

GIORNALE

DI

ASTRONOMIA

Rivista di informazione, cultura e didattica
della Società Astronomica Italiana

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

Direttore responsabile: Fabrizio Bònoli

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

www.bo.astro.it/sait/giornale.html

Per informazioni rivolgersi alla Segreteria della
Società Astronomica Italiana
Largo E. Fermi 5, I 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
inviati direttamente al Direttore:

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

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

Publicazione trimestrale
Vol. 44^o · N. 4 · Dicembre 2018



Fabrizio Serra editore
Pisa · Roma

Sommario

Astronomia e società

- 2 Scienza, temperamento, razza
G. L. Andriani (1901-1964)

Astronomia oggi

- 5 Sistemi tripli di buchi neri nell'era dell'astronomia gravita-
zionale
M. BONETTI (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2018)
- 13 La scienza dei pianeti extra-solari nell'era degli Extremely
Large Telescopes: strumenti di simulazione scientifica e
tecnologica per spettroscopia ad alta risoluzione. I casi di
ESPRESSO e ELT-HIRES
M. GENONI (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2018)
- 21 Rosetta: la prima osservazione dell'interno ghiacciato di un
nucleo cometario
M. PAJOLA (PREMIO 'GIUSEPPE LORENZONI' 2018)

Didattica

- 24 L'ASTRONOMIA MULTI-MESSENGER: DIDATTICA, RICERCA,
CULTURA E SVILUPPO DEL TERRITORIO
SEZIONE DIDATTICA DEL LXII CONGRESSO NAZIONALE
DELLA SAIT-TERAMO 2018
(a cura di C. del Pinto, A. Cittadini Bellini)
- 24 Occasioni per la didattica della filosofia: *Indicazioni naziona-
li*, epistemologia e astronomia
F. GALLO
- 37 Rappresentazione di una stella: considerazioni geometriche,
simboliche e didattiche
C. DEL PINTO

Cent'anni fa

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

Cieli d'inchostro (a cura di A. Mandrino, M. Gargano, A. Ga- sperini)

- 44 Gasparo Squarciafico: un amico genovese di Gio. Domenico
Cassini?
R. BALESTRIERI

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

- 47 Lo strano caso dell'ardente Mercurio
C. ELIDORO

In ricordo di

- 50 Giorgio G.C. Palumbo
M. DEL SANTO
- 53 Marina Muzi
G. BONINI, N. CONTE, A. CASSINI

Biblioteca (a cura di A. CAPPI)

- 56 M. CAPACCIOLI, *MilleNotte. Storie dell'altro mondo* (recens. di
A. Cappi)
- 56 B. D'AMORE, S. SBARAGLI, *La matematica e la sua storia. Dalle
origini al miracolo greco* (recens. di A. Cappi)
- 57 A. JONES, *A Portable Cosmos. Revealing the Antikythera Mech-
anism, Scientific Wonder of the Ancient World* (recens. di A.
Cappi)
- 59 G. LAWTON, J. DANIEL, *L'origine di (quasi) tutto. Per fare una
torta, devi prima inventare l'Universo* (recens. di S. Bardelli)
- 59 L. PERRI, A. ADAMO, *La pazzia scienza. Risultati serissimi da
ricerche stravaganti* (recens. di F. Fusi Pecci)

61 Indici del volume 44 · 2018

61 Indice degli autori

In copertina:

Vogliamo ricordare gli ottant'anni della promulgazione delle leggi
razziali con la trascrizione di questo articolo di Giovanni Andriani
del dicembre 1938, accesamente rivolto contro gli scienziati, in par-
ticolare gli astronomi, di "razze" diverse. [Si veda all'interno nella
rubrica 'Astronomia e società']

Scienza, temperamento, razza*

Giovanni Latino Andrissi (1901-1964)

«La Tribuna» · 16 dicembre 1938

NELL'OTTANTESIMO anniversario dell'emanazione delle leggi razziali pubblichiamo, volutamente senza alcun commento, l'articolo che segue, ritrovato di recente durante il riordino dell'Archivio storico dell'Osservatorio astronomico di Brera.

La stupidaggine (eufemismo) di chi scrive, proponendo una visione così assurdamente manipolata dell'astronomia, è evidente ai nostri occhi di lettori di ottant'anni dopo. Ma certamente articoli di tal fatta dovettero sembrare normali, e forse anche "giusti", per molte persone dell'epoca. Noi vogliamo invece pensare, e invitare a riflettere, sull'impatto che questi scritti ebbero su altri individui, su uomini e donne che vivevano l'angoscia di essere diventati improvvisamente "diversi", perseguitati nei loro diritti (il lavoro, il salario, la sicurezza, la dignità), cacciati da ogni civile convivenza, in una società che non perdeva occasione, in tutti gli ambiti – e lo vediamo qui per l'astronomia – per formulare deliranti fondamenti dogmatici alla teoria razziale. Anche molti scritti come questo, che abbondano nei giornali dell'epoca, fomentarono una campagna di odio che aprì la strada, tra l'indifferenza dei più, alla persecuzione delle vite, allo sterminio nei lager. Fortunatamente non ci furono conclusioni tragiche per gli astronomi italiani che, comunque, dalle leggi razziali ebbero molto a soffrire, come abbiamo ricordato nel convegno "Sotto lo stesso cielo? Le leggi razziali e gli astronomi in Italia", tenutosi a Bologna il 26 gennaio 2015 e i cui atti, a cura di F. Bònoli e A. Mandrino, sono stati pubblicati nel «Giornale di Astronomia», 2015, n. 2.

È veramente difficile stabilire quanta parte abbiano nella vita i preconcetti ed i luoghi comuni che, il più delle volte, riflettono supina accettazione od ignoranza.

Molti si sono chiesti, anche in buona fede, che relazione vi possa essere tra scienza e razza, ritenendo la scienza, secondo un vecchio luogo comune, un'entità astratta. Abbiamo altre volte già mostrato su queste colonne come l'uomo in nessuna delle sue manifestazioni intellettuali possa essere interamente ed esclusivamente oggettivo, e ciò anche per quanto riguarda le manifestazioni scientifiche; e che, in questo campo, solo ad uno studioso superficiale può sfuggire lo stretto legame che unisce l'autore

alla sua opera. Intendiamoci: evidentemente non sono da ricercarsi in un teorema isolato, la personalità, il temperamento e la razza dell'autore, sebbene anche il modo stesso d'impostare e di condurre una dimostrazione sia significativo nei riguardi, se non dell'individuo, della scuola a cui l'individuo appartiene. Ma la questione va esaminata in campo più generale e più complesso, considerando la scienza nel suo insieme e gli indirizzi che a tale scienza vengono impressi dalle varie scuole di carattere prettamente razziale.

Certamente oggi è difficile per noi, stabilire con precisione e chiarezza quali siano i caratteri nazionali e razziali peculiari nello sviluppo delle scienze, e stabilire quindi l'apporto, positivo o negativo, delle varie razze, data la passata internazionalità, comunanza e mescolanza intellettuale dei fattori razziali, e l'affermarsi, nelle varie nazioni, di una sola corrente a discapito di altre di minore importanza; e ciò non soltanto per il valore intrinseco scientifico, ma molto spesso per il prevalere di altri elementi non prettamente scientifici.

Un convincente ed eloquentissimo esempio della stretta relazione tra le caratteristiche razziali e lo sviluppo scientifico, possiamo trarlo dalla storia della scienza che, a torto divisa e separata dalla storia politica, è anch'essa da considerarsi elemento fondamentale nella formazione del pensiero scientifico, come l'altra del pensiero politico. Se noi ci portiamo ad esaminare i caratteri dell'astronomia greca ed i caratteri dell'astronomia babilonese, nella quale confluiscono elementi semitici ed indo-europei, troviamo una netta differenziazione nel loro sviluppo e nelle loro finalità, pur essendo uguale ed identico l'oggetto dello studio.

Mentre i babilonesi si fermarono alla registrazione metodica ed accurata dei fenomeni, e quindi all'aritmetico impiego dei dati per trarne empiriche regole, i greci poco curarono le osservazioni¹ speculando invece sulla natura e sull'essenza degli oggetti celesti, tentando di giungere alla sintesi dei loro moti, attraverso la formulazione dei sistemi del mondo.

Chiunque può facilmente riconoscere nell'astronomia greca le stesse caratteristiche che si ritrovano nel pensiero filosofico e nelle altre manifestazioni intellettuali; e questa unità che sostanzialmente si mantiene anche attraverso le apparenti discordanze delle varie scuole, caratterizza razzialmente il pensiero greco.

¹ NdR: questa affermazione di Andrissi è completamente erronea. Senza ripercorrere la storia dell'astronomia greca ed ellenistica, per mostrarne la falsità può essere sufficiente ricordare solo alcuni dei nomi più noti dell'epoca, eccellenti osservatori, misuratori e costruttori di strumenti: Aristarco, Eratostene, Archimede, Ipparco, Tolomeo ecc.

* In «La Tribuna» del 16 dicembre 1938; conservato in Archivio storico dell'Osservatorio astronomico di Brera, Fondo Emilio Bianchi, cart. 799, fasc. 1. Si ringrazia Agnese Mandrino di INAF-Osservatorio Astronomico di Brera per avercelo segnalato e trascritto e per la sintetica introduzione.

Così, in seguito, nell'astronomia araba si può facilmente discernere, nel suo sviluppo, l'elemento indiano ed ellenico d'importazione da quello che è l'elemento proprio religioso dell'arabo, inserito nei sistemi astronomici nei riguardi delle concezioni dei motori del mondo.

Già con gli arabi le tendenze intellettuali razziali vengono a confondersi nella Spagna, ed apparentemente è difficile, in seguito, seguire le correnti razziali che rimangono sotterranee, e stabilire la loro influenza sulla società medioevale. Ma, anche in questo periodo, possiamo stabilire che, mentre nelle discussioni tra tolemaici e peripatetici, si manifesta un carattere internazionale nella scuola di Parigi,² e quindi senza caratteri etnici definiti, invece in Italia si conserva un carattere completamente diverso e nazionale. Infatti, mentre a Parigi le discussioni si sono filosoficamente composte accettando il sistema tolemaico, l'italiano pratico e pieno di buon senso, e quindi poco propenso ad accettare dimostrazioni interamente filosofiche senza prove e sostegno, lascia insolita la questione.³

Copernico poi, spirito nordico costruttivo, dalla insoddisfazione degli astronomi italiani riceverà la spinta che lo porterà a rinnegare Tolomeo. E possiamo affermare che, se Copernico avesse compiuto i suoi studi alla Sorbona, ad altri sarebbe toccato l'onore di affermare il vero sistema del mondo.

Potremmo ancora continuare a ricordare i caratteri razziali nello sviluppo dell'astronomia, ma quello che più ci importa ora è di mostrare come le scienze nel loro indirizzo e sviluppo risentano, come ogni altra manifestazione intellettuale, delle caratteristiche peculiari di una razza, e ciò anche oggi, nonostante che le razze sembrino, superficialmente, fuse e dimentiche di se stesse in un pensiero internazionale, che in fondo non è che il trionfo internazionale di una data corrente. Un esempio può bastare per tutti: la fisica che trae le sue origini da Einstein e che domina presentemente porta con sé le stigmate giudaiche che nettamente la caratterizzano, come del resto genialmente Papini⁴ molti anni or sono aveva chiaramente indicato. Einstein porta nella sua costruzione non già la brillante genialità dei latini che, spesso, in se stessa si esaurisce; ma la più spiccata e chiara applicazione della mentalità giudea della capitalizzazione, che la fisica moderna ha trasportato ormai con le teorie statistiche dal campo assicurativo nello studio della natura, intacando perfino le sue basi divine.

In modo ancor più semplice possiamo mostrare ancora quanto la razza, con le sue caratteristiche, possa influire sulla scienza. Ognuno di noi si sente incline verso un particolare ramo del sapere, in relazione al suo temperamento, che è la manifestazione esteriore della sua razza, e ciò anche scegliendo di una data scienza un particolare ramo.

² NdR: si riferisce alla scuola della Sorbona del XIII-XIV secolo, con Buridano, Oresme, Francesco della Marca *et al.*

³ NdR: Andrissi sembra dimenticare completamente la Scolastica e personaggi come, p.e., Tomaso d'Aquino e Alberto Magno.

⁴ NdR: Giovanni Papini (1881-1956), direttore, fra l'altro, de «Il Leonardo», «La voce», «Lacerba», «La Rinascita», fu nel '38 tra i firmatari del *Manifesto della razza*.

Evidentemente molto spesso falsano questa scelta personale elementi di tutt'altra natura, quali possono essere quelli utilitari e di carriera che portano spesso i giovani a seguire correnti estranee al loro temperamento, per ottenere più facili allori od interessanti appoggi, condannandosi però, in tal caso, ad un pedissequo servilismo.

Volendo esemplificare, possiamo rilevare come nell'astronomia si possono avere astronomi eminentemente osservatori, oppure calcolatori, teorici, fisici o matematici; e, se noi potessimo scendere in una ancora più dettagliata esemplificazione, potremmo mostrare come il predominio di un ramo dell'astronomia o di un altro sia in stretto rapporto con l'importanza di uno scienziato geniale o maestro di una determinata razza, che crea in tal modo una corrente attuale nella quale si incanalano i comuni studiosi di tutte le altre razze. Ciò si è avuto, come abbiamo detto, per la fisica, mentre non l'abbiamo ora per l'astronomia, mancando oggi una forte personalità accentratrice; e in questo campo, grazie a Dio, i giudei fin dall'inizio della loro civiltà furono negati alla gloria.⁵

Quindi torniamo a ripetere che, impostando il problema della razza, non bisogna limitarlo al campo somatico e letterario come ancora continuano a credere i letterati ed i medici compilatori quasi esclusivi della rivista «La Razza», ma bisogna estenderlo in profondità anche nel campo scientifico attraverso una profonda revisione dei libri scientifici e degli insegnamenti, che, anche se non impartiti direttamente da giudei riconosciuti dallo Stato civile, possono continuare ad essere impartiti dai loro negri⁶ che sono ancora rimasti indisturbati, fedeli e ligi ai loro maestri che fortunatamente se ne sono andati...

Così bisogna sorvegliare che le opere scritte da questi negri, e controfirmate da giudei, non tornino in circolazione con il solo nome del negro sulla copertina e con il contenuto immutato. È inoltre, da raccomandarsi a coloro che sono incaricati della bonifica libraria, da noi invocata già molti anni or sono su queste stesse colonne, di prestare un'attenzione molto severa alle traduzioni scientifiche e particolarmente a quelle di volgarizzazione che più di ogni altra manifestano più o meno apertamente la mentalità e la razza del compilatore e, perché meno sospette, sono spesso le più insidiose e dannose. Appare così necessario che nella Commissione della Bonifica libraria siano inclusi scienziati specializzati e non sospetti, ed ancora una volta appare la necessità che il Ministero della Cultura Popolare si attrezzi anche in questo campo allargando la sua concezione della Cultura, includendovi anche le manifestazioni scientifiche.

Se non si seguiranno con inflessibile severità e sagace intelligenza queste bonifiche dell'insegnamento e librerie, l'aver allontanato i giudei, sarà stato come estirpare da un campo la gramigna senza poi procedere alla necessaria aratura e coltivazione intensiva.

⁵ NdR: anche qui Andrissi dimentica completamente l'apporto degli astronomi ebrei all'epoca d'oro della cultura arabo-islamica in Spagna (e non solo), dall'VIII al XII secolo, chiarissimo esempio di "contaminazione" culturale.

⁶ In corsivo nell'originale.

Ma il fascismo è ormai maestro al mondo nelle opere di bonifiche integrali e saprà quindi andare in profondità anche in questo campo, restituendo alla Nazione la sua integrità intellettuale e spirituale.

GIOVANNI L. ANDRISSI

A completamento dell'articolo di Andrissi, riportiamo qui una sua breve nota biografica, parzialmente tratta da G. FODERÀ SERIO, D. RANDAZZO, *Astronomi italiani dall'Unità d'Italia ai giorni nostri: un primo elenco*, SAIt ed., 1997.⁷

⁷ Anche online in: www.astropa.inaf.it/archivio-storico/astronomi/.

Giovanni Latino Andrissi (Brescia 1901-Milano 1964).

Laureato in Matematica all'Università di Roma nel 1924, nello stesso anno entrò come assistente volontario all'Osservatorio di Milano e fu poi nominato per il biennio 1924-26 assistente alla cattedra di Astronomia dell'Università. Dal luglio al dicembre 1926 prestò servizio a Carloforte. Nel 1927 fu assistente all'Osservatorio Astronomico di Roma, ove rimase sino al 1940. Nel 1928 era divenuto direttore del Planetario di Roma. Dopo il periodo bellico, nel 1948 passò all'Osservatorio di Milano con la qualifica di aiuto.

All'inizio della carriera, a Milano, gli fu affidato il servizio del tempo e della meteorologia, e fu addestrato alle osservazioni di pianetini e comete, dedicandosi poi soprattutto alla storia dell'astronomia e alla divulgazione, con conferenze e articoli su quotidiani.

Sistemi tripli di buchi neri nell'era dell'astronomia gravitazionale*

Matteo Bonetti

Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia · Università degli Studi dell'Insubria

Le onde gravitazionali rappresentano gli invisibili messaggeri di un universo estremo e in continua evoluzione. La loro recente scoperta da parte della collaborazione scientifica LIGO/Virgo (www.ligo.caltech.edu; www.virgo-gw.eu) segna l'apertura di una finestra completamente nuova sul nostro universo e rappresenta un passo fondamentale verso una più profonda comprensione delle leggi della natura.

La rilevazione diretta delle onde gravitazionali rappresenta l'ultima conferma sperimentale della teoria della relatività generale, a oggi considerata la teoria più completa per la descrizione dei fenomeni legati alla gravitazione e che a distanza di più di un secolo dalla sua formulazione continua a incassare successi.

La teoria introduce un radicale cambio di paradigma rispetto alla meccanica newtoniana (la teoria dominante fino agli inizi del secolo scorso), in cui si afferma che il moto di oggetti dotati di massa (più precisamente di massa-energia) non è dovuto all'esistenza di una forza gravitazionale istantanea, bensì è da imputare alla curvatura dello spazio-tempo, la quale è a sua volta plasmata dalla medesima distribuzione di massa (si veda FIG. 1 e *L'evoluzione della fisica* di Einstein e Infeld, per una trattazione chiara ed esaustiva). Questo profondo legame può essere matematicamente descritto tramite le equazioni di campo della relatività generale, note anche come equazioni di Einstein. Anche se in apparenza semplici, in realtà esse nascondono una grandissima complessità, a causa della quale, a oggi, solo in pochissimi casi ne è stato possibile ottenere soluzioni esatte e in particolare solo per casi che presentano un alto grado di simmetria (p.e., simmetria sferica e assiale). Di conseguenza, la maggior parte dei problemi riguardanti la dinamica di oggetti relativistici si è affidata, e tuttora si affida, ai metodi perturbativi e negli ultimi anni, grazie allo sviluppo dei calcolatori, anche a metodi numerici.

Fu proprio grazie ai metodi perturbativi che lo stesso Einstein, linearizzando le equazioni di campo, riuscì a trovare soluzioni di tipo ondulatorio che, a tutti gli effetti, rappresentavano perturbazio-

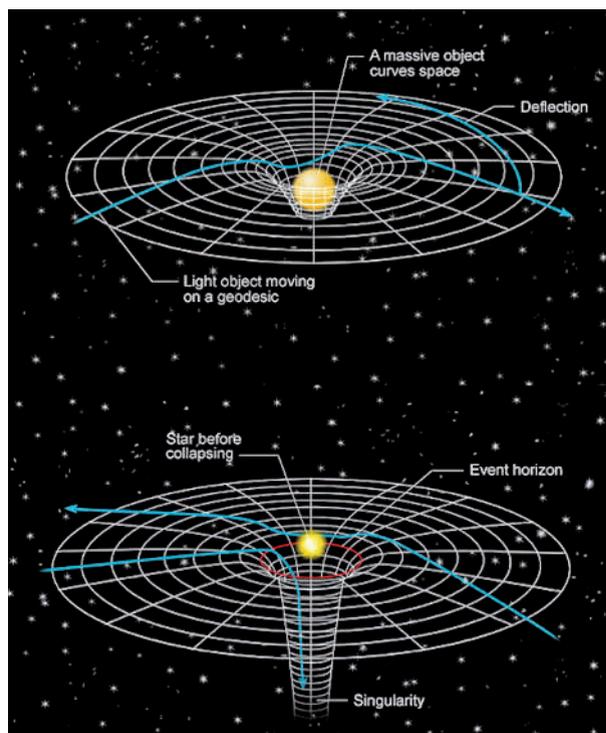


FIG. 1.

ni dello spazio-tempo (e quindi di curvatura), prodotte da masse accelerate (aventi un momento di quadrupolo variabile nel tempo), che si propagano alla velocità della luce e in grado di trasportare energia. Nonostante il carattere rivoluzionario della predizione, ben presto si realizzò che l'estrema piccolezza degli effetti generati dal passaggio di un'onda gravitazionale avrebbe rappresentato un insormontabile ostacolo tecnologico ma anche una grande sfida per l'astrofisica teorica. Si comprese infatti che, al fine della rivelazione della onde gravitazionali, era necessaria l'esistenza di oggetti estremamente massivi ma soprattutto compatti, in grado di orbitare a separazioni molto piccole e quindi di raggiungere velocità altissime, prossime a quella della luce.

Oggetti di questo tipo fortunatamente esistono e rappresentano un'altra straordinaria predizione della relatività generale. La teoria, infatti, prevede l'esistenza di oggetti così compatti in grado di generare una gravità estrema nelle loro vicinanze, tale per cui le regioni circostanti risultano interdette dallo spazio-tempo esterno e, di fatto, risultano avvolte da un orizzonte degli eventi. In queste re-

* 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 2018 - XIII edizione, consegnato durante il LXII Congresso Nazionale della Società, tenutosi a Teramo nel maggio dello stesso anno.

gioni, la velocità di fuga dal corpo centrale supera quella della luce, rendendo in pratica impossibile la fuga a qualsiasi cosa, persino alla luce. Date le sue caratteristiche, un oggetto di questo tipo è noto come buco nero, proprio perché nulla può sfuggirgli (FIG. 1).

Di conseguenza, se i buchi neri esistono e se due di essi sono sufficientemente vicini da formare un sistema binario, data la loro massa e la loro compattezza, allora di fatto essi rappresenterebbero una potente sorgente di onde gravitazionali che, con opportuni esperimenti, potrebbero essere rilevate. Questo è esattamente quello che è successo il 14 settembre del 2015, quando l'esperimento LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) ha osservato la fusione di due buchi neri di massa pari all'incirca trenta volte quella del Sole, avvenuta a più di 400 megaparsec di distanza (circa un miliardo di anni luce). Nonostante questo rappresenti un risultato straordinario che inaugura una nuova era di osservazioni, si hanno indizi dell'esistenza di buchi neri ben più massivi, che se membri di un sistema binario allora rappresenterebbero le più potenti sorgenti di onde gravitazionali nell'intero universo.

In questo articolo analizzerò gli scenari di formazione di binarie di questi buchi neri di grande massa, illustrerò i processi astrofisici alla base della loro evoluzione e le possibili "minacce" che potrebbero arrestarla. Accennerò alle possibili soluzioni emerse negli anni e in particolare mi soffermerò su una di esse, cioè la formazione di sistemi tripli di buchi neri, il principale argomento della mia tesi di dottorato. Analizzerò, quindi, le varie implicazioni di questo scenario per gli attuali e i futuri esperimenti di rilevazione di onde gravitazionali, illustrandone i risultati ottenuti.

Binarie di buchi neri massivi

Il modello cosmologico a oggi largamente accettato prevede che la struttura a larga scala del Cosmo sia plasmata dalla materia oscura, cioè una forma di materia differente dalla materia ordinaria che conosciamo, la quale interagisce solo gravitazionalmente e rappresenta circa il 30% del contenuto di massa-energia dell'universo. Dal Big Bang a oggi, a causa della gravità, la struttura di materia oscura ha subito una crescita gerarchica. Infatti, con il trascorrere del tempo cosmico, ammassi di materia oscura (noti come aloni) via via più massivi si sono fusi per formarne sempre di più grandi. Gli aloni di materia oscura rappresentano le buche di potenziale in cui la materia ordinaria (quella di cui siamo fatti) può collassare e formare le complesse strutture che conosciamo e possiamo osservare, dai sistemi planetari alle intere galassie.

Concentrandosi ora sulle singole galassie, è noto ormai da svariati anni che al centro della maggior parte di esse si ha evidenza dell'esistenza di oggetti estremi, in grado di emettere grandi quantità di ra-

diatore elettromagnetica tramite processi di accrescimento e di influenzare pesantemente la dinamica delle stelle che orbitano nelle regioni centrali (KORMENDY, HO 2013). Questi oggetti sono molto piccoli rispetto alle dimensioni delle galassie ospiti, ma dimostrano di possedere masse molto grandi che vanno dal milione al miliardo di masse solari. La loro massa e compattezza li caratterizzano come candidati ideali per rappresentare dei buchi neri e per l'appunto chiamiamo questi oggetti buchi neri massivi (o supermassivi).

In questo scenario, se semplicemente mettiamo in relazione la crescita gerarchica della struttura cosmica con l'esistenza di buchi neri massivi al centro delle galassie, si arriva inevitabilmente a teorizzare la formazione di sistemi binari composti da questi oggetti. L'evoluzione di questi sistemi è il risultato di una complessa interazione tra i buchi neri e l'ambiente in cui risiedono, richiedendo di combinare conoscenze e teorie appartenenti a diversi campi dell'astrofisica, dalla dinamica stellare alla fisica relativistica.

Lo scenario standard (BEGELMAN, BLANFORD, REES 1980) prevede che, dopo la fusione di due galassie, i buchi neri, essendo tra i corpi più massivi della galassia, tendono a migrare verso il centro della distribuzione stellare, a causa di un processo chiamato frizione dinamica. Infatti, l'effetto cumulativo di incontri più o meno ravvicinati con moltissime stelle della galassia (si pensi ad una serie di effetti fionda) genera una forza netta agente sui buchi neri. Questa forza, detta forza di frizione dinamica (CHANDRASEKHAR 1943), si oppone al loro moto e frenandoli li spinge verso le regioni centrali.

Dopo svariati milioni di anni, i due buchi neri possono venire a trovarsi sufficientemente vicini da formare una binaria kepleriana legata. Da qui in poi la frizione dinamica inizia a diventare inefficiente nello stringere la binaria, poiché l'autogravità di quest'ultima inizia a farsi rilevante. Da questo momento in poi, l'unico altro processo che può ulteriormente restringere l'orbita della binaria è l'interazione a tre corpi con le stelle che vivono nelle vicinanze. Infatti, quando una stella interseca l'orbita della binaria, si dà il via a una complessa interazione a tre corpi che, data l'enorme differenza in massa tra stella e binaria, si conclude con l'espulsione della prima dalle regioni centrali dove la binaria risiede. La stella si porta via piccole frazioni di energia e momento angolare della binaria, quindi, di fatto, determinando un piccolo restringimento dell'orbita dei due buchi neri. Il processo, noto come *hardening* stellare (QUINLAN 1996; SESANA *et al.* 2006), ripetuto moltissime volte, provoca quindi una sensibile riduzione del semiasse maggiore della binaria. Tuttavia anche questo meccanismo non può durare all'infinito, poiché durante l'interazione le stelle vengono espulse, determinando una progressiva erosione della riserva di stelle che possono interagire e stringere la binaria. Di conseguenza, dopo una prima efficiente fase, il processo rallenta e il

tempo scala associato può velocemente superare l'età dell'universo. In questa situazione si dice che la binaria "stalla", cioè non riesce più a restringere la sua orbita, e non raggiungerà mai una separazione sufficientemente piccola da garantire un'efficiente emissione di onde gravitazionali culminante nella fusione dei due buchi neri. È chiaro che la mancanza di quest'ultima fase andrebbe a inibire una qualsiasi produzione di un segnale di onde gravitazionali rilevabile dai correnti e futuri esperimenti pianificati a tale scopo, rendendoci di fatto ciechi a ciò che succede in una vasta parte del nostro universo. Questa situazione è nota in letteratura come il *final parsec problem* (MILOSAVLJEVIC, MERRITT 2003).

Nel corso degli anni si è ovviamente cercato di capire se effettivamente esistono delle vie d'uscita da questa situazione. La risposta è affermativa e tutte le possibili soluzioni fanno leva sulle assunzioni abbastanza idealizzate dello scenario standard, in cui le galassie vengono assunte come oggetti sfericamente simmetrici e composti solo da stelle.

Una prima soluzione, infatti, considera la presenza di abbondanti riserve di gas all'interno della galassia (DOTTI *et al.* 2007). Una binaria, trovandosi all'interno di una densa regione gassosa, può cedere energia e momento angolare al gas circostante, restringendosi di conseguenza, e in linea di principio riempire il *gap* spaziale fino alla separazione a cui l'emissione di radiazione gravitazionale è efficiente. Tuttavia, non tutte le galassie sono ricche di gas e questa via d'uscita è applicabile solo per certi tipi di galassie.

Nel caso in cui la presenza di gas sia piuttosto modesta, una seconda possibile soluzione risiede nella deviazione dalla simmetria sferica del potenziale galattico. Le galassie sono, infatti, sistemi complessi ed è lecito considerare che le stelle che le compongono non seguano perfettamente una distribuzione a simmetria sferica (YU 2002), soprattutto se una galassia è il risultato della fusione di due o più di esse. La deviazione dalla sfericità risulta importante perché determina l'esistenza di particolari famiglie di orbite stellari (dette *centrophillic*) che attraversano le regioni centrali della galassia. Queste orbite, trasportando nuove stelle nel centro galattico, di fatto, riforniscono la binaria di buchi neri massivi, evitando in tal modo che l'*hardening* stellare si arresti. Sebbene in questa situazione si eviti l'inibizione completa del processo, il tempo scala associato (che dipende fortemente dalla densità stellare centrale, la quale è difficilmente quantificabile) può continuare a essere molto lungo, dell'ordine di uno o più miliardi di anni.

