

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. 51° · N. 4 · Dicembre 2025



Fabrizio Serra · Editore
Pisa · Roma

Giornale di Astronomia, 2025, 4

Sommario

Astronomia oggi

- 2 Simulazioni di evoluzione galattica con polvere
M. PARENTE (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2025)
- 8 Impatto dei nuclei galattici attivi sul gas molecolare:
una prospettiva radiativa e cinetica
F. ESPOSITO (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2025:
menzione speciale)

Storia

- 16 Il pianeta Marte osservato da lontano e fotografato
da presso (1966)
G. HORN D'ARTURO (1879-1967)

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

- 19 L'archivio ritrovato di Emilio Bianchi:
un astronomo tra scienza e memoria
R. DANIZI

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

- 24 Cavitazione, ebollizione e volo aereo
A. D'ERCOLE

Biblioteca (a cura di A. Cappi)

- 31 M. BARSUGLIA, *La rivoluzione delle onde gravitazio-
nali* (recens. di A. Cappi)
- 32 L. NARDI, *Pianeti mancanti. Da Plutone a Planet Nine,
gli astri erranti nell'oscurità* (recens. di M. Bellaz-
zini)
- 32 E. PEROZZI, *Spazzini spaziali. Per un futuro sostenibile
dello spazio* (recens. di G. M. Stirpe)
- 33 R. TROTTA, *Il cielo stellato sopra di noi. Storia dell'uma-
nità senza gli astri* (recens. di A. Cappi)

36 **Gli Incontri del «Giornale di Astronomia»**

37 **Indici del volume 51 · 2025**

38 **Indice degli autori**

In copertina

Sessant'anni dalle prime immagini ravvicinate di Marte, riprese
dalla sonda *Mariner 4* nel 1965. Su una mappa del pianeta sono
mostrati il passaggio radente della sonda e i siti delle 22 immagini
riprese con la fotocamera elettronica dallo *spacecraft*. In alto, la
prima foto del 15 luglio 1965, la cui trasmissione a Terra impiegò
quasi sei ore. Mostra un'area di circa 330×1200 km. (crediti: NASA /
JPL Caltech) [Si veda all'interno l'articolo di Guido Horn d'Arturo
del 1966]

Simulazioni di evoluzione galattica con polvere★

Massimiliano Parente

Department of Astronomy · University of Florida · Bryant Space Science Center, USA

SEBBENE la frazione di materia luminosa che popola il nostro universo sia molto bassa (meno del 5%), è da essa che riusciamo a trarre la maggior parte delle informazioni su ciò che ci circonda. L'osservazione di questa materia – fondamentalmente gas e stelle – è dunque cruciale per l'astronomia e, in particolare, per l'astronomia extra-galattica, la quale si occupa dello studio delle galassie diverse dalla nostra Via Lattea. Lo sviluppo di questa branca risale circa a un secolo fa, quando fu riconosciuta la natura extra-galattica di alcuni oggetti celesti fino ad allora creduti delle *nebulae* situate nella Via Lattea. Il momento di svolta è rappresentato dagli studi di Edwin Hubble sulle stelle cefeidi all'interno di questi oggetti e il conseguente calcolo della distanza che sancì definitivamente la natura extra-galattica di alcune *nebulae*. Un celebre caso è la galassia di Andromeda, la "sorella" della nostra Galassia nel gruppo locale, precedentemente denominata *Andromeda Nebula* come si può ancora riscontrare in alcuni atlanti stellari ad uso osservativo e amatoriale.

Da quel momento l'astronomia extra-galattica è stata oggetto di uno sviluppo florido, che l'ha resa oggi una branca che coinvolge un gran numero di studiosi con diversi interessi, dalla cosmologia alla fisica fondamentale. La natura "intermedia" delle galassie – che si posizionano idealmente a metà tra la cosmologia a larga scala e la fisica di buchi neri, stelle e mezzo interstellare – rende infatti questo argomento allo stesso tempo affascinante, interessante e complesso.

Questo ha spinto la comunità scientifica a investire negli anni importanti risorse nello sviluppo di telescopi, sia terrestri che spaziali, che potessero osservare sempre più galassie e con più dettaglio, per costruire, e possibilmente interpretare, quello che è il puzzle dell'evoluzione dell'universo. Oggi abbiamo a disposizione strumenti dalle caratteristiche diverse e complementari tra loro che ci consentono di studiare galassie risalenti a quando l'universo era giovanissimo. In questo contesto, è chiarissimo come interpretare l'osservazione delle galassie sia cruciale.

Polvere nelle galassie: perché studiarla?

Le galassie che popolano il nostro universo hanno caratteristiche diverse, come la massa di gas o di

stelle oppure il tasso e la storia di formazione stellare o la composizione chimica del mezzo interstellare. Queste sono solo alcune delle caratteristiche principali che determinano lo spettro elettromagnetico di una galassia (SED; dall'inglese *Spectral Energy Distribution*), che rappresenta la principale fonte di informazione a nostra disposizione. Nel più semplice dei casi (tralasciando i nuclei galattici attivi, AGN), questo spettro è il contributo di varie componenti, essenzialmente stelle, gas e grani di polvere. Questi ultimi in particolare hanno un ruolo fondamentale nell'interpretazione delle osservazioni: senza tenerne conto arriveremmo a conclusioni estremamente sbagliate.

I grani di polvere sono piccole particelle solide, dal raggio dell'ordine di angstrom ($1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm}$) fino a decimi di micron, che sono composti da quegli elementi chimici più pesanti di idrogeno ed elio che gli astronomi, per semplificazione, chiamano "metalli" (principalmente C, O, Mg, Si, Fe) e che popolano il mezzo interstellare di molte galassie nell'universo. La loro esistenza fu notata per la prima volta circa un secolo fa, quando TRUMPLER (1930) associò l'assorbimento dell'emissione stellare nella nostra Galassia a «sottili particelle cosmiche di polvere di varia dimensione». I grani infatti sono in grado di assorbire la radiazione emessa da stelle e AGN nell'ottico e nell'ultravioletto, oscurando di fatto la galassia a queste lunghezze d'onda. Questa radiazione assorbita contribuisce al riscaldamento dei grani, che ri-emettono l'energia a lunghezza d'onda maggiori, tipiche dell'infrarosso.

L'esistenza della polvere all'interno delle galassie stravolge dunque il modo in cui queste appaiono ai nostri telescopi: si tratta di un vero e proprio ri-processamento dell'energia emessa da stelle e AGN.

Sebbene questo sia il ruolo più celebre dei grani di polvere, il loro contributo nell'evoluzione della galassie stesse è altrettanto importante. Ci sono infatti diversi processi fisici particolarmente rilevanti a livello galattico in cui la polvere gioca un ruolo determinante ed è dunque appropriato tenerne conto nei modelli teorici di evoluzione galattica. Tra questi ci sono il raffreddamento del mezzo interstellare per emissione termica, la formazione delle molecole (come l'idrogeno molecolare H_2) sulla superficie dei grani, oppure la stimolazione di venti galattici per pressione di radiazione sui grani stessi.

Per riassumere, i grani di polvere sono una componente fondamentale delle nostre galassie, benché costituiscano una minima parte del mezzo interstellare – tipicamente meno dell'1% della massa.

* L'Autore presenta qui i contenuti essenziali delle ricerche svolte nel corso del Dottorato di Ricerca che gli sono valse il "Premio Pietro Tacchini" della SAI per l'anno 2025-xx edizione; premio assegnato alle migliori tesi di Dottorato di carattere astrofisico.

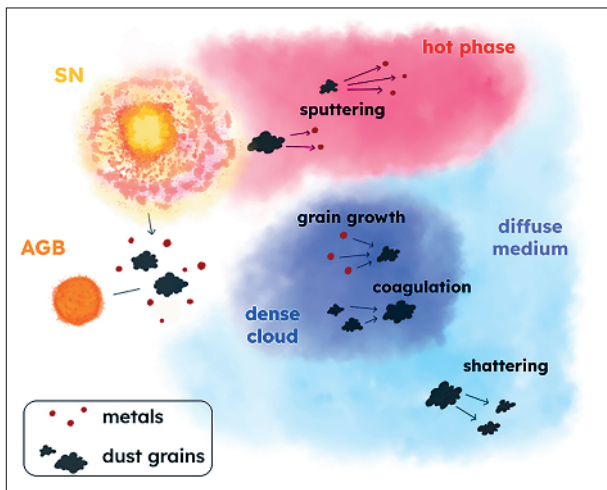


FIG. 1. Rappresentazione artistica dei processi principali che interessano i grani di polvere in un contesto di evoluzione galattica.

Includerli nei modelli teorici e interpretativi di evoluzione galattica è un compito obbligatorio dell'astronomia extra-galattica moderna.

Il ciclo di vita dei grani di polvere nell'universo

La formazione ed evoluzione della polvere nelle galassie è il primo processo da considerare per studiarne gli effetti sull'evoluzione e osservabilità delle stesse. Una rappresentazione artistica dei principali processi che interessano i grani è presentata in FIG. 1. Il primo passo è la produzione dei grani in alcune fasi dell'evoluzione stellare. Ambienti favorevoli per la condensazione di metalli in grani di polvere sono i venti delle stelle durante la fase del ramo asintotico delle giganti, oppure gli *ejecta* delle supernovae. Queste sorgenti arricchiscono il mezzo interstellare circostante con metalli in fase gassosa e grani polvere, decretando l'inizio del ciclo di vita della polvere. Una volta presenti nel mezzo interstellare, in base alle condizioni fisiche e termodinamiche dello stesso, i grani possono evolvere in quantità, massa e proprietà. Ad esempio, nelle fredde e dense nubi molecolari, i metalli presenti in fase gassosa possono attaccarsi sui grani, accrescendone la massa (processo spesso noto con il nome di *grain growth*). Sempre grazie alle elevate densità e alle basse velocità relative, in questi ambienti il processo di *coagulazione* dei grani è favorito, grazie al quale grani piccoli tendono a fondersi formando strutture più grandi. Al contrario, nel mezzo diffuso – tipicamente più caldo e con densità inferiori – le collisioni tra i grani possono portare alla frammentazione (*shattering*) degli stessi, riducendone quindi le dimensioni.

Infine, in condizioni estreme i grani di polvere possono essere distrutti. Ciò si verifica nelle fasi più calde del mezzo interstellare, dove le temperature superano le centinaia di migliaia di gradi kelvin, oppure negli *shock* causati dalle esplosioni di supernovae. In questi casi i grani vengono erosi (*sputtering*) perdendo massa e i metalli che li compongono vengono restituiti alla fase gassosa. In un sistema galattico, tutti questi processi co-esistono e la loro relativa importanza è determinata dalle caratteristiche della galassia stessa, principalmente dal tasso e dalla storia di formazione stellare, la composizione chimica e le proprietà termodinamiche del mezzo interstellare. Il modo migliore per studiare la formazione e l'evoluzione della polvere nelle galassie è quindi implementare una trattazione – seppur approssimata – di questi processi all'interno dei modelli di evoluzione galattica.

La polvere nelle simulazioni di evoluzione galattica

Come anticipato, lo studio della formazione e dell'evoluzione delle galassie è un tassello fondamentale dell'astrofisica e cosmologia moderne (MO, VAN DEN BOSCH, WHITE 2010; CIMATTI, FRATERALI, NIPOTI 2019). Se però da un lato la loro posizione a metà strada tra lo studio della larga scala dell'universo e la microfisica del mezzo interstellare le rende oggetti estremamente interessanti, da un altro punto di vista questo costituisce una sfida enorme per i nostri modelli teorici. La FIG. 2 esprime questo concetto con un'illustrazione dove vengono raffigurati alcuni dei processi più rilevanti per l'evoluzione galattica. Molti di essi sono ancora poco conosciuti (si pensi alla fisica dei buchi neri) e inoltre coprono un *range* di scale spaziali, temporali ed energetiche enorme. Nell'astrofisica moderna si cerca di far fronte a questi problemi attraverso simulazioni numeriche, le quali seguono esplicitamente i processi al di sopra di una certa scala e utilizzano approssimazioni fisicamente ragionevoli per i processi sotto-risoluzione.

Due tipi di simulazioni utilizzate comunemente nell'evoluzione galattica sono i modelli semi-analitici e le simulazioni idrodinamiche. I primi hanno

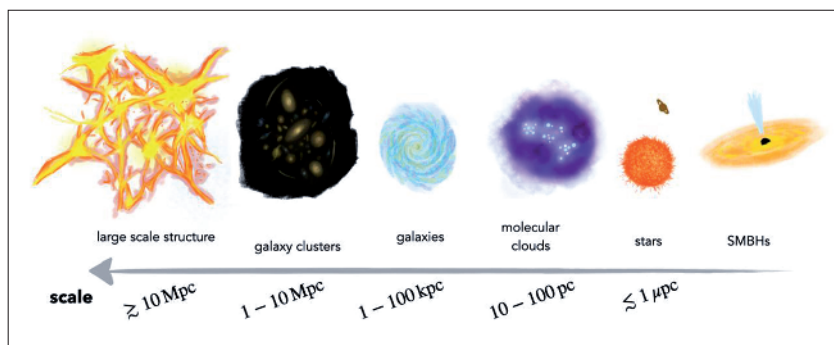


FIG. 2. Raffigurazione del vasto intervallo di scale spaziali rilevanti per l'evoluzione galattica.

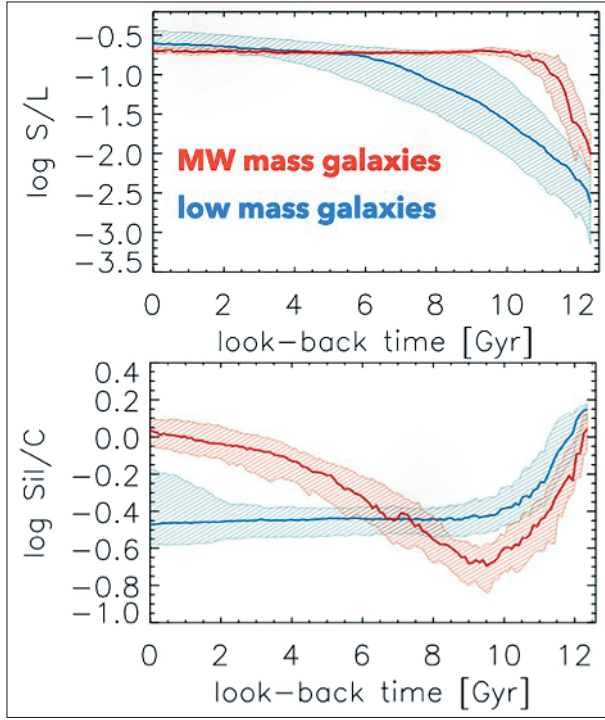


FIG. 3. Evoluzione delle proprietà della polvere per galassie con massa simile a quella della Via Lattea (rosso) e galassie meno massicce (blu). Il pannello superiore mostra l'evoluzione del rapporto di masse tra grani piccoli e grandi (*small/large*), mentre il pannello inferiore indica l'evoluzione del rapporto tra grani silicati e carbonacei. Il look-back time pari a 0 Gyr corrisponde a oggi.

una risoluzione inferiore, e partono da *merger trees* di aloni di materia oscura (eventualmente ottenuti da simulazioni numeriche) ai quali associano delle ricette per la fisica barionica, ovvero la fisica che interessa il gas e le stelle (ad esempio raffreddamento del gas, formazione stellare, *feedback* energetico e arricchimento chimico). Le simulazioni idrodinamiche sono invece più dettagliate, riuscendo a trattare l'idrodinamica del gas e risolvere ogni galassia in molte piccole regioni, ovviamente con uno sforzo computazionale maggiore.

Questi due metodi, entrambi utilizzati nel mio lavoro, seppur tecnicamente diversi, hanno in comune la filosofia di trattare, mediante approssimazioni, i processi sotto una certa risoluzione. La formazione e l'evoluzione dei grani di polvere è uno di questi. La strategia tipicamente utilizzata è quella di modellare i vari processi introducendo una dipendenza dalle proprietà più o meno risolte delle galassie. Le metodologie più diffuse in letteratura sono le seguenti:

- Produzione stellare: i grani di polvere prodotti dalle stelle rappresentano una frazione dei metalli rilasciati da stelle del ramo asintotico delle giganti e supernovae, oppure vengono utilizzati dettagliati calcoli di condensazione dei grani.
- *Grain growth*: questo processo è favorito da alte densità e alte metallicità, dunque il tempo scala è $\tau_{\text{gg}} \propto n^{-1} T^{-1/2} Z^{-1}$, ed è più efficiente per i grani di piccole dimensioni. Dal momento che queste regioni, tipicamente nubi molecolari, sono fuori dalla portata di simulazioni co-

smologiche, alcune quantità come densità e temperatura vengono assunte oppure derivate da altre quantità risolte.

- Distruzione in *shock* di supernovae: questo processo è più efficiente in presenza di tassi di esplosione di supernovae più alti (o equivalentemente, *rates* di formazione stellare più alta, $\tau_{\text{SNdes}} \propto \text{SFR}^{-1}$). Questa è una quantità che viene tipicamente predetta dalle simulazioni.
- *Sputtering*: questo processo dipende dalla temperatura $\tau_{\text{spu}} = \frac{1}{n}(T^{-\omega} + 1)$ ed è più efficiente per grani di piccole dimensioni. La temperatura, in particolare per $T > 10^4$ K, è una quantità termodinamica spesso predetta dalle simulazioni, dunque includere lo *sputtering* è banale.
- *Coagulation* e *shattering*: questi due processi sono responsabili delle dimensioni dei grani e sono attivi rispettivamente nella fase densa e diffusa del mezzo interstellare. Questa è una divisione che spesso esiste nelle simulazioni per distinguere le zone dense, capaci di ospitare formazione stellare, dal resto del mezzo.

Sebbene questi siano gli elementi comuni nella modellizzazione della polvere all'interno delle simulazioni di evoluzione galattica, la loro implementazione varia ampiamente tra i diversi studi presenti in letteratura, spesso adattandosi alle specifiche caratteristiche delle simulazioni adottate. I primi tentativi di questo tipo risalgono agli anni Ottanta, con modelli analitici pionieristici sviluppati per studiare la chimica della Via Lattea (ad esempio DWEK, SCALO 1980). Pur nella loro semplicità, questi approcci hanno posto le basi per lo sviluppo di modelli più sofisticati, successivamente integrati in simulazioni semi-analitiche e idrodinamiche. Nell'ultima decade si è assistito a un'accelerazione significativa in questo ambito: attualmente, circa una decina di gruppi di ricerca nel mondo è in grado di realizzare simulazioni di evoluzione galattica che includano un trattamento esplicito della componente di polvere.

Il modello di polvere adoperato e maneggiato nel mio lavoro di tesi prende origine dai lavori di GJERGO *et al.* (2018) e GRANATO *et al.* (2021). È uno dei pochi modelli esistenti capace di seguire sia la composizione chimica sia la dimensione dei grani, seppur con notevoli approssimazioni: vengono considerate due composizioni chimiche (grani carbonacei e silicati) e due dimensioni (grani piccoli e grani grandi, rispettivamente 0,005 e 0,05 μm). Il modello considera tutti i processi sopra menzionati ed è nato nel contesto di simulazioni idrodinamiche, poi successivamente esteso in simulazioni semi-analitiche. I risultati chiave del mio lavoro di tesi – di seguito brevemente presentati – riguardano vari aspetti della polvere galattica: proprietà, abbondanza e distribuzione, emissione nella banda infrarossa.

Le proprietà della polvere

I grani di polvere non sono tutti uguali, sia per dimensione sia per composizioni chimica: ci sono

grani più piccoli e grani più grandi, grani composti principalmente da carbonio, oppure silicio, o ancora ferro. Queste caratteristiche sono importanti dal momento che il riprocessamento dei fotoni dipende da esse. Ad esempio, grani più piccoli assorbono e “scatterano” preferibilmente fotoni a frequenze maggiori, mentre l’emissione termica dipende sia dalla temperatura dei grani (fortemente dipendente dalla dimensione) che dalla proprietà chimiche.

In PARENTE *et al.* (2022) abbiamo utilizzato simulazioni idrodinamiche per studiare varie caratteristiche di un volume cosmologico legate alla polvere nelle galassie, tra cui dimensione e composizione chimica. Un risultato chiave e originale è stato scoprire che queste proprietà evolvono con l’evoluzione della galassia stessa, a causa dei vari processi di evoluzione della polvere inclusi nel modello. Questa evoluzione è illustrata in FIG. 3 per galassie di massa simile alla nostra Via Lattea e galassie meno massicce. Per quanto riguarda la dimensione dei grani, inizialmente la produzione stellare favorisce i grani di grandi dimensioni, mentre in seguito il *grain growth* nel mezzo interstellare – più rapido nelle galassie più massicce dove le regioni dense sono di più – favorisce principalmente i grani piccoli. In maniera simile, le SNe sono le prime sorgenti di grani, tipicamente silicati, mentre le AGB – su tempi scala più lunghi – producono principalmente grani composti da carbonio. Di nuovo, il *grain growth* nel mezzo interstellare è più efficiente per silicati, da cui la crescita del rapporto Sil/C nelle galassie più massicce.

Nell’interpretazione delle osservazioni, è dunque bene tenere a mente che le proprietà dei grani di polvere possono variare da galassia a galassia e, in particolare, nelle galassie primordiali che si trovano in fasi evolutive molto diverse dalla nostra Via Lattea, spesso presa come riferimento in questo tipo di studi.

Abbondanza e distribuzione della polvere

Quanta polvere c’è nel nostro universo? Come è distribuita? L’abbondanza di polvere nelle galassie, spesso indicata come $\Omega_{\text{dust}}^{\text{ISM}}$, è stata oggetto di numerosi studi, sia osservativi che teorici. Le osservazioni, principalmente basate sui dati del telescopio spaziale Herschel operante nel lontano infrarosso, suggeriscono un andamento con il *redshift* come quello indicato dalla regione gialla nella FIG. 4. La caratteristica degna di nota è che la quantità di polvere sembra diminuire da *redshift* $z = 1$ a oggi, $z = 0$. In altre parole, a $z = 1$, circa 8 miliardi di anni fa, c’era più polvere rispetto a oggi. Questo fatto, già di per sé interessante, è ancora più degno di nota considerando che molte delle simulazioni attuali non riescono a spiegare questo andamento e questa diminuzione. In PARENTE *et al.* (2023) abbiamo studiato il problema con un modello semi-analiti-

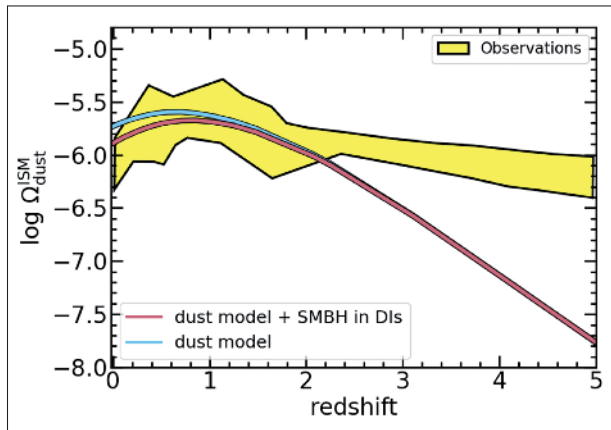


FIG. 4. Evoluzione dell’abbondanza di polvere galattica nell’universo in funzione del *redshift*. La regione gialla indica risultati ottenuti osservativamente. La linea blu indica i risultati della simulazione equipaggiata con il trattamento dell’evoluzione della polvere, mentre il modello indicato dalla linea rossa include anche il trattamento per la crescita dei buchi neri supermassicci durante instabilità di disco.

co, ritrovando una diminuzione negli ultimi 8 miliardi di anni simile a quanto osservato (linea rossa in figura). Il risultato chiave è che questa diminuzione non è affatto dovuta (solo) al modello di polvere in sé, bensì a un nuovo ingrediente utilizzato nella simulazione di evoluzione galattica: la crescita dei buchi neri super-massicci a causa delle instabilità di disco. Brevemente, questo processo prevede che galassie i cui dischi gassosi siano instabili gravitazionalmente possano contribuire alla crescita del buco nero super massiccio al loro centro, il quale è responsabile del *quenching* della galassia, ovvero della cessazione della formazione stellare. Questo *feedback*, ovvero trasferimento di energia dal buco nero al gas circostante, è in grado di rendere la galassia più povera di gas freddo e conseguentemente di polvere, dunque più in accordo con le osservazioni locali ($z \approx 0$).

