

# GIORNALE DI ASTRONOMIA

Rivista di informazione, cultura e didattica  
della Società Astronomica Italiana

Pubblicato con il patrocinio  
della Camera dei Deputati

Direttore responsabile: Fabrizio Bònoli

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

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

Per informazioni rivolgersi alla Segreteria della  
Società Astronomica Italiana  
Largo E. Fermi 5, 1 50125 Firenze  
tel. +39 055 2752270  
sait@arcetri.astro.it

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

Fabrizio Bònoli, Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Via Ranzani 1, 1 40127 Bologna  
tel. +39 051 2095701, fax +39 051 2095700  
fabrizio.bonoli@unibo.it

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

Pubblicazione trimestrale  
Vol. 44° · N. 1 · Marzo 2018



Fabrizio Serra editore  
Pisa · Roma

## Sommario

### Astronomia oggi

- 2 Il mistero di CR7: stelle di terza popolazione o buco nero a collasso diretto?  
A. PALLOTTINI (PREMIO 'GIUSEPPE LORENZONI' 2017)
- 6 Dischi protoplanetari nell'era di ALMA  
G. DIPIERRO (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2017)
- 13 Cent'anni di cosmologia  
R. CACCIA

### Storia

- 24 Gli strumenti del 'Museo del Cielo e della Terra' di San  
Giovanni in Persiceto: come l'uomo ha misurato il  
tempo nel corso dei secoli  
G. PALTRINIERI, R. SERRA

### Didattica

- 34 A proposito delle leggi di Keplero  
M. CITTÀ, M. GENCHI, S. SPALLINO, M. A. FIASCONARO
- 41 Esperienze didattiche nel Corso di laurea in Astronomia  
di Bologna  
C. BARTOLINI

### Cent'anni fa

- 43 D. RANDAZZO, I. CHINNICI (a cura di)

- Cielo d'inchiostro** (a cura di A. MANDRINO, M. GARGANO, A.  
GASPERINI)
- 45 «Carissimo zio...». 1908: da Elsa a Giovanni Virginio  
(Schiaparelli)  
I. AROSIO

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

- 49 Un tè con Einstein navigando sul fiume  
A. D'ERCOLE

### Biblioteca (a cura di A. CAPPÌ)

- 53 A. CIMATTI, *L'universo oscuro. Viaggio astronomico tra i  
misteri del cosmo* (recens. di A. Buzzoni)
- 54 N. F. COMINS, *Destinazione spazio. Una guida per coloni e  
turisti* (recens. di M. Orlando)
- 55 P. ODDIFREDDI, *Dalla Terra alle lune* (recens. di C. Barbieri)
- 57 A. VANCE, *Elon Musk. Tesla, SpaceX e la sfida per un futuro  
fantastico* (recens. di M. Orlando)
- 58 D. VERARDI, *Logica e magia. Giovan Battista Della Porta e i  
segreti della natura* (recens. di P. Nava)
- 61 LXII Congresso Nazionale della SAIt  
Teramo, 2-5 maggio 2018
- 62 Premio 'Pietro Tacchini'  
XIII edizione - 2018

### In copertina:

Immagine estratta dai filmati realizzati con le simulazioni cosmologiche di formazioni di galassie, impiegate per lo studio di una delle galassie più lontane e più luminose osservate fino ad ora, *Cosmos Redshift 7*, CR7. [Si veda all'interno l'articolo di A. PALLOTTINI]

# Il mistero di CR7: stelle di terza popolazione o buco nero a collasso diretto?\*

Andrea Pallottini

Centro Fermi, Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche ‘Enrico Fermi’ · Roma

**C**OSMOS REDSHIFT 7, abbreviato CR7, è una delle galassie più lontane e più luminose osservate fino ad ora, tre volte più splendente di *Himiko* – la galassia precedentemente detentrice del record – e posta circa alla stessa distanza. L’oggetto CR7 è stato chiamato così perché si trova a *redshift* sette, che corrisponde a quando l’universo aveva un’età di circa 800 milioni di anni (contro i 13,8 miliardi di anni attuali); la sua scoperta è stata fatta nel 2014, con un lavoro guidato da un gruppo di ricercatori dell’Università di Lisbona.<sup>1</sup> I primi dati su CR7 sono dovuti ad una campagna di osservazioni che combinano immagini dai telescopi Hubble, Subaru e VLT, che hanno dato una copertura spettrale della sorgente che va dall’ottico al vicino infrarosso. Alla vista appare come un sistema formato da un gruppo di tre componenti (vedere l’impressione artistica in FIG. 1), due con colori fotometrici rossi, che indicano la presenza di due galassie composte da stelle antiche – formate in precedenza rispetto all’epoca di osservazione – e una terza componente molto più luminosa e blu, colore che potrebbe indicare una composizione di stelle formatesi recentemente.

Nel 2015, con successive osservazioni spettroscopiche, più accurate e approfondite, è stato mostrato dagli stessi ricercatori che CR7 è un oggetto molto più particolare di come era risultato inizialmente. Le osservazioni delle due componenti rosse risultano compatibili con due galassie di massa pari a circa un centesimo della nostra Via Lattea, dimensioni abbastanza tipiche per delle galassie a quell’età dell’universo. Le osservazioni della componente blu, invece, sono estremamente peculiari: mostrano unicamente strette righe di emissione di idrogeno ed elio ionizzati, mentre non è stata rilevata la presenza di elementi più pesanti. Queste caratteristiche



FIG. 1. Impressione artistica di CR7. Notare le tre componenti, tra di loro ad una distanza relativa di circa 10 kiloparsec (circa trentamila anni luce), cioè più o meno la dimensione della nostra Galassia. Le due componenti in alto e in alto a sinistra sono rese nella rielaborazione con colori più in rosso, mentre la nebulosa in basso appare più blu e più brillante, per dare qualitativamente l’idea di quanto rilevato dalle osservazioni. (Autore: ESO/M. KORNMESSER; fonte: [www.eso.org/public/images/eso1524a/](http://www.eso.org/public/images/eso1524a/))

potrebbero essere spiegabili se CR7 avesse come sorgente di luce stelle di terza popolazione, ossia stelle che si sono formate in un ambiente primordiale, cioè costituito quasi esclusivamente da idrogeno ed elio. Tale ambiente sarebbe quello tipico dell’epoca in cui l’universo era uscito dalla fase di nucleosintesi primordiale, vale a dire non ancora contaminato dall’arricchimento di elementi più pesanti e da grani di polvere cosmica, processo che viene causato, ad esempio, dalle esplosioni di supernovae. Proprio per le proprietà dell’ambiente primordiale, si pensa che le stelle di terza popolazione si formino con caratteristiche molto diverse rispetto a quelle che conosciamo bene e che popolano l’universo attuale, per esempio quelle che si trovano nella nostra Galassia e che vengono denominate stelle di prima e seconda popolazione.<sup>2</sup>

Perché stelle formatesi in ambiente primordiale dovrebbero essere diverse da quelle che vediamo nella Via Lattea?

Lo scenario tipico della formazione stellare è il seguente. Si ha una nube molecolare – un oggetto gasoso, con un massa pari a circa diecimila volte quel-

\* In questo articolo, l’Autore presenta i contenuti essenziali delle ricerche che gli hanno valso il “Premio Giuseppe Lorenzoni” per l’anno 2017, consegnatogli durante il LXI Congresso Nazionale della SAIt, tenutosi a Padova nel settembre dello stesso anno. Il premio, dedicato a Giuseppe Lorenzoni per ricordare la sua opera in campo astrofisico, è stato istituito nel 2017 dalla SAIt e dall’INAF - Osservatorio Astronomico di Padova, in occasione dei 250 anni della fondazione della Specola di Padova, ed è volto a premiare il miglior articolo scientifico di carattere astrofisico di un giovane di non più di 37 anni, pubblicato nel triennio precedente, in questo caso 2014/16.

<sup>1</sup> Inoltre, la provenienza dei principali ricercatori della scoperta (D. SOBRAL *et al.*) potrebbe lasciare immaginare che l’acronimo CR7 sia stato scelto anche perché normalmente associato al giocatore portoghese Cristiano Ronaldo.

<sup>2</sup> Il rango di una popolazione stellare è inversamente proporzionale alla quantità di elementi pesanti presente nella stella al momento della formazione. Come riferimento, il nostro Sole è denominato una stella di prima popolazione. Notare che si tratta più di una nomenclatura qualitativa che di una definizione quantitativa.

la del Sole e compatto – che si estende su scale spaziali della trentina di anni luce. A causa della auto-gravità e del processo di raffreddamento – dovuto alla presenza di elementi pesanti, polvere cosmica e alla formazione di molecole – la nube può collassare e frammentarsi, formando tipicamente un centinaio o un migliaio di stelle, con masse paragonabili a quella del Sole. In ambiente primordiale, la mancanza di elementi pesanti e polvere cosmica inficia il processo di raffreddamento e la frammentazione avviene in modo più grossolano, formando oggetti stellari più massicci: le stelle che vengono chiamate di terza popolazione. Studi teorici di formazione stellare mostrano che, rispetto alle altre stelle, quelle di terza popolazione dovrebbero essere molto più massicce, di conseguenza con vita più breve e molto più luminose. In particolare, le stelle di terza popolazione potrebbero avere masse fino a circa duecentosessanta volte quella del nostro Sole, tempi di vita di due milioni di anni, contro i miliardi di anni tipici per le stelle della nostra Galassia. Una singola stella di terza popolazione può arrivare a una luminosità di milioni di volte quella del Sole e avere uno spettro ad energie sufficientemente elevate per ionizzare l'elio, cosa che non può essere fatta da stelle di altre popolazioni. L'esistenza concettuale di queste stelle è comunemente accettata, per esempio, se l'universo era originariamente formato da materiale primordiale, le prime stelle formate devono essere di terza popolazione. Tuttavia, mentre lo sviluppo teorico dei modelli è notevole, le stelle di terza popolazione sono state cercate a lungo, senza successo, dagli astronomi. È quindi, chiaramente, per questo motivo che la scoperta di CR7 ha destato molto scalpore nella comunità scientifica: sarebbe, infatti, un passo fondamentale per distinguere tra i possibili modelli che ci porterebbe più vicini alla comprensione della natura di questi oggetti, la cui formazione è tra i processi chiave che ha portato all'evoluzione delle galassie e dell'universo.

Nel 2015, con un gruppo di ricercatori basati principalmente alla Scuola Normale Superiore di Pisa, abbiamo analizzato le osservazioni della scoperta di CR7 utilizzando varie modellizzazioni teoriche; ci siamo così resi conto che esiste anche un'altra tipologia di oggetti in grado di spiegare le inusuali caratteristiche spettroscopiche osservate per CR7, cioè quello che si chiama un *direct collapse black hole* (DCBH), sarebbe a dire un buco nero che si può formare dal collasso diretto di una nube compatta di materia nell'universo primordiale. Questa sarebbe una scoperta forse ancora più sensazionale, visto che esistono tuttora molti dubbi sulle caratteristiche osservative e addirittura sulla stessa esistenza e possibilità di formazione di questi oggetti massicci nell'universo primordiale.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Ndr: l'articolo in questione e per il quale l'Autore ha ricevuto il "Premio Giuseppe Lorenzoni" 2017 è: A. PALLOTTINI *et al.*, *The brightest Ly $\alpha$  emitter: Pop III or black hole?*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 453 (3), 2015, pp. 2465-2470.

Come si formano questi DCBH?

Ripartiamo dallo scenario di collasso gravitazionale di una nube compatta e massiccia. In assenza di elementi pesanti, l'idrogeno molecolare è l'unico agente di raffreddamento e frammentazione che rimane alla nube per entrare nel processo di formazione stellare di stelle di terza popolazione; se la sua formazione viene prevenuta dalla fotodissociazione causata dalla radiazione proveniente da una galassia vicina, in questo caso la nube potrebbe non frammentarsi e sarebbe teoricamente possibile il collasso diretto dell'intera nube in un singolo buco nero, il DCBH appunto.

Riassumendo, per avere stelle di terza popolazione servono ambienti incontaminati da elementi pesanti, che possono provenire da galassie vicine. Per avere un DCBH, servirebbe una sacca di ambiente primordiale, sufficientemente lontana da un'altra galassia per non essere stata contaminata da elementi pesanti, e al tempo stesso sufficientemente vicina per essere illuminata da una forte radiazione.

Riportato al caso specifico di CR7, in entrambi gli scenari le due componenti rosse non sarebbero riuscite ad arricchire di elementi pesanti la componente blu, che è quella più luminosa, oppure, quantomeno, la formazione del sistema a tre componenti sarebbe posteriore alla generazione della sorgente che governa l'emissione della luce della componente blu. Nello scenario di DCBH, inoltre, le componenti rosse dovrebbero essere abbastanza vicine alla componente blu da poter agire da fotodissociatori di idrogeno molecolare, permettendo il collasso diretto di una nube in un buco nero.

Per quanto rari e particolari, entrambi gli scenari sembrano plausibili a livello teorico, a causa della configurazione spaziale delle componenti. Per le osservazioni che erano disponibili per CR7, il tipo di emissione risulta qualitativamente compatibile sia con le stelle di terza popolazione, sia con il DCBH. C'è però un'importante differenza quantitativa che dipende dal confronto tra l'estrema luminosità di CR7 e i processi di produzione di luce nei due scenari, combinati con la formazione delle rispettive sorgenti.

Nello scenario di stelle di terza popolazione, l'alta luminosità osservata richiede una massa totale di stelle pari a dieci milioni o un miliardo di masse solari, con la variazione dovuta a seconda dei modelli teorici adottati per queste stelle, che sono incerti a livello quantitativo sui valori della massa tipica della singola stella che si può generare in evento di formazione. Dati i tempi di vita brevi, queste stelle si dovrebbero essere formate sia contemporaneamente, che nel solito luogo, per riuscire a brillare per alimentare una fonte come CR7. I nostri modelli teorici, basati su simulazioni cosmologiche di formazione di galassie (Fig. 2), mostrano che è praticamente impossibile che si abbia la formazione simultanea di una così grande quantità di stelle di terza popolazione nella solita locazione. A prescindere dal tipo di popolazione, le stelle sufficientemente

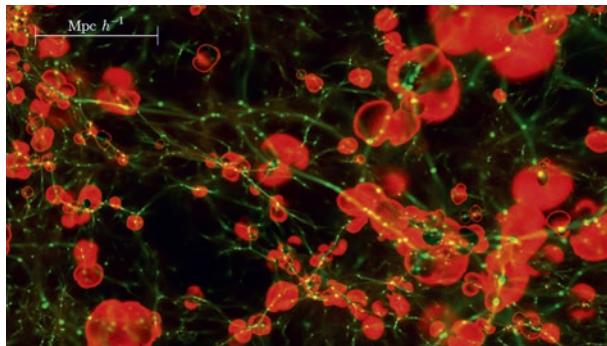


FIG. 2. Immagine estratta da uno dei filmati (l'intero filmato è scaricabile dal sito indicato) realizzati con le simulazioni cosmologiche impiegate per lo studio. In verde, è resa la rete cosmica lungo la quale si possono formare galassie e ammassi di galassie. In rosso, le bolle ad alta temperatura, dovute ad esplosioni di *multiple supernovae* che arricchiscono di elementi pesanti il materiale circostante. La scala dell'immagine è dei milioni di anni luce. (Autore: A. PALLOTTINI; fonte: [www.researchgate.net/profile/Andrea\\_Pallottini](http://www.researchgate.net/profile/Andrea_Pallottini))

massicce esplodono in supernovae che arricchiscono il loro ambiente e prevengono la formazione successiva di stelle di terza popolazione. I modelli mostrano che, se si formano gruppi di stelle di terza popolazione, queste hanno una massa totale tipicamente pari a centomila volte quella del Sole, circa cento volte più bassa di quella richiesta per spiegare l'osservazione di CR7. A meno che i modelli attuali di formazione di stelle di terza popolazione siano concettualmente sbagliati – ad esempio per quanto riguarda il tempo di vita di queste stelle – lo scenario risulta sfavorito a livello teorico.

Per lo scenario del DCBH, la situazione è invece più favorita. In generale, il determinare la probabilità di formazione di un tale oggetto nel cosmo è soggetto ad enormi incertezze teoriche, ma una volta stabilito che si sia potuto formare – come la configurazione spaziale di CR7 farebbe intuire – il processo di generazione di radiazione è in un certo modo più sicuro. Infatti, la produzione di energia per un DCBH è simile agli altri buchi neri, formati per esempio dalla morte di stelle massicce o nei nuclei galattici attivi (vedere l'immagine artistica in FIG. 3); il gas che si trova in prossimità della nube che sarebbe collassata in un buco nero può accrescere sullo stesso, aumentandone la massa. Mentre il materiale precipita sul buco nero, il gas è sottoposto a gradienti di forza gravitazionale estremamente elevati, fatto che riscalda il gas a sufficienza per trasformarlo in plasma. Mentre spiraleggia in caduta sul buco nero, il plasma sviluppa un campo magnetico; pertanto, l'interazione tra il plasma che si muove all'interno del campo magnetico che lui stesso ha generato lo rallenta, sviluppando infine radiazione in maniera estremamente efficiente. Lo spettro che viene generato può avere fotoni fino ai raggi X e quindi, automaticamente, anche energetici quanto basta da ionizzare l'elio ed eccitare la ionizzazione degli elementi pesanti, se presenti. È da notare che più il buco nero è massiccio, più il massimo



FIG. 3. Impressione artistica di un buco nero supermassiccio nella galassia NGC 3783, nella quale, in questo caso, il materiale viene accresciuto dal disco. (Autore: ESO / M. KORNMESSER; fonte: [www.eso.org/public/images/eso1327a/](http://www.eso.org/public/images/eso1327a/))

accrescimento sostenibile può essere rapido e, di conseguenza, la produzione di radiazione più copiosa. I modelli teorici mostrano che un DCBH appena formato ha una massa tipica di diecimila masse solari e che tale massa è sufficiente per produrre luminosità compatibili a quelle osservate nelle varie osservazioni spettroscopiche con cui è stato visto CR7. Infine, a differenza di altri buchi neri massicci, in alcune fasi dell'accrescimento un DCBH può produrre delle righe abbastanza strette da essere comparabili a quanto osservato nel caso di CR7.

In entrambi gli scenari, i modelli teorici sono stati usati per predire ulteriori osservabili, non ancora disponibili dai telescopi, che distinguerebbero tra i due casi, se cioè la luce di CR7 sia dovuta a stelle di terza popolazione o sia prodotta dalla presenza di un DCBH. Non avendo al momento la prova diretta per nessuno dei due tipi di oggetti, la modellistica è ancora in un certo senso incerta a livello quantitativo, per cui solo nuove e più precise osservazioni potrebbero chiarire la nostra comprensione dei fenomeni che vengono teorizzati. Pertanto, l'idea che è stata proposta consiste nell'osservare CR7 in righe e bande che non sono state coperte dai telescopi attuali, in modo da poter confrontare i nuovi dati con le predizioni.

Nel periodo immediatamente successivo alla scoperta e all'analisi delle sue caratteristiche, l'interpretazione di CR7 ha in un certo senso dominato il dibattito della comunità astrofisica dell'universo primordiale in conferenze e pubblicazioni scientifiche, sia con rianalisi delle osservazioni disponibili, sia indagando, dal punto di vista teorico, aspetti complementari a quelli che il nostro gruppo aveva inizialmente analizzato.<sup>4</sup> L'interesse per la sorgente

<sup>4</sup> CR7 ha avuto, inoltre, copertura mediatica sia nazionale che internazionale. Ad esempio, si vedano gli articoli pubblicati sui siti: <http://vis.sns.it/la-misteriosa-natura-della-remota-galassia-cr7/>, [www.media.inaf.it/2016/07/08/un-buco-nero-primordiale-per-cr7/](http://www.media.inaf.it/2016/07/08/un-buco-nero-primordiale-per-cr7/), e [www.nytimes.com/2015/06/18/science/space/astrophysicists-report-finding-earliest-stars-that-enriched-cosmos.html](http://www.nytimes.com/2015/06/18/science/space/astrophysicists-report-finding-earliest-stars-that-enriched-cosmos.html).

e il lavoro teorico sviluppato ha, di rimando, spronato gli astronomi a riosservare l'oggetto. Ad esempio, nelle nuove campagne osservative, CR7 è stato indagato con ALMA, il più preciso e potente interferometro esistente,<sup>5</sup> per cercare la possibile presenza di elementi pesanti che potrebbero non essere stati rilevati dalla precedenti osservazioni. Nello stesso tempo, sempre a titolo di esempio, è stato riosser-

<sup>5</sup> Per dettagli sul funzionamento e le capacità di ALMA si veda qui il successivo articolo di G. Dipierro.

vato con esposizioni in tempi brevi e divise in vari periodi – le cosiddette epoche di osservazione – con il Telescopio Spaziale Hubble, per indagare se fosse presente una variabilità della sorgente, effetto che lo collocherebbe nella categoria degli oggetti la cui emissione è dovuta alla presenza di buchi neri.

Finalmente, proprio in questi mesi, stanno cominciando ad apparire i primi risultati di questi nuovi cicli di osservazioni, fatti con vari telescopi e da vari gruppi di ricerca, che auspicabilmente chiariranno il mistero sulla natura di CR7 e ci aiuteranno a fare luce sulla natura di questi oggetti primordiali.

---

**Andrea Pallottini** è ricercatore in astrofisica. La sua ricerca attuale è focalizzata sulla formazione ed evoluzione delle galassie primordiali, che studia principalmente dal punto di vista teorico, sviluppando simulazioni numeriche. Si è laureato in Fisica con specializzazione in Astrofisica all'Università di Pisa nel 2011 e ha conseguito il titolo di Dottore di ricerca nel 2015 alla Scuola Normale Superiore. Dopo il dottorato è stato ricercatore al Cavendish Laboratory a Cambridge e ha successivamente iniziato a lavorare come assegnista di ricerca per il Centro Fermi, cui è tuttora affiliato.

# Dischi protoplanetari nell'era di ALMA\*

Giovanni Dipierro

Department of Physics and Astronomy, University of Leicester, United Kingdom

## Introduzione

UNO dei temi più importanti dell'astrofisica contemporanea è lo studio dei sistemi planetari extra-solari. L'interesse verso questo tema è stato recentemente rinvigorito, da una parte, dalle numerose scoperte di pianeti extra-solari e, dall'altra, dalle recenti osservazioni ad alta risoluzione e sensibilità di dischi protoplanetari. L'analisi dei sistemi planetari osservati, nel primo caso, in fase avanzata e, nel secondo caso, in fase di formazione, sta permettendo, per la prima volta, di ottenere forti indicazioni sui fenomeni che avvengono lungo il processo di formazione stellare e su come correlare le diverse fasi evolutive alle architetture finali e le proprietà dei pianeti extra-solari osservati.

A partire dalla scoperta, nel 1995, del primo pianeta extra-solare orbitante attorno ad una stella simile al Sole (51 Peg b), il numero di sistemi planetari extra-solari noti è cresciuto a dismisura (si consulti <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>). Con l'avvento di nuove tecniche spettroscopiche ad alta risoluzione e la costruzione di telescopi dedicati alle osservazioni di transiti planetari (come *Kepler*), abbiamo ora la possibilità di studiare statisticamente le architetture dei sistemi planetari e metterle in relazione con quello che è più noto a noi: Il Sistema solare. Dal punto di vista teorico, queste osservazioni forniscano delle indicazioni importanti sui modelli di formazione planetaria, i quali devono essere in grado di riprodurre la diversa architettura dei vari sistemi e le proprietà fisiche ed orbitali osservate.

Ad esempio, l'evidenza di particolari architetture costituite da una forte presenza di pianeti dotati di massa confrontabile con quella di Giove, orbitanti ad una distanza dalla loro stella molto inferiore rispetto a quella di Mercurio dal Sole, fa sorgere il dubbio che questi pianeti si siano formati *in situ*, rafforzando l'ipotesi che i pianeti migrino molto efficacemente dalla posizione dove vengono generati verso la loro posizione finale, come predetto teoricamente alla fine degli anni Settanta. Inoltre, l'alta frequenza di pianeti giganti attorno a stelle con alta metallicità potrebbe fornire indicazioni riguardo alla crescita di pianeti nelle primissime fasi di formazione. Queste evidenze osservative devono essere

spiegate in maniera coerente dai modelli di formazione ed evoluzione planetaria.

Mentre l'osservazione di pianeti extra-solari ci fornisce informazioni sulle architetture e proprietà finali del processo di formazione stellare e planetaria, l'osservazione diretta dei dischi protoplanetari ci consente di osservare le prime fasi di questo processo. Gli ultimi anni sono stati molto fruttiferi in questo ambito grazie, tra tutti, all'avvento del telescopio ALMA (*Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array*), un complesso di sessantasei radiotelescopi ubicati nel deserto di Atacama in Cile operanti a lunghezze d'onda del (decimo di) millimetro. La tecnica interferometrica su cui si basa ALMA, accoppiata al numero, posizione e posizione geografica delle antenne, sta permettendo di osservare l'emissione termica della polvere contenuta nei dischi con un livello di risoluzione angolare (capacità di osservare i dettagli su scale piccole del disco) e sensibilità (cioè la capacità di rivelare segnali molto piccoli in intensità) irraggiungibile fino a pochi anni fa. Nell'era pre-ALMA, i dischi protoplanetari venivano osservati come strutture semplici, con una mappa di emissione simmetrica rispetto alla posizione centrale della stella e con un profilo di intensità che varia solo con la distanza dalla stella, seguendo un andamento semplice e monotono, solitamente una legge di potenza.

La rivoluzione introdotta da ALMA ha permesso di osservare dischi caratterizzati da una mappa in emissione con una morfologia molto peculiare. FIG. 1 mostra tre rappresentativi esempi, significativi di queste strutture recentemente rivelate da ALMA, classificabili sulla base della loro morfologia in tre tipi: spirali, anelli luminosi e scuri e strutture a ferro di cavallo.

Nella maggior parte dei casi, le recenti osservazioni stanno mostrando che i dischi protoplanetari non possono essere più descritti con modelli a simmetria assiale, come si faceva in passato, in cui le quantità fisiche, come densità, temperatura e velocità, variano solo con la distanza dalla stella. Risulta pertanto chiaro che è necessario sviluppare una trattazione più completa dei dischi, utilizzando modelli che predicono queste tipo di strutture.

In questo articolo, presenterò una breve introduzione ai dischi protoplanetari, concentrandomi sulla dinamica dei loro costituenti principali: il gas e la polvere. Evidenzierò, inoltre, come i segni distintivi della loro dinamica possono essere rivelati tramite le moderne tecniche osservative. Mi concentrerò in seguito sui modelli di disco studiati durante il mio

\* In questo articolo l'Autore presenta i contenuti essenziali delle ricerche svolte nel corso del Dottorato di Ricerca che gli hanno valso il "Premio Pietro Tacchini" della SAIt per l'anno 2017, consegnatogli durante il LXI Congresso Nazionale della Società, tenutosi a Padova nel settembre 2017.

percorso di Dottorato e come possono essere utilizzati per interpretare i recenti risultati osservativi.

## Cosa sono i dischi protoplanetari?

I dischi protoplanetari rappresentano una delle fasi iniziali del processo di formazione stellare e planetaria. Essi sono il risultato del collasso di dense nubi di materiale interstellare in rotazione. L'idea di formazione di un disco protoplanetario come prodotto del collasso di una nube risale agli studi di Kant e Laplace nella seconda metà del XVIII secolo, basate sulle osservazioni dei pianeti del Sistema solare. L'ipotesi alla base, meglio nota come *nebular hypothesis*, stabilisce che il collasso di una nube generi un disco di polvere e gas dal quale successivamente si formano i pianeti che osserviamo nel nostro Sistema solare (all'epoca si conoscevano soltanto i 6 pianeti visibili sui totali 8 presenti nel Sistema solare). Questo modello fu confermato dalla successiva scoperta di Urano e Nettuno, i quali presentavano un moto orbitale giacente su un piano molto vicino a quello su quale la Terra e gli altri pianeti conosciuti orbitano attorno al Sole. Queste evidenze, formalizzate e catalogate dagli astronomi dell'epoca (come William Herschel), rafforzarono l'idea che la formazione ed evoluzione del disco sia legata alla nascita della stella e dei pianeti orbitanti attorno ad essa, fornendo la prima descrizione qualitativa del processo di formazione stellare e planetaria.

La prima trattazione teorica del processo di formazione stellare fu fornita da Fred Hoyle (1960), il quale descrisse il concetto di disco protoplanetario come prodotto del collasso di una nube di gas interstellare rotante sotto l'azione della sua forza di gravità. Le proprietà fisiche del disco sarebbero legate al contenuto di momento angolare e ai processi termodinamici della nube da cui è nato. Una stima della grandezza iniziale di queste nubi può essere ottenuta a partire dalla teoria sull'instabilità gravitazionale di un mezzo continuo e spazialmente infinito introdotta da James Jeans (1902). Considerate le densità tipiche ( $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ) e temperatura ( $\sim 50 \text{ K}$ ) del mezzo interstellare, tenendo conto dell'azione combinata dell'autogravità e delle forze di pressione del gas, si ottiene una stima di  $0.1 \text{ pc}$  (cioè circa  $2 \cdot 10^4 \text{ au}$ , dove con au, *astronomical unit*, si indica la distanza Terra-Sole). Queste nubi di gas interstellare, chiamate comunemente *molecular cloud cores*, iniziano a collassare formando un disco su un piano perpendicolare all'asse di rotazione del *core*. La formazione del disco è legata alla cosiddetta "barriera centrifuga", la quale, applicata al singolo elemento fluido nel sistema di riferimento solidale con esso, risulta dall'equilibrio tra l'attrazione gravitazionale della pro-

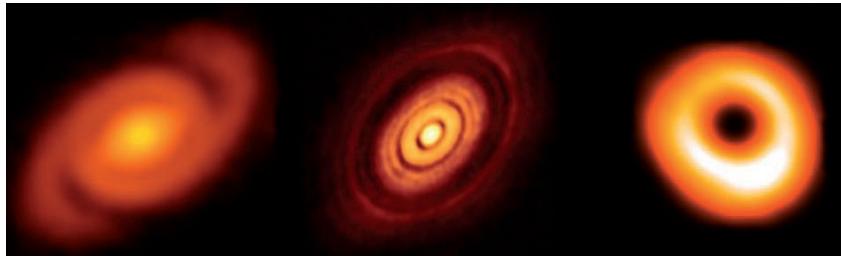


FIG. 1. Immagini ALMA di dischi protoplanetari che presentano le tre diverse classi di sottostrutture investigate nel mio lavoro di dottorato: (sinistra) spirale in Elias 2-27, (centro) anelli chiari e scuri in HL Tauri e (destra) ferro di cavallo in HD 135344B. (Crediti: PEREZ *et al.* 2016, PEREZ *et al.* 2014, ALMA PARTNERSHIP *et al.* 2015, B. SAXTON [NRAO/AUI/NSF]; ALMA [ESO/NAOJ/NRAO])

tostella in formazione al centro della nube, e la forza centrifuga. Quando questo equilibrio è raggiunto, il collasso si arresta e si forma un disco circondato dalla nube molecolare dalla quale è nato.

Dalle stime tipiche della velocità di rotazione delle nubi moleculari osservate, la scala iniziale caratteristica dei dischi è dell'ordine delle  $10^3 \text{ au}$ . Una volta formato il disco, esso continua ad essere interessato da un flusso di gas e polvere proveniente dalla nube attorno ad esso.

Sotto l'azione di meccanismi dissipativi, il disco evolve su tempi scala molto lunghi (circa  $10^6$ - $10^7$  anni) accrescendo massa nelle regioni centrali e permettendo, dunque, la formazione di una regione densa di gas chiamata comunemente "protostella". Questi meccanismi dissipativi sono responsabili del trasferimento di momento angolare dalle regioni più vicine alla protostella alle regioni più lontane, permettendo un continuo flusso di massa verso le regioni centrali e garantendo un'evoluzione che, seppur molto lenta, permette la formazione della stella e la nascita e l'evoluzione di pianeti (LO DATO 2008). I meccanismi che permettono il trasporto di momento angolare ed energia nei dischi protoplanetari non sono ancora del tutto chiari alla comunità scientifica. Generalmente, il trasporto può essere mediato dallo sviluppo di instabilità magnetoidrodinamiche (BALBUS, HAWLEY 1998) o gravitazionali (KRATTER, LO DATO 2016). Qualunque sia il meccanismo di trasporto, esso viene solitamente descritto come un trasporto mediato da una forza di natura viscosa. La differenza in velocità orbitale tra due elementi fluidi adiacenti produce un flusso di momento angolare dalle regioni interne (che hanno una velocità orbitale maggiore) alle regioni esterne (che hanno una velocità orbitale minore), garantendo anche una conversione di energia meccanica in calore che riscalda il gas contenuto nel disco. Pertanto, mentre il materiale che perde momento angolare accresce la protostella, le regioni più lontane dalla protostella acquistano momento angolare e si muovono verso l'esterno. La combinazione di questi due effetti risulta essere a favore dell'accrescimento sulla protostella centrale, la quale, dopo circa 10 milioni di anni accresce la maggior parte del gas e della polvere contenuta nel disco di-

ventando una *pre-main-sequence star*. Da qui, inizia la fase di contrazione ed espansione che terminerà, se le condizioni sono favorevoli, con la formazione di una stella.

## Polvere in dischi protoplanetari

Poiché derivanti dal collasso di nubi di materiale interstellare, i dischi protoplanetari sono formati da gas e da una piccola componente di polvere (circa un centesimo della massa di gas), costituita prevalentemente, alla nascita del disco, da grani di silicati e ghiaccio con una dimensione dell'ordine del micron.

La polvere ricopre un ruolo fondamentale per l'evoluzione dei dischi e per la formazione planetaria. Secondo una delle teorie più accreditate sulla formazione planetaria, la *core accretion theory*, i pianeti rocciosi e quei pianeti giganti che possiedono un nucleo roccioso si formano dalla coagulazione di grani di polvere, a partire dalle primissime fasi di formazione del disco. Oltre a ricoprire questo ruolo, la distribuzione spaziale e le proprietà ottiche dei grani di polvere influenzano la struttura in temperatura e, di conseguenza, l'emissione radiativa dei dischi su un'ampia porzione dello spettro elettromagnetico. Infatti, nonostante il gas rappresenti una buona parte della massa totale di un disco, la componente di polvere domina l'opacità del disco e, pertanto, studiare la sua dinamica rappresenta la diagnostica più importante per interpretare i risultati osservativi (ANDREWS 2015). In particolare, poiché l'emissione di un disco a una determinata lunghezza d'onda  $\lambda$  è fortemente influenzata dalla temperatura e densità della componente di polvere costituita da grani di dimensione confrontabile con  $\lambda$ , studiare la dinamica di grani di polvere di diversi dimensioni è cruciale per capire come il disco evolve e per testare le moderne teorie di formazione planetaria.

Inoltre, poiché l'opacità dei grani dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione emessa, osservare il disco a diverse lunghezze d'onda permette di avere accesso alle proprietà fisiche della polvere in diversi strati di disco lungo la direzione della linea di vista.

Ad esempio, nelle lunghezze d'onda del millimetrico (dove opera ALMA), osserviamo l'emissione termica dei grani di dimensione del millimetro-centimetro. L'opacità di questi grani è più piccola rispetto a quella relativa ai grani di dimensione più piccola. A queste lunghezze d'onda, il disco è otticamente sottile (cioè trasparente) e l'emissione che osserviamo proviene dagli strati più profondi del disco, vicino al piano equatoriale (assumendo un disco visto di fronte, giacente su un piano perpendicolare alla nostra linea di vista).

Infine, la superficie dei grani di polvere funge da catalizzatore di reazioni chimiche, permettendo quindi di creare specie chimiche via via più complesse.

Al contrario, l'emissione proveniente dalla componente gassosa dei dischi (che domina la massa di questi sistemi) risulta essere molto difficile da osservare. Il costituente più importante del gas nei dischi, la molecola di idrogeno  $H_2$ , emette molto debolmente. Per avere informazioni sulla componente gassosa si cerca di osservare emissioni di linea di specie molecolari meno diffuse nei dischi, come il deuterio di idrogeno,  $HD$ , o il monossido di carbonio,  $CO$ , e i suoi isotopi molecolari. Purtroppo, queste specie non risultano essere dei buoni traccianti del gas perché vengono interessate da fenomeni molto diversi rispetto all'idrogeno molecolare. Ad ogni modo, l'osservazioni delle righe di queste specie può fornirci alcune informazioni sulla cinematica del gas.

## Dinamica della polvere

Lo studio della dinamica della polvere ricopre un ruolo fondamentale per investigare sia l'evoluzione del disco, sia la formazione dei pianeti.

Oltre all'influenza gravitazionale della stella, la dinamica della polvere è fortemente influenzata dal gas e viceversa. Analogamente a un corpo solido che si muove immerso in un gas (come ad esempio il moto di caduta di una sferetta di acciaio all'interno di un fluido viscoso), la forza derivante dall'accoppiamento aerodinamico tra il gas e la polvere, chiamato comunemente *drag force*, produce uno scambio di quantità di moto che influenza la loro dinamica, diminuendo la velocità relativa delle due componenti. L'intensità dell'accoppiamento aerodinamico tra le due componenti è parametrizzata tramite il cosiddetto "numero di Stokes",  $St$ , definito come il rapporto tra il tempo scala di accoppiamento aerodinamico ed il tempo scala dinamico del sistema, il quale, nei casi dei dischi protoplanetari, è dato dal tempo orbitale. Il numero di Stokes dipende principalmente dalle proprietà locali del gas, quali densità e temperatura, e dalle proprietà fisiche dei grani di polvere, quali dimensione, forma e densità interna. Il grado di accoppiamento dei grani di polvere varia a differenti distanze dalla stella: tipicamente, grani di una certa dimensione possono essere fortemente accoppiati nelle regioni interne del disco e disaccoppiati nelle regioni esterne.

Considerando un tipico modello di disco protoplanetario, mentre grani di polvere di dimensioni micrometriche sono molto accoppiati al gas ( $St \ll 1$ ) nel piano equatoriale del disco, i grani millimetrici-centrimetrici hanno uno *Stokes number* vicino all'unità. Grani di dimensione più grande risultano essere disaccoppiati ( $St \gg 1$ ) e non risentono della frizione del gas.

L'effetto combinato della gravità e della drag force determina la dinamica della polvere, la quale può essere sintetizzata in due processi fondamentali: il *settling verticale* (sedimentazione) sul piano equatoriale del disco e il *radial drift* (spostamento radiale)

verso determinate regioni caratterizzate da picchi in pressione (BIRNSTIEL *et al.* 2016). Entrambi i processi si basano sul fatto che, mentre il gas risente principalmente delle forze di pressione e gravità, la dinamica della polvere nei dischi protoplanetari è dominata dall'azione della gravità e della *drag force*, senza che la pressione ne supporti il moto.

Il *settling verticale* è legato all'azione combinata della gravità della stella che tende a depositare la polvere attorno al piano equatoriale del disco e la *drag force* che tende a decelerare questo moto verticale. L'azione combinata di queste due forze produce un sottile strato di polvere con un'estensione verticale che decresce all'aumentare della dimensione dei grani. Il gas, essendo supportato dalla pressione, tende a concentrarsi meno debolmente attorno al piano equatoriale.

Per quanto riguarda la dinamica lungo il raggio del disco, la polvere scambia momento angolare con il gas spostandosi verso le regioni ad alta pressione. Questo moto è legato alla differenza in velocità orbitale tra la polvere e il gas. Poiché supportato dalle forze di pressione, il gas orbita con una velocità leggermente differente rispetto a quella della polvere. La differenza in velocità orbitale tra il gas e la polvere è proporzionale alla variazione radiale locale della pressione. Di conseguenza, la *drag force*, che tende a ridurre la velocità relativa tra le due fasi, induce uno scambio di momento angolare che influenza il moto radiale della polvere e del gas. Si può dimostrare che la povera tende ad accumularsi nelle regioni ad alta pressione mentre il gas, al contrario, popola le regioni a bassa pressione. L'efficienza del *drift radiale* dipende dallo *Stokes number* dei grani di polvere: per  $St \ll 1$ , la polvere tende a seguire il moto del gas mentre per  $St \gg 1$  la polvere non risente del gas. La maggiore efficienza della migrazione radiale avviene per grani con  $St \sim 1$ , i quali vengono interessati da una migrazione su un tempo scala dell'ordine del migliaio di anni, molto corto rispetto alla vita del disco. Questa migrazione ha un effetto distruttivo nel processo di formazione planetaria poiché i grani di polvere, migrando verso la parte interna del disco dove la pressione del gas è massima, si avvicinano troppo alla stella e vengono distrutti dalla radiazione proveniente da essa.

Questi due semplici processi dinamici sono un primo passo per fornire una prima interpretazione ai risultati osservativi recenti. Ad esempio, le recenti osservazioni stanno mostrando che i dischi di polvere sono molto più compatti dei dischi di gas. L'estensione radiale dei dischi di polvere decresce con l'aumentare della lunghezza d'onda con la quale i dischi vengono osservati. Questo indica che grani via via più grandi popolano le parti interne dei dischi, come ci si aspetterebbe dalla teoria del *radial drift* descritta in precedenza. Inoltre, alcune sottostrutture osservate nei dischi potrebbero essere interpretate come regioni di massimi di pressione, dove i grani di polvere vengono intrappolati. Queste regioni, chiamate comunemente *particle*

*traps*, permettono ai grani di coagulare e di crescere in dimensione, poiché l'intrappolamento dei grani reduce la dispersione della velocità dei grani stessi, incrementando l'efficienza delle collisioni e garantendo la formazione di *core* rocciosi via via più grandi.

## Sottostrutture in dischi protoplanetari

Il mio progetto di dottorato è basato sullo studio della dinamica di polvere e gas in tre diversi tipi di dischi protoplanetari: dischi gravitazionalmente instabili, dischi con pianeti in formazione e dischi attorno a sistemi binari. L'obiettivo di questo progetto è quello di interpretare le strutture recentemente osservate nei dischi come risultati di alcuni fenomeni legati all'evoluzione del disco e alla formazione planetaria. A partire dalla struttura in polvere e gas dei dischi ricavata da questa analisi, il mio lavoro di dottorato si prefigge di fornire predizioni osservative per questi tipi di modelli, consentendo un confronto diretto con i recenti risultati osservativi.

L'analisi condotta nel mio lavoro può essere considerata un ponte tra i modelli teorici sviluppati in passato e le osservazioni, permettendo di verificare se alcuni modelli possono essere utilizzati per ottenere informazioni sui processi che avvengono nei dischi osservati.

## Dischi gravitazionalmente instabili

Nelle primissime fasi di evoluzione del disco a partire dal collasso della nube, il disco può essere così freddo e massivo da risultare instabile alla sua autogravità. Lo sviluppo di queste instabilità, chiamate "instabilità gravitazionali", sono particolarmente importanti nelle primissime fasi di formazione del disco perché, oltre a garantire il trasporto di momento angolare, potrebbero creare delle regioni più dense che collassano su loro stesse sotto l'azione della loro autogravità. In alcune circostanze, generalmente legate a proprietà locali di natura termo-dinamica e gravitazionale, questi *clumps* di materiale gassoso possono formare i giganti gassosi che osserviamo nel nostro Sistema solare (KRATTER, LODATO 2016).

Strutture a spirale in dischi protoplanetari sono state osservate in alcune sorgenti sia in banda radio tramite ALMA (vedi l'immagine a sinistra in FIG. 1), sia nel vicino infrarosso. Come detto in precedenza, poiché le immagini che otteniamo dalle osservazioni ci forniscono informazioni sulla distribuzione di polvere, è necessario studiare la dinamica dei grani di polvere in questi sistemi. In due recenti articoli (DIPIERRO *et al.* 2014, 2015a), è stato confermato che i grani di polvere con estensione dell'ordine del mm-cm vengono intrappolati all'interno dei bracci a spirale. Questo studio è stato condotto a partire da simulazioni numeriche in tre dimensioni che risol-

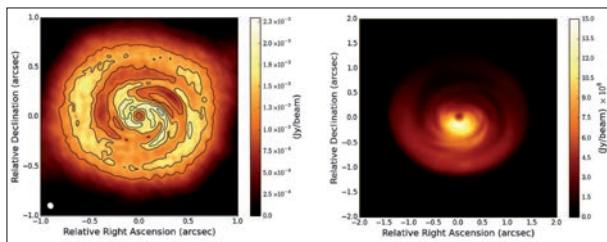


FIG. 2. Immagini simulate dell'emissione di un disco gravitazionalmente instabile a una lunghezza d'onda di (sinistra) 1.3 mm e (destra) 1.65 micron. (Crediti: DIPIERRO *et al.* 2015a)

vono le equazioni dell'idrodinamica accoppiate a simulazioni in una dimensione per studiare la dinamica della polvere in questo tipo di sistemi. Il modello di disco di gas e polvere, ottenuto tramite questa analisi numerica, è stato utilizzato per investigare l'osservabilità di questi sistemi in un'ampia banda di lunghezze d'onda, dal vicino infrarosso al radio (dove opera ALMA). I nostri risultati (vedi FIG. 2) mostrano che le spirali osservate recentemente (vedi il pannello di sinistra in FIG. 1) possono essere interpretate come strutture indotte dallo sviluppo di instabilità gravitazionali. Questo risultato è particolarmente interessante perché, se le spirali osservate fossero legate a fenomeni d'instabilità gravitazionale, la morfologia e l'intensità di questa struttura ci può fornire forti indicazioni riguardo le proprietà fisiche (massa e geometria verticale) e termodinamiche (tassi di raffreddamento) dei dischi osservati.

## Dischi con pianeti

La rivoluzione introdotta dal telescopio ALMA è iniziata quando, nel novembre del 2014, è stata rilasciata la prima immagine del disco protoplanetario attorno alla giovane stella HL Tauri (mostrata in FIG. 1 nel pannello centrale) ottenuta utilizzando ALMA a pieno regime. Essa rappresenta l'immagine di un disco protoplanetario più nitida e precisa mai ottenuta in questa banda elettromagnetica.

L'aspetto più interessante e rivoluzionario di questa osservazione è la presenza di anelli scuri intervallati da bande chiare in emissione. A prima vista, l'immagine sembra essere molto simile a quanto osserviamo nel disco di polvere orbitante attorno a Saturno, dove gli anelli scuri rappresentano regioni scavate dalle lune. Analogamente a Saturno, questi anelli scuri potrebbero essere spiegati dalla presenza di pianeti in formazione che "spazzano" via la polvere lungo la loro orbita. L'aspetto che sorprende di questa immagine è legato al fatto che, in un disco così giovane come quello attorno ad HL Tau, ci si aspetterebbe che il disco fosse molto ricco di gas. Pertanto, la dinamica della polvere dovrebbe essere fortemente influenzata dalla presenza e di gas e la struttura risultante dovrebbe essere diversa da quella nel disco attorno a Saturno.

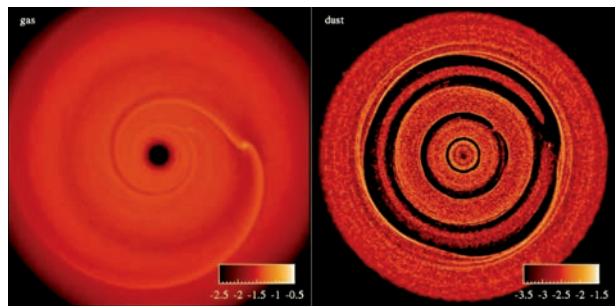


FIG. 3. Simulazione numerica del disco di gas e polvere attorno ad HL Tau. Le immagini mostrano la struttura in densità del gas (sinistra) e della polvere di dimensioni millimetriche (destra), in presenza di tre pianeti di massa simile alla massa di Saturno, in corrispondenza degli anelli osservati in HL Tau. La scala in densità è in unità di  $\text{g cm}^{-2}$ . (Crediti: DIPIERRO *et al.* 2015b)

In dettaglio, i recenti modelli teorici suggeriscono che la polvere, interagendo con i pianeti all'interno del disco, dovrebbe produrre una struttura a spirale che dovrebbe essere osservata da ALMA. In un recente articolo (DIPIERRO *et al.* 2015b) abbiamo simulato la dinamica di un disco di gas e polvere all'interno di un disco simile al disco attorno a HL Tau. Nel disco sono stati immersi tre pianeti di massa uguale a 0.2, 0.27 e 0.55 masse di Giove, orbitanti negli anelli scuri osservati in HL Tau a 13.2, 32.3 e 68.8 unità astronomiche di distanza dalla stella, rispettivamente. La FIG. 3 mostra il risultato della simulazione numerica condotta in questo studio. Mentre l'iterazione tra il pianeta col gas forma una spirale nella distribuzione in densità (vedi pannello di sinistra in FIG. 3), i grani millimetrici si disaccoppiano dal gas e tendono a distribuirsi spazialmente, formando anelli concentrici rispetto alla stella centrale (vedi pannello di destra in FIG. 3) in appena una decina di migliaia di anni. L'aspetto sorprendente è che l'interazione mareale tra i grani di polvere responsabili dell'emissione rivelata da ALMA e pianeti in orbita attorno alla stella produce, se questi grani sono disaccoppiati col gas (cioè caratterizzati da un numero di Stokes maggiore di 1), la formazione di strutture ad anelli chiari e scuri. Partendo dalle strutture in densità ottenute tramite le simulazioni di dinamica, sono state effettuate simulazioni di trasferimento radiativo, con l'obiettivo di capire come ALMA osserverebbe il modello di disco studiato. La FIG. 4 mostra il confronto tra l'immagine reale (a sinistra) e l'immagine ottenuta dalla nostra analisi (a destra). Si nota che quest'ultima rispecchia molto quello che si osserva nell'immagine reale, rafforzando l'ipotesi che queste strutture si siano formate in conseguenza della presenza di pianeti all'interno del disco.

Queste strutture ad anello sono state recentemente osservate in altri dischi più evoluti e localizzati in diverse regioni di formazione stellare. La presenza di questi anelli, di diversa estensione radiale e localizzati in un ampio intervallo di distanze dalla loro stella, forniscono forti indicazioni che, se gli anelli sono dovuti alla presenza di pianeti, la formazione planetaria sarebbe un meccanismo molto effi-

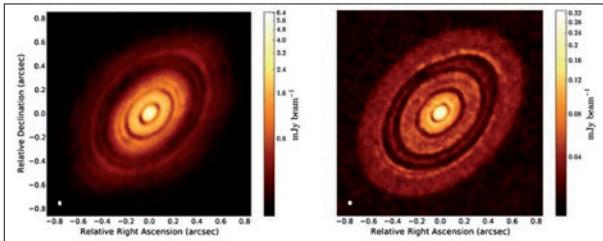


FIG. 4. Confronto tra (sinistra) l'immagine ALMA di HL Tau (ALMA PARTNERSHIP *et al.* 2015) e (destra) l'immagine sintetica prodotta a partire dalle simulazioni mostrate in FIG. 3. (Crediti: DIPIERRO *et al.* 2015b)

ciente e potrebbe già iniziare nelle primissime fasi di formazione del disco.

### Dischi transitional

Una classe di dischi protoplanetari molto studiata ultimamente è la classe dei dischi *transitional*. Questi dischi sono caratterizzati da una cavità di gas e polvere molto profonda che circonda la stella e da un disco attorno a questa cavità che può presentare marcate asimmetrie azimutali nella forma di mezzelune e ferri di cavallo (vedi l'immagine a destra in FIG. 1). Per via della particolare morfologia del disco, questo tipo di oggetti sono considerati un interessante banco di prova per le teorie di evoluzione del disco e di formazione planetaria. Particolare interesse è stata dedicato alle strutture che circondano la cavità, le quali possono presentare marcate asimmetrie con intensità e forma diversa. L'origine di queste strutture viene solitamente identificata con la formazione di vortici in seguito allo sviluppo di una particolare instabilità idrodinamica che si instaura al margine esterno della cavità scavata da un pianeta giovane. Questi vortici, a loro volta, possono intrappolare grani di polvere e possono essere dunque rilevati tramite osservazioni ad alta risoluzione e sensibilità. La creazione e l'evoluzione di questi vortici richiede, però, che il disco sia caratterizzato da una bassissima viscosità. In un recente articolo (RAGUSA *et al.* 2016) abbiamo fornito una spiegazione alternativa per la creazione di queste strutture a ferro di cavallo in dischi viscosi. Se il disco circonda una cavità ospitante una binaria (una coppia di oggetti), caratterizzata da un rapporto in massa tra il primo e il secondo oggetto superiore a una determinate soglia, il disco è interessato da un intenso scambio di eccentricità tra la binaria e il bordo interno del disco stesso. Di conseguenza, il bordo interno della cavità diventa eccentrico, formando una struttura a ferro di cavallo sia nel gas che nella polvere. Analogamente al metodo sviluppato durante il mio dottorato, abbiamo valutato se ALMA fosse in grado di rilevare queste strutture e abbiamo confrontato le nostre osservazioni simulate con le osservazioni reali (vedi il confronto in FIG. 5). I nostri risultati mostrano che le recenti osservazioni ALMA di strutture a ferro di cavallo in dischi *transi-*

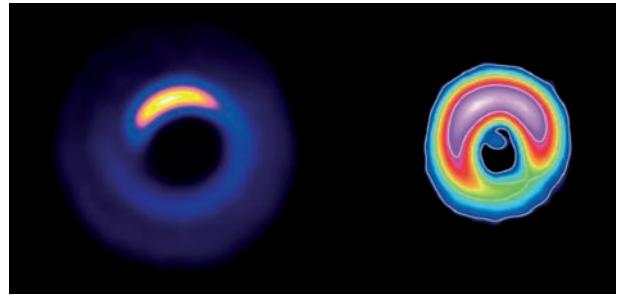


FIG. 5. Confronto tra (sinistra) l'immagine sintetica di un disco circumbinario e (destra) l'immagine ALMA di HD 142527 (Crediti: RAGUSA *et al.* 2017, MUTO *et al.* 2015).

*tional* possono essere interpretate utilizzando il modello dinamico proposto.

### Conclusioni

La rivoluzione ALMA è appena cominciata. Già nei primi anni della sua operatività, ALMA sta infatti letteralmente rivoluzionando la nostra comprensione dei fenomeni che avvengono all'interno dei dischi protoplanetari. Gli approcci sviluppati in passato per l'analisi delle osservazioni, come ad esempio l'ipotesi di asimmetria delle quantità fluide quali densità e temperatura attorno alla stella, sono ormai obsoleti. Gli sviluppi osservativi e il perfezionarsi delle tecniche numeriche (come, ad esempio, la cosiddetta *Smoothed Particle Hydrodynamics* o SPH) sono fondamentali per interpretare le nuove osservazioni offerte da ALMA e per capire come possiamo fare tesoro di questi nuovi dati per perfezionare le teorie di evoluzione del disco e di formazione planetaria.

### Referenze bibliografiche

- ALMA PARTNERSHIP *et al.*, *The 2014 ALMA Long Baseline Campaign: First Results from High Angular Resolution Observations toward the HL Tau Region*, «The Astrophysical Journal Letters», 2015, 808, L3.
- S. ANDREWS, *Observations of Solids in Protoplanetary Disks*, «Publications of the Astronomical Society of the Pacific», 2015, 127, p. 961.
- S.A. BALBUS, J.F. HAWLEY, *Instability, turbulence, and enhanced transport in accretion disks*, «Reviews of Modern Physics», 1998, 70, pp. 1-53.
- T. BIRNSTIEL, M. FANG, A. JOHANSEN, *Dust Evolution and the Formation of Planetesimals*, «Space Science Reviews», 2016, 205, pp. 41-75.
- G. DIPIERRO, G. LODATO, L. TESTI, I. DE GREGORIO MONSALVO, *How to detect the signatures of self-gravitating circumstellar discs with the Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 2014, 444, pp. 1919-1929.
- G. DIPIERRO, P. PINILLA, G. LODATO, L. TESTI, *Dust trapping by spiral arms in gravitationally unstable protostellar discs*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 2015a, 454, pp. 974-986.

- G. DIPIERRO, D. PRICE, G. LAIBE, K. HIRSH, A. CERIOLI, G. LODATO, *On planet formation in HL Tau*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters», 2015b, 453, L73-L77.
- F. HOYLE, *The Origin of the Solar Nebula*, «Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society», 1960, 1, p. 28.
- J.H. JEANS, *The Stability of a Spherical Nebula*, «Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A», 1902, 199, pp. 1-53.
- K. KRATTER, G. LODATO, *Gravitational Instabilities in Circumstellar Disks*, «Annual Review of Astronomy and Astrophysics», 2016, 54, pp. 271-311.
- G. LODATO, *Classical disc physics*, «New Astronomy Reviews», 2008, 52, pp. 21-41.
- T. MUTO *et al.*, *Significant gas-to-dust ratio asymmetry and variation in the disk of HD 142527 and the indication of gas depletion*, «Publications of the Astronomical Society of Japan», 2015, 67, p. 122.
- L. PEREZ *et al.*, *Spiral density waves in a young protoplanetary disk*, «Science», 2016, 353, pp. 1519-1521.
- L. PEREZ, A. ISELLA, J.M. CARPENTER, C.J. CHANDLER, *Large-scale Asymmetries in the Transitional Disks of SAO 206462 and SR 21*, «Astrophysical Journal», 2014, 783, L13.
- E. RAGUSA, G. DIPIERRO, G. LODATO, G. LAIBE, D.J. PRICE, *On the origin of horseshoes in transitional discs*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 2017, 464, pp. 1449-1455.

---

**Giovanni Dipierro**, nato a Castellana Grotte (BA) nel 1988, ha conseguito il Dottorato di ricerca in Fisica, Astrofisica e Fisica Applicata presso l'Università degli Studi di Milano nel febbraio 2017. Attualmente svolge attività di ricerca come postdoc presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia all'Università di Leicester (UK). Si occupa principalmente di dischi protoplanetari da un punto di vista teorico.

# Cent'anni di cosmologia\*

Riccardo Caccia

Il presente lavoro intende fornire una riflessione “filosofico-scientifica” sullo stato dell’arte in cosmologia. Qualcuno si potrebbe chiedere cosa c’entri la filosofia: diceva Einstein che «la scienza senza epistemologia, se pure si può concepire, è primitiva e confusa».¹ Pertanto, credo che sia utile raccontare fatti e modelli di una disciplina scientifica, analizzandone anche le fondamenta ovvero i principi, i metodi e lo sviluppo storico che la caratterizza. Questo sforzo mi pare, anzi, necessario se vogliamo almeno tentare di non ricadere in errori passati, che hanno visto talvolta portare le convinzioni degli studiosi verso territori sterili, tanto più lontani questi dalla verità, quanto più erano convinti quelli di possederla.

Vale sempre la pena di ricordare cos’è successo nel III secolo a.C., quando il sistema eliocentrico di Aristarco non è riuscito a prevalere su quello precedente geocentrico di Aristotele e abbiamo dovuto aspettare circa 1800 anni prima di riportare il Sole al centro del nostro sistema planetario con Copernico. Infatti, il sapere non è mai un dato acquisito per sempre, può regredire da un momento all’altro e il suo recupero non sarebbe affatto scontato. Anche per questo fanno sgomento, da una parte, le continue guerre in varie parti del mondo (che contribuiscono alla distruzione della memoria), dall’altra (pur su di un piano non commensurabile) l’eccesso di informazione che pervade sempre più la nostra civiltà, nel senso che il troppo può essere peggio del poco, nebbia che fa perdere di vista le cose veramente importanti, già di per sé difficili da trovare.<sup>2</sup>

Ma veniamo alla cosmologia. Oggigiorno, con tale parola s’intende generalmente «lo studio dell’universo inteso nella sua totalità», ovvero, com’è fatto e come funziona.<sup>3</sup> La particolarità di questa di-

\* L’8 Febbraio 1917 venivano pubblicate sugli Atti della Reale Accademia Prussiana delle Scienze di Berlino le *Considerazioni cosmologiche sulla teoria della relatività generale* (vedi in: A. EINSTEIN, *Opere scelte*, a cura di E. BELLONE, Bollati Boringhieri, Torino, 1988, pp. 361-373), in cui Einstein applica per primo la sua nuova teoria della relatività generale all’universo intero.

<sup>1</sup> A. EINSTEIN, *Pensieri di un uomo curioso*, Mondadori, Milano, 1997, p. 120.

<sup>2</sup> L. RUSSO: «il continuo progresso scientifico [...] non può essere considerato una caratteristica intrinseca alla natura stessa della scienza e non è quindi garantito per il futuro. Molti sintomi fanno piuttosto ritenere che la continua crescita del numero di articoli pubblicati e degli addetti alla ricerca si accompagni oggi a una crisi profonda nella qualità dei risultati». (Stelle, atomi e velieri, Mondadori, Milano, 2015, p. 2).

<sup>3</sup> Etimologicamente, cosmologia deriva dal greco *kόsmos* (ordine) e *lόgos* (discorso) e significa “discorso sull’ordine”, il che ci rivela come gli antichi filosofi (pare che furono i pitagorici i primi ad usare questo termine) identificassero l’universo col “cosmo”,

disciplina scientifica (se di scienza si può parlare)<sup>4</sup> sta nel fatto che l’universo è uno e può essere solo osservato: diversamente da quanto avviene in altri campi, gli astronomi non possono modificare l’oggetto delle proprie indagini. Dunque, il grado di certezza delle loro affermazioni (di solito) non è dello stesso livello delle proposizioni dicibili, per esempio, in fisica classica.

Volendo cercare di capire cosa sono stati gli ultimi cent’anni per la cosmologia, penso che sia istruttivo partire da una constatazione: come nel giro di poco tempo si sia passati da un paradigma al suo opposto.<sup>5</sup> Infatti, se i capisaldi di oggi sono l’espansione dell’universo e il suo avere avuto un’origine, non bisogna dimenticare che fino agli anni Venti premeva ancora la concezione di un universo statico e infinito, la quale poggiava su due assunti ritenuti fino ad allora solidissimi: la mancanza osservativa di fenomeni dinamici rilevanti (almeno su grande scala) e il modello gravitazionale newtoniano.<sup>6</sup> Bene, nel giro di qualche decennio tutto questo è stato ribaltato ed oggi quel mondo ci sembra incredibilmente assurdo e lontano; ma ciò non è avvenuto in maniera lineare e indolore, per cui è utile ripercorrere, anche a grandi linee, le pietre miliari di questa interessantissima storia.

Una storia che potremmo romanzescamente far iniziare nel 1826 con un antefatto: il medico e astro-

cioè, qualcosa di ordinato e perciò intelligibile: idea tutt’altro che scontata.

<sup>4</sup> L’affermazione può sembrare un po’ balzana, ora che, secondo molti, siamo entrati nell’era della “cosmologia di precisione” (su cosa si deve intendere con questo, avremo modo di ritornare più avanti), tuttavia, anche a non voler prendere sul serio le posizioni ostili (più o meno leggendarie) di un “certo” E. Rutherford cent’anni fa («Fate in modo che non sorprenda nessuno a parlare dell’universo nel mio dipartimento!», in M. BERSANELLI, *Il grande spettacolo del cielo. Otto visioni dell’universo dall’antichità ai nostri giorni*, Sperling & Kupfer, Milano, 2016, p. 218), il dibattito era ben vivo ancora alla metà del Novecento e, più recentemente, ci sono segnali di una sua ripresa; ad esempio, M. J. DISNEY si è espresso in modo piuttosto duro, ma, a mio avviso, sensato, su certe affermazioni trionfalistiche attorno alla cosmologia (*The Case Against Cosmology*, in *General Relativity and Gravitation*, Vol. 32, No. 6, 2000).

<sup>5</sup> Sull’effetto *bias*, ovvero, la distorsione (in questo caso, una vera e propria “miopia temporale”) che percepisce un contemporaneo guardando al passato, si consideri che oggi giorno si dataono i più antichi reperti di *homo sapiens* ad almeno 200.000 anni fa, ma la storia propriamente detta ha circa 5.000 anni, mentre la scienza di Galileo 500, infine, il “modello cosmologico standard” neanche 50 ...

<sup>6</sup> In realtà, lo stesso Newton era consapevole del fatto che, se da una parte, essendo la gravità solo attrattiva, l’unico modo per evitare il collasso di un universo statico è che questo sia infinito e con la materia distribuita in modo uniforme (per cui tutte le forze si bilanciano), dall’altro un tale equilibrio non può che essere instabile: basterebbe una piccola perturbazione locale per far collassare tutta la struttura.

nomo tedesco H. W. Olbers pubblica un saggio sull'esistenza di un paradosso, che viene ricordato col suo nome, il quale, se correttamente affrontato, avrebbe potuto mettere in crisi assai prima il vecchio paradigma.<sup>7</sup> Si tratta dell'osservazione, apparentemente banale, del fatto che di notte il cielo è buio. Infatti, un universo di infinite stelle ed eterno dovrebbe essere illuminato anche dopo il tramonto, come si deduce con un semplice calcolo dell'intensità luminosa ricevuta da tutti gli astri, la quale risulta crescere in maniera proporzionale alla distanza. In realtà, affinando il ragionamento, andrebbe tenuto conto del fatto che le stelle più vicine nascondono quelle più lontane situate sulla stessa linea di vista; di conseguenza, il cielo dovrebbe avere una brillanza superficiale pari a quella del Sole.<sup>8</sup>

Olbers ipotizzò che la luce delle stelle lontane fosse assorbita da un qualche mezzo interstellare, però, tale risposta (come avrebbe dimostrato di lì a poco la termodinamica) non funziona, perché, in un universo senza fine, la materia, prima o poi, raggiungerebbe l'equilibrio termico, arrivando a riemettere tanta radiazione elettromagnetica quanta ne assorbisse.

In effetti, le possibili soluzioni al paradosso sono molteplici, ma, alla luce dell'attuale modello cosmologico standard, il motivo principale per cui il cielo di notte non è luminoso deriva (forse)<sup>9</sup> dal fatto che, da una parte, c'è stato un inizio (e, quindi, non si può parlare di infinite stelle), dall'altra, l'espansione con lo spostamento verso il rosso della radiazione luminosa fa uscire dalla finestra del visibile la luce di oggetti sufficientemente lontani.<sup>10</sup> L'esempio più eclatante è dato dalla radiazione cosmica di fondo<sup>11</sup> (considerata la prima emissione di radiazione del neo-nato universo), che, infatti, oggi riceviamo sotto forma di microonde. In realtà, questa potrebbe essere interpretata proprio come effetto Olbers di un cosmo infinito ma

<sup>7</sup> Il paradosso di Olbers è uno dei molti esempi, nella storia della scienza, di quella che scherzosamente viene definita legge della "misonimia", per cui quasi niente (scoperta, invenzione o dimostrazione) porta veramente il nome della persona che ne è l'autore. Nella fattispecie, altri prima di Olbers, a partire almeno da Keplero (1610), avevano usato lo stesso argomento, ora per contraddirlo, ora per sostenere l'ipotesi di un universo infinito.

<sup>8</sup> Va detto, nell'ulteriore ipotesi semplificatrice che tutte le stelle abbiano la stessa luminosità e per sempre.

<sup>9</sup> Secondo alcuni (ad esempio, l'astronomo inglese E.R. Harrison) il vero motivo sarebbe essenzialmente legato al ciclo di vita finito delle stelle, per cui il paradosso sarebbe compatibile anche con un universo "stazionario".

<sup>10</sup> Il *redshift* è definito come:  $\zeta = (\lambda_o - \lambda_e) / \lambda_e$ , dove  $\lambda_o$  è la lunghezza d'onda di una riga (di emissione o assorbimento) tipica dello spettro di una data sostanza misurata in laboratorio e  $\lambda_e$  è la lunghezza d'onda della stessa riga in una sorgente lontana; tale differenza viene attribuita all'effetto Doppler, quello che, in forma analoga e più comune, è responsabile dell'alterazione del suono di una sirena che si avvicina (*blue-*) o si allontana (*red-shift*) da noi, e, quindi, considerato come il risultato del movimento relativo dell'oggetto lontano; per velocità  $v$  (radiali) molto inferiori a quella della luce ( $c$ ), vale la relazione  $\zeta = v/c$ .

<sup>11</sup> *Cosmic Microwave Background Radiation (CMBR)*.

INFINITO	FINITO
Anassimandro	
Democrito	Aristotele
Lucrezio	Tolomeo
	Dante
Cusano	
Bruno	Copernico
Cartesio	Keplero
Newton	
Kant	
Engels	Clausius
Kelvin	
Boltzmann	
	Einstein
	Lemaître
Hoyle	Gamow

TAB. 1. A titolo di esempio, si riporta un elenco di alcuni dei principali sostenitori di modelli di universo "infinito" o "finito", in circa 2600 anni di storia.

in espansione:<sup>12</sup> in tal caso, però, vorrebbe dire negare il *Big Bang* e, forse, riabilitare addirittura la teoria dello Stato (Quasi) Stazionario.<sup>13</sup>

Per concludere questa prima riflessione sui paradigmi "finito" e "infinito" (che si sono alternati come dominanti nel corso dei secoli: si veda tabella 1),<sup>14</sup> è curioso (ma non sorprendente) constatare che uno dei primi a intuire una spiegazione plausibile (e a noi più familiare) del paradosso sia stato uno scrittore: E. A. Poe, nel suo poema in prosa *Eureka* (1848), sostiene che l'universo abbia avuto origine da una condizione di unità, dalla frammentazione istantanea di una particella primitiva per l'azione di una forza repulsiva e che, se la successione delle stesse fosse senza fine, la sola maniera per comprendere «i vuoti che i nostri telescopi trovano in innumerevoli direzioni sarebbe quella di supporre la distanza del fondo invisibile così immensa che nessun raggio proveniente da esso ha potuto finora raggiungerci».<sup>15</sup>

<sup>12</sup> Sembra, però, che certe caratteristiche della radiazione cosmica di fondo non siano compatibili con questa ipotesi, anche se fa riflettere il fatto che la temperatura dello spazio "vuoto" misurata dai satelliti a partire dagli anni Novanta e interpretata come residuo "fossile" del *Big Bang* sia praticamente la stessa che si può dedurre come semplice "rumore di fondo stellare" e le cui prime misure risalgono addirittura alla fine dell'Ottocento (si veda, a tal riguardo, L. PATERNÒ, M. CONSOLI, *La temperatura dello spazio vuoto: implicazioni cosmologiche o curiosa coincidenza?*, «Giornale di Astronomia», 43-1, 2017, p. 2)

<sup>13</sup> Le due principali teorie cosmologiche del Novecento su cui avremo modo di ritornare.

<sup>14</sup> Ed è, perciò, lecito pensare che la parola fine non sia stata ancora scritta.

<sup>15</sup> Sintesi e traduzione personale da <http://www.bo.astro.it/~cappi/poequot.html>.

La cosmologia moderna<sup>16</sup> non poteva che nascerne alla luce della nuova legge di gravitazione, rappresentata dalla teoria della relatività generale, le cui equazioni definitive furono rese pubbliche da Einstein il 25 novembre del 1915. Egli fu anche il primo, due anni dopo, ad applicarle all'universo, partendo dall'ipotesi di "omogeneità" (cioè, di densità di materia costante)<sup>17</sup> e da quella di "diluizione" (in modo da considerare nulla la pressione): ne derivò un modello a curvatura positiva, ovvero, a geometria sferica, uno spazio illimitato ma finito. Tuttavia, per renderlo statico, in linea con le conoscenze astronomiche del tempo, Einstein dovette modificare la formulazione originale dell'equazione di campo, introducendo (a malincuore)<sup>18</sup> la cosiddetta "costante cosmologica": una sorta di forza repulsiva, capace di equilibrare, a lungo andare, la gravitazione.

Sempre nel 1917, l'olandese W. De Sitter (uno dei primi a far conoscere il lavoro di Einstein fuori dalla Germania) scoprì una seconda soluzione (anch'essa ritenuta, all'inizio, statica), ma partendo da un'ipotesi limite diversa, quella di un universo senza materia, in cui gli oggetti che lo riempiono (come le stelle) si possono considerare alla stregua di particelle *test*. Così facendo, De Sitter dedusse che, all'aumentare della distanza, le righe spettrali di tali oggetti dovessero presentare uno spostamento sistematico verso il rosso, che lui considerò come una velocità radiale "spuria" (aprendo, di fatto, la strada all'interpretazione cosmologica del *redshift*).

Sarà il russo A.A. Friedmann, tra il 1922 e il 1924, a trovare la soluzione generale alle equazioni di Ein-

<sup>16</sup> Non considero corretto l'uso dell'aggettivo "scientifica", che spesso si associa, nei testi contemporanei, al termine cosmologia, per caratterizzare e distinguere l'attuale stato delle conoscenze in materia, rispetto a quello delle epoche precedenti alla nascita della teoria della relatività, perché ritengo che non ci sia una ragione valida per definire "non scientifica" nemmeno la cosmologia di Aristotele, figurarsi quella di Newton o Laplace; anche se può sembrare appropriato secondo i nostri standard correnti, bisogna provare a chiedersi cosa penseranno della teoria del *Big Bang*, o di altre contemporanee, tra qualche centinaio di anni (e forse anche meno).

<sup>17</sup> Si tratta di quello che verrà poi chiamato (con l'aggiunta dell'isotropia) "principio cosmologico": assunto necessario per semplificare le complesse equazioni della relatività generale, ma che è chiaramente falso fino a dimensioni più che galattiche; solo a grandissima scala (oltre 100 Mpc) pare che emerga una certa uniformità di distribuzione della massa e dell'energia: si veda, a questo proposito, l'ipotesi osservativa di Laniakea, il "super-superammasso" di galassie (circa 100.000 in 160 Mpc) scoperto nel 2014 e del quale faremmo parte anche noi con la Via Lattea, il Gruppo Locale e il Superammasso della Vergine o il più avveniristico *Millennium Run*, il progetto di simulazione che tenta di riprodurre la struttura dell'universo attraverso l'approssimazione (col calcolo numerico) di un problema agli n-corpi (notoriamente insolubile già con n=3), considerando 10 miliardi di particelle (ognuna delle quali rappresenta una galassia) distribuite in una regione cubica di 2 miliardi di anni luce di lato: tutto questo è impressionante, ma se ne dovrebbero tenere bene a mente i limiti ...

<sup>18</sup> Sia per la sua natura "arbitraria" (cioè, non discendente da una logica interna alla teoria), sia per motivi "estetici" (la perdita di simmetria nell'equazione di campo). Infatti, nel 1931, preso atto della prova dell'espansione dell'universo e, quindi, del venir meno della ragione per la quale era stata introdotta, si racconta che Einstein la ripudiasse come il più grande errore della sua vita.

stein, cioè, infiniti modelli in cui compaiono il fattore di scala,  $R$ ,<sup>19</sup> che dipende dal tempo (eccetto il caso particolare dell'universo di Einstein in cui  $R$  è costante) e due parametri liberi:  $k$ , detto parametro di curvatura,<sup>20</sup> da cui dipende la geometria dell'universo,<sup>21</sup> e  $\Lambda$ , la costante cosmologica, che ne determina l'evoluzione; se quest'ultima è positiva e maggiore di un certo valore critico, si ottiene un modello che cresce in modo monotono a partire da un valore iniziale di  $R$  nullo; se, invece,  $\Lambda$  è positiva ma inferiore al valore critico, la crescita è ancora monotona con un'ordinata all'origine diversa da zero; altrimenti ( $\Lambda \leq 0$ ), l'universo risultante sarà periodico, con  $R$  che oscilla tra zero e un valore finito. Friedmann, tuttavia, conclude che le osservazioni dell'epoca non permettono di determinare in maniera certa a quale tipo appartenga il nostro universo.<sup>22</sup>

Intanto,<sup>23</sup> l'astronomo americano V. M. Slipher ha cominciato ad accumulare dati osservativi di spostamenti delle righe spettrali nelle cosiddette *nebulae*,<sup>24</sup> la maggior parte dei quali verso il rosso e interpretabili, appunto, come velocità radiali in allontanamento. Il tedesco C. W. Wirtz (1922) nota il fenomeno e discute la possibilità di una relazione con la distanza, collegandolo al modello di De Sitter. H. Weyl (1923), anch'egli tedesco, e il polacco L. Silberstein (1924) propongono, indipendentemente, relazioni lineari tra *redshift* e distanza, senza ottenere sufficiente attenzione o consenso. Nello stesso periodo, lo svedese K. Lundmark è il primo a porre in un grafico "velocità radiale" e "distanza", però, a causa della dispersione dei dati, non ritiene di poter tracciare un qualche tipo di tendenza. Wirtz, invece, rifacendosi proprio a Lundmark, propone una relazione in scala logaritmica, mentre l'astronomo svedese G.B. Strömgren utilizza la magnitudine apparente al posto delle distanze, ma anch'egli non vede sufficienti ragioni per inferire alcun tipo di relazione. Spetterà, così, all'americano E. Hubble

<sup>19</sup> È l'"incognita" e rappresenta il "parametro di espansione" dell'universo, in quanto descrive come variano nel tempo le distanze tra due punti (nei testi moderni si preferisce la notazione "a").

<sup>20</sup> È una costante (il cui valore va determinato sperimentalmente) che può essere  $< 0$  (universo a curvatura negativa o iperbolico),  $= 0$  (universo a curvatura nulla o piatto) o  $> 1$  (universo a curvatura positiva o ipersferico).

<sup>21</sup> Friedmann, però, sottolineò anche il fatto che la relatività generale, essendo basata su derivate parziali, fornisce solo risposte locali, ma non può dire nulla ("senza assunzioni addizionali") sulla forma generale dell'universo (si veda, ad esempio, J. P. LUMINET, B. F. ROUKEMA, *Topology of the universe: theory and observation*, arXiv:astro-ph/9901364v3, 1999).

<sup>22</sup> Da J. P. LUMINET, *L'Invenzione del Big Bang. Storia dell'Origine dell'Universo*, Edizioni Dedalo, Bari, 2006, pp. 46-47.

<sup>23</sup> A partire dal 1912.

<sup>24</sup> Ricordiamo che non erano state ancora risolte sia la questione della natura di questi oggetti (se stellare o altro) che della loro posizione (se all'interno o all'esterno della Via Lattea): dilemma che passerà alla storia come il "Grande Dibattito" (dal confronto che si tenne nel 1920 tra i due capofila delle tesi opposte: gli americani H. Shapley e H. Curtis) e che sarà sciolto da Hubble con la determinazione della distanza della nebulosa di Andromeda e l'evidenza del suo essere extra-galattica (1924).



FIG. 1. *Città ideale*, dipinto di anonimo italiano del Quattrocento, conservato a Berlino. (Staatliche Museen, Gemäldegalerie)

(utilizzando le misure del fido collega M. L. Humason, prese con l'allora telescopio più potente del mondo, il 100 pollici dell'osservatorio di Monte Wilson) affermare la dipendenza lineare, che avrebbe preso il suo nome, tra le velocità radiali delle galassie e le loro distanze (1929). Tuttavia, va ricordato che Hubble mostrerà sempre una certa prudenza interpretativa verso i suoi risultati.<sup>25</sup>

Gli anni Venti vedono anche l'entrata in scena del presbitero belga G. E. Lemaître, il quale, ignaro del lavoro di Friedmann, riscopre il fatto che le equazioni di Einstein ammettono soluzioni non statiche e, soprattutto, interpreta le osservazioni sui *redshifts* delle galassie come indizi di un universo in espansione,<sup>26</sup> ma all'inizio nessuno lo nota (1927). Nel 1930, il famoso astronomo inglese A.S. Eddington dimostra l'instabilità del modello di Einstein e, finalmente, prende in considerazione quello di Lemaître. Questi, nel 1931, pubblica un articolo in cui per la prima volta viene sostenuta l'idea (se vogliamo, di per sé un po' ingenua, come lo sarebbe affermare la convergenza reale delle linee in prospettiva nell'immagine riportata in FIG. 1) per la quale, se le galassie si stanno allontanando, andando indietro nel tempo dovevano essere state più vicine, fino ad arrivare, nell'istante iniziale, a condensarsi in una sorta di "atomo primordiale".<sup>27</sup> Lemaître può, quindi, essere considerato il vero padre del *Big Bang*, tanto più che egli stesso usa la metafora del «grande fuoco d'artificio».

<sup>25</sup> Egli, da "vero" astronomo osservativo, si "limitava" (per così dire) a raccogliere i dati, lasciando ai teorici l'interpretazione ultima, ma da varie fonti si sa che propendeva per il modello di universo di De Sitter.

<sup>26</sup> Derivando teoricamente la relazione che poi, trovata sperimentalmente da Hubble due anni dopo, diverrà la legge omonima.

<sup>27</sup> Si fa notare: con un ribaltamento totale rispetto alla cosmogonia di Kant del 1755, il quale poneva come punto di partenza dell'evoluzione del "mondo" una sorta di nebulosa diffusa, «un caos di particelle a riposo, distribuite in un vuoto infinito» (traduzione personale da H. S. KRAGH, *Conceptions of Cosmos*, Oxford University Press, New York, 2007, p. 79).

In quegli anni, anche Einstein e De Sitter si convincono che l'universo è in espansione e nel 1932 decidono di firmare insieme uno scritto che avrà il suo peso (per l'autorevolezza degli autori e per la semplicità del modello) nel ritardare l'affermazione dell'ipotesi del prete belga.<sup>28</sup> I due scienziati propongono una soluzione con curvatura spaziale e costante cosmologica nulle (possibilità, peraltro, già insita, come caso particolare, nei lavori di Friedmann e Lemaître), che si espande in modo "critico", cioè, con velocità tendente a zero all'infinito.

Bisogna arrivare al 1948 perché lo sviluppo della cosmologia abbia un nuovo sussulto: a prendere la scena sono ora i due principali modelli antagonisti. Il primo è quello che verrà battezzato di lì a poco *Big Bang* e sostenuto dal fisico ucraino (naturalizzato americano) G.A. Gamow, il quale da un paio d'anni ha iniziato a lavorare sull'ipotesi del condensato originale di Lemaître, sviluppando l'idea che in uno spazio così piccolo tutta la materia doveva trovarsi a una temperatura (oltre che densità) pazzesca, tale da rendere possibili le reazioni di fusioni nucleari.<sup>29</sup>

<sup>28</sup> L'universo che il belga propone nel 1931 è detto "esitante", perché caratterizzato da una fase in cui l'accelerazione iniziale rallenta fino all'equilibrio fra materia e costante cosmologica, che rappresenterebbe il momento favorevole alla formazione delle prime "strutture", per poi riprendere ad accelerare col prevale della costante cosmologica a seguito della rottura di tale equilibrio, causata proprio dalle suddette "condensazioni": in pratica, anticipa di quasi settant'anni il modello cosmologico standard (inflazione e "robe oscure" a parte).

<sup>29</sup> Col contributo importante, nella derivazione della teoria della nucleosintesi primordiale (che spiega la formazione degli elementi più leggeri), dell'americano R.A. Alpher (1946), il quale, poi, insieme al collega R. Herman, arriva a prevedere che, dopo l'inizio caldo, l'universo, raffreddandosi, a un certo punto diventò trasparente, lasciando sfuggire la sua "prima luce": secondo i loro calcoli, questa, dovrebbe avere al tempo attuale la forma di una radiazione di corpo nero alla temperatura di 5 K (il valore attualmente accettato è di circa 2,7 K); quest'ultimo risultato è normalmente considerato la scoperta teorica della CMBR.

La seconda teoria, denominata dello Stato Stazionario (*Steady State*), viene proposta dagli austriaci H. Bondi e T. Gold e dall'inglese F. Hoyle. Essa si basa sul cosiddetto "principio cosmologico perfetto", per il quale l'universo non solo è omogeneo e isotropo nello spazio, ma anche nel tempo, il che implica che sia eterno. Per giustificare l'espansione, i tre ipotizzano una creazione continua di materia, che, a conti fatti, si traduce in una quantità così minima da essere praticamente inosservabile.<sup>30</sup> Le motivazioni che spingono Hoyle e gli altri a sostenere lo Stato Stazionario sono fondamentalmente filosofiche, rifiutando l'idea che all'origine di tutto ci sia una singolarità.<sup>31</sup> E, inizialmente, il loro modello funziona meglio del *Big Bang*, alle prese con problemi legati all'età dell'universo<sup>32</sup> e alla formazione degli elementi più pesanti.<sup>33</sup>

Ma nel 1964<sup>34</sup> accade una di quelle scoperte, cosiddette *serendipity*,<sup>35</sup> che cambiano il corso della storia: gli americani A.A. Penzias e R. Wilson registrano con la nuova antenna dei laboratori Bell (il non *plus ultra* di quegli anni) un rumore di fondo, che all'inizio credono accidentale, cioè dovuto a qualche interferenza terrestre o ad errori dell'apparato strumentale; solo dopo quasi un anno<sup>36</sup> si rendono conto di aver trovato qualcosa di origine cosmologica.<sup>37</sup> Di fatto, è la parola fine sul modello

<sup>30</sup> Un atomo di idrogeno per m<sup>3</sup>, ogni 10 miliardi di anni: certamente, un'ipotesi *ad hoc*, come conveniva lo stesso Hoyle, ma non meno "incredibile" che immaginare come tutto l'universo abbia avuto origine a partire da un unico "punto"!

<sup>31</sup> Lo stesso Einstein aveva definito l'idea di Lemaître «ispirata dal dogma cristiano della creazione e ingiustificata sul piano della fisica» (J. P. LUMINET, *L'Invenzione...*, cit., p. 135).

<sup>32</sup> Il problema dell'età dell'universo nel modello del *Big Bang* è legato al valore della costante di Hubble, H, inizialmente stimato dell'ordine di 500 km/s Mpc, il che portava a calcolare un tempo di Hubble (l'inverso di H) e pari esattamente all'età dell'universo in caso di espansione costante) inferiore all'età della Terra, calcolata dai geologi secondo il metodo degli elementi radioattivi. Oggi, conti più precisi ci danno per H un valore di circa 70 km/s Mpc, di fatto risolvendo quasi completamente il problema dell'età (a maggior ragione, se risultasse confermata l'accelerazione nell'espansione dell'universo).

<sup>33</sup> Ironia della sorte, toccherà proprio ad Hoyle (già autore del nome col quale, malgrado lui, diverrà celebre la teoria rivale) aiutare a sgombrare il cammino verso l'affermazione del *Big Bang*, liberandolo da questo secondo problema, grazie alla scoperta del meccanismo che conduce, durante il ciclo di vita delle stelle, alla produzione degli elementi con numero atomico maggiore di 3 (che non possono essersi formati durante il *Big Bang* a causa del rapido raffreddamento dell'universo in espansione).

<sup>34</sup> In effetti, fin dagli anni Quaranta, misure parziali della temperatura di fondo del cielo vengono rilevate da vari esperimenti, ma nessuno le collega alle previsioni teoriche del *Big Bang*.

<sup>35</sup> Il termine (da Serendip, l'antico nome persiano dello Sri Lanka) indica la fortuna di fare felici scoperte per puro caso, trovando una cosa non cercata e imprevista; fu coniato nel Settecento dallo scrittore inglese H. Walpole traducendo un racconto italiano (*Peregrinaggio di tre giovani figliuoli del re di Serendippo* di Michele Tramezzino, 1557).

<sup>36</sup> Le provano tutte, pensando a problemi tecnici, a disturbi dovuti a trasmissioni terrestri, addirittura, per un momento, credono di aver individuato la causa in un nido di uccelli!

<sup>37</sup> Grazie a un collega, al quale avevano infine raccontato le proprie disavventure: nella pubblicazione scientifica che ne seguì (1965), l'articolo di Penzias e Wilson si limitò a descrivere la sco-

dello Stato Stazionario, anche se i suoi principali fautori<sup>38</sup> non si arrenderanno mai, modificando in maniera opportuna (ma sempre meno semplice) la loro teoria.<sup>39</sup>

Un altro punto di forza della teoria del *Big Bang* che si consolida in quegli anni (meno famoso, ma forse più rilevante) è il fatto che osservando sempre più lontano (e, quindi, indietro nel tempo) sembra che si trovino distribuzioni diverse di certi oggetti (ad esempio, i *quasar*), le quali starebbero a indicare un'evoluzione dell'universo difficile da conciliare col principio cosmologico perfetto.<sup>40</sup>

C'è da dire che anche i sostenitori del "grande botto" non ebbero subito vita facile, per la difficoltà a spiegare altri fenomeni che emergevano via via in modo sempre più chiaro.<sup>41</sup>

Si deve arrivare ai primi anni Ottanta perché le principali obiezioni a quello che nel frattempo è diventato il modello cosmologico standard trovino una composizione grazie a una nuova ipotesi, quella dell'"inflazione", tra i cui pionieri ci sono il russo A. A. Starobinsky e l'americano A. Guth.<sup>42</sup>

Gli anni Novanta si aprono con le sfide tecnologiche e i risultati strabilianti della nuova generazione di satelliti (e telescopi a terra) di sensibilità (e dimensioni) a lungo inimmaginabili: tra quelli destinati allo studio della radiazione cosmica di fondo (che tante implicazioni ha sulla verifica sperimentale dei modelli cosmologici), il primo (lanciato nel novembre del 1989) è COBE (COsmic Background Explorer) e il successivo (2001) è WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), entrambi della NASA, mentre l'ultimo (2009) è PLANCK dell'ESA. Vale la pena di ricordare (non solo per un po' di sano patriottismo) anche BOOMERANG (Balloon

perta, mentre l'interpretazione venne affidata al gruppo di teorici dell'Università di Princeton, guidati da R. Dicke, i quali si erano messi sulle tracce di questo segnale, ma erano stati bruciati sul tempo dai due ricercatori.

<sup>38</sup> In particolare, lo stesso Hoyle, insieme ai coniugi G. e M. Burbidge e a J.V. Narlikar.

<sup>39</sup> Sul concetto di semplicità applicato alle teorie cosmologiche ci sarebbe molto da discutere.

<sup>40</sup> Sempre che non avesse ragione (anche parzialmente) l'americano H. C. Arp nel sostenere che i *redshift* associati a certi *quasar* non possano essere di origine cosmologica, in quanto tali oggetti mostrerebbero dei contatti fisici con galassie dotate di spostamento verso il rosso notevolmente inferiore (*Seeing Red: Redshifts, Cosmology and Academic Science*, Apieron, Montreal, 1998).

<sup>41</sup> Tra i quali il problema dell'orizzonte, il problema della piattezza e il problema dell'assenza di monopoli magnetici: si tratta di caratteristiche osservate nell'universo in cui viviamo che mal si conciliano con l'ipotesi di un semplice *Big Bang* (non potendo approfondire l'argomento in questa sede, per la loro spiegazione si rimanda a testi specialistici).

<sup>42</sup> L'idea è che l'universo, nei primissimi istanti di vita (circa  $10^{-35}$  s dal *Big Bang*), abbia attraversato una fase di espansione parossistica. La crescita enorme del raggio dell'universo (la cui stima varia da un modello inflattivo all'altro, ma che, grossomodo, si può assumere pari a un fattore  $10^{30}$ ) si presta a spiegare in un colpo solo le suddette obiezioni al *Big Bang* classico; inoltre, le piccole anisotropie della CMBR (che sono dell'ordine di una parte su  $10^5$ ) sarebbero emerse, proprio durante l'inflazione, grazie all'amplificazione improvvisa di fluttuazioni quantistiche preesistenti e dovute all'energia del vuoto.

*Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics*),<sup>43</sup> che ha misurato la radiazione cosmica di fondo per mezzo di un pallone fatto volare ad alta quota, in tre missioni tra il 1997 e il 2003. Infatti, è stato il primo esperimento in grado di fornire un'immagine ad alta definizione delle anisotropie della temperatura della CMBR (pur se in una porzione limitata dello spazio). Ma molti altri<sup>44</sup> sono i satelliti lanciati nello spazio a sondare ogni parte dello spettro elettromagnetico (dai raggi gamma alle onde radio) e i cui risultati hanno fornito (e forniranno sempre più)<sup>45</sup> informazioni preziose per sostenere, confutare o far nascere teorie cosmologiche che meglio si prestino alla loro interpretazione.

Come ponte ideale tra il vecchio e il nuovo millennio si pone la scoperta, nel 1998 (ad opera di due gruppi di ricerca, guidati uno da S. Perlmutter, l'altro da B.P. Schmidt e A. Riess), di una possibile accelerazione nell'espansione dell'universo, che ha fatto tornare *in auge* la costante cosmologica di Einstein, il cui ruolo non sembra più né tanto arbitrario, né, soprattutto, trascurabile.

Ovviamente, una storia della cosmologia seria dovrebbe raccontare molte più cose, ma si spera di essere riusciti lo stesso ad offrire almeno un'idea di quello che è stato il lungo e tortuoso cammino di questa disciplina negli ultimi cent'anni, che hanno visto mutare così profondamente il paradigma alla base della nostra concezione dell'universo.

Se è vero che questo inizio di nuovo secolo viene considerato da molti l'era della "cosmologia di precisione", grazie al miglioramento formidabile della tecnologia (non solo per la strumentazione osservativa, ma anche per le crescenti potenzialità di calcolo e simulazione),<sup>46</sup> il ruolo degli scienziati, oltre a quello di effettuare misurazioni che mostrino l'accuratezza dei modelli con un dettaglio sempre maggiore, dovrebbe essere (e forse in maniera premiante) quello di scoprire e sottolineare eventuali debolezze, perché solo così può nascere l'esigenza

<sup>43</sup> A responsabilità di P. De Bernardis dell'Università *La Sapienza* di Roma.

<sup>44</sup> Come non citare *Hubble Space Telescope* (nello spazio dal 1990), risultato della collaborazione tra NASA ed ESA: il primo telescopio ottico capace di arrivare a una risoluzione di 0,1 secondi d'arco.

<sup>45</sup> Ad esempio, col *James Webb Space Telescope* da 6,5 m di diametro (il cui lancio è previsto entro il 2019 e che opererà nell'infrarosso), per finire (si fa per dire) con lo *European Extremely Large Telescope*, da 39 m di diametro!, che sorgerà sul monte Paranal del Cile nel prossimo decennio.

<sup>46</sup> A rischio di passare per una Cassandra (figura che, purtroppo, si tende a ricordare più nell'accezione di uccello del malaugurio che in quella di simbolo di lungimiranza), mi preme sottolineare il rischio di affidarsi ciecamente alle simulazioni come mezzo di conoscenza: i calcolatori, in fondo, riproducono quello che gli diciamo noi di fare, attraverso opportuni algoritmi, i quali nascono da ipotesi ritenute vere o ragionevoli, ma che possono non esserlo affatto, se non all'interno di determinati modelli, col rischio di arrivare così a dimostrare (al massimo) quello che era già implicito in partenza.

di una nuova comprensione della realtà e di teorie migliori.<sup>47</sup>

Ciò premesso e ricapitolando, oggi giorno, per modello cosmologico standard (detto  $\Lambda$ CDM)<sup>48</sup> s'intende la teoria del *Big Bang* caldo<sup>49</sup> con l'aggiunta dello scenario inflazione,<sup>50</sup> della costante cosmologica e della materia oscura fredda.<sup>51</sup> Da un punto di vista teorico,<sup>52</sup> esso poggia sul principio cosmologico, sulla teoria della relatività generale e sull'interpretazione del *redshift* come effetto Doppler;<sup>53</sup> dal lato osservativo, invece, i tre pilastri che lo sostengono e la cui accuratezza ha ormai raggiunto i pochi punti percentuali,<sup>54</sup> sono: l'espansione dell'universo, la concentrazione relativa degli elementi chimici leggeri (in particolare, dell'elio)<sup>55</sup> e la radiazione cosmica di fondo.

Tuttavia, il modello di Lemaître, Gamow & Co. lascia aperti alcuni problemi, tra cui:

1. L'origine stessa del *Big Bang*.
2. L'origine delle fluttuazioni primordiali della densità.
3. L'origine dell'inflazione.

<sup>47</sup> Si legga in proposito l'interessante articolo di M. M. CIRKOVIC, S. PEROVIC, *Alternative explanations of the cosmic microwave background: a historical and an epistemological perspective*, «The Studies in History and Philosophy of Modern Physics», Submitted on 8 May 2017 (in particolare, alle pp. 39-41).

<sup>48</sup>  $\Lambda$  è la costante cosmologica e CDM sta per *Cold Dark Matter* (si veda più avanti).

<sup>49</sup> Nei primi anni Sessanta il russo J.B. Zel'dovič arrivò a ipotizzare anche un modello di *Big Bang* freddo, poi, abbandonato.

<sup>50</sup> Decine di teorie diverse, tra le quali si fa ancora molta fatica a scegliere quella giusta. Gli ultimi dati prodotti da PLANCK sembrano favorire i modelli più complicati, con un certo imbarazzo per la comunità scientifica che sostiene il modello standard (almeno secondo A. IJIAS, P.J. STEINHARDT, A. LOEB, *L'universo fa boom*, «Le Scienze», 2017, 584, p. 30).

<sup>51</sup> Ci sono due correnti di pensiero: una prevede che la materia oscura sia di tipo "caldo" (ad es., i neutrini relativistici), l'altra "freddo". Al momento, il primo modello sembra sfavorito rispetto al secondo.

<sup>52</sup> Alla base di tutti questi ragionamenti, ci sono almeno altre due assunzioni implicite: innanzitutto, la validità nel tempo e nello spazio delle leggi note della fisica e l'esistenza di appropriate condizioni iniziali, in particolare: che la temperatura in una delle prime fasi del *Big Bang* avesse valori opportunamente alti, che il contenuto dell'universo fosse in equilibrio termico, che esistesse un'asimmetria a favore della materia barionica, che il parametro di densità iniziale fosse estremamente vicino a 1 e che ci fosse uno spettro di fluttuazioni di densità compatibile con la successiva formazione delle strutture...

<sup>53</sup> Ammesso e non concesso che questa interpretazione sia corretta! Il che non dovrebbe essere dato per scontato: a partire dalla «luce stanca» di F. Zwicky, molti sono i meccanismi alternativi proposti nel tempo (anche di recente) e non tutti si possono considerare definitivamente "fuori gioco". Vale la pena leggere il seguente articolo di L. MARMET, *On the Interpretation of Red-Shifts: A Quantitative Comparison of Red-Shift Mechanism II*, 2016 ([www.marmet.org/cosmology/redshift/mechanisms.pdf](http://www.marmet.org/cosmology/redshift/mechanisms.pdf)).

<sup>54</sup> Il "prezzo" della precisione si chiama (è bene dirlo!) "parametri liberi": maggiore è il loro numero (attualmente sono sei), maggiori sono le possibilità di far fare al nostro modello, in ultima analisi, quello che vogliamo (si veda anche: R. G. VISHWAKARMA, J. V. NARLIKAR, *A Critique of Supernova Data Analysis in Cosmology*, «Research in Astron. Astrophys.», Vol. 10, No. 12, 2010).

<sup>55</sup> C'è, infatti, il cosiddetto "problema del *7Li*", la cui abbondanza osservativa è circa tre volte inferiore a quanto previsto dal modello; varie ipotesi cercano di spiegare la discrepanza, ma, al momento, nessuna in maniera risolutiva.

4. L'evoluzione dell'universo a energie superiori a 100 GeV.<sup>56</sup>
5. La bariosintesi, ovvero l'origine dell'asimmetria barionica.<sup>57</sup>
6. La natura della materia e dell'energia oscura.

Se le prime tre questioni appartengono più al campo meta-fisico che a quello scientifico e la quarta e quinta (almeno per ora) restano confinate al solo livello teorico, qualcosa di più concreto si può provare a dire sulle "cose" oscurie.

La presenza di un tipo di materia non visibile (e, perciò, ritenuta non in grado di emettere, o quasi, radiazione elettromagnetica) è un fatto che ha molte conferme osservative.<sup>58</sup> Il primo a ipotizzarne l'esistenza su base sperimentale fu l'astronomo svizzero Zwicky nel 1933, come spiegazione del fatto che le velocità radiali nell'ammasso di galassie della Chioma sono talmente elevate (dell'ordine di 1000 km/s), che col contributo alla massa totale del sistema da parte della sola materia luminosa non si riesce a giustificare come queste galassie possano rimanere vicine. Da allora, altre prove indirette si sono aggiunte a suffragare l'esistenza di materia oscura in quantità nettamente superiore (in media, oltre cinque volte) a quella visibile, in particolare: la curva di rotazione delle galassie a spirale,<sup>59</sup> l'effetto lente gravitazionale e la presenza di gas caldissimo attorno alle galassie ellittiche. C'è anche un motivo teorico (di parte) a favore della *dark matter*: i modelli che cercano di inquadrare la formazione delle strutture a partire dal *Big Bang*, per funzionare, hanno bisogno dell'aiuto preponderante di materia oscura.

Quindi, se il ricorso a quest'ultima pare abbastanza giustificato, più complicato è stabilirne la natura. Una prima spiegazione potrebbe essere quella di oggetti macroscopici (quali nane marroni,<sup>60</sup> bian-

<sup>56</sup> Questi aspetti vengono investigati nella cosiddetta "nuova fisica" GUT, *Grand Unified Theory*, che, però, è ancora ben lungi dal poter essere verificata.

<sup>57</sup> I barioni sono una famiglia di particelle (tra cui spiccano i protoni e i neutroni) la cui caratteristica è quella di essere costituite da tre *quark*; per la loro massa e stabilità, rappresentano complessivamente il grosso della materia propriamente detta. L'asimmetria barionica, cioè lo scarto positivo tra il numero di particelle di materia e quelle di antimateria, è una condizione necessaria a spiegare l'esistenza dell'universo come lo conosciamo, ma non trova giustificazione teorica nel modello standard della fisica delle particelle.

<sup>58</sup> Tuttavia, mi permetto di osservare che il *gap* tra massa gravitazionale e massa luminosa potrebbe avere origine (almeno in parte) nelle modalità di "pesare" la materia (ad esempio) attraverso la sua luminosità. Gli astronomi sono davvero bravi: cosa non riescono a fare con la poca "luce" che arriva dal cielo notturno! Eppure, come ci ha ricordato recentemente in una conferenza a Massa la Presidente SAlt Giovanna Trinchieri, per gli astronomi  $1 \approx 10$ , il che ci dà il senso delle grosse approssimazioni a cui si è costretti in molte circostanze.

<sup>59</sup> Si veda anche C. ELIDORO, *Girandole cosmiche*, in "Spigolature astronomiche" a cura di A. D'Ercole, «Giornale di Astronomia», 43-2, 2017, p. 37.

<sup>60</sup> Dette anche nane brune, sono, in pratica, stelle mancate per insufficiente massa, minore di 0,08 volte quella solare (che vale circa  $2 \cdot 10^{33}$  g) e, pertanto, incapaci di far raggiungere al nucleo, per contrazione gravitazionale, quei milioni di gradi di temperatura necessari all'innescio delle reazioni nucleari che accendono una stella.

che e nere,<sup>61</sup> pianeti gioviani<sup>62</sup> ed eventuali buchi neri primordiali)<sup>63</sup> che di fatto non emettono radiazioni rilevabili (collettivamente denominati *MACHOS*, *Massive Compact Halo Objects*). Però, da calcoli fatti (per esempio, sulla probabilità che simili corpi siano responsabili delle lenti gravitazionali osservate), si può concludere che solo una parte minore della materia oscura può essere costituita da simili oggetti. Un limite superiore alla percentuale di materia ordinaria deriva, poi, da considerazioni teoriche legate alla nucleosintesi primordiale.<sup>64</sup>

Uno dei primi candidati non barionici è rappresentato dai neutrini, che dovrebbero possedere massa. Tuttavia, questa non sembra sufficiente a spiegare la quantità di materia stimata dinamicamente. Inoltre, un altro problema è legato alla natura relativistica di queste particelle, la quale difficilmente avrebbe permesso alle strutture di formarsi.

Da tutte queste (e altre) considerazioni, alcuni inferiscono la necessità dell'esistenza di nuove particelle (non previste, cioè, dal modello standard delle fisica sub-atomica), per le quali si è coniato l'acronimo *WIMPS* (*Weakly Interacting Massive Particles*). Nonostante vari progetti di ricerca in tutto il mondo, da tempo, stiano dando la caccia a questi "campioni" della nuova fisica, ad oggi, non ne è stata ancora trovata evidenza.<sup>65</sup>

<sup>61</sup> Le nane bianche sono stelle che hanno all'incirca la stessa massa del Sole concentrata in un volume simile a quello della Terra e sono il risultato del collasso di stelle medie al termine della loro vita, quando cioè si rompe l'equilibrio tra la forza gravitazionale e la pressione di radiazione (conseguenza delle fusioni nucleari interne) per esaurimento del combustibile. Sono stelle che, una volta raggiunto un nuovo equilibrio grazie all'instaurarsi di uno stato fisico particolare degli elettroni (detto degeneri), continuano a irradiare come semplici corpi caldi, raffreddandosi progressivamente fino a spingersi e diventare, appunto, nane nere.

<sup>62</sup> Dal nome del più grande pianeta del Sistema solare (Giove ha una massa che è circa un millesimo di quella del Sole).

<sup>63</sup> Ribattezzati anche mini perché di massa contenuta, dell'ordine di  $10^{14}$  g. Tuttavia, la loro esistenza è un'ipotesi ancora tutta da verificare (anzi, al momento ci sono buone ragioni per dubitare quantomeno che ce ne siano in numero significativo); il concetto stesso di buco nero (potrà sembrare strano visto che se ne sente tanto parlare) non ha ancora ricevuto una vera e propria conferma diretta (del resto, come si intuisce dalle caratteristiche di questi oggetti, non facile da scoprire). Non lo sono, a mio avviso, neanche le prime onde gravitazionali rilevate dalla collaborazione Ligo-Virgo, la cui interpretazione come prodotto della fusione di due buchi neri è il risultato (plausibile, ma non dirimente) di un modello matematico (e, per questo, una prova indiretta).

<sup>64</sup> Quindi, all'interno del modello del *Big Bang*...

<sup>65</sup> Come ex-studente di astronomia a Bologna, mi piace ricordare che già A. Renzini, in tempi non sospetti, aveva trovato alcuni ostacoli astrofisici a un certo tipo di *WIMPS* (anche se nell'ambito del dibattito sulla ricerca di soluzioni al problema dei neutrini solari): particelle debolmente interagenti con la materia ed aventi certe sezioni d'urto, dovrebbero comunque alterare la struttura interna di stelle come il Sole, il che, in ultima analisi, si ripercuoterebbe sui ben noti diagrammi H-R, modificandoli; cosa che, invece, non si osserva (A. RENZINI, *Effects of cosmions in the Sun and in globular cluster stars*, in «Astron. Astrophys.» 171, 1987, pp. 121-122). Questo mi dà lo spunto per dire che, forse, gli argomenti astronomici, più della "nuova fisica", potrebbero portarci alla soluzione del mistero della materia oscura e magari scopriremo, poi, che non era neanche tanto misteriosa come ci sembra oggi.

Nella visione del modello cosmologico standard, l'universo è costituito<sup>66</sup> per il 5% circa dalla materia barianica, per il 27% dalla materia oscura e per il restante 68% dalla cosiddetta energia oscura. Quest'ultima (invocata per spiegare l'accelerazione che sembrerebbe emergere dall'analisi delle *supernovae* di tipo Ia) sarebbe una sorta di energia quantistica del vuoto, il cui effetto è descritto matematicamente dalla costante cosmologica e che agisce come una forza repulsiva capace di prevalere sulla gravità a scale molto grandi. Il problema è che, calcolandone il valore con la meccanica quantistica, si ottiene un numero che è 120 ordini di grandezza (!!!) superiore a quello osservato: si tratta del peggior caso di disallineamento tra valori teorici e sperimentali di tutta la scienza. Sembrerebbe<sup>67</sup> un altro segnale che bisogna superare la fisica attuale, ma, per ora, le varie teorie proposte sono da considerarsi mere speculazioni.<sup>68</sup>

Il modello cosmologico standard è stato sviluppato estrapolando le conoscenze fisiche attuali sino ad energie molto più grandi di quelle studiate sperimentalmente e a scale di distanza immense, la cui misura è ancora affetta da errori significativi, quindi, la possibilità di trovare conferme è sottoposta, innanzitutto, a limiti teorici: il modello standard della fisica delle particelle dovrebbe essere valido fino a un livello corrispondente a circa  $10^{-12}$  secondi dopo il *Big Bang*; ogni affermazione relativa ad epoche anteriori è fondata su teorie non sufficientemente consolidate. Inoltre, l'osservazione elettromagnetica non può coprire le fasi precedenti l'epoca cosiddetta della ricombinazione<sup>69</sup> (ca. 380.000 anni dopo il *Big Bang*, quando sarebbe stata emessa la radiazione cosmica di fondo), in quanto fino a quel momento l'universo era opaco.<sup>70</sup> In linea di principio, uno sguardo oltre quel muro può essere gettato, dal momento che, nel 2015, sono state finalmente rilevate le onde gravitazionali, o grazie al potenziamento della strumentazione che permette lo studio dei neutrini eventualmente emessi prima della CMBR. Pertanto, nei prossimi anni, potremo forse arrivare a chiarire i molti dubbi (o a dover riscrivere daccapo questa storia!). Ancora più incerte sono, poi, tutte le affermazioni sull'evoluzione dell'universo nel lontano futuro.

<sup>66</sup> Secondo le più recenti stime (2015) derivate dalle osservazioni del satellite PLANCK.

<sup>67</sup> A meno di non rinunciare all'idea stessa di *Big Bang*...

<sup>68</sup> Si fa soltanto un cenno a un paio di queste: l'identificazione dell'energia oscura con una sorta di nuova forza, denominata "quintessenza" (diversa dall'energia del vuoto, tra l'altro, per essere variabile nel tempo) e l'ipotesi che la relatività generale vada modificata su larga scala.

<sup>69</sup> A parte l'infelice suffisso "ri", si tratterebbe della prima combinazione di elettroni e nuclei a formare gli atomi, avvenuta quando l'universo, espandendosi, si era raffreddato abbastanza (attorno a 3000 K) perché le forze elettrostatiche attrattive prevalessero su quelle repulsive dovute all'energia cinetica delle particelle.

<sup>70</sup> In conseguenza del continuo scattering dei fotoni nel plasma di nuclei ed elettroni liberi dovuto a una temperatura ancora troppo alta perché potessero formarsi atomi stabili.

Sebbene ci siano ragioni valide per credere che il modello cosmologico standard sia fondamentalmente corretto, si deve sempre tener presente che potrebbe, in seguito, rivelarsi sbagliato, mentre una delle alternative (attuali o a venire) risultare migliore o, comunque, più completa. Infatti, non si può fare a meno di notare che l'insieme delle ipotesi *ad hoc*, inflazione, materia ed energia oscura, che sostengono il *Big Bang* ricorda vagamente una versione moderna di epicli, deferenti ed eccentrici del sistema geocentrico tolemaico.<sup>71</sup>

Abbiamo detto che gli elementi alla base del modello  $\Lambda$ CDM sono: il principio cosmologico, la relatività generale, l'inflazione, le "cose" oscuri e l'interpretazione come effetto Doppler del *redshift*. Per ognuno di questi, sono state sviluppate teorie alternative che non ne tengono conto o ne danno una spiegazione diversa. Per motivi di spazio si farà solo un brevissimo cenno ad alcune di esse.<sup>72</sup>

Il venir meno (anche in parte) del principio cosmologico ha portato allo sviluppo dei modelli omogenei ma non isotropi (che si basano sulle classi di simmetria studiate dal matematico italiano L. Bianchi e tra cui merita una menzione l'universo *mixmaster* dell'americano C.W. Misner), o di quelli isotropi ma non omogenei (notevoli le soluzioni del connazionale R. Tolman e gli universi gerarchici dello svedese C. Charlier, in cui la distribuzione della materia si suppone che obbedisca a una struttura di tipo frattale).<sup>73</sup>

La rinuncia alla relatività generale ha portato gli inglesi E.A. Milne e W. McCrea, nella prima metà del Novecento, a sviluppare un modello cosmologico basato sulla teoria di Newton e la sola relatività speciale di Einstein.

Alcuni scienziati si sono, invece, ispirati allo studio delle "coincidenze cosmiche" del britannico P. Dirac: egli costruì numeri adimensionali a partire dalle costanti fisiche fondamentali, scoprendo che danno valori approssimativamente uguali e ipotizzando che ciò non sia casuale, ma dipenda da leggi fisiche non ancora scoperte; ne segue che alcune di queste costanti potrebbero in realtà essere variabili. Rifacendosi a queste idee, R.H. Dicke e C.H. Brans hanno sviluppato una teoria basata su una funzione del moto (lagrangiana) più ampia di quella della relatività generale. Ne viene fuori un modello che rappresenta un'estensione delle soluzioni trovate da Friedmann. Tuttavia, le complicazioni che ne derivano rendono il modello poco maneggevole, anche

<sup>71</sup> Come non ricordare le parole profetiche del filosofo arabo Averroè, il quale, circa quattro secoli prima di Copernico, affermava che eccentrici ed epicli sono impossibili, qualcosa che fa tornare i conti ma che non ha senso.

<sup>72</sup> Per uno sguardo più "variegato" (oltre alla già citata opera di MARMET), si consigliano le seguenti letture: H. RATCLIFFE, *The Second Crisis in Cosmology Conference (ccc2)*, Alternative Cosmology Group, Port Angeles, April 2013, e J.D. BARROW, *Il libro degli universi. Guida completa agli universi possibili*, Mondadori, Milano, 2016.

<sup>73</sup> Che, tra l'altro, offre una soluzione brillante al paradosso di Olbers: infatti, il contributo integrato della luminosità delle stelle in un universo frattale, anche se infinito, è trascurabile.

dal punto di vista delle previsioni possibili, la più importante delle quali resta la variazione nel tempo della costante di gravitazione universale (finora, però, non riscontrata). Dicke è stato anche uno dei primi, negli anni Sessanta, a dare alle coincidenze cosmologiche di Dirac, un'interpretazione basata sul principio antropico debole.<sup>74</sup>

Il modello cosmologico alternativo più famoso è senza dubbio quello dello Stato Stazionario, di cui si è già parlato. Dopo la scoperta della radiazione cosmica di fondo e il decretato trionfo del *Big Bang*, scienziati come Hoyle, lonti dall'abbandonare il loro modello, ne hanno affinato le ipotesi in modo da renderle plausibili con i nuovi dati osservativi, fino a produrre una variante nota come modello dello "Stato Quasi-Stazionario" (QSS, in cui la materia viene creata non come singoli nucleoni, ma in dimensioni di scala cosmologica, ad esempio, al centro delle galassie attive). Da notare che il principio cosmologico perfetto porta a un parametro di Hubble veramente costante e, quindi, a un'espansione esponenziale, che è la stessa adottata nello scenario inflazione.<sup>75</sup>

Un'alternativa interessante all'ipotesi della materia oscura è rappresentata dalla teoria MOND (*MOdified Newtonian Dynamics*), formulata dal fisico israeliano M. Milgrom nel 1981,<sup>76</sup> che prevede, appunto, una modifica alla seconda legge di Newton per accelerazioni molto piccole. Il vantaggio di questo approccio è quello di non richiedere l'esistenza di alcuna materia "esotica" per spiegare, ad esempio, la curva di rotazione delle galassie a spirale. I limiti maggiori (oltre a non risultare compatibile con la relatività generale!) sono dovuti al fatto che la maggior parte degli altri dati osservativi sembrano non collimare con le predizioni fatte all'interno di questa teoria.

Anche l'idea dell'energia oscura ha i suoi rivali, infatti, non tutti accettano l'interpretazione secondo cui l'espansione dell'universo starebbe accelerando (Narlikar, in particolare, propone che l'effetto sia dovuto all'estinzione della luce provocata da aghi di polvere formatisi nelle vicinanze delle stelle, nell'ambito della già citata teoria dello Stato Quasi-Stazionario).

Sul filone delle interpretazioni alternative al *redshift* si innesta, poi, la cosmologia del plasma, che fu sviluppata nella seconda metà del Novecento dagli svedesi H. Alfvén e D. Klein: in essa si attribuisce alle forze elettromagnetiche un ruolo ugualmente importante a quello della gravità nel modellare l'universo.

<sup>74</sup> Del quale si farà un cenno alla fine.

<sup>75</sup> Ciò significa anche che il QSS (a differenza del *Big Bang*) prevede l'accelerazione dell'espansione dell'universo, senza bisogno di rincorrere (verrebbe da dire «come novelli cavalieri Jedi») l'energia oscura.

<sup>76</sup> Il primo ad ipotizzare la non validità della legge di Newton a grandi distanze fu lo scienziato francese A. Calimon, amico di H. Poincaré, in uno scritto del 1889. Più recentemente (1963) ne aveva parlato anche il fisico italiano A. Finzi.

Filosoficamente interessante è pure la teoria denominata SEC, *Scale Expanding Cosmos*, di un altro svedese, C. J. Masreliez, che promette (e forse esagera un tantino) di risolvere quasi tutti i problemi del modello cosmologico standard.

Di natura ancor più speculativa sono da considerarsi: le varie ipotesi dei "molti mondi" o delle "storie differenziate" (proposte a partire, rispettivamente, dagli americani H. Everett III e da M. Gell-Mann e J. Hartle), che si basano su interpretazioni della meccanica quantistica diverse da quella di Copenhagen; il modello di universo ciclico dell'americano P. Steinhardt e del sudafricano N. Turok, nonché l'eterna inflazione del russo A. D. Linde.

Infine, ci sono le cosmologie quantistiche propriamente dette, che cercano di riconciliare relatività generale e teoria dei quanti: dalle "superstringhe" (e la più generale teoria "M"), alla gravità quantistica a loop.

Recentemente, alcuni fisici (tra cui G. Ballesteros), per rispondere in modo unitario ai principali problemi aperti della fisica contemporanea, hanno unito una serie di ipotesi *ad hoc*, preesistenti in una teoria euristica denominata SMASH, ovvero, *Standard Model Axion Seesaw Higgs*; si tratta (come s'intuisce dal nome) di un'estensione del modello standard per mezzo dell'aggiunta di alcune nuove particelle: l'assione<sup>77</sup> per la materia oscura, tre nuovi neutrini per spiegarne l'origine della massa (altrimenti, non giustificabile allo stato attuale delle conoscenze) e l'inflazione quale causa dell'inflazione. Il nuovo modello pare che riesca anche a fare previsioni che in futuro potranno essere verificate o falsificate.

La cosmologia è indubbiamente un settore di studi affascinante, perché cerca di dare risposte alle domande fondamentali che accompagnano l'uomo da sempre. Tuttavia, questa è anche la missione dei miti, delle religioni e dell'arte. Il rischio, quindi, di sconfinare dalla scienza agli altri campi è altissimo ed occorre molto rigore per evitare passi falsi. Purtroppo, una certa letteratura (non solo divulgativa), si lascia facilmente prendere la mano: molti articoli e libri (per non parlare di programmi televisivi) cominciano con «se [la tal proposizione è vera], allora ...» e il resto del contenuto diventa un bel romanzo, spesso avvincente come un film in 3D, ma che appunto non è più scienza, perché poggia su un assunto non dimostrato e magari neanche falsificabile, mentre il problema della sostenibilità dell'ipotesi di partenza viene per lo più sorvolato (quando non del tutto taciuto).

È giusto costruire teorie e cercare di metterle alla prova. Attualmente, quella che dà le migliori risposte (anche rispetto al sempre valido principio del rasoio di Occam)<sup>78</sup> sembra essere il modello

<sup>77</sup> Uno dei principali candidati al ruolo di WIMP.

<sup>78</sup> Principio fondamentale nella scienza, che si può riassumere nella frase: «a parità di fattori la spiegazione più semplice è da preferire». Eppure, c'è chi arriva perfino a metterne in dubbio l'utilità ... il mondo è (anche) bello perché vario!

cosmologico standard. Tuttavia, esso presenta ancora lati oscuri (è letteralmente il caso) un po' imbarazzanti, visto che costituiscono il 95% dell'universo. La ricerca scientifica contemporanea è troppo posseduta da due démoni molto potenti: la matematica più astratta e la tecnologia estrema. Si tratta di strumenti indispensabili, che hanno fatto passi da gigante nell'ultimo secolo, ma restano pur sempre strumenti, è il ragionamento che aiuta a capire veramente le cose. La fisica non deve delegare alla matematica o alla tecnologia, sperando che facendo i conti più precisi o raccogliendo più informazione possibile si arrivi a capire meglio la natura. Diceva Einstein che «lo scopo supremo del fisico è di arrivare alle leggi elementari universali dalle quali il cosmo può essere costruito per pura deduzione. Non c'è un cammino logico verso queste leggi; solo l'intuizione, che riposa sulla comprensione empatica dell'esperienza, può raggiungerle».<sup>79</sup>

Si nota, poi, una gran smania di arrivare a spiegare "tutto": questo ricorda altri momenti della storia del sapere, quando personalità eminenti decretavano prossima la fine della ricerca, per aver raggiunto le verità ultime. È possibile che la scienza sia vicina a nuove importanti svolte, come lo fu, ad esempio, il modello copernicano nei confronti di quello aristotelico. Però, anche se fosse il caso, molto probabilmente, ci vorrebbero (come accaduto allora) molti anni ancora di osservazioni e sviluppi teorici per affinare il nuovo paradigma. È inutile farsi troppe illusioni e suonare le trombe (sempre stonate) del trionfalismo. In fondo, anche Copernico aveva in un certo senso torto: il Sole non è al centro dell'universo. E nemmeno della Via Lattea. E questa non coincide con tutto l'universo, né si trova al centro, semplicemente, perché un centro non esiste. Eppure, ogni volta che è stato raggiunto un livello più generale di comprensione, è sembrato necessario riaffermare una nuova forma di antropocentrismo. Ciò è (per l'appunto) umano, ma bisognerebbe almeno esserne consapevoli.<sup>80</sup>

Da qui a parlare del principio antropico il passo è breve. L'impressione è che molte persone (tra cui eminenti scienziati), per motivazioni che possono essere le più varie (dall'eccesso di zelo verso la propria fede religiosa e/o verso la meccanica quantistica, che a volte viene presentata alla stessa stregua; dalla difficoltà a differenziarsi nel crescente mare delle pubblicazioni scientifiche e non; a mille altre ragioni altrettanto rispettabili), vogliono ar-

<sup>79</sup> Traduzione personale di un passo tratto da *Motives for Research, a speech delivered at Max Planck's sixtieth birthday celebration, April 1918*; reprinted in *Ideas and Opinions*, 226, as *Principles of Research*, see CPAE, Vol. 7, Doc. 7, e riportato in: A. CALAPRICE, *The Ultimate Quotable Einstein*, Princeton University Press, 2011.

<sup>80</sup> Secondo me, una delle più strane (ma, purtroppo, poco percepita come tale) manifestazioni di questa tendenza è l'ossessione (questa sì soltanto umana) di volersi distinguere (ovviamente, in senso superiore) dagli altri animali.

uire teorie fantasiose dalla semplice constatazione che gli esseri umani esistono e che, quindi, le leggi della natura devono essere compatibili con la genesi della vita. Così, hanno cominciato, prima, ad invertire il ragionamento, inserendo un principio di finalità (che non dovrebbe starci) nel paradigma scientifico: se le leggi che governano l'universo fossero un po' diverse da quelle che sono, molto difficilmente si sarebbero date le condizioni favorevoli all'evoluzione che ha portato all'*Homo sapiens* (forma debole del principio antropico).<sup>81</sup> Poi, si è rafforzato il concetto, affermando che esiste una sintonia fine nel cosmo, la quale ha permesso l'evolversi dell'autocoscienza. Infine, si è arrivati a concludere che l'esistenza degli esseri umani determina le proprietà dell'universo (forma forte). E così si è rimesso l'uomo al centro di tutto, anzi se ne fa causa invece che effetto, quasi motore primo (o, almeno, "interruttore").<sup>82</sup> Va bene continuare a meravigliarsi degli aspetti strani della natura (anzi, è condizione necessaria all'instaurarsi di quell'empatia tanto auspicata da Einstein), ma gli scienziati non dovrebbero lasciarsi da ciò condurre sul terreno della fanta-scienza, bensì accettarli come dati di fatto e aspettare: aspettare, che prima o poi il progredire della conoscenza faccia chiarezza. E così via.<sup>83</sup>

Ovunque stia la verità, credo che il modo migliore per concludere questo discorso attorno alla cosmologia sia quello di prendere a prestito le parole (come sempre efficaci e dirimenti) di Luca Ciotti dell'Università di Bologna, pronunciate durante la sua lezione di Astrofisica extragalattica del 28 aprile 2014: «Se c'è una cosa bella del mondo, è che il mondo è fatto come è fatto e di cosa ne possiamo pensare noi, o di cosa ci fa piacere, non gliene potrebbe importare di meno. E questa è una cosa ottima, perché così il mondo è indipendente dai nostri ragionamenti».<sup>84</sup>

<sup>81</sup> Personalmente, ho molti dubbi sulla validità di questo modo di argomentare: credere di poter affermare «come sarebbe il mondo se», equivale a pretendere di poter costruire un universo intero (e per miliardi di anni!), ripercorrendone le infinite diramazioni di causa ed effetto, quando (per di più) non siamo nemmeno lontanamente in grado di descrivere in dettaglio quello in cui viviamo ora.

<sup>82</sup> Il riferimento è, ovviamente, al collasso della funzione d'onda...

<sup>83</sup> Mi viene spontanea la seguente riflessione, forse un po' fuori tema (ma anche no, se si pensa alle implicazioni che può avere sull'uso delle risorse, le quali, è bene ricordarlo sempre, non sono infinite): i ritmi di tutte le altre specie viventi sembrano puramente biologici; l'uomo, invece, ha separato da tempo l'evoluzione tecnologica da quella naturale, con la prima che ormai viaggia molto più velocemente della seconda. Questa a me sembra la causa principale delle tante problematiche (economico, sociali, etiche ecc.) che affliggono il mondo: la fretta, cioè, come uno dei peggiori mali da combattere (almeno, nella maggior parte delle questioni umane).

<sup>84</sup> Per completezza, nel pensiero di Ciotti la frase sta a significare che il mondo fisico ha una sua esistenza ed una sua logica intrinseca e, dunque, non può essere considerato una mera proiezione del nostro cervello. Basti pensare alle onde elettromagnetiche, mai viste né immaginate da nessuno prima della loro deduzione ottenuta con la soluzione delle equazioni di Maxwell e, quindi, im-

## Referenze bibliografiche<sup>85</sup>

- A. BALBI, *La musica del Big Bang*, Springer-Verlag, Milano, 2007.
- C. BAMBI, A.D. DOLGOV, *Introduction to Particle Cosmology*, Springer, Heidelberg, 2016.
- S. BONOMETTO, *Cosmologia & Cosmologie*, Zanichelli, Bologna, 2008.
- A. CIMATTI, *L'universo oscuro. Viaggio astronomico tra i misteri del cosmo*, Carocci editore, Roma, 2017.
- P. COLES, F. LUCCHIN, *Cosmology. The Origin and Evolution of Cosmic Structure*, John Wiley & Sons, Chichester, 2002.
- B. GREENE, *L'universo elegante - Superstringhe, dimensioni nascoste e la ricerca della teoria ultima*, Einaudi, Torino, 2005.
- E. HARRISON, *Cosmology. The Science of the Universe*, Cambridge University Press, Cambridge, 2010.
- F. HOYLE, G. BURBIDGE, J.V. NARLIKAR, *A Different Approach to Cosmology. From a Static Universe through the Big Bang towards Reality*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- C. LAMBERTI, *Capire l'Universo. L'appassionante Avventura della Cosmologia*, Springer-Verlag, Milano, 2011.
- S. WEINBERG, *Cosmology*, Oxford University Press, New York, 2008.

possibili da “proiettare”, oppure, al fatto che con la relatività generale e la meccanica quantistica si arriva a prevedere l'esistenza dell'antimateria e lo spin dell'elettrone.

<sup>85</sup> Oltre ai testi citati nell'articolo.

---

**Riccardo Caccia** è nato a Rosignano Solvay (LI) l'11/08/1968 e attualmente vive nel comune di Montescudaio (PI). Già Ingegnere Chimico (1995, Pisa), ha conseguito recentemente la seconda laurea in Astronomia (2014, Bologna) con una tesi in cosmologia. Si occupa, tra l'altro, di formazione e divulgazione tecnico-scientifica. È socio SAIt, sezione di Livorno, per la quale ha preparato e presentato più volte durante il 2015 una conferenza su Einstein, per celebrare l'Anno Internazionale della Luce e i cent'anni della relatività generale.

# Gli strumenti del ‘Museo del Cielo e della Terra’ di San Giovanni in Persiceto: come l’uomo ha misurato il tempo nel corso dei secoli

Giovanni Paltrinieri · Romano Serra\*

\* Dipartimento di Fisica e Astronomia, Alma Mater Studiorum Università di Bologna

**I**n occasione dell’attività “Alternanza scuola-lavoro 2017” del DIFA (Dipartimento di Fisica e Astronomia dell’Università di Bologna) è stata avviata anche una ricerca su come l’uomo, fin dai tempi antichi, abbia realizzato strumenti per la misura del tempo. Per tale lavoro sono stati utilizzati gli strumenti presenti a San Giovanni Persiceto nel “Museo del Cielo e della Terra”, dove è esposta una collezione di astrolabi, sfere armillari (anche islamiche) e strumenti per la misura del tempo in genere. In questo articolo descriviamo questi manufatti (quasi tutti riprodotti in tempi relativamente recenti), evidenziando l’ingegno profuso dall’uomo nel concepire sistemi per la misura del tempo e la sua grande conoscenza del cielo, fin da tempi immemorabili.

\*

Ipparco di Nicea, il celebre matematico astronomo del II a.C., avrebbe ideato, secondo la tradizione, un semplice strumento per misurare la posizione del Sole nel corso del giorno. Egli notò che, orientando e collocando opportunamente un cerchio secondo l’asse meridiano, si ottenevano delle ombre ellittiche le quali, se proiettate sopra un piano, nei giorni degli Equinozi formavano una linea retta.

L’astronomo con questo anello conosciuto poi universalmente come “Cerchio di Ipparco”, ideò in pratica il primo vero strumento astronomico, con il quale determinò la periodicità della posizione del Sole in cielo e quindi della rotazione della Terra nel tempo, e la costanza ciclica delle sue posizioni. Ma soprattutto, apprese e perfezionò il principio della proiezione stereografica, cioè la possibilità di proiettare su un piano la posizione di un punto presente su una sfera. Egli conosceva certamente il modello di descrizione dei moti dei cieli a sfere omocentriche proposto da Eudosso di Cnido circa due secoli prima, e forse questa conoscenza lo indusse a elaborare ulteriormente il modello, proponendo una sua proiezione sul piano, per pervenire, quindi, all’ideazione dell’orologio anaforico, cioè uno strumento atto a misurare lo scorrere del tempo durante la giornata. Ipparco, in altre parole, è il precursore della realizzazione di quel regolo calcolatore astronomico che per oltre un millennio l’uomo ha usato per misurare la posizione delle stelle: l’astrolabio, il grande computer dell’antichità.

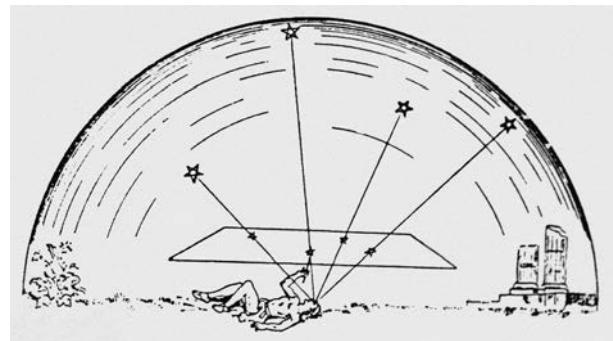


FIG. 1. Il principio della concezione stereografica, alla base dell’astrolabio.

Il suo nome deriva dai termini greci *astèr* (astro) e *lambāno* (prendere) e significa “prendo le stelle”. Si tratta molto probabilmente del più antico strumento per la misura dei moti celesti, utile anche ai navigatori, per migliorare l’orientamento delle rotte durante le lunghe traversate.

La storia ci dice che dopo Ipparco, fu il grande Tolomeo, circa quattrocento anni dopo, nel 200 d.C., a perfezionare ulteriormente l’astrolabio, forse anche grazie alle osservazioni eseguite con il semplice strumento poi conosciuto come “plinto di Tolomeo”, con il quale si determina la posizione, in altezza, del Sole ottenendo inoltre l’ampiezza dell’angolo tra solstizio invernale e quello estivo, e da lì il valore dell’inclinazione dell’asse terrestre sull’eclittica. Tolomeo, si accorse che l’ampiezza dell’escursione rimaneva sempre la stessa in tutti i luoghi ove poteva installare il suo semplice strumento, al di là delle diverse latitudini locali. Oltre al Sole, ovviamente anche le stelle variano in altezza, mutando tempi ed angoli del loro nascere e tramontare rispetto alle diverse località. Queste osservazioni probabilmente indussero Tolomeo a perfezionare l’astrolabio, applicandovi “reti e griglie” dando così origine alla realizzazione dell’astrolabio piano.

Grazie all’opera del matematico greco Teone di Alessandria (435-405) l’astrolabio si diffuse in tutto l’Egitto e da lì in tutto il bacino del mar Mediterraneo, raggiungendo le massime potenzialità sia osservative sia tecniche grazie alla realizzazione di diversi modelli raggruppati sotto il termine di “astrolabi universali”.



FIG. 2. Astrolabio arabo completo.

Nel volgere di pochi secoli l'astronomia araba recepì molto dalla cultura alessandrina, arricchendosi notevolmente grazie alle influenze indiane e persiane, adottando le loro tecniche di osservazione del cielo ed innestandovi una forte influenza greca che applicava il metodo dell'indagine, fatto soprattutto di teorie matematiche e loro verifica con modelli.

In quei tempi l'osservazione del cielo era riferita al moto dei corpi celesti e quindi si basava soprattutto sui classici cerchi e punti celesti, quali orizzonte, zenith, equatore celeste, eclittica, tropici, poli, ecc., e si avvaleva di strumenti di posizionamento come quadranti murali ed alidada (ovvero un disco rotante costituito da un goniometro e da indice fisso che serve per misurare l'angolo azimutale di un astro). L'astrolabio, in realtà, è una sintesi di questi due strumenti. Infatti, esso è provvisto di due piastre metalliche circolari, l'una che reca incise le coordinate celesti, l'altra provvista di un incavo il cui bordo esterno rappresenta l'orizzonte, in modo che facendo scorrere quest'ultima sulla prima, si possa individuare la parte di cielo visibile in ogni momento dell'anno. Con tale strumento, è quindi possibile ottenere le coordinate locali di un dato giorno e ora

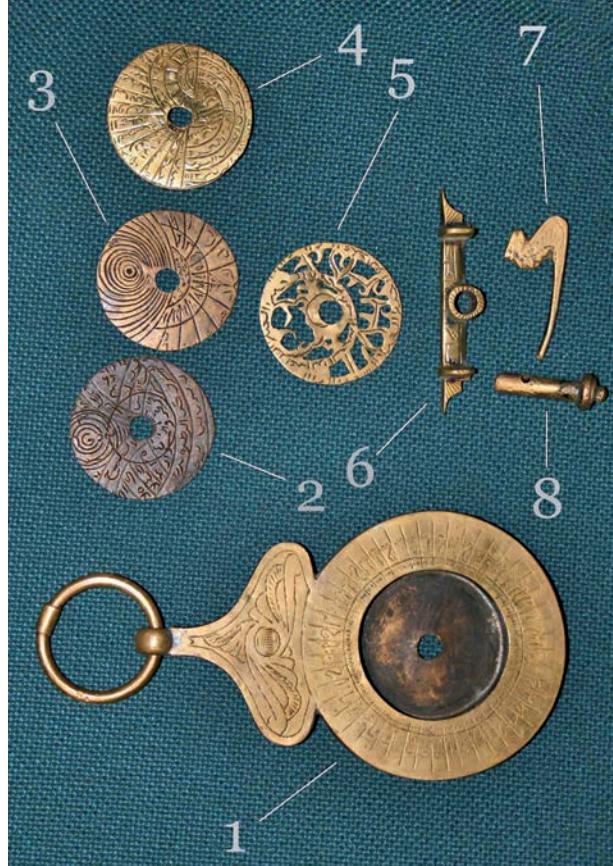


FIG. 3. Astrolabio arabo mostrato nei particolari.

dell'anno conoscendo la posizione in cielo di un astro, cioè la sua altezza rispetto all'orizzonte e l'azimut, distanza angolare dal meridiano. Nell'astrolabio sono già indicate – o meglio, incise – le posizioni delle stelle più luminose (FIG. 1).

L'astrolabio conobbe una indiscussa fama ed uso fino ad oltre il Seicento, testimoniata dalla multiforme varietà di modelli proposti sia dal mondo arabo e persiano, sia da costruttori europei (astrolabio piano, sferico, armillare, quadrante, nautico, universale, ecc.). Ma poi, dagli inizi del Settecento, lo strumento cadde in disuso fino al suo definitivo abbandono con l'uso del sestante e di altri più moderni strumenti, in particolare i sofisticati orologi meccanici, capaci di funzionare perfettamente anche in mare.

Ai giorni nostri gli astrolabi rivestono soltanto un valore storico, di collezionismo e di curiosità, sia che si tratti di reperti antichi, sia quali copie realizzate in diversi materiali e dimensioni. Questi ultimi costituiscono comunque un ottimo veicolo di conoscenza astronomica basilare in quanto da essi si apprendono le regole dell'astronomia sferica tradotta su un piano. Un'esperienza questa, che possiamo fare realizzando il tutto su cartoncino, plastica, forbici, ecc.: un buon motivo per imparare ad orientarsi in cielo e riconoscere le costellazioni ed i segreti della grande macchina celeste (FIG. 2).

Il primo astrolabio che prendiamo in considerazione è la riproduzione di un modello più antico di



FIG. 4. Immagine tratta da un'incisione cinquecentesca di un astronomo intento a fare rilievi con il suo astrolabio.

provenienza islamica, che in FIG. 3 viene presentato interamente smontato e completo dei suoi particolari. Vi è incisa la data “523”, presumibilmente del calendario islamico che si riferisce all’Egira, e quindi l’originale dovrebbe essere stato realizzato nel 1145. Diverse lamine arricchiscono poi la madre dello strumento.

Questo astrolabio è costituito essenzialmente dalle seguenti parti:

- **MADRE** (FIG. 3/1): frontalmente piastra con bordo rialzato, graduato come un goniometro da un lato. Sul dorso generalmente si trovano incisi lungo la circonferenza la scala dei gradi, lo zodiaco e il calendario. Alcuni modelli portano nel dorso anche il quadrante delle ombre che serve per misurare le distanze e le altezze di punti inaccessibili, sia celesti che terrestri. Il quadrante delle ombre è diviso in dodici parti per lato e ricalca le ombre generate da uno gnomone verticale (ombra retta) o orizzontale (ombra versa)
- **TIMPANO** (FIGG. 3/2,3,4): generalmente è un sottile disco su cui è incisa la proiezione stereografica della sfera celeste per una determinata latitudine, con equatore celeste, tropici, polo e zenith. La MADRE raccoglie normalmente alcuni timpani per diverse latitudini: si porta in primo piano quello interessato alla località in cui si opera. È la parte più complessa dell’astrolabio che, orientato lungo il meridiano, mostra i tropici e l’equatore celeste come circoli concentrici. Il centro della lamina rappresenta il Polo. L’orizzonte è un circolo passante per i punti equinoziali (intersezione dell’eclittica con l’equatore) e contiene i circoli degli azimut, della longitudine e degli *almucantarati* (cioè i circoli minori paralleli all’orizzonte), della latitudine, convergenti verso lo zenith. Sotto l’orizzonte,

nella parte inferiore dello strumento, si trovano le linee delle ore ineguali che passano per le dodici divisioni tracciate sugli archi di cerchio dei tropici e dell’equatore compresi in questa zona; la sesta ora è l’unica linea retta, passante per il centro, che rappresenta anche il meridiano. Nel presente strumento i vari **TIMPANI** hanno disegni che si staccano notevolmente dalle classiche tracciature aventi finalità astronomiche: si potrebbe supporre che questo strumento abbia finalità assai particolari, come ad esempio di tipo astrologico.

- **RETE** (FIG. 3/5): è un disco traforato in grado di ruotare, che si sovrappone al **TIMPANO** ed indica sia l’eclittica con un cerchio graduato decentrato e tangente ai circoli dei tropici nei punti del solstizio, sia la posizione di un certo numero di stelle brillanti, il cui preciso punto stereografico è alla conclusione di una sottile fiamma a forma di uncino. Generalmente la **RETE** ospita circa una ventina di fiamme, cioè altrettante stelle.
- **ALIDADA** (FIG. 3/6): impeniata al centro della **MADRE**, dotata di due bracci opposti, essa è il riferimento di osservazione e indicazione angolare del raggio visivo.
- **CAVALLUCCIO** (FIG. 3/7): è la chiavetta che infilata nel **PERNO**, tiene unite e serrate tutte le parti dello strumento.
- **PERNO** (FIG. 3/8): costituisce l’asse fondamentale dell’astrolabio, grazie al quale le parti mobili ruotano tra loro concentricamente.

Oltre al suddetto astrolabio, il “Museo del cielo e della Terra” di San Giovanni in Persiceto espone anche la moderna replica di un simile strumento, le cui caratteristiche sono perfettamente in sintonia con i classici canoni europei. Con esso dunque si possono affrontare diverse esperienze di carattere astronomico che ci portano indietro a cinque secoli fa, quando la scienza celeste esprimeva la sua maggior qualità con strumenti del genere.

## L’astrolabio nautico

Oltre all’astrolabio classico, esiste anche l’astrolabio nautico (FIG. 4). Quest’ultimo è costituito da un’intelaiatura a croce disposta lungo gli assi orizzontale e verticale, inserita in una circonferenza graduata. Un anello è presente superiormente in modo da inserirvi un dito per lasciare penzolare in verticale l’intero strumento.

Al centro è l’alidada (o braccio mobile rotante), utile all’osservazione, che è dotata alle estremità di due pinnule (o piastrine) forate al centro, attraverso cui si traguarda il Sole o la Stella Polare. Normalmente l’intera struttura dello strumento è di bronzo o di ottone di notevole spessore, tale da garantirgli una particolare pesantezza: ciò consente di utilizzarlo ottimamente anche in presenza di oscillazioni della nave.

La modalità operativa è alquanto semplice: inserito il pollice nell’anello, e lasciata gravitare a piombo l’intera struttura metallica, si indirizza l’alidada verso il corpo celeste interessato, deducendone im-



Fig. 5. Anello equinoziale universale.

mediatamente la sua altezza angolare sul livello del mare.

Essenzialmente l'osservazione si limita a due oggetti celesti: di giorno si osserva il Sole deducendo il mezzodì locale quando l'astro raggiunge la sua massima altezza sull'orizzonte; di notte, si osserva la Stella Polare. In entrambi i casi ne deriva la conoscenza della latitudine locale, cui però manca l'informazione della longitudine, secondo valore indispensabile per fare il punto geografico di una posizione. Il problema della determinazione della longitudine in mare verrà risolto solo in tempi relativamente recenti, dopo la metà del Settecento, e costituirà un notevolissimo progresso per la scienza astronomico-geografica e soprattutto per la navigazione. Uno strumento di questo tipo era ben noto al tempo di Cristoforo Colombo, ma il suo uso cominciò a decadere intorno alla metà del xvi secolo, quando venne soppiantato da più moderni mezzi.

### Anello equinoziale universale

Si tratta di uno strumento idoneo per qualsiasi latitudine e per qualsiasi momento della giornata. Si compone di due cerchi d'ottone incernierati uno nell'altro (Fig. 5). Quello esterno – del meridiano – ha sospensione mobile tale da essere regolato per la latitudine locale; reca una sequenza di valori angolari lungo una scala di  $180^\circ$ , idonea per la corretta regolazione dello strumento, oltre che fornire l'indicazione della latitudine di diverse città capitali europee. L'anello interno – delle ore – reca l'incisione di due sequenze orarie che vanno di XII in XII.



Fig. 6. Calendario perpetuo.

Più internamente è inserita una piastra rettangolare con l'indicazione dei mesi disposti lungo una scala: un'asola centrale ospita una piastrina in grado di scorrere lungo i mesi, recante al centro un piccolo foro che costituisce lo gnomone dello strumento.

Orientando opportunamente l'anello esterno lungo l'asse meridiano, una macchia di luce cade sulla scala dell'anello interno, fornendo l'indicazione oraria. Ne risulta uno strumento particolarmente preciso, ed ottimamente idoneo per ogni latitudine, previa regolazione angolare iniziale. Ha inoltre il vantaggio di potersi ripiegare su un unico piano quando l'apparecchio non viene usato, riducendo al minimo l'ingombro, a tutto vantaggio della sua protezione.

### Calendario perpetuo

La strumentazione astronomico-calendariale costituisce il fondamento di un'indagine che, partendo dalla semplice osservazione di un evento affiancata da un approssimato computo mnemonico, determina una logica ricerca le cui basi sono riconducibili ad una serie di tavole che per definizione sono dette "perpetue".

Una delle più utilizzate Tavole perpetue è quella calendariale, che consente di determinare con immediatezza il giorno della settimana riferito ad una qualsiasi data passata o futura. Conosciute poi le regole, da essa ne sono derivati strumenti meccanici di tutti i tipi e forme, oggi disponibili in innumerevoli versioni, quale quello di Fig. 6.

L'attuale assetto del calendario che tutti conosciamo ha origine alquanto remota. Affermano gli antichi cronisti Macrobio e Censorino, che il calen-

dario romano sia stato creato da Romolo, fondatore e primo re di Roma, che concepì un calendario di soli dieci mesi, in qualche modo legato alle fasi lunari. L'anno iniziava con *Martius*, dedicato al dio della guerra (31 gg.). Seguivano poi nell'ordine *Aprilis* dedicato a Venere Afrodite (30 gg.); *Majus* dedicato a Maja madre di Mercurio (31 gg.); *Junius* dedicato a Giunone (30 gg.); *Quinctilis* (31 gg.); *Sextilis* (30 gg.); *September* (30 gg.); *October* (31 gg.); *November* (30 gg.); *December* (30 gg.). Per mantenere poi questi mesi al passo con le stagioni, Romolo avrebbe ordinato che alla fine di dicembre si aggiungessero un certo numero di giorni utili a completare la durata dell'anno.

Una globale modifica calendariale avvenne sotto Numa Pompilio nel 715 a.C., il quale portò a 29 giorni i mesi che prima ne avevano 30, ed aggiunse i mesi di *Januarius*, dedicato a Giano (29 gg.), e *Februarius* dedicato agli dèi dell'Averno (28 gg.). Ne risultava così un anno composto di 355 giorni, di poco eccedente dodici lunazioni annuali. Ma il ciclo lunare non si accordava con quello solare, che a quei tempi si riteneva fosse di circa 365 giorni e un quarto. Per sopperire a ciò si stabilì che ogni due anni si aggiungesse un tredicesimo mese detto *Mercedonius*, il quale si alternava, rispettivamente, di 22 e di 23 giorni e si doveva inserire fra il VI e il V giorno avanti le calende di marzo (l'attuale 23 e 24 febbraio). Errori di computo e imperfette applicazioni produssero col tempo inevitabili sfasamenti, tanto che nel 46 a.C. esso si trovava in anticipo di ben tre mesi rispetto alle stagioni e fu necessario risolvere il problema.

Sulla scena romana dell'epoca troviamo Giulio Cesare (107-44 a.C.). Eletto Pontefice Massimo nel 63 a.C., deciso a porre fine ad un calendario tanto imperfetto, Cesare chiamò a Roma il matematico alessandrino Sosigene, richiedendogli una precisa soluzione a un computo tanto importante. Lo studioso abbandonò l'antico schema lunare per portarsi interamente a quello solare, del tutto simile a quello egizio. Nell'anno 46 a.C. si provvide a riportare il calendario nella sua corretta posizione assegnandogli una durata di 365 giorni. Siccome l'anno tropico si riteneva eccedesse tale valore di 6 ore ogni anno, si stabilì che dopo tre anni di 365 gg. ne dovesse seguire uno di 366, inserendo quel giorno nello stesso punto ove in precedenza si poneva il *Mercedonius*, cioè *ante diem sextum kalendas martias* (l'attuale 24 febbraio, in seguito portato subito dopo il 28), il quale giorno sesto veniva così ad essere raddoppiato: *bis sextus*, da cui "bisestile".

Il calendario promosso da Romolo aveva i mesi suddivisi in tre blocchi disuguali:

- *Kalendas* (da cui il nome di "calendario"), cadevano sempre il primo di ogni mese;
- *Nonas*, cadevano il 5 nei mesi di gennaio, febbraio, aprile, giugno, agosto, settembre, novembre e dicembre, mentre negli altri mesi cadevano il 7;
- *Idus*, cadevano il 13 in gennaio, febbraio, aprile, giugno, agosto, settembre, novembre e dicembre, mentre negli altri mesi cadevano il 15.

I giorni intermedi indicavano quanto mancasse alle None, oppure alle Idi, oppure alle Calende. Il calendario romano contrassegnava inoltre ogni giorno del mese con una "lettera nundinale", ovvero con una sequenza che si ripeteva ogni nove giorni. Per ultimo, ad ogni giorno erano attribuite delle caratteristiche con intenti religiosi, amministrativi o di servizio, secondo la seguente specifica:

F = giorni fasti; N = nefasti; FP = nefasti nelle ore antimeridiane; NP = fasti nelle sole ore pomeridiane; EN = fasti solo in alcune ore; C = comiziali; QRFC = quando il sacrificatore assiste ai comizi; QSTD = giorno in cui si monda il tempio di Vesta

Dopo l'avvento del calendario giuliano, si introdusse una diversa forma di calendario derivante dalla antica cultura egizia. Pur mantenendo l'anno formato da 365 giorni, con l'inserimento del bisestile ogni quattro in modo da formare mediamente il valore di 365,25 giorni, al suo interno si adottò una sequenza di sette giorni che si ripeteva all'infinito. Ciascun giorno era dedicato a un pianeta, considerando come tale anche il Sole e la Luna, secondo la seguente progressione di patronato con una sequenza che da allora non è mai venuta meno: Sole, Luna, Marte, Mercurio, Giove, Venere, Saturno.

Dunque, al ciclo nundinale succedeva quello settimanale secondo la seguente logica: al primo gennaio viene attribuita la lettera A; al 2 gennaio la lettera B, quindi C, D, E, F, G, per poi proseguire di nuovo con A, B, ecc. sino alla conclusione dell'anno. Ne deriva che, se a un dato anno viene attribuita una certa "lettera domenica", quando la medesima si ritroverà sul calendario, tale giorno sarà domenica. Questa regola ha una variabile: quando l'anno è bisestile (cioè il mese di febbraio ha un giorno in più), la lettera domenica è doppia. La prima si usa per gennaio e febbraio, mentre la seconda per i restanti mesi.

Il discorso sembrerebbe concluso, ma la storia non finisce qui. Quella piccola differenza tra un anno tropico stimato di 365,25 giorni e la sua reale durata di 365,242189670, cioè un po' di meno, aveva fatto sì che il calendario giuliano, nel corso dei secoli, fosse sfasato rispetto al percorso del Sole e quindi alle stagioni, soprattutto in riferimento alla Pasqua che il Concilio di Nicea nel 325 aveva stabilito cadeesse la domenica successiva al primo plenilunio dopo l'equinozio di primavera, che all'epoca cadeva il 21 marzo.

E così, nel 1582, papa Gregorio XIII operò la riforma del calendario togliendo in quell'anno ben dieci giorni per far tornare i mesi in linea con le stagioni, senza però modificarne la sequenza della lettera domenica. In tale occasione, tuttavia, per impedire che in futuro si riformassero ulteriori errori e avendo constatato che nel volgere di 400 anni veniva a formarsi un'eccedenza di tre giorni, si applicò la seguente regola:

CALENDARIO PERPETUO							
LETTERA DOMENICALE GREGORIANA, dal 1582 al 3599							
ANNI DELL'ERA VOLGARE		DAL	1600	1700	1800	1900	
		1582	2000	2100	2200	2300	
		1599	2400	2500	2600	2700	
			2800	2900	3000	3100	
			3200	3300	3400	3500	
0			B A	C	E	G	
1	29	57	85	F	G	B	D
2	30	58	86	E	F	A	C
3	31	59	87	D	E	G	B
4	32	60	88	C B	D C	F E	A G
5	33	61	89	A	B	D	F
6	34	62	90	G	A	C	E
7	35	63	91	F	G	B	D
8	36	64	92	E D	F E	A G	C B
9	37	65	93	C	D	F	A
10	38	66	94	B	C	E	G
11	39	67	95	A	B	D	F
12	40	68	96	G F	A G	C B	E D
13	41	69	97	E	F	A	C
14	42	70	98	D	E	G	B
15	43	71	99	C	D	F	A
16	44	72		C B	E D	G F	B A
17	45	73		A	C	E	G
18	46	74		G	B	D	F
19	47	75		F	A	C	E
20	48	76		E D	G F	B A	D C
21	49	77		C	E	G	B
22	50	78		B	D	F	A
23	51	79		A	C	E	G
24	52	80		G F	B A	D C	F E
25	53	81		E	G	B	D
26	54	82		C	D	F	A
27	55	83		B	C	E	G
28	56	84		A G	B A	D C	F E

FIG. 7. Tabella della lettera domenicale gregoriana.

LETTERE DOMENICALI IN CORRISPONDENZA CON I GIORNI DEL MESE PER CONOSCERE I GIORNI DELLA SETTIMANA											
GENNAIO	OTTobre	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	LUGLIO	GIUGNO	AGOSTO	SETTEMB	DICEMB	GIORNI DEL MESE
A	D	G	B	E	C	F	1	8	15	22	29
B	E	A	C	F	D	G	2	9	16	23	30
C	F	B	D	G	E	A	3	10	17	24	31
D	G	C	E	A	F	B	4	11	18	25	
E	A	D	F	B	G	C	5	12	19	26	
F	B	E	G	C	A	D	6	13	20	27	
G	C	F	A	D	B	E	7	14	21	28	

FIG. 8. Lettere domenicali corrispondenti ai mesi.

Non si devono considerare bisestili gli anni di inizio secolo le cui prime due cifre non sono perfettamente divisibili per 4. Sono dunque stati bisestili il 1600 e il 2000, mentre non lo sono stati il 1700, 1800, 1900, che secondo la precedente regola dovevano invece esserlo.

A conclusione di questa lunga, ma speriamo utile dissertazione, riportiamo due tavole da cui si ottiene il giorno della settimana di un qualsiasi giorno compreso nell'arco che va dal 1582 al 3599:

- la prima tabella (FIG. 7) consente di determinare la lettera domenicale intersecando il valore secolare con quello dell'anno interessato. Sia, ad esempio, il 1948 che, essendo bisestile, contiene le due lettere domenicali d e c: la prima lettera si usa per gennaio e febbraio, la seconda per i restanti mesi;



FIG. 9. Multiquadrante di Beringer.

– la seconda tabella (FIG. 8) conclude la ricerca. Andati sulla colonna del mese interessato, si scende sino alla lettera domenicale ricavata dalla tabella precedente; portandoci poi lungo tale riga sulla destra, ne otteniamo la lista delle domeniche per detto mese.

Consideriamo ad esempio il maggio 1948: a tale anno (bisestile) per questo mese compete la seconda lettera, cioè c. Andiamo dunque sulla colonna di maggio e scendiamo sino alla c: su questa riga troviamo a destra tutte le domeniche di quel mese, che cadono nei giorni 2, 9, 16, 23, 30. Il computo insito in questo sistema di tabelle risulta dunque di facile attuazione e in grado di soddisfare immediatamente la ricerca del nome della settimana. Da qui sono derivati innumerevoli strumenti meccanici quali appunto il calendario perpetuo di FIG. 6, tali da costituire anche un gradevole oggetto dai contenuti scientifici ed estetici.

### Multiquadrante di Beringer

Questo orologio solare cubico (FIG. 9) si compone di una base rettangolare entro cui è incassata una bussola per consentirne l'allineamento; dalla base stessa si erge un sostegno cilindrico regolabile che



FIG. 10. Notturlabio.

permette di orientare la parte gnomonica superiore. Quest'ultima è formata da un cubo che ospita cinque quadranti solari realizzati in carta colorata e incollati sul legno: quattro sono verticali con le facce rivolte ai punti cardinali, più quello superiore che giace in posizione orizzontale. Altrettanti gnomoni sono inseriti sulle facce, tutti allineati parallelamente all'asse terrestre. L'intero strumento è reso "universale" grazie al sostegno regolabile e a un filo a piombo che consente di metterlo correttamente in posizione.

Il costruttore di questo multiquadrante – il cui nome è chiaramente presente su una delle sue facce – è David Beringer (1756-1821), autore inoltre di moltissimi quadranti "dittici", cioè formati da due piastre di legno incernierate tra loro. La sua famiglia era originaria di Dieppe in Francia, ma fu costretta ad emigrare allorquando i "nuovi convertiti" furono indotti a lasciare la patria dopo la revoca dell'Editto di Nantes, prendendo quindi dimora a Norimberga, dove il nostro David intraprese un'attività per la produzione di quadranti solari in legno, assai ricercati per la loro grazia e colorazione che li rendeva ottimi anche come oggetti da tavolo.

## Notturlabio

Già in epoca antica esistevano semplici strumentazioni capaci di indicare l'ora di notte, seppur con una certa approssimazione, osservando in cielo la posizione di alcune costellazioni, preferibilmente circumpolari, che quindi non vanno mai ad eclissarsi sotto l'orizzonte.

Se escludiamo in cielo la presenza del Sole, della Luna e dei pianeti che hanno una propria autonoma periodicità, l'intera volta notturna è come un im-

menso tappeto su cui sono applicate delle stelle che apparentemente si mantengono costantemente nel punto loro assegnato. Il tutto ha come centro di rotazione un punto del cielo cui, dal Quattrocento, corrisponde una stella che chiamiamo "Polare".

Questo immenso mantello trapunto di stelle non si presenta ogni sera alla stessa ora nella medesima posizione, ma lo troviamo costantemente sfasato di circa 4 minuti, così che nel volgere di un anno l'intera volta celeste viene progressivamente passata in rassegna. Ciò avviene in quanto la Terra, rispetto alle stelle, non fa una rivoluzione completa in 24 ore precise, ma in  $23^{\text{h}}56^{\text{m}}4^{\text{s}}$  di Tempo solare medio. È questa la durata del "giorno siderale". In altre parole, se una stella questa sera transita al meridiano locale alle ore 22,00 di Tempo Medio Europa Centrale (TMEC), domani sera la medesima stella la ritroveremo in meridiano alle  $21^{\text{h}}56^{\text{m}}4^{\text{s}}$ . Tale sfasamento quotidiano di  $3^{\text{m}}56^{\text{s}}$ , se moltiplicato per il numero di giorni di un anno, forma esattamente 24 ore, cioè una completa rivoluzione terrestre. Dunque, esiste una stretta relazione tra data e posizione delle stelle, al punto che scegliendone alcune molto prossime alla Polare, in modo da poterle osservare in una qualsiasi notte dell'anno, potremo determinare l'ora di notte con una discreta precisione.

Le sette stelle dell'Orsa maggiore costituiscono un formidabile strumento notturno per la misurazione del tempo. Il tutto ha come fulcro la Stella Polare (appartenente all'Orsa minore), attorno alla quale ruotano in senso antiorario le stelle dell'Orsa maggiore *Dubhe* e *Merak* che chiameremo i "Guardiani", assieme ad altre cinque. La distanza apparente tra queste due stelle, prolungata cinque volte, porta alla posizione della Polare.

Lo strumento (FIG. 10) si impone tenendolo sospeso per un filo affinché tutto assuma una corretta posizione di gravità, e di conseguenza si regola per la data in corso. Attraverso il foro centrale si traggono la Stella Polare, mentre l'alidada viene ruotata opportunamente per allinearla con l'inclinazione che assumono i due Guardiani: da ciò ne deriva la lettura dell'ora ottenuta con un metodo semplice e diretto.

## Abaco delle maree

La conoscenza del cambiamento del livello dell'acqua del mare a causa delle progressive fasi lunari ha sempre interessato chi si occupa di navigazione, pesca e traffico portuale, specie nei mari del nord dove le variazioni in altezza sono spesso notevoli. La maggiore variazione del livello dell'acqua marina – alta e bassa marea – si ha in occasione della luna nuova e piena, cioè due volte in un mese, in quanto la lunazione (mese sinodico) ha una durata di  $29^{\text{g}}12^{\text{h}}44^{\text{m}}3^{\text{s}} \pm 15^{\text{h}}$ , cioè poco più di 29,5 giorni, qui per semplicità aggiustata al valore intero di 30.

Per utilizzare questo strumento (FIG. 11) si presuppone di conoscere la quantità di giorni della Lu-



FIG. 11. Abaco delle maree. La foto raffigura il verso del notturnabio in FIG. 10.

na, ricavabili da un calendario oppure dagli uffici del porto in cui si effettua il rilievo. Nella parte centrale si imposta tale valore, da cui deriva immediatamente l'immagine lunare che in tal giorno si manifesta, grazie ad un'apertura circolare presente su quel disco. Ulteriori incisioni frontali indicano i giorni in cui la Luna col Sole formano delle particolari situazioni astronomiche, quali il trigono, il quadrato e il sestile. Nella parte più esterna si ha l'immediata conoscenza dell'ora della massima marea per quel giorno, il cui risultato è ovviamente rapido e discretamente preciso.

### Orologio cappuccino

Un curioso e singolare orologio solare di tipo "ad altezza" è il "cappuccino", così chiamato perché dalla sua sagoma molti autori vi hanno creato il viso di un monaco coperto nella testa dal saio (FIG. 12).

La parte superiore dello strumento reca una scanalatura obliqua, il cui valore di inclinazione corrisponde alla latitudine per cui è costruito, e reca su entrambi i sensi la scala zodiacale a cui l'utilizzatore fa riferimento per il giorno in cui effettua la lettura. Entro tale scanalatura è inserita una piastrina che si può bloccare sulla data prescelta, dalla quale viene fatto scendere un filo a piombo su cui scorre a frizione una perletta. Più in basso troviamo il quadrante vero e proprio, composto di linee verticali, ad ognuna delle quali compete il doppio riferimento orario, cioè per le ore ascendentì e discendentì rispetto al mezzodì. Ovviamente la linea delle ore XII è unica.

La modalità d'uso dell'orologio cappuccino è la seguente. Definita la data di utilizzo dello strumento e fissando per essa la piastrina che corre lungo l'asola, tenendo teso il filo a piombo posizioniamo la perletta nel punto orario delle XII. Eseguita tale regolazione, prendiamo lo strumento tenendolo ben ritto in verticale, operando una rotazione su se

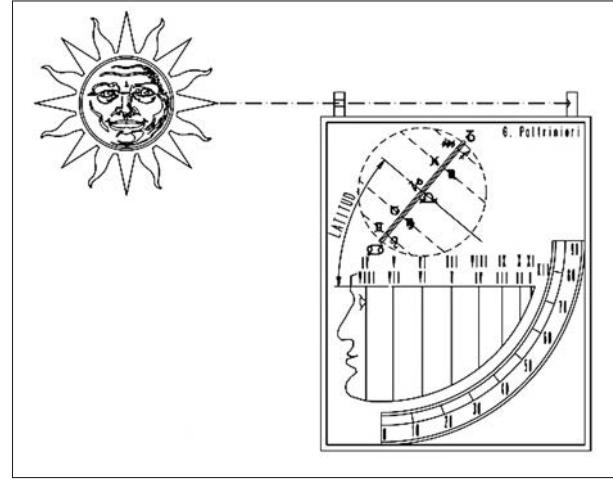


FIG. 12. Orologio cappuccino.

stessa affinché attraverso il foro della prima pinnula i raggi solari vadano a centrare il riferimento della pinnula posteriore, mentre il filo a piombo gravita normalmente nella sua posizione. Nel contempo, con un dito blocciamo il filo contro il quadrante esaminando la posizione della perletta rispetto alle linee orarie, e da lì otterremo direttamente l'ora col nostro strumento.

Essendo l'orologio cappuccino di tipo "ad altezza", questi non richiede dunque alcuna bussola, in quanto il suo funzionamento, come si è visto, richiede soltanto l'allineamento delle pinnule con l'astro.

In conseguenza di ciò, l'autore di questo strumento vi ha inserito lateralmente la scala angolare per determinare per ogni occasione l'altezza del Sole o di qualsiasi altro oggetto di cui vuole conoscere la posizione. Deve soltanto fissare la piastrina che corre nella scanalatura nel punto inferiore della medesima, e lasciare che il filo a piombo graviti liberamente.

Per ultimo, va considerato che questo strumento non è "universale", in quanto funziona correttamente soltanto per le località in cui la latitudine è quella impostata dal suo costruttore.

### Orologio solare equinoziale universale

Questo strumento si presenta particolarmente raffinato ed interessante, oltre che pratico ed idoneo per qualsiasi latitudine (FIG. 13).

La sua base circolare poggia su tre piedini regolabili a vite che consentono la messa a bolla dell'intera struttura. Entro il fondo della medesima è posizionato l'ago della bussola per ottenere un perfetto orientamento dell'orologio. Sul piano di base è poi inserito a cerniera un disco circolare, su cui è incisa l'intera sequenza oraria con l'intervallo di separazione di dieci minuti ogni tacca. Questo disco avendo la funzione di indicatore orario di tipo uni-



FIG. 13. Orologio solare equinoziale universale.

versale, richiede un aggiustamento angolare a seconda della latitudine locale di utilizzo: a ciò provvede un semicerchio posto lateralmente su cui è incisa una progressiva sequenza angolare.

### Anello del viandante

Si tratta di un oggetto metallico con diametro di tre centimetri, di figura circolare, alto un centimetro, da cui emerge un piccolo supporto con foro, su cui va inserito un lacchetto (FIG. 14).

Il centro del tratto cilindrico è interessato da una scanalatura su cui è fasciata un'anellina piatta, regolabile, recante un foro appositamente posizionato per ricevere i raggi solari. I fianchi recano le iniziali dei mesi ascensionali e discensionali, mentre l'interno dell'anello è percorso da una numerazione oraria opportunamente posizionata.

### Ulteriori strumenti astronomico-gnomonici

#### Quadrante

Il nome di "quadrante" si attribuisce genericamente ad uno strumento di forma quadrangolare recante su due lati la quarta parte di un cerchio dotata di scala goniometrica a 90 gradi. In tal caso su uno dei lati perimetrali dello strumento sono applicate due pinnule (una con foro passante, l'altra marcata con una crocetta), mentre al centro del goniometro penne un filo a piombo. In altre parole, tenute in verticale le facce dello strumento e mirato con le pinnule un oggetto celeste, grazie al filo tenuto in gravitazione si deduce l'altezza sull'orizzonte del medesimo.

Di variazioni sul tema ne esiste un numero sterminato, in quanto oltre all'utilizzo goniometrico del medesimo, si associa quasi sempre un'ulteriore tracciatura che ne completa ed amplifica le funzio-

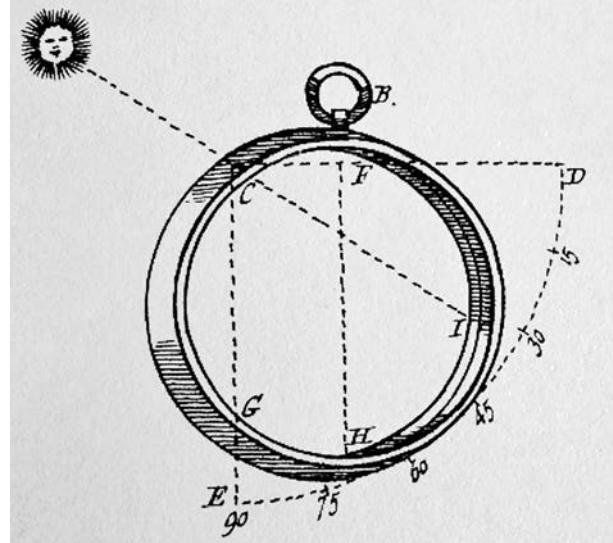


FIG. 14. Anello del viandante.

ni. Certi quadranti, infatti, recano su una faccia l'incisione di una fitta serie di quadrettature disposte su una scala a base trigonometrica: una sorta di abaco trigonometrico che utilizza la funzione del seno. L'altra faccia porta invece delle tracciature curve che forniscono, a seconda dell'altezza del Sole, le ore temporarie o ineguali, alle quali abbiamo già accennato.

#### Sestante

Questo strumento appartiene al gruppo degli apparecchi a riflessione, che usano cioè uno specchietto da cui un'immagine viene traguardata in rapporto ad un'altra al fine di ottenere un certo valore angolare tra i medesimi.

Il principio di funzionamento del sestante è molto semplice e ben congegnato. Mentre si effettua con lo strumento la diretta osservazione dell'orizzonte marino, si opera la rotazione di un braccio del medesimo sul quale è fissato uno specchietto, entro cui l'immagine del Sole viene intercettata e sovrapposta al piano dell'orizzonte. Ne deriva, su una esterna scala curva, il valore in altezza assunto dal Sole in quell'istante. Partendo dall'antico "quadrante" (quarta parte di un cerchio), gli scienziati del passato ne hanno realizzato di varie fogge e forme, essenzialmente suddividendoli in: "sestante" (sesta parte del cerchio), e "ottante" (ottava parte del cerchio). Per facilitare l'uso del sestante in ogni situazione, al medesimo sono applicati diversi filtri per consentirne l'utilizzo anche traguardando direttamente il Sole.

Per secoli esso ha rappresentato lo strumento ideale dei navigatori, che lo utilizzavano maggiormente all'alba e al tramonto, quando si poteva osservare in simultanea l'orizzonte ed alcune stelle tra le più brillanti.

Non va però dimenticato che "fare il punto" in mare aperto equivaleva essenzialmente a determinare la latitudine; il secondo valore, la longitudine, presentava difficoltà molto maggiori, essendo ne-

cessaria la presenza a bordo di uno strumento per la misura del tempo di grande accuratezza: un errore di soli due minuti poteva mettere una nave fuori rotta di 30 miglia, oltre 55 km! Il problema si inizierà a risolvere soltanto a partire dal 1735, grazie a John Harrison (1683-1776), il quale realizzerà un orologio meccanico idoneo alla navigazione, quindi esente da qualsiasi perturbazione esterna, in grado di mantenere sulla nave l'ora data dall'ultimo porto incrociato lungo la rotta.

### Sfera armillare

Questo strumento è la rappresentazione materiale della sfera locale, in quanto la Terra è posta al centro dell'intero sistema secondo la classica rappresentazione degli antichi. La qualifica di "armillare" le deriva dal latino, che significa "anello", quale appunto è la sua composizione fatta con una serie di anelli che si intersecano tra loro.

L'oggetto è anche destinato alle dimostrazioni didattiche e scolari, oltre che ad un suo specifico uso scientifico. All'asse terrestre corre perpendicolare l'anello dell'equatore celeste, i cerchi solstiziali ai quali si collega obliquamente la fascia zodiacale, ecc.

### Le armille islamiche

Le sfere armillari islamiche rappresentano ulteriori antichi strumenti concepiti nell'area araba del Mediterraneo. Su di esse sono incise l'eclittica e l'equatore celeste con le varie costellazioni.

Esistono inoltre le sfere armillari a 4 globi, su cui sono incisi riferimenti astronomici con le costellazioni sul bordo. Su un reperto troviamo la data 1122 relativa al calendario islamico, che nel calendario Gregoriano corrisponde al 1744. Le 4 sfere rappresentano il cielo stellato nelle 4 stagioni.

Un altro esempio di sfera armillare presenta una rappresentazione del cielo con la Terra al centro e con 4 cerchi concentrici sui quali sono incise le costellazioni ed altri riferimenti. Non ci sono date.



FIG. 15. Marco Uguzzoni, Andrea Vutera Cuda, Giulia Mattioli, Francesco Urso, i ragazzi dell'“Alternanza Scuola Lavoro 2017 del DIFA” che hanno seguito il percorso sulla misura del tempo, davanti al Dipartimento di Fisica e Astronomia, tengono tra le mani alcuni strumenti, tra cui astrolabi e sfere armillari islamiche. Da notare i due orologi solari realizzati ed affissi in facciata – orientamento sud-ovest dell’edificio – grazie al determinante contributo di Giovanni Paltrinieri (primo a destra nella foto). Il quadrante di sinistra indica le antiche ore italiche, mentre quello di destra le attuali ore astronomiche.

Un’ulteriore versione è una sfera armillare ed astrolabio di probabile origine persiana con rappresentazione della sfera celeste montata su un supporto a stella con 6 punte sulle quali sono incise le costellazioni.

I grandi astronomi di tutti i tempi vengono sempre raffigurati con una sfera armillare tra le mani, ostentando una profonda conoscenza, riservata ad un limitato numero di eletti. Queste strumentazioni erano in passato particolarmente esclusive. Anche le pubblicazioni cinquecentesche a stampa risentivano di questa situazione: l'autore pubblicava un volume con la promessa di portar luce su delle tematiche oscure, ma in pari tempo egli eclissava alcuni passi chiave per timore che il lettore venutone a conoscenza potesse diventare un futuro concorrente.

Inoltre, in passato quasi ogni astronomo progettava una propria armilla dotata di particolarità che la distinguevano dalle altre: per questo motivo ne troviamo oggi delle più disparate forme ed accessori assolutamente singolari.

**Giovanni Paltrinieri**, gnomonista e studioso bolognese della misura del tempo. Autore di innumerevoli strumenti solari di varie dimensioni e caratteristiche. Il suo sito è: [www.lineameridiana.com](http://www.lineameridiana.com).

**Romano Serra**, laureato in Astronomia e in Fisica lavora presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna e segue come volontario l'attività del Museo del Cielo e della Terra di San Giovanni Persiceto (BO). L'asteroide 5302 porta il nome: Romanoserra.

# A proposito delle leggi di Keplero

Michele Città<sup>1</sup> · Massimo Genchi<sup>2</sup> · Santa Spallino<sup>1</sup> · Maria Anna Fiasconaro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IIS 'L.F. Tedaldi' Castelbuono (PA)

<sup>2</sup> ISIS 'G. Salerno', Gangi (PA)

## Il progetto didattico

Il presente lavoro, pensato come attività didattica da svolgere in orario extracurriculare in forma interdisciplinare, con il coinvolgimento degli insegnanti di matematica, fisica, lettere e religione, riprende le tre leggi di Keplero con qualche considerazione aggiuntiva. Sarà coinvolta una classe quinta del Liceo Scientifico, in quanto gli studenti, oltre a possedere le conoscenze matematiche per affrontare l'argomento, hanno già svolto il percorso umanistico inserito nel quadro storico di riferimento.

Dopo la necessaria introduzione storica, vengono richiamate le leggi di Keplero. La prima, in particolare, fornisce l'opportunità di una digressione sulle proprietà geometriche dell'ellisse e di richiamare la sua equazione polare a partire dalla quale si perviene alla determinazione del raggio medio dell'orbita, il cui valore egualgia quello del semiasse minore  $b$ . A partire dal valore del raggio medio  $r_m$  si ricalcolano, per mezzo della terza legge di Keplero, i valori della costante  $k$  rispetto alla quale si fornisce anche la deviazione standard nonché il valore della massa del Sole calcolato con il valore medio di  $k$  nei casi in cui  $r_m = a$ ,  $r_m = b$ .

## Obiettivi

1. Conoscere le diverse spiegazioni fornite storicamente al problema del moto dei pianeti, con particolare attenzione al modello tolemaico e al modello copernicano;
2. conoscere gli sviluppi moderni del problema del moto dei pianeti e i contributi dovuti a Tycho Brahe, Galilei e Keplero;
3. accrescere negli studenti la consapevolezza dell'uso di strumenti matematici finalizzati alla risoluzione di particolari problemi (es.: calcolo del raggio medio dell'orbita ellittica);
4. favorire l'utilizzo di metodologie didattiche interdisciplinari, finalizzate anche ad ampliare le conoscenze e a migliorare abilità e competenze.

## Introduzione storico-letteraria e scientifica

Fin da quando, nell'antica Grecia, l'astronomia assunse il carattere e la struttura di una scienza, il modello geocentrico-geostatico proposto da Eraclito,

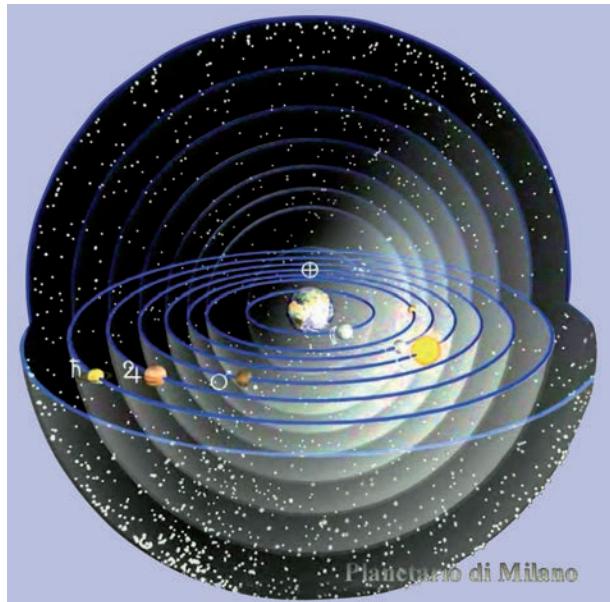


FIG. 1. Il sistema delle sfere omocentriche di Eudosso adottato da Aristotele. (dall'animazione realizzata da Massimo Mogi Vicentini per il Planetario di Milano)

fin dal V secolo, si affermò su quello eliocentrico di Aristarco da Samo del III secolo a.C.

Il sistema geocentrico venne perfezionato dapprima da Platone e dal suo discepolo Eudosso di Cnido, i quali teorizzavano entrambi un Universo sferico in cui la Terra, immobile, si trova al centro e attorno ad essa si muovono su orbite circolari il Sole, la Luna e gli altri cinque pianeti; quindi da Aristotele secondo il quale nell'Universo, suddiviso in una serie di sfere concentriche, era da distinguere il mondo sublunare da quello sopralunare (FIG. 1). Il primo, costituito dalla sfera centrale occupata dalla Terra, regno del divenire, della vita e della morte, è l'unico ad essere imperfetto per via dei moti rettilinei che vi si svolgono ma anche per la sua mutevolezza. Il mondo sopralunare è caratterizzato invece dall'eterna immutabilità del moto circolare uniforme con cui si muovono le "stelle erranti", vale a dire Luna, Mercurio, Venere, Sole, Marte, Giove, Saturno incastonate nelle rispettive sfere e dall'ottava sfera, quella delle stelle fisse, che si muovono regolarmente da est a ovest mantenendo le posizioni reciproche.

Più tardi, il sistema geocentrico fu innovato da Ipparco di Nicea, nel II sec a.C., e, soprattutto, da Tolomeo, nel II sec. d.C., il quale nell'*Almagesto* espone, rielaborandolo, tutto il sapere astronomico

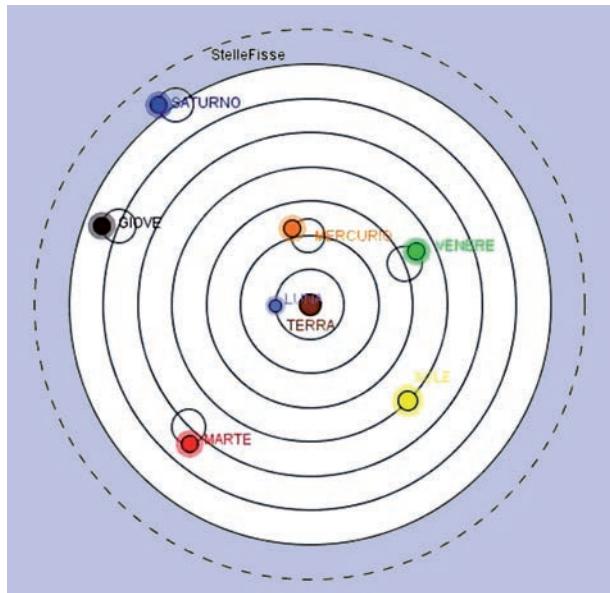


FIG. 2. Il sistema di Tolomeo; per semplicità, qui sono mostrati i soli deferenti ed epicicli dei pianeti e non gli eccentrici e l'equante.

raccolto fino ad allora e imponendo, di fatto, il sistema geocentrico e geostatico in tutto il mondo antico. Benché il modello tolemaico fosse basato su un complesso sistema di epicicli, deferenti, eccentrici ed equante per cercare di giustificare diverse incongruenze che le osservazioni del moto dei pianeti evidenziavano, la concezione geocentrica dell'Universo resse per più di quindici secoli (FIG. 2).

Nella rappresentazione fantastica dell'oltremondo, Dante elabora le convinzioni religiose e intellettuali del suo tempo: la tradizione giudaico-cristiana, la cosmologia tolemaica dell'etica di Aristotele sviluppata da San Tommaso, la scienza orientale. E parte dall'idea centrale della cultura medioevale: la continuità tra il mondo terreno e la vita ultraterrena, quindi tra mondo fisico e mondo metafisico. Può dunque immaginare e costruire il regno dei morti su basi coerenti e scientifiche:

- la Terra è al centro dell'Universo;
- nelle viscere della Terra, il luogo più lontano da Dio, si apre la voragine dell'Inferno;
- agli antipodi del mondo abitato dagli uomini, in mezzo all'oceano, sorge la montagna del Purgatorio;
- intorno alla Terra girano i nove cieli concentrici dell'astronomia aristotelica;
- esternamente ad essi si estende il decimo cielo, l'Empireo, dove ha sede Dio con gli angeli e gli spiriti beati.

Niccolò Copernico (1473-1543), nel celebre trattato *De revolutionibus orbium coelestium* (1543), illustra il nuovo modello dell'Universo in cui il Sole ne occupa il centro e, attorno ad esso, ruotano su orbite circolari Mercurio, Venere, la Terra con la Luna, Marte, Giove e Saturno, racchiusi nella sfera delle stelle fisse (FIG. 3).

La Chiesa considerò il modello eliocentrico come una semplice ipotesi matematica. In realtà la visione copernicana ebbe conseguenze culturali enormi:

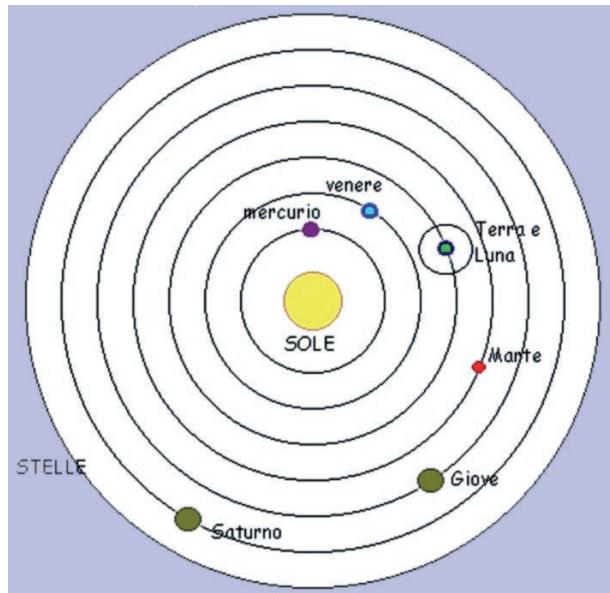


FIG. 3. Il sistema di Niccolò Copernico, senza i piccoli epicicli anche da lui utilizzati.

modificò la percezione dello spazio, promosse la formazione della nuova mentalità scientifica e stimolò la nascita del moderno relativismo; non a caso Pirandello sosterrà, nel Novecento, che «fu tutta colpa di Copernico».

Con Copernico cambia innanzi tutto il modo di concepire l'uomo nell'Universo. L'immagine secolare di una struttura gerarchica dello spazio che ha il centro nella Terra e nell'Uomo viene demolita; la Terra assume una collocazione marginale nell'immensità di un Universo in cui l'Uomo ha perso il suo ruolo privilegiato essendo venuta a mancare la visione antropocentrica.

L'Universo non ha più un carattere finito e ordinato, l'Uomo è inserito in un nuovo sistema aperto, non sa più determinare la propria posizione nello spazio. Tutto diventa incerto e relativo.

Lo scordinamento delle vecchie certezze ha, per certi versi, un effetto liberatorio: nasce la libera ricerca su cui si basa la scienza moderna. Questo atteggiamento nuovo di fronte alla realtà, se dischiude nuovi orizzonti conoscitivi, provoca però anche smarrimento e inquietudine. Mentre il principio di autorità entra in crisi nella filosofia e nella scienza, la realtà politica e religiosa del tempo ribadiscono l'assolutismo e il dogmatismo. Ciò provoca un conflitto drammatico tra la libera ricerca e la Chiesa che non esita a mandare al rogo chiunque la contraddice. Si apre un contrasto tra fede e ragione che crea profondi turbamenti nella coscienza degli artisti, fino alla follia nel caso del Tasso. L'autore vive in maniera drammatica il controllo ideologico e la repressione da parte della Chiesa della Controriforma, la quale vuole imporre "il mondo di carta" delle Sacre Scritture e di Aristotele sul "mondo sensibile" di Galileo.

Copernico impostò la nuova teoria riducendo (se pur di poco) la complessità dei calcoli necessari a

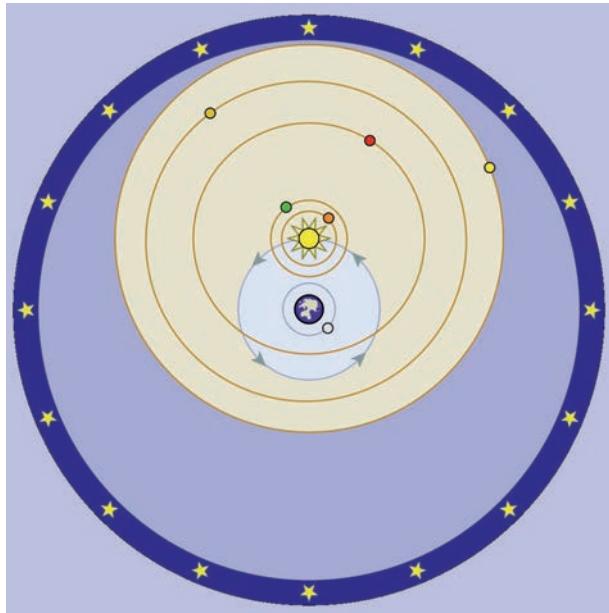


FIG. 4. Il sistema di Tycho Brahe: la Terra è al centro di una sfera di stelle in rotazione, la Luna e il Sole si muovono intorno alla Terra. Gli altri pianeti, invece, ruotano tutti intorno al Sole, mentre questo ruota intorno alla Terra.

prevedere le posizioni dei pianeti e rendendo le leggi che le regolano più semplici ed armoniose. Il modello copernicano prevede, per la Terra, tre movimenti:

1. Moto di rotazione attorno ad un asse passante per i poli, in direzione Est;
2. Moto di rivoluzione intorno al Sole da Ovest ad Est;
3. Moto conico dell'asse di rotazione terrestre verso Ovest

Negli anni successivi, Tycho Brahe (1546-1601), grazie alle sistematiche ed estremamente precise osservazioni condotte a Uraniborg – l'osservatorio fatto costruire appositamente dal re Federico II di Danimarca – poté disporre di una grande quantità di dati, a partire dai quali riuscì a descrivere le orbite seguite dai pianeti. Le analisi dei dati raccolti, lo posero su una posizione diversa sia da quella copernicana che da quella tolemaica, permettendogli di elaborare il cosiddetto modello ticonico che, *in primis*, permise il superamento della vecchia concezione secondo la quale i pianeti fossero ancorati a sfere solide. Nel sistema cosmologico elaborato da Brahe, i pianeti ruotavano intorno al Sole, che a sua volta ruotava intorno alla Terra, ferma al centro dell'Universo, in quanto la costante posizione angolare delle stelle nel corso dell'anno gli faceva ritenere improbabile un suo moto attorno al Sole (FIG. 4).

Il successore di Brahe come matematico e astrologo alla corte asburgica fu il suo assistente Johannes Kepler (1571-1630) il quale, a differenza di Tycho, era profondamente copernicano e convinto, in linea con le idee cosmologiche di Platone, che il sistema che governa il mondo dovesse obbedire a leggi semplici e armoniose. Keplero riprende i dati relativi al-

le osservazioni di Brahe e nel suo programma di ricerca definisce il problema di trovare, a partire dalle posizioni dei pianeti nei vari giorni dell'anno, la curva che meglio li descrive.

Dal momento che il sistema copernicano, in linea con la tradizione filosofica greca, secondo la quale il cerchio era la curva perfetta e la sfera il solido perfetto, supponeva che le orbite dei pianeti fossero circolari, Keplero avviò il suo studio a partire dall'orbita di Marte utilizzando le teorie del moto circolare uniforme e quella degli epicicli. Ben presto, però, si accorse che non era possibile conciliare i dati in suo possesso con la circolarità dell'orbita e neanche con il sistema proposto da Tycho, avendo trovato che le velocità del pianeta al perielio e all'afelio sono diverse. Essendo caduta l'ipotesi dell'orbita circolare, ma rimanendo fermamente convinto che essa dovesse essere necessariamente una conica, prova con la traiettoria ellittica e trova che i dati raccolti da Tycho Brahe risultano verificati.

Avere verificato che la velocità di Marte lungo la sua orbita non si mantiene costante, lo porta a verificare positivamente la stessa proprietà per gli altri pianeti, ad estendere ad essi la proprietà di muoversi su orbite ellittiche e ad enunciare la legge delle aree, nota anche come seconda legge di Keplero. Questi due risultati furono pubblicati nel 1609 nell'*Astronomia nova*.

Scoperte le leggi del moto dei singoli pianeti, Keplero si dedicò alla ricerca di possibili relazioni tra il moto dei diversi pianeti, cercando, in un primo momento e senza successo, un legame fra le orbite planetarie e i solidi platonici. Nel 1619, infine, scoprì la terza legge che pubblicò nel trattato *Harmonices Mundi*. Quest'ultima legge, in effetti, appare la più interessante delle prime due in quanto, mettendo in relazione caratteristiche trasversali a tutti i pianeti, evidenzia che l'Universo è regolato da precise leggi matematiche. Questa regolarità avrebbe indotto Galilei a scrivere:

La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'imparsa a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto.

## Le leggi di Keplero

È importante sottolineare che quanto faticosamente e pazientemente trovato da Keplero sono in realtà delle "relazioni empiriche", essendo state ricavate dai semplici dati osservativi: sarà solo con Newton che, derivate dalla legge della gravitazione universale, diventeranno delle "leggi" fisiche, da cui il termine comunemente usato (qui anche da noi) di "leggi di Keplero".

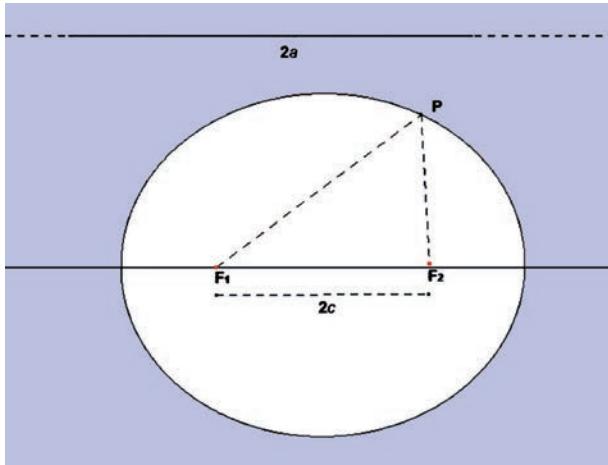


FIG. 5.

### Prima legge di Keplero

I pianeti descrivono intorno al Sole orbite ellittiche di cui il Sole occupa uno dei fuochi.

L'ellisse è il luogo geometrico dei punti del piano per i quali è costante la somma delle distanze da due punti fissi, detti fuochi. La posizione lungo l'orbita in cui un pianeta si trova alla minima distanza dal Sole si chiama perielio; quella in cui si trova alla massima distanza si chiama afelio. Le orbite dei pianeti del Sistema solare sono ellissi poco eccentriche,<sup>1</sup> in quanto il rapporto tra la semidistanza focale e il semiasse maggiore, che fornisce l'eccentricità dell'ellisse – vale a dire la misura di quanto essa, per la sua forma più o meno allungata, differisce dalla circonferenza – assume valori piuttosto piccoli.

### Alcune proprietà dell'ellisse

#### Equazione canonica in coordinate cartesiane

Per determinare l'equazione cartesiana dell'ellisse, cioè l'equazione in due variabili  $x$  e  $y$  che risulti soddisfatta dalle coordinate di tutti e soli i punti della curva considerata, chiamiamo  $F_1$  ed  $F_2$  i due fuochi,  $2c$  la loro distanza (con  $c > 0$ ) e  $2a$  la somma costante (FIG. 5).

Se  $P$  è un punto appartenente all'ellisse deve risultare:

$$\overline{PF}_1 + \overline{PF}_2 = 2a \quad (1)$$

e quindi, dall'essere  $\overline{F_1F_2} = 2c$ , segue  $a > c$ , perché in ogni triangolo la somma di due lati è maggiore del terzo.

Fissiamo sul piano il sistema di riferimento cartesiano in modo che l'asse  $x$  contenga i punti  $F_1$  ed  $F_2$  e che l'asse  $y$  coincida con l'asse del segmento di estremi  $F_1$  ed  $F_2$ . In questo modo le coordinate dei due fuochi sono  $F_1(-c, 0)$  ed  $F_2(c, 0)$ . Affinché il

<sup>1</sup> L'eccentricità dell'orbita di Mercurio, per quanto piccola, è però alquanto accentuata se riferita a quelle degli altri pianeti.

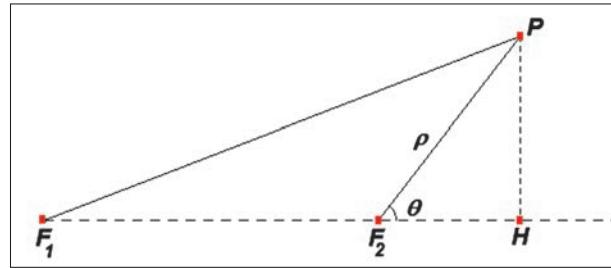


FIG. 6.

punto  $P$  appartenga all'ellisse, occorre e basta che soddisfi la condizione (1).

Sviluppando i calcoli, si ottiene:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (3)$$

che costituisce la forma razionale dell'equazione dell'ellisse e si chiama equazione canonica dell'ellisse, dove  $b^2 = a^2 - c^2$ .

Come si riconosce immediatamente dalla (3), la costante  $2a$  dell'ellisse non è altro che la distanza fra i due vertici  $A$  e  $B$ , vale a dire la lunghezza dell'asse maggiore, mentre la posizione  $a^2 - c^2 = b^2$  permette, nel contempo, di dedurre che  $b$  è la lunghezza del semiasse minore e di costruire con righello e compasso uno dei tre segmenti, noti che siano due di essi.

Come si è già detto, il rapporto  $e = c/a$  fra la semidistanza focale e il semiasse maggiore è detta eccentricità dell'ellisse.

Se si osserva che

$$e = \frac{c}{a} = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2},$$

si riconosce facilmente che l'eccentricità evidenzia in che rapporto stanno fra loro i due semiassi. In particolare, per  $b = a$  si ottiene la circonferenza alla quale compete eccentricità  $e = 0$ . Da qui segue immediatamente che le ellissi poco eccentriche sono quelle per le quali il semiasse minore differisce di poco dal maggiore.

Dal momento che l'ellisse si può riguardare come una circonferenza avente due raggi perpendicolari (vale a dire i semiassi) di diversa lunghezza, la sua area – come si può verificare con un qualsiasi metodo di calcolo – si può determinare, a partire da quella del cerchio, considerando i due raggi che intervengono nella espressione della sua area come segmenti di diversa lunghezza per cui avremo  $S_{\text{ellisse}} = \pi \cdot a \cdot b$ .

#### Equazione canonica in coordinate polari

Per ricavare l'equazione polare dell'ellisse, fissiamo il sistema di riferimento il modo tale che l'asse polare contenga l'asse focale e che il fuoco  $F_2$  coincida con il polo (FIG. 6).

Il generico punto  $P$  del piano che con le sue coordinate  $(\rho, \theta)$  soddisfi la (1) è dunque tale che  $\overline{PF}_2 = \rho$  e che l'anomalia, cioè l'angolo che l'asse polare spazza in una rotazione in senso antiorario

per sovrapporsi al raggio vettore sia  $\partial$ . Dal momento che

$$\overline{PF_1} = \sqrt{\overline{F_1H}^2 + \overline{PH}^2} = \sqrt{(\overline{F_1F_2} + \overline{F_2H})^2 + \overline{PH}^2} = \sqrt{(2c + \rho \cos \partial)^2 + (\rho \sin \partial)^2},$$

il generico punto  $P$  del piano appartiene all'ellisse se soddisfa la (1) e quindi se

$$\sqrt{(2c + \rho \cos \partial)^2 + (\rho \sin \partial)^2} + \rho = 2a$$

ossia se

$$\sqrt{(2c + \rho \cos \partial)^2 + (\rho \sin \partial)^2} = 2a - \rho$$

la quale, dopo avere quadrato e semplificato, diventa:

$$\rho \cos \partial = a^2 - c^2 - a\rho$$

Poiché  $a^2 - c^2 = b^2$ , esplicitando rispetto a  $\rho$  e tenuto conto che  $c/a = e$ , la precedente relazione si può scrivere:

$$\rho(\partial) = \frac{b^2}{a(1 + e \cos \partial)}$$

Se ora si osserva che il semilato retto dell'ellisse, vale a dire il segmento di perpendicolare  $l$ , compreso fra uno dei due fuochi e l'ellisse, è quanto proporzionale dopo il semiasse maggiore  $a$ , il semiasse minore  $b$  e il semiasse minore  $b$ , cioè che sussiste la proporzione  $a:b = b:l$ ,<sup>2</sup> la precedente relazione del raggio vettore in funzione dell'anomalia si può anche scrivere:

$$\rho(\partial) = \frac{l}{1 + e \cos \partial} \quad (4)$$

che rappresenta l'equazione canonica dell'ellisse in coordinate polari.

Ora, quando la Terra si trova in perielio, si ha  $\partial = 0$ , mentre quando è in afelio si ha  $\partial = \pi$ . Di conseguenza, il modulo del raggio vettore al perielio e all'afelio varrà, rispettivamente,

$$\rho(0) = \frac{b^2}{a(1 + e)} \text{ e } \rho(\pi) = \frac{b^2}{a(1 - e)}.$$

Infine, se si tiene conto che, dall'essere  $b^2 = a^2 - c^2$ , segue  $\frac{b^2}{a^2} = 1 - \frac{c^2}{a^2}$ , vale a dire  $\frac{b^2}{a^2} = 1 - e^2$ , i raggi vettore al perielio e all'afelio assumono le forme:

$$\rho_{\text{perielio}} = a(1 - e) \text{ e } \rho_{\text{afelio}} = a(1 + e) \quad (5)$$

dalle quali, sommando e sottraendo a membro a membro, si ricavano le espressioni per il semiasse maggiore e per l'eccentricità in funzione dei raggi vettore al perielio e all'afelio:

$$a = \frac{\rho_{\text{perielio}} + \rho_{\text{afelio}}}{2}, e = \frac{\rho_{\text{afelio}} - \rho_{\text{perielio}}}{\rho_{\text{afelio}} + \rho_{\text{perielio}}}$$

<sup>2</sup> Considerando il semilato retto  $l$  e la distanza focale  $2c$  questi costituiscono i cateti di un triangolo rettangolo la cui ipotenusa vale  $2a - l$ ;  $2a$  essendo la costante dell'ellisse. Imponendo ora la relazione pitagorica e tenendo conto che  $c^2 = a^2 - b^2$ , e quindi anche  $4c^2 = 4a^2 - 4b^2$ , si ottiene  $al = b^2$ .

### Raggio medio dell'orbita ellittica

L'equazione in coordinate polari dell'ellisse può essere assunta per esprimere la generica lunghezza del raggio vettore e da essa risalire alla lunghezza del raggio medio dell'orbita attraverso una integrazione del raggio vettore lungo tutte le anomalie toccate durante il percorso di metà dell'orbita, cioè:

$$r_m = \frac{l}{\pi} \int_0^\pi \frac{d\partial}{1 + e \cos \partial} \quad (6)$$

Se ora si pone  $\cos \partial = \frac{1 - t^2}{1 + t^2}$ , dove  $t = \operatorname{tg} \left( \frac{\partial}{2} \right)$ , tenuto conto che da quest'ultima si ottiene  $d\partial = 2dt / [\operatorname{arctg} t] = \frac{2dt}{1 + t^2}$ , la (6) diventa:

$$r_m = \frac{l}{\pi} \int_0^\infty \frac{2dt}{(1 - e) + (1 + e)t^2}$$

e quindi

$$r_m = \frac{2l}{\pi(1 + e)} \int_0^\infty \frac{dt}{\frac{1 - e}{1 + e} + t^2} = \frac{2l}{\pi(1 + e)} \sqrt{\frac{1 + e}{1 - e}} \left[ \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1 + e}{1 - e}} t \right]_0^\infty = \frac{l}{1 + e} \sqrt{\frac{1 + e}{1 - e}} = \frac{l}{\sqrt{1 - e^2}} \quad (7)$$

Tenendo presente che  $l = b^2/a$ ,  $e = c/a$ , la (7) diventa

$$r_m = \frac{l}{\sqrt{1 - e^2}} = \frac{\frac{b^2}{a}}{\sqrt{1 - \left( \frac{c}{a} \right)^2}} = \frac{\frac{b^2}{a}}{\frac{\sqrt{a^2 - c^2}}{a}} = \frac{b^2}{\sqrt{a^2 - c^2}} = b$$

Si conclude, quindi, che il raggio medio dell'orbita ellittica è pari al suo asse minore  $b$ . In altre parole, l'orbita ellittica, mediamente, equivale a un'orbita circolare di raggio costante uguale a  $b$ . Quando i fuochi si avvicinano al centro dell'ellisse, il semiasse maggiore tende al semiasse minore e il perielio e l'afelio tendono a coincidere.

Nel caso in cui si considerino uguali i valori delle aree dell'ellisse e del cerchio equivalente, vale a dire  $\pi r^2 = \pi ab$ , il raggio medio risulta medio proporzionale fra le lunghezze dei semiassi o, che è la stessa cosa, è dato dalla media geometrica dei semiassi:  $r = \sqrt{ab}$ .

### Seconda legge di Keplero

*Il raggio vettore tracciato dal Sole a uno qualsiasi dei pianeti spazza aree uguali dell'orbita planetaria in intervalli di tempo uguali.*

La legge può essere formulata anche dicendo che la velocità areolare, vale a dire l'area spazzata dal raggio vettore di ogni pianeta nell'unità di tempo, è costante durante il moto dei pianeti sull'orbita (FIG. 7).

Corpo	Massa (kg)	Semiasse maggiore (m)	Semiasse minore (m)	Eccentricità	Periodo di rivoluzione (s)	$T^2/a^3(s^2/m^3)$	$T^2/b^3(s^2/m^3)$
<b>Sole</b>	$1,99 \times 10^{30}$	—	—	—	—	—	—
<b>Mercurio</b>	$3,28 \times 10^{23}$	$5,791 \times 10^{10}$	$5,667 \times 10^{10}$	0,2056	$7,60 \times 10^6$	$2,974 \times 10^{-19}$	$3,174 \times 10^{-19}$
<b>Venere</b>	$4,88 \times 10^{24}$	$1,082 \times 10^{11}$	$1,082 \times 10^{11}$	0,0068	$1,94 \times 10^7$	$2,975 \times 10^{-19}$	$2,975 \times 10^{-19}$
<b>Terra</b>	$5,97 \times 10^{24}$	$1,496 \times 10^{11}$	$1,495 \times 10^{11}$	0,0167	$3,16 \times 10^7$	$2,974 \times 10^{-19}$	$2,975 \times 10^{-19}$
<b>Marte</b>	$6,40 \times 10^{23}$	$2,279 \times 10^{11}$	$2,27 \times 10^{11}$	0,0933	$5,94 \times 10^7$	$2,976 \times 10^{-19}$	$3,015 \times 10^{-19}$
<b>Giove</b>	$1,90 \times 10^{27}$	$7,783 \times 10^{11}$	$7,774 \times 10^{11}$	0,048	$3,74 \times 10^8$	$2,971 \times 10^{-19}$	$2,981 \times 10^{-19}$
<b>Saturno</b>	$5,68 \times 10^{26}$	$1,427 \times 10^{12}$	$1,424 \times 10^{12}$	0,056	$9,35 \times 10^8$	$2,974 \times 10^{-19}$	$2,988 \times 10^{-19}$
<b>Urano</b>	$8,67 \times 10^{25}$	$2,871 \times 10^{12}$	$2,868 \times 10^{12}$	0,046	$2,65 \times 10^9$	$2,971 \times 10^{-19}$	$2,980 \times 10^{-19}$
<b>Nettuno</b>	$1,03 \times 10^{26}$	$4,497 \times 10^{12}$	$4,497 \times 10^{12}$	0,009	$5,22 \times 10^9$	$2,974 \times 10^{-19}$	$2,974 \times 10^{-19}$
<i>k medio</i>						$2,974 \times 10^{-19}$	$3,008 \times 10^{-19}$
deviazione standard						$1,895 \times 10^{-22}$	$6,822 \times 10^{-21}$

TAB. 1. Valori notevoli relativi ai pianeti del Sistema solare.

Keplero giunse ad enunciare la sua seconda legge senza seguire un procedimento matematico rigoroso. Dalle osservazioni sperimentali era emerso che la velocità di rivoluzione della Terra andava aumentando quanto più si essa si avvicinava al perielio. Si fece così strada in Keplero la convinzione che il Sole fosse una sorgente di forza che guidava i pianeti lungo le orbite, le quali non erano più, quindi, solo dei semplici artifici matematici, ma traiettorie reali.

La seconda legge di Keplero è una conseguenza del principio di conservazione del momento angolare. Se  $\omega$  è la velocità angolare del pianeta, variabile da punto a punto lungo la traiettoria ellittica, ed  $r$  è il raggio dell'orbita, l'area  $\Delta A$  descritta dal raggio vettore nel tempo  $\Delta t$  è pari al settore circolare di ampiezza  $\omega \cdot \Delta t$  e raggio  $r$ . si ha:

$$\Delta A = (r\omega\Delta t) \frac{r}{2},$$

$$\text{cioè } \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{r^2 \omega}{2}.$$

Se si considera una traiettoria circolare per cui  $\omega$  = costante, posto il raggio dell'orbita uguale al raggio medio, quindi al semiasse minore  $b$ , vale a dire:  $r = r_m = b$ , detta  $m$  la massa del pianeta, il suo momento angolare rispetto al Sole ha modulo  $L = r \cdot m \cdot v = m \cdot \omega \cdot r^2 = m \cdot \omega \cdot b^2$  e la precedente relazione diventa:

$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{L}{2m}.$$

Il fatto che il momento angolare sia costante impone che il momento della forza agente sul pianeta calcolato rispetto al Sole sia nullo. Questo vuol dire

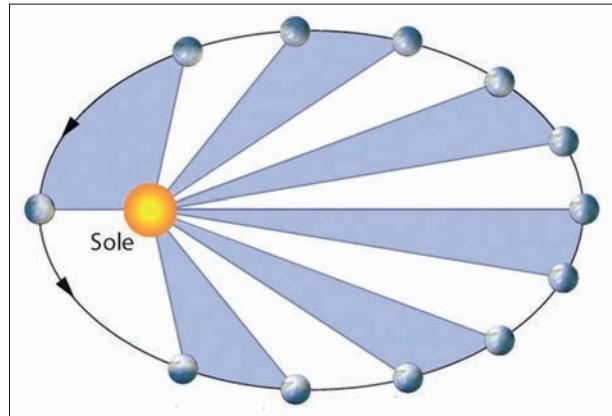


FIG. 7. La II legge di Keplero.

che la forza agisce lungo la congiungente pianeta-Sole e quindi si tratta di una forza di tipo centrale.

La forza gravitazionale è dunque una forza centrale, la sua direzione passa sempre per un punto  $O$  che è il centro della forza e il modulo è funzione soltanto della distanza dal centro stesso.

### Terza legge di Keplero

*I quadrati dei tempi che i pianeti impiegano a percorrere le loro orbite sono proporzionali ai cubi delle loro distanze medie dal Sole*

Se due pianeti, le cui distanze medie dal Sole valgono  $R_1$  ed  $R_2$  rispettivamente, compiono le relative rivoluzioni attorno al Sole nei tempi  $T_1$  e  $T_2$ , allora

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3.$$

In altre parole, per qualunque pianeta è costante il rapporto fra il quadrato del tempo di rivoluzione e il cubo della distanza del pianeta dal Sole:

$$\frac{T^2}{r_m^3} = k.$$

Se si considera il raggio medio  $r_m = b$ , la terza legge di Keplero diventa:

$$\frac{T^2}{b^3} = k.$$

Nella TABELLA 1 si possono confrontare i dati relativi a  $k$  per i pianeti del Sistema solare, sia valutando  $T^2/a^3$  che  $T^2/b^3$ . Di questi valori viene calcolato in entrambi i casi il valore medio e la relativa deviazione standard.<sup>3</sup>

L'introduzione del raggio medio dell'orbita dei pianeti e la conseguente modifica della forma dell'orbita da ellittica a circolare comporta, sia pure approssimativamente, una diversa valutazione della massa del Sole. Se, infatti, la forza di attrazione gravitazionale fra il Sole e la Terra fornisce l'accelerazione centripeta che consente alla Terra di girare intorno al Sole, si avrà:

$$F = G \frac{M_s \cdot M_t}{r_m^2} = M_t \cdot \omega^2 \cdot r_m$$

<sup>3</sup> Si noti che, nel caso del pianeta Mercurio, la differenza tra i rapporti  $T^2/a^3$  e  $T^2/b^3$  diventa notevole a causa della grande eccentricità di questo pianeta rispetto agli altri.

da cui

$$M_s = \frac{\omega^2 \cdot r_m^3}{G} = \frac{(2\pi)^2 \cdot r_m^3}{T^2 G} = \frac{(2\pi)^2 \cdot b^3}{T^2 G} = \frac{4\pi^2}{G \cdot k}.$$

Sostituendo in questa relazione i valori medi di  $T^2/a^3$  e  $T^2/b^3$ , desunti dalla TABELLA 1, per la massa solare si ottengono rispettivamente i valori e  $M_{S_a} = 1,988 \cdot 10^{30} \text{ kg}$  e  $M_{S_b} = 1,966 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ . Quest'ultimo, risulta inferiore dell'1% (che non è poca cosa) rispetto al valore oggi accettato.

## Referenze bibliografiche

- A. CAFORIO, A. FERILLI, *Fisica 1*, Le Monnier, 2004.  
 N. DODERO, P. BARONCINI, R. MANFREDI, *Nuovi elementi di matematica*, vol. A, Ghisetti e Corvi Editori.  
 D. HALLIDAY, R. RESNICK, *Fisica: meccanica-acustica-termodinamica*, Casa Editrice Ambrosiana, 1970.  
 S. JACOMUZZI, A. DUGHERA, G. IOLI, V. JACOMUZZI (a cura di), *La Divina Commedia*, SEI.  
 R. LUPERINI, P. CATALDI, L. MARCHIANI, F. MARCHESE, *Le parole e le cose*, Palumbo.  
 P. MAZZOLDI, M. NIGRO, C. VOCI, *Elementi di Fisica*, EdiSES, 2008.  
 G.P. PARODI, M. OSTILI, G. MOCHI ONORI, *L'evoluzione della Fisica*, vol. 3, Paravia.  
 M. SCORLETTI, *Sintesi Fisica*, Vallardi, 2007.

[www.roma1.infn.it/cms/delre/didattica/10-11/note\\_elissee.pdf](http://www.roma1.infn.it/cms/delre/didattica/10-11/note_elissee.pdf).

# Esperienze didattiche nel Corso di laurea in Astronomia di Bologna

Corrado Bartolini

Alma Mater Studiorum Università di Bologna

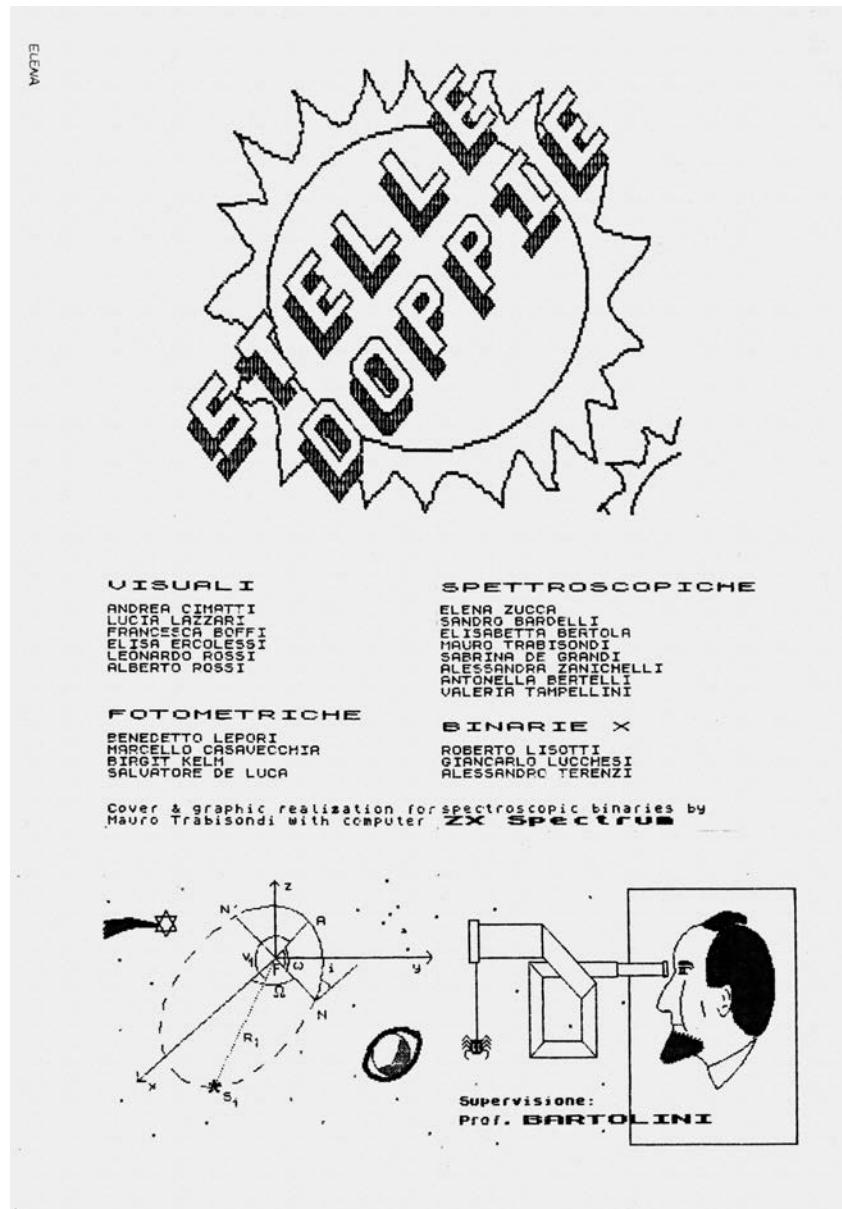
C'è chi, pur appassionandosi alla disciplina di cui si occupa, esclude decisamente la possibilità di poterla insegnare, c'è chi, invece, si sente realizzato se può trasmettere anche agli altri, soprattutto ai giovani, la passione per quello che personalmente ha approfondito e interiorizzato. Seneca, ad esempio, in *Epistulae ad Lucilium* (6,4) scrive: «*Nec me ulla res delectabit, licet sit eximia et salutaris, quam mihi uni sciturus sum*» ("Né alcuna conoscenza potrà mai riuscirmi gradita, per quanto essa sia elevata e giovevole, se dovrò possederla per me solo").

Durante 42 anni di insegnamento universitario nei corsi di Astronomia, Fisica dei pianeti e Astrobiologia, forte del principio enunciato da Seneca, mi sono sforzato di rendere chiara e fruttuosa la mia parola. Ho cominciato col rendere i miei studenti protagonisti essi stessi del loro lavoro, prendendo le mosse da Francesco de Bartolomeis (*La ricerca come antipedagogia*, Feltrinelli, 1969).

Credo sia utile additare ai miei colleghi questa strada, dove incontreranno sempre cose nuove frutto di sempre nuove scoperte e arricchimenti.

Per l'insegnamento di Astronomia non ho applicato il metodo della ricerca di gruppo a tutto il corso, ma solo ad un'ampia sezione (circa un quinto del programma) che può essere divisa in argomenti tra loro distinti. Trattando ad esempio il Sistema solare, ho assegnato a ciascun gruppo un pianeta oppure, spiegando le stelle doppie, le ho divise in quattro gruppi: visuali, spettroscopiche, fotometriche e binarie X.

Nei primi anni, i testi elaborati dai gruppi non erano corredati da immagini. Quando in Internet cominciarono ad essere pubblicati articoli ricchi di illustrazioni, gli studenti hanno inserito con piacere nei loro lavori le figure più significative e i file si sono trasformati in presentazioni mediante *Power-Point* (*ppt*).



Nella mia esperienza, per scrivere un *ppt* in gruppo ho seguito il seguente schema:

- far scegliere agli studenti fra vari temi da approfondire;
- formare così gruppi spontanei con a capo un responsabile (sarebbe ideale che nel gruppo figurassero ragazzi dotati di varie competenze: chi conosce le lingue straniere, chi è esperto nella grafica, chi è un abile informatico);
- fornire ad ogni gruppo una bibliografia preliminare; il gruppo penserà poi per conto suo a trovare altro materiale (libri, riviste, animazioni, colloqui con esperti, Wikipedia);

- aiutare a scegliere il materiale utile al *ppt*, dividendolo poi per argomenti;
- ordinare gli argomenti secondo un filo logico;
- elaborare le diapositive in modo chiaro (non più di 7 righe per diapositiva, caratteri grandi) e sintetico (fare schemi, evitare ripetizioni);
- discutere la versione iniziale all'interno del gruppo e successivamente con tutti gli studenti: un videoproiettore consente a tutti di vedere simultaneamente un testo, discuterlo e proporre dei miglioramenti;
- concludere aggiungendo la bibliografia (compresa quella su Internet).

Il concetto fondamentale è che “il contributo di ciascuno è una ricchezza per tutti”.

Ripetendo il lavoro in anni successivi, i *ppt* vengono sempre migliorati e aggiornati, soprattutto quando nuove ricerche hanno ampliato le conoscenze di un argomento; perciò essi non sono cristallizzati in una forma definitiva, ma sono qualcosa di vivo in continua evoluzione. A mio parere, lo scopo dell'insegnamento è perfettamente raggiunto quando l'allievo, dopo aver acquisito una padronanza sicura della materia, riesce anche ad esprimere la propria fantasia, a volte perfino con qualche spunto poetico.

La possibilità di scrivere qualcosa di originale, è molto piaciuta agli studenti. Alcuni, che dopo la

laurea sono divenuti insegnanti di scuola media superiore, mi hanno detto di aver applicato con successo il metodo alle loro classi.

Un importante pregio del metodo è quello di addestrare i giovani a lavorare in gruppo, come è sempre più richiesto nella vita moderna.

Riconosco infine di avere molto imparato dai miei studenti, in una relazione circolare di insegnamento-apprendimento: ad esempio una studentessa, notando che il pianeta Mercurio ha un'orbita molto eccentrica e sulla sua superficie vi sono enormi crateri dovuti all'impatto di asteroidi, ha suggerito che i due fatti potessero essere collegati. Per approfondire l'argomento ho proposto una tesi di laurea in Astronomia, che è stata approvata dalla commissione col massimo dei voti. Questo fatto conferma quanto scrive Seneca in *Epistulae ad Lucilium* (7,8): «*Homines dum docent discunt*» (“Gli uomini, mentre insegnano, imparano”).

La figura, composta dai miei studenti, è la copertina del lavoro da loro svolto sulle stelle doppie; la sua esecuzione mediante un computer ZX Spectrum della Sinclair permette di datarla agli anni Ottanta ed alcuni dei nomi che compaiono sono di astronomi oggi affermati.

Essa dice che loro hanno gioito per le mie lezioni e che io ho gioito per il mio mestiere.

---

**Corrado Bartolini**, attualmente in pensione, è stato professore associato presso il Dipartimento di Astronomia dell'Università di Bologna.

# Cent'anni fa★

A cura di Donatella Randazzo e Ileana Chinnici

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

*Statistica delle macchie e facole solari osservate nel R. Osservatorio Astronomico di Roma al C.R. nel 2° semestre 1916 e nell'anno 1917 dal Signor Luigi Taffara (p. 62)*

## NOTA DI E. MILLOSEVICH

[...]

IL signor Luigi Taffara, che in assenza dell'intero personale scientifico di questo R. Osservatorio, mi coadiuva con amore e intelligenza, si assunse il carico di osservare per proiezione e di disegnare le macchie e facole solari dal luglio 1916, cioè dopo la morte del compianto Dott. Tringali.

Mentre ho creduto opportuno di non far continuare le osservazioni visuali spettroscopiche delle prominenze, non volli interrompere la serie delle osservazioni per proiezione delle macchie e delle facole solari, anche se il procedimento sia antiquato, perché la serie offerta da questo Osservatorio, senza aver interruzioni, è quella che abbraccia il più lungo periodo. Appunto perciò è opportuno non modificare un metodo che permette comparazioni omogenee.

Nel compilare questa statistica fu seguito il procedimento seguito da tanti anni dal prof. Riccò. Le colonne della Tabella I (2° semestre 1916 e intera annata 1917) non hanno bisogno di spiegazione alcuna. Solo si soggiunge che nella colonna "facole" sono compresi non solo i gruppi di facole senza macchie o fori, ma anche i gruppi di macchie quando, come è di spesso, queste sono avvolte da facole.

Nella colonna detta "giorni d'osservazione del mese" vi sono alcuni simboli, il cui significato è qui detto:

N	= nuvoloso
V	= velato
C	= caliginoso
W	= molto velato
IE	= immagini eccellenti
IB	= " buone
IM	= " mediocri
IC	= " cattive

Il Signor Taffara non poté consacrare a queste osservazioni che qualche ritaglio di tempo, occupato essendo in altre funzioni fuori dell'Osservatorio, e però i giorni d'osservazione presentano alcune discontinuità, che restano giustificate dalle condizio-

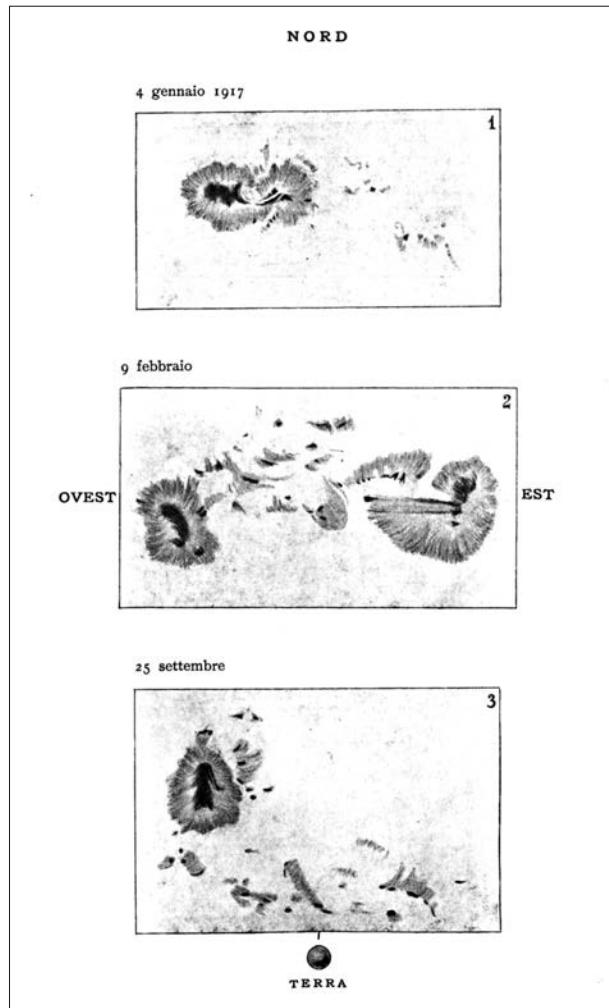


FIG. I.

ni anomale dell'oggi, ogni pensiero ed ogni attività restando assorbiti nella lotta mortale contro il militarismo, che ci costringe ad immolare per non essere immolati. Nel 1917 le lacune sono più gravi che nel secondo semestre del 1916. Il persistente mal tempo concorse ad aumentarle.

[...]

Con 78 giorni d'osservazioni, fra 7 luglio e 17 novembre 1916, si hanno i seguenti valori di frequenza media in un dì:

Gruppi di fori e macchie	= 3.4
Fori	= 11.7
Macchie	= 1.9
Facole	= 2.3

Accettando che questi numeri s'accostino a valori medi di frequenza che si avrebbero avuto se l'intero

\* Estratti dal Vol. VII, S. II (1918) delle *Memorie della Società degli Spettroscopisti Italiani*.

Tabella I.

TAB. 1a.

secondo semestre del 1916 avesse dato elementi osservati, risulta una diminuita attività solare in confronto del primo semestre specialmente in riguardo al numero delle macchie.

[...]

Vi sono nel 1917 soltanto 81 giorni d'osservazioni. Su questa base si hanno i seguenti valori di frequenza media in un dì:

Gruppi di fori e macchie	=	5.6
Fori	=	30.7
Macchie	=	5.4
Facole	=	3.6

Non sembra cosa saggia cavar conclusioni sopra una base d'osservazioni così limitata.

(Segue) Tabella 1.

Giorni d'osservazione nel mese. Stato del cielo.				Giorni d'osservazione nel mese. Stato del cielo.				Giorni d'osservazione nel mese. Stato del cielo.							
Gruppi di fori e macchie		Fori		Macchie		Fori		Macchie		Fori					
Facoltà		Facoltà		Facoltà		Facoltà		Facoltà		Facoltà					
4 1M	2	3	5	4		1 1B	7	51	8	5	29 1M	5	25	3	4
8 1B						2 1B	6	27	5	3	30 1M	5	22	7	4
12 1M	5	21	4	4		5 1B	6	4	7	3	31 1B	6	17	7	4
26 1C	4	56	1	4		7 1B	5	18	5	4					
30 1M	5	15	3	2		8 1B	6	17	7	2					
	7	15	4	3		10 1B	8	26	7	6					
GENNAIO 1917				GIUGNO 1917				AGOSTO 1917							
FEBBRAIO 1917				LUGLIO 1917				SETTEMBRE 1917							
9 1C	5	25	4	3	19 1M	7	26	13	6	4	2 1B	4	30	5	4
16 W	3	21	1	0	28 1M	7	35	8	4	3	15 1B	6	48	4	4
20 1B	6	20	1	1		18 1B	6	38	7	3	17 1B	5	37	5	5
21 N	3	18	1	2		19 1B	7	12	5	4	19 1B	6	40	7	3
22 1B	2	9	1	4		20 1B	6	26	6	5	20 1B	6	59	7	3
24 1B	2	2	1	3		23 1M	5	7	4	6	21 1M	7	48	7	3
MARZO 1917				AGOSTO 1917				OTTOBRE 1917							
2 1B	5	11	3	6	4 1B	4	32	5	4	8 1M	3	26	1	1	
9 1M	6	41	4	3	5 1B	6	40	4	4	9 1C	3	23	1	1	
10 1M	3	29	3	3	7 1C	5	45	2	4	12 1C	4	12	0	4	
16 1C	5	23	5	4	18 1B	7	16	6	3	23 1C	6	44	10	4	
17 1M	6	11	8	5	19 1B	7	12	5	4	26 1C	7	42	6	4	
APRILE 1917				DICEMBRE 1917				NOVEMBRE 1917							
4 1M	2	1	2	4	2 1B	5	24	5	3	7 V	4	35	5	1	
21 1M	5	17	2	2	3 1M	8	26	6	4	28 1B	7	59	4	1	
24 1M	5	35	5	5	4 1M	7	19	5	4						
MAGGIO 1917				AGOSTO 1917				AGOSTO 1917							
8 1B	5	15	3	4	6 1C	9	64	9	5	4 1C	4	8	7	5	
10 V	5	11	4	3	9 1B	9	63	13	4	5 1C	7	10	4	4	
14 1B	7	43	4	4	12 1B	6	85	12	5	6 1C	5	9	2	2	
					13 1B	7	54	14	4	8 1C	4	9	4	2	
					17 1B	6	35	11	4	9 1C	9	54	6	2	
					18 1B	6	55	8	5						
					19 1C	5	28	8	3						
					22 1B	5	31	5	3						
					23 1B	4	21	3	3						

TABLE 1b

Certo peraltro che, nelle oscure fluttuazioni del fenomeno dell'attività solare, sembra che il massimo di essa non sia occorso nel primo semestre del 1916, come potevasi credere, ma forse dovrà fissarsi nel 1917, e il prof. Riccò [...] crede saggiamente attendere, per un giudizio definitivo, anche il 1918.

La Tavola che fa parte di questa Nota devesi al signor Luigi Taffara, che osservò e disegnò, con l'abilità che gli è propria, le classiche macchie del 1917, alcune delle quali si videro ad occhio nudo.

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

**Ileana Chinnici** è ricercatore astronomo dell’Osservatorio Astronomico “G. S. Vaiana” di Palermo e dal 1996 è stata conservatore del Museo dell’Osservatorio. Laureatasi nel 1992 in Fisica con tesi in storia dell’astronomia, ha pubblicato, con G. Foderà, il catalogo degli strumenti dell’Osservatorio. I suoi interessi di ricerca vertono principalmente sulla storia dell’astronomia e dell’astrofisica nell’Ottocento, con particolare attenzione alle fonti archivistiche. In collaborazione con l’Observatoire de Paris ha curato l’edizione della corrispondenza relativa all’impresa internazionale della *Carte du Ciel*.

# Cieli d'inchiostro\*

A cura di Agnese Mandrino<sup>1</sup> · Mauro Gargano<sup>2</sup> · Antonella Gasperini<sup>3</sup>

<sup>1</sup> INAF · Osservatorio Astronomico di Brera

<sup>2</sup> INAF · Osservatorio Astronomico di Capodimonte

<sup>3</sup> INAF · Osservatorio Astrofisico di Arcetri

## «Carissimo zio ...»

### 1908: da Elsa a Giovanni Virginio (Schiaparelli)

Ilaria Arosio

INAF · Osservatorio Astronomico di Brera

NEI primi decenni del xx secolo chi non voleva uniformarsi all'eleganza comune ma voleva colpire e scardinare le regole del costume doveva fare tappa al numero 21 di Place Vendôme a Parigi ed entrare nello stravagante *atelier* di Elsa Schiaparelli, unica degna rivale di Coco Chanel nel periodo tra le due guerre e una delle stiliste più innovative di tutti i tempi.

Elsa nasce nel 1890 in via Corsini a Roma, da una poliedrica e aristocratica famiglia italiana di origine piemontese: gli Schiaparelli. Il padre Celestino, celebre arabista, è direttore della biblioteca della Accademia dei Lincei, lo zio Ernesto è direttore del Museo egizio di Torino e lo zio Giovanni è l'astronomo noto per la descrizione dei canali di Marte e direttore dell'Osservatorio Astronomico di Brera dal 1862 al 1900.

Il fratello di mio padre, Giovanni Schiaparelli, era una persona straordinaria. Dirigeva l'Osservatorio di Brera a Milano. [...] Gli piacevo perché, diceva, ero nata con la costellazione dell'Orsa Maggiore sulla guancia. Ovviamente, si trattava di lei. Mi portava sempre a guardare le stelle con il suo grande telescopio e, tenendomi in braccio, mi spiegava perché pensava che su Marte abitassero persone come noi; credeva addirittura che lassù ci fosse la mietitura. La sua scoperta dei canali di Marte venne accolta come un grande evento nel mondo dell'astronomia. Lo zio possedeva una villa napoleonica vicino a Milano dove passavo ore felici seduta per terra in un angolo mentre cucinavano la polenta. Per me era una persona semplice, con una grande energia in un piccolo corpo, che scoprieva sempre nuovi mondi, che intuiva i misteriosi rapporti tra le stelle e le comete e mi descriveva

\* 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.

Marte come se fosse appena tornato dopo averci soggiornato a lungo.

Tra le carte del celebre astronomo, nell'archivio dell'Osservatorio di Brera, troviamo oggi una lettera autografa di Elsa. È raccolta insieme alla poca altra corrispondenza del pur numeroso parentado e subito, solo a guardarla, colpisce per la sua grafia così "eccentrica" e per un orientamento dei fogli quantomeno originale (FIG. 1).

Il 20 giugno del 1908, all'approssimarsi dell'onomastico, Elsa scrive allo zio Giovanni la nostra lettera di auguri affettuosi, senza nascondere la sua tristezza e la sua frustrazione nel trovarsi sola, tra i monti svizzeri, in una situazione che lei definisce "esiglio".

Si tratta probabilmente di uno dei tanti soggiorni in un educandato svizzero gestito da suore, grazie ai quali la famiglia cerca di rimettere sui binari una figlia un po' troppo fantasiosa e spumeggiante che dapprima pensa di diventare attrice e poi pubblica poemi a sfondo erotico.

Servirà a poco: con il pretesto di aiutare nella gestione dei figli un'amica, residente nella campagna londinese, Elsa cerca e trova presto la sua via di fuga per l'indipendenza.

Si sposa a Londra nel 1914 con il conte William de Wendt de Kerlor e, abbandonata a New York dallo stesso conte con la neonata figlia Gogo tra le braccia, incomincia a frequentare gli artisti dell'avanguardia dadaista. Si trasferisce poi a Parigi, ospitata dalla moglie di François Picabia, il celebre artista, e si reinventa stilista, grazie ad un'intuizione che la porta a creare maglioni con uno strano effetto *trompe l'oeil*, in collaborazione con una rifugiata armena; particolarmente fortunata è la maglia nera con il fiocco realizzato con la innovativa tecnica della maglia doppia: Schiaparelli è sulla bocca di tutti e non è che l'inizio.

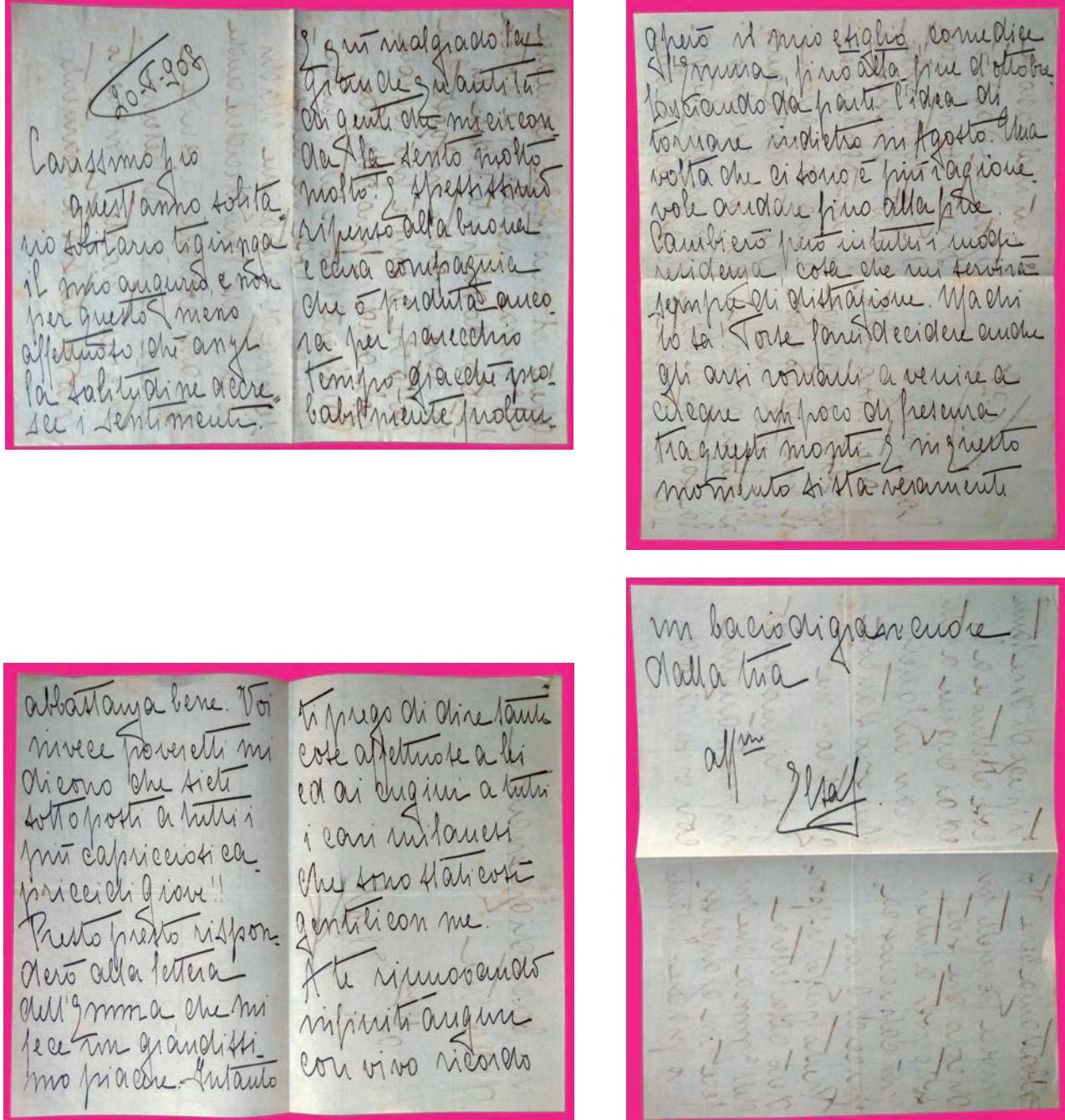


FIG. 1. Lettera di Elsa Schiaparelli a Giovanni V. Schiaparelli, 20 giugno 1908, in Archivio storico dell'Osservatorio astronomico di Brera, Fondo G.V. Schiaparelli, cart. 595, fasc. 1.

Un maglione con l'immagine di uno scheletro sconvolse i benpensanti ma arrivò sui giornali che a quel tempo non si occupavano molto di moda. Le linee bianche sul maglione seguivano il disegno delle costole, generando un effetto raggi x sulle donne che lo indossavano.

Permeabile a qualunque tipo di arte e fortemente legata all'ala surrealista, Elsa Schiaparelli crea abiti ispirandosi alla scultura, all'industria, ai mezzi di trasporto e allo sport e all'architettura.

Imparò alcune regole riguardo ai vestiti, aiutata probabilmente dalla bellezza che l'aveva circondata durante tutta l'infanzia. I vestiti dovevano ispirarsi all'architettura: non bisogna mai dimenticare il corpo e bisogna

usarla come si usa la struttura in un edificio. Le linee e i dettagli stravaganti o un effetto asimmetrico devono sempre essere in stretto rapporto con questa struttura. Più il corpo viene rispettato più vitalità acquisisce il vestito. Si possono aggiungere imbottiture e fiocchi, si possono abbassare o alzare le linee, modificare le curve, accentuare questo o quel punto ma l'armonia deve restare.

Elsa sarà la prima a sviluppare collezioni a tema: *Fermati, Guarda e ascolta, Le farfalle, Gli strumenti musicali* e quella forse più famosa, *Il circo*. Ma, per la collezione autunno inverno 1938-1939, Elsa fa un tuffo nel passato; ripensa forse allo zio, al cielo stellato e realizza una collezione che passerà alla storia per la sua potenza iconica: *Astrologie* (con buona pace de-



FIG. 2. La famosa giacca *Zodiaco*, realizzata da Elsa Schiaparelli per la collezione 1938-1939 e venduta all'asta, nel 2013, alla cifra di 110.000 sterline.

gli astronomi che tanto si battono per distinguere la loro disciplina dalle baggianate dell'astrologia).

L'elemento di punta della collezione è la giacca *Zodiaco* in velluto blu (FIG. 2), con ricami a forma di luna, stelle, pianeti e costellazioni, realizzati dalla celeberrima *Maison Lesage*; spicca in particolare, sulla spalla, la costellazione dell'Orsa Maggiore, la stessa che lo zio le riconosce sulla guancia (FIG. 3) e con l'immagine della quale Elsa realizza per sé un'inseparabile spilla (FIG. 4).

Antesignana della rivoluzione della *Space Age*, che arriverà negli anni Sessanta ad opera di Pierre Cardin, André Courrèges e Paco Rabanne, la Schiap (come ama chiamarsi lei) sfrutta ogni tipo di materiale per creare vestiti. Realizza abiti con cellophane e vetro, accessori in plexiglass, bottoni di ogni tipo con penne, catene, lucchetti, animali, caramelle ed è la prima a dare risalto alla chiusura a lampo, fino a quel momento nascosta all'interno dei vestiti, mettendola in vista e dandole un senso estetico.

Tra le sue fedeli acquirenti troviamo Katherine Hepburn, Mae West, Gary Cooper e l'angelo azzurro Marlene Dietrich. Proprio ispirandosi al busto che Mae West le lascia in *atelier* per riprodurre perfettamente le sue misure, Elsa crea la boccetta del profumo *Shocking*, confezionato con il colore da lei stessa inventato, il rosa *shocking*.



FIG. 3. I nei sul volto di Elsa Schiaparelli, riconosciuti dallo zio astronomo come l'immagine dell'Orsa Maggiore.

Il colore d'un tratto mi si parò davanti agli occhi: brillante, impossibile, sfrontato, piacevole, pieno di energia, come tutta la luce, tutti gli uccelli e tutti i pesci del mondo messi insieme, un colore proveniente dalla Cina o dal Perù, non occidentale; un colore *Shocking*, puro e non diluito. Così chiamai il profumo *Shocking*.

Libera la sua fantasia e infrange ogni regola pratica, collaborando con i grandi surrealisti, quali Dalí e Man Ray, che la portano a realizzare opere bizzarre e stravaganti, come il cappello a forma di scarpa o di costolatta d'agnello, il cappotto con i cassetti, i guanti con le unghie o un modello da sera che mostra vistosi strappi da cui appare un fondo rosso come fosse carne viva ...

«Un abito Schiaparelli è come un quadro di arte moderna» recita il *New Yorker* nel 1932.

E, se da un lato troviamo nelle sue collezioni vestiti non indossabili, dall'altro la stilista è convinta che l'abito debba essere a servizio della donna e si inventa vestiti che permettano di essere curata e attraente in qualunque tipo di attività.

Gonne pantalone «graziose, femminili e meno pretenziose delle gonne», indossate dalla tennista Lilí de Álvarez, spalline create per dare l'impressione che la vita fosse più sottile, grembiuli o vestiti da cucina, per permettere alle donne di essere attraen-



FIG. 4. Elsa Schiaparelli, qui con Salvador Dalí, indossa la spilla con la costellazione dell'Orsa Maggiore.

ti persino cucinando, o le imbottiture del reggiseno: Elsa Schiaparelli ha in mente una donna libera e indipendente che possa fare tutto senza dimenticare l'estetica.

La Schiaparelli chiude la *Maison* nel 1954 e si spegne nel sonno il 13 novembre 1973, all'età di 83 anni.

Anche se il suo ricordo rimane opaco e sfuocato, Elsa Schiaparelli, la nipote del grande astronomo, non verrà mai dimenticata nel mondo della moda che, a intervalli, la ricorda come stilista di assoluta avanguardia cui ispirarsi.

Nel 2007 Diego della Valle acquista i diritti del marchio e inizia un lento recupero della maison. Nel 2012 viene realizzata, al Metropolitan Museum of Art di New York, la mostra *Impossibile Conversations*, in cui vengono accostate due importantissime figure della moda e dell'arte italiana: Elsa Schiaparelli e Miuccia Prada. Per l'occasione viene realizzata una conversazione impossibile tra le due grandi stiliste, sullo stile di quelle realizzate da Miguel Covarrubias per *Vogue* negli anni Trenta.

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

**Mauro Gargano**, laureato in Astronomia presso l'Università di Padova, ha un assegno di ricerca presso l'Osservatorio Astronomico di Capodimonte a Napoli, dove si occupa anche dello studio e valorizzazione della collezione storica esposta nel Museo degli Strumenti Astronomici.

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

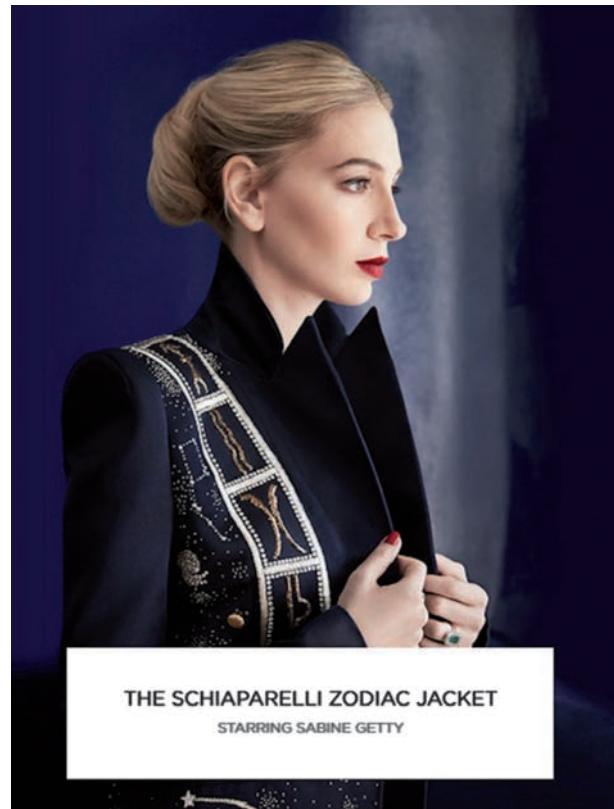


FIG. 5. La giacca Zodiaco, rivisitata oggi dalla nuova *Maison Schiaparelli*: si riconosce a sinistra l'Orsa Maggiore. (da: [www.schiaparelli.com/fr](http://www.schiaparelli.com/fr))

Nel dicembre 2016 esce una rivisitazione della giacca Zodiaco (FIG. 5), ad opera di Bertrand Guyon, *design director* della rinata *Maison*, che ritrova negli astri, nelle stelle, nei pianeti il marchio indelebile della stilista che, forse, allo zio Giovanni e ai suoi voli pindarici su Marte deve parte della sua fortuna.

«Saranno, queste, anche cose inutili ma danno tanto piacere e tanto lavoro a così tanta gente ...»

#### I DOCUMENTO:

Lettera di Elsa Schiaparelli a Giovanni Schiaparelli, 20 giugno 1908, in Archivio storico dell'Osservatorio astronomico di Brera, Fondo G.V. Schiaparelli, cart. 595, fasc. 1.

**Ilaria Arosio**, astrofisica con Master in comunicazione della scienza si occupa a tempo pieno di divulgazione e didattica dell'astronomia. Dal 2006 fa parte del *Public Outreach Education Office* (POE) dell'INAF-Osservatorio Astronomico di Brera e collabora con il Planetario di Milano "U. Hoepli"; si interessa alla comunicazione della scienza attraverso musica, cinema e moda e scrive articoli per riviste di divulgazione scientifica e quotidiani. Dal 2012 cura il blog <https://rockandscience.wordpress.com/>.

# Spigolature astronomiche\*

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna

## Un tè con Einstein navigando sul fiume

Annibale D'Ercole

**C**OM'È facile verificare, dopo aver messo in rotazione con un cucchiaino il tè contenuto in una tazza, le foglioline tendono a convergere al centro piuttosto che muoversi verso il bordo, come invece ci si aspetterebbe a causa della forza centrifuga. Questo fenomeno, noto come *il paradosso delle foglioline di tè*, era già conosciuto fin dalla metà dell'Ottocento, ma venne risolto soltanto nel 1926 da Albert Einstein in un articolo pubblicato sulla rivista *Die Naturwissenschaften*.

Quando il liquido viene messo in rotazione, la forza centrifuga lo spinge verso la parete costringendolo ad accumularsi contro di essa; ne segue un innalzamento del livello superficiale vicino al bordo, mentre il liquido si "abbassa" verso il centro della tazza (la forma della superficie è esattamente quella formata da una parabola in rotazione; si veda il livello avanzato). D'altra parte, la pressione in un liquido è tanto maggiore quanto maggiore è la profondità a cui ci si trova, a causa del maggior peso del liquido sovrastante; pertanto, la pressione sul fondo vicino alla parete della tazza è maggiore di quella al centro, dove il liquido è meno profondo. Questa differenza di pressione tende a spingere il liquido verso il centro; in condizioni di equilibrio, tale spinta è bilanciata dalla forza centrifuga, e nessun moto radiale si sviluppa.

Ma questo equilibrio è solo un'idealizzazione perché la rotazione del liquido vicino alla parete e nei pressi del fondo è rallentata a causa dell'attrito. Pertanto, in queste zone la forza centrifuga, che dipende dalla velocità di rotazione, risulta indebolita e la pressione sul fondo ha buon gioco nello spingere

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

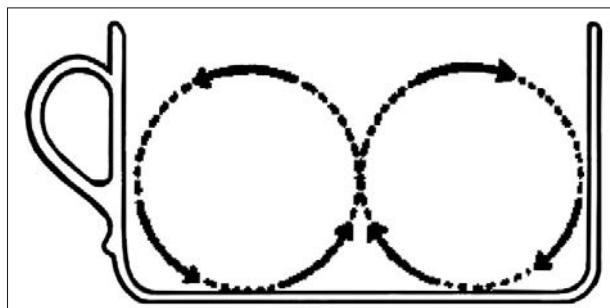


FIG. 1. Figura originale presente nell'articolo di Einstein del 1926. Viene illustrato il moto secondario che si innesca in una bevanda in una tazza quando la si mette in rotazione con un cucchiaino.

re il liquido verso il centro. Si innesca allora un *flusso secondario* che si sovrappone a quello *primario* (ossia quello circolare): vicino al fondo il liquido si muove dal bordo verso il centro, da qui risale verso l'alto per poi muoversi radialmente verso il bordo e scendere di nuovo in basso (FIG. 1). Le foglioline di tè seguono il moto radiale sul fondo, ma sono troppo pesanti per risalire e si accumulano al centro.

Può risultare sorprendente che Einstein "perde tempo" ad analizzare il moto di un liquido all'interno di una tazza. In realtà, lo scienziato era interessato a dare una spiegazione del perché tutti i fiumi, in misura maggiore o minore, sviluppano un percorso tortuoso piuttosto che essenzialmente rettilineo.<sup>1</sup> Come scrive egli stesso: «Non avendo trovato nessuno realmente in grado di fornire una spiegazione a questo fenomeno, penso che valga la pena darne una breve descrizione qualitativa». Einstein inizia allora descrivendo la dinamica del flusso di tè che abbiamo dato più sopra, e mette poi in luce le analogie di tale flusso con quello dell'acqua nel letto di un fiume.

Immaginiamo un fiume che segua inizialmente un percorso più o meno rettilineo (FIG. 2). Ogni pic-

<sup>1</sup> La tortuosità di un fiume è caratterizzata dall'*indice di sinuosità* *is* definito come il rapporto tra la lunghezza effettiva del fiume e la distanza che intercorre in linea d'aria tra la sorgente e la foce. Maggiore è la tortuosità di un fiume, maggiore è il suo indice di sinuosità; invece, un fiume perfettamente rettilineo avrebbe il minimo valore *is* = 1.

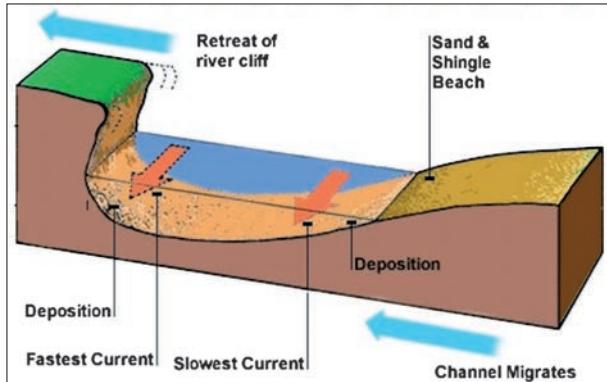


FIG. 2. Sezione dell'alveo di un'ansa di un fiume. Nel lato più profondo l'acqua scorre più velocemente a causa del minor attrito col fondo (freccia arancione sinistra) e la corrente è sufficientemente forte da riuscire ad erodere il bordo del fiume. Nel lato meno profondo, invece, il flusso più lento (freccia arancione destra) favorisce la sedimentazione dei detriti trascinati dal fiume piuttosto che l'erosione. Il risultato netto di erosione da un lato e sedimentazione dall'altro è un lento spostamento del letto del fiume nella direzione indicata dalle frecce azzurre.

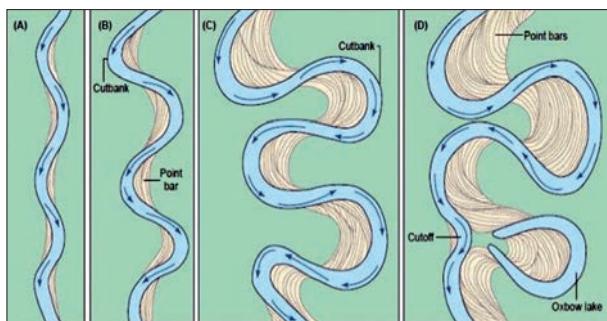


FIG. 4. La struttura sinuosa di un fiume evolve nel tempo (pannelli da A a D) a causa dell'erosione che si verifica nel lato esterno delle anse – dove la velocità è maggiore – e della sedimentazione che si accumula nel lato interno (indicata in marrone). Le anse diventano sempre più grandi e tendono a migrare più a valle. Può capitare che due meandri arrivino ad essere così vicini che la striscia di terra che li separa diventi sottile al punto da essere scavalcata dalla corrente (pannello D); il meandro isolato diventa sede di acqua stagnante e col tempo si trasforma in palude.

cola curva, per quanto modesta, produce delle differenze di velocità nel flusso dell'acqua; l'acqua che scorre nella parte concava (cioè esterna) della curva deve rimanere "al passo" con quella che costeggia il lato convesso (cioè interno) più corto, e deve dunque scorrere più velocemente rispetto a quest'ultima. La massa d'acqua contenuta nel fiume è soggetta alla forza centrifuga e tende a spostarsi verso il lato concavo, in analogia a quanto accade al tè che ruota nella tazza. Pertanto, lungo le curve dei fiumi, dette anche *anse* o *meandri*, si crea un flusso secondario che in superficie va dal lato interno a quello esterno, e in profondità scorre in direzione opposta in conseguenza dell'attrito col fondo che riduce l'azione della forza centrifuga.

La maggiore velocità di scorrimento implica una maggiore capacità di dilavare il bordo del fiume: pertanto sul lato esterno dell'ansa il fenomeno prevalente è l'erosione (FIG. 3). Viceversa, nel settore

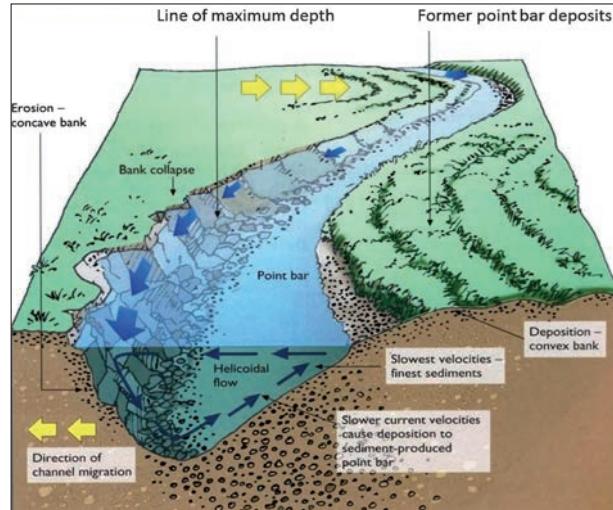


FIG. 3. Moto dell'acqua lungo un meandro. Le frecce azzurre grandi mettono in risalto come la velocità di scorrimento aumenti sul lato concavo (esterno) dell'ansa man mano che il flusso la percorre. Le frecce sottili azzurre, invece, illustrano il flusso secondario che, sovrapponendosi a quello primario (scorrimento lungo l'alveo) dà luogo ad un moto complessivo elicoidale la cui progressione ricorda quella della filettatura di una vite. Il flusso secondario è presente solo lungo le anse, dove agisce la forza centrifuga (si veda il testo), e contribuisce all'erosione del lato concavo e alla sedimentazione del lato convesso. Le tre frecce gialle in alto testimoniano del progressivo avanzamento degli strati sedimentari posti sul lato convesso (si veda anche la struttura a gradini del terreno in primo piano sulla destra), mentre le due frecce gialle indicano la direzione della migrazione del lato esterno a causa dell'erosione.

del fiume in prossimità del lato convesso la velocità della corrente è minore, e l'acqua non è in grado di erodere o trasportare materiale: viene quindi favorito il deposito del materiale alluvionale e prevale la sedimentazione. Il flusso secondario contribuisce a questo fenomeno rimuovendo materiale dal bordo esterno di un meandro e depositandolo sul lato interno del meandro successivo. Pertanto, mentre sul lato convesso si ha un progressivo accumulo di materiale e in quel settore il letto del fiume viene colmato, sul lato opposto la corrente erode gradualmente il bordo e l'alveo si espande. Il risultato complessivo è un'accentuazione della sinuosità del fiume con meandri che diventano sempre più ampi assumendo una curvatura a "laccio" e migrando lateralmente e verso valle.<sup>2</sup> Se un meandro si sposta più velocemente di uno adiacente, tra i due si sviluppa uno stretto "collo" di terra sempre più sottile destinato a venire scavalcato dal flusso d'acqua. Il flusso del fiume allora mantiene questa nuova direzione rettilinea, e l'ansa abbandonata, detta *lanca*, diventa una sorta di palude contenente acqua stagnante (FIG. 4).

<sup>2</sup> La migrazione verso valle è dovuta al fatto che l'acqua, come tutti i corpi, possiede un'inerzia e reagisce con un certo ritardo agli stimoli esterni. Così come, pur premendo l'acceleratore "a tavolletta", persino una Lamborghini impiega del tempo per raggiungere la velocità desiderata, ugualmente un elemento d'acqua raggiunge la sua massima velocità – e dunque la sua massima capacità di erosione – dopo aver superato il punto di massima curvatura, quindi più a valle.



FIG. 5. Esempi di meandri in avanzata fase evolutiva.

La realizzazione di lanche e meandri particolarmente sviluppati avviene preferibilmente in terreni con scarsa pendenza dove l'acqua del fiume, muovendosi lentamente, non è in grado di scavalcare sedimenti ed ostacoli, ma li evita procedendo a zig-zag (FIG. 5).

Abbiamo visto nel livello base che la superficie del liquido in rotazione in una tazza assume una disposizione concava. Mostriamo qui che la superficie di un liquido in rotazione con velocità angolare costante all'interno di un contenitore cilindrico assume la forma di un paraboloido di rotazione, ossia una superficie che si ottiene facendo ruotare una parabola attorno al suo asse di simmetria.

Fissiamo l'attenzione su un piccolo elemento cubico di liquido posto sul fondo i cui lati sono pari a  $dr$  (FIG. 6). La massa di questo cubetto è  $dm =$

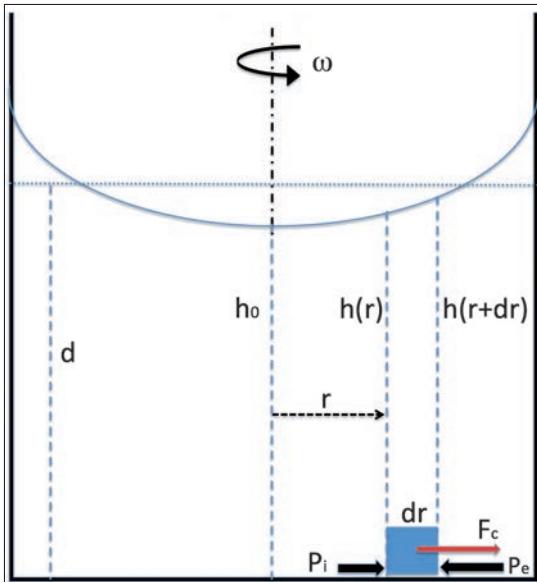


FIG. 6. Liquido in rotazione la cui superficie assume un profilo concavo (linea blu continua); la linea blu orizzontale indica la superficie dell'acqua in quiete. Il quadrato blu rappresenta un cubetto d'acqua di lato  $dr$ . Tutte le altre quantità indicate sono definite nel testo.

$\rho dr^3$ , dove  $\rho$  è la densità del liquido. Ammettendo che l'acqua ruoti come un corpo rigido, il nostro cubetto ruota con una velocità circolare  $u = \omega r$ , dove  $r$  è la sua distanza dall'asse di rotazione e  $\omega$  è la velocità angolare del liquido (ossia il numero di giri che compie nell'unità di tempo). È noto che, nel sistema di riferimento ruotante del liquido, il cubetto è sottoposto ad una accelerazione centrifuga  $\omega^2 r$ , e dunque ad una forza centrifuga  $F_c = dm\omega^2 r$  che tende a spingerlo verso l'esterno. Come abbiamo detto nel livello base, in assenza di attrito si crea una situazione di equilibrio per cui la forza centrifuga è bilanciata dalla pressione. La pressione  $P(r)$  in un punto sul fondo a distanza  $r$  dal centro è data dal peso della colonna d'acqua di sezione unitaria che grava su quel punto:  $P(r) = g\rho h(r)$ , dove  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $h(r)$  è la profondità dell'acqua alla distanza  $r$ . Detta  $P_i = P(r)$  la pressione esercitata sulla faccia interna del cubetto e  $P_e = P(r+dr)$  quella esercitata sulla faccia opposta, la spinta radiale netta subita dal cubetto ad opera della pressione è  $F_p = (P_e - P_i)dr^2$ , dove  $dr^2$  rappresenta la superficie della faccia del cubetto. Essendo  $P_e > P_i$ ,  $F_p$  è rivolta verso il centro e si oppone alla forza centrifuga. Perché vi sia equilibrio è necessario che sia  $F_p = F_c$ , ossia

$$g\rho[h(r+dr) - h(r)]dr^2 = \rho dr^3 \omega^2 r,$$

da cui

$$\frac{h(r+dr) - h(r)}{dr} = \frac{\omega^2}{g} r. \quad (1)$$

Si può facilmente verificare che la soluzione all'equazione (1) è data da

$$h(r) = \frac{\omega^2}{2g} r^2 - h_0, \quad (2)$$

dove  $h_0$  è la minima profondità dell'acqua (che si verifica a  $r = 0$ ). Infatti possiamo scrivere:

$$\begin{aligned} h(r+dr) &= \frac{\omega^2}{2g} (r^2 + 2rdr + dr^2) + h_0 \\ &= \frac{\omega^2}{2g} r^2 (1 + 2x + x^2) + h_0 \quad (3) \\ &\approx \frac{\omega^2}{2g} r^2 (1 + 2x) + h_0, \end{aligned}$$

dove  $x = dr/r$ ; dal momento che  $dr \ll r$ , abbiamo  $x^2 \ll x \ll 1$  e possiamo trascurare il termine  $x^2$  nell'ultimo passaggio.

Utilizzando ora le equazioni (2) e (3) possiamo riscrivere il termine a sinistra dell'uguale dell'equazione (1), ottenendo proprio il termine a destra. Abbiamo pertanto verificato che l'equazione (2) rappresenta effettivamente l'andamento della profondità dell'acqua in funzione di  $r$ . Tale equazione descrive un paraboloido di rotazione, come anticipato all'inizio.

La costante  $h_0$  dipende dalla quantità d'acqua presente nel recipiente, e si può dimostrare che vale

$$h_0 = d - \frac{\omega^2 R^2}{4g}, \quad (4)$$

dove  $R$  rappresenta il raggio del recipiente cilindrico e  $d$  è la profondità dell'acqua da ferma. Com'è intuitivo, la depressione centrale è tanto maggiore quanto maggiore è la velocità di rotazione.

Queste ultime righe sono dedicate ai lettori con qualche conoscenza di analisi matematica che non volessero limitarsi a verificare, ma fossero intenzionati a dimostrare le equazioni (2) e (4). In quest'ottica, cominciamo col notare che, per  $dr \rightarrow 0$ , l'espressione di sinistra nell'equazione (1) rappresenta la derivata di  $h(r)$  rispetto ad  $r$ :

$$\frac{dh(r)}{dr} = \frac{\omega^2}{g} r.$$

La funzione  $h(r)$  può essere allora facilmente trovata integrando l'equazione precedente:

$$h(r) = \int \frac{dh(r)}{dr} dr = \frac{\omega^2}{g} \int r dr = \frac{\omega^2}{2g} r^2 + h_0,$$

dove  $h_0$  è la costante di integrazione. Quest'ultima si trova notando che il volume iniziale  $V_i$  del fluido in quiete deve essere uguale al volume  $V_f$  del liquido in rotazione. Inizialmente il volume occupato è cilindrico:

$$V_i = \pi R^2 d.$$

Il volume del liquido in rotazione si calcola invece come

$$V_f = 2\pi \int_0^R r h(r) dr = 2\pi \left( \frac{\omega^2 R^4}{8g} + \frac{h_0 R^2}{2} \right).$$

Ponendo  $V_i = V_f$  si ottiene infine l'equazione (4).

A cura di Alberto Cappi

INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna

## L'universo oscuro

### Viaggio astronomico tra i misteri del cosmo

Andrea Cimatti

Carocci editore (Città della Scienza), 1917

Copertina flessibile, pp. 171, € 14.00

ISBN 9788843088034

[www.carocci.it](http://www.carocci.it)

**I**l breve saggio di Andrea Cimatti si inserisce come piacevolissima sorpresa nel sempre avaro panorama italiano della divulgazione astronomica "di classe". Se, infatti, da un lato abbonda anche da noi la pletora di libri "basici", sempre riccamente illustrati e che si indirizzano essenzialmente al pubblico dei ragazzi nella fascia di età della scuola primaria, molto meno sono presenti, sul mercato, i saggi approfonditi (ma allo stesso tempo non specialistici), che possano indirizzarsi al lettore "evoluto" (il cosiddetto *layman*, come direbbero gli inglesi). In altri termini, a quella figura di lettore interessato, con un minimo di formazione scolastica alle spalle, in grado di assaporare concetti più esotici e spunti di analisi più elaborati, al riparo tuttavia dal flagello del formalismo matematico e dai tecnicismi dialettici dello specialista.

Ebbene, il libro di Cimatti è una perfetta risposta a questa esigenza di divulgazione "avanzata", che affronta tra l'altro una delle aree più complesse della ricerca astronomica: quella che gira attorno al grande mistero della nascita ed evoluzione del cosmo. Una sfida non banale da proporre, soprattutto perché il libro intende affrontare il tema dal suo lato più nuovo e difficile (e quindi anche più stimolante) dell'astrofisica della materia oscura e della sua relazione con il discorso cosmologico.

Se è vero, come dice il proverbio, che «non è tutto oro quello che luce», in cosmologia il discorso potrebbe parafrasarsi dicendo che «non tutto l'oro sembra dare luce» poiché una (imbarazzantissima) frazione del 95 percento dell'intera materia dell'universo starebbe scappando alla vista dei nostri telescopi ottici e radiotelescopi. Cosa compone questa inimmaginabile quantità di "materia"? Come è finita lì? Perché non la vediamo? E come ha influenzato (ed influenzerà) il passato (e il futuro) del nostro universo?

Inutile dire che, pur nella loro apparente semplicità, queste domande non hanno trovato una risposta univoca e, come lascia intendere Cimatti, molto tempo potrebbe volerci per trovarne una (sola) di risposta... ammesso che esista. In effetti, questo elemento di "dubbio ragionato" e di analisi pragmati-

ca della nostra ignoranza è un punto assai apprezzabile del libro, dove la discussione rifugge dai toni entusiastici di una scienza sempre "certa" e in marcia verso l'"inevitabile" vittoria finale e si sofferma a considerare, al contrario, le tante strade possibili ancora da esplorare e i tanti inossidabili paradigmi che forse dovranno essere messi presto in discussione, se vogliamo "andare oltre" con la nostra comprensione del cosmo.

Questa commistione di "fresco stupore" e di argomentata razionalità può essere, in effetti, una cifra di lettura del libro, dove l'autore (scienziato fra i più brillanti esperti del settore, riconosciuto a livello internazionale) lascia spesso trasparire l'adolescente curioso ed entusiasta che guardava il cielo con incanto dal balcone di casa.

Come in un *thriller*, la trama del libro si dipana, nella prima parte, secondo i rassicuranti canoni classici della narrazione del nostro "posto nell'universo", con un progressivo zoom all'inverso, che parte dal Sistema solare, su fino alla Galassia, poi alle galassie nel loro insieme e ancora più in su fino alle cosiddette "strutture a larga scala" nell'universo. In questo contesto, il percorso del libro segue tracce ben sperimentate e, lo ammettiamo, rischia di annoiare un po' il lettore incostante, alla (vana?) ricerca dei brividi intellettuali sottintesi dal titolo. Ad una più attenta lettura, però, anche questa parte della narrazione è impreziosita da alcuni paragoni per nulla scontati e ammiccanti "tratti d'acquarello" nel descrivere le cose celesti e noi umani che le guardiamo. Come l'incipit, con la ballerina che torna a casa sfinita dopo una festa in discoteca o l'infermiera nella sua pausa dal turno di notte, che esce a prendere una boccata d'aria e si mette a naso in su a guardare le stelle...

Ma è nella seconda parte che il libro dà il meglio della discussione, addentrandosi con grande dettaglio e chiarezza nei meandri della fisica delle particelle per andare a discutere le (tante) possibili nature della materia oscura, dalla materia "ordinaria" (gas, polveri, pianeti giganti e stelle nane... bianche, brune e nere!) a quella "esotica". Questo secondo scenario, in particolare, è assolutamente originale e innovativo, come approccio, e riporta un quadro aggiornatissimo della situazione. Leggendo questo capitolo, andremo a conoscere tante particelle "strane" forse mai sentite prima. Chi conosce, ad esempio, il *neutralino*? E che dire dei *neutrini* "sterili" e delle "WIMPzillas"? Saranno forse gli *assioni* a risolvere il segreto della massa mancante?

Per concludere, fanno da utile contorno alla discussione una serie di figure (tutte a colori), di curatissima fattura grafica, e dei brevi ma esaustivi riassunti dei concetti trattati, alla fine di ciascun capitolo, per il lettore più frettoloso. Insomma, una "chicca" che non può assolutamente mancare nella libreria dell'amante serio delle cose astronomiche.

ALBERTO BUZZONI

**Andrea Cimatti** è professore ordinario nel Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, dove insegna Astronomia e Formazione ed evoluzione delle galassie. Nel 2006 ha conseguito il *Bessel Prize* della Alexander von Humboldt Foundation e nel 2016 il *Premio L. Tartufari* dell'Accademia dei Lincei.

\*

### Destinazione spazio Una guida per coloni e turisti

Neil F. Comins  
Ulrico Hoepli Editore S.p.A., 2017  
Copertina flessibile, pp. 297, € 22,90  
ISBN 9788820380212  
[www.hoeplieditore.it](http://www.hoeplieditore.it)

**M**OGLI pensano che ormai viaggiare nello spazio sia cosa di tutti giorni, una routine ripetuta all'infinito non più in grado di riservare particolari emozioni a chi vi assiste da spettatore e addirittura a chi vive questa esperienza da protagonista. Un po' come prendere l'autobus per andare al lavoro, insomma.

Nulla di più sbagliato, in realtà, perché il volo spaziale è ancora, come ai suoi albori qualche decennio fa, un'esperienza estrema, che richiede la massima cura nella preparazione delle macchine e degli esseri umani che quelle macchine andranno a utilizzare.

Certamente, da ex-ragazzo inebriato dalla visione degli eroici astronauti che volavano sulla Luna ai tempi dell'Apollo, non posso non prendere atto che i voli ripetuti verso la Stazione Spaziale Internazionale rivestono un fascino minore, almeno per il grosso pubblico, rispetto all'interesse che si viveva negli anni '60 per la corsa allo spazio tra Sovietici e Americani con obiettivo finale lo sbarco sulla Luna. Non per questo, tuttavia, l'andare in orbita oggi (e, sperabilmente, un po' più in là domani) deve essere visto in maniera riduttiva rispetto ai citati tempi eroici. Non sono infatti tanto lontane nel tempo le tragedie che colpirono due missioni dello Space Shuttle nel 1986 e nel 2003, causando in totale la perdita di quattordici astronauti, proprio quando un volo dello Shuttle era considerato routine che non faceva più notizia.

Di recente, inoltre, si è appreso che il 10 aprile 2017 la Soyuz MS-02, che rientrava sulla Terra dalla Stazione Spaziale Internazionale con un astronauta e due cosmonauti a bordo, ha sperimentato una perdita parziale della pressurizzazione dagli esiti po-

tenzialmente pericolosi, un incidente simile a quello occorso alla Soyuz 11 nel lontano 1971, che causò la morte di tre cosmonauti sovietici perché, a differenza dell'equipaggio della MS-02, non indossavano la tuta spaziale pressurizzata.

Tutto questo per dire che l'Uomo va sì nello spazio dal 1961, ma che il rischio e il pericolo fanno sempre parte della pratica dell'astronautica, che in tanti modi si potrà definire tranne che pura e semplice routine.

Ed è quasi pleonastico aggiungere, come già accennato più sopra, che se le macchine che portano gli esseri umani nello spazio debbono essere all'altezza del compito, molto della fase preparatoria dei lanci spaziali riguarda altresì proprio gli astronauti e la loro preparazione fisica e mentale, perché anch'essi siano perfettamente all'altezza dei compiti gravosi che li attendono in orbita e oltre.

Per questo finora ben pochi non professionisti sono andati nello spazio: al di là dei *Payload Specialists* che volavano sullo Shuttle – i quali pur non essendo astronauti professionisti membri della NASA erano comunque tecnici o scienziati responsabili di alcuni esperimenti di bordo – la casistica comprende sostanzialmente alcuni VIP danarosi in grado, a fini esclusivamente ricreativi, di pagarsi un costoso seggiolino su una nave spaziale diretta in orbita terrestre e di soggiornare lassù per qualche giorno insieme agli astronauti e cosmonauti "veri".

Mi lascia perplesso, a questo proposito, l'affermazione dell'autore riportata alle pagine 3 e 4 che non si conosca il numero preciso degli astronauti che sono andati finora nello spazio «per via delle missioni militari»: la cronologia dei voli spaziali con equipaggio è in realtà ben nota (al di là della mitologia creatasi nel corso dei decenni relativamente ai presunti cosmonauti sovietici perduti) né è così facile lanciare veicoli spaziali senza che qualcuno se ne accorga, per cui la discussione tra gli esperti riguarda semmai questioni più specifiche (per esempio a seconda che si escludano dall'elenco o vi si comprendano i voli suborbitali o le missioni con equipaggio abortite prima di raggiungere la cosiddetta linea di Karman).

Se ad oggi il turismo spaziale, di cui molto si parla e si immagina in riferimento a un futuro non lontanissimo, ha mosso soltanto i primi passi, rimanendo per ora una pratica riservata a pochi fortunati dalle possibilità (soprattutto economiche) del tutto fuori portata rispetto alla gente comune, le cose tuttavia stanno cambiando e di qui a non molto diverrà abbastanza comune imbarcarsi su un aerorazzo che porterà i propri passeggeri in una traiettoria suborbitale grazie alla quale essi potranno, per pochi minuti prima di rientrare sulla Terra, sperimentare la microgravità e vedere il nostro pianeta come lo vedono gli astronauti.

È questo un primo assaggio del turismo spaziale del futuro, e certamente sarà affare di pochi anni prima di veder svolgersi, in maniera abbastanza regolare, attività del genere da parte di imprenditori priva-

ti in grado di garantire a persone più o meno normali (per quanto riguarda il portafoglio) l'ebbrezza del volo spaziale ad accettabili condizioni di sicurezza.

Ma in un futuro (alquanto) più lontano si può pensare che anche l'idea di turismo spaziale si possa evolvere in maniera consequenziale all'attività esplorativa del cosmo da parte delle agenzie nazionali e internazionali, portando strutture di supporto per civili amanti delle emozioni forti in orbita terrestre e poi in orbita lunare, sulla Luna stessa e, perché no, anche verso Marte, le sue lune e i corpi minori del Sistema solare.

Il libro dell'astronomo Neil F. Comins si occupa proprio di questa evoluzione da astronauta professionista a chi andrà nello spazio per diletto. Chiaramente, parlare oggi di questi argomenti significa rischiare di scivolare nella fantascienza, perché è in discussione lo sviluppo di tecnologie e metodologie operative ancora in parte al di là da venire ma già ampiamente allo studio, anche e soprattutto da parte di aziende private.

Comins fornisce qui un esempio di buona divulgazione scientifica, affrontando la questione a tutto tondo in maniera piacevole e senza inutili appesantimenti: il lettore è messo in condizione di trarre dal testo un'informazione completa, precisa e comprensibile anche ai non addetti ai lavori, relativamente alle nozioni astronomiche di base inerenti il Sistema solare e al tipo di addestramento personale e ai requisiti fisici e mentali che i futuri turisti cosmici dovranno possedere.

È quindi un libro interessante e sicuramente consigliabile in particolare ai lettori non usi agli argomenti trattati ma desiderosi di informarsi sugli sviluppi futuri dell'esplorazione spaziale. Mi ha sorpreso trovare, in un testo così curato e preciso, una svista di un certo rilievo in tema di storia dell'astronautica, probabilmente sfuggita in fase di revisione finale: l'indicazione, a pag. 180, di «astronauti sovietici delle missioni *Luna 16*, *Luna 20* e *Luna 24*», quando invece si trattava di sonde automatiche senza equipaggio. Ma è un neo del tutto perdonabile vista la qualità generale del testo.

Forse l'unico appunto concettuale che si può muovere al libro è il dare per scontata e apparentemente non troppo lontana nel tempo un'evoluzione e un'affidabilità di programmi e voli spaziali ancora tutta da dimostrare. Ci sono infatti pochi dubbi sulla esattezza di una visione d'insieme che prevede in un futuro ancora non ben definito, ma comunque abbastanza prossimo, l'affermazione di un sistema di turismo spaziale consolidato gestito da privati in parallelo alle attività esplorative "istituzionali", ma è sulle tempistiche e gli sviluppi tecnologici che a mio parere molte incertezze ancora oggi permangono.

Se, infatti, proprio nei giorni in cui scrivo queste note, viene divulgata (vedi V. Frezzato ne *La Stampa* del 4/11/2017) la buona notizia del coinvolgimento di una ricercatrice italiana, Valentina Sumini, in un team del Massachusetts Institute of Technology

che con un proprio progetto si è aggiudicato il concorso *Mars City Design Competition 2017*, sponsorizzato dalla NASA per lo sviluppo di un insediamento abitativo per i futuri colonizzatori di Marte, quasi a temperare gli entusiasmi viene contestualmente pubblicato sul *New England Journal of Medicine* un approfondito studio della neuroradiologa Donna Roberts (si veda E. Ferroni in *Media INAF* del 2/11/2017) che evidenzia la serietà dei danni cerebrali provocati da una lunga permanenza in condizioni di microgravità. Due facce antipodali della stessa medaglia, da cui si evince come il progresso porti da un lato allo sviluppo di concetti sempre più arditi e avveniristici nell'esplorazione dello spazio, ma anche come a ciò faccia da contraltare la necessità di studiare sempre più a fondo i pericoli che rendono l'approccio ai viaggi spaziali di lunga durata una sfida le cui implicazioni per l'organismo umano sono ancora da comprendere nella loro globalità. In questo, indubbiamente, sono e saranno di grande utilità gli studi sulla permanenza di lunga durata in orbita compiuti a bordo della ISS che, sperabilmente, porteranno allo sviluppo e all'adozione di adeguate contromisure ai rischi che i futuri viaggiatori dello spazio dovranno affrontare.

Nel frattempo, gli avventurosi turisti spaziali *in progress* possono gustarsi questo documentato manuale per farsi un'idea delle mete cosmiche che le scienze astronautiche e planetarie permetteranno loro di raggiungere nei prossimi anni e di come dovranno prepararsi fisicamente e mentalmente per farlo.

MARCO ORLANDI

**Neil F. Comins** è professore di Fisica e Astronomia all'Università del Maine. Tra i suoi libri, *Discovering the Universe* (decima edizione, 2014), *What If the Earth Had Two Moons?* (2010), *What If the Moon Didn't Exist?* (1993).

★

### Dalla Terra alle lune

Piergiorgio Odifreddi

Rizzoli, 2017

Copertina flessibile, pp. 336, € 22,00

ISBN 9788817094740

[www.rizzolilibri.it](http://www.rizzolilibri.it)

**I**l libro di Piergiorgio Odifreddi, *Dalla Terra alle lune*, sorprende già nel titolo e ancor più nel sottotitolo, *Un viaggio cosmico in compagnia di Plutarco, Keplero e Huygens*. A prima vista una strana compagnia, con due viaggiatori quasi coevi e il primo vissuto milleseicento anni prima. Naturalmente il prof. Odifreddi ha avuto ottimi motivi per questo accostamento, se teniamo conto della straordinaria fama goduta da Plutarco dal XIV a ben oltre il XVII secolo, al punto che Keplero stesso avrebbe voluto che il *Volto della Luna* di Plutarco fosse stampato assieme al suo *Somnium*. Un'opera che Keplero aveva iniziato a scrivere negli anni giovanili, ma che fu

pubblicata dal figlio Alessandro con il sottotitolo *seu Opus Posthumus de Astronomia Lunari*. Era infatti il primo trattato di astronomia lunare, cioè di astronomia condotta da un osservatore situato sul suolo del nostro satellite, e anche il primo trattato di fantascienza basata sulla scienza. Sessant'anni dopo, al *Somnium* faceva seguito il trattato di Huygens *L'osservatore cosmico* (*Kosmotheoros*), che estendeva la vista del firmamento a un osservatore posto su Saturno.

Il libro è avvincente, ma avviso che l'impaginazione non è di immediata comprensione. L'autore fornisce le *Istruzioni per l'uso*, per come si deve leggere il libro, ma, come tutti i manuali, chi le legge se proprio non deve? Niente paura, sono poche e semplici avvertenze che consiglio di leggere subito, cosa che ovviamente io non ho fatto se non dopo le prime pagine che mi avevano un po' sbalestrato. L'autore si è trovato infatti davanti a un compito arduo, di completare parti mancanti, integrare note sparse in vari testi e in differenti edizioni, omogeneizzare la terminologia. Compito risolto in maniera drastica, con una personale traduzione dei testi greci e latini e inserimento delle note nel testo principale in colori differenti (usati per evidenziare i brani commentati a fronte (blu) o altrove (rosso), mentre i brani aggiunti al testo, comprese le note di Keplero, sono tra parentesi quadre), con l'intento dichiarato di «risvegliare delle belle opere addormentate più che dissezionare dei brutti cadaveri mummificati».

Già dalla lettura delle prime pagine è scaturito un mio rammarico personale (per non averlo fatto) e un suggerimento per i colleghi che insegnano astronomia (se non l'hanno fatto), cioè di assegnare ai loro studenti, come esercizi da svolgere, la descrizione della visibilità della Terra e del firmamento da varie parti del suolo lunare (inclusa la faccia nascosta) o degli anelli o delle varie lune dal polo o dall'equatore di Saturno, e verificare se essi, con tutti i mezzi a loro disposizione, armati di immagini da vari satelliti e sofisticati programmi di calcolo, farebbero meglio di Keplero e Huygens.

Il libro è diviso in quattro capitoli, il primo che dà il piano di volo e gli altri tre dedicati ai tre compagni di viaggio. Ogni capitolo poi è suddiviso in vari sotto-capitoli, ognuno corredata di utili e spesso guitosissime schede a fronte di ogni pagina di testo, ad esempio quella che ricorda il parallelo tra le vicende di Gian Domenico Cassini e Christian Huygens, rivali nella vita e accumunati per vari anni a bordo della sonda NASA-ESA-ASI *Cassini-Huygens*, fino al definitivo distacco del modulo *Huygens* nel 2004.

Il dialogo di Plutarco sulla faccia della Luna (che l'accenno a una eclisse totale di Sole permette di datare o al 20 marzo 71 o al 6 gennaio 75), mi dà modo di ricordare una domanda che il dottissimo Leonida Rosino rivolgeva in sede di esame: «Mi dica, secondo lei, la Luna è solida, liquida o gassosa?»; se poi la risposta era corretta, e non succedeva sempre, seguiva la ben più insidiosa: «Me lo dimostri». Leonida

era erede di una solidissima cultura classica, ormai svanita nelle generazioni più giovani, una lacuna che questo bel libro di Odifreddi contribuisce efficacemente a colmare. Cito, al riguardo, un'altra bella scheda, quella che ricorda cinque nostri poeti che hanno cantato la Luna, Dante, Ariosto, Galileo, Leopardi e Calvino. Non paia improprio l'aver inserito Galileo tra i «poeti», non fu solo Calvino a considerarlo tra i massimi scrittori italiani.

È straordinaria l'abilità dell'autore di collegare le opinioni dei vari personaggi di un dialogo di duemila anni fa con concetti contemporanei, quali l'espansione dell'universo o il principio antropico o il cosiddetto *intelligent design*. Una concezione, quest'ultima, che trovò uno strenuo oppositore in George Coyne SJ, grande direttore della Specola Vaticana.

Il collegamento tra antico e moderno è del resto presente anche negli altri capitoli, in cui compaiono notizie recentissime, quali la presenza di acqua sotterranea su Encelado o l'esopianeta di Proxima Centauri, un'ulteriore dimostrazione della capacità dell'autore di collegare documenti storici a strumenti moderni di pensiero e di calcolo.

Il capitolo sul *Somnium* di Keplero si apre con l'accorata dedica del libro a Filippo d'Assia-Butzbach da parte del figlio di Keplero, Ludovico; accorata perché, apparentemente, il libro portò guai al padre e sfortuna a chi tenta di pubblicarlo, il che non ha però scoraggiato Odifreddi, e quindi troviamo finalmente *Dialogo* di Plutarco e *Sogno* di Keplero uniti nello stesso libro. Capitolo densissimo di informazioni attuali, ma anche di richiami storici, in particolare a come Galileo immagina, nel *Dialogo*, di come si vedrebbe la Terra dalla Luna.

Il capitolo sull'*Osservatore Cosmico* di Huygens è il più corposo dei tre, a esso sono dedicate cento dense pagine. Anche la pubblicazione di questo libro non fu semplice, ma come dice il primo editore, l'olandese Adrian Moetjen, «Leggete oltre per divertirvi, e state bene». Un'esortazione che si attaglia benissimo anche al libro di Odifreddi. Incidentalmente, questa sembra essere anche la prima traduzione in italiano del *Cosmotheoros*, una notizia quasi nascosta nelle ultime righe di pagina 210, con la speranza che «chiunque lo capisca», come avvenne al *Dialogo* di Galileo, oggi che nessuno o quasi studia più il latino.

Come per il *Somnium*, non provo nemmeno a isolare qualche brano, se non per una mia osservazione personale, scaturita dalla citazione delle tre leggi di Cassini sul moto della Luna. Il confronto tra Cassini e Huygens ricorre varie volte nel libro di Odifreddi e, a mio avviso, è forse troppo sbilanciato a sfavore di Gian Domenico. Ma avendo io studiato a Bologna, il mio giudizio non è del tutto imparziale.

Completano l'opera quattro utilissime sezioni con indicazioni bibliografiche, indici e apparato iconografico.

In conclusione, un'opera che merita un'attenta lettura da parte non solo di chi si occupa di fisica e

astronomia o di storia della scienza. Mi auguro che essa venga raccomandata agli studenti delle scuole superiori, oggi forse troppo distratti da un incessante sviluppo tecnologico che maschera, e direi impedisce, di capire le radici profonde della nostra civiltà.

Per gli appassionati di Plutarco, segnalo che è uscito il volume *Plutarco. Tutti i Moralia*, a cura di Emanuele Lelli e Giuliano Pisani, e edito da Bompiani, 3.200 pagine che contengono la prima traduzione italiana completa, comprensiva dei frammenti (testo greco a fronte), degli oltre ottanta scritti che la tradizione ha fatto pervenire sotto il nome di *Moralia*.

CESARE BARBIERI

**Piergiorgio Odifreddi** è un matematico, logico e saggista italiano. Ha studiato matematica in Italia, Stati Uniti e Unione Sovietica e insegnato logica presso l'Università di Torino e la Cornell University. Collabora a *la Repubblica* e *Le Scienze* e nel 2011 ha vinto il premio Galileo per la divulgazione scientifica.

\*

### Elon Musk

#### Tesla, SpaceX e la sfida per un futuro fantastico

Ashlee Vance

Ulrico Hoepli Editore, 2017

Rilegato, pp. 372, € 24,90

ISBN 9788820380984

[www.hoeplieditore.it](http://www.hoeplieditore.it)

**D**EVO ammettere che, quando mi è stato proposto di recensire questo volume, la cosa non mi ha entusiasmato: temevo infatti che, trattando della vita e delle opere di un rampante imprenditore della Silicon Valley, fosse incentrato soprattutto sul *business* e l'alta finanza, argomenti che onestamente non mi appassionano troppo. E non serviva a diminuire il mio disagio nell'affrontare quest'opera la considerazione che tra le sue molte attività imprenditoriali Elon Musk possa annoverare un fiore all'occhiello come *SpaceX*, una delle *private ventures* oggi più interessanti e intraprendenti nella nuova corsa allo spazio.

Poi ho cominciato a leggere il libro e mi sono subito accorto di quanto mi sbagliassi. Chi infatti si avvicinasse a questo libro con preconcetti simili ai miei si rassicuri e lo legga senza timori, preparandosi a molte piacevoli sorprese: è infatti una gran bella biografia relativa ai primi quarantacinque anni di vita e attività di un uomo davvero eccezionale. E forse definirlo eccezionale è perfino riduttivo, perché Elon Musk è prima di tutto un incrollabile visionario, con tutto l'ottimismo e le positive aspettative per il futuro che caratterizzano le persone come lui. Musk viene immancabilmente paragonato a Thomas Edison, a Steve Jobs e a diversi altri famosi inventori e innovatori, ma anche abili imprenditori,

per rimarcare lo stretto legame esistente tra il progresso tecnico e la capacità di utilizzarlo per farne una macchina da soldi.

Uso senza problemi una frase fatta per dire che si tratta di un saggio appassionante che si legge d'un fiato, come un romanzo. E questo per indubbio merito dell'autore, il giornalista americano specializzato in tecnologia Ashlee Vance, che si è documentato in profondità intervistando tutti i principali personaggi che hanno avuto una parte nella vita – privata ma soprattutto imprenditoriale – di questo straordinario personaggio, oltre a incontrare e intervistare più volte lo stesso Musk, all'inizio recalcitrante ma poi pienamente coinvolto nell'operazione.

Dato il dovuto merito a Vance, va detto che l'altro pilastro su cui questo bel libro si regge e si fa apprezzare è la straordinarietà della vicenda umana e professionale di Elon Musk.

Il racconto della storia di quest'uomo così fuori dal comune prende le mosse dall'infanzia sudafricana (anni avventurosi e spesso travagliati), per procedere poi attraverso i trasferimenti in Canada e, infine e definitivamente, negli Stati Uniti, con gli studi e le specializzazioni universitarie, la Silicon Valley con le prime idee creative e innovative (*startup* come *Zip2*, *X.com* e soprattutto *PayPal*), con l'accumulo in pochi e intensi anni di un consistente patrimonio e la presa di coscienza di poter influire sul futuro dell'umanità con la creazione delle sue aziende più importanti: *Space Exploration Technologies* (meglio e più comunemente conosciuta come *SpaceX*), *Tesla Motors* e *SolarCity*.

Perché – e questo è il nocciolo del libro e del discorso che sto cercando di sintetizzare – l'eccezionalità della visione di Elon Musk sta non solo nella ricerca del proprio personale profitto, che trattandosi di un imprenditore evidentemente non può, e non deve, mancare, ma anche e soprattutto nella volontà di guidare la specie umana verso un futuro positivo e pieno di prospettive entusiasmanti. E non è un caso, a questo proposito, che un altro paragone spesso utilizzato per lui – tra il serio e il faceto – sia quello con l'eroe dei fumetti Marvel, Tony Stark/Iron Man.

Musk ha dato un fondamentale impulso all'utilizzo massiccio delle energie pulite, sviluppando praticamente dal nulla un'azienda come *Tesla Motors*, che promette nei prossimi anni di rivoluzionare il mercato automobilistico mondiale, avendo peraltro già iniziato a farlo attraverso la produzione di auto elettriche dalle caratteristiche assolutamente rivoluzionarie. Con *SolarCity*, inoltre, Musk sta parallelamente portando avanti un'innovativa (non potrebbe essere altrimenti!) idea di produzione e commercializzazione tutto compreso, e a basso costo, di pannelli solari per uso privato e di batterie e ausili per la ricarica delle auto prodotte da *Tesla*. Secondo la sua visione, tra non molto tempo le strade degli Stati Uniti prima, e del resto del mondo poi, saranno caratterizzate dalla presenza di enormi sta-

zioni che permetteranno, in una manciata di minuti, la ricarica gratuita dei banchi di batterie montati sulle auto da lui prodotte (e si potrà anche, ancora più velocemente e con una spesa ridotta, sostituire l'intero banco), contribuendo decisamente a un radicale cambio di indirizzo nelle abitudini e nello stile di vita dell'uomo medio, a tutto vantaggio della salute globale del pianeta.

Ma mentre cerca di salvare il mondo dai pericoli dell'inquinamento e dall'uso smodato dei combustibili fossili, Musk è impegnato in un'altra impresa, se possibile ancora più estrema e immaginifica. Il Nostro è infatti convinto (ed era ora che qualcuno si rimettesse a pensarci seriamente) che il futuro dell'umanità sia nello spazio, ben oltre l'orbita terrestre. E vuole anche essere l'uomo che rivoluzionerà il nostro modo di andare nello spazio e spianerà all'umanità la strada verso il ritorno sulla Luna e la meta per lui più ambita, la colonizzazione di Marte.

In questo senso, ciò che ha fatto, sta facendo e farà con *SpaceX* è ancora più incredibile di quanto intrapreso con *Tesla*. Basti dire che *SpaceX*, fondata appena nel 2002, ha in fase di costruzione o di sviluppo un'intera famiglia di razzi vettori (*Falcon*), via via sempre più potenti, e ha già al suo attivo importanti successi commerciali (numerosi contratti per la messa in orbita di satelliti, civili e militari), ma soprattutto alcuni primati di grande rilevanza e sostanza: a semplice titolo di esempio, la capsula *Dragon* prodotta dall'azienda è stata, nel 2012, il primo veicolo privato ad attraccare alla Stazione Spaziale Internazionale, portando un carico di rifornimenti, ed è recuperabile al rientro, rendendo possibile rispedire materiali a terra (su finanziamento governativo, è in corso di sviluppo la versione con equipaggio, che di qui a non molto contribuirà ad affrancare la *NASA* dalla dipendenza dalle *Soyuz* russe per l'invio dei propri astronauti alla *ISS*). Inoltre, i *Falcon 9* di *SpaceX* sono dotati di una tecnologia che permette al loro primo stadio di rientrare a terra (addirittura su un'apposita piattaforma galleggiante) sulle proprie "zampe" e di essere quindi riutilizzato in successive missioni. Va inoltre sottolineato che *SpaceX* costruisce in proprio e negli Stati Uniti i suoi veicoli spaziali, a costi molto inferiori e competitivi rispetto a quelli di altre ben più blasonate aziende aerospaziali.

La storia dello sviluppo delle grandi aziende di Musk viene dettagliatamente ricostruita nel libro ed è una lettura affascinante che mette in luce la determinazione di quest'uomo che, per raggiungere i propri scopi, non esita ad arruolare i più competenti specialisti di ogni settore scientifico e tecnologico in cui le sue avventure imprenditoriali e la sua visione del mondo futuro lo portano ad avventurarsi, ma anche i lati meno accattivanti della sua personalità e del suo carattere non proprio e non sempre facile, che gli ha procurato più di un nemico. Soprattutto, è una storia che non concede pause, perché Musk non si ferma di fronte a nulla per realizzare la pro-

pria visione e soprattutto non si ferma mai, andando spesso lui per primo a lavorare nelle sue aziende anche il sabato e la domenica e meravigliandosi quando scopre che i fornitori esterni (o i propri dipendenti, se necessario) non fanno altrettanto.

Il libro è stato originariamente edito negli USA nel 2015 e una edizione successiva riporta un epilogo aggiornato all'inizio del 2017, presente anche nella ben curata edizione italiana.

MARCO ORLANDI

**Ashlee Vance** ha lavorato per il sito web *The Register*, dedicato all'informazione tecnologica, e per il *New York Times*; attualmente scrive per la rivista *Bloomberg Businessweek*. Nel 2007 ha pubblicato una storia della Silicon Valley (*Geek Silicon Valley*).

\*

### Logica e magia

**Giovan Battista Della Porta e i segreti della natura**

Donato Verardi

Agorà & Co., 2017

Copertina flessibile, pp. 174, € 25,00

ISBN 9788897461944

[www.agoracommunication.com](http://www.agoracommunication.com)

**P**ENSATORE «più famoso che noto» (come ebbe a definirlo, con fortunata espressione, Giuseppe Gabrieli), Giovan Battista Della Porta è spesso ricordato per la contesa sulla paternità dell'invenzione del cannocchiale, che lo oppose a Galileo Galilei a partire dal 1609. Il 28 agosto di quell'anno, in una lettera al principe Federico Cesi, fondatore dell'Accademia dei Lincei, Della Porta rivendica la scoperta e insieme esprime i suoi dubbi sull'effettivo valore dello strumento, ascrivendolo alla categoria dei «secreti» da lui già indagati: «Del potere dell'occhiale l'ho visto et è una castroneria, et è presa dal mio libro 9 – *De refractione*» e ne descrive la meccanica e le ottiche, con tanto di schema grafico, per spiegarne il funzionamento al principe. Non c'è alcun dubbio sul suo primato: i Lincei e lo stesso Keplero glielo riconosceranno. Ma non seppe trarne le conseguenze scientifiche né poté sfruttarne le potenzialità: il suo progetto di condurre studi sulla costruzione di specchi parabolici e di lenti che avrebbero dovuto migliorare le prestazioni del cannocchiale, fino ad ottenere «una nuova forma di telescopio [...] il qual farà centuplicato effetto più del solito», fu interrotto dalla morte, avvenuta nel 1615.

L'aneddoto è significativo per comprendere la molteplicità di interessi del «mago» e scienziato napoletano, Linceo della prima ora insieme a Galileo, studioso di ottica, fisiognomica e magia naturale, alchimia, medicina e astrologia, scrittore di teatro e di agronomia. Le implicazioni filosofiche del suo pensiero sono indagate in modo sistematico da Verardi in questo libro che colloca il lavoro di Della Porta nell'ambito del dibattito culturale contemporaneo.

raneo sui rapporti tra logica e magia e sul ruolo del mago naturale nello svelare gli «occulti segreti della natura».

L'autore, che ha dedicato numerosi studi all'opera del pensatore campano, ci offre un confronto puntuale di fonti, sia manoscritte sia a stampa, ricostruendo così un ampio e dettagliato quadro della sua proposta filosofica e dell'ambiente culturale partenopeo nel quale ha operato.

Ciò che colpisce il lettore, anche non specialista, è la costante preoccupazione di Della Porta di ri-scattare la magia naturale da suggestioni ermetiche o demonologiche. La fondamentale razionalità del suo approccio potrà rappresentare una sorpresa per molti e la capacità di Verardi di evidenziare tale aspetto dell'opera dell'aportiana è, a mio parere, uno dei pregi del volume.

L'idea di fondo è che i fenomeni della natura, anche quelli apparentemente più arcani e misteriosi, possano essere descritti senza ricorrere alle spiegazioni dei demonologi, grazie a un sistema metafisico fondato sull'influenza astrologica dei cieli, a sua volta basato sulla logica matematica, come già suggeriva Tolomeo. Richiamandosi a quanto proposto da Francesco Storella, filosofo presso lo Studio napoletano in quegli anni e pensatore in sintonia con Della Porta, Verardi chiarisce come il sapere astronomico e astrologico assuma un ruolo di collegamento tra la logica aristotelica e la magia naturale, nel contesto culturale partenopeo tra il Cinquecento e il Seicento: nella misura in cui la logica matematica giustifica l'astrologia, essa diventa uno strumento da contrapporre agli inganni dei demoni. Infatti, spiega Verardi, «da logica permette all'uomo di scienza di riappropriarsi, tramite la magia naturale, della conoscenza dell'*admirandum*, in altri termini del segreto della natura», avvertendo il lettore moderno che «se oggi, quantomeno nell'uso comune, termini come segreto e occulto sembrano designare tutto ciò che compete l'occultismo, l'esoterismo, l'irrazionale, in un pensatore come Della Porta sono l'espressione stessa del suo razionalismo.»

La figura del mago naturale proposta da Della Porta, infatti, ha poco a che vedere, nella sostanza, con il ruolo quasi religioso ad esso affidato da Agripa di Nettesheim o con le suggestioni neo-platoniche ed ermetiche di Marsilio Ficino, al di là delle inevitabili citazioni prevedibili nel contesto storico e culturale del tempo. Con l'enfasi posta dal Della Porta sul ruolo dell'esperienza e sull'abilità tecnica, sulle conoscenze mediche, botaniche, chimico-alchemiche, ottiche, matematiche e astronomiche, la figura del mago dell'aportiano emerge piuttosto con le tipiche connotazioni – e le inevitabili ambiguità – dello scienziato rinascimentale, dell'uomo dal sapere laico, esperto nell'*arte*, concetto che include e valorizza l'aspetto tecnico, pratico e applicativo del sapere.

Verardi dedica poi una notevole parte del volume all'indagine del ruolo della scienza degli astri nella

visione del mondo di Della Porta. Identificando fonti e influenze (da Giovanni Pontano allo pseudo-Alberto del *De mirabilibus mundi*, a Giovanni Abioso da Bagnolo e la tradizione ottica), l'autore nuovamente enfatizza come l'astrologia di Della Porta, fondata sullo studio della *perspectiva* e strutturata su solide basi geometrico-matematiche, sia lontana da qualunque forma di magia demonica, compresa quella ficiiana. La luce e il colore, i cui concetti Della Porta approfondisce nel nono libro del suo *De refractione*, nonché nei successivi *Coelestis physiognomia* e *De aeris transmutationibus*, sono «una dote del cielo che, per il tramite della vista, permette al mago naturale (che è un ottico) la conoscenza delle proprietà occulte della natura». Ciò che in natura appare occulto e difficilmente spiegabile, in realtà, è sempre riconducibile a cause naturali, “prossime” e “necessarissime”: le stelle. Spiega Verardi: «Secondo Della Porta, la legittimazione fisica e razionale del segreto della natura è garantita dall'essere sempre riconducibile al regolare moto degli astri, che predispone gli aspetti celesti i quali, a loro volta, “danno” le virtù occulte alle cose. Gli aspetti del cielo regolano tutto ciò che è rinvenibile nel mondo naturale, vale a dire, tutti i segreti. A garantire un mondo così ordinato e connesso vi è la simpatia e antipatia tra le cose, la “legge prima” della natura dell'aportiana.»

È in questo quadro che meglio si comprende il senso degli interventi del filosofo campano riguardo al problema, allora assai dibattuto, dell'origine e causa dei fenomeni magnetici. Coerentemente con questa impostazione, infatti, la spiegazione dell'attrazione tra pietra calamita e ferro viene affidata agli astri, grazie al concetto di simpatia che attrae i simili. Ma, mentre nella *Magia naturalis* del 1558, il giovane Della Porta, probabilmente influenzato da Ficino, riconduce il fenomeno magnetico all'influsso della stella Cinosura, cioè la Polare, trent'anni dopo, in *Phytognomonica*, egli ricollegherà l'effetto attrattivo del magnete a Marte, sulla base dell'antica e ancora diffusamente riconosciuta analogia tra il pianeta color ruggine e il ferro. Una spiegazione astrologica del fenomeno che verrà poi negata in modo deciso solo nel 1600, dal *De magnetе* di William Gilbert.

Il volume di Verardi è quindi uno studio puntuale e molto approfondito dell'opera del filosofo campano, che non mancherà di coinvolgere i lettori interessati alla storia e all'evoluzione del pensiero scientifico nella prima età moderna.

Nel capitolo dedicato alle stelle dell'Orsa e al ruolo loro attribuito nella genesi del magnetismo, non sfuggirà al lettore l'equivoco in cui l'autore, seguendo in questo l'ambiguo testo dell'aportiano, incorre nel momento in cui pone la stella polare in relazione all'Orsa Maggiore. Un equivoco, tuttavia, ampiamente chiarito dagli approfondimenti e dagli studi dettagliati che Verardi ha nel frattempo prodotto. Uno dei quali, comparso sul numero 4, 2017 del *Giornale di astronomia* col titolo *Dalle costellazioni dell'Orsa al pianeta Marte. Giovan Battista Della Porta e i magneti*.

*ta e l'attrazione magnetica prima di Gilbert*, approfondisce non solo la posizione di Della Porta sulla questione, ma anche la probabile origine dell'errore nell'ambigua trattazione dell'argomento da parte di Marsilio Ficino, alla cui opinione il giovane Della Porta inizialmente si ispira, per abbandonarla poi nelle opere mature. Il filosofo di Figline, puntualizza infatti Verardi, riconduce l'origine del magnetismo alle stelle dell'Orsa e, più propriamente, alla stella Cinosura ( $\alpha$  UMi). Tuttavia, in un diverso passo del *De Vita*, collega la pietra calamita alla stella Alkaid/Benetnasch ( $\gamma$  UMa), coinvolgendo in qualche modo entrambe le costellazioni.

Si tratta, quindi, di un'opera in divenire, suscettibile di ulteriori acquisizioni e aperta al contributo di future indagini. L'autore, del resto, non fa mistero del suo approccio: primo volume della collana *Dellaportiana*, *Logica e magia* è una sorta di “cantiere aperto”, un primo, importante passo verso la risco-

perta della vasta e parzialmente incompresa produzione intellettuale di Della Porta.

PATRIZIA NAVA

**Donato Verardi**, dottore di ricerca in Storia (Parigi) e in Filosofia (Pisa-Firenze), vive attualmente in Francia ed è tra i più accreditati studiosi dell'opera di Giovan Battista Della Porta. Specialista in storia del pensiero tardo medievale e rinascimentale, la sua riflessione critica è indirizzata soprattutto verso problematiche inerenti l'astronomia, l'astrologia, l'ottica e la meteorologia. Relatore su questi temi a numerosi convegni internazionali, è autore di svariati articoli apparsi su riviste di prestigio internazionale. Ha inoltre diretto il numero speciale *Medieval and renaissance astrology* per la rivista *Philosophical readings*. È coordinatore e membro del comitato scientifico e direttivo della collana *Dellaportiana. Studi e testi di filosofia naturale* (Agorà & Co.), nonché membro del comitato scientifico di *Astra inclinant. Bollettino di Storia dell'astrologia*.



# Società Astronomica Italiana

## LXII Congresso Nazionale · 2018

*L'astronomia 'multi-messenger':  
didattica, ricerca, cultura e sviluppo del Territorio*

**Teramo 2-5 maggio 2018**

*Università degli Studi di Teramo*

**I**L Congresso è strutturato in tre sezioni: scientifica, didattica e storica.

La parte scientifica sarà centrata sull'astronomia *multi-messenger*. Il continuo sviluppo di nuove tecnologie per la strumentazione da terra e dallo spazio ha consentito di estendere le osservazioni astronomiche a tutte le bande dello spettro elettromagnetico, dal radio alle alte energie. Le *performances* oggi raggiunte in termini di risoluzione angolare e spettrale, non solo nell'ottico, stanno portando ad una continua estensione delle frontiere dell'astrofisica moderna. Con la recente rivelazione delle onde gravitazionali prodotte dalla coalescenza di oggetti compatti si è diffusa nella comunità scientifica la convinzione che il futuro in questo campo sia già cominciato.

Uno spazio specifico sarà dedicato alle problematiche dell'insegnamento dell'astronomia nella scuola secondaria. Alla luce delle esperienze didattiche realizzate presso l'INAF e le Università italiane e di quelle promosse dalla SAIt, quali l'alternanza scuola-lavoro, le Olimpiadi e gli Stage formativi, ci si propone di discutere sull'insegnamento dell'astronomia come strumento per l'apprendimento delle discipline scientifiche. Verrà esaminata la progettazione di percorsi formativi disciplinari e pluridisciplinari da inserire all'interno dei Piani dell'Offerta Formativa.

Svolgendosi infine nella ricorrenza dei 200 anni dalla nascita di padre Angelo Secchi SJ, il Congresso SAIt 2018 dedicherà uno spazio adeguato alla storia di questo illustre italiano, scienziato e gesuita.

### **Comitato scientifico**

O. Straniero, A. Antonelli, P. Blasi, V. Fafone, A. Possenti, R. Ragazzoni, L. Stella, F. Vissani.

### **Sessione Didattica**

E. Di Carlo, A. Cittadini Bellini, V. Cozzi, G. De Gasperis, C. Del Pinto, G. De Nardis, S. Di Bonaventura, E. Di Luigi, L. Di Luigi, A. Di Ottavio, M. Esposito, S. Mazzarelli, A. Misiano, G. Valentini.

### **Sessione Storica**

R. Buonanno, A. Altamore.

### **Comitato Organizzatore Locale**

E. Di Carlo, M. Cantiello, S. Ciprietti, F. De Luise, G. Di Rico, F. Mazzucconi, L. Mazzucconi, L. Pacinelli, A. Pietrinferni, M. Quintini, G. Valentini.

**Il programma del Congresso e le istruzioni per l'iscrizione saranno disponibili sul sito web  
[sait2018.oa-abruzzo.inaf.it](http://sait2018.oa-abruzzo.inaf.it)**



## SOCIETÀ ASTRONOMICA ITALIANA

*Largo E. Fermi 5, 50125 Firenze*

**PRESIDENZA: INAF-Osservatorio Astronomico di Brera, via Brera 28, 20121 Milano**

**Presidente**

Ai Coordinatori di dottorato in Fisica e in Astrofisica

Con preghiera di diffusione presso i docenti  
universitari e i ricercatori dell'INAF interessati

### **Premio Pietro Tacchini XIII edizione - 2018**

A partire dal 2005, centenario della scomparsa di Pietro Tacchini, la **Società Astronomica Italiana (SAIt)** ha istituito un premio dedicato a questo astronomo che, negli anni nei quali si realizzava l'Unità d'Italia, fu tra i fondatori della SAIt, come Società degli Spettroscopisti Italiani. Il premio è riservato a tesi di dottorato di ricerca di carattere astrofisico.

Grazie alla generosità del prof. Giancarlo Setti, vincitore del Premio “Sidereus Nuncius”, bandito congiuntamente dalla SAIt e dall'INAF, che ha devoluto il Premio al fine di riconoscimenti per le attività di giovani astronomi, per l'edizione 2017 sono disponibili due premi di 3000 euro ciascuno, rispettivamente per l'area scientifica generale (astrofisica teorica, osservativa, interpretativa) e per l'area tecnologica, da assegnare alle migliori tesi del XXX ciclo di dottorato.

Se il premio in una delle due aree non venisse assegnato, la giuria potrà disporre di assegnarne due nell'altra.

I vincitori avranno inoltre la possibilità di pubblicare un estratto della loro tesi sulla Rivista della SAIt “Il Giornale di Astronomia”. I premi saranno consegnati durante il Congresso annuale della Società, che si svolgerà a Teramo il 2-5 Maggio 2018. Per i vincitori è previsto il rimborso delle spese di viaggio e della quota di iscrizione al Congresso stesso.

I vincitori saranno selezionati tra i candidati designati dai rispettivi supervisori o da un membro del Collegio dei Docenti.

**SOCIETÀ ASTRONOMICA ITALIANA, Largo E. Fermi 5, 50125 Firenze,**

**SEGRETERIA : Tel. 055-2752270 Tel: 081 5575533 e\_mail: [segreteria@sait.it](mailto:segreteria@sait.it)**

**PRESIDENZA: Tel. 02.72320327, Fax 02.72001600, e\_mail: [ginevra.trinchieri@brera.inaf.it](mailto:ginevra.trinchieri@brera.inaf.it)**

**Pec: [societa.astronomica.it@legalmail.it](mailto:societa.astronomica.it@legalmail.it) – Sito web: [www.sait.it](http://www.sait.it)**



## SOCIETÀ ASTRONOMICA ITALIANA

*Largo E. Fermi 5, 50125 Firenze*

**PRESIDENZA: INAF-Osservatorio Astronomico di Brera, via Brera 28, 20121 Milano**

**Presidente**

Le designazioni dovranno riportare

area (generale o tecnologica) per la quale viene posta la candidatura;

nome e la qualifica del presentatore;

nome, cognome e indirizzo email del candidato;

Istituto o Dipartimento presso il quale è stata svolta la tesi di Dottorato;

titolo ed un breve riassunto della tesi;

data di approvazione del competente Collegio;

indirizzo web, anche riservato, sul quale la tesi possa essere consultata in esteso dalla Commissione giudicatrice, garantendone comunque la riservatezza.

Alla designazione dovrà essere allegato un breve curriculum del candidato con elenco delle pubblicazioni. Alla designazione dovrà essere allegata altresì una relazione a cura del presentatore nella quale venga presentata la figura scientifica del candidato e i risultati conseguiti dalla tesi.

La designazione e la relativa documentazione deve essere fatta pervenire via email alla Segreteria SAIt, all'indirizzo SAIt@sait.it con oggetto “Candidatura Premio Tacchini” entro il 20 febbraio 2018.

Milano, 16 gennaio 2018

Ginevra Trinchieri

Presidente

**SOCIETÀ ASTRONOMICA ITALIANA, *Largo E. Fermi 5, 50125 Firenze,***

**SEGRETERIA : Tel. 055-2752270 Tel: 081 5575533 e\_mail: [segreteria@sait.it](mailto:segreteria@sait.it)**

**PRESIDENZA: Tel. 02.72320327, Fax 02.72001600, e\_mail: [ginevra.trinchieri@brera.inaf.it](mailto:ginevra.trinchieri@brera.inaf.it)**

**Pec: [societa.astronomica.it@legalmail.it](mailto:societa.astronomica.it@legalmail.it) – Sito web: [www.sait.it](http://www.sait.it)**

*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®



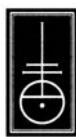
Istituti editoriali  
e poligrafici  
internazionali®



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**