa dire a un Priore della repubblica fiorentina «Non vedo bene senza i miei occhiali» Poiché tale Priore ebbe questo ufficio già nel 1346, il Manzi (p. 51), con inganno, induceva i lettori a credere che il brano del Sacchetti si riferisse a quell’anno. Ma la novella riguarda tre persone che furono Priori allo stesso tempo, e l’unico periodo di tale ufficio che corrisponda a questa situazione è dell’anno 1358.

Tre precedenti citazioni italiane di occhiali nel XIV secolo sono state finora ritrovate in manoscritti inediti...

In una nota a piè di pagina [n. 273], il Rosen commenta che Guy «... ne parla (degli occhiali), contrariamente all’affermazione di Ronchi che “nessun scienziato né filosofo parla di occhiali nei propri scritti” ...».

Cito questa nota, perché dimostra la precisione della ricerca eseguita dal Rosen e ne aumenta il valore in favore della mia tesi. Egli ha che la mia affermazione non era giusta; ed ha ragione; ma al tempo stesso viene a dimostrare che in tre secoli egli ha trovato soltanto tre citazioni degli occhiali, una in una enciclopedia medica, una in una lettera di un poeta e terza in una novella. E tutte e tre le citazioni sono limitate a pochissime parole. Ma resta ora più che mai dimostrato che nessun uomo di scienza e nessun filosofo ha considerato gli occhiali, ne ha discusso le proprietà, ne ha descritto l’uso, ne ha tentato lo studio e tanto meno la spiegazione.

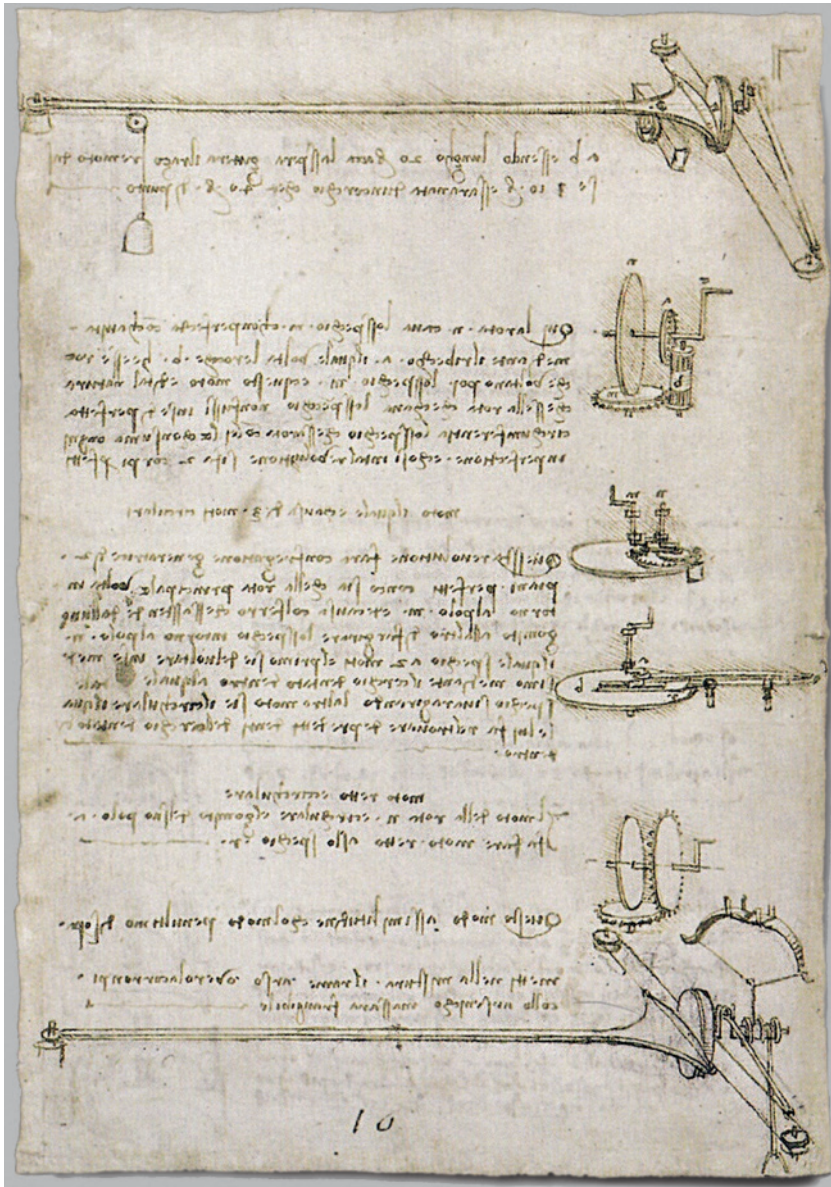


FIG. 2. Codice Atlantico, folio 1103v (già 396v f). Macchina per la lavorazione di specchi concavi (1503-1505 ca.). (Veneranda Biblioteca Ambrosiana, Milano)

Io non ho mai fatto una ricerca così minuziosa e accurata come quella del Rosen, purtroppo il tempo me ne è sempre mancato; ma ho avuto la conferma della mia ricostruzione, da una frase che si trova nel libro in cui veramente per la prima volta si è parlato delle lenti, e se ne è parlato proprio come di un qualche cosa sempre trascurato: l'edizione del 1589 della *Magia naturalis* di Giovan Battista Della Porta.

All'inizio del Cap. x del XVII libro, che porta il titolo *De crystallinae lentis effectibus*, dopo aver specificato che vi sono lenti concave e lenti convesse, aggiunge:

... idem sunt et specillorum effectus, qui maxime ad humanae vitae usum sunt necessarii, quorum adhuc nemo neque effectus neque rationes attulit.

È appena il caso di ricordare che «specilli» erano le lenti da occhiali.

Del resto, basta ricordare la spiegazione del perché le lenti convergenti correggono la presbiopia,

come è esposta nel *De Refractione* del 1593, sempre di G. B. Della Porta, per concludere che nessuno aveva mai studiato prima di lui queste strane “lenti di vetro”.

Non vi è dubbio dunque che l'ambiente scientifico ha rifiutato all'unanimità più completa di prendere in considerazione le lenti. Se così non bene fosse stato, ne sarebbe stato fatto almeno un esame descrittivo, sarebbero state descritte esperienze intese a spiegarne il funzionamento, ne sarebbe stata tracciata qualche teoria magari paradossale. In tre secoli qualche cosa del genere doveva trovar posto, per niente che gli uomini di scienza avessero guardato le lenti in qualche modo. Invece nulla di tutto questo. Ed è chiaro perché. Come ho accennato sopra, i matematici, i fisici, i filosofi che avessero preso le lenti sul serio sarebbero stati costretti a riconoscere che non vi capivano nulla, e soprattutto sarebbero stati costretti a riconoscere che la scienza del tempo, quella scienza che costituiva il loro patrimonio e anche la giustificazione della loro posizione e del loro prestigio, si dimostrava del tutto impotente di fronte a quei dischetti lucidi di vetro a facce colme. E ciò in un periodo in cui, come è ben noto, l'autorità dei “maestri” del tempo e soprattutto di quelli classici aveva una potenza enorme.

In quelle condizioni, prendere in considerazione le lenti, dal punto di vista scientifico, voleva dire assumere un atteggiamento rivoluzionario, voleva dire lanciarsi decisamente contro l'organizzazione accademica. E tutti sanno quanto ciò sia pericoloso e poco consigliabile.

Se le lenti in questi tre secoli non sono scomparse dalla faccia della terra, ma anzi, hanno conquistato lentamente il pubblico (e in particolare quello colto) ed hanno progredito tecnicamente, riuscendo a correggere anche i miopi, lo si deve all'opera tenace, ingenua ed oscura di artigiani, che non si occupavano di filosofia e di scienza, ma che dalla fabbricazione e dalla applicazione degli occhiali traevano un modesto mezzo di vita.

\*

Veniamo ora a Leonardo. Come è ben noto egli non ha seguito corsi di studii particolari, ma si è formato da sé, cercando col suo ingegno e col suo buon sen-



so la spiegazione di tanti fenomeni che si presentavano alla sua acutissima e attenta osservazione. È ben noto che egli non esitava a chiamarsi «homo senza lettere».

Risulta per altro da numerosi documenti che egli ha cercato di farsi una cultura, leggendo i testi classici del suo tempo, e quindi ha letto anche i testi di ottica, come del resto risulta da numerose note citazioni dei suoi codici.

Non vi è dubbio che egli ha cercato in questi testi la spiegazione del fenomeno meraviglioso per cui un osservatore che guarda un quadro dipinto non vede un'accozzaglia di strati di materie variamente colorate, ma vede un panorama, un ambiente, una figura di uomo quasi come la vedrebbe se guardasse direttamente un panorama, un ambiente, una persona. Ciò deve averlo colpito. Ha interrogato i testi classici e vi ha trovato la risposta: la vista è un senso che inganna, che fa vedere una cosa per un'altra.

Nel paragrafo 32 del *Trattato della pittura* scrive:

... i maestri non si fidano nel giudizio dell'occhio, perché sempre inganna, come prova chi vuol dividere una linea in due parti eguali a giudizio di occhio, che spesso la speranza lo inganna. Onde per tale sospetto i buoni giudici sempre temono, il che non fanno gli ignoranti.

Questo dicevano i "maestri". Anche Leonardo si guarda bene dal contraddirli sarebbe stata una follia. Però non ingoia tutto tranquillamente. Già nel paragrafo 6 aveva scritto:

La pittura si estende nelle superficie, colori e figure di qualunque cosa creata dalla natura, e la filosofia penetra dentro ai medesimi corpi, considerando in quelli le loro proprie virtù, ma non rimane soddisfatta con quella verità che fa il pittore, che abbraccia in sé la prima verità di tali corpi, perché l'occhio meno s'inganna ...

E subito dopo, nel paragrafo 7, sotto il titolo, ribadisce ancora la sua convinzione:

Come l'occhio meno s'inganna ne' suoi esercizi, che nessun altro senso, in luminosi, o trasparenti, ed uniformi mezzi... L'occhio nelle debite distanze e debiti mezzi meno s'inganna nel suo ufficio che nessun altro senso, perché vede se non per linee rette, che compongono la piramide che si fa base dell'obbietto, e la conduce ad esso occhio, come intendo provare.

Si sente in tutto questo la scienza del tempo, ma affiorano delle riserve che non si trovano in nessun testo classico. Addirittura Leonardo attribuisce al senso della vista una fedeltà maggiore che non al tatto!

Con queste premesse egli si dedica allo studio del funzionamento dell'occhio, e del meccanismo della visione. La sua opera in questo settore, non coronata da successi notevoli, è già stata analizzata nella mia nota citata del 1954 e non credo interessante ritornarvi sopra.

Invece, dove credo opportuno riesaminare la opera di Leonardo è a proposito delle lenti. Nella nota suddetta ho riferito numerosi brani, in cui Leonardo accenna al suo lavoro per fare specchi concavi

e lenti. Particolarmente nota e famosa è la frase contenuta nel *fol. 190'a* [ora 518r] del *Codice Atlantico*: «Fa occhiali da veder la luna grande», con accanto lo schema di uno specchio concavo. È anche interessante l'esperienza descritta nel *fol. 12'* del *Cod. A*:

Li occhiali quanto più li allontanano dall'occhio (tanto) più mostrano maggiori, quando sono di 50 anni. E se l'occhio vedrà due uguali cose, al paragone l'una fuori dell'occhiale e l'altra dentro, quella dell'occhiale li parà grande e l'altra piccola. Ma le vedute cose deono esser lontane dall'occhio 200 braccia.

Anche nel *Cod. F, fol. 25'* si parla di una lente:

Questo achiale di cristallo debe esser netto di machie e molto chiaro e da lati debbe esser grosso un'oncia d'un'oncia, cioè  $1/144$  di braccio e sia sottile in mezzo secondo la vista che lui l'adoprare, cioè secondo la proportionione di quelli occhiali che a lui stanno bene ...

È anche interessante il tentativo, nel *fol. 244a* del *Codice Atlantico*, di render conto del perché le lenti convergenti correggono la miopia: «Pruova come gli occhiali aiutano la vista ...». Ma si tratta di un tentativo avviato su una via che non poteva giungere a una conclusione ragionevole.

Non si tratta ora di rilevare le conquiste di Leonardo nel campo dell'ottica; come è già stato riferito sopra, ho già dovuto concludere che non è certo l'ottica il campo in cui Leonardo ha raccolto i frutti migliori. Invece è straordinariamente interessante il suo atteggiamento verso i problemi ottici del tempo.

Il fatto più notevole è che egli si è dedicato allo studio delle lenti.

Quando nel 1954 tirai le conclusioni del mio studio sull'ottica di Leonardo, conclusioni riportate poco sopra, il fatto che egli si fosse dedicato a degli studi sulle lenti lo giudicai «una spregiudicatezza non indifferente». Credo di non aver valutato bene il fatto stesso.

A quell'epoca non era stata pubblicata ancora la ricerca del Rosen che, come ho riferito sopra, è del 1956. Se io avevo asserito in qualche mia pubblicazione ciò che il Rosen ha trovato non del tutto esatto, e cioè che «nessun uomo di scienza e nessun filosofo aveva trattato le lenti nei suoi scritti», lo avevo fatto un po' con criterio per così dire statistico, io stesso non credevo che il silenzio fosse stato veramente così totale nell'ambiente scientifico e non mi sarei meravigliato se il Rosen avesse trovato qualche opera matematica o tecnica in cui agli occhiali fosse stata dedicata qualche pagina. Perciò non detti peso eccessivo all'opera di Leonardo sulle lenti. Si era allontanato dall'opinione di quella che io ritenevo una maggioranza, magari anche una grandissima maggioranza, ma non la totalità assoluta. E perciò si poteva parlare di «spregiudicatezza non indifferente». Ma ora che la ricerca del Rosen ha dimostrato che il silenzio degli uomini di scienza e dei filosofi del medio evo a proposito delle lenti è stato veramente assoluto fino alla *Magia naturalis*

del 1589, si deve concludere che Leonardo è stato l'unico a occuparsi delle lenti a scopo di studio, almeno fino a che non venga scoperto qualche altro documento da cui risulti che qualcun altro se ne è occupato in tutti quei tre secoli.

Leonardo non era un accademico, ma non era un artigiano; tanto meno un artigiano occhialaio. Era un uomo di grande ingegno, di acuto spirito di osservazione, e di buon senso. Egli ha studiato i testi dei maestri classici, li ha ammirati, vi ha imparato molte cose; ma poi ha guardato coi propri occhi e ha avuto fiducia in ciò che vedeva, anche se aveva imparato che la vista inganna, e ha concluso che la

vista inganna meno degli altri sensi; e avendo avuto fra mano delle lenti, non ha esitato a guardarvi attraverso, ha tentato di misurare quante volte facevano vedere ingrandito e ha tentato di spiegare perché correggevano la presbiopia. Se poi in questi suoi tentativi non è giunto a risultati degni di rilievo e definitivi, non deve diminuire il valore del fatto che vi si è dedicato. Non si può non riconoscere che il compito era sovrumano per un uomo del tardo medio evo; i suoi sforzi erano prematuri e i problemi da lui affrontati potevano essere risolti soltanto con lo sforzo combinato di decine e decine di ricercatori in tutti i settori della scienza.

---

**Vasco Ronchi** (Firenze, 19 dicembre 1897-Firenze, 31 ottobre 1988) fondò nel 1927 l'Istituto Nazionale di Ottica ad Arcetri, che diresse fino al 1978, contribuendo allo sviluppo della disciplina nell'Italia del secondo dopoguerra. Si occupò di ottica teorica e applicata, di storia dell'ottica e dei suoi concetti base, interessandosi dei relativi meccanismi fisiologici e psicologici, con posizioni non convenzionali che suscitarono numerose critiche. Dal 1953 al 1970 fu presidente della *Union internationale d'histoire des sciences*.

# Leonardo e la luce cinerea (1919)<sup>★</sup>

Elia Millosevich (1848-1919)

R. Osservatorio al Collegio Romano

CHE in qua e in là nei manoscritti di Leonardo appaiano sani concetti astronomici, quasi d'intuito e di divinazione delle grandi scoperte, che s'iniziano 24 anni dopo la morte di lui, col libro immortale *De revolutionibus*, e che si chiudono nel 1687 coi *Principia* di Newton, non vi è chi nol sappia; né di ciò intendo occuparmi, benché l'occuparsene, con criterio discreto ed amore del vero, varrebbe la pena. Voglio invece dir qualche parola sulla scoperta astronomica di Leonardo che riguarda la ragione del lume cinereo della Luna dopo novilunio e prima di esso. La priorità dell'esatta spiegazione del bel fenomeno spetta, senza contestazione alcuna, a Leonardo.

Quando, dopo il novilunio, scorgesi a ponente la Luna in crepuscolo serotino avanzato, il disco intero ben vedesi, perché la fase è completata da un lucre cinereo; il lucre perdura alcuni dì e va smorzandosi intorno al primo quarto per rinforzarsi dopo l'ultimo e raggiungere un massimo di luce tre o quattro dì avanti il novilunio.

Leonardo, per primo, spiegò il fenomeno dovuto ad una doppia riflessione della luce, perché le fasi della Terra rapporto alla Luna sono *reciproche* delle fasi della Luna rapporto alla Terra, e la Terra manda per riflessione alla Luna il lume che riceve dal Sole e questa lo rimette alla Terra.

L'energia luminosa solare attraversa una prima volta l'atmosfera terrestre con "albedo" variabile, in causa dei continenti e degli oceani terrestri; ha luogo il secondo passaggio attraverso il nostro involucro gassoso, indi dalla superficie lunare, pianeggiante e montuosa, viene la luce a colpire la retina umana.

Gli antichi diedero spiegazioni senza valore sulla causa della così detta "luce secondaria della Luna". Alcuni vollero essere la Luna trasparente, altri fosforescente, perfino la si volle attribuire al lume delle stelle (Riccioli, *Almagestum Novum*, I. 199). Sull'autorità di Keplero, sembra che Tycho Brahe facesse dipendere la luce cinerea dal lume di Venere.

Il primo (così almeno io credo) che fece conoscere che, in uno dei Codici Vinciani che si conservano a Londra, Leonardo diede l'esatta spiegazione della causa della luce cinerea è il celebre matematico Paolo Frisi (Milano, 1728-1784). Lalande infatti nella sua *Astronomia* dice:

<sup>★</sup> Da: *Per il IV centenario della morte di Leonardo da Vinci. 11 maggio MCMXIX*, Istituto di Studi Vinciani in Roma diretto da Mario Cermentati, Istituto italiano d'arti grafiche, Bergamo, 1919, pp. 17-19.

*il y a des Italiens qui attribuent cette remarque (parla della vera causa del lume cinereo) à Leonardo del (sic) Vinci célèbre peintre Toscan mort en 1518 (leggi 1519), et le P. Frisi m'a assuré qu'elle se trouve dans un de ses manuscrits sur les Rivieres, que l'on conserve à Londres.*

Quasi cent'anni dopo, Keplero, nell'opera intitolata: *Ad Vitellionem Paralipomena, quibus Astronomiae pars optica traditur* (1640, p. 254), attribuisce le prime nozioni esatte sulla natura della luce cinerea al suo venerato maestro Maestlin (1550-1631), che le presentò nelle tesi sostenute pubblicamente a Tubinga nel 1596. Galileo nel suo *Sidereus Nuncius* parla di questa riflessione della luce terrestre come d'un fatto da lui scoperto già da tempo, certamente ignorando la spiegazione data pur esattamente da Maestlin e, più d'un secolo prima, da Leonardo.

Dopo che la vera causa della luce cinerea divenne patrimonio comune, il lucre lunare venne indagato con cura da parecchi scienziati. Humboldt dice che la luce cinerea vista nelle regioni tropicali, sugli altipiani di Quito e del Messico, produce un'impressione particolare (*Cosmos*, III partie, 2<sup>e</sup> livraison, p. 409, ed. francese, Milan, 1853). Sta di fatto che a fase eguale, con eguale distanza zenitale della Luna e con eguale serenità atmosferica, la luce cinerea ha intensità diversa se osservata dopo il novilunio o prima di esso. Secondo Lambert (1728-1777) e Schroeter (1745-1816) le differenze di intensità luminosa della luce cinerea dipendono dal fatto che la riflessione dalla Terra alla Luna ha luogo in regioni terrestri d'*albedo* variabile, la Terra presentando o masse continentali coperte di sabbie, di praterie, di foreste tropicali, oppure specchi d'acqua (oceani). Prima del novilunio, *caeteris paribus*, il lume cinereo è più vivo che dopo il novilunio. Se si determina, ad un tempo dato, il punto della Terra che ha il Sole allo zenit, donde il circolo terminatore che separa l'emisfero terrestre in luce da quello in ombra, e se su quello si traccia la fase terrestre vista dalla Luna, che è reciproca della fase lunare vista dalla Terra, è ben facile rendersi conto della ragione del variabile lucre, perché ora la parte illuminata e in fase abbraccerà il grande continente Asiatico e l'Australia (prima del novilunio), ora l'Atlantico e le foreste tropicali dell'America (dopo il novilunio).

Arago, a questo proposito, dice che, dall'esame delle varie tinte e della varia intensità del lume cinereo, sarebbe possibile giudicare della nebulosità o meno dell'atmosfera terrestre, che sovrasta la parte illuminata ed in fase, vista da noi, come in uno specchio, sulla Luna.



FIG. 1. Codice Leicester, folio 2r (ex Codice Hammer), in cui viene presentata la spiegazione della luce cinerea (1506-1510). (Seattle, collezione privata Bill Gates)

Il continente Australiano (le coste) tardi venne scoperto; certamente dopo che fra gli astronomi era ben penetrata la nozione della causa della luce cinerea, e Benedetto Castelli (1577-1644), l'insigne discepolo di Galileo, divinò dal luore di quella, l'esistenza di quel continente.

Sulla scoperta di Leonardo, seguita, come vedemmo, da altri, si era sollevata un'obiezione a proposito della causa della luce cinerea, che cioè questa doppia riflessione di luce fosse insufficiente a giustificare quello splendore che, in circostanze favorevo-

li, è veramente notevole. Senonché non si pensava che il disco lunare visto dalla Terra sta al disco terrestre visto dalla Luna come 0,074:1, cioè il disco terrestre visto dalla Luna è tredici volte circa più grande che il disco lunare visto dalla Terra, e però, tutte le altre ragioni fisiche essendo eguali, la quantità di luce che la Terra manda alla Luna è tale da pienamente giustificare l'ipotesi Leonardiana.

Poiché siamo nell'argomento, un'ultima considerazione può essere ricordata. Osservando la luce cinerea, per la quale l'intero disco lunare si fa visibile mentre la Luna è in piccola fase, questa sembra appartenere ad un cerchio di raggio maggiore del cerchio spettante al lume cinereo. Il fenomeno interessante è dovuto all'irradiazione sulla retina dell'immagine della fase così più lucente dell'immagine della luce cinerea, come quando di due cerchi uno nero in campo bianco e l'altro bianco in campo nero, pur essendo di eguale raggio, il primo appare più piccolo del secondo, e però un astronomo, in una sua conferenza, suggeriva alle dame magre che lo ascoltavano di vestir di bianco e alle dame grasse di vestir di nero.

\*

*Nul être humain ne fut doué, comme Léonard de Vinci, de dons plus riches, plus variés et plus complexes. Aucun homme de son temps ne toucha plus aux limites extrêmes du génie. Peintre et musicien, sculpteur et architecte, biologiste et mathématicien, philosophe et anatomiste, il fut grand en tout, et devança les siècles à venir. Et néanmoins nul n'a mieux mesuré les bornes de l'esprit humain, en observant le peu que nous savons au regard de tout ce que nous ne savons pas.*

*«La musique, a-t-il écrit, est la figuration de l'invisible». Léonard, lui, fut la figuration du génie humain lorsque, par un effort sublime, il arrive à se confondre avec la Divinité.*

CAMILLE BARRÈRE

**Elia Filippo Francesco Giuseppe Maria Millosevich** (Venezia, 5 settembre 1848 - Roma, 5 dicembre 1919) studiò matematica, fisica e astronomia da autodidatta e a soli 23 anni, nel 1872, vinse il concorso per professore di Astronomia nautica presso il R. Istituto di Marina Mercantile di Venezia. Venne chiamato da Pietro Tacchini all'Ufficio Centrale di Meteorologia a Roma e poi all'Osservatorio del Collegio Romano, di cui divenne direttore nel 1902, per le dimissioni di Tacchini. Oltre alla ricerca astronomica – fra l'altro scoprì gli asteroidi Josephina e Unitas e collaborò alla realizzazione di un ampio catalogo di stelle – si occupò anche di astronomia dantesca. L'asteroide "69961 Millosevich" porta il suo nome.

# Mitizzazioni e dissacrazioni poetiche delle scoperte astronomiche

Andrea Battistini

Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

ROBERT MUSIL, facendosi portavoce dell'*Uomo senza qualità*, ammette con una punta di rimpianto che «il corno da caccia di Münchhausen era più bello di una voce conservata in scatola», quella del magnetofono, e che «lo stivale delle sette leghe era più bello dell'automobile». Ma se è giustificabile il suo rammarico, non si può però condividere il pessimismo di quando afferma che con il progresso scientifico e tecnologico «noi abbiamo conquistato la realtà e perduto il sogno»,<sup>1</sup> perché, nonostante tutto, l'uomo continua ancora e sempre a nutrirsi di miti e oggi i nuovi dèi sono diventati i robot e le astronavi, i nuovi eroi, incarnazione di Prometeo e di Ercole, gli scienziati, il nuovo genere, sulla linea evolutiva del racconto di fiabe, la fantascienza. I temi però restano gli stessi: la sfida lanciata all'ignoto, la proiezione utopica di ideali, la fuga da un mondo alienato, la fede nel progresso ma al tempo stesso l'angoscia che esso ci possa sfuggire di mano.

Tutto ciò significa che la fantascienza, contrariamente a quanto si pensa comunemente, è un genere molto difficile da orchestrare, dovendo da una parte anticipare il futuro della scienza e dall'altra tenere conto delle condizioni oggettive in cui essa si trova, in modo da rendere plausibile ciò che si vuole raccontare e preconizzare il futuro con un'accettabile percentuale di verisimiglianza. Nonostante tutto, vige ancora il principio dettato da Aristotele, per il quale l'obiettivo da raggiungere consiste nel realizzare un "impossibile" che sia "credibile".

Seguendo questo imperativo, i poeti sono giunti sulla Luna molto prima del 20 luglio 1969, ma in realtà, più del racconto di un allunaggio, quello che a loro importa esprimere prima di ogni altra cosa sono le emozioni, i sogni, le fantasie, gli stupori, i sentimenti, gli interrogativi suscitati o eccitati da un simile evento. Con ciò non si vuole sostenere che questi stati d'animo siano di pertinenza esclusiva dei poeti. In realtà sono comuni anche agli scienziati. Basti a dimostrarlo un solo esempio. A prima vista pare non esistere un'opera più arida e impersonale del *Sidereus Nuncius* di Galileo, che è alla lettera il giornale di bordo di un ideale viaggio stellare compiuto con il nuovo ausilio del cannocchiale. Esso non è altro che la registrazione quotidiana delle osservazioni serali condotte per rilevare le altezze dei monti della Luna e dei suoi altri dislivelli, per an-

notare le diverse posizioni dei satelliti di Giove, per disegnare le costellazioni della Via Lattea. Nondimeno, tutte queste rilevazioni sono accompagnate da indizi emotivamente inequivocabili nel fare trasparire l'«*admiratio*» di «*magna longeque admirabilia spectacula*», ovvero il fascino di un incanto celeste «*iucundum atque perpulcrum*».<sup>2</sup>

A riconoscere questo coinvolgimento affettivo è stato uno scrittore "lunare" come Calvino, per il quale «Galileo, appena si mette a parlare della Luna, innalza la sua prosa a un grado di precisione ed evidenza ed insieme di rarefazione lirica prodigiosa», in quanto «usa il linguaggio non come uno strumento neutro, ma con una coscienza letteraria, con una continua partecipazione espressiva, immaginativa».<sup>3</sup> Basterebbe questa attestazione di convergenza tra le cosiddette "due culture" per smentire Charles Snow circa la tesi di una totale incomunicabilità tra scienziati e letterati, tra i quali esiste di fatto una sorta di osmosi. Avviene, insomma, che anche gli scienziati sono una fonte di ispirazione per i poeti, non solo per i risultati fattuali delle loro ricerche ma anche per le suggestioni e le spiegazioni che le accompagnano. Sono istruttive in questo senso le riflessioni di Plinio il Vecchio, uno scienziato dell'antichità che nella *Naturalis historia* ha racchiuso tutto lo scibile, disegnando un'estesa enciclopedia di ogni sapere. Giunto a parlare della Luna, formula queste considerazioni, tutt'altro che asettiche o impassibili, ma cariche di pathos:

supera la meraviglia di tutti [*omnium admirationem vincit*] l'ultimo degli astri, rimedio alle tenebre escogitato dalla natura: la Luna. Polimorfa, essa ha torturato col dubbio la mente dei suoi osservatori, incapaci di sopportare che proprio l'astro più vicino restasse sconosciuto (II, 41-42).

Con un'impostazione teleologica, ossia finalistica, Plinio immagina – si direbbe poeticamente – che la Luna stia in cielo per permettere anche alla notte di avere la sua luce, così come il giorno la ottiene dal Sole. Ne designa le continue metamorfosi, dovute alle sue fasi che le fanno cambiare continuamente aspetto, e soprattutto crede che la sua presenza in cielo serva a nient'altro che a stimolare nell'uomo la sete di sapere, la curiosità, a sfidare l'ignoto e il

<sup>2</sup> G. GALILEI, *Sidereus Nuncius*, a cura di A. Battistini, Venezia, Marsilio, 2009<sup>4</sup>, pp. 72 e 84.

<sup>3</sup> I. CALVINO, *Una pietra sopra*, Torino, Einaudi, 1980, pp. 183 e 186.

<sup>1</sup> R. MUSIL, *L'uomo senza qualità*, trad. it., Torino, Einaudi, 1978, I, p. 35.

mistero. La Luna, insomma, fungerebbe da catalizzatore, da incentivo alla conoscenza. Non stupisce quindi che gli astronomi con le loro esplorazioni celesti fungano da intermediari tra i fenomeni celesti e i sentimenti che sono capaci di suscitare. Giovanni Pascoli non avrebbe mai scritto liriche di contenuto astrale quali *Alla cometa di Halley*, *Il bolide*, *Il ciocco* se non avesse letto non solo Leopardi ma anche l'*Astronomie populaire* di Camille Flammarion, traducendo, per così dire, le descrizioni in sensazioni.

I poeti infatti, più che rappresentare oggettivamente un astro, rappresentano ciò che esso suscita in loro. Gli aggettivi referenziali e oggettivi che Leopardi impiega in riferimento alla Luna sono pochissimi: è «cadente», perché la si vede tramontare, è «candida» o «aurea» secondo i colori che le fa assumere la rifrazione dell'atmosfera, è «recente» quando appare poco dopo il novilunio. Molto più numerosi gli attributi soggettivi e antropomorfi che la qualificano «cara», «diletta», «graziosa», «pensosa», «silenziosa», «tacita», «vergine», con riferimento, quest'ultimo aggettivo, sia alla castità di Diana, che per gli antichi si identificava in cielo con la Luna, sia alla verginità dell'Immacolata Concezione, che per i cristiani si abbinava al nostro satellite, come dimostra il famoso affresco del Cigoli nella cupola della Cappella Paolina della basilica romana di Santa Maria Maggiore, dove Maria è dipinta avendo ai piedi la Luna raffigurata così come fu disegnata da Galileo nel *Sidereus Nuncius*.

Mentre le descrizioni della Luna fatte dagli astronomi sono univoche e linguisticamente denotative, le reazioni che discendono dalle scoperte che la riguardano sono tutt'altro che concordi e unanimi, anzi perfino opposte. Nel Seicento Galileo scoprì che la Luna non era quel corpo celeste ritenuto fino allora perfettamente sferico ma dotato di monti e valli esattamente come la Terra. Se a ciò si aggiunge che pure il Sole ha le macchie e non è quindi formato di una quintessenza incorruttibile ed eterna diversa dai quattro elementi che costituiscono la Terra (aria acqua terra fuoco) e che i satelliti di Giove smentiscono che l'intero universo giri intorno al nostro mondo, si può capire come mai la nuova concezione astronomica, se per un verso annunciò ottimisticamente tempi nuovi, per un altro verso indusse al pessimismo perché cancellò le millenarie certezze cosmologiche e segnò la fine di un'epoca. Di solito questi opposti stati d'animo di entusiasmo e di smarrimento convivono, vanificando le facili schematizzazioni.

Da una parte impressionava favorevolmente l'"audacia" dell'uomo che, osservava compiaciuto Giambattista Marino rivolgendosi a Galileo in riferimento alle sue scoperte relative alla Luna, gli consentì di essere «solo osservator d'ogni suo moto / e di qualunque ha in lei parte nascosta», riuscendo, «senza che vel nulla ne chiuda», a potere «mirarla ignuda». <sup>4</sup> L'avvenuto ampliamento dello spazio ave-

va dunque il corrispettivo nell'entusiasmante accrescimento delle capacità della mente a esplorare l'ignoto e nella sconfinata fiducia di dominarlo. Nel Seicento la nuova scienza liberò l'uomo dall'angustia di un mondo finito e ai peripatetici che accusavano il *Sidereus Nuncius* di avere degradato la Luna all'infimo rango della Terra, poiché la riconosceva costituita della stessa materia, i galileiani replicavano che in realtà si era al contrario innalzata la Terra alla dignità degli altri corpi celesti, in quanto se ne erano scoperti gli stessi attributi della luminosità e del moto.

D'altra parte, però, l'astronomia moderna estendeva pure alla Luna e ai cieli la stessa imperfezione che regnava sulla Terra, quasi che all'improvviso l'intero universo fosse diventato la rancida preda della corruzione e della sproporzione, subentrate all'ordine e all'unità del passato. Se ne fece portavoce John Donne, per il quale «la nuova filosofia revoca tutto in dubbio», e «liberamente gli uomini confessano che questo universo è consumato» e «tutto è in pezzi, ogni coerenza sparita». <sup>5</sup> Il senso dell'infinito produce ebbrezza, euforia, eccitazione, orgoglio ma anche afflizione, angoscia, turbamento metafisico, espresso come meglio non si potrebbe da un pensiero di Pascal: «il silenzio eterno di quegli spazi infiniti mi sgomenta», nel quale la finitezza dell'uomo si scontra con le due dimensioni estranee al suo essere, l'eternità del tempo e l'infinito dello spazio. Nondimeno, sensazioni e sentimenti di segno opposto possono perfino convivere nella stessa persona, come dimostra ancora Pascal, le cui *Pensées* esprimono magistralmente la doppia forma di ricezione delle scoperte astronomiche. Per rappresentare la debolezza e al tempo stesso la forza dell'uomo, lo definisce «solo una canna, la più fragile della natura; ma una canna che pensa». <sup>6</sup>

A ben vedere si tratta di due atteggiamenti costanti nell'uomo, impasto inestricabile di ottimismo e pessimismo, di mitizzazione e di dissacrazione. Se ne ha conferma anche negli anni non lontani in cui ferveva la gara tra sovietici e americani per la conquista dello spazio. All'indomani del lancio del primo Sputnik, avvenuto il 4 ottobre 1957, Salvatore Quasimodo manifestava un incontenibile entusiasmo in una poesia *Alla nuova luna*, nella quale l'uomo veniva addirittura a sostituirsi a Dio creando nuovi «luminari» (così nel *Genesi*, 1, 14 e 16, sono chiamati il Sole, la Luna e gli altri corpi celesti):

In principio Dio creò il cielo  
e la terra, poi nel suo giorno  
esatto mise i luminari in cielo,  
e al settimo giorno si riposò.

<sup>5</sup> «New philosophy calls all in doubt [...] and freely men confess that this world's spent [...]. 'Tis all in pieces, all coherence gone». J. DONNE, *An Anatomy of the World*, in *The Anniversaries*, in *The Complete English Poems*, ed. by A. J. Smith, Harmondsworth, Penguin, 1973, p. 276.

<sup>6</sup> B. PASCAL, *Pensieri*, a cura di P. Serini, Milano, Mondadori, 1976<sup>8</sup>, pp. 76 e 127.

Dopo miliardi di anni l'uomo,  
fatto a sua immagine e somiglianza,  
senza mai riposare, con la sua  
intelligenza laica,  
senza timore, nel cielo sereno  
d'una notte d'ottobre,  
mise altri luminari uguali  
a quelli che giravano  
dalla creazione del mondo. Amen.<sup>7</sup>

Di tutt'altro segno, venata di sarcasmo, è la poesia dialettale ispirata a Giacomo Noventa dal lancio in orbita della cagnetta Laika, avvenuto il 3 novembre 1957, appena un mese dopo il volo riuscito dello Sputnik. In questo caso non è più l'uomo che si sostituisce a Dio nel creare nuovi corpi celesti ma è una bestia che l'uomo ha mandato in cielo a prendere il posto del Signore:

In alto, in alto nel ciel,  
Dove una volta ai me veci,  
E anca ai tui, Franco Lattes!  
Se mostrava el Signor,  
Vola una cagna. [...]  
Alegri, dunque, compagni,  
Alegro, Lattes!  
El progresso trionfa. [...]<sup>8</sup>

Quando i progressi spaziali, dopo il memorabile discorso di Kennedy del 25 maggio 1961 che prometteva la conquista della Luna entro la fine di quel decennio, si erano fatti sempre più stupefacenti, la loro doppia e contrastante percezione, di inquietudine e di compiacimento, suscitò in Italia un dibattito apparso sul finire del 1967 sul «Corriere della sera». A promuoverlo furono due scrittori, Anna Maria Ortese e Italo Calvino, le cui posizioni, a posteriori, sembrano oggi riassumere nel modo più efficace i due poli della questione. L'Ortese confessava di provare «tristezza e fastidio», «forse sgoamento e ansia» nel sentire «parlare di lanci spaziali, di conquista dello spazio, ecc.». Nell'interrogarsi sulle ragioni di questa «irritazione», ipotizzava, echeggiando forse Pascal e *contrariis*, che i silenzi che scendevano dall'«immensità dello spazio che si apre di là da qualsiasi orizzonte [...] erano consolatori e capaci di restituirla a un interiore equilibrio». Nel presente invece, con l'affollarsi di razzi vettori e di satelliti artificiali quello spazio veniva «sottratto al desiderio di riposo, di ordine, di beltà, allo straziante desiderio di riposo di gente che le somiglia», fino a diventare «fra breve, probabilmente, uno spazio edilizio. O nuovo territorio di caccia, di meccanico progresso, di corsa alla supremazia, al terrore». E concludeva, a mo' di epigrafe, che tutto ciò non le piaceva.