Un altro risultato chiave ottenuto dalla simulazione riguarda il contributo dei vari processi che interessano l’evoluzione della massa di polvere. Sebbene la produzione dei grani da parte di sorgenti stellari sia il primo passo del ciclo di vita della polvere, la maggior parte della polvere presente nell’universo sin da tempi primordiali (circa 12 miliardi di anni fa) è formata per accrescimento dei grani nel mezzo interstellare. Per quanto riguarda invece la distruzione dei grani che determina la decrescita osservata negli ultimi 8 miliardi di anni, i vari processi di distruzione negli *shock* di supernovae, l’espulsione da venti galattici e la re-incorporazione in stelle giocano tutti un ruolo rilevante circa allo stesso modo.

Il messaggio fondamentale di questo lavoro è quello di tenere sempre in conto il fatto che simulazioni di evoluzione galattica come queste sono estremamente complesse e dipendono da una moltitudine di fattori spesso difficili da disaccoppiare; dunque, osservazioni e risultati relativi alla polvere

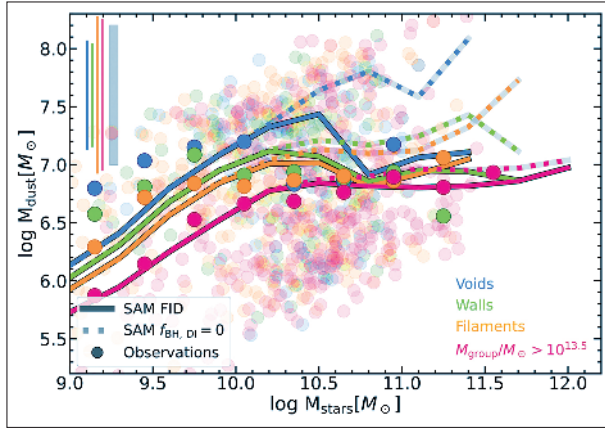


FIG. 5. Relazione tra massa di polvere e massa stellare tra le galassie simulate (linee) e osservate (punti). Le linee tratteggiate si riferiscono a un modello in cui non è incluso l'accrescimento di buchi neri super massicci durante instabilità gravitazionale di disco. I diversi colori si riferiscono a diversi ambienti della struttura a larga scala, cioè vuoti, muri, filamenti e nodi.

non devono essere necessariamente imputati al modello di polvere stesso, ma interpretati in un contesto di più ampio respiro come quello dell'evoluzione galattica.

D'altro canto, visto il grosso numero di processi all'interno delle simulazioni di evoluzione galattica che potrebbero influire su questa quantità, quello individuato in questo lavoro è solo una delle possibilità. Ciononostante, questo modello è risultato anche in grado di spiegare l'abbondanza di polvere in regioni diverse della ragnatela cosmica. Infatti, la struttura a larga scala dell'universo, dove le galassie risiedono, è composta da vari ambienti con diversa densità, che vengono grossomodo distinti in vuoti (bassa densità), muri, filamenti e nodi (alta densità). In PARENTE *et al.* (2024) abbiamo studiato per la prima volta l'abbondanza della polvere in galassie locali che risiedono in diversi ambienti. Il risultato principale – sintetizzato in FIG. 5 – è che, per galassie con massa stellare fino a circa 100 miliardi di masse solari, quelle situate in ambienti più isolati, come i vuoti cosmici, risultano in genere più ricche di polvere, in quanto la loro evoluzione procede più lentamente. Al contrario, in galassie molto massicce non sono presenti differenze tra i vari ambienti a larga scala. Questa è una conseguenza del modello di accrescimento dei buchi neri supermassicci per instabilità gravitazionale di disco: si tratta infatti di un processo indipendente dalle interazioni tra galassie (come i *mergers*) e che quindi agisce in modo analogo in tutti gli ambienti, portando a popolazioni di galassie “quenched” in maniera simile. Queste predizioni sono confermate da un'analisi effettuata con osservazioni reali. La conclusione principale è che la polvere può essere utilizzata come strumento diagnostico di processi fondamentali nell'evoluzione galattica, come la crescita dei buchi neri supermassicci e il ruolo del loro *feedback* nel *quenching* delle galassie.

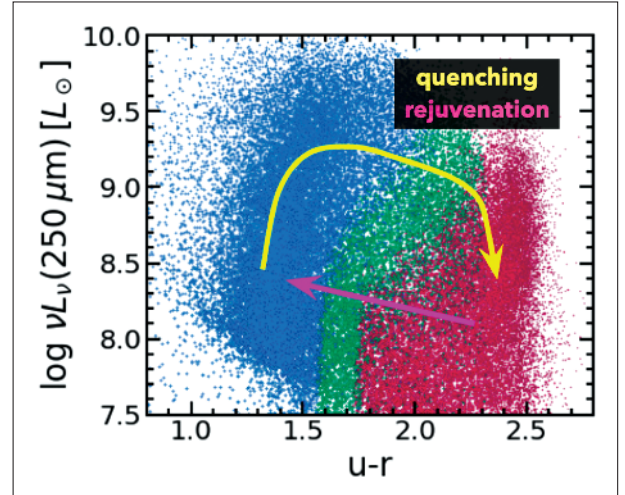


FIG. 6. Evoluzione schematica nel piano colore (asse x) vs luminosità infrarossa dovuta all'emissione della polvere (a $250 \mu\text{m}$; asse y) di galassie in fase di *quenching* (freccia gialla) o *rejuvenation* (freccia rosa). I punti colorati in blu, verde e rosso si riferiscono rispettivamente a galassie in fase di formazione stellare, in transizione e *quenching*.

Emissione della polvere

Oltre a composizione, dimensione e abbondanza, una caratteristica fondamentale della polvere è la sua emissione nell'infrarosso, che permette di osservare e studiare le galassie a queste lunghezze d'onda. Questa emissione può essere usata come strumento diagnostico per indagare lo stato evolutivo delle galassie, che vengono generalmente classificate in sistemi attivi (galassie blu), quiescenti (galassie rosse) e in transizione (cosiddetta “valle verde”). Le galassie nella valle verde possono trovarsi in fase di spegnimento della formazione stellare (*quenching*) o, più raramente, in fase di riattivazione (*rejuvenation*). Distinguere tra questi due scenari è ancora complesso. Tuttavia, grazie al modello sviluppato nella mia tesi, che include un trattamento realistico della polvere e della sua emissione infrarossa, abbiamo mostrato che questa componente dello spettro può essere un efficace discriminante (PARENTE *et al.* 2025). Come mostrato in FIG. 6, le galassie in fase di *quenching* mostrano un'emissione da polvere più intensa rispetto a quelle in ringiovanimento, che non hanno ancora (ri-)accumulato abbastanza polvere. Questo perché la formazione di polvere nelle galassie non è istantanea, ma segue con un certo ritardo la formazione stellare, a causa dell'importanza dell'accrescimento nel mezzo interstellare. In questo caso, è proprio l'emissione da polvere a offrirci nuove chiavi di lettura sull'evoluzione galattica.

Conclusioni e prospettive

Anche se rappresentano solo una piccola parte della massa totale delle galassie, i grani di polvere cosmi-

ca svolgono un ruolo fondamentale nella loro evoluzione e osservabilità. Studiare i processi di formazione e trasformazione dei grani di polvere, nonché il loro impatto sulla radiazione osservata, è divenuto uno degli obiettivi centrali dell'astrofisica moderna, soprattutto mediante simulazioni numeriche di evoluzione galattica.

Questi studi ci permettono di analizzare in dettaglio le proprietà fisiche della polvere, la sua abbondanza e la sua emissione nell'infrarosso, cioè quella parte dello spettro elettromagnetico che spesso ci racconta ciò che la luce visibile non riesce a mostrarci. L'obiettivo finale è usare la polvere come chiave di lettura per comprendere meglio l'evoluzione delle galassie e interpretare correttamente i dati raccolti con gli strumenti a nostra disposizione, presenti e futuri. Si pensi, ad esempio, al radiointerferometro ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*), che ci permette di osservare l'emissione della polvere in galassie risalenti ai primissimi miliardi di anni di vita dell'universo – un'epoca in cui esso risultava già sorprendentemente ricco di polvere. Oppure a possibili missioni future come PRIMA (*PRobe Infrared Mission for Astrophysics*), concepita per integrare le osservazioni di ALMA a lunghezze d'onda minori e fornire nuove informazioni sull'abbondanza e sulle proprietà della polvere a *redshift* intermedi, quando la formazione stellare nell'universo era particolarmente vigorosa.

Il passo successivo è ancora più ambizioso: trattare la polvere non solo come un elemento passivo da studiare, ma come un componente attivo delle simulazioni stesse. I grani di polvere, infatti, intervengono in numerosi processi fondamentali, tra cui il raffreddamento del gas e la formazione delle molecole necessarie all'innesco della formazione stellare. Includere la polvere in modo realistico nei nostri modelli è una sfida già avviata e sarà uno degli sviluppi centrali nelle simulazioni dei prossimi anni. Percorrere questa strada ci consentirà di migliorare la comprensione delle proprietà delle galassie che popolano il nostro universo.

Referenze bibliografiche

- A. CIMATTI, C. FRATERNALI, F. NIPOTI, *Introduction to Galaxy Formation and Evolution: from Primordial Gas to Present-Day Galaxies*, Cambridge, Cambridge University Press, 2019.
- E. DWEK, J. M. SCALO, *The Evolution of Refractory Interstellar Grains in the Solar Neighborhood*, «The Astrophysical Journal», 239, 193, 1980.
- E. GJERGO, G. L. GRANATO, G. MURANTE *et al.*, *Dust Evolution in Galaxy Cluster Simulations*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 479, 2588, 2018.
- G. L. GRANATO *et al.*, *Dust Evolution in Zoom-in Cosmological Simulations of Galaxy Formation*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 503, 511, 2021.
- E. P. HUBBLE, *NGC 6822, a Remote Stellar System*, «The Astrophysical Journal», 62, 409, 1925.
- H. MO, F. VAN DEN BOSCH, S. WHITE, *Galaxy Formation and Evolution*, Cambridge, Cambridge University Press, 2010.
- M. PARENTE, C. RAGONE-FIGUEROA, G. L. GRANATO *et al.*, *Dust Evolution with MUPPI in Cosmological Volumes*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 515, 2053, 2022.
- M. PARENTE, C. RAGONE-FIGUEROA, G. L. GRANATO, A. LAPÍ, *The $z \lesssim 1$ Drop of Cosmic Dust Abundance in a Semi-Analytic Framework*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 521, 6105, 2023.
- M. PARENTE *et al.*, *Star Formation and Dust in the Cosmic Web*, «The Astrophysical Journal», 966, 154, 2024.
- M. PARENTE, C. RAGONE-FIGUEROA, G. L. GRANATO *et al.*, *Dust Sub-millimetre Emission in Green Valley Galaxies*, «Astronomy & Astrophysics», 697, 231, 2025.
- R. J. TRUMPLER, *Absorption of Light in the Galactic System*, «Publication of the Astronomical Society of the Pacific», 42, 214, 1930.

Lecture consigliate

- A. CIMATTI, *L'universo oscuro. Viaggio tra i più grandi misteri del cosmo*, Roma, Carocci, 2020.
- D. GASPARRI, *Galassie. Proprietà, formazione ed evoluzione dei mattoni dell'universo*, farsiuilibro.it, 2010.

Massimiliano Parente è nato a Lecce nel 1996. Ha iniziato gli studi in Fisica a Roma, conseguendo nel 2020 la Laurea Magistrale in Fisica teorica presso l'Università La Sapienza. Si è poi trasferito a Trieste, dove ha ottenuto il dottorato di ricerca in Astrofisica e Cosmologia presso la Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati (SISSA) nel 2024. Dopo una breve esperienza come assegnista di ricerca presso l'INAF di Trieste, si è spostato negli USA all'Università della Florida, dove attualmente ricopre il ruolo di post-doc. La sua attività di ricerca si concentra sullo studio teorico e numerico dell'evoluzione delle galassie, con particolare attenzione alla composizione e all'emissione infrarossa del mezzo interstellare.

Impatto dei nuclei galattici attivi sul gas molecolare: una prospettiva radiativa e cinetica*

Federico Esposito

Observatorio Astronómico Nacional, Madrid, España

LONTANO dalle luci della città, in una notte d'estate senza Luna, mano a mano che i nostri occhi si abituano a vedere le stelle, la Via Lattea emerge dal cielo oscuro. In alcune costellazioni come il Cigno, Cassiopea e Perseo nel cielo dell'emisfero nord, e la Croce del Sud e il Centauro nell'emisfero sud, una luce diffusa sembra collegare le stelle più luminose: questo è lo splendore combinato di milioni di stelle poste a decine di migliaia di anni luce da noi (o parsec, dove $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ anni luce}$). Le stelle brillanti di Cassiopea e del Centauro, invece, sono molto più vicine, tra 10 e 100 pc dalla Terra. È come se vivessimo nella campagna alla periferia della Galassia,¹ con poche luci sparse attorno a noi – corrispondenti alle case vicine, circondate da campi bui – con le luci della città all'orizzonte, tutte vicine e allineate. Guardando con più attenzione, con un cielo eccezionalmente terso e oscuro, possiamo individuare diverse regioni lungo la Via Lattea: grumi di luce diffusa, qua, e misteriose macchie scure là, come se qualcuno le avesse marcate con un pennarello nero (FIG. 1, pannello a). I primi sono chiamati ammassi stellari, e sono composti prevalentemente di stelle giovanissime, ancora vicine tra loro perché troppo poco tempo è passato perché si disperdessero durante il loro moto di rivoluzione attorno al centro della Galassia. Conosciamo la loro età grazie al loro colore, un parametro chiave per gli studi di evoluzione stellare. I secondi, le macchie scure, sono state chiamate inizialmente «nubi oscure» (*dark clouds* in inglese), poiché coprono ciò che sta dietro di loro (e al loro interno). Oggi sappiamo che sono oscure a causa della loro alta densità e bassa temperatura e della loro composizione chimica di polveri e gas molecolare. Per questa ragione, ci riferiamo spesso a loro con il nome di nubi molecolari: queste sono le nubi da cui nascono le stelle.

Le nubi molecolari

Il primo ad osservare le nubi molecolari con un telescopio fu probabilmente William Herschel, che

nel 1785 le definì «Buchi nei cieli» (*holes in the heavens*). Poco più di un secolo fa, nel 1919, l'astronomo statunitense Edward Emerson Barnard, con l'aiuto di sua nipote Mary Ross Calvert, pubblica il primo catalogo delle «Macchie scure del cielo» (*dark markings of the sky*). Tre decenni dopo, l'astronomo olandese Bart Bok realizza che è da queste macchie scure che nascono le stelle. La scoperta della componente molecolare del mezzo interstellare² era iniziata poco prima, con la prima osservazione, con telescopi ottici, del radicale metilidrinico (CH, cioè molecola composta da un atomo di carbonio e uno di idrogeno) a 4300 Å , nel 1937. Ma è solo con lo sviluppo dei radiotelescopi che abbiamo iniziato a «vedere» le nubi molecolari (FIG. 1, pannello b), con le prime osservazioni dell'idrogeno neutro a $1,42 \text{ GHz}$ (nel 1951), del radicale ossidrilico OH a $1,67 \text{ GHz}$ (nel 1963), e finalmente con la riga di emissione fondamentale³ del monossido di carbonio, chiamata CO(1–0), a 115 GHz (nel 1970). Da allora, moltissime molecole sono state identificate nello spazio: il catalogo più aggiornato (a settembre 2025) elenca 341 specie molecolari, composte da un numero di atomi compreso tra 2 e 70.

Le molecole possono sopravvivere solo in climi freddi. Sulla Terra abbiamo un'abbondanza di molecole grazie alla nostra temperatura stabilmente fredda (su scala cosmica), mentre nella Galassia il gas che circonda le stelle si trova a migliaia o milioni di gradi: le molecole vengono distrutte in queste regioni, e addirittura la maggior parte degli elettroni abbandonano gli atomi. Le nubi molecolari, invece, rimangono fredde (fino a una decina di gradi kelvin) grazie a una combinazione di meccanismi: i più importanti sono l'auto-schermatura (*self-shielding*) dell'idrogeno molecolare a densità di colonna⁴ superiori a 10^{14} cm^{-2} , e il raffreddamento del gas che avviene con l'emissione di righe molecolari (soprattutto del CO).

Grazie alla bassa temperatura, il gas molecolare può aggregarsi in strutture gigantesche, chiamate

* L'Autore presenta qui i contenuti essenziali delle ricerche svolte nel corso del Dottorato di Ricerca che gli sono valse la menzione speciale al "Premio Pietro Tacchini" della SAIt per l'anno 2024-XIX edizione; premio assegnato alle migliori tesi di Dottorato di carattere astrofisico.

¹ I nomi «Via Lattea» e «Galassia» si usano entrambi per indicare la nostra galassia.

² ISM, da *interstellar medium*, come viene abbreviato solitamente l'insieme di gas e polveri in una galassia.

³ In spettroscopia chiamiamo «fondamentali» le transizioni che coinvolgono lo stato energetico più basso. Nel caso dello spettro rotazionale del CO, questo equivale al livello con numero quantico $J = 0$.

⁴ La densità di colonna, misurata in cm^{-2} , è una misura dello spessore del gas, quindi la quantità di gas in profondità che risulta schiacciato in un'immagine bidimensionale ottenuta con un telescopio.

appunto nubi molecolari giganti (GMC, da *giant molecular cloud*), con masse intorno alle 10^5 masse solari, e dimensioni di 30-50 pc. Tali nubi sono così massicce e dense che la loro forza di gravità tenderebbe a farle collassare, se non fosse per la pressione del campo magnetico e la turbolenza del gas tipiche delle GMC. Al loro interno esiste una complessa organizzazione gerarchica di tipo frattale: dai cosiddetti *grumi* (*clumps*, 50-500 masse solari) fino ai *nuclei* (*cores*, 0,5-5 masse solari).

A un certo punto, i nuclei densi dentro una GMC collassano e questo li porta ad accrescere massa dal gas circostante, portando alla formazione di un disco di gas rotante, dentro cui si formano i pianeti della neonata stella. Ci sono ancora molte questioni aperte riguardo la comprensione dei processi fisici della formazione stellare. Sappiamo comunque che i più giovani ammassi stellari nella Galassia si trovano insieme a massicci complessi di gas molecolare. Uno degli esempi più spettacolari e meglio studiati è la Nebulosa di Orione, il sito di formazione stellare attivo più vicino a noi. Qui stelle giovani e massicce, di tipo spettrale O e B, emettono grandi quantità di radiazione ultravioletta. I fotoni ultravioletti⁵ con energia superiore a 13,6 eV (EUV: *extreme ultraviolet*) sono in grado di dissociare le molecole e ionizzare il gas, così che le regioni intorno a tali stelle sono note come regioni HII.⁶ Queste regioni assorbono tutti i fotoni EUV, così che il gas poco più lontano, all'esterno delle regioni HII, viene principalmente investito dai fotoni con energia tra 6 e 13,6 eV (FUV: *far ultraviolet*): questa regione di gas viene chiamata regione di fotodissociazione (PDR, da *photodissociation region*), in quanto le molecole vengono dissociate dai fotoni FUV (ma ogni molecola a distanze diverse, dipendendo dalla loro energia di legame).

La nostra Galassia ha ancora gas freddo per continuare a formare stelle: osservando altre galassie possiamo immaginare cosa accadrà quando queste riserve finiranno.

Le galassie esterne

Fino agli anni Venti del secolo scorso, il fatto che la nostra fosse l'unica galassia (contenente l'intero universo), o se le piccole nebulose con forma a spirale visibili con i telescopi fossero in realtà lontane galassie esterne, era materia di dibattito e anzi era noto, data la sua importanza, come «il grande dibattito» (*the great debate*). Oggi sappiamo che ci sono al-

⁵ I fotoni UV hanno lunghezze d'onda molto piccole ($\lambda < 380$ nm), per cui è spesso preferibile esprimerne l'energia in elettronvolt (eV), con $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$. A titolo di esempio, un fotone UV da 13,6 eV possiede l'energia necessaria per ionizzare un atomo di idrogeno.

⁶ In astronomia, HII, da leggersi H secondo, identifica l'idrogeno ionizzato, o senza il solo elettrone che l'idrogeno neutro (chiamato HI) ha. Analogamente chiamiamo CIV il carbonio con 3 elettroni in meno del carbonio neutro (CI).

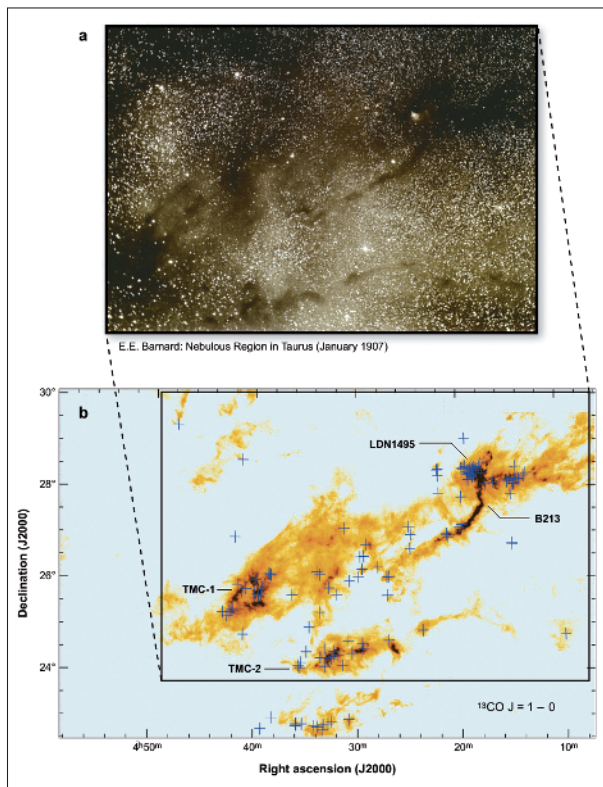


FIG. 1. (a) Immagine fotografica della regione di Taurus ottenuta da E. E. Barnard. (b) Mappa integrata dell'emissione del $^{13}\text{CO}(1-0)$ nella stessa regione della nube molecolare, ottenuta con il *Five College Radio Astronomy Observatory*. Le croci blu indicano la posizione di oggetti stellari e protostellari noti. La scala di colori dell'emissione va da 0,5 a 10 K km s^{-1} . (BERGIN, TAFALLA, 2007).

meno centinaia di miliardi di galassie oltre la nostra nell'universo osservabile. Alcune di esse sono isolate (le cosiddette galassie di campo), altre vivono in gruppi e ammassi. Edwin Hubble fu il primo, nel 1926, a organizzarle sistematicamente in tipi morfologici: galassie ellittiche, a spirale (normale o barrata), e irregolari. Notò anche che gli spettri ottici di tre galassie che analizzò, NGC1068, NGC4051, e NGC4151, mostravano righe di emissione simili a quelle che si trovano associate alle nebulose planetarie,⁷ Hubble pensava che le galassie evolessero da ellittiche a spirali, esprimendo una progressione da forme più semplici a più complesse, cosa che oggi sappiamo essere completamente falsa. Oggi tendiamo a usare la stessa divisione, usando però termini più generici come *sferoidi* per le galassie ellittiche e *dischi* per le galassie a spirale.