In questo lungo lasso di tempo, a causa della crescita gerarchica determinata dalla cosmologia, è possibile che una galassia ospitante una binaria vada incontro a una nuova interazione con un'altra galassia. Se questa nuova galassia ospita a sua volta un buco nero massivo si arriva inevitabilmente alla formazione di sistemi tripli di buchi neri massivi, su cui ora mi concentrerò.

Triplette di buchi neri massivi

Come già accennato sopra, la formazione di sistemi tripli di buchi neri è, come per le binarie, una conseguenza diretta della formazione gerarchica della struttura cosmica. L'ingrediente aggiuntivo è il lungo tempo scala che una binaria impiega a fondersi, il quale è determinato dal complesso *interplay* con l'ambiente in cui risiede. Infatti, dopo la fusione delle galassie, al terzo buco nero toccherà la stessa sorte capitata ai due precedenti, cioè tenderà a migrare verso le regioni centrali. A un certo punto inizierà a "sentire" l'influenza della binaria e si verrà a formare un tripetto gerarchico di buchi neri, cioè un sistema caratterizzato dalla presenza simultanea di due binarie separate, una interna, formata dalla precedente binaria, e una esterna, formata dal centro di massa della prima e dal terzo corpo.

La dinamica a tre corpi presenta una fenomenologia molto più ricca ma anche molto più complessa rispetto al caso binario. Uno dei più interessanti fenomeni legati ai triplette in configurazione gerarchica è il meccanismo di Kozai-Lidov (KL), dal nome dei loro scopritori (KOZAI 1962; LIDOV 1962). Il processo implica che se l'inclinazione relativa dei piani orbitali delle due binarie che formano il tripetto è compresa tra 39° e 140° , allora, su tempi scala secolari, cioè molto più lunghi dei periodi orbitali, si innescano degli scambi di momento angolare tra le due binarie che formano il sistema triplo. L'effetto netto di questi scambi è quello di attivare delle oscillazioni (quasi) periodiche dell'inclinazione relativa delle due binarie e dell'eccentricità della binaria interna.

Se l'inclinazione iniziale risulta essere prossima a 90° , allora il meccanismo raggiunge la sua massima efficienza e l'eccentricità della binaria interna può crescere a valori estremamente alti prossimi all'unità. L'importanza di questo processo è presto riconosciuta nel caso di oggetti compatti; infatti, una binaria molto eccentrica presenta una fortissima emissione di onde gravitazionali dovuta alla piccola distanza che i due buchi neri raggiungono al passaggio al pericentro (cioè la minima separazione tra due oggetti in un'orbita). L'emissione può essere così intensa da generare la fusione dei due buchi neri su tempi scala brevissimi comparati al rispettivo caso di binaria circolare (FIG. 2).

Al contrario, nella situazione in cui l'inclinazione iniziale è fuori dall'intervallo in cui il meccanismo di KL è efficiente, durante la fase gerarchica la binaria interna rimane invece essenzialmente imperturbata. Tuttavia, come già spiegato, il terzo corpo tende ad avvicinarsi sempre di più alla binaria interna a causa dell'*hardening* stellare e di conseguenza il destino finale del tripetto gerarchico è inevitabilmente segnato dall'instabilità dinamica. Quando l'instabilità sopraggiunge, i tre corpi interagiscono tramite una serie di complessi e caotici incontri ravvicinati che possono risolversi o nella fusione di due dei buchi neri oppure nell'espulsione di uno di essi

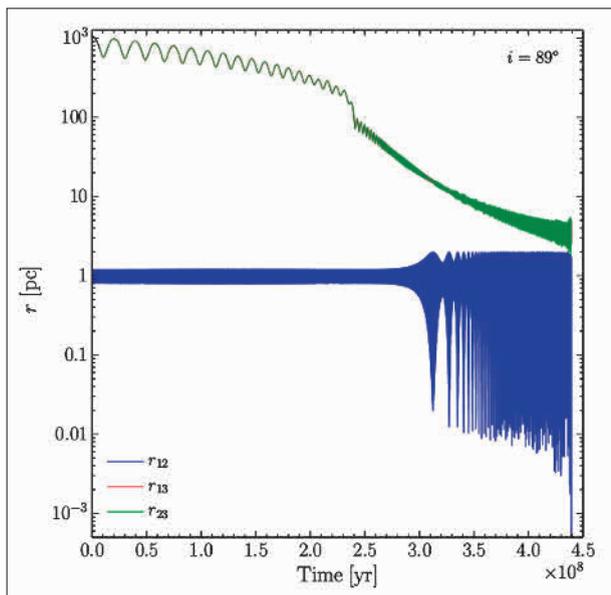


FIG. 2.

(in generale il meno massivo). Nel secondo caso, il corpo espulso può essere perso per sempre, nel senso che viene espulso dalla galassia, oppure, se la velocità acquisita non risulta troppo elevata, allora il buco nero può gradualmente rallentare e rimanere legato alla distribuzione stellare. Quest'ultimo può poi nuovamente ritornare nelle regioni centrali e interagire con la binaria lasciata nel centro, incrementando le probabilità di una nuova fusione (FIG. 3). Infine, anche nel caso in cui il buco nero espulso fugga dalla galassia, è ancora possibile che nell'ultima interazione prima dell'espulsione la binaria rimasta sia stata sufficientemente perturbata, tale per cui il tempo scala legato al restringimento dell'orbita per emissione di radiazione gravitazionale sia più piccolo dell'età dell'universo. Di conseguenza, sebbene su tempi scala più lunghi rispetto ai casi precedenti, la fusione dei buchi neri potrebbe ancora avvenire. Per semplicità, chiamiamo fusioni rapide tutti gli eventi generati da interazioni triple, siano esse in regime secolare o caotico, mentre denotiamo le fusioni che avvengono dopo l'espulsione di uno dei buchi neri come fusioni ritardate.

Come spiegato sopra, l'analisi della formazione ed evoluzione dei tripletti di buchi neri suggerisce che questo tipo di interazione può portare alla fusione di binarie di buchi neri. Il principale responsabile è l'aumento dell'eccentricità della binaria, che in alcuni casi può essere molto alta, determinando una copiosa emissione di radiazione gravitazionale. Tuttavia, un'analisi completa richiede di considerare due fattori fondamentali: l'efficienza con cui le interazioni triple determinano la fusione di buchi neri, ma soprattutto la probabilità di formazione di questo tipo di sistemi in un contesto cosmologico. Per rispondere a queste domande è necessario realizzare un'accurata architettura computazionale per verificare l'effettiva realizzabilità in natura di questo tipo di processi. A tal fine, una parte fondamentale della tesi di dottorato si è focalizzata su questi punti.

Simulazioni di sistemi tripli

Oltre a una descrizione accurata dell'interazione a tre corpi, di fondamentale importanza risulta la modellizzazione della complessa interazione dei buchi neri con l'ambiente galattico, nonché l'introduzione degli effetti di relatività generale, da cui una completa analisi della dinamica di oggetti compatti non può prescindere. A causa della complessità degli ingredienti necessari, uno studio puramente analitico è risultato essere di difficile realizzazione (già a livello newtoniano l'interazione a tre corpi non ammette una soluzione analitica generale), indirizzando quindi lo studio verso l'utilizzo di metodi numerici per l'integrazione delle equazioni differenziali che descrivono il moto dei sistemi studiati.

Armati con un opportuno apparato computazionale, il passo successivo è stato la sistematica esplorazione dello spazio dei parametri, cioè l'analisi dell'efficienza delle interazioni triple al variare delle condizioni iniziali, come massa iniziale dei tre corpi, il semiasse maggiore delle binarie, l'eccentricità, l'inclinazione relativa ecc.

Il principale risultato emerso da questa esplorazione conferma che effettivamente le interazioni triple rappresentano un possibile canale per la fusione di buchi neri massivi, diventando, di fatto, una possibile soluzione del *final parsec problem*. In particolare, dal set completo di simulazioni risulta che circa il 30% di tutti i sistemi simulati arriva ad avere un evento di fusione. Della totalità degli eventi, circa 1/5 è imputabile alle fusioni ritardate, le quali sono più frequenti a grandi masse, quando l'emissione di radiazione gravitazionale è più efficiente. Il restante 4/5 degli eventi è invece dovuto alle fusioni rapide, le quali, al contrario, mostrano solo una debole dipendenza dalla massa.

Arrivati a questo punto, con il set di simulazioni effettuate, si è stabilito qual è l'efficienza delle interazioni triple in base ai parametri iniziali. Manca tuttavia ancora un tassello fondamentale, cioè capire qual è il reale tasso di formazione di questi sistemi in un universo in evoluzione.

L'aspetto cosmologico

Come anticipato, l'attuale modello cosmologico prevede una crescita gerarchica della struttura a larga scala dell'universo, in cui le galassie formatesi all'interno degli aloni di materia oscura possono interagire e fondersi. La descrizione più dettagliata che a oggi abbiamo di questo processo viene dalle simulazioni cosmologiche, una complessa architettura computazionale capace di riprodurre l'evoluzione gerarchica della materia oscura, ma anche di descrivere la fisica della materia ordinaria che può essere sotto forma di stelle o di gas, richiedendo quindi un'accurata descrizione dei fenomeni idrodinamici. Sebbene questo tipo di simulazioni fornisca una buona descrizione della realtà, il costo compu-

tazionale è estremamente grande e limita di molto le capacità predittive di questo approccio.

Fortunatamente, esiste un secondo approccio al problema, molto più semplice ma altrettanto valido, cioè l'impiego di modelli semi-analitici (SAM). A differenza delle simulazioni cosmologiche, questi modelli non si prefiggono di descrivere la fisica delle galassie nei minimi dettagli, bensì cercano di riprodurre una descrizione "stilizzata" dell'evoluzione cosmologica, mediante l'utilizzo di ricette semplici e approssimazioni giustificate. Il minor grado di accuratezza è ampiamente ripagato dalla *performance* e dalla grande flessibilità con cui la fisica basilare è implementata, permettendo di produrre un gran numero di realizzazioni dell'evoluzione cosmologica del nostro universo. Nel particolare, questo tipo di modelli combina un'auto-consistente descrizione della storia evolutiva degli aloni di materia oscura con delle opportune ricette fisiche usate per popolare tali aloni con le galassie, avendo cura di introdurre tutte le componenti fondamentali come il gas, le stelle e anche i buchi neri massivi ospitati nelle regioni centrali.

Questo secondo approccio si presta perfettamente alla descrizione delle interazioni triple nell'ambito cosmologico. In particolare, usando l'ampio set di simulazioni di triplette è possibile creare delle semplici ricette (FIG. 4) che ricalchino la natura e l'efficienza delle interazioni triple nel generare fusioni di buchi neri al variare dei parametri dei sistemi formati durante l'evoluzione cosmologica simulata dal SAM.

Quest'ultimo ingrediente permette di dare una descrizione completa delle interazioni triple, combinando un'accurata descrizione della fisica di queste interazioni (le simulazioni di triplette) con un'auto-consistente evoluzione cosmologica (il SAM).

Il prossimo passo consiste nell'utilizzo delle informazioni ottenute per predire il segnale di onde gravitazionali emesso dalle fusioni di buchi neri massivi avvenute durante l'evoluzione del nostro universo sintetico.

Il fondo stocastico di onde gravitazionali e la tecnica del *pulsar timing*

L'architettura computazionale realizzata permette di stimare l'intensità del segnale di onde gravitazionali emesso dalla binarie di buchi neri massivi. Nella tesi di dottorato mi sono concentrato su un particolare tipo di segnale di radiazione gravitazionale, noto come fondo stocastico di onde gravitazionali. Questo segnale è generato dalla sovrapposizione incoerente dell'emissione di onde gravitazionali

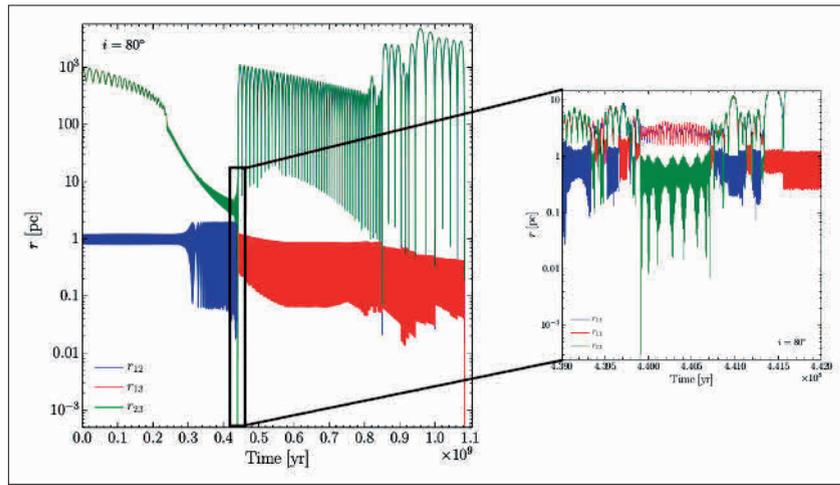


FIG. 3.

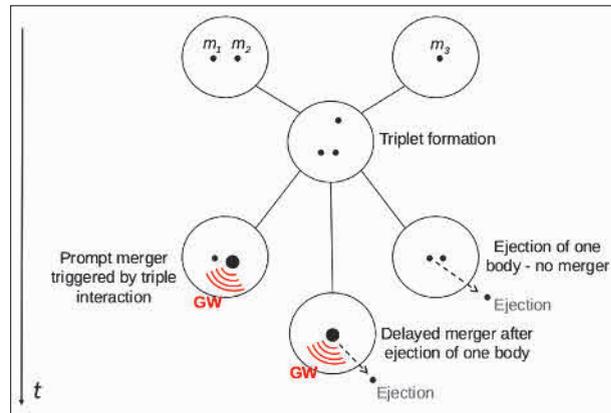


FIG. 4.

proveniente da un grandissimo numero di binarie sparse in tutto l'universo e racchiude perciò preziose informazioni riguardanti la formazione ed evoluzione dei buchi neri massivi, ma anche sull'assemblaggio della struttura cosmica.

Se l'esistenza di questo tipo di segnale è di per sé molto interessante e suggestiva, il modo in cui si pensa di rilevarlo lo è altrettanto. Per la detezione, infatti, non si utilizza un apparato strumentale appositamente costruito, ma si impiegano gli orologi macroscopici più stabili disponibili in natura, cioè le *pulsar* al millisecondo. Queste straordinarie sorgenti sono delle stelle di neutroni, cioè oggetti con massa paragonabile al Sole ma concentrate in una decina di chilometri, che ruotano con periodi prossimi al millisecondo e che presentano intensi campi magnetici. Questi oggetti, come il nome suggerisce, sono sorgenti di radiazione elettromagnetica pulsata (nella banda radio). L'effetto è dovuto a un'emissione molto concentrata che s'irradia dai poli dell'intenso campo magnetico. Quest'ultimo è in genere disallineato dall'asse di rotazione, di conseguenza, se durante la rotazione il fascio di radiazione intercetta la Terra, possiamo osservare la radiazione emessa modulata dal moto di rotazione, esattamente come quando si guarda la luce di un faro. L'estrema stabilità degli impulsi rende questi

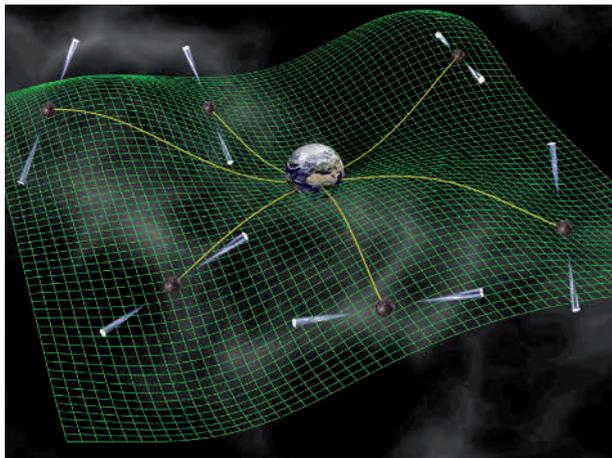


FIG. 5.

oggetti degli orologi perfetti utilizzabili per rilevare le onde gravitazionali. Il concetto è molto semplice: ogni volta che un'onda gravitazionale passa dalla Terra, il cammino ottico percorso seguito dalla radiazione radio dalla *pulsar* fino a noi sarà leggermente modificato, di conseguenza l'impulso arriverà con un leggero anticipo o ritardo in base a come il cammino ottico è stato modificato. Realizzando un dettagliato modello teorico dell'emissione della *pulsar* è possibile avere un predizione del tempo di arrivo del segnale da una specifica *pulsar*. Confrontando osservazioni e modello è possibile calcolare i residui, cioè la differenza tra il tempo di arrivo osservato e quello predetto. Residui che aumentano nel tempo possono indicare il passaggio di un'onda gravitazionale. L'espedito che rende il metodo veramente affidabile e che riduce l'effetto delle sistematiche, delle incertezze sull'emissione delle pulsar e della propagazione della radiazione fino alla Terra, sta nel monitorare molte sorgenti e ricercare una correlazione tra i residui di molte *pulsar* in modo da inferire un *pattern* coerente (FIG. 5). Purtroppo, avendo a che fare con le onde gravitazionali, ci si deve scontrare con la loro piccolezza, infatti, i residui indotti dal loro passaggio sono molto piccoli, dell'ordine di nanosecondi. Nonostante questo limite, il costante monitoraggio continua a migliorare la precisione della misura degli impulsi e quindi, con il protrarsi dell'osservazione, si può lentamente, ma continuamente, migliorare la sensibilità. Attualmente, sono in corso tre esperimenti di pulsar timing, NanoGrav, PPTA ed EPTA, rispettivamente a guida americana, australiana ed europea. I tre esperimenti sono congiuntamente organizzati nell'International Pulsar Timing Array (IPTA, www.ipta4gw.org/) al fine della condivisione delle osservazioni, poiché la precisione della misura dipende fortemente dal numero di *pulsar* monitorate.

Il range di frequenze della radiazione gravitazionale che gli esperimenti PTA possono sondare si estende in una banda che va da qualche nano-Hz a frazioni del micro-Hz, un intervallo in cui svariati modelli teorici predicono l'esistenza del fondo di

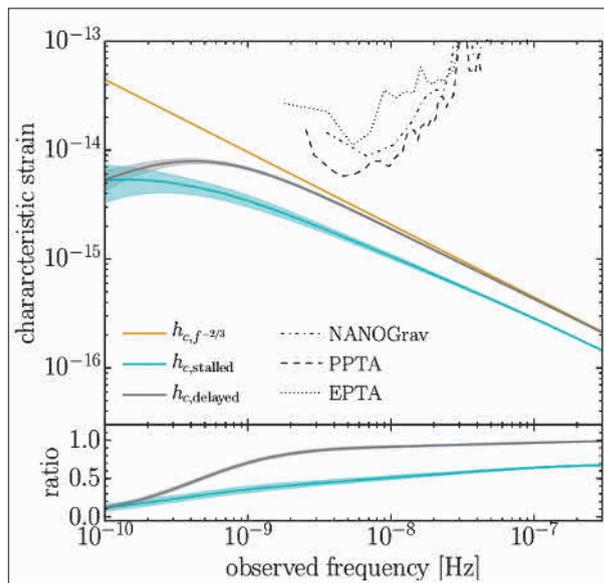


FIG. 6.

onde gravitazionali, sebbene, a oggi, una chiara rilevazione di questo fondo ancora manchi. Lo scopo principale della tesi è stato quindi quello di determinare un robusto limite inferiore all'intensità del segnale del fondo stocastico, al fine di valutare la sua possibile rilevazione nei prossimi anni.

A tale scopo, ho utilizzato i risultati combinati delle simulazioni di tripletti e del SAM, in particolare analizzando due scenari diametralmente opposti. In un primo ottimistico scenario si è assunto che le binarie di buchi neri nell'universo possono fondersi efficientemente, sia secondo i canali standard (evoluzione dominata dall'*hardening* stellare o da un ambiente gassoso) che per l'effetto dei tripletti. Invece, in una seconda e più pessimistica eventualità si è assunto che tutte le binarie nell'universo non possono arrivare alla fusione tramite i canali standard, ma solamente per mezzo delle interazioni triple. In questo secondo scenario ci si aspetta che il livello del fondo sia soppresso rispetto al caso ottimistico poiché molte binarie vengono assunte come "stallate". Tuttavia la cosmologia ci insegna che, se una binaria rimane "bloccata" per svariate centinaia di milioni di anni, allora è possibile che si venga a formare un sistema triplo, il quale a sua volta può effettivamente determinare la fusione di due buchi neri. In questo scenario i tripletti di fatto rappresentano un'ultima risorsa per evitare una profonda soppressione del segnale gravitazionale.

Dai risultati dell'analisi è emerso che effettivamente, anche nel caso più pessimistico, l'intensità del fondo stocastico risulta essere soppressa solo di un fattore due/tre (si veda il confronto tra la curva ciano e quella arancione in FIG. 6) rispetto al caso ottimistico in cui le binarie possono fondersi secondo tutti i possibili canali.

Questo risultato è molto importante per gli esperimenti PTA, sia quelli correnti sia quelli futuri, perché predice quanto sensibili questi esperimenti do-

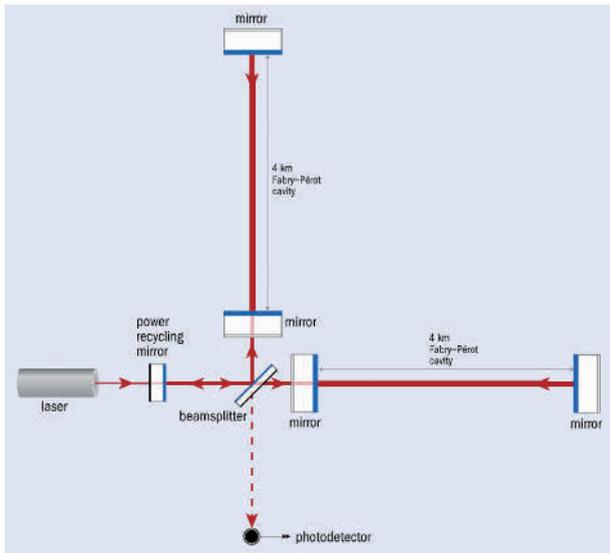


FIG. 7.

vranno essere e quindi come pianificare la loro evoluzione. Sebbene dai risultati ottenuti risulti che gli attuali esperimenti non sono ancora in grado di produrre una robusta rilevazione del segnale, la prossima generazione di esperimenti di *pulsar timing*, come SKA (Square Kilometer Array) avrà una sensibilità molto più alta e verosimilmente potrà quindi rilevare il fondo stocastico stabilendone l'intensità e la distribuzione in frequenza, le quali racchiudono preziose informazioni sia sull'evoluzione cosmologica delle strutture che sulla fisica dei buchi neri massivi.

Prospettive future per LISA

La missione LISA (Laser Interferometer Space Antenna, www.elisascience.org/) sarà una missione per la rilevazione di onde gravitazionali prevista entrare in funzione attorno al 2030. A differenza degli esperimenti di *pulsar timing*, LISA impiegherà la tecnica dell'interferometria laser, la stessa usata dagli attuali esperimenti che hanno recentemente rilevato le onde gravitazionali (LIGO/Virgo). La grande differenza con gli attuali esperimenti sarà la dimensione; la missione si prefigge, infatti, l'ambizioso obiettivo di avere un interferometro con braccia lunghe milioni di chilometri, al fine di poter raggiungere frequenze molto più basse (al di sotto del milli-Hz) rispetto agli interferometri a terra. Data la dimensione dell'esperimento, la sua collocazione sarà necessariamente nello spazio.

La tecnica dell'interferometria permette di compiere misurazioni a una precisione mai raggiunta e proprio per questo è ideale per rilevare i minuscoli effetti che accompagnano il passaggio delle onde gravitazionali. Il concetto di fondo si basa sull'utilizzo di un raggio luminoso che, appena prodotto, viene diviso in due fasci identici inviati poi in direzioni diverse. I due raggi vengono quindi riflessi da

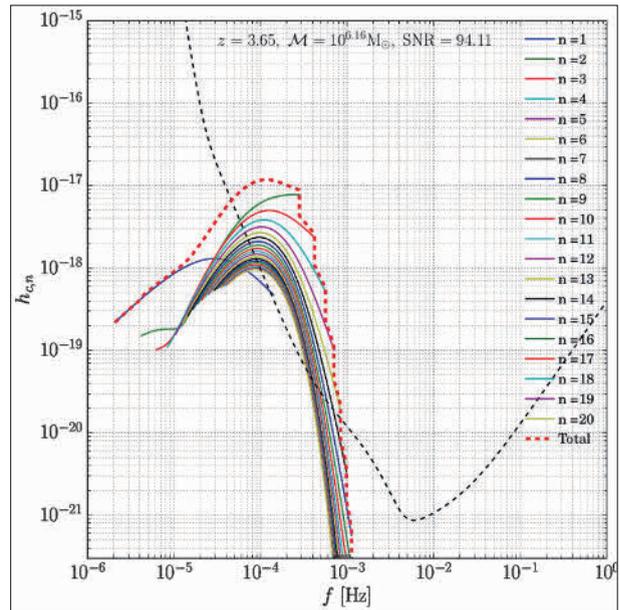


FIG. 8.

degli specchi e obbligati a ripercorrere il cammino effettuato, fino a quando non vengono ricombinati e mandati a un rivelatore capace di risolvere il pattern di interferenza della luce (FIG. 7). Se durante l'esperimento, per qualche motivo, la lunghezza dei cammini ottici varia, allora nel rivelatore si osserverà un *pattern* di interferenza che varia nel tempo. Una delle ragioni per cui il cammino ottico può variare è proprio il passaggio di un'onda gravitazionale, la quale cambiando la curvatura locale dello spazio-tempo modifica il percorso più breve seguito dalla luce. La precisione raggiunta è talmente alta che per il primo evento rilevato da LIGO/Virgo si sono misurati spostamenti 200 volte più piccoli di un nucleo atomico!

LISA rappresenterà una versione molto più grande di questi interferometri ed essendo collocata nello spazio sarà libera da tutte le sistematiche che affliggono gli esperimenti sulla Terra. Il *target* principale della missione sono principalmente le binarie di buchi neri massivi, anche se gli obiettivi scientifici sono molto più numerosi e ambiziosi.

Tra le possibili sorgenti che LISA osserverà, i tripletti potrebbero rappresentare delle sorgenti uniche. Infatti, una delle principali caratteristiche delle binarie che si fondono a seguito di un'interazione tripla è l'alta eccentricità, che in alcuni casi può raggiungere valori prossimi all'unità, producendo dunque particolari segnali nella banda di sensibilità di LISA. La particolarità di questo tipo di segnali sta nella sua distribuzione in frequenza. Infatti, se una binaria circolare di fatto rappresenta una sorgente monocromatica che emette a una frequenza pari a due volte la frequenza orbitale, un sistema eccentrico emette invece onde gravitazionali su un *range* molto più ampio di frequenze (PETERS, MATHEWS 1963), corrispondenti alle armoniche superiori (cioè multipli interi) della frequenza orbitale (FIG. 8). Più la binaria è eccentrica, più alta sarà la frequenza in

La scienza dei pianeti extra-solari nell'era degli Extremely Large Telescopes: strumenti di simulazione scientifica e tecnologica per spettroscopia ad alta risoluzione.

I casi di ESPRESSO e ELT-HIRES[★]

Matteo Genoni

INAF · Osservatorio Astronomico di Brera

Introduzione

UNA delle tematiche più rilevanti e affrontate nell'astrofisica contemporanea, nonché uno degli argomenti di punta nei futuri decenni, è lo studio dei sistemi di pianeti extra-solari, chiamati anche esopianeti. Dalla scoperta del primo (nel 1995, pianeta così definito "Gioviano caldo", orbitante attorno alla stella 51 Pegasi, MAYOR, QUELOZ 1995) fino ad oggi, più di 3500 pianeti extra-solari sono stati scoperti con diverse tecniche osservative.

Uno degli aspetti fondamentali da rimarcare in questo campo è che sono stati scoperti tipi di esopianeti che non sono presenti nel nostro Sistema solare e che le teorie di formazione ed evoluzione planetaria non prevedevano. Proprio il primo pianeta scoperto infatti è un cosiddetto Gioviano caldo (*Hot Jupiter*) perché ha dimensione circa metà di Giove, ma il suo periodo orbitale è di soli 4 giorni (rispetto ai circa 12 anni di Giove!) e la sua temperatura è più di 1000 K (Giove circa 170 K). Questo ha fatto capire quanto il nostro sistema non sia la "regola generale" e quanto dovevamo e dobbiamo ancora capire e scoprire. Le varie tecniche osservative utilizzate per scoprire e studiare questi oggetti si basano su differenti strumenti e tecnologie e si differenziano anche per la tipologia di sistemi extra-solari che si propongono di osservare: da sistemi con pianeti giganti e gassosi (come il nostro Giove) e giovani a grandi distanze dalla stella attorno cui orbitano, fino a pianeti rocciosi più piccoli che orbitano attorno a stelle più piccole e fredde.

Uno dei due metodi che hanno permesso di fare fino ad ora il maggior numero di scoperte è quello che sfrutta la perturbazione orbitale che il pianeta esercita sulla stella. Entrambi i corpi orbitano intorno a un centro di massa comune e quindi la stel-

la, rispetto ad un osservatore lontano, ha una velocità relativa, lungo la congiungente osservatore stella, diversa da zero; questa velocità si definisce velocità radiale (RV). A causa di questo moto, la radiazione emessa dalla stella subisce un effetto di spostamento delle lunghezze d'onda (effetto Doppler).