La replica di Calvino non si fece attendere e in forma di lettera aperta a Ortese le chiedeva:

guardare il cielo stellato per consolarci delle brutture terrestri? Ma non le sembra una soluzione troppo comoda? Se si volesse portare il suo discorso alle estreme conseguenze, si finirebbe per dire: continui pure la terra ad andare di male in peggio, tanto io guardo il firmamento e ritrovo il mio equilibrio e la mia pace interiore. Non le pare di «strumentalizzarlo» malamente, questo cielo?

Con ciò, non intendeva affatto esortare all'entusiasmo per le conquiste spaziali: sapeva bene che tutte quelle imprese erano episodi di una «lotta di supremazia terrestre», ma a contare davvero era ben altro. Di là dai meschini interessi di potere e di prestigio, «l'appropriazione vera dello spazio e degli oggetti celesti» significava «*conoscenza*: uscita dal nostro quadro limitato e certamente ingannevole». Riprendendo, forse involontariamente, le argomentazioni già viste di Plinio il Vecchio, Calvino si diceva convinto che la «devozione» alla Luna dei poeti, così intensa fin dall'antichità, nasceva proprio dal desiderio di allargare la cerchia del sapere, di stabilire un rapporto tra l'uomo e l'universo extraumano e di ripensare la Luna in un modo nuovo e insieme con essa anche tante altre cose che riguardano il mondo umano. Per Calvino ciò che si acquista con le imprese spaziali «riguarda non solo le conoscenze specializzate degli scienziati ma anche il posto che queste hanno nell'immaginazione e nel linguaggio di tutti», entrando così nei territori di pertinenza della letteratura.<sup>9</sup>

Perfino le filastrocche destinate ai bambini, se provengono dalla penna arguta di uno scrittore quale Gianni Rodari, possono fare riflettere pur senza rinunciare a un tono scanzonato e apparentemente «leggero». Ecco i consigli che ha dato al tempo in cui si cominciava a parlare con più fondate speranze di uomini destinati a risiedere *Sulla luna*:

Sulla luna, per piacere,  
non mandate un generale:  
ne farebbe una caserma  
con la tromba e il caporale.

Non mandateci un banchiere  
sul satellite d'argento,  
o lo mette in cassaforte  
per mostrarlo a pagamento.

Non mandateci un ministro  
col suo seguito di uscieri:  
empirebbe di scartoffie  
i lunatici crateri.

Ha da essere un poeta  
sulla luna ad allunare:  
con la testa nella luna  
lui da un pezzo ci sa stare.

A sognar i più bei sogni  
è da un pezzo abituato:  
sa sperare l'impossibile  
anche quando è disperato.

<sup>7</sup> S. QUASIMODO, *Poesie e discorsi sulla poesia*, a cura di G. Finzi, Milano, Mondadori, 1996<sup>10</sup>, p. 225.

<sup>8</sup> G. NOVENTA, *Versi e poesie*, Milano, Mondadori, 1975<sup>2</sup>, p. 55. Lattes è il vero cognome del poeta di sinistra Franco Fortini.

<sup>9</sup> I. CALVINO, *Il rapporto con la luna* (24 dicembre 1967), in *Una pietra sopra*, Torino, Einaudi, 1980, pp. 182-183, dove sono riportate anche le considerazioni più significative di Anna Maria Ortese che indussero Calvino a intervenire.

Or che i sogni e le speranze  
si fan veri come fiori,  
sulla luna e sulla terra  
fate largo ai sognatori!<sup>10</sup>

<sup>10</sup> G. RODARI, *Sulla luna*, [www.poesie.reportonline.it/poesie-di-gianni-rodari/poesia-di-gianni-rodari-sulla-luna.html](http://www.poesie.reportonline.it/poesie-di-gianni-rodari/poesia-di-gianni-rodari-sulla-luna.html) (22.07.2019).

Nella lineare semplicità di queste strofette apparentemente disimpegnate si ha la più lampante conferma di quanto asserito da Calvino, circa l'estensione «nell'immaginazione e nel linguaggio di tutti» delle conoscenze specialistiche recate dagli scienziati, a riprova che, anziché esistere “due culture” tra loro incompatibili, è più vero pensare che ne esista una sola, sia pure espressa con linguaggi diversi.

---

**Andrea Battistini**, ora professore emerito dell'Università di Bologna, ha insegnato Letteratura italiana dal 1972 al 2017. Ha curato l'edizione del *Sidereus Nuncius* di Galileo, su cui ha scritto una monografia (Il Mulino, 2011) e ha studiato i rapporti su letteratura e scienza. Suoi lavori sono tradotti in inglese, francese, tedesco, spagnolo, portoghese, ungherese, giapponese. Nel 2015 ha ottenuto il premio assegnato dall'Accademia dei Lincei e destinato a un letterato.



# Navigazione autonoma per operazioni di prossimità con oggetti spaziali non cooperativi\*

Vincenzo Pesce

Politecnico di Milano

LA navigazione relativa autonoma di veicoli spaziali è un problema complesso e attraente per future missioni spaziali. Quando si parla di navigazione di veicoli spaziali, ci si riferisce all'azione di processare le misure disponibili per determinare la posizione e l'assetto attuali e futuri del veicolo. Volendo fare un'analogia, la navigazione spaziale potrebbe essere paragonata all'antica navigazione navale. Infatti, nel remoto passato, subito dopo aver lasciato il porto, la posizione dell'imbarcazione era molto incerta. I marinai, allora, avendo una vaga idea della posizione del porto di partenza e della loro destinazione, potevano utilizzare alcuni strumenti e sensori rudimentali, come il sestante o il suo antenato, il bastone di Giacobbe (o balestriglia), per "stimare" la loro posizione.

Nei veicoli spaziali moderni, la navigazione è un compito fondamentale ed è eseguito sfruttando i sensori disponibili a bordo della navicella, modelli dinamici, potenti computer e il supporto da Terra. In generale, con la parola "navigazione" ci si riferisce alla navigazione assoluta ovvero il problema di localizzare sé stessi rispetto ad un sistema di riferimento noto. Tuttavia, un aspetto molto interessante è quello che riguarda la navigazione relativa, ovvero il problema di ricostruire la posizione e l'assetto relativo di due diversi oggetti spaziali. Inoltre, la necessità di aumentare significativamente il livello di autonomia dei veicoli spaziali, per consentire la prossima generazione di missioni spaziali, è stata recentemente sottolineata da importanti istituzioni come la NASA. Infatti, l'autonomia garantirebbe di far fronte all'impossibilità di fare affidamento su comandi inviati dalle stazioni di Terra (a causa di latenze di comunicazione e non visibilità), ma potrebbe anche migliorare la robustezza, affidabilità e rapidità delle missioni.

Di particolare interesse è lo scenario di navigazione relativa tra un veicolo attivo (inseguitore) e un altro oggetto (*target*) nelle vicinanze. Questo tipo di scenario è attraente per molte e diverse applicazioni come formazioni di satelliti, manutenzione di satelliti in orbita e rimozione attiva di detriti spaziali. In questo tipo di missioni, infatti, il computer di bordo

del veicolo inseguitore deve essere in grado di stimare autonomamente il suo stato relativo, assicurando accuratezza e velocità di aggiornamento, soddisfacendo così i requisiti di controllo e minimizzando i rischi di collisioni. Durante gli ultimi decenni, pochissime missioni hanno tentato di compiere operazioni autonome in orbita. Tuttavia, l'interesse delle maggiori agenzie spaziali va verso una graduale automazione di tutte le fasi delle missioni spaziali per i molti vantaggi che questa comporterebbe.

La prima missione che ha coinvolto operazioni autonome di prossimità fu nel 1997 l'Engineering Test Satellite ETS-7, durante la quale fu eseguito un avvicinamento e un "attracco" tra due satelliti, utilizzando numerosi sensori di prossimità. Negli anni successivi, la NASA e DARPA hanno tentato, con sorti alterne, missioni autonome di prossimità come DART nel 2005 e Orbital Express nel 2007. Più recentemente, la missione PRISMA, lanciata nel 2010, ha dimostrato il possibile utilizzo di tecniche di navigazione relativa per missioni di voli in formazione di satelliti.

Nella maggior parte delle missioni elencate si trattava di approcci con un veicolo *target* di tipo attivamente cooperativo. In questi casi, sia il veicolo inseguitore che il veicolo *target* hanno conoscenza del loro stato (posizione e assetto) e possono scambiarsi informazioni attraverso un canale di comunicazione. In questo caso, l'accuratezza della navigazione è tipicamente molto elevata e può essere utilizzata per scenari dove è richiesta un'alta precisione (voli in formazione e manutenzione in orbita). In altri casi, il *target* può cooperare in maniera passiva, attraverso marcatori artificiali posti sul corpo del veicolo che possono essere individuati e tracciati dal veicolo inseguitore. Anche in questi casi, si raggiungono solitamente risultati soddisfacenti.

D'altro canto, quando il tipo di *target* è non collaborativo, l'accuratezza della navigazione degrada inevitabilmente a causa della mancanza di informazioni fornita dal veicolo *target*. Per questo tipo di scenario, sono stati proposti sensori attivi e passivi insieme a tecnologie *software* avanzate per derivare una stima dello stato relativo. Tuttavia, anche una conoscenza limitata della geometria del *target* può migliorare in maniera significativa l'accuratezza della stima. Un'attenzione particolare è rivolta ai casi in cui il *target* è non cooperativo e ignoto. Infatti, la completa mancanza di informazioni riguardanti il corpo del veicolo e l'elevata incertezza sulla cono-

\* In questo articolo l'Autore presenta i contenuti essenziali delle ricerche svolte nel corso del Dottorato di Ricerca che gli hanno valso il "Premio Guido Horn d'Arturo" della SAIt per l'anno 2019, consegnato durante il LXIII Congresso Nazionale della Società, tenutosi a Roma nel maggio dello stesso anno.

scenza del suo moto, rendono il problema della navigazione relativa particolarmente difficile da risolvere. Di conseguenza devono essere adottate soluzioni ad-hoc in termini di tecnologie e algoritmi. A questo proposito, i sensori elettro-ottici sono stati identificati come l'opzione migliore per consentire la navigazione durante operazioni di prossimità con *target* non cooperativi. Nello specifico, possono essere utilizzati strumenti attivi come il Light Detection And Ranging (LIDAR) o passivi come mono o stereo camere. La scelta dei sensori di navigazione deve tenere in conto, da un lato, delle risorse disponibili a bordo in termini di massa, potenza elettrica e di calcolo, dall'altro, dello scenario di missione e dei costi, che devono essere sostenibili, per la progettazione e lo sviluppo dei sistemi del veicolo spaziale. L'attenzione di questo lavoro è posta sull'utilizzo di monocamere e stereocamere. Infatti, queste presentano dei vantaggi rispetto ai LIDAR in termini di minor complessità *hardware*, costo, peso e consumo di potenza. Inoltre, questo tipo di sensore può essere utilizzato simultaneamente in applicazioni che richiedono una supervisione umana. È importante sottolineare come le camere monoculari abbiano un più ampio range operativo, non limitato dalle dimensioni della piattaforma, rispetto ad un approccio stereo, ma non possano fornire informazioni circa la profondità dell'oggetto inquadrato.

L'utilizzo di camere, tuttavia, ha alcuni lati negativi che devono essere tenuti in considerazione e risolti. In particolare, questo tipo di sensore è sensibile a condizioni di illuminazione avverse, come la saturazione, quando esposte a luce solare diretta o durante le eclissi, quindi in mancanza di illuminazione.

Il problema della stima dello stato di un oggetto non cooperativo, usando delle camere, può essere risolto sfruttando architetture di navigazione relativa sia "strettamente accoppiate" che "debolmente accoppiate". L'approccio strettamente accoppiato consiste nel processare direttamente nel filtro di navigazione caratteristiche naturali del veicolo (angoli, spigoli, lati), estratte dalle immagini acquisite. Nello specifico, le linee di vista (LOS) o il vettore posizione 3D, di ciascun punto caratteristico, devono essere incluse nel vettore di stato. Di conseguenza, il costo computazionale dell'algoritmo aumenta con l'aumentare del numero di punti caratteristici individuati. In più, questo tipo di architettura di navigazione non è robusto nel caso di dinamiche relative particolarmente rapide o se il *target* presenta una geometria complessa, in quanto la capacità di tracciare i punti caratteristici può essere compromessa. Questo può accadere quando si avvicinano veicoli spaziali con parti mobili (satelliti di comunicazione in orbite geostazionarie). D'altro canto, è importante sottolineare come questi approcci siano la migliore opzione quando si ha a che fare con *target* non cooperativi e ignoti. Invece, nel caso in cui fossero disponibili informazioni basilari circa la geometria del *target*, le architetture debolmente accop-

piate offrono un'alternativa migliore. Con architetture debolmente accoppiate si indicano architetture composte da due blocchi separati e consecutivi. Inizialmente, il blocco di determinazione della posa (posizione e assetto) analizza l'immagine e fornisce una stima indipendente di posizione e assetto relativi tra *target* e inseguitore. Successivamente, questa stima è usata come misura in un filtro di navigazione, come può esserlo un filtro di Kalman.

In questo lavoro si è deciso di studiare il problema della navigazione con veicoli spaziali non cooperativi, ma noti. La principale ragione è che questo tipo di scenario è molto attraente, potendo essere applicato a diversi tipi di missioni. Come precedentemente spiegato, in queste condizioni è consigliabile usare architetture di navigazione debolmente accoppiate. Questo lavoro propone una soluzione per la navigazione relativa basata su un'architettura debolmente accoppiata con una monocamera e assumendo la conoscenza di una geometria semplificata del veicolo *target*. Tale tipo di architettura consta di due blocchi principali. Il primo, quello di determinazione della posa, processa direttamente le immagini paragonandole a un modello disponibile a bordo. Il secondo, costituito da un filtro di navigazione, processa queste informazioni per migliorare la stima della posa. Nel nostro caso, si è deciso di lavorare con punti caratteristici come gli spigoli del veicolo. Di conseguenza, il modello del veicolo *target*, generato prima della missione dalla conoscenza della geometria del veicolo, sarà un *dataset* di punti 3D corrispondenti ad alcuni degli spigoli del veicolo più facilmente identificabili dall'algoritmo. Chiaramente, un aspetto critico per l'acquisizione iniziale della posa e per il tracciamento è l'identificazione corretta delle corrispondenze tra i punti caratteristici estratti dall'immagine e i punti del modello. Infatti, i problemi di corrispondenza immagine-modello e quello di stima della posa sono accoppiati e possono essere risolti solamente utilizzando metodi iterativi. Per quanto riguarda il tracciamento, l'evoluzione dei parametri della posa è analizzato implementando l'algoritmo SoftPOSIT, il quale, precedentemente sviluppato, calcola i parametri di posizione e assetto relativo per mezzo di un'ottimizzazione ai minimi quadrati. Senza entrare nel dettaglio, questo metodo consente di calcolare la posa confrontando la proiezione prospettica reale dell'immagine con una proiezione ortografica scalata (del modello). Per un corretto funzionamento, tuttavia, è necessario avere una buona inizializzazione. Per questo motivo, è fondamentale sviluppare un algoritmo di inizializzazione efficace e preciso. A tale proposito, è stato proposto un algoritmo originale basato sul concetto di "ipotesi-e-test".

L'algoritmo sviluppato funziona nel seguente modo: inizialmente, si sceglie un *set* di corrispondenze tra gli insiemi di punti del modello e quelli estratti dall'immagine. Queste corrispondenze non sono scelte in maniera del tutto casuale, come avviene solitamente, ma in maniera intelligente, sele-

zionando solamente i punti che sono lontani dal centro di massa del satellite. Questo approccio è particolarmente utile per applicazioni con satelliti aventi lunghe appendici, come pannelli solari o antenne. Una volta trovate le corrispondenze iniziali, queste sono utilizzate per risolvere il problema PnP (*Perspective-n-Point*) che fornisce una prima stima della posa del veicolo *target*. I valori di posa ottenuti sono utilizzati per riproiettare i punti 3D del modello sul piano immagine così da confrontare i nuovi punti 2D proiettati e gli originali estratti dall'immagine. Se le corrispondenze ipotizzate inizialmente non sono confermate, il processo deve ricominciare selezionando un nuovo set di corrispondenze; un processo iterativo che si ripete fino a quando le corrispondenze ipotizzate sono confermate. Una volta ottenute le corrispondenze tra i punti 3D e quelli 2D dell'immagine, si può ottenere la posa stimata corrispondente.

Una volta ottenuta una prima stima della posa relativa, questa è usata come *input* per un filtro di navigazione. Senza entrare nel dettaglio dell'implementazione, un filtro è uno strumento che consente di migliorare la stima dello stato fondendo in maniera intelligente le misure disponibili e un modello dinamico che ne descrive la sua evoluzione. L'utilizzo di un filtro è imprescindibile per qualsiasi applicazione di navigazione ed è utile in moltissimi altri campi.

Una volta sviluppato, l'algoritmo è stato testato con simulazioni numeriche. Questo tipo di approccio consente di validare l'algoritmo proposto utilizzando modelli della dinamica rappresentativi dello scenario considerato. Gli esperimenti numerici dell'algoritmo sono il primo passo nella catena di validazione dello stesso e sono fondamentali per evidenziare eventuali problematiche e colli di bottiglia. La strategia proposta è stata validata numericamente grazie ad una campagna di *test* estensiva, basata su scenari realistici e considerando diverse condizioni orbitali. Inoltre, la robustezza dell'algoritmo e la sua dipendenza dal rumore delle misurazioni e da possibili false misure è stata comprovata attraverso analisi di sensitività aggiuntive. In tutti questi casi, l'algoritmo proposto ha dimostrato di poter garantire le prestazioni richieste nel caso di approcci con veicoli spaziali non cooperativi.

Il passo successivo nella catena di validazione di un algoritmo è la sua validazione sperimentale. È questo un tipo di esperimento particolarmente complicato, nel caso di missioni spaziali, in quanto le dinamiche ottenute in orbita sono fortemente distinte rispetto a quelle ottenibili sulla Terra. Per questa ragione, è stato necessario progettare in maniera particolare un esperimento che permettesse di ottenere condizioni di simulazione realistiche. A questo fine, l'algoritmo è stato validato presso i laboratori del Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali del Politecnico di Milano. Il sistema utilizzato è composto da un braccio robotico a 7 gradi di libertà sulla cui punta è stata montata una



FIG. 1. Riproduzione realistica e in scala del veicolo spaziale.

camera monoculare e un veicolo spaziale riprodotto fedelmente in scala. Il braccio robotico utilizzato consente di riprodurre traiettorie di dinamica relativa ottenibili in orbita grazie alla sua estrema mobilità. Oltre a ciò, condizioni di illuminazione controllate e realistiche sono state riprodotte mediante un dedicato sistema di luci, tende nere di tessuto non riflettente e pavimento nero. Per riprodurre il veicolo spaziale *target*, si è usato come riferimento il modello del satellite SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) che è stato successivamente stampato in 3D nei laboratori del Politecnico. Per riprodurre le caratteristiche ottiche superficiali, il satellite è stato poi rifinito e verniciato superficialmente. Fogli di alluminio sono stati utilizzati per riprodurre la protezione termica dei veicoli spaziali in Multi-Layer Insulation (MLI) e scarti di vere celle solari per riprodurre i pannelli solari del veicolo. Il risultato del processo è visibile nella FIG. 1.

Il test di validazione sperimentale è stato condotto impostando un moto controllato al braccio robotico e mantenendo il modellino del satellite fisso su un supporto. Le immagini acquisite sono state processate *off-line* per ottenere una stima della posa relativa tra la camera e il veicolo *target*. I risultati ottenuti, riprodotti in FIG. 2 e FIG. 3, mostrano degli esiti preliminari promettenti.

Un altro scenario molto interessante nell'ambito della navigazione relativa è quello dell'esplorazione di corpi ignoti come asteroidi o comete. Come già precedentemente discusso, missioni che operano in prossimità, mappando la superficie di questo tipo di corpi celesti, presentano numerose sfide dal punto di vista progettuale. Oggigiorno, affrontare questo tipo di ambiente, con un alto grado di incertezza, richiede l'intervento umano lungo tutte le diverse fasi della missione, specialmente all'inizio delle operazioni di prossimità. In più, per eseguire una mappatura e acquisire dati scientifici è necessario progettare accuratamente le manovre da eseguire.

Allo stato attuale, operatori specializzati giocano un ruolo chiave nel processo di progettazione delle traiettorie e assistenza durante la fase di mappatura. Questo processo, che prevede l'uomo fortemente coinvolto, è estremamente dispendioso in termi-

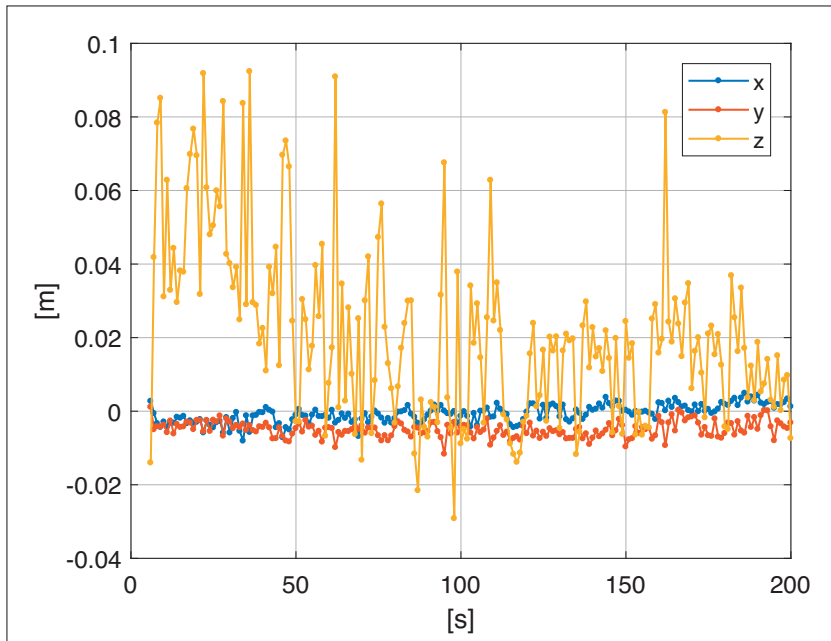


FIG. 2. Stima della posizione relativa.

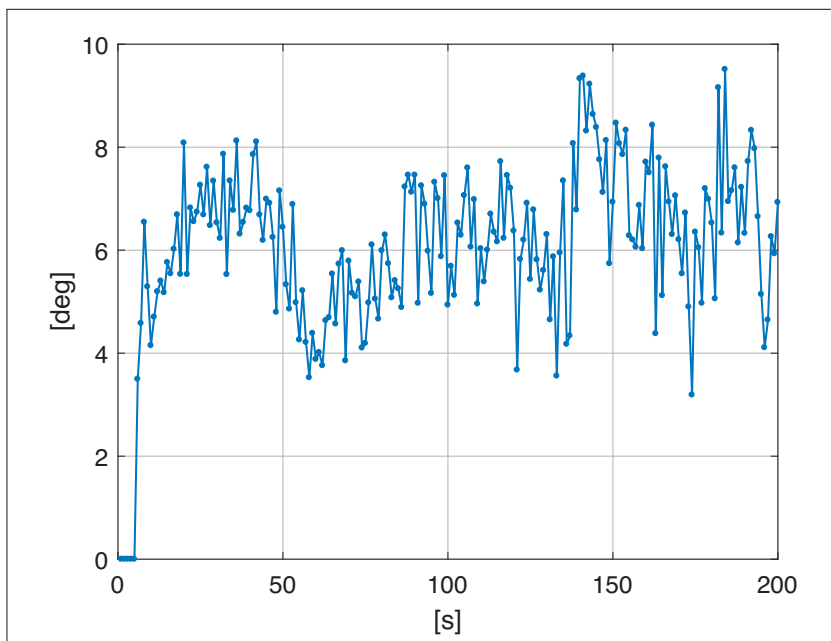


FIG. 3. Stima dell'assetto relativo.

ni di tempo e limiterà l'esecuzione di future missioni spaziali, come inviare più veicoli spaziali per esplorare diversi corpi celesti simultaneamente. Per aumentare l'autonomia delle future missioni spaziali, in questo tipo di scenario, è necessario concentrarsi sul processo di selezione delle orbite per migliorare l'accuratezza della mappatura. In altre parole, lo scopo di questo lavoro, sviluppato in collaborazione con il NASA-Jet Propulsion Laboratory, è anche quello di consentire al veicolo spaziale di eseguire azioni che migliorino la conoscenza dell'ambiente e quindi della forma dell'oggetto approssiato. Per fare ciò è necessario risolvere un problema di ottimizzazione che consenta di massimizzare la copertura del corpo osservato e, in par-

ticolare, è stato formulato un problema di *planning* in ambiente incerto. Quindi, sono state definite formalmente delle misure quantitative che descrivono l'accuratezza della mappa del corpo celeste. Infatti, una ricompensa è calcolata per ciascuna possibile orbita, basandosi sulla bontà delle eventuali osservazioni. Questo consente, in maniera intelligente e autonoma, di selezionare l'orbita successiva che massimizzi questa ricompensa. C'è da notare come la ricompensa sia calcolata in base alla valutazione di angoli di illuminazione del corpo e di osservazione da parte del satellite. Sebbene possa sembrare concettualmente semplice, l'algoritmo finale è stato derivato dopo una formulazione matematica piuttosto complessa. Un altro aspetto da sottolineare è come una buona conoscenza della mappa dell'asteroide consenta poi una più agevole e accurata navigazione.

L'algoritmo sviluppato è stato validato numericamente grazie ad un modello estremamente realistico dell'ambiente e dell'asteroide (JPL's Small Body Dynamics Toolkit) e grazie ad uno strumento per la valutazione della bontà della mappatura (Primitive Body Coverage and Geometry Evaluator). Per le simulazioni numeriche è stato utilizzato il modello di cometa CG67-P (ovvero quello della missione ESA Rosetta). Ottimi risultati (vedi FIG. 4) sono stati ottenuti nei casi di *test*, migliorando considerevolmente i risultati del processo di mappatura. In particolare, si può notare come le aree chiare (corrispondenti ad una migliore mappatura)

aumentino dopo aver selezionato l'orbita appropriata al passo successivo.

L'ambito della navigazione spaziale relativa è attualmente molto attivo e numerose ricerche parallele si prefiggono di offrire soluzioni più o meno efficienti a questo problema. La motivazione principale è la grande varietà di possibili missioni che una tale tecnologia consentirebbe di eseguire con costi relativamente contenuti. In particolare, sviluppare algoritmi che sfruttino monocamere può essere molto vantaggioso in termini di costi, ma anche di potenza computazionale. Ultimamente, infatti, stanno prendendo sempre più piede i CubeSat, piccoli satelliti dalle dimensioni decisamente ridotte e conseguentemente dalle prestazioni limitate. Questo tipo di al-

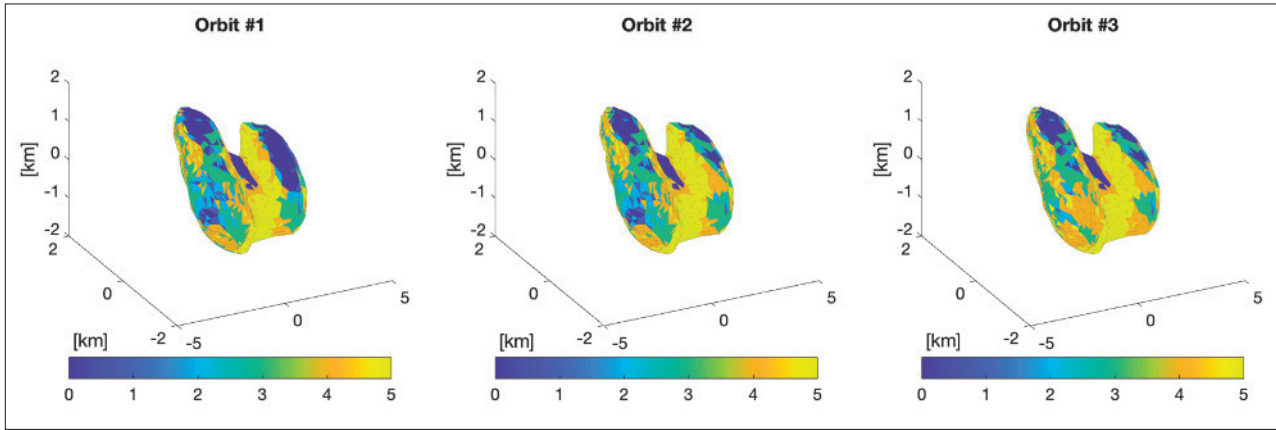


FIG. 4. Mappa di copertura dell'asteroide CG67-P con il metodo proposto. L'indice da 0 a 5 indica la bontà della mappatura in ciascuna area.

goritmi consentirebbe di eseguire operazioni e quindi missioni fino ad ora inimmaginabili. Il miglioramento dell'accuratezza di tali tecnologie permetterebbe di implementare missioni che richiedono elevate precisioni di stima dello stato relativo per sistemi di metrologia o monitoraggio della Terra.

Gli algoritmi e approcci innovativi qui illustrati sono un esempio di molte proposte presenti in questo florido campo di ricerca, le quali, però, offrono soluzioni alternative e performanti che, chissà, potrebbero essere un giorno implementate su veicoli spaziali per missioni reali.

**Vincenzo Pesce**, nato a Matera il 20/11/1990, ha conseguito un dottorando di Ingegneria Spaziale presso il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale al Politecnico di Milano nel gennaio 2019. Nel 2015 ha svolto la sua tesi di laurea magistrale alla University of Florida presso l'ADAMUS (ADvanced Autonomous MULTiple Spacecraft) Laboratory, per la quale nel maggio 2017 ha ricevuto dal Presidente della Repubblica il '1° Premio Leonardo-Finmeccanica'. Nel 2017 ha trascorso sei mesi presso il NASA Jet Propulsion Laboratory di Pasadena come *visiting researcher* nella divisione di robotica. La sua ricerca è incentrata principalmente nel campo dei sistemi autonomi e robotica spaziale. In particolare, lo sviluppo di algoritmi che consentono di ricostruire in maniera autonoma la posizione e l'orientamento nello spazio di un altro satellite, utilizzando solamente una sequenza di immagini. Durante il suo dottorato, nel 2016, ha avuto la possibilità di partecipare a un volo parabolico sponsorizzato dall'Agenzia Spaziale Europea per studiare la dinamica di cavi, che potrebbero essere utilizzati, in futuro, per trainare detriti spaziali.

# Formazione di galassie a disco con simulazioni numeriche cosmologiche: ruolo degli *outflow* galattici ed evoluzione chimica\*

Milena Valentini

Scuola Normale Superiore, Pisa

## Introduzione

UNO dei più interessanti filoni di ricerca attuale nello studio della formazione delle galassie è rappresentato dalla comprensione accurata e dettagliata di come si formano le galassie a disco o a spirale come la nostra Galassia, la Via Lattea. La formazione delle galassie a disco è infatti di fondamentale importanza per l'intera teoria della formazione ed evoluzione delle galassie, non solo di quelle a spirale. Infatti, sulla base dello scenario attualmente accreditato, le galassie ellittiche (che hanno cioè una morfologia diversa da quelle a spirale) sono il risultato dell'interazione e della fusione di proto-galassie a disco avvenute diversi miliardi di anni fa. Quando ci si concentra sulla formazione delle galassie a disco, inoltre, è estremamente interessante comprendere come e perché si formano dischi gassosi e stellari radialmente estesi.

Per studiare questo scenario dal punto di vista teorico, le simulazioni numeriche cosmologiche rappresentano uno strumento estremamente potente. In generale, una simulazione numerica risolve ed evolve nel tempo un sistema di equazioni complesse che sarebbe impossibile risolvere analiticamente. Le equazioni che le simulazioni risolvono, nel nostro caso, descrivono l'insieme di processi fisici che regolano la formazione e l'evoluzione delle galassie. Ne sono un esempio il collasso del gas in un alone di materia oscura che è all'origine della formazione della galassia, il raffreddamento del gas, la formazione stellare, l'evoluzione dei buchi neri super-massicci, i processi di *feedback*. In particolare, con quest'ultima espressione ci si riferisce a quell'insieme di fenomeni, costituiti principalmente dall'immissione di energia e metalli (ovvero tutti quegli elementi chimici diversi da idrogeno ed elio) nel mezzo interstellare, con cui un sistema risponde ad un precedente evento (e.g. il buco nero super-massiccio accresce gas e rilascia energia, le supernovae esplodono e liberano energia e metalli). Le simula-

zioni numeriche cosmologiche descrivono consistentemente l'evoluzione della materia oscura e bionica (gas e stelle) in un universo in espansione come il nostro.

Lo scenario generale per la formazione e l'evoluzione delle galassie a disco è il seguente: il mezzo gassoso che si trova tra le galassie rappresenta la riserva di gas da cui le galassie si formano. Il mezzo inter-galattico fornisce dunque il carburante per la formazione stellare: infatti questo gas povero di metalli viene accresciuto dalla galassia che si sta formando al centro dell'alone di materia oscura nel quale risiede, ed alimenta la formazione stellare. Con il passare del tempo, le stelle si formano, evolvono ed una frazione di esse termina la propria esistenza esplodendo come supernovae: queste potenti esplosioni innescano ed avviano gli *outflow* galattici.

Gli *outflow* galattici sono flussi di gas in movimento che promuovono il ricircolo continuo di materiale all'interno della galassia ed intorno ad essa e garantiscono un'interazione continua tra la singola galassia e l'ambiente circostante. In particolare, gli *outflow* galattici sono estremamente importanti perché incentivano l'arricchimento chimico del mezzo inter-galattico: essi sono, infatti, in grado di espellere i metalli sintetizzati dalle stelle durante la loro evoluzione e di condurli dai luoghi della formazione stellare (all'interno della galassia) verso l'esterno.

Di fondamentale importanza è poi collegare le proprietà termodinamiche e chimiche locali del gas con la dinamica del gas, in modo da poter seguire e rintracciare i metalli durante tutta l'evoluzione della galassia. In quest'ottica, i metalli assumono il ruolo di traccianti dell'evoluzione galattica e della storia passata di *feedback* stellare. È come se fossero delle particelle di inchiostro che il moto del gas circostante sposta e deposita qua e là: l'abbondanza e la distribuzione dei vari elementi chimici consente di ricostruire ciò che è avvenuto in passato nell'ecosistema galassia. Il ruolo fondamentale degli *outflow* galattici è dunque intimamente connesso con quello della dinamica del gas: le simulazioni numeriche cosmologiche si rivelano pertanto strumenti d'indagine estremamente utili, in quanto includono un accurato trattamento della dinamica del gas.

\* In questo articolo l'Autrice presenta i contenuti essenziali delle ricerche svolte nel corso del Dottorato di Ricerca che gli hanno valso il "Premio Pietro Tacchini" della SAIt per l'anno 2019 – XIV edizione, consegnato durante il LXIII Congresso Nazionale della Società, tenutosi a Roma nel maggio dello stesso anno.

Per le nostre simulazioni numeriche cosmologiche abbiamo utilizzato una evoluzione di un codice numerico chiamato *GADGET*:<sup>1</sup> questo codice discretizza la materia oscura e quella barionica per mezzo di particelle. L'analisi delle proprietà di queste particelle, la cui evoluzione è dettata dalle leggi della gravità, dell'idrodinamica (per le particelle di gas), e dai processi fisici di cui nel codice si tiene conto, consente poi di ricostruire le proprietà della galassia che si simula e delle sue componenti.

Le condizioni iniziali (ovvero il punto di partenza delle nostre simulazioni cosmologiche) utilizzate per produrre i risultati presentati in questo articolo descrivono un alone la cui massa totale è circa mille miliardi di volte quella del Sole. Questa massa è comparabile con quella dell'alone della nostra Galassia. Ci si aspetta che questo alone ospiti al tempo attuale una galassia a disco, per via della sua massa e perché non ha avuto importanti episodi di interazione con altre galassie negli ultimi circa dieci miliardi di anni. L'effettiva storia di formazione della galassia in questo alone, la sua morfologia e le sue proprietà finali saranno poi stabilite dai processi fisici che vengono inseriti nel codice utilizzato per fare le simulazioni cosmologiche, e dal modo in cui essi sono implementati (ovvero, descritti numericamente).

## Gli *outflow* galattici

Gli *outflow* galattici sono promossi principalmente dal *feedback* stellare (ovvero dalle esplosioni di supernovae) e sono un elemento fondamentale per regolare la continua interazione tra le galassie e il mezzo gassoso che le circonda. Tuttavia, nonostante ci sia un consenso unanime sulla necessità del *feedback* stellare per promuovere la formazione di galassie a spirale che non siano eccessivamente concentrate al centro e che abbiano una componente di disco estesa, è ancora aperto il dibattito su quale sia il modo più convincente ed efficace per descrivere nei codici numerici l'iniezione di energia attraverso cui il *feedback* stellare si sviluppa. Infatti, nelle simulazioni numeriche cosmologiche è necessario semplificare la descrizione fisica dei processi che realmente avvengono nelle galassie. Inoltre, dal momento che molti fenomeni quali il *feedback* stellare coinvolgono scale fisiche molto diverse tra loro, è necessario descrivere efficacemente i processi che si sviluppano su scale non risolte (ad esempio lo spazio che circonda una singola stella ha dimensione inferiore alla risoluzione di una tipica simulazione cosmologica, che dunque non è in grado di risolverlo e di catturarne in dettaglio la fisica), ma che hanno poi ripercussioni su scale che la simulazione numerica effettivamente risolve.

<sup>1</sup> V. SPRINGEL, *The cosmological simulation code GADGET-2*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 364 (4), 2005, pp. 1105-1134.

