

GIORNALE DI ASTRONOMIA

Rivista di informazione, cultura e didattica
della Società Astronomica Italiana

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

Direttore responsabile: Fabrizio Bònoli

Ufficio redazionale: Valentina Pagnan

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

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

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

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

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

Fabrizio Bònoli
fabrizio.bonoli@unibo.it

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

Pubblicazione trimestrale
Vol. 52° · N. 1 · Marzo 2026



Fabrizio Serra · Editore
Pisa · Roma

Giornale di Astronomia, 2026, 1

Sommario

Astronomia e società

- 2 Il cielo non lo possono bombardare. La storia di
Maysoon, astrofila di Gaza
N. IANNASCOLI, G. COVONE

Astronomia oggi

- 5 L'enorme eco radio della formazione di un ammas-
so di galassie
A. BOTTEON (PREMIO 'GIUSEPPE LORENZONI' 2025)
9 La popolazione galattica delle Pulsar Wind Nebulae
ai raggi gamma
M. FIORI (PREMIO 'GIUSEPPE LORENZONI' 2025:
menzione speciale)

Storia

- 16 Vita ed eredità di Paolo Maffei, a cento anni dalla
nascita
R. NESCI
23 Aurore boreali osservate a bassa latitudine
A. ALTAMORE

Didattica

- 28 Le comete nei cieli antichi
F. GINANNESCHI

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

- 34 Il padiglione del cerchio meridiano di Repsold: do-
cumenti e immagini di un ambizioso progetto di
modernizzazione
M. GARGANO

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

- 39 Rifrazione, onda evanescente ed effetto tunnel
A. D'ERCOLE

Biblioteca (a cura di A. CAPPI)

- 48 E. BERGER, *La rivoluzione SpaceX. Elon Musk e la con-
quista di Marte* (recens. di A. CAPPI)
49 A. BETTINI, *Galileo Galilei, genio policromo. Fisico,
astronomo, filosofo, scrittore, ingegnere, matematico,
filologo, musicista e pittore* (recens. di P. MOLARO)
51 N. CARTWRIGHT, *La scienza vista da una filosofa*
(recens. di A. CAPPI)
53 C. ROVELLI, *Sull'eguaglianza di tutte le cose. Lezioni
americane* (recens. di A. CAPPI)

55 Gli Incontri del «Giornale di Astronomia»

In copertina

Vista aerea del "cuore" del radiotelescopio LOFAR (Low Frequency
Array), nei Paesi Bassi. Si tratta di un grande interferometro radio
composto da settantamila antenne distribuite su dieci Paesi euro-
pei, tra cui l'Italia, in grado di studiare emissione radio alle basse
frequenze. (crediti: ASTRON - Netherlands Institute for Radio As-
tronomy) [Si veda all'interno l'articolo di Andrea Botteon]

Il cielo non lo possono bombardare.

La storia di Maysoon, astrofila di Gaza

Nicoletta Iannascoli¹ · Giovanni Covone²

¹ Unione Astrofili Napoletani

² Università degli Studi di Napoli Federico II

«SONO Maysoon, ho 45 anni, vengo da Gaza, sono sposata e ho sei figli».

Così inizia il racconto di una donna che, fin da bambina, si alzava prima dell'alba per guardare le stelle, coltivando un sogno "impossibile" in quel luogo e in quelle condizioni: diventare astronauta.

In Palestina non c'erano percorsi per inseguire quel sogno, ma la passione è rimasta come una fiamma bassa ma costante, che non si è mai spenta.

Ho conosciuto Maysoon dalla sua pagina di astronomia su Facebook e le ho chiesto di raccontarmi la sua storia.

È iniziato tutto su un tetto di Gaza, con una bambina che contava le stelle e provava a riconoscere le costellazioni e a ricordarne i nomi. Poi la vita ha preso una sua direzione: il matrimonio, i figli, le guerre senza fine che spazzavano via ogni progetto. Ma il cielo era sempre lì, a ricordarle che esiste qualcosa che resta immutabile, che nessuna guerra può distruggere.

Nel 2014 la svolta: Maysoon scopre l'esistenza di un centro di astronomia presso una delle università della città. «C'era un telescopio per le osservazioni: non riuscivo a contenere la gioia», scrive. Partecipa a un evento pubblico per osservare la Luna e Giove, conosce la direzione e gli organizzatori, inizia a seguire corsi e a partecipare alle serate osservative.

Poi il passo più coraggioso: chiedere di entrare nel gruppo, nonostante lo scetticismo iniziale – «madre, casalinga, senza laurea» – e dimostrare sul campo che passione e impegno possono contare più dei titoli. In poco tempo tiene conferenze e attività per scuole e università e apre una pagina divulgativa che riscuote grande seguito.

Tra i ricordi più luminosi c'è la partecipazione a un concorso di astronomia organizzato da studenti, in collaborazione con il Centro di Astronomia di Gaza (Center of Astronomy and Space Sciences), presso l'Al-Aqsa University, guidato tra gli altri dall'astrofisico Suleiman Baraka (UNESCO Chair) e con l'Osservatorio Astronomico di Parigi.

L'idea di Maysoon è semplice e potente: sviluppare un'app in arabo, una mappa del cielo con prome-



FIG. 1. La casa di Maysoon.



FIG. 2. La casa di Maysoon dopo i bombardamenti.

moria degli eventi astronomici, pensata per chi vuole orientarsi sotto le stelle nella propria lingua. Forma una squadra, lavorano tre giorni, presentano il progetto. Quando viene pubblicata la classifica, Maysoon non si riconosce nei nomi del terzo e del secondo posto: «Con mia grande sorpresa, ero la prima classificata», racconta. Quella sera un amico le regala anche un piccolo telescopio autocostruito: «per guardare il futuro» le dice.

Con il tempo Maysoon apre anche una pagina Facebook, che in pochi mesi raccoglie centinaia di follower.

Poi, la guerra. Il buio non è più quello della notte stellata, ma un buio di interruzioni elettriche e connessioni saltate, di case sventrate, di fughe e ripari improvvisati. «Abbiamo lasciato la nostra casa e lì ho lasciato i miei sogni», scrive Maysoon.

Dopo il 2020 il centro di astronomia ha smesso di operare e il gruppo che lo gestiva si è disperso. Ho continuato a

* Su richiesta degli autori e in accordo con il «Giornale di Astronomia», questo articolo è stato pubblicato anche sulle seguenti riviste: «Coelum Astronomia», «Cosmo2050», «Astronomia UAI», «Scienza & Pace Magazine» (Centro Interdisciplinare Scienze per la Pace dell'Università di Pisa).



FIGG. 3 e 4. L'attuale paesaggio di Gaza.

osservare il cielo e a insegnare ai miei figli della Luna, delle costellazioni e di molte altre cose celesti.

Ma adesso, racconta Maysoon, «la guerra mi ha negato di guardare non solo il cielo, ma persino dalla finestra di casa». Da mesi non riesce nemmeno a riconoscere il cielo che prima conosceva «stella per stella». Paradossalmente, con l'elettricità spenta in tutta la città, le stelle tornano visibilissime – ma guardarle fa male: «Ora non so quale pianeta ho davanti né in che fase sia la Luna».

Maysoon e la sua famiglia è tornata a Gaza. «Ma, dopo due anni, con sgomento ho scoperto di aver perso la mia casa: è stata completamente distrutta». La vita quotidiana si è ristretta a necessità elementari: un tetto che non c'è, vestiti e stoviglie perduti, nessun reddito. «Dormiamo per terra, coperti da un panno che a malapena ci basta», scrive. L'osservatorio ha chiuso da anni, il gruppo si è sciolto; restano i figli, a cui Maysoon insegna ancora a riconoscere le costellazioni, come può, a occhio nudo.

È un atto di resistenza: preservare nei bambini la capacità di alzare lo sguardo, nominare il cielo, trovare una stella guida. «Tornerò a essere come prima e tornerò a contemplare il cielo», promette.

Prima della distruzione attuale, la Striscia di Gaza aveva sei università. Tre di queste sono state



FIG. 5. Un'osservazione pubblica organizzata prima della guerra dal Center of Astronomy and Space Sciences Research dell'Al-Aqsa University. (NdR: I volti sono stati offuscati per ovvi motivi).



FIG. 6. L'immagine riproduce visivamente la differenza «prima/dopo» dell'Al-Aqsa University nella Striscia di Gaza. Stante la difficoltà di reperire e/o pubblicare immagini satellitari dirette, si chiarisce che si tratta di una ricostruzione basata su fonti online ("satellite-style illustration"), realizzata su richiesta del «Giornale di Astronomia» da ChatGPT.

completamente distrutte dai raid aerei dell'esercito israeliano. Erano frequentate da oltre novantamila studenti cui è stato negato il diritto di studiare e sognare un futuro, come lo sognava la piccola Maysoon.

A Gaza colpire le università è stato un modo per recidere la possibilità stessa del futuro, a sradicare le fondamenta dell'istruzione. Nonostante tutto, la comunità accademica non si è arresa. Come affermato nella Dichiarazione d'emergenza unificata degli accademici e amministratori palestinesi del 29 maggio 2024, «le forze di occupazione israeliane hanno demolito i nostri edifici, ma le nostre università vivono ancora». Le università vivono nei loro studenti, vivono nei sogni di ragazze come Maysoon.

L'astronomia, per Maysoon, non è evasione, ma radicamento: attraverso le stelle ritrova le sue radici, la connessione con la vita, con la Terra: il cielo la riporta a sé stessa.

«Conoscevo ogni stella», scrive. Ricominciare vuol dire tornare a chiamarle per nome.

Nonostante le difficoltà, Maysoon non è sola. Quando la connessione lo permette ci sentiamo, ci scambiamo immagini, parliamo di futuro.

Ha perso tutto ma non il cielo. Il cielo non lo possono bombardare. Oggi Maysoon vive in un campo temporaneo, ma continua a raccontare le stelle ai suoi figli.

La storia di Maysoon non è solo una cronaca di guerra, non è solo la storia di una donna che guarda il cielo tra le macerie di Gaza, ma una testimonianza di come la scienza possa diventare linguaggio di pace. Perché l'Universo non appartiene solo a chi lo conquista, ma a chi lo guarda con meraviglia. Questa è anche la storia di un popolo intero. La storia di tanti altri uomini e donne a cui sono stati spezzati i sogni, a cui è stata spezzata l'istruzione, famiglie intere e la vita.

E mentre a Gaza una donna continua a cercare la sua stella, il mondo intero dovrebbe imparare a farlo con lei.

Con questo articolo, gli autori Nicoletta Iannascoli, e Giovanni Covone insieme alle redazioni delle riviste che pubblicheranno questo messaggio, sono vicini a Maysoon e a tutto il popolo palestinese con la speranza che un giorno possano riprendersi la propria vita, la propria terra e la propria libertà di guardare il cielo – non per paura ma per meraviglia.

Nicoletta Iannascoli, economista impegnata nel settore della Space Economy e divulgatrice scientifica, ideatrice, tra l'altro del progetto *Astronomia in corsia*, un'iniziativa per bambini in ospedale. Nel giugno 2024 è stata scelta come "Osservatore del mese" dal programma *Exoplanet Watch* della NASA, per le sue osservazioni di esopianeti.

Giovanni Covone è un astrofisico, professore di Astrofisica e Cosmologia presso l'Università di Napoli Federico II, divulgatore scientifico e Presidente della Società Italiana di Astrobiologia (SIA).

L'enorme eco radio della formazione di un ammasso di galassie*

Andrea Botteon

INAF · Istituto di Radioastronomia, Bologna

La rete cosmica

LA materia nell'universo non è distribuita uniformemente su scala grandissima, ma assomiglia ad una ragnatela fatta di filamenti, vuoti e nodi (FIG. 1). Questa struttura a "rete cosmica" rappresenta la mappa dell'universo su scala più vasta ed è il risultato di miliardi di anni di crescita delle strutture cosmiche guidata dalla gravità. Ai nodi di questa ragnatela troviamo gli ammassi di galassie, i più grandi oggetti gravitazionalmente legati presenti nell'universo. Gli ammassi di galassie sono dei sistemi enormi, con una massa totale che può superare 10^{14} - 10^{15} masse solari. Questa massa è costituita per la maggior parte (~80%) da materia oscura, una componente invisibile che non emette luce ma che esercita gravità e determina la struttura dell'ammasso.

Nonostante gli ammassi di galassie più grandi possano ospitare migliaia di galassie, la massa complessiva di queste rappresenta solo una piccola frazione (~5%) della massa totale dell'ammasso. La maggior parte della materia visibile dell'ammasso (~15%) è costituita dal gas detto *intracluster medium* (ICM), un plasma rarefatto ma molto caldo (da decine a centinaia di milioni di gradi) che emette principalmente raggi X e permea il volume in cui si muovono le galassie. Nell'ICM esistono anche due ingredienti meno visibili ma cruciali: le particelle relativistiche e i campi magnetici, che si manifestano attraverso emissioni osservabili alle frequenze radio (VAN WEEREN *et al.*, 2019). Capire come questi ingredienti si formano ed evolvono negli ammassi di galassie è il tema di frontiera di molte ricerche moderne.

Con l'articolo BOTTEON *et al.* (2022) abbiamo portato un contributo fondamentale in questo campo, mostrando che i fenomeni legati alla presenza dei campi magnetici e particelle relativistiche si distribuiscono negli ammassi su scale molto più grandi di quanto immaginato in precedenza.

* In questo articolo, l'Autore presenta i contenuti essenziali delle ricerche che gli sono valse il "Premio Giuseppe Lorenzoni" per l'anno 2025. Il premio, dedicato a Giuseppe Lorenzoni per ricordare la sua opera in campo astrofisico, è stato istituito nel 2017 dalla SAIT e dall'INAF - Osservatorio Astronomico di Padova, in occasione dei 250 anni della fondazione della Specola di Padova, ed è volto a premiare il miglior articolo scientifico di carattere astrofisico di un giovane, pubblicato nel triennio precedente.

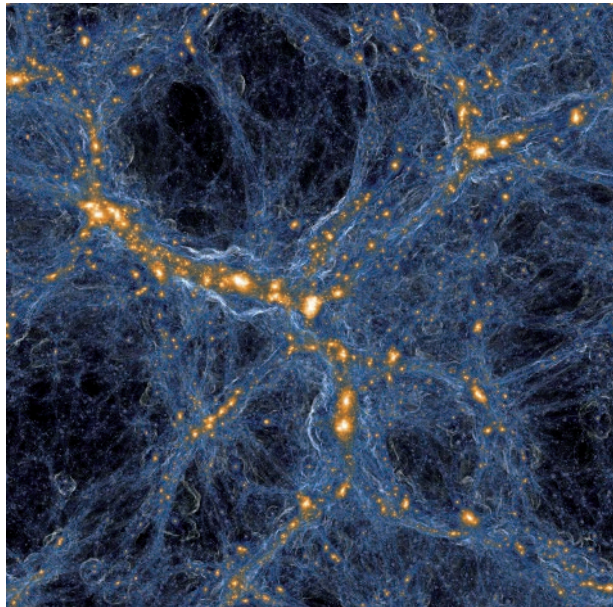


FIG. 1. Visualizzazione dell'universo su vastissima scala proveniente da una grande simulazione cosmologica. Si può notare come la materia sia distribuita prevalentemente lungo i filamenti cosmici. Gli ammassi di galassie si trovano ai nodi di intersezione di questi filamenti. (Crediti: collaborazione IllustrisTNG).

Come nascono gli ammassi di galassie?

Per capire come si formano queste emissioni radio dobbiamo prima comprendere come si formano gli ammassi di galassie. Gli ammassi crescono per fusione, quando due o più ammassi si avvicinano e si scontrano sotto l'effetto della gravità (MOLNAR, 2016). Queste collisioni cosmiche sono gli eventi più energetici dell'universo dopo il Big Bang. Durante una fusione tra ammassi di galassie, enormi quantità di energia cinetica vengono rilasciate su volumi molto grandi: parte di quest'energia finisce nel riscaldamento del gas che costituisce l'ICM, ma una porzione può alimentare processi che amplificano i campi magnetici. In pratica, moti caotici e su grande scala del gas stirano e intrecciano linee di campo magnetico, aumentandone l'intensità (DONNERT *et al.*, 2018). Il risultato sono campi magnetici più forti rispetto a quelli di partenza.

Questo è particolarmente vero nelle regioni interne dell'ammasso e, come vedremo, la nuova scoperta dimostra che anche le periferie degli ammassi possono raggiungere valori significativi di campo magnetico. Ma l'energia liberata durante le collisioni



FIG. 2. Vista aerea del “cuore” del radiotelescopio LOFAR, nei Paesi Bassi. Le antenne che costituiscono LOFAR sono distribuite in dieci Paesi europei. (Crediti: ASTRON).

ni tra ammassi non amplifica solo i campi: la stessa energia alimenta processi di accelerazione delle particelle (BRUNETTI, JONES, 2014). Onde d’urto e turbolenza generati durante il processo di fusione degli ammassi possono trasferire energia dal moto macroscopico alle particelle cariche, spingendo alcuni elettroni a velocità relativistiche (vicine a quelle della luce).

Il legame tra collisioni tra ammassi di galassie e la conseguente formazione di onde d’urto e turbolenza nell’ICM (che portano all’amplificazione dei campi magnetici e all’accelerazione delle particelle) è fondamentale per interpretare ciò che vediamo nelle immagini radio degli ammassi in stato di fusione.

Osservare l’emissione radio dagli ammassi

La presenza di emissione radio diffusa dagli ammassi è nota da decenni e ha portato allo sviluppo di modelli teorici per spiegarne l’origine nelle regioni centrali, dove è tipicamente osservata. In base alle proprietà dell’emissione radio, gli astrofisici sono in grado di associare diversi meccanismi di formazione alla radiazione osservata, distinguendo quella attribuibile alle onde d’urto e quella imputabile alla turbolenza. Poiché l’emissione radio è generata da meccanismi che la rendono più facile da osservare a basse frequenze (decine o centinaia di MHz), per “vedere” l’emissione più diffusa, più debole e più

estesa degli ammassi di galassie, servono radiotelescopi molto sensibili alle basse frequenze.

Qui entra in gioco LOFAR (*Low Frequency Array*; VAN HAARLEM *et al.*, 2013): un grande interferometro radio composto da 70mila antenne distribuite su ben dieci Paesi europei (Italia compresa), specializzato nelle osservazioni alle basse frequenze (da ~ 10 a ~ 240 MHz). LOFAR (FIG. 2) è considerato un *pathfinder* del futuro SKA (*Square Kilometre Array*; DEWDNEY *et al.*, 2009), il più grande interferometro che sarà presente sulla Terra e che comincerà ad essere operativo all’inizio del prossimo decennio. LOFAR è uno degli strumenti che sta sperimentando tecnologie e metodi di osservazioni innovativi che SKA svilupperà su scala ancora più grande. Operando alle frequenze più basse osservabili dalla Terra, LOFAR apre una finestra privilegiata per “scoprire” emissione radio che altri telescopi non vedrebbero.

Il caso di Abell 2255

In BOTTEON *et al.* abbiamo utilizzato LOFAR per osservare Abell 2255, un ammasso relativamente vicino (*redshift* $z \sim 0,08$, che corrisponde a circa un miliardo di anni luce di distanza), con una profondità d’osservazione straordinaria: decine di ore sia nella banda bassa (50 MHz) che in quella “alta” per LOFAR (150 MHz). Si tratta dell’osservazione più profonda mai realizzata finora su un ammasso di

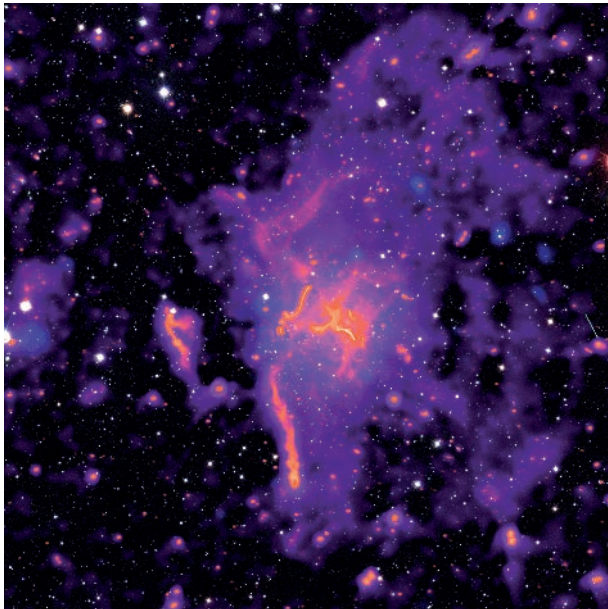


FIG. 3. Immagine composta dell'ammasso di galassie Abell 2255. In blu sono evidenziati i dati a raggi X di ROSAT, che mostrano il gas caldo tra le galassie. In arancione e viola sono descritti i dati radio di LOFAR, che mostrano particelle in rapido movimento nei campi magnetici dell'ammasso. Il bagliore viola è l'emissione radio che circonda l'intero cluster. L'immagine ottica di sfondo è stata catturata dalla Sloan Digital Sky Survey (SDSS). L'immagine composta misura circa 18 milioni per 18 milioni di anni luce, e il campo visivo copre una regione del cielo corrispondente a circa quattro lune piene. (Crediti: ROSAT/LOFAR/SDSS/BOTTEON *et al.*, 2022).

galassie in banda radio. Questa sensibilità ha permesso di mappare emissioni molto deboli, prima invisibili.

Le immagini ottenute dimostrano la presenza di un'enorme emissione radio addizionale rispetto a quella già nota da studi precedenti su Abell 2255. LOFAR ha permesso di osservare un gigantesco "involuppo" di emissione radio molto debole che avvolge e ingloba l'intero ammasso su scale senza precedenti. La sorpresa principale è l'emissione radio in Abell 2255, che si estende su scale di almeno 5 megaparsec (un megaparsec è $\sim 3,26$ milioni di anni luce) e avvolge l'intero sistema (FIG. 3). Questo involucro radio è anche molto più esteso dell'emissione del gas caldo dell'ICM osservato in raggi X. La brillantezza superficiale di questa emissione radio esterna è bassa (circa dieci volte più debole della regione centrale), ma grazie alla grande sensibilità di LOFAR è stata rilevata con chiarezza. Questa emissione pervasiva ci dice che gli elettroni relativistici e i campi magnetici che la generano sono distribuiti su volumi molto più grandi di quanto si pensasse.

Combinando le informazioni delle immagini ottenute con LOFAR a 50 e 150 MHz, è stato inoltre possibile dimostrare che sia le onde d'urto che la turbolenza sono in grado di generare emissione radio anche alle grandi distanze dal centro dell'ammasso. In altre parole, i processi di accelerazione delle particelle e di amplificazione dei campi non sono confinati al centro ma sono attivi anche nelle periferie dell'ammasso.

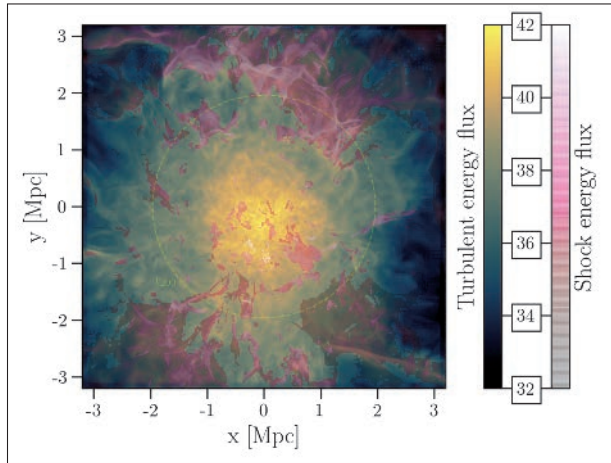


FIG. 4. Simulazione dell'energia rilasciata dalla turbolenza (in verde/giallo) e dalle onde d'urto (in bianco/rosso) in un ammasso di galassie con proprietà simili a quelle di Abell 2255. La figura mostra una regione corrispondente a circa 20 milioni per 20 milioni di anni luce. (Crediti: BOTTEON *et al.*, 2022).

Grazie all'analisi svolta, abbiamo misurato valori di campo magnetico a circa 2 Mpc dal centro dell'ammasso dell'ordine del microGauss. Pur essendo un milione di volte inferiori al campo magnetico terrestre ($\sim 0,5$ Gauss), questi valori sono centinaia di volte più grandi di quelli attesi semplicemente comprimendo un ipotetico campo magnetico primordiale uniforme generato durante il Big Bang. Questo significa che esistono meccanismi di amplificazione del campo magnetico aggiuntivi rispetto alla semplice compressione, e che questi devono essere efficaci anche nelle periferie degli ammassi, dove la densità del gas è molto più bassa rispetto al centro. È la prima volta che è stata effettuata una misura del campo a una distanza così grande dal centro di un ammasso.

Per aiutare l'interpretazione dei dati, le osservazioni sono state anche confrontate con simulazioni numeriche di ammassi di galassie simili ad Abell 2255. Le grandi simulazioni cosmologiche utilizzate, condotte con codici in grado di risolvere le equazioni della magnetoidrodinamica ad alta risoluzione, permettono di seguire la formazione di turbolenza e onde d'urto, e di calcolare il flusso di energia disponibile per l'amplificazione dei campi magnetici e per l'accelerazione di particelle (FIG. 4). Da questo confronto è stato possibile stimare che una percentuale dell'ordine di 5-10% del flusso energetico turbolento è canalizzata in campi magnetici e particelle relativistiche per spiegare l'emissione radio osservata fino a grandi distanze. È importante notare che l'accelerazione turbolenta delle particelle agisce su una popolazione pre-esistente di particelle semi-relativistiche che possono venire riaccelerate fino a produrre emissione radio osservabile. Infatti, spiegare l'enorme emissione radio mediante l'accelerazione di particelle con energia più bassa sarebbe troppo costoso dal punto di vista energetico.

Pertanto, lo scenario plausibile è che le particelle ad energie intermedie accumulate nelle periferie

dell'ammasso vengano rinvigorite dalla turbolenza generata nell'ammasso, producendo così l'involuppo radio osservato.

Uno sguardo al futuro: oltre gli ammassi di galassie?

Questo studio ha anche dimostrato come la banda radio è al momento l'unica banda osservativa che ci permette di investigare efficientemente le regioni periferiche degli ammassi di galassie. La banda radio è quindi fondamentale per comprendere la dinamica caotica del gas a grande distanza dal centro degli ammassi, dove avviene l'accrescimento delle strutture. Le osservazioni LOFAR di Abell 2255 fanno capire che siamo solo all'inizio di un'epoca aurea per lo studio delle particelle relativistiche e campi magnetici su grandissima scala. Con strumenti futuri, come il già citato SKA, potremo andare oltre, cercando di tracciare i segnali radio provenienti dalla ragnatela cosmica di filamenti che collega gli ammassi di galassie nell'universo, mostrando come i campi magnetici si estendono a connettere gli ammassi attraverso l'intero cosmo.

Referenze bibliografiche

Articoli scientifici

- A. BOTTEON *et al.*, *Magnetic fields and relativistic electrons fill entire galaxy cluster*, «Science Advances», 8, eabq7623, 2022.
- G. BRUNETTI, T. JONES, *Cosmic rays in galaxy clusters and their nonthermal emission*, «International Journal of Modern Physics D», 23, 30007, 2014.
- P. E. DEWDNEY *et al.*, *The Square Kilometre Array*, «Proceedings of the IEEE», 97, 8, 1482, 2009.
- J. DONNERT *et al.*, *Magnetic field amplification in galaxy clusters and its simulation*, «Space Science Reviews», 214, 122, 2018.
- S. MOLNAR, *Cluster physics with merging galaxy clusters*, «Frontiers in Astronomy and Space Sciences», 2, 7, 2016.
- M. VAN HAARLEM *et al.*, *LOFAR: The LOW-frequency ARray*, «Astronomy & Astrophysics» 556, A2, 2013.
- R. J. VAN WEEREN *et al.*, *Diffuse radio emission from galaxy clusters*, «Space Science Reviews», 215, 16, 2019.

Libri divulgativi

- F. BRADASCHIA, *Radioastronomia. Introduzione al cielo invisibile*, Albino, Sandit Libri, 2013.
- G. GHISELLINI, *L'universo come non si era mai visto. Le nuove astronomie*, Milano, Hoepli, 2023.

Andrea Botteon è nato a Vittorio Veneto (TV) nel 1991. Ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Astrofisica e Cosmologia presso l'Università di Bologna e l'Istituto di Radioastronomia dell'INAF nel 2019. Dal 2019 al 2022, ha lavorato come ricercatore post-doc all'Osservatorio di Leida (Paesi Bassi). Nel 2022, ha ottenuto un finanziamento "Young Researchers" dal Ministero dell'Università e della Ricerca. Dal 2023, è ricercatore presso l'Istituto di Radioastronomia dell'INAF di Bologna. La sua attività di ricerca si concentra principalmente sullo studio degli ammassi di galassie in banda radio e X.

La popolazione galattica delle Pulsar Wind Nebulae ai raggi gamma[★]

Michele Fiori

INAF · Osservatorio Astronomico di Padova

Il 4 luglio del 1054 d.C. gli astronomi cinesi osservarono l'esplosione di una supernova avvenuta a soli 6.500 anni luce dalla Terra in direzione della costellazione del Toro. L'evento generò quella che definirono una "stella ospite", tanto brillante da essere visibile di giorno per tre settimane e di notte per ben 22 mesi. Solo nel 1942 però, grazie al confronto tra l'espansione misurata della nebulosa e le antiche cronache cinesi, fu possibile ricondurre definitivamente quell'evento all'esplosione che generò uno degli oggetti astrofisici oggi più studiati dopo la nostra stella: la Nebulosa del Granchio (da qui in avanti la chiameremo con il suo nome inglese, Crab Nebula; FIG. 1).¹ Questa nebulosa ospita al centro una pulsar (una stella di neutroni rapidamente rotante; dall'inglese *PULSating stAR*) ed insieme sono ciò che resta dell'esplosione di supernova che ha distrutto la stella massiccia² progenitrice del sistema. Questi due oggetti sono intimamente connessi non solo dall'evento comune di origine ma, come vedremo più nel dettaglio, dalla loro interazione e dalla loro evoluzione nel tempo. Di fatto, ciò che rende così brillante la Crab Nebula, oltre all'interazione tra la materia espulsa nell'evento di supernova e il mezzo interstellare circostante (il resto di supernova), sono soprattutto le particelle cariche espulse dalla pulsar centrale – il vento della pulsar – che si espandono all'interno del resto di supernova.

Questo tipo di sorgente è definita "nebulosa da vento di pulsar" (dall'inglese *Pulsar Wind Nebula*, PWN; nel resto del testo useremo questo acronimo per semplicità). Il motore che ne alimenta l'emissione elettromagnetica è la perdita di energia rotazionale della pulsar centrale. Nel caso di pulsar giovani e molto energetiche, l'emissione della PWN è così intensa da essere osservabile dalla banda radio fino

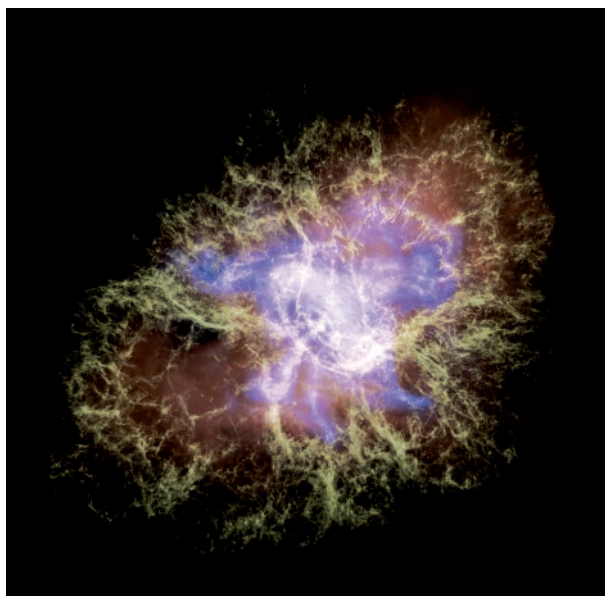


FIG. 1. Immagine multibanda della Crab Nebula ottenuta combinando osservazioni in banda X del telescopio "Chandra" (in blu) con la luce visibile raccolta dal telescopio «Hubble» (in giallo) e la luce infrarossa osservata dal telescopio «Spitzer» (in rosso). Questa particolare combinazione di luce proveniente da diverse bande dello spettro elettromagnetico evidenzia la struttura della PWN, chiaramente visibile dai dati in banda X. (Crediti: NASA, ESA, CXC, SSC).

ai raggi gamma. Nella banda gamma può spingersi a energie estreme, anche oltre i 10^{15} eV (1 PeV).³

La Crab Nebula è quindi una PWN "di riferimento" e, per molti aspetti, può essere considerata il prototipo che descrive le proprietà osservative di una PWN giovane: è vicina, luminosa, e la pulsar centrale è altamente energetica. Sebbene la Crab Nebula sia uno degli oggetti più importanti e studiati, esistono ovviamente molte altre sorgenti appartenenti a questa classe. Se consideriamo la banda gamma ad altissima energia – tipicamente ad energie maggiori di circa 10^{12} eV (1 TeV) – le PWN rappresentano la classe più numerosa di sorgenti galattiche identificate finora nelle più profonde survey del piano galattico.⁴ Approfondiremo più avanti il perché, ma il punto chiave è che, quando si parla di

[★] In questo articolo, l'Autore presenta i contenuti essenziali delle ricerche che gli sono valse la menzione speciale al "Premio Giuseppe Lorenzoni" per l'anno 2025. Il premio, dedicato a Giuseppe Lorenzoni per ricordare la sua opera in campo astrofisico, è stato istituito nel 2017 dalla SAIT e dall'INAF - Osservatorio Astronomico di Padova, in occasione dei 250 anni della fondazione della Specola di Padova, ed è volto a premiare il miglior articolo scientifico di carattere astrofisico di un giovane, pubblicato nel triennio precedente.

¹ J. J. HESTER, *The Crab Nebula: An Astrophysical Chimera*, «Annual Review of Astronomy and Astrophysics», 46, 2008, pp. 127-155.

² Una stella "massiccia" è generalmente definita come una stella con massa maggiore circa di 8 masse solari

³ In astronomia gamma si utilizza la stessa convenzione che si usa per i raggi X, per cui ci si riferisce all'energia dei singoli fotoni piuttosto che alla loro lunghezza d'onda (come ad esempio nella banda ottica) od alla loro frequenza (come ad esempio in banda radio).