Le galassie sferoidali sono caratterizzate dall'assenza di braccia a spirale, popolazioni stellari vecchie, colori più rossi, e poche quantità di gas freddo e polvere. D'altro canto, le galassie a disco mostrano spesso bracci a spirale, popolazioni stellari giovani, colori più blu, e grandi quantità di gas freddo e

⁷ Le nebulose planetarie sono nubi di gas illuminate da una nana bianca. Grazie alla dinamica del gas, che è stato espulso dalla stella al termine della fase di gigante rossa, e al forte flusso UV della nana bianca, le nebulose planetarie mostrano una spettacolare emissione colorata.

polvere. Sempre più spesso si parla di bimodalità: la maggior parte delle galassie è blu o rossa, la maggior parte delle galassie blu è a disco e la quasi totalità delle galassie rosse è sferoidale. Le poche che mostrano un colore intermedio formano la cosiddetta *valle verde* (*green valley*): è interessante notare che sia la Via Lattea sia la nostra vicina, la galassia di Andromeda, fanno parte della valle verde.

Siccome una popolazione stellare evolve passivamente dal blu al rosso, è facile interpretare la bimodalità delle galassie come una traccia evolutiva, dove le galassie maturano da blu a rosse e le stelle passano da ruotare in un disco a ruotare in uno sferoide (quindi invertendo l'ordine pensato da Hubble). Tuttavia, le galassie si rivelano sistemi più complessi di così. Si è scoperto che le galassie sferoidali interrompono velocemente la formazione stellare (in qualche centinaio di milioni di anni), forse in seguito a una fusione tra galassie, e più la galassia finale è massiccia più corta e concentrata è stata la sua fase di formazione stellare. Viceversa, le galassie a disco ci mettono miliardi di anni a esaurire le riserve di gas freddo e quindi a fermare la nascita di nuove stelle. L'esatto processo per cui le galassie smettono di formare stelle (chiamato *quenching*) non è ancora del tutto compreso, e diversi meccanismi vengono invocati per scaldare il gas, renderlo più turbolento, più magnetizzato, o rimuoverlo dalla galassia, in modo da fermare la formazione stellare e spiegare il mistero delle galassie rosse.

Le galassie attive

Uno dei meccanismi più affascinanti attraverso il quale le galassie possono modificarsi è la fase di nucleo galattico attivo (AGN, da *active galactic nucleus*). Nel 1943, l'astronomo statunitense Carl Seyfert studiò nel dettaglio quelle galassie che mostravano righe di emissione ad alto livello di eccitazione, scoprendo che tale emissione veniva dal nucleo galattico. Una normale galassia mostra uno spettro dominato dal continuo delle stelle e dalle loro righe di assorbimento, mentre una galassia con formazione stellare attiva mostra righe di emissione a basso livello di eccitazione, come $H\alpha$ ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$, dove λ è la lunghezza d'onda) e $H\beta$ ($\lambda = 4861 \text{ \AA}$). Le galassie di Seyfert invece hanno lo spettro dominato da righe di emissione da elementi ionizzati, come il doppietto dell'[OIII] ($\lambda\lambda = 4959, 5007 \text{ \AA}$). Seyfert notò anche che in alcuni nuclei le righe dell'idrogeno erano eccezionalmente larghe, il che corrispondeva a gas in movimento fino a 7500 km/s nel caso di NGC4151.

In quegli stessi anni, lo sviluppo dei radiotelescopi da parte di Karl Jansky ispirò un giovane ingegnere e radioamatore, Grote Reber, a costruire un radiotelescopio nel suo giardino, con il quale osservò per primo la sorgente radio Cygnus A a 160 MHz, nel 1944. Dieci anni dopo, osservazioni ottiche rivelarono la natura extragalattica di Cygnus A (si tratta

di un sistema di due galassie in fusione) e da allora sorgenti di questo tipo vennero chiamate radiogalassie. Molte altre sorgenti radio rimanevano invece puntiformi (come stelle) quando osservate con un telescopio ottico, da cui viene il nome *quasi-stellar radio source*, o *quasar*. Nel 1963 si scoprì che la loro distanza era di miliardi di anni luce da noi: la loro luminosità intrinseca risultava quindi migliaia di volte superiore a quella di una galassia normale.

Un anno dopo, grazie agli esperimenti pionieristici di Riccardo Giacconi, 3C 273 e M87 furono le prime galassie ad essere osservate nei raggi X. Le galassie di Seyfert NGC1275 e NGC4151 furono osservate dal primo satellite a raggi X, Uhuru, nel 1971. In quegli anni si scoprì che anche il nucleo della radiogalassia Centaurus A, studiata nell'ottico col nome di NGC5128, emetteva raggi X con un'intensità variabile nell'arco di pochi giorni: proprio da questa estrema variabilità stimarono che la dimensione massima che poteva avere la regione di emissione fosse di un centesimo di anno luce. Da questi studi pionieristici ai recenti risultati della collaborazione *Event Horizon Telescope*, siamo ormai tutti convinti dell'esistenza dei buchi neri supermassicci al centro delle galassie.

Il fatto che i buchi neri possano fornire l'energia per le sorgenti più luminose dell'universo può sembrare controintuitivo e necessita una spiegazione approfondita: la concentrazione di una massa così alta (tra milioni e decine di miliardi di masse solari) in uno spazio inferiore a quello occupato dal Sistema Solare, fa in modo che il gas circostante, cadendo verso il buco nero, perda una quantità immensa di energia potenziale gravitazionale e di momento angolare. Il caso più tipico è quello in cui il gas forma un disco di accrescimento intorno al buco nero e cede momento angolare attraverso l'attrito tra i diversi strati di tale disco. Il disco si scalda così fino a raggiungere centinaia di migliaia di gradi, emettendo radiazione UV, mentre uno strato di gas circostante, molto tenue, si scalda a decine di milioni di gradi (in modo simile alla corona solare), emettendo radiazione X. Questa emissione X sembra essere onnipresente negli AGN, eccetto nelle sorgenti oscurate da una densità di colonna di gas eccezionalmente alta. Allontanandoci di circa un anno luce dal buco nero, nubi di idrogeno ad alta densità si muovono ad altissima velocità, producendo le righe allargate osservate da Seyfert. Questa regione è nota come *broad line region*, per distinguerla dalla più estesa e meno densa *narrow line region*, da dove vengono emesse le righe strette ad alta ionizzazione. Il fatto che alcuni AGN, come NGC4151, abbiano righe allargate negli spettri, ed altri, come NGC1068, abbiano solo righe strette, era un mistero inizialmente. Si chiamarono i primi AGN di tipo 1 e i secondi di tipo 2. Finalmente, nel 1985, attraverso uno spettropolarimetro, fu possibile realizzare che un toro⁸

⁸ Un *toro* è un oggetto geometrico tridimensionale a forma di ciambella.

oscurante di gas e polvere impediva la vista della *broad line region* negli AGN di tipo 2. Recentemente, grazie a osservazioni ad alta risoluzione fatte con l'Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), è possibile osservare l'emissione del gas molecolare (CO) e della polvere del toro su scale di pochi parsec: si è visto che il toro è la struttura intermedia che connette le riserve di gas di una galassia con il disco di accrescimento intorno al buco nero.

Feedback degli AGN

Il gas molecolare può costituire fino al 50% della massa del gas in una tipica galassia a disco (CASASOLA *et al.*, 2020), la maggior parte del quale rimane concentrato nel kpc⁹ centrale e lungo i bracci a spirale, dove viene consumato per formare continuamente nuove stelle. Una frazione di questo gas spiraleggia però verso il buco nero supermassiccio. Finché poco gas segue questo canale, il buco nero è dormiente, come nel caso della Via Lattea. Man mano che il gas si accumula al centro però, si forma un toro e un disco di accrescimento, e grandi quantità di energia vengono emesse, soprattutto nei raggi X. Inoltre, con meccanismi ancora poco compresi, si sviluppano moti di gas spinti verso l'esterno, a volte collimati dal campo magnetico in potentissimi getti di materia. Sia la radiazione X, che i venti dall'AGN, hanno potenzialmente l'effetto di scaldare, dissociare, rimuovere il gas molecolare, e aumentarne la turbolenza, tutte condizioni negative per la formazione stellare ma anche per mantenere un costante accrescimento del buco nero. Questo fenomeno è noto come *AGN feedback*, e viene invocato come fenomeno regolatore della formazione stellare e della crescita delle galassie.

Per caratterizzare il *feedback* è necessario studiare sia l'AGN che il contenuto di gas molecolare della galassia contenente l'AGN (chiamata *galassia ospite*). In questo articolo vengono presentati due studi complementari sull'influenza dell'AGN sul gas molecolare: il primo riguarda lo stato di eccitazione del gas, quindi sulla sua capacità di assorbire e riemettere la radiazione incidente; il secondo analizza lo stato cinematico del gas e, nel dettaglio, il suo moto in risposta alla presenza di un vento proveniente dall'AGN.

Un codice per capire l'eccitazione del gas molecolare

Il riscaldamento del gas molecolare è dominato da due tipi di sorgenti e radiazione: l'emissione a raggi X della corona dell'AGN e l'emissione FUV delle stel-

le giovani di classe O e B. Quest'ultima forma regioni di fotodissociazione (PDR) nel gas, che si raffredda emettendo righe del CO a bassa frequenza (< 1 THz); in maniera analoga, l'emissione X forma regioni chiamate XDR (*X-ray dominated regions*), dove il gas si raffredda emettendo righe del CO a più alta frequenza (> 1 THz). Nonostante il gas molecolare sia composto al 99,99% di H₂, la molecola di gran lunga più osservata in astronomia è il CO: grazie al suo basso momento dipolare, le basta un leggero urto con un'altra molecola (quasi sempre H₂) per farla ruotare a un livello più alto. I livelli di energia rotazionale (espressi con la lettera *J*) delle molecole polari come il CO sono quantizzati e seguono una regola precisa: *J* può cambiare di un livello alla volta ($\Delta J = \pm 1$). Se quindi una molecola di CO viene portata da un urto fino al livello $J = 3$, tenderà a tornare progressivamente allo stato fondamentale emettendo nell'ordine le righe CO(3-2), CO(2-1) e infine CO(1-0). Oggi, grazie alle osservazioni combinate del satellite *Herschel* e di radiotelescopi terrestri, possiamo ricostruire, per una galassia locale, lo spettro delle righe del CO dalla CO(1-0) alla CO(13-12), con frequenze tra 115 GHz e 1,5 THz.

Per capire le condizioni in cui si trova il gas molecolare in una galassia e il tipo di sorgente radiativa dominante (AGN o stelle giovani), si usano solitamente codici che risolvono numericamente le equazioni di trasporto radiativo e che funzionano nel seguente modo: si definiscono i parametri iniziali del gas (ad esempio densità e composizione chimica) e della sorgente radiativa (luminosità e distanza), ed il codice predice l'emissione del gas in risposta (ad esempio, lo spettro delle righe del CO). Si confronta quindi l'emissione predetta con quella osservata e si modificano i parametri iniziali finché il codice non dà risultati simili a quelli osservati: tali parametri iniziali «ottimali» descriveranno lo stato attuale del gas.

Questo approccio, nonostante la sua diffusione, è ovviamente una semplificazione che cerca una soluzione numerica a un problema fisico. Nella maggior parte dei casi, inoltre, non è possibile con un singolo valore di un parametro iniziale (soprattutto della densità del gas) predire la totalità dello spettro osservato, e quindi si sviluppano modelli a due o tre componenti, a densità diversa, che possano generare ad hoc l'emissione osservata. Con lo scopo di migliorare l'interpretazione dei risultati, abbiamo sviluppato un nuovo codice, chiamato *galaxySLED*¹⁰, che parte da una distribuzione fisica del gas molecolare all'interno delle nubi molecolari (le GMC), e di tali nubi all'interno di una galassia. Diversi lavori osservativi e teorici, soprattutto con-

⁹ Le unità più usate negli studi di galassie sono il parsec (1 pc = 3,26 anni luce) e il kiloparsec (1 kpc = 10³ pc).

¹⁰ *SLED* sta per *spectral line energy distribution*, cioè lo spettro di tutte le righe osservate. Al momento della stesura di questo articolo, il codice opera solo con lo spettro rotazionale del CO, ma è pianificato un aggiornamento per includere altre specie molecolari e atomiche. Il codice è gratuito e disponibile al sito <https://federicoesposito.github.io/galaxySLED/>.

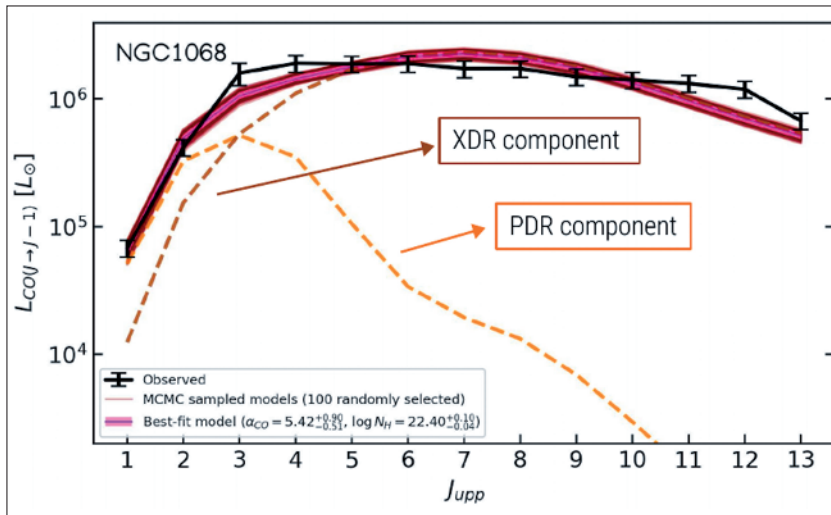


FIG. 2 Spettro delle righe molecolari del CO, dalla CO(1–0) alla CO(13–12), per la galassia di Seyfert NGC1068, in unità di luminosità solari. Le barre di errore in nero indicano le luminosità osservate (da radiotelescopi terrestri per $J_{\text{upp}} \leq 3$ e dall'*Herschel Space Observatory* per $J_{\text{upp}} \geq 4$). La curva rosa mostra il miglior modello ottenuto con *galaxysLED*, corrispondente alla mediana di 100 modelli (in rosso). Le componenti della curva totale dovute al gas in PDR e XDR sono mostrate rispettivamente in arancione e marrone. (ESPOSITO *et al.*, 2024a).

centrati sulle GMC nella Via Lattea, hanno mostrato come la turbolenza del gas molecolare sia fondamentale per comprenderne la distribuzione di densità. La turbolenza si manifesta in moti caotici e si può descrivere matematicamente (con non poche difficoltà). La soluzione più adottata prevede che la densità del gas segua una distribuzione di probabilità lognormale¹¹ caratterizzata dal suo numero di Mach, cioè da come i moti turbolenti si rapportino alla velocità del suono del gas. Una volta adottato questo modello, i parametri chiave di una GMC sono la sua massa, la dimensione, la densità media e il suo numero di Mach. Con tali parametri si può generare una distribuzione di *clumps* di gas interni alla GMC che seguano appunto la distribuzione di densità lognormale indotta dalla turbolenza. Per simulare meglio una galassia reale, il codice crea diverse GMC e le pone a diverse distanze dal centro, riempiendo il profilo di massa molecolare della galassia. A questo punto usiamo *CLOUDY*, un noto software che risolve numericamente le equazioni del trasporto radiativo, illuminando tutti queste GMC e i *clumps* dentro di esse con un AGN o con una popolazione stellare giovane, e confrontiamo infine i risultati con le osservazioni (ad esempio con lo spettro del CO della galassia di Seyfert NGC1068, in FIG. 2).

Abbiamo inizialmente testato *galaxysLED* su un campione di Seyfert locali, ottenendo risultati molto promettenti: il codice riesce a riprodurre bene gli spettri del CO, mostrando che per spiegare l'emissione osservata in queste sorgenti sono indi-

spensabili le regioni XDR eccitate dall'AGN. Un aspetto interessante è che, nel nostro modello, l'importanza delle XDR risulta maggiore rispetto a quanto trovato in studi precedenti, che sottostimavano il contributo dell'AGN al riscaldamento del CO: questo è probabilmente dovuto alla distribuzione più realistica delle nubi di gas. Il codice permette anche di prevedere dove vengono emesse le diverse righe del CO: le transizioni a bassi livelli J , dominate dalle PDR, si estendono per diversi kpc, mentre le righe ad alti J , dominate dalle XDR, vengono emesse entro 1 kpc dal centro. Le osservazioni *Herschel* di queste ultime non avevano abbastanza risoluzione spaziale per fornirci questa informazione.

Il vento della galassia di Seyfert NGC5506

Durante il mio dottorato presso l'Università di Bologna ho svolto un periodo di ricerca di 6 mesi presso il Centro de Astrobiología di Madrid, in Spagna. Lì ho collaborato all'interno del progetto internazionale GATOS,¹² che si propone di caratterizzare nel dettaglio gli AGN locali, soprattutto per quanto riguarda la cinematica del gas e le proprietà del toro. Una delle scoperte più importanti di questo progetto è stata, nel 2021, l'osservazione di un deficit di gas molecolare, tracciato con osservazioni ALMA ad alta risoluzione della riga CO(3–2) a 345,8 GHz, nei 100 pc centrali di alcuni AGN (GARCÍA-BURILLO *et al.*, 2021). Questo deficit, quantificato con un indice di concentrazione, risulta correlato alla luminosità X del nucleo galattico: più emette raggi X, meno gas si trova al centro.

La galassia di Seyfert NGC5506 è una di quelle che mostra un deficit più alto (FIG. 3, secondo pannello). Il gas molecolare normalmente tende a concentrarsi verso il centro della galassia, e una sua assenza comporta che sia stato spazzato via, o che sia stato scaldato abbastanza da dissociare il CO. Per vederci più chiaramente, abbiamo analizzato la cinematica della riga CO(3–2) osservata da ALMA. Questo significa tracciare in ogni pixel lo spostamento della frequenza di emissione della riga: uno spostamento verso il rosso¹³ comporta un moto di allontanamento lungo la linea di vista, verso il blu un moto di avvicinamento. I moti tangenziali alla linea di vista

¹¹ È questa una distribuzione di probabilità che descrive variabili il cui logaritmo naturale segue una distribuzione normale: può approssimare il prodotto di molte variabili aleatorie positive indipendenti.

¹² GATOS sta per *Galaxy Activity, Torus, and Outflow Survey* (<https://gatos.myportfolio.com/>).

¹³ In astronomia si usano i termini «verso il rosso/blu» anche per fotoni non visibili (come in questo caso), intendendo «verso frequenze minori/maggiori».

non sono misurabili con questa tecnica (che sfrutta il famoso effetto Doppler), ma siccome NGC5506 è vista di taglio (FIG. 3), è possibile vedere il moto del gas in rotazione attorno al centro della galassia (FIG. 3, terzo pannello). Il quarto pannello di FIG. 3 mostra la dispersione di velocità, cioè quanto, in ogni pixel, la riga sia allargata attorno al suo centro: il fatto che ci siano valori più alti (intorno a 50 km/s) lungo un asse inclinato rispetto all'asse di rotazione ci dà già un'indicazione di una cinematica disturbata. Usando il codice 3D-Barolo abbiamo potuto quantificare questo disturbo: il gas sta ruotando intorno al centro, e al tempo stesso sta venendo spinto verso l'esterno con velocità di decine di km/s. Questo può spiegare il deficit di gas molecolare presente nei 100 pc centrali (corrispondenti a 0,8" per NGC5506).

Ma cosa spinge il gas molecolare verso l'esterno? Per scoprirlo abbiamo analizzato un'osservazione ottica ottenuta con lo strumento MEGARA presso il Gran Telescopio Canarias (contorni arancioni in FIG. 4): questa mostra uno spettro dominato dal doppietto dell'[OIII] (FIG. 4, pannelli inferiori), come atteso per una galassia di Seyfert. Analizzando nel dettaglio la cinematica dell'[OIII], abbiamo rilevato un moto di fuoriuscita del gas ionizzato con velocità fino a 1000 km/s, che si espande sopra e sotto il disco di stelle e gas molecolare: è probabile che siano le parti più interne di questo vento a spingere il gas molecolare e a crearne il deficit nucleare.

Ma cosa genera questo rapido vento di gas ionizzato? La presenza di venti negli AGN, con i telescopi attuali, viene rilevata frequentemente, ma la loro origine è ancora dibattuta. Nel caso di NGC5506, abbiamo anche analizzato osservazioni radio di archivio fatte con la tecnica VLBI,¹⁴ che mostrano la presenza di un piccolo getto inizialmente diretto a 70° dalla direzione nord (in senso antiorario), per poi piegare di 90° verso sud a 3 pc dal buco nero: questo

¹⁴ VLBI sta per interferometria a lunghissima base (*very long baseline interferometry*), ed è una tecnica usata in radioastronomia che prevede l'osservazione simultanea dello stesso oggetto con radiotelescopi sparsi per il mondo, in modo da ottenere una risoluzione pari ad un radiotelescopio grande quanto la Terra.

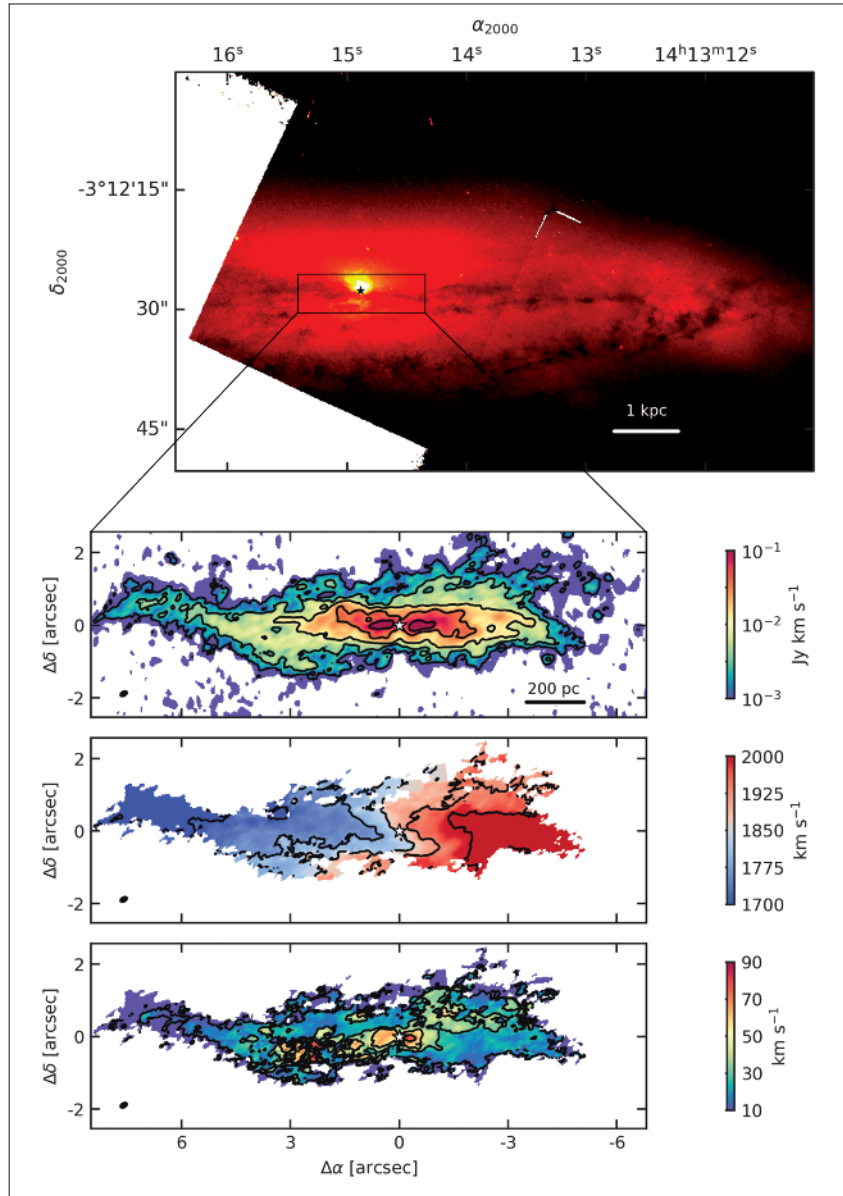


FIG. 3 Pannello superiore: immagine HST/F606W di NGC5506 da MALKAN *et al.* (1998). Il rettangolo nero identifica una regione di $15,3'' \times 5,1''$ (corrispondente a $1,9 \times 0,6$ kpc²). Pannelli inferiori: mappe di intensità, velocità e dispersione di velocità del CO(3-2) osservate con ALMA, con soglia di segnale-rumore pari a 3. Le curve di livello sono comprese tra 10^{-3} e 10^{-1} Jy km s⁻¹ (con passi di 0,5 dex) per la mappa di intensità, tra 1700 e 2000 km s⁻¹ (con passi di 75 km s⁻¹) per la mappa di velocità, e tra 10 e 90 km s⁻¹ (con passi di 20 km s⁻¹) per la mappa di dispersione di velocità. Il nord è in alto e l'est a sinistra; gli *offset* nelle mappe ALMA sono misurati rispetto al picco del continuo a 870 μ m, marcato con un simbolo a stella in ogni pannello. Il *beam* di ALMA ($0,21'' \times 0,13''$) è mostrato in ogni pannello inferiore come un'ellisse nera in basso a sinistra. (ESPOSITO *et al.*, 2024b).

potrebbe indicare un'interazione tra il getto e il gas nel toro, viste le dimensioni (troppo piccole per potersi vedere in FIGG. 3 e 4). Osservazioni ai raggi X hanno identificato, in NGC5506, un probabile *outflow* ultra-rapido (UFO, da *ultra-fast outflow*) con velocità pari a un quarto della velocità della luce (quindi quasi 75000 km/s!): questo gas in fuga ultra-rapida si troverebbe, secondo tale analisi, ai margini del disco di accrescimento, a meno di un millesimo di pc dal buco nero. La quantità di moto dell'UFO risulta però almeno 4 volte quella dei moti del gas molecolare e ionizzato, il che potrebbe indicare che si tratti di diversi episodi: il gas, rallentando durante la sua fuga

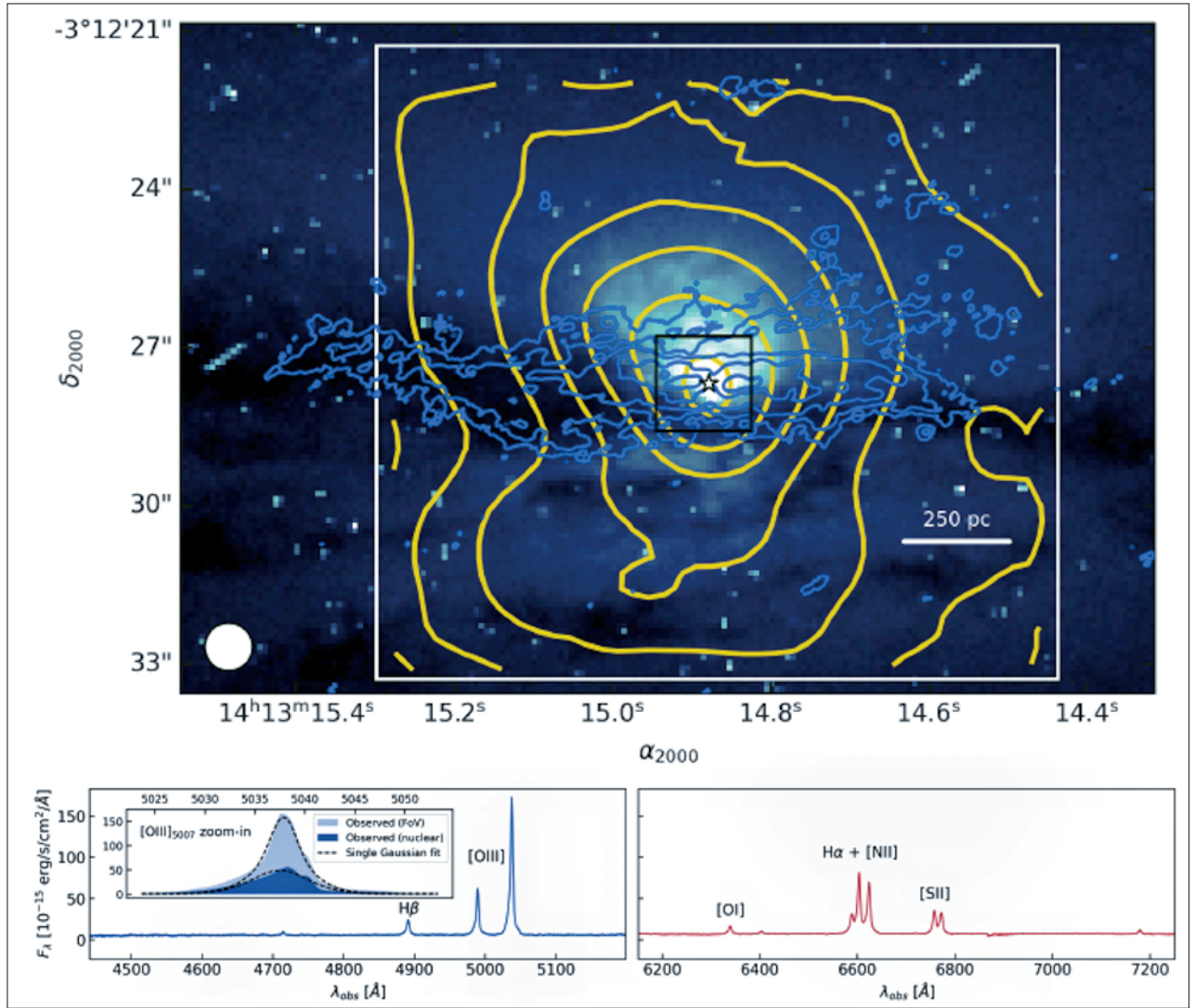


FIG. 4 *In alto*: Contorni dell'emissione dell'[OIII] (5007 Å, in arancione) e del CO (870 μm, in blu) sovrapposti all'immagine ottenuta con l'*Hubble Space Telescope* di NGC5506 (MALKAN *et al.*, 1998). La stella bianca indica la posizione dell'AGN. I quadrati nero e bianco mostrano rispettivamente la regione nucleare, di dimensioni 1,8" (~225 pc), e il campo di vista di MEGARA (12,5" × 11,3", 1,5 kpc × 1,4 kpc). Il cerchio bianco in basso a sinistra indica le condizioni di seeing di MEGARA (diametro 0,9"). *In basso*: I pannelli di sinistra e di destra mostrano gli spettri (integrati all'interno del campo di vista di MEGARA) ottenuti con i reticoli LR-B e LR-R di MEGARA, rispettivamente, con i nomi delle righe e dei doppietti identificati. Nel pannello a sinistra è presente un ingrandimento della riga dell'[OIII] (dopo la sottrazione del continuo): le aree blu rappresentano gli spettri osservati nel FOV di MEGARA e nella regione nucleare, le linee tratteggiate nere sono i fit con una singola gaussiana. (ESPOSITO *et al.*, 2024b).

dal nucleo, può metterci infatti decine di migliaia di anni a raggiungere le scale dentro cui osserviamo il gas con ALMA, e in questo lasso di tempo il nucleo può tornare dormiente, per poi riattivarsi all'arrivo di abbastanza gas.

Nel caso in cui questa espulsione di gas continui ai ritmi osservati oggi, il disco di gas molecolare visibile in FIG. 3 si esaurirebbe in circa 20 milioni di anni. Nel frattempo, questo stesso gas verrebbe consumato anche per formare stelle (con un tasso di formazione che abbiamo misurato essere simile al tasso di fuga del gas): ad ogni modo, nell'arco di 20 milioni di anni, il gas ha tempo di riciclarsi fuori dalle stelle (almeno dalle più massicce) e raffreddarsi per formare nuove stelle; inoltre, avendo una velocità molto più bassa della velocità di fuga dalla galassia, il gas molecolare continuerà a circolare all'interno della galassia, dando eventualmente luogo a fontane galattiche, rimescolandosi continua-

mente e contribuendo così a far circolare gli elementi chimici prodotti nelle stelle e rilasciati alla loro morte.

Conclusioni e prospettive future

Una delle questioni aperte nell'astronomia contemporanea è se l'energia rilasciata dall'AGN sia in grado di fermare la formazione stellare nella galassia ospite, guidandone la transizione morfologica da dischi a sferoidi. Come abbiamo visto, il problema è intrinsecamente complesso a causa di:

- diverse scale fisiche coinvolte, dalla dimensione sub-pc dei dischi di accrescimento e dei *clumps* molecolari fino alla dimensione di centinaia di kpc di un'intera galassia;
- diverse scale temporali ed effetti ritardati, tra radiazione dell'AGN, espansione dei venti, formazione stellare

- ed espulsione di materiale arricchito; a questo si aggiunge il continuo accendersi e spegnersi dell'AGN;
- coinvolgimento di differenti fasi del gas, ciascuna associata a processi fisici distinti e richiedente strumenti e tecniche osservative diverse;
- l'evidente unicità di ogni galassia, che richiede un forte impegno osservativo, statistico e teorico per evidenziare le proprietà chiave comuni (ad esempio la bimodalità galattica); inoltre, le galassie non sono entità isolate: sono interconnesse in gruppi, ammassi e filamenti cosmici, e nel corso della loro vita interagiscono e si fondono frequentemente.

Il gas molecolare è il combustibile primario sia per la formazione stellare sia per l'accrescimento del buco nero, così che capire il suo destino è cruciale per capire l'evoluzione delle galassie.

In futuro, la sinergia di osservazioni su diverse scale e a diverse frequenze (come radio, ottico, X), aiuterà sempre di più la caratterizzazione degli AGN. Con i nuovi dati del *James Webb Space Telescope* (JWST) siamo già in grado di osservare la componente più calda del gas molecolare e della polvere (in maniera complementare allo studio delle componenti fredde, possibile con ALMA). Un nuovo telescopio che operi nella regione del lontano infrarosso, come faceva il defunto *Herschel Space Observatory*, è sempre più vicino al completamento grazie al progetto PRIMA;¹⁵ questo permetterebbe di coprire lo spettro, al momento scoperto e invisibile dalla superficie terrestre, tra JWST e ALMA, dandoci

¹⁵ PRIMA (*PRobe far-Infrared Mission for Astrophysics*) è un telescopio spaziale da 1,8m di diametro, selezionato dalla NASA nel 2024 per la prima fase di sviluppo, con lancio previsto nella decade del 2030.

sempre più dettagli sul comportamento del gas molecolare e il ruolo dell'AGN nell'evoluzione delle galassie.

Referenze bibliografiche

Articoli scientifici

- E. A. BERGIN, M. TAFALLA, *Cold Dark Clouds: The Initial Conditions for Star Formation*, «Annual Review of Astronomy and Astrophysics», 45, 339, 2017.
- V. CASASOLA *et al.*, *The ISM scaling relations in DustPedia late-type galaxies: A benchmark study for the Local Universe*, «Astronomy & Astrophysics», 633, A100, 2020.
- F. ESPOSITO *et al.*, *AGN impact on the molecular gas in galactic centres as probed by CO lines*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 512, 686, 2022.
- F. ESPOSITO *et al.*, *Modelling molecular clouds and CO excitation in AGN-host galaxies*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 527, 8727, 2024.
- F. ESPOSITO *et al.*, *AGN feedback in the Local Universe: Multi-phase outflow of the Seyfert galaxy NGC5506*, «Astronomy & Astrophysics», 686, A46, 2024.
- S. GARCÍA-BURILLO *et al.*, *The Galaxy Activity, Torus, and Outflow Survey (GATOS). I. ALMA images of dusty molecular tori in Seyfert galaxies*, «Astronomy & Astrophysics», 652, A98, 2021.

Libri divulgativi

- P. ANGELA, *Tredici miliardi di anni. Il romanzo dell'universo e della vita*, Milano, Mondadori, 2015.
- A. CIMATTI, *L'universo oscuro. Viaggio tra i più grandi misteri del cosmo*, Roma, Carocci, 2020.
- G. GHISELLINI, *L'universo come non si era mai visto. Le nuove astronomie*, Milano, Hoepli, 2023.
- A. MARCONI, *I buchi neri. Misteriosi protagonisti dell'evoluzione delle galassie*, Bologna, il Mulino, 2019.

Federico Esposito è nato a Chivasso (TO) nel 1990. Nel giugno 2024, dopo un periodo di ricerca presso il *Centro de Astrobiología* di Madrid (Spagna), ha conseguito il suo Dottorato di Ricerca in Astrofisica e Cosmologia presso l'Università di Bologna. Dal 2025 è astronomo presso l'*Observatorio Astronómico Nacional* di Madrid, dove svolge attività di ricerca sull'impatto dei nuclei galattici attivi sul mezzo interstellare.

Il pianeta Marte osservato da lontano e fotografato da presso (1966)

Guido Horn d'Arturo (1879-1967)

Il *Mariner 4*, lanciato il 28 novembre 1964, fu in assoluto la prima sonda a raggiungere Marte e a inviare a Terra le prime immagini ravvicinate del pianeta il 15 luglio 1965.

A sessant'anni dall'impresa spaziale, pubblichiamo questo articolo del 1966 in cui Guido Horn d'Arturo commentava quelle immagini, con la consueta abilità di astronomo grande esperto di ottica, sulla rivista da lui fondata e diretta, «Coelum» (24, 1-2, 1966, pp. 1-3).

ACCORDARE le immagini osservate al telescopio con le fotografate dal *Mariner* è un'impresa disperata. Fin dalle prime mappe del nostro grande Schiaparelli si sospettò¹ che le macchie visibili sul Pianeta, ed estese talora come continenti, fossero la sintesi di particolari più minuti, operata dall'occhio, e non risolvibili dal telescopio. Volendo rendermi conto di tale sintesi, ma in questo caso *obiettiva*, cioè sintesi strumentale, ho confrontato l'immagine consueta del *Primo quarto lunare* (FIG. 3) con un suo impiccolimento fotografico (FIG. 4) ed analogamente ho tentato di ripetere la stessa operazione con le immagini di Marte, e ne è risultata la FIG. 2.

Questa è una parte della Tav. III, fuori testo, della celebre *Memoria seconda*² dello Schiaparelli: vi ho applicato le immagini fotografiche del *Mariner*, quali furono pubblicate nello *Sky and Telescope* (settembre 1965) impiccolite di quanto era necessario per adeguarle alla scala della mappa: esse furono inserite successivamente su tutte le zone, fotografate nella precipitosa caduta del *Mariner*, da 20 a 12 mila km di distanza dal Pianeta.

Invano si cercherebbe somiglianza d'aspetto fra le osservazioni della mappa e le fotografie impiccolite, in zone sovrapposte od adiacenti; non bisogna però dimenticare che le fotografie coprono una linea esilissima, ossia la punteggiata che rappresenta nella FIG. 2 la traiettoria del *Mariner* rispetto alla rotante superficie del Pianeta: quando avessimo tutto il volto di Marte fotografato da presso si potrebbe parlare di un confronto con le osservazioni; sebbene altra è la sintesi operata dall'obiettivo (FIG. 4) ed altra è presumibilmente la sintesi operata dall'occhio umano, in rilievi non distinguibili; è vero che tutti gli altri osservatori sulle tracce dello Schiaparelli, hanno delineato macchie pressoché uguali, ma come si produca la sintesi nell'occhio non è dato finora di sapere.



FIG. 1. Questa è la 11ª fotografia scattata dal *Mariner* da 12.500 km (1 cm = 20 km).

Di un altro argomento oramai superato ho avuto occasione di parlare quasi mezzo secolo fa³ voglio dire della geminazione dei *canali*, suscitando l'indignazione degli astronomi italiani i quali gridarono all'eresia, perché osavo affermare che lo Schiaparelli aveva osservato Marte con le immagini sfocate. I difensori dello Schiaparelli, che lo esaltavano senza conoscer bene il grande valore della sua opera, dimenticavano che l'occhio astigmatico, non opportunamente corretto, vede forzatamente le immagini sfocate, in un senso o nell'ortogonale; lo stesso Schiaparelli, in un'epoca in cui quel difetto oculare non era stato studiato ancora a fondo, e tanto meno si ricorreva a lenti cilindriche o toriche per correg-

¹ V. CERULLI, *Saggio di interpretazione ottica delle sensazioni aerospiche. Nuove Osservazioni di Marte* nelle «Pubbl. dell'Osservatorio di Collurania in Teramo», 3, 1 (1898) ib, (1898-99).

² «Memorie dell'Accademia dei Lincei», 1881, CCLXXVIII.

³ Il fenomeno della goccia nera e l'astigmatismo, «Pubbl. Oss. astr. di Bologna», 1, 3, 1922. [NdR: riprodotto sul «Giornale di Astronomia», 30, 1, 2004, p. 48 e disponibile online (anche in inglese) a: <http://www.bo.astro.it/~biblio/Horn/dicembre3.htm>]



ticolare in quelle delle stelle doppie, di occultazioni etc.⁵

Così l'era delle ispezioni visuali di Marte si è chiusa col prodigioso viaggio del *Mariner*; resta però da chiarire un problema di ottica fisiologica, vale a dire perché i particolari più minuti, rilevati dalle fotogra-

fie da presso, si traducano in quelle macchie uniformi, viste per la prima volta nel 1636 da Francesco Fontana,⁶ in un'unica *pilula*, e constatate dopo da innumerevoli osservatori: dopo più di tre secoli di osservazioni visuali la FIG. 1 ha finalmente svelato il vero volto del Pianeta!

⁵ Vedi «Pubbl. Oss. di Bologna», I, 4, a p. 80 e sgg.: *Le suture della lente cristallina e l'effetto della loro opacità sulla visione*.

⁶ F. FONTANA, *Novae coelestium terrestriumque rerum observationes*, Napoli, Gaffaro, 1646.

Guido Horn d'Arturo (Trieste, 13 feb. 1879 - Bologna, 1 apr. 1967) è stato professore di Astronomia e direttore dell'Osservatorio Astronomico Universitario di Bologna dal 1921 al 1954, con una drammatica sospensione dovuta alle leggi razziali, in quanto ebreo. Nel 1931 fondò la rivista *Coelum*, che diresse fino alla morte (si veda il fascicolo monografico del *Giornale di Astronomia* del 2019, n. 2, Gli "ASTRI" di Horn. *L'astronomo che ha progettato il Futuro* a cura di Rossella Spiga, con gli Atti del convegno tenuto a Catania per la dedicazione del telescopio ASTRI a Horn d'Arturo, progenitore dei telescopi a tasselli).

L'archivio ritrovato di Emilio Bianchi: un astronomo tra scienza e memoria

Roberto Danizi

INAF · Osservatorio Astronomico di Roma, Italia

Caro professore, le invio alcuni ricordi del nonno Emilio; sono sicura che troveranno quella sistemazione che io tanto desidero. La ringrazio anche per il suo interessamento così caloroso... Con i più cordiali saluti, Maria Josè Nicoletti. (FIG. 1)

CON queste parole, in una lettera dal tono affettuoso e personale, Maria Josè Nicoletti affidava al professor Roberto Buonanno, allora direttore dell'Osservatorio Astronomico di Roma, l'archivio privato del nonno Emilio Bianchi. Una donazione importante, destinata a custodire la memoria di uno dei protagonisti della storia dell'astronomia italiana.

L'archivio, rimasto per decenni nei depositi dell'Osservatorio, è tornato alla luce solo di recente. Un documento di accompagnamento (FIG. 2), che ne elencava sommariamente il contenuto, si è rivelato prezioso per ricostruirne l'identità e il valore. A volte, anche carte all'apparenza modeste possono aprire squarci inattesi sulla storia della scienza.

Emilio Bianchi si laureò in fisica all'Università di Padova nel 1898. Iniziò come assistente volontario all'osservatorio della stessa città, per poi passare alla stazione astronomica di Carloforte, in Sardegna. La sua carriera lo portò quindi a Roma, presso l'Osservatorio del Collegio Romano, di cui divenne direttore incaricato nel 1919, dopo la morte di Elia Millosevich.

Dal 1922 fino alla morte guidò l'Osservatorio Astronomico di Brera, a Milano, avviando tra l'altro il trasferimento della sezione osservativa nella nuova sede di Merate. Figura di rilievo nel panorama scientifico, fu nominato Accademico d'Italia, presi-

[★] 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.

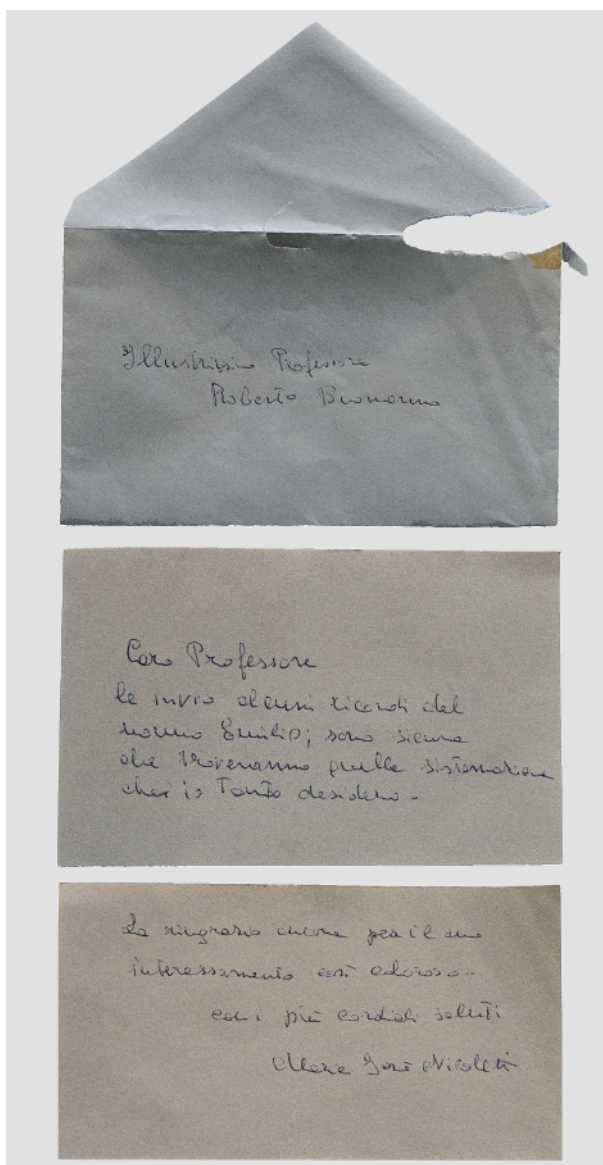


FIG. 1. IL DOCUMENTO: lettera di Maria Josè Nicoletti indirizzata al Prof. Roberto Buonanno (ASOAR, Fondo Emilio Bianchi, B.1 nr. Prog. 01, 2005).

SPEED S.a.s.
Via Salaria, 7 - 00125 CATANIA (CT) - Italia -
Tel. 095/470224 Fax 095/470224
Partita IVA 03543430870

Doc. di nr. **191** del **15/03/2005**

Destinatario
OSSERVATORIO ASTRONOMICOMI DI ROMA
VIA FRASCATI 33
00040 MONTE PORZIO CATONE - ROMA

Destinazione
OSSERVATORIO ASTRONOMICOMI DI ROMA
VIA FRASCATI 33
00040 MONTE PORZIO CATONE - ROMA

Cod. Articolo	Descrizione	Um.	Q.tà
	QUADRO - DOCUMENTI		2

CONSEGNA TASSATIVA
17/03/05
tel 06/94 286409
06/94 286410
FRAGILE

NO PIANO - GIACENZA A
CARICO DEL DESTINATARIO

Incaricato del trasporto		Causale del trasporto		Firma/Incarico del trasporto	
Bertolini S.p.A.		SPEDIZIONE			
N. coll.	Aspetto esteriore del bene	Foto	Data e ora inizio trasporto	Firma destinatario	
2	Carlotti	FRANCO	15/03/2005 16:16		

MITT. ORIG. NICOLETTI MARIA JOSE¹ VIA CASERTA 21 - CATANIA

Pag. 1

Vi preghiamo di controllare l'Vi. dei anagrafici e la Partita IVA. Non ci rendiamo responsabili di eventuali errori.

FIG. 2. IL DOCUMENTO: bolla di accompagnamento (ASOAR, Fondo Emilio Bianchi, B.1 nr. Prog. 02, 2005).

dente del Comitato per l'Astronomia e la Geodesia del CNR e della Società Astronomica Italiana. Negli anni 1929-1930 fu tra i protagonisti della realizzazione del Planetario di Milano, che ancora oggi rappresenta un punto di riferimento per la divulgazione astronomica.

Nel 1939, in seguito alla visita di Hitler in Italia e alla donazione di un grande telescopio Zeiss, destinato a un nuovo osservatorio nazionale che sarebbe sorto a Monte Porzio Catone, Mussolini chiamò Emilio Bianchi a supervisionare il progetto scientifico. Tutto lasciava pensare che ne sarebbe stato il futuro direttore, ma il destino fu diverso: Bianchi morì poco dopo, senza poter coronare quell'impresa.

Il materiale donato dalla signora Nicoletti forma oggi il *Fondo Emilio Bianchi*¹ presso l'Archivio storico dell'Osservatorio di Roma (da qui in avanti ASOAR) e comprende 106 unità archivistiche, suddivise in quattro grandi sezioni: "documenti cartacei", "fotografie", "medaglie e onorificenze", "monografie". Si tratta di un patrimonio ricchissimo, che non solo illumina la carriera scientifica di Bianchi, ma ci restituisce anche l'uomo nella sua dimensione più intima.

¹ Il più corposo nucleo di materiale di Emilio Bianchi, che copre tutti i periodi della sua vita professionale, si trova presso l'Archivio storico dell'Osservatorio astronomico di Brera, *Fondo Emilio Bianchi*. (<https://brera.inaf.it/biblioteca-e-archivio-storico/inventario-darchivio-brera/>)



FIG. 3. Ritratto di Emilio Bianchi eseguito da Italo Gratton; sotto, il dettaglio con la firma e la data (ASOAR, Fondo Emilio Bianchi, B.1 nr. Prog. 03, 1938).

Le fotografie, ad esempio, raccontano la sua vita familiare, con immagini che lo ritraggono insieme ai suoi cari.

Tra i pezzi più interessanti spicca un ritratto a tempera del 1938 (FIG. 3), eseguito dall'artista Italo Gratton, fratello del celebre astrofisico Livio Gratton. Scoperto solo di recente come parte integrante dell'archivio, il dipinto era stato inizialmente confuso con le opere conservate nel fondo iconografico dell'Osservatorio di Roma, mentre ora è stato spostato nel *Fondo Emilio Bianchi*. Stando al racconto del professor Giampaolo Gratton (figlio di Livio) che ho potuto incontrare per ricevere chiarimenti sul ritratto, Italo Gratton lavorava come assicuratore, ma la passione per la pittura lo portò a dedicarsi soprattutto verso quest'arte, specializzandosi in ritrattistica e paesaggistica. Suo fi-



FIG. 4. Fotografia raffigurante Emilio Bianchi conservata nell'Archivio storico di Brera.

glio, Piero Gratton, diventerà noto per aver creato il celebre "lupetto" stilizzato della squadra di calcio A. S. Roma: una curiosa connessione tra arte, sport e astronomia.

Probabilmente, il ritratto è stato eseguito partendo da una fotografia conservata nell'Archivio storico di Brera (FIG. 4). Il ritratto riprende fedelmente la posa della fotografia; a un attento confronto, tuttavia, si può notare come nel ritratto eseguito da Gratton manchino le numerose decorazioni appuntate al petto di Bianchi, relative all'Ordine della Corona d'Italia e all'Ordine dei Santi Maurizio e Lazzaro (FIG. 5). A queste si aggiungono i diplomi che attestano il titolo di Accademico Pontificio e quello di socio dell'Accademia dei Lincei (FIG. 6). Questi documenti non sono solo simboli di prestigio: rappresentano la rete di relazioni scientifiche e istituzionali che Bianchi seppe costruire, testimoniando il ruolo centrale che ebbe nella comunità astronomica e nella società del suo tempo.

L'archivio rivela anche aspetti inconsueti per un astronomo, ma che furono invece una parte im-



FIG. 5. A sinistra, onorificenza relativa all'Ordine dei Santi Maurizio e Lazzaro (ASOAR, Fondo Emilio Bianchi, B.1 nr. Prog. 04, 1940). A destra, Onorificenza relativa all'Ordine della Corona d'Italia (ASOAR, Fondo Emilio Bianchi, B.1 nr. Prog. 05, 1922).

portante dell'esperienza e della carriera di Emilio Bianchi. Nel 1913, ad esempio, fu chiamato a insegnare presso l'Istituto Centrale Aeronautico, occupandosi di navigazione aerea e di collaudo statico e dinamico dei dirigibili militari; incarico proseguito poi anche durante la Grande guerra. Alcune fotografie (FIG. 7) documentano la costruzione di uno



FIG. 6. Onorificenze relative alla carica di Accademico Pontificio (a sinistra) e Accademico dei Lincei (a destra) (ASOAR, Fondo Emilio Bianchi, B.1 nr. Prog. 06, 1940).

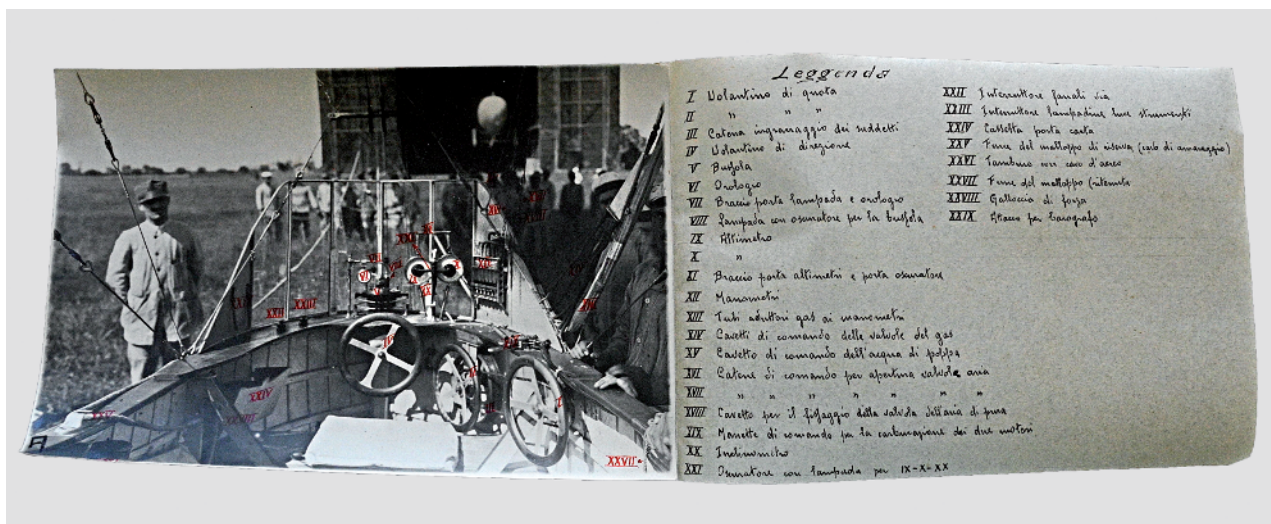
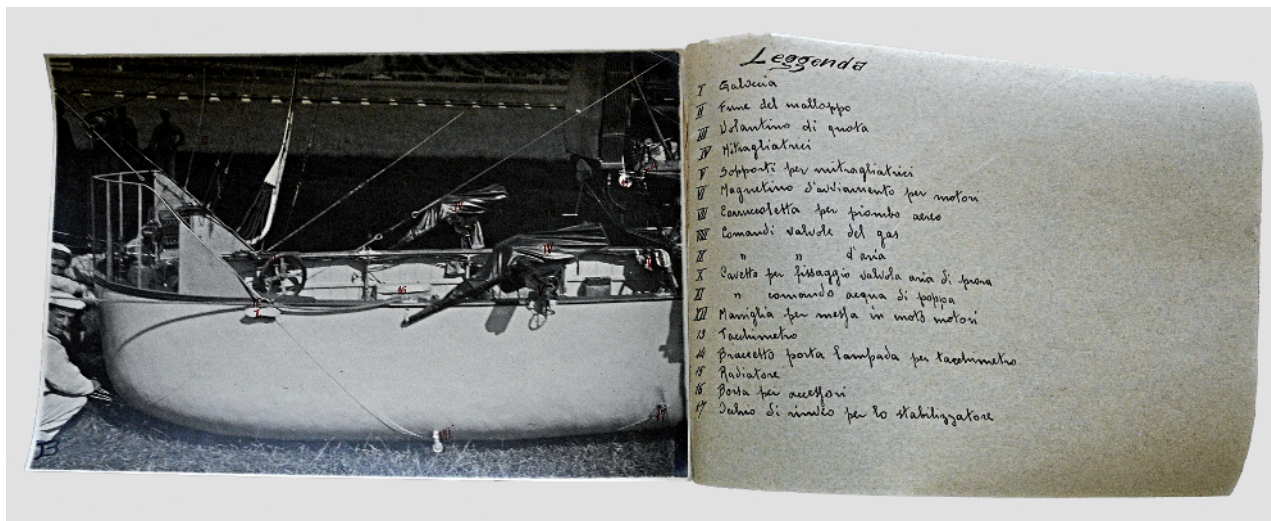


FIG. 7. Fotografie relative alla costruzione del dirigibile bellico (ASOAR, Fondo Emilio Bianchi, B.1 nr. Prog. 10, c.a 1913).



FIG. 8. Copertina dell'album fotografico relativo ai funerali solenni di Emilio Bianchi e un dettaglio dei funerali (ASOAR, Fondo Emilio Bianchi, B.1 nr. Prog.17, 1941).

di questi aeromobili, mostrando come l'astronomia e la fisica potessero intrecciarsi con le tecnologie aeronautiche emergenti.

Altre immagini raccontano invece la fondazione e la costruzione della sede di Merate, una delle opere più significative della sua direzione e che aprì an-

che all'Osservatorio di Brera la possibilità di intraprendere le nuove ricerche astrofisiche.²

² Sulla nascita della sede di Merate, vedi in questa stessa rubrica: A. MANDRINO, *Cosa c'era prima?*, «Giornale di Astronomia», 51, 1, 2025, pp. 40-43, e referenze all'interno.

Infine, un album fotografico conserva le immagini dei suoi funerali solenni a Brera nel 1941: un tributo che testimonia il rilievo nazionale della sua figura (Fig. 8).

Questa donazione, a lungo dimenticata e oggi finalmente riscoperta, è un tassello prezioso della storia dell'astronomia italiana. Il *Fondo Emilio Bianchi* ci offre non solo la possibilità di seguire le tappe della sua carriera scientifica, ma anche di entrare nella dimensione personale dell'uomo.

Grazie alla donazione della famiglia e al paziente lavoro di ricostruzione archivistica, oggi possiamo ripercorrere la storia di Emilio Bianchi in tutta la sua complessità: scienziato, docente, direttore di osservatori, ma anche uomo di relazioni, padre e nonno.

Il suo archivio non è solo un insieme di carte e oggetti, ma un ponte tra passato e presente, capace di far rivivere non soltanto la storia di un grande astronomo, ma anche quella di un'epoca in cui la scienza e la società italiana si muovevano insieme, tra ambizioni, sogni e trasformazioni profonde.

Referenze bibliografiche

- A. ALTAMORE, N. PTITSYNA, *L'Osservatorio del Tuscolo e i telescopi di Mussolini*, «Giornale di Astronomia», 42, 2, 2016, pp. 17-21.
- G. ARMELLINI, *L'Osservatorio Astronomico di Roma*, in R. *Osservatorio Astronomico di Roma sul Campidoglio, contributi scientifici*, Roma, Bardi, 1930.
- Bianchi, Emilio, in *Enciclopedia Italiana*, 1 Appendice, Roma, Istituto dell'Enciclopedia Italiana, 1938.

- E. BIANCHI, *A proposito del nuovo Osservatorio di Roma*, Pavia, Tipografia Legatoria Mario Porzio, 1930.
- E. BIANCHI, *Il nuovo Osservatorio Astronomico Nazionale del Tuscolo a Roma*, «Rivista di Fisica, Matematica e Scienze Naturali», 1939.
- R. BUONANNO, *Il cielo sopra Roma: i luoghi dell'astronomia*, Milano, Springer, 2008.
- L. GRATTON, «Memorie della Società Astronomica Italiana», XXXII, Industrie Lito-tipografiche Mario Porzio, 1961.
- G. MONACO, *L'Astronomia a Roma dalle origini al Novecento*, Monotipia Cremonese, 2001.
- E. POZZATO, *Bianchi, Emilio*, «Dizionario Biografico degli Italiani», 10, 1968.
- R.M. STROLLO, *L'Osservatorio Astronomico del Tuscolo, rilevamento e progetti*, Roma, Aracne, 2008.
- F. ZAGAR, *Emilio Bianchi nel ventennio della morte*, Pavia, Industrie Lito-tipografiche Mario Porzio, 1961.

IL DOCUMENTO (FIGG. 1 e 2)

La lettera con cui Maria Josè Nicoletti, nipote di Emilio Bianchi, accompagnava i documenti del nonno donati all'Osservatorio di Roma e bolla di accompagnamento degli stessi. (ASOAR, *Fondo Emilio Bianchi*)

Roberto Danizi, laureato in Scienze dei Beni Culturali e in Archeologia presso l'Università di Roma Tor Vergata, è assegnista di ricerca presso l'INAF-Osservatorio Astronomico di Roma, dove si occupa della gestione, valorizzazione e tutela della biblioteca antica e moderna e dell'Archivio storico dell'Osservatorio. Collabora inoltre con il settore Didattica e Divulgazione gestendo la rubrica "Giovedì Storico" sulle pagine social dell'osservatorio astronomico di Roma.

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.

Cavitazione, ebollizione e volo aereo

Annibale D'Ercole

LA FIG. 1 ci mostra l'usura della pala di un'elica nautica, ovvero un'elica che spinge un natante o una nave. Il deterioramento è notevole (anche nel caso di eliche di acciaio) e consiste nella formazione di numerose piccole cavità che si producono sul lato delle pale rivolte verso l'imbarcazione. Questo logoramento è dovuto alla cosiddetta *cavitazione* che consiste nella formazione – a seguito della rotazione dell'elica – di bolle di vapore acqueo destinate ad implodere così violentemente da produrre l'erosione illustrata in FIG. 1 e la conseguente riduzione di efficienza dell'elica. Per comprendere come si realizza la cavitazione è necessario capire dapprima due fenomeni (apparentemente) scollegati tra loro, ossia l'*ebollizione* dell'acqua e il funzionamento di un'elica (a sua volta collegato, come vedremo, a quello di un'ala di aeroplano).

Cominciamo dal primo fenomeno. Consideriamo una pentola – posta a livello del mare – piena d'acqua a temperatura ambiente (p.e. 25 °C) e con una pressione pari a quella atmosferica [$\approx 10^5$ Pa (pascal)]. Entro un certo tempo la pentola resterà vuota a causa dell'*evaporazione*, un fenomeno che coinvolge le molecole alla superficie dell'acqua e che si verifica per ogni temperatura superiore a 0 °C. Per via dell'agitazione termica, le molecole d'acqua a 25 °C si muovono e si urtano con una velocità di circa 600 m/s (2160 km/h!); questa, tuttavia, è una velocità media e, a causa dei reciproci urti, ad ogni istante vi sono molecole più lente e altre più veloci. Tra queste, quelle che subiscono urti parti-

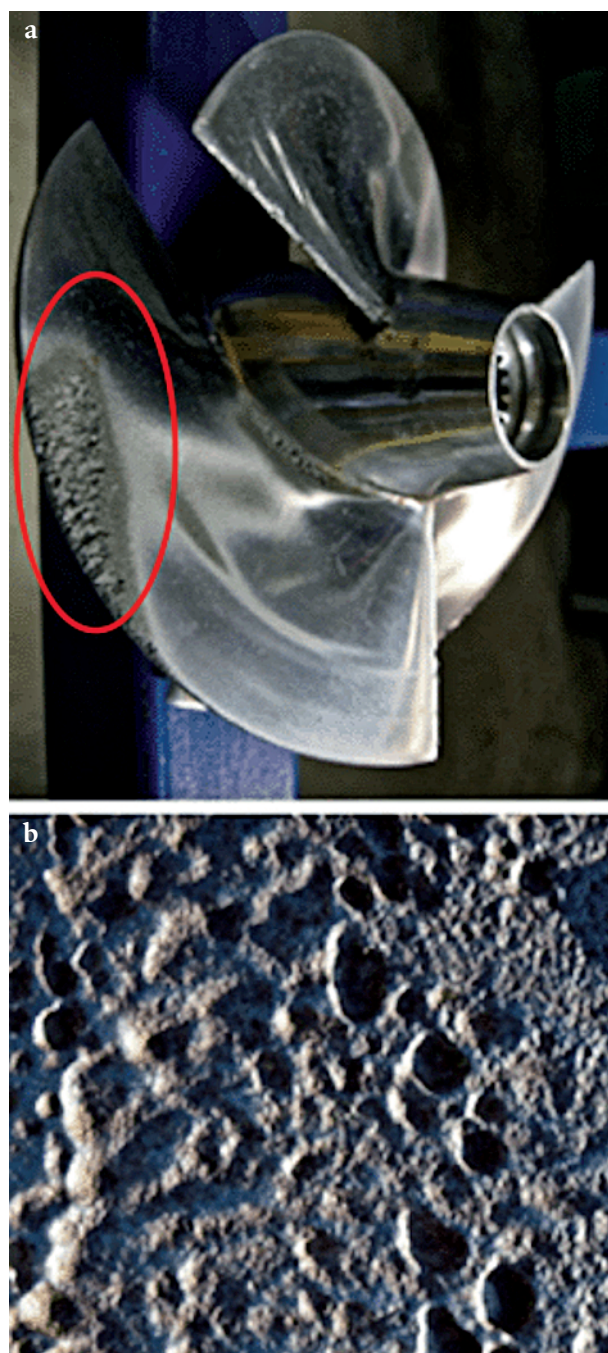


FIG. 1. a) Pala di elica danneggiata dalla cavitazione. b) Ingrandimento dell'area danneggiata.

★ 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>.

colarmente violenti acquisiscono un'energia cinetica tale da potersi svincolare dalle forze intermolecolari sollevandosi a formare *vapore*.

Una volta acceso il fornello sotto la pentola, la temperatura dell'acqua e l'energia cinetica delle molecole aumentano producendo un maggiore tasso di evaporazione (ossia quantità di vapore prodotta nell'unità di tempo). In linea di principio si potrebbe essere portati a credere che non vi sia limite a questo andamento e che al crescere della temperatura – qualunque essa sia – l'evaporazione possa continuare a verificarsi sempre e solo in superficie. Ma la nostra esperienza quotidiana ci dice che non è così. Raggiunti i 100 °C, all'evaporazione si aggiunge bruscamente un secondo meccanismo che coinvolge tutta l'acqua e non solo la sua superficie: l'ebollizione.¹ Perché scatta questo processo? E come funziona?

Anche tra le molecole che si trovano al centro del volume occupato dall'acqua vi sono quelle con un'energia cinetica tale da potersi "svincolare" dai legami intermolecolari. Tuttavia, neanche le più veloci tra queste molecole hanno la possibilità di evaporare perché, non trovandosi in superficie, sono circondate da un numero esorbitante di altre molecole ($3,3 \times 10^{12}$ in ogni cm^3) con cui hanno urti incessanti (circa 10^{12} ogni secondo). Il loro percorso è estremamente caotico e a zig-zag e lo spostamento netto dalla posizione iniziale è molto piccolo; esse impiegano circa 2 ore per allontanarsi di 1 centimetro. Di conseguenza necessitano di un tempo eccessivamente lungo per giungere alla superficie ed evaporare. Tuttavia, quando la temperatura raggiunge i 100 °C, "scatta" l'ebollizione; il riscaldamento aumenta la velocità delle molecole le quali hanno in maggior numero la possibilità di superare le reciproche forze di legame distanziandosi e giungendo allo stato gassoso. Questo processo non è uniforme, e statisticamente vi sono punti in cui le molecole si distanziano maggiormente: in questi punti si creano così le bolle di vapore le quali, essendo più leggere del liquido, per il principio di Archimede risalgono in superficie dove scoppiano. Queste bolle possono svilupparsi perché la loro pressione è uguale a quella dell'acqua; ipotetiche bolle che si formassero a temperature più basse avrebbero pressioni minori e verrebbero schiacciate sul nascere. Nel presente esempio la temperatura di 100 °C rappresenta la *temperatura di ebollizione* in caso di pressione atmosferica. Per una diversa pressione abbiamo una diversa temperatura di ebollizione, come mostriamo qui di seguito.

Nell'esempio della pentola abbiamo ottenuto l'ebollizione mantenendo fissa la pressione (a livello atmosferico) e aumentando la temperatura fino a 100 °C. Ma l'ebollizione può essere ottenuta anche seguendo la via opposta, ossia tenendo fissa la temperatura dell'acqua (p.e. a 25 °C) e riducendo la pressione fino a quando l'acqua comincia a bollire

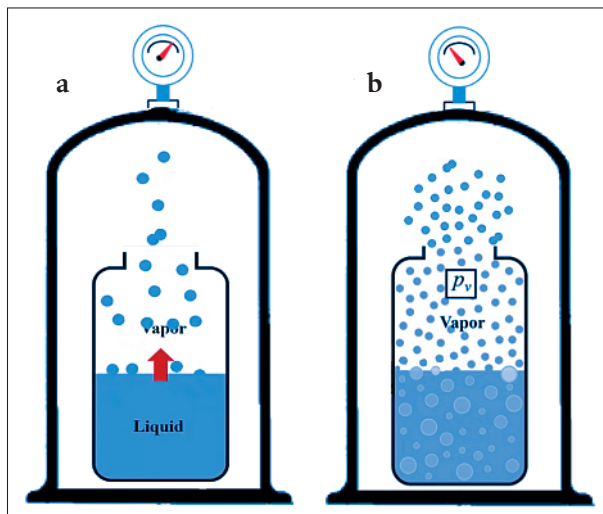


FIG. 2. a) Recipiente contenente acqua posto sotto una campana di vetro (dotata di manometro) in cui pressione e temperatura sono uguali a quelle dell'ambiente esterno. b) Riducendo la pressione all'interno della campana tramite una pompa aspirante (non mostrata in figura) l'acqua bolle a temperatura ambiente.

(in verità, come vedremo, questa seconda via è quella che più ci interessa per descrivere la cavitazione). Si consideri l'esperimento illustrato in FIG. 2. Si pone un contenitore con dell'acqua sotto una campana di vetro; inizialmente i valori di pressione e temperatura sono gli stessi all'interno e all'esterno della campana, e l'acqua evapora normalmente (FIG. 2a). Estruendo dalla campana aria (e vapore) tramite una pompa, la pressione diminuisce fino ad arrivare al 3% di quella atmosferica; a questo punto l'acqua (la cui temperatura è rimasta invariata) comincia a bollire (FIG. 2b). Infatti, data la bassa pressione, le molecole – sia pure a 25 °C – sono in grado di "slegarsi" l'una dall'altra formando bolle di vapore la cui pressione è uguale a quella dell'acqua e possono dunque perdurare fino a raggiungere la superficie.

Dai due esempi precedenti risulta chiaro che ad ogni prefissato valore di pressione corrisponde un preciso valore di temperatura a cui l'acqua bolle: ogni coppia di tali valori individua un cosiddetto *punto di ebollizione*. La formula che collega la temperatura e la pressione di ebollizione dell'acqua (derivata empiricamente e valida nell'intervallo $0\text{ °C} < t \leq 100\text{ °C}$), graficata in FIG. 3, è data da²

$$P = 618.78 \times e^{\frac{17,271}{237,3 + t}} \text{ Pa.} \quad (1)$$

Possiamo ora abbandonare (momentaneamente) il fenomeno dell'ebollizione e dedicarci alla propulsione di imbarcazioni e navi. Per quasi tutta la storia umana, il trasporto su nave è stato ottenuto tramite remi e vele. A partire dal XIX secolo si realizzarono battelli con coppie di ruote a pale poste

¹ L'insieme di evaporazione ed ebollizione è detta *vaporizzazione*.

² Il calcolo di questa pressione presenta non poche difficoltà. Vari autori hanno escogitato formule semplificate (alquanto simili tra loro) che ne agevolano il calcolo. Noi ne abbiamo riportata una a titolo di esempio.

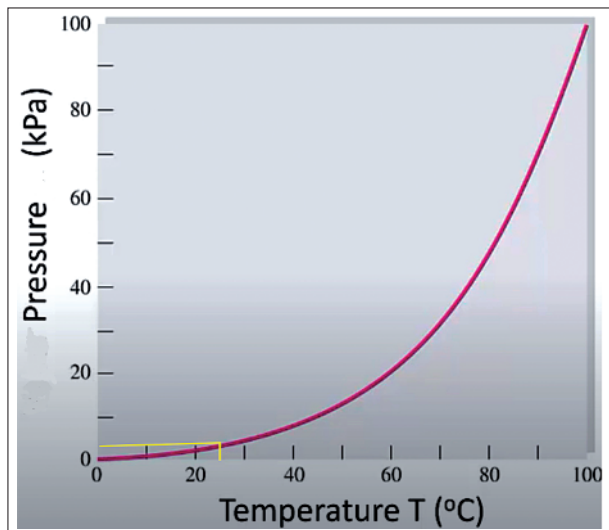


FIG. 3. Grafico ottenuto mediante l'eq. (1) in cui la pressione del punto di ebollizione è mostrato in funzione della temperatura di ebollizione. Com'è evidente, l'acqua bolle a 100 °C alla pressione atmosferica ($\sim 10^5$ Pa), mentre le sono sufficienti 25 °C per bollire ad una pressione pari al 3% di quella atmosferica (linee gialle).

lateralmente – o con un'unica ruota posizionata a poppa – mosse da una macchina a vapore. Questa soluzione si mostrò utile per percorrere le placide acque di fiumi navigabili ma inadatta per affrontare il moto ondoso in mare aperto. Si ricorse allora a un'invenzione risalente al III secolo a.C., ossia la cosiddetta *vite di Archimede*, ideata per trasportare l'acqua al fine di irrigare o drenare i campi. Si compone di una superficie elicoidale che si avvolge spiraleggiando attorno ad un asse centrale collocato all'interno di un tubo; ruotando, la vite sposta l'acqua nel tubo (FIG. 4a). Posta al di sotto di una nave in posizione orizzontale, la vite genera un flusso d'acqua che si allontana dalla poppa (FIG. 4b) producendo, per il *principio di azione e reazione* (la terza legge di Newton), una spinta della nave in direzione della prua (sostanzialmente quel che succede con un missile che è spinto in avanti per via del getto di gas espulso in direzione opposta). Questa soluzione si dimostrò efficace per sospingere una nave, ma una svolta importante si verificò per caso nel 1835. Durante una prova la vite venne danneggiata casualmente e gran parte andò persa mentre il "mozzicone" rimanente restò saldamente attaccato all'asse di rotazione. Risultò che in queste condizioni le prestazioni miglioravano perché una vite più corta risente di minore resistenza.

Questa scoperta portò allo sviluppo dell'elica moderna che è costituita da un corto cilindro su cui sono poste delle pale, come mostrato in FIG. 5. In questa figura osserviamo che l'elica è *destrorsa* (ossia gira in senso orario se vista dall'estremità del mozzo) e pertanto le pale – in virtù del loro attacco diagonale al mozzo – durante la rotazione spingono l'acqua creando una pressione positiva sulla loro faccia rivolta contro la direzione di marcia (a sinistra in figura). Contemporaneamente, sull'altra faccia (detta *dorso*) l'acqua viene aspirata provocando una

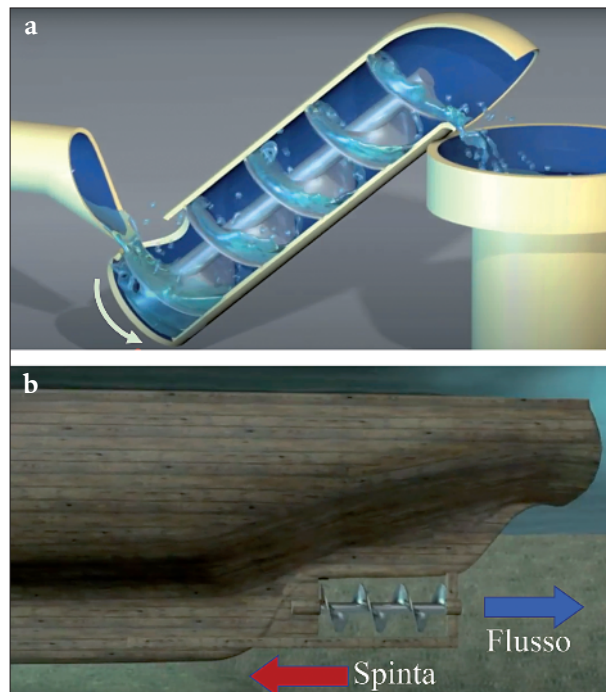


FIG. 4. Vite di Archimede. a) Attraverso la rotazione della vite nel tubo si raccoglie una certa quantità d'acqua che avanza finché, arrivata in cima, non viene scaricata in un serbatoio di immagazzinamento. La freccia mostra il senso di rotazione. L'elica si avvolge attorno all'asse mantenendo un angolo costante. b) Una vite immersa in acqua orizzontalmente e collegata all'“albero motore” di una nave ruota producendo un flusso d'acqua che si allontana dalla poppa. Per il principio di azione e reazione si verifica una spinta della nave in direzione opposta.

depressione.³ Dunque, l'elica aspira l'acqua “alle sue spalle” e la spinge lontano dalla poppa generando, per reazione, una spinta propulsiva – anche detta *portanza* – in direzione della prua (FIG. 5).

L'azione di un'elica è assai più complessa di quanto qui accennato, e ha molti aspetti in comune con il volo aereo (a cominciare dal termine “portanza”). A questo argomento è dedicato il livello avanzato. Nel presente livello ci è sufficiente sapere della formazione di una depressione sul dorso delle pale, giacché tale depressione è all'origine della cavitazione che ora ci accingiamo a trattare.

Dall'esempio esaminato e illustrato precedentemente (FIG. 2) sappiamo che quando la pressione diminuisce al di sotto del punto di ebollizione l'acqua comincia a bollire. Questo è effettivamente quello che accade sul dorso delle pale di un'elica. Le bolle di vapore si muovono successivamente lungo la superficie trascinate dal flusso verso zone dove la pressione è maggiore (FIG. 6) e dove, pertanto, implodono violentemente (FIG. 7). Il ripetuto collasso di queste bolle sulla superficie (o nelle vicinanze) delle pale causa un'erosione dell'elica che ne riduce la spinta e, di

³ Grosso modo, la situazione non è molto diversa da quello che accade utilizzando un remo. Il lato che spinge l'acqua crea una sovrappressione davanti a sé, mentre sul lato posteriore si genera una depressione per via dell'acqua che è stata spostata dal movimento del remo. Si crea allora un flusso d'acqua – un risucchio – dalle zone circostanti in direzione del lato posteriore della pala.

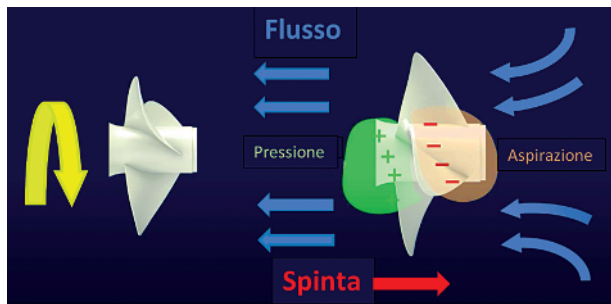


FIG. 5. A sinistra è rappresentata (di profilo) un'elica con tre pale. Ciascuna pala ricorda un breve tratto della vite di Archimede che si avvolge attorno all'asse spiraleggiando. Infatti, l'attacco dell'elica al mozzo non è parallela alla circonferenza di quest'ultimo, ma forma con essa un angolo. L'elica è posizionata a poppa della nave (posta a destra dell'elica ma non rappresentata in figura). Sul perché le pale non sono patte ma "distorte" si veda il livello avanzato. Come mostrato nello schema a destra, le pale sono studiate in modo che, con la loro rotazione (nella marcia avanti) creino una pressione negativa sul proprio dorso (area marrone) ed una pressione positiva (area verde) sull'altra faccia. L'azione combinata di queste due pressioni permette all'elica di aspirare l'acqua dal lato prodiero e creare un flusso in direzione opposta all'imbarcazione (freccie azzurre). Per la terza legge di Newton si crea una spinta in avanti dell'imbarcazione (freccia rossa).

conseguenza, il rendimento. Le implosioni producono inoltre un rumore subacqueo particolarmente dannoso per i sottomarini militari in quanto facilita la loro individuazione (mediante il *sonar*).

Vediamo meglio come delle "innocue bollicine" delle dimensioni dell'ordine di $30\ \mu\text{m}$ ($30 \times 10^{-6}\ \text{m}$) possano recare tanto danno. Quando la bolla, spostandosi, si ritrova in un ambiente in cui la pressione è maggiore della propria, la sua crescita si interrompe e assume una forma obolata perché la pressione dell'acqua che agisce sul suo lato più vicino alle pale è minore di quella presente sul lato opposto. Su quest'ultimo lato la pressione deforma la zona centrale della superficie della bolla creando un'introflessione attraverso cui l'acqua si incanala fino a raggiungere il lato opposto da cui fuoriesce formando un *microjet* che va a colpire la superficie della pala (FIG. 7). Data la differenza di pressione tra il lato di entrata e quello di uscita, il *microjet* acquisisce velocità di centinaia di m/s ($\leq 1000\ \text{km/h}$) e, nell'impatto con l'elica, esercita una pressione di diverse migliaia di atmosfere ($\leq 10^9\ \text{Pa}$) capace di scalfire le superfici di acciaio e di generare un'onda d'urto che si propaga nell'ambiente circostante. Le pareti della bolla, che a questo punto ha un aspetto toroidale, collasano velocemente verso il centro creando una potente onda d'urto convergente che attraversa il vapore facendogli raggiungere pressioni dell'ordine di $10^9\ \text{Pa}$ e temperature che possono arrivare a $T \sim 20.000\ \text{K}$ (più alta della temperatura della superficie del Sole pari a $5.700\ \text{K}$); in questi casi estremi il collasso produce un istantaneo lampo luminoso.

L'intero "ciclo vitale" di una bolla – dalla formazione alla sparizione – è estremamente breve, dell'ordine dei millisecondi; la fase della formazione del jet e del collasso finale rappresenta un fugace evento della durata compresa tra i microsecondi e i

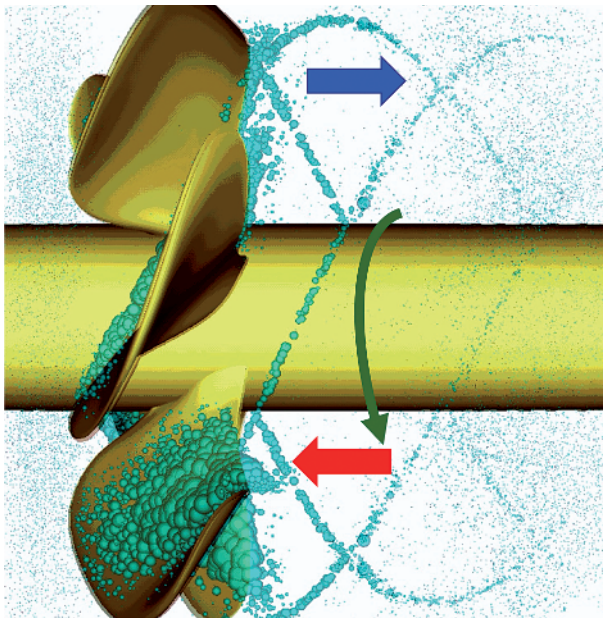


FIG. 6. Formazione di bolle di vapore (sferette azzurre) sul dorso delle pale. Le frecce blu e rosse rappresentano, rispettivamente, la direzione del flusso d'acqua e della spinta comunicata alla barca, mentre la freccia curva verde indica il verso di rotazione. Si noti che, nonostante la rotazione sia la stessa di FIG. 5, il flusso e la spinta sono invertiti perché è invertita la diagonale lungo cui le pale si saldano al mozzo.

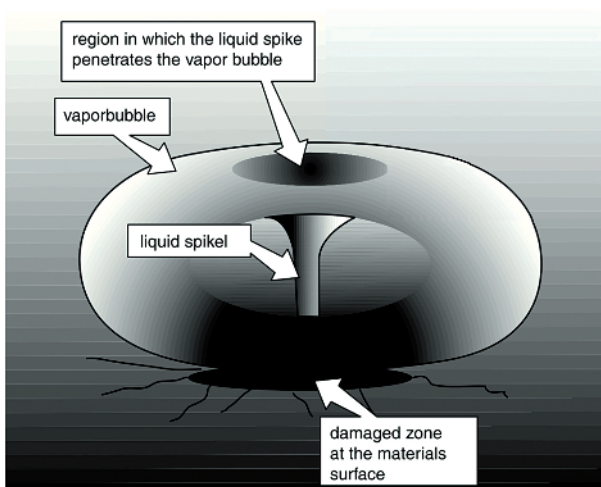
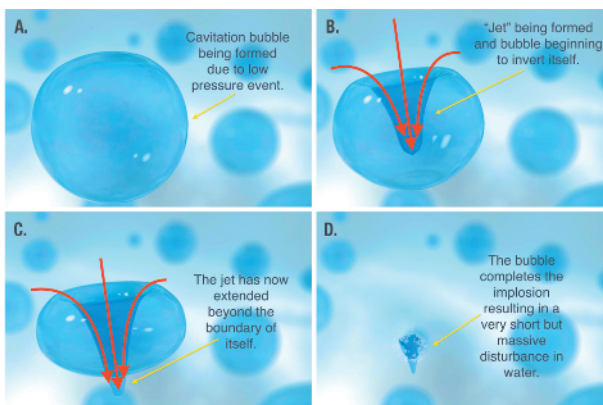


FIG. 7. I quattro pannelli superiori mostrano le varie fasi dell'implosione di una bolla; A) bolla sferica giunta alla sua massima espansione; B) intrusione della superficie all'interno della bolla e formazione di un jet (le frecce rosse ne indicano il flusso); C) sforamento del lato inferiore della superficie da parte del jet; D) collasso finale della bolla. Nel pannello grigio sono rappresentate in dettaglio le varie regioni della bolla nell'istante in cui il jet colpisce la superficie.

nanosecondi (i valori precisi delle varie grandezze dipendono da diversi fattori come – ad esempio – la pressione ambientale, le dimensioni della bolla e la distanza da una parete rigida).

La cavitazione non riguarda solo le eliche nautiche, ma interessa anche le reti idriche là dove presentino restringimenti come all’innesto di una pompa. Come vedremo nel livello avanzato, infatti, in tali restringimenti la pressione può diminuire fino al punto di ebollizione. Inoltre, le eliche delle pompe stesse sono soggette a cavitazione. Ma la cavitazione ha anche effetti benefici. L’energia rilasciata da bolle cavitanti può essere usata, p.e., per la pulizia e sterilizzazione di strumenti chirurgici, la frammentazione dei calcoli renali, il trattamento delle acque reflue, ecc.

Nel livello base ci siamo ripromessi di capire meglio il meccanismo che permette ad un’elica di creare un flusso d’acqua (nel caso di un’imbarcazione) o di aria (nel caso di un ventilatore). Una pala di elica fende l’aria durante la rotazione in maniera simile a come lo fa un’ala di aeroplano viaggiando lungo una traiettoria rettilinea. Per questo motivo abbandoniamo momentaneamente l’elica per concentrarci sul comportamento dell’ala. Tuttavia, prima di entrare nel vivo dell’argomento, riteniamo utile richiamare due concetti propedeutici a quanto diremo tra breve. Il primo si riferisce all’equazione di Bernoulli che discende direttamente dalla conservazione dell’energia. Consideriamo un piccolo elemento⁴ di fluido⁵ che abbia pressione p , densità ρ e velocità v . La traiettoria percorsa da questo elemento è detta linea di flusso. Se la corrente (e le linee di flusso che la compongono) impatta contro un ostacolo deflettendo dalla traiettoria originale, gli elementi di fluido subiscono una variazione di p e v (ma non di ρ perché stiamo considerando fluidi incompressibili). L’equazione di Bernoulli stabilisce, tuttavia, che la somma della pressione e dell’energia cinetica lungo ogni linea di flusso non varia:⁶

$$p + 0,5 \rho v^2 = c, \quad (2)$$

⁴ Una particella di fluido idealizzata è sufficientemente piccola da essere considerata quasi puntiforme, ma grande al punto di contenere un elevato numero di molecole.

⁵ Nella presente spigolatura intendiamo per fluido l’aria e l’acqua. Quest’ultima, essendo un liquido, è incompressibile e la sua densità ρ rimane costante. L’aria è un gas e quindi è soggetta a compressioni e rarefazioni che ne alterano la densità. Tuttavia, si può dimostrare che per velocità pari o inferiori a un terzo della velocità del suono (~ 340) m/s, ossia circa 1235 km/h) anche l’aria si comporta come un fluido incompressibile e pertanto la sua densità può considerarsi costante.

⁶ Una spiegazione intuitiva a livello microscopico di questa equazione è la seguente: le velocità delle molecole del fluido hanno una componente “disordinata” (ossia diretta in ogni direzione) responsabile della pressione e una componente “ordinata” responsabile della velocità del flusso macroscopico. Per la conservazione dell’energia (cinetica in questo caso), se una componente diminuisce l’altra deve aumentare. Una giustificazione macroscopica dell’equazione di Bernoulli è data nella didascalia di FIG. 8.

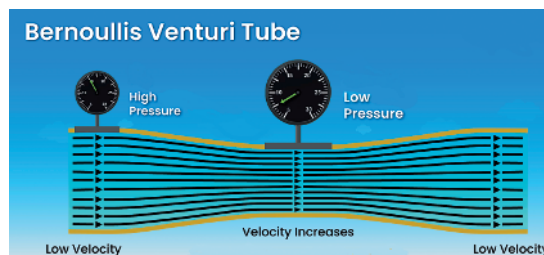


FIG. 8. Tubo di Venturi. Consideriamo il flusso stazionario di un fluido inviscido e incompressibile (le linee nere rappresentano linee di flusso). Per la conservazione della massa la quantità di fluido che ad ogni istante attraversa la sezione in entrata della condotta in figura deve essere pari a quella che attraversa una sezione della strozzatura. Dal momento che quest’ultima è inferiore alla prima, la velocità del fluido nella strozzatura deve necessariamente aumentare. La pressione, invece, diminuisce per l’equazione di Bernoulli [(eq. (2))]. Una giustificazione intuitiva di questo calo è data dal fatto che parte della pressione nel tubo con maggior sezione è spesa nello “spingere” il fluido nella strozzatura aumentandone la velocità per rispettare la conservazione della massa.

dove c è una costante.⁷ Un’applicazione della formula di Bernoulli è data dal tubo di Venturi illustrato in FIG. 8.

Il secondo concetto propedeutico è illustrato in FIG. 9. Se la risultante delle forze che agiscono su un elemento di fluido è nulla, secondo la prima legge di Newton esso si muoverà con velocità costante lungo una linea di flusso rettilinea. Se invece la linea è curva l’elemento di flusso è sottoposto a una forza centripeta. La situazione è analoga a quella di un sasso legato all’estremità di una corda e fatto roteare lungo una traiettoria circolare. Ad ogni istante il sasso “vorrebbe” liberarsi della corda e proseguire a velocità costante lungo la tangente al cerchio; ma la tensione della corda esercita una forza centripeta che costringe il sasso a curvare. Nel caso di un elemento di fluido la forza centripeta è data dalla differenza delle pressioni che agiscono su due lati opposti dell’elemento stesso.

Dalle FIGG. 8 e 9 notiamo due dettagli. Nelle regioni in cui le linee di flusso si addensano la velocità del flusso aumenta (e viceversa), e nelle regioni dove le linee di flusso curvano è presente un gradiente (ossia, una differenza) di pressione. Questi due dettagli ci torneranno utili ora che finalmente ci accingiamo a discutere del funzionamento di un’ala di aeroplano.

Ci sono due particolari punti di vista (o, per meglio dire, sistemi di riferimento) utilizzati per analizzare il flusso d’aria attorno a un’ala: quello di una persona a terra che vede l’aereo attraversare l’aria immobile, oppure quello del pilota secondo cui l’aereo è fermo e viene investito dall’aria che si muove alla velocità del velivolo ma in senso opposto

⁷ In verità l’equazione completa prevede anche la presenza dell’energia potenziale gravitazionale U : $p + 0,5 \rho v^2 + U = c$. Ma noi consideriamo solo flussi le cui variazioni di quota sono trascurabili, e dunque U non cambia e può essere inglobata in c .

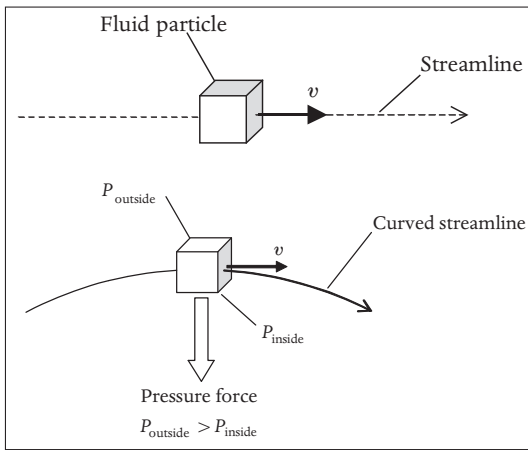


FIG. 9. Moto di un elemento di fluido (assunto cubico per semplicità) lungo una linea di flusso. Se le eventuali forze agenti sull'elemento danno una risultante nulla, quest'ultimo si muove a velocità costante lungo una linea di flusso rettilinea (prima legge di Newton). Se invece la linea di flusso è curva vuol dire che il cubetto è sottoposto a una forza centripeta (freccia bianca) dovuta alla differenza tra la pressione che si esercita sul lato superiore e quella che agisce sul lato opposto. Nel caso in figura la pressione sul lato superiore è maggiore di quella sul lato inferiore.

(come capita quando viaggiamo in automobile). In FIG. 10a è stato adottato questo secondo punto di vista. Come si vede, la base del profilo alare non è parallela al flusso d'aria imperturbato ma forma con esso il cosiddetto angolo d'attacco di cui parleremo più in là. Il flusso proveniente da sinistra si divide in due parti in prossimità dell'ala; la linea divisoria – detta linea di ristagno – è data da una linea di flusso che “va a sbattere” contro l'ala nel cosiddetto punto di ristagno in cui la velocità è nulla e la pressione è massima [per via dell'eq. (2)]. Questa pressione indirizza le linee di flusso verso il lato superiore o inferiore dell'ala a seconda che si trovino sopra o sotto la linea di ristagno. Si nota chiaramente che le linee di flusso a ridosso del “naso” dell'ala sono particolarmente ravvicinate; questo significa che in questa zona la velocità è elevata (può raggiungere anche il doppio della velocità dell'aereo). Le linee in prossimità della superficie alare ne seguono il profilo mentre quelle più in alto hanno curvature sempre meno accentuate e si intuisce che a una certa distanza – là dove l'atmosfera non è disturbata dal passaggio dell'ala – le linee di flusso tornano ad essere rettilinee e la velocità torna ad essere quella dell'aereo (cambiata di segno). Per quanto detto sopra, la curvatura delle linee indica la presenza di un gradiente di pressione; a partire dall'alto, la pressione decresce sempre più in direzione dell'ala all'aumentare della curvatura delle linee di flusso.⁸ È proprio il gradiente di pres-

⁸ La creazione di una depressione (e del suo gradiente) sul lato superiore dell'ala può essere compresa come segue. Come abbiamo notato, le linee di flusso a ridosso del “naso” dell'ala sono particolarmente ravvicinate e veloci; tuttavia esse si distanziano sempre più l'una dall'altra man mano che si avvicinano verso l'alto ad una zona in cui il vento non è stato perturbato dalla presenza del-

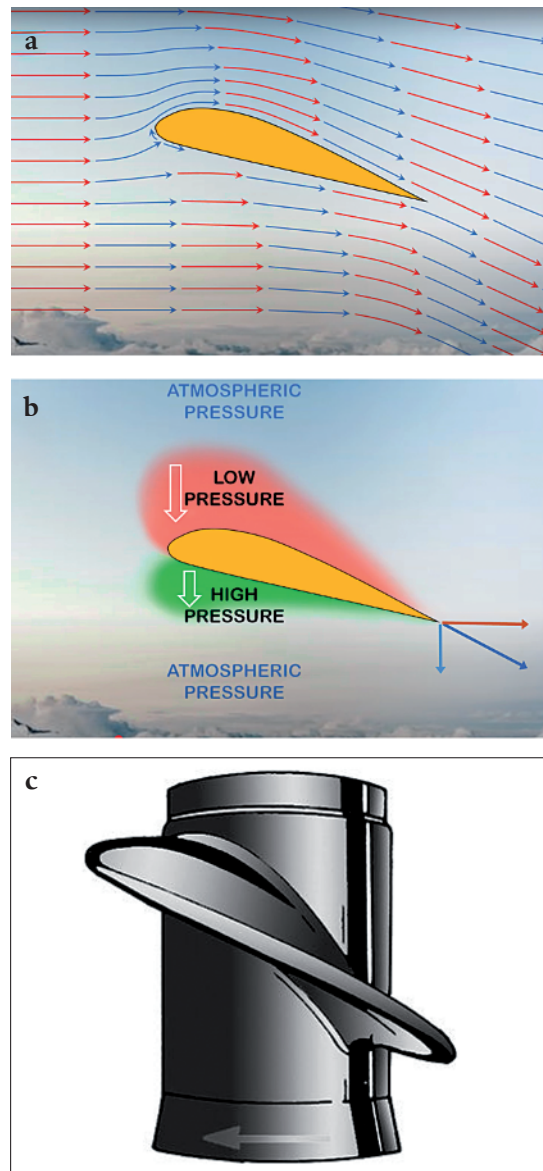


FIG. 10. Flusso attorno ad un profilo alare. a) La sagoma gialla rappresenta la sezione di un'ala di aeroplano. L'ala è investita da un vento le cui linee di flusso sono evidenziate dalle frecce rosse e azzurre che ne indicano la velocità. L'ala è inclinata e la sua base forma un angolo (non indicato esplicitamente in figura) con la direzione del vento imperturbato (indicata dalle frecce rosse a sinistra). Si nota una particolare linea di flusso che “cozza” contro l'ala nel cosiddetto punto di ristagno in cui la velocità è nulla e la pressione è massima. Questa linea di ristagno separa il flusso che passa sopra l'ala da quello che passa sotto, come indicato dalle due freccette ai lati del punto di ristagno; b) le due aree colorate in rosso e verde indicano, rispettivamente, regioni di bassa e alta pressione. Le due frecce contornate in bianco indicano la direzione dei gradienti di pressione indirizzati verso pressioni più basse. La freccia blu indica la velocità del flusso “in uscita” dalla coda dell'ala (come nel pannello a); la freccia rossa è la componente della velocità che si riferisce all'allontanamento orizzontale dell'aria (con un modulo simile a quello della velocità imperturbata a sinistra); la freccia azzurra illustra la componente della velocità dell'aria che viene spinta verticalmente in basso (naturalmente frecce simili a questa sono presenti lungo tutto il bordo inferiore dell'ala, ma sono state omesse per non “intasare” la figura); c) elica di imbarcazione posta verticalmente per evidenziare la somiglianza tra una sua pala e un'ala di aereo.

sione a spingere in basso le linee di flusso più vicine all'ala impedendo loro, una volta scavallato il "dosso", di distaccarsi dalla superficie alare (creando indesiderata turbolenza) e le "obbliga", invece, a scivolare lungo l'ala mantenendo un assetto laminare in cui strati infinitesimi di fluido scorrono gli uni sugli altri senza alcun rimescolamento. Naturalmente, l'alta velocità lungo queste linee di flusso contribuisce a mantenere bassa la pressione in base all'equazione di Bernoulli.

Le linee di flusso che scorrono sotto l'ala presentano anch'esse una curvatura concava. Questo vuol dire che, partendo sufficientemente in basso, dove l'aria non è perturbata dal passaggio dell'ala, – e muovendoci verso l'alto – troviamo pressioni sempre maggiori. Questo riduce la velocità delle linee di flusso sotto l'ala contribuendo all'aumento di pressione (sempre in base all'equazione di Bernoulli). In conclusione, il lato inferiore dell'ala sperimenta una pressione più alta di quella sul lato superiore. Questa differenza di pressione origina una forza diretta verso l'alto che agisce sull'ala (le aree a diversa pressione sono evidenziate in FIG. 10b). Tale forza è detta portanza e si oppone alla gravità consentendo all'aereo di non precipitare.

Vi è anche un secondo approccio al fenomeno della portanza basato sulla terza legge di Newton. Come si vede in FIG. 10a, l'ala induce una variazione della direzione del vento che in effetti viene sospinto diagonalmente verso il basso. In FIG. 10b la velocità di un elemento di fluido è scomposta in due componenti, una orizzontale – il cui modulo è all'incirca quello del vento imperturbato – e una verticale. L'intera l'ala spinge in basso una quantità d'aria con una certa velocità (ossia con una determinata quantità di moto). Per il principio di azione e reazione l'ala riceve una pari quantità di moto verso l'alto: questo porta alla formazione della portanza.

Sottolineiamo che l'equazione di Bernoulli e la terza legge di Newton non sono due teorie alternative per la realizzazione della portanza, ma sono in qualche modo connesse, e non potrebbe essere altrimenti dal momento che la prima deriva dalla conservazione dell'energia e la seconda dalla conservazione della quantità di moto; in un sistema isolato, com'è noto, le leggi di conservazione devono tutte essere rispettate. Ciascuna di queste teorie è a suo modo corretta; nessuna delle due, però, fornisce

l'ala ed ha pertanto velocità e pressione "originali". Dalla FIG. 8 sappiamo che questo distanziamento equivale ad un rallentamento del flusso e ad un aumento della pressione (per il teorema di Bernoulli). Pertanto, partendo dall'alto, ogni linea di flusso successiva ha una pressione inferiore alla precedente, fino ad arrivare all'ala dell'aereo lungo cui scorre la linea di flusso con la massima velocità e minima pressione.

una spiegazione completa della portanza, né vi riescono insieme perché ognuna omette qualcosa: l'equazione di Bernoulli non spiega come possano gli aerei volare in volo rovesciato (ossia in posizione capovolta) o con le ali con profilo piatto, e la legge di Newton non chiarisce del tutto la zona di bassa pressione sopra l'ala. Gli esperti hanno tentato di districare la questione, tuttavia – a 122 anni dal primo volo controllato (durato 12 secondi) realizzato dai fratelli Wright – non riescono ancora a stabilire una teoria completa del volo. Persino Einstein si cimentò con questo problema senza tuttavia riuscire a cavare il proverbiale ragno dal buco.⁹

Dopo questa lunga (e pur tuttavia superficiale) digressione sul volo aereo, la FIG. 10c ci riporta all'argomento che più ci interessa, ossia il funzionamento di un'elica. In questa figura è riportata l'immagine di un'elica nautica con il mozzo in verticale, per esaltare la somiglianza tra il profilo di una sua pala e quello dell'ala di aereo in FIG. 10b. L'angolo di attacco di quest'ultima è l'equivalente dell'angolo con cui la pala è connessa al mozzo. Le regioni rossa e verde in FIG. 10b indicano rispettivamente la bassa e l'alta pressione sui lati di un'ala, analogamente a quanto fanno le regioni marrone e verde relativamente alle pale dell'elica raffigurata in FIG. 5. Vi è dunque un'analogia tra il flusso d'aria verticale dovuto all'ala e il flusso d'acqua orizzontale generato dall'elica. In pratica, si può affermare che la spinta propulsiva dell'elica è paragonabile alla portanza alare. Nonostante tutte queste affinità, la pala di un'elica ha alcune caratteristiche proprie. La FIG. 10c mostra, ad esempio, come la pala presenti una sorta di torsione (si veda anche la FIG. 5); questa torsione, detta svergolamento, serve a mantenere costante la portanza lungo la pala, compensando l'aumento di velocità periferica verso l'esterno. Questo permette all'elica di esercitare una spinta uniforme e inoltre, riducendo picchi di pressione localizzati, ritarda l'insorgere della cavitazione e ne mitiga gli effetti.

⁹ Quanto affermato non deve generare dubbi o timori nel lettore che voglia imbarcarsi per un volo! Chi progetta aeroplani in realtà utilizza una serie di complicate equazioni, le più importanti delle quali sono le equazioni di Navier-Stokes. La soluzione analitica di queste equazioni rappresenta uno dei problemi irrisolti della matematica per la quale è stato istituito il premio Clay (del valore di un milione di dollari). Soluzioni approssimate si ottengono numericamente con l'utilizzo di potenti calcolatori e permettono la realizzazione di aeroplani "sicuri". Le incertezze a cui ci si riferisce nel testo riguardano il fatto che anche se abbiamo capito che la portanza è generata da una complessa interazione tra l'effetto dell'equazione di Bernoulli e quello dovuto alla terza legge di Newton, una reale spiegazione che leghi in maniera unica e armonica questi due fenomeni (e altri che abbiamo qui trascurato) ancora ci sfugge e rimane (per il momento) sepolta nella complessità delle equazioni.

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 delle onde gravitazionali

Matteo Barsuglia

Hoepli, 2025

Copertina flessibile, pp. 242, € 19,90

ISBN 9788836018642

www.hoeplieditore.it

PROPRIO mentre scrivevo questa recensione è stato pubblicato sulle *Physical Review Letters* un articolo che ha avuto una certa eco mediatica, firmato dalla collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA, ovvero dai gruppi americano, europeo e giapponese che operano con i rispettivi rivelatori di onde gravitazionali. Stavolta i due rivelatori americani LIGO hanno registrato un'onda gravitazionale proveniente dalla fusione di due buchi neri con un segnale sufficientemente grande da poter identificare e confermare le caratteristiche previste teoricamente per la formazione di un buco nero di Kerr (in rotazione), e da poter appurare che l'area dell'orizzonte degli eventi del buco nero finale è superiore alla somma delle aree degli orizzonti degli eventi dei buchi neri prima della loro fusione, a conferma di quanto aveva ipotizzato Bekenstein e poi aveva formulato Hawking. È impressionante vedere fino a che punto la rivelazione di onde gravitazionali è progredita: in tempi non lontanissimi sembrava un'impresa quasi impossibile. A questo proposito mi sembra significativo un aneddoto che Barsuglia racconta nel suo libro, all'inizio del quinto capitolo, dove ricorda che un suo collega di Virgo «teneva sempre una copia del *Deserto dei Tartari* di Dino Buzzati in bella vista sulla sua scrivania, in mezzo ai quaderni e ai libri di fisica. Quando gli chiesi perché quel libro fosse sempre lì, mi rispose che si sentiva un po' come il protagonista del romanzo, il tenente Drogo», ovvero in attesa di un nemico che non sarebbe mai arrivato. D'altronde mi rammento che un collega francese nel 2003 scommise contro alcuni membri del gruppo Virgo che di lì a dieci anni non avrebbero rivelato nessuna onda gravitazionale. Gli andò bene perché la prima rivelazione ebbe luogo due anni dopo il limite fissato per la scommessa, nel 2015.

La *rivoluzione delle onde gravitazionali* è la traduzione aggiornata e ampliata della versione originale in francese, pubblicata nel 2019, traduzione che è opera dell'autore stesso, italiano che lavora a Parigi, nella parte francese della collaborazione europea Virgo. Barsuglia, che ha partecipato in prima persona al progetto, descrive in modo semplice e chiaro gli aspetti tecnici che hanno permesso di arrivare alla rivelazione delle onde gravitazionali, oltre che na-

turalmente la scienza che si fa con esse, riuscendo a mantenere desto l'interesse del lettore; inoltre lascia il giusto spazio all'aspetto umano e cita alcune vicende personali legate al suo lavoro. La lettura risulta dunque piacevole e mai pesante. Ci sono giusto un paio di formule nelle note, tra cui le equazioni della relatività generale, non necessarie certo a questo livello ma ammetto che è difficile resistere dal mostrarle.

Il libro è suddiviso in tredici capitoli, tipicamente di una quindicina di pagine ciascuno, preceduti da una citazione letteraria e un breve commento dell'autore (che come stile a me ricorda le *Cosmicomiche* di Calvino).

Dopo un'introduzione storica sull'astronomia, la gravità e la relatività, nel terzo capitolo vengono introdotte le onde gravitazionali, previste da Einstein, che le ritenne però inosservabili. In effetti, si richiede di misurare la variazione di distanza fra due masse e la variazione è proporzionale alla distanza. Per rivelatori di qualche chilometro, come gli interferometri LIGO e Virgo, la variazione da misurare, come mostra l'autore, è di «meno di un milionesimo di milionesimo di metro».

Di qui il titolo del quarto capitolo, *Non aver paura delle sfide impossibili*, da una affermazione di Adalberto Giazotto, fra i pionieri di questo campo e fra i fondatori del progetto Virgo, affermazione che Barsuglia giustamente definisce «provocatoria», nel senso che «molte sfide sono veramente impossibili e la domanda 'ne vale la pena?' bisogna sempre porsi prima d'iniziare una ricerca scientifica». Nei capitoli successivi si descrive il percorso compiuto per vincere la sfida, le sorgenti di onde gravitazionali che possiamo rivelare, ovvero le stelle di neutroni e i buchi neri (i «mostri cinguettanti»). Si arriva poi al momento fatidico della prima onda gravitazionale rivelata da LIGO, l'evento del 14 settembre 2015, quando purtroppo Virgo non era ancora pronto. Virgo rivelò insieme a LIGO la sua prima onda gravitazionale il 14 agosto del 2017 e tre giorni dopo, il 17 agosto, un'onda gravitazionale emessa dalla fusione di due stelle di neutroni, un evento noto come «kilonova». Questo evento fu osservato come lampo gamma dai satelliti Fermi e INTEGRAL e fu in seguito osservato nell'ottico. Si parla poi di come si sia installata una routine nella rivelazione di onde gravitazionali, della possibilità di studiare statisticamente le popolazioni di buchi neri in funzione della loro massa, di misurare la costante di Hubble e forse, un giorno, di rivelare il fondo di onde gravitazionali primordiali.

L'ultimo capitolo offre una prospettiva del futuro. Gli attuali LIGO e Virgo saranno affiancati dal rivelatore giapponese KAGRA e da un LIGO in India, il che permetterà una migliore localizzazione delle sorgenti. In prospettiva, si avrà la realizzazione dell'Einstein Telescope, che potrebbe essere situato in Sardegna, e di LISA, l'interferometro spaziale costituito da tre satelliti in orbita intorno al Sole, con l'equivalente di tre bracci lunghi 2,5 milioni di chilometri. La rassegna si chiude con le pulsar, che possono essere usate come rivelatori del fondo stocastico di onde gravitazionali.

Il libro è dotato di otto pagine centrali con dieci tavole a colori e diciannove figure in bianco e nero. Concludendo, si tratta di un bel testo che consiglio a chiunque cerchi un'introduzione chiara e aggiornata alle onde gravitazionali.

ALBERTO CAPPI

Matteo Barsuglia è direttore di ricerca presso il *Centre National de la Recherche Scientifique* (CNRS) di Parigi. Ha coordinato il team che ha realizzato la messa a punto del rivelatore Virgo presso l'*European Gravitational Observatory* ed è stato responsabile scientifico del progetto per la Francia. Attualmente guida un gruppo di ricerca al laboratorio *AstroParticules et Cosmologie* presso l'*Université Paris Cité* ed è direttore del centro *Cosmos, sciences et sociétés* che sviluppa alcuni progetti interdisciplinari, di divulgazione scientifica e di sensibilizzazione alla crisi ecologica. L'edizione originale del libro, intitolata *Les vagues de l'espace-temps*, ha vinto in Francia il premio *Ciel&Espace*.

★

Pianeti mancanti

Da Plutone a Planet Nine, gli astri erranti nell'oscurità

Luca Nardi

Dedalo («scienzaFACILE»), 2025

Copertina flessibile, pp. 276, € 18,00

ISBN 9788822069283

www.edizionidedalo.it

TALVOLTA mi chiedo se in effetti le recensioni dei libri che mi sottopone il «Giornale di Astronomia» possano davvero essere di qualche utilità, stante il fatto conclamato che ancora non ne ho trovato uno che racconti qualcosa che non mi interessi. Quel che intendo dire è che, in sostanza, qualunque argomento venga trattato suscita la mia attenzione e talvolta il mio entusiasmo: forse sono troppo innamorato delle cose del cosmo (troppo nerd?) per poter formulare giudizi veramente attendibili su queste opere.

Pianeti mancanti non fa eccezione: è stata una piacevole lettura, che mi ha stimolato riflessioni, idee, domande. L'opera prende a pretesto il problema della ricerca dei pianeti del Sistema solare, oltre a quelli conosciuti fin dall'antichità, per raccontare storie di appassionanti ricerche del passato e del presente, arricchite da chiare e succinte esposizioni di

alcune questioni scientifiche, come, ad esempio, la recente scoperta di molti corpi minori del Sistema solare su orbite trans-nettuniane, o la vicenda della recente revisione della definizione di «pianeta» e l'introduzione del concetto di «pianeta nano», di cui si è molto parlato anche fuori dalla comunità scientifica. Lo stile è diretto ma composto, con qualche caduta da considerarsi veniale nel contesto della letteratura divulgativa contemporanea.

Più passa il tempo e più sembra diventare cogente il tema dell'origine delle anomalie nella dinamica sulla grande scala dell'universo. I moti delle galassie all'interno degli ammassi di galassie, come i moti delle stelle all'interno delle galassie, appaiono «troppo veloci». È una questione aperta da più di un secolo e le spiegazioni possibili richiedono o la presenza di massa invisibile (la materia oscura) o una carenza nelle leggi di gravità, quindi la necessità di una nuova teoria. Trovo molto intrigante che le due grandi anomalie dei moti planetari che sono state così centrali nella ricerca astronomica nei secoli passati, e che, conseguentemente, sono ampiamente trattate in questo libro, abbiano trovato soluzione ciascuna da un diverso lato della medesima dicotomia. Le anomalie del moto di Urano hanno portato alla scoperta di una massa non conosciuta che ne perturbava l'orbita: il pianeta Nettuno. Le anomalie del moto di Mercurio sono state altresì spiegate con un superamento della teoria newtoniana con la relatività generale. Questo è il genere di riflessioni che *Pianeti mancanti* ha suscitato in me: ritengo e mi auguro che possa accadere lo stesso, o di meglio, anche ad altri lettori.

In sostanza, non definirei *Pianeti mancanti* un libro memorabile ma è un'opera onesta e gradevole, chiara e ricca di spunti. Mi sembra più che sufficiente per meritare la lettura di chi è interessato alla ricerca delle affascinanti balene bianche della conoscenza.

MICHELE BELLAZZINI

Luca Nardi è astrofisico, dottore in scienze planetarie e divulgatore scientifico. È presente su tutti i *social network*, ma in particolare sul suo canale YouTube. Collabora con il Planetario di Roma e con varie testate tra cui *Wired Italia*. Ha pubblicato *Un mese a testa in giù* (Geo4Map, 2021), *Giganti Ghiacciati* (Dedalo, 2023), e *Pianeti Mancanti* (Dedalo, 2025). Con *Giganti Ghiacciati* ha vinto il Premio Nazionale di Divulgazione Scientifica.

★

Spazzini spaziali

Per un futuro sostenibile dello spazio

Ettore Perozzi

Dedalo («scienzaFACILE»), 2024

Copertina flessibile, pp. 160, € 16,00

ISBN 9788822069269

www.edizionidedalo.it

L'USO sostenibile dello spazio sta diventando un argomento sempre più attuale, e giustamente.

Anche prima dello sviluppo impetuoso delle grandi costellazioni satellitari, lo spazio era già “inquinato” da una quantità enorme di detriti non controllabili: stadi di razzi alla deriva, satelliti ormai spenti, frammenti di diverse dimensioni risultanti da esplosioni o collisioni avvenute in passato, per fare solo alcuni esempi. Sono almeno in parte il risultato del *modus operandi* delle agenzie spaziali nei primi decenni di lanci, in cui non si teneva conto delle conseguenze della produzione di detriti o dell’abbandono alla deriva di oggetti, anche voluminosi, ormai non più utilizzabili: lo spazio è grande, praticamente vuoto, i lanci erano ancora pochi, e i rischi di collisione erano effettivamente quasi nulli. Ma a lungo andare il numero di satelliti in orbita è aumentato e i detriti si sono accumulati, soprattutto nella regione delle orbite basse (200-2.000 km di altitudine), rappresentando un rischio crescente per i satelliti operativi e per gli astronauti a bordo dei velivoli spaziali. L’avvento delle costellazioni, che in pochi anni hanno più che raddoppiato il numero di satelliti in orbita intorno al nostro pianeta, ha fatto aumentare ulteriormente le criticità legate ai rischi di collisione, sollevando fondate preoccupazioni sulla futura sostenibilità dell’uso di determinate orbite. E questo è un problema per tutti noi, perché i satelliti hanno un ruolo fondamentale in tanti servizi ormai essenziali che utilizziamo sulla superficie terrestre, anche se molti non se ne rendono conto.

È inevitabile vedere il parallelismo con il cambiamento climatico: un problema su scala globale, che può essere contrastato solo tramite accordi e trattati fra le nazioni, grandi potenze in primis, guardando oltre i propri interessi di parte. La situazione è ulteriormente complicata dall’importanza strategica dello spazio per scopi militari e dall’attuale vuoto di regolamentazione internazionale: di fatto lo spazio è oggetto di conquista, in cui chi prima arriva si insedia, acquisendo il diritto di sfruttamento delle orbite più utili. Come per la lotta al cambiamento climatico, per ora non ci sono molti segnali che inducano all’ottimismo su una mitigazione dei problemi.

Questo libro divulgativo di Ettore Perozzi, autorevole esperto in materia, è un’ottima panoramica sull’argomento. In 138 pagine espone concisamente e chiaramente prima i concetti principali del volo orbitale nel vuoto dello spazio circumterrestre, poi le problematiche dei detriti e della congestione spaziale, soprattutto da un punto di vista tecnico, ma con diverse considerazioni anche sugli aspetti politici ed economici; infine, descrive le possibili soluzioni, sia preventive che curative e l’ormai urgentissima necessità di regolamentare a livello internazionale l’uso dello spazio, nell’interesse di tutte le nazioni. Diversi codici QR sparsi nel testo facilitano l’approfondimento tramite altre fonti. Il linguaggio è scorrevole e comprensibile e il libro si presta bene anche ad un uso didattico a livello di scuole superiori: e sarebbe bene che venisse diffusa fra i giovani, e

fra il pubblico in generale, una maggiore consapevolezza dello spazio come risorsa ricca ma non infinita appartenente a tutta l’umanità, e dei tanti risvolti economici, politici e sociali che derivano dal suo sfruttamento.

GIOVANNA M. STIRPE

Ettore Perozzi è laureato in Fisica e si occupa di dinamica del Sistema solare, meccanica celeste, missioni spaziali e divulgazione scientifica. Dal 2017 al 2020 è stato responsabile dell’Ufficio per la Sorveglianza Spaziale dell’ASI (Agenzia Spaziale Italiana). Ha scritto diversi libri, tra cui *Ordine e Caos nel Sistema Solare* (con Alessandra Celletti, UTET 2007, finalista al Premio Galileo), *Il Cielo che ci cade sulla testa* (il Mulino 2016), *Luna Nuova* (il Mulino 2019), *Parola di Astronauta* (con Simonetta di Pippo, Lapis 2019, vincitore del premio “Un libro per l’ambiente”). L’asteroide n.10027 porta il suo nome.

★

Il cielo stellato sopra di noi Storia dell’umanità senza gli astri

Roberto Trotta

Traduzione di Luisa Doplicher e Daniele A. Gewurz
Il Saggiatore, 2025

Copertina flessibile, pp. 456, € 29,00

ISBN 9788842828358

www.ilsaggiatore.com

SAPPIAMO che i fenomeni celesti sono stati importanti per l’umanità fin dalla preistoria: è luogo comune che l’astronomia sia la più antica delle scienze e la rivoluzione copernicana segni l’inizio della scienza moderna. Ma in questo libro l’autore vuole mostrare qualcosa di più, ovvero come il cielo stellato, plasmando l’umanità, sia stato determinante nella sua evoluzione.

Il titolo originale del libro è *Starborn. How the stars made us – and who we would be without them*, ma il titolo italiano, come spesso capita, è stato cambiato: il riferimento al ruolo delle stelle è scomparso, sostituito da un “cielo stellato sopra di noi” che riecheggia Kant, mentre il sottotitolo suggerisce una storia alternativa di un’umanità che non abbia mai visto il cielo. Un titolo suggestivo ma anche un po’ fuorviante, dato che il tema del libro è proprio l’influsso del cielo stellato sulla civiltà umana; la storia alternativa di un’umanità senza stelle c’è, ma è confinata in poche pagine alla fine di ogni capitolo.

Questa idea di fondo caratterizza il libro di Trotta rispetto ad altri libri divulgativi sulla storia dell’astronomia, ma un altro elemento di distinzione è la varietà e quantità degli argomenti trattati, delle storie e degli aneddoti, che tengono desto l’interesse e rendono la lettura sempre piacevole. A riprova della vastità dei riferimenti dell’autore, la bibliografia è di quarantatré pagine, le note ne occupano trentuno e trenta l’indice analitico. Si tratta di un livello di erudizione inusuale, che fortunatamente

non si accompagna ad alcuna pedanteria. A questo va aggiunto che l'autore non esita a toccare qualche corda sentimentale raccontando episodi ed emozioni della propria vita.

Il prologo e il primo capitolo sono una introduzione al tema del libro, che comincia veramente col secondo capitolo (*Il cielo perduto*), in cui Trotta spiega l'importanza nella storia delle eclissi di Sole e delle comete e sottolinea quanto oggi si sia perduta la familiarità con il cielo stellato. Mi ha qui colpito, in particolare, un episodio narrato dall'autore. Mentre si trovava su un'isola del Mediterraneo per tenere un corso avanzato, camminando dopo cena con un gruppo di studenti, ammirò il cielo e fece notare la bellezza della Via Lattea, al che un dottorando in fisica di New York gli confessò che vedeva le stelle per la prima volta. «All'inizio pensai che volesse dire che non le aveva mai viste così bene, ma spiegò che durante l'infanzia, vicino a New York, credeva che le stelle si potessero vedere soltanto con un telescopio; non si era ricreduto fino al dottorato». Voglio sperare che questo dottorando sia un'invenzione letteraria di Trotta: significherebbe altrimenti non solo che il ragazzo non è mai uscito da New York, ma anche che non ha mai letto una rivista o un libro, visto un documentario, guardato un quadro o un film dove compare un paesaggio con un cielo stellato. D'altronde, devo riconoscere che se anche fosse un'esagerazione, la realtà non è certo molto incoraggiante. Ad esempio, poco più avanti, l'autore riferisce che in occasione del terremoto di Northridge il 17 gennaio 1994 alle quattro del mattino Los Angeles rimase senza elettricità e «gli abitanti, impressionati, telefonarono al Griffith Observatory per via dello 'strano cielo' cui assistevano: strano perché pieno di stelle».

Ma che cosa sarebbe avvenuto se l'umanità si fosse evoluta su un pianeta dove le stelle non sono mai visibili? È nel terzo capitolo che l'autore stabilisce quale potrebbe essere in questo caso l'*alter ego* della Terra: un pianeta coperto di nubi, che però dovrebbe consentire l'evoluzione di una specie intelligente come la nostra. Con una serie di considerazioni scientifiche, Trotta giunge alla conclusione che un pianeta totalmente coperto di nubi difficilmente potrebbe dare origine a una specie come la nostra, e anche se in teoria lo consentisse, le diramazioni dell'evoluzione rendono infima la probabilità di avere una specie molto simile a noi. Dunque, il pianeta senza cielo stellato è una finzione letteraria: battezzato dall'autore "Caligo", diventa sostanzialmente l'ambientazione di un racconto diviso in brevi puntate di due o tre pagine, poste alla fine di ogni capitolo. In questo racconto l'umanità è rappresentata da un gruppo di uomini preistorici che venerano "la Nuvola". Simmetricamente, l'autore all'inizio di ogni capitolo racconta invece un episodio della propria vita, che coinvolge spesso anche la sua famiglia.

Sarebbe impossibile menzionare tutto ciò che viene raccontato nei sette capitoli successivi, che se-

guono approssimativamente un ordine cronologico. Li descrivo brevemente, per dare un'idea della varietà del contenuto. Nel quarto capitolo l'autore intende mostrare come il rapporto con il cielo stellato sia stato determinante nel percorso dell'Homo Sapiens verso la civiltà e nel suo prevalere sull'uomo di Neanderthal. Il quinto capitolo è dedicato alla misura del tempo e include, fra tante altre cose, l'orologio di Jacopo Dondi e la macchina di Anticitera. Nel sesto descrive come Cook fu aiutato dal sommo sacerdote e navigatore polinesiano Tupaia, spiegando l'affascinante diversità delle mappe dei polinesiani, e narra della misura della longitudine e dell'orologio di Harrison. Il settimo capitolo è dedicato alla rivoluzione scientifica che, partita dal modello eliocentrico di Copernico, ha visto come protagonisti Tycho Brahe, Galileo, Keplero, e Newton e ha portato alla fine alla scoperta dell'universo delle galassie. Nell'ottavo capitolo si incontra "il demone" di Laplace, Darwin e la macchina alle differenze di Babbage. Nel nono capitolo si parla del culto del Sole, della Luna e dell'astrologia. Il decimo ed ultimo capitolo narra della conquista dello spazio da parte dei privati, dell'impatto di Starlink di Elon Musk sul cielo notturno, dell'inquinamento luminoso. L'autore è critico su quanto sta accadendo e osserva: «Piuttosto che seguire sogni irrealizzabili di vita su altri mondi, il nostro imperativo morale è diventare custodi del pianeta Terra».

L'epilogo si chiude con un malinconico riferimento alla sonda Voyager 1, già presentata nel prologo, col suo disco d'oro che vuole essere una testimonianza della civiltà umana. Trotta si chiede che cosa troverebbe in un lontano futuro sul nostro pianeta una civiltà extraterrestre che avesse recuperato la sonda e seguendo la mappa di pulsar sul disco fosse venuta a visitarlo.

Confesso che alcune parti autobiografiche non rientrano nei miei gusti, perché mi sembrano un po' troppo teatrali o da scena di film con accompagnamento di violini, ma riconosco che questo è solo un apprezzamento soggettivo e che anzi molti lettori probabilmente le apprezzeranno. Anche i "racconti di Caligo" non mi convincono del tutto; si assiste ai comportamenti dettati da credenze e superstizioni di un gruppo di uomini preistorici che non sono in grado di decifrare razionalmente il mondo che li circonda, come ad esempio il pendolo di Foucault, in quanto "la Nuvola" nasconde loro la vista del cielo, ma mi sarebbe piaciuta una descrizione un po' più approfondita.

La visibilità del cielo stellato, che ha avuto senza alcun dubbio un'enorme influenza nella storia umana, come esemplificato negli innumerevoli esempi del libro di Trotta, è stata davvero determinante per l'evoluzione della civiltà? A me sembra effettivamente plausibile, ma non si potrebbero immaginare strade alternative che portino al progresso scientifico e tecnologico fin quando, con una mongolfiera o altro, l'umanità non arrivi a volare al di là delle nubi? Credo comunque che lo scopo

dell'autore non fosse tanto questo, anche perché, come lui stesso sottolinea, un pianeta come Caligo è una finzione, quanto quello di rendere chiare a tutti l'antichità e la profondità del rapporto fra l'umanità e il cielo stellato. Uno scopo, devo dire, pienamente raggiunto.

ALBERTO CAPPI

Roberto Trotta è professore di Fisica teorica presso la Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati (SISSA) di Trieste e *Visiting Professor* di Astrostatistica presso l'Imperial College di Londra. Nel 2018 è stato insignito della cattedra *Lemaître* dell'università di Lovanio per il suo lavoro sull'astrostatistica e nel 2020 ha ricevuto la medaglia *Annie Maunders* della Royal Astronomical Society per il suo impegno nella comunicazione scientifica.

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

Gli Incontri del «Giornale di Astronomia»

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

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

A causa del positivo riscontro presso il pubblico di questa linea editoriale, il Consiglio Direttivo della *Società Astronomica Italiana* ha deciso 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*.

Gli incontri sono successivamente resi disponibili sul canale YouTube della *Società Astronomica Italiana*: www.youtube.com/@sait-societaastronomica-it3911/streams.

Astronomia oggi

Ricerca delle prime fasi di formazione di sistemi planetari simili al Sistema solare: le cavità di polvere (G. SABATINI, L. PODIO, C. CODELLA), 2025, vol. 51, n. 1, p. 2
 Archeologia esoplanetaria: ricostruire la formazione dei pianeti dalle loro atmosfere (E. PACETTI), 2025, vol. 51, n. 1, p. 7 (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2024: menzione speciale)
 Dalla *detection* alla caratterizzazione di un pianeta extrasolare: viaggio alla scoperta del più giovane sistema multi-planetario compatto TOI-5398 (G. MANTOVAN), 2025, vol. 51, n. 1, p. 15 (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2024: menzione speciale)
 La polarimetria X di sorgenti estese con IXPE: una nuova finestra sull'universo energetico (R. FERRAZZOLI), 2025, vol. 51, n. 1, p. 20 (PREMIO 'GIOVANNI BIGNAMI' 2024)
 Simulazioni di evoluzione galattica con polvere (M. PARENTE), 2025, vol. 51, n. 4, p. 2 (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2025)
 Impatto dei nuclei galattici attivi sul gas molecolare: una prospettiva radiativa e cinetica (F. ESPOSITO), 2025, vol. 51, n. 4, p. 8 (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2025: menzione speciale)

Astronomia e società

L'inafferrabile *Hilal* (P. MORINI), 2025, vol. 51, n. 2, p. 21

Astronomia e arte

Dalla 'bellezza dell'immagine' alla conoscenza scientifica. Riflessione sul metodo e la pratica grafica di Giovanni Virginio Schiaparelli (1878) (S. ROMANI), 2025, vol. 51, n. 2, p. 2

Astronomia e letteratura

Flatlandia: solo novella matematica o anche allegoria narrativa della chimica, della biologia e della fisiologia di fine Ottocento? (A. ADAMO), 2025, vol. 51, n. 2, p. 12

Didattica

Women Measuring Stars: portare le immagini astronomiche e l'ottica adattiva nella scuola secondaria (C. MIGNONE, L. SCHREIBER, G. FIORENTINO, M. TANTALO, A. NUNNARI, R. LEONI, D. RICCI, C. LARDO, E. DIOLAITI), 2025, vol. 51, n. 3, p. 24

Storia

Plinio il Vecchio e Seneca, testimoni di una teoria ellenistica sulle comete (G. GAIA), 2025, vol. 51, n. 1, p. 28
 La cometa di Coggia secondo Mark Twain (M. MAZZONI), 2025, vol. 51, n. 1, p. 35
 L'utilizzo del microscopio composto nella lettura dei cerchi graduati degli strumenti astronomici e nei misuratori di lastre fotografiche (P. PAURA, C. SASSO), 2025, vol. 51, n. 2, p. 30
 Gio: Domenico Cassini: 1625-1712 (F. BÒNOLI), 2025, vol. 51, n. 3, p. 2
 Nicolas Camille Flammarion: 1842-1925 (G. VANIN), 2025, vol. 51, n. 3, p. 8
 Quando a Merate si tentavano misure polarimetriche (S. COVINO), 2025, vol. 51, n. 3, p. 20
 Il pianeta Marte osservato da lontano e fotografato da presso (1966) (G. HORN D'ARTURO (1879-1967)), 2025, vol. 51, n. 4, p. 16

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

Che cosa c'era prima? (A. MANDRINO), 2025, vol. 51, n. 1, p. 40

La Mappa del Duca di Noja: una visione di ampio respiro storico e topografico per la città di Napoli (M. GARGANO), 2025, vol. 51, n. 2, p. 45

Un *fundraising* di successo per la Torre solare di Arcetri (S. BIANCHI, D. GALLI, A. GASPERINI), 2025, vol. 51, n. 3, p. 34

L'archivio ritrovato di Emilio Bianchi: un astronomo tra scienza e memoria (R. DANIZI), 2025, vol. 51, n. 4, p. 19

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

Brevissima storia della termodinamica classica (A. D'ERCOLE), 2025, vol. 51, n. 1, p. 44

Brevissima storia della termodinamica statistica (A. D'ERCOLE), 2025, vol. 51, n. 2, p. 50

Teoria delle code (A. D'ERCOLE), 2025, vol. 51, n. 3, p. 29

Cavitazione, ebollizione e volo aereo (A. D'ERCOLE), 2025, vol. 51, n. 4, p. 24

In ricordo di:

Raffaele Barletti (F. MAZZUCCONI), 2025, vol. 51, n. 1, p. 52

Filippina Caputo (G. BONO, M. MARCONI, I. MUSELLA, V. RIPEPI, M. DALL'ORA, G. FIORENTINO, A. SAHA), 2025, vol. 51, n. 1, p. 52

Biblioteca (a cura di A. CAPPI)

A. ASPECT, *Si Einstein avait su* (recens. di A. Cappi), 2025, vol. 51, n. 3, p. 47

M. BARSUGLIA, *La rivoluzione delle onde gravitazionali* (recens. di A. Cappi), 2025, vol. 51, n. 4, p. 31

A. BHATTACHARYA, *L'uomo venuto dal futuro. La vita visionaria di John von Neumann* (recens. di M. Bellazzini), 2025, vol. 51, n. 2, p. 58

S. CARROLL, *Quanta and Fields. The Biggest Ideas in the Universe* (recens. di A. Cappi), 2025, vol. 51, n. 2, p. 59

L. FARRONI, M. INCERTI, A. PAGLIANO (a cura di), *Misurare il tempo. Strumenti e tecniche tra storia e contemporaneità* (recens. di F. Foresta Martin), 2025, vol. 51, n. 3, p. 47

D.R. FINKELSTEIN, *Manifesto della melanconia* (recens. di S. Ettori), 2025, vol. 51, n. 1, p. 56

C. GUAITA, *La ricerca della vita su Marte* (recens. di A. Cappi), 2025, vol. 51, n. 2, p. 59

F. HAISE, B. MOORE, *Niente panico, per ora. Il viaggio di un astronauta dell'Apollo 13* (recens. di G.M. Stirpe), 2025, vol. 51, n. 3, p. 49

G. MACCHIA, *Come può l'universo espandersi? Le origini della cosmologia moderna alla luce delle controversie degli anni Trenta* (recens. di A. Cappi), 2025, vol. 51, n. 3, p. 50

L. NARDI, *Pianeti mancanti. Da Plutone a Planet Nine, gli astri erranti nell'oscurità* (recens. di M. Bellazzini), 2025, vol. 51, n. 4, p. 32

E. OLOSTRO CIRELLA, L. ABRAMI, G. CAPRIO, F. PERRONE, D. RANDAZZO (a cura di), *Gli incunaboli e le cinquecentine degli Osservatori Astronomici dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (1478-1560)* (recens. di V. Petrilli), 2025, vol. 51, n. 1, p. 55

E. PEROZZI, *Spazzini spaziali. Per un futuro sostenibile dello spazio* (recens. di G.M. Stirpe), 2025, vol. 51, n. 4, p. 32

L. SUSSKIND, A. CABANNES, *Relatività generale. Il minimo indispensabile per fare della (buona) fisica* (recens. di A. Cappi), 2025, vol. 51, n. 1, p. 57

L. SUSSKIND, A. CABANNES, *General Relativity. The Theoretical Minimum* (recens. di A. Cappi), 2025, vol. 51, n. 1, p. 57

L. TAUB, *Ancient Greek and Roman Science. A Very Short Introduction* (recens. di A. Cappi), 2025, vol. 51, n. 2, p. 60

R. TROTTA, *Il cielo stellato sopra di noi. Storia dell'umanità senza gli astri* (recens. di A. Cappi), 2025, vol. 51, n. 4, p. 33

Gli Incontri del «Giornale di Astronomia»

2025, vol. 51, n. 1, p. 59; n. 2, p. 63; n. 3, p. 53; n. 4, p. 36

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

Indice degli autori

- A. ADAMO, 2025, vol. 51, n. 2, p. 12
M. BELLAZZINI, 2025, vol. 51, n. 2, p. 58; n. 4, p. 32
S. BIANCHI, 2025, vol. 51, n. 3, p. 34
G. BONO, 2025, vol. 51, n. 1, p. 52
F. BÒNOLI, 2025, vol. 51, n. 3, p. 2
A. CAPPI, 2025, vol. 51, n. 1, p. 57; n. 2, p. 59, 60; n. 3, p. 47, 50; n. 4, p. 31, 33
C. CODELLA, 2025, vol. 51, n. 1, p. 2
S. COVINO, 2025, vol. 51, n. 3, p. 20
M. DALL'ORA, 2025, vol. 51, n. 1, p. 52
R. DANIZI, n. 4, p. 19
A. D'ERCOLE, 2025, vol. 51, n. 1, p. 44; n. 2, p. 50; n. 3, p. 29; n. 4, p. 24
E. DIOLAITI, 2025, vol. 51, n. 3, p. 24
F. ESPOSITO, n. 4, p. 8
S. ETTORI, 2025, vol. 51, n. 1, p. 56
R. FERRAZZOLI, 2025, vol. 51, n. 1, p. 20
G. FIORENTINO, 2025, vol. 51, n. 1, p. 52; n. 3, p. 24
F. FORESTA MARTIN, 2025, vol. 51, n. 3, p. 47
G. GAIA, 2025, vol. 51, n. 1, p. 28
D. GALLI, 2025, vol. 51, n. 3, p. 34
M. GARGANO, 2025, vol. 51, n. 2, p. 45
A. GASPERINI, 2025, vol. 51, n. 3, p. 34
G. HORN D'ARTURO, n. 4, p. 16
C. LARDO, 2025, vol. 51, n. 3, p. 24
R. LEONI, 2025, vol. 51, n. 3, p. 24
A. MANDRINO, 2025, vol. 51, n. 1, p. 40
G. MANTOVAN, 2025, vol. 51, n. 1, p. 15
M. MARCONI, 2025, vol. 51, n. 1, p. 52
M. MAZZONI, 2025, vol. 51, n. 1, p. 35
F. MAZZUCCONI, 2025, vol. 51, n. 1, p. 52
C. MIGNONE, 2025, vol. 51, n. 3, p. 24
P. MORINI, 2025, vol. 51, n. 2, p. 21
I. MUSELLA, 2025, vol. 51, n. 1, p. 52
A. NUNNARI, 2025, vol. 51, n. 3, p. 24
E. PACETTI, 2025, vol. 51, n. 1, p. 7
M. PARENTE; n. 4, p. 2
P. PAURA, 2025, vol. 51, n. 2, p. 30
V. PETRILLI, 2025, vol. 51, n. 1, p. 55
L. PODIO, 2025, vol. 51, n. 1, p. 2
D. RICCI, 2025, vol. 51, n. 3, p. 24
V. RIPEPI, 2025, vol. 51, n. 1, p. 52
S. ROMANI, 2025, vol. 51, n. 2, p. 2
G. SABATINI, 2025, vol. 51, n. 1, p. 2
A. SAHA, 2025, vol. 51, n. 1, p. 52
C. SASSO, 2025, vol. 51, n. 2, p. 30
L. SCHREIBER, 2025, vol. 51, n. 3, p. 24
G. M. STIRPE, 2025, vol. 51, n. 3, p. 49, n. 4, p. 32
M. TANTALO, 2025, vol. 51, n. 3, p. 24
G. VANIN, 2025, vol. 51, n. 3, p. 8

*Le nostre riviste Online,
la nostra libreria Internet*
www.libraweb.net



*Our Online Journals,
our Internet Bookshop*
www.libraweb.net



Fabrizio Serra
Editore®



Accademia
editoriale®



Istituti editoriali
e poligrafici
internazionali®



Giardini editori
e stampatori
in Pisa®



Edizioni
dell'Ateneo®



Gruppo editoriale
internazionale®

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

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

www.libraweb.net/periodonline.php