Al fine di apportare un contributo significativo a questo dibattito, abbiamo portato avanti uno studio comparativo degli effetti che diversi modelli di *feedback* stellare e di *outflow* galattici hanno sulla formazione delle galassie a disco. Abbiamo dunque eseguito un insieme di simulazioni numeriche cosmologiche di galassie a disco e in ciascuna simulazione abbiamo implementato un diverso modello di *feedback* stellare. Tra i diversi modelli, alcuni dei quali vengono attualmente utilizzati da diversi gruppi di scienziati per i loro studi numerici, cambia il modo in cui l'energia derivante dall'esplosione delle supernovae viene immessa e distribuita nel mezzo interstellare. La novità di questo lavoro risiede soprattutto nel fatto di aver implementato accuratamente, con notevole sforzo numerico, diversi modelli di *feedback* stellare all'interno di un unico modello di formazione delle galassie. In questo modo è stato possibile isolare e quantificare l'impatto del solo *feedback* stellare sui risultati finali, mentre tutte le altre prescrizioni numeriche che riguardano l'idrodinamica o processi come il raffreddamento del gas e la formazione stellare vengono mantenuti inalterati. Con questo lavoro abbiamo dimostrato quanto le proprietà delle galassie simulate (quali ad esempio la loro morfologia e la massa in stelle) sono estremamente sensibili ai dettagli del *feedback* stellare e al modo in cui questo promuove gli *outflow* galattici.

I risultati ottenuti (FIG. 1) mostrano che le prescrizioni numeriche adottate per descrivere il *feedback* stellare e generare gli *outflow* galattici sono il fattore che più di tutti determina la morfologia della galassia e l'estensione del suo disco stellare. In questo studio abbiamo evidenziato che gli *outflow* galattici regolano la tempistica con cui il gas viene accresciuto dalla galassia in formazione: essi promuovono o ostacolano l'accrescimento di gas dalla struttura a grande scala dell'universo che circonda le galassie in formazione e che continuamente le rifornisce di gas da poter essere inglobato nel loro alone. In questo modo, gli *outflow* galattici controllano anche la storia di formazione stellare della galassia.

Inoltre, mettendo a confronto le proprietà delle galassie simulate con diversi modelli di *feedback*, abbiamo dimostrato che un modello di *feedback* e di *outflow* galattici che riesca a condurre alla formazione di una galassia a spirale con una componente di disco estesa deve avere le seguenti caratteristiche: deve essere in grado di regolare la formazione stellare nei primi miliardi di anni (è infatti in questo lasso di tempo che si forma la parte sferoidale centrale e più concentrata delle galassie a disco, chiamata *bulge*) e, allo stesso tempo, deve riuscire a prevenire un'acquisizione di gas in tempi recenti. Una tale acquisizione di gas produrrebbe infatti una formazione stellare sostenuta e in disaccordo con quanto le osservazioni evidenziano per le galassie a disco nell'universo odierno. La ragione per cui gli *outflow* galattici riescono o meno a soddisfare questi requi-

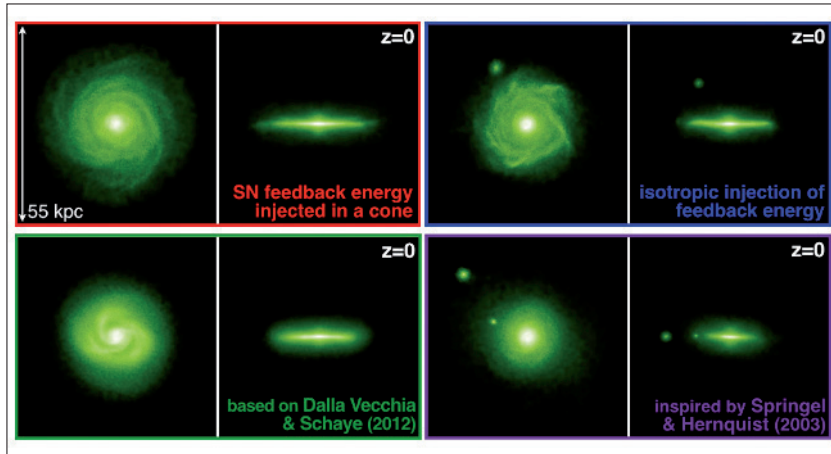


FIG. 1. Le prescrizioni numeriche adottate per descrivere il *feedback* stellare e generare gli *outflow* galattici determinano la morfologia delle galassie a disco simulate. La figura mostra mappe di densità stellare proiettata per una galassia simulata, ogni volta assumendo ed implementando nel codice un diverso modello di *feedback* stellare. Le mappe sono mostrate al tempo attuale e la dimensione di ogni figura è di 55 mila parsec. Il testo riportato nelle figure individua tecnicamente il modello di *feedback* utilizzato, facendo riferimento alla letteratura scientifica.

siti risiede proprio nella loro abilità di determinare il moto e la circolazione del gas nelle galassie e attorno ad esse.

### La distribuzione dei metalli e l'evoluzione chimica delle galassie a disco

Un aspetto fondamentale delle galassie riguarda la loro evoluzione chimica. Possiamo pensare ai metalli come al corredo genetico di una galassia: la composizione chimica del gas e delle stelle in una galassia è ciò che distingue una galassia da un'altra. Inoltre, la composizione chimica attuale della galassia e la distribuzione che i metalli assumono al suo interno rispecchiano il modo in cui la galassia è arrivata fino a quel punto della sua evoluzione. Ciò vuol dire che, se la galassia avesse avuto una vita diversa (ad esempio se avesse ricevuto più gas dal mezzo gassoso distante o se avesse avuto più interazioni con altre galassie) o se i processi fisici che regolano la sua esistenza avvenissero in modo diverso, la quantità e la distribuzione di elementi chimici al suo interno (ovvero, la sua carta d'identità) sarebbero altri.

Le nostre simulazioni numeriche cosmologiche includono un accurato modello di evoluzione chimica: i risultati delle simulazioni possono dunque essere confrontati con le osservazioni della distribuzione dei metalli nel gas e nelle stelle di galassie simili a quelle che simuliamo, al fine di validare le varie componenti del nostro modello e di interpretare i dati osservativi.

Uno dei tasselli di ogni modello di evoluzione chimica è costituito dalla funzione stellare di massa iniziale. Questa funzione descrive la probabilità che le stelle nascano con una certa massa dalla nube di gas da cui vengono originate. Se esportassimo que-

sto concetto in un contesto a noi più familiare, potremmo pensare di fotografare una classe di alunni: una simile funzione ci quantificherebbe la probabilità di osservare persone di data altezza o di dato indice di massa corporea. Ovviamente, se scattassimo una fotografia di classe ad allievi svedesi o tutsi (i Vatussi, per intenderci!) e una a studenti cinesi o guatemaltechi, la suddetta funzione sarebbe diversa nei vari casi. In modo del tutto analogo, sono state derivate diverse funzioni stellari di massa iniziale per le stelle, principalmente a seconda della regione di cielo osservata o delle proprietà della galassia ospite. Ciascun modello di evoluzione chimica assume una funzione stellare di massa iniziale.

Abbiamo perciò deciso di esplorare quanto i risultati delle simulazioni siano sensibili alla funzione di massa iniziale assunta, e se le osservazioni disponibili per il gas e le stelle nella nostra Galassia consentano di supportare o scartare una determinata funzione di massa iniziale. Queste funzioni di massa iniziale sono estremamente importanti nel decretare la quantità finale di metalli in una galassia: infatti, la teoria dell'evoluzione stellare prevede che stelle di massa diversa evolvano e muoiano in modo diverso e su tempi scala differenti. Di conseguenza, assumere una funzione di massa iniziale o un'altra sancirà il numero di stelle che evolveranno in modo tranquillo immettendo nel mezzo interstellare un determinato tipo di metalli, il numero di stelle che terminerà la loro vita in modo violento esplodendo come supernovae ed inquinando il mezzo gassoso con elementi chimici diversi a seconda del tipo di supernova, nonché le tempistiche sulle quali il processo di evoluzione chimica si svilupperà.

Abbiamo dunque eseguito una serie di simulazioni numeriche cosmologiche di galassie a disco, assumendo diverse funzioni stellari di massa iniziale. Abbiamo quindi quantificato quanto la scelta di questa funzione incida sui risultati finali, confrontando le predizioni delle nostre simulazioni con le osservazioni. Abbiamo trovato che per riprodurre la quantità di metalli osservata in un campione di galassie a disco nell'universo locale è opportuno assumere una funzione stellare di massa iniziale che prevede un numero minore (rispetto al consueto) di stelle massicce; il confronto dei risultati delle simulazioni con le osservazioni di stelle che si trovano nella nostra Galassia supporta invece l'assunzione di una funzione di massa iniziale con un più alto numero di stelle massicce. Una possibile interpretazione di questo risultato è che le stelle della Via Lattea hanno un contenuto in metalli più alto rispetto ad altre galassie vicine, plausibilmente perché han-



no avuto un diverso scenario evolutivo. Questa interpretazione è valida a meno che non si assuma che le incertezze osservative dei dati a nostra disposizione siano alte al punto da inficiare le conclusioni tratte. Sicuramente, la futura disponibilità di nuovi dati ed una più accurata calibrazione delle proprietà delle stelle osservate consentirà di trarre conclusioni più solide.

Altri risultati di questo studio hanno contribuito a corroborare la solidità dei modelli numerici che utilizziamo nelle nostre simulazioni: un esempio tra tutti riguarda l'ottimo accordo con le osservazioni della pendenza dei profili di metallicità. L'accordo tra la pendenza dei profili teorici ed osservati, in questo caso, testimonia come il processo di arricchimento chimico coinvolga consistentemente regioni della galassia a diversa distanza dal centro. Inoltre, questo accordo con le osservazioni indica anche quanto gli *outflow* galattici implementati nel nostro codice, che nel loro moto coinvolgono i metalli presenti nel mezzo interstellare, siano in grado di far circolare correttamente gli elementi chimici all'interno della galassia simulata.

## I diagrammi colore-magnitudine nelle simulazioni numeriche cosmologiche

Un aspetto molto importante quando si analizzano e si interpretano i risultati di una simulazione numerica cosmologica è il confronto delle predizioni ottenute con le osservazioni. I dati osservativi mostrano infatti le proprietà effettive del gas, delle stelle e delle galassie nel nostro universo: confrontare i risultati delle simulazioni con le osservazioni è di fondamentale importanza per verificare la descrizione dei processi fisici implementati nei codici numerici, ma anche per interpretare i dati osservativi raccolti. A tal fine, è cruciale confrontare le predizioni delle simulazioni con le osservazioni in un modo il più accurato possibile. Infatti, quando si descrivono i processi dal punto di vista numerico, è necessario fare delle assunzioni e delle semplificazioni: di ciò bisogna tener poi conto quando si interpretano i risultati. Inoltre, la descrizione numerica di sistemi e corpi astrofisici, quali ad esempio il gas interstellare o le stelle in una galassia, si basa spesso su tecniche di discretizzazione: nel codice utilizzato per produrre i risultati illustrati in questo articolo, la materia barionica (così come la materia oscura) è descritta attraverso particelle. Ciò vuol dire, ad esempio, che la struttura stellare delle galassie che simuliamo è prodotta dalla distribuzione di un certo numero di particelle stellari che, disponendosi in un determinato modo, campionano e definiscono la morfologia della galassia. La dimensione di queste particelle stellari (che hanno dunque una certa massa) è determinata dalla risoluzione della simulazione. Nelle nostre simulazioni, le particelle stellari hanno una massa di circa 100.000 volte quella del Sole. Nelle simulazioni numeriche

cosmologiche che rappresentano lo stato dell'arte nel panorama attuale dell'astrofisica numerica, le particelle stellari hanno una massa compresa tra 1000 volte e 100 milioni di volte quella del Sole, a seconda della loro risoluzione.

Da questo limite numerico (fare simulazioni a risoluzione più alta – e dunque con una massa delle particelle inferiore – richiederebbe risorse computazionali di gran lunga maggiori e tempi molto più lunghi) deriva la rappresentazione delle particelle stellari nelle simulazioni attraverso popolazioni stellari. Ciò vuol dire che nelle simulazioni numeriche cosmologiche una particella stellare non rappresenta una singola stella, bensì essa campiona una popolazione semplice, ovvero un insieme di stelle quasi coeve che condividono lo stesso contenuto metallico iniziale. D'altra parte, le osservazioni di stelle nella nostra Galassia e nelle galassie circostanti ci forniscono proprietà di stelle singole. Di questa discrepanza non si può non tener conto quando si confrontano le predizioni delle simulazioni numeriche con i dati osservativi.

Nel riportare i risultati delle simulazioni numeriche cosmologiche alle osservazioni per quanto concerne il contenuto metallico delle stelle, l'approccio finora adottato consiste nell'assumere che la metallicità di una particella stellare rappresenti statisticamente il contenuto metallico medio della popolazione stellare che la particella campiona. Con lo scopo di apportare un contributo in questo filone e di confrontare in modo più accurato le predizioni delle simulazioni con le osservazioni, abbiamo sviluppato una nuova metodologia che connetta direttamente le particelle stellari nelle simulazioni con le stelle osservate. La tecnica sviluppata consiste nel popolare le particelle stellari con stelle sintetiche o simulate, partendo dalle proprietà che le particelle stellari hanno consistentemente ereditato dalla simulazione numerica cosmologica. Le proprietà delle particelle stellari quali massa, posizione, età e metallicità vengono fornite ad un codice di sintesi di popolazioni stellari chiamato *TRILEGAL*.<sup>2</sup> Questo codice dispone di una libreria di tracce di evoluzione stellare e di spettri sintetici e, assumendo una funzione di massa iniziale per le stelle, genera un catalogo di stelle simulate. Sostanzialmente, è come se questo codice generasse un insieme di stelle figlie di una particella stellare madre: ad ogni particella stellare madre verranno attribuite le sue stelle figlie, che dalla madre hanno ereditato le sue caratteristiche. Le stelle sintetiche generate hanno una massa tipica delle stelle osservate; inoltre, grazie alla libreria di spettri di cui il codice dispone, *TRILEGAL* produce le proprietà fotometriche delle stelle generate (ciò vuol dire che delle stelle simulate noi sappiamo anche come ci apparirebbero se le osservassimo con gli strumenti con cui osserviamo le stelle in cielo e nella

<sup>2</sup> L. GIRARDI, M.A.T. GROENEWEGEN, E. HATZIMINAOGLOU, L. DA COSTA, *Star counts in the Galaxy*, «Astronomy & Astrophysics», 436 (3), 2005, pp. 895-915.

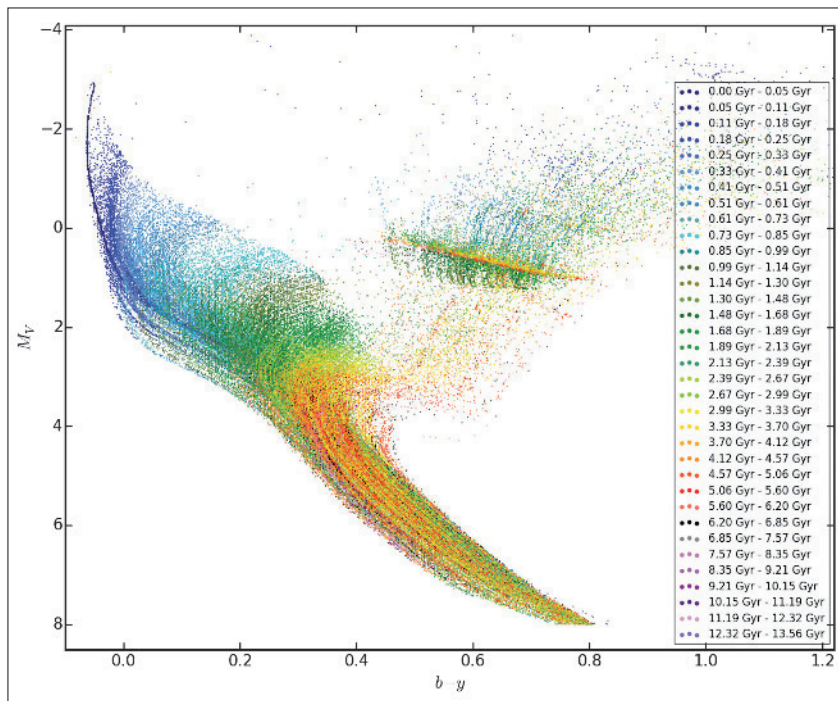


FIG. 2. Diagramma colore-magnitudine ottenuto a partire da una simulazione numerica cosmologica. La figura mostra il diagramma colore-magnitudine assoluta (ovvero, considerando che tutte le stelle siano poste alla stessa distanza dall'osservatore) del catalogo di stelle che rappresentano il contenuto stellare osservabile di un volume di una galassia simulata assimilabile ai dintorni del Sole. Le particelle stellari nella simulazione numerica cosmologica e le stelle sintetiche generate sono state selezionate in modo da riprodurre i vincoli di una campagna osservativa con i cui dati volevamo confrontare i nostri risultati. Le stelle sono colorate a seconda della loro età, espressa in miliardi di anni, come descritto nella legenda.

nostra Galassia). Utilizzando questo approccio originale, abbiamo così prodotto un catalogo di stelle simulate a partire dalle proprietà delle particelle stellari presenti nella simulazione numerica cosmologica. Con questa nuova tecnica, abbiamo introdotto un metodo per confrontare nel modo più accurato possibile il risultato delle simulazioni numeriche cosmologiche con le osservazioni: partendo dunque dalle particelle stellari che rappresentano una popolazione di stelle come un unico insieme nelle simulazioni, siamo arrivati a produrre un catalogo di stelle singole che dalle particelle stellari deriva. Questo catalogo di stelle è ciò che andremo a confrontare con le osservazioni perché il confronto sia il più accurato e corretto possibile.

Come possibile applicazione di questa nuova tecnica sviluppata, abbiamo simulato il contenuto stellare visibile di una regione che può essere considerata analoga alle vicinanze del Sole. I dintorni del Sole sono infatti la regione nella nostra Galassia in cui lo studio delle proprietà chimiche e cinematiche delle singole stelle può essere condotto in modo più semplice ed accurato. Obiettivo del nostro progetto è la realizzazione di un diagramma colore-magnitudine delle stelle simulate: questo diagramma rappresenta il piano osservativo dove le stelle si collocano a seconda della loro magnitudine apparente (collegata alla luminosità della stella e dipendente dalla distanza della stella dall'osservatore) e della loro temperatura superficiale. Questa

temperatura superficiale è espressa come differenza tra magnitudini ottenute utilizzando due diversi filtri osservativi: a questa differenza ci si riferisce come colore.

Abbiamo pertanto realizzato una simulazione numerica cosmologica, individuato le particelle stellari che si trovano in una sfera centrata sul piano galattico e distante dal centro della galassia quanto il nostro Sole dal centro della Via Lattea, e analizzato le proprietà di queste particelle stellari. Nel definire la procedura di selezione delle particelle, abbiamo fatto in modo che i nostri criteri rispecchiassero le caratteristiche tecniche di una *survey* (i.e. una campagna osservativa) che ha recentemente osservato migliaia di stelle nei dintorni del Sole: vogliamo infatti poi confrontare i nostri risultati con i dati provenienti da questa *survey*. Dunque, abbiamo fornito le proprietà delle particelle stellari al codice TRILEGAL, che ha generato stelle simulate con proprietà fisiche e fotometriche in accordo con le caratteristiche delle particelle stellari progenitrici e

con la loro posizione. Abbiamo così realizzato un catalogo di stelle sintetiche, le cui proprietà possono essere comparate in modo accurato e corretto con le osservazioni. Abbiamo perciò realizzato un diagramma colore-magnitudine (FIG. 2) a partire da una simulazione numerica cosmologica. Questo diagramma rappresenta il contenuto stellare visibile di una regione simulata assimilabile ai dintorni solari. Inoltre, analizzando le proprietà delle stelle sintetiche generate con la nostra nuova tecnica, abbiamo trovato un ottimo accordo con le osservazioni per quel che riguarda l'età, la metallicità, le masse delle stelle e le relazioni esistenti tra le suddette proprietà.

Questa nuova metodologia che abbiamo sviluppato sarà sicuramente molto utile per confrontare i risultati delle simulazioni numeriche cosmologiche per quanto concerne la componente stellare delle strutture simulate con i dati delle campagne osservative che stanno scandagliando il cielo della nostra Galassia (ad esempio GAIA) o che sono in programma nel futuro prossimo.

### Il feedback da nucleo galattico attivo

Gli *outflow* galattici sono principalmente promossi dal *feedback* stellare, come discusso nelle precedenti sezioni. A promuovere questi *outflow* contribuisce inoltre l'attività del nucleo galattico, che ospita un

buco nero super-massiccio: il buco nero, infatti, accresce gas dalle regioni circostanti e poi converte l'energia gravitazionale accumulata dal gas accresciuto in energia di *feedback*, ovvero principalmente energia termica e cinetica che viene rilasciata nel mezzo interstellare della galassia. I nuclei galattici attivi rivestono un ruolo fondamentale nella formazione delle strutture cosmiche: nonostante i buchi neri super-massicci siano confinati nella regione centrale della galassia (ordine di grandezza del parsec), con la loro attività riescono a regolare la formazione e l'evoluzione delle galassie che li ospitano ed i loro effetti sono visibili anche a grandi distanze (decine di migliaia di parsec) dal nucleo.

Al fine di studiare in dettaglio il processo di rilascio di energia da parte dei buchi neri super-massicci e di quantificare il loro contributo alla formazione degli *outflow* galattici, abbiamo implementato un nuovo modello di formazione ed evoluzione di buchi neri super-massicci e di *feedback* da nucleo galattico attivo nel codice utilizzato per le simulazioni numeriche cosmologiche, codice che fino a quel momento ne era sprovvisto. Uno sforzo numerico importante è stato richiesto dalla descrizione numerica accurata del modo in cui l'energia di *feedback* viene distribuita nel mezzo interstellare ed accoppiata alle sue diverse componenti. Il mezzo interstellare è infatti multi-fase e porzioni di gas freddo e denso coesistono con regioni di gas più caldo e diffuso (generalmente in equilibrio di pressione). Tra i risultati principali di questo progetto abbiamo trovato che, perché il buco nero super-massiccio al centro cresca nel tempo fino a raggiungere una massa che ad oggi sia in accordo con le osservazioni di buchi neri super-massicci in galassie simili a quelle simulate, almeno una frazione di energia rilasciata dal buco nero deve essere accoppiata alla componente calda e diffusa del mezzo interstellare. Questa condizione è necessaria affinché il buco nero al centro della galassia a disco simulata raggiunga una massa dell'ordine di qualche milione di volte quella del Sole, senza diventare eccessivamente massiccio per la galassia in cui si trova.

Abbiamo inoltre studiato l'impatto che il *feedback* da nucleo galattico attivo ha sui profili di metallicità del gas in una galassia a disco nell'universo locale. Abbiamo evidenziato come l'inclusione del *feedback* da buco nero super-massiccio non cambi in modo significativo né la pendenza, né la normalizzazione dei profili di metallicità. Di conseguenza, abbiamo potuto concludere che l'energia immessa dai buchi neri super-massicci e gli *outflow* galattici che essi promuovono non influenzano o alterano sensibilmente la circolazione di metalli all'interno delle galassie a spirale.

## In sintesi e in prospettiva

I processi di *feedback* sono il motivo conduttore dei risultati presentati in questo articolo. Processi di *fe-*

*edback* che scaturiscono dall'evoluzione delle stelle e dei buchi neri super-massicci e che hanno importanti ripercussioni sul contenuto energetico e metallico delle strutture cosmiche. L'idea principale dietro questo argomento è che i vari processi che regolano la formazione e l'evoluzione delle galassie non sono soltanto importanti di per sé. Essi sono altresì fondamentali per ciò che causano e determinano nel sistema in cui avvengono, su tempi scala medio-lunghi.

Declinando questa importanza in un contesto a noi più familiare, potremmo pensare ad un bambino che mangia una barretta di cioccolato. Il fulcro dell'attenzione non può essere soltanto il processo dell'introduzione di una certa quantità di cibo nel corpo. Altrettanto importanti sono le condizioni che hanno determinato il bisogno di cibo, il modo in cui il cibo è stato recuperato e mangiato, ciò che ha poi prodotto nel singolo bambino e nel contesto sociale in cui è inserito. Nell'ecosistema galassia, si avranno conseguenze diverse se un buco nero accresce gas caldo o freddo, se accresce in modo continuo oppure mediante episodi intermittenti, se accresce fino ad un livello di saturazione o se l'accrescimento di gas si auto-regola, con il buco nero che in qualche modo reagisce a seconda delle condizioni della galassia in cui vive. Alla stregua di un buco nero, possiamo tornare a pensare al suddetto bambino: per la sua crescita mangiare una barretta di cioccolato non è equivalente ad un piatto di minestrone né l'introduzione di un numero determinato di pasti produce le stesse conseguenze dell'assunzione continua di spuntini; inoltre, una scorpiata incontrollata di cioccolato non sortirà gli stessi effetti prodotti da un'assunzione moderata e consapevole.

I processi di *feedback* sono dunque cruciali nella formazione ed evoluzione delle galassie, in quanto promuovono o ostacolano fenomeni che determinano le proprietà attuali delle galassie. Gli *outflow* galattici costituiscono uno dei suddetti fenomeni e rappresentano il meccanismo principale attraverso cui i processi di *feedback* si propagano all'interno delle galassie ed intorno ad esse. Come evidenziato in questo articolo, gli *outflow* giocano un ruolo primario nel plasmare la formazione delle galassie a disco e nel determinarne l'evoluzione. Questi *outflow* galattici, promossi dall'attività congiunta del *feedback* stellare e dei nuclei galattici attivi, garantiscono un'interazione continua della galassia con il mezzo gassoso che la circonda e sono responsabili di stabilire le proprietà della galassia. Quanto il loro ruolo sia fondamentale è evidente durante tutto il processo dell'evoluzione della galassia. Infatti, essi determinano la riserva di gas disponibile per la formazione stellare, regolano l'accrescimento di gas povero di metalli dalla struttura a grande scala dell'universo e, al contempo, conducono il gas arricchito di metalli lontano dai siti in cui la formazione stellare è avvenuta. Inoltre, gli *outflow* galattici governano la dinamica del gas, controllano come il gas espulso

dalle supernovae ricade sulla galassia in formazione e come esso circola all'interno della galassia stessa. Ciò ha ripercussioni sia sull'estensione del disco galattico gassoso e stellare, sia sulla pendenza dei profili di metallicità. Inoltre, il gas che fuoriesce dalle regioni più centrali della galassia ha un impatto cruciale sull'attività del nucleo galattico, poiché è intimamente connesso con la quantità di gas disponibile per alimentare il buco nero super-massiccio centrale e dunque con il *feedback* di quest'ultimo. L'accurata implementazione di questa complessa circolazione di barioni in un modo auto-regolato nelle simulazioni numeriche cosmologiche è impegnativa, ma estremamente stimolante.

Al fine di quantificare l'impatto dei processi astrofisici appena descritti, è di vitale importanza il modo in cui essi sono numericamente modellati. La descrizione fisica e numerica dei meccanismi che innescano i processi di *feedback* (come ad esempio le esplosioni di supernovae e l'accrescimento di gas sul buco nero super-massiccio) è cruciale per studiare i processi di *feedback* stessi e il modo in cui essi si ripercuotono sull'evoluzione della galassia. È in questo contesto che si può apprezzare quanto fondamentali siano le simulazioni numeriche cosmologiche: esse consentono di esplorare i diversi scenari possibili e di limitare e restringere la nostra ignoranza su quei dettagli e fenomeni di cui ancora non possediamo una piena comprensione fisica. Lo sforzo numerico è pertanto essenziale per fare passi in avanti.

La scala galattica studiata in questo articolo rappresenta un contesto importante ed un laboratorio unico per comprendere le scale più grandi: lo studio di come i buchi neri super-massicci accrescono gas e depositano energia nel mezzo interstellare, qui incentrato sulle galassie a disco, può essere infatti trasposto ed applicato proficuamente in simulazioni di galassie ellittiche, gruppi ed ammassi di galassie. È così possibile studiare come il *feedback* da nucleo galattico attivo si ripercuote sulla formazione e l'evoluzione di sistemi caratterizzati da buchi neri con

una massa di due o tre ordini di grandezza maggiore e che accrescono con tassi di accrescimento più sostenuti.

Una naturale estensione di questo studio è rappresentata dalla simulazione di volumi cosmologici, dove ci sono un numero di galassie grande abbastanza da consentire di studiarne le proprietà in modo statistico. Allo stesso tempo, un'altra interessante direzione di studio è rappresentata dall'aumento di risoluzione in simulazioni di galassie singole: questo passo in avanti è infatti necessario per capire se e quali ulteriori processi fisici devono essere considerati per la descrizione della formazione delle galassie; al contempo, ciò consentirebbe anche una più accurata e corretta implementazione dei fenomeni già inclusi nelle simulazioni.

La disponibilità di nuovi dati osservativi sicuramente contribuirà a validare i risultati delle simulazioni numeriche per quel che riguarda la distribuzione dei metalli e l'abbondanza dei vari elementi nel mezzo interstellare. Un'altra interessante prospettiva di studio è rappresentata dal confronto tra le predizioni delle simulazioni numeriche e le osservazioni dell'universo lontano (o giovane, cioè ad alto *redshift*), così da poter testare gli scenari evolutivi emergenti dalle simulazioni e poter meglio vincolare processi come la crescita dei buchi neri super-massicci attraverso il tempo cosmico. Dal momento che nuovi strumenti osservativi saranno operativi in un futuro prossimo (e.g. il telescopio spaziale James Webb, JWST, e il telescopio europeo E-ELT) e consentiranno di sondare l'universo ad alto *redshift*, è estremamente importante avere a disposizione codici numerici il più completi possibili, per quel che riguarda la presenza di processi fisici in essi implementati, e che siano molto efficienti dal punto di vista computazionale. In questo modo si potranno portare a termine simulazioni numeriche in grado di gettare nuova luce su ciò che guida la formazione delle prime strutture cosmiche e ne determina la successiva evoluzione.

---

**Milena Valentini** è originaria di L'Aquila. Durante gli studi al Liceo Classico vince una selezione per prendere parte a una scuola estiva di Fisica all'Università di Princeton, negli Stati Uniti. Dopo la maturità classica, ha ottenuto la Laurea Triennale in Fisica all'Università di L'Aquila. Ha poi conseguito la Laurea Magistrale in Astrofisica e Cosmologia, con lode, all'Università di Bologna e quindi il dottorato di ricerca in Astrofisica, con lode, alla Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati di Trieste. È assegnista di ricerca alla Scuola Normale Superiore di Pisa e dalla fine del 2019 proseguirà la sua ricerca all'Università Ludwig Maximilian di Monaco, in Germania. Si occupa di formazione ed evoluzione di galassie e buchi neri con simulazioni numeriche cosmologiche.

# Tra le pieghe della Galassia★

Eloisa Poggio

INAF · Osservatorio Astrofisico di Torino

SE osserviamo il cielo in una notte limpida, riusciamo a distinguere ad occhio nudo una tenue striscia biancastra che attraversa la volta celeste: si tratta della nostra Galassia, nota anche come “Via Lattea”. Osservandola con un telescopio, notiamo che questa striscia biancastra è in realtà formata da miliardi di singole stelle. Ciascuna di esse, proprio come il nostro Sole, ha delle caratteristiche specifiche, tra cui, per esempio, la posizione nel cielo, la luminosità intrinseca, la temperatura, la metallicità e la velocità con cui si sta muovendo. Tutte queste informazioni sono fondamentali per determinare la struttura attuale della nostra Galassia, la sua origine e la sua evoluzione.

Oggi sappiamo che la Via Lattea non è che una delle molte galassie presenti nell’universo. Molte delle altre galassie, note come galassie esterne, presentano caratteristiche simili alla nostra, come la struttura a spirale presente nel disco, oppure la barra centrale. Tuttavia, la nostra Galassia è l’unica che possiamo esplorare in grande dettaglio, e lo studio delle singole stelle permette di raggiungere informazioni chiave sui processi che avvengono al suo interno. La possibilità di studiare queste strutture in dettaglio offre una chiave di interpretazione anche per le galassie esterne, rendendo la nostra Galassia una vera e propria “stele di Rosetta” per lo studio delle galassie in generale.

## La rivoluzione di Gaia

La storia evolutiva della nostra Galassia è fortemente legata all’attuale distribuzione spaziale delle stelle che la compongono, nonché alle loro velocità. Per questo motivo, la recente pubblicazione dei dati di *Gaia* (*Gaia Data Release 2*, *Gaia DR2*, avvenuta il 25 Aprile 2018) ha segnato una vera e propria rivoluzione nel campo dello studio della Galassia, fornendo una mole senza precedenti di dati ad altissima precisione.

\* In questo articolo, l’Autrice presenta i contenuti essenziali delle ricerche che le hanno valso il “Premio Giuseppe Lorenzoni” per l’anno 2019-III edizione, consegnato durante il LXIII Congresso Nazionale della SAIt, tenutosi a Roma nel maggio dello stesso anno. 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 di non più di 37 anni, pubblicato nel triennio precedente.

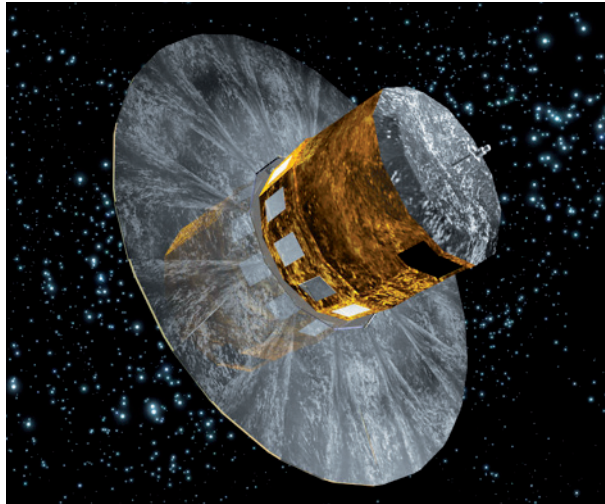


FIG. 1. Il satellite *Gaia* dell’Agenzia Spaziale Europea in un’elaborazione artistica.

Per oltre 1,3 miliardi di stelle, il satellite *Gaia* (FIG. 1) ha misurato le posizioni sulla volta celeste e i movimenti su di essa, raggiungendo anche stelle molto deboli (fino alla ventunesima magnitudine nella banda G). Inoltre, *Gaia* ha fornito le velocità radiali (che consentono di capire se e quanto una stella si sta avvicinando o allontanando da noi) per oltre 7 milioni di stelle. Queste informazioni, combinate insieme, permettono di avere una completa caratterizzazione delle stelle osservate: le loro posizioni e le loro velocità tridimensionali. *Gaia* quindi ha permesso di creare delle mappe (non solo spaziali, ma anche di velocità) della nostra Galassia raggiungendo distanze fino ad allora inesplorate. Pertanto, i dati di *Gaia* hanno permesso di osservare la nostra Galassia con una “lente di ingrandimento” molto potente, portando alla luce una grande quantità di informazioni di cui, fino ad ora, eravamo all’oscuro.

Per una descrizione più approfondita del satellite *Gaia*, della sua missione e delle principali scoperte avvenute fino ad adesso, si rimanda il lettore alla referenza n. 1.

## Imparando dalle galassie esterne

L’essere immersi all’interno del disco Galattico<sup>1</sup> comporta, come discusso in precedenza, una note-

<sup>1</sup> NdR: l’aggettivo “galattico” è qui sempre utilizzato con l’iniziale maiuscola per evidenziare il riferimento alla nostra Galassia e non ad una generica galassia.

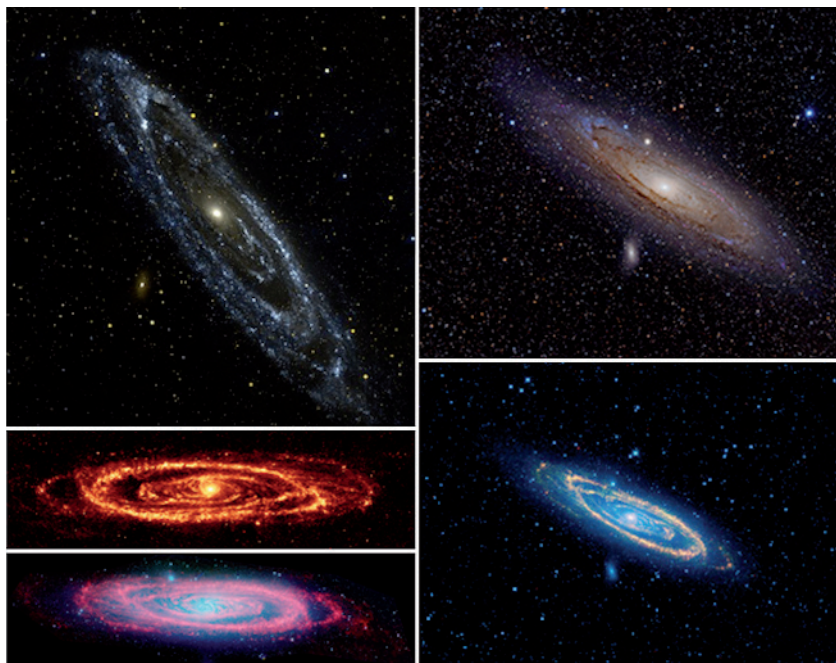


FIG. 2. Diverse immagini della galassia di Andromeda (M31) in diverse bande elettromagnetiche: ultravioletto (in alto a sinistra), visuale (in alto a destra) e diverse bande infrarosse (in basso a sinistra e a destra). (Crediti: G. Ghisellini)

vole quantità di vantaggi, principalmente legati alla possibilità di studiare la Galassia sulla base delle singole stelle che la compongono. Questi vantaggi si accompagnano, tuttavia, ad una serie di problematiche.

Per esempio, ricostruire la struttura della nostra Galassia è tutt'altro che banale. La nostra prospettiva, infatti, non permette di avere una visione globale della Galassia, cosa che invece avviene per le galassie esterne. Se, per esempio, guardiamo una fotografia della nostra "vicina di casa", la galassia di Andromeda, nota anche come M31 (FIG. 2, in alto a destra), ci rendiamo subito conto di come è strutturata nella sua interezza. Notiamo subito che ha una zona centrale, di colore giallastro, e una regione esterna, di colore blu. Come vedremo in seguito, la regione giallastra contraddistingue zone antiche, che contengono stelle molto vecchie e relativamente "fredde", mentre le regioni blu sono zone di formazione stellare, con stelle molto giovani, massicce e calde. Queste regioni di formazione stellare sono associate ai bracci a spirale/strutture ad anello, che sono chiaramente visibili se guardiamo la stessa Galassia in altre bande elettromagnetiche (FIG. 2). In un colpo d'occhio, riusciamo ad avere una visione globale della Galassia, e a catturarne le strutture salienti.

Non riusciremo mai a fare alla nostra Galassia una fotografia simile: essendo immersi al suo interno, possiamo soltanto basarci su ricostruzioni, a loro volta basate sulle posizioni delle singole stelle che riusciamo a vedere. A complicare ulteriormente la questione, le polveri interstellari (soprattutto nella banda visibile) attenuano la luminosità delle stelle, oscurando alcune zone (soprattutto nelle regioni

centrali della Galassia). Queste complicazioni fanno sì che si arrivi a una situazione paradossale, in cui la struttura della nostra Galassia – la nostra casa, molto più vicina rispetto alle altre galassie – si conosca molto poco. Al punto che, per esempio, non si sappia con esattezza il numero dei bracci a spirale nella nostra Galassia, o la lunghezza della barra centrale. Per analogia, possiamo pensare a una persona che si guarda intorno: riuscirà a vedere bene le persone vicino a lui, ma non potrà (immaginando che non esistano specchi) guardare direttamente il proprio volto, oppure vedere l'interezza del proprio corpo (per esempio la schiena). Dal momento che non possiamo costruire degli specchi di dimensioni galattiche, dovremo accontentarci di ricostruire la Galassia sulla base delle posizioni delle singole stelle osservate.

## Anatomia della Via Lattea

La Galassia è tipicamente suddivisa in tre componenti principali, che presentano caratteristiche spaziali, cinematiche e chimiche differenti e che presumibilmente nacquero in momenti diversi del processo di formazione Galattico: il *bulge*, il disco e l'alone. Le caratteristiche salienti di queste tre componenti sono discusse nel seguito. Si rimanda alla referenza n. 2 per una discussione dettagliata sugli attuali modelli di formazione ed evoluzione delle componenti Galattiche.

### Il bulge

Il *bulge*, detto anche bulbo Galattico, è la zona centrale della Galassia, ed è visibile in FIG. 3 come un rigonfiamento centrale di colore giallo. Il *bulge* contiene circa un quarto della massa della Galassia, e occupa circa 500-600 gradi quadrati in cielo.

Numerose galassie a disco presentano un *bulge* al loro centro; tuttavia, queste strutture sono eterogenee in luminosità, metallicità ed estensione spaziale, suggerendo una natura di origine complessa, non ancora del tutto compresa. Per molti anni, il *bulge* Galattico è stato classificato come "*bulge classico*", ovvero uno sferoide centrale, relitto delle interazioni mareali avvenute durante la formazione della Galassia. Questo scenario è stato supportato per lungo tempo da evidenze osservative, come per esempio il fatto che contenesse stelle molto vecchie. Negli anni Novanta è stato però scoperto che il *bulge* Galattico contiene una struttura a barra, visibile sia nei conteggi di stelle, sia nella cinematica del gas.

Secondo la maggior parte degli autori, la barra si estende per 2-3 kpc (1 kiloparsec, abbreviato kpc, equivale a 30.000.000.000.000.000 metri) dal centro Galattico, e il suo asse maggiore è inclinato rispetto al Sole di un angolo compreso tra i 20 e i 30 gradi nel piano Galattico. La parte centrale contiene un buco nero super massiccio (di massa pari a 4 milioni di volte la massa del Sole), chiamato Sagittarius A\* o Sgr A\*, che viene considerato il centro della Galassia.

### Il disco

La maggior parte delle stelle della nostra Galassia sono contenute nel disco galattico, che si estende per circa 20 kpc dal centro Galattico (corrispondenti a circa 60.000 anni luce, ovvero 60.000 ly, vedi FIG. 3). Il Sistema solare si trova immerso nel disco, ad una distanza dal centro Galattico di circa 8 kpc, a circa 0,025 kpc di altezza dal piano Galattico (vedi FIG. 3).

Come discusso in precedenza, questa posizione permette di studiare con dettaglio unico i moti delle singole stelle, e di capire, per esempio, i fenomeni che avvengono all'interno della Galassia. Per esempio, le strutture non-assisimmetriche, come la barra e i bracci a spirale, possono indurre dei veri e propri fenomeni di migrazione delle stelle, intrappolarle o disperderle nelle regioni vicine in particolari condizioni, chiamate "risonanze" (proprio come avviene per i fenomeni ondulatori: la nostra Galassia si comporta come un grande tamburo). L'immagine del disco Galattico che sta emergendo negli ultimi tempi è quella di una struttura complessa, in evoluzione, ricca di strutture cinematiche. In particolare, la struttura su cui mi soffermerò in questo articolo è il cosiddetto *warp* Galattico, che in italiano potremmo tradurre come "piega". Si tratta infatti di una distorsione su grande scala del disco Galattico, deformato "verso il basso" da una parte (verso sinistra, in FIG. 3) e "verso l'alto" dall'altra (verso destra, in FIG. 3). La sezione seguente ("Come piegare una Galassia") fornisce una panoramica dei meccanismi che possono aver creato questa struttura.

### L'alone

Nonostante il modesto contenuto di massa stellare (circa l'1% della massa totale della Galassia), l'alone stellare contiene informazioni cruciali sull'evoluzione della Via Lattea. Contiene le stelle più antiche conosciute, non solo in maniera diffusa attorno alla Galassia (non rappresentate in FIG. 3), ma anche raggruppate nei cosiddetti ammassi globulari.

Inizialmente si pensava che l'alone stellare si fosse formato durante un collasso di una singola nube di gas, che diede vita all'attuale Via Lattea. In seguito, venne proposto uno scenario di formazione alternativo, basato sull'aggregazione di molte nubi di gas. L'ipotesi attualmente più accreditata è che entrambi gli effetti abbiano contribuito alla formazione dell'alone stellare, agendo in maniera comple-

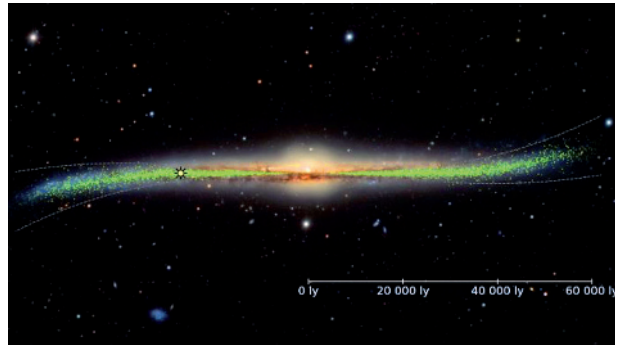


FIG. 3. Illustrazione artistica della nostra Galassia vista di taglio. Il disco Galattico presenta un *warp*, ovvero una deformazione verso l'alto da una parte (destra) e verso il basso dall'altra (sinistra). Il simbolo del Sole mostra la distanza dal centro Galattico. I punti verdi sovrapposti all'immagine mostrano la distribuzione spaziale delle Cefeidi, stelle molto giovani e dalla luminosità variabile. (Crediti: J. Skowron/OGLE/Astronomical Observatory/University of Warsaw)

mentare. L'alone stellare si estende per almeno 30 kpc dal centro Galattico; al suo interno, date le enormi distanze in gioco, i processi dinamici hanno dei tempi scala molto grandi. Questo fa sì che l'alone sia una sorta di "museo di antiquariato", dove le interazioni rimangono congelate per molto tempo, e i resti di queste interazioni – noti come *stream*, ovvero delle "strisce" di materiale che la nostra Galassia sta fagocitando a poco a poco – sono visibili per moltissimo tempo. Lo *stream* più famoso, nonché il primo scoperto, è quello del Sagittario, che rappresenta l'evidenza osservativa di un'interazione mareale in corso e si estende per 360 gradi intorno alla Galassia.

Infine, i modelli cosmologici attuali prevedono che le galassie siano immerse in aloni di materia invisibile, chiamata materia oscura, che può essere rivelata soltanto per mezzo della gravità. Si ritiene che l'alone di materia oscura della nostra Galassia contenga circa il 90% della massa totale della Galassia, e che si estenda per almeno 100 kpc dal centro Galattico.

## Come "piegare" una Galassia

Fin dagli anni Sessanta sappiamo che il disco della nostra Galassia non è perfettamente piatto: è deformato verticalmente, proprio come mostrato in FIG. 3, formando il cosiddetto *warp* Galattico. Il disco si piega verso l'alto nel nord (I e II quadrante Galattico) e verso il basso nel sud (III e IV quadrante Galattico). Il *warp* Galattico fu inizialmente scoperto nel gas e in seguito osservato anche nelle polveri interstellari e in vari tipi di stelle.

Molto recentemente, il *warp* Galattico è stato mappato con grande accuratezza utilizzando delle stelle dalla luminosità variabile, chiamate Cefeidi, per cui è possibile stimare la distanza in maniera molto precisa. Come si può vedere dalla FIG. 3,

questa deformazione diventa sempre più importante all'aumentare della distanza dal centro Galattico. Si definisce, inoltre, "linea dei nodi" la transizione tra la deformazione verso l'alto e quella verso il basso. Osservazioni mostrano che il Sole è abbastanza vicino alla linea dei nodi del *warp* Galattico. Come vedremo in seguito, questa sarà un'ottima posizione per studiare i moti stellari indotti dal *warp* stesso.

La nostra Galassia non rappresenta un'eccezione rispetto alle altre: la maggior parte delle galassie a spirale presentano un *warp*. Due esempi eclatanti di *warp* possono essere la galassia ESO 510-G13 e NGC 3190 (qui non mostrate). Un altro esempio può essere la galassia di Andromeda (FIG. 2). Il fatto che queste strutture siano molto frequenti suggerisce che i *warp* galattici siano strutture stabili, con una lunga vita, oppure che vengano generati molto frequentemente. Nonostante l'apparente semplicità di queste strutture, la loro origine ed evoluzione è tuttora molto dibattuta, nonché oggetto di svariate ricerche. Con la sua presenza, il *warp* Galattico sembra suggerirci che la Galassia è sottoposta ad importanti forze esterne, con un'intensità tale da deformare il disco. Quali forze possono esercitare una reazione così importante nel disco Galattico?

In ordine cronologico, le prime proposte sono state le forze mareali esercitate da uno o più satelliti della Via Lattea. Per esempio, sono state proposte le Nubi di Magellano e la galassia nana del Sagittario. Simulazioni mostrano che quest'ultima in particolare (meno massiccia delle Nubi di Magellano, ma più vicina) è in grado di deformare il disco Galattico in accordo con le evidenze osservative. Tuttavia, nelle galassie esterne, i *warp* sono visibili anche in galassie apparentemente isolate. Questa osservazione ha spinto gli scienziati a studiare anche vie alternative, come per esempio i campi magnetici intergalattici. Alternativamente, è stata proposta anche una caduta (chiamata *infall*) di materiale sul disco Galattico lungo una direzione obliqua rispetto all'asse verticale del piano Galattico.

Infine, è stato sviluppato un modello basato sulla materia oscura: se infatti il disco Galattico è inclinato rispetto all'asse principale di un alone di materia oscura (non sferico, ma leggermente schiacciato), allora il disco tenderà ad allinearsi con l'alone, inclinandosi molto velocemente nelle parti più interne e molto più lentamente nelle parti più esterne, creando quindi un *warp*, ovvero un disallineamento delle regioni Galattiche più esterne rispetto a quelle più interne. Questa grande varietà di modelli teorici, però, non ha ancora trovato un'evidenza osservativa capace di determinare quale sia il più realistico, e di stabilire quale fenomeno stia alla base del *warp* Galattico. Tale informazione permetterebbe inoltre di capire quali siano le principali forze esterne ad agire sulla nostra Galassia. Per concludere, possiamo affermare che il *warp* Galattico è noto da molto tempo, ma non sappiamo il perché della sua esistenza. Nelle sezioni seguenti discuteremo

del ruolo cardine dei dati di *Gaia* nel fare luce sulla questione.

## La Galassia è una pista per le biglie

Possiamo pensare alla cinematica delle stelle nella Galassia come al moto delle biglie su una pista: parte di questo moto sarà legata alla storia della biglia stessa (cioè, per esempio, dalla direzione e dalla forza con cui è stata lanciata), mentre parte sarà determinata dalla struttura della pista. Per esempio, se la pista presenta una discesa, le biglie "cadranno giù", mentre se presenta una salita, avranno bisogno di una bella spinta per salire.

Immaginiamo ora di costruire una pista ideale, perfettamente liscia, senza attrito. La costruiamo ad anello, in modo tale che le biglie possano fare molti giri. Poi la deformiamo un po': verso l'alto da una parte e verso il basso dall'altra (per semplicità, immaginiamo che le deformazioni siano perfettamente simmetriche). Cosa faranno le biglie? Se diamo loro una spinta iniziale, inizieranno a girare nella pista, e continueranno ad andare su e giù. Ora supponiamo di non sapere nulla di questa pista, ma di vedere soltanto le biglie. Per esempio, immaginiamo di essere in una stanza completamente buia e di avere delle biglie luminose. Questo scenario adesso diventa molto simile a quello che i ricercatori si trovano ad affrontare quotidianamente: le biglie luminose sono le stelle e la pista che non vediamo è la Galassia stessa – o, per essere precisi, il cosiddetto potenziale della Galassia: la distribuzione della massa totale che "guida" il moto delle stelle per mezzo della gravità, proprio come fa la pista per le biglie.

Possiamo capire qualcosa della pista (ovvero della Galassia) in base a come si muovono le biglie (ovvero le stelle)? Certamente sì. In particolare, quello che sarà utile per noi sarà la velocità verticale, che d'ora in poi chiameremo "Vz" (la "V" indica la velocità, mentre il pedice "z" si riferisce all'asse verticale). Se infatti avessimo una pista piatta, Vz sarebbe nulla dappertutto. Le biglie si muoverebbero nel piano, oscillando un po' di qua e un po' di là per la larghezza della pista, ma non avendo alcun moto verticale. Se ora deformiamo la pista come abbiamo detto sopra, ecco che Vz inizia ad essere diversa da zero. Le biglie, infatti, dovranno avere una certa Vz per "stare al passo" con la pista. Chiunque abbia seguito qualche lezione di fisica si ricorderà di cosa succede ad un oscillatore armonico (la nostra pista è infatti diventata qualcosa di simile): la velocità è "sfasata" (di 90 gradi) rispetto alla deformazione spaziale. In altre parole: siccome la pista va da una parte verso l'alto (e ci sarà un punto di massima deformazione spaziale), e dall'altra va verso il basso (e ci sarà un punto di massima deformazione, ma con segno opposto rispetto alla precedente), possiamo indentificare gli "estremi" della nostra pista. Ricordiamoci che la pista, essendo un anello, è di 360 gra-



di in totale, mentre i due estremi sono separati da 180 gradi. Perfettamente a metà tra questi due estremi, cioè a 90 gradi da essi, avremo la cosiddetta “linea dei nodi”, che abbiamo già nominato in precedenza. La linea dei nodi è perfettamente nel piano e determina il passaggio tra le due deformazioni. Essa svolge un ruolo cruciale per la cinematica: proprio lì avremo la velocità massima.

Ma c'è qualcosa in più che la nostra pista può insegnarci. Immaginiamo di complicare un po' la situazione: se prima avevamo una sola pista adesso immaginiamo di avere tantissime piste, e costruirle in modo tale che siano tanti anelli concentrici, uno a fianco all'altro. Ora le deformiamo come prima, su da una parte e giù dall'altra. Per semplicità, immaginiamo che la deformazione sia coerente per tutte le piste – ottenendo quindi un'unica, lunghissima (e dritta) linea dei nodi. Immaginiamo, però, che la deformazione sia tanto più grande quanto è la distanza dal centro – ovvero, le piste più esterne siano leggermente più deformate rispetto a quelle interne. Cosa succederà alle velocità verticali? Per ogni singola pista, il massimo della velocità sarà lungo la linea dei nodi. Ma  $V_z$  sarà tanto più grande quanto è grande la deformazione della pista – pertanto, sarà più grande per le piste esterne.

Quindi, per riassumere, ecco che cosa abbiamo imparato dal nostro modellino: ci aspettiamo che la velocità verticale  $V_z$  sia massima lungo la linea dei nodi, e che cresca all'aumentare della distanza dal centro Galattico. Senza saperlo, abbiamo realizzato il nostro modello di *warp* Galattico! Sarà sufficientemente realistico? Nella prossima sezione andremo a scoprire com'è, nella realtà, la velocità  $V_z$  delle stelle della nostra Galassia.

### La firma del *warp* Galattico

Come discusso nelle sezioni precedenti, non c'è consenso su quale sia la causa della deformazione su grande scala del disco Galattico, nota come *warp*. Infatti, nonostante la sua forma sia nota, la sua natura dinamica non lo è per niente. Questo è causato principalmente dal fatto che, prima di *Gaia*, non erano disponibili informazioni precise sui moti delle stelle (cioè sulla cosiddetta cinematica stellare) per le stelle lontane.

In particolare, è necessario andare a studiare le parti esterne del disco, laddove ci si aspetta di avere un segnale sulla velocità verticale  $V_z$  abbastanza grande. Inoltre, un altro fattore importante è il numero di stelle per cui le misure cinematiche sono precise. Se infatti avessimo a disposizione soltanto poche stelle, questo sarebbe del tutto inutile, perché quello che a noi interessa è un cosiddetto *trend* statistico. Esattamente come le biglie di cui abbiamo parlato nella sezione precedente, ciascuna stella ha il suo moto peculiare, che può essere determinato da molti fattori, e, in generale, può essere molto più grande del segnale che stiamo cercando. Tuttavia,

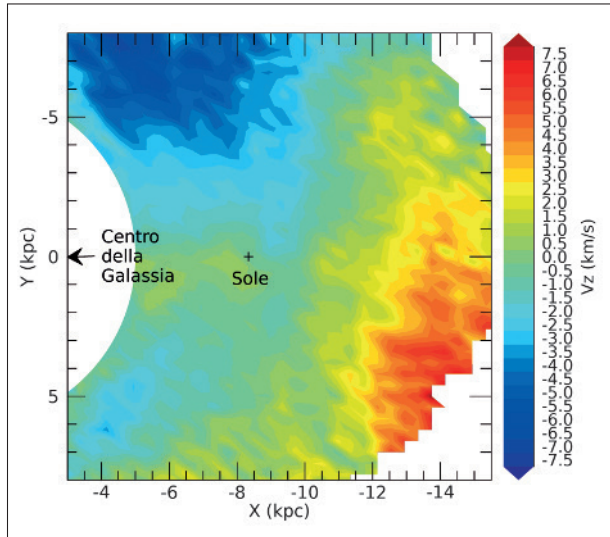


FIG. 4. Mapa delle velocità verticali nel disco Galattico usando i dati di *Gaia*. La posizione del Sole è mostrata dalla croce. Il Centro della Galassia è verso sinistra, nella posizione  $X = 0$  e  $Y = 0$ . La rotazione Galattica avviene in senso orario.

quello che interessa a noi è l'andamento *statistico*: ci interessa sapere se, in una data regione della Galassia, l'andamento medio delle stelle corrisponde a quello previsto dai nostri modelli (per esempio, quello semplicissimo sviluppato nella sezione precedente). Per questo motivo, i dati di *Gaia* svolgono un ruolo fondamentale, dal momento che consentono di calcolare in maniera precisa le posizioni e le velocità di moltissime stelle.

Analisi effettuate con i dati precedenti (per esempio il satellite *Hipparcos*) non avevano permesso di rilevare alcun segnale, proprio a causa delle ridotte informazioni disponibili, lasciando una questione aperta per la ricerca della “firma” cinematica del *warp*, ovvero il segnale cinematico che il *warp* si pensa possa indurre nel moto delle stelle. Per decine di anni, i ricercatori si sono chiesti innanzitutto se ci fosse un segnale legato al *warp*, e, in caso affermativo, come fosse fatto. Grazie ai dati di *Gaia*, possiamo ora dare risposta a queste domande. Andiamo quindi a consultare i dati: in FIG. 4 possiamo vedere la mappa delle velocità verticali medie nel piano Galattico per 12 milioni di stelle.

Prima di commentare questo grafico nel dettaglio, è doverosa qualche premessa per sapere come interpretarlo. Innanzi tutto, stiamo guardando il disco della nostra Galassia “dall’alto” – per intenderci, come se potessimo vedere la Galassia di faccia (*face-on*). Chiaramente, non possiamo vedere tutto il disco, ma soltanto fino a qualche kiloparsec dal Sole (che comunque rappresenta una regione immensamente più grande di quella campionabile in precedenza). In generale, assumendo che le stelle abbiano un'unica luminosità intrinseca (quest'assunzione è sbagliata, ma è utile per riuscire a comprendere cosa voglia dire avere un campione limitato in magnitudine), riusciamo a vedere quelle più vicine e poi, al crescere della distanza, la loro lumi-

nosità apparente diventa così debole da non poter essere viste.

In FIG. 4, la croce rappresenta la posizione del Sole. Il centro Galattico è verso la sinistra del grafico, mentre le parti esterne del disco Galattico sono verso la parte destra. La mappa è colorata in base alle velocità verticali medie  $V_z$  delle stelle: blu per le regioni che hanno velocità negative, rosse per quelle con velocità positive, verde per le regioni intermedie. Come possiamo vedere, all'aumentare della distanza dal centro Galattico, crescono anche le velocità verticali: abbiamo rilevato il segnale che stavamo cercando! La regione rossa, ovvero quella con le velocità verticali maggiori, mostra la posizione della linea dei nodi. Il fatto che questa regione sia collocata in basso a destra nel nostro grafico indica che il Sole non si trova esattamente sulla linea dei nodi. Questa evidenza osservativa è in accordo con le più recenti mappe spaziali del *warp*. Le stelle che si trovano nella regione rossa hanno le velocità verticali maggiori, perché si stanno preparando per "scalare" una grande salita, ovvero la regione del disco deformata "verso l'alto" a causa del *warp*. Il semplicissimo modello che abbiamo sviluppato prima, basandoci sull'analogia con la pista di biglie, riesce, sorprendentemente, a guidarci nel modo corretto nell'interpretazione dei dati.

### Stelle di età diverse a confronto

Il grafico in FIG. 4 mostra una mappa costruita con un particolare tipo di stelle, chiamate giganti rosse. Queste stelle sono abbastanza vecchie e, data la loro età, hanno avuto il tempo di compiere diversi giri attorno al centro Galattico. Abbiamo provato a confrontare questo segnale con quello presentato da stelle più giovani (di tipo spettrale O e B). Pur presentando un andamento cinematico perturbato, probabilmente ereditato dalle nubi di gas da cui sono nate recentemente, le stelle giovani (qui non mostrate) presentano evidenza della firma cinematica del *warp*, con un andamento simile a quello delle gi-

ganti rosse in FIG. 4. Questo confronto ci permette di porre alcuni vincoli sul fenomeno che può aver formato il *warp*.

Dobbiamo prima di tutto tenere a mente che le stelle giovani, essendo nate da poco, tracciano i movimenti del gas, mentre le stelle vecchie hanno già compiuto diversi giri attorno al centro Galattico, e quindi possono essere definite una popolazione "dinamicamente rilassata", che ha perso il ricordo delle condizioni iniziali. Supponiamo ora che il meccanismo responsabile del *warp* Galattico agisca soltanto sul gas (come, per esempio, i campi magnetici). In questo scenario, il *warp* sarebbe presente soltanto nel gas, e la "firma" cinematica sarebbe ereditata dalle stelle appena nate. Al passare del tempo, le stelle si dimenticherebbero delle condizioni iniziali: la firma del *warp* sarebbe spazzata via dopo un paio di giri attorno al centro Galattico e quindi assente nelle popolazioni più vecchie, come le giganti rosse.

Chiaramente, questo scenario non è realistico: il segnale è presente sia nelle popolazioni giovani che in quelle vecchie. Quale ingrediente manca? Quale forza è in grado di "piegare" entrambe le componenti? La risposta è molto semplice ed è sotto i nostri occhi quotidianamente: la forza di gravità.

Dal confronto di queste due popolazioni, abbiamo capito che il meccanismo che sta alla base del *warp* Galattico deve essere di natura gravitazionale. In base al nostro studio, le ipotesi di interazione mareale con uno o più satelliti o di forze esercitate dall'alone di materia oscura rimangono ancora validi scenari di formazione, che dovranno essere esplorati negli anni a venire.

### Referenze bibliografiche

- G. BERNARDI, A. VECCHIATO, *Understanding Gaia. A Mission to Map the Galaxy*, Praxis, 2019.
- C. CHIAPPINI, *The formation and evolution of the Milky Way: The distribution of the chemical elements in our galaxy serves as a "fossil record" of its evolutionary history*, «American Scientist», 89 (6), 2001, pp. 506-515.

---

**Eloisa Poggio** è assegnista di ricerca presso l'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF) - Osservatorio Astrofisico di Torino. Si occupa di struttura, cinematica ed evoluzione dinamica della Galassia in collaborazione con il Max Planck Institute for Astronomy di Heidelberg (Germania) e con il Center for Computational Astrophysics di New York. Ha conseguito il Dottorato di ricerca in Fisica e Astrofisica presso l'Università degli Studi di Torino nel 2018. (eloisa.poggio@inaf.it)

# Le immagini di un giovane sistema planetario multiplo\*

Alice Zurlo

Núcleo de Astronomía, Facultad de Ingeniería y Ciencias  
Universidad Diego Portales, Santiago, Chile

ESISTONO pochissimi esopianeti di cui abbiamo immagini dirette e, tra questi, la giovane stella HR8799 ospita il primo sistema multiplanetario finora visto con immagini dirette, composto da quattro giganteschi pianeti gassosi e due dischi di polvere. Questo sistema è stato osservato da SPHERE (*Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch*) strumento per osservare esopianeti ad alto contrasto, installato nell'Osservatorio VLT di Paranal in Chile.

SPHERE è stato progettato per la ricerca di pianeti e dischi protoplanetari, le cui prestazioni hanno un risultato molto più elevato del previsto, e permette di misurare la massa, l'orbita e gli spettri di questi pianeti con una precisione mai ottenuta prima.

Il sistema HR8799 è uno dei più noti nel campo dei sistemi planetari, con quattro pianeti rilevati visualmente e due dischi di polvere. La stella è molto giovane, con un'età di circa 40 milioni di anni (al confronto, il nostro Sole ha 4500 milioni di anni), come i suoi pianeti. In effetti, questi sono ancora in fase di formazione, il che spiegherebbe perché questi pianeti hanno temperature molto elevate e probabilmente hanno ancora molta polvere nella loro atmosfera.

La ricerca di esopianeti per immagine diretta è possibile grazie all'uso di coronografi, o maschere opache, che attenuano la luce della stella principale, permettendoci di apprezzare gli oggetti meno luminosi attorno, come pianeti e dischi di polvere.

Ma non solo, è anche necessaria un'ottica adattiva, che riduce l'effetto di distorsione della nostra atmosfera sulla qualità delle immagini.

\* In questo articolo, l'Autrice presenta i contenuti essenziali delle ricerche che le hanno valso la menzione speciale al "Premio Giuseppe Lorenzoni" per l'anno 2019 - III edizione, consegnato durante il LXIII Congresso Nazionale della SAI, tenutosi a Roma nel maggio dello stesso anno. Il premio, dedicato a Giuseppe Lorenzoni per ricordare la sua opera in campo astrofisico, è stato istituito nel 2017 dalla SAI 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 di non più di 37 anni, pubblicato nel triennio precedente.

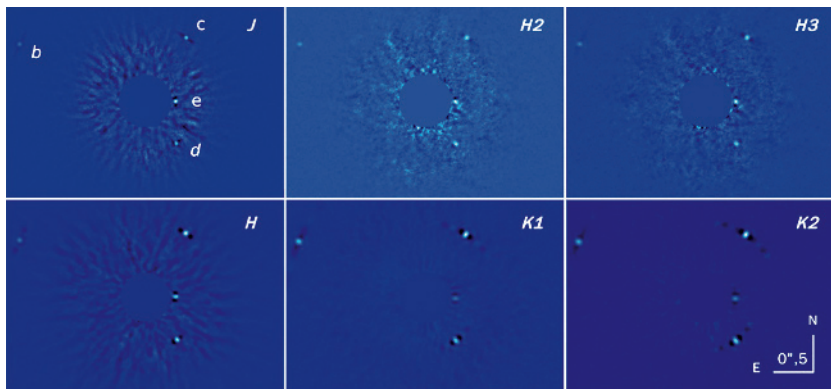


FIG. 1. I quattro pianeti (b, c, d, e) attorno a HR8799, visti dalla camera IRDIS di SPHERE in differenti filtri (J, H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>, H, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>). Il pianeta e, il più vicino alla stella, viene visto per la prima volta in filtro J. La luce della stella, nascosta dietro al coronografo al centro delle immagini, è stata attenuata grazie ad un Angular Differential Imaging (ADI) post-processing, ottenuto con la tecnica della Principal Component Analysis (PCA).

Nonostante la qualità e l'efficacia di SPHERE nell'ottenere immagini in cui la luce della stella principale è fortemente oscurata, è necessaria un'elaborazione delle immagini complessa per rilevare oggetti migliaia di volte meno luminosi della stella principale.

## Lo strumento

SPHERE è uno strumento costruito da un consorzio europeo, che ha visto la sua prima luce nel maggio 2014, ed è composto da tre parti:

- IRDIS (*InfraRed Dual-band Imager and Spectrograph*), un rivelatore a doppia banda infrarossa;
- IFS (*Integral Field Spectrograph*), che divide il campo di vista in migliaia di spettri registrati contemporaneamente;
- ZIMPOL (*Zurich IMaging POLarimeter*), un polarimetro in luce visibile.

IRDIS e IFS possono osservare in parallelo, mentre ZIMPOL, che funziona in luce visibile, osserva separatamente.

## Le osservazioni

I dati acquisiti da SPHERE sono immagini della telecamera IRDIS e dello spettrografo IFS. Tutte sono immagini infrarosse, in diversi filtri. I 4 pianeti che

orbitano attorno alla stella HR8799 sono stati rilevati senza difficoltà in tutti i filtri. SPHERE ha permesso per la prima volta il rilevamento del pianeta più vicino, HR8799, e, nella banda J, di lunghezza d'onda più breve.

Le immagini IRDIS mostrano chiaramente i 4 pianeti, quindi è stato possibile misurare le posizioni precise degli oggetti e aggiungerli a quelli precedentemente ottenuti, per stimare meglio i parametri delle loro orbite.

Le misurazioni del flusso dei pianeti sono state completate per tutti i filtri IRDIS. Con i dati IFS è stato possibile estrarre gli spettri dei due pianeti più vicini (quelli che entrano nel piccolo campo visivo dello strumento), con una qualità che supera di diversi ordini di grandezza tutte le misurazioni precedenti.

Grazie alla qualità di questi spettri è stato possibile fare un confronto con modelli di note atmosfere di nane brune (*brown dwarf*). È stato scoperto che questi giovani pianeti gassosi sono molto diver-

si dalle nane brune più vecchie alle lunghezze d'onda più lunghe, il che significa che c'è polvere nello strato superiore dell'atmosfera di questi giovani pianeti.

Nelle lunghezze d'onda più corte i pianeti e gli spettri delle nane brune coincidono perfettamente, il che ci fa domandare se c'è una differenza nel processo di formazione di questo tipo di oggetti.

Grazie a strumenti come SPHERE o il suo gemello americano, GPI (*Gemini Planet Imager*, installato nel telescopio Gemini Sud in Cile), è possibile studiare giovani stelle con pianeti e dischi, permettendoci di capire meglio come si formano i sistemi planetari.

Altri metodi per studiare i pianeti extrasolari, come i transiti o le velocità radiali, sono influenzati dall'eccessiva attività delle giovani stelle e pertanto devono essere esclusi dalle loro osservazioni.

Nel prossimo futuro, telescopi giganti della classe di 30 metri come l'E-ELT o il TMT ci consentiranno di ottenere immagini dirette di pianeti piccoli come la Terra.

---

**Alice Zurlo**, attualmente residente a Santiago del Cile, si è laureata in Astronomia all'Università di Padova nel 2008, dopodiché ha intrapreso il Dottorato di ricerca in Astrofisica tra le due Università di Marsiglia e Padova. Ottenuto il dottorato nel 2012, ha cominciato a lavorare come post-doc all'Universidad Diego Portales di Santiago del Cile, dove è attualmente ricercatrice e professoressa assistente da marzo 2018.

# Il Premio Cosmos 2019 per la divulgazione scientifica

IL Premio Cosmos per la migliore opera di divulgazione scientifica nei settori della fisica, dell'astronomia e della matematica si pone come obiettivo principale la promozione della cultura scientifica in Italia. Nasce dall'iniziativa di un gruppo di scienziati e scienziati italiani, in sinergia con la Società Astronomica Italiana, la Città Metropolitana di Reggio Calabria - Planetario *Pythagoras*, e la Fondazione Bracco, con l'obiettivo di promuovere la cultura scientifica in Italia e in particolare al Sud.

Il Premio Cosmos è assegnato dal Comitato Scientifico a un'opera di divulgazione scientifica selezionata tra quelle inviate dalle case editrici alla segreteria del premio (vedi i dettagli nel sito <https://premiocosmos.org/>).

Contestualmente, per coinvolgere i giovani nell'iniziativa, viene assegnato ogni anno anche il *Premio Cosmos degli studenti* secondo le indicazioni degli studenti delle scuole superiori che partecipano all'iniziativa. Ogni classe deve identificare un libro preferito tra i cinque selezionati dal Comitato organizzatore. Un rappresentante di ogni classe partecipa poi a un'assemblea finale che culmina con la selezione dell'autore vincitore del premio degli studenti.

È previsto che le premiazioni avvengano a Reggio Calabria nei giorni intorno al solstizio d'estate.

## Perché Cosmos?

Come si legge nel sito del Premio, si tratta di

una parola fortemente evocativa, che suona allo stesso modo nell'originale greco antico e in inglese: *κόσμος* (*kósmos*) significava "ordine", inteso come concetto opposto a "caos". È una parola collegata al territorio che ospita il Premio, in quanto Pitagora, filosofo attivo in Calabria nel sesto secolo a.C., fu il primo a utilizzarla per descrivere l'ordine che regna nell'universo.

La parola *Cosmos* è anche fortemente collegata alla divulgazione scientifica, in quanto è il titolo della celebre opera *Kosmos* di Alexander von Humboldt e della nota opera di divulgazione scientifica *Cosmos* (libro e serie tv) di Carl Sagan.

## Il Comitato scientifico è composto da:

Gianfranco Bertone – Presidente (Centro di eccellenza in fisica gravitazionale e astroparticellare dell'Università di Amsterdam);  
Amedeo Balbi (Università di Roma Tor Vergata);  
Roberto Battiston (già Presidente Agenzia Spaziale Italiana);  
Maria Luisa Chiofalo (Università di Pisa);  
Andrea Ferrara (Scuola Normale Superiore di Pisa);  
Piergiorgio Odifreddi  
Carlo Rovelli (Université de la Méditerranée et Centre de Physique Théorique de Luminy a Marsiglia);  
Sandra Savaglio (Università della Calabria);



Ginevra Trinchieri (Presidente SAI);  
Pierluigi Veltri (Università della Calabria);  
Lucia Votano (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare);  
Paolo Zellini (Università di Roma Tor Vergata).

## Il Comitato organizzatore è composto da:

Giuseppina Attanasio (Rappresentante Città Metropolitana di Reggio Calabria);  
Adriana Basile (Docente);  
Gaeta Bernini (Rappresentante Fondazione Bracco);  
Rosario Borrello (Planetario *Pythagoras*);  
Gianfranco Bertone – Presidente Comitato Scientifico (Centro di eccellenza in fisica gravitazionale e astroparticellare dell'Università di Amsterdam);  
Melania Borzumati (Docente);  
Myriam Calipari (Docente);  
Caterina Camera (Docente);  
Marika Canonico (Planetario *Pythagoras*);  
Maria Castiello (Rappresentante Città Metropolitana di Reggio Calabria);  
Francesco Dattola (Ufficio Gabinetto del Sindaco);  
Massimo Esposito (Ispettore Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca);  
Carmelo Evoli (Responsabile *Premio Cosmos degli Studenti*);  
Emanuela Martino (Docente);  
Carmelo Nucera (Planetario *Pythagoras*);  
Angela Misiano (Direttore Scientifico Planetario *Pythagoras*);  
Emanuela Minnai (Responsabile contatti con gli editori);  
Ginevra Trinchieri (Presidente Società Astronomica Italiana).

Il *Premio Cosmos 2019* è stato assegnato dal Comitato scientifico al matematico e scrittore britannico IAN STEWART per il volume *I numeri uno. La vita dei più grandi matematici del mondo*, edito da Einaudi, con le seguenti motivazioni:

«Nel libro *I numeri uno*, Ian Stewart, uno dei più noti e popolari divulgatori della matematica del mondo, inanella una serie di brevi e intense biografie dei massimi matematici della storia. Con tono leggero e accattivante, Stewart accompagna il lettore in un caleidoscopico viaggio attraverso lo spazio e il tempo. Fatti e aneddoti sulle vite delle donne e degli uomini che hanno fatto la storia della matematica sono affiancati da una descrizione competente e rigorosa del loro lavoro, offrendo così un illuminante spaccato del contesto culturale e sociale da cui sono scaturite le grandi scoperte di questa disciplina. Ne emerge da una parte l'unicità di una scienza fatta di leggi e fatti universali e immutabili che, al contrario di quanto accade ad esempio in fisica e in astronomia, non vengono continuamente aggiornati o superati da nuove scoperte. Dall'altra, l'eterogeneità delle vite dei 25 matematici scelti dall'autore, che dimostra come non esista una ricetta unica per arrivare al successo scientifico: un messaggio importante che non mancherà di ispirare tante e tanti giovani interessati ad intraprendere una carriera scientifica».

IAN STEWART, professore di matematica all'Università di Warwick, in Inghilterra, e membro della Royal Society, ha prevalso su altri quattro scrittori di prestigio: ED FINN con *Che cosa vogliono gli algoritmi? L'immaginazione nell'era dei computer*, PAUL HALPERN con *Il labirinto dei quanti. Richard Feynman, John Wheeler e la rivoluzione della fisica*, ELI MAOR con *La musica dai numeri. Musica e matematica da Pitagora a Schoenberg*, e GOVERT SCHILLING con *Onde nello spaziotempo. Einstein, le onde gravitazionali e il futuro dell'astronomia*.

Il **Premio Cosmos degli studenti 2019** è stato assegnato a LUCA PERRI per *Astrobufale. Tutto ciò che sappiamo (ma non dovremmo sapere) sullo spazio*, edito da Rizzoli. È risultato il più gradito tra i giovani delle scuole superiori italiane, che lo hanno scelto tra una cinquina di libri finalisti che includeva, oltre ai testi di MAOR, SCHILLING e PERRI, anche il libro di CRISTIANO GALBIATI *Le entità oscure. Viaggio ai limiti dell'universo*.

Il testo «tratta tematiche estremamente attuali attraverso un linguaggio dai toni colloquiali e ironici», recita la motivazione redatta dagli studenti delle 25 scuole di tutt'Italia nell'assemblea svoltasi lo scorso 20 maggio a Reggio Calabria. L'autore è dottorando in Astrofisica all'Università dell'Insubria e all'Osservatorio di Brera e astronomo dell'Osservatorio di Merate.

La cerimonia di premiazione si è svolta a Reggio Calabria il 21 giugno 2019 con la consegna ai vincitori di una scultura in vetro dell'artista americano Josh Simpson e un premio in denaro.

Riportiamo qui alcune delle recensioni ai cinque libri in gara per il *Premio Cosmos degli studenti*.

\*

LUCA PERRI, *Astrobufale. Tutto ciò che sappiamo (ma non dovremmo sapere) sullo spazio*

Liceo Classico e Scientifico 'Socrate', Roma – docente  
Claudia Moretti

Il dilagare della disinformazione è una delle tante controindicazioni di una società digitale come la nostra, complici, inutile negarlo, soprattutto i *social*: abbiamo abbattuto le distanze, accorciato drasticamente i tempi di comunicazione, dato la possibilità a chiunque di condividere ciò che pensa; ma guardando l'altro lato della medaglia, spesso ci troviamo davanti ad una mole infinita di informazioni, spesso con pochissimi (a volte nulli) strumenti adatti a distinguere il vero dal falso. Ciò diventa tanto più pericoloso quando le *fake news* cominciano ad insinuarsi persino nelle scienze esatte e mettono solide radici nel sapere comune; nei casi più estremi le bufale ci convincono così tanto che neanche la verità o il buon senso riescono più a persuaderci.

Con *Astrobufale*, Luca Perri realizza una divulgazione scientifica a 360 gradi che non offre soltanto una cura alla nostra disinformazione, ma ci fornisce anche i mezzi per una solida prevenzione. Da un lato, il libro si pone l'obiettivo di revisionare «Tutto ciò che sappiamo (ma non dovremmo sapere) sullo spazio», toccando, tra un capitolo e l'altro, una notevole varietà di temi, sapientemente connessi dal filo della corsa allo spazio; dall'altro si preoccupa di mostrarci i pregiudizi, i «*bias cognitivi*» che deformano la nostra comprensione e disturbano il nostro apprendimento per evitare, o quantomeno farci ragionare, prima di venire nuovamente ingannati.

Il tutto acquista le forme di un quiz interattivo e umoristico che tiene viva l'attenzione del lettore, di una conversazione divertente e disinvolta sui misteri del cosmo, comunque ben lontana dalla banalità o dalla comicità scadente. Un libro chiaro e diretto che non dà nulla per scontato, che non presuppone conoscenze ma al contrario ci invita a mettere in dubbio tutto ciò che sappiamo per costruire un sapere nuovo, consapevole e ragionato. Una divulgazione scientifica aperta davvero a tutti; unico prerequisito, la capacità di meravigliarsi davanti alla bellezza del cosmo, all'eccellenza della Terra, alla «delicatezza del nostro mondo» e alla potenza dell'ingegno umano.

\*

IAN STEWART, *I numeri uno. La vita dei più grandi matematici del mondo*

Istituto Superiore 'Euclide', Bova Marina (RC) – docente  
Anna Cavallaro

Il libro scritto da Stewart, *I numeri uno*, pubblicato nel 2018, è una raccolta di biografie di 25 matematici scelti da lui per scandire la storia del pensiero matematico dai tempi più lontani fino ai nostri giorni. Matematici che con le loro ricerche hanno aperto

nuovi orizzonti alla ricerca matematica, ne sono stati i pionieri. Ma perché pionieri? Perché, come spiega lo stesso Autore, essi hanno un tratto comune: la capacità di entrare in regioni del pensiero precedentemente sconosciute all'umanità.

Si prenda, per esempio, Cantor e di come riuscì a fare crollare secoli e secoli di false certezze sul concetto di infinito; o Archimede e della sua formidabile idea per misurare la lunghezza della circonferenza e stimare il valore del pi greco.

L'autore attraverso questo libro vuole far capire come la matematica sia una pura creazione della mente umana e, una volta che un teorema viene dimostrato correttamente, esso sarà vero sempre, diventa una verità eterna, per cui la matematica non è altro che una perenne ricerca della verità. I teoremi e le teorie matematiche possono anche passare di moda ma rimangono sempre veri.

Lo stile non è molto complesso e la lettura è molto interessante e scorrevole, non vi sono punti morti nel testo, nonostante l'autore abbia trattato 2500 anni di storia matematica. Anche gli aneddoti e gli argomenti noti acquisiscono un peso diverso in una narrazione così particolare. Un libro molto coinvolgente, sia per gli appassionati di matematica, sia per coloro che vogliono approfondire le proprie conoscenze riguardanti essa.

LARIZZA MARIA ROSA

★

GOVERT SCHILLING, *Onde nello spaziotempo. Einstein, le onde gravitazionali e il futuro dell'astronomia*  
Liceo Scientifico Statale 'Stanislao Cannizzaro', Palermo – docente Erasmo Modica

La penna di Schilling guida il lettore lungo la storia delle scoperte dei meandri più remoti del cosmo. Partendo dalla registrazione diretta di un'onda gravitazionale avvenuta il 14 settembre 2015, l'autore guida verso la piena comprensione di un evento di grande risonanza. Districandosi tra impressionanti distanze astronomiche e altrettanto impressionanti cifre finanziarie, l'interferometro laser adoperato si è dimostrato abbastanza sensibile da verificare un'increspatura della trama spazio-temporale, pressoché impercettibile, proveniente dallo scontro di due buchi neri binari. Per rendere tutto ciò comprensibile a chi di astrofisica ne mastichi poca, l'autore olandese dedica interi capitoli a "corsi accelerati", assicurandosi di non lasciare nessuno indietro nel procedere di una coinvolgente narrazione. Tuttavia, riferendo di onde gravitazionali, Schilling non può fare a meno di menzionarne il padre intellettuale; pertanto il secondo capitolo è dedicato al fisico più iconico della storia recente, Albert Einstein, e alle sue scoperte, senza mancare di approfondire l'aspetto sentimentale del premio Nobel tedesco.

Schilling non si subordina alla sua stessa divulgazione: egli è la filigrana delle sue stesse pagine, costruite intrecciando opportunamente le sue vicende

e conoscenze all'argomento, risultando, anziché un marginale relatore, il partecipe narratore del misterioso mondo siderale. Pertanto, dalle onde radio alle stelle di neutroni, ai complessi telescopi, tutto viene reso immediato grazie a un linguaggio chiaro, agli affascinanti aneddoti, alle efficaci metafore. La conclusione della lettura porterà a metabolizzare la sconcertante sensazione che sia ancora tutto da scoprire, rammentando che le scoperte avvengono quotidianamente. Non esitate, quindi, a lasciarvi trasportare dall'appassionante racconto che avvicinerà anche i più "digiuni" di astrofisica ai misteri del cosmo. Schilling sarà la perfetta guida per accompagnarvi in un viaggio attraverso le meraviglie di un universo inesplorato.

★

ELI MAOR, *La musica dai numeri. Musica e matematica da Pitagora a Schoenberg*

Liceo Classico Statale 'F. Capece', Maglie (LE) – docente Maria Teresa Piccinni

In questo libro l'autore, Eli Maor, cattura l'essenza dello stretto contatto fra musica e numeri, rapporto del resto percepito sin dall'antichità.

All'inizio della sua riflessione, propone l'esperienza del filosofo Pitagora, noto matematico, che basava la sua dottrina sui numeri. Questo esperimento è il filo conduttore di tutta la musica basata sulla matematica. L'autore trasporta il lettore in un'analogia continua fra il mondo della fisica e quello della musica, evidenziando anche la crisi che entrambe ebbero quando la fisica classica si trovò a scontrarsi con la fisica relativistica, mentre la musica trovava in Schoenberg il primo fautore della musica atonale, decisamente poco apprezzata a quel tempo. Proseguendo nel suo percorso, Eli Maor presenta il diverso approccio conseguente ai cambiamenti: mentre la fisica relativistica ha oggi grande consenso e un seguito numeroso, la musica atonale suona ancora dissonante alle nostre orecchie. Va in direzione contraria l'esempio della musica di Bach che è interamente basata su principi matematici, eppure risulta "dolce" all'udito. L'autore inoltre riflette sugli stretti legami tra cosmologia e musica sia per la teoria delle stringhe (secondo la quale l'universo è conseguenza delle vibrazioni di stringhe esistenti in undici dimensioni), sia per le rilevazioni dei "suoni delle stelle", dovuti alle reazioni nucleari e a ciò che ne consegue: il nostro universo è immerso in una melodia costante che non riusciamo ad udire per la distanza dalla fonte e perché siamo immersi in essa da sempre.

Bizzarro come ciò fosse stato già anticipato dai pitagorici dell'antica Grecia! Nel complesso, il libro è un interessante viaggio attraverso epoche diverse, alla scoperta di relazioni inimmaginabili tra numeri e vibrazioni.

★

CRISTIANO GALBIATI, *Le entità oscure. Viaggio ai limiti dell'universo*

Liceo Scientifico 'Alessandro Volta', Reggio Calabria –  
docente Anna Maria Borrello

Cristiano Galbiati, nel suo libro *Le entità oscure*, passa in rassegna gli attuali rompicapi della fisica moderna, imbattutasi in un «mondo inaspettato. Talmente inatteso che desta tanta confusione quanta meraviglia». La cosiddetta materia oscura, sulla quale è oggi riposta l'attenzione degli astrofisici, è nuovo tipo di materia, prodotta successivamente al Big Bang, che risponde alle leggi della gravità, pur discostandosi totalmente dal modello standard. Solo attraverso la conoscenza e lo studio di essa sarà possibile scoprire le origini e il futuro del nostro universo, attualmente ignoti all'Uomo. Una ricerca che, riprendendo le parole dell'autore, si configura come uno «splendido viaggio», intrapreso «oltre le Colonne d'Ercole della nostra conoscenza», senza avere la consapevolezza del punto di arrivo. Un

viaggio che coinvolge fisici, astrofisici, scienziati e filosofi, animati dal desiderio di progredire, anche solo di un piccolo passo.

Uno di questi è proprio Cristiano Galbiati, dottore di ricerca in Fisica all'Università di Milano, che trasportato dall'entusiasmo scrive questo libro nell'intento di rendere i lettori viaggiatori nell'universo. Un tentativo che va a buon fine: da ogni parola traspare la sua passione per la fisica, coinvolgendo inevitabilmente il lettore. Leggi, esperimenti e modelli sono descritti in modo poetico e suggestivo, con la massima semplicità possibile, rendendo il libro accessibile a chiunque voglia accostarsi a questo mondo.

Uniche pecche dell'opera sono alcune ripetizioni e, soprattutto, la scelta di omettere i nomi dei fisici, sostituiti da perifrasi. Un espediente narrativo che, se da un lato desta curiosità, dall'altro, trattandosi di un saggio scientifico, può essere una vera e propria mancanza ... ma, appunto, stiamo parlando di «entità oscure».

FRANCESCA CERETO



# Cent'anni fa

Saluto ai lettori

---

CENT'ANNI fa terminava l'esperienza della *Società degli Spettroscopisti Italiani*, per dare vita alla *Società Astronomica Italiana*. L'astronomia italiana cambiava volto, lasciandosi alle spalle la gloriosa epoca della nascita dell'astrofisica, e imboccando una strada più tradizionale. La svolta avvenne, non a caso, con la morte della terna di membri del Consiglio di Presidenza, succeduti al primo Presidente, Pietro Tacchini. Infatti, Pietro Blaserna, Elia Milllosevich e Annibale Riccò morirono tra il 1918 ed il 1919: con la loro scomparsa, c'era da ricostruire tutta una comunità, decimata dalle conseguenze del conflitto mondiale. Le scarse risorse disponibili giustificavano, in parte, questo ripiegamento verso l'astronomia classica e questa rinuncia all'innovazione. In compenso, aumenterà il dialogo col mondo della didattica e dell'astronomia non professionale, che porterà alla costituzione delle rispettive sezioni.

Con questo fascicolo si chiude la rubrica "Cent'anni fa", che ha accompagnato i lettori dal 1991, curata prima da Salvatore Serio e poi dalle sottoscritte. Attingendo dagli articoli pubblicati sulle *Memorie della Società degli Spettroscopisti Italiani*, con la cessazione di questo periodico nel 1919 (che assumerà dal

1920 il titolo di *Memorie della Società Astronomica Italiana*) viene infatti a mancare la materia prima per le nostre pagine. Come "finestre" sull'astronomia italiana del passato, esse ne hanno indicato i principali temi di interesse nel corso del trentennio preso in considerazione (1891-1919): dalle pionieristiche ricerche di spettroscopia solare, alle più o meno ambiziose spedizioni scientifiche, sino ai più modesti studi di variabilità stellare e meccanica celeste.

Ci sembra significativo chiudere qui la rubrica, con le prime pagine della neonata rivista del 1920 *Memorie della SAIt*, riproponendo il *Verbale* della riunione in cui si deliberava la cessazione della *Società degli Spettroscopisti* e la *Presentazione* e lo *Statuto* della nuova *Società Astronomica*: in un momento nel quale ci si interroga anche sul futuro delle attuali *Memorie della SAIt*, vogliamo sottolineare la svolta che, cent'anni fa, portò alla costituzione della *Società Astronomica Italiana*: iniziava un'altra storia, le *Memorie* diventavano espressione di un'altra astronomia... e oggi lasciamo eventualmente ad altri di inventarsi un modo diverso per raccontarla.

DONATELLA RANDAZZO, ILEANA CHINNICI

TERZA SERIE

VOL. I (1920) - N. 1

MEMORIE  
DELLA  
SOCIETÀ  
ASTRONOMICA  
ITALIANA  
(già degli SPETTROSCOPISTI)

**Sommario:**

V. CERULLI, Prefazione, p. 3 - Verbale della seduta del 7 gennaio 1920, p. 5 - Statuto della Società, p. 7 - J. G. HAGEN, Via Lattea e Via Nubila, p. 9 - G. ABETTI, Esperienze fotografiche con il prisma-obiettivo Merz-Secchi, p. 15 - G. ARMELLINI, Sul potenziale galattico, p. 24 - A. BEMPORAD, Variabilità di 32 Geminorum, p. 29 - E. BIANCHI, La doppia spettroscopica  $\gamma$  Bootis, p. 31 - E. BIANCHI ed E. PADOVA, Le variazioni di luce del pianeta «(44) Nisa», p. 39 - A. PROSPERI, Sopra alcune misure del diametro solare, p. 66 - G. ZAPPA, Riflessioni sulle stelle giganti e nane nell'evoluzione stellare, p. 73 - G. BEMPORAD, Necrologia, p. 77 - Notizie, p. 79.

ROMA  
TIPOGRAFIA DELL'UNIONE EDITRICE  
Via Federico Cesi, 45

# Cent'anni fa\*

A cura di Donatella Randazzo, Ileana Chinnici

INAF · Osservatorio Astronomico 'G. S. Vaiana', Palermo

## Prefazione

(p. 3)

AI brevi cenni storici sulla SOCIETÀ DEGLI SPETTROSCOPISTI ITALIANI che il nostro compianto predecessore A. Riccò ebbe a dare nella introduzione all'INDICE GENERALE dei primi 40 anni delle Memorie, un solo fatto nuovo è oggi da aggiungere. Con la scomparsa lacrimata del Riccò stesso, seguita dopo due mesi da quella non meno dolorosa al cuore di tutti gli astronomi italiani, dell'ottimo Millosevich, occorrendo provvedere alla nomina del nuovo Consiglio direttivo, si tenne un'adunanza di Soci in Roma il 7 gennaio 1920,<sup>1</sup> dalla quale vennero eletti i nuovi Consiglieri nelle persone dei professori BEMPORAD, BIANCHI, GARBASSO, VOLTERRA, CERULLI. A quest'ultimo fu conferita la Presidenza della Società e la direzione del Periodico. Fu anche deliberato che la Società, non essendo più un'accolta esclusiva di Spettroscopisti, come era stata sul principio, ma avendo estesa la sua attività a tutti i rami dell'Astronomia, si chiamasse d'indi innanzi SOCIETÀ ASTRONOMICA ITALIANA, e rinnovasse il proprio Statuto sul modello delle più repute Società astronomiche dell'estero.

In forza di codesto nuovo Statuto, già approvato dalla maggioranza dei Soci, e di cui riproduciamo qui appresso il testo,<sup>2</sup> è sperabile che la Società veda accrescersi sensibilmente le proprie risorse finanziarie, così da poter, in non lontano avvenire, oltre che alacramente cooperare con la UNIONE ASTRONOMICA INTERNAZIONALE, anche attendere alla creazione di seri organi di divulgazione dell'Astronomia in Italia.

Ma i tempi difficili che attraversiamo non consentono l'attuazione immediata di un tale programma. Per il momento, il meglio che possiamo fare si è di concentrare tutte le nostre cure nel Periodico, affinché ne sia assicurata una lodevole continuazione, e dove è possibile, anche qualche lieve miglioramento.

Col presente numero s'inizia in Roma la nuova Serie, sotto il titolo di MEMORIE DELLA SOCIETÀ

\* Estratto dal Vol. I, S. III (1920) delle *Memorie della Società Astronomica Italiana* (già degli *Spettroscopisti*)

<sup>1</sup> Vedi a pag. 5 il verbale di detta adunanza [qui FIG. 1].

<sup>2</sup> P. 7 [qui FIG. 2].

### VERBALE DELLA RIUNIONE TENUTA IL 7 GENNAIO 1920 IN UNA SALA DELLA REALE ACCADEMIA DEI LINCEI FRA I SOCI DELLA SOCIETÀ DEGLI SPETTROSCOPISTI ITALIANI ED ASTRONOMI PRESENTI IN ROMA PER LA TRASFORMAZIONE IN SOCIETÀ ASTRONOMICA ITALIANA

Dei 27 membri italiani della Società degli Spettroscopisti sono presenti: Bemporad, Cerulli, Di Legge, Garbasso, Giacomelli, Mengarini, Palazzo, Rotti, Volterra. Si sono fatti rappresentare i soci: Abetti, Angelitti, Antoniazzi, Celoria, Chistoni, Grabovitz.

Sono pure presenti come invitati: Armellini, Bianchi, Padova, Zappa.

Il prof. DI LEGGE spiega lo scopo della riunione e prega il prof. ROTTI di assumere la presidenza e il prof. BEMPORAD di fungere da segretario.

Il sen. MENGARINI, prima che si inizi la discussione, ai fini della validità delle deliberazioni da prendersi, fa constatare che tra membri effettivi presenti e rappresentati con regolare delegazione, è raggiunta la maggioranza.

Dietro richiesta del sen. Volterra, BEMPORAD fornisce informazioni approssimate circa le condizioni economiche passate e presenti della Società degli Spettroscopisti. Per sopprimere ai bisogni della Società attuale e della futura, il prof. DI LEGGE informa di aver avuto affidamenti, per quanto non ancora conclusivi, da parte del Ministero della Pubblica Istruzione circa il raddoppiamento dell'attuale sovvenzione di L. 2500.

Il prof. BIANCHI osserva che, ammesso l'anzidetto contributo del Ministero, tenuto conto delle quote di abbonamento che dovrebbero pagare tutti i soci (esclusi i soci stranieri) e gli abbonati, e tenuto conto infine del contributo speciale che gli Osservatori Astronomici avrebbero interesse di dare per la pubblicazione nelle Memorie della Società, dei loro lavori, non è azzardata la speranza che la nuova Società possa iniziarsi sotto fiduciosi auspici.

Il sen. MENGARINI ricorda il passato glorioso della Società, e raccomanda sia provveduto a mantenere i diritti acquisiti dai membri stranieri e a continuare le tradizioni del periodico attuale.

Il prof. ROTTI si associa al sen. Mengarini e raccomanda sia sempre ricordato il nome del fondatore della Società.

Il prof. PALAZZO si associa, proponendo si faccia una precisa distinzione fra membri, soci ed abbonati.

Il sen. VOLTERRA ritiene che la riunione debba decidere anzitutto circa la questione fondamentale dell'indirizzo della nuova Società e della pubblicazione; se cioè debbano mantenere il carattere scientifico sino ad oggi avuto, o estendersi nel campo di divulgazione della scienza.

Il sen. MENGARINI accenna alla organizzazione della Società Elettrotecnica Americana.

Prendono la parola in merito i prof. ZAPPA, CERULLI, e BEMPORAD.

6

VERBALE

Il sen. VOLTERRA osserva che, essendo stata ormai accettata da tutti i membri della Società la trasformazione di essa in Società Astronomica, da qui si devono prendere le mosse per le ulteriori deliberazioni. Il prof. BIANCHI, ritenendo ormai matura la discussione ed unanime il consenso dei presenti, propone un ordine del giorno che, dopo osservazioni del sen. MENGARINI, del prof. ARMELLINI, del prof. GIACOMELLI e del sen. VOLTERRA, viene approvato ad unanimità nella seguente forma:

«1° - Prendendo atto del voto favorevole già emesso circa la trasformazione dell'attuale Società degli Spettroscopisti Italiani in Società Astronomica Italiana, (secondo la circolare a firma dei delanti prof. Riccò e Millosevich in data 20 aprile 1910), detta trasformazione è a tutti gli effetti deliberata, e d'ora in poi il periodico attuale dell'anzidetta Società degli Spettroscopisti Italiani, mantenendo le caratteristiche del vecchio titolo, sarà organo della Società Astronomica Italiana.

«2° - Detto organo conserverà il carattere scientifico sino ad oggi avuto, riservando ad ulteriori deliberazioni di decidere se, considerata la futura potenzialità economica della Società, sarà il caso di dare ad essa un campo di attività ancor più vasto, sino a quello di divulgazione popolare, da consacrarsi in un bollettino di propaganda astronomica.

«3° - La Direzione della nuova Società, la cui costituzione è pur opportuno sia affrettata per dar modo alla Astronomia italiana di stringere legami sempre più vivi con le Associazioni analoghe estere e con la Unione internazionale, è affidata ad un Comitato organizzatore composto di 5 membri.

«4° - Detto Comitato compierà lo Statuto della nuova Società, ispirandosi alle direttive approvate durante la presente riunione».

Dovendosi poi procedere alla costituzione del Comitato organizzatore, il prof. ROTTI, ispirandosi a proposte del prof. Cerulli riflettenti il pensiero del compianto prof. Millosevich, propone che di detto Comitato facciano parte il professor Garbasso e il prof. Bemporad, e che, per la gran parte avuta nella organizzazione di società scientifiche e per le relazioni sue con l'estero, sia pure chiamato il sen. Volterra. Propone altresì il presentatore dell'ordine del giorno prof. Bianchi. Il prof. Rotti e molti dei presenti prendono la parola, anche a nome dei rappresentati, designando come presidente del Comitato e per le sue benemerite scientifiche e per la sua autorità astronomica, il prof. Cerulli.

Messe ai voti queste proposte sono pure approvate da tutti i presenti, meno i designati.

Il prof. ROTTI propone in ultimo, e l'assemblea approva, di chiudere la riunione inviando un telegramma di omaggio al sen. Celoria.

FIG. 1.

## STATUTO DELLA SOCIETÀ ASTRONOMICA ITALIANA

- Art. 1. – È costituita in Roma la *Società Astronomica Italiana*, con lo scopo di promuovere e diffondere gli studi dell'Astronomia. La società sarà eretta, appena la cosa sia possibile, in Ente Morale.
- Art. 2. – La Società Astronomica Italiana per raggiungere il suo scopo:
- indice riunioni per i soci e i simpatizzanti;
  - concorre, accordando sussidi finanziari e concedendo l'uso dei libri ed strumenti di sua proprietà, ad organizzare studi e ricerche;
  - cura la pubblicazione di un periodico ed eventualmente di un bollettino popolare.
- Art. 3. – La Società assume come suo organo le *Memorie degli Spettroscopisti*, fondate da Pietro Tacchini, delle quali Memorie si inizierà con l'anno 1920 una nuova serie.
- Art. 4. – La Società comprende membri *effettivi*, *associati* ed *onorari*.
- Art. 5. – La Società è governata da un *Consiglio direttivo*, composto di un *Presidente*, un *Segretario*, un *Cassiere* e due *Consiglieri*.
- Art. 6. – Il Consiglio direttivo funziona come *Comitato di redazione* del periodico sociale, ed eventualmente del bollettino.
- Art. 7. – I membri effettivi non possono essere più di cento.
- Art. 8. – Quando uno o più posti di membro effettivo siano vacanti, il Consiglio sottopone una lista di altrettanti nomi di membri associati al *referendum* dei membri effettivi, i quali votano per sì e per no. È eletto quel candidato che abbia raccolto i due terzi dei voti espressi.
- Art. 9. – Rimandando la scheda di votazione, ogni membro effettivo può indicare due nomi di membri associati, che a suo giudizio potrebbero essere designati per il *referendum* in caso di eventuali vacanze.
- Art. 10. – I nomi indicati da almeno 5 membri effettivi devono essere sottoposti al *referendum* alla prima occasione.
- Se sono in numero esuberante, passano avanti quelli che hanno raccolto un maggior numero di suffragi, e, a parità di suffragi, i più anziani come membri associati.
- Art. 11. – I membri associati sono in numero illimitato.
- Art. 12. – I membri associati vengono scelti dal Consiglio, su proposta di due membri effettivi.
- Art. 13. – I *Membri onorari* sono esclusivamente stranieri; non possono essere più di 30.
- Art. 14. – I membri onorari vengono eletti con le stesse norme stabilite dal presente Statuto agli articoli 8, 9 e 10 per l'elezione dei membri effettivi.
- Art. 15. – Il presidente, il cassiere, il segretario e i consiglieri vengono eletti fra i membri effettivi dai membri effettivi convocati in assemblea. L'elezione è fatta a maggioranza dei presenti.

8

STATUTO

- Art. 16. – Il presidente, cassiere, segretario e consiglieri durano in carica 2 anni. Il primo è sempre rieleggibile; gli altri sono rieleggibili per due volte.
- Art. 17. – In caso di impedimento il presidente è supplito dal consigliere anziano.
- Art. 18. – Il Consiglio Direttivo risiede in Roma presso la Sede della Società.
- Art. 19. – Presidente e Consiglio governano la Società secondo le consuetudini.
- Art. 20. – Il bilancio preventivo deve essere approvato dal Consiglio, il consuntivo dall'assemblea.
- Art. 21. – I membri effettivi pagano una quota di L. 25 e così pure gli associati.
- Gli uni e gli altri ricevono, senza dover versare altro contributo, il periodico sociale.
- Art. 22. – I membri onorari non pagano quota, e ricevono gratuitamente il periodico.
- Art. 23. – Il periodico può essere dato in abbonamento anche ai non soci al prezzo di L. 30.
- Art. 24. – Il periodico sociale potrà essere organo di pubblicazione per gli Osservatori e gli Istituti scientifici affini. In tale caso saranno stabiliti opportuni accordi fra il Consiglio Direttivo della Società e le direzioni degli Osservatori o Istituti interessati.
- Art. 25. – L'assemblea è costituita dai membri effettivi e dagli associati. Deve essere convocata almeno una volta all'anno per l'approvazione del bilancio consuntivo.
- Art. 26. – I membri associati non votano, nell'Assemblea, nel caso previsto dall'Art. 15.

### DISPOSIZIONI TRANSITORIE

- Art. 1. – Sono membri effettivi, di pieno diritto, gli attuali Soci nazionali della Società degli Spettroscopisti Italiani.
- Art. 2. – Sono membri onorari, di pieno diritto, gli attuali Soci stranieri della Società degli Spettroscopisti Italiani.
- Art. 3. – Tutte le attività e proprietà della Società degli Spettroscopisti Italiani passano alla Società Astronomica Italiana.

FIG. 2.

ASTRONOMICA ITALIANA ed in nuovo formato, che ci lusinghiamo sia per riuscire più gradito del primitivo specialmente ai nostri associati di lontani paesi, che spesso avevano trovato a lagnarsi delle avarie con cui i nostri fascicoli, ripiegati, di altra volta, arrivavano a destinazione. Crediamo anche di aver migliorato i tipi e la correzione tipografica.

Come già le MEMORIE DEGLI SPETTROSCOPISTI, così anche le MEMORIE della nuova Società si propongono di rispecchiar per intero il pensiero astronomico italiano. Saremo perciò grati a quanti seri cultori conta l'Astronomia nel nostro Paese, se vorranno inviarci sotto forma di NOTE piuttosto brevi, i risultati dei loro studi. E non solo rivolgiamo l'appello agli astronomi propriamente detti, ma anche ai cultori di scienze affini all'Astronomia, quali la Geodesia, la Meccanica celeste, la Fisica delle radiazioni. Le MEMORIE accoglieranno ben volentieri anche lavori sulla storia dell'Astronomia e contributi critici intorno alle scoperte che va quotidiana-

mente e sotto i nostri occhi accumulandosi. Intendiamo scoperte di fatti e di metodi.

È nostra intenzione pubblicare un numero di 100 pagine ogni tre mesi. Ma i favolosi rincari della carta e della mano d'opera tolgono per ora anche a questo modesto desiderio la facoltà d'esser realizzato. Questo primo numero si è dovuto per es. limitare a 80 pagine, né siamo certi che di qui a tre mesi potrà puntualmente venir in luce un secondo fascicolo altrettanto voluminoso. I nostri benevoli Colleghi ed associati, conoscendo le difficoltà nelle quali ci dibattiamo, vorranno usarci indulgenza, mentre in compenso promettiamo che non risparmieremo attenzione acciò il Periodico, accogliendo solo lavori di indubbia importanza, conservi sempre un posto onorato fra le Riviste astronomiche.

Roma, giugno 1920

Per il consiglio Direttivo  
V. CERULLI

**Donatella Randazzo**, laureata in Biologia e diplomata "Librarian" in Inghilterra, è bibliotecaria all'INAF-Osservatorio Astronomico "G. S. Vaiana" di Palermo, dove è responsabile del fondo antico e dell'archivio storico. Ha collaborato alla compilazione del repertorio degli astronomi italiani e dell'inventario dell'archivio storico dell'Osservatorio di Palermo, ed è impegnata nel progetto nazionale di catalogazione delle cinquecentine conservate negli osservatori astronomici dell'INAF.

**Ileana Chinnici** è ricercatore astronomico dell'INAF-Osservatorio Astronomico "G. S. Vaiana" di Palermo e Adjoint Scholar della Specola Vaticana. Laureatasi nel 1992 in Fisica con tesi in storia dell'astronomia, i suoi interessi di ricerca vertono principalmente sulla storia dell'astronomia e dell'astrofisica nell'Ottocento, con particolare attenzione alle fonti archivistiche. Nel 2001 ha collaborato all'edizione dell'inventario di archivio del Fondo Secchi della P. Università Gregoriana.

## Dicembre 1819: due secoli fa le prime osservazioni astronomiche a Capodimonte

Emilia Olostro Cirella

INAF · Osservatorio Astronomico di Capodimonte

Napoli= 17. Dicembre 1819= Specola di Minadois  
Questa mattina fu montato un Circolo ripetitore di Reich. nella Torre orientale  
17. Dicembre 1819 - sera  
Distanze dal zenit col circolo ripetitore orientale  $\alpha$  Cassiopea sopra il polo.<sup>1</sup> (FIG. 1)

Così Carlo Brioschi (1781-1833) la sera del 17 dicembre 1819, annotando nel suo diario di lavoro la prima osservazione compiuta a Capodimonte, ossia la misurazione della posizione di  $\alpha$  Cassiopeiae sopra il polo, sanciva l'avvio dell'attività scientifica del nuovo Osservatorio di Napoli.

Fondata il 4 novembre 1812, la specola partenopea o, come osò definirla Franz Xaver von Zach (1754-1832), «*le Vesuve de l'Astronomie*»,<sup>2</sup> fu ideata in puro stile neoclassico dall'astronomo Federigo Zuccari (1784-1817) e dall'architetto Stefano Gasse (1778-1840) e completata dopo sette anni. Incertezze e avversità scaturite da problemi di natura sia progettuale che politica contribuirono notevolmente a rallentare e poi a interrompere i lavori di fabbrica. Zuccari, direttore dell'Osservatorio di Napoli dal 1811, aveva infatti più volte sottoposto i disegni al giudizio degli astronomi milanesi, suoi amici, e aveva persino in-

terpellato von Zach per ottenere un parere da esperto sulla bontà della costruzione, provvedendo via via a modificarne la pianta. Nel 1813 i lavori sembravano procedere, ma i tumulti scoppiati a Napoli nel 1815 e il rientro in città dei Borbone impedirono la realizzazione del sogno di Federigo che restava, a giudizio di Giuseppe Piazzi (1746-1826), ancora un «iter desiderata con vera perdita dell'Astronomia, non vi essendo Cielo più bello del Partenopeo». <sup>3</sup> Solo nell'aprile del 1819 l'Osservatorio di Capodimonte, primo edificio italiano a essere concepito come un moderno centro di ricerca «per il solo uso delle osservazioni astronomiche»,<sup>4</sup> poteva finalmente considerarsi ultimato e pronto a rivaleggiare, per tipologia di costruzione e per strumenti in dotazione, con i più importanti osservatori europei dell'epoca. Artefice risolutivo dell'impresa fu proprio Piazzi che, nominato nel 1817 da re Ferdinando I (1751-1825) soprintendente generale degli Osservatori di Napoli e Palermo, rassicurò il monarca sia sulla strumentazione acquisita da Zuccari, sia sui lavori di fabbrica rimasti incompiuti, per i quali suggeriva modifiche funzionali:

Strumenti vene ha gran copia così di fissi come di mobili [...] e formano la più bella e preziosa collezione che mai non ho veduto in altr'osservatorio. [...] l'osservatorio così montato, e provveduto potrà per avventura primeggiare sù quanti son oggi in onore. [...] niente rimarrebbe a desiderarsi se la fabbrica si fosse immaginata con maggiore semplicità, e ordinata con maggiori comodi. Senza distruggere la parte più essenziale di quanto sinora si è

\* In questa rubrica, iniziata nel n. 1/2012, 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.

<sup>1</sup> Osservazioni fatte alla Specola di Minadois dal 17. Dicembre 1819 al 31. Gennajo 1820, ASOAC, *Attività Scientifica, Ricerca, Osservazioni di Carlo Brioschi*, B. 1, f. 1.

<sup>2</sup> Lettera di von Zach a Barnaba Oriani, Napoli 18 febbraio 1815, ASOAB, *Corrispondenza Scientifica*, cart. 104.

<sup>3</sup> Lettera di Piazzi a Barnaba Oriani, Palermo 20 gennaio 1815, ivi.

<sup>4</sup> Lettera di Zuccari a Francesco Carlini, Napoli 9 giugno 1812, ASOAB, *Corrispondenza Scientifica*, cart. 101.

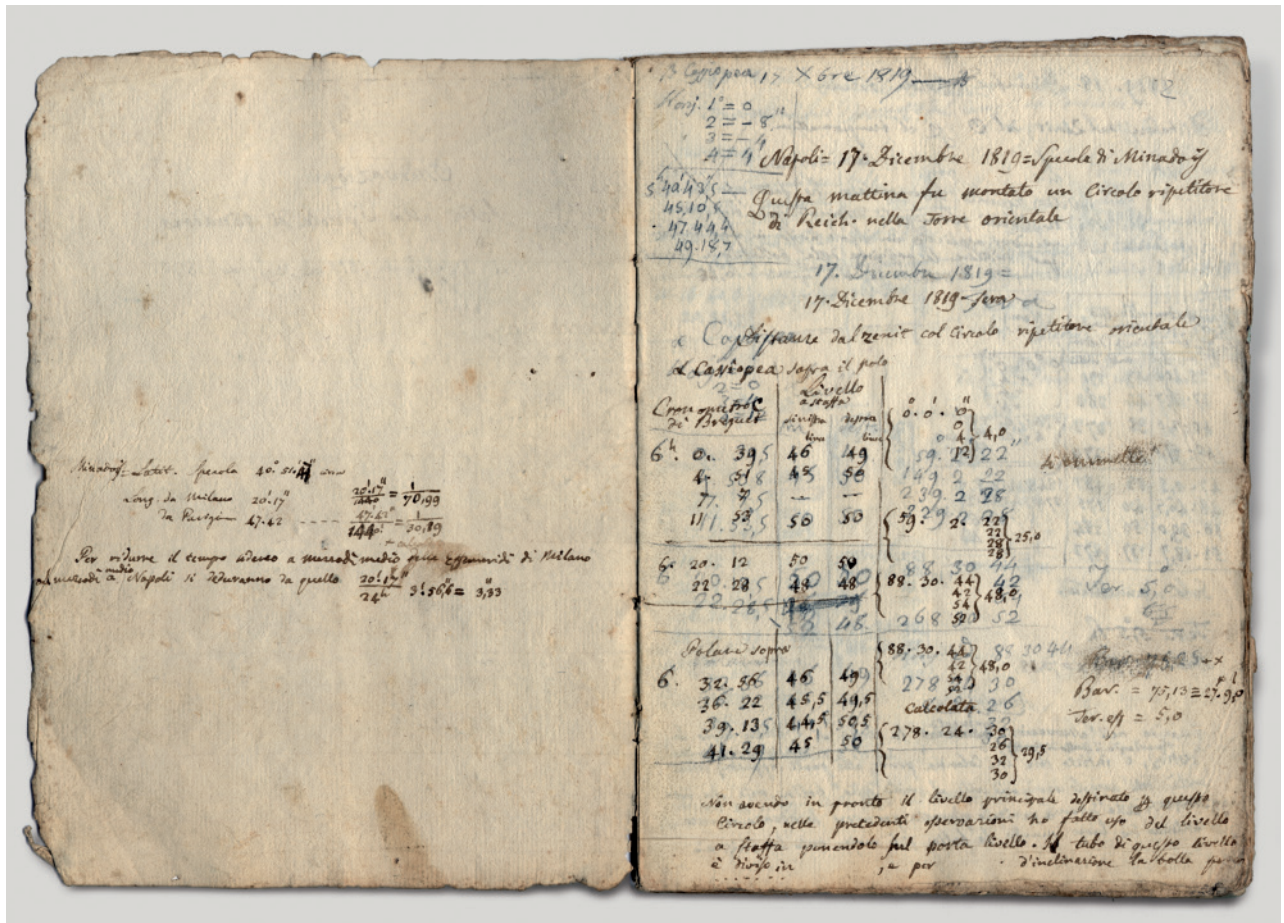


FIG. 1. La prima osservazione a Capodimonte di Carlo Brioschi.



FIG. 2. Ritratto di Carlo Brioschi, M. BARBATO, 1954, carboncino su carta.

fatto, e solo togliendo la stanza circolare formata da 16 colonne [...] si otterrebbe un edificio più adatto all'uopo, e di spesa minore.<sup>5</sup>

E così, nel giro di un anno e mezzo, padre Piazzì completò l'opera.<sup>6</sup> A lui si deve, inoltre, la scelta del primo direttore di Capodimonte, essendo prematuramente venuto a mancare, il 15 dicembre 1817, Federigo Zuccari. Per risolvere l'incombenza, Piazzì si rivolse all'amico e consigliere Barnaba Oriani (1752-1832), sollecitandolo a indicargli qualche bravo allievo di Brera «onesto, faticatore, burbero»<sup>7</sup> in grado di dirigere la Specola di Napoli. Oriani gli propose due nomi, Carlo Brioschi e Giovanni Inghirami

<sup>5</sup> *Rappresentanze al Re, ed al Ministero, Rapporto di Giuseppe Piazzì, Napoli 6 maggio 1817, ASOAC, Amministrazione, Lettere d'ufficio, B. 1, f. 1.*

<sup>6</sup> Per una puntuale e dettagliata ricostruzione delle vicende legate alla fondazione dell'Osservatorio Astronomico di Capodimonte si vedano: M. CAPACCIOLI, G. LONGO, E. OLOSTRO CIRELLA, *L'astronomia a Napoli dal Settecento ai giorni nostri. Storia di un'altra occasione perduta*, Napoli, Guida, 2009; M. GARGANO, E. OLOSTRO CIRELLA, M. DELLA VALLE, *Il tempio di Urania. Progetti per una specola astronomica a Napoli*, Napoli, INAF-Osservatorio Astronomico di Capodimonte, 2012; *Che il diavolo benedica i Pulcinella! Cronache napoletane, scientifiche e non, dell'astronomo von Zach*, a cura di M. Gargano, E. Olostro Cirella, M. Della Valle, Napoli, Pironti, 2015.

<sup>7</sup> Lettera di Piazzì a Barnaba Oriani, Napoli 22 aprile 1818, ASOAB, *Corrispondenza Scientifica*, cart. 107.



FIG. 3. “Veduta del Reale Osservatorio Astronomico di Capodimonte”, L. CERASOLI, A. PIZZALA, 1821 ca., acquaforte.

(1779-1851), segnalandogli in una lettera le note caratteriali e i pregi di entrambi. Piazzi non ebbe dubbi sulla scelta; preferì Brioschi, nonostante alcuni suoi difetti riconducibili a un’indole piuttosto schiva e introversa:

Parla poco? tanto meglio, opererà di vantaggio. Non scrive con eleganza? ciò non è difetto in un astronomo, che deve dire cose e non parole.<sup>8</sup>

Nato a Milano nel 1781, sin dai tempi dell’università Carlo Brioschi (FIG. 2) si rivelò uomo capace e pieno di interessi.<sup>9</sup> Dopo aver conseguito a pieni voti la laurea in ingegneria, cominciò a frequentare la Specola di Brera dove, oltre a dedicarsi allo studio dell’astronomia, iniziò a lavorare alle misurazioni topografiche per la creazione della nuova carta geografica della Lombardia. Appassionato di aeronavigazione, Brioschi approfondì le sue conoscenze in questo campo e il 22 agosto 1808 stabilì a Padova, insieme a Pasquale Andreoli (1774-1837), il record d’altezza con un pallone aerostatico: 8265 m. L’impresa purtroppo si concluse con un grave incidente che compromise per sempre la sua salute.

<sup>8</sup> Lettera di Piazzi a Barnaba Oriani, Napoli 1 agosto 1818, *ivi*.

<sup>9</sup> Per un ritratto approfondito di Carlo Brioschi si veda: M. GARGANO, *Carlo Brioschi, il primo astronomo di Capodimonte*, «Giornale di Astronomia», n. 2, 2016, pp. 10-16.

Nel 1818, Brioschi, desideroso di mettere in pratica le competenze astronomiche acquisite a Brera, avanzò la sua candidatura per la direzione dell’Osservatorio di Vienna; ma il destino decise per lui una soluzione diversa: Piazzi lo propose direttore della Specola partenopea. Giunto a Napoli nel giugno del 1819, rimase abbastanza deluso dalla nuova realtà che lo attendeva, come confidò anche all’amico Giovanni Santini (1787-1877):

Casa da piantare di nuovo; Specola da collocarvi tutti gli Istromenti, [...] e per questi far costruire tutti i pezzi di montatura ed accessori, assistere alla collocazione [...] Questa Specola è certamente una delle più scomode, tanto per essere fuori della Città quanto maggiormente per trovarsi sulla sommità della cosiddetta collina di Minadois di faticoso accesso. Nella scelta del luogo fu messo sotto i piedi il comodo degli astronomi, e nella costruzione della fabbrica si obliarono molti dei bisogni dell’astronomia. [...] Certamente in Napoli si sarebbe trovata situazione più comoda. A Zach, a Zuccari ed ultimamente a Piazzi si deve tutto il buono, e tutto il cattivo.<sup>10</sup>

Questo sfogo, naturalmente, mette a nudo il carattere di un uomo schietto e genuino ma appassiona-

<sup>10</sup> Minuta di lettera di Brioschi a Giovanni Santini, Napoli 29 marzo 1820, ASOAR, *Osservatorio del Collegio romano, Collezione degli autografi degli astronomi italiani, Santini Giovanni*, B. 71.

to del proprio lavoro e pronto a mettersi in gioco. Superati i primi ostacoli di natura ambientale, Brioschi si dedicò, con la scrupolosità che lo contraddistingueva, all'installazione degli strumenti scientifici che, realizzati e consegnati da Georg von Reichenbach (1771-1826) nel 1815, giacevano ancora nelle casse inutilizzati. Dall'autunno del 1819 sino alla primavera dell'anno successivo, completò la sistemazione di «due Ripetitori di tre piedi, un Canocchiale meridiano, un Circolo meridiano, un Equatoriale»,<sup>11</sup> verificandone meticolosamente collocazione e funzionalità, e rettificò gli «Orologi [...] montati colle [sue] mani [...] che gli orivolai di qui non erano ancora riusciti a far camminare».<sup>12</sup> Nel giro di sei mesi, Brioschi restituì alla comunità astronomica, che ora attendeva solo i risultati scientifici, un istituto totalmente funzionante, fuggendo così i timori di Piazzì rispetto a un osservatorio magnifico solo nella fabbrica e negli strumenti (FIG. 3).

Infatti, a partire da dicembre 1819 e per tutto il 1820, il direttore di Capodimonte intraprese una lunga serie di osservazioni, coadiuvato dai giovani astronomi dell'Osservatorio Ernesto Capocci (1798-1864) e Antonio Nobile (1794-1863) e, successivamente, dall'allievo Leopoldo Del Re (1804-1872). Produsse circa 400 serie di misure per le distanze zenitali di 33 stelle e 200 per gli azimut del Sole, per un totale di oltre 6000 osservazioni che pubblicò nel primo volume del catalogo stellare *Comentarj astronomici della Specola Reale di Napoli* (Tipografia nella Pietà de' Turchini, 1824-1826). La prematura morte, avvenuta a Napoli il 29 gennaio 1833, non gli consentì di pubblicare il secondo volume. L'opera fu molto ap-

<sup>11</sup> *Ibidem.*

<sup>12</sup> *Ibidem.*

prezzata e contribuì non poco ai successivi progressi, riconosciuti anche a livello internazionale, dell'astronomia napoletana.

I risultati dell'accurata ricerca scientifica compiuta a Capodimonte sono testimoniati dalle raffinate osservazioni di Capocci e Del Re per l'ora XVIII del catalogo stellare dell'Accademia delle Scienze di Berlino, dalle scoperte di nove asteroidi, compiute tra il 1849 e il 1865 da Annibale de Gasparis (1819-1892), e dalle intuizioni scientifiche sulle variazioni di latitudine di Arminio Nobile (1838-1897) ed Emanuele Fergola (1830-1915).

Oggi come allora le sfide continuano: l'osservazione di  $\alpha$  Cassiopeiae nella fredda sera del 17 dicembre 1819 ha rappresentato soltanto il punto di partenza di una storia che vede tuttora l'Osservatorio Astronomico di Capodimonte impegnato nei principali progetti internazionali per l'esplorazione del Sistema Solare e per lo studio del profondo universo.

#### IL DOCUMENTO (FIG. 1)

Pagina del diario di osservazioni di Carlo Brioschi con l'annotazione della sua prima osservazione a Capodimonte [Archivio storico dell'Osservatorio Astronomico di Capodimonte (ASOAC), *Attività scientifica, Ricerca, Osservazioni di Carlo Brioschi*].

**Emilia Olostro Cirella** è tecnologo all'INAF-Osservatorio Astronomico di Capodimonte, dove è responsabile della Biblioteca Antica e dell'Archivio Storico. Impegnata da anni nella tutela e valorizzazione del patrimonio bibliografico raro e di pregio del proprio Osservatorio, è referente scientifico per il progetto nazionale di catalogazione delle cinquecentine dell'INAF. Si occupa di ricerche storico-scientifiche con particolare riguardo all'astronomia napoletana.

---

**Agnese Mandrino** è responsabile della Biblioteca e dell'Archivio storico dell'Osservatorio Astronomico di Brera a Milano. Coordina il progetto "Specola 2000" per il riordino e la valorizzazione degli archivi storici degli Osservatori.

**Mauro Gargano**, laureato in Astronomia presso l'Università di Padova, è responsabile del Museo degli Strumenti Astronomici dell'Osservatorio Astronomico di Capodimonte a Napoli, dove si occupa anche di studi storici sull'astronomia, principalmente partenopea.

**Antonella Gasperini** è responsabile della Biblioteca e dell'Archivio storico dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri. Collabora con le attività di diffusione della cultura scientifica e di valorizzazione del patrimonio storico dell'Osservatorio.



# Spigolature astronomiche★

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS)

## L'immagine del buco nero nella galassia M87

Annibale D'Ercole

ALCUNE galassie producono *jet* estremamente collimati che si originano nel centro galattico. Il materiale espulso raggiunge velocità vicine a quella della luce ( $c = 300.000 \text{ km/s}$ ) e i *jet* possono arrivare ad essere molto estesi. È questo il caso della grande galassia ellittica M87, posta alla distanza di 55 milioni di anni luce, che contiene diverse centinaia di miliardi di stelle ed esibisce un *jet* lungo almeno 5000 anni luce (FIG. 1b).

Le straordinarie energie in gioco hanno indotto gli astronomi a ritenere che il "motore" all'origine di questo fenomeno sia un buco nero supermassiccio di diversi miliardi di masse solari. Come vedremo tra poco, il gas nei dintorni del buco nero non cade verso di esso seguendo una traiettoria radiale diretta, ma spiraleggiando in modo da creare il cosiddetto *disco di accrescimento*. Tuttavia, non tutto il gas del disco viene ingoiato dal buco nero; circa il 15% viene proiettato lungo la direzione dell'asse di rotazione formando due *jet* (FIG. 1a). È interessante notare che nella fotografia in FIG. 1b compare solo il *jet* diretto verso di noi, ma non quello opposto, come ci si aspetterebbe guardando la FIG. 1a. In realtà, questo *jet* è presente ma è reso invisibile dal cosiddetto *effetto Doppler relativistico* che intensifica la luminosità delle sorgenti luminose in avvicinamento e riduce drasticamente quella delle sorgenti in allontanamento quando si muovono con velocità vicine a quella della luce. Più tardi incontreremo ancora (e approfondiremo parzialmente) questo effetto discutendo del disco di accrescimento.

\* Questa rubrica 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 ad 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>.

Gli astronomi si sono impegnati per anni per individuare il buco nero all'origine del *jet* nel centro di M87. Nell'aprile di quest'anno i loro sforzi si sono concretizzati nella realizzazione dell'immagine divulgata da tutti i media e che pure noi riproduciamo (FIG. 1c). Essa è stata ottenuta grazie al telescopio EHT (Event Horizon Telescope) che consiste, in realtà, nell'impiego coordinato di svariati radiotelescopi (ne accenneremo più in là). Si tenga presente che il diametro della "ciambella" rossa visibile nell'immagine – rappresentante il disco di accrescimento – è di soli  $\approx 0,01$  anni luce. Questa disparità di dimensioni rispetto al *jet* rende evidente le enormi difficoltà tecniche che gli scienziati dell'EHT hanno dovuto superare per visualizzare quest'oggetto. L'interpretazione dell'immagine non è banale; in ciò che segue cercheremo di capirne meglio il significato.

Iniziamo dando una definizione, sia pure semplificata, di buco nero. Si tratta di un oggetto massiccio talmente compatto da possedere una forza di gravità capace di trattenere persino la luce. Più precisamente, è possibile associare ad ogni corpo il concetto di raggio di Schwarzschild  $R_s = 3(M/M_\odot) \text{ km}$  (si veda il livello avanzato), dove  $M$  è la massa del corpo e  $M_\odot$  quella del Sole. Con una certa approssimazione possiamo definire buco nero qualunque corpo con dimensioni inferiori a  $R_s$  (data la definizione di  $R_s$ , per diventare un buco nero il Sole, che ha un raggio di 700.000 km, dovrebbe venire compresso in una sfera con un raggio inferiore a 3 km). È possibile allora immaginare un'ideale superficie sferica con raggio  $R_s$  che circonda il buco nero denominata *orizzonte degli eventi*: qualunque oggetto all'interno del volume delimitato da questa superficie – ossia che si trovi a distanze dal centro inferiori o pari a  $R_s$  – non è in grado di attraversare tale orizzonte a causa dell'estrema forza attrattiva presente, e rimane legato gravitazionalmente al buco nero. Questo vale anche per la luce: i raggi luminosi eventualmente prodotti all'interno della superficie degli eventi e diretti verso l'esterno vengono deflessi e "risucchiati" verso il centro, rimanendo invisibili ad un osservatore esterno.

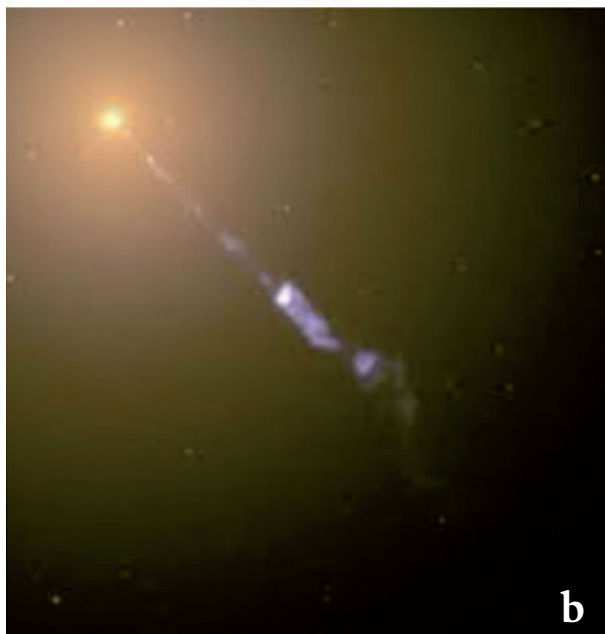
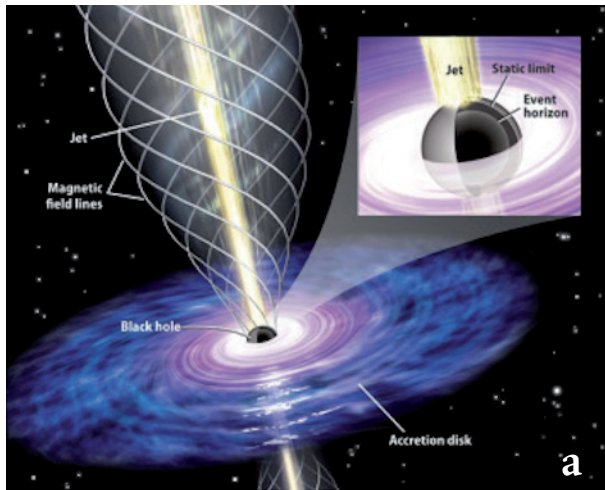


FIG. 1. Pannello a: rappresentazione della formazione di *jet* da parte di un buco nero. Il gas attratto dal buco nero si muove verso di esso spiraleggiando lungo il disco di accrescimento. Man mano che il gas si addensa vicino al buco nero, la pressione e il campo magnetico crescono al punto da "spruzzare" parte del gas lungo la direzione di minor resistenza, ossia verticalmente, lungo l'asse di rotazione. Si formano così *jet* altamente collimati che si muovono a velocità vicine a quella della luce. Pannello b: la galassia ellittica M87. L'alone luminoso è dovuto alle centinaia di miliardi di stelle della galassia troppo distanti per poter apparire individualmente come singoli puntini luminosi. È chiaramente visibile il *jet* di M87 che si origina nel centro galattico e si estende verso di noi per circa 5000 anni luce. Pannello c: l'immagine ottenuta dal telescopio EHT. È visibile il disco di accrescimento che circonda la regione centrale nera detta "ombra del buco nero" (si veda il testo). Le misurazioni sono state eseguite alla lunghezza d'onda di 1,3 mm, ben al di fuori dello spettro visibile (0.0004 – 0.0007 mm). Per questo motivo gli astronomi hanno colorato artificialmente l'immagine con tonalità proporzionali all'intensità di emissione (dal rosso cupo per le regioni meno luminose al rosso vivo e poi al bianco per quelle più luminose).

cia di avvicinamento" il gas diventa sempre più caldo e luminoso. In conclusione, ciò che si può riuscire ad osservare direttamente non è il buco nero in sé, ma il disco gassoso che lo circonda. L'esistenza del buco nero è testimoniata dalla presenza di un'area circolare scura da cui non giunge alcuna radiazione e che si staglia contro lo sfondo luminoso dato dal gas in accrescimento (il "buco" della "ciambella" di FIG. 1c). Contrariamente a quanto si sarebbe portati a credere, le dimensioni della "silhouette" del buco nero sono maggiori di quelle dell'orizzonte degli eventi: ad un osservatore distante il disco scuro appare avere un raggio pari a  $2,6R_s$ , anziché  $R_s$ . Tale disco viene detto "ombra" del buco nero; la sua magnificazione è dovuto alla forte distorsione dei raggi luminosi a causa della gravità (si veda il livello avanzato) e rappresenta un indubbio aiuto per i "cacciatori" di buchi neri.

Più tardi vedremo come dall'analisi dell'ombra è possibile ricavare utili informazioni sul buco nero. Prima, però, passiamo ad esaminare le peculiarità presenti nell'immagine del disco di accrescimento per via della teoria della relatività generale.

Consideriamo Saturno e i suoi anelli circolari come rappresentativi di un sistema classico, un sistema, cioè, dove la gravità esercitata dal pianeta è debole e i raggi luminosi emessi dagli anelli si propagano in linea retta. Immaginiamo inoltre di osservare il sistema da un punto di vista leggermente al di sopra del piano individuato dagli anelli. Naturalmente, una parte degli anelli è nascosta dal pianeta, ma è facile ricostruire il loro aspetto ellittico (dovuto alla prospettiva). Nel caso di un disco rotante attorno ad un buco nero le cose sono assai diverse. In questo caso è possibile vedere la parte superiore della porzione posteriore del disco nella sua totalità, indipendentemente dall'angolo di vista. L'immagine di questa porzione viene deformata ed indirizzata verso l'osservatore dall'effetto distorcente esercitato dalla gravità sul percorso dei raggi luminosi. Ancora più sorprendentemente, l'osservatore è in grado di visualizzare anche il lato inferiore del disco. I

Da quanto appena detto, risulta impossibile fotografare un buco nero! Tuttavia i buchi neri non sono isolati, ma attraggono a sé gas strappato a nubi interstellari o a stelle nelle vicinanze. Come abbiamo anticipato poc'anzi, questo gas si avvicina al buco nero spiraleggiando sul disco di accrescimento fino ad essere fagocitato definitivamente (con l'eccezione, come abbiamo visto, di una piccola quota che viene convogliata lungo i *jet*). Durante questa "mar-

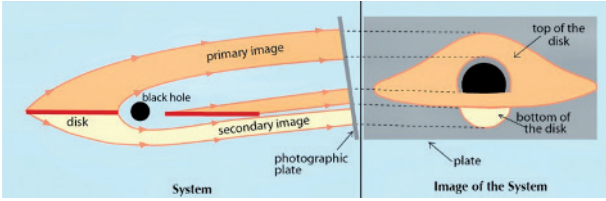


FIG. 2. Distorsione della luce vicino a un buco nero circondato da un disco luminoso circolare. Il sistema è osservato a grande distanza ad un angolo di  $10^\circ$  rispetto al piano del disco. I raggi luminosi vanno ad impressionare una lastra fotografica (posta a destra del buco nero). Sia il disco che la lastra sono rappresentati “di taglio”, rispettivamente, da due segmenti orizzontali rossi e da uno obliquo grigio. Nel riquadro a destra è rappresentato il sistema come appare sulla lastra fotografica. A causa della curvatura dei raggi luminosi dovuti alla forte gravità del buco nero, il disco non appare di forma ellittica, a causa della prospettiva, come risulterebbe se circondasse una stella ordinaria o un pianeta. La radiazione emessa dalla parte superiore del disco “alle spalle” del buco nero, benché “coperta” da quest’ultimo, è completamente visibile, sebbene distorta, a causa dell’“aggiramento” dell’ostacolo da parte dei raggi luminosi. Questo meccanismo vale anche per la radiazione emessa dal lato inferiore del disco, che forma quindi un’immagine secondaria (in giallo chiaro nella figura).

raggi luminosi – che normalmente si dirigerebbero in basso, allontanandosi dall’osservatore – vengono curvati e, dopo aver aggirato il buco nero, danno luogo ad un’immagine secondaria, una rappresentazione deformata del lato inferiore del disco (FIG. 2). Va sottolineato che ben poca radiazione può provenire dalla regione compresa tra il raggio interno del disco pari a  $3R_s$  e l’orizzonte degli eventi. Infatti, l’orbita spiraleggiante quasi circolare del gas nel disco può essere mantenuta fino ad una distanza critica pari a tre raggi di Schwarzschild (si veda il livello avanzato). A distanze inferiori dal buco nero il disco è instabile, e il gas cade oltre l’orizzonte degli eventi così rapidamente da non avere tempo di emettere una grande quantità di radiazione.

È interessante notare che, a causa dell’elevata gravità, si generano un’infinità di immagini del disco perché i raggi luminosi possono percorrere un numero qualunque di giri attorno al buco nero prima di sfuggire alla sua morsa ed essere osservati da un astronomo distante. L’immagine primaria mostra il lato superiore, l’immagine secondaria quello inferiore, la terza immagine mostra di nuovo il lato superiore, e così via (FIG. 3). Tuttavia, le immagini di ordine superiore non sono interessanti perché sono deboli e molto vicine al bordo dell’ombra (FIG. 4).

Per avere un’idea realistica di come ci si aspetta che appaia la luminosità di un disco di accrescimento attorno ad un buco nero, è necessario tener conto delle sue proprietà fisiche come la temperatura e la rotazione. L’intensità della radiazione emessa è tanto maggiore quanto maggiore è la temperatura, e quest’ultima dipende dalla distanza radiale dal buco nero ed è più alta nelle sue vicinanze; infatti, il gas si comprime man mano che si concentra verso il buco nero e di conseguenza la sua temperatura aumenta (com’è facile verificare quando, gonfiando le ruote della bicicletta, notiamo che la pompa si scalda a causa della compressione dell’aria al suo

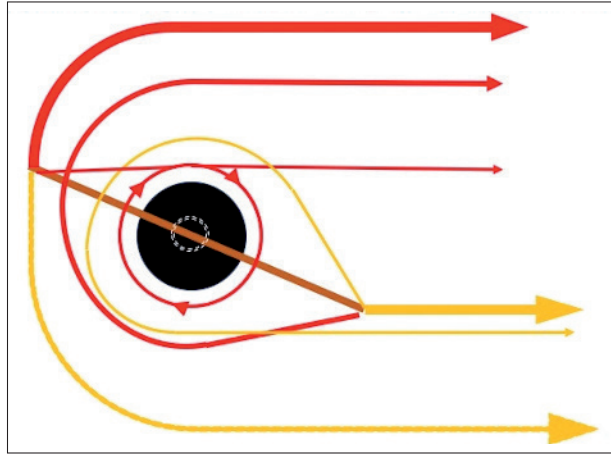


FIG. 3. Formazione di immagini di diverso ordine. La sfera nera rappresenta l’ombra del buco nero (con raggio  $2,6R_s$ ), mentre il cerchio tratteggiato (con raggio  $R_s$ ) indica l’orizzonte degli eventi. La linea diagonale marrone che li attraversa schematizza il disco di accrescimento visto di taglio. Le frecce rappresentano raggi luminosi diretti verso un osservatore posto a destra. I raggi più spessi danno luogo all’immagine principale, quelli intermedi (più curvati) all’immagine secondaria, e quelli più sottili all’immagine del terzo ordine (si veda la FIG. 4). Si noti che questi ultimi sono quelli più distorti perché, passando più vicino al buco nero, compiono un intero giro attorno ad esso prima di raggiungere l’osservatore. Il raggio rosso più in alto e quello giallo più in basso sono equivalenti ai raggi illustrati nel pannello di sinistra della FIG. 2.

interno). Pertanto, la luminosità del disco non può essere uniforme, ma è massima nelle regioni centrali vicine all’ombra del buco nero, dove la temperatura può arrivare a miliardi di gradi.

Un secondo effetto che influenza la luminosità del disco è dato dal cosiddetto *redshift*, ovvero la variazione in frequenza cui è sottoposta la radiazione emessa. Vi sono due tipi di *redshift*. Uno è dovuto al campo gravitazionale che riduce la frequenza e dunque l’intensità della radiazione emessa;<sup>1</sup> l’altro è dovuto all’effetto Doppler (di cui abbiamo accennato all’inizio) che intensifica la radiazione se la sorgente si muove verso l’osservatore, e la indebolisce in caso contrario.<sup>2</sup> Quest’ultimo effetto si verifi-

<sup>1</sup> Quando lanciamo un oggetto nello spazio, esso è contrastato dalla gravità della Terra e riduce la sua energia cinetica – e dunque la sua velocità – per riuscire a svincolarsi dall’energia di legame gravitazionale del pianeta. Anche un fotone “in fuga” perde energia, ma la sua velocità rimane  $c = 300.000 \text{ km/s}$ , giacché questa sua caratteristica è una costante della natura; in realtà l’energia di un fotone è proporzionale alla sua frequenza  $\nu$ :  $E = h\nu$ , dove  $h$  rappresenta la costante di Plank. Pertanto un fotone in allontanamento da un pianeta o da una stella riduce la sua energia riducendo la propria frequenza: in questo consiste il *redshift* gravitazionale.

<sup>2</sup> L’effetto Doppler relativistico dà luogo al fenomeno del *beaming*. Una sorgente sferica che irradia isotropicamente (cioè in tutte le direzioni in ugual misura) si rende visibile ad un osservatore distante solo grazie ad una minima parte della sua luminosità, ossia quella inviata proprio in direzione dell’osservatore stesso. Se la stessa sorgente si muove a velocità relativistiche, l’emissione diventa altamente anisotropa e la radiazione viene (quasi) tutta convogliata in avanti, lungo la direzione del moto; la sorgente si comporta come una torcia elettrica. Se il moto è in direzione dell’osservatore, la sorgente gli appare molto più luminosa. Al contrario, le sorgenti in allontanamento possono ridurre la loro luminosità apparente fino a diventare inosservabili (come succede per uno dei *jet* di M87).

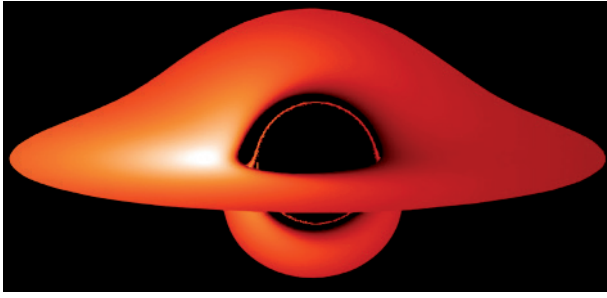


FIG. 4. Simulazione al computer mediante *ray tracing* dell'aspetto di un disco di accrescimento attorno a un buco nero, come appare ad un osservatore distante. La figura è analoga al pannello destro di FIG. 2, ma con importanti dettagli in più. Sono presenti due sottili archi a ridosso dell'ombra del buco nero, circondandola: si tratta dell'immagine del terzo ordine del disco (dovuta ai raggi più sottili mostrati in FIG. 3). Inoltre, la scala di colore adottata per il disco non è uniforme ma si estende dal rosso cupo delle regioni meno luminose al rosso vivo e al bianco per quelle più luminose. Si veda il testo per i dettagli.

ca a causa della rotazione del disco che, nei pressi del buco nero, può raggiungere velocità prossime a quella della luce. Con riferimento alla FIG. 4 (ottenuta tramite modelli elaborati al computer), il senso di rotazione è tale per cui le regioni sulla sinistra dell'immagine si muovono verso l'osservatore e quelle sulla destra invece recedono. In quest'ultime regioni l'attenuazione luminosa dovuta all'effetto Doppler si aggiunge a quella dovuta al *redshift* gravitazionale, e questo spiega la bassa luminosità di questa zona. Nelle regioni di sinistra, invece, l'effetto Doppler prevale sul *redshift* gravitazionale, e l'intensità luminosa risulta maggiore.

Quanto abbiamo detto finora si riferisce ad un buco nero non rotante. In realtà i buchi neri ruotano vigorosamente, com'è testimoniato dai *jet* lanciati lungo l'asse di rotazione (FIG. 1a) e che traggono la loro energia proprio da tale rotazione. Tuttavia, le considerazioni generali esposte fin qui possono comunque ritenersi valide anche in caso di buchi neri rotanti, sia pure con qualche differenza. Ad esempio, nel caso di un buco nero rotante l'orbita stabile più interna ha un raggio inferiore a  $3R_s$ , e il bordo interno del disco va a lambire l'orizzonte degli eventi. Inoltre, l'ombra del buco nero non appare perfettamente circolare.

E veniamo finalmente a commentare l'immagine divulgata lo scorso aprile (FIG. 1c). A prima vista può sembrare deludente, una sorta di alone sfocato, una ciambella disomogenea che non rassomiglia alle belle immagini ottenute al computer (FIG. 4). Questo è dovuto al fatto che l'attuale tecnologia, sia pure spinta al massimo come nel caso dell'EHT, non permette immagini più nitide (benché l'aver individuato l'ombra del buco nero attorniato dal disco di accrescimento sia già di per sé un risultato straordinario). Tuttavia, sono previste nei prossimi anni osservazioni dotate di maggiore risoluzione spaziale (si veda più sotto).

In ogni caso, è già possibile estrarre numerose informazioni dall'immagine attuale. Innanzi tutto es-

sa rappresenta la prima prova *diretta* dell'esistenza dei buchi neri e costituisce un'ennesima conferma della teoria della relatività generale. Dalle dimensioni dell'ombra si è poi ricavato  $R_s = 1.87 \times 10^{10}$  km e, conseguentemente, una massa del buco nero pari a  $6.5 \times 10^9 M_\odot$  (si ricordi la relazione tra  $M$  e  $R_s$  data più sopra). Inoltre, l'ombra presenta una leggera asimmetria che devia dalla perfetta circolarità per meno del 10%; questo indizio indica che il buco nero ruota, giacché un buco nero non rotante è supposto avere un'ombra circolare.

È noto, poi, che il *jet* di M87 risulta inclinato di un angolo di  $17^\circ$  verso destra (cioè verso ovest) rispetto alla nostra linea di vista; dal momento che il disco è ortogonale al *jet*, risulta anch'esso inclinato nella stessa direzione e con lo stesso angolo. Sappiamo altresì, da quanto discusso più sopra, che le regioni del disco che si muovono verso di noi a causa della rotazione appaiono più luminose per via dell'effetto Doppler. Queste regioni sono posizionate nella metà inferiore del disco; data la prospettiva appena descritta, possiamo dunque concludere che il disco ruota in senso orario. I modelli teorici mostrano poi che, se il buco nero ruotasse in senso opposto al disco, le regioni più luminose si troverebbero nella metà superiore del disco stesso, in contrasto con quanto osservato; pertanto il disco e il buco nero sono corotanti.

Inoltre, dato il piccolo angolo di inclinazione, noi vediamo il disco quasi "di faccia", una prospettiva ben diversa da quella del modello in FIG. 4, dove il disco è visto quasi "di taglio"; pertanto il "lobo" inferiore che appare in questa figura non è visibile in M87 perché viene coperto dalla parte anteriore del disco.

Infine, i modelli al computer compatibili con le osservazioni mostrano che il buco nero "divora" ogni anno una quantità di materia pari a 900 volte quella della Terra.

Non possiamo concludere questo livello base senza accennare all'enorme sforzo tecnologico e organizzativo resosi necessario per ottenere l'immagine in FIG. 1c. Il telescopio EHT è uno strumento non meno rimarchevole degli oggetti che osserva. Grazie alla collaborazione di 200 ricercatori, EHT non adopera un singolo radiotelescopio, ma utilizza una rete di numerose antenne situate dalla Groenlandia al Polo Sud e dalle Hawaii alle Alpi francesi (FIG. 5). L'elevato numero di antenne è dovuto al fatto che, ovviamente, il segnale intercettato è tanto maggiore quanto più numerosi sono i radiotelescopi i cui dati vengono sincronizzati tramite orologi atomici, e questo permette anche una maggiore risoluzione spaziale. Successivamente, mediante una tecnologia d'avanguardia e strumenti matematici complessi, gli scienziati combinano i dati provenienti da tutti i telescopi ottenendo un'immagine la cui risoluzione dei dettagli spaziali è simile a quella che si otterrebbe con un singolo telescopio del diametro della massima distanza tra



FIG. 5. Rete degli 8 radiotelescopi posti in 4 continenti che costituiscono l'EHT. Operano alla lunghezza d'onda (radio) di 1,3 mm

le antenne utilizzate<sup>3</sup> ( $\approx 10.000$  km). Questo consente all'EHT di raggiungere una risoluzione angolare di 20 micro secondi d'arco ( $1 \mu\text{as} = 10^{-6}$  arcsec) sufficiente a distinguere una pallina da ping pong posta sulla Luna, e adeguata a risolvere il disco di accrescimento che sottende un angolo di circa 50  $\mu\text{as}$ . Immagini dotate di maggiore risoluzione spaziale potranno essere ottenute il prossimo anno, riducendo la lunghezza d'onda di osservazione dall'attuale  $\lambda = 1,3$  mm a  $\lambda = 0,8$  mm, e aggiungendo più radiotelescopi (si veda la nota 3). In un futuro più distante potranno essere utilizzati radiotelescopi orbitanti attorno alla Terra.

*Prima di esaminare ciò che accade nei pressi di un buco nero, è utile richiamare alcune nozioni di fisica classica valide per descrivere le traiettorie di una*

<sup>3</sup> A causa della natura ondulatoria della luce, quando un raggio luminoso incontra un ostacolo, esso viene parzialmente deviato tramite il fenomeno della *diffrazione*. Un fronte luminoso che attraversa la lente di un cannocchiale o venga riflesso dallo specchio di un telescopio o dalla parabola di un radiotelescopio viene "disturbato" dai bordi di questi oggetti e non riesce a riprodurre correttamente sul piano focale una sorgente puntiforme come una stella, che appare invece come una "macchiolina" con un diametro maggiore del reale detto *diametro di diffrazione*. È chiaro allora che due stelle che sulla sfera celeste sono separate da una distanza angolare inferiore al diametro di diffrazione non saranno risolte spazialmente e appariranno sul piano focale come un oggetto unico. Il diametro (angolare) di diffrazione è dell'ordine di  $\lambda/D$ , dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda della radiazione osservata e  $D$  il diametro della lente o della parabola di un radiotelescopio. L'EHT sfrutta una complessa tecnica detta VLBI (Very Long Baseline Interferometry) in base alla quale  $D$  è dato dalla massima distanza tra i radiotelescopi, riducendo drasticamente il diametro di diffrazione e aumentando in pari misura la risoluzione spaziale, ovvero la capacità di individuare dettagli in una sorgente estesa come il disco di accrescimento.

particella o di un piccolo oggetto (p.e. un asteroide) nei pressi di un attrattore gravitazionale (p.e. la Terra o il Sole) la cui gravità, non particolarmente intensa, può essere descritta secondo la classica formula newtoniana.

Si consideri un oggetto di massa  $m$  che si muove verso l'attrattore di massa  $M \gg m$  provenendo da una grande distanza. Com'è noto, la sua energia totale  $E$  è data dalla somma dell'energia potenziale<sup>4</sup>  $U = -GMm/r$  (dove  $G$  è la costante gravitazionale e  $r$  è la distanza dell'oggetto dal centro dell'attrattore) e dell'energia cinetica  $T = 0,5mv^2$  (dove  $v$  è la velocità dell'oggetto). Durante il tragitto  $T$  e  $U$  variano, ma l'energia totale  $E = T+U$  non cambia.  $U$ , con il suo segno negativo, rappresenta l'energia gravitazionale che lega  $m$  a  $M$ . Per riuscire a svincolare l'oggetto dalla morsa gravitazionale dell'attrattore e spostarlo a distanza formalmente infinita è necessario fornirgli un'energia positiva che sia superiore al modulo di  $U$  (cioè  $|U|$ , il valore di  $U$  preso col segno più). Se, pertanto, l'energia cinetica è  $T > |U|$ , e quindi  $E = T+U > 0$ , l'oggetto si avvicinerà all'attrattore ma riuscirà poi allontanarsi indefinitamente. Se, al contrario, si ha  $E < 0$ , l'oggetto è destinato a rimanere "agganciato" all'attrattore e ad orbitargli attorno.

È possibile approfondire in parte questi concetti senza addentrarsi nelle complesse equazioni che regolano il problema dei due corpi che stiamo considerando. Innanzi tutto notiamo che è sempre possibile scomporre la velocità in una componente radiale  $v_r$  ed una componente ortogonale a questa: le due componenti sono legate dall'usuale relazione  $v^2 = v_r^2 + v_\perp^2$  dettata dal teorema di Pitagora (si veda il pannello superiore di FIG. 6). Sottolineiamo poi che  $c'$  è anche un'altra grandezza che rimane costante lungo tutta la traiettoria: il momento angolare<sup>5</sup>  $\ell = mrv_\perp$ . Questo ci permette di riscrivere l'energia totale nel seguente modo (in quel che segue abbiamo posto che la massa della particella sia unitaria, p.e.  $m = 1$  g oppure  $m = 1$  kg, a seconda del sistema di unità scelto; pertanto le energie e il momento angolare devono intendersi per unità di massa):

<sup>4</sup> Per i lettori con qualche nozione di analisi matematica ricordiamo che l'energia potenziale di una particella di massa  $m$  posta alla distanza  $r_0$  da un attrattore di massa  $M$  rappresenta l'energia necessaria per portare tale particella all'infinito, ossia il lavoro compiuto lungo tale tragitto contro la forza di gravità  $F_g$ . Per un piccolo spostamento  $dr$  il lavoro compiuto (Forza  $\times$  spostamento) è  $d\mathcal{L} = -F_g dr$  (il segno meno è dovuto al fatto che lo spostamento è verso l'esterno mentre la forza è diretta verso il centro). Per calcolare il lavoro fino all'infinito è necessario calcolare l'integrale

$$\int_{r_0}^{\infty} d\mathcal{L} = - \int_{r_0}^{\infty} \frac{GMm}{r^2} dr = - \frac{GMm}{r_0}$$

<sup>5</sup> Un classico esempio di conservazione del momento angolare è dato dalla pattinatrice che, avvicinando le braccia al corpo (riducendo  $r$ ) aumenta la velocità di rotazione su se stessa ( $v_\perp$ ) perché il prodotto  $rv_\perp$  rimane costante.

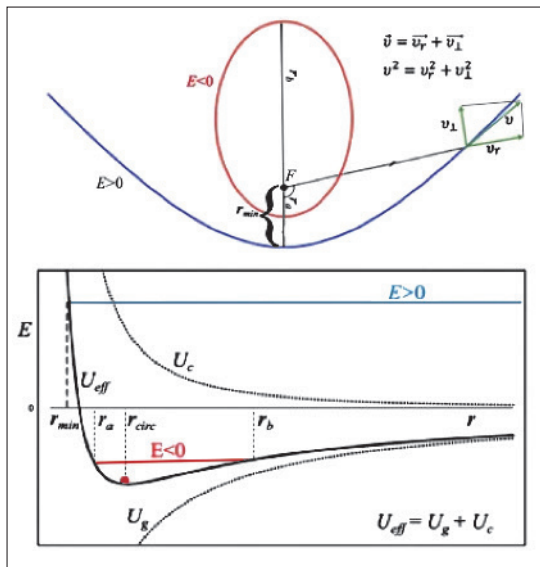


FIG. 6. Pannello superiore: possibili traiettorie di un oggetto sottoposto all'azione gravitazionale di un attrattore posto in  $F$ . Se l'oggetto è dotato di energia negativa non riesce a svincolarsi dall'attrattore e vi ruota attorno seguendo un'orbita ellittica. Se invece è dotato di energia positiva, pur risentendo dell'azione gravitazionale dell'attrattore che ne deflette la traiettoria, riesce ad allontanarsi indefinitamente, ed è slegato gravitazionalmente dall'attrattore stesso. Pannello inferiore: a dispetto delle apparenze, l'interpretazione di questa figura è alquanto semplice. La linea spessa nera rappresenta l'andamento radiale del potenziale efficace  $U_{eff}$  ed è dato dalla somma del potenziale gravitazionale  $U_g$  e centrifugo  $U_c$ , entrambi raffigurati dalle curve punteggiate. La linea rossa rappresenta l'energia totale negativa di un oggetto "intrappolato" all'interno della buca di potenziale e costretto a muoversi lungo un'orbita che lo porta a distanze dall'attrattore comprese tra  $r_a$  e  $r_b$  (si veda il pannello superiore). La pallina rossa in fondo alla buca rappresenta un oggetto con la minima energia (a parità di momento angolare) che rimane sempre a distanza  $r_{circ}$  dall'attrattore, e la cui traiettoria è dunque circolare. La linea blu rappresenta invece l'energia totale positiva di un oggetto che è in grado di allontanarsi indefinitamente, ma non può avvicinarsi all'attrattore a distanze inferiori di  $r_{min}$  a causa della barriera centrifuga (si veda il pannello superiore). Si noti che le linee rossa e blu sono orizzontali perché l'energia di un oggetto rimane costante lungo la traiettoria, e quindi non dipende da  $r$ . I lettori più accorti avranno notato che nel pannello superiore  $r_{min} > r_a$ . Questo significa che l'oggetto che percorre la traiettoria blu ha un momento angolare maggiore rispetto a quello orbitante lungo l'ellisse; se infatti avesse un momento angolare uguale si avrebbe  $r_{min} < r_a$ , come si vede nel pannello inferiore.

$$E = \frac{1}{2}v^2 - \frac{GM}{r} = \frac{1}{2}v_r^2 + \frac{1}{2}v_t^2 - \frac{GM}{r}, \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2}v_r^2 + \frac{1}{2}\frac{\ell^2}{r^2} - \frac{GM}{r} = \frac{1}{2}v_r^2 + U_{eff}$$

dove il potenziale effettivo è definito come

$$U_{eff} = \frac{1}{2}\frac{\ell^2}{r^2} - \frac{GM}{r}. \quad (2)$$

Dunque il potenziale effettivo cui è sottoposta la particella è composto dall'usuale termine attrattivo (negativo) dovuto alla gravità, e da un termine

repulsivo (positivo) dovuto alla forza centrifuga che insorge al ruotare della particella attorno all'attrattore. Data la diversa dipendenza da  $r$ , man mano che la particella si avvicina all'attrattore quest'ultimo termine prevale e impedisce alla particella di raggiungere  $r = 0$  (eccetto il caso in cui la particella si avvicini lungo una traiettoria perfettamente radiale, nel qual caso il momento angolare è nullo e la barriera centrifuga è assente). Nel caso in cui l'energia totale sia positiva l'oggetto proveniente da grandi distanze si avvicina fino ad una distanza  $r_{min}$  per poi allontanarsi di nuovo a grandi raggi senza cadere sull'attrattore, a meno che questo non abbia un raggio maggiore di  $r_{min}$ . Se invece l'oggetto ha un'energia  $E < 0$ , esso rimane intrappolato nella buca di potenziale e segue un'orbita ellittica muovendosi da una distanza minima  $r_a$  ad una massima  $r_b$ ; neanche in questo caso l'oggetto cade sulla superficie dell'attrattore, a meno che quest'ultimo non abbia un raggio maggiore di  $r_a$ . La FIG. 6 illustrante l'andamento radiale di  $U_{eff}$  e i diversi tipi di traiettorie risulta particolarmente utile per chiarire i concetti appena esposti.

Passiamo ora ad esaminare cosa succede agli oggetti in orbita nei pressi di un buco nero. Prima di farlo, però, è necessario definire il concetto di raggio di Schwarzschild che caratterizza ogni oggetto gravitante. Consideriamo il caso in cui una particella sia posta sulla superficie dell'attrattore, e dotata quindi di un'energia potenziale  $U = -GMm/R$ , dove  $R$  è il raggio dell'attrattore stesso. Per poter lanciare la particella nello spazio senza che faccia più ritorno, è necessario – per quanto detto più sopra – fornirle un'energia cinetica  $T \geq |U|$ , ossia una velocità  $v \geq (2GM/R)^{0.5}$ , detta velocità di fuga (si noti che questa velocità non dipende da  $m$ , ma solo da  $M$ : per la Terra essa vale circa 11 km/s). Risulta chiaro che se l'attrattore è particolarmente compatto (se cioè  $R$  è molto piccolo) la velocità di fuga può crescere fino a raggiungere o superare  $c$ , la velocità della luce. Data la definizione di velocità di fuga, questo avviene se l'attrattore ha un raggio pari o inferiore a  $R_s = 2GM/c^2 \sim 3(M/M_\odot)$ . Questo raggio è detto raggio di Schwarzschild. Da oggetti con dimensioni inferiori a  $R_s$  nulla può fuoriuscire – neanche la luce – perché la velocità di fuga è superiore a  $c$ , la massima velocità raggiungibile in natura. Per questo motivo questi oggetti sono detti buchi neri.

È facile verificare che alla distanza del raggio di Schwarzschild abbiamo  $GMm/R_s = 0,5mc^2$ , ossia l'energia potenziale di una particella calcolata classicamente è dell'ordine dell'energia associata alla sua massa secondo la nota formula di Einstein  $\epsilon = mc^2$ . Questo fatto ci segnala che i fenomeni nei dintorni di un buco nero avvengono in regime relativistico e non possono essere descritti dalla gravità newtoniana, ma piuttosto dalla teoria della relati-

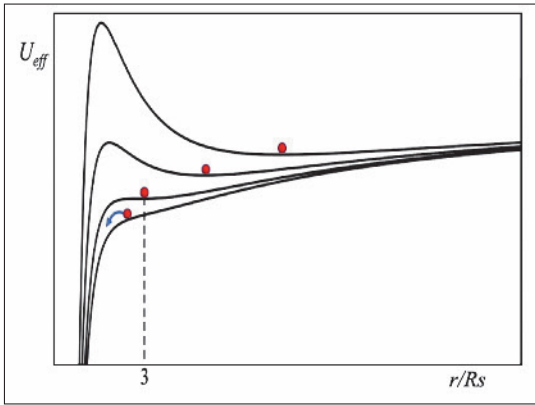


FIG. 7. Profili radiali del potenziale effettivo di un buco nero per valori decrescenti del momento angolare (a partire dall'alto). Come nel caso classico, le palline rosse indicano oggetti con la minima energia possibile, e dunque posti nel fondo (locale) della buca di potenziale e dotati perciò di orbite circolari. Il terzo profilo è dato dall'ultimo possibile valore di  $\ell$  che dà luogo ad un'orbita circolare stabile con  $r = 3R_s$ . Ad  $\ell$  minori non esistono orbite stabili (si consideri l'ultimo profilo di  $U_{\text{eff}}$  dove manca una "buca" in cui poter collocare stabilmente una pallina senza che questa rotoli giù verso il centro). A differenza del caso classico, manca una barriera centrifuga che tenda ad infinito, ma è presente solo un picco di altezza limitata. Dunque, particelle con energia sufficiente possono superare il picco e cadere nel buco nero. In conclusione, il buco nero è in grado di catturare sia particelle dotate di momento angolare con alta energia, sia particelle con basso (ma non nullo) momento angolare.

vità generale di Einstein. Noi ovviamente ci asterremo dal farlo, ma daremo direttamente il risultato finale che è assai simile al risultato classico – si veda l'eq. (1) – se si esclude la presenza di un terzo termine nella espressione di  $U_{\text{eff}}$  (in realtà in questo caso i concetti di energia totale e distanza radiale andrebbero utilizzati con maggiore cautela, ma noi non lo faremo in questa sede)

$$U_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \frac{\ell^2}{r^2} - \frac{GM}{r} - \frac{GM\ell^2}{c^2 r^3}.$$

Come si vede, anche questo nuovo termine è legato al momento angolare, ma, contrariamente al primo, è preceduto dal segno negativo e contribuisce quindi ad esercitare un'attrazione come il termine gravitazionale. Per una comprensione intuitiva di questo comportamento – opposto a quello repulsivo classico – dobbiamo considerare che l'energia legata al moto rotatorio attorno al buco nero contribuisce ad aumentare la massa della particella secondo la solita formula  $\epsilon = mc^2$ , e questo aumenta la gravità che agisce su di essa.

La FIG. 7 mostra l'andamento radiale di  $U_{\text{eff}}$  nel caso relativistico per diversi valori di  $\ell$ . Un paragone con la FIG. 6 illustra il ruolo giocato dal termine attrattivo relativistico collegato al momento angolare. Ora la barriera centrifuga non si erge fino all'infinito per  $r$  che tende a 0, ma si limita a raggiungere un picco che è tanto minore quanto mino-

re è  $\ell$ . Questo fa sì che, contrariamente al caso classico, oggetti in avvicinamento con alta energia (superiore al picco di  $U_{\text{eff}}$ ) sono in grado di raggiungere  $r = 0$  anche se dotati di momento angolare. Un secondo aspetto che merita di essere evidenziato è che oggetti con un momento angolare inferiore ad un determinato valore critico (ma comunque diverso da zero) non sono in grado di orbitare stabilmente attorno al buco nero ma vengono risucchiati inevitabilmente da quest'ultimo. Dalla FIG. 7 impariamo che l'ultima orbita circolare stabile ha un raggio pari a  $3R_s$ . Orbite circolari con  $r < 3R_s$  sono instabili e la particella precipita rapidamente verso il buco nero.

Quanto detto finora per l'orbita di una particella materiale vale qualitativamente anche per la traiettoria di un fotone. In questo caso, tuttavia, l'orbita circolare più vicina possibile ha raggio  $1,5R_s$  invece che  $3R_s$ . Inoltre, quest'orbita è instabile e il fotone, dopo aver compiuto uno o più giri lungo essa, l'abbandona e spiraleggia verso il centro oppure verso l'esterno. La sfera ideale di raggio  $1,5R_s$  centrata sul buco nero viene detta "sfera di luce" o "sfera fotonica".

Tutto questo ha importanti conseguenze dal punto di vista osservativo. Un fotone che si trovi ad una distanza compresa nell'intervallo  $R_s < r < 1,5R_s$  è destinato a spiraleggiare nel buco nero (se si esclude il caso, statisticamente poco probabile, che la sua traiettoria abbia una direzione sostanzialmente radiale). Di conseguenza, l'area di sfera celeste occultata dal buco nero non è semplicemente un disco di raggio  $R_s$ , come si sarebbe portati a credere, ma è dovuta alla sfera di luce le cui dimensioni appaiono inoltre magnificate ad un osservatore distante, a causa della distorsione dei raggi luminosi ad opera della gravità del buco nero (tutto questo è illustrato in FIG. 8). I calcoli mostrano che l'area di sfera celeste coperta dal buco nero è un disco di raggio  $2,6R_s$ . Questa zona scura da cui non può provenire alcuna radiazione è detta "ombra" del buco nero (naturalmente, se vi sono sorgenti luminose tra il buco nero e l'osservatore, esse saranno visibili a quest'ultimo).

Questo punto è importante per l'interpretazione dell'immagine del buco nero divulgata di recente. Questa immagine mostra un buco nero su cui si sta riversando non una singola particella ma una gran quantità di gas catturato dall'ambiente circostante. E in verità ciò che si osserva non è il buco nero – il quale, per definizione, è invisibile – ma proprio questo gas che spiraleggia verso di lui lungo un disco di accrescimento. Per quanto abbiamo detto, la zona scura centrale non indica l'orizzonte degli eventi ma l'ombra del buco nero.

Concludiamo questa nota attirando l'attenzione sul meccanismo di accrescimento di gas da parte del buco nero. A causa del momento angolare che

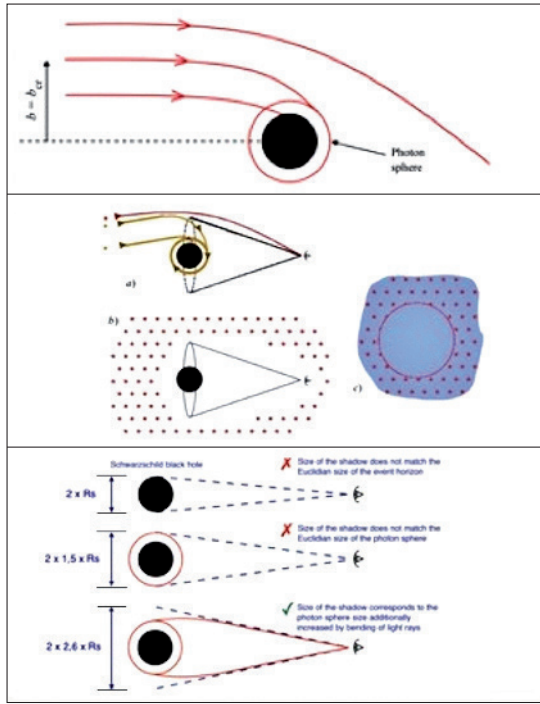


FIG. 8. Fenomeno della “sfera di luce” (o “sfera fotonica”) e dell’“ombra” del buco nero. Pannello superiore: immaginiamo un fascio di raggi luminosi in viaggio verso il buco nero. I raggi con un parametro di impatto (il segmento  $b$  nella figura) maggiore di un certo valore  $b_{cr} = 2,6R_s$  sono in grado, pur deviando dalla loro traiettoria originale, di allontanarsi dal buco nero. I raggi con  $b < b_{cr}$  sono indotti a spiraleggiare attorno al buco nero fino a precipitare oltre l’orizzonte degli eventi (evidenziato dal disco nero). I fotoni con  $b = b_{cr}$  assumono un’orbita circolare intorno al buco nero che definisce la cosiddetta sfera di luce con raggio  $1,5R_s$ . Quest’orbita, tuttavia, è instabile e i fotoni sono destinati ad allontanarsi definitivamente o a cadere oltre l’orizzonte degli eventi. Pannello intermedio: illustrazione di un cono di vista all’interno del quale è precluso per l’osservatore distante l’arrivo di raggi luminosi emessi alle spalle del buco nero (la luce proveniente dalle stelle gialle non raggiunge l’osservatore: il raggio giallo superiore entra in orbita lungo la sfera di luce, mentre quello inferiore l’attraversa e cade direttamente nel buco nero). Come si vede, il disco oscuro che appare all’osservatore ha dimensioni maggiori dell’orizzonte degli eventi perché i raggi che attraversano la sfera di luce sono destinati ad essere inghiottiti dal buco nero. Il pannello in basso riassume questi concetti evidenziando che tale disco ha un diametro maggiore non solo dell’orizzonte degli eventi, ma anche della sfera di luce, a causa della distorsione dello spazio (e relativa deflessione dei raggi luminosi). Questo disco oscuro è detto ombra del buco nero.

*questo gas ragionevolmente possiede, la caduta non avviene radialmente ma, come abbiamo già sottolineato, il gas ruota attorno al buco nero formando un disco di accrescimento. È istruttivo considerare il fatto che, in linea di principio, a causa della con-*

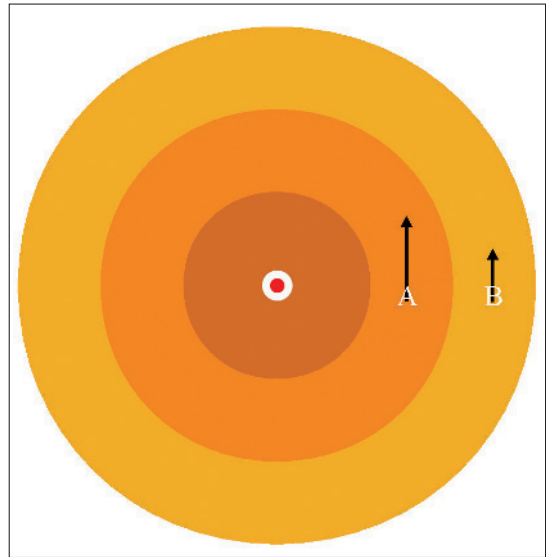


FIG. 9. Meccanismo di trasferimento del momento angolare che permette al gas di cadere nel centro. Immaginiamo di dividere il disco di accrescimento in un numero di anelli concentrici. L’anello A ruota più velocemente dell’anello B. L’attrito (ossia la viscosità) tra i due tende a far rallentare A ed accelerare B. Pertanto, l’anello A si stringe verso il centro mentre l’anello B tende ad espandersi, a meno che non venga rallentato da un anello C, a sua volta rallentato da un anello D, e così via (si veda il testo).

*servazione del momento angolare, il gas non potrebbe cadere nel centro (in base a quanto detto a commento dell’eq. (2)). Immaginiamo di dividere idealmente il disco in una serie di anelli concentrici; ognuno di questi anelli ruota in maniera stabile giacché per ognuno la forza di gravità è bilanciata da quella centrifuga, proprio come accade con le orbite planetarie attorno al Sole. Ora, proprio come avviene per i pianeti, gli anelli più distanti ruotano più lentamente.<sup>6</sup> Tuttavia, il gas possiede una sua viscosità dovuta alla presenza di turbolenze e campi magnetici. Questa viscosità agisce da attrito e gli anelli più interni rallentano perché frenati da quelli esterni più lenti con cui sono a contatto (FIG. 9). La riduzione di velocità porta ad una riduzione della forza centrifuga e ad una conseguente prevalenza di quella gravitazionale; ogni elemento di gas, pertanto, spiraleggia attorno al buco nero fino a cadervi dentro.*

<sup>6</sup> Per un pianeta in orbita stabile attorno al Sole (assunta circolare per semplicità), l’accelerazione gravitazionale e quella centrifuga si bilanciano:  $GM/r^2 = v^2/r$ . Si ottiene pertanto  $v \propto r^{0,5}$ , a dimostrazione di quanto affermato nel testo, ossia che i pianeti più distanti si muovono più lentamente.

**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.



A cura di Alberto Cappi

INAF · Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS)

## Alla scoperta della Luna Storia, tradizioni, osservazione astronomica

Giovanni Anselmi

Il Castello, 2019

Copertina flessibile, pp. 112, € 19,00

ISBN 9788827600375

www.ilcastelloeditore.it

MOLTI sono i libri usciti recentemente per celebrare il cinquantenario dello sbarco dell'uomo sulla Luna, avvenuto nel luglio 1969. In questa recensione ci occupiamo di un bel libro, di facile lettura, pubblicato dalla casa editrice "Il Castello".

In soli quattro capitoli l'abile autore, Giovanni Anselmi, riesce a dare un ritratto straordinario del nostro satellite naturale, a partire proprio dalla storica missione dell'Apollo 11 che coronò lo straordinario sogno tecnologico e scientifico, annunciato nel celebre discorso del presidente americano John F. Kennedy alla *Rice University* di Houston nel settembre 1962, e che portò i primi astronauti, Neil Armstrong ed Edwin Aldrin, a passeggiare sulla Luna mentre Michael Collins orbitava intorno al satellite in attesa del loro rientro. Un'impresa memorabile, seguita in diretta televisiva da milioni di persone in tutto il mondo, che mostrava le incredibili capacità dell'uomo e avviava una nuova era: quella spaziale.

Nel capitolo successivo la Luna viene indagata sotto il profilo astronomico: le sue origini (sono diverse le ipotesi in merito), il suo ruolo di stabilizzatore del sistema Terra-Luna, le fasi lunari, le clissi e molto altro.

Nel terzo capitolo, quello che forse ha più attratto la mia curiosità, Anselmi affronta la "consapevolezza della Luna" ovvero il rapporto tra l'uomo e la Luna, a partire dalla preistoria. Qui un paragrafo è dedicato al disco di Nebra, un disco di bronzo intarsiato con lamine in oro, del diametro di 32 cm, ritrovato nel 1999 in Germania insieme a numerosi altri reperti metallici risalenti all'età del bronzo. Il disco solleva ancora molti interrogativi, ma gli studiosi ritengono che la sua funzione fosse astronomica. Secondo l'interpretazione più seguita il disco riporta in forma stilizzata tutto quello che era facilmente visibile a occhio nudo nel cielo: Sole, Luna, stelle e, molto probabilmente, l'ammasso delle Pleiadi.

Nel quarto e ultimo capitolo l'autore ci invita all'osservazione astronomica, e fornisce tante informazioni che consentono di individuare le più im-

portanti caratteristiche del nostro satellite anche utilizzando un piccolo telescopio.

Un vero libro di divulgazione scientifica, il classico "libro per tutti" dato che il linguaggio è semplice e ciò lo rende anche molto scorrevole. Il testo termina con un "Indice analitico" e una lista di approfondimenti *online* degli argomenti proposti. Infine, in allegato il lettore troverà un'utile mappa per l'osservazione lunare e un poster (50 × 70 cm) con una stupenda immagine del nostro satellite.

ANDREA SIMONCELLI

**Giovanni Anselmi**, dopo la formazione universitaria in astronomia, ha lavorato per oltre vent'anni in ambito divulgativo ed editoriale come direttore della rivista *Coelum astronomia*. Collabora con grandi istituti astronomici, come il CFHT (Canada-France-Hawaii Telescope), per l'elaborazione delle loro migliori riprese fotografiche del cielo. È autore di numerosi articoli per varie riviste di astronomia e gli è stato dedicato l'asteroide (15036) GiovanniAnselmi.

\*

## Luna rossa La conquista sovietica dello spazio

Massimo Capaccioli

Carocci (Sfere), 2019

Copertina flessibile, pp. 239, € 18,00

ISBN 9788843094974

www.carocci.it

PUBBLICARE un libro sull'astronautica sovietica in occasione del cinquantenario del primo sbarco lunare della storia, conquista tecnologica e "di sistema" statunitense proprio in competizione con l'URSS, può apparire ardito e quasi fuori contesto. In realtà, proprio in questi mesi in cui siamo – giustamente, perché la ricorrenza senza dubbio lo merita – subissati di titoli celebrativi delle imprese dell'Apollo, è sicuramente utile avere l'opportunità di farsi un quadro completo degli eventi occorsi in quel memorabile 1969, andandone ad esplorare i prodromi avvenuti anche nell'Unione Sovietica. Per cui l'iniziativa è tutt'altro che fuori contesto ed anzi merita attenzione e considerazione.

Perché se è vero che la gara spaziale di quegli anni l'hanno chiaramente e indiscutibilmente vinta gli Americani sbarcando un equipaggio sulla Luna entro il fatidico decennio, così come promesso da John

F. Kennedy nel suo celebre discorso al Congresso del 25 maggio 1961, è altresì vero che anche i Sovietici hanno contribuito pesantemente a caratterizzare quegli anni di competizione con gli Stati Uniti, meritando per questo anch'essi un giusto ricordo per le imprese compiute – comunque fondamentali – e per il coraggio e l'abnegazione dimostrati dai loro cosmonauti. Non per niente l'Autore nel capitolo introduttivo dell'opera evidenzia come la vittoriosa epopea statunitense culminata nel 1969 debba molto alla sfida con i Sovietici e ai primati da questi ultimi inizialmente messi a segno in campo spaziale, che ebbero l'effetto di scuotere un'America tranquillamente adagiata sulla propria consolidata superiorità tecnologica e darle lo spunto, e la spinta, per scendere in campo con tutto il proprio strapotere organizzativo ed economico per pareggiare gli sforzi sovietici prima, e superarli poi, nella corsa alla Luna. Negli anni più caldi della Guerra Fredda la competizione per lo spazio tra USA e URSS – con alle spalle i rispettivi sistemi sociali, economici e politici – costituì un importante agone sostitutivo della guerra vera e guerreggiata, che fortunatamente entrambi i contendenti ebbero la saggezza di non voler intraprendere, sfidandosi invece su campi di battaglia alternativi, e tra questi il campo spaziale, con le sue importanti ricadute di natura mediatica e propagandistica, assunse ben presto una valenza fondamentale e primaria.

Ma pur affidandosi all'indiscutibile genio del mitico *glavnij konstruktor* Sergei Pavlovich Korolev, il "progettista capo", all'epoca conosciuto in Unione Sovietica (che aveva messo ufficialmente al bando il culto della personalità) e nel mondo solo per il ruolo rivestito nel programma spaziale e non attraverso la rivelazione della sua identità anagrafica, i Sovietici nel lungo periodo non ebbero alcuna chance di mantenere il vantaggio acquisito nei primi anni della corsa allo spazio sugli Stati Uniti i quali, oltre che della loro formidabile macchina industriale e organizzativa, poterono a loro volta giovare – tra le molte altre a disposizione – della talentuosa professionalità di un visionario come Wernher von Braun, passato finalmente (in maniera non dissimile da quanto era capitato al suo collega/rivale sovietico) dallo sviluppo di vettori missilistici per uso militare alla realizzazione del proprio sogno, quello di costruire razzi in grado di inviare equipaggi umani all'esplorazione del Sistema solare.

A un certo punto della narrazione l'Autore cita il timore – espresso dall'ammiraglio giapponese Yamamoto dopo aver scatenato il proditorio attacco di Pearl Harbor il 7 dicembre 1941 ai danni della flotta americana – di aver svegliato un gigante addormentato, domandandosi argutamente se analogo pensiero possa essere passato per la mente di Korolev nel momento in cui Kennedy pronunciava i suoi discorsi volti a pungolare una Nazione fino a quel momento assopita, ma pronta a gettare nella mischia le proprie migliori menti ed energie al fine di non essere lasciata indietro da nessuno. La domanda, per

quanto riguarda Korolev, rimane senza risposta, ma sappiamo bene che quel risveglio puntualmente avvenne in entrambe le occasioni.

Detto questo, e chiarito quindi che la finalità in base alla quale nasce questo libro trova ampie giustificazioni storiche e metodologiche, il mio modesto e personalissimo giudizio sull'opera è pienamente positivo.

Capaccioli, che come astrofisico non ha bisogno di presentazioni, sa scrivere e lo dimostra qui molto bene, tracciando la storia della cosmonautica in URSS fin dai suoi primordi e dai suoi numi tutelari e fondatori (a cominciare da Konstantin Eduardovich Ciolkovskij), ma occupandosi anche delle scuole razzistiche (nel senso di appassionati di razzi) che trovarono nell'americano Goddard e nel tedesco Oberth, nei rispettivi Paesi, i degni contraltari dei primi visionari russo/sovietici. Perché pur basando la propria narrazione sul versante e il punto di vista sovietico, l'Autore sceglie correttamente di darle un respiro più ampio, interfacciando l'evolversi delle attività spaziali in URSS con ciò che contestualmente avveniva negli USA, in modo da far vivere al lettore il completo svolgersi degli eventi, quasi in presa diretta, sia al di qua che al di là della Cortina di Ferro.

Lo stile narrativo dell'Autore è molto piacevole. Capaccioli si dimostra inoltre profondo conoscitore delle cose russe e sovietiche ed è molto abile nel delineare a uso e consumo del lettore una piena caratterizzazione dei personaggi citati e degli ambienti in cui si svolgono le vicende narrate, non risparmiando, ove necessario, salaci commenti nei confronti delle storture e delle ipocrisie di un regime pronto fin dalla prima ora a giovare a fini propagandistici delle conquiste spaziali (come del resto non si mancò di fare anche in America, in quella che ormai era diventata una lotta senza esclusione di colpi, mediatici ancor più che tecnologici), conquiste ottenute grazie all'intelligenza e alle capacità organizzative di Korolev al quale, per i motivi politici cui si è già accennato, non furono mai pubblicamente riconosciuti, almeno finché fu in vita, gli enormi meriti che la società sovietica avrebbe invece dovuto attribuirgli, ma non solo quella sovietica. Ricordiamo che a causa di questa surreale paranoia il progettista capo non poté ricevere un meritato premio Nobel che il comitato organizzatore era intenzionato a conferire agli artefici del lancio dello Sputnik, vedendosi però ribattere dal premier Chruscev che l'onorificenza avrebbe dovuto essere conferita all'Unione Sovietica. Per cui alla fine non se ne fece niente, essendo il premio conferibile per regolamento solo a persone fisiche e viventi.

La lettura di questo libro non offre quindi soltanto l'occasione di conoscere cose interessanti e di ricordare con rispetto persone che hanno fatto la Storia e il cui nome avrebbe diritto a non finire nel dimenticatoio – come, per citarne solo alcuni, i Korolev, i Gagarin, i Komarov, le Tereskova, i Leonov – ma anche di trarre dalla lettura qualche momento di sano buonumore.

Un punto importante, che è doveroso sottolineare, è anche e soprattutto che l'Autore non usa toni sistematicamente e acriticamente agiografici nel rievocare nomi e personaggi illustri, né fa sconti nell'inquadrare a tutto tondo le figure e le personalità di politici, progettisti e cosmonauti, con tutte le luci e le ombre che li caratterizzano, mostrandosi oltremodo equilibrato nei giudizi e nelle enunciazioni.

Il libro si segnala infine per un ulteriore pregio: alcune corpose e preziose pagine di bibliografia e fonti specializzate incluse a fine testo, molto utili per approfondire i concetti e gli eventi narrati.

MARCO ORLANDI

**Massimo Capaccioli** ha insegnato presso l'Università di Padova e l'Università di Napoli Federico II, dove è attualmente Professore Emerito. In campo scientifico si occupa di dinamica dei sistemi stellari e di cosmologia osservativa, e ha pubblicato numerosi articoli scientifici, oltre che libri e manuali. È stato direttore dell'Osservatorio Astronomico di Napoli ed ha concepito e gestito la costruzione del VST in collaborazione con l'*European Southern Observatory*. È stato inoltre presidente della Società Astronomica Italiana e presidente generale della Società Nazionale di Scienze Lettere e Arti in Napoli.

\*

### Conquistati dalla Luna

#### Storia di un'attrazione senza tempo

Patrizia Caraveo

Raffaello Cortina (Scienza e Idee), 2019

Copertina flessibile, pp. 203, € 19,00

ISBN 9788832850918

www.raffaellocortina.it

**I**n questo 2019 in cui ricorre il cinquantesimo anniversario del primo sbarco sulla Luna sono stati tanti i libri pubblicati per ricordare l'impresa dell'Apollo 11 e, più in generale, la gara spaziale avvenuta tra Stati Uniti e Unione Sovietica negli anni Cinquanta e Sessanta del secolo scorso. Come mi è già capitato di rilevare altrove, non proprio tutti questi libri si sono dimostrati all'altezza e per questo qualche lettore sarà magari rimasto deluso dal prodotto acquistato, dimostratosi carente rispetto alle aspettative. Credo però (e la constatazione riguarda per fortuna la maggior parte dei molti altri libri usciti nei mesi scorsi sull'argomento) che non saranno rimasti delusi gli acquirenti del volume di Patrizia Caraveo *Conquistati dalla Luna*. Si tratta infatti di un'ottima opera di divulgazione storico/scientifica, precisa e ben strutturata.

Il testo fornisce, innanzitutto, una "carta d'identità" della Luna, in particolare relativamente alle sue caratteristiche morfologiche ed astronomiche. Si passa poi, nel secondo capitolo, alle osservazioni compiute dagli astronomi a partire da Galileo e Casini e all'influenza che i loro studi scientifici hanno avuto su scrittori e sognatori, i quali sulle ali della

fantasia hanno immaginato, nel corso dei secoli, viaggi mirabolanti compiuti da avventurosi esploratori, naturalmente con mezzi adeguati allo stato dell'arte della tecnologia dell'epoca. L'Autrice si sofferma qui in particolare – e non potrebbe essere altrimenti – sui due famosi romanzi scritti da Jules Verne a proposito di un volo di esplorazione lunare, compiuto dai soliti ardimentosi a bordo di un proiettile sparato da un gigantesco cannone, dei quali sottolinea molto opportunamente sia le qualità che gli inevitabili errori scientifici, figli dei tempi in cui i libri in questione videro la luce. Ma soprattutto, in questo capitolo, si rivela, a mio parere, davvero rimarchevole la descrizione del fantomatico viaggio compiuto sulla Luna nientepopodimeno che da Pulcinella, come documentato dalla riproduzione di due stampe risalenti al 1836 che ritraggono il personaggio alla partenza e al ritorno dalla Luna (il viaggio avviene a bordo di una vera e propria nave con tanto di vele e soffietto da utilizzare in caso di bonaccia, e nell'immagine raffigurante il ritorno sulla Terra la vela della nave riporta le raffigurazioni del vero e proprio bestiario alieno incontrato da Pulcinella sul satellite). Curiosi i collegamenti con la realtà dell'epoca, in quanto la storia illustrata dall'Autrice narra che Pulcinella, prima di intraprendere il viaggio verso la Luna, avrebbe chiesto un parere agli astronomi dell'Osservatorio di Capodimonte, allora diretto da Ernesto Capocci, i quali però avrebbero dimostrato perplessità nei confronti dell'impresa e dei mezzi previsti per portarla a compimento. Un esempio davvero interessante e poco noto di proto-fantascienza italiana, replicato non molto tempo dopo (per la precisione nel 1857) da un libretto effettivamente scritto dal sopra citato Capocci, dal titolo *Relazione del primo viaggio alla Luna fatto da una donna l'anno di grazia 2057*. La cosa realmente straordinaria del racconto è che esso contiene molti elementi che lo accomunano al ben più famoso *Dalla Terra alla Luna* di Verne, che però vide la luce soltanto otto anni più tardi.

Patrizia Caraveo riesce a trovare addirittura elementi concettuali in comune tra questa storia e il capolavoro cinematografico di Stanley Kubrick *2001: Odissea nello spazio* (come nel film di Kubrick alcuni astronauti compiono il viaggio verso Giove ibernati, qui l'equipaggio del proiettile sparato da un enorme cannone viene "eterizzato" e si dovrà risvegliare all'arrivo sulla Luna), pur precisando che, vista la scarsa notorietà del racconto di Capocci, è molto improbabile che esso possa aver costituito un qualche tipo di ispirazione per il regista britannico. Se questo è del tutto verosimile, resto invece assolutamente senza parole di fronte alle evidenti similitudini esistenti tra il libro di Verne del 1865 e il testo di Capocci del 1857, anche se credo sia difficile dimostrare che Verne abbia oggettivamente tratto qualche ispirazione dall'immaginario volumetto dell'astronomo di Capodimonte. Ma questa è solo una delle interessantissime storie che si trovano nel volume della Caraveo che, fin dall'introduzione, ope-

ra un intrigante rovesciamento di prospettiva chiedendosi se, in fin dei conti, non siamo stati tanto noi umani a “conquistare” la Luna nel 1969, quanto invece sia stata la stessa Luna ad aver conquistato i Terrestri fin dagli albori della civiltà, con la sua sola presenza nel cielo notturno. Una domanda – assolutamente legittima – cui viene data risposta affermativa già a partire dal titolo del libro.

E anche se svolta nel clima della Guerra Fredda e nell’ottica di un’affermazione ideologica tra sistemi politici e sociali schierati agli antipodi l’uno rispetto all’altro, si capisce da questo punto di vista come la gara spaziale del secolo scorso tra USA e URSS abbia quindi finito per trovare un ideale – per quanto fortunatamente incruento – campo di battaglia proprio nella corsa alla “conquista” della Luna, la cui fascinazione nei confronti degli uomini la rendeva un obiettivo perfetto per fini propagandistici e “di bandiera” prima ancora che per motivi di esplorazione e sete di conoscenza.

Gli sviluppi del confronto spaziale tra Sovietici e Americani costituiscono l’argomento dei capitoli successivi del libro, connotati da un buon dettaglio e da una più che valida sintesi storica riguardo al dipanarsi delle missioni, con equipaggio e senza, concepite per portare uomini e mezzi sulla Luna. Una gara che, anche dopo la vittoria senza appello riportata dagli Stati Uniti nel 1969 con il primo sbarco umano sulla Luna ad opera di Apollo 11, non si è spenta del tutto, pur conoscendo momenti di stasi (caratterizzati dall’invio di sonde automatiche verso altri bersagli ben più rappresentativi e intriganti nell’ambito del Sistema solare) ma anche una decisa ripresa in anni recenti, con l’entrata in scena di nuovi attori come le potenze asiatiche emergenti e i privati.

Il libro si conclude con una approfondita disamina sui motivi che possono giustificare, oggi, un ritorno alla Luna o, piuttosto, una decisa inversione di rotta in direzione di Marte.

È un dibattito molto importante, proprio in un momento in cui si fanno piani per riportare l’Uomo sulla Luna ma, contemporaneamente, se ne fanno anche per portarlo per la prima volta su Marte. In entrambi i casi le tecnologie necessarie sono alla nostra portata (subito dopo Apollo 11 e ancora prima di Apollo 12 von Braun aveva già proposto alle autorità statunitensi un piano dettagliatissimo in grado di far sbarcare un astronauta americano su Marte negli anni Ottanta del secolo scorso...), ma il vero problema sono i fondi, la montagna di denaro necessaria per un’impresa del genere, che rende inevitabile la collaborazione internazionale per raggiungere questo fondamentale risultato.

Ho trovato molto illuminanti e degne di considerazione e ragionamento le argomentazioni espresse dal compianto Giovanni Bignami – al quale il libro è affettuosamente dedicato («Al marziano della mia vita») – sulla rivista *Wired* nel luglio 2009, in occasione del quarantennale del primo sbarco sulla Luna, e riportate dall’Autrice nel presente libro in

quanto ancora, dopo dieci anni, di stretta attualità, a favore dell’opportunità di saltare il ritorno sulla Luna e puntare invece decisamente verso Marte; un’opinione condivisa dall’Autrice e sulla quale convergono molti addetti ai lavori (ma non tutti), rendendo sempre più interessante e animato il relativo dibattito.

In conclusione, questo *Conquistati dalla Luna* per il dettaglio dell’esposizione e la chiarezza dei concetti espressi nella molteplicità dei temi trattati si colloca senz’altro nelle primissime posizioni in una ideale classifica dei libri pubblicati in occasione del cinquantennale del primo sbarco sulla Luna. Un libro che mi sento senz’altro di consigliare a chiunque voglia documentarsi sulle varie fasi dell’esplorazione lunare e, soprattutto, capire le motivazioni e le strategie che ne sono state, ne sono e ne saranno alla base.

MARCO ORLANDI

**Patrizia Caraveo** è dirigente di ricerca e direttore dell’Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica di Milano (IASF) dell’INAF ed è professore a contratto all’Università di Pavia dove tiene il corso di *Introduzione all’Astronomia*. Ha collaborato e collabora a diverse missioni spaziali internazionali dedicate all’astrofisica delle alte energie e rappresenta l’INAF nella collaborazione internazionale per la progettazione, costruzione e gestione del *Cherenkov Telescope Array*. Nel 2009 è stata insignita del *Premio nazionale Presidente della Repubblica* e nel 2014 *Women in Aerospace Europe* le ha conferito l’*Outstanding Achievement Award*.

\*

### **Men on the Moon An American History 1969-2019**

Stefano Cavina

Edizioni Moderna, 2018

Copertina rigida, pp. 216, € 45,00

ISBN 9788898843633

www.tipografiaem.com

**S**TEFANO CAVINA, giornalista e scrittore, è anche e soprattutto un uomo innamorato dello spazio e dell’astronautica. Per quanto riguarda l’esplorazione spaziale e la storia dell’astronautica, ha pubblicato nel 2004 il libro *Pianeta Marte. Miti e realtà del futuro avamposto dell’umanità*, seguito tra il 2007 e il 2011 dalla trilogia *Uomini per la Luna* (comprendente i titoli *Sputnik. L’alba dell’era spaziale*, *Cosmonauti. Esploratori dell’infinito* e *Apollo. La sfida alla Luna*) e nel 2014 da *Sorella Luna. Visioni e realtà sulla nostra compagna astrale*.

I volumi della trilogia *Uomini per la Luna*, vera e propria storia dell’astronautica dai primordi agli sbarchi lunari del programma Apollo, li recensii a suo tempo su queste stesse pagine del *Giornale di Astronomia*, e rileggere oggi quelle recensioni mi rinnova il piacere provato all’epoca nel gustare que-

sti libri, dai quali traspare evidente la profonda passione dell'Autore per quelle vicende così emblematiche nella storia dell'umanità.

La trilogia costituisce infatti un ottimo esempio di divulgazione scientifica, che unisce l'entusiasmo del narratore alla competenza dell'esperto, capace di integrare pienamente il lato umano e umanistico del racconto storico con gli indispensabili dettagli tecnici necessari a fornire al lettore – occasionale o conoscitore dell'argomento che sia – un'informazione compiuta e completa sulla materia trattata.

Questa nuova fatica editoriale di Stefano Cavina, uscita a dicembre 2018, si inquadra a buon titolo tra le numerose pubblicazioni (non tutte di buon livello, questo va detto) che hanno visto e stanno vedendo la luce in occasione del cinquantesimo anniversario dello sbarco lunare di Apollo 11, e senza dubbio si tratta di un'opera di valore, pur discostandosi notevolmente dalla linea editoriale tracciata dall'Autore nei suoi precedenti volumi dedicati al medesimo argomento.

Se, infatti, le sue opere precedenti, e in particolare la sopra citata trilogia, erano basate soprattutto sulla ricchezza e sul dettaglio del testo (peraltro prezioso e integrato da immagini in bianco e nero), questo nuovo volume celebrativo dell'impresa dell'Apollo 11 (e successive) si caratterizza per un'impostazione grafica e narrativa diversa, il cui nucleo è costituito da fotografie a colori di grande formato (come, del resto, di grande formato è il libro) e a tutta pagina, corredate da una didascalia esplicativa.

È importante però precisare che in molti casi non si tratta di una pura e semplice didascalia a spiegazione dell'immagine, bensì di un "mini-testo" che offre un'informazione più dettagliata ed esaustiva.

Si tratta pertanto di una mezza via tra il libro tradizionale e il libro fotografico, che a mio parere ha successo nel raggiungere l'ottimo risultato di prendere il meglio delle due impostazioni, fornendo belle immagini (ma anche la riproduzione di interessanti documenti) insieme a testi ben curati e strutturati, per quanto essenziali. Chiaramente, chi cercasse un maggiore dettaglio e descrizioni più complete e approfondite dovrebbe indirizzarsi verso altri prodotti, compresi gli ottimi libri pubblicati in precedenza dallo stesso Autore, ma con riferimento alla sua specifica tipologia si può senz'altro affermare che per la cura del dettaglio, le informazioni fornite e la bellezza e appropriatezza delle foto contenute questo nuovo libro indubbiamente si colloca in una posizione di alto livello nella sua categoria editoriale.

Come spesso mi capita di fare, anche recensendo libri di valore come questo, richiamo l'attenzione sulla necessità di controllare bene il testo in sede di revisione, perché anche qui ho notato almeno un paio di refusi evidenti, oltretutto ben visibili perché presenti in titoli di capitoli o tabelle. So bene, anche per esperienza personale, quanto sia difficile accorgersi di ogni possibile errore o refuso per quante riletture si possano fare: lo rilevo quindi non certa-

mente per avanzare critiche (non stiamo cercando il pelo nell'uovo, tutt'altro), quanto perché a volte, e anche qui richiamo il caso presente, manca veramente poco perché un ottimo prodotto diventi un prodotto praticamente perfetto.

Precisato doverosamente quanto sopra, aggiungo che il volume si focalizza in particolare sugli sbarchi lunari del 1969-1972 suddividendo la narrazione (basata essenzialmente, come detto più sopra, su fotografie corredate da un'ampia didascalia) in undici capitoli dedicati a diverse tematiche: l'*hardware* impiegato nell'impresa (il razzo Saturn V e la vera e propria astronave lunare, il *rover* impiegato nelle missioni dalla 15 alla 17, la tuta spaziale, le macchine fotografiche utilizzate, le targhe lasciate sulla Luna); la spiegazione dei profili di missione presi in considerazione fino ad arrivare alla scelta di quello effettivamente adottato (il *rendez-vous* in orbita lunare); il riepilogo e la descrizione delle singole missioni, compreso un ricordo dedicato agli astronauti dell'Apollo 1, Virgil "Gus" Grissom, Ed White e Roger Chaffee, periti il 27 gennaio 1967 durante un test di routine sulla rampa di lancio.

In particolare, ho trovato molto piacevoli e ben pensati i tre capitoli finali, dedicati rispettivamente al lunacomplottismo (intitolato ironicamente "Non siamo mai andati sulla Luna", mostra le splendide immagini dei siti di allunaggio realizzate a partire dal 2009, con un'incredibile ricchezza di dettagli, dalla sonda LRO – *Lunar Reconnaissance Orbiter*) e a due *gadget* diventati nel tempo icone di quegli anni e oggetti di culto per appassionati e collezionisti: l'orologio Omega 'Speedmaster' degli astronauti americani e la penna Fisher 'AG-7 Anti-Gravity' per uso astronautico, che si fregia della singolare distinzione di essere stata venduta dalla ditta produttrice sia alla NASA che ai Sovietici.

La differenza concettuale tra questo libro e i precedenti pubblicati dall'Autore sullo stesso argomento è quindi evidente, ma non ha molto senso chiedersi quale sia migliore o peggiore, si tratta semplicemente di opere di impostazione diversa. Questo *Men On The Moon* è un libro celebrativo delle imprese compiute dal programma Apollo, e visto in quest'ottica è sicuramente uno dei migliori tra quelli messi a disposizione del pubblico in questo scorcio di 2019. Se per certi versi mi infastidisce un po' l'enorme quantità di libri (non proprio tutti, come già detto, di livello eccelso e soprattutto non proprio tutti curati come si dovrebbe) pubblicati negli ultimi mesi sull'onda delle peraltro doverose celebrazioni delle imprese Apollo, sono tuttavia ben consapevole dell'importanza che questa pubblicistica riveste per rammentare a un pubblico sempre più distaccato, distratto e ignorante dei fatti della storia anche recente, queste imprese così importanti, il cui ricordo non deve assolutamente andare perduto o sommerso dai mille inutili messaggi che i media quotidianamente ci propinano.

Pertanto, non posso che considerare benvenuta questa nuova opera di Stefano Cavina, confezionata

dall'Autore con la passione e la precisione cui nel tempo ci ha abituato. Il prezzo di copertina, pur certamente in linea col prodotto finale fornito, è abbastanza elevato, ma non dovrebbe costituire un impedimento per la diffusione dell'opera, aiutata anche dal fatto che tutti i testi (introduzione, didascalie, ecc.) sono bilingui italiano/inglese.

MARCO ORLANDI

**Stefano Cavina**, nato a Ravenna, è pubblicitista, poeta e scrittore. Membro della *Planetary Society*, si occupa di divulgazione spaziale dal 1973. Ha pubblicato il libro *Pianeta Marte-Miti e realtà del futuro avamposto dell'Umanità* (AIEP 2004), *Sputnik. L'Alba dell'Era Spaziale* (2006), *Cosmonauti-Esploratori dell'Infinito* (2008) e *Apollo. La Sfida Alla Luna* (2011), *Sorella Luna. Visioni e Realtà sulla nostra compagna Astrale* (2015). Nel 2019 la nuova edizione del suo libro *Apollo. La Sfida Alla Luna* ha vinto il premio Vega.

\*

## The Cosmos

### Astronomy in the New Millennium

Jay M. Pasachoff, Alex Filippenko

Cambridge University Press, luglio 2019 (quinta edizione)

Copertina flessibile, pp. 732, £ 59,99 (€ 72,81)

ISBN 9781108431385

www.cambridge.org

QUESTA è la 5ª edizione (le altre nel 2001, 2004, 2007 e 2014) di un grosso volume (letteralmente: 2 kg, 28 × 22 × 3 cm, 739 illustrazioni a colori, 409 b/n, 5 mappe) che i due astronomi hanno redatto grazie alle loro esperienze di ricercatori, di insegnanti e di scrittori.

Si tratta di una vasta e approfondita opera utilizzabile – come dichiarato dalla casa editrice, la prestigiosa Cambridge University Press – nei corsi di introduzione all'astronomia di livello universitario. Suddiviso in venti capitoli e otto appendici, copre, infatti, quanto è necessario per l'apprendimento dei fondamentali della disciplina, fornendo inoltre numerosi *box* di approfondimento fisico o matematico, più di un migliaio tra foto, grafici e diagrammi e, alla fine di ogni capitolo, un ampio numero di *Questions* e *Topics for discussion*.

Questa nuova edizione si arricchisce con le più recenti scoperte dell'astronomia, avvenute nel quinquennio successivo all'edizione del 2014: le ultime missioni spaziali e i moderni grandi telescopi, il volo del 2015 su Plutone della sonda NASA *New Horizons*, la scoperta di un gran numero di esopianeti, gli studi attuali sulla materia oscura e l'energia oscura, le rilevazioni di onde gravitazionali da collisioni di buchi neri e di stelle a neutroni, le osservazioni della regione della nostra Galassia intorno all'enorme buco nero centrale, gli studi sulle supernovae e sulla loro importanza cosmologica e tanto altro.

All'inizio di ogni capitolo sono chiaramente evidenziati gli *Aims* relativi a quell'argomento – cioè le finalità didattiche che si intendono raggiungere – e per gran parte dei temi trattati è presentata anche una breve introduzione storica che illustra come si sono evolute le conoscenze su quell'argomento, come hanno cambiato le prospettive e, inoltre, cosa gli scienziati prevedono per gli sviluppi futuri, sia da un punto di vista strumentale e osservativo che teorico. L'importanza, che viene poi sottolineata, delle osservazioni, dell'enunciazione di ipotesi che le spieghino, delle successive verifiche osservative o strumentali e delle conseguenti definizioni di modelli costituisce un punto importante per portare gli studenti alla piena comprensione del metodo scientifico.

Gli esercizi alla fine di ogni capitolo – *Questions* e *Topics for discussion* citati sopra e rinnovati rispetto alle edizioni precedenti – forniscono un notevole aiuto agli studenti, non solo per verificare la loro comprensione dell'argomento studiato, ma anche per inserirlo all'interno del più vasto panorama dell'astronomia e per poter inoltre discutere sul ruolo della scienza nella vita di tutti i giorni.

Per rendere il testo più accattivante, gli autori hanno compiuto lo sforzo di alternare i concetti più complessi di astronomia, fisica e matematica con immagini e descrizioni che fanno parte di quanto oggi rende l'astronomia una delle discipline più attraenti per gli studenti e anche per il grande pubblico. Va inoltre sottolineato come un *fil rouge* guidi attraverso tutti gli argomenti: è quello delle "origini", sia all'interno di ogni capitolo, sia tra un capitolo e i successivi. E così, partendo dai primi capitoli che parlano di luce, materia ed energia, si arriva, con gli ultimi, a parlare dell'inizio del nostro universo, per finire con quello dedicato alla vita nel cosmo.

Le otto appendici presentano i sistemi di misura, le principali costanti, le stelle più brillanti e quelle più vicine e i loro nomi, le costellazioni e il catalogo Messier illustrato. Otto pagine di letture di approfondimento e sedici con un glossario di più di settecento termini, oltre a un dettagliato indice analitico degli argomenti, concludono il volume. Quattro mappe celesti, all'inizio e alla fine, presentano il cielo nelle quattro stagioni.

Il sito <http://thecosmos5.com> contiene numerosi supporti didattici per insegnanti e studenti.

Una veloce ricerca *online* mostra come *The Cosmos* sia un testo utilizzato in numerose università statunitensi per quelli che vengono chiamati *Introductory astronomy courses*. Visto che esiste una qualche differenza tra gli *Introductory courses* nel sistema statunitense e i nostri corsi di Astronomia nelle lauree triennali, anche se ritengo che *The Cosmos* sia un eccellente testo di base, credo che ai nostri docenti sia necessaria un'accurata analisi del modo in cui sono trattati i vari argomenti per decidere se adottarlo o meno.

Per concludere, mi permetto un solo commento negativo che mi è venuto in mente appena preso in

mano, prima ancora di consultarlo: in quest'epoca in cui – ahimè – si vedono i nostri ragazzi studiare sui loro portatili o, al massimo, su fotocopie di appunti o frammenti di dispense e raramente su un libro: chi di loro si porterà in giro un volume che pesa oltre 2 kg? La *Cambridge University Press* offre comunque come alternativa l'e-book (a un prezzo “non basso” di 64 dollari).

FABRIZIO BÒNOLI

**Jay M. Pasachoff** è professore di Astronomia al *Williams College* (Massachusetts) e direttore dell'*Hopkins Observatory*. Si occupa prevalentemente del nostro Sistema sola-

re. È presidente del *Working Group on Eclipses* dell'*International Astronomical Union* e lo è stato della *Historical Astronomy Division* dell'*American Astronomical Society*. Ha ricevuto numerosi premi soprattutto per la sua attività di insegnante ed educatore. A lui è dedicato l'asteroide “5100 Pasachoff”.

**Alex Filippenko** è professore di Astronomia e *Richard and Rhoda Goldman Distinguished Professor in the Physical Sciences* all'Università della California a Berkeley. Si occupa di stelle esplosive, *gamma-ray bursts*, galassie attive, buchi neri e cosmologia osservativa. Ha ricevuto numerosi premi, tra i quali il *Carl Sagan Prize for Science Popularization*, nel 2004. Nel 2006 è stato nominato *Carnegie/CASE National Professor of the Year*.

---

**Alberto Cappi** 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.

## Astronomia oggi

- Onde gravitazionali e teoria della relatività generale: una storia complessa (R. LALLI), n. 1, p. 19  
 Conoscenza e cosmologie (R. CACCIA), n. 3, p. 2  
 Navigazione autonoma per operazioni di prossimità con oggetti spaziali non cooperativi (V. PESCE) (PREMIO 'GUIDO HORN D'ARTURO' 2019), n. 4, p. 31  
 Formazione di galassie a disco con simulazioni numeriche cosmologiche: ruolo degli *outflow* galattici ed evoluzione chimica (M. VALENTINI) (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2019), n. 4, p. 36  
 Tra le pieghe della Galassia (E. POGGIO) (PREMIO 'GIUSEPPE LORENZONI' 2019), n. 4, p. 43  
 Le immagini di un giovane sistema planetario multiplo  
 A. ZURLO (PREMIO 'GIUSEPPE LORENZONI' 2019: menzione speciale), n. 4, p. 49

## Astronomia e società

- Luna e dintorni: Apollo 11 e quel piccolo passo di mezzo secolo fa (M. ORLANDI), n. 1, p. 2  
 A proposito di Internet e di astronomia ... (E. PULIATTI), n. 1, p. 13

## Astronomia e letteratura

- Mitizzazioni e dissacrazioni poetiche delle scoperte astronomiche (A. BATTISTINI), n. 4, p. 27

## Didattica

- L'ASTRONOMIA MULTI-MESSENGER: DIDATTICA, RICERCA, CULTURA E SVILUPPO DEL TERRITORIO. SEZIONE DIDATTICA DEL LXII CONGRESSO NAZIONALE DELLA SAIT-TERAMO 2018 (a cura di C. Del Pinto, A. Cittadini Bellini), n. 1, p. 41  
 Le idee, le storie, le sfide dell'astronomia: spunti per percorsi didattici (M. ESPOSITO), n. 1, p. 41  
 Un progetto di astronomia al Liceo IESS di Reggio Emilia (F. FERRARI), n. 3, p. 37  
 Il Premio Cosmos 2019 per la divulgazione scientifica, n. 4, p. 51

## Storia

- L'astronomia occidentale nell'Alto Medioevo: metodi numerici per il calcolo delle posizioni planetarie (S. BUSCHERINI), n. 1, p. 29  
 Tomasi di Lampedusa, il Principe astronomo (I. CHINNICI), n. 1, p. 37  
 Fondazione astronomica *ex sole* di *Augusta Taurinorum* (Torino). Archeologia, astronomia e astrologia e la fondazione delle città romane (S. CARANZANO, M. CROSTA), n. 3, p. 10  
 La stella di san Domenico (F. CAPUTO, N. PANAGIA), n. 3, p. 22  
 Le ricerche sui raggi cosmici a Firenze e a Roma. La nuova scienza astronomica (S. D'AGOSTINO), n. 3, p. 27  
 Siamo stati sulla Luna con la meridiana della basilica di San Petronio (G. PALTRINIERI, R. SERRA), n. 3, p. 31  
 Leonardo da Vinci (Anchiano, 15 aprile 1452-Amboise, 2 maggio 1519) (F. BÒNOLI), n. 4, p. 2  
 L'astronomia vinciana (1939) (P. EMANUELLI (1889-1946)), n. 4, p. 5  
 L'astronomia in Leonardo (1938) (R. MARCOLONGO (1862-1943)), n. 4, p. 10  
 Leonardo da Vinci e gli astronomi del suo tempo (1952) (C. PEDRETTI (1928-2018)), n. 4, p. 12  
 Un aspetto poco conosciuto dell'attività di Leonardo da Vinci nel campo dell'ottica (1965) (V. RONCHI (1897-1988)), n. 4, p. 18  
 Leonardo e la luce cinerea (1919) (E. MILLOSEVICH (1848-1919)), n. 4, p. 25

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

**Atti del Convegno «Gli 'ASTRI' di Horn. L'astronomo che ha progettato il futuro», Catania, 9-10 novembre 2018** (a cura di R. Spiga), 2019, n. 2

- Presentazione (R. SPIGA), n. 2, p. 2  
 Gli 'ASTRI' di Horn. L'astronomo che ha progettato il Futuro (G. TRINCHIERI, G. PARESCHI), n. 2, p. 4  
 Guido Horn d'Arturo e i primi telescopi *multi-mirror*: 1932-1952 (F. BÒNOLI), n. 2, p. 5  
 Guido Horn d'Arturo e le ottiche cooperanti (R. RAGAZZONI), n. 2, p. 19  
 Cherenkov Telescope Array: 120 telescopi e 6500 specchi segmentati per esplorare l'universo delle alte energie (A. FERNÁNDEZ BARRAL, F. FERRINI), n. 2, p. 22  
 Il progetto ASTRI (S. SCUDERI), n. 2, p. 29  
 La luce Cherenkov per l'astronomia gamma e non solo. Un utilizzo "imprevisto" di ASTRI (O. CATALANO), n. 2, p. 35  
 Dal telescopio a tasselli di Horn d'Arturo al telescopio 'ASTRI-HORN': tecnologie d'avanguardia e coinvolgimento industriale per la strumentazione astronomica (G. PARESCHI), n. 2, p. 41  
 L'avventura di Guido Horn d'Arturo a fumetti (L. ZARANONTELLO, R. RAMPAZZO, V. ZANINI), n. 2, p. 44  
 Gli 'ASTRI' di Horn: l'eredità scientifica dell'astronomo che ha inventato il futuro (M. GARGANO), n. 2, p. 53  
 Guido Horn d'Arturo: le radici ebraiche di un astronomo italiano (C. QUARENI), n. 2, p. 57  
 Guido Horn d'Arturo: il mondo, le passioni e gli interessi di un umanista contemporaneo (S.N. SINICROPI), n. 2, p. 57

## Cent'anni fa

- D. RANDAZZO, I. CHINNICI (a cura di)  
 n. 1, p. 47; n. 3, p. 40; n. 4, p. 57  
 Saluto ai lettori, n. 4, p. 55

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

- Il disegnatore misterioso (G. GENOVA, D. RANDAZZO), n. 1, p. 49  
 Dalla "o" di Giotto alla "generatrice" di Morandi, attraverso lenti prismatiche e spettri di stelle cadenti, con un *excursus* da Copernico a Janet Abramowicz e Teresa Żarnower (F. BÒNOLI), n. 2, p. 70  
 Quando una foto ci fa volare (R. DELLA CECA), n. 3, p. 43  
 Dicembre 1819: due secoli fa le prime osservazioni astronomiche a Capodimonte (E. OLOSTRO CIRELLA), n. 4, p. 59

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

- È la somma che fa il totale (A. D'ERCOLE), n. 1, p. 49  
 L'età del Mondo: dalla Bibbia alle reazioni nucleari (A. D'ERCOLE), n. 3, p. 46  
 L'immagine del buco nero nella galassia M87 (A. D'ERCOLE), n. 4, p. 63

**Biblioteca** (a cura di A. Cappi)

- L. AMENDOLA, *L'altra faccia dell'universo. I segreti della materia oscura e dell'energia oscura* (recens. di M. Bellazzini), n. 3, p. 52  
 G. ANSELMI, *Alla scoperta della Luna. Storia, tradizioni, osservazione astronomica* (recens. di A. Simoncelli), n. 4, p. 71  
 M. CAPACCIOLI, *Luna rossa. La conquista sovietica dello spazio* (recens. di M. Orlandi), n. 4, p. 71  
 P. CARAVEO, *Conquistati dalla Luna. Storia di un'attrazione senza tempo* (recens. di M. Orlandi), n. 4, p. 73  
 S. CAVINA, *Men on the Moon. An American History 1969-2019* (recens. di M. Orlandi), n. 4, p. 74  
 E. CERNAN, D. DAVIS, *L'ultimo uomo sulla Luna* (recens. di G. M. Stirpe), n. 3, p. 52  
 M. CHOWN, *L'ascesa della gravità*, (recens. di M. Bellazzini), n. 1, p. 58



- S. CLARK, *Alla ricerca di una nuova Terra. Esopianeti, esplorazioni spaziali e vita extraterrestre* (recens. di A. Adamo), n. 3, p. 53  
 F. FERRINI, *Le onde gravitazionali. Una nuova porta sul cosmo* (recens. di R. Decarli), n. 3, p. 54  
 A. GIAZOTTO (a cura di A. PARLANGELI), *La musica nascosta dell'universo. La mia vita a caccia delle onde gravitazionali* (recens. di A. Simoncelli), n. 3, p. 55  
 J.R. HANSEN, *First Man. Il primo uomo. La biografia autorizzata di Neil Armstrong*, (recens. di M. Orlandi), n. 1, p. 59  
 R. D. LAUNIUS, *Storia dell'esplorazione spaziale. Tutte le scoperte dal mondo antico al futuro extraterrestre* (recens. di M. Orlandi), n. 3, p. 56

- F. MARCACCI, *Cieli in Contraddizione. Giovanni Battista Riccioli e il Terzo Sistema del Mondo*, (recens. di A. Giostra), n. 1, p. 61  
 V. PALUMBO, *L'epopea delle lunatiche. Storie di astronome ribelli* (recens. di G. M. Stirpe), n. 3, p. 57  
 J. M. PASACHOFF, A. FILIPPENKO, *The Cosmos. Astronomy in the New Millennium* (recens. di F. Bònoli), n. 4, p. 76  
 E. PEROZZI, *Luna nuova. Tra mito e scienza dalle eclissi alle basi lunari* (recens. di M. Orlandi), n. 3, p. 58  
 A. SIMONCELLI, *L'era delle onde gravitazionali. Una nuova finestra sull'universo*, (recens. di A. Cappelletti), n. 1, p. 63

#### Errata corrige

del n. 1: 2019, n. 3 p. 60

## Indici degli autori

---

- A. ADAMO, n. 3, p. 53  
 A. BATTISTINI, n. 4, p. 27  
 M. BELLAZZINI, n. 1, p. 58; n. 3, p. 52  
 F. BÒNOLI, n. 2, p. 5, 70; n. 4, p. 2, 2  
 S. BUSCHERINI, n. 1, p. 29  
 R. CACCIA, n. 3, p. 2  
 A. CAPPI, n. 1, p. 63  
 F. CAPUTO, n. 3, p. 22  
 S. CARANZANO, n. 3, p. 10  
 O. CATALANO, n. 2, p. 35  
 I. CHINNICI, n. 1, p. 37, 47; n. 3, p. 40; n. 4, p. 55  
 A. CITTADINI BELLINI, n. 1, p. 41  
 M. CROSTA, n. 3, p. 10  
 S. D'AGOSTINO, n. 3, p. 27  
 R. DECARLI, n. 3, p. 54  
 R. DELLA CECA, n. 3, p. 43  
 C. DEL PINTO, n. 1, p. 41  
 A. D'ERCOLE, n. 1, p. 49; n. 3, p. 46; n. 4, p. 63  
 P. EMANUELLI (1889-1946), n. 4, p. 5  
 M. ESPOSITO, n. 1, p. 41  
 A. FERNÁNDEZ BARRAL, n. 2, p. 22  
 F. FERRARI, n. 3, p. 37  
 F. FERRINI, n. 2, p. 22  
 M. GARGANO, n. 2, p. 53  
 G. GENOVA, n. 1, p. 49

- A. GIOSTRA, n. 1, p. 61  
 R. MARCOLONGO (1862-1943), n. 4, p. 10  
 E. MILLOSEVICH (1848-1919), n. 4, p. 25  
 E. OLOSTRO CIRELLA, n. 4, p. 59  
 M. ORLANDI, n. 1, p. 2, 59; n. 3, p. 56, 58; n. 4, p. 71, 73, 74  
 G. PALTRINIERI, n. 3, p. 31  
 N. PANAGIA, n. 3, p. 22  
 G. PARESCHI, n. 2, p. 4, 41  
 C. PEDRETTI (1928-2018), n. 4, p. 12  
 E. POGGIO, n. 4, p. 43  
 E. PULIATTI, n. 1, p. 13  
 C. QUARENI, n. 2, p. 57  
 R. RAGAZZONI, n. 2, p. 19  
 D. RANDAZZO, n. 1, p. 47, 49; n. 3, p. 40; n. 4, p. 55  
 R. RAMPAZZO, n. 2, p. 44  
 V. RONCHI (1897-1988), n. 4, p. 18  
 S. SCUDERI, n. 2, p. 29  
 R. SERRA, n. 3, p. 31  
 A. SIMONCELLI, n. 3, p. 55; n. 4, pp. 71  
 S. N. SINICROPI, n. 2, p. 57  
 R. SPIGA, n. 2, p. 2  
 G.M. STIRPE, n. 3, p. 52, 57  
 G. TRINCHIERI, n. 2, p. 4  
 V. ZANINI, n. 2, p. 44  
 L. ZARANONTELO, n. 2, p. 44

*Le nostre riviste Online,  
la nostra libreria Internet*

**www.libraweb.net**

★

*Our Online Journals,  
our Internet Bookshop*

**www.libraweb.net**



Fabrizio Serra  
editore®



Accademia  
editoriale®



Istituti editoriali  
e poligrafici  
internazionali®



Giardini editori  
e stampatori  
in Pisa®



Edizioni  
dell'Ateneo®



Gruppo editoriale  
internazionale®

---

*Per leggere un fascicolo saggio di ogni nostra rivista si visiti il nostro sito web:*

*To read a free sample issue of any of our journals visit our website:*

**www.libraweb.net/periodonline.php**

## ISTRUZIONI PER GLI AUTORI

Il «Giornale di Astronomia» è una rivista di informazione, cultura e didattica, edita dalla *Società Astronomica Italiana* per promuovere la diffusione scientifica. La rivista si rivolge sia a studenti e docenti delle scuole, per fornire loro un'informazione seria, sicura e aggiornata sugli studi astronomici moderni e dibattiti su metodi e criteri didattici nel campo dell'astronomia, che a persone interessate all'astronomia, desiderose di approfondire la loro cultura al di là di quello che si fa normalmente nei libri e nei giornali divulgativi, senza arrivare a un'eccessiva specializzazione.

Il «Giornale di Astronomia» è aperto a contributi, provenienti da tutti i paesi in cui è diffuso, concernenti argomenti scientifici, esperienze osservative e tecniche professionali e non, proposte didattiche e divulgative, articoli di storia dell'astronomia e di problematiche culturali e interdisciplinari e descrizioni di istituzioni operanti nel campo dell'astronomia e dell'astrofisica.

1. Inviare il lavoro proposto per la pubblicazione via e-mail all'indirizzo della Direzione.
2. Il testo (massimo 30.000 battute, spazi compresi) deve essere scritto con spaziatura 2 in formato Word 98 o superiore, oppure RTF, con *tabelle e figure in forma definitiva*, **NON** inserite nel testo, ma allegate in *file* a parte.
3. Le immagini **NON** devono essere inserite nel *file* di testo, ma separate e in formato tif, gif o jpg, a buona risoluzione (min. 300 dpi) e correttamente numerate. Le didascalie devono essere inserite alla fine dell'articolo con il numero di riferimento all'immagine (p.e.: FIG. 1.). I *crediti* per le immagini devono essere citati in parentesi alla fine della relativa didascalia.
4. Ogni lavoro deve portare in testa: il titolo, il nome ed il cognome dell'autore, l'istituzione di appartenenza. Allegare al lavoro sottomesso una breve *biografia dell'autore* (3-4 righe max).
5. I richiami a note a piè di pagina o a fine articolo vanno fatti con cifre arabe. Le figure, le tabelle e le formule vanno numerate con cifre arabe. Per formule, simboli matematici e unità di grandezze fisiche vanno usate le notazioni internazionali. La parola "figura" va sempre abbreviata con "FIG.".
6. Si raccomanda un'estrema chiarezza nella compilazione delle tabelle. Si raccomanda di accompagnare ogni tabella con una breve didascalia.
7. Per le citazioni bibliografiche si raccomanda di seguire il seguente criterio:
  - *referenze a libri* devono includere l'iniziale del nome dell'autore ed il cognome (in 'm.lo/m.letto'); titolo del libro (in corsivo), luogo di pubblicazione, editore, anno, n. di pagina. Il tutto con la prima riga sporgente. Esempio:  
J. D. NORTH, *The Fontana History of Astronomy and Cosmology*, London, Fontana Press, 1994, p. yy.
  - *referenze ad articoli in periodici* devono includere l'iniziale del nome dell'autore ed il cognome (in 'm.lo/m.letto'); titolo dell'articolo in corsivo, titolo del periodico non abbreviato alto/basso tra virgolette basse, anno, n. del volume, n. di pagina dell'articolo o della pagina citata. Il tutto con la prima riga sporgente. Esempio:  
S. G. BRUSH, *The Reception of Mendeleev's Periodic Law in America and Britain*, «Isis», 1996, 87, p. yyy.
8. Agli autori verranno inviate tre copie del fascicolo in cui il loro articolo è stato pubblicato. Estratti a pagamento possono essere richiesti direttamente alla Casa editrice prima della stampa.
9. È responsabilità dell'autore ottenere il permesso per la pubblicazione di materiale preso da altre fonti.
10. I lavori proposti per la pubblicazione sono sottoposti al vaglio di referee e la rivista non restituisce il materiale non accettato per la pubblicazione.
11. La SAIt e la casa editrice *Fabrizio Serra editore*<sup>®</sup> acquisiscono il copyright sugli articoli pubblicati. La SAIt acquisisce anche i diritti di traduzione dell'articolo nelle lingue dei paesi in cui il *Giornale* è diffuso.
12. La SAIt e la casa editrice *Fabrizio Serra editore*<sup>®</sup> si dichiarano pienamente disponibili, nel caso di involontari errori, a regolare eventuali pendenze con gli aventi diritto che non sia stato possibile contattare.
13. Per la migliore riuscita delle pubblicazioni, si invitano gli autori ad attenersi, nel predisporre i materiali da consegnare alla Redazione ed alla Casa editrice, alle norme specificate nel volume FABRIZIO SERRA, *Regole editoriali, tipografiche e redazionali*, Pisa · Roma, Serra, 2009<sup>2</sup> (Euro 34,00, ordini a: fse@libraweb.net). Il capitolo *Norme redazionali*, estratto dalle *Regole*, cit. è consultabile Online alla pagina «Pubblicare con noi» di [www.libraweb.net](http://www.libraweb.net)

---

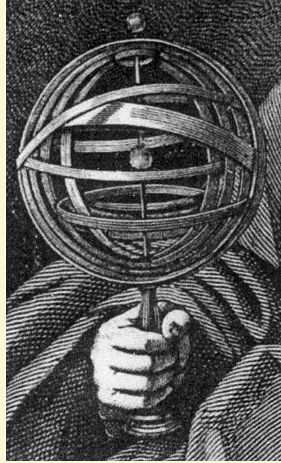
Composto, in carattere *Serra Dante*, dalla *Fabrizio Serra editore*<sup>®</sup>, Pisa · Roma.  
Stampato e rilegato nella *Tipografia di Agnano*, Agnano Pisano (Pisa).

★

Marzo 2019

(czz/FG21)





*Società Astronomica Italiana*

Con il patrocinio della  
Camera dei Deputati