⁴ E. DE OÑA WILHELMI et al., *Prospects for observations of pulsars and pulsar wind nebulae with CTA*, «Astroparticle Physics», 43, 2013, pp. 287-300.

dati e osservazioni ai raggi gamma ad altissime energie, queste nebulose sono tra le sorgenti galattiche più importanti, e capire come e perché emettano ci consente di studiare direttamente i processi di accelerazione e trasporto di particelle cariche in ambienti estremi.

Una delle maggiori difficoltà, nel contesto dell'astronomia al TeV-PeV, è l'identificazione certa di una sorgente come PWN. Il metodo più sicuro e inequivocabile è la presenza di una pulsar spazialmente coincidente con l'emissione gamma – ma è un caso non sempre disponibile, perché l'identificazione di una pulsar richiede l'osservazione della sua emissione pulsata. Occorre inoltre considerare che l'evoluzione dinamica di questi sistemi può far sì che la PWN risulti addirittura spostata rispetto alla pulsar che l'ha originata, rendendo meno banale la semplice coincidenza spaziale. Il metodo quindi più utilizzato è il confronto con la controparte ad altre lunghezze d'onda: l'osservazione spazialmente coincidente con la sorgente gamma di emissione non termica in banda radio e/o X e con le caratteristiche tipiche di una PWN che vedremo più avanti.

Nel panorama attuale dell'astronomia alle altissime energie, gli attuali osservatori gamma, hanno mostrato che le PWN dominano la popolazione galattica a queste energie e che esistono acceleratori in grado di portare le particelle fino alla scala PeV, come appunto la Crab Nebula. Questo rende cruciale non solo il censimento delle PWN, ma anche la loro modellazione come popolazione: un passaggio necessario per interpretare i cataloghi gamma, stimare il contributo delle sorgenti non risolte all'emissione diffusa e prevedere quante PWN osserveremo con la prossima generazione di telescopi. In questo contesto si inserisce il lavoro *Modeling the gamma-ray Pulsar Wind Nebulae population in our Galaxy*⁵ uscito nel 2022, in cui costruiamo una popolazione sintetica di PWN galattiche per cercare di descrivere le proprietà osservate di queste sorgenti e fare delle predizioni per la futura generazione di osservatori gamma alle altissime energie. Ma prima di continuare è necessario fare un paio di passi indietro e andare a vedere un po' più nel dettaglio cosa siano una pulsar ed una PWN (prossima sezione), oltre a qualche dettaglio sui raggi gamma ad altissima energia e su come possiamo osservarli da terra (sezione successiva). Nell'ultima sezione di questo articolo torneremo infine a parlare dei risultati ottenuti nel lavoro citato.

Pulsar e Pulsar Wind Nebulae

Le pulsar rappresentano una delle possibili fasi finali dell'evoluzione stellare e sono identificabili come delle stelle di neutroni altamente magnetizzate e in

rapida rotazione. Questi oggetti compatti sono i resti del nucleo di una stella massiccia che, giunta al termine del suo ciclo di vita, ha subito un rapido collasso gravitazionale seguito da un violento rilascio della materia presente negli strati esterni della stella (l'esplosione di supernova). La materia all'interno di una stella di neutroni raggiunge densità enormi, trovandosi in uno stato definito di degenerazione neutronica in cui una massa superiore a quella del Sole è compressa all'interno di un raggio dell'ordine di appena una decina di chilometri. La conservazione del momento angolare durante il collasso della stella progenitrice fa sì che l'oggetto compatto in formazione aumenti drasticamente la sua velocità rotazionale, finendo per avere periodi che vanno da qualche millisecondo fino ai secondi. A causa del collasso della stella progenitrice, anche il campo magnetico viene enormemente amplificato per effetto della conservazione del flusso magnetico, passando da campi magnetici iniziali dell'ordine di 100 G a campi magnetici dell'ordine di 10^{12} G. La velocità di rotazione estremamente elevata, combinata con questo campo magnetico estremo, è il motore che alimenta l'emissione della pulsar. Il campo magnetico incanala e accelera elettroni e positroni lungo le linee di campo magnetico a velocità relativistiche. Questa accelerazione lungo traiettorie curve induce l'emissione di radiazione di curvatura, che si manifesta come fasci collimati di onde elettromagnetiche che vanno dalle onde radio ai raggi gamma, emessi vicino ai poli magnetici. Poiché l'asse magnetico è generalmente disallineato rispetto all'asse di rotazione, questi fasci di radiazione spazzano lo spazio circostante con un moto precessionale. Per un osservatore lontano, il segnale appare quindi pulsato, visibile solo quando il fascio intercetta la linea di vista. Durante questo processo, la pulsar dissipa la sua energia rotazionale, rallentando gradualmente nel tempo, un processo noto come *spin-down*.

Tuttavia, l'emissione pulsata dovuta al dipolo magnetico rotante non è l'unico fenomeno significativo che causa la perdita di energia delle pulsar. Un'altra parte rilevante di energia rotazionale viene invece convertita in un flusso continuo di particelle altamente relativistiche e magnetizzate, principalmente coppie elettrone-positrone, che si propagano dalla magnetosfera della pulsar verso l'esterno. Questo flusso è chiamato "vento della pulsar" (*pulsar wind*) ed è la fonte energetica che alimenta l'emissione delle PWN. L'interazione tra questo vento ultrarelativistico e il mezzo circostante – che nelle prime fasi evolutive è la materia all'interno del resto di supernova – provoca un fronte d'urto (*termination shock*) in cui le particelle vengono ri-accelerate molto efficientemente. In questa regione, confinata all'interno del mezzo circostante, l'energia cinetica e magnetica del vento viene dissipata e convertita in radiazione, principalmente attraverso due meccanismi di emissione non termica: la radiazione di sincrotrone e l'effetto Compton inverso.

⁵ M. FIORI et al., *Modelling the γ -ray Pulsar Wind Nebulae population in our Galaxy*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 511, 2022, pp. 1439-1453.

L'emissione di sincrotrone è generata dall'interazione tra particelle cariche ultrarelativistiche e i campi magnetici all'interno della nebulosa, rendendo queste sorgenti estremamente luminose dalla banda radio ai raggi X. L'emissione dovuta all'effetto Compton inverso è invece dovuta all'interazione tra le stesse particelle altamente energetiche e fotoni a bassa energia presenti nella stessa regione, generalmente fotoni delle bande delle microonde e degli infrarossi. In questa interazione, le particelle cariche scambiano parte della loro energia con i fotoni fino a farli raggiungere energie molto maggiori, rendendo queste sorgenti estremamente luminose anche nella banda gamma. Poiché la luminosità totale di un PWN è direttamente correlata all'energia delle particelle presenti nel vento e quindi al tasso di perdita di energia rotazionale della pulsar, solo le pulsar con un'età inferiore a circa centomila anni possono alimentarle in modo significativo. Di conseguenza, le PWN solitamente osservabili, specialmente nelle bande dei raggi X e dei raggi gamma, sono tipicamente associate a pulsar con età caratteristiche inferiori a questo valore.

Le caratteristiche morfologiche delle PWN mostrano spesso strutture complesse e dinamiche, con evidenza di getti bipolari che si estendono lungo l'asse di rotazione della pulsar e strutture toroidali che riflettono il piano equatoriale dell'emissione del vento. Tuttavia, questa morfologia non è statica: l'aspetto della nebulosa cambia drasticamente a seconda della banda dello spettro elettromagnetico in cui viene osservata. La prova più evidente di questo fenomeno è data dal fatto che solitamente la dimensione della regione di emissione diminuisce progressivamente dalla banda radio alla banda X. Questo effetto di "restringimento" è legato al processo di raffreddamento delle particelle causato dall'emissione di sincrotrone: la durata media del tempo di emissività delle particelle è inversamente proporzionale alla loro energia; maggiore è l'energia delle particelle, più velocemente verrà dissipata questa energia. Ciò implica che le particelle più energetiche (responsabili dell'emissione in banda X) sopravvivano solo per un breve periodo e possano essere osservate solo nelle regioni più interne vicino alla regione di shock, mentre quelle meno energetiche, che vivono più a lungo, riescono a diffondersi raggiungendo distanze maggiori. Tuttavia, questo non è invece vero nella banda gamma. Le particelle responsabili dell'emissione di raggi gamma dovuta all'effetto Compton inverso sono le

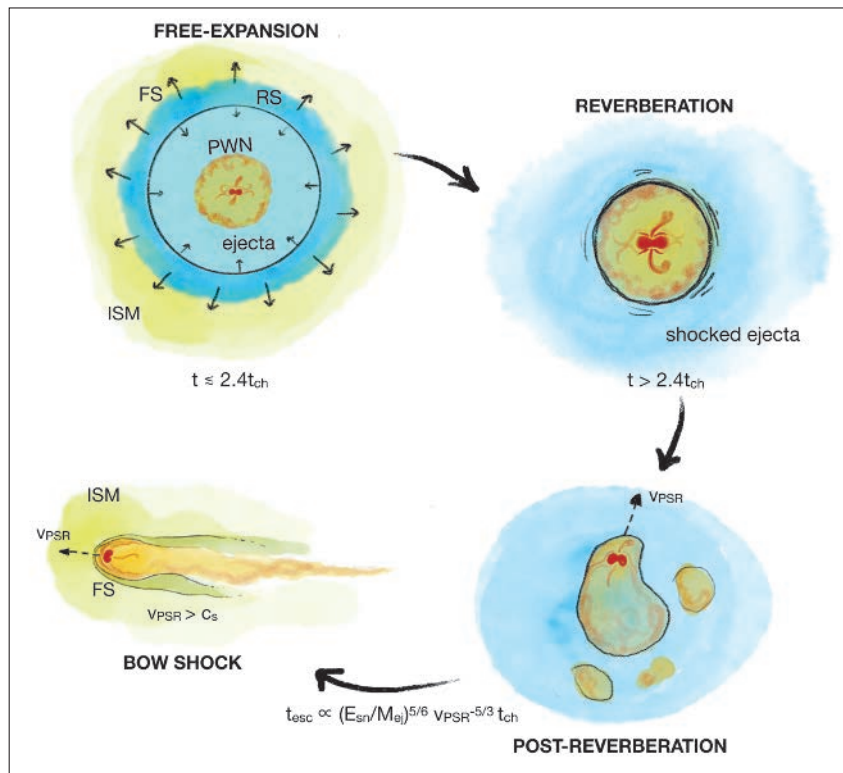


FIG. 2. Illustrazione delle principali fasi evolutive di una PWN. La terza fase è suddivisa in due fasi distinte: fase post-reverberation e la fase bow-shock. (Crediti: B. Olmi; vedi nota 6).

stesse particelle "relativamente" a più bassa energia che generano l'emissione di sincrotrone nelle bande radio e infrarossa. Poiché queste ultime, come discusso, hanno un tempo di raffreddamento molto lungo, una PWN rimarrà estesa e luminosa nei raggi gamma anche molto tempo dopo che l'emissione di raggi X non sarà più osservabile.

Per comprendere appieno l'ampia fenomenologia mostrata dalle PWN, è necessario analizzare come evolvano nel tempo l'emissione elettromagnetica e la morfologia di queste nebulose. Si distinguono tre fasi principali nell'evoluzione di una PWN, che sono illustrate in FIG. 2.⁶ Nei primi millenni dall'evento di supernova, la PWN si espande all'interno del materiale freddo nel resto di supernova senza interagirvi direttamente: questa è definita come fase di espansione libera. In questa fase l'evoluzione dinamica della nebulosa è governata interamente dall'energia rilasciata dalla pulsar. La durata è inversamente proporzionale al rapporto tra il tasso di perdita di energia rotazionale della pulsar e l'energia totale rilasciata durante l'esplosione di supernova: maggiore è questo rapporto, minore sarà la durata di questa fase. Tuttavia, in linea generale, questa fase ha una durata dell'ordine dei 10.000 anni. La seconda fase è definita di "risonanza" (*reverberation phase*) in quanto è previsto dai modelli teorici che il raggio della nebulosa inizi ad "oscillare" tra-

⁶ B. OLMI, *Evolved Pulsar Wind Nebulae*, «Universe», 9, 2023, p. 402.

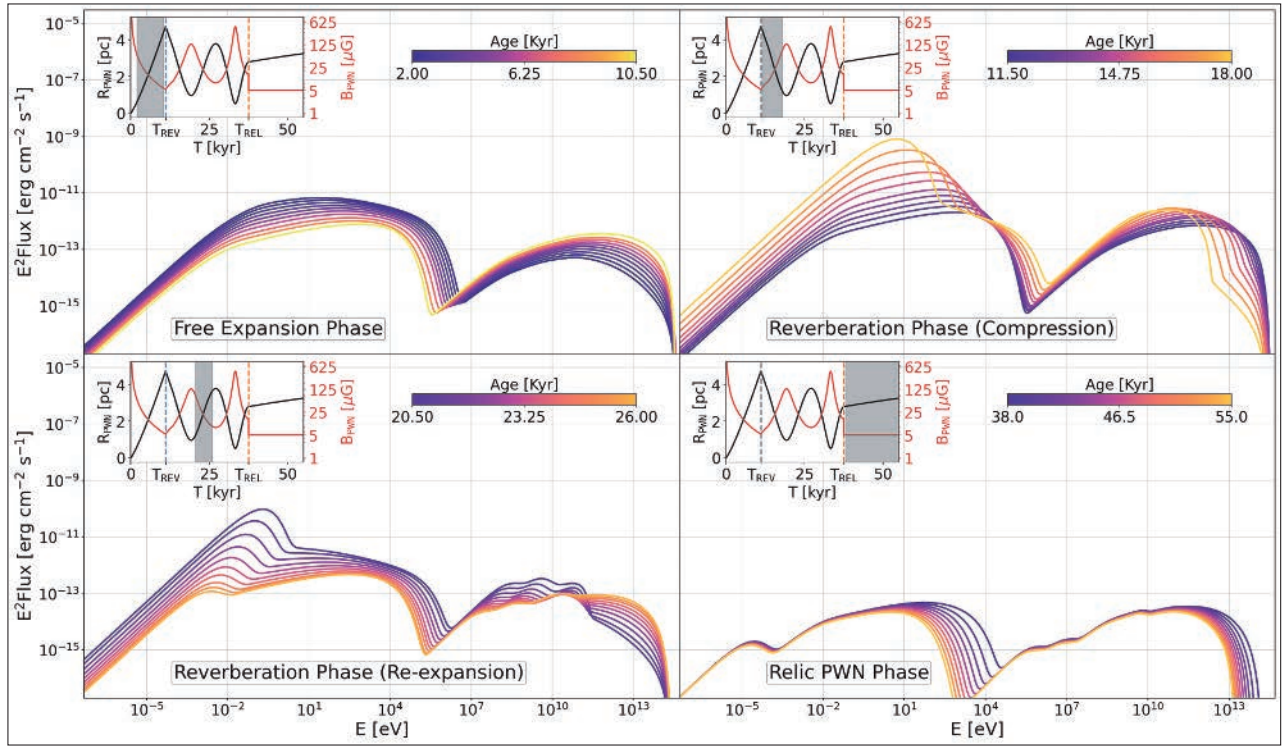


FIG. 3. Evoluzione spettrale di una PWN simulata durante le diverse fasi evolutive. I sottopannelli all'interno dei pannelli principali illustrano l'evoluzione temporale del raggio (in nero) e del campo magnetico (in rosso). L'area evidenziata in grigio nei sottopannelli indica l'epoca a cui sono estratti gli spettri mostrati nel pannello principale. Si noti l'ampio range di energie coperto dall'emissione elettromagnetica da queste sorgenti. (Crediti: vedi nota 5).

mite una serie di compressioni e ri-espansioni consecutive. Questo processo, che può durare per decine di migliaia di anni e che può portare a morfologie molto complesse e a modifiche importanti dello spettro di emissione, è dovuto all'interazione tra la PWN e lo shock inverso del resto di supernova (uno shock che si propaga verso l'interno del sistema). L'alternanza tra la contrazione e l'espansione è governata dal bilancio tra la pressione interna alla PWN e quella esercitata esternamente dal materiale nel resto di supernova. In questa fase, è possibile che la pulsar abbandoni la sua PWN (soprattutto a causa dell'elevato moto proprio acquisito dalla pulsar nel momento dell'esplosione della supernova), lasciando dietro di sé una PWN "reliquia" e generando una nuova PWN giovane intorno alla sua nuova posizione. Questa fase è quella di cui solitamente i modelli matematici faticano maggiormente a descrivere l'evoluzione e quindi tendono a sottostimare il suo impatto sullo spettro finale di emissione, anche se probabilmente la maggior parte delle PWN galattiche osservabili si trova oggi proprio in questo stadio. La fase finale inizia solitamente intorno ai 100.000 anni. In questo scenario si può osservare la coesistenza di due componenti, la PWN reliquia e una nuova PWN. Inoltre, se la pulsar ha una velocità sufficientemente elevata, può sfuggire al resto di supernova originale e muoversi direttamente all'interno del mezzo interstellare, generando una PWN definita *bow-shock*. Queste vecchie PWN sono caratterizzate da una forma allungata simile a quella di una cometa, con la pulsar in testa ed una lunga coda

alimentata dal vento della pulsar sviluppata nella direzione opposta al moto del sistema. In FIG. 3, mostriamo come evolve nel tempo lo spettro multi-banda emesso da queste sorgenti nelle diverse fasi appena descritte.

Raggi gamma ad altissime energie

Lo studio dell'universo ai raggi gamma è un campo relativamente nuovo per l'astronomia. Le prime misurazioni dirette dei raggi gamma da sorgenti celesti sono state possibili solo a partire dagli anni sessanta del secolo scorso. L'avvento di palloni aerostatici e satelliti in orbita ha infatti permesso di collocare gli strumenti al di sopra degli strati più bassi dell'atmosfera, che altrimenti ci schermava da questa radiazione altamente ionizzante. La prima rilevazione da terra di una sorgente di raggi gamma ad altissima energia è avvenuta invece solo nel 1989, con l'osservazione proprio della Crab Nebula tramite uno dei primi telescopi Cherenkov presso l'Osservatorio Whipple.⁷

Oggi, l'astronomia dei raggi gamma ad altissima energia sta vivendo una rapida espansione grazie all'attuale generazione di telescopi da terra, come MAGIC, VERITAS, HESS, HAWC, l'Osservatorio Pierre Auger e LHAASO, solo per citarne alcuni. Le sorgenti

⁷ T. C. WEEKES et al., *Observation of TeV gamma rays from the Crab nebula using the atmospheric Cerenkov imaging technique*, «The Astrophysical Journal», 342, 1989, pp. 379-395.

note che emettono alle energie dei TeV e oltre sono attualmente più di 300, un numero in costante aumento. Con la prossima generazione di strumenti, come gli osservatori CTAO (Cherenkov Telescope Array Observatory)⁸ e il mini-array di telescopi ASTRI,⁹ si prevede un ulteriore incremento di questo numero. Questi raggi gamma ad altissime energie hanno origine nei processi di decadimento nucleare, nelle interazioni nucleari e nelle interazioni di particelle cariche con campi magnetici intensi o, come abbiamo visto, tramite processi di scattering tra fotoni e particelle cariche estremamente relativistiche. Lo studio delle sorgenti che emettono a queste energie offre dunque una visione diretta dei processi più violenti e degli acceleratori più potenti dell'universo.

Ma se i raggi gamma non raggiungono gli strati più bassi dell'atmosfera, come è possibile effettuare delle osservazioni da terra? Quando un fotone TeV raggiunge l'atmosfera, l'interazione tra quel fotone e un nucleo atomico genera una cascata di particelle e fotoni altamente energetici che si propagano seguendo la direzione originaria del fotone gamma. In questo modo, la funzione di rivelatore dei raggi gamma è svolta dall'atmosfera stessa. A terra bisogna solo predisporre degli strumenti in grado di osservare gli effetti di questa interazione. Le tecniche possibili sono due e sfruttano in entrambi i casi l'effetto Cherenkov, fenomeno per cui particelle cariche in moto ad una velocità maggiore della velocità di propagazione della luce in quel determinato mezzo emettono dei brevissimi lampi di luce blu.

Una prima tecnica rivela direttamente le particelle all'interno della cascata, sfruttando il loro passaggio all'interno di vasche contenenti acqua (*water Cherenkov detectors*). Le strutture di rivelazione sono relativamente economiche – trattandosi di semplici vasche riempite d'acqua e dotate di detector sensibili alla luce blu – e quindi gli osservatori possono installarne molte e coprire grandi aree, anche se necessitano di essere posizionate ad altitudini abbastanza elevate (quote maggiori di circa 4000 metri sul livello del mare). Ne sono un esempio gli osservatori HAWC e LHAASO. Questa tecnica permette di osservare efficacemente soprattutto i fotoni gamma più energetici, quelli con energie maggiori di 100 TeV e fino ai PeV.

La seconda tecnica rivela invece i lampi Cherenkov generati in aria dalle particelle della cascata. Tramite l'utilizzo di telescopi ottici disposti in una configurazione ad array è possibile risalire alla direzione e all'energia del fotone gamma originario ("Imaging Air Cherenkov Telescopes" o IACT). Questi possono essere posizionati a quote più basse

– ma comunque generalmente a quote superiori ai 2000 metri sul livello del mare – e necessitano di specchi primari di dimensioni considerevoli, pur non richiedendo una buona qualità ottica. Per quest'ultimo motivo sono telescopi che non necessitano di essere riparati dalle intemperie e quindi non hanno nessuna struttura di protezione. Questa è la tecnica utilizzata dagli osservatori H.E.S.S., MAGIC e VERITAS, e permette di raggiungere sensibilità eccellenti da poche decine di GeV fino a decine di TeV.

Grazie a questi strumenti è stato costruito negli anni il catalogo delle sorgenti gamma astrofisiche alle altissime energie. Alle energie dei TeV gli IACT hanno svolto diverse campagne osservative sistematiche: ad esempio H.E.S.S., tramite la *Galactic Plane Survey* (HGPS),¹⁰ ha mappato gran parte del piano galattico a cui aveva accesso e pubblicato un catalogo omogeneo con decine di sorgenti identificate, tra cui molte PWN. In parallelo, array come LHAASO hanno osservato raggi gamma ultra-energetici da più sorgenti galattiche; nel caso della Crab Nebula, LHAASO ha misurato fotoni fino a circa 1.1 PeV,¹¹ mostrando che alcune PWN sono effettivamente dei Pevatron elettronici. La prossima generazione di IACT, tra cui CTAO ed il mini-array ASTRI, promettono un salto di sensibilità ed un ampliamento delle energie osservabili (da poche decine di GeV fino a centinaia di TeV), permettendo delle survey ancora più profonde, studi di popolazione e una migliore discriminazione morfologica nelle regioni più affollate lungo il piano galattico.

La popolazione di PWN galattiche

Abbiamo quindi visto i complessi meccanismi fisici che governano le singole sorgenti e le tecnologie che ci consentono di osservarle alle altissime energie. Ciò solleva una domanda fondamentale: quanto è rappresentativo ciò che vediamo nella realtà della nostra Galassia? Sebbene oggetti come la Crab Nebula siano stati estremamente importanti per aiutarci a comprendere le basi di questi fenomeni, questa è solo una piccola parte di un quadro molto più ampio e complesso. Infatti, considerando un tasso di nascita di nuove pulsar nella Galassia di circa una ogni cento anni¹² e che queste nebulose abbiamo visto essere abbastanza luminose solo fino ad un massimo di circa 100.000 anni, si può stimare che il numero totale di PWN galattiche osservabili ai raggi gamma possa essere compreso tra 500 e 1000. Comprendere la distribuzione globale delle PWN non è solo un esercizio di classificazione, ma è la chiave

⁸ THE CHERENKOV TELESCOPE ARRAY CONSORTIUM, *Science with the Cherenkov Telescope Array*, Singapore, World Scientific, 2019.

⁹ S. SCUDERI *et al.*, *The ASTRI Mini-Array of Cherenkov telescopes at the Teide Observatory*, «Journal of High Energy Astrophysics», 35, 2022, pp. 52-68.

¹⁰ H. ABDALLA *et al.* (H.E.S.S. COLLABORATION), *The H.E.S.S. Galactic plane survey*, «Astronomy & Astrophysics», 612, 2018, p. A1.

¹¹ Z. CAO *et al.* (LHAASO COLLABORATION), *Ultra-high-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 galactic sources*, «Nature», 594, 2021, pp. 33-36.

¹² C.-A. FAUCHER-GIGUÈRE, V. M. KASPI, *Birth and Evolution of Isolated Radio Pulsars*, «The Astrophysical Journal», 643, 2006, pp. 332-355.

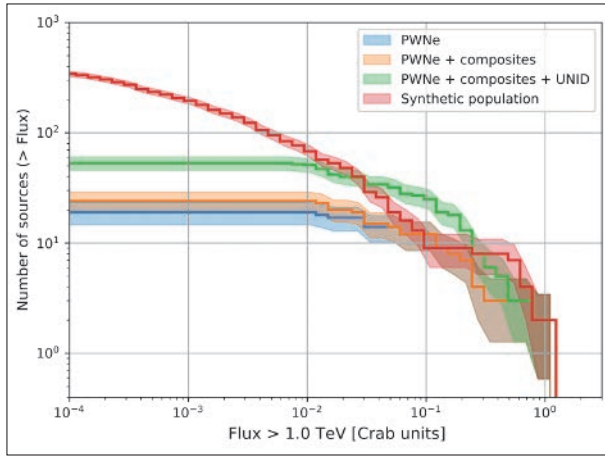


FIG. 4. Confronto tra il numero di sorgenti divise per intervalli di flusso totale tra la popolazione simulata e quella delle sorgenti osservate. La popolazione simulata (in rosso) è confrontata direttamente con le *PWNe* identificate con certezza (in blu), i sistemi compositi *PWN* / resti di supernova (in arancione) e la somma di queste due con le sorgenti ancora non identificate con certezza (in verde). Le aree di colore più chiaro rappresentano le incertezze di ciascuna curva. (Crediti: vedi nota 5).

per comprendere il ruolo di questi acceleratori nell'evoluzione energetica della nostra galassia. In questo contesto, la modellazione della popolazione galattica diventa un passaggio necessario non solo per interpretare correttamente i cataloghi, ma anche per stimare il contributo di queste sorgenti all'emissione diffusa della Galassia. Nel lavoro pubblicato nel 2022 abbiamo quindi proposto un modello fisicamente motivato della popolazione galattica di *PWN* responsabile dell'emissione di raggi gamma, tenendo conto dei vincoli osservativi disponibili provenienti dalle sorgenti note ed osservate tramite la generazione attuale di telescopi Cherenkov. Abbiamo basato le simulazioni che descrivono l'evoluzione dinamica e spettrale delle singole nebulose tramite un modello a singola zona e dipendente dal tempo. In questo approccio, la nebulosa viene trattata come un unico volume omogeneo (la «singola zona»), all'interno del quale viene tracciata temporalmente l'evoluzione energetica della popolazione delle particelle emittenti. Il modello funziona tramite un bilancio energetico dinamico: da un lato la pulsar rifornisce continuamente la nebulosa di energia (sotto forma di nuove particelle cariche ed energia magnetica), mentre dall'altro le particelle perdono energia nel tempo a causa dell'espansione della nebulosa e dei processi radiativi (principalmente sincrotrone e Compton inverso). Questo modello è stato inoltre modificato per includere la complessa fase di *reverberation* utilizzando prescrizioni ottenute attraverso moltissime simulazioni tridimensionali magneto-idrodinamiche. Ciò è stato fondamentale perché ha permesso di simulare l'intera «storia» di ogni singola *PWN*, dalla sua nascita fino alle fasi più evolute.

Un risultato particolarmente significativo del lavoro riguarda la scelta della popolazione di pulsar utilizzata per dare inizio all'evoluzione temporale

delle sorgenti simulate. Abbiamo scoperto che i dati osservativi sulle *PWN* vengono riprodotti con maggiore precisione se si ipotizza che le pulsar che alimentano queste nebulose abbiano le caratteristiche tipiche delle pulsar osservate pulsare nei raggi gamma, piuttosto che le caratteristiche dell'intera popolazione di pulsar radio (che include un campione molto più ampio ed evoluto di pulsar). Il motivo è che le pulsar rilevate ai raggi gamma sono intrinsecamente più giovani e più energetiche. Poiché solo gli oggetti in questa fase iniziale della loro vita possiedono energia rotazionale sufficiente per alimentare una nebulosa luminosa, esse costituiscono il campione statistico più appropriato per descrivere le proprietà osservate delle *PWN*.

La popolazione sintetica finale è risultata essere in buon accordo con i dati osservativi quando si considerano i *bias* introdotti dai limiti di sensibilità degli attuali telescopi. Dalla FIG. 4, dove mostriamo il confronto tra il numero di sorgenti divise per intervalli di flusso totale tra la popolazione simulata e quella delle sorgenti osservate, si vede che la popolazione simulata sembra riprodurre molto bene i dati osservativi fino a 10^{-2} «Crab Units» (CU).¹³ Attorno a tale valore, si vede che le curve osservative si appiattiscono a causa della perdita di sensibilità degli strumenti e, al di sotto di tale flusso, qualsiasi confronto è privo di significato. Notiamo anche che la popolazione sintetica potrebbe spiegare buona parte delle sorgenti non identificate a flussi più elevati, il che potrebbe significare che alcune di esse sono in realtà *PWN*. Si ritiene, infatti, che molte delle sorgenti gamma ad altissima energia ancora non identificate siano in realtà *PWN* evolute o «reliquie». Queste sorgenti hanno ormai perso la loro controparte nei raggi X o radio, rendendo la loro classificazione estremamente difficile, e potrebbero costituire una buona frazione del totale delle sorgenti gamma galattiche. Al contrario, la popolazione non identificata non è riprodotta nell'intervallo $2 \times 10^{-2} - 10^{-1}$ CU dalla popolazione sintetica. Ciò potrebbe essere un'indicazione di una diversa natura delle sorgenti che contribuiscono in questo intervallo di energia. Di fatto, le sorgenti attualmente sicuramente identificate, o potenzialmente identificabili, come *PWN* possono comunque spiegare solo circa la metà delle sorgenti attese al di sopra della soglia di rilevamento degli strumenti odierni. Un esempio concreto arriva dalla HGPS, dove sono state individuate circa 60 sorgenti TeV potenzialmente riconducibili a delle *PWN*: tuttavia, solo 14 di queste sono state identificate con certezza, mentre le restanti circa 45 sono sorgenti non identificate che potrebbero essere nebulose in una fase avanzata. Comunque un numero ben inferiore, di quasi un fattore 2 rispetto alle sorgenti attendibili. Le ragioni per cui circa il 50% delle sorgenti non sono state osservate posso-

¹³ La CU di una sorgente è definita come il rapporto, in un determinato intervallo di energia, tra il flusso della stessa sorgente e quello della Crab Nebula.

no essere molteplici: la mancanza di copertura spaziale degli odierni strumenti; la confusione spaziale delle sorgenti e la conseguente difficoltà di identificazione; o addirittura un'estensione angolare troppo grande delle sorgenti.

Il futuro CTAO è sicuramente destinato a dare un grande impatto alla comprensione di queste sorgenti. Grazie ad una sensibilità migliorata di almeno un ordine di grandezza in un range energetico molto più grande rispetto agli attuali strumenti, CTAO permetterà un salto di qualità senza precedenti. È possibile stimare che la sua entrata in funzione porterà

ad un aumento di almeno un fattore 3 nel numero di PWN identificate, con un numero teoricamente rilevabile di circa 500 sorgenti. Anche considerando un certo fattore di inefficienza simile a quanto vediamo oggi, ci attendiamo che saranno comunque osservabili almeno 200 PWN durante le prime *survey* del piano Galattico. Queste future osservazioni forniranno informazioni fondamentali per convalidare e migliorare i modelli teorici, aiutandoci a comprendere come queste sorgenti possano essere tra gli acceleratori di particelle più potenti e diffusi della nostra Galassia.

Michele Fiori, ricercatore presso INAF-Padova, ha conseguito il dottorato nel 2019 con una tesi sulle *Pulsar Wind Nebulae* ai raggi gamma. Ora si occupa di astrofisica ad altissima risoluzione temporale in banda ottica, studiando oggetti compatti tramite osservazioni di *timing*. Parallelamente, si occupa dello sviluppo di strumentazione per il *timing* ottico ultra-veloce e l'interferometria di intensità.

Vita ed eredità di Paolo Maffei, a cento anni dalla nascita

Roberto Nesci

INAF · Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali, Roma

NON è facile parlare di Paolo Maffei senza finire nella retorica o nelle banalità. Ripercorrere la sua vita personale e la sua attività professionale ci fa meglio percepire quanto sia cambiata la nostra vita quotidiana in questi cento anni, e anche quanto sia cambiata la ricerca scientifica e l'attività di divulgazione della scienza.

I primi anni

La famiglia di Paolo Maffei era di Foligno, sia per parte di padre che di madre, e il fatto che sia nato ad Arezzo (il 2 gennaio del 1926) è stato puramente accidentale. Il nonno materno di Paolo, Tobia Cimarelli, in quegli anni era Preside al liceo di Arezzo, per cui in prossimità della nascita la madre Angela si spostò ad Arezzo dove si trovavano i suoi genitori per non trovarsi da sola al momento del parto.

Fin da giovane Paolo mostrò interesse per le scienze, e l'astronomia in particolare: gli fu da guida un giovane sacerdote, don Ernesto Buono, poco più grande di lui, che era anche Direttore dell'Osservatorio Sismico di Foligno, collocato dal 1915 presso il Seminario. Paolo lo aiutava nella gestione del sismografo Alfani; le oscillazioni del pennino del sismografo venivano tracciate su fogli di carta affumicata che andavano quotidianamente sostituiti. Di notte, Paolo osservava i pianeti col cannocchiale di don Ernesto dalla terrazza del Seminario. Il primo bombardamento di Foligno del 22 novembre 1943 distrusse il Seminario e Paolo, che aveva allora 17 anni, mise in salvo quasi tutti i pezzi del sismografo in casa sua, sperando di poterlo rimontare a guerra finita. Non fu così, e il progresso tecnologico rese presto lo strumento obsoleto. Solo nel 2024 lo strumento verrà rimontato, in condizioni operative ma museali, presso la Biblioteca Jacobilli della Diocesi di Foligno, grazie all'interessamento della famiglia Maffei e all'opera sapiente del dott. Graziano Ferrari dell'INGV.

Sfuggito fortunatamente ai rastrellamenti tedeschi e al servizio di leva, appena finita la guerra Paolo andò inizialmente all'Università a Roma alla Sapienza, e proseguì gli studi a Firenze dove si laureò nel 1952 con una tesi sulla spettroscopia infrarossa, utilizzando lastre prese da Attilio Colacevich al Warner and Swasey Observatory di Cleveland (Ohio).

A Firenze conobbe Maria Assunta Morganti, che diventerà poi sua moglie nel 1955.



FIG. 1. Paolo Maffei all'Università di Perugia (anni Novanta).

Colacevich aveva lavorato a Firenze prima della Seconda Guerra Mondiale, ma era poi diventato Direttore dell'Osservatorio di Capodimonte, per cui non sappiamo quanto poté seguire la tesi di Paolo Maffei, che fu firmata come relatore da Giorgio Abetti, Direttore di Arcetri. La prematura scomparsa di Colacevich nel 1953 lasciò Maffei senza una guida per proseguire la linea di ricerca, e lui non amava lo studio della fisica solare, che era la principale attività ad Arcetri.

Inizi di carriera

Vinto il concorso per assistente alla cattedra di Astronomia dell'Università di Bologna, Maffei si spostò nel 1955 con la moglie a Loiano. Lì si trovava la stazione astronomica dell'Università di Bologna, realizzata nel 1936 da Guido Horn d'Arturo, inventore della tecnica dei telescopi a tasselli, tecnologicamente prematura per i suoi tempi, ma che ha per-

messo oggi la costruzione del James Webb Space Telescope. Direttore di Loiano era allora Leonida Rosino, da poco subentrato a Horn d'Arturo andato in pensione per limiti di età.

Maffei iniziò a studiare con Rosino sia le comete sia le stelle variabili. A differenza di oggi, in cui qualunque ricercatore è costretto a pubblicare qualcosa tutti gli anni, indipendentemente dal valore dei risultati raggiunti, a quel tempo il ritmo di pubblicazione era più lento e si preferiva accumulare le osservazioni per avere un quadro più completo.

A quell'epoca molti Osservatori in tutto il mondo avevano delle proprie pubblicazioni, che venivano poi mandate (per posta) agli altri Osservatori: oggi invece praticamente tutto viene pubblicato su riviste internazionali in inglese in modo da avere una maggiore e più facile diffusione. I primi lavori scientifici di Maffei sono quindi nei *Contributi* dell'Osservatorio dell'Università di Bologna e dell'Osservatorio di Padova, in italiano: non si trovano in internet, sono solo cartacei.

Rosino era intanto stato chiamato a coprire la cattedra di Astronomia a Padova, diventando così Direttore anche dell'Osservatorio di Asiago, che già teneva per incarico, e propose a Maffei di seguirlo; Maffei lo seguì volentieri con la famiglia, che nel frattempo era cresciuta con l'arrivo della figlia Marta, e tra i due si consolidò nel tempo una amicizia durata tutta la vita.

Ad Asiago Maffei proseguì lo studio delle stelle variabili in varie zone di formazione stellare (NGC2264, M20, M16, M17, NGC1579, NGC1999, IC405) pubblicando adesso sulle *Memorie della SAIT* a nome singolo. Pubblicò anche, sempre sulle *Memorie SAIT*, i risultati delle osservazioni fatte sulle comete coi telescopi di Loiano e di Asiago. A quei tempi le *Memorie della SAIT* erano scritte in italiano, con solo un breve riassunto in inglese.

Durante la sua permanenza ad Asiago Maffei fece anche un anno di studio presso l'Osservatorio di Amburgo, sempre per le ricerche sulle stelle variabili, usando anche lastre storiche prese decenni prima da quell'Osservatorio.

Nel 1963 ci fu un nuovo trasferimento, da Asiago ai Castelli Romani. Questa volta fu Livio Gratton, titolare della cattedra di Astrofisica alla Sapienza di Roma, a chiedere a Maffei di trasferirsi all'Università come Assistente alla sua cattedra. Gratton aveva appena fondato il Laboratorio di Astrofisica Spaziale (LAS) su fondi del CNR, accanto ai Laboratori di Frascati del CNEN, e stava mettendo insieme una squadra con competenze molto larghe in modo da aprire nuove linee di ricerca: in questa squadra Maffei era l'esperto di fotometria stellare, mentre Gratton era soprattutto uno spettroscopista. Il Laboratorio aveva anche persone dedicate alla astrofisica delle alte energie, che muoveva allora i primi passi, con strumentazione per raggi X su razzi e su palloni stratosferici, e alla astrofisica teorica con lo sviluppo di modelli di evoluzione stellare. Si formarono al LAS giovani destinati a diventare colonne portanti



FIG. 2. Paolo Maffei al telescopio Schmidt da 92/67 cm di Asiago (1973).

dell'astrofisica italiana, come Vittorio Castellani, Alvio Renzini, Franco Pacini, Giancarlo Setti, Duccio Macchetto, Giulio Auremma, Marcello Fulchignoni, Franco Occhionero. E naturalmente anche Paolo Maffei.

Dal punto di vista abitativo Maffei fu piuttosto nomade nei primi anni di permanenza sui Castelli Romani, in affitto tra Grottaferrata e Monteporzio, finché poté permettersi di comprare casa a Frascati. Dal punto di vista psicologico rimase sempre affezionato all'ambiente di Asiago: del resto Roma aveva un Osservatorio solare su Monte Mario e una stazione stellare a Campo Imperatore, ma i rapporti tra Gratton e Massimo Cimino, allora Direttore dell'Osservatorio di Roma, non erano idilliaci. Di fatto per le osservazioni il LAS poté far conto solo sui telescopi di Asiago, tanto da affittare ad Asiago una casa e acquistare una Volkswagen "Maggiolino" per i ricercatori che si recavano lì a turno per lunghi periodi di osservazione.

Fu quindi ad Asiago, col telescopio Schmidt da 67 cm di diametro inaugurato nel 1965, che Maffei iniziò un lungo programma di ricerca e studio di variabili a lungo periodo con lastre fotografiche sia sensibili al blu che all'infrarosso su 4 campi scelti lungo la Via Lattea. L'idea guida era di utilizzare le lastre infrarosse per scoprire le variabili a lungo periodo, tipo Mira, che hanno il massimo di emissione nell'infrarosso, mentre emettono poco nel blu data la bassa temperatura superficiale. L'osservazione nell'infrarosso permetteva inoltre di ridurre l'assorbimento della luce prodotto dalle polveri interstellari, molto dense sul piano della galassia, e quindi raggiungere anche maggiori distanze. Fino a quell'epoca, quasi tutte le ricerche di variabili sul piano galattico erano state condotte con lastre sensibili al blu, molto più semplici da usare di quelle infrarosse, che richiedevano tecniche speciali di sensibilizzazione immediatamente prima dell'uso e la cui omogeneità non era garantita. Da questo punto di vista il materiale raccolto da Maffei tra il 1967 e il 1975 si rivelò di ottima qualità.

A quei tempi, lo studio delle lastre fotografiche veniva fatto di necessità a occhio: l'Osservatorio di



FIG. 3. Paolo Maffei nel suo studio all'Università di Perugia col microscopio per le lastre fotografiche (1981).

Asiago aveva a questo scopo uno strumento apposito, il microscopio *blink*, che permetteva di osservare in rapida successione due lastre della stessa area di cielo prese con emulsioni diverse (es. blu e infrarossa) o in date diverse e notare facilmente la presenza di una stella variabile perché appariva lampeggiare mentre tutte le altre stelle apparivano ugualmente luminose: meglio sarebbe dire ugualmente annerite, dato che si osservavano direttamente le negative originali e non le stampe positive.

Una volta scoperte le variabili e fatta una stampa positiva su carta, ingrandita circa 10 volte, per ciascuna variabile si definiva una serie di stelle vicine non variabili e, guardando le lastre con un microscopio binoculare, si determinava per confronto la magnitudine della variabile: la precisione delle misure era tipicamente tra 1 e 2 decimi di magnitudine. L'esatta posizione della variabile veniva determinata misurando la sua distanza da stelle vicine di coordinate celesti già note prese dai cataloghi astrometrici disponibili.

Era un lavoro lungo e faticoso, che oggi è diventato molto semplice e veloce con le immagini digitali dei moderni rivelatori elettronici e i software su computer che misurano in pochi secondi posizioni e luminosità di migliaia di stelle presenti in una immagine astronomica.

Con i mezzi dell'epoca Maffei scoprì 198 variabili nel campo di M16, 62 nel campo di Gamma Cigni, e 35 nel campo di IC1805, pubblicate su *Information Bulletin of Variable Stars* (IBVS), all'epoca la rivista più usata per questo tipo di ricerche.

La curiosità premia

Una dote di Maffei, oltre ad essere molto scrupoloso, era una istintiva curiosità nel notare qualunque cosa insolita apparisse sulle lastre. E fu per questo che nel 1968 notò nel campo di IC1805 due strane macchioline presenti sulle lastre infrarosse, ma non in quelle blu. I telescopi a lui accessibili erano troppo piccoli per indagare la natura delle due nebulose, per cui si dovette limitare a pubblicarne semplice-

mente la scoperta sulle *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* (PASP), lasciando ad altri ulteriori studi. Saranno questi due oggetti, subito etichettati tra gli astronomi come "oggetti Maffei", che lo renderanno famoso presso il grande pubblico e genereranno una svolta nella sua vita.

Maffei non limitava la sua vita tra i telescopi, le lastre e la famiglia. Aveva una grande passione per la musica lirica, uno spiccato interesse per i fumetti e un grande interesse per la storia, sia quella romana, sia quella della scienza. Ai suoi tempi, ben prima di internet, per leggere qualcosa bisognava o andare nelle biblioteche pubbliche, o comprarla. Abitando in piccole cittadine, come Loiano ed Asiago, Maffei iniziò a formarsi una biblioteca privata che conteneva, oltre alle riviste astronomiche necessarie per il suo lavoro, tanti libri che coprivano i suoi molteplici interessi. Questo aspetto si mantenne costante per tutta la vita, sia negli anni sui Castelli Romani che dopo.

Un altro aspetto importante della personalità di Maffei era l'interesse per la divulgazione dell'astronomia. Fin da quando era a Firenze cominciò a scrivere articoli di divulgazione sulla rivista bimestrale *Universo* dell'Istituto Geografico Militare e sul *Bollettino di Geodesia e scienze affini* dello stesso Istituto. Quando poi andò a Loiano iniziò a collaborare alla rivista *Coelum*, fondata da Horn d'Arturo nel 1931 e diretta a un pubblico soprattutto di astrofili. Su questa rivista Maffei scrisse resoconti di proprie attività di ricerca e inoltre tenne una rubrica fissa di *Rassegna delle riviste e notizie brevi*. Oltre a questa *Rassegna*, che mantenne fino al 1979, scrisse moltissimi articoli di astronomia per le terze pagine di vari giornali, allora l'unico canale esistente per la divulgazione della scienza in Italia. Nel 1963 scrisse anche un piccolo libro, *Carte lunari di ieri e di oggi*, edito dall'Istituto Geografico Militare, in cui percorre la storia della cartografia lunare da Galileo ai suoi giorni. Erano gli anni in cui iniziava la corsa alla Luna delle due superpotenze USA e URSS e la Luna era diventata argomento di attualità.

E sempre restando nella attualità, nel 1969 ci fu lo sbarco dei primi astronauti sulla Luna. In quella occasione la RAI fece una diretta fiume, che si protrasse oltre 24 ore, invitando in studio oltre 150 personalità della cultura, della scienza, delle arti, della politica: ovviamente non potevano mancare gli astronomi, fra cui c'era anche Maffei. Durante quella lunga permanenza in comune Maffei ebbe modo di accorgersi di quanto infantili fossero le conoscenze astronomiche di base di tante persone che lui ammirava e che avevano un rilevante ruolo nella società, e decise che bisognava porre rimedio a questa situazione: la frattura tra conoscenza umanistica e scientifica era molto evidente, e ammettere di non capire nulla di matematica era quasi più un pregio che una vergogna. Nacque così l'idea di scrivere il libro *Al di là della Luna*, scritto con un linguaggio comprensibile per chi avesse fatto la scuola dell'obbligo, in cui si accompagna il lettore dalla superficie

del nostro pianeta fino ai confini dell'universo osservabile. Il libro fu scritto, ma rimase per qualche anno in un cassetto perché non si trovava un editore disposto a correre il rischio di pubblicarlo, poiché si pensava che non avrebbe potuto riscuotere l'interesse del pubblico. Qui vennero in aiuto le due nebulose scoperte nel 1968, che erano state studiate da astronomi americani coi maggiori telescopi del mondo e si erano rivelate essere addirittura due galassie, tra le più vicine alla Via Lattea. La notizia rimbalzò in Italia per via giornalistica, e venendo dall'America ebbe grande spazio sui giornali italiani. Il nome di Maffei divenne improvvisamente famoso e l'editore Mondadori decise nel 1973 di stampare il libro con una piccola tiratura nella collana scientifica EST, che andò a ruba in una settimana per cui furono necessarie diverse ristampe. L'ultima, la nona, fu del 1984 e in totale il libro vendette oltre centomila copie, un numero inimmaginabile all'epoca per un libro di divulgazione scientifica.

Il successo di *Al di là della Luna* spinse Maffei a realizzare un nuovo libro, più specialistico ma sempre accattivante, dal titolo *I mostri del cielo*, dove "mostri" va inteso nel senso latino di "meraviglia". In sette capitoli tratta diversi argomenti che sono stati, e alcuni ancora sono, di particolare interesse per l'astronomia: I mostri affascinanti (comete), Fantasma nel Sistema Solare (pianeti inesistenti), I mostri che uccidono (le supernovae), Eta Carinae (una stella misteriosa), I buchi neri, I mostri chiave (i quasar), Il mostro invisibile (la materia oscura). Il libro è una messa a punto scientificamente aggiornata al 1974 delle conoscenze astronomiche su quei temi, sempre scritto avendo in mente un lettore non specialista.

Da Roma a Catania

Nel 1975 Maffei vinse il concorso a professore ordinario e scelse di andare all'Università di Catania, che aveva un Osservatorio astronomico in città per lo studio del Sole e uno per le stelle sull'Etna in località Serra La Nave, a 1735 metri di quota. Maffei resterà a Catania fino al 1980, lasciando di sé un ottimo ricordo per le sue doti umane e la sensibilità nel valorizzare tutte le competenze presenti. Fra le altre cose, riuscì a ritrovare le lastre fotografiche realizzate tra il 1894 e il 1932 per il progetto internazionale della *Carte du Ciel*, cui l'Osservatorio di Catania aveva partecipato con pieno successo, ma di cui si era persa traccia. Fece anche svolgere a Catania, per la prima volta nella storia di quell'Osservatorio, un Congresso scientifico internazionale dedicato al Sole.

Maffei partecipò, durante la sua permanenza a Catania, anche allo studio di un telescopio spaziale a grande campo di vista da collocare sullo Skylab, che fu il primo tentativo degli USA di realizzare una stazione spaziale; ma il progetto Skylab venne poi abbandonato e il telescopio progettato non ebbe seguito.

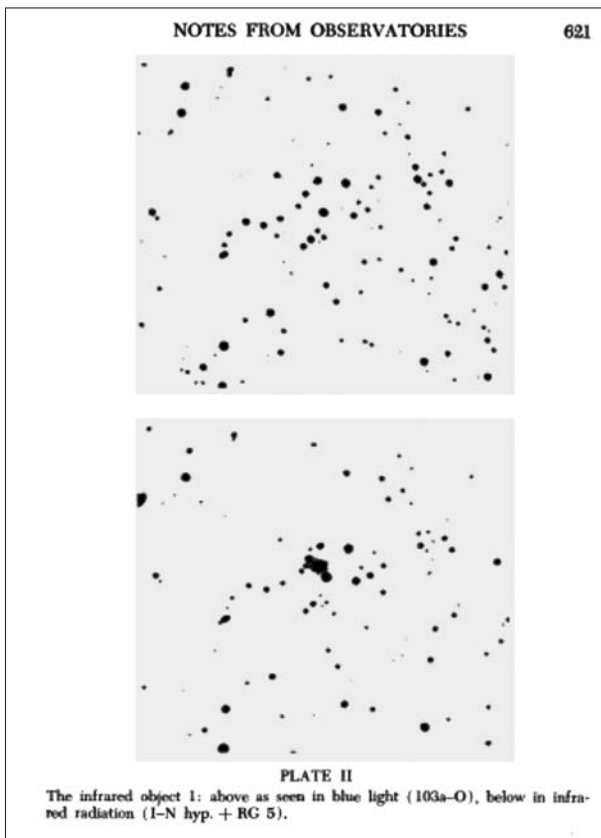


FIG. 4. La prima comunicazione sull'*infrared object 1* – che diventerà poi noto come la galassia Maffei 1 – nell'articolo *Infrared Object in the Region of IC1805*, su *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* (80, 1980, pp. 618-621). In alto l'esposizione nel blu, in basso quella nell'infrarosso, dove la galassia è quella specie di macchia scura al centro.

Maffei avrebbe potuto restare a Catania fino alla pensione, ma era figlio unico e aveva a Foligno due anziani genitori. Sentì quindi il dovere di riavvicinarsi a loro e si operò, insieme ad altri docenti universitari, per attivare un Dipartimento di Fisica all'Università di Perugia. La cosa era completamente nuova per quell'Ateneo, molto antico ma che non aveva mai avuto una linea di ricerca attiva in quel campo. L'operazione riuscì e Maffei si trasferì a Perugia dove ricoprì la cattedra di Astrofisica dal 1981 al 1998, anno in cui andò fuori ruolo. Nel 2002 venne nominato professore emerito dall'Università.

Altri libri

Parallelamente alla sua attività scientifica, Maffei si imbarcò nell'impresa di scrivere un altro libro, filosoficamente più impegnativo, *L'universo nel tempo*, pubblicato sempre per la collana EST di Mondadori nel 1982. È un libro molto interessante in cui si parte dalla evoluzione stellare e dalla formazione dei sistemi planetari, per passare poi alla evoluzione geologica del pianeta Terra e infine delle varie forme di vita terrestre. In seguito si passa alla descrizione della evoluzione delle strutture cosmiche, dalle galassie agli ammassi di galassie, e alle fasi ini-



FIG. 5. Paolo Maffei ad Asiago davanti alla cupola del telescopio da 122 cm (anni Ottanta).

ziali di esistenza dell'universo. Per far questo lavoro Maffei ha consultato, oltre a numerosi libri e articoli scientifici, anche i suoi colleghi di varie università, specialisti nei diversi campi da lui trattati, in modo da offrire al lettore un quadro unitario, aggiornato e scientificamente rigoroso, sempre avendo come obiettivo un lettore non specialista. È stato il primo libro in cui l'evoluzione dell'universo è stata illustrata su tutte le scale, dal macro al micro cosmo, mostrando come il cambiamento continuo sia in realtà la cifra con cui leggere l'universo. La motivazione alla base di questa grande opera editoriale era l'idea che ogni persona ha diritto di essere informata sulle conoscenze che la società ha accumulato nel tempo, perché questa conoscenza è necessaria a formare la percezione che ognuno ha della propria collocazione e del proprio ruolo nel mondo. Il senso stesso che una persona ha della propria vita dipende in gran parte dalla sua visione cosmica e secondo Maffei questo compito di diffusione di cultura non può essere delegato dagli scienziati ai giornalisti ma deve in qualche modo essere sentito come proprio.

Si avvicinava intanto una data astronomicamente importante, il ritorno della cometa di Halley previsto per il febbraio 1986. Per l'occasione, l'Agenzia Spaziale Europea aveva preparato la sonda Giotto che doveva incrociare l'orbita della cometa e farne uno studio ravvicinato: era la prima volta che una sonda spaziale avrebbe potuto vedere da vicino il nucleo di una cometa, impossibile da osservare dalla Terra, e fare una analisi chimica diretta della sua composizione. Anche l'Unione Sovietica aveva preparato due sonde per osservare la cometa, ma da distanza molto maggiore. Maffei pensò che fosse opportuno scrivere un libro dedicato alla Halley, raccontando sia le conoscenze disponibili sulle comete, sia la storia dei vari passaggi della cometa come descritti nei documenti storici che ne parlano. Il libro si compone di varie parti: la prima descrive cosa si pensava delle comete nella antichità greco-romana; contiene poi una breve storia della Cina per inquadrare le numerose osservazioni astronomiche cinesi della cometa; infine tratta la storia degli ultimi quattro secoli dello studio delle comete in generale, e della Halley in particolare.

La seconda parte contiene il racconto di tutti i passaggi della cometa di Halley dal 240 a.C. al 1910, quasi tutti storicamente documentati da osservazioni astronomiche, in gran parte cinesi e coreane, ma

anche europee. È di fatto anche un viaggio nella storia dell'umanità, a intervalli di 76 anni.

La terza parte descrive come sarà il passaggio del 1986 e le missioni spaziali destinate a incontrare per la prima volta una cometa.

Anche questo libro fu edito nella collana EST di Mondadori ed ebbe un grandissimo successo. Due anni dopo Maffei fece una seconda edizione coi primi risultati delle osservazioni fatte nel 1986.

I libri di Maffei furono tradotti in varie lingue, caso rarissimo per libri scientifici scritti in italiano, e Maffei riuscì a convincere l'editore a scegliere i traduttori tra astronomi di madrelingua o comunque persone che unissero la competenza linguistica con una buona conoscenza di base degli argomenti trattati. Non si trattava infatti di opere di pura letteratura e la proprietà di linguaggio era un elemento importante per la buona riuscita della traduzione.

Scienza a Perugia

L'attività propriamente scientifica di Maffei a Perugia fu concentrata su diversi progetti.

Il primo fu la realizzazione di un telescopio robotico per lo studio dei Nuclei galattici attivi, in particolare del tipo BL Lacertae, che aveva trattato ne *I mostri del cielo*. Fu un telescopio da 40 cm di diametro posto nel lato nord della periferia di Perugia, alloggiato in un prefabbricato munito di cupola girevole. Il telescopio era particolarmente innovativo e unico in Italia: controllato da un pc, svolgeva da solo le osservazioni durante tutta la notte, acquisendo le immagini con una camera CCD e misurando la magnitudine degli oggetti di interesse. L'intervento umano si limitava a definire la sequenza di osservazioni da svolgere durante la notte. Un sensore di pioggia provvedeva automaticamente a chiudere l'Osservatorio in caso di maltempo. Il telescopio fu operativo dal 1992 al 2000 e produsse una grande mole di dati per lo studio della variabilità di decine di sorgenti.

Un secondo progetto, più concentrato nel tempo, fu la partecipazione alla campagna internazionale di osservazione della cometa di Halley nel 1985-86 (1HW). Maffei acquistò e mandò in Sudafrica un telescopio Schmidt da 30cm di diametro per l'osservazione delle variazioni rapide della coda della cometa, riempiendo il grande buco temporale esistente tra i telescopi in Sud America e quelli in Australia.

Un terzo progetto fu la realizzazione di un telescopio infrarosso (IRAIT) da collocare in Antartide, un'idea nata dopo l'adesione dell'Italia nel 1986 al trattato internazionale per l'uso scientifico dell'Antartide. Il progetto prese vita nel 1994 ma fu meno fortunato dei precedenti, sia per il sistematico sottofinanziamento, sia per le oggettive difficoltà di operare un telescopio in un ambiente estremamente ostile, per certi aspetti peggiore di quello spaziale, sia per la inesperienza delle ditte coinvolte per la realizzazione di strumenti capaci di funzionare nelle

condizioni della notte antartica. Il progetto prevedeva anche la costruzione di un telescopio gemello da tenere in Italia, posto in una zona molto buia dell'Umbria, a Borgo Coloti, su cui sperimentare le modifiche da apportare al telescopio antartico, una filosofia che era stata usata in tutte le grandi missioni spaziali della NASA. L'Università di Perugia però non aveva i mezzi finanziari e di personale qualificato per sostenere il progetto, e sorsero anche conflitti di competenze tra la Regione e l'Università che resero di fatto i due telescopi completamente indipendenti. Maffei non visse abbastanza da avere la soddisfazione di vedere diventare funzionante il telescopio antartico IRAIT. Divenuto operativo vari anni dopo la morte di Maffei con il supporto dell'Osservatorio della Val d'Aosta, ancora oggi il telescopio, ribattezzato ITM (Infrared Telescope Maffei) vive sotto la spada di Damocle della mancanza di fondi.

Un quarto progetto fu la realizzazione di un indirizzo di Ingegneria spaziale all'interno del Corso di Laurea in Ingegneria elettronica. Come per il telescopio robotico, anche in questo caso Maffei fu molto preveggenza circa lo sviluppo delle attività spaziali nazionali: quasi contemporaneamente infatti nel 1988 nasceva l'Agenzia Spaziale Italiana, ASI. I contenuti del corso furono concordati in collaborazione con le principali aziende italiane coinvolte nella attività spaziale, e fu operativo per diversi anni con l'aiuto di vari professori a contratto. Purtroppo l'Università di Perugia non ebbe mai le forze necessarie per stabilizzare il corpo docente e corsi di ingegneria spaziale vennero aperti di conseguenza in Piemonte e in Lombardia presso Università più potenti e più vicine alle sedi aziendali, mettendo fine alla esperienza perugina.

Non solo astronomia

Ci sono altri due libri a cui si dedicò Paolo Maffei. Il primo è la edizione critica di una parte del diario scritto nella prima metà del 1800 da Giuseppe Settele, professore di Astronomia all'Università La Sapienza, allora nello Stato Pontificio. L'interesse per la storia dell'astronomia di questo diario consiste nel fatto che descrive gli eventi a seguito dei quali i libri di Galileo Galilei furono tolti dall'Indice dei libri proibiti nel 1820, per ordine di papa Gregorio VII. Maffei si interessò sempre ai dettagli della questione galileiana, tanto che la sua biblioteca ha un intero armadio di libri relativi a questa vicenda. I suoi buoni rapporti con i Gesuiti della Specola Vaticana, nati durante la sua lunga permanenza sui Castelli Romani, lo fecero anche includere nella commissione che papa Giovanni Paolo II costituì per preparare la cosiddetta riabilitazione di Galilei del 1992.

Maffei venne a conoscenza dell'esistenza di questo diario tramite Pio Emanuelli, astronomo presso la Specola Vaticana e docente di Storia dell'Astronomia all'Università La Sapienza, conosciuto quando

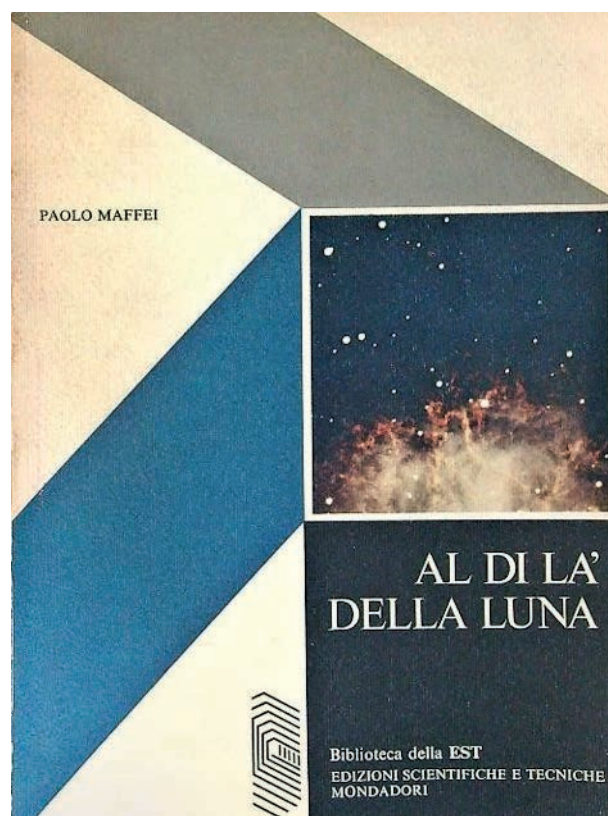


FIG. 6. La prima edizione di *Al di là della Luna*, del 1973.

era ancora studente di Matematica all'Università. La loro amicizia fu bruscamente interrotta dalla prematura scomparsa di Emanuelli nel luglio 1946 e Maffei si operò a lungo per riordinare gli scritti inediti e la biblioteca, curandone infine la cessione alla Biblioteca Galileiana di Pisa. Nel 1966 pubblicherà la ricognizione delle opere inedite di Emanuelli sulle *Memorie della SAIt*.

Nel frattempo, con l'aiuto dei genitori e della moglie, fece una accurata trascrizione dattiloscritta del diario del Settele, sperando di poterne fare col tempo la pubblicazione integrale. Data la mole del lavoro, Maffei riuscì soltanto, nel 1986, a pubblicare la parte del diario relativa all'anno 1820 con una piccola casa editrice di Perugia, Edizioni dell'Arquata ormai scomparsa. Il libro, intitolato *Giuseppe Settele, il suo diario e la questione galileiana*, contiene una ampia introduzione storica, la trascrizione integrale del diario per l'anno 1820, e un indice ragionato di tutte le persone citate all'interno del diario.

Il secondo libro, *I terremoti di Foligno negli anni 1935-38*, contiene la storia dell'Osservatorio Sismico di Foligno, che Maffei aveva frequentato da ragazzo e che aveva contribuito a mettere in salvo nel 1943, e il resoconto di tutte le scosse registrate negli anni 1935-38 quando lui era ancora un ragazzino. La ragione che spinse Maffei a scrivere il libro fu lo scoprire che questi terremoti, da lui vissuti personalmente, non erano riportati nel libro dell'INGV stampato nel 1998 e dedicato ai terremoti dell'Appennino Umbro-Marchigiano. La relazione e i tracciati sismici che il direttore don Ernesto Buono ave-

va a suo tempo mandato a Roma nel 1939 erano andati smarriti e non se ne trovò traccia. Decise quindi, avendo a disposizione gli appunti e le minute originali di don Buono, di raccogliere in maniera organica e filologicamente corretta tutto il materiale relativo alle singole scosse osservate e la mappa della intensità delle scosse registrata in varie zone del territorio folignate, realizzata a suo tempo da don Buono sulla base dei racconti dei parroci e di persone affidabili. Unitamente a una ampia documentazione fotografica dell'epoca, e alla storia dell'Osservatorio sismico, il libro si può ben considerare una prova tangibile dell'amore di Maffei per la sua città. Purtroppo non fece in tempo a vederlo stampato, morì infatti appena un mese prima della pubblicazione del libro, che fu presentato a Foligno da Giuseppe Zamberletti, storico fondatore del Dipartimento di Protezione Civile.

Attività divulgativa

Un grande merito di Paolo Maffei fu di aver realizzato, primo in Italia, una sistematica attività di divulgazione scientifica, prima con la lunga collaborazione a *Coelum*, poi con l'intensa opera di pubblicista su diversi giornali e riviste (*La Stampa*, *Osservatore Romano*, *Tutto Scienze*, *l'Astronomia*, *Airone*, *Genius*, *Il Giorno*, *La Repubblica*, *Scientia*, *Il Tempo*, *Scienze e Dossier*, *La Casa di Dedalo*, *l'Enciclopedia Italiana*, e altre), e inoltre con numerose interviste televisive anche con famosi giornalisti scientifici come Piero Bianucci e Piero Angela. Ha sempre tenuto un intenso scambio epistolare con diverse associazioni di astrofili; fondò, o incoraggiò la fondazione di associazioni astrofile in Umbria, prima di lui quasi inesistenti. In riconoscimento della sua attività divulgativa l'Unione Astrofili Italiani gli conferì nel 2002 il "Premio Giovanni Battista Lacchini".

Tratto importante della sua personalità, timida e poco ambiziosa, mantenne una corrispondenza epistolare con tutti i semplici cittadini che gli scrivevano per avere informazioni scientifiche, non disde-

gnando di esporsi anche sul versante filosofico e religioso. Del resto la sua biblioteca, ricca di oltre dodicimila volumi, non manca di libri su questi argomenti.

Paolo Maffei ha lasciato una grande biblioteca, ricca di elementi molto rari, che oltre alla astrofisica riguarda la storia della musica, la storia romana, la storia della scienza, la storia e l'arte dell'Umbria, mappe e guide del Touring Club, letteratura minore, il caso Galileo, e tanto altro. Su iniziativa della famiglia, i libri sono stati classificati sul sistema SEBI-NA-OPAC e sono accessibili in loco per consultazione.

Premi e riconoscimenti

- Medaglia d'oro dei benemeriti della cultura e dell'arte della Repubblica Italiana, 20 novembre 1989.
- a Maffei è dedicato un asteroide, 18426 Maffei.
- Premio di operosità scientifica del Dipartimento di Fisica dell'Università La Sapienza di Roma, relativo all'A.A. 1969/70.
- Premio Bergamo, xv Fiera del libro, 1974, Associazione Esercenti e Commercianti, per *Al di là della Luna*.
- Premio APE, Associazione per il Progresso Economico, 24 febbraio 1975, per *Al di là della Luna*.
- Premio dell'Ente Biblioteche Popolari, 1975, per *Al di là della Luna*.
- Medaglia Ente Provinciale per il Turismo di Roma, 1978.
- Premio Glaxo per la Divulgazione Scientifica, VII edizione, patrocinato dall'Unione Giornalisti Scientifici Italiani, Verona 17 novembre 1985, per *La cometa di Halley*.
- Premio NUOVAERA di Todi, 16 settembre 1985.
- Premio Internazionale San Valentino d'Oro, XXII edizione, Terni, 20 aprile 1990.
- Premio Rotary Umbria 1993.
- Premio Anassilaos, XI edizione, 6 novembre 1999.
- Premio G. B. Lacchini della Unione Astrofili Italiani, 15 settembre 2002.
- Medaglia per i 60 anni di appartenenza alla Société Astronomique de France, 13 novembre 2006.
- Medaglia d'oro del Comune di Foligno.

Roberto Nesci, laureato in Fisica presso l'Università "La Sapienza" di Roma il 5/10/1973. Astrofisico sperimentale, docente di Astronomia presso la stessa Università dal 1986 per il Corso di Laurea in Scienze Naturali e dal 2003 per il Corso di Laurea in Fisica e Astrofisica fino al 2011. Ha fatto parte delle collaborazioni internazionali WEBT e TANAMI per lo studio di QSO; si è occupato della digitalizzazione di lastre fotografiche degli Osservatori di Asiago e di Byurakan.

Aurore boreali osservate a bassa latitudine

Aldo Altamore

Adjunct Scholar Specola Vaticana

già Dipartimento di Matematica e Fisica Università degli Studi Roma Tre

In memoria di Natalia Ptitsyna

St. Petersburg Filial of Institute of Terrestrial Magnetism,
Ionosphere and Radiowave Propagation, Federazione Russa

Sommario

NEL presente lavoro vengono illustrate e discusse le aurore boreali osservate in Italia a partire dall'anno 1582 fino alla più recente del 2024.

In una tabella riassuntiva sono riportati i dati salienti dei fenomeni: epoca e luogo di osservazione, nome dell'osservatore, bibliografia relativa alla descrizione del fenomeno.

Molte aurore furono osservate dal padre Angelo Secchi o da suoi corrispondenti e pubblicate sul *Bullettino Meteorologico del Collegio Romano*. Vanno anche menzionate le aurore osservate da Giovanni Schiaparelli all'Osservatorio di Brera a Milano.

Tra tutte l'aurora più famosa è quella del 28-29 agosto 1859, denominata "evento di Carrington" che fu osservata in tutto il mondo e che coincise con la più intensa tempesta geomagnetica avvenuta in epoca storica.

L'attuale inquinamento luminoso ha reso estremamente difficile l'osservazione di queste aurore meridionali.

Introduzione

L'aurora polare è un fenomeno caratterizzato da bande luminose che assumono un'ampia gamma di forme e colori rapidamente variabili, di solito di colore rosso-verde-azzurro. Sono causate dall'interazione di protoni ed elettroni provenienti dal Sole. Queste particelle eccitano gli atomi dell'alta atmosfera che diseccitandosi emettono la luce osservata. Le aurore sono normalmente osservabili alle alte latitudini, tuttavia, nel corso della storia è stato possibile osservarle anche nelle regioni meridionali.

In Italia le aurore sono un fenomeno raro, anche se talora sono state osservate non solo nelle regioni del nord ma anche al centro e persino al sud. Per esempio, il 17 e il 18 novembre 1848, il fenomeno fu talmente intenso ed esteso da essere visibile anche a Napoli dove fu osservato dagli astronomi dell'Osservatorio Astronomico di Capodimonte. Il pittore Salvatore Fergola realizzò due dipinti rappresentanti l'aurora vista proprio da quell'Osservatorio.

Molto famosa è l'intensissima aurora del 28-29 agosto 1859, che fu osservata in tutto il mondo e va sotto il nome di evento di Carrington, dal nome del

l'astronomo inglese Richard Christopher Carrington che lo osservò e lo mise in correlazione con l'emissione delle particelle cariche da parte del Sole, permettendo di escludere tutte le altre ipotesi sull'origine dei fenomeni aurorali.

In coincidenza con questa aurora la strumentazione degli osservatori geomagnetici mostrò intense variazioni, che furono anche registrate all'Osservatorio del Collegio Romano dal padre Angelo Secchi sj. In quell'occasione si formarono correnti spurie nelle linee telegrafiche che provocarono anche ustioni ai telegrafisti in servizio.

Si ritiene che tempeste di questa intensità abbiano una frequenza media di 500 anni. Se oggi dovesse avvenire un fenomeno simile a quello del 1859, questo avrebbe gravi conseguenze sulle moderne tecnologie, tali da paralizzare per diversi giorni le attività umane. Per questo motivo è stata sviluppata la cosiddetta meteorologia spaziale che cerca di prevedere i suddetti fenomeni in modo da poter correre ai ripari, come per esempio, mettere in sicurezza i satelliti artificiali.

In questo lavoro riporteremo la descrizione delle aurore meridionali osservate tra il 1716 e 2024 riportate nel *Bullettino Meteorologico del Collegio Romano* e in altre fonti. La tabella ne presenta un elenco, a partire da un'osservazione del 1582. Tra gli osservatori vale la pena ricordare Giovanni Schiaparelli, che lavorava a Brera; il barnabita Francesco Maria Denza del Real Collegio Carlo Alberto di Moncalieri, fondatore della Specola Vaticana; il gesuita Angelo Secchi e Giuseppe Armellini fondatore dell'Osservatorio Astronomico di Roma.

È infine importante sottolineare che nel passato le aurore erano più facilmente visibili per l'assenza dell'inquinamento luminoso prodotto dall'odierna illuminazione artificiale.

Aurore osservate nell'area del Mediterraneo nell'antichità

Le antiche osservazioni delle aurore nel mondo occidentale vennero quasi esclusivamente effettuate nell'area del Mediterraneo, essenzialmente in Grecia e in Italia, in genere in coincidenza con i massimi del ciclo solare. I pochi resoconti di queste antiche osservazioni sono vaghi ed imprecisi e spesso pre-

AURORE BOREALI OSSERVATE IN ITALIA DAL 1582 AL 2024			
Data	Luogo	Osservatore	Referenze
6-8 marzo 1582	Casale Monferrato	Anonimo	<i>De Conti Notizie Storiche della Città di Casale e del Monferrato</i> , 1841
17 marzo 1716	Casale Monferrato	Anonimo	<i>De Conti Notizie Storiche della Città di Casale e del Monferrato</i> , 1841
19 ottobre 1726	Firenze	Anonimo	Th. Dereham in <i>Novelle Letterarie</i> , Firenze 1758, Tomo XIX, p. 381
16 dicembre 1737	Venezia Bologna	Giovanni Poleni Eusebio Sguario Angelo Calogerà Eustachio Zanotti	E. SGUARIO, <i>Dissertazione sopra le aurore boreali</i> , Venezia 1787 A. CALOGERÀ, <i>Opuscoli scientifici e filologici</i> , tomo XXX E. ZANOTTI, <i>Descrizione di un'aurora boreale ...</i> Lelio Della Volpe, Bologna
29 marzo 1739	Bologna	Eustachio Zanotti	E. ZANOTTI, <i>Osservazioni di un'aurora boreale ...</i> Lelio Della Volpe, Bologna
da 1768 a 1779	Padova	Francesco Zantedeschi	<i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i> , n. 11, 15 giugno 1863, p. 83
da 1780 a 1807	Padova	Francesco Zantedeschi	<i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i> , n. 12, 30 giugno 1863 p. 90
29 febbraio 1780	Padova	Giuseppe Toaldo	<i>Saggi scientifici e letterari dell'Accademia di Padua</i> , 1, 178-194, 1780
17 novembre 1848	Roma-Napoli	Mario Patrelli	<i>Rendiconto Reale Accademia delle Scienze</i> , Napoli 1848, n. 37
29 agosto 1859	Roma	Angelo Secchi	<i>Civiltà Cattolica</i> , Ser. IV, Vol. III, 6 settembre 1859, p. 732
3 maggio 1862	Milano-Brera	Giovanni Schiaparelli	<i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i> , n. 17, 15 ottobre 1862, p. 135
19 maggio 1862	Milano-Brera	Giovanni Schiaparelli	"
20 maggio 1862	Milano-Brera	Giovanni Schiaparelli	"
27 maggio 1862	Milano-Brera	Giovanni Schiaparelli	"
4 agosto 1862	Milano-Brera	Giovanni Schiaparelli	"
21 agosto 1862	Milano-Brera	Giovanni Schiaparelli	"
28 agosto 1862	Milano-Brera	Giovanni Schiaparelli	"
14 dicembre 1862	Urbino	Alessandro Serpieri	<i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i> , n. 24, 31 dicembre 1862, p. 193
14 febbraio 1869	Moncalieri	Francesco Denza	<i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i> , n. 2, 28 febbraio 1869, p. 10
5 aprile 1870	Volpigliano	Francesco Denza	<i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i> n. 4, 30 aprile 1870, p. 2
24-25 settembre 1870	Moncalieri	Francesco Denza	<i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i> , n. 12 31 dicembre 1870, p. 91
24-25 ottobre 1870	Caltagirone	Gesualdo Montemagno Angelo Secchi	Archivio Osservatorio Astronomico Palermo e <i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i> , n. 11, 30 novembre 1870, p. 11
24-25 ottobre 1870	Roma	Angelo Secchi	<i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i> , n. 11, 30 novembr 1870, p. 81 e ss.
9-10 aprile 1871	Moncalieri	Francesco Denza	<i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i> , n. 5, 31 maggio 1871 p. 34
9-10 maggio 1871	Moncalieri	Francesco Denza	<i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i> , n. 5, 31 maggio 1871 p. 34
18 e 27 giugno 1871	Moncalieri	Francesco Denza	<i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i> , n. 7, 31 luglio 1871, p. 52
15 luglio 1871	Moncalieri	Francesco Denza	<i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i> , n. 7, e 31 luglio 1871, p. 52
2 novembre 1871	Roma	Angelo Secchi	<i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i>
4-5 febbraio 1872	Roma	G. B. Donati, A. Secchi, G. Egidi	<i>Atti Acc. Pont. Nuovi Lincei</i> , Sess. III, 18 feb. 1872 e <i>Bullettino Meteor. del Collegio Romano</i> n. 11, p. 1 e ss
25-26 gennaio 1938	Roma	Ignoto	Registro OAR-INAF non meglio identificato
21-22 gennaio 1957	Roma	Giuseppe Armellini	Appunto ritrovato in archivio OAR-INAF
10-11 maggio 2024	Roma	Gianluca Masi	www.virtualtelescope.eu/

sentano difficoltà di interpretazione. La più antica descrizione di un'aurora boreale meridionale osservata nell'area del mediterraneo è dovuta ai Greci e risale al 468 a.C. (STOTHERS, 1979; SCHOVE, 1983, MADEN 2020).

Le aurore osservate in Italia dal 1726 al 2024

Passiamo ora a descrivere le informazioni sui fenomeni aurorali osservati in Italia a partire dal 1726 fino ai giorni nostri. Prima di questa data, a parte le aurore antiche di cui abbiamo fatto cenno, non siamo riusciti a trovare documenti.

6-8 marzo 1582 CASALE MONFERRATO

DE CONTI, *Notizie Storiche della Città di Casale e del Monferrato*, 1841

17 marzo 1716 CASALE MONFERRATO

Nel 1716 si verificò un'aurora boreale molto intensa osservata anche dall'astronomo inglese Edmond Halley. È riportata da VINCENZO DE-CONTI, nel libro storico *Notizie Storiche della Città di Casale e del Monferrato*, pubblicato nel 1841.

19 ottobre 1726 FIRENZE

È riportata dallo scienziato inglese THOMAS DERHAM in un volume stampato a Firenze nel 1728. L'autore dice che il fenomeno fu osservato in più parti d'Europa.

16 dicembre 1737 RAVENNA, BOLOGNA e probabilmente in altre città del nord e centro Italia.

Osservata da GIOVANNI POLENI, professore dell'Università di Padova, descritta negli *Opuscoli scientifici* del p. ANGELO CALOGERÀ e da EUSTACHIO ZANOTTI direttore della Specola di Bologna e da EUSEBIO SGUARIO.

29 marzo 1739 BOLOGNA

Osservata da EUSTACHIO ZANOTTI, *Osservazioni di una aurora boreale fatta nella Specula dell'Istituto delle Scienze di Bologna la sera del 29 marzo MDCCXXXIX riferita dal dott. Eustachio Zanotti*. In Bologna, nella stamperia di Lelio dalla Volpe, s.d. Fu osservata anche a Caltagirone.

29 febbraio 1780 PADOVA e dintorni

Descritta dall'abate GIUSEPPE TOALDO che spiega il fenomeno e presenta anche una lista delle 54 aurore osservate a Padova tra il 1768 e il 1780.

17 novembre 1848 ROMA-NAPOLI

Questa aurora fu osservata in diverse parti della penisola tra le quali Roma e Napoli. A Napoli fu immortalata in un quadro del pittore SALVATORE FERGOLA.

29 agosto 1859 ROMA

Fu osservata a Roma da ANGELO SECCHI e da lui descritta sulla rivista *Civiltà Cattolica*.

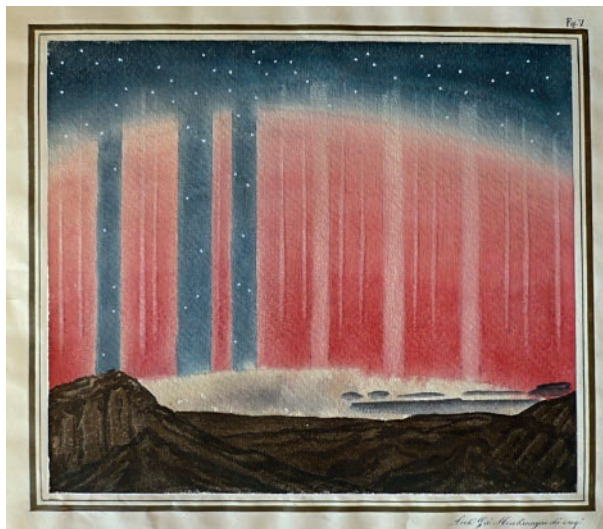


FIG. 1. Tre acquerelli realizzati dall'architetto Gesualdo Montemagno a Caltagirone che descrivono le aurore del 24-25 ottobre 1870, poi da lui inviati all'Osservatorio di Palermo. (Archivio storico dell'Osservatorio Astronomico di Palermo, proprietà Università degli Studi di Palermo).

3 maggio 1862 MILANO-BRERA

Questa e tutte le aurore elencate nel seguito, relative all'anno 1862, furono osservate e descritte da GIOVANNI SCHIAPARELLI.



FIG. 2. La foto illustra il fenomeno osservato a Roma il 10-11 maggio 2024. Più che di una classica aurora boreale, si tratta di un “arco aurorale rosso stabile” (*Stable Auroral Red arc: SAR*), che avviene nell’alta atmosfera. È simile all’aurora boreale, ma è dovuto a particelle cariche provenienti dalle tempeste geomagnetiche che provocano interazione tra le correnti ad anello e l’ossigeno nell’atmosfera, trasferendo energia e creando archi luminosi. (www.astronomitaly.com/wp-content/uploads/2024/05/aurora-roma-scaled.jpg).

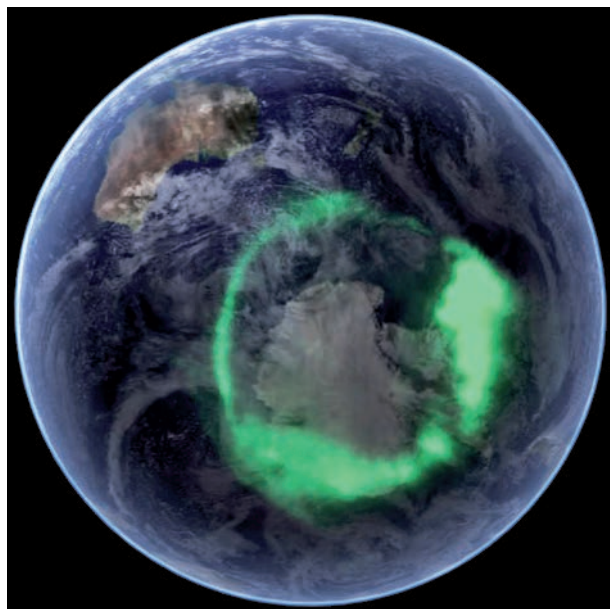


FIG. 3. Le attività aurorali avvengono in regioni di forma ovale centrate nei due poli geomagnetici e vengono chiamate “ovali aurorali”. La foto, ripresa dalla missione IMAGE della NASA mostra l’ovale aurorale dell’11 settembre 2005 sul polo sud, quattro giorni dopo un’eruzione solare da record. (Crediti: IMAGE-NASA; <https://spaceweather.com/>).

19 maggio 1862 MILANO-BRERA

20 maggio 1862 MILANO-BRERA

27 maggio 1862 MILANO-BRERA

4 agosto 1862 MILANO-BRERA

21 agosto 1862 MILANO-BRERA

28 agosto 1862 MILANO-BRERA

14 dicembre 1862 URBINO

Osservata dal padre scolio ALESSANDRO SERPIERI (1823-1885), docente di astronomia fisica e meteorologia presso l’Università di Urbino.

14 febbraio 1869 MONCALIERI

Questa e le due successive furono osservate da FRANCESCO DENZA e pubblicate sul *Bollettino Meteorologico del Collegio Romano*.

5 aprile 1870 VOLPEGLINO (AL)

24-25 settembre 1870 MONCALIERI

24-25 ottobre 1870 CALTAGIRONE e ROMA
Illustrata in tre acquerelli custoditi dall’Osservatorio Astronomico di Palermo, realizzati dallo stesso osservatore, l’architetto GESUALDO MONTEMAGNO. La stessa aurora venne osservata anche a Roma dal p. ANGELO SECCHI che ne fece relazione sul *Bollettino Meteorologico del Collegio Romano*.

9-10 aprile 1871 MONCALIERI

Osservata da FRANCESCO DENZA, come anche le tre successive, e pubblicate sul *Bollettino Meteorologico del Collegio Romano*. Denza riporta che l’aurora fu visibile a Moncalieri, Torino, Alessandria, Mondovì, Piacenza, Genova e Perugia.

9-10 maggio 1871 MONCALIERI

18-27 giugno 1871 MONCALIERI

15 luglio 1871 MONCALIERI

2 novembre 1871 ROMA

Osservata a Roma da ANGELO SECCHI, pubblicata sul *Bollettino Meteorologico del Collegio Romano*.

4-5 febbraio 1872 ROMA

Osservata da GIOVANNI BATTISTA DONATI e ANGELO SECCHI, pubblicata negli *Atti dell’Accademia Pontificia dei Nuovi Lincei*. Osservata anche dal p. GIOVANNI EGIDI S.J. e pubblicata sul *Bollettino Meteorologico del Collegio Romano*.

25-26 gennaio 1938 ROMA

Viene citata da una relazione del prof. GIUSEPPE ARMELLINI, fondatore e direttore dell’Osservatorio Astronomico di Roma, nella nota riguardante l’aurora osservata a Roma il 21-22 gennaio 1957 di cui alla riga seguente.

21-22 gennaio 1957 ROMA

L’aurora si manifestò a Roma verso le 23 di sera e durò fino alle 2. ARMELLINI dice che il fenomeno fu osservato in diverse regioni dell’Europa meridionale.

10-11 maggio 2024 ROMA

Osservata a Roma dalle 22 fino a dopo la mezzanotte, ma anche in tutta l’Europa, l’Asia, in Africa nonché nel Nord e Sud America e in Australia.



FIG. 4. La spettacolare aurora sul Cervino dell'11-12 novembre 2025. (Screenshot da www.youtube.com/watch?v=utwbfstf7Sc).

Ringraziamenti

Ileana Chinnici e Francesca Martines, INAF - Osservatorio Astronomico di Palermo; Elena Vernova, St. Petersburg Filial of the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation (IZMIRAN), Russia; direzione e personale della Specola Vaticana, Albano; Fabrizio Bònoli, Università di Bologna.

Referenze bibliografiche

- ARMELLINI G., 1938, *Le Aurore Boreali*, Roma, Società Italiana per il Progresso delle Scienze.
 DE CONTI V., 1841, *Notizie Storiche della Città di Casale e del Monferrato*, Casale, Tipografia Mantelli.
 DEREHAM TH., 1728, *Raccolta di relazioni del fenomeno veduto in più parti d'Europa alli 19 ottobre 1726*, Firenze Stamperia di sua altezza reale.

- DOMÍNGUEZ-CASTRO F. et al., 2016, *Aurorae observed by Giuseppe Toaldo in Padua (1766-1797)*, «Journal of Space Weather and Space Climate», 6, A21.
 MADEN, N., 2020, *Historical Aurora Borealis 1 Observations in Anatolia during Medieval Period: Implications for the Past Solar Activity*, July 2020, «Annales Geophysicae», 38, 4, pp. 889-899.
 PTITSYNA N. G., ALTAMORE A., 2016, *Historic aurora borealis observed in Italy and related solar and geomagnetic activity*, in *Problems of Geocosmos*, Oct. 37, 2016, Petrodvorets, St. Petersburg, Russia.
 PTITSYNA N. G., TYASTO M. I., ALTAMORE A., 2012, *New data on the giant September 1859 magnetic storm: an analysis of Italian and Russian historic observations*, in *Proceedings of the 9th Intl Conf. "Problems of Geocosmos"*, Oct. 8-12, 2012, St. Petersburg, Russia.
 STOTHERS, R., 1979, *Ancient aurorae*, «Isis», 70, pp. 85-95.
 TOALDO, J., 1780, *Descrizione dell'aurora boreale del dì XXIX Febrajo MDCCCLXXX dal signor abbate Giuseppe Toaldo. «Saggi scientifici e letterari dell'Accademia di Padua»*, 1, 1780, pp. 178-194.
 ZANOTTI E., 1737, *De boreali aurora anni MDCCXXXVII*. In *De Bononiensi Scientiarum et Artium Instituto atque Academia Commentarii*, t. II, (1745), p. I, pp. 476-479.
 ZANOTTI E., 1737, *Descrizione di un'aurora boreale osservata nella Specola dell'Istituto delle Scienze di Bologna la sera del 16 Dicembre 1737*, in Bologna, nella Stamperia di Lelio dalla Volpe.
 ZANOTTI E., 1739, *Osservazioni di una aurora boreale fatta nella Specola dell'Istituto delle Scienze di Bologna la sera dei 29 marzo MDCCXXXIX riferita dal dott. Eustachio Zanotti*, in Bologna, nella stamperia di Lelio dalla Volpe, s.d.
 ZUCCOLI M., PEPPERONI L. (a cura di), 2016, *Dalle carte degli astronomi bolognesi ai loro libri: Eustachio Manfredi, Vittorio Francesco Stancari, Eustachio Zanotti*, «Archivio Storico del Dipartimento di Astronomia. Progetto Scienza per tutti», Università di Bologna e Sistema Museale d'Ateneo, www.bo.astro.it/~biblio/sma/#.

Aldo Altamore, già docente di Fisica e di materie astronomiche all'Università Roma Tre, attualmente collabora con l'Osservatorio Astronomico di Roma e con la Specola Vaticana. I suoi interessi di ricerca riguardano la storia dell'astronomia del XIX e del XX secolo e la strumentazione astronomica d'epoca.

Le comete nei cieli antichi★

Francesco Ginanneschi

Studente del Master in Divulgazione scientifica dell'Università degli Studi di Siena

IN da tempi immemorabili, l'uomo ha levato gli occhi al cielo e scrutato la volta del firmamento con curiosità e meraviglia, per necessità metafisiche oppure per prevedere l'incidenza sulla vita quotidiana dei vari fenomeni atmosferici e spaziali. Una posizione di indiscussa influenza è stata sempre rivestita dalle comete, oggetti celesti la cui conformazione e il cui fascino non sono sfuggiti ai nostri avi, anche se con altalenanti valutazioni. Infatti, a seconda del contesto e dell'interpretazione che le persone decidevano di assegnare loro, le comete sono state viste come messaggere di sconvolgimenti e rovina o viceversa come annunciatrici di epoche luminose e serene.¹

Prima di ripercorrere sinteticamente millenni di osservazione delle comete, partiamo da un breve inquadramento di questi silenziosi viaggiatori cosmici.

Il tema della genesi delle comete vede confrontarsi varie teorie all'interno della comunità scientifica. Secondo una prima e molto accreditata teoria, le comete sarebbero coeve rispetto a tutti i corpi del Sistema solare, essendosi formate dalla stessa nebulosa di condensazione vecchia di quattro miliardi e mezzo di anni. In base a una seconda ricostruzione, le comete sarebbero invece il risultato di collisioni più recenti tra oggetti detti transnettuniani (ossia gravitanti oltre l'orbita di Nettuno). Una terza ipotesi, frutto di recenti osservazioni, attesta come le comete siano il prodotto dell'assemblaggio di due lobi di partenza, i quali, dopo essersi accresciuti con materia a bassa densità ma alta porosità proveniente dall'antica nebulosa, infine si fusero, in un contesto di temperature stabilmente molto basse.²

Capita che le comete siano spinte ad abbandonare la sede in cui sono nate e in cui hanno trascorso miliardi di anni, per intraprendere lunghi spostamenti. Esiste una regione che gli scienziati hanno battezzato Nube di Oort, in onore dell'astronomo olandese Jan Oort che per primo ne teorizzò l'esistenza nel 1950.³ Essa ha la forma di un disco che avvolge esternamente il nostro Sistema solare, collocandosi a una distanza dalla stella che varia tra un minimo di 2.000 unità astronomiche a un massimo

di oltre 50.000.⁴ Tale regione potrebbe essere definita come la fucina delle comete, dal momento che è composta da detriti rocciosi, gas ghiacciati e variegati avanzi risalenti addirittura alla nube primigenia da cui presero forma i pianeti. Questa riserva di materiali (e di elementi chimici che vi sono incastonati) occasionalmente subisce un'azione combinata di forze fisiche che porta al dirottamento di una cometa. Ciò avviene quando la forza di attrazione gravitazionale del Sole (per quanto relativamente debole a tali distanze) e quella esercitata pure da altri astri, perturba l'equilibrio di un settore della Nube, causando il movimento di una roccia che così si avvia a tracciare un'orbita attorno alla stella.⁵

In verità la Nube di Oort non è l'unico serbatoio cometario noto, perché se ne conosce anche un secondo, la Fascia di Kuiper, il cui nome è anche in questo caso riconducibile all'indagine di un astronomo olandese negli anni Cinquanta del secolo scorso, Gerard Kuiper. La Fascia consiste in una cintura di oggetti glaciali transnettuniani, tra cui si annoverano planetesimi e altri reperti risalenti alla formazione del Sistema solare.⁶

Per quanto concerne strettamente le comete, la differenza tra le due regioni è la seguente. Mentre dalla Nube di Oort originano le comete che completano il proprio moto attorno al Sole in tempi molto lunghi, quelle provenienti dalla Cintura di Kuiper presentano generalmente un periodo inferiore ai duecento anni e sono dette comete periodiche.⁷ Un esempio del primo tipo è la cometa Hale-Bopp, del secondo quella di Halley.

L'approssimarsi del nucleo cometario al Sole fa sì che il calore lo incendi, provocando l'espulsione di getti di gas e polveri che vanno a formare ciò che nell'immaginario popolare è la classica "coda", orientata sempre in direzione opposta rispetto alla stella.⁸

Ora, non è difficile immaginare quanto potesse risultare stupefacente l'avvistamento di un corpo celeste tanto maestoso da parte delle comunità umane antiche, portando i nostri progenitori a darsi spiegazioni coerenti con il sistema culturale in vigore presso di loro (Fig. 1). Nel caso poi un bolide spa-

* [Ndr: Questo articolo è il frutto di una esercitazione nel Master in Divulgazione Scientifica dell'Università degli Studi di Siena.]

¹ Cfr. www.brera.inaf.it/~covino/DVG/planetv/1/L15_11S.html.

² Cfr. www.lescienze.it/news/2016/08/03/news/rosetta_nuovo_modello_formazione_comete-3187763/ e www.aanda.org/articles/aa/full_html/2016/08/aa26968-15/aa26968-15.html.

³ Cfr. <https://edu.inaf.it/astroschede/nube-oort/>.

⁴ Cfr. www.passioneastronomia.it/la-nube-di-oort/.

⁵ Cfr. <https://edu.inaf.it/astroschede/nube-oort/>.

⁶ Cfr. www.esa.int/kids/it/imparare/L_Universo/Pianeti_e_satelliti/La_Fascia_di_Kuiper.

⁷ Cfr. www.amsagrosseto.com/images/LA-FASCIA-DI-KUIPER.pdf.

⁸ Cfr. I. RIDPATH, W. TIRION, *Stelle e pianeti*, Roma, Editori Riuniti-University Press, 2020, pp. 377-378.

ziale non si fosse limitato a tagliare la volta del cielo con una scia luminosa, ma avesse colpito la crosta terrestre, l'immagine del cataclisma sarebbe entrata prepotentemente nel patrimonio di memorie da conservare e tramandare tramite l'oralità, il mito e l'arte. In effetti, oggi sappiamo come già l'uomo del Paleolitico ricorresse alle raffigurazioni rupestri del cielo. Si tratta delle prime tracce lasciate dalla proto-astronomia preistorica decine di migliaia di anni fa, quando gli sparuti abitanti di un emisfero boreale stretto nella morsa della glaciazione di Wurm scandagliavano il cielo per orientarsi negli spostamenti e calcolare il tempo. Vari rinvenimenti archeologici dislocati tra l'Europa e l'Asia avvalorano la tesi di un'antichissima umanità che fissava nell'arte ciò che il cielo mostrava e che probabilmente fu testimone di impatti cometari.⁹

In epoca storica, molte antiche civiltà posero le basi per elaborare sistemi di studio del cielo. Sin dal terzo millennio avanti Cristo, l'astronomia fiorì in Cina e India, per poi successivamente apparire presso le civiltà delle Americhe, in Mesopotamia, Egitto, Grecia e nella cultura araba.

I più sistematici e meticolosi cronachisti antichi furono i cinesi, che registrarono una sterminata messe di dati relativi a nove, supernove, macchie solari, moti planetari e lunari, eclissi, meteore e, naturalmente, comete. Nell'antica Cina gli studi astronomici furono promossi dagli imperatori (non a caso, la millenaria denominazione dello Stato cinese come "Celeste Impero" rimanda al concetto di sovranità esercitata su mandato del Cielo su tutta la realtà terrena), al punto che andò strutturandosi un corpo di funzionari di corte a questo deputati e inquadrati in un vero e proprio ufficio statale. Il lavoro di tali apparati produsse una copiosa letteratura fatta di trattati, mappe, memorie, cronache, raccolte, calendari.¹⁰ Nel suo ambito rintracciamo un'opera particolarmente significativa intitolata *Divinazione mediante i fenomeni astrologici e meteorologici*, conosciuta anche come *Libro di seta* per via del tessuto sul quale è stata scritta, compilata tra il III e il I secolo a.C. Consistente nella presentazione di una grande quantità di manifestazioni atmosferiche e spaziali catturate dagli astronomi cinesi nell'arco di trecento anni e associate a precisi influssi sulla vita umana, l'opera cataloga ben ventinove apparizioni cometa-rie. Curiosa la denominazione che questi corpi assumono, ossia quella di *stelle con la scopa*.¹¹

Cambiando radicalmente ambito geografico, fu in Grecia che l'astronomia si intrecciò con il pensiero dei filosofi dando forma a complesse e suggestive speculazioni sull'architettura dell'universo, per poi approdare, in epoca ellenistica, a una cosmologia de-



FIG. 1. La cometa C/2022 E3 (ZTF), soprannominata "la cometa di Neanderthal" in virtù del suo periodo orbitale di 50.000 anni, in uno scatto del 27 gennaio 2023. (Crediti: Edu INAF, foto di: Alessandro Bianconi, CC BY-SA 2.0; <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0>, via Wikimedia Commons).

stinata a condizionare per diversi secoli la concezione occidentale dello spazio esterno alla Terra. Circa le comete, i filosofi della scuola pitagorica, così come anche Anassagora e Democrito, le immaginavano quali pianeti dotati di coda, mentre più tardi Aristotele ne ravvisò l'origine in emissioni gassose del sottosuolo che giunte a certe altezze vanno incontro a una sorta di combustione.¹² La teoria aristotelica, rimasta salda per secoli, concependo i cieli come un ambiente perfetto e immutabile relegava le comete a manifestazioni del piano terrestre. Corollario di questa ricostruzione è l'associazione tra la loro comparsa e il verificarsi di eventi luttuosi e catastrofici. Infatti, l'idea che la cometa sia un fenomeno atmosferico o addirittura prettamente terrestre, ma in ogni caso di pertinenza della sfera sublunare, ha per gli antichi come conseguenza logica che essa influenzi la vita umana al pari di ogni altro potente fenomeno naturale. Una sinistra coincidenza contribuì a fissare a lungo tale errata visione prescientifica. Infatti, nel 373 a.C., mentre il cielo sopra il Mediterraneo era illuminato da una cometa, un terremoto devastò il Golfo di Corinto; successivamente, a finire l'opera di distruzione delle città costiere, intervenne uno tsunami.¹³ L'evento fu probabilmente decisivo nel legare popolarmente l'immagine europea delle comete a quella dei cataclismi più disparati e la titanica mole di un maestro del pensiero come Aristotele, usato quale garante di veridicità, valse a sigillare il pregiudizio per duemila anni, praticamente sino alla rivoluzione scientifica dell'Età moderna.

Qualche secolo più tardi, un rilevante sussulto di razionalità venne dal filosofo latino Seneca, ma fu rapidamente archiviato senza che lasciasse tracce durature. Il grande stoico ebbe a esprimersi in questi termini:

Perché dunque meravigliarsi che le comete, spettacolo così raro dell'universo, non siano ancora sottomesse a

⁹ Cfr. www.globalscience.it/6454/astrologia-nei-graffiti-preistorici/.

¹⁰ [NdR: si vedano su questa rivista gli articoli di S. DE MEIS, *L'astronomia dello Shi-King e di altri classici cinesi: I parte*, 31, 3, 2005, pp. 16-26 e *II parte*, 32, 2, 2006, pp. 17-23.]

¹¹ Cfr. <https://scienzapertutti.infn.it/il-cielo-cinese>.

¹² Cfr. www.astrogeo.va.it/astrologia/comete/storia.php.

¹³ Cfr. www.angeloangeletti.it/oliastro2013/ASTEROIDI,%20COMETE%20E%20METEORITI.pdf.



FIG. 2. Denario battuto intorno al 19 a.C., raffigurante sul dritto Ottaviano Augusto con la corona civica e sul rovescio la cometa splendente associata alla divinizzazione di Giulio Cesare. (Crediti: Classical Numismatic Group, Inc. www.cngcoins.com, CC BY-SA 2.5; <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/>, via Wikimedia Commons).

leggi fisse, e che non sappiamo dove inizi e dove termini una corsa il cui ritorno si verifica con immensi intervalli? [...] Verrà il tempo in cui uno studio attento e condotto per un lungo periodo farà luce su questi fenomeni della natura. [...] Verrà il tempo in cui i nostri posteri si meravigliano che noi ignorassimo cose tanto manifeste.¹⁴

Seneca coglieva nel segno intuendo che le comete, come ogni corpo fisico, fossero assoggettate a leggi meccaniche, ma concludeva come d'altra parte gli uomini del suo tempo queste leggi non fossero in grado di scoprirle, rimandandone l'onere ai posteri. Si trattava a tutti gli effetti di una visione razionale assai diversa dall'approccio superstizioso che andava per la maggiore e che era ben lungi dall'essere scalfato.

È però doveroso dare conto di almeno due antichi eventi astronomici, tra i più famosi di tutti i tempi, in cui la cometa non è stata associata a cataclismi e rovina, bensì a gloria, riscatto e salvezza.

Il primo a cui ci si riferisce è del 44 a.C., anno spartiacque della storia di Roma in quanto insanguinato dall'assassinio di Giulio Cesare e dall'inizio dell'ultima, feroce fase delle guerre civili che condusse al superamento della Repubblica e all'instaurazione del Principato augusteo.

Nota come Cometa di Cesare (*Sidus Iulium*, C/-43 K1 nella nomenclatura moderna), è ricordata nelle cronache come un astro di magnitudine talmente elevata da essere rimasto visibile persino di giorno per un lungo periodo. Il dittatore era stato eliminato da pochi mesi e l'apparizione di quel segno nel cielo fu interpretata come l'accoglimento tra gli dei della sua anima. A onor del vero, non c'è unanimità circa l'effettivo passaggio di questo bolide celeste e vi è chi ne ha messo in dubbio la stessa esistenza. L'uso che ne fu fatto fu anche politico, giacché il futuro fondatore del Principato, Ottaviano, vi innestò una campagna propagandistica per legittimare il proprio potere sulla base della divinizza-

zione del padre adottivo.¹⁵ Diversi anni dopo, intorno al 19 a.C., Augusto autorizzò l'emissione di un denario recante sul dritto la propria effigie con la testa cinta di una corona di quercia, mentre sul rovescio mostrava l'indicazione della divinizzazione di Giulio Cesare contornata dalla rappresentazione stilizzata della stella crinita (FIG. 2). La letteratura si conformò al paradigma imperiale impresso dall'ideologia augustea, tanto da consacrare il tema della divinizzazione in forma cometaria del Divo Giulio nelle *Metamorfosi* di Ovidio:

Cesare invece è dio nella propria città. Eccelso in guerra, eccelso in pace, non tanto per guerre trionfali, / per l'opere compiute in patria o la fulminea gloria che ne ottenne, / ma in grazia della sua progenie fu mutato in nuovo astro, / in stella cometa. [...] Ma perché Augusto non fosse disceso da stirpe mortale, Cesare / dio doveva essere fatto.¹⁶

Se la stella di Cesare ha segnato in un certo senso la rifondazione politica e ideologica di Roma, è però con la Stella di Betlemme che in Occidente si presenta l'episodio più popolare e positivo legato a una cometa. Simbolo indiscusso del Natale, secondo la tradizione un astro luminosissimo guidò i Magi lungo l'itinerario che li portò a salutare la venuta sulla Terra del Salvatore. Si pone tuttavia un rilevante dubbio astronomico perché, nonostante il larghissimo consenso popolare giunto sino alle illustrazioni commerciali odierne, è molto incerta la classificazione come cometa del fenomeno celeste descritto dall'apostolo Matteo. Per gli antichi, qualunque corpo celeste abbastanza rilevante era una "stella". Oggi si ritiene improbabile che una cometa appariscente abbia solcato i cieli mediorientali nel periodo intorno alla nascita di Cristo. La fortuna della tesi cometaria si può far risalire all'opera *L'Adorazione dei Magi*, affrescata da Giotto nella Cappella degli Scrovegni di Padova all'inizio del Trecento, e prima rappresentazione in forma di cometa della luce celeste dell'Epifania (FIG. 3). È stato affermato che il pittore si fosse ispirato al passaggio della cometa di Halley (visibile in Italia nel 1301), ma è plausibile anche che egli abbia confuso nel ricordo un altro oggetto comparso nello stesso anno in prossimità del Natale ma cromaticamente diverso dalla Halley (segno di una differente composizione chimica che si manifesta nello spettro colorato della luce) e che infine ne abbia ingrandito le proporzioni per rimanere aderente alla descrizione riportata dalle fonti.¹⁷

Altre tesi sono state avanzate per risalire all'esatta natura del fenomeno, portando gli astronomi a misurarsi con la necessità di individuare spiegazioni

¹⁵ Cfr. www.cambridge.org/core/books/abs/poetics-of-power-in-augustan-rome/history-in-light-of-the-sidus-iulium/164DD64A659FC1AEEA47142EE62A0497.

¹⁶ PUBLIO OVIDIO NASONE, *Metamorphosēon*, libro xv, Apoteosi di Cesare, versi 729-842.

¹⁷ Cfr. *La Scienza*, volume 2. *Il Sistema solare*, Novara, Istituto Geografico De Agostini-UTET, 2005, p. 272.

¹⁴ LUCIO ANNEO SENECA, *Naturales quaestiones*, libro VII, 22-29. [Ndr: si veda su questa rivista l'articolo di G. GAIA Plinio il Vecchio e Seneca, *testimoni di una teoria ellenistica sulle comete*, 51, 1, 2025, pp. 28-34].

compatibili con le coordinate di spazio e tempo in cui esso si verificò. Scartato che potesse trattarsi del bagliore di una supernova in quanto un'esplosione effettivamente visibile dalla Terra intorno all'anno 0 (il sistema binario Hulse-Taylor nella costellazione dell'Aquila, prima pulsar binaria scoperta), si stima che non abbia generato la luminosità sufficiente per essere associata a qualcosa di memorabile,¹⁸ una tesi piuttosto solida è quella della congiunzione planetaria. Fatta risalire al matematico e astronomo tedesco Johann Kepler, essa sostiene che la Stella della Natività altro non fosse che il raro triplo allineamento avvenuto nella costellazione dei Pesci tra Giove e Saturno nel 7 a.C.¹⁹ Altre versioni della tesi astrale-planetaria spiegano il fenomeno evangelico, alternativamente, con l'occultamento di Giove da parte della Luna avvenuto nel 6 a.C. o con la congiunzione tra Giove, Venere e la stella Regolo del 2 a.C. Qualsiasi combinazione presenta significati astrologici pregnanti per quei tempi e quei luoghi (Giove associato alla regalità, Venere alla fertilità, la costellazione dei Pesci all'ebraismo, cui aggiungere i tempi di ritorno decisamente ampi di questi eventi e quindi la loro eccezionalità), accordandosi, la suddetta tesi nelle sue varie declinazioni, sia con la funzione di sacerdoti-astronomi occupata dai Magi in Oriente, sia con la descrizione emergente dal Vangelo di Matteo in merito alla sostanziale immobilità della luce dell'astro.²⁰

Per il resto dell'antichità e poi lungo tutto il Medioevo e la prima modernità, alle comete furono normalmente imputati grandi sconvolgimenti, in accordo con la distorsione dell'interpretazione aristotelica e con il nesso tipicamente astrologico istituito tra eventi celesti e terrestri. Tra i più influenti propugnatori di siffatta visione troviamo l'astronomo e geografo egizio (ma ellenistico per cultura e romano per cittadinanza) del II secolo Claudio Tolomeo, che nel suo *Tetrabiblos* scrisse

Per giungere alla predizione degli avvenimenti futuri dovremo osservare poi anche le comete, sia quelle che giungono durante le eclissi, che quelle che arrivano invece durante qualsiasi altro periodo, quali sono quelle dette 'otri', 'botti', 'trombe' o anche altre di tal genere, poiché esse generano degli effetti simili a quelli di Marte o Mercurio, e cioè le guerre, i grandi caldi, i moti impetuosi, insomma tutte quelle cose da cui le comete sono generalmente seguite. Inoltre, tanto le parti dello Zodiaco dalle quali esse provengono, che l'inclinazione della loro chioma, mostrano quali luoghi siano minacciati e in quali svilupperanno i loro effetti. Dal colore e dalla forma della cometa si conosceranno poi la specie e il genere della cosa sulla quale devono capitare gli effetti.

¹⁸ Cfr. www.geopop.it/cosera-la-stella-di-betlemme-le-possibili-spiegazioni-astronomiche/.

¹⁹ L'anno 0 va retrocesso di alcuni anni per correggere l'errore di computo compiuto dal monaco Dionigi il Piccolo, noto perché calcolò la data di nascita di Gesù.

²⁰ Cfr. www.geopop.it/cosera-la-stella-di-betlemme-le-possibili-spiegazioni-astronomiche/, e www.unina.it/~1327914-la-stella-cometa-simbolo-incontrastato-del-natale.



Fig. 3. *L'Adorazione dei Magi*, di Giotto di Bondone, nella Cappella degli Scrovegni a Padova (1303-1305). In alto al centro si staglia il fiammeggiante corpo celeste probabilmente ispirato dalla Cometa di Halley. (Comune di Padova - Assessorato alla Cultura - Musei civici).

Per molti secoli, le società del Vecchio mondo non si sarebbero distanziate da questa matrice di pensiero, in una spirale di superstizione e di collegamenti inventati di sana pianta con gli eventi più disparati, frutto di fervida inventiva.

L'astronomo e astrologo cinquecentesco italiano Rutilio Benincasa, nel suo *Almanacco Perpetuo* (una sorta di compendio delle conoscenze del suo tempo) rende edotti di alcune apparizioni di comete del lontano passato associate a nefasti presagi:

In Costantinopoli fu gran pestilenza, che tolse la vita a più di trecentomila persone, e si veddero due gran Comete che l'una andava la mattina avanti il Sole, e l'altra lo seguiva la sera, e in Brescia nacque un fanciullo con due denti;²¹ [Relativamente alla cometa del 728 d.C.]

In Italia fu una gran cometa, e la fame, e peste l'oppressò; e vi levò molta gente; in Fiandra si vide un gran serpente volar per l'aria, e in Genova un cavallo parlò, in Pisa veduti huomini con effigie di cane.²² [Questa cronaca, relativa all'anno 984, è probabile che non si riferisca a una vera cometa, ma a un astro diurno, identificabile con Venere]

Imperando Ottone III l'anno 1019 nel mese di giugno a hore 9 si vide una cometa, e travi ardenti in Cielo, e poi apparve una figura grandissima di Serpente con terremoto, Ottone ordinò che all'Imperio non succedesse il figliuolo, ma si facesse per elezione.²³

In Milano si viddero molte statue per l'aria volare, e si sentirno voci spaventevoli, e nell'aria si vidde gran fuoco a somiglianza d'una gran galera, in Costantinopoli furono vedute tre lune, e tre Comete, tre mesi, e la fame, e la

²¹ www.oa-roma.inaf.it/blog/arriva-la-cometa-atlas-y4-primaparte/.

²² www.angeloangeletti.it/oliastro2013/ASTEROIDI,%20COMETE%20E%20METEORITI.pdf

²³ *Ibidem*.

peste fecero gran danno in molti paesi.²⁴ [Questi eventi eccezionali risalirebbero al 1316, anno in cui sarebbero state viste diverse comete]

Lungi dal rintracciarvi un tentativo di comprensione razionale, questi frammenti ci offrono uno spaccato del quadro di superstizione alimentato dall'inesauribile fantasia che inesorabilmente legava i segni celesti ai fatti più luttuosi ma anche variegati e grotteschi capitati alle genti.

Innumerevoli altre fonti coeve o successive danno conto di catastrofi fatte incastrare con l'apparizione di qualche cometa, vera o presunta che fosse (e spesso sfalsata di alcuni anni rispetto agli eventi che avrebbe causato, segno che le credenze popolari non di rado arrivavano a forzature estreme):

L'anno DCCCCXC una stella apparsa nella parte settentrionale avente grande splendore e dopo alcuni giorni la stessa stella apparsa ad occidente con una coda che si protendeva ad oriente e dopo non molti giorni ci fu un grande terremoto a Benevento e Capua; [Testimonianza sulla cometa di Halley nella cronaca di Romualdo da Salerno]

Negli anni di Cristo MLXXXVIII, essendo papa Urbano secondo, i Saracini di Soria presono la città di Gerusalem, e uccidono molti Cristiani, e molti ne menarono per ischiavi; per la qual cosa il detto papa Urbano fatto concilio generale prima a Chieramonte in Avernia, e poi al Torso in Torena alla sommossa di Piero romito, santa persona, tornato lui di Gerusalem colle dette novelle. E in questo tempo apparve in cielo la stella comata, la quale, secondo che dicono i savi astrolagi, significa gran cose e mutazioni di regni.²⁵

Ancora, dalla *Nova Cronica* del Villani apprendiamo una descrizione di quella che probabilmente fu la cometa di Halley del 1301, che abbiamo visto aver giocato un ruolo cruciale nell'iconografia della Natività grazie alla mediazione pittorica di Giotto:

Come apparve in cielo una stella commata.

Nel detto anno, del mese di settembre, apparve in cielo una stella commata con grandi raggi di fummo dietro, apparendo la sera di verso il ponente, e durò infino al gennaio, de la quale i savi astrolagi dissono grandi significazioni di futuri pericoli e danni a la provincia d'Italia, e a la città di Firenze, e massimamente perché la pianeta di Saturno e quella di Marti in quello anno s'erano congiunte due volte insieme nel mese di gennaio e di maggio nel segno del Leone, e la Luna scurata del detto mese di gennaio similmente nel segno del Leone, il quale s'attribuisce a la provincia d'Italia. E bene asseguì la significazione, come innanzi leggendo potrete comprendere; ma singolarmente si disse che la detta commeta significò l'avvento di messer Carlo di Valos, per la cui venuta molte rivolture ebbe la provincia d'Italia e la nostra città di Firenze.²⁶

Ma dal martoriato quattordicesimo secolo, tra pestilenze, raffreddamento del clima, carestie e rivolgimenti sociopolitici, l'ineffabile Villani ci informa

anche di un'altra cometa, datata 1347 e ovviamente portatrice di un generoso carico di disgrazie:

Come in cielo aparve una commeta.

Nel detto anno, del mese d'agosto, aparve in cielo la stella commeta, che essi chiama Nigra, nel segno del Tauro, a gradi xvi nel capo della figura e segno del Gorgone, e durò xv di. Questa Nigra è della natura di Saturno, e per sua infrenza si cria, secondo che dice Zael filosofo e strolago, e più altri maestri della detta scienza, la quale significa pure male e morte di re e di potenti; e questo dimostrò assai tosto in più re e reali, come innanzi leggendo si troverrà; e ingenerò grande mortalità ne' paesi ove il detto pianeta e segno signoreggiano; e bene il dimostrò in Oriente e nelle marine d'intorno, come dicemmo adietro.²⁷

Dato che anche la morte dei potenti veniva non di rado ritenuta annunciata dai frondosi messaggeri cosmici, il trapasso di Lorenzo il Magnifico rientrò tra questi:

nel detto anno 1491 avendo Lorenzo de' Medici avuto un male lungo e giudicato nel principi da' medici di non molta importanza, né forse curato con la diligenza si conveniva, e però occultamente avendo sempre preso forze, finalmente a di' 8 di aprile passò della presente vita. Fu denotata questa morte come di momento grandissimo da molti presagi: era apparita poco innanzi la cometa; erasi uditi urlare i lupi [...]²⁸

Una separata menzione, tra le rimarchevoli comete medievali, merita ancora una volta la Halley, nel suo transito del 1066. Quello fu un anno capitale per la storia d'Europa e in particolare per il quadrante nordoccidentale del continente: a settembre i normanni, comandati dal duca Guglielmo, salpati dalle coste francesi e sbarcati nel Sussex, sconfissero una coalizione di eserciti sassoni guidata da re Aroldo nella battaglia di Hastings, unificando l'Inghilterra sotto il proprio dominio. Coincidenza volle che l'invadente bolide fosse stato chiaramente avvistato da quelle terre appena pochi mesi prima. Il presagio fu interpretato a posteriori a seconda della parte in causa: beneagurante per i normanni (a cui la vittoria arrise) ma disastroso per Aroldo, che perse la sua stessa vita sul campo di battaglia.

La comparsa della cometa e il successivo cambio etnico-politico della guardia, ma anche l'integrazione pacifica tra sassoni e normanni e la legittimità del nuovo ceto dirigente, animano il ciclo di immagini raffigurate nel pregevole arazzo di Bayeux (Fig. 4).

All'alba dell'Età Moderna, nel XVI secolo, l'Europa sperimentò probabilmente la fase più acuta e cupa della superstizione di massa, che indifferentemente dilagava tra il popolo e le élite. In un contesto occupato sul piano teologico dalla contrapposizione tra le chiese riformate della protesta e la reazione cattolica della Controriforma e con le persone costrette a fare i conti con un clima caratterizzato dai

²⁴ *Ibidem*.

²⁵ G. VILLANI, *Nova Cronica*, Firenze, 1348.

²⁶ *Ibidem*.

²⁷ *Ibidem*.

²⁸ G. CANESTRINI, *Storia Fiorentina*, Firenze, 1859 (citazione tratta da un manoscritto di Francesco Guicciardini del 1509).

rigori della cosiddetta Piccola era glaciale, qualsiasi manifestazione naturale estrema e terrificante (a titolo esemplificativo si possono indicare: terremoti, tempeste di vento, inondazioni, calamità meteorologiche come forti nevicate e grandinate o all'opposto siccità prolungata, gelate persistenti, ma anche luci misteriose in cielo quali aurore boreali, meteor e, ovviamente, comete), causando seri contraccolpi economici come inflazione e penuria di generi alimentari (quando non vere e proprie carestie) era interpretata come un castigo divino.²⁹

Ma fu proprio nel corso dell'Età Moderna che, perlomeno in Occidente, si andò via via consolidando un approccio razionale nel rapportarsi dell'uomo con la natura, ponendo le basi per la rivoluzione scientifica e la filosofia illuministica. Per quanto riguarda le comete, la visione aristotelica che le aveva ridimensionate a manifestazioni sublunari o atmosferiche fu demolita a partire dalle intuizioni dell'astronomo danese Tycho Brahe (che ne dedusse la distanza molto più lontana dalla Terra rispetto alla Luna cimentandosi nel calcolo della parallasse) e da quelle del tedesco Pietro Apiano e dell'italiano Girolamo Fracastoro, che notarono come le code fossero sempre rivolte in direzione opposta al Sole.³⁰ A quel punto la strada era spianata. Nei due secoli successivi, i sempre più accurati studi di fisica e astronomia (soprattutto da parte di Edmund Halley e di Isaac Newton), con la costruzione di un sistema meccanicistico che permette di calcolare esattamente orbite e periodi dei moti celesti, hanno consegnato le comete al campo dell'indagine razionale al pari di tutti i fenomeni della natura.

Ringraziamenti

L'autore desidera ringraziare Vincenzo Millucci, Silvia Cantara, Claudia Ricci e Alessandro Marchini, tutti dell'Università degli Studi di Siena.

Referenze bibliografiche

- W. BEHRINGER, *Storia culturale del clima*, Torino, Bollati Boringhieri, 2010.
G. CANESTRINI, *Storia Fiorentina*, Firenze, 1859.
I. RIDPATH, W. TIRION, *Stelle e pianeti*, Roma, Editori Riuniti-University Press, 2020.

²⁹ Cfr. W. BEHRINGER, *Storia culturale del clima*, Torino, Bollati Boringhieri, 2010, pp. 167 e ss.

³⁰ Cfr. www.astrogeo.va.it/astrofisica/comete/storia.php. [NdR: per una ampia descrizione dello studio delle comete nel Seicento, si veda: A. GUALANDI, *Teorie delle comete. Da Galileo a Newton*, Milano, Franco Angeli, 2009]



FIG. 4. Particolare dell'Arazzo di Bayeux con la Cometa di Halley del 1066, tra lo stupore degli uomini e il cattivo presagio per il re sassone Aroldo. (Crediti: Museo degli Arazzi di Bayeux, Public domain, via Wikimedia Commons).

- PUBLIO OVIDIO NASONE, *Metamorphosēon*, libro xv, *Apoteosi di Cesare*.
LUCIO ANNEO SENECA, *Naturales quaestiones*.
La Scienza, volume 2 – *Il Sistema solare*, Novara, Istituto Geografico De Agostini-UTET, 2005.
G. VILLANI, *Nova Cronica*, Firenze, 1348.

Siti Web

- <https://edu.inaf.it/astroschede/nube-oort/>.
<https://scienzapertutti.infn.it/il-cielo-cinese>.
www.aanda.org/articles/aa/full_html/2016/08/aa26968-15/aa26968-15.html.
www.amsagrosseto.com/images/LA-FASCIA-DI-KUIPER.pdf.
www.angeloangeletti.it/oliastro2013/ASTEROIDI,%20COMETE%20E%20METEORITI.pdf.
www.astrogeo.va.it/astrofisica/comete/storia.php.
www.brera.inaf.it/~covino/DVG/planetv/1/L15_11S.html.
www.cambridge.org/core/books/abs/poetics-of-power-in-augustan-rome/history-in-light-of-the-sidus-iulium/164DD64A659FC1AEEA47142EB62A0497.
www.esa.int/kids/it/imparare/L_Universo/Pianeti_e_satelliti/La_Fascia_di_Kuiper.
www.geopop.it/cosera-la-stella-di-betlemme-le-possibili-spiegazioni-astronomiche/.
www.globalscience.it/6454/astrofisica-nei-graffiti-preistorici/.
www.lescienze.it/news/2016/08/03/news/rosetta_nuovo_modello_formazione_comete-3187763/.
www.oa-roma.inaf.it/blog/arriva-la-cometa-atlas-y4-prima-parte/.
www.passioneastronomia.it/la-nube-di-oort/.
www.unina.it/-/1327914-la-stella-cometa-simbolo-in-contrastato-del-natale.

Francesco Ginanneschi: sono nato a Castel del Piano (Grosseto) nel 1989. Ho conseguito il diploma di maturità scientifica e la laurea magistrale in giurisprudenza, per poi trovare impiego come funzionario del Ministero dell'istruzione e del merito. Attualmente frequento il Master in Divulgazione scientifica dell'UNISI. Ho un grande interesse per la storia e la scienza.

Il padiglione del cerchio meridiano di Repsold: documenti e immagini di un ambizioso progetto di modernizzazione

Mauro Gargano

INAF · Osservatorio Astronomico di Capodimonte

COME molti osservatori italiani di antica fondazione, anche Capodimonte agli inizi del Novecento soffriva di carenza di uomini e mezzi. Lo sottolineava nel 1917 Vincenzo Cerulli in una lettera ad Azeglio Bemporad:

Il nuovo in astronomia non ci viene ormai che dall'America, ma non meno essenziale è l'opera che possiamo far noi, quello di perfezionare le conoscenze già grossolanamente acquisite, ed assicurare sempre più solidamente le basi della moderna astrofisica. (CERULLI, 1917)

Il divario con le grandi strutture internazionali era evidente: l'Osservatorio di Yerkes possedeva dal 1897 un telescopio con lente di 102 cm; a Mount Wilson George Ellery Hale aveva installato nel 1908 uno strumento da 150 cm e inaugurato uno da 250 cm nel 1917; infine, nel 1948, a Monte Palomar fu sistemato un telescopio da 500 cm. In Italia, invece, il primato spettava al telescopio da 122 cm inaugurato nel 1942 all'Osservatorio Astrofisico di Asiago, che restò il maggiore a disposizione degli astronomi europei fino al 1975, quando a Byurakan fu installato un telescopio da 260 cm.

In questo scenario di crescente divario con le grandi strutture internazionali, a Capodimonte si avvertiva con urgenza la necessità di rinnovare la dotazione strumentale. Già da metà Ottocento i direttori avevano richiesto fondi governativi a tale scopo. Il più moderno della vecchia serie era, infatti, il cerchio meridiano di Repsold, acquistato da Annibale de Gasparis nel 1869 grazie ai finanziamenti del

Ministero della Pubblica Istruzione e, per la prima e unica volta, del Comune di Napoli. Emmanuele Fergola acquistò invece nel 1892 il telescopio zenitale di Wanschaff per avviare un programma di osservazioni simultanee con l'Osservatorio della Columbia University di New York.

Le sollecitazioni al rinnovamento si ripeterono nei decenni. Nel 1934 Eugenio Guerrieri scriveva parole vibranti:

L'augurio è che i Napoletani diano fattiva ed energica cooperazione acciocché esso diventi un Osservatorio Astronomico veramente Moderno: già Piazzesi e Brioschi, a centoquattordici anni da noi, non erano pienamente soddisfatti dei loro strumenti; De Gasparis, da oltre mezzo secolo, insisteva che si provvedesse l'Istituto di strumenti nuovi e di maggiori proporzioni; A. Bemporad per venti anni ha, in circostanze svariatissime, ripetuto le stesse sollecitazioni; infine la voce di L. Carnera oggi di risuona forte, che è imperiosa ed imprescindibile necessità, per i lavori astronomici che attualmente da tutto il mondo si reclamano, modernizzare assolutamente l'Osservatorio di Capodimonte. Lo spirito di Padre Piazzesi aleggia su di esso! (GUERRIERI, 1934, pp. 100-101)

Nei calendari dell'Osservatorio del 1934 e 1935 Carnera, subentrato nel 1932 ad Azeglio Bemporad nella direzione dell'Osservatorio di Napoli, propose una completa trasformazione dell'istituto, specializzandolo nell'astrometria, campo di ricerca da lui prediletto. Dal 1° gennaio 1936 divenne infatti responsabile del Servizio internazionale delle Latitudini e Capodimonte centro di raccolta dei dati della rete internazionale. La scelta risentiva anche delle crescenti condizioni di inquinamento luminoso:

la città toglie a questo [osservatorio] non poche possibilità di lavoro, e particolarmente nel campo della moder-

* 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.

na astrofisica, per la quale ogni luce estranea riesce nociva. (CARNERA, 1935, p. 54)

Con l'aiuto dell'architetto razionalista Alberto Saranica, il direttore progettò un vero e proprio campus scientifico, immaginando di riunire a Capodimonte, intorno all'Osservatorio, anche gli istituti universitari di fisica terrestre e di geodesia. Quanto alla strumentazione da acquisire, sottolineava che non fosse necessario un gran numero di apparecchi, ma pochi strumenti ben scelti:

appena un cerchio meridiano moderno con cannocchiale munito di lente non maggiore di 18 cent. di diametro, del tipo di quello fornito recentemente all'Osservatorio astronomico di Uccle, presso Bruxelles, e migliorato solo in alcuni dettagli; uno strumento dei passaggi in primo verticale, su per giù di analoghe dimensioni, ed un telescopio zenitale con cannocchiale un poco più piccolo. A questi strumenti dovrebbe aggiungersi ancora un equatoriale con una lente di almeno 60 centimetri di diametro, onde poter vedere e misurare anche le posizioni dei satelliti minori dei grandi pianeti, lavoro questo mai tentato da noi per l'insufficienza dei mezzi disponibili. (CARNERA, 1934b, pp. 53-54)

Tra il 1932 e il 1933 il cerchio meridiano di Repsold era stato smontato completamente e l'obiettivo inviato alla Zeiss per una radicale pulitura, poiché «era diventato così poco trasparente da render difficili le osservazioni di stelle se appena passavano la ottava grandezza!» (CARNERA, 1934a, p. 60). Furono inoltre rinnovati i sistemi di illuminazione del cerchio, dei microscopi e dei collimatori, nonché il collegamento del cronografo. Carnera osservava che, sebbene lo strumento si prestasse «a determinazioni di declinazioni, non si può sperare neppure di fare molto nel campo delle determinazioni di ascensioni rette», la sala meridiana «con l'apertura insufficiente risulta inadatta allo scopo»; inoltre evidenziava «l'insufficienza del pilastro, che regge lo strumento, la poca stabilità del cerchio, che porta i microscopi, la difficoltà di fare l'inversione» (CARNERA, 1934a, pp. 59-60). Il suo obiettivo era dunque la costruzione di una nuova cupola per il cerchio meridiano. Propose strutture leggere

poggiate su murature sporgenti appena pochi centimetri dal terreno, e costituite interamente di legno, con ossature in ferro a traliccio e doppie pareti con circolazione interna d'aria; costruzioni atte a conservare relativamente freschi gli interni, ed a non accumulare calore, e quindi a non risultare nella notte sorgenti di radiazioni calorifiche. (CARNERA, 1934b, p. 53)

Il direttore di Capodimonte analizzò anche le scelte compiute in altri istituti europei, come Pulkovo e Greenwich, che avevano costruito nuovi edifici, secondo criteri simili a quelli pensati per Napoli:

una sistemazione opportuna agli strumenti destinati alle determinazioni fondamentali, che abbiamo visto in questi ultimi anni come a Pulcova abbiano abbandonato i locali appositamente costruiti nel vecchio edificio (costruito come è noto sulle linee di questo di Capodimonte)

destinati al cerchio verticale di Ertel, per collocarlo in un nuovo edificio del tipo di quelli progettati per Napoli; ed ancor più recentemente come a Greenwich si sia abbandonata la vecchia sala del cerchio meridiano, e si è costruita una nuova per il nuovo cerchio seguendo gli stessi criteri, adottati da D. Gill per il cerchio meridiano del Capo di Buona Speranza, da Harzer per quello di Kiel, da Schorr per quello di Amburgo, da H. Struve per quelli di Berlino. (CARNERA, 1935, p. 55)

Preoccupato per lo stato degli edifici e della strumentazione, e conseguentemente per la qualità delle ricerche scientifiche, Carnera aveva infatti avvertito che

senza provvedimenti urgenti e radicali si aggraveranno talmente le condizioni della specola, che non solo si renderà impossibile ogni e qualunque lavoro scientifico, ma che andranno persino in rovina gli strumenti e libri, che stanno ad attestare un passato glorioso. Se non si concedono i fondi per le due cupoline, e quelli destinati alle riparazioni dei tetti e del locale per gli orologi, alla stessa guisa che non so dove collocare lo strumento zenitale, od il Bamberg, e che ho dovuto togliere gli orologi fondamentali dal locale ove l'acqua gronda da ogni parte, non saprò neppure come difendere i libri. (CARNERA, 1934e)

Gli auspici del direttore sembrarono concretizzarsi il 10 febbraio 1934, quando l'Alto Commissariato per la provincia di Napoli, retto dal prefetto Pietro Baratonio, stanziò 250 mila lire (circa 350 mila €) per opere straordinarie urgenti. Un soddisfatto Carnera ne informò il Ministero dell'Educazione Nazionale:

Ben conoscendo la parte vivissima presa da Codesta Direzione Generale per ottenere questo fondo non posso che esprimere la mia più viva riconoscenza per questa prova di vivo interessamento [...] Credo però fin d'ora poter prevedere che con i mezzi messi a disposizione si potrà dare oltre un assetto migliore ai locali d'ufficio, costruire la sala per il cerchio meridiano onde rendere utilizzabile l'unico strumento ancor usabile della specola, e dare una sistemazione agli orologi ed alla officina meccanica. (CARNERA, 1934d)

Anche Emilio Bianchi, direttore dell'Osservatorio di Brera e vicepresidente per l'Astronomia del Comitato per l'Astronomia, la Matematica Applicata e la Fisica in seno al Consiglio Nazionale delle Ricerche, espresse la sua soddisfazione per gli interventi promessi a Napoli, «onde dare agli Astronomi di Capodimonte la possibilità di cimentarsi nel campo delle moderne ricerche della Scienza del Cielo». Manifestò inoltre la

più viva e deferente gratitudine per l'immenso beneficio arrecato alla nostra scienza; perché nella rinascita della gloriosa Specola di Napoli [...] vediamo un fulgido segno di sicurezza per la rinascita totale dell'Astronomia Italiana già felicemente avviata. (BIANCHI, 1934)

Contestualmente, Carnera si rivolse a due ditte per ottenere progetto e preventivo di spesa per la realizzazione delle nuove cupole destinate a sostituire le antiche cupole orientali e occidentali dell'Osservatorio. Il 14 febbraio ricevette immediato riscontro



FIG. 1. Raccomandata del 7 luglio 1936 di Angelo Bombelli a Luigi Carnera relativa alla "Specola per Meridiano R. Osservatorio Astronomico Capodimonte". ASOC, Sede, Lavori di fabbrica, Corrispondenza, B. 4, f. 3.

sia da Angelo Bombelli di Milano, ditta specializzata in costruzioni metalliche che aveva già realizzato le cupole per gli osservatori di Merate e di Castel Gandolfo, sia da Carlo Cante, titolare della storica officina meccanica per la lavorazione del legno che a Trieste aveva costruito le cupole dell'Osservatorio sotto la direzione dello stesso Carnera. Dopo alcuni scambi tecnici con entrambe le ditte, nell'ottobre 1934 Carnera ottenne i due preventivi per la realizzazione di due cupole girevoli semisferiche del diametro di 3,80 metri: Bombelli propose un costo di 24.500 lire ciascuna, mentre Cante ne indicò uno di 28.000 lire.

Nel luglio 1935 l'ingegnere capo del Corpo reale del Genio civile di Napoli, Vito Pugliese, responsabile dei lavori straordinari nell'Osservatorio, informò Carnera che

le due cupole ad ovest ed est della specola sono in via di sistemazione. Nell'abolita Sala Meridiana si provvederà al più presto alla sistemazione della parte del volto rimasta scoperta in conseguenza della rimozione delle colonne... Le due nuove cupole girevoli sulla terrazza della

Specola sono state, com'è noto, ordinate alla Ditta Bombelli e potranno essere poste in opera entro la prima quindicina del prossimo ottobre. (PUGLIESE, 1935)

Con la sostituzione delle cupole superiori ormai avviata, Carnera poté concentrarsi sul progetto più ambizioso: la nuova sala per il cerchio meridiano. Il 3 luglio 1936 richiese ad Angelo Bombelli un progetto di massima per la costruzione del nuovo padiglione, avendo ottenuto dal Provveditore Generale delle opere pubbliche per la Campania l'approvazione per la sua realizzazione. Bombelli rispose il 7 luglio allegando copia del disegno n. 2467 (IL DOCUMENTO e FIG. 1). Due mesi più tardi il Provveditorato autorizzò il Genio Civile

ad affidare alla ditta Bombelli Angelo di Milano, mediante contratto di cottimo fiduciario, l'esecuzione dei lavori di copertura con cupola metallica della nuova Sala Meridiana nell'Osservatorio di Capodimonte per il prezzo a forfait di lire 93.000. (PROVVEDITORATO ..., 1936)

Bombelli giunse quindi a Napoli per discutere la realizzazione della cupola con l'ing. Pugliese e con Carnera, inviando il 12 ottobre la descrizione e il disegno definitivo n. 3208. Nell'aprile dell'anno successivo, Carnera informò Bombelli dell'avvenuto montaggio della cupola.

Nell'archivio fotografico dell'Osservatorio sono conservate una serie di immagini delle diverse fasi della costruzione. A completare questa sequenza vi è la ricevuta del meccanico Carlo Andreoni del 10 maggio 1937, che attesta «lavori straordinari in seguito al montaggio della Cupola a motori»:

10-5-1937. XV

Io sottoscritto montatore meccanico Andreoni Carlo dichiaro di aver ricevuto dal S. Direttore P. Carnera la somma di £ 200 per lavori straordinari in seguito al montaggio della Cupola a motori della nuova sala del Cerchio meridiano.

Montatore meccanico Andreoni Carlo

Alcune fotografie riportano invece una data scritta a biro «Mag. 1936», che tuttavia non è corretta. In alcune di esse, relative ai discorsi tenuti nella rinnovata prima sala meridiana, sullo sfondo compare un calendario della cartolibreria Emilio De Magistris: si legge chiaramente «maggio 30 lunedì». Nel 1936 il 30 maggio cadeva di sabato, mentre nel 1938 era lunedì. Si tratta dunque del 30 maggio 1938.



FIG. 2. Luigi Carnera e i tecnici dell'Osservatorio completano l'installazione del cerchio meridiano di Repsold. National Archief (Paesi Bassi), Fotocollectie Van de Poll, *Bezoek aan Napels en de Vesuvius*, 191-1357.

Del resto, durante la VI assemblea generale dell'Unione internazionale di Geodesia e Geofisica, svoltasi a Edimburgo dal 17 al 25 settembre 1936, si tenne anche la riunione dell'Associazione internazionale di geodesia, nella quale Carnera ribadì che tra gli studi di punta dell'Osservatorio di Napoli rientrava «lo studio più accurato delle declinazioni stellari usate nelle stazioni di latitudine», assicurando che «a tale scopo verrà adibito il cerchio meridiano di Repsold, che fra poco avrà una sistemazione del tutto moderna» (CARNERA, 1936, p. 156).

Occorre quindi riferirsi ad altre fonti per conoscere la conclusione dei lavori e la messa in funzione del cerchio meridiano nella sua nuova cupola. Tra queste fonti si segnala il fondo fotografico conservato presso l'Archivio nazionale dei Paesi Bassi, che raccoglie l'opera di Willem van de Poll, noto per i suoi reportage internazionali pubblicati da numerose riviste e dall'Associated Press, oltre che per il ruolo di fotografo ufficiale della casa regnante olandese. Nel 1944 fu nominato a capo della divisione fotografica delle forze armate e della resistenza olandese. Tra la fine del 1937 e l'inizio del 1938 realizzò un ampio reportage in Italia, visitando anche Napoli e l'Osservatorio di Capodimonte (*Bezoek aan Napels en de Vesuvius*). Gli scatti di van de Poll documentano le ultime fasi di sistemazione della strumentazione nel padiglione (FIG. 2), verosimilmente inaugurato in occasione dei lavori della R. Commissione



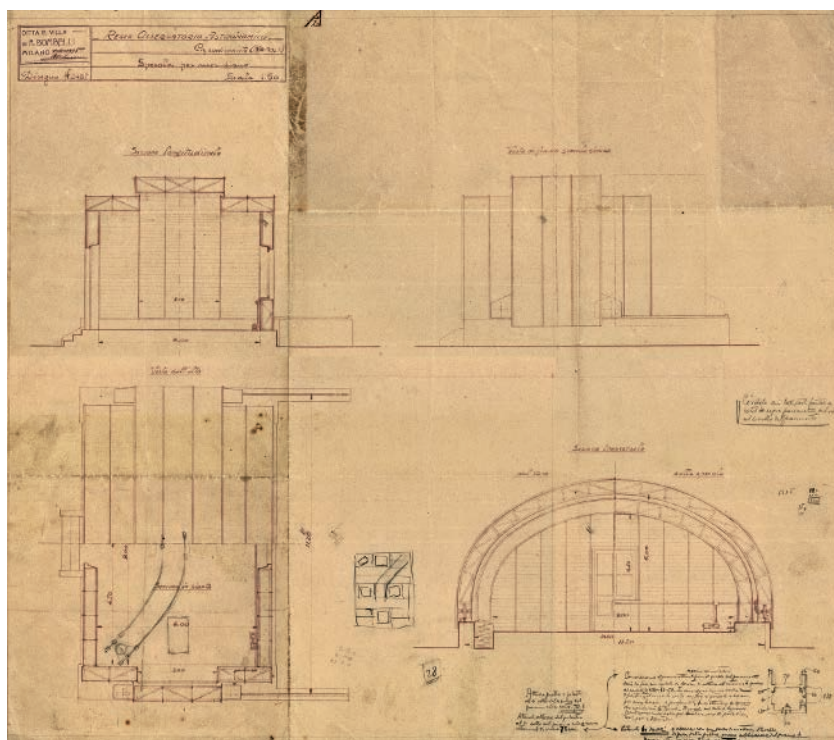
FIG. 3a. Discorso inaugurale dei lavori della Commissione geodetica italiana a Napoli il 30 maggio 1938. ASOC, Fondo fotografico, Album 2.



FIG. 3b. Visita al padiglione del cerchio meridiano dei partecipanti ai lavori della Commissione geodetica italiana e delle autorità intervenute, 30 maggio 1938. ASOC, Fondo fotografico, Album 2.

Geodetica Italiana, tenuti a Capodimonte il 30-31 maggio 1938 (FIGG. 3a,b). In quell'occasione, Eugenio Guerrieri descrisse l'apertura della riunione, alla quale presero parte astronomi, geodeti e numerose autorità locali:

Nel mattino del 30 maggio, nel vasto salone del R. Osservatorio Astronomico di Capodimonte, antica sala meridiana del Cerchio di Repsold, si sono inaugurati i lavori della R. Commissione geodetica Italiana, con l'interven-



IL DOCUMENTO. Disegno del progetto della "Specola per Meridiano R. Osservatorio Astronomico Capodimonte" della ditta Bombelli, allegato alla raccomandata del 7 luglio 1936 (vedi FIG. 1). ASOC, Sede, Lavori di fabbrica, Corrispondenza, B. 4, f. 3.

to di un valoroso e distinto gruppo specializzato di geodeti astronomi, di Proff. Universitari e di varie Autorità locali. Erano presenti: il Presidente Sen. Prof. E. Soler, l'Accademico d'Italia S. E. Prof. E. Bianchi, Vice-Presidente della Commissione, il Prof. L. Carnera Segretario e Direttore dell'Osservatorio di Capodimonte; il Generale Toraldo di Francia, Direttore del R. Istituto Geografico Militare ed il Geodeta Capo Generale F. Ferri; l'Ing. Tucci rappresentante il Ministero dei Lavori Pubblici, il Prof. Tenani dell'Istituto Idrografico della R. Marina, il Prof. Pierantoni, Preside della Facoltà di Scienze e rappresentante il Rettore Magnifico della R. Università; i Membri della Commissione Proff. Somigliana, Cicconetti, Silva, Barbieri, Mineo, Cassinis, Dore; i Proff. Carrelli, Nobile, Imbò, Vocca, Milone, Guerrieri; i rappresentanti della Federazione Fascista, Duca Tixon, Console Cortese, Prof. Aurino [...] Il Direttore Prof. Carnera porge un commosso saluto e ringraziamenti a quanti hanno voluto con la loro presenza onorare l'Istituto da lui diretto, concludendo che "questo giorno sia veramente efficace alla Scienza, a Napoli ed alla Patria" [...] Dopo, tutti i convenuti furono invitati a visitare la nuova Sala Meridiana del Repsold e quella del Bamberg, oramai complete e pronte per i lavori, alle quali per tre anni il Direttore Carnera ha dedicato la sua vigile cura ed operosità multiforme. (GUERRIERI, 1938)

La cerimonia del maggio 1938 segnò il compimento di un lungo percorso di rinnovamento, in cui il nuovo padiglione del cerchio meridiano di Repsold si impose come simbolo della volontà di Capodimonte di attestarsi, pur con mezzi limitati, nel panorama internazionale delle osservazioni fondamentali. La nuova sala meridiana, insieme alle rinnovate cupole est e ovest, al piccolo padiglione per lo strumento dei passaggi di Bamberg e alla «cabina a temperatura costante (circa 27 °C) dei pendoli fondamentali», frutto di anni di progettazione e di cure costanti, resta tuttora testimonianza concreta dell'impegno di Carnera e della tradizione scientifica dell'Osservatorio, ponte ideale tra il passato e le aspirazioni di modernità. Oggi, grazie alla ricca documentazione emersa dall'archivio, è possibile seguire con precisione le tappe di questo progetto ambizioso, che restituisce il senso di una modernizzazione perseguita con tenacia e visione.

IL DOCUMENTO

Regio Osservatorio Astronomico Capodimonte (Napoli), Specola per meridiano, Disegno n. 2467, scala 1:50, Ditta F.

Villa di A. Bombelli, Milano, ASOC, *Lavori di fabbrica, Disegni*, B. 6, f. 2

Referenze bibliografiche

- CARNERA, L. (1934a), *La Specola di Capodimonte negli anni 1932-33*, «Calendario del R. Osservatorio Astronomico di Napoli», 1934, pp. 57-65.
- CARNERA, L. (1934b), *Sulla sistemazione futura della specola di Capodimonte*, «Calendario del R. Osservatorio Astronomico di Napoli», 1934, pp. 49-56.
- CARNERA, L. (1935), *Ancora della futura sistemazione dell'Osservatorio di Capodimonte*, «Calendario del R. Osservatorio Astronomico di Napoli», 1935, pp. 51-58.
- CARNERA, L. (1936), *Rapporto sui lavori eseguiti nell'Ufficio centrale del Servizio internazionale delle Latitudini nell'anno 1936*, «Bollettino del Comitato per la geodesia e la geofisica del Consiglio nazionale delle ricerche», 2. s., 6, 3, pp. 153-156.
- GUERRIERI, E. (1934), *Barnaba Oriani e la fondazione della specola di Capodimonte dalla corrispondenza Oriani-Piazzzi*, «Calendario del R. Osservatorio Astronomico di Napoli», 1934, pp. 77-101.
- GUERRIERI, E. (1938), *Inaugurazione dei lavori della R. Commissione Geodetica Italiana nel R. Osservatorio Astronomico di Capodimonte*, «Rivista di fisica, matematica e scienze naturali», 2. s., 12, 9, pp. 491-492.

Fonti d'archivio

- ANDREANI, C. (1937), Ricevuta di pagamento, Napoli, 10 maggio, ASOC, *Amministrazione, Conti*, B. 33, f. 1.
- BIANCHI, E. (1934), "A Sua Eccellenza l'Alto Commissario per la Provincia di Napoli", Milano, 21 febbraio, ASOC, *Sede, Lavori di fabbrica, Corrispondenza*, B. 4, f. 3.
- CARNERA, L. (1934d), "Lavori di restauro", 13 febbraio, ASOC, *Sede, Lavori di fabbrica, Corrispondenza*, B. 4, f. 3.
- CARNERA, L. (1934e), "Restauro degli edifici", Lettera al Ministero dell'Educazione nazionale, 2 novembre, ASOC, *Sede, Lavori di fabbrica, Corrispondenza*, B. 4, f. 3.
- CERULLI, V. (1917), Lettera ad Azeglio Bemporad, Roma, 7 gennaio, ASOC, *Corrispondenza privata. Bemporad*, B.1, f. 1.
- PROVVEDITORE ALLE OPERE PUBBLICHE (1936), "Osservatorio di Capodimonte" – Copertura nuova Sala Meridiana, Lettera a Vito Pugliese, 4 settembre, ASOC, *Sede, Lavori di fabbrica, Corrispondenza*, B. 4, f. 3.
- PUGLIESE, V. (1935), "Lavori Specola ed alloggi", Napoli, 25 luglio, ASOC, *Sede, Lavori di fabbrica, Corrispondenza*, B. 4, f. 3.

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

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

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

Rifrazione, onda evanescente ed effetto tunnel

Annibale D'Ercole

CONSIDERIAMO un muro di recinzione di altezza h_0 e immaginiamo di calciare un pallone di massa m comunicandogli una velocità iniziale (circa verticale) v_i e un'energia E_i in forma di *energia cinetica* $K_i = 0,5 mv_i^2$ (FIG. 1). Man mano che il pallone sale la sua velocità e la sua energia cinetica si riducono. D'altra parte, sappiamo che in Natura l'energia si conserva, dunque che fine fa l'energia mancante? Essa in realtà non è sparita ma è rimasta "immagazzinata" nel campo gravitazionale sotto forma di *energia potenziale* $U = mgh$ (dove $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità) a disposizione del pallone e che gli viene restituita quando il pallone, ricadendo in basso, riacquista energia cinetica a spese di quella potenziale.¹ L'energia totale del pallone si conserva, ossia rimane costante lungo tutta la sua traiettoria: $E_i = K + U$ (questo argomento è trattato in maggior dettaglio nella Spigolatura n. 3 del 2023). La massima altezza raggiunta, h_{max} , è quella in cui il pallone si ferma prima di ricadere. A questa altezza $K = 0$ e, dall'equazione precedente, abbiamo $h_{\text{max}} = E_i/mg$. È chiaro che il pallone è in grado di scavalcare il muro se $h_{\text{max}} > h_0$ mentre non lo è se $h_{\text{max}} < h_0$. In vista delle argomentazioni che seguiranno, risulta più utile trasformare questi vincoli sulle altezze in vincoli energetici. Possiamo definire $U_0 \equiv mgh_0$ e $U_{\text{max}} \equiv mgh_{\text{max}} = E_i$ (questo passaggio

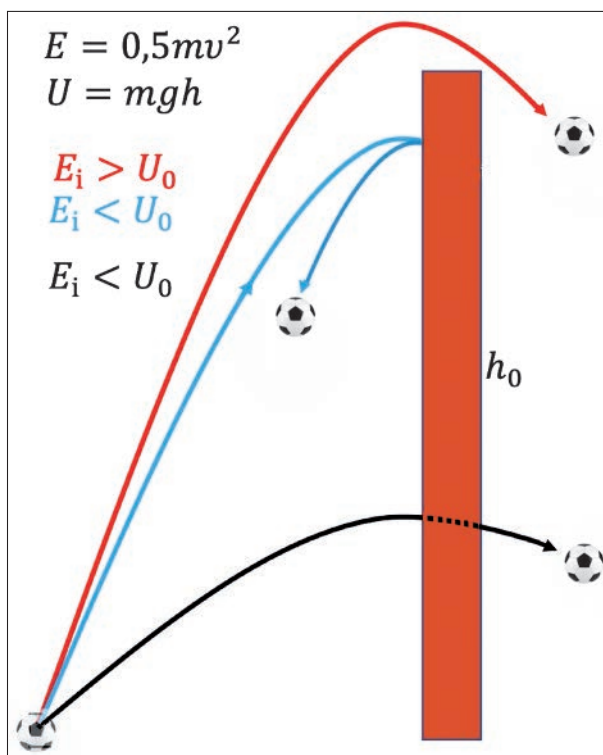


FIG. 1. Classicamente, le traiettorie rossa e azzurra rappresentano, rispettivamente, il caso in cui il pallone supera o meno il muro a seconda della sua energia iniziale. La traiettoria nera rappresenta il caso quantistico in cui il pallone, grazie all'effetto tunnel, si ritrova al di là del muro anche nel caso in cui abbia un'energia insufficiente (si veda il testo per i dettagli).

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

¹ Analogamente, quando comprimiamo una molla l'energia muscolare spesa rimane immagazzinata in forma di energia potenziale nella molla stessa e viene restituita da quest'ultima come energia cinetica quando le permettiamo di espandersi.

deriva sempre dalla conservazione dell'energia). Pertanto, il pallone potrà superare il muro solo se $E_i > U_0$ e non in caso contrario.

Quest'ultima affermazione è vera in fisica classica ma non in meccanica quantistica; se valesse a livello macroscopico (sappiamo che in realtà essa vale a livello atomico e subatomico), allora vi sarebbe una probabilità non nulla che il pallone si ritrovi al di là del muro anche nel caso $E_i < U_0$ (FIG. 1). Questo stupefacente risultato è detto *effetto tunnel*. Prima di descrivere tale effetto nel suo ambito naturale (ossia – come si è detto – in meccanica quantistica) nei prossimi paragrafi divagheremo (solo apparen-

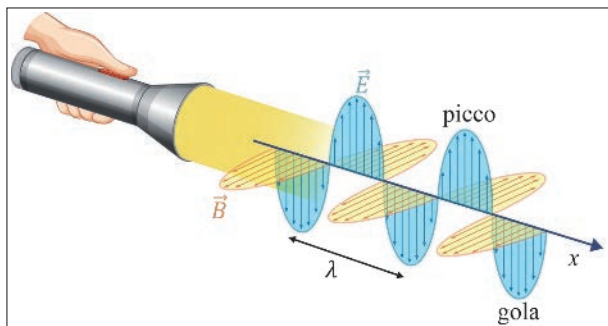


FIG. 2. Un raggio luminoso emesso da una sorgente può essere interpretato come una sottile linea propagantesi in direzione x (nel caso dell'ottica geometrica) oppure, più realisticamente, come un'onda composta da oscillazioni di un campo elettrico (freccie azzurre) ed uno magnetico (freccie gialle) ortogonali tra loro e propagantesi lungo l'asse x . I picchi e le gole indicano l'ampiezza di oscillazione, mentre la distanza tra due picchi (o gole) successivi rappresenta la lunghezza d'onda λ della radiazione.

temente) appoggiandoci ancora alla fisica classica, più propriamente alla sua trattazione della propagazione della luce.

La luce può essere raffigurata come un raggio propagantesi in linea retta oppure, più realisticamente, come un'onda composta da oscillazioni di un campo elettrico ed uno magnetico ortogonali tra loro (FIG. 2). La prima descrizione va sotto il nome di *ottica geometrica* e rappresenta un'approssimazione valida quando le dimensioni degli oggetti (lenti, specchi, aperture, ecc.) sono molto più grandi della lunghezza d'onda della luce ($\lambda \sim 10^{-7}$ m). L'interpretazione ondulatoria è invece necessaria quando le grandezze in gioco sono dell'ordine di λ e si verificano fenomeni quali, p.e., l'*interferenza* (che incontreremo più in là).

Premesso quanto sopra, consideriamo ora un esempio di ottica geometrica utile per i nostri scopi. I mezzi trasmissivi sono mezzi che possono essere attraversati dalla luce, e ciascuno è caratterizzato da un proprio valore dell'indice di rifrazione n . Quest'ultimo è un numero adimensionale che determina il rapporto tra la velocità della luce c nel vuoto (pari a 300.000 km/s) e la velocità v nel mezzo:² $n \equiv c/v$. Con riferimento alla FIG. 3a, si vede che se un raggio attraversa l'interfaccia tra due mezzi passando da quello con n_1 ad un altro con $n_2 < n_1$ – come ad esempio da vetro ($n_1 = 1,5$) ad aria ($n_2 = 1$) – esso viene in parte riflesso e in parte rifratto, ossia attraversa l'interfaccia deviando dalla direzione originaria. Il raggio riflesso forma con la normale alla superficie di separazione tra i due mezzi un angolo θ_1 uguale a quello del raggio incidente. L'angolo del raggio rifratto, invece, è regolato dalla *legge di Snell* (la cui dimostrazione verrà data nel livello avanzato)

² Quando la luce entra in un mezzo materiale, l'onda elettromagnetica interagisce con gli elettroni di tale mezzo e viene continuamente assorbita e riemessa introducendo un ritardo percepito come rallentamento rispetto alla velocità nel vuoto dove la luce si muove liberamente.

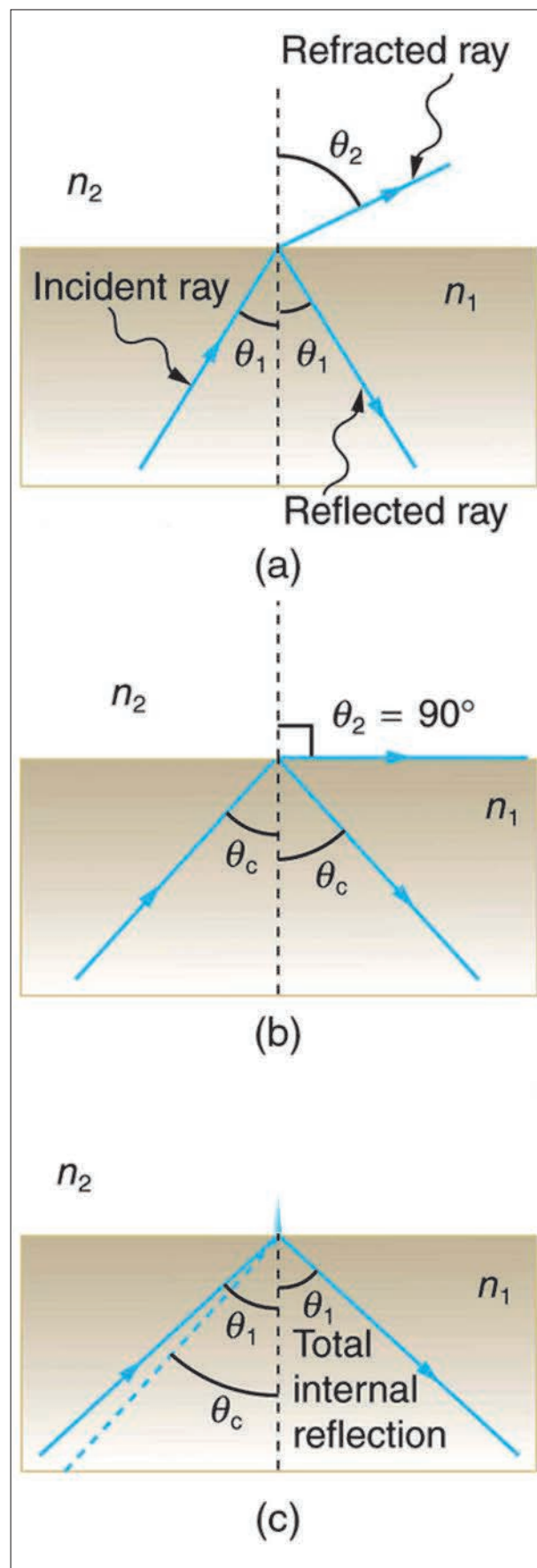


FIG. 3. a) Un raggio luminoso (linea rossa) procede da un mezzo con indice di rifrazione n_1 a uno con indice di rifrazione $n_2 < n_1$. θ_1 e θ_2 rappresentano, rispettivamente, l'angolo di incidenza (e riflessione) e di rifrazione. b) Quando $\theta_1 = \theta_c$ il raggio rifratto si propaga parallelamente alla superficie di contatto dei due mezzi. c) Per $\theta_1 > \theta_c$ si verifica la condizione TIR e non vi è alcuna rifrazione ma appare una breve "appendice": si tratta dell'onda evanescente.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2. \quad (1)$$

Come si vede in FIG. 3a, $\theta_1 < \theta_2$. Questo vuol dire che esiste un angolo critico θ_c di incidenza a cui corrisponde un angolo di rifrazione $\theta_2 = 90^\circ$, per cui il raggio rifratto si propaga parallelamente al piano di contatto tra i due mezzi (FIG. 3b). Essendo $\sin 90^\circ = 1$, dall'eq. (1) otteniamo $\sin \theta_c = n_2/n_1$, e quindi

$$\theta_c = \arcsen \left(\frac{n_2}{n_1} \right); \quad (2)$$

nel caso di vetro e aria abbiamo $\theta_c = 41,81^\circ$.

Quando $\theta_1 > \theta_c$ si verifica solo la riflessione – che per questo viene detta riflessione interna totale o TIR (dall'acronimo inglese di *total internal reflection*) – ed il raggio riflesso trasporta la stessa energia di quello incidente. In verità, come mostrato in (FIG. 3c), una piccola “intrusione” nel mezzo 2 si verifica, ma è di breve estensione in quanto la sua intensità decresce esponenzialmente (su una scala dell'ordine di λ) e non trasporta energia lontano dalla superficie di contatto. Per questo motivo l'onda associata a questo raggio è detta *evanescente*.

Nel livello avanzato daremo una descrizione più accurata di quest'onda. Per il momento ci concentreremo su una sua proprietà che l'accomuna all'effetto tunnel. In FIG. 4a vediamo un raggio luminoso che attraversa un prisma di vetro e viene totalmente riflesso da un suo lato giacché l'angolo di incidenza $\theta_1 = 45^\circ$ è maggiore dell'angolo critico $\theta_c = 41,81^\circ$ (vedi sopra); similmente alla FIG. 3c, anche in questo caso appare un'onda evanescente. In FIG. 4b un secondo prisma è posto ad una distanza d dell'ordine di λ ; l'onda evanescente nello spazio tra i due prismi ha ancora un'ampiezza non nulla quando tocca il secondo prisma e un raggio può trasmettersi attraverso quest'ultimo. Questo effetto è denominato FTIR dall'acronimo inglese di *frustrated total internal reflection*, dove l'aggettivo “frustrato” si riferisce al raggio riflesso che non trasporta più la totalità dell'energia del raggio incidente (TIR), ma ne cede parte a quello rifratto. Il raggio che attraversa il secondo prisma ha un'intensità che aumenta al decrescere di d . Se $d = 0$ il raggio luminoso attraversa i due prismi posti a diretto contatto che vengono “interpretati” come un unico blocco in quanto hanno lo stesso indice di rifrazione; pertanto, il raggio attraversa la superficie di contatto senza essere riflesso o rifratto (FIG. 4c).

Torniamo a considerare la FIG. 4b concentrando ci unicamente sul raggio rifratto. Possiamo interpretare lo spazio d come una “barriera d'aria” interposta tra i due prismi di vetro. Nonostante la sua presenza il raggio incidente riesce a passare dall'altra parte e proseguire nel secondo prisma. Questo attraversamento è molto simile all'effetto tunnel ed è reso possibile grazie alla natura ondulatoria della luce, come mostrato in FIG. 5. In questa figura il raggio incidente è rappresentato da un'onda la cui ampiezza, raggiunta la barriera, tende a ridursi espo-

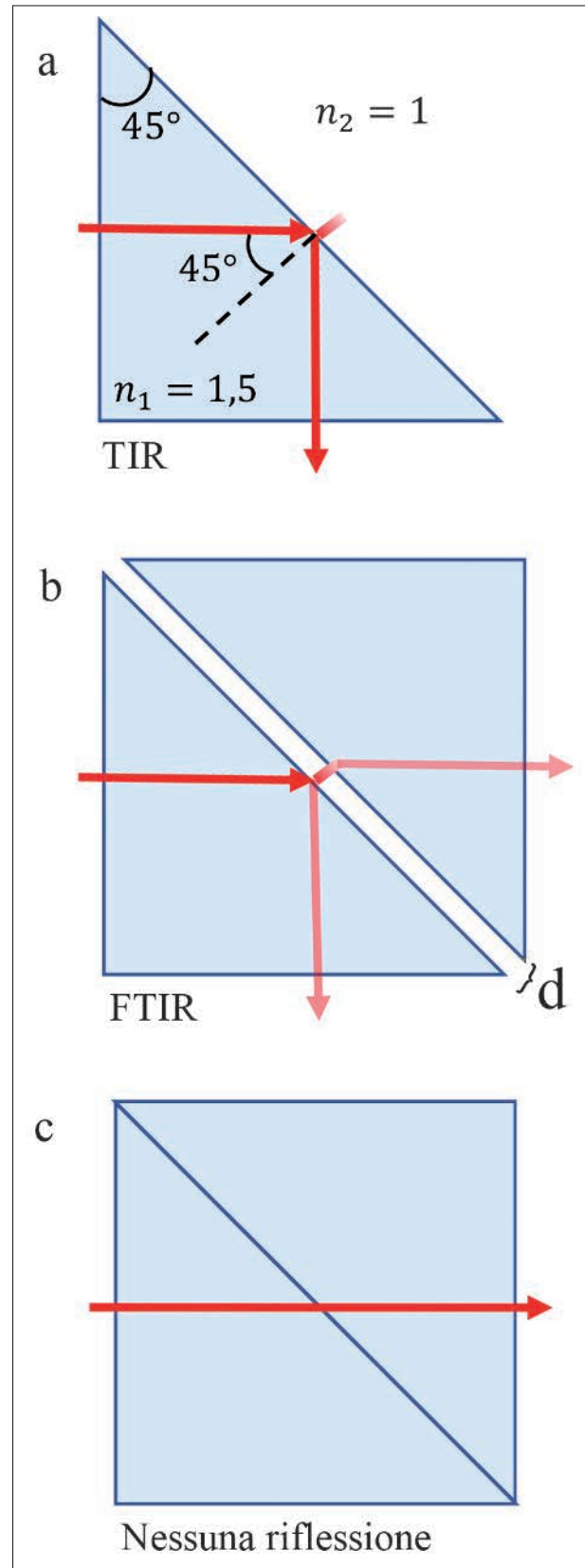


FIG. 4. a) Un raggio luminoso attraversa un prisma di vetro ($n_1 = 1,5$) e viene riflesso con un angolo di incidenza di $45^\circ > 41,81^\circ$ che è l'angolo critico; si verifica quindi la condizione TIR. b) Ponendo un secondo prisma ad una distanza $d \sim \lambda$ dal primo otteniamo la condizione FTIR. c) Se i due prismi sono a contatto, il raggio luminoso attraversa la superficie di separazione e prosegue normalmente.

nenzialmente formando l'onda evanescente. Tuttavia, la “coda” di quest'onda oltrepassa l'ostacolo e continua a propagarsi dando luogo all'onda rifratta

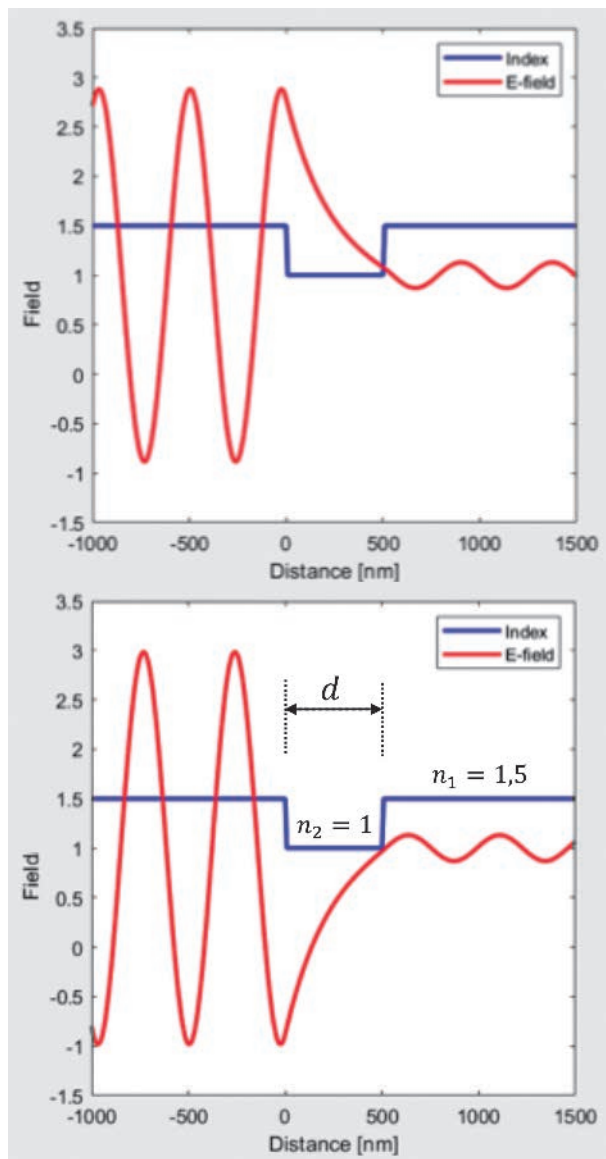


FIG. 5. Il fenomeno FTIR illustrato dal punto di vista ondulatorio (la luce riflessa non è considerata). La linea blu rappresenta l'andamento (lungo la linea di propagazione) dell'indice di rifrazione in una situazione come quella in FIG. 4b. La linea rossa mostra l'andamento delle oscillazioni del campo elettrico nel passare da un prisma all'altro separati da una distanza d . I due pannelli si riferiscono a due "fotogrammi" distanziati da mezzo periodo di oscillazione.

reale la cui ampiezza è inferiore a quella dell'onda incidente. Dal momento che l'intensità della luce è proporzionale al *quadrato dell'ampiezza*, il raggio rifratto è meno luminoso di quello incidente.

Il motivo per cui ci siamo dilungati su alcuni aspetti della natura ondulatoria della luce (e sull'onda evanescente in particolare) è dovuto all'analogia che essa mostra con il comportamento quantistico delle particelle elementari e che ci permetterà di capire meglio l'effetto tunnel. Infatti, le particelle elementari mostrano una duplice natura ondulatoria/particellare; tale natura – e il parallelismo con il comportamento della radiazione – sono evidenziati dal celebre esperimento di Young.

In questo esperimento un'onda luminosa monocromatica piana colpisce un diaframma con due fenditure sottili e vicine (FIG. 6a). Queste fenditure,

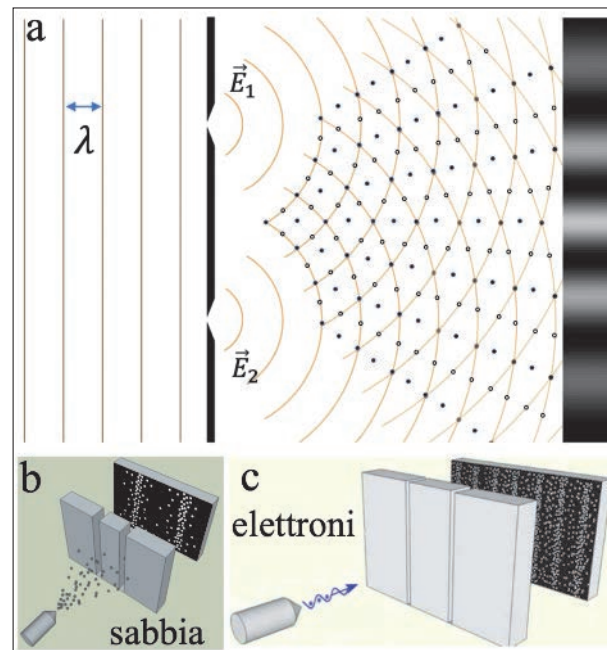


FIG. 6. L'esperimento di Young. a) Le linee verticali rappresentano i picchi del campo elettrico $\vec{E}$ di un'onda elettromagnetica piana monocromatica di lunghezza d'onda λ indirizzata verso il diaframma (per semplicità non vengono riportate le linee corrispondenti alle gole che si trovano a metà strada tra quelle dei picchi). Dalle due fessure si propagano due serie di onde circolari che interferiscono. I punti dove si realizzano le interferenze costruttive sono indicati da cerchi pieni neri posizionati all'incrocio delle linee e al centro dei rettangoloidi (dove si incrociano le gole). I cerchi vuoti indicano la posizione delle interferenze distruttive. A destra è rappresentato uno schermo su cui si formano frange chiare e scure; b) Nel caso in cui il diaframma venga investito da un flusso di granelli di sabbia si formano solo due frange; c) Se al posto dei granelli di sabbia consideriamo degli elettroni, torna a formarsi una serie di frange (gli elettroni emessi dal "cannoncino" sono raffigurati sia come punti che come onde per sottolineare la loro duplice natura onda/particella).

attraversate dall'onda, agiscono come se fossero a loro volta sorgenti di onde che si espandono circolarmente (come le onde che si formano in uno stagno quando vi si getta un sasso) fino a raggiungere uno schermo. I due sistemi di onde si propagano e si sovrappongono dando luogo al fenomeno dell'*interferenza*. Nei punti in cui sono presenti due picchi o due gole contemporaneamente l'ampiezza dell'onda risultante raddoppia e l'intensità quadruplica: è questo il caso dell'*interferenza costruttiva*. Si chiama invece *interferenza distruttiva* l'occorrenza della sovrapposizione di un picco e di una gola: nei punti dove questo accade la luminosità è nulla. Le regioni dello schermo raggiunte da interferenze costruttive mostrano frange luminose mentre quelle raggiunte da interferenze distruttive rimangono scure (FIG. 6a).

La realizzazione di una serie di frange è caratteristica dei fenomeni ondulatori. Immaginiamo ora che, invece di un'onda piana, il diaframma sia colpito da un flusso di particelle macroscopiche come, p.e., granelli di sabbia (per quanto piccolo, un granello di sabbia contiene $\sim 10^{20}$ atomi di silicio ed è dunque decisamente enorme su scala atomica). I granelli che superano le fenditure proseguono lun-

go una traiettoria rettilinea fino a colpire uno schermo opportuno dove lasciano un "impronta" quasi puntiforme. L'insieme di questi punti dà luogo a due sole frange poste di fronte alle fessure, com'è abbastanza intuitivo (FIG. 6b). Se però sostituiamo i granelli di sabbia con elettroni, i puntini sullo schermo formano un sistema di frange come nel caso della luce (FIG. 6c). Dunque, l'impronta puntiforme sullo schermo testimonia la natura particellare dell'elettrone; d'altra parte la formazione di una sequenza di frange indica che l'elettrone, durante il tragitto dal diaframma allo schermo, ha proprietà ondulatorie per cui la sua posizione non può essere ricondotta ad un punto preciso ma è diffusa nello spazio e la sua evoluzione è descritta dalla *funzione d'onda* $\Psi(r, t)$. Ma qual è il significato di questa misteriosa onda associata all'elettrone?

Per la fisica classica è possibile tracciare la traiettoria di un corpo misurandone con precisione la posizione r ad ogni istante. Ma come mostrato dall'esperimento di Young questo non è ammissibile se abbiamo a che fare con particelle atomiche o subatomiche come, p.e., un elettrone. In questo caso è necessario ricorrere alla meccanica quantistica che si basa su argomenti probabilistici: non possiamo sapere con certezza dove sia un elettrone, ma possiamo calcolare la probabilità di trovarlo ad un certo istante in una certa regione dello spazio. Questa probabilità è data dal quadrato della funzione d'onda Ψ^2 . Nell'esperimento di Young le frange più intense si ottengono dove si verificano interferenze costruttive delle onde elettromagnetiche; analogamente, nel caso degli elettroni, le frange più popolate di puntini si realizzano dove sono presenti le interferenze costruttive di Ψ , ossia dove è più probabile trovare gli elettroni.³

La dualità onda-particella implica che, p.e., un elettrone possa attraversare una barriera di potenziale anche se la sua energia cinetica è inferiore all'altezza della barriera (un comportamento impossibile classicamente), come illustrato in FIG. 7 (si noti l'analogia con FIG. 5). Perché l'effetto tunnel possa realizzarsi la barriera non dev'essere troppo spessa (alcune lunghezze d'onda di Ψ) per evitare che l'onda evanescente declini a zero. L'ampiezza dell'onda che si propaga oltre la barriera è ridotta rispetto a quella dell'onda incidente; questa riduzione non rappresenta, come nel caso del raggio rifratto, una diminuzione dell'energia dell'elettrone (che rimane costante) ma una minore probabilità che esso possa trovarsi al di là della barriera piuttosto che al di qua. Come abbiamo già sottolineato, la meccanica quantistica è probabilistica: se lanciamo molte particelle di bassa energia contro una barriera, per la maggior parte esse non superano l'ostacolo, ma alcune, statisticamente, vi riescono grazie all'effetto

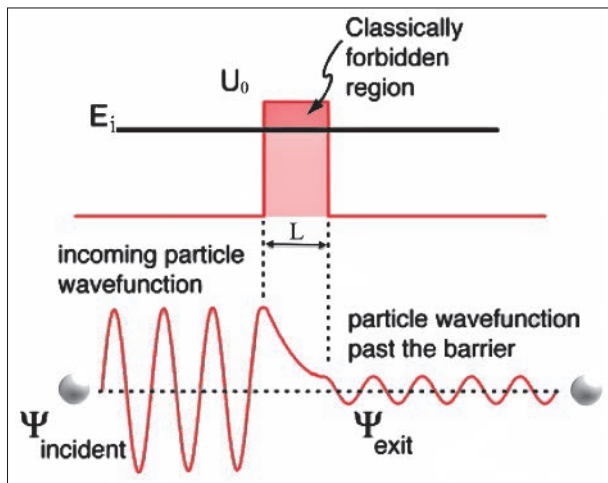


FIG. 7. L'effetto tunnel. Nel diagramma superiore la linea rossa rappresenta un "muro" (analogo a quello in FIG. 1) di potenziale elettrico U_0 maggiore dell'energia E_i (linea nera) della particella che rimane costante prima, durante e dopo l'attraversamento della barriera. Nel diagramma inferiore è raffigurata l'onda di probabilità associata all'elettrone incidente. L'ampiezza dell'onda decresce esponenzialmente durante l'attraversamento della barriera (in analogia a quanto accade in FIG. 5) e l'onda trasmessa ha un'ampiezza inferiore a quella incidente.

tunnel. La probabilità per una singola particella che questo avvenga è data dall'esponenziale⁴

$$P \approx \exp\left(-2L \sqrt{\frac{2m(U_0 - E_i)}{\hbar^2}}\right), \quad (3)$$

dove m rappresenta la massa della particella e $\hbar \equiv h/2\pi$ è legata alla costante di Planck $h \approx 6,63 \times 10^{-34}$ J·s; gli altri simboli sono rappresentati in FIG. 7 dove la barriera ha forma rettangolare.⁵ Come si evince dalla formula, la probabilità cresce al diminuire dello spessore della barriera e del "deficit" di energia ($U_0 - E_i$) che la particella ha rispetto alla barriera. Inoltre, le particelle leggere (come gli elettroni) hanno una probabilità molto maggiore rispetto a quelle pesanti.⁶

L'effetto tunnel è presente nella nostra vita quotidiana molto più di quanto si tenderebbe a credere. Ad esempio, ogni conduttore esposto all'aria si ricopre rapidamente di uno strato di ossido, per cui cavi intrecciati o connessi con viti, morsetti ecc. (o anche le usuali lampadine avvitate nella loro sede) presentano strati isolanti fra le giunzioni. La corrente elettrica, tuttavia, scorre ugualmente grazie all'effetto tunnel. Questo effetto è altresì alla base di molti dispositivi elettronici quali diodi, memorie flash e microscopi elettronici. Ricordiamo infine che l'effetto tunnel consente anche il verificarsi del fenomeno della radioattività e la fusione dell'idro-

⁴ Per una più comoda lettura della formula adottiamo la convenzione $\exp(x) \equiv e^x$.

⁵ La forma rettangolare è una semplificazione che facilita i calcoli. Tuttavia potenziali rettangolari vengono effettivamente realizzati ed utilizzati nel campo dei semiconduttori o in dispositivi come il microscopio elettronico.

⁶ Questo spiega perché per oggetti macroscopici l'effetto tunnel è sostanzialmente trascurabile.

³ All'argomento trattato alquanto frettolosamente in questo paragrafo sono state dedicate due precedenti Spigolature, la n. 1 del 2001 e la n. 1 del 2024. Ad esse il lettore è rimandato per maggiori approfondimenti.

geno al centro del Sole (senza la quale non esisterebbero). Approfondiremo quest'ultimo punto nel livello avanzato.

Come anticipato nel livello base, analizziamo ora due argomenti: la legge di Snell (con relativa onda evanescente) e il ruolo dell'effetto tunnel nel processo di fusione all'interno del Sole.

Cominciamo dal primo argomento esaminando qui il fenomeno della rifrazione sulla base dell'aspetto ondulatorio della luce.⁷ Iniziamo ricordando che la velocità di un'onda elettromagnetica in un mezzo con indice di rifrazione n è pari a $v = c/n$, dove c è la velocità nel vuoto (il quale ha, pertanto, $n = 1$). In FIG. 8a abbiamo un'onda piana monocromatica (le cui creste e gole sono rappresentate, rispettivamente, da rette verdi e blu) che viaggia con un angolo di incidenza θ_1 in un mezzo con indice di rifrazione n_1 , e che poi si propaga con un angolo di rifrazione θ_2 in un mezzo adiacente con $n_2 < n_1$.

Osserviamo che all'interfaccia dei due mezzi le linee verdi e blu indicanti l'onda incidente non solo cambiano inclinazione, ma appaiono anche "spezzarsi" in quanto si trovano a contatto con linee di colore opposto (o con l'interspazio tra esse) rappresentanti l'onda rifratta; questo significa, ad esempio, che una cresta dell'onda incidente si trasforma istantaneamente in una gola non appena attraversa la superficie di separazione. Questa eventualità non ha senso fisico e la rappresentazione dell'onda rifratta in FIG. 8a è scorretta. È necessario invece che si realizzi una continuità, ossia che in ogni punto della superficie di contatto l'onda superiore e quella inferiore abbiano lo stesso valore; dal punto di vista grafico questo significa che le righe dell'onda incidente si piegano senza "rompersi", come mostrato correttamente in FIG. 8b.

Dalla FIG. 9 si evince che le velocità con cui le estremità delle creste dell'onda incidente e di quella rifratta "scorrono" lungo l'interfaccia sono, rispettivamente, $v_{s1} = c/n_1 \sin \theta_1$ e $v_{s2} = c/n_2 \sin \theta_2$ e, per i motivi di continuità esposti più sopra, deve essere $v_{s1} = v_{s2}$. Per un fissato valore di θ_1 c'è un unico valore di θ_2 per cui questa uguaglianza possa realizzarsi, dando così luogo (com'è facile verificare) alla legge di Snell [eq. (1)] nel caso $\theta_1 < \theta_c$. Nel caso $\theta_1 = \theta_c$ si ottiene naturalmente l'eq. (2) e l'onda rifratta si propaga parallelamente alla superficie di contatto (FIG. 10a). Se $\theta_1 > \theta_c$ abbiamo $v_{s1} < v_{s2}$, in contraddizione con l'ipotesi di partenza; pertanto in questo caso l'onda rifratta non può esistere (si verifica la condizione TIR).

⁷ La rifrazione è stata descritta in dettaglio nelle *Spigolature* n. 3 del 2015. Lì, però, si è adottata l'approssimazione geometrica, e la legge di Snell è stata ottenuta in base al principio di Fermat secondo cui il percorso fra due punti preso da un raggio di luce è quello che è attraversato nel minor tempo.

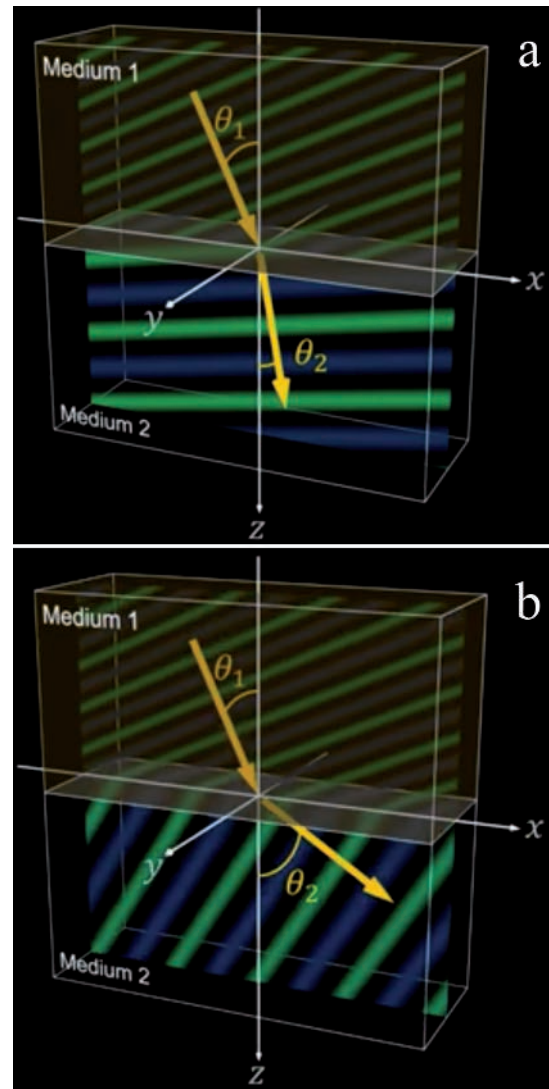


FIG. 8. a) Sono illustrati due mezzi con diverso indice di rifrazione. Il mezzo 1 con indice di rifrazione n_1 occupa il semispazio superiore ($z < 0$) mentre il mezzo 2 con indice di rifrazione $n_2 < n_1$ occupa il semispazio inferiore ($z > 0$). I due mezzi sono a contatto lungo la superficie $z = 0$. Le linee verdi e blu rappresentano le creste e le gole di un'onda piana. Le due frecce gialle indicano il verso di propagazione dell'onda incidente (in alto) e rifratta (in basso). Questa figura è sbagliata in quanto non c'è continuità delle linee verdi e blu attraverso la superficie di separazione. b) Questa figura, invece, è corretta in quanto la continuità è presente e l'angolo di rifrazione θ_2 è maggiore dell'angolo di incidenza θ_1 , in accordo con la legge di Snell. Per chiarezza non è riportata l'onda riflessa.

Tuttavia, una breve intrusione nel mezzo 2 si verifica ugualmente (FIG. 10b). Il motivo, ancor una volta, è dovuto al fatto che un'onda non può interrompersi "ex abrupto" e c'è quindi necessità di una continuità attraverso il piano di separazione tra i due mezzi. Si forma così un'onda evanescente che si propaga parallelamente alla superficie di contatto, ma con un'ampiezza che decade esponenzialmente con la distanza da tale superficie; una simile onda non trasporta energia.

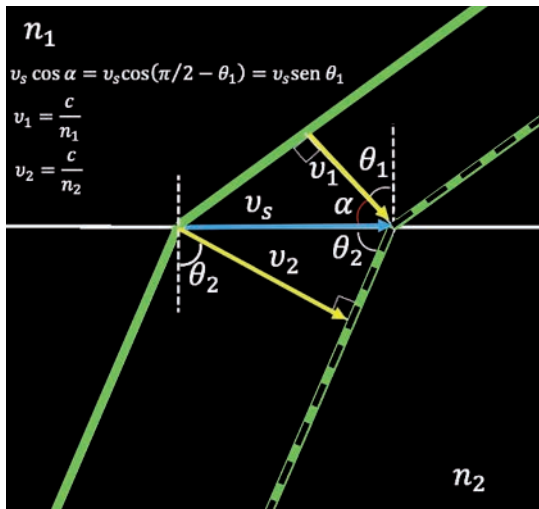


FIG. 9. La linea bianca orizzontale rappresenta il contatto tra un mezzo con indice di rifrazione n_1 ed uno con indice di rifrazione $n_2 < n_1$. Le due linee verdi continue rappresentano una cresta incidente (in alto) e una rifratta (in basso), mentre le linee verdi tratteggiate mostrano le stesse creste dopo un tempo unitario (p.e. 1 s). Le due frecce gialle indicano le velocità delle onde incidente e rifratta, mentre la freccia blu rappresenta la velocità di scorrimento delle intersezioni delle creste d'onda con la linea divisoria. Infine θ_1 e θ_2 sono, rispettivamente, l'angolo di incidenza e quello di rifrazione. Le due linee bianche tratteggiate servono a guidare l'occhio e non hanno alcun significato fisico.

Quanto appena detto vale in generale per vari tipi di onde tra cui, in particolare, l'onda di probabilità associata alle particelle in meccanica quantistica. La funzione Ψ deve rimanere continua a contatto con la "parete" di una barriera di potenziale e si estende perciò al suo interno tramite una "coda" esponenziale (FIG. 7).

Passiamo ora al secondo argomento, ossia la fusione tra protoni. Com'è noto, la maggior parte dell'energia prodotta dal Sole deriva dalla fusione di coppie di protoni che, "in collaborazione" con coppie di neutroni, formano nuclei di elio (2 protoni+2 neutroni).⁸ Le due forze che regolano la fusione sono quella di Coulomb (che si esercita tra cariche elettriche) e la forza forte. Quest'ultima – la forza (attrattiva) nucleare – ha un raggio d'azione $r_n \sim 1 \text{ fm}$ ⁹ ed è circa 100 volte più intensa di quella elettromagnetica (repulsiva). Consideriamo due protoni inizialmente ad una distanza r talmente elevata (rispetto alle dimensioni di un protone) da poter porre formalmente $r \sim \infty$. Immaginiamo che il secondo protone, dotato di energia iniziale (totalmente cinetica) E_i , si diriga verso il primo protone

⁸ In verità il ciclo protone-protone che produce l'elio è alquanto complesso e si realizza attraverso diversi passaggi. Essendo interessati in particolare all'effetto tunnel, noi qui ci soffermiamo unicamente sul primo passaggio in cui due protoni (H) si uniscono a formare deuterio (^2H). Tuttavia, alle reazioni nucleari sono state dedicate due Spigolature (n. 2 del 2006 e n. 2 del 2023) a cui rimandiamo il lettore interessato.

⁹ $1 \text{ fm} = 1 \times 10^{-15} \text{ m}$, dove fm sta per l'unità di misura "fermi".

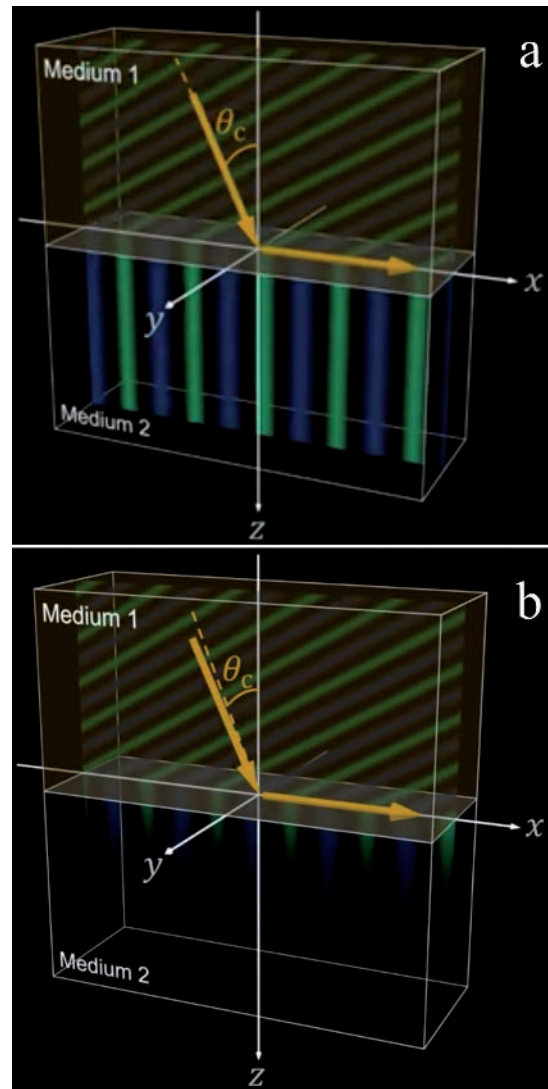


FIG. 10. a) Quando l'angolo di incidenza è uguale a quello critico ($\theta_1 = \theta_c$) l'onda rifratta scorre parallelamente alla superficie di contatto mentre le creste e le gole sono perpendicolari ad essa. b) Se $\theta_1 > \theta_c$ non vi è più rifrazione, ma una piccola "appendice" delle linee verdi e blu si protrude comunque nel mezzo 2 con un'estensione dell'ordine della lunghezza d'onda della radiazione (si veda il testo).

(posto a $r = 0$);¹⁰ esso rallenta continuamente (per via della repulsione) e la distanza diminuisce sempre più fino ad un valore minimo r_m (FIG. 11). Se $r_m > r_n$ la velocità si annullerà per un istante in r_m per poi invertire la sua direzione a causa della repulsione coulombiana tra le due particelle e non si realizzerà alcuna fusione. Se invece $r_m < r_n$ il secondo protone cadrà nel raggio di azione della forza nucleare del primo (e viceversa); essendo questa forza molto superiore a quella di Coulomb, l'attrazione supererà la repulsione e le due particelle potranno unirsi (FIG. 11).

¹⁰ Questa frase è imprecisa perché suggerisce che un primo protone rimane fermo mentre l'altro gli si avvicina. In realtà entrambi i protoni si respingono allontanandosi l'uno dall'altro. Tuttavia, la descrizione nel testo è di più facile comprensione e non introduce rilevanti errori quantitativi in alcuni dei valori numerici riportati.

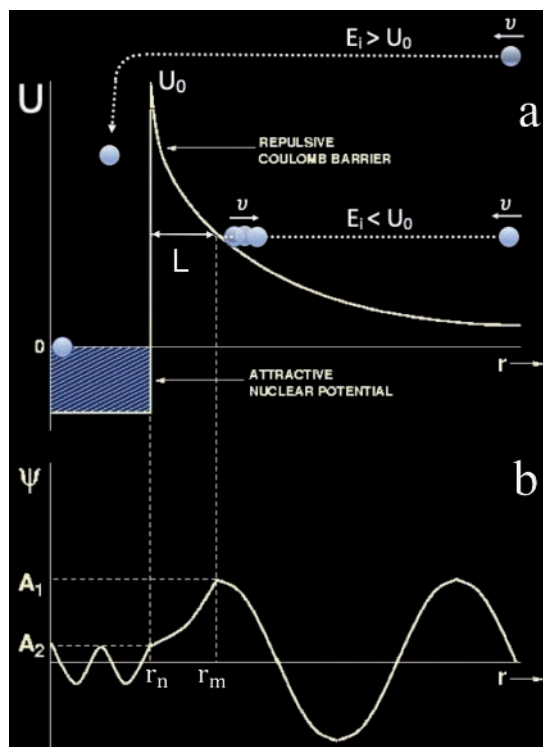


FIG. 11. a) Uno schema dell'energia potenziale U (ossia l'energia che un protone deve avere per avvicinare un altro protone). A grandi distanze prevale la repulsione coulombiana: la linea punteggiata inferiore mostra un protone che, partito da lontano con un'energia $E_i = K$ (dove E_i è l'energia totale e K quella cinetica), rallenta sempre più fino a fermarsi in r_m (dove la sua energia si è totalmente trasformata in energia potenziale $U(r_m) = k/r_m$, per poi "rimbalzare" indietro. b) Lo schema inferiore rappresenta la stessa cosa di quello superiore, ma da un punto di vista quantistico. La funzione d'onda associata ad un elettrone con $E_i = U_0$ oscilla alla destra e alla sinistra della barriera e decade esponenzialmente al suo interno. L'ampiezza dell'onda nella buca di potenziale nucleare indica che la probabilità per il secondo protone di stabilirsi è piccola ma non nulla, e la fusione è dunque possibile.

Per comprendere il ruolo cruciale dell'effetto tunnel è necessario trasformare i vincoli sulle distanze appena esposti in vincoli sulle energie, analogamente a quanto abbiamo fatto nell'esempio del pallone descritto nel livello base. Mentre in quell'esempio la forza di gravità è stata assunta indipendente dalla posizione, nel caso dei due protoni dobbiamo tenere conto della dipendenza da r della forza di Coulomb, e il calcolo dell'energia potenziale risulta un poco più complicato.

La forza di Coulomb tra le due protoni è $F = q^2 / (4\pi\epsilon_0 r^2) \equiv k/r^2$ dove q è la carica del protone, ϵ_0 è la costante dielettrica nel vuoto e $k \equiv q^2 / (4\pi\epsilon_0) = 2,31 \times 10^{-28} \text{ N}\cdot\text{m}^2$. In base ad un semplice calcolo integrale (che omettiamo) l'energia potenziale risulta essere $U(r) = k/r$, ed avere, quindi, un andamento radiale iperbolico, come illustrato in FIG. 11a. Tale andamento si interrompe in r_n , dove si impone la forza forte che, essendo attrattiva, ha

un'energia potenziale negativa; nell'intervallo $0 < r \leq r_n$ si forma una sorta di "pozzo" in fondo al quale due protoni possono fondersi. Il profilo complessivo dell'energia potenziale mostra dunque un picco $U_0 = k/r_n$.

Consideriamo ora il moto del secondo protone verso il primo. Inizialmente, essendo a grande distanza, sarà sostanzialmente privo di energia potenziale e la sua energia sarà totalmente cinetica: $E_i = K$. Come nell'esempio del pallone illustrato all'inizio del livello base, nel corso del suo avvicinamento il protone mantiene costante la sua energia iniziale ma acquisisce energia potenziale a spese dell'energia cinetica: $E_i = K + U$. Come mostrato in FIG. 11a, se $E_i < U_0$ il protone procede fino ad incontrare la barriera potenziale in r_m ; qui $K = 0$ perché l'energia si è interamente trasformata in energia potenziale $U(r_m) = k/r_m$. Successivamente il protone si allontana trasformando di nuovo la sua energia potenziale in energia cinetica; in questo caso la fusione non avviene. Se invece $E_i > U_0$ il protone riesce a scavalcare la barriera e cadere nel pozzo dando luogo alla fusione.

Utilizziamo ora qualche numero per rendere quantitativo quanto esposto finora e capire quel che realmente succede nel centro del Sole. Qui la temperatura¹¹ è $T = 15 \times 10^6 \text{ K}$ e dalla termodinamica statistica sappiamo che, per via dell'agitazione termica, l'energia cinetica di una particella è data da $K = 1,5\kappa T$, dove $\kappa = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ è la costante di Boltzmann. Pertanto l'energia iniziale del protone è pari a $E_i = K = 3,11 \times 10^{-16} \text{ J}$ e va confrontata con il valore del picco della barriera di energia potenziale $U_0 = 2,31 \times 10^{-13} \text{ J}$. Dunque, mediamente l'energia dei protoni è circa 300 volte inferiore al picco della barriera e la fusione, con annessa produzione di energia, risulta inibita. Naturalmente questa conclusione – basata sulla fisica classica – è palesemente sbagliata, come ci rendiamo conto quotidianamente.

Ma ormai abbiamo già capito che la soluzione al problema appena esposto è data dalla meccanica quantistica e, in particolare, dall'effetto tunnel. Come mostrato in FIG. 11b, la funzione d'onda Ψ associata alla particella in arrivo con $E_i < U_0$ può superare la barriera tramite una coda esponenziale che, una volta "sbucata" dal lato opposto, torna ad oscillare sia pure con ampiezza ridotta. Questo significa che la probabilità che il protone si ritrovi effettivamente nel pozzo per potere dare luogo alla fusione è alquanto bassa. Per calcolare tale probabilità proviamo a utilizzare l'eq. (3) non prima di aver calcolato lo spessore della barriera $L = r_m - r_n$. In r_m il valore dell'energia potenziale è pari a $E_i = k/r_m$, per cui otteniamo $L = (U_0/E_i - 1)r_n = 7,41 \times 10^{-13} \text{ m}$.

¹¹ La scala termometrica Kelvin è uguale a quella Celsius ma "sfasata" di 273 gradi (p.e., $0^\circ \text{C} = 273 \text{ K}$).

Utilizzando i valori calcolati più sopra per valutare la probabilità che si realizzi l'effetto tunnel [eq. (3)] otteniamo $P \approx 0$, ossia il risultato classico! Il punto è che abbiamo assunto che tutti i protoni abbiano un'energia pari al valor medio, mentre in realtà essi sono ripartiti in energia secondo la distribuzione di Boltzmann $\exp(-E/kT)$ (si veda il n. 1 del 2021) per cui i protoni più energetici sono meno numerosi, e viceversa. Con riferimento alla FIG. 11a, i protoni con maggiore E_i seguono una traiettoria "alta" che li porta ad avere a che fare con valori di $(U_0 - E_i)$ relativamente bassi e spessori L della barriera alquanto sottili. Entrambi questi fattori contribuiscono ad aumentare la probabilità P data dall'eq. (3). Riassumendo, ab-

biamo pochi protoni con alto P e, gradatamente, sempre più protoni con basso P . Il calcolo di P medio che tenga conto di questi fattori è alquanto complesso e non lo riportiamo; riportiamo però il risultato finale pari a $P \sim 10^{-9}$. In altre parole, solo uno scontro su un miliardo può effettivamente dare vita ad una reazione di fusione.¹² Nonostante questo dato possa apparire basso, grazie all'enorme numero di protoni ($\sim 10^{56}$) contenuti nel suo nucleo il Sole ha potuto brillare durante gli scorsi $4,5 \times 10^9$ anni e continuerà a farlo per un analogo lasso di tempo.

¹² In realtà questo numero è ulteriormente ridotto da altri fattori non dovuti all'effetto tunnel e su cui, pertanto, non ci soffermiamo.

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.

La rivoluzione SpaceX
Elon Musk e la conquista di Marte
Eric Berger
Traduzione di Daniela Di Lisio
Apogeo (Saggi), 2025
Copertina flessibile, pp. 288, € 25,00
ISBN 9788850339273
www.apogeonline.com

Da bambino seguivo con interesse ed entusiasmo le missioni Apollo, e ricordo quando von Braun affermò che si sarebbe raggiunto Marte nel 1980. Ma la vittoria degli Stati Uniti sull'Unione Sovietica nella corsa alla Luna e i costi enormi delle missioni oltre l'orbita terrestre portarono alla fine del sogno di inviare esseri umani su altri pianeti. Così, quando ho visto i primi test di SpaceX per sviluppare un razzo riutilizzabile, ho cominciato a seguire i suoi progressi, e l'interesse ed entusiasmo della mia infanzia hanno cominciato a riaffiorare. Non c'è dubbio che la visione messianica di Elon Musk che ritiene necessario colonizzare Marte per salvare l'umanità sia discutibile (e non realizzabile almeno nel prossimo futuro), ma è grazie anche a quella visione che Musk ha avuto il coraggio di rischiare e di affrontare sfide che ad altri sarebbero sembrate impossibili. Inizialmente è stato deriso da tutti, *in primis* dalla United Launch Alliance (*joint venture* fra Boeing e Lockheed Martin). Eppure, con il *Falcon 9* (versione *Block 5*), SpaceX ha raggiunto un obiettivo che era considerato irrealizzabile: un razzo estremamente affidabile, riutilizzabile in tempi rapidi, che ha abbattuto i costi dell'accesso all'orbita terrestre, che domina commercialmente il mercato dei lanci, e che ha rilanciato la corsa allo spazio.

La rivoluzione SpaceX ripercorre in tredici capitoli questa storia straordinaria a partire dal 2008, dopo che SpaceX è riuscita a far volare il suo primo razzo, il *Falcon 1* (una storia narrata dall'autore in un suo precedente libro, *Liftoff*, non tradotto in italiano), fino al 2023. L'autore è ben noto agli addetti ai lavori. Eric Berger è infatti un giornalista specializzato che segue l'industria aerospaziale e con particolare attenzione le vicende di SpaceX: oltre ad aver intervistato più volte Elon Musk, ha molti contatti con i dipendenti e gli ex-dipendenti di SpaceX.

Il titolo originale del libro è in realtà *Reentry. SpaceX, Elon Musk, and the Reusable Rockets that Launched a Second Space Age*: sulla copertina dell'edizione americana campeggia l'immagine di un primo stadio del *Falcon 9* in fase di atterraggio, una copertina apprezzata dall'autore nei ringraziamenti e

simmetrica a quella del suo libro precedente, *Liftoff* (non tradotto in italiano), dove si ha invece un *Falcon* che decolla. Il titolo però, ammettiamolo, non appare particolarmente accattivante, e capisco che lo si sia voluto cambiare nella versione italiana, come d'altronde spesso succede. *La rivoluzione SpaceX* è senz'altro un'ottima scelta, ma avrei qualche riserva sul sottotitolo, *Elon Musk e la conquista di Marte*, così come sulla copertina, dove campeggiano Marte in alto e Musk in basso. Se è vero che la motivazione e lo scopo di Musk è la colonizzazione di Marte, va sottolineato che la storia narrata nel libro non è centrata su questo, ma non per questo è meno interessante e avvincente. Ci si può rammaricare che il corredo iconografico sia modesto, con poche foto in bianco e nero e a bassa risoluzione, ma alla fine del volume si trova un codice a barre con l'indirizzo web dove si può recuperare un file pdf con un buon numero di foto a colori «di alcuni dei momenti, delle persone e dei razzi iconici nella storia di SpaceX».

Come si suol dire, il libro si legge d'un fiato. È scritto in maniera scorrevole, merito dell'autore ma, ricordiamolo visto che è qualcosa che si tende a trascurare, di chi l'ha tradotto. La storia di SpaceX è un susseguirsi di attività frenetiche ed estenuanti, di cambi di strategia improvvisi dettati da Musk, di momenti di esaltazione ed altri di sconforto, con un buon numero di esplosioni (chi, come il sottoscritto, ha sperimentato la divertente simulazione del volo spaziale *Kerbal Space Program*, peraltro apprezzata da Musk stesso, inevitabilmente troverà qualche parallelismo). E nella lettura ci si appassiona non solo per i momenti critici del lancio o del rientro di un razzo, per una situazione critica, per un incidente inaspettato e la ricerca delle sue cause, ma anche per le difficoltà e le capacità di improvvisazione del personale nel sollevare un razzo con una gru, nel trasportare un razzo lungo le strade degli Stati Uniti, nel preparare in urgenza una chiatta per recuperare la capsula Dragon nell'oceano.

Un pregio particolare del libro è che Musk è sì presente, ma i veri protagonisti sono gli ingegneri, di una parte dei quali possiamo conoscere i nomi e qualcosa della loro motivazione e personalità; e non ci sono solo dipendenti di SpaceX, ma anche responsabili della NASA e dell'esercito, che muovendosi nei rispettivi ambienti e conciliando le esigenze di prudenza e sicurezza degli enti istituzionali con l'approccio innovativo, decisamente non ortodosso e più propenso al rischio dell'azienda di Musk, hanno contribuito al successo finale. Dentro SpaceX vediamo l'operato di persone brillanti, disposte ad arriva-

re fino a 100 ore settimanali di lavoro perché hanno creduto nel progetto, ma che si sono dovute adattare alla personalità di Elon Musk, alle sue esigenze impossibili e alle sue sfuriate di fronte a contrattamenti a suo parere non giustificati. Il decimo capitolo, intitolato *Il prezzo da pagare per arrivare su Marte*, è dedicato proprio a diverse di queste persone, che hanno sacrificato anni della loro vita e della loro famiglia, per poi essere costrette a lasciare l'azienda nella quale pur credevano. Fra loro, i dirigenti sono quelli più a rischio, come ha dichiarato a Berger un ex dirigente di SpaceX, Abhi Tripathi: «Sembra un'esagerazione, ma ogni vicepresidente ha una probabilità quasi del cento per cento di essere licenziato o di arrivare al *burnout*».

Nell'epilogo l'autore offre alcune interessanti e serie riflessioni sul futuro di SpaceX e sui rischi che si prospettano. La personalità del fondatore innanzitutto, con i suoi interventi su Twitter e nella sfera pubblica e politica, che non favoriscono certo la fiducia degli investitori. O la necessità di trovare un giorno un sostituto altrettanto valido a Gwynne Shotwell, presidente e *Chief Operating Officer* di SpaceX, che ha affiancato Musk in tutti questi anni (possiamo immaginare il suo carattere di ferro per aver resistito tanto tempo) ed è riuscita a garantire la serietà e affidabilità dell'azienda.

Ed è fra l'altro recente la notizia, commentata e analizzata ampiamente dallo stesso Eric Berger su *Ars Technica*, della prossima quotazione in Borsa di SpaceX e del nuovo progetto di Musk: la realizzazione di una nuova serie di satelliti *Starlink* per creare dei *data center* nello spazio al servizio dell'intelligenza artificiale (gli *Starlink* sono purtroppo un disastro per l'astronomia e l'assenza di un'autorità internazionale che possa regolare l'invio nello spazio dei satelliti ci sta portando ad una situazione sempre più critica con rischi di collisione in aumento, ma questo è un altro discorso).

La Rivoluzione SpaceX costituisce dunque una lettura piacevole e avvincente, e al tempo stesso molto istruttiva, non solo perché racconta i momenti importanti della storia del *Falcon 9*, lo storico primo razzo recuperabile che rappresenta un passo fondamentale per il futuro dell'umanità nello spazio, ma anche perché permette di comprendere le ragioni del successo dell'azienda di Elon Musk, con tutte le sue luci e le sue ombre. Non dubito che in futuro Eric Berger dedicherà un terzo libro alla *Starship*, ma bisognerà probabilmente attendere qualche anno ancora per conoscere il destino di questo razzo rivoluzionario.

ALBERTO CAPPI

Eric Berger ha conseguito la laurea in Astronomia all'Università del Texas e il master in giornalismo presso l'Università del Missouri. È *senior editor* per il settore spaziale di *Ars Technica*, dove si occupa in particolare di industria aerospaziale privata e politica della NASA. Per diciassette anni ha lavorato allo *Houston Chronicle*, contribuendo alla copertura dell'uragano Ike, che nel 2009 ha

portato il giornale tra i finalisti del premio Pulitzer. Meteorologo certificato, ha fondato *Space City Weather*. È autore di *Liftoff*, libro sull'ascesa di SpaceX.

★

Galileo Galilei, genio policromo

Fisico, astronomo, filosofo, scrittore, ingegnere, matematico, filologo, musicista e pittore

Alessandro Bettini

Bollati Boringhieri, 2025

Copertina flessibile, pp. 176, € 18,00

ISBN 9788833945095

www.bollatiboringhieri.it

CON Galileo. *Genio policromo*, il fisico Alessandro Bettini firma l'ennesimo libro dedicato alla figura di Galileo Galilei, pubblicato da Bollati Boringhieri. Ce n'era davvero bisogno? La risposta non può che essere affermativa, almeno per chi continua a considerare Galileo un riferimento imprescindibile e legge con rinnovato interesse tutto ciò che lo riguarda, riconoscendolo come il nostro eroe – e padre – scientifico.

Il volume rinuncia consapevolmente alla classica impostazione cronologica per articolarsi in sedici capitoli tematici, ciascuno dedicato ad aspetti che hanno particolarmente stimolato l'autore. Ogni capitolo è ulteriormente suddiviso in sottosezioni che affrontano argomenti affini, dando vita a un percorso ricco e variegato. Il testo si distingue per l'abbondanza di citazioni, tratte quasi esclusivamente dall'Edizione Nazionale delle Opere di Galileo Galilei curata da Antonio Favaro. I richiami ad altre fonti sono rari – con poche eccezioni, come Calvino o Panofsky – e questa scelta, lungi dall'essere un limite, diventa un punto di forza: ne risulta infatti una riflessione compatta, personale e coerente sull'opera e sulla figura di Galileo. Chi fosse invece in cerca di una trattazione sistematica delle scoperte scientifiche galileiane potrebbe rimanere deluso.

Il libro si apre con un capitolo dedicato al disegno, a partire dalla celebre testimonianza di Viviani sull'interesse di Galileo per la pittura, per poi passare, in modo piuttosto inatteso, alla teoria delle maree. In questo passaggio Bettini appare forse un po' severo nei confronti di Galileo, poiché non sempre contestualizza adeguatamente lo sforzo razionale compiuto per spiegare il fenomeno. Galileo non disponeva della formulazione $F = ma$, ma la combinazione dei moti di rotazione e di rivoluzione produce effettivamente una forza sui corpi liquidi – oggi nota come forza di Coriolis – che spiega, per esempio, l'opposto senso di rotazione degli uragani nei due emisferi terrestri.

Il secondo capitolo è dedicato alla Luna e comprende la scoperta e lo sviluppo del cannocchiale. Meno convincente appare l'idea che il cannocchiale galileiano (o olandese) sia nato “per caso” prima di quello kepleriano semplicemente perché più compatto. Le osservazioni di Fracastoro, che già a metà

del XVI secolo utilizzava due lenti convesse, suggeriscono infatti che il vero limite fosse la qualità delle lenti, più che le loro dimensioni.

Nel terzo capitolo si affronta la scoperta delle macchie solari e la controversia con il gesuita Christoph Scheiner. La ricostruzione è accurata e ricca di dettagli e consente di cogliere con chiarezza sia le personalità dei protagonisti sia il ruolo svolto dai gesuiti nella successiva condanna di Galileo nel 1633.

Il quarto capitolo torna sul tema della pittura, mettendo in evidenza la modernità di Galileo nel sostenere la superiorità di quest'arte sulla scultura, all'interno di un dibattito centrale del Rinascimento italiano e già caro a Leonardo da Vinci, di cui Galileo riprende e sviluppa le argomentazioni. In questo contesto viene presentata anche la teoria galileiana delle comete, interpretate come fenomeni atmosferici. A questo proposito sarebbe stato interessante conoscere più nel dettaglio il giudizio di Galileo su Tycho Brahe, che verso la fine del XVI secolo fu il primo a misurare la parallasse di diverse comete, dimostrando che si trattava di corpi celesti situati oltre la Luna e quindi al di fuori dell'atmosfera, mediante una tecnica ben nota allo stesso Galileo.

Il quinto capitolo è dedicato alla musica e offre un'analisi approfondita della figura del padre Vincenzo, probabilmente il più importante teorico musicale del suo tempo. È plausibile che Galileo abbia ereditato da lui l'approccio sperimentale allo studio del suono. Tuttavia, Galileo si mostra sorprendentemente moderno nel superare le posizioni paterne, sostenendo che la musica possiede un valore per sé e non ha bisogno della parola o del canto per suscitare emozioni.

Il sesto capitolo affronta l'attività di critico letterario di Galileo, soffermandosi in particolare sulla sua nota preferenza per l'Ariosto rispetto al Tasso e mettendo in luce la finezza e la profondità della sua analisi testuale.

Il settimo capitolo, intitolato *Pavan*, è dedicato al dialetto padovano utilizzato da Galileo, in forma anonima e con l'aiuto di parlanti locali, per il *Dialogo de Cecco di Ronchitti da Bruzene in prepusito de la stella nuova*. Si tratta di un testo di grande importanza, spesso trascurato, perché rappresenta la prima occasione in cui Galileo esprime apertamente, seppur anonimamente, il proprio pensiero copernicano. In questa analisi emerge con chiarezza il Bettini filologo che, da buon padovano, individua persino alcune lievi imperfezioni nel dialetto adottato da Galileo.

L'ottavo capitolo, *Lago*, è dedicato al primo esperimento storicamente documentato del principio di relatività galileiana, ricordando tuttavia che Giordano Bruno ne aveva già formulato una versione concettuale nel *La cena de le ceneri*. Un altro grande pensatore con cui Galileo si è certamente confrontato, seppur in modo non dichiarato e per ovvie ragioni. Anche qui la relatività galileiana viene presentata come uno studio a sé, scollegato dal problema del copernicanesimo, che pure non avrebbe potuto essere accettato senza di essa.

Il nono capitolo, *Fiume*, descrive gli interventi di idraulica e di messa in sicurezza del territorio progettati da Galileo: soluzioni di straordinaria ingegnosit , delle quali avremmo grande bisogno ancora oggi.

Il decimo capitolo è dedicato al vino. Bettini ribalta l'immagine tradizionale di un Galileo grande bevitore e lo presenta piuttosto come un consumatore moderato.¹ Ricordo un articolo di Alessandro De Angelis sul Corriere della Sera secondo cui Galileo, in una serata conviviale, poteva bere una bozza di vino, pari a circa otto "ombre" padovane odierne. Una questione che forse meriterebbe di essere chiarita definitivamente. Di particolare interesse è l'attribuzione a Galileo dell'invenzione della macerazione carbonica, tanto che all'elenco delle sue competenze si potrebbe aggiungere anche quella di enologo.

Il capitolo successivo, *Mortadelle e geometria*, affronta il contributo di Galileo alla matematica ed è forse il più originale e stimolante dell'intero volume. Il suo ruolo nell'affermare l'esistenza di diversi tipi di infinito – un concetto che ancora oggi mette in crisi la nostra logica – gli garantisce un posto di primo piano anche in questo ambito.

I capitoli finali risultano più tradizionali e, in un certo senso, meno innovativi. Il dodicesimo è dedicato ai legami familiari di Galileo; il tredicesimo alla sua caduta, con il celebre incidente della Sala dei Venti, le cui conseguenze lo segneranno per il resto della vita. Il quattordicesimo capitolo è riservato a Viviani, il quindicesimo all'ultimo amore – apparentemente ricambiato – per Alessandra Bocchineri, mentre il sedicesimo ripercorre la vicenda della riesumazione dei suoi resti, arricchita da una citazione dei *Sepolcri* di Alfieri.

Nel complesso, *Galileo. Genio policromo* è un libro estremamente piacevole, che si legge con il ritmo di un romanzo. Il sottotitolo chiarisce il significato del termine "policromo", elencando le molteplici discipline in cui Galileo avrebbe eccelso: fisico, astronomo, filosofo, scrittore, ingegnere, matematico, filologo, musicista e pittore. Su alcune di queste etichette è però lecito nutrire qualche riserva, in particolare su quella di filosofo, a meno che non venga intesa nel significato che il termine aveva all'epoca di Galileo, quando la filosofia era considerata la scienza suprema. Non a caso Galileo chiese il titolo di Filosofo al suo rientro in Toscana. È tuttavia difficile immaginare una figura più distante dalla filosofia come la intendiamo oggi: se è vero che Galileo ha inciso profondamente sul suo sviluppo, introducendo al suo interno la riflessione sulla realtà fisica, è altrettanto vero che nella sua opera non si trovano discussioni su problemi filosofici privi di una possibile soluzione fisica o almeno razionale. Emblematica, in questo senso, l'esclamazione attribuita a Matteo nel *Dialogo de Cecco di Ronchitti da Bruzene in prepusito de la stella nuova*: «merda di una

¹ [NdR: si veda su questa rivista: A. RIGHINI, *Galileo e il vino*, «Giornale di Astronomia», 35, 2, 2009, pp. 10-18].

stella, rovinare così la filosofia di questi signori». Considerazioni analoghe valgono per l'etichetta di filologo: la conoscenza del latino e del greco non è di per sé sufficiente a definirlo tale. Al contrario, si potrebbe forse aggiungere all'elenco un'altra qualifica, quella di divulgatore scientifico, dal momento che Galileo fu il primo a portare la scienza fuori dalla ristretta cerchia accademica. Anche se il libro non segue una struttura rigidamente sistematica, o forse proprio per questo, *Galileo. Genio policromo* è destinato a conquistare tutti gli appassionati di Galileo, che fortunatamente non sono pochi.

PAOLO MOLARO

Alessandro Bettini è professore emerito di Fisica all'Università di Padova e ricercatore sperimentale nella Fisica delle particelle elementari. Vicepresidente della Società Italiana di Fisica, per sei anni direttore del Laboratorio Nazionale del Gran Sasso e in precedenza vicepresidente dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Bettini è autore di più di 200 pubblicazioni scientifiche sulle maggiori riviste internazionali e di libri di testo universitari. Per Bollati Boringhieri ha pubblicato *Da Talete a Newton. La fisica nelle parole dei giganti* (2019) e *Nove parole della fisica. Vuoto, inerzia, atomo, simmetria, spazio-tempo, massa, eclissi, quark, cosmo* (2021), entrambi tradotti in diverse lingue.

★

La scienza vista da una filosofa

Nancy Cartwright

Traduzione di Alessio Bucci

Codice edizioni, 2025

Copertina flessibile, pp. 224, € 22,00

ISBN 9791254500866

www.codiceedizioni.it

IL caso ha voluto che mi sia ritrovato a leggere uno dopo l'altro l'ultimo libro di Carlo Rovelli *Sull'eguaglianza di tutte le cose*, e questo di Nancy Cartwright; la loro lettura permette un interessante confronto fra due diversi punti di vista sulla scienza.

Il libro di Cartwright (pubblicato nell'originale dalla Cambridge University Press) è diviso in tre lunghi capitoli, preceduti da un'introduzione e seguiti da un epilogo. L'introduzione è una chiara esposizione delle principali tesi dell'autrice, che sono poi argomentate nelle pagine successive. Il primo capitolo è ben definito dal suo titolo, *Teoria + Esperimento non fanno una scienza*, e mira a superare una definizione sbrigativa, ma molto diffusa, della ricerca scientifica. In un utile esercizio che definirei di filosofia descrittiva, Cartwright mostra come in realtà l'attività scientifica sia qualcosa di ben più complesso. Dopo varie considerazioni (fra le quali una sottile analisi dell'uso della statistica e delle probabilità, con l'interrogativo se queste siano sempre applicabili), l'autrice analizza in dettaglio la misura della carica dell'elettrone da parte di Millikan. Credo che la lettura di questo capitolo sia molto utile nella sua revi-

sione di un'immagine semplicistica della scienza sovente veicolata dalla divulgazione, dove si narra di scienziati geniali che elaborano da soli la loro teoria, mentre abili sperimentatori la confermano o la falsificano. Segnalo solo un paio di punti nella descrizione dell'esperimento di Millikan che potrebbero confondere qualche lettore. Nella figura 13 l'elettrone si muove verso l'alto e la forza di trascinamento è diretta verso il basso, mentre nel testo si descrive la situazione contraria (ho verificato che questa inversione viene dall'edizione originale in inglese). Nel testo relativo all'esperimento troviamo poi la formula $q = nqe$, dove q è la carica di una gocciolina d'olio e qe rappresenta la carica dell'elettrone: una notazione non corretta causata evidentemente da una svista tipografica nella preparazione del testo italiano, che ha "promosso" la e , in pedice nell'originale q_e , e quindi la formula corretta è: $q = nq_e$.

Il secondo capitolo, *Spodestare la regina* (cioè la fisica), è un attacco al riduzionismo. Cartwright passa in rassegna le diverse proposte con le quali i filosofi hanno cercato di inquadrarlo (chiamate tipo-tipo, occorrenza-occorrenza, sopravvenienza, *grounding*), e le critica mostrandone i limiti. A me sembra indubbiamente che in filosofia i dibattiti sulle definizioni si aggrovigolino e tendano a sterilizzarsi. Detto questo, ho l'impressione che l'autrice si lasci talvolta trasportare un po' troppo dalla sua avversione al riduzionismo, arrivando a qualche fraintendimento.

Il terzo capitolo, *Una natura più negoziabile*, esamina le possibili visioni della natura, ovvero «come possiamo costruire immagini della natura che abbiano un senso alla luce della nostra osservazione della scienza, in particolare dei suoi numerosi successi, dei suoi molti fallimenti e del modo in cui sono stati raggiunti». L'autrice critica la "filosofia meccanicista" attraverso la cui lente «vediamo una natura ordinata, che procede senza errori, sottoposta alle leggi che le nostre teorie scientifiche migliori ci illustrano a un ritmo sempre più frenetico. Questa immagine non è fedele alla sregolatezza che osservo nel mondo che mi circonda e che sperimento quando cerco di orientarmi al suo interno, né credo che sia fedele all'esperienza di chi legge questo libro». Propone invece la visione di un mondo da lei definito «screziato», ispirandosi a una poesia del poeta vittoriano e gesuita Gerard Manley Hopkins.

L'epilogo, intitolato *Riflessioni finali*, sostiene la pari dignità di tutte le discipline scientifiche, mette in guardia contro la rigidità nella metodologia (fra gli esempi è discussa la tragedia della diga del Vajont nel 1963) ed invita alla modestia e all'umiltà: «Se le mie preoccupazioni sono giuste, allora dobbiamo impegnarci molto di più per accogliere l'invito a una maggiore umiltà intellettuale nelle istituzioni scientifiche, comprese le sue culture, norme e pratiche e le sue istituzioni in senso più formale, cioè università e laboratori di ricerca, industria scientifica ed enti finanziatori».

Vi sono senz'altro situazioni nella scienza contemporanea dove la critica di Cartwright è pertinente.

te e dove il suo appello è da prendere in considerazione, ma in questo libro ci sono alcune sue affermazioni che mi lasciano un po' perplesso.

Ad esempio, secondo l'autrice la fisica utilizza leggi che si applicano soltanto a situazioni ideali, ma oltre queste situazioni ideali, oltre quello che lei chiama «il piccolo mondo» degli esperimenti dove si realizzano condizioni speciali e controllate, la fisica non è in grado di descrivere la complessità dei fenomeni: conclude dunque, in sostanza, che non si può ridurre tutto alla fisica. A mio parere, dove la fisica non è in grado di descrivere con precisione fenomeni complessi che avvengono in natura, anche in quei casi è comunque in grado di valutare la compatibilità delle sue leggi con le osservazioni entro gli errori. L'impossibilità di una misura con piccoli margini di errore non significa che la fisica non sia applicabile o che le leggi fisiche lì non valgano. D'altronde accade che il progresso tecnologico permetta di compiere misure laddove era in passato impossibile farlo: e finora ogni volta che è successo si è riusciti ad applicare la fisica sviluppata nel «piccolo mondo» del laboratorio.

Cartwright critica il nome stesso di «leggi» della fisica, e su questo posso essere d'accordo: legge è un nome improprio, usato per convenzione. Ma sostituirlo, come suggerisce l'autrice, con «poteri» (riprendendolo dagli Scolastici), dicendo ad esempio che «la Terra ha il potere gravitazionale», anziché «la Terra esercita una forza gravitazionale», non mi sembra costituire un cambiamento radicale, ma naturalmente chi leggerà le pagine del libro dedicate all'argomento potrà farsi la propria opinione.

L'autrice se la prende inoltre con «la filosofia meccanicista» e la concezione dell'«universo a orologeria»: a dire il vero queste sono visioni del mondo appartenenti al passato, ben prima della profonda rivoluzione della teoria dei quanti (d'altronde un universo meccanico non potrebbe generare la complessità che vediamo intorno a noi).

Oltre a sostenere la pari dignità di tutte le scienze (su cui ovviamente concordo) l'autrice contesta anche l'idea che quanto avviene nell'universo ed è descritto dalla chimica e dalla biologia derivi in ultima analisi dalle leggi della fisica, il che implicherebbe un suo primato sulle altre scienze. D'accordo, certi fisici teorici parlando della loro materia possono essere arroganti e semplicistici, ma il fatto che la fisica costituisca la base dell'edificio scientifico mi sembra innegabile e altrettanto innegabile l'importanza e la necessità delle altre scienze. Noto per inciso che mi pare fuorviante la figura di pagina 15, dove, volendo mostrare la visione (criticata e contestata dall'autrice) della fisica regina delle scienze, la fisica appare in cima a una piramide: in quella visione, in realtà, la fisica sta alla base, anche se la complessità dell'edificio via via aumenta: decisamente la piramide non è una rappresentazione adatta.

A me piace invece considerare l'aspetto fondamentale della fisica da un punto di vista «storico»: Dopo i primi istanti e durante i primi 380.000 anni

dopo il Big Bang l'universo era riempito da un plasma dove circolavano elettroni e protoni, e i fotoni venivano continuamente emessi e riassorbiti. A quell'epoca non c'erano stelle, pianeti, molecole o forme di vita: per studiare quelle condizioni primordiali, relativamente semplici, possiamo solo applicare la fisica, non la chimica o la biologia. Eppure, a partire da quelle condizioni, si è sviluppato l'universo complesso che osserviamo e studiamo. L'aspetto affascinante del riduzionismo, che a me sembra sfugga all'autrice, è che, date le proprietà delle leggi fisiche fondamentali, si sono sviluppate nell'universo nuove condizioni e una straordinaria varietà di nuovi meravigliosi e complessi fenomeni, tra i quali la vita, per descrivere i quali le leggi fondamentali stesse divengono inutili e bisogna ricorrere ad altre scienze (chimica, biologia, ecc.).

L'ostilità di Cartwright nei confronti del riduzionismo deriva, credo, anche dal fatto che porta al determinismo e sembra negare il libero arbitrio: «Ci viene detto che, secondo la scienza contemporanea, la natura è imperiosa e inflessibile, governata da leggi immutabili. D'altra parte, ci viene anche detto che, se riusciamo a scoprire queste leggi, possiamo dominare la natura e far sì che gli eventi vadano nel modo che desideriamo. Questo assunto mostra una palese incoerenza. Se davvero il futuro è inesorabilmente determinato fin dall'inizio, allora né la scienza né altro possono insegnarci come cambiarlo».

Si può criticare il determinismo e sostenere il libero arbitrio, ma questa accusa di incoerenza è palesemente fallace. Nell'universo noi siamo parte della sequenza degli eventi, e se vogliamo ottenere qualcosa dobbiamo agire per farlo. Se agiamo e otteniamo ciò che vogliamo, significa che la sequenza di eventi che include la nostra volontà e le condizioni dell'ambiente che ci circonda avrebbero portato a quel risultato. Noi non possiamo saperlo a priori, e per noi, dal nostro punto di vista, il libero arbitrio esiste (in questo concordo con Rovelli, si veda la recensione qui sotto).

In conclusione, credo che il libro sia utile e stimolante nel mettere in discussione certe semplificazioni della pratica scientifica che si riscontrano nella divulgazione e certe affermazioni perentorie e arroganti di alcuni fisici teorici. Che si condividano o meno le tesi di Nancy Cartwright e il suo poetico universo screziato, siamo spinti a riflettere su tematiche importanti e a rivedere in modo critico la nostra immagine della scienza.

ALBERTO CAPPI

Nancy Cartwright è una filosofa statunitense con una duplice formazione, scientifica (laurea in matematica) e umanistica (dottorato in filosofia). Attualmente insegna alla University of California di San Diego e alla Durham University in Inghilterra. Si occupa del rapporto tra scienza, società e politica.

★

Sull'eguaglianza di tutte le cose

Lezioni americane

Carlo Rovelli

Adelphi (Piccola Biblioteca), 2025

Copertina flessibile, pp. 214, € 15,00

ISBN 9788845940293

www.adelphi.it

In questo nuovo libro, che segue il suo *Buchi Bianchi* (si veda «GdA», 3, 2023, p. 68), Rovelli espone in maniera sistematica la sua visione della scienza e della conoscenza umana. Nella prefazione ci spiega che il libro è nato dalle sue lezioni tenute su invito dell'università di Princeton presso il Dipartimento di Filosofia, e si rivolge «ai miei lettori che non hanno conoscenze tecniche e sono curiosi di comprendere cosa comporti la scienza moderna per le domande filosofiche di sempre. Ma ancor più a filosofi e scienziati interessati alle implicazioni concettuali di gravità e quanti presi assieme». Ecco, credo che l'«ancor più» sia importante. Per quanto la prosa di Rovelli sia sempre semplice e fatta di frasi brevi, gli argomenti che tratta non sono tra i più facili. Non mi sento in grado di valutare quale possa essere la reale comprensione da parte di un lettore privo di conoscenze sulla fisica moderna (spero non sia quella che risulta dalla divertente imitazione di Crozza, ma temo che in parte rifletta la realtà).

Il libro è suddiviso in sei «lezioni» più un'appendice. In queste lezioni Rovelli progressivamente mostra la corrispondenza fra la struttura relazionale della meccanica quantistica, della conoscenza e dello spaziotempo e la dipendenza della descrizione fisica dall'osservatore.

Nella prima lezione Rovelli introduce l'interpretazione relazionale della meccanica quantistica. E fin dall'inizio quelli che lui chiama «i metafisici di Princeton» non fanno una gran bella figura: oltre ad essere in totale disaccordo con loro, Rovelli lancia frecciate e qualche volta li ridicolizza (se leggeranno il suo libro, mi chiedo se lo inviteranno nuovamente). Ad esempio, racconta di un giovane brillante del Dipartimento di Filosofia che gli detto di essere convinto che ci debba pur essere «un senso assoluto in cui una cosa si muova o stia ferma». E sulla relatività del moto, in una nota, Rovelli afferma di non aver osato mettere alla prova i professori.

Per l'autore la meccanica quantistica descrive l'informazione che i sistemi fisici hanno l'uno dell'altro, ma nella seconda lezione osserva che analogamente la conoscenza è una correlazione fra parti concrete del mondo fisico. Nota «la somiglianza fra la struttura relazionale dei fenomeni quantistici e la struttura relazionale della natura fisica della conoscenza» e osserva che la conoscenza sarebbe «un caso particolare della struttura generale del mondo fisico: informazione relativa fra sistemi». Sottolinea anche l'assenza di certezze assolute, e narra la storiella suggestiva del filosofo cinese Zhuangzi che sogna di essere una farfalla.

Nella terza lezione Rovelli affronta lo spaziotempo. Prima ci spiega che «lo spazio è una relazione di adiacenza fra entità». Non c'è un «dove?» né un «quando?», se non in senso relativo, così come nei quanti non c'è un «come?» se non in senso relativo. Ma le proprietà di un sistema sono il modo in cui il sistema agisce su un altro, e «c'è una evidente connessione fra contiguità e interazione: A e B possono interagire solo se sono contigui ('località')». Una regione dello spaziotempo è un processo quantistico, e un processo quantistico che includa la gravità è una regione dello spaziotempo.

La quarta lezione riguarda il tempo e il libero arbitrio. Devo dire che finalmente viene affrontato il libero arbitrio non con la rozza certezza abituale di molti fisici che si limitano a dichiarare la sua non esistenza. Rovelli ci offre una visione più fine, che si riassume nella sua affermazione «Il futuro è veramente aperto. Per noi».

Nella quinta lezione Rovelli spiega come possiamo pensare oggi la natura. Ma fa anche i conti con il relativismo della morale (neanche qui i metafisici di Princeton, con il loro «realismo morale assoluto», fanno una gran bella figura).

Nella sesta lezione vengono «tirate le fila» del discorso e si affronta il problema della mente. È la parte dove a me pare che l'analisi sia meno convincente. Rovelli ritiene che anche se non tutto si può spiegare, tutto fa parte del mondo fisico e afferma di aderire al fisicalismo. Il problema è come (e se) si può passare dalla spiegazione del cervello alla spiegazione della mente: David Chalmers l'ha battezzato *l'hard problem*, che a me piace tradurre, per assonanza e un po' scherzosamente, «l'arduo problema», anche se in italiano è noto come «il problema difficile». È un problema che ha fatto e fa discutere molti filosofi e scienziati ma che, per Rovelli, è tutt'altro che difficile: «basta rendersi conto che è un falso problema, causato dal prendere per una distinzione metafisica quella che è solo una differenza di linguaggio nel descrivere le cose». E ancora: «La fonte della confusione è il passo iniziale: trattare a priori la conoscenza, e la coscienza, come qualcosa di intrinsecamente non-fisico. Questo è l'errore che impedisce la serena chiusura del cerchio tra la nostra epistemologia e la nostra ontologia. [...] Ma attenzione, il punto che sto sottolineando non è che la prospettiva soggettiva possa essere ridotta a una comprensione oggettiva. È il contrario: qualsiasi resoconto è prospettico, perché non c'è conoscenza che non sia incorporata nella natura. Pertanto, qualsiasi pretesa oggettività nella conoscenza è in ultima analisi altrettanto soggettiva quanto qualsiasi soggettività». Il bel discorso continua, seguendo quelle che ritengo siano però divagazioni. Eppure il problema che Rovelli non vuole riconoscere come tale può essere posto in termini molto semplici: in che modo una rete neurale in cui si trasmettono impulsi elettrici (il nostro cervello), produce una mente, ovvero un'esperienza soggettiva? Con le nostre teorie scientifiche possiamo discutere gli impulsi elettrici,

le reti neurali, e stabilire una correlazione fra configurazioni cerebrali e stati mentali: ma attraverso quale teoria possiamo spiegare la percezione dei colori, dei suoni, per non parlare della coscienza? Il problema non è soltanto teorico, ma ha risvolti etici e pratici: facciamo fatica a determinare quali animali possiamo considerare dotati di una coscienza di sé, ed è prevedibile che un giorno non lontano ci ritroveremo con lo stesso problema di fronte all'intelligenza artificiale. Rovelli afferma che «La comprensione dei fenomeni mentali fa rapidi progressi, ma è ancora in alto mare»; in realtà le neuroscienze fanno rapidi progressi nel mappare la corrispondenza fra attività cerebrale e stato mentale, ma non dicono nulla su come la prima produce il secondo. Penso che il rifiuto di Rovelli e di altri scienziati di riconoscere l'esistenza del problema derivi in realtà dal timore che si lasci spazio a discorsi metafisici e spiritualisti.

Nell'appendice che chiude il volume, Rovelli si lascia andare ad alcune riflessioni sul modo di procedere attuale della fisica fondamentale. Non vi è dubbio che le aspettative della teoria delle superstringhe sono state disattese. Dal CERN, oltre allo straordinario successo del bosone di Higgs, non è venuta alcuna indicazione di Supersimmetria o nuove particelle, e Rovelli, che ha sempre sostenuto la teoria della gravità a *loop* (e qui credo si tolga qualche sassolino dalla scarpa...), attribuisce questo insuccesso all'influsso sugli scienziati di una interpretazione superficiale dei paradigmi di Kuhn e della falsificabilità di Popper, che avrebbero in qualche modo giustificato l'esplosione di articoli su teorie e modelli fantasiosi.

A questa considerazione aggiungerei anche la necessità di pubblicare ad ogni costo, data la mania di "misurare" la ricerca con indicatori quantitativi che poco hanno a che vedere con la qualità.

Sull'eguaglianza di tutte le cose è senz'altro il libro più filosofico di Rovelli, dove sono riprese in modo sistematico tematiche che ha già trattato in precedenza. La sua visione di un universo dove non è possibile definire un'unica realtà, e dove le proprietà delle cose sono definite dalle relazioni che hanno con le altre cose è indubbiamente affascinante e si adatta bene a quanto la fisica fondamentale ci ha rivelato. Rovelli non manca anche di sottolineare la vicinanza di questa visione con alcuni filoni di pensiero orientale, in particolare il buddhismo (come già nel suo libro sulla meccanica quantistica *Helgoland*, viene citato il filosofo Nāgārjuna). Ci si può chiedere se questa visione possa permettere di affrontare in modo più efficace l'indagine scientifica sul mondo che ci circonda. Probabilmente è opportuno che ogni ricercatore adotti l'approccio che gli sembra più opportuno: si vedrà alla fine quale avrà successo e saprà aprirci nuove strade.

ALBERTO CAPPI

Carlo Rovelli è fisico teorico e responsabile dell'*Équipe de Gravité Quantique* del *Centre de Physique Théorique* dell'Università di Aix-Marseille. È membro dell'*Institut Universitaire de France* e dell'*Académie Internationale de Philosophie des Sciences*. È autore di *Sette brevi lezioni di fisica* (2014), *L'ordine del tempo* (2017), *Helgoland* (2020), *Relatività Generale* (2023), *Buchi bianchi* (2023), tutti pubblicati da Adelphi.

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.

Gli Incontri del «Giornale di Astronomia»

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

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

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

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

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

2023

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

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

2024

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

2025

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

2026

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

- 26 febbraio: da definire
26 marzo con CRISTINA PUZZARINI: *La chimica tra le stelle. Come spettroscopia e meccanica quantistica ci raccontano il mezzo interstellare.*

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

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 30.000-40.000 battute, spazi, note, bibliografia, didascalie e nota biografica 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 o jpg, a buona risoluzione (min. 300 dpi, base 11 cm; 17 cm nel caso di immagini a giustezza piena) e correttamente numerate. Le didascalie devono essere inserite alla fine dell'articolo con il numero di riferimento all'immagine (p.e.: FIG. 1.). I *credits* 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. Si prega di allegare al manoscritto l'indirizzo postale cui si desidera ricevere le copie cartacee. 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® 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® 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, 2009² (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

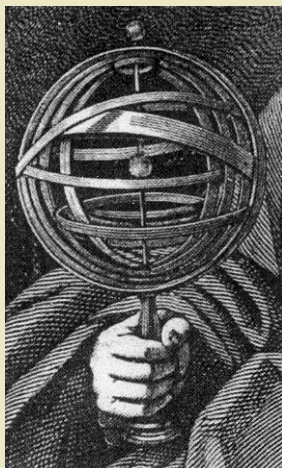
Composto, in carattere Serra Dante, dalla Fabrizio Serra · Editore®, Pisa · Roma.
Stampato e rilegato nella Tipografia di Agnano, Agnano Pisano (Pisa).

★

Novembre 2024

(CZ2/FG21)





Società Astronomica Italiana

Con il patrocinio della
Camera dei Deputati

ISSN 0390-1106
ISSN ELETTRONICO 1724-0468