Gli spettrografi ad alta risoluzione e ad alta stabilità sono in grado di cogliere questo effetto in modo molto accurato. Risoluzione e stabilità sono infatti due fra le caratteristiche strumentali che più sono state ottimizzate negli ultimi vent'anni per poter scoprire pianeti sempre più analoghi alla Terra. A titolo di esempio, basti pensare che la perturbazione, e quindi l'effetto in velocità radiale, che Giove esercita sul nostro Sole è di circa 15 m/s, mentre quello della Terra è di soli 10 cm/s. Gli spettrografi ad alta risoluzione e stabilità, installati sui grandi telescopi, sono strumenti fondamentali non solo per scoprire oggetti come gli esopianeti, ma anche per studiarne le diverse caratteristiche e proprietà.

In questo specifico campo dell'astrofisica, infatti, siamo ormai entrati nell'era dello studio dell'evoluzione dei pianeti extra-solari e della caratterizzazione delle loro atmosfere. Le misure su cui si basano queste indagini scientifiche sono però molto complesse e complicate e necessitano di un eccezionale livello di *design*, ottimizzazione e caratterizzazione degli strumenti, quali spettrografi ad alta risoluzione e stabilità. Risulta quindi importante e significativo dotarsi di strumenti di simulazione che siano in grado di modellare con accuratezza gli strumenti e che possano essere utilizzati in modo efficiente per la comprensione e l'ottimizzazione degli strumenti e delle analisi scientifiche correlate.

In questo articolo presenterò i diversi *tool* di simulazione che ho sviluppato durante il mio percorso di dottorato, mostrando alcuni esempi di utilizzo sia per indagini scientifiche (il Simulatore di spettri in trasmissione) sia per progettazione ed analisi strumentale (relativa ai progetti ESPRESSO ed ELT-HIRES nei quali ho avuto la fortuna, e il piacere, di essere attivamente coinvolto).

* 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 2018 - XIII edizione, consegnato durante il LXII Congresso Nazionale della Società, tenutosi a Teramo nel maggio dello stesso anno.

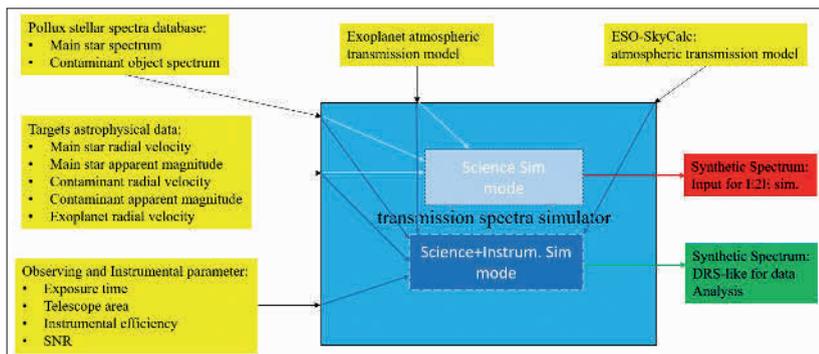


FIG. 1. Diagramma schematico simulatore di spettri di trasmissione, dove vengono mostrate le due modalità operative. I diversi parametri di *input* sono nelle *box* gialle, mentre gli spettri sintetici prodotti come risultato sono nelle *box* rosse e verdi; si riferiscono rispettivamente a spettri generali che possono essere usati come *input* per il simulatore *End-to-End* (che verrà presentato in seguito) e a spettri già processati in formato [lunghezza d'onda – conteggi] che possono essere usati direttamente in analisi scientifiche.

Simulatore di Spettri in Trasmissione (*Transmission Spectra Simulator*)

Gli spettri in trasmissione delle atmosfere degli esopianeti sono ottenuti durante il cosiddetto transito, ovvero la porzione di orbita in cui il pianeta extra-solare si interpone fra la sua stella e l'osservatore, durante il quale il pianeta occulta differenti parti del disco stellare. La spettroscopia in trasmissione è una tecnica definita differenziale, in quanto richiede l'acquisizione di spettri della stella, attorno cui orbita il pianeta extra-solare, sia durante il transito sia fuori (e cioè quando l'esopianeta non si interpone fra l'osservatore e la stella). Gli spettri in transito contengono l'*imprinting*, sulla radiazione stellare, dell'assorbimento sia dell'atmosfera dell'esopianeta, sia dell'atmosfera terrestre (quando l'osservazione è fatta da terra); gli spettri fuori transito contengono solo traccia dell'atmosfera terrestre (di nuovo, in caso di osservazione da terra) e non quelle dell'eso-atmosfera, perché il pianeta non è più lungo la linea di vista che congiunge osservatore e stella. Solitamente, gli spettri in trasmissione sono analizzati attraverso una correlazione con spettri modello della stella, al fine di individuare righe di assorbimento di atomi e molecole, ottenendo quindi indicazioni sulla composizione chimica delle atmosfere esoplanetarie. Inoltre, sfruttando l'informazione sull'effetto Doppler spettroscopico (di spostamento delle righe di assorbimento) associato all'individuazione delle righe relative agli atomi o molecole, è possibile ottenere indizi relativi a differenti fenomeni fisici presenti nelle eso-atmosfere, quali: presenza di aerosol, evaporazione atmosferica, gradienti di temperatura e venti di circolazione.

Ciò è stato possibile grazie all'utilizzo di spettrografi ad alta risoluzione spettrale, ovvero la capacità di risolvere (cioè distinguere) righe spettrali vicine, ed alta precisione e stabilità; fra i più performanti gli spettrografi HARPS (WYTENBACH *et al.*, 2015), montato al telescopio di 3.6 m di ESO, ed UVES e CRILES (SNELLEN *et al.*, 2010) entrambi installati

nel complesso Very Large Telescope (VLT) di 4 telescopi da 8 m ciascuno.

L'applicazione sistematica di spettroscopia ad alta risoluzione ed elevata precisione, nel *range* spettrale dal visibile (380-800 nm) al vicino infrarosso (fino a 2000-2500 nm), permetterà di approfondire enormemente la nostra conoscenza delle atmosfere per una vasta gamma di tipologie di esopianeti: dai pianeti simili alla Terra fino ai Gioviniani caldi.

Va sottolineato però che maggiore è la risoluzione spettrale, e quindi la capacità dello strumento di dividere la luce nelle sue lunghezze d'onda costituenti, maggiore è la diminuzione del segnale e quindi minore l'effetto di assorbimento dell'atmosfera esoplanetaria rispetto al rumore strumentale e di misura dello spettro. Risulta chiaro, quindi, come la spettroscopia ad alta risoluzione debba essere accoppiata con grandi telescopi per aumentare la capacità di raccogliere i fotoni emessi dalla stella e quindi di aumentare il segnale rispetto al rumore strumentale e di lettura dello spettro (quello che in gergo si definisce il rapporto segnale-rumore, abbreviato in inglese SNR). Il rapporto segnale-rumore richiesto per poter analizzare lo spettro di sistemi analoghi a quello Sole-Terra è $> 500-1000$ (mentre, per esempio, per altri casi scientifici sono richiesti valori attorno a 10 o 50); lo studio di sistemi analoghi al nostro saranno fra i casi scientifici di maggior interesse per strumenti come ESPRESSO al VLT ed HIRES al futuro Extremely Large Telescope (ELT).

La potenza di raccolta di luce dei grandi telescopi, però, potrebbe implicare la possibilità di captare fotoni emessi da sorgenti di fondo, rispetto ai sistemi stella-esopianeta che verranno studiati, oppure gravitazionalmente legate alla stella attorno cui orbita anche l'esopianeta. L'analisi di questi scenari è stata uno dei principali fattori per i quali nel mio lavoro di tesi ho sviluppato un simulatore di spettri di trasmissione, il quale ha l'obiettivo di generare spettri simulati combinando: spettro stellare, assorbimento dell'eso-atmosfera, contributo dell'atmosfera della Terra e la contaminazione dovuta alla possibile presenza di oggetti di fondo o gravitazionalmente legati alla stella. La struttura flessibile del simulatore permette di sfruttarlo anche per generare i suoi *output* come spettri di *input* per un altro strumento di simulazione sviluppato nel mio percorso di dottorato, e cioè il simulatore *End-to-End* che verrà presentato in seguito.

Un diagramma che schematizza i parametri di input, le modalità di funzionamento e i prodotti del simulatore è raffigurato in FIG. 1. I parametri di input relativi al sistema astrofisico osservato (stella, esopianeta ed oggetto di contaminazione) sono: la tipologia spettrale, la magnitudine apparente e il moto relativo, rispetto alla terra, della stella e del contami-

nante e infine il modello di spettro di assorbimento dell'atmosfera dell'esopianeta. I parametri relativi alle condizioni di osservazione e all'atmosfera terrestre sono l'altezza in cielo del sistema osservato e il parametro di *seeing* (che sintetizza le condizioni di turbolenza della nostra atmosfera). I parametri strumentali (legati alla modalità operativa e di osservazione dello strumento) sono: il tempo di esposizione dell'osservazione, l'area del telescopio, il potere di risoluzione dello strumento e la sua efficienza e infine il rapporto segnale-rumore stimato.

Per generare lo spettro stellare, della stella principale e della contaminante, il simulatore sfrutta il *database online POLLUX*,¹ il quale è una vasta libreria di spettri stellari teorici. L'interfaccia WEB di POLLUX permette di impostare i diversi parametri della fotosfera stellare quali: la temperatura effettiva, la massa, la gravità, la luminosità e la metallicità, insieme all'abbondanza di diverse specie atomiche. Il profilo di trasmissione dell'atmosfera terrestre è invece calcolato usando il simulatore SkyCalc² di ESO (European Southern Observatory), il quale è basato su un modello di cielo relativo a Cerro Paranal (in Cile dove è costruito il telescopio VLT). Il contributo dell'eso-atmosfera può essere modellato in due modalità: la prima si basa su spettri di atmosfera complessi e derivati da modelli teorici (PINO *et al.*, 2018), la seconda prevede la possibilità di modellare solo alcune righe di assorbimento specifiche con profilo gaussiano o lorentziano caratterizzato dagli opportuni parametri di: lunghezza d'onda di assorbimento, profondità e larghezza della riga. La possibilità di modellare solo alcune righe di assorbimento dell'atmosfera esoplanetaria è utile nel caso si vogliono svolgere analisi su specifici traccianti dell'atmosfera esoplanetaria ed inoltre permette di alleggerire notevolmente la potenza di calcolo richiesta al simulatore.

Il simulatore, acquisiti gli spettri appena descritti, li combina in modo opportuno tenendo conto di tutti i parametri di *input*. La flessibilità del simulatore permette anche di combinare solo alcune delle quattro componenti, come ad esempio è stato fatto per analizzare la contaminazione che un oggetto di fondo, non gravitazionalmente legato alla stella, introduce senza considerare la presenza di atmosfera (esopianeta e terrestre). In FIG. 2, per esempio, è mostrato lo spettro combinato di due sorgenti, nel range spettrale 5000-7000 angstrom. Il sistema simulato è quello HD 189733 (sistema molto famoso, dove è presente un pianeta Gioviniano caldo molto studiato) in cui la stella principale è di tipo spettrale K1V e la magnitudine apparente in banda V è 7.68; la conta-

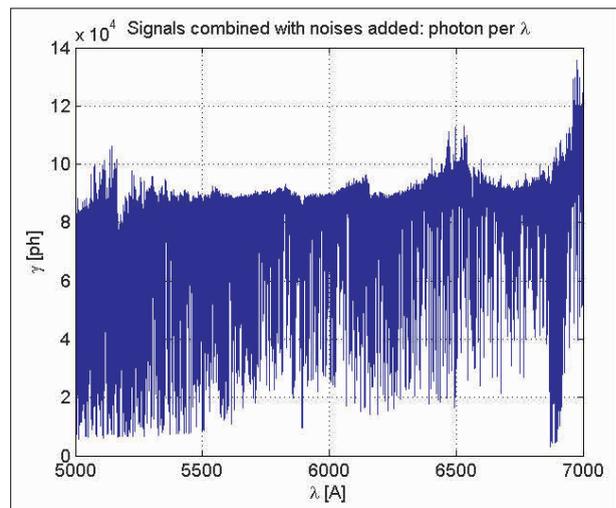


FIG. 2. Spettro combinato, attraverso il Simulatore di spettri in transizione, di due sorgenti, nel range spettrale 5000-7000 angstrom. Il sistema simulato è quello composto da una stella principale di tipo spettrale K1V e la magnitudine apparente in banda V è 7.68; la contaminante è una stella di tipo spettrale M4V simulata con magnitudine apparente in banda V pari a 12. Non sono stati aggiunti gli spettri di assorbimento di una possibile atmosfera esoplanetaria e quello terrestre.

minante è una stella di tipo spettrale M4V simulata con magnitudine apparente in banda V pari a 12.

In quest'analisi è stato studiato l'impatto che la magnitudine e la classe spettrale del contaminante hanno sullo spettro in trasmissione, nella regione di risonanza del doppietto del sodio (le linee D di assorbimento del sodio sono infatti uno dei traccianti maggiormente sfruttati per lo studio delle atmosfere esoplanetarie). Il risultato di quest'analisi è che la contaminazione è maggiore per oggetti di fondo con classe spettrale simile a quella della stella principale e minore è la magnitudine (ovvero maggiore luminosità del contaminante). Per una contaminante di classe spettrale M e magnitudine apparente fra 9 e 10, la contaminazione in parti per milione (ppm) dello spettro risulta essere dell'ordine di 500-1000, la quale è ordini di grandezza maggiore rispetto alla decina di ppm per il segnale previsto dalla presenza di un pianeta simile alla Terra in orbita attorno ad una stella di classe G (come il nostro Sole).

Un altro scenario studiato ha visto l'aggiunta delle righe di assorbimento del sodio dovuto alla presenza del pianeta gioviano caldo HD 189733-b. Scopo di questo scenario è stato simulare cosa si osserverebbe con lo spettrografo HARPS se fosse presente della contaminazione dovuta ad una stella di *background* di magnitudine apparente V pari a 12 e classe spettrale M. Il pianeta HD 189733-b è stato osservato con molti strumenti e con i dati di HARPS è stata ipotizzato un gradiente di temperatura e la presenza di forti moti di circolazione nella sua atmosfera (WYTTEBACH *et al.*, 2015).

Il risultato, mostrato in FIG. 3, è che le righe di assorbimento che provengono dall'atmosfera dell'esopianeta sono stata individuate correttamente, nonostante la presenza della stella contaminante.

¹ Il Database POLLUX è sviluppato da Laboratoire Univers et Particules de Montpellier (LUPM - Université Montpellier - CNRS) ed ha una interfaccia grafica on-line. È un servizio registrato del VO: <http://pollux.graal.univ-montp2.fr/ssaserver/tsap>.

² ESO SkyCalc tool è stato sviluppato da 'Austrian ESO in-kind project', ed è disponibile alla pagina web: <http://www.eso.org/observing/etc/bin/gen/form?INS.MODE=swspectr+INS.NA-ME=SKYCALC>

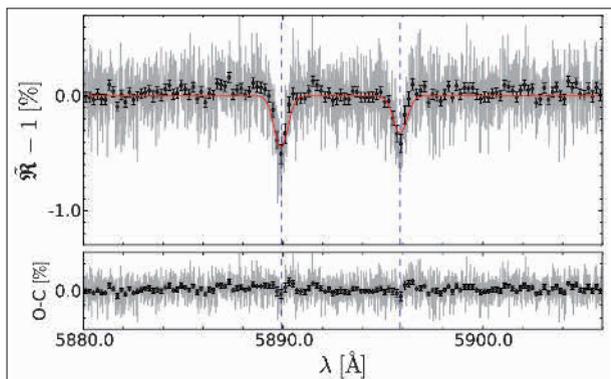


FIG. 3. Spettro di trasmissione per il secondo scenario analizzato con il Simulatore di spettri in trasmissione attorno alla regione del doppietto del sodio. Lo spettro di trasmissione, in cui emerge chiaramente l'assorbimento del sodio, è stato approssimato con due profili gaussiani con specifici parametri per le righe (in rosso). Nel pannello sottostante, grafico della differenza fra i dati simulati e l'approssimazione globale dello spettro.

Lo spettro di trasmissione, in cui emerge l'assorbimento del sodio, è stato approssimato con due profili gaussiani con specifici parametri per le righe. Lo spostamento medio delle righe in lunghezza d'onda, rispetto alla posizione aspettata, è di solo $-0.0004 \pm 0.003 \text{ \AA}$, indicando che non si sono generati effetti spuri di moti peculiari nell'atmosfera dell'esopianeta. Questo è un importante risultato della simulazione, perché dimostrerebbe come la circolazione venti ipotizzata da Wytttenbach e collaboratori nel loro lavoro non sarebbe riproducibile almeno in questo scenario simulato. La profondità di assorbimento delle righe è consistente con lo spettro dell'atmosfera simulata di HD 198733-b.

Come previsto, quindi, la presenza di contaminazione considerata in uno spettrografo simile a HARPS, e con un telescopio della classe di 3 m, non impedisce il corretto rilevamento di eso-atmosfera con spettroscopia di trasmissione; tuttavia, come notato nella prima analisi, il segnale spurio potrebbe arrivare a migliaia di ppm per stelle di classe G o M a maggiore luminosità. Questo tipo di scenario dovrebbe quindi essere tenuto presente per i programmi osservativi ad alta risoluzione con telescopi estremamente grandi (gli ELTS) dove i segnali di poche ppm dovuti a sistemi gemelli di quello Terra-Sole saranno fra gli obiettivi principali.

Spettrografi ad alta risoluzione e stabilità per osservazioni da terra: VLT-ESPRESSO ed ELT-HIRES

Gli spettrografi ad alta risoluzione e stabilità per osservazioni con telescopi ottici da terra (ovvero costruiti per essere installati su telescopi terrestri e non per satelliti spaziali) sono strumenti eccezionali che hanno già permesso e permetteranno in futuro di compiere passi fondamentali in diversi campi dell'astrofisica. La scoperta, lo studio degli esopianeti e la caratterizzazione delle loro atmosfere

re sono "solo" alcuni esempi (come verrà scritto di seguito).

Gli aspetti chiave che legano le *performance* a livello di osservazione scientifica e i requisiti tecnici specifici, sulla base dei quali viene progettato il dettaglio di ogni componente di questi strumenti sono: risoluzione, efficienza, precisione, accuratezza e stabilità. Senza entrare nel dettaglio, occorre sottolineare come tutti questi aspetti siano legati in qualche modo fra di loro e, ovviamente, ottimizzare queste performance è estremamente "challenging" a livello di progettazione, costruzione dei singoli componenti ed allineamento finale dell'intero strumento.

In questo capitolo presenterò alcuni degli strumenti di analisi e simulazione che ho sviluppato per gli spettrografi ESPRESSO ed ELT-HIRES.

ESPRESSO: installazione ed allineamento al VLT

ESPRESSO è l'acronimo di Echelle SPectrograph for Rocky Exoplanet Super-Stable Observations (PEPE *et al.*, 2014), ovvero è uno spettrografo *echelle* progettato per osservazione di pianeti rocciosi (e simili alla terra) ed osservazioni super-stabili. È stato installato fra settembre 2017 e settembre 2018 presso il complesso di telescopi Very Large Telescope (VLT) di ESO a Cerro Paranal in Cile ad una altitudine di 2635 m. VLT si compone di quattro telescopi ottici identici (chiamati genericamente UT, Unit Telescope) aventi lo specchio primario di 8,2 m di diametro.

Fra le caratteristiche peculiari di ESPRESSO, alcune sono impressionanti: potere di risoluzione spettrale massimo pari a circa 240.000 (max degli altri spettrografi ad alta risoluzione fino ad ora costruiti è di circa 130.000), la precisione strumentale in termini di velocità radiale (RV, si veda l'introduzione) massima è di circa 10 cm/s e, in una modalità operativa fra le tre a sua disposizione, sarà il primo strumento al mondo a poter combinare la luce da tutti e quattro i telescopi del VLT, facendolo diventare il telescopio ottico più grande al mondo con un diametro equivalente di 16 m (il più grande attualmente era il Gran Telescopio Canarias da 10,4 m). Per questo è installato in una stanza sotterranea del complesso del VLT (chiamata Combined Coudé Laboratory) dove vengono convogliati, attraverso dei tunnel, tutti i fasci di luce provenienti dai singoli telescopi (FIG. 4).

Uno specifico sotto-sistema dello strumento (chiamato *Front-End*) raccoglie la luce proveniente dai tunnel e, attraverso una serie di componenti ottici, la convoglia a diverse fibre ottiche ognuna delle quali è relativa a un modo operativo dello strumento. Le fibre ottiche portano la luce al sotto-sistema spettrografo, ovvero la parte dello strumento che ha la stessa funzione di un classico spettrografo, e cioè dividere la luce nelle sue lunghezze d'onda costituenti. La banda di lavoro dello strumento va da 380 nm a 780 nm. Nel sotto-sistema spettrografo, di cui un rendering è mostrato in FIG. 5, il cono di luce in uscita dalle fibre viene raccolto da uno specchio, il

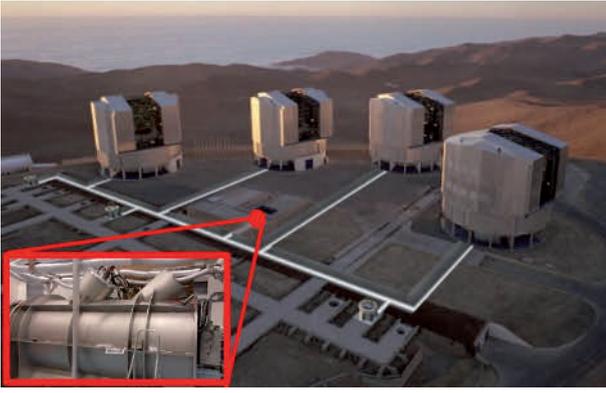


FIG. 4. Complesso Very Large Telescope a Cerro Paranal in Cile. Sono visibili le cupole dei quattro telescopi. In rosso è evidenziata la posizione approssimata del laboratorio sotterraneo dove ESPRESSO raccoglie la luce dai quattro telescopi. Nel riquadro rosso, una foto fatta dall'Autore della struttura meccanica che contiene tutti i componenti ottici del sotto-sistema spettrografo.

collimatore principale, che lo collima verso l'elemento di dispersione principale. Questo componente, che negli spettrografi ad alta risoluzione è un reticolo di diffrazione *echelle*, è il componente che permette di dividere la luce nelle diverse lunghezze d'onda (ovvero il ruolo giocato da un prisma in uno spettrografo "classico"). La luce, così scomposta, passa attraverso un componente ottico che permette di tagliare in due il *range* di lunghezze d'onda, riflettendo la luce fino a circa 525 nm (che continua il suo percorso nella parte "blu" dello strumento) e trasmettendo la luce sopra i 525 nm (che continua il suo percorso nella parte "rossa" dello strumento). La parte blu e la parte rossa del sotto-sistema spettrografo sono analoghe e prevedono: un secondo specchio che collima la luce verso un secondo elemento ottico di dispersione, che agisce in direzione perpendicolare al reticolo di diffrazione *echelle*, e infine una serie di lenti che proiettano le diverse lunghezze d'onda in posizioni diverse di un rivelatore. I rivelatori, attraverso i *pixel* e il sistema di lettura, possono così raccogliere i fotoni di tutte le diverse lunghezze d'onda risolte dallo strumento.

ESPRESSO, grazie alle sue caratteristiche e diversi modi operativi, giocherà un ruolo importante in svariate aree dell'astrofisica, quali: ricerca e caratterizzazione di pianeti extra-solari rocciosi analoghi alla Terra, studio della composizione chimica delle stelle, studio dei modi di vibrare del gas stellare (branca definita astero-sismologia), composizione chimica del mezzo inter-galattico e variazione delle costanti fondamentali dell'universo (la costante di struttura fine α e quella di rapporto fra massa del protone e dell'elettrone μ).

Oltre alla fase di progettazione, un'altra fase fondamentale per "portare alla vita" uno strumento è quella del montaggio e allineamento dei componenti ottici e meccanici. Senza un corretto allineamento e appropriati sistemi di verifica e interpretazione di come le *performance* dello strumento variano a seconda dell'allineamento dei singoli componenti, il rischio che lo strumento non rispet-

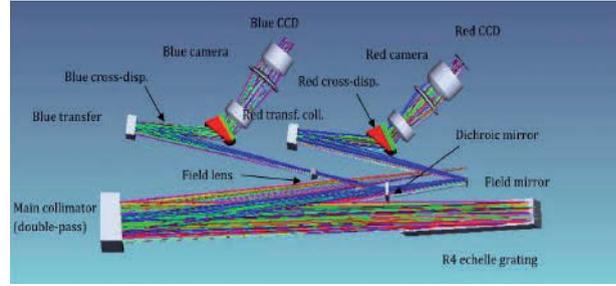


FIG. 5. Rendering del sotto-sistema spettrografo di ESPRESSO. È evidenziato il percorso che compie il fascio ottico e il nome (in inglese) di tutti gli elementi ottici. Si possono distinguere i due "bracci" dello spettrografo, ovvero quello blu che lavora da 380 a 525 nm, e quello rosso che lavora da 525 fino a 780 nm.

ti i requisiti di funzionamento per i quali è stato progettato è elevato. A titolo di esempio, un non corretto allineamento del reticolo *echelle* di circa 0,015 gradi attorno al suo asse verticale provoca uno spostamento delle varie lunghezze d'onda sul detector di circa 50 *pixel*; oppure un disallineamento del collimatore principale lungo il proprio asse *z* (perpendicolare alla superficie) di circa 1 mm degrada la qualità dell'immagine, facendo perdere allo strumento la sua capacità di risoluzione spettrale.

Nel mio percorso di dottorato ho avuto la fortuna di lavorare nel team di ESPRESSO e ho partecipato sia alle diverse fasi di *test* condotte all'osservatorio astronomico di Ginevra, sia all'installazione dello strumento al VLT. Ho sviluppato alcuni *tool* di simulazione per la verifica delle *performance*, l'ottimizzazione di alcuni componenti come parte delle lenti della camera nel ramo rosso, e simulazioni per coadiuvare la fase di allineamento. In particolare, per quest'ultimo aspetto è stato simulato, sfruttando e combinando le capacità di un software di tracciamento dei raggi di luce ed uno di calcolo matematico, l'effetto che il disallineamento dei vari componenti ha rispetto alla posizione delle diverse lunghezze d'onda sul rivelatore (GENONI *et al.*, 2016). Sfruttando questo lavoro è stato possibile per esempio centrare correttamente sul detector le varie lunghezze d'onda della parte blu dello spettrografo, come mostrato in FIG. 6.

ELT-HIRES: modellazione parametrica per la progettazione

Lo spettrografo ELT-HIRES (acronimo di High Resolution Spectrograph for the Extremely Large Telescope; OLIVA *et al.*, 2018) può essere considerato il futuro successore di ESPRESSO ed è attualmente nelle prime fasi di studio e progettazione. Situato a Cerro Armazones (Cile) ad un'altitudine di circa 3000 m, la costruzione della struttura principale a cupola di ELT è avvenuta nel maggio 2017 e la prima luce è attualmente prevista per il 2024. ELT sarà il più grande telescopio per osservare in luce visibile e infrarossa, con uno specchio primario di 39 m composto da 798 specchi esagonali della dimensione massima di 1,4m.

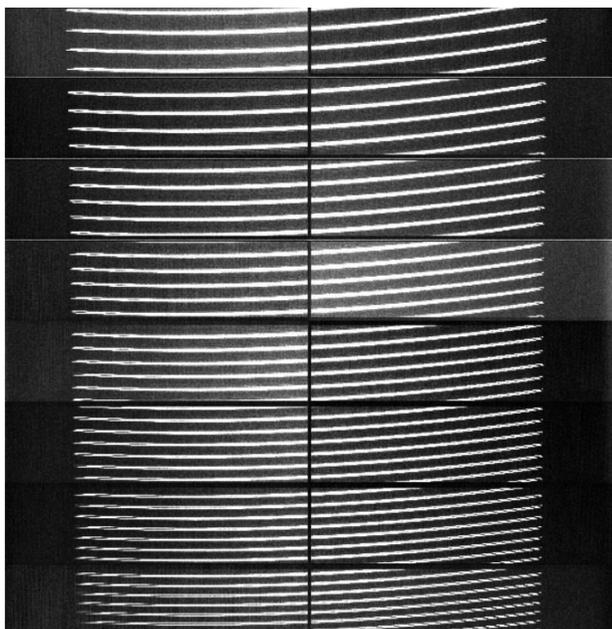


FIG. 6. Immagine del rivelatore della parte blu dello spettrografo ESPRESSO, dopo il corretto allineamento delle lunghezze d'onda sul rivelatore stesso. La traccia delle diverse lunghezze d'onda è data dalle curve bianche.

I casi scientifici che verranno indagati con *ELT-HIRES* (MARCONI *et al.*, 2016) saranno simili a quelli di *ESPRESSO*, data la natura simile di strumento, con le seguenti particolarità: grazie all'area di *ELT* si potranno osservare oggetti molto più profondi (lontani) nel cielo, lo strumento sarà in grado di osservare almeno fino al vicino infrarosso (1800 nm) e grazie ad alcune modalità operative previste sarà in grado di studiare sistemi planetari in fase di formazione ed evoluzione, caratterizzare la struttura del gas primordiale successivamente all'epoca della re-ionizzazione dell'universo e cercare segni di attività biologica su pianeti extra-solari (per citare solo alcuni interessanti casi scientifici "slegati" fra loro, con ovvia sottolineatura per l'impatto che avrebbe a livello culturale la scoperta di "segni di vita" altrove).

Il fatto di poter/dover processare la luce raccolta da un telescopio di classe 40 m implica una serie di complessità a livello tecnologico e di progettazione dello strumento al fine di garantire prestazioni di alta risoluzione (requisito per *ELT-HIRES* è potere risolutivo > 100.000) mantenendo le dimensioni dei componenti ottici in un *range* fattibile per fabbricazione, complessità di allineamento e, non meno importante, costo. Una delle soluzioni che sono state considerate e studiate nella fase di progettazione iniziale dello strumento (anche qui senza entrare in eccessivi dettagli e tecnicismi) è quella che prevede di campionare la luce sul piano focale del telescopio con un gruppo di fibre ottiche, ognuna delle quali preleva la luce da una porzione dell'immagine dell'oggetto osservato. Successivamente, le fibre vengono allineate una sopra l'altra in modo da formare una sorta di fenditura e vengono collegate all'ingresso dello spettrografo. In questo modo si diminuisce la dimensione orizzontale (seppur, ovvia-

mente, aumenta quella verticale) del fascio di luce che entra nello strumento ed è possibile raggiungere il requisito di potere risolutivo, mantenendo le dimensioni dei componenti entro limiti di capacità di fabbricazione (per curiosità del lettore basti pensare che, se non si utilizzasse questo trucco, il reticolo di dispersione principale *echelle* dovrebbe avere dimensioni di circa 10 m!).

Nel percorso di dottorato ho avuto la possibilità di collaborare con il team di progettazione dello spettrografo ed ho sviluppato un modello parametrico dello stesso (GENONI *et al.*, 2016b) basato sulle equazioni che descrivono e caratterizzano il comportamento dei diversi elementi ottici. La potenzialità di questo modello è la velocità e flessibilità con la quale si possono esplorare diverse soluzioni progettuali, andando a combinare i diversi parametri di progetto legati agli specifici elementi ottici (quali ad esempio il numero di fibre ottiche, i parametri di lavoro del reticolo di diffrazione, la dimensione degli elementi della camera e il numero di *pixel* del rivelatore per citarne solo alcuni). È quindi possibile analizzare in modo sistematico e completo lo spazio dei parametri, per studiare il *range* entro cui questi possono variare e il loro impatto sulle diverse possibili soluzioni di *design*.

Un esempio di come è stato utilizzato questo modello è presentato in FIG. 7, dove viene graficato il numero di reticoli di diffrazione necessari a disperdere tutta la luce in funzione del numero di fibre ottiche, parametrizzando per i parametri di lavoro del reticolo (angolo di inclinazione rispetto al fascio incidente e numero di linee incise sul reticolo, parametro che influenza la capacità disperdente). Il risultato è che con 26 fibre ottiche per oggetto è possibile definire un mosaico di reticoli di diffrazione che si compone di 4×1 reticoli, al limite della capacità di allineamento e costo. Il lettore osserverà che aumentando il numero di fibre ottiche diminuisce il numero di reticoli necessari, ma ciò comporterebbe un aumento del numero di rivelatori, con conseguenti complicazioni di funzionamento, costo e analisi dati.

Il simulatore End-to-End per lo spettrografo ELT-HIRES

Differenti campi dell'astrofisica stanno entrando in una nuova era, dove le capacità di rilevamento del segnale verranno spinte a livelli di sensibilità mai raggiunte in precedenza. Come anticipato, nel contesto della scienza esoplanetaria, la caratterizzazione atmosferica tramite spettroscopia ad alta risoluzione con grandi telescopi – con l'obiettivo di rilevare i segnali di poche ppm di ampiezza che un pianeta simile alla Terra sovrappone alla radiazione emessa da una stella simile al solare – o la possibile rilevazione di attività biologiche su esopianeti sono solo alcuni degli esempi più affascinanti. Però, la misurazione di questi segnali è estremamente impegnativa sia per i processi fisici che influenzano queste proprietà, sia per la progettazione, l'ottimiz-

zazione, la caratterizzazione e complessità della strumentazione richiesta. I limiti della nostra conoscenza e comprensione dell'universo verranno superati grazie a strutture osservative via via più complesse in termini di tecnologie, modalità operative e strumenti sempre più flessibili ed eterogenei.

Risulta fondamentale (e lo sarà maggiormente in futuro) dotarsi di strumenti di modellazione e simulazione che rendano possibile valutare, con la maggiore accuratezza possibile, l'impatto che le diverse soluzioni progettuali possono avere sul funzionamento e sulle performance della strumentazione (per esempio LI CAUSI *et al.*, 2014, o GOODWIN *et al.*, 2010). Inoltre, un'accurata modellazione e predizione delle performance degli strumenti è determinante nell'ottimizzare il ritorno scientifico delle osservazioni che vengono pianificate.

Tali strumenti di modellazione sono chiamati simulatori *End-to-End*, e si propongono di modellare fisicamente tutta la catena osservativa: dalla radiazione emessa dall'oggetto astrofisico di interesse fino alla matrice di dati prodotta dai rilevatori. Questi dati sono poi quelli che vengono processati da altri *software*, chiamati genericamente *software* di riduzione dati (acronimo inglese DRS), che permettono di tradurre l'informazione contenuta nei *pixel* del rilevatore in un formato utile all'analisi e comprensione fisica di ciò che si è osservato.

In questo ambito il mio contributo è stato quello di sviluppare una prima versione del simulatore *End-to-End* per lo strumento ELT-HIRES, direttamente fin dalle prime fasi progettuali. È stata definita l'architettura generale del simulatore, con particolare attenzione a fattori fondamentali per la sua progettazione e sviluppo, quali: flessibilità, modularità e velocità di calcolo. Questi aspetti risultano essenziali per poter simulare uno strumento complesso come ELT-HIRES, i suoi differenti modi operativi e gli svariati scenari scientifici in modo accurato e veloce. Sono stati modellati i differenti moduli che compongono il simulatore (GENONI *et al.*, 2018), e cioè: la radiazione emessa dall'oggetto osservato (sfruttando anche il simulatore di spettri in trasmissione descritto in precedenza), il telescopio, le diverse unità dello strumento. Il risultato finale, presentato con un esempio in FIG. 8, è la generazione di una immagine sintetica (simulata) di ciò che dovrebbe produrre lo strumento in termini di fotoni raccolti dai singoli *pixel* del rivelatore.

Un aspetto fondamentale per la generazione di questo risultato è legato alla potenza di calcolo richiesta e all'architettura computazionale del simulatore. Questa infatti, per ottimizzare il tempo di calcolo, è basata sul paradigma di calcolo parallelo e distribuito (LANDONI *et al.*, 2018). Infatti, per poter

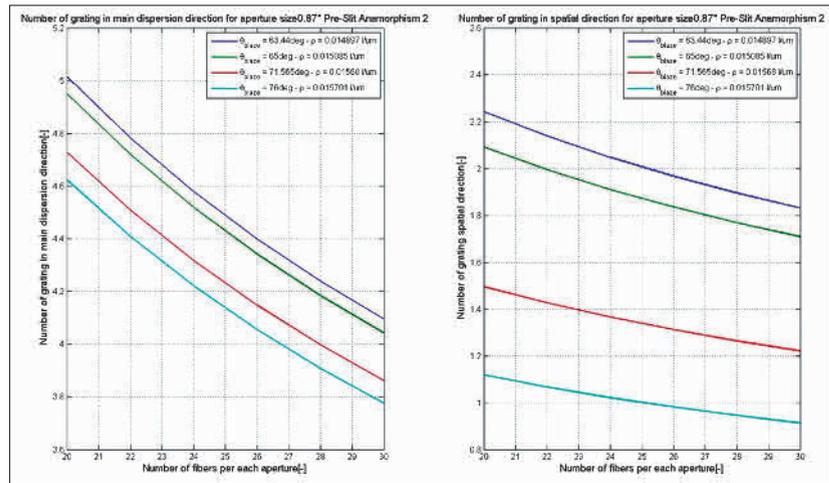


FIG. 7. Esempio dei risultati ottenuti applicando il modello parametrico ad ELT-HIRES. Numero di reticoli di diffrazione, in direzione orizzontale e verticale, necessari a disperdere tutta la luce in funzione del numero di fibre ottiche, parametrizzando per i parametri di lavoro del reticolo (angolo di inclinazione rispetto al fascio incidente e numero di linee incise sul reticolo). Come si può notare, solo il reticolo definito dai parametri di angolo di lavoro pari a 76 gradi e densità di linee pari a $0,0158 \text{ l}/\mu\text{m}$ (curva in color ciano) permette di richiedere meno di un reticolo in direzione verticale, con un numero di fibre ≥ 26 .

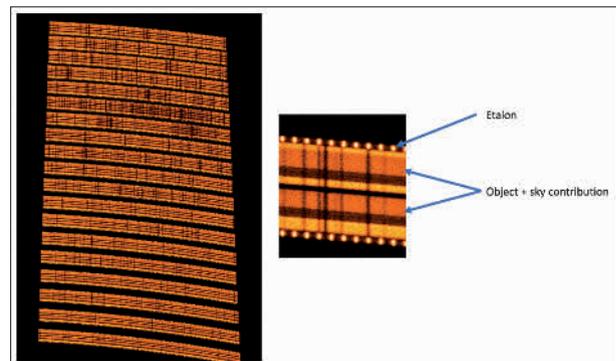


FIG. 8. Esempio di un'immagine sintetica (simulata) in una banda di lunghezza d'onda dello spettrografo ELT-HIRES, prodotta con il simulatore *End-to-End*. Nel riquadro più piccolo viene mostrato uno zoom di una regione dove è possibile vedere la luce proiettata relativa alle diverse fibre ottiche allineate una sopra l'altra (dove viene indicato con la freccia blu il termine "Object + Sky contribution") e della luce delle fibre di calibrazione dello strumento (indicate con la freccia blu e la dicitura *Etalon*).

simulare tutte le lunghezze d'onda nelle diverse fibre sono stati sviluppati degli algoritmi di convoluzione di immagini che sfruttano la potenza di calcolo parallelo, offerta dalle moderne unità di elaborazione grafica, e del calcolo distribuito. Le unità di elaborazione grafica (note come GPU, dall'inglese Graphics Processing Unit) sono presenti nelle moderne schede grafiche dei computer (in parole povere, quelle unità che permettono una visualizzazione delle grafiche e dei videogiochi così realistiche). Mentre la logica del calcolo distribuito (nota in inglese come *Cloud Computing*) è implementata sfruttando servizi quali Amazon Web Services che, senza entrare eccessivamente nel dettaglio, permettono di dividere il totale delle operazioni che un *software* deve eseguire su più computer virtuali. In sostanza, differenti aree dell'immagine sono state generate da differenti macchine virtuali nel *cloud*, le quali hanno eseguito codici scritti per

poter sfruttare le unità di elaborazione grafica presenti su ognuna di esse.

Questa immagine simulata è stata inoltre processata dal *software* di riduzione dati di uno strumento che ha delle caratteristiche analoghe ad ELT-HIRES, per provare a testare preliminarmente la scalabilità ed adattabilità dei suoi algoritmi anche alle immagini prodotte da ELT-HIRES. Il risultato è stato positivo, in quanto il *software* è riuscito a riconoscere la variazione del numero dei fotoni fra le diverse fibre e alle diverse lunghezze d'onda.

Va sottolineato che, sebbene questo sia un primo passo verso il completo sviluppo di un simulatore *End-to-End* e del software di riduzione dati dedicato per uno strumento della complessità di ELT-HIRES che si propone di misurare segnali estremamente piccoli, i risultati raggiunti fino ad ora sono fondamentali per il proseguo dell'implementazione di questi *tool* di simulazione e della progettazione dello strumento stesso.

Conclusioni

Nel campo della scienza dei pianeti extra-solari, gli spettrografi ad alta risoluzione e alta stabilità accoppiati a grandi telescopi sono alcuni degli strumenti fondamentali per la scoperta di pianeti simili alla Terra e per lo studio generale delle atmosfere delle diverse tipologie di pianeti stessi. I segnali che questi strumenti si propongono di misurare sono però molto piccoli e complessi. Risulta quindi fondamentale dotarsi di strumenti di simulazione che siano in grado di modellare con accuratezza gli strumenti e che possano essere utilizzati in modo efficiente per la comprensione e ottimizzazione strumentale e delle analisi scientifiche correlate per massimizzare le possibilità di nuove e corrette scoperte.

In particolare è stato presentato un *tool* di simulazione di spettri in trasmissione delle atmosfere esoplanetarie, per valutare l'effetto di contaminazione di oggetti di fondo, la cui radiazione può essere catturata dai grandi telescopi. Le analisi hanno evidenziato che la massima contaminazione si ha per stelle di fondo di classe spettrale simile a quella della stella principale, mentre nella simulazione dell'osservazione del sistema HD 189733 l'individuazione dell'atmosfera non è stata influenzata dalla presenza fittizia di una contaminante.

Per quanto riguarda gli spettrografi ESPRESSO ed ELT-HIRES i diversi strumenti di simulazione sono stati brevemente presentati, mostrando l'efficacia con cui sono stati sfruttati rispettivamente per la parte di allineamento dello strumento e di progettazione.

Referenze bibliografiche

- M. GENONI, M. RIVA, G. PARIANI, *et al.*, *Spectrograph sensitivity analysis: an efficient tool for different design phases*. «Proc. SPIE 9908, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI», 2016, 9908, 99086Z.
- M. GENONI, M. RIVA, G. PARIANI, *et al.*, *Optical parametric evaluation model for a broadband high resolution spectrograph at E-ELT (E-ELT HIRES)*. «Proc. SPIE 9911, Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy VI», 2016, 99112, 99112L.
- M. GENONI, M. LANDONI, M. RIVA, *et al.*, *ELT-HIRES, the high resolution spectrograph for the ELT; end-to-end simulator: design approach and results*. «Proc. SPIE 10705, Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy VIII», 2018, 10702, 1070514.
- M. GOODWIN, S. SMEDLEY, S. BARNES, *et al.*, *Data simulator for the HERMES instrument*. «Proc. of SPIE 7735, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III», 2010, 7735, 77357U.
- M. LANDONI, M. GENONI, M. RIVA, A. BIANCO, A. CORINA, *Application of cloud computing in astrophysics: the case of Amazon Web Services*. «Proc. SPIE 10707, Software and Cyberinfrastructure for Astronomy V», 2018, 10707, 107070G.
- G. LI CAUSI, A. CABRAL, *et al.*, *“Virtual MOONS”, a focal plane simulator for the MOONS thousand-fiber NIR spectrograph*. «Proc. SPIE 9147 Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V», 2014, Vol. 9147, 914764.
- M. MAYOR, D. QUELOZ, *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*. «Nature», 1995, 378, 355.
- A. MARCONI, P. DI MARCANTONIO, V. D'ODORICO, *et al.*, *E-ELT-HIRES the high-resolution spectrograph for the E-ELT*. «Proc. SPIE 9908, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI», 2016, 9908, 990823.
- E. OLIVA, A. TOZZI, D. FERRUZZI, *et al.*, *ELT-HIRES the high resolution instrument for the ELT: optical design and instrument architecture*. «Proc. SPIE 10702, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII», 2018, 10702, 1070280.
- A. PALACIOS, M. LEBRE, M. SANGUILLON, *Pollux database - User guide*. Version 7-March 2015. 2015.
- F. PEPE, P. MOLARO, S. CRISTIANI, *et al.*, *ESPRESSO: The next European exoplanet hunter*. «Astronomische Nachrichten», 2014, 335, issue 1, 8.
- L. PINO, D. EHRENREICH, *et al.*, *Combining low-to-high-resolution transit spectroscopy of HD 189733b. Linking the troposphere and the thermosphere of a hot gas giant*. «Astronomy & Astrophysics», 2018, 612, A53.
- I.A.G. SNELLEN, R.J. DE KOK, *et al.* *The orbital motion, absolute mass, and high-altitude winds of exoplanet HD 209458b*. 2010. «Nature», 2010, 465, 1049-1051.
- A. WYTENBACH, D. EHRENREICH, C. LOVIS, *et al.*, *Spectrally resolved detection of sodium in the atmosphere of HD 189733b with the HARPS spectrograph*. «Astronomy & Astrophysics», 2015, 577, A62.

Matteo Genoni, è nato a Legnano (MI) il 27 gennaio 1989. Ha conseguito il Dottorato di ricerca in Fisica ed Astrofisica presso l'Università degli Studi dell'Insubria nel marzo 2018. Attualmente è assegnista di ricerca presso l'Osservatorio Astronomico di Brera-Merate, dove si occupa principalmente di simulazioni per spettrografi ad alta risoluzione nel campo degli esopianeti.

Rosetta: la prima osservazione dell'interno ghiacciato di un nucleo cometario*

Maurizio Pajola

INAF · Osservatorio Astronomico di Padova

IL 30 settembre 2016 la missione spaziale europea Rosetta si è conclusa ufficialmente con un atterraggio “controllato” sulla superficie della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. Quel giorno è stato la fine di più di venticinque anni di studio, sviluppo, realizzazione, lancio, trasferimento interplanetario ed orbita attorno alla 67P, ma ha portato alla definitiva consacrazione di quella che può essere considerata una delle sonde spaziali di più grande successo realizzate dall'Umanità intera per l'esplorazione dei corpi minori del Sistema solare.

Lo scopo di Rosetta era squisitamente scientifico e prevedeva di orbitare per la prima volta attorno ad un nucleo cometario quando questo si fosse trovato ancora distante dal Sole (a circa quattro volte la distanza Terra-Sole), di vedere come la superficie cometaria si “accendesse”, portando alla formazione dei famosi getti cometari e alla nascita della sua chioma e coda nell'avvicinamento al Sole, di sganciare sulla superficie della 67P il *lander* Philae, che potesse trivellare ed analizzare la superficie cometaria da pochi centimetri di distanza, ed infine di identificare i maggiori cambiamenti superficiali avvenuti sul nucleo durante il suo passaggio al perielio, cioè al punto di maggiore avvicinamento della cometa al Sole (nel caso della 67P poco più della distanza alla quale si trova la Terra dal Sole).

Tutti questi interrogativi, infatti, erano ancora aperti prima della missione Rosetta, nonostante vi fossero state diverse sonde spaziali europee (Giotto) ed americane (Deep Space 1, Stardust, Deep Impact/EPOXI) che avevano sorvolato ed osservato, ma solo per poche ore, altri nuclei cometari. Al contrario, grazie alla complessa strumentazione scientifica a bordo sia di Rosetta, che di Philae, a molte di queste domande sono state fornite importanti risposte.

* In questo articolo, l'Autore presenta i contenuti essenziali delle ricerche che gli hanno valso il “Premio Giuseppe Lorenzoni” per l'anno 2018 - 11 edizione, consegnato durante il LXII Congresso Nazionale della SAIt, tenutosi a Teramo 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 2015/17.

Tra tutte le scoperte scientifiche compiute da Rosetta ce n'è una in particolare che per dimensioni non ha confronti: il rovinoso crollo della parete di Aswan, il cui studio ha portato alla pubblicazione su *Nature Astronomy* dell'articolo di PAJOLA *et al.* (2017), all'ottenimento della copertina del giornale nell'edizione di marzo 2017 e, in seguito, al conseguimento da parte dell'autore di questo articolo del Premio “Giuseppe Lorenzoni” per l'anno 2018, indetto dalla Società Astronomica Italiana e dall'Osservatorio Astronomico di Padova, grazie alla sponsorizzazione di Officina Stellare (www.officinastellare.com).

La parete di Aswan è localizzata sul lobo principale della 67P, rivolto in direzione del “collo” della cometa (FIG. 1: A, B). Questa zona ha destato l'attenzione dei ricercatori di Rosetta fin dalle prime immagini ad alta risoluzione ottenute dalla fotocamera scientifica OSIRIS, in quanto era caratterizzata da una profonda frattura, larga almeno un metro e lunga settanta metri, situata proprio sul bordo della parete (FIG. 1: C). Il pezzo di parete cometaria di Aswan era così esposto ed aggettante che sembrava pronto a staccarsi e a cadere rovinosamente 140 m più in basso.

Dopo mesi di attente e difficili osservazioni, cercando di identificare qualunque tipo di cambiamento che accennasse ad un possibile crollo, questo è finalmente avvenuto un mese prima del passaggio della cometa al suo perielio, precisamente il 10 luglio 2015 (FIG. 2).

La scoperta è stata fatta grazie ad una immagine di OSIRIS ripresa sulla zona il 15 luglio 2015, in cui si vedeva l'apparizione di una estesa “chiazza bianca” sulla parete, non presente precedentemente (FIG. 2: A-C). Attraverso lo studio spettrofotometrico compiuto per decifrarne la natura di questa, si è compreso che in realtà la “chiazza” era composta da ghiaccio d'acqua direttamente esposto in superficie dopo il crollo di Aswan e quello che gli scienziati stavano osservando per la prima volta era l'interno di un nucleo cometario. Grazie a questa osservazione, si è quindi riuscito a dimostrare che, nonostante i nuclei cometari siano particolarmente scuri sulla loro superficie, a causa della presenza di materiale organico (composti del carbonio), in realtà il loro interno è composto da ghiaccio d'acqua, così come ipotizzato in letteratura per molti anni.

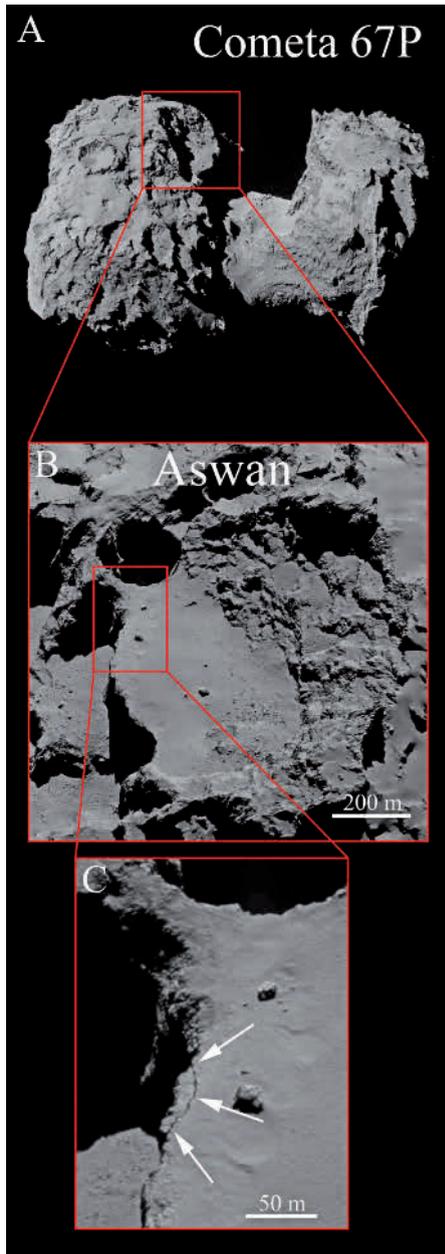


FIG. 1. A: La cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko e l'ubicazione del sito Aswan sul lobo maggiore. B: Il sito Aswan e l'area dove è presente la lunga frattura indicata con le frecce bianche in C. (Crediti: M. Pajola-ESA/Rosetta/MPS per OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA)

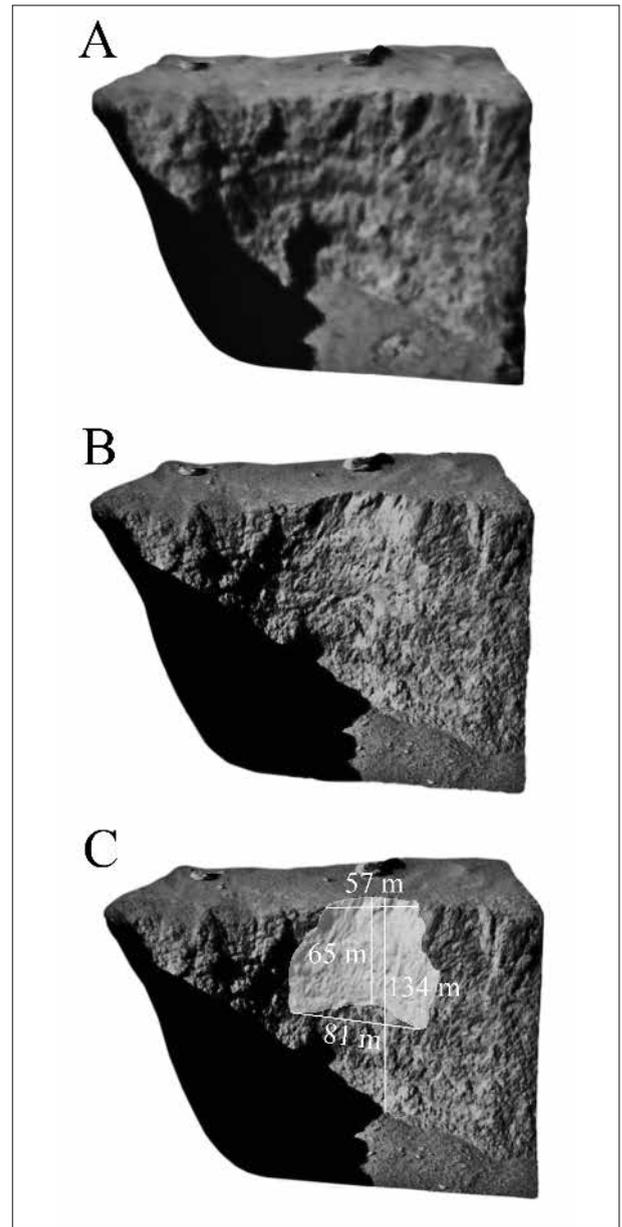


FIG. 3. A: La parete di Aswan osservata ad alta risoluzione prima del crollo. B: La parete di Aswan osservata dopo il crollo. C: Le dimensioni del blocco di parete cometaria distaccatosi il 10 luglio 2015 ottenute tramite il modello tridimensionale della cometa 67P. (Crediti: F. Scholten & F. Preusker, ESA/Rosetta/MPS per OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA)



FIG. 2. A: Il sito Aswan osservato il 4 luglio 2015, tramite la fotocamera OSIRIS a bordo di Rosetta, con identificata la regione della parete cometaria prima del crollo. B: Immagine ottenuta dalla Fotocamera di Navigazione (NavCam) di Rosetta il 10 luglio 2015. Con la freccia bianca è indicato il getto di polvere proveniente dalla parete di Aswan. C: La parete di Aswan osservata da OSIRIS il 15 luglio 2015, con la "chiazza" di ghiaccio esposta in superficie dopo il crollo. (Crediti 2A e 2C: M. Pajola-ESA/Rosetta/MPS per OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA; crediti 2B: ESA/Rosetta/NavCam – CC BY-SA IGO 3.0)

Questa importante scoperta però non è stata l'unica che Aswan ha permesso di fare agli scienziati. Infatti, per poter identificare l'esatto momento del crollo, il team di OSIRIS è andato a vedere le immagini della zona ottenute nei giorni precedenti e si è visto che il 4 luglio nessun ghiaccio era stato ancora esposto né alcun cambiamento superficiale era avvenuto. Nella ricerca minuziosa tra migliaia di immagini, due foto fatte il 10 luglio 2015 dalla *Navigation Camera* a bordo di Rosetta mostrarono un gigantesco getto di polvere cometaria, in gergo chiamato *outburst*, proveniente proprio dalla parete di Aswan (FIG. 2: B). Niente di tutto questo era stato osservato precedentemente e per la prima volta nell'osservazione di una cometa si è quindi riuscito a legare l'origine di un getto cometario al rovinoso crollo di una parete.

In seguito, è stata compiuta un'analisi termica della regione del crollo, con lo scopo di comprendere se fosse possibile che particolari stress termici dovuti all'illuminazione del Sole avessero potuto causarne il collasso. La modellizzazione termofisica della zona ha quindi indicato come proprio nel periodo del crollo (luglio 2015) la parete studiata fosse l'unica situata nell'emisfero nord della cometa soggetta a forti variazioni di illuminazione, a causa della sua particolare posizione. Gli imponenti stress termici su Aswan portavano ad avere variazioni di tempe-

ratura tra -140°C e 50°C in meno di 20 minuti ed un massimo di variazione di 30°C al minuto non appena il Sole sorgeva sull'area.

Questa analisi ha quindi suggerito, per la prima volta, la possibilità che locali e importanti variazioni di temperatura potessero modificare la superficie di una cometa, favorendovi la comparsa di fratture, e che queste poi riuscissero a propagarsi nell'interno del nucleo cometario veicolandone il calore solare. Questo innalzamento di temperatura all'interno della cometa ne avrebbe causato la diretta sublimazione del materiale volatile (CO , CO_2 , H_2O) sottosuperficiale con conseguenti esplosioni.

Grazie alla ricostruzione tridimensionale, tramite immagini ad alta risoluzione della parete di Aswan, si è quindi riuscito a determinare il volume che si è distaccato durante il crollo, ottenendo un valore di 22000 m^3 , pari a circa nove piscine olimpioniche (FIG. 3). Di questo volume circa l'1% è stato eiettato sotto forma dell'*outburst* osservato (FIG. 2: B), mentre il restante è andato a formare il deposito al piede della parete. Dallo studio della distribuzione in taglia dei massi situati sotto la parete si è quindi compreso che il blocco che è crollato ha generato massi di dimensioni non superiori a tre metri, dimostrando che i fenomeni di frammentazione dovuti a crolli di parete che si osservano su una cometa sono del tutto simili e comparabili a quelli terrestri.

Maurizio Pajola si è laureato in Astronomia presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova ed ha conseguito nel 2014 il titolo di Dottore di ricerca in Astronautica e Scienza da Satellite tra il Centro Interdipartimentale di Studi ed Attività Spaziali (CISAS) dell'Università di Padova ed il NASA-JPL a Pasadena, California. Dopo il dottorato è stato ricercatore presso il NASA Ames Research Center a Moffett Field, California, ed ha poi iniziato a lavorare come ricercatore presso INAF – Osservatorio Astronomico di Padova, cui è tuttora affiliato. Si occupa di planetologia e la sua ricerca attuale riguarda lo studio morfologico e mineralogico della superficie dei pianeti Marte e Mercurio, della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko e del satellite marziano Phobos. È coinvolto nelle missioni Rosetta, ExoMars e BepiColombo e nella missione NASA OSIRIS-REX. Da cinque anni partecipa all'identificazione dei siti di atterraggio per i rover NASA ed ESA su Marte.

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

Sezione didattica del LXII Congresso Nazionale della SAI - Teramo 2018

A cura di Christian del Pinto, Andrea Cittadini Bellini

Occasioni per la didattica della filosofia: *Indicazioni nazionali, epistemologia e astronomia**

Franco Gallo

MIUR · Ufficio scolastico regionale per la Lombardia

CON la presente comunicazione toccherò brevemente la problematica delle opportunità didattiche offerte alla filosofia nel quadro delle rinnovate *Indicazioni nazionali* e degli *Orientamenti* per la loro applicazione recentemente proposti dal MIUR e in fase di analisi e discussione,¹ con particolare riferimento alla dimensione epistemologica privilegiabile nell'insegnamento della filosofia e agli spunti in ciò recuperabili dall'astronomia e dall'astrofisica.

La premessa logica è che, pur nella persistenza di un quadro di carattere storico come scenario di contestualizzazione, le *Indicazioni Nazionali* e, con ancor maggior vigore, gli *Orientamenti per l'apprendimento della Filosofia nella società della conoscenza* ci chiedono di muoverci da una dimensione della didattica della filosofia come memoria storica di se stessa a una crescente funzionalizzazione del suo apprendimento a insegnare a pensare e problematizzare, non soltanto a costruirsi un corredo di conoscenze di carattere storico-culturale.

* NdR: nel pubblicare questo articolo, ci rendiamo conto che presenta aspetti di carattere filosofico ed epistemologico di non immediata comprensione per un pubblico di non esperti in quelle discipline, essendo questa una rivista di divulgazione astronomica. Tuttavia, si è ritenuto di pubblicarlo nella sua interezza, sia perché rispetta ed amplia quanto esposto dall'Autore nella sezione didattica del Congresso della SAI (ed è nello stile del *Giornale di Astronomia* non intervenire sui testi degli autori), sia perché presenta, comunque, numerosi spunti di discussione che possono fornire agli insegnanti utili occasioni di approfondimento in classe, all'interno di percorsi didattici interdisciplinari.

¹ Per le *Indicazioni nazionali*, cfr. www.gazzettaufficiale.it/gu-newsletter/dettaglio.jsp?service=1&datagu=2010-12-14&task=dettaglio&numgu=291&redaz=010G0232&tmstp=1292405356450 e relativi allegati (link consultato 01.05.2018). Gli *Orientamenti* sono stati diffusi con nota MIUR AOO DGOSV 16914 del 19.12.2017; disponibili a www.miur.gov.it/-/documento-orientamenti-per-l-apprendimento-della-filosofia-nella-societa-della-conoscenza (link consultato 01.05.18).

Gli *Orientamenti*, interpretando le *Indicazioni*, affermano:

Come noto, a seguito del riordino dei licei l'insegnamento della filosofia è parte integrante e caratterizzante di tutti gli indirizzi liceali. In generale, essi mirano a promuovere un atteggiamento "razionale, creativo, progettuale e critico" e hanno in comune i seguenti esiti formativi:

- consapevolezza della "diversità dei metodi utilizzati dai vari ambiti disciplinari";
- capacità di "interconnettere" metodi e risultati delle "singole discipline";
- capacità di "sostenere una propria tesi e saper ascoltare";
- capacità di "ragionare con rigore logico";
- capacità di "interpretare criticamente" le diverse forme di comunicazione;
- "comprensione dei diritti e dei doveri" propri della condizione di cittadino;
- capacità di collocare lo sviluppo della storia della scienza e della tecnologica "nell'ambito più vasto della storia delle idee";
- acquisizione della strumentazione adeguata per confrontare le diverse tradizioni culturali.²

Tutto ciò nel quadro della conseguente necessità di rafforzare diversi elementi auspicabili nella prassi didattica, quali "la dimensione critico-riflessiva del pensiero filosofico come strumento per il potenziamento della capacità di pensare e giudicare" e "la correlazione della tradizione culturale della filosofia con quella delle discipline linguistico-letterarie e scientifiche".³

A questo proposito, con la proposta di una sillabazione della disciplina, gli orientamenti mirano tra

² *Orientamenti* cit., p. 8.

³ *Ibidem*, p. 9.

l'altro a stimolare i docenti a individuare nella proposta di specifici temi teorici quegli elementi culturali che, *montati e offerti in percorsi didattici*, contribuiscono alla costruzione delle competenze previste dal profilo in uscita degli studenti dei diversi licei.⁴

Sulla base di quanto sopra, riflettiamo su alcune possibilità offerte alla didattica dalle problematiche epistemologiche proprie dell'astronomia e dell'astrofisica, per individuare come organizzarle in vista della costruzione delle competenze degli studenti.

Affermano infatti i menzionati *Orientamenti* che la "consapevolezza degli orizzonti problematici della gnoseologia" è una delle dimensioni cui lo studio della filosofia deve proporsi di rispondere, per convergere così sull'obiettivo di apprendimento del comprendere il "significato teoretico e sociale", tra l'altro dei problemi filosofici, e realizzarlo nello sviluppare nello studente come il "saper identificare problemi e argomenti pertinenti" al "comprendere scenari complessi", mettendo in campo abilità come il "dedurre, classificare, sistematizzare e documentare"; cercheremo dunque di identificare aspetti della problematica filosofica contemporanea nei quali la riflessione filosofica si sostanzia dal rapporto con l'astrofisica e la cosmologia e in relazione a queste ultime stimola oggi l'apprendimento a confrontarsi con documentate e organizzate interazioni vitali tra le diverse discipline. Ne esce così una sorta di proposta di syllabo della rilevanza per la filosofia e l'epistemologia della ricerca astrofisica e cosmologica, utilizzabile in fase di programmazione per discutere tre punti centrali della problematica epistemologica moderna: la ricostituzione della cosmologia come scienza, la rivoluzione filosofica e scientifica della relatività e la sua reinterpretazione epistemologica, la frontiera moderna dell'osservazione del cosmo nel suo rapporto con la *computer science*.

La ricostituzione della cosmologia come scienza: universalità delle leggi della fisica, omogeneità dell'universo e natura non peculiare o privilegiata del punto di vista della Terra per la osservazione di quest'ultimo

Questa dimensione può essere facilmente assunta dal docente non solo in riferimento alle cosmologie antiche, per contrasto con alcune loro posizioni, ma anche come chiave del passaggio alla visione del mondo moderna, in cui viene a costituirsi un sistema naturale di scienze dell'uomo,⁵ a tendenza fisico-meccanicistica, proprio perché l'osservazione dell'isotropia dell'universo e l'universalità delle sue

⁴ www.miur.gov.it/documents/20182/0/Documento+Orientamenti+per+l%27apprendimento+della+Filosofia/c48d277c-23e9-4832-8fb3-bae0d68390d6?version=1.0, file zip, Allegato B.

⁵ L'espressione deriva da Wilhelm Dilthey e connota l'impostazione dell'antropologia di matrice cartesiana e spinozista.

leggi autorizzano al *transfert* delle stesse dall'immensamente grande al piccolo, dallo spazio cosmico al corpo e alla mente umana.

L'aspetto fondamentale ricavabile da questo passaggio, troppo noto e discusso per indugiarsi, è comunque quello dell'integrazione organica dell'astronomia nella fisica generale, e quindi la costruzione di un ponte verso un sapere dell'ordine del cosmo fondato nell'omogeneità di leggi matematiche e modelli causali di validità universale.⁶

Più interessante, nel quadro di una proposta innovativa, è allora affrontare il problema all'altezza della crisi dei fondamenti, quando, dopo la condanna della cosmologia come scienza speculativa da parte di Kant e del positivismo, sulla soglia del costituirsi di una nuova dimensione della cosmologia come scienza di precisione, si sviluppa un dibattito che reinquadra l'osservazione del cosmo su una base sperimentale.

La cosmologia del positivismo

Nel positivismo il problema cosmologico venne posto in due modi essenzialmente diversi all'interno della riflessione filosofica propriamente detta e della ricerca scientifica. Da un lato, la filosofia positivista esplorò una serie di posizioni cosmologiche generali che andarono dal rifiuto della disciplina alla sua reinterpretazione in un senso pragmatico o, ancora, speculativo ed in ultima analisi metafisico. Dall'altro, il pensiero scientifico dell'Ottocento rivalutò l'importanza della tematica cosmologica a partire da alcune evidenze sperimentali e da alcune istanze teoriche di fondo legate all'estensione di modelli generali della comprensione della natura, di cui la cosmologia avrebbe dovuto costituire la prova di coerenza.

Una definizione di cosmologia

Definiamo in via generale come cosmologia la scienza della struttura fisica del tutto, che vuole cogliere le leggi della formazione del complesso dell'universo. In essa la scienza astronomica gioca un ruolo fondamentale, data l'evidenza dell'enorme preponderanza del suo materiale di osservazione rispetto a quello dell'esperienza umana ordinaria: vi è molto più essere nel campo astronomico che in quello antropico.

La cosmologia scientifica moderna si consolida in effetti con la teoria della relatività generale (1917) e si caratterizza per alcune assunzioni di fondo:

1. *Esiste un'isotropia dell'universo al di là dell'anisotropia visibile.*
2. *Sono possibili osservazioni con valenza cosmologica, tali cioè che non derivano da un singolo oggetto interno*

⁶ Sulla struttura di questa impostazione vedi J. POLKINGHORNE, *Tempo delle creature e azione del Creatore*, in G. GIORELLO, E. SINDONI, C. SINIGAGLIA (c/d), *I volti del tempo*, Milano, Bompiani, 2001, pp. 40-42.

all'universo stesso e riguardano esso soltanto o la sua mera classe, ma riguardano l'universo *come tale*.

3. *Nessun punto dello spazio dell'universo né nessun momento della sua esistenza sono privilegiati* per condurne l'osservazione.

È facile comprendere la crucialità di questi requisiti rispetto alla possibilità stessa di una cosmologia come scienza. Al docente di filosofia, peraltro, queste asserzioni possono anche suggerire il tema del confronto con gli assunti di ontologie classiche, da Aristotele a Heidegger.

Nel corso di questo contributo tenterò di argomentare come, incorporando in modo significativo una riflessione sulle conseguenze del paradosso di Olbers, si possa costruire da parte di un docente un quadro di discussione storica e culturale sulla cosmologia, che assume come riferimento privilegiato un problema posto nel quadro dell'astronomia, e porta sia a una comprensione profonda della cosmologia ottocentesca, sia a poter analizzare con maggiore cognizione di causa l'epistemologia della relatività.

Prima del positivismo: la crisi della cosmologia nel pensiero illuministico e in Kant. Kant e Comte

La cosmologia rappresentava, nel sistema delle scienze raggruppato nell'enciclopedia filosofica della scolastica tedesca,⁷ una parte della *metaphysica specialis*: precisamente, quella parte teorico-speculativa della fisica che avrebbe dovuto fissare le condizioni ontologiche generali per l'applicazione delle leggi fisiche ai processi naturali, inquadrando questi ultimi in una struttura universale organizzata e comprensibile. In particolare, la cosmologia wolffiana discuteva dell'origine e dei limiti nel tempo e nello spazio dell'universo e della struttura dei suoi costituenti materiali ultimi (che, tra parentesi, sono ancora i problemi teorici di fondo dell'odierna cosmologia!). A questa cosmologia speculativa, Kant e l'illuminismo europeo tendono a sostituire una teoria più limitata che riguardi al massimo l'origine del Sistema solare (ipotesi Kant-Laplace), mentre la cosmologia come scienza indipendente appare impraticabile perché antinomica (ci sono ragioni altrettanto valide per affermare l'infinità o la finitezza spaziale e temporale del cosmo, la sua natura discreta o continua etc.).

Nell'enciclopedia del *Cours de philosophie positive*, Comte compie poi un ulteriore passo affermando l'inutilità della cosmologia come disciplina e la necessità di mantenere l'astronomia *positiva* (scientifica, ma anche immediatamente utile), ferma all'analisi dei moti del Sistema solare e dei corpi che lo intersechino. Comte rifiuta la speculazione cosmologica per la sua mancanza di risvolti pratici, per la sua natura ambigua dal punto di vista metodologi-

co (come si distinguono in cosmologia l'osservatore e l'osservato?) e per la sua portata metafisica.

Cosmologie positivistiche a sfondo umanistico ed evolutivistico

In realtà, l'affermazione comteiana non prescinde da un tentativo di reinterpretazione del senso del tutto, che risulta in Comte finalizzato alla piena estrinsecazione dell'esistenza umana secondo "ordine e progresso"; Comte non ritiene però che l'ordine e il progresso siano fini intrinseci alla natura del tutto, né che la vita umana sia lo scopo ultimo dell'esistenza cosmica. È piuttosto l'uomo a dovere fare di sé lo scopo ultimo del reale, imparando a dominarlo con la scienza e con l'azione.

Le teorie evolutivistiche saldano questa prospettiva pragmatistica di Comte con lo sviluppo dei processi naturali nel loro insieme. La natura viene vista culminare nella vita, e la vita umana appare quella che più di ogni altra è efficace nello *struggle for existence*. L'estensione spericolata della teoria dell'evoluzione alla comprensione dell'intero processo cosmico appare evidente in Spencer e si accompagna, sintomaticamente, alla teoria dell'inconoscibile.

L'Ignorabimus!

Nel quadro del pensiero positivistico, la cosmologia ebbe un ruolo fondamentale per avvalorare o smentire le interpretazioni progressistiche della scienza, della storia e della cultura. Se autori come Comte o come Spencer sentivano di poter fondare la loro concezione sociale progressiva su un principio generale di evoluzione (legge dei tre stati, teoria evolutivistica) che riguarda in Comte il solo sapere, ma in Spencer molto più metafisicamente l'intera natura, è tuttavia sintomatico come essi sentissero il bisogno di evitare una lettura materialistica pura e semplice delle loro metafisiche naturalistiche e biologistiche. L'affermazione pura e semplice del materialismo, infatti, inteso come chiave di comprensione dell'intero cosmo e dell'esistenza umana al suo interno, appariva difatti appannaggio del pensiero illuministico-rivoluzionario e, dopo il 1848, del comunismo. Il timore che la scienza della natura si trasformasse in una filosofia votata alla difesa ad oltranza del materialismo, e quindi delle tendenze politiche radicali ad esso più o meno direttamente legate, condurrà molti scienziati ad assumere una posizione agnostica circa la fondatezza di una spiegazione materialistica ultima del reale. Caratteristico e famoso è il caso del fisiologo e fisico tedesco Emil du Bois-Reymond, autore di un celebre intervento *Sui limiti della conoscenza della natura*,⁸ in cui sostiene che vi sono difficoltà irrisolvibili di fronte

⁸ E. H. DU BOIS-REYMOND, *Über die Grenzen des Naturerkenntnis*, Leipzig, Veit, 1872. Disponibile in digitale a www.deutsches-textarchiv.de/book/show/dubois_naturerkennen_1872 (link consultato 01.05.18).

⁷ La filosofia insegnata nelle università settecentesche, da cui Kant prese le mosse.

alle quali il programma meccanicistico-laplaciano, proprio del pensiero scientifico contemporaneo, è destinato ad arrestarsi inevitabilmente e a pronunciare un modesto e sobrio *Ignorabimus!*.

La tendenza a cui si riferisce du Bois-Reymond è quindi quella secondo cui la comprensione dell'universo consiste nel riuscire a costruire un unico grande calcolo ("formula cosmica"), basato sulle leggi della meccanica, cioè sui soli concetti delle masse e delle forze agenti sui centri delle masse stesse. Tutti i fenomeni naturali si dovrebbero spiegare, in ultima analisi, a partire dai movimenti della materia indifferenziata.

A questo programma il fisiologo tedesco avanza due notevoli obiezioni:

1. la prima è che lo schema atomistico sotteso a questa dottrina può al massimo risultare una "utile finzione", ma non può essere scambiato con una vera e propria conoscenza della struttura corpuscolare della realtà; l'atomo fisico reale occuperà pur sempre uno spazio e perciò sarà comunque ulteriormente divisibile; forze centrali agenti nel vuoto si scontrano con la constatazione dell'inesistenza del vuoto perfetto. Quindi, lo schema esplicativo proposto dal meccanicismo, per quanto capace di successo pratico, non sarebbe invece capace di scoprire la ragione dell'origine del movimento della materia né di spiegare la diversa distribuzione della materia nello spazio (notare che du Bois-Reymond quindi non concepisce l'universo come isotropo!);
2. la seconda obiezione è che la cosmologia dovrebbe prevedere quali proprietà la materia debba eventualmente avere per spiegare come mai, laddove essa si organizza nella forma della vita, emerga in essa la caratteristica macroscopica e qualitativamente del tutto nuova della "coscienza". Anche se potessimo raggiungere una conoscenza "astronomica" dei processi mentali e psichici (se cioè potessimo ricondurre le cause meccaniche del pensiero di un uomo fino alle loro remote origini nel movimento meccanico originario del cosmo...) non avremmo ancora capito che cosa renda tale la qualità soggettiva e vissuta del pensiero (il senso di piacere, di dolore, l'intensità provata e personale della percezione etc.).

Problematiche cosmologiche innescate dalla ricerca scientifica: il paradosso di Olbers e la termodinamica

Sebbene quindi la speculazione cosmologica venisse rifiutata da alcuni scienziati per ragioni ad un tempo teoriche ed ideologiche, tuttavia il secolo XIX fu teatro di una grande e sistematica riflessione sulla problematica cosmologica, motivata innanzitutto da alcune fondamentali evidenze sperimentali e considerazioni empiriche che rendevano nuovamente attuale, al di là delle critiche scettiche, la ricerca in questo particolare campo della speculazione naturalistica.

Molto significativo è al proposito il cosiddetto *paradosso di Olbers*, dal nome dell'astronomo danese

che per primo lo formulò nel 1823. Olbers assume che la cosmologia si caratterizzi per l'assunzione di almeno quattro proposizioni:

- *L'universo è spazialmente infinito e mediamente omogeneo.*
- *L'universo non ha avuto un inizio nel tempo.*
- *Le sue proprietà sono stazionarie e non si modificano sensibilmente nel tempo.*
- *Osservato secondo una scala abbastanza ampia, l'universo è statico e regolare.*

Il paradosso nasce dal confronto delle quattro proposizioni con un'osservazione molto semplice che rileva l'oscurità del cielo notturno (o del cielo in generale, se teniamo conto che la diffusione della luce solare è una proprietà locale dovuta alla presenza di atmosfera). Vediamo come un critico contemporaneo commenta la questione.

Supponiamo infatti che l'universo sia spazialmente infinito, e popolato, in media, uniformemente di stelle (prima proposizione). In tale situazione, puntando in una qualsiasi direzione l'occhio, prima o poi si deve necessariamente incontrare una stella. La conclusione di questo primo spezzone del ragionamento è che il cielo notturno dovrebbe risplendere come 180.000 soli. Una prima via d'uscita si avrebbe se l'universo fosse vissuto un tempo finito (contraddizione con la seconda proposizione): in tal caso infatti, essendo la velocità di propagazione della luce finita, quella di stelle situate al di là di una distanza pari al prodotto della velocità della luce per l'età dell'universo non avrebbe fatto ancora in tempo a raggiungerci, e la conclusione sarebbe in linea di principio scongiurata. Una seconda via d'uscita si avrebbe se la natura dell'universo mutasse, nelle sue proprietà medie, nel tempo (contraddizione con la terza proposizione): basterebbe che, prima che l'universo avesse compiuto una certa età, non vi fossero stelle luminose. Una terza via d'uscita sembra prospettarsi nel caso in cui l'universo sia mediamente non statico, e specificamente in espansione (contraddizione con la quarta proposizione). La fisica ci insegna infatti che in tal caso non si avrebbe soltanto uno spostamento in frequenza della radiazione emessa, ma anche una diminuzione di intensità. Il tentativo di dimostrare che il paradosso sarebbe scongiurato dall'espansione richiede un calcolo puntuale, che non voglio proporre ora. Basti qui aver tenuto presente un'ulteriore possibile via d'uscita dal paradosso, e sottolineato, conseguentemente, che, in linea di principio, è l'insieme delle quattro proposizioni che è inconsistente con il dato. Il paradosso di Olbers non è qui citato per ricordare come ne esce la cosmologia contemporanea, ma, innanzitutto, [...] in quanto potenzialmente capace di permetterci conclusioni sulle proprietà dell'universo: il discorso che precede ci porta a concludere infatti che non è possibile un universo infinito, eterno, stazionario e statico.⁹

⁹ www.dima.unige.it/~pusillo/ParadossoDiOlbers.pdf per una analisi delle diverse possibilità di soluzione, o mancanza di soluzione, del paradosso (link consultato 01.05.18). Per la citazione, cfr. S. BERGIA, *Problemi fondazionali e metodologici in cosmologia*, in G. BONIOLO (c/d), *Filosofia della fisica*, Milano, Bruno Mondadori, 1997, pp. 173-174.

Un secondo problema caratteristico del pensiero cosmologico del XIX secolo è quello delle conseguenze cosmologiche del secondo principio della termodinamica, inerente l'irreversibilità dei fenomeni termici.

A voler raggiungere un'estensione sistematica del secondo principio della termodinamica, bisognerebbe concludere che, dato che la cessione di calore avviene sempre da un corpo più caldo a quello meno caldo, l'intero universo è alimentato da scambi termici e quindi energetici solo perché esistono tuttora differenze di calore tra i corpi (il che implica anche il problema: come e perché esse si sono determinate?). Ma in un futuro incalcolabile l'energia non potrà più essere scambiata, perché le differenze di calore si saranno annullate e quindi l'intero universo andrà soggetto ad una "morte termica", riducendosi ad un enorme ammasso di energia non utilizzabile... Questa conclusione, raggiunta contemporaneamente da Thomson e da Clausius, è all'origine di un altro notevole episodio della riflessione cosmologica, quello di Boltzmann.

Può essere interessante, prima di esaminare quest'ultimo, ricordare che la nuova interpretazione termodinamica dell'universo confliggeva almeno sotto un profilo basilare con quella meccanicistica tradizionale – quest'ultima infatti si basava sul principio della reversibilità di tutti i fenomeni naturali, in quanto appunto fenomeni meccanici. Una conseguenza curiosa di questa concezione meccanicistica è la cosmologia dell'eterno ritorno ciclico del cosmo, che non è stata formulata originalmente da Nietzsche, ma corre in quegli anni in parecchi libri e opuscoli che Nietzsche ha con ogni probabilità letto: la circostanza è stata dimostrata da Mazzino Montinari.¹⁰ In sostanza, lo schema teorico sottostante alla cosmologia dell'eterno ritorno è questo: il numero delle configurazioni meccaniche diverse che l'universo può assumere è indefinito, incalcolabilmente grande ma non infinito; una volta percorso l'intero insieme delle configurazioni possibili, la forza meccanica agente nell'universo (e quindi una forza viva: siamo nel quadro di una contaminazione con l'evoluzionismo, il biologismo etc.), che non si altera né si dissipa, riprenderà il proprio corso e così via *in infinitum*. Questo tipo di cosmologia va in direzione di teorie fatalistiche (come appunto in Nietzsche); si nota che esse sono accolte e sostenute anche in ambienti prossimi al marxismo gradualistico e riformistico, che non riteneva più necessaria la rivoluzione, ma solo l'assestamento dell'"inevitabile" cambiamento sociale già in atto.

¹⁰ Sulla scorta di Hans Lichtenberger e Charles Andler, cfr. in sintesi M. MONTINARI, *Che cosa ha veramente detto Nietzsche*, Roma, Ubaldini, 1975, pp. 91-93.

Come è noto, il grande ed ai suoi tempi (fine secolo XIX) incompreso scienziato austriaco Ludwig Boltzmann ha tentato una lettura probabilistica dell'irreversibilità termodinamica, che comporta anche rilevanti conseguenze a livello cosmologico.

Boltzmann rifiuta un valore ontologico alla tesi dell'irreversibilità termodinamica, preferendo constatare che la reversibilità dei fenomeni termici è estremamente improbabile, e ciò sulla base della nota teoria cinetica del comportamento dei gas. Immaginiamo una condizione in cui un fluido gassoso si trovi in una situazione altamente ordinata (per esempio sia contenuto completamente in un serbatoio). Creiamo il vuoto e colleghiamo a questo serbatoio altri serbatoi. Il gas tenderà a distribuirsi uniformemente in tutti i serbatoi. È possibile che ritorni nel primo serbatoio in base a movimenti propri? Logicamente sì, ma è molto improbabile. Essendo una determinata quantità di fluido gassoso composta comunque da un numero molto elevato di molecole, la possibilità che essa assuma l'ordine (altamente improbabile) da noi desiderato è estremamente piccola...

Scriva allora Boltzmann:

Quando in un sistema di corpi è racchiusa una data quantità di energia, questa energia non si trasforma in modo arbitrario, *ma passa sempre dalle forme meno probabili a quelle più probabili; se inizialmente questa ripartizione non corrispondeva alle leggi delle probabilità, vi tenderà sempre più*. Ma, appunto, le forme di energia che vorremmo magari realizzare in pratica, sono sempre *improbabili*...

*Quel che chiamiamo forme degradate dell'energia sono quelle più probabili, più esattamente quelle che sono ripartite tra le molecole nel modo più probabile [...]. A ogni ripartizione dell'energia corrisponde una probabilità quantitativamente determinata. Poiché essa, nei casi pratici più importanti, è identica alla grandezza che Clausius ha designato col nome di entropia, le daremo anche noi lo stesso nome. È per il fatto che un sistema di corpi non passa mai spontaneamente da uno stato a un altro stato di stessa probabilità, ma sempre solo da uno stato a uno stato più probabile, che non è possibile costruire un sistema di corpi che, dopo aver percorso differenti stati, ritorni periodicamente allo stato iniziale: un *perpetuum mobile*. Siamo così giunti al punto da cui si parte, abitualmente, nella considerazione del secondo principio. Si pone come assioma che sia impossibile, con un numero finito di corpi, di costruire un *perpetuum mobile*; si esprime questo assioma con delle equazioni, che costituiscono le equazioni fondamentali del secondo principio; e infine ci si meraviglia del fatto che, una volta ammesso che l'Universo sia un vasto sistema costituito da un numero finito di corpi, risulti da tali equazioni che l'Universo stesso non possa essere un *perpetuum mobile*, il che tuttavia era già compreso nell'ipotesi fatta.*

Boltzmann: la cosmologia

A partire da queste considerazioni, tuttavia, Boltzmann sente di dover trarre ulteriori estrapolazioni

di carattere cosmologico in un senso speculativo ancora più impegnativo.

Boltzmann si chiede se l'apparente irreversibilità di tutti i processi naturali (per l'entropia cresce solo in una direzione) sia compatibile con l'idea che «tutti gli eventi naturali sono possibili senza restrizione».

Possiamo concepire il mondo come un sistema meccanico formato da un numero enorme di costituenti e da un periodo di tempo immensamente lungo, sicché le dimensioni di quella parte che contiene le nostre «stelle fisse» risultino molto piccole paragonate all'estensione dell'universo; e i tempi che chiameremo «eoni» analogamente siano molto piccoli confrontati a tale periodo. Allora nell'universo, che complessivamente è in equilibrio termico e quindi morto, occorreranno qui e là regioni relativamente piccole della stessa dimensione della nostra galassia (chiamiamoli «mondi») che durante il tempo relativamente breve degli eoni, fluttuano notevolmente dall'equilibrio termico; anzi in tali casi la probabilità dello stato potrà in questo caso crescere o decrescere. *Per l'universo le due direzioni del tempo sono indistinguibili, come nello spazio non c'è un sopra e un sotto.* Tuttavia, come in una particolare regione della superficie terrestre chiamiamo «basso» la direzione verso il centro della terra, così un essere vivente in un particolare intervallo di tempo di un tale mondo distinguerà la direzione del tempo verso stati meno probabili dalla direzione opposta (la prima è il passato, la seconda è il futuro). Grazie a questa terminologia, tali piccole regioni isolate dell'universo si troveranno «inizialmente in uno» stato improbabile. Questo metodo mi sembra l'unico modo in cui possiamo intendere la seconda legge – la morte termica di ogni singolo mondo – senza un cambiamento unidirezionale dell'intero universo da uno stato iniziale definito ad uno stato finale.

Boltzmann tenta cioè di preservare la cosmologia dalla speculazione metafisica, la scienza fisica dal prestarsi a diventare metafisica di un oggetto, l'universo, inconcepibile ed inosservabile nel suo insieme. Conclude lo scienziato austriaco:

Ovviamente non si dovrebbero considerare tali speculazioni come importanti scoperte e neppure come fecero invece gli antichi filosofi, come i sommi scopi della scienza. Tuttavia dubito che sia corretto rigettarle come completamente vuote di senso. Come escludere, infatti, che esse non possano ampliare l'orizzonte del nostro cerchio di idee e stimolando il nostro pensiero, non ci facilitino la comprensione dei fatti empirici?

Non è secondario che proprio la riflessione cosmologica portasse ad una parziale riabilitazione, in funzione euristica, della speculazione metafisica, al di là del praticismo e pragmatismo del positivismo comtiano, restituendo alla scienza una dimensione autenticamente filosofica.¹¹

¹¹ Per un commento alla posizione di Boltzmann, e le citazioni e traduzioni, cfr. G. GIORELLO, *Il tempo e la fisica dell'irreversibile*, in R. ROMANO (c/d), *Le frontiere del tempo*, Milano, Il Saggiatore, 1981, pp. 141-64.

Mach e la relatività

L'«empiriocriticismo» di Mach rappresenta il più importante esempio, prima di Einstein e di Poincaré, dell'esigenza di una fisica della relatività generale che impieghi modelli esplicativi interattivi, in cui i singoli fenomeni siano compresi a partire dalla loro relazione con la totalità degli altri.

Mach è stato il primo a formulare in modo esplicito il principio della relatività non solo cinematica (tema che attraversa per esempio tutto il dinamismo fisico settecentesco, a partire da Leibnitz), ma anche dinamica: gli effetti inerziali devono essere considerati, secondo Mach, come causati dalla gravitazione, ossia dall'influsso della totalità delle masse dei corpi effettivamente esistenti, di cui andranno naturalmente considerati i contingenti stati di moto. La critica machiana investe la concezione newtoniana dello spazio assoluto e del tempo assoluto, nonché la convinzione di Newton che esista un sistema di riferimento assoluto e privilegiato (non solo si intende, dal punto di vista di specifiche operazioni, bensì sotto il profilo ontologico). Mach vuole procedere ad una costruzione tramite *elementi* degli oggetti della fisica – dove «tramite elementi» non intende né concrete sensazioni psicofisiche né elementi fisici considerati in senso assoluto (come per esempio le cose in sé del kantismo); gli elementi trattati da Mach sono isolati mediante un processo metodologico guidato da un principio di economia e di organicità. Essi devono essere in minor numero possibile e in completa interrelazione; l'esame di tutte le funzioni in cui si esprimono queste loro interrelazioni deve poter rendere conto dei fenomeni empiricamente attestati in modo non contraddittorio.

Ciò spiega la ragione per cui le finzioni e le ipotesi che prescindono dal modello della mutua interazione funzionale sono secondo Mach vere e proprie astruità metafisiche prive di senso (per esempio l'idea newtoniana dello spazio assoluto); inoltre spiega la ragione per cui per Mach gli effetti inerziali non possano che venire interpretati come esito dell'interrelazione funzionale di tutti gli elementi in gioco nel loro specifico campo, e cioè, in questo caso, dell'interazione gravitazionale di tutti i corpi dell'universo gli uni con gli altri.

Einstein e Mach

Il principio secondo cui l'origine dell'inerzia è la gravitazione è stato definito dallo stesso Einstein il «principio di Mach», nel famoso articolo su *I principi della relatività generale*, apparso negli *Annalen der Physik* del 1918, e costituisce il terzo dei principi essenziali della relatività generale, accanto a quello dell'equivalenza (tra massa inerziale e massa gravitazionale) e a quello della covarianza generale (che possiamo enunciare, trascurando la problematica delle coordinate gaussiane, dicendo che nessun sistema fisico o stato di sistema fisico, che si comporti in una certa maniera in un sistema di riferimento

arbitrario, si comporterà diversamente in un altro sistema di riferimento arbitrario).

Ancora nel 1921, Einstein sostiene di avere creato con la relatività generale una teoria completamente machiana, ossia caratterizzata dall'eliminazione degli assoluti, dalla giustificazione dell'aumento dell'inerzia di un corpo a causa della vicinanza di altri corpi dotati di massa e dall'assenza di sistemi di riferimento privilegiati.¹² La critica ha però dimostrato che il particolare procedimento teorico impiegato da Einstein per dimostrare questi assunti non solo impiega in modo estensivo un sistema di riferimento privilegiato, ma dipende dall'assunzione teorica, ammessa dalla relatività generale, di un modello di universo in cui all'infinito non c'è materia. Ora, Mach rifiuterebbe questa impostazione come assunto metafisico e come ipotesi superflua, poiché i principi di organicità ed economia cui egli si richiama impongono di non introdurre ulteriori elementi oltre quelli empiricamente attestati; l'assenza di materia all'infinito è appunto una mera concezione metafisica. La critica ha altresì sottolineato che tra le tematiche che certamente hanno influenzato Einstein a formulare la propria complessa ed in parte ancora indecisa riflessione sulla costante cosmologica è stata essenziale proprio la ricerca di una teoria dell'universo completamente machiana, che sfuggisse cioè alle difficoltà sopra ricordate. Il ruolo della costante cosmologica, come forza repulsiva capace di contrastare su scala cosmica l'attrazione gravitazionale, consisterebbe proprio nel permettere l'esistenza di un universo chiuso, statico e pieno di materia, dove le cosiddette "condizioni al contorno minkowskiane" (l'assenza di materia all'infinito) siano impossibili. Non è questa la sede per trattare di come la questione si sia evoluta in seguito ai contributi di de Sitter e Friedman e poi delle osservazioni sul *redshift* di Hubble, né di come certi teorici contemporanei, come Paul Davies, riabilitino la validità dell'impostazione teorica di Einstein a proposito della questione della costante cosmologica.

In generale, va considerato comunque non riuscito il tentativo einsteiniano di creare una fisica completamente machiana (quale neppure Mach, d'altra parte, aveva poi creato, bensì solo proposto), dato che sono possibili modelli di universo, ammissibili nel quadro della relatività generale, in cui continuano ad esistere sistemi di riferimento privilegiati; la soluzione delle equazioni einsteiniane proposta nel 1949 da Kurt Gödel, oltre a provare che non esistono limiti teorici intrinseci alla teoria della relatività che vietino l'esistenza di anelli temporali, ipotizza un modello di universo caratterizzato da una rotazione globale, il cui asse diventa appunto il sistema di riferimento privilegiato. Naturalmente i fisici hanno obiettato che considerazioni fisiche e

sperimentali numerose sono tali da non comprovare il modello, ma il problema di Mach (e anche, a quanto pare, di Einstein) è anzitutto epistemologico e si concretizza nella fondazione di un modello di ricerca e teoria che sia assolutamente immune da ipoteche metafisiche.

La teoria della relatività come sfondo della cosmologia e dell'astrofisica: un piccolo percorso di analisi epistemologica

Raramente nel corso della presentazione in sede di didattica della filosofia della relatività e del suo quadro teorico si sottolinea la rilevanza delle problematiche astronomiche che vennero a convergere sulla formazione e sulla prova della teoria.

Osservazioni astronomiche e teoria della relatività

In primo luogo, la questione della velocità della luce nacque, fin dal mondo antico, come questione interna all'astronomia¹³ e la sua prima osservazione come dotata di velocità finita deriva dalle osservazioni di Ole Roemer (1644-1710) sulle occultazioni dei satelliti medicei da parte di Giove. Quando, come noto, le ripetute esperienze di Michelson e Morley dimostrarono che la velocità della luce non si componeva con la velocità orbitale terrestre, e rimaneva identica sia misurata nel senso della direzione del moto di rivoluzione della Terra, sia perpendicolarmente a tale direzione, si determinò una crisi del sistema della meccanica celeste newtoniana.

Lo spostamento del perielio di Mercurio fu messo in evidenza da Urbain Le Verrier nel 1859. La teoria della relatività generale riuscì nel 1915 a spiegare i dati osservativi, per la cui consistenza si era arrivati a supporre di dover modificare alcuni aspetti della teoria gravitazionale newtoniana. Asaph Hall (1829-1907), scopritore tra l'altro delle lune di Marte, propose un piccolo aggiustamento della legge di gravitazione di Newton, prevedendo una proporzionalità inversa non con il quadrato del raggio, ma con una potenza del raggio di esponente 2,0000001574, il che avrebbe tra l'altro potuto spiegare altre anomalie nel moto dei pianeti interni.

Infine, come è noto, un'ulteriore corroborazione della relatività generale fu data dall'osservazione della deflessione dei raggi luminosi di alcune stelle dell'ammasso delle Pleiadi, rilevata sulle fotografie dell'eclisse totale di Sole del 29 maggio 1919 riprese da due spedizioni, una all'isola di Principe e una a Sobral, in Brasile.

In termini epistemologici, si può da ciascuna di queste potenti osservazioni corroboranti notare

¹² A. EINSTEIN, *Il significato della relatività*, Torino, Boringhieri, 1980, pp. 94 e sgg.

¹³ ARISTOTELE, *De sensu* 446a26 e sgg., confuta la tesi di Empedocle, che assegna alla luce una velocità finita, sulla base sia della istantaneità dell'illuminazione al sorgere del sole sia della tesi di fondo della natura non corporea della luce.

che in nessun caso Einstein costruì la teoria con quella che Popper avrebbe poi chiamato una mossa *ad hoc*, bensì con un riorientamento della teoria stessa che non solo spiegava il dato sperimentale difforme, ma consegnava alla scienza astronomica la possibilità di prevedere e osservare fatti nuovi: troppo noti, perché qui se ne parli.

Interpretazioni epistemologiche dell'origine della teoria della relatività

Ma come nacque allora in termini epistemologici la teoria della relatività? Esaminando il pensiero di Poincaré, si individua una determinata interpretazione del modo in cui teorie scientifiche innovative vengono elaborate: esse partono dalla constatazione delle contraddizioni tra le teorie in campo; tengono fermi i rapporti (metricamente e matematicamente espressi) tra le grandezze che queste teorie individuano e modificano le corrispondenti "immagini" degli oggetti sottostanti alle teorie. Ma Poincaré non pensava di progredire in questo modo verso una maggiore approssimazione all'ontologia reale degli oggetti, bensì di stabilire una convenzione più comoda, efficace e coerente. Mach pensa invece alla formazione della teoria come ad un processo di correlazione di elementi, fino alla loro piena interrelazione funzionale che elimini ogni unidirezionalità causale (completa integrazione dinamica di tutte le masse e di tutti gli stati dinamici gli uni con gli altri, nel caso della meccanica).

Ancora oggi, chi legge i resoconti della formulazione della teoria della relatività si trova di fronte ad interpretazioni divergenti. Nei libri di Roger Penrose, così belli e così diffusi presso il grande pubblico, la formulazione della teoria della relatività appare il risultato di una teoresi astratta, creativa ed idealizzante, in cui l'elemento dominante consiste nella strutturazione di un formalismo rigoroso, dotato della massima simmetria logico-matematica. Accentuando soprattutto la formazione della teoria della relatività generale, Penrose scrive per esempio: «le motivazioni che spinsero Einstein a... formulare la teoria generale non furono osservative o sperimentali», eppure Einstein rivelò con essa «qualcosa che c'era». ¹⁴ Con ciò Penrose si richiama sia alla funzione intrinsecamente unificante della fisica nei confronti delle altre scienze della natura ¹⁵ che all'inesauribilità della risorsa della creatività matematica nel fornire modelli teorici alla ricerca fisico-naturalistica anche in relazione alla nota tesi del "platonismo" che Penrose ha espresso anche nei suoi altri scritti. Il mondo fisico gli pare emergere, come mondo possibile, dai tanti universi espressi nel sistema delle conoscenze e delle verità matematiche. ¹⁶ La concezione penrosiana è però più

complessa di quella di un semplice derivazionismo, perché accoglie l'idea di una circolarità non convenzionale tra mondo fisico, mondo mentale e mondo delle verità matematiche. Egli li connette così secondo la figura di un triangolo impossibile, simile a quelli disegnati dal grande artista olandese M. C. Escher.

Ma sono possibili anche altri approcci. Per esempio, Paul Davies insiste sull'origine della relatività speciale attraverso un processo essenzialmente machiano ed insieme deduttivo. Da una parte, Einstein avrebbe voluto difendere ad ogni costo il principio di relatività mutuato da Mach; dall'altra invece, «non voleva rinunciare all'eccellente ed efficiente teoria dell'elettrodinamica e con essa al principio che la velocità della luce avesse un valore costante». Quindi Einstein si sarebbe risolto ad un "passo arduo", cioè all'accettazione risoluta e contemporanea delle due dottrine tra di loro apparentemente contraddittorie, semplicemente modificando una clausola fondamentale di tutte le dottrine fisiche che lo avevano preceduto. Asserendo che lo spazio ed il tempo non sono assoluti, ma relativi, non universali, ma diversi da osservatore ad osservatore, diventava possibile postulare che osservatori in moto relativo l'uno rispetto all'altro possano vedere uno stesso impulso luminoso muoversi con la stessa velocità relativamente a ciascuno di essi. ¹⁷

Si confronti ora la seguente ulteriore indicazione di C. Rovelli:

La relatività speciale è un esempio sfolgorante di rivoluzione concettuale... era già scritta dentro le equazioni di Maxwell e la relatività galileiana. Già Poincaré e Lorentz ne avevano scritto le equazioni, in piena scienza normale. Einstein l'ha trovata grazie ad una immersione piena in Maxwell e Galileo; l'ha trovata perché ha creduto a Maxwell e soprattutto ha creduto a Galileo – alla sostanza della sua più grande scoperta scientifica: la relatività del moto – anche contro i dettagli che da questa scoperta erano derivati – le trasformazioni di Galileo... [l'ha trovata] interrogando a fondo tutto il sapere accumulato e cioè le vecchie teorie e le loro apparenti contraddizioni interne... ¹⁸

Si tratta naturalmente di pure semplificazioni, ma sufficienti a rivelare la pluralità di letture autorizzate dal processo teorico einsteiniano. Abbiamo così isolato già ben quattro immagini diverse: l'intuizionismo idealistico; l'applicazione estensiva del principio machiano di economia e di olismo; la congettura volta al *problem solving*, non è ben chiaro se in senso convenzionalistico-poincareano o in senso popperiano (congetture e confutazioni) ed infine la rottura del paradigma della scienza normale mediante riproblematizzazione dei suoi assunti concettuali ultimi (una sorta di riorientamento gestalti-

¹⁴ R. PENROSE, *Il grande, il piccolo e la mente umana*, Milano, Cortina, 1998, p. 32.

¹⁵ *Ibidem*, pp. 180-2.

¹⁶ *Ibidem*, p. 10.

¹⁷ P. DAVIES, *I misteri del tempo*, Milano, Arnoldo Mondadori Editore, 1997, II ed., pp. 46-47.

¹⁸ C. ROVELLI, *La natura della natura*, «Montag», 1998, 4, pp. 14-15.

co della ricerca e del pensiero). Ci possiamo chiedere allora che cosa ne pensassero gli immediati contemporanei e quali elementi, in ultima analisi, si possano trarre dalla teoria einsteiniana e da Einstein stesso nelle sue specifiche formulazioni epistemologiche, allo scopo di pervenire ad una decisione sul grado di relativismo della sua impostazione teoretica.

Nel corso della prima ricezione dei risultati della teoria della relatività nel dibattito epistemologico, le ambiguità e la poliedricità teorica dell'approccio einsteiniano vennero rilevate in modo pressoché unanime, ma insieme non mancò allora, in ogni caso, lo sforzo di inquadrare la teoria della relatività in contesti epistemologici già indipendentemente formati mediante l'autonoma critica filosofica. Essendo già in possesso di specifiche concezioni dei nessi e dei problemi del rapporto tra filosofia e scienza, nonché impegnati in rilevanti battaglie ideologiche e culturali, nella maggior parte dei casi i filosofi non riuscirono ad articolare il loro rapporto con la teoria della relatività se non in base ad una sua utilizzazione esemplificativa in vista della corroborazione della propria e peculiare dottrina della scienza e della conoscenza.

I relativismi di matrice tardopositivistica, ispirati in modo rigido ad un'interpretazione convenzionalistica di Mach e di Poincaré, colsero nell'approccio einsteiniano il culmine di una teoria del moto di carattere appunto integralmente fenomenico e convenzionale. Così il machiano Josef Petzoldt (1862-1926), il più attento tra gli interpreti di questo indirizzo, si sforza da un lato di evidenziare gli elementi fenomenistici della posizione einsteiniana (come la tesi dell'osservabilità delle sole coincidenze di eventi fisici), ma vede poi nella relatività generale il pericoloso reintromettersi di un'errata impostazione razionalistica di ascendenze kantiane, secondo cui, per parafrasare questo autore, tocca alla ragione imporre la propria struttura alle cose. Quindi, certi aspetti della teorizzazione della relatività generale, come la finitezza dello spazio (abbiamo già visto come peraltro la sua assunzione, mediante l'introduzione anche della costante cosmologica, corrispondesse per Einstein ad un bisogno di inveramento machiano della sua teoria!) e l'intrascendibilità ed assolutezza della velocità della luce gli sembrano caratteri tipicamente metafisici propri di un pensare aprioristico, gli equivalenti nella meccanica contemporanea delle vecchie assunzioni metafisiche newtoniane. Ciò che Petzoldt rimprovera dunque ad Einstein è il carattere alternativamente astratto e ipotetico della postulazione teorica o dogmatico della determinazione ontologica del reale – se cioè si intende che la teoria della relatività non sia una semplice organizzazione economica dei fenomeni secondo principi convenzionali, ma abbia un carattere di descrizione oggettiva del reale e parli delle proprietà intrinseche dello spazio-tempo. Va osservato, tuttavia, che Petzoldt non tiene conto che il valore della velocità della luce non è

un semplice costrutto teorico comodistico, ma può essere oggetto di previsione e di accertamento tramite misurazione secondo condizioni che il sistema teorico einsteiniano indica e rende praticabili.¹⁹

Probabilmente ha qui luogo un equivoco che dipende dalla sottovalutazione del ruolo dell'esperienza e dei processi di convalida osservativa nella costruzione della fisica teorica, che si connette tra l'altro alle acute critiche alla concezione della "prova sperimentale" elaborate su base teorica e storica, all'inizio del secolo xx, ad opera del grande epistemologo francese Pierre Duhem. Paradossalmente anche l'empirismo machiano, nella misura in cui è olistico, lascia altrettanto poco spazio all'istanza sperimentale, perché il suo obiettivo non è quello di costruire la teoria scientifica come modello astratto e semplificato del reale in cui vengano indicate relazioni univoche tra classi di grandezze, ma di elaborare senza contraddizioni logiche (oltre che empiriche) l'interconnessione funzionale di tutti gli "elementi" gli uni con gli altri. Il carattere di osservabilità, così importante per Mach, assomiglia più alla corroborazione empirica di una teoria volta a salvare i fenomeni che al test sperimentale di un'ipotesi secondo il modello galileiano e einsteiniano (si noti che l'ipotesi sarà previsiva, in questo caso, di classi di fenomeni *non ancora osservati*).

Dallo stesso equivoco sono condizionate le reazioni della filosofia del "come se", il cosiddetto finzionalismo elaborato su una matrice kantiana da Hans Vaihinger (1852-1911). Questa tendenza teorica, molto di moda ai propri tempi, si è interessata in modo approfondito e polemico della teoria della relatività, attraverso l'opera di vari suoi esponenti, culminata poi in un congresso del movimento (1920) dove la teoria einsteiniana venne puntigliosamente esaminata.²⁰

In conformità ai propri assunti epistemologici, i finzionalisti ravvisano nella relatività numerose "finzioni", cioè concetti, nozioni ed operazioni introdotti al puro scopo di ottenere risultati efficaci nel calcolo e di preservare la compattezza della teoria e la sua efficacia pratica. Alle spalle di questo atteggiamento c'è tra l'altro il dogmatismo agnostico che aveva nutrito di sé buona parte del positivismo tedesco di fine secolo (si pensi a du Bois-Reymond) contribuendo a limitarne le potenzialità rivoluzionarie in campo morale, psicologico e politico.

¹⁹ Cfr. J. PETZOLDT, *Die Stellung der Relativitätstheorie in der geistigen Entwicklung der Menschheit*, Leipzig, Joh. Ambr. Barth, 1923, II ed.

²⁰ La manifestazione si tenne a Halle. Sui rapporti Vaihinger-Einstein cfr. K. HENTSCHEL, *Zur Rezeption von Vaihingers Philosophie des Als Ob in der Physik*, in M. NEUBER (Hrsg.), *Fiktion und Fiktionalismus. Beiträge zu Hans Vaihingers 'Philosophie des Als-Ob'*, Würzburg, Königshausen & Neumann, 2014, pp. 161-186. Disponibile in formato elettronico a: www.researchgate.net/publication/264932638_Zur_Rezeption_von_Vaihingers_Philosophie_des_Als-Ob_in_der_Physik_in_Matthias_Neuber_ed_Fiktion_und_Fiktionalismus_Beitrage_zu_Hans_Vaihingers_Philosophie_des_Als-Ob_Wurzburg_Konigshausen_Neumann_2014 (link consultato 01.05.18).

In sostanza, per i finzionalisti la teoria della relatività non sarebbe altro che un modo speciale per trattare una serie di imbarazzanti misure sperimentali attinenti certe classi molto specifiche di fenomeni; essa non avrebbe nessuna portata ontologica né alcuna peculiare innovazione metodologica. Come altri kantiani più ortodossi, anche i filosofi del “come se” assegnano alla sintesi a priori kantiana il compito di determinare le autentiche strutture ontologiche del reale e sono pertanto inclini a vedere nell’innovativa tematizzazione einsteiniana delle proprietà dello spaziotempo poco più che uno strumentalismo basato su asserzioni fittizie. La struttura geometrica dello spazio, costituita a priori nella soggettività trascendentale, sarebbe necessariamente di tipo euclideo, e il carattere sintetico a priori della conoscenza geometrica pura, esplicitato da Kant, conserverebbe tutta la sua dignità. I kantiani ortodossi ricorrono così all’argomento secondo il quale la teoria della relatività non ha a che fare con la struttura oggettiva dello spaziotempo, ma con certe specifiche misure spaziali e temporali, che risulta comodo trattare in forma peculiare.

Ulteriori riflessioni per l’individuazione di problematiche utilizzabili nella didattica integrata della filosofia

Siamo così di fronte alla distinzione tra tempo e spazio “puri” e gli “pseudoconcetti” scientifico-pratici, per dirla con Croce, potenti ed efficaci ma irrimediabilmente superficiali, pre- ed extrafilosofici.

A tacere delle relazioni già invece viste, potenti e strutturanti, con la concettualità sviluppata nel vivo della ricerca astronomica, se ora dal punto di vista didattico si volessero sviluppare ulteriori relazioni per integrare la didattica della filosofia con altri campi, dai quali trarre gli spunti problematici per far riflettere gli studenti, dove si potrebbe ancora parlare?

A puro scopo esemplificativo, si può dire, con tutta certezza, che uno degli effetti più potenti e significativi della teoria einsteiniana, per quanto se ne parli poco, è proprio quello di aver messo in discussione l’ovvietà ontologica dell’immagine euclidea dello spazio e di aver stimolato la riflessione sull’esperienza soggettiva e sul modo in cui essa si “normalizza” in forma quasi-euclidea, nel contesto di un certo ordine di grandezze del campo percettivo. Studi recenti di psicologia della percezione enucleano sperimentalmente l’esistenza di modelli lobacevskiani e riemanniani di percezione dello spazio accanto a quelli quasi-euclidei. La riflessione sulla spazialità appropriata ad ospitare e sviluppare l’esperienza del corpo proprio non si esaurisce negli inscatolamenti razionalistici ed ortogonali di matrice bauhausiana (pur non volendo negare la rilevanza progettuale, storica e morale di quella lezione). Coevi ad Einstein sono fenomeni come la ricerca husserliana sulla cinestesi e sul corpo proprio, l’esperienza di determinate avanguardie (da Arp all’*Action Painting*), la tematizzazione della spazialità

corporea nella danza e nel teatro – tutti elementi che convergono nell’individuazione di una legittimità originaria di un’esperienza multiforme dello spazio, e di una sua determinazione originaria nel senso anche dell’incurvamento e del continuo mutamento locale e percettivo insieme della natura dello spaziotempo

Anche Bergson, come è noto, pare rivolgersi alla teoria della relatività con la stessa impostazione aprioristicamente difensiva già vista nei neokantiani ortodossi, nei convenzionalisti e nei finzionalisti; egli nega risolutamente la valenza filosofica della concezione einsteiniana del tempo, sulla base della considerazione che la stessa critica del concetto di simultaneità svolta da Einstein è comunque estrinseca alla vera nozione filosofica del tempo, di carattere soggettivo e qualitativo. Lo sdoppiamento ideale dell’osservatore, necessaria supposizione per la critica della simultaneità, nega la circostanza per cui il singolo osservatore reale, nel suo tempo vissuto, è immerso in un’esperienza intima ed insuperabile di durata reale. Il tempo criticato da Einstein è già tempo spazializzato, non il vero tempo filosofico; la nuova nozione einsteiniana di tempo è meramente formale (si riduce ad un indice numerico che esprime una coordinata) e non filosofica. Eppure, in un contesto teorico affine a quello bergsoniano, lo Heidegger degli anni Venti, la critica einsteiniana alla simultaneità appare accolta positivamente come momento essenziale di una strategia teorica destinata all’eliminazione dell’oggettività statica e pubblica dell’essere come sostanza, in vista di una nuova concezione “eventuale” e relazionale dell’essere stesso.

Proprio la prima impostazione einsteiniana del problema della simultaneità, di carattere operativo («abbiamo bisogno di una definizione di simultaneità capace di fornirci il metodo per mezzo del quale chiarirci sperimentalmente [...]; questo concetto non esiste per il fisico fino a quando egli non ha la possibilità di scoprire nel caso concreto se esso risulti fondato oppure no»: sono tra le note affermazioni dell’esposizione divulgativa della relatività speciale del 1917), chiarisce la natura esclusivamente convenzionale e relativa della simultaneità e la conseguente astrattezza della nozione oggettivistica di tempo inteso come sequenza di punti-ora. Con Bergson e con Heidegger si va verso una concezione dell’essere come flusso essenzialmente indeterminato, il cui indice temporale non è assoluto perché non è relativo ad uno scorrere del flusso all’interno del tempo inteso come contenitore, bensì esiste solo come relazione tra l’osservatore ed il processo stesso da un lato (l’osservatore epistemico va inteso qui come caso-limite, si tratta normalmente e piuttosto di un attore inglobato e operante nel reale), come ritmo intrinseco di sviluppo del processo stesso dall’altro. Con Bergson e con Heidegger, quindi (in modo più simpatetico certo nel secondo che nel primo), vengono evidenziate e valorizzate alcune tendenze indeterministiche (estranee peraltro ad Einstein) estrapolabili dalla rivolu-

zione concettuale relativistica ed estensibili all'interpretazione del nuovo modello fisico di origine quantistica legato ai problemi della modellizzazione e del trattamento teorico del caos (il che ci riporta a Poincaré e può gettare una luce diversa sul significato del suo convenzionalismo).

Si coglie così una conseguenza significativa del relativismo einsteiniano, spesso poco esaminata benché Einstein stesso l'abbia enunciata e valorizzata: la scomparsa dell'idea di una disponibilità oggettiva e permanente del reale inteso come sostanza estesa ed immota (e d'altra parte la crisi del paradigma meccanicistico doveva pur rimettere in auge il suo antico concorrente, il dinamismo fisico!). A questa ontologia Bergson e Heidegger – e bisogna aggiungere loro almeno Whitehead – sostituiscono un'immagine processuale ed eventuale della realtà, in cui vengono prese sul serio le nuove indicazioni ontologiche relative all'interdipendenza dello spazio e del tempo ed al dinamismo intrinseco della realtà (non possiamo ovviamente soffermarci qui sulle diverse strategie teoriche dei tre autori).

Il riferimento alla teoria della relatività ha qui allora la funzione di negare il privilegio ontologico del presente, la dottrina sostanzialistica dell'ente e la natura esterna ed indipendente del soggetto rispetto ai processi fisici reali (meglio, la possibilità di astrarre in forma definitiva dall'interdipendenza reale tra soggetto e oggetto). Va detto però, in conclusione, che questi autori, pur andando verso un'accentuazione di elementi indeterministici della nuova fisica relativistica, non pensano a riallacciarsi al probabilismo strumentalistico dell'interpretazione classica della teoria quantistica. È stato suggerito che mirino a preservare al reale un'intatta capacità di creatività e di capacità morfogenetica, il che è suggestivo poiché li ricollega ad aspetti molto vitali della ricerca contemporanea; a noi basta per ora la constatazione dell'originalità di questo rapporto con le tematiche relativistiche, estraneo sia alla loro lettura in chiave strumentalistica che alla loro interpretazione, certo vicina agli sviluppi della personale ricerca einsteiniana, in chiave di crescente assiomaticizzazione e strutturazione logico-deduttiva.

Per riallacciarsi ulteriormente all'astronomia, osserviamo di passaggio che il cosmo consegnato all'osservazione da parte della relatività non può più essere analizzato a soli scopi tassonomici, né come campo di comprova della meccanica newtoniana; esso risulta conoscibile in quanto storico (nel senso della storia naturale), cioè visto nel suo passato e comprensibile solo in quanto se ne interpreti il mutamento.

Relatività e neopositivismo

Infine prendiamo in considerazione quelle epistemologie coeve ad Einstein che si sono rivelate più intrinseche alla logica interna del procedimento teorico einsteiniano e che risultano anch'esse, come

le precedenti, vitali ed interessanti anche per il lettore odierno: il riferimento è ai due grandi epistemologi neopositivisti Moritz Schlick e Hans Reichenbach. Ai loro occhi la teoria della relatività risulta essenzialmente un caso eccezionalmente efficace di completa applicazione della procedura scientifica, un esempio insigne ed insostituibile di ricerca concreta secondo il vero metodo positivo. Come scrive Reichenbach,²¹ «il significato filosofico della teoria consiste nella modifica di certi fondamentali concetti epistemologici», per esempio quello della sostanza (che deve venire riformulato), quello dello spazio, del tempo etc.

Con ciò, sostiene Reichenbach, si dimostra che non esiste un apriori apodittico, cioè una nozione pura, intemporalmente ed universalmente valida, delle nozioni epistemologiche essenziali; gli apriori si costituiscono via via nel corso del processo concreto della ricerca scientifica e la loro continua sostituzione e riformulazione è connessa al rapporto produttivo, di controllo e verifica, che la teoria deve intrattenere con l'esperienza (si noti il coglimento, da parte di Reichenbach, della portata rivoluzionaria, dal punto di vista concettuale, della teoria della relatività, ed insieme la richiesta che la scienza proceda sempre per revisione critica della proprie strutture epistemologiche: concezione che si riannoda alle teorie moderne sui cosiddetti controlli olistici).

L'importanza della riflessione di Schlick sta nella sua dettagliata rilevazione di come la teoria della relatività si costituisca come processo di purificazione logico-scientifica di concetti induttivi e di contenuti d'esperienza vissuta. Einstein conduce molto più in là di Newton la distinzione, assolutamente essenziale, tra l'esperienza ordinaria dei contenuti spaziotemporali e le nozioni teoriche dello spazio e del tempo della scienza. L'impostazione einsteiniana è però arricchita anche dal rigore metodologico della concettualizzazione matematica dello spazio e del tempo e dal superamento della loro distinzione; dalla dimostrazione degli effetti di un'elaborazione non sufficientemente critica delle nozioni scientifiche dello spazio e del tempo e della necessità di adottare costrutti teorici di più alto grado di generalità rispetto a quelli sufficienti a spiegare l'esperienza ordinaria (sembra di rivedere l'ambizione galileiana di una fisica universale, non limitata alla sola fisica terrestre); infine, dall'analisi sistematica delle trasformazioni che permettono di passare, con successive procedure di misura e assiomaticizzazione, alla costruzione concettuale dello spaziotempo relativistico.

Schlick giunge così all'importante conclusione che la teoria della relatività sia la dimostrazione di come gli "oggetti fisici" siano "non-intuitivi", e quindi come la ricerca scientifica debba necessariamente basarsi su modellizzazioni teoretiche del reale fondate su ipotesi. Nonostante la reverenza di

²¹ H. REICHENBACH, *La nuova filosofia della scienza*, Milano, Bompiani, 1974, II ed., pp. 62-63.

Schlick per Mach e la sua indubbia dipendenza da quest'ultimo, emerge qua un certo contrasto: infatti Mach, come già abbiamo visto, riconosce come criteri essenziali per la significanza scientifica della teoria la sua connotazione olistico-funzionale dell'interconnessione degli elementi e l'economia della loro scelta. Il valore conoscitivo reale non è invece significativo e risulta una sorta di relitto metafisico nel seno della scienza. Schlick e Reichenbach attribuiscono invece un valore conoscitivo reale alla scienza e considerano essenziale il processo con cui la scienza stessa riesce a giustificare l'origine dall'esperienza dei propri costrutti ed a determinare il metodo per il controllo sperimentale (verificazione) dei propri asserti. In qualche modo, allora, siamo di fronte ad un rovesciamento dell'interpretazione machista della relatività: ciò che ai machiani pareva un antieconomico e metafisico processo di postulazione, appare a Schlick un modello del tutto legittimo di costruzione di ipotesi teoriche, sia per la sua genesi a partire dall'esperienza per trasformazioni progressive, sia perché la teoria stessa prescrive le procedure per la propria controllabilità sperimentale.

L'orizzonte dei big data

Dalle conseguenze del paradosso di Olbers, quindi, si traggono elementi altrettanto potenti, per la comprensione della cosmologia contemporanea, di quelli che si traggono dalle conseguenze dei principi fondamentali della termodinamica e la loro convergenza si trova nelle teorie caratteristiche della fisica di inizio Novecento, che hanno un importo non soltanto rispetto alle concezioni sperimentali e alle pratiche osservative, ma anche in riferimento alla comprensione della filosofia e del processo della conoscenza come tale. Soprattutto il punto sollevato da Olbers costringe a riflettere su proprietà dell'universo dichiarate insondabili e puramente speculative da Kant e Comte, e riportabili invece a regime di corroborabilità empirica dall'approccio astronomico ed astrofisico.

Oggi, peraltro, la conoscenza cambia in ragione della centralità, in essa, dell'elemento del dato, sia come sua natura strettamente matematicizzata, più che percettiva, situa come sua esponenziale disponibilità e crescita.

Astrophysics and cosmology are rich with data. The advent of wide-area digital cameras on large aperture telescopes has led to ever more ambitious surveys of the sky. Data volumes of entire surveys a decade ago can now be acquired in a single night and real-time analysis is often desired. Thus, modern astronomy requires big data know-how, in particular it demands highly efficient machine learning and image analysis algorithms. But scalability is not the only challenge: Astronomy applications touch several current machine learning research questions, such as learning from biased data and dealing with label and measurement noise. We argue that this makes astronomy a great domain for computer science research, as it

pushes the boundaries of data analysis. In the following, we will present this exciting application area for data scientists. We will focus on exemplary results, discuss main challenges, and highlight some recent methodological advancements in machine learning and image analysis triggered by astronomical applications.²²

Questo rapido *abstract* rende chiara la portata del problema. Nel campo della ricerca astronomica ed astrofisica diventa possibile osservare oggi, in un lasso di tempo brevissimo, una serie di dati così cospicua da sfuggire all'analisi umana. Quindi, come procedere nel quadro di una crescente capacità di rilevazione empirica?

La risposta è nell'ordine dell'integrazione dei moderni sistemi di calcolo nella scienza astrofisica e astronomica.

I problemi sollevati sono allora diversi:

1. sistemi di calcolo intelligenti, capaci di imparare anche da dati che devono esser filtrati da rumore e distorsione;
2. problemi di scala nell'immagazzinamento dei dati e di priorità nel loro trattamento;
3. interpretazione fisica di schemi di correlazione e organizzazione dei dati elaborati da sistemi di calcolo capaci di apprendimento;
4. costi della ricerca e loro ottimizzazione.

Sempre dal precedente articolo leggiamo:

Physical Models vs. Machine Learning Models

A big concern data scientists meet when bringing forward data-driven machine learning models in astrophysics and cosmology is lack of interpretability. There are two different approaches to predictive modeling in astronomy: physical modeling and data-driven modeling. Building physical models, which can incorporate all necessary astrophysical background knowledge, is the traditional approach. These models can be used for prediction, for example, by running Monte Carlo simulations.²³ Ideally, this approach ensures that the predictions are physically plausible. In contrast, extrapolations by purely data-driven machine learning models may violate physical laws. Another decisive feature of physical models is that they allow for understanding and explaining observations. This interpretability of predictions is typically not provided when using a machine learning approach.

Physical models have the drawbacks that they are difficult to construct and that inference may take a long time (e.g., in the case of Monte Carlo simulations). Most importantly, the quality of the predictions depends on the quality of the physical model, which is typically limited by necessary simplifications and incomplete scientific knowledge. In our experience, data-driven models typically outperform physical models in terms of prediction accuracy. [...]

²² Cfr. <https://arxiv.org/abs/1704.04650>, J. KREMER, K. STEN-SBO-SMIDT, F. GIESEKE, K. STEENSTRUP PEDERSEN, C. IGLER *Big Universe, Big Data: Machine Learning and Image Analysis for Astronomy*, in «IEEE Intelligent Systems», vol. 32 (2), Mar. 2017, pp. 16-22: 10.1109/MIS.2017.40 (Cite as: arXiv:1704.04650v1 [astro-ph.IM]; link consultato 01.05.18).

²³ La simulazione Monte Carlo è una tecnica che genera variabili casuali per stimare probabilisticamente l'incertezza delle previsioni di un modello.

Thus, we strongly advocate data-driven models when accurate predictions are the main objective. And this is indeed often the case, for example, if we want to estimate properties of objects in the sky for quickly identifying observations worth a follow-up investigation or for conducting large-scale statistical analyses.

Generic machine learning methods are not meant to replace physical modeling, because they typically do not provide scientific insights beyond the predicted values. Still, we argue that if prediction accuracy is what matters, one should favor the more accurate model, whether it is interpretable or not.

While the black-and-white portrayal of the two approaches may help to illustrate common misunderstandings between data scientists and physicists, it is of course shortsighted. Physical and machine learning modeling are not mutually exclusive: Physical models can inform machine learning algorithms, and machine learning can support physical modeling. A simple example of the latter is using machine learning to estimate error residuals of a physical model.

Siamo così di fronte a una pletora di tematiche di interesse sociologico ed epistemologico.

Da un lato, la dimensione della scienza come processo sociale, che coinvolge comunità di specialisti e tecnologie; dall'altro, il costo sociale da tenere sotto controllo, in un mondo reale che prevede la valorizzazione del prodotto della ricerca scientifica (anche) come merce e che comunque assegna risorse finite al processo di investigazione scientifica.

Da un lato, la costruzione meccanico-informativa di catene di previsione che permettono la sintesi dei dati, che però non si conformano ai modelli fisici noti; dall'altro, modelli fisici non compatibili con la crescente sistematica dei dati; in mezzo, il problema della loro convergenza.²⁴

Un didatta di filosofia potrebbe così chiedersi, con la propria classe, quanto della partecipazione a un'attività sociale così specializzata come la ricerca scientifica sia facilitato oppure ostacolato dai sistemi contemporanei di raccolta e trattamento del dato. O se attività come il progetto Seti@home avvicino il ricercatore autonomo e la persona comune appassionata alla ricerca scientifica. O se e come sia giustificato il massiccio investimento che imprese

²⁴ Il problema della divergenza tra sistemi comodistici di previsione e sistemi dotati di significato fisico si propone regolarmente nell'epoca delle trasformazioni scientifiche.

come queste richiede, e pertanto da qui vi sarebbe un'ottima opportunità per discutere il valore imprescindibile della scienza di base nella politica culturale e formativa di un paese.

Conclusioni

Nella riflessione sull'astronomia e il suo ruolo nella storia della cultura, il docente di filosofia ha diverse opportunità ulteriori rispetto a quella della classica valorizzazione del periodo della rivoluzione scientifica.

Una assai significativa è data dall'analisi della problematica cosmologica ottocentesca, con riferimento al paradosso di Olbers e alla soggiacente osservazione empirica che è dotata di valenza cosmologica e pertanto autorizza l'estensione della problematizzazione teorica successiva dei principi della termodinamica e della relatività a tentare di applicarsi alla soluzione dei paradossi del modello cosmologico altrimenti ipotizzato da Olbers. Nella trasformazione, pertanto, da vecchiume di origine metafisica a nuovo campo di sintesi del sapere scientifico, la cosmologia ingloba l'osservazione astronomica ed astrofisica e potenzia, anzi sempre più esige, osservazione potenziata e modellizzata. La scala di questa osservazione produce problemi tecnici sempre più rilevanti e comporta la trasformazione dell'impresa dell'osservazione astronomica nel senso della tecnologia dei *big data*, con tutto quanto questo comporta.

Un'elegante conclusione sarebbe quella che nel campo della ricerca astronomica, d'altronde, la simbiosi con lo strumento osservativo e la ricerca della precisione hanno sempre comportato e stimolato procedure tecnologiche peculiari, come la macchina di Anticitera o gli strumenti di Tycho Brahe.

Dal percorso svolto emerge, in ogni caso, lo scambio inesauribile tra i campi del sapere e l'importo filosofico attualissimo della ricerca astronomica, nonché i profili di impiegabilità ai fini della costruzione di percorsi di senso nella didattica integrata della filosofia. Ai docenti delle discipline coinvolte la possibilità di applicarla, mediante le prospettive previste dagli *Orientamenti* o altre scelte metodologiche proprie.

Franco Gallo (1962), dirigente tecnico MIUR, è autore di monografie e articoli di ricerca nel campo della filosofia, della storia e della didattica delle scienze umane. Coautore di una nota serie manualistica, ha svolto numerosi corsi di formazione in materia di filosofia ed epistemologia.

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

Sezione didattica del LXII Congresso Nazionale della SAI - Teramo 2018

A cura di Christian del Pinto, Andrea Cittadini Bellini

Rappresentazione di una stella: considerazioni geometriche, simboliche e didattiche

Christian del Pinto

Scuola Secondaria di I Grado "F. Savini" - Teramo

NEL *Saggiatore* (1623), Galileo Galilei afferma¹ che il Libro dell'Universo è scritto nel linguaggio della Matematica, che permea, pertanto, l'intero *corpus* scientifico. Data l'immensa vastità degli argomenti possibili, proporre un qualsiasi argomento nell'ambito delle scienze matematiche restando nel mero nozionismo significherebbe sminuire l'importanza inalienabile di tale Insegnamento, privandolo delle qualità "emozionali" su cui l'intero senso comune di bellezza ed armonia trova proprio fondamento.

Ben consapevole di ciò, un docente ideale dovrebbe essere in grado di trasmettere, nel corso (sempre troppo breve) delle proprie lezioni, quel senso di meraviglia e di ordine che nelle scienze matematiche è sempre presente, dalla struttura di un "quadrato magico" al ricoprimento di una superficie piana tramite figure regolari od opportuna tassellatura,² dalla progressione di una serie numerica alla precisione di una particolare costruzione geometrica, fino a giungere alle sorprendenti peculiari caratteristiche proprie di un determinato insieme di numeri.

¹ Precisamente, nel Capitolo VI: «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'impara a intender la lingua, a 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 mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto».

² Tale ricoprimento è possibile esclusivamente con quadrati (in numero di 4 a contatto con uno dei propri vertici), triangoli equilateri (in numero di 6) ed esagoni regolari (in numero di 3). Tenendo conto delle possibili simmetrie (per rotazione, riflessione e glissoriflessione), si può dimostrare che si possono realizzare soltanto 17 differenti tassellature, tutte architettonicamente rappresentate nell'Alcázar di Siviglia. Invece, nell'Alhambra di Granada, ne sono rappresentate soltanto 13.

Non dovrebbero inoltre mancare specifiche attività laboratoriali nell'ottica, necessaria, che il discente debba il più possibile concretizzare quei concetti matematici – sia aritmetici che geometrici – che altrimenti resterebbero confinati in uno spazio meramente teorico. E ciò sarebbe un paradosso, visto che è del linguaggio con cui è stato scritto il "Libro dell'Universo" – e quindi l'intera Realtà – che si sta parlando.

Tale lavoro trova propria genesi nella domanda posta da uno studente di III media³ in riguardo a quale particolare motivazione le stelle venissero, da tempo immemore, rappresentate secondo una forma pentagonale. Tale domanda, tutt'altro che banale, ha meritato una risposta accurata, attingendo al vero e proprio linguaggio universale che ha accompagnato l'essere umano durante la sua intera evoluzione.

Per riuscire nell'intento di ricercare un linguaggio universale, è necessario risalire il fiume del tempo fino agli albori della comunicazione, quando non esisteva alcun alfabeto e lo scambio di informazioni avveniva mediante la più ancestrale delle rappresentazioni scritte: il simbolo. Dal punto di vista tradizionale, il simbolo non dev'essere meramente decodificato, ma compreso nella sua interezza. La sua semantica dev'essere assimilata mediante un processo intuitivo slegato dalla razionalità, poiché è proprio la razionalità che ne limiterebbe la comprensione quale riflesso dei sovrastanti archetipi.

Un simbolo interpretato dalla mente razionale risente delle conoscenze, dei desideri e delle aspettative di colui che lo interpreta. La semantica di un

³ Nello specifico, l'alunno Federico Teti, che nell'Anno Scolastico 2017/2018 ha frequentato la classe III F della Scuola Secondaria di I Grado "Francesco Savini" di Teramo.

simbolo è qualcosa di intrinseco, poiché appartiene ad un mondo (quello degli archetipi) posto ad un livello ben superiore rispetto a quello materiale. Tale essenza dev'essere compresa, non semplicemente decodificata. Decodificare un simbolo vuol dire "sporcarlo" attribuendogli una parte del proprio bagaglio di conoscenze legate alla materialità del contingente mondo in cui si vive. Il simbolo, quindi, rappresenta un'ottima opportunità per sintetizzare un linguaggio universale.

Fatta chiarezza sulla concezione tradizionale del simbolo e sui possibili metodi da utilizzare per conoscerlo dal punto di vista semantico, è doveroso fare una considerazione che, in un primo momento, potrebbe sembrare quasi scontata e banale. L'essere umano ha sempre temuto ciò che era al di là del proprio controllo, oltre la sfera delle sue capacità. Il rendersi conto che in natura ci fossero eventi, fenomeni e forze che egli non avrebbe mai potuto controllare, ha fatto sì che questi sviluppasse una certa percezione dei propri limiti. Al di fuori, furono poste entità superiori, concetti e idee travalicanti la materiale sfera di agibilità d'ogni umano controllo, che iniziarono ad esser tenute in considerazione con reverenziale timore. Un timore che poteva essere mitigato mediante la possibilità di ingraziarsi tali arcane ed occulte forze, attraverso la creazione e lo sviluppo di un opportuno culto. Da qui, nacquero le invocazioni e le offerte sacrificali, la ritualità e la liturgia. Per dirlo in un'unica parola, la religione. In tale contesto, fu intuiva l'esistenza di una Volontà Creatrice che, tramite la propria Intelligenza, aveva plasmato l'Uomo e il mondo stesso seguendo una Legge ultraterrena ed infondendovi, saggiamente, parte della propria Energia. Un arcano *Logos* che in molti contesti sociali, anche profondamente differenti tra loro, venne rappresentato con un aspetto triplice: Volontà-Legge (ogni cosa che ha ragione d'essere è governata da leggi superiori secondo una volontà trascendente), Energia-Saggezza (le Idee – del buono, del giusto, del bello – che abitano il mondo iperuranico degli archetipi possono essere intuite e conseguentemente applicate nel mondo contingente) e Intelligenza-Forma (la concretizzazione degli archetipi nel mondo contingente è realizzata mediante l'Intelligenza superiore che li fa manifestare in una forma adeguata nel pieno rispetto della Legge). Molti dei simboli primordiali sono pertanto da riferirsi necessariamente al tentativo dell'essere umano di rappresentare tale *Logos*, che non poteva essere né visto né sentito, ma del quale non si poteva fare a meno di intuire l'assoluta presenza.

La rappresentazione dei simboli primordiali si è necessariamente tradotta in aritmetica e geometria. Di conseguenza, i numeri e le forme geometriche hanno assunto, nel corso dei secoli, una fondamentale importanza, quali vie da percorrere per conoscere il divino. Plotino, ad esempio, ha affermato che «il tutto è emanato attraverso i numeri», mentre Platone nel *Timeo* sostiene che «Dio, quando

crea l'Universo, in realtà geometrizza», evidenziando in tal modo che ogni archetipo è un insieme di numeri correlati tra loro. Non a caso, per questi, la perfezione era rappresentata in natura dai cinque solidi regolari, detti per l'appunto "platonici", le cui facce sono costituite da poligoni regolari. Un ulteriore esempio può certamente essere costituito dalla scuola dei pitagorici, che per percepire il divino utilizzavano esclusivamente numeri e formule matematiche. Pur non parlando in tale sede del contesto matematico quale uno dei fondamenti logici della filosofia, si farà riferimento esclusivamente al proprio significato a livello simbolico.

Tornando al quesito di partenza, nella ricerca semantica inerente i simboli primordiali, sarà doverosamente necessario soffermarsi sul significato del numero cinque.

Se si osserva una piramide a base quadrata in prospettiva dal basso, essa apparirà come un pentagono regolare. Il pentagono ricorda anche la forma di una nave: per tale motivo al numero cinque le antiche tradizioni hanno connesso il significato del divenire. Il divenire dell'Uomo è rappresentabile come il cammino spirituale che egli compie per ascendere verso la divinità, così come il cammino che l'Uomo primordiale ha compiuto discendendo dalla divinità verso la manifestazione. Nei culti misterici della Samotraccia, queste due tipologie di "divenire" erano rappresentate da due differenti categorie di iniziati, note rispettivamente come *Axeos* e *Axeostris*: colui che inizia il proprio cammino e colui che, avendolo portato a termine, torna indietro per aiutare, con la propria esperienza acquisita, chi ancora deve giungere alla meta. Quando l'Uomo nasce, l'intera sua esistenza è un cammino proteso verso la perfezione. L'uomo e il proprio divenire sono quindi simboli inscindibili, tradizionalmente rappresentati dal numero cinque, come è sintetizzato nella ben nota rappresentazione dell'Uomo vitruviano inscritto in un pentagono regolare, con la punta diretta verso l'alto in un perenne moto di ascensione. Tracciando in un pentagono regolare i segmenti che uniscono i vari vertici, si genera una stella a cinque punte nota come pentalfa (ovvero formata dalla sovrapposizione di cinque lettere alfa dell'alfabeto greco, come affermavano i pitagorici, o la stella Sirio, com'era per gli antichi Egizi) o, più comunemente, pentacolo. Questo è un simbolo estremamente conosciuto anche da coloro che non hanno mai affrontato studi in materia, molto utilizzato in ambito tradizionale ed esoterico (dall'alchimia alla wicca) per rappresentare l'Uomo nella sua interezza, nonché la sua necessità di essere protetto dalle influenze negative che potrebbero ostacolarlo nel proprio cammino verso l'assoluto. A seguito di ciò, il satanismo, nel completo rovesciamento dei valori umani etici e morali, rovescerà il pentacolo per rappresentare, insieme al pentagono regolare che lo circonda, una nave diretta verso il basso, in un perenne protendersi verso l'accrescimento degli istinti più ferini dell'Uomo e costante allontana-

mento dalla divinità e dai vincoli che ad essa possono essere ricondotti, in quanto, secondo tale pensiero, è proprio dall'allontanamento dalla divinità che l'Uomo può a sua volta divenire dio (FIG. 1).

La nave è un simbolo ancestrale, molto utilizzato anche nel cristianesimo: non a caso i tetti delle chiese sono chiamati "navate" e ricordano, nella forma, delle navi rovesciate. Sulla nave, inoltre, vi sono i "pescatori di anime" come Pietro, a cui il Cristo affida la propria Chiesa al termine della propria manifestazione mortale. La nave ha sempre simboleggiato il viaggio verso regioni inesplorate (i mari, tra i cui potenti flutti erano celati pericoli inimmaginabili). Essa simboleggia il mezzo con cui l'essere umano potrà concretizzare il suo destino finale: un destino di elevazione spirituale, di redenzione e di contemplazione del Divino. Come avveniva nell'antico Egitto, dove il viaggio dell'anima del Faraone defunto, che salpava con una nave alle volte di Orione, per ricongiungersi alle divinità, costituiva l'aspetto fondamentale della religione. Il cristianesimo ha più volte utilizzato, nelle proprie Scritture, il numero cinque per rappresentare il limitato stato dell'Uomo ed il suo destino di redenzione. Si pensi, per fare alcuni esempi, alle cinque vergini prudenti e alle cinque vergini stolte,⁴ alla moltiplicazione dei cinque pani e dei due pesci,⁵ o alla parabola dei talenti.⁶ Cinque sono, infine, anche le piaghe del Redentore, grazie alle quali l'intera umanità verrà redenta, come sono rappresentate nelle cinque croci vermiglie che costituiscono la "Croce di Gerusalemme", ancora oggi simbolo distintivo dell'Ordine Equestre del Santo Sepolcro.

Al numero cinque è anche correlato il concetto di "Sezione Aurea", nota anche come "Numero d'oro". Il "Numero d'oro" è un particolare rapporto matematico – definibile sia in ambito geometrico che aritmetico – pari a 1,618 studiato fin dai tempi di Euclide e Pitagora, e rappresenta il rapporto costante esistente tra il raggio di una circonferenza e il lato del decagono regolare in essa inscritto. Analogamente, lo si può definire come il rapporto tra il lato di un pentagono stellato e il lato del pentagono convesso, se entrambi sono inscritti nella medesima circonferenza, oppure tra il lato del decagono stellato ed il raggio della circonferenza ad esso circoscritta. Nel Cinquecento il matematico Luca Pacioli ne definì l'applicazione "Divina proporzione", mentre il termine "Sezione aurea" è invece attribuito a Leonardo da Vinci. In ambito aritmetico, esso gode di particolari caratteristiche peculiari. Ad esempio, il suo reciproco è 0,618, mentre il suo quadrato è 2,618 (si noti che le cifre decimali restano le stesse). Il suo cubo è 4,236 (pari alla somma tra 1,618 ed il suo quadrato 2,618), mentre la sua quarta potenza è 6,854 (pari alla somma tra il suo quadrato

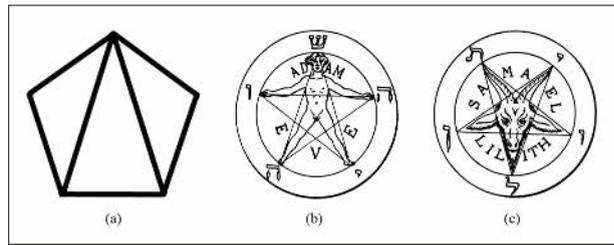


FIG. 1. Rappresentazione tradizionale del numero cinque come: (a) visione prospettica di una piramide, (b) pentacolo in elevazione e (c) in allontanamento.

2,618 ed il suo cubo 4,236). Per tale numero, quindi, ogni determinata potenza è pari alla somma tra le due potenze ad essa precedenti e tale proprietà risulta essere valida anche per le potenze del suo reciproco 0,618. Il "Numero d'oro" fu studiato con particolare attenzione dal matematico Leonardo da Pisa detto Fibonacci, frequentatore della corte di Federico II. Fibonacci, infatti, studiò le particolarità di una serie numerica in cui ogni termine è la somma dei due termini ad esso precedente (1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, ...); dividendo ogni numero della serie per il minore che lo precede, si ottiene sempre 1,618 (così come dividendo ogni numero della serie per il maggiore che lo segue si ottiene il suo reciproco 0,618). Tale successione di divisioni risulta essere convergente al numero irrazionale $(\sqrt{5} + 1)/2$, la cui approssimazione alle prime tre cifre decimali risulta essere, per l'appunto, 1,618.

Al di là di tali caratteristiche, la maggiore importanza simbolica il Numero d'oro la ottiene in base all'evidenza che esso rappresenta – oltre a molteplici ulteriori casi in natura, come la spirale di alcune conchiglie e le gemmazioni di alcuni fiori ed ortaggi – il metro di misura con il quale si armonizza il corpo umano ben proporzionato. Esso infatti risulta essere, in un uomo adulto, il rapporto che c'è tra la sua statura e la distanza che intercorre da terra all'ombelico, tra la lunghezza del braccio e quella dal gomito alle dita tese, tra la gamba dall'anca al malleolo e la distanza che intercorre fra l'anca e il ginocchio. Anche le falangi, le sezioni delle dita dei soli medio ed anulare sono in "rapporto aureo" tra di loro, mentre il viso è scomponibile in tutta una serie di segmenti il cui rapporto fornisce sempre 1,618 (ad esempio, la distanza esterna tra gli occhi e la lunghezza della bocca, o la lunghezza della bocca per la larghezza del naso). Tale peculiarità fu notata dalle popolazioni antiche che enfatizzarono in tal modo il senso sacro legato a tale numero. Esso fu già da allora considerato il mattone fondamentale con cui il Logos aveva dato forma alla sua creatura più perfetta: l'Uomo. Per tale motivo le architetture delle più importanti costruzioni sacre al mondo, dalle piramidi egiziane alle cattedrali gotiche, passando per l'edificio simbolico di Castel del Monte in Puglia (FIG. 2) sono state concepite secondo tale rapporto, che pertanto risulta essere uno dei numeri fondamentali della matematica.

⁴ Vangelo di Matteo, cap. 25, v. 1 e seguenti.

⁵ Vangelo di Matteo, cap. 16, v. 9.

⁶ Vangelo di Luca, cap. 12, v. 6.

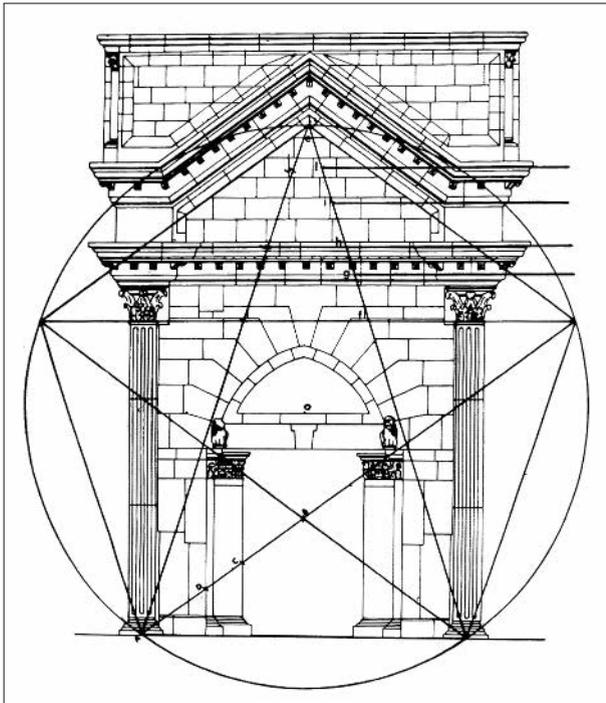


FIG. 2. Schema geometrico, sviluppato secondo il Rapporto aureo e la simbologia del numero cinque, rilevato nel portale di Castel del Monte, come mostrato da A. TAVOLARO (1994, p. 33).

In conclusione, la rappresentazione tradizionale di una forma non è casuale. Essa deriva da un'antica e differente percezione del sacro nella quotidiana contingenza che fa del simbolo uno strumento archetipico di conoscenza. Ed in questo non vi è nulla di "esoterico". Le stelle, idealmente ubicate nel Cielo più distante (detto appunto "delle Stelle fisse") hanno sempre rappresentato per l'Uomo una meta a cui ascendere, mediante un cammino che travalica la propria esistenza (si pensi, ad esempio, al già citato viaggio ultraterreno degli antichi Faraoni verso la Cintura di Orione).

L'associazione della forma pentagonale alla rappresentazione delle stelle indica, pertanto, una dinamica di evoluzione che tende alla perfezione. Non è un caso, infatti, che rapporti geometrici propri del pentagono (Numero d'oro) siano presenti nelle proporzioni dell'essere umano perfetto (Uomo vitruviano). Tradizionalmente, ciò sottolinea la natura verticale dell'Uomo che "discende dalle stelle" e che quindi vi può tornare. In un certo senso è vero, visto che le fusioni termonucleari riescono a produrre elementi fino al ferro e che tutti gli elementi più pesanti, comunque indispensabili per l'innescare e lo sviluppo della vita, sono frutto delle supernovae.

Referenze bibliografiche

- DEL PINTO C., *Didattica attiva ed inclusiva della Scienza*, Acadèmia Editrice d'Italia e San Marino, Bologna, 2015.
- DEL PINTO C., *Il Simbolo nel contesto tradizionale ed attuale*, Acadèmia Editrice d'Italia e San Marino, Bologna, 2012.
- DURANTI G. C., *Terzo Numero Binomiale di Euclide e Terza Civiltà di Amon-Zeus*, Franco Cesati, Venezia, 1989.
- GONZALEZ RAMIREZ M. I., *El trazado geométrico en la ornamentación del Alcázar de Sevilla*, Universidad de Sevilla, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Sevilla, 1995.
- MAZZOLI P., *Capire si può. Educazione scientifica e matematica*, Carocci, Roma, 2005.
- MARTINEAU J., (a cura di), *Quadrivium*, Sironi, Milano, 2011.
- MARTINEAU J., (a cura di), *Scientia*, Sironi, Milano, 2012.
- PACIOLI L., *De Divina Proportione*, Amiedi, Milano (edizione riservata fuori commercio, edizione originale 1509).
- TAVOLARO A., *Castel del Monte. Scienza e mistero in Puglia*, Giuseppe Laterza, Bari, 2000.
- TAVOLARO A., *Federico II di Svevia Imperatore e Leonardo Fibonacci da Pisa Matematico*, Fratelli Laterza, Bari, 1994.

Christian del Pinto, Dottore in Fisica, Dottore di Ricerca in Sismologia, geofisico, sismologo, vulcanologo, Membro dell'*International Seismic Safety Organization* (ISSO). Già Responsabile scientifico del Centro Funzionale del Servizio per la Protezione Civile del Molise, è attualmente docente di Matematica e Scienze presso la Scuola Secondaria di I Grado "F. Savini" di Teramo. Si occupa, su più fronti, di divulgazione scientifica, diffusione della cultura della prevenzione e didattica della scienza. È inoltre *Postdoctoral Research Assistant* presso il Dipartimento di Ingegneria e Scienze dell'Informazione e Matematica dell'Università degli Studi di L'Aquila, nell'ambito di ricerche riguardanti l'intelligenza artificiale e il *Complex Event Processing* applicate all'analisi dei dati sismici.

A cura di Donatella Randazzo e Ileana Chinnici

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

*L'eclisse totale di Sole del 21 agosto 1914
Osservata dalla missione italiana in Teodosia (Crimea)
(p. 108)*

RELAZIONE 3^a DI L. PALAZZO

[NDR: prosegue dai fascicoli precedenti del «Giornale di Astronomia».]

Registrazioni geotermometriche

A TEODOSIA abbiamo messo in atto l'idea (forse per la prima volta in occasione di eclissi) [...] di verificare con misure dirette quale sia l'effetto di raffreddamento sul suolo provocato dall'occultazione temporanea del Sole. Non v'è in ciò una semplice curiosità di dettaglio da soddisfare; ma chi ha presente quanto io ho scritto [...] intorno alle possibili spiegazioni dell'effetto magnetico delle eclissi solari, si persuade che lo studio del raffreddamento del suolo in tempo di eclisse può assurgere anche ad una certa importanza dal punto di vista teorico; invero, tra le spiegazioni che abbiamo allora prospettate, ve n'è una in cui si invoca, in particolare, la funzione del suolo in quanto è soggetto a raffreddamento, più o meno notevole, durante l'eclisse.

Noi avevamo ordinato appositamente alla Casa costruttrice Richard di Parigi, e ricevuto in tempo utile prima della nostra partenza, un termometro registratore a distanza, cioè un termografo in cui il bulbo termometrico è collegato con la capsula Bourdon del registratore mediante un tubo di rame lungo e flessibile pieno del liquido. Io intendevo valermene come registratore della temperatura del suolo, seppellendo il bulbo nel terreno. Anche in questo strumento vi è la compensazione per annullare l'effetto delle variazioni della temperatura esterna; il compensatore consiste in un secondo termometro a tubo filiforme, ma senza serbatoio, che corre parallelo al primo tubo ed agisce, mediante la relativa capsula, su di un sistema differenziale di leve. I limiti delle temperature che si possono registrare nel nostro geotermometro, sono -5° e $+55^{\circ}$; il cilindro col movimento d'orologeria è a rotazione giornaliera.

Scelto nel giardino un piccolo elemento del suolo spianato e nudo d'erba, vi abbiamo adagiato orizzontalmente, a $\frac{1}{2}$ cm di profondità dalla superficie,

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

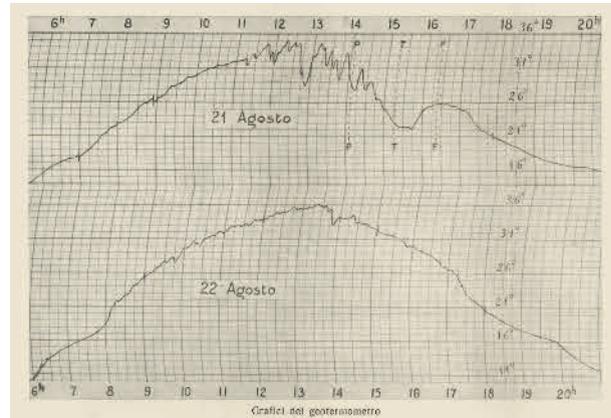


FIG. 1.

il vaso o bulbo recettore delle temperature, che è cilindrico, della lunghezza di 16 cm e del diametro di 1 cm, disponendo il registratore su di uno sgabello, accanto al bancone degli eliografanti, dalla parte di sud, in modo che sull'elemento di terreno potesse battere il Sole tutto il giorno.

Nella [...] parte del diagramma registrato dal geotermometro nel giorno 21 agosto, [...] vedi FIG. 1] si rispecchiano tutte le fluttuazioni della mutabile nuvolosità nella plaga del cielo occupata dal Sole; e se teniamo sott'occhio anche il diagramma dell'attinografo Violle-Richard [...], tutte le creste e tutte le bassure della curva attinografica [...] si contano altresì sulla curva geotermometrica, una ad una in perfetta corrispondenza fra loro, con questo in più: che le oscillazioni del geotermometro sono tutte, in certo modo, esagerate, o per dire meglio, notevolmente amplificate, ed inoltre mostrano un leggero anticipo in confronto delle corrispondenti onde dell'attinografo; il che prova che il geotermometro, sotto una leggera copertura di terra, prende meglio e più prontamente le temperature cosiddette d'insolazione, di quel che faccia il termometro chiuso dentro la sfera a vernice nera dell'attinografo. È noto, del resto, che il potere emissivo ed assorbente, per il calore, della terra in polvere eguaglia, o differisce di poco, da quello del nero fumo [...].

Dall'insieme delle cose dette, si può stimare di 8° circa il raffreddamento della superficie del terreno provocato dall'eclisse, raffreddamento che è abbastanza ragguardevole.

Le osservazioni geotermiche qui riferite e che, per essere noi in possesso di un solo registratore, abbiamo necessariamente limitate ad un unico strato (quello più superficiale, di $\frac{1}{2}$ cm di spessore), non sono che un primo saggio di una più estesa ricerca

che si potrebbe fare nell'occasione di eclissi. Sarebbe infatti interessante collocare termografi a profondità diverse: a 5, a 10 e più cm, per studiare come l'onda termometrica suscitata, nell'andamento normale diurno, dall'intervento di un'eclisse solare, penetri man mano in profondità, riducendosi d'ampiezza e ritardando progressivamente nel minimo, fino ad estinguersi. È un argomento che potremmo mettere in programma per una futura eclisse [...]. Naturalmente converrebbe adoperare un registratore in cui parecchi termometri coi bulbi seppelliti in varie profondità avessero a registrare su di un unico cilindro; così il confronto fra le diverse curve dello stesso foglio si renderebbe più agevole e più diretto, specialmente se si adottasse un dispositivo per fare tracciare agli stili scriventi ordinate rettilinee, invece che curve, lungo una stessa generatrice del cilindro, allo scopo di eliminare la parallasse reciproca fra le penne [...].

Misure della radiazione penetrante

Già nelle occasioni di precedenti eclissi solari sono state fatte, di frequente, da vari autori, speciali ricerche di elettricità atmosferica, indagando su quale poteva essere l'influenza del temporaneo occultamento del Sole in pieno giorno su diversi elementi: il potenziale elettrico atmosferico preso in un dato punto, ovvero il gradiente o caduta di esso (*volta per metro*), la dispersione elettrica dell'aria, la sua ionizzazione e rispettivamente, il numero e la mobilità degli ioni, la radioattività dell'aria libera, la radiazione penetrante. Ognuno di questi elementi richiede un proprio strumentario per la registrazione continua o per le misure isolate con letture dirette; e poiché, coll'essermi proposto quale compito essenziale l'impianto del magnetografo, io solo, nei pochi giorni disponibili a Teodosia prima dell'eclisse, non avrei avuto modo di procedere anche all'installazione più o meno laboriosa di altri apparecchi, e non avrei potuto pure, durante l'eclisse, distogliere troppo la mia attenzione dalle misure pireliometriche per attendere ad altro, così la mia attività nel campo delle ricerche elettro-atmosferiche doveva necessariamente limitarsi a qualche genere di misura che non importasse né grandi preparativi pel montaggio né molto dispendio di tempo nell'osservare. Come tale mi si offriva la determinazione della radiazione penetrante, a farsi mediante il noto apparato di Wulf [...], sempre pronto per immediate osservazioni. Il R. Ufficio Centrale di Meteorologia possiede due di tali apparecchi, forniti dalla Firma Günther & Tegetmeyer di Braunschweig, e già studiati ed adoperati dal nostro Dottor Pacini, nelle sue interessanti ricerche sulla radiazione penetrante nel mare Tirreno ed al lago di Bracciano. Dei due scelsi per portare con me a Teodosia quello di costruzione più recente, segnato col N. 2861.

[...] qui mi limito ad enunciare semplicemente il risultato delle mie misure riguardo all'eclisse, risul-

tato che fu negativo, in questo senso: che dalla serie di osservazioni di Teodosia *non è apparso alcun sensibile effetto dell'eclisse solare sull'intensità della radiazione penetrante*.

Osservazioni meteorologiche

In quanto a meteorologia propriamente detta, noi non ci eravamo proposti alcuna particolare ricerca avente un diretto fine per se stessa, ma semplicemente desideravamo raccogliere, dagli ordinari strumenti meteorologici, quegli elementi di fatto, la cui conoscenza era utile complemento e corredo per le altre indagini: magnetiche, attinometriche, geotermiche ed elettriche, che avevano per noi maggior interesse e che abbiamo svolto nei precedenti capitoli. D'altra parte, allorché a Teodosia feci la prima visita al Sig. Prof. Sarandinaki, Direttore della Stazione Centrale del Servizio Idro-Meteorologico pel Mar Nero e pel Mar d'Azof, l'egregio professore mi fece vedere che già si era tutto predisposto per studiare, in ogni particolare, ciò che chiamar potrebbe la meteorologia dell'eclisse, con grande dovizia di mezzi, numerosi strumenti e di prim'ordine, ed abbondante personale, anche militare, che stava allora addestrandosi alle speciali osservazioni.¹ In vista di ciò, non sarebbe stato proprio il caso che da parte nostra si desse molta opera per sviluppare la parte meteorologica del programma per l'eclisse; siamo quindi giustificati se ci limitammo a quei pochi dati meteorologici che potevano servire a noi stessi in rapporto alle altre sunnominate ricerche.

I nostri mezzi di osservazione meteorologica erano modesti, così come era secondario il nostro scopo in tale materia. Avevamo portato con noi un buon barometro aneroide di Naudet, un psicrometro ad aspirazione di Assmann di piccolo modello da viaggio, una serie di piccoli registratori Richard: barografo, termografo ed idrografo. Questi ultimi erano riuniti insieme entro un'apposita cassetta, che aprendosi di sotto e sui lati con adatti sportelli, costituiva un conveniente riparo per la loro esposizione all'aperto. Io appesi questa specie di osservatorio portatile [...] sul davanti di un piccolo castello a travi di legni, in forma di cavalletto con quattro piedi, che aveva servito ai nostri astronomi come armatura d'imballaggio pel trasporto del pesante piedestallo di ferro dell'equatoriale Fraunhofer; distesi inoltre sul dorso inclinato del cavalletto e rivolto a

¹ L'Osservatorio di Teodosia ha sede in uno dei più cospicui palazzi della graziosa cittadina, poco discosto dal mare, e dispone di terreni circostanti per gli impianti dei vari apparecchi di osservazioni e di segnalazioni meteorologiche e marittime. Purtroppo, in conseguenza delle tristi vicende belliche e politiche che travagliarono la misera Russia, il prezioso materiale raccolto dal chiaro Prof. Sarandinaki per la meteorologia dell'eclisse, non deve ancora aver visto la luce; ragione per cui non crediamo poterci dispensare dal dare il resoconto particolareggiato, nella presente relazione, anche di ciò che, sia pure in assai ristretta misura, da noi si è fatto a Teodosia nei riguardi della meteorologia.

sud, una pezza di tela per meglio difendere la custodia cogli strumenti dall'irradiazione solare, pur mantenendo libera la circolazione d'aria; è questa parte posteriore del cavalletto che vedesi nella fotografia del giardino (Tav. XXXVII) [vedi FIG. 1 nel fascicolo precedente del «Giornale di Astronomia»]. Il psicrometro ad aspirazione, che si teneva sospeso pure a lato dei registratori, era all'altezza di 140 cm dal suolo. In quanto al vento, una semplice fettuccia di carta leggerissima, lunga un metro circa e pendente da un'asta sopra il baraccone degli strumenti astronomici, mi serviva per stimare la direzione e la forza delle correnti aeree, con approssimazione sufficiente.

L'osservatorio meteorologico coi registratori fu sistemato nel giardino già l'11 agosto, appena all'indomani del nostro arrivo a Teodosia; e fu mantenuto in funzione fino al mattino del 28 agosto, antiviglianza della nostra partenza.

Comportamento dei tre registratori meteorologici durante l'eclisse

Nelle registrazioni del barografo abbiamo nulla di speciale a notare; forse lo strumento non aveva sensibilità sufficiente per accusare le minime fluttuazioni della pressione atmosferica che potevano presentarsi nell'occorrenza dell'eclisse.

Il tracciato del termografo, nel giorno dell'eclisse, mostra oscillazioni continue un po' prima, e poi dopo il mezzodì, essendo la temperatura dell'aria rapidamente variabile in seguito alle intermittenze di sole e d'ombra causate dalle nubi. Come conseguenza dell'eclissamento del Sole, si osserva sul diagramma [...] una spiccata depressione in forma di V; la temperatura si è abbassata fino a 20° , 4 intorno al momento della totalità (più esattamente, il vertice del minimo sussegue all'istante medio della totalità con un piccolo ritardo valutabile di quasi 5

primi); e raccordando fra loro, con un tratto continuo, le creste della curva prima e dopo l'eclisse, si può stimare che in quel momento, se l'eclisse non vi fosse stata, la temperatura dell'aria avrebbe dovuto essere non meno di 23° , 4. Deduciamo pertanto che il raffreddamento dell'aria, ad $1\frac{1}{2}$ metro circa da terra, prodotto dall'eclisse, è stato di 3° , in cifra tonda, e quindi assai minore del raffreddamento di circa 8° che noi abbiamo constatato nello strato superficiale del suolo mediante il geotermometro; il che, del resto, è conforme a quanto noi conosciamo intorno alla diversità di contegno tra aria e suolo che ricevono i raggi solari.

Riguardo alla curva dell'idrografo, dobbiamo premettere che l'andamento diurno dell'umidità relativa presenta, di consueto, una grande depressione che raggiunge il suo minimo intorno al mezzodì e che si mantiene nelle prime ore del pomeriggio. Or bene, nel giorno dell'eclisse, nella suddetta depressione diurna si osserva un rialzo, una caratteristica piccola cuspidata, il cui vertice corrisponde presso a poco all'ora della totalità; a mezzodì l'umidità relativa era 39%, alle $15\frac{1}{4}$ rialzata fino a 48, alle 16^h di nuovo bassa a 42. È, in certo modo, proprio l'opposto di quanto notammo essersi verificato nell'andamento del termografo: mentre nella convessità (verso l'alto) della curva termica del meriggio si vede, in corrispondenza dell'eclisse, un piccolo incavo in forma di V, troviamo invece, sulla curva igrometrica, che nella concavità od avvallamento meridiano sorge, sempre per effetto dell'eclisse, un rovescio. Questa opposizione di movimenti nella marcia dei due registratori, termografo ed igrografo, è perfettamente spiegabile quando si pensi alla dipendenza dell'umidità relativa dalla temperatura: l'eclisse produce raffreddamento dell'aria, ed il raffreddamento avvicina l'aria umida allo stato di saturazione.

[...]

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

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

Gasparo Squarciafico: un amico genovese di Gio. Domenico Cassini?★★

Riccardo Balestrieri

COME si è formato Giovanni Domenico Cassini (1625-1712)? Quali sono state le sue peregrinazioni intellettuali, prima di maturare gli interessi che lo hanno portato alle scoperte per cui è tuttora ricordato? Quali sono stati gli incontri determinanti lungo la strada percorsa?

Non è questa la sede per sintetizzare la sua biografia.¹ Giova però sottolineare che il periodo meno conosciuto è quello, fondamentale, dell'istruzione superiore a Genova, dopo la formazione di base ricevuta nella contea di Nizza. Di fatto, l'unica fonte disponibile è costituita dai suoi ricordi minuziosi, dettati alla fine di una vita lunga e operosa. Un manuale prezioso, però, suggerisce cautela, nel trattare le autobiografie, a chi si avventura nella storia della scienza!²

Nel 1639 il giovane perinaldese si trasferisce nella capitale della Repubblica, per frequentare il Collegio gesuitico di strada Balbi, da cui nascerà, oltre un secolo dopo, l'Università degli studi.³ L'istituzione è

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

** NdA: La recente scomparsa dell'amica Marina Muzi, che tanto si è prodigata per la divulgazione e la didattica dell'astronomia in Liguria e a Perinaldo, paese natale di Giovanni Domenico Cassini, mi ha spinto a completare questi appunti.

¹ La vita e i contributi scientifici sono stati più volte approfonditi in questa stessa rivista; basti citare il numero monografico: F. BÒNOLI, G. PARMEGGIANI, F. POPPI (a cura di), *Atti del Convegno 'Il Sole nella Chiesa: Cassini e le grandi meridiane come strumenti di indagine scientifica'*, Bologna, 22-23 settembre 2005, «Giornale di Astronomia», 32 (1), 2006.

² H. KRAGH, *Introduzione alla storiografia della scienza*, Bologna, Zanichelli, 1990, p. 166.

³ L'arrivo a Genova è datato al margine di p. 2 (antica numerazione) del manoscritto di cui alla figura. Per un'ampia visione d'insieme del periodo genovese: A. CASSINI, *Gio. Domenico Cassini. Uno scienziato del Seicento*, Comune di Perinaldo, 2003², pp. 29-44.

di buon livello anche nelle matematiche e l'ambiente culturale genovese può contribuire a formare i giovani persino nell'astronomia. Qui, però, si vuole considerare una disciplina, tipica della *Ratio Studiorum* gesuitica, finora trascurata dai biografhi, ma importante per definire la personalità di Cassini: le dispute in materia morale, ricordate con una certa enfasi dallo stesso astronomo, come si può vedere nel brano seguente, tratto dalle sue memorie.⁴

Quelque réputation acquise dans mes entretiens sur les sciences me procura la connaissance de plusieurs personnes de mérite, entr'autres celle de M. Cosoni, élu depuis cardinal dans la dernière promotion, et celle de M. Sarchafieri, dont la maison était hors de la ville, du côté du levant. Nous y allions souvent, et là nous nous exercions à improviser et à discourir sur des sujets proposés, la plupart de morale. Le père Bianchi, jésuite, ayant publié sous le nom de Candidus Philalethes un livre dans lequel il enseignait qu'en matière de morale on est obligé de rejeter l'opinion la moins probable pour suivre la plus probable, plusieurs théologiens soutenaient qu'il suffisait qu'une opinion eût quelque probabilité, pour que l'on fût maître de l'adopter préférablement à d'autres plus probables encore. Tel fut l'avis du père Stefano Spinola, qui fut depuis évêque de Savonne. Cette question fut fort agitée entre nous; j'étais d'avis d'adopter préférablement l'opinion la plus probable: ce parti me paraissait le plus prudent. J'avais pour moi le sentiment de Merenda, premier professeur de droit dans l'Université de Bologne. Je disputai souvent contre M. Lercaro, qui

Nulla aggiunge: G. BERNARDI, *Giovanni Domenico Cassini. A Modern Astronomer in the 17th Century*, Springer, 2017, pp. 9-13.

⁴ Trascrizione da: *Anecdotes de la vie de J.-D. Cassini, rapportées par lui-même, in Mémoires pour servir à l'histoire des sciences et à celle de l'Observatoire Royal de Paris, suivis de la vie de J.-D. Cassini, écrite par lui-même, et des éloges de plusieurs Académiciens morts pendant la Révolution*, a cura di J.-D. CASSINI, detto CASSINI IV, Paris, Jombert, 1810, pp. 258-259 (vedi il testo online in: <http://books.google.it/books?id=BfBeAAAACAAJ&pg=PA258#v=twopage>). Sull'*otium* in villa con il Lercari: A. LAGUZZI, *Storia della scienza e identità locale: Giandomenico Cassini a Ovada (1645-1646)*, in D. ARECCO, *Scienza e storia dal Piemonte alla Liguria (secoli XVII-XIX)*, Bruzzone Arti Grafiche, Genova Rivarolo, 2011, pp. 88-90.

Quelque Reputacion acquise Dans mes Entretien sur Les
Sciences me procura la connoissance de Plusieurs Personnes de
merite entre autres celle de M.^{rs} Cosoni qui depuis Cardinal dans
la Derniere Promotion, et celle de M.^{rs} Scharchafieri dont la maison
estoit hors la ville Du Costé Du Levant; nous y allions souvent

Nos conferences avec M.^{rs} Cosoni et
Scharchafieri ne seroient qu'à l'occasion de l'estroite connoissance
et amitié que je liai avec le S.^r François & Marie
imperiale Lercaro les qualitez et la solidité de son

IL DOCUMENTO.

était de l'avis contraire. Au reste, dans ces sortes de matières, il est de la prudence de ne point trop se fier à soi-même, et de soumettre son jugement aux personnes plus éclairées que nous.

Nos conférences avec MM. Cosoni et Scharchafieri ne cessèrent qu'à l'occasion de l'estroite connoissance et amitié que je liai avec Monseigneur François-Marie-Imperiale Lercaro.

[Una certa reputazione acquisita nelle mie conversazioni scientifiche mi procurò la conoscenza di diverse persone di valore, tra le altre quella del signor Cosoni, eletto poi cardinale nell'ultima promozione, e quella del signor Scharchafieri, il cui palazzo era fuori città, sul lato di levante. Ci andavamo spesso, e lì ci esercitavamo a improvvisare e discutere su temi che ci venivano proposti, per lo più di morale. Poiché il padre Bianchi <Andrea (1587-1657)>, gesuita, aveva pubblicato sotto il nome di *Candidus Philalethes* un libro in cui insegnava che, in materia di morale, si è obbligati a respingere l'opinione meno probabile per seguire la più probabile, vari teologi sostenevano che era sufficiente che un'opinione avesse una qualche probabilità, per essere padroni di adottarla prima di altre ancora più probabili. Era di tale avviso padre Stefano Spinola <(1618?-1682)>, che fu più tardi vescovo di Savona. Questo problema fu assai discusso tra di noi; ritenevo che fosse preferibile adottare l'opinione più probabile: mi sembrava il partito più prudente. In questo mi sosteneva il parere di Merenda <Antonio (1578-1655)>, primo professore di diritto all'Università di Bologna. Discutevo spesso contro il signor Lercaro, che era di opinione opposta. D'altra parte, in questo genere di materie, è prudente non fidarsi troppo di se stessi e sottomettere il proprio giudizio a persone che riteniamo più illuminate di noi.

Tali dispute con i signori Cosoni e Scharchafieri non cessarono che a seguito della stretta conoscenza e amicizia che maturai con monsignor Francesco Maria Imperiale Lercaro <Lercari (1629-1712)>].⁵

In questo e in altri brani viene il dubbio che i ricordi di Cassini, vecchio e cieco ma assai lucido, siano in-

satti o parziali. Il che rende interessante la ricerca di fonti indipendenti, ma la presenza del giovane perinaldese non sembra aver destato una particolare attenzione, in quella Genova che era ancora superba, oppure gli storici sono stati finora assai sfortunati negli archivi.

In ogni caso è evidente che Cassini vuole subito qualificarsi come "personne de mérite". È noto, infatti, che Gio. Domenico è rimasto affascinato dalla nobiltà genovese, che riusciva a esprimere al meglio la propria cultura in lieti conversari negli opulenti giardini dei palazzi di villa, famosi già al tempo del Petrarca, rispetto alle magnifiche ma severe aule del monumentale collegio o ai palazzi di città, presi a modello da Rubens, in cui decideva di traffici e di governo.

Nel brano trascritto, solo due nomi non sono immediatamente identificabili. Il primo è "Cosoni" o, meglio, "Cosoni", come leggiamo nel manoscritto (idiografo o copia tarda?) presumibilmente usato per l'edizione di Cassini IV (vedi qui nota 4). Se, come pare, siamo di fronte a tre condiscipoli coetanei, che si esercitano nelle dispute morali passeggiando in un giardino genovese intorno al 1645, non può essere Lorenzo Casoni (1645-1720), per quanto sia stato elevato effettivamente alla porpora cardinalizia nel 1706. Potrebbe invece essere trattarsi di un nipote del vescovo Filippo Casoni (1599-1659): Agostino Favoriti (1624-1682), che ha poi fatto una gran carriera alla corte pontificia, dove ha favorito largamente il cugino Lorenzo Casoni.⁶

Ma in questa sede mi concentro sull'ancora più misterioso "Scharchafieri" o, meglio, "Scarchafieri". A differenza di Casoni, Spinola e Lercari, il cognome non rimanda immediatamente ad ascendenze

⁶ D. M. CHENEY, *Bishop Filippo Casoni, 1599-1720*, in www.catholic-hierarchy.org/bishop/bcasof.html; R. CONTARINO, *Favoriti Agostino*, in *Dizionario Biografico degli Italiani*, vol. 45, 1995.

⁵ Traduzione dell'Autore.

genovesi. E se il gran Cassini avesse pronunciato alla francese il nome originale e peggio avesse capito chi ne trascriveva le memorie? Lo stesso è capitato a padre Gio. Battista da Dieci, trasformato in “Dadiesse”.

Propongo che si tratti di *Gasparo* – o Gaspare – *Squarciafico*.

I suoi avi avevano iniziato a distinguersi a Genova nel XII secolo.⁷ Come tutti i Magnifici genovesi più doviziosi, “possedevano” una piccola piazza – attuale piazza Invrea – su cui dava il palazzo di famiglia, ricostruito con grande pompa intorno al 1565. Gaspare era nato a Genova il 1° ottobre 1624, primogenito di Giuseppe Squarciafico e Isabella Bracelli; sua nonna era Virginia Centurione Bracelli, morta in profumo di santità nel 1651, ma canonizzata solo nel 2003.⁸ Nel 1641 aveva discusso un “atto di logica” nel seminario gesuitico romano:⁹ studi proficui, dato che anche gli eruditi contemporanei lo ricordano quale giureconsulto e teologo.¹⁰ Ma Gaspare si sente in dovere di risollevarne le sorti della famiglia, sprofondate dopo la bancarotta spagnola del 1627, e si getta nell’agone politico di una Repubblica in equilibrio precario tra Spagna e Francia e, nel suo seno, tra partiti e divisioni reali o parentate: “spagnardi” e “navarrini”, nobili vecchi e nuovi, giovani e anziani, Genovesato e Dominio. Apprezzato, come poeta, ancora nel 1742¹¹ e senza dubbio brillante nello scrivere, è di temperamento fin troppo acceso. Lui stesso si dipinge così nel 1655, quando Cassini è già da sei anni a Bologna.

... il Marchese Gaspare Squarciafico, se non oppresso, fu nulladimeno violentemente agitato. Il nutrire Spiriti elevati, e creduti maggiori di privato Cittadino l’havere

⁷ P. GUGLIELMOTTI, «Agnacio seu parentella». *La genesi dell’albergo Squarciafico a Genova (1297)*, Società Ligure di Storia Patria, Genova, 2017.

⁸ A. DI RAIMONDO, *Storia di una villa scomparsa e dell’urbanizzazione del colle di Carignano. La “casa di villa” di Minetta Serra a Genova*, Erga, Genova, s.a. ma 2017, pp. 16-18.

⁹ L. RICE, *Pomis Sua Nomina Servant: The emblematic thesis prints of the Roman Seminary*, «Journal of the Warburg and Courtauld Institutes», 70, 2007, p. 227.

¹⁰ M. GIUSTINIANI, *Gli scrittori liguri*, Roma, N. A. Tinassi, 1667, p. 268. A. OLDOINI, *Athenaeum Ligusticum seu syllabus scriptorum ligurum*, Perusiae, 1680, p. 223. I titoli dottorali compaiono in: G. SQUARCIAFICO, *Geometria dialectica*, Romae, I. de Lazaris, 1653, antiporta e frontespizio.

¹¹ F. S. QUADRIO, *Della storia e della ragione d’ogni poesia*, vol. 2, Milano, F. Agnelli, 1742, p. 135.

l’Aura Popolare; l’essere di varia Eruditione, e profonda Dottrina; il procurare di restituire alla sua Famiglia quelle abbondantissime Ricchezze, che in mano di molti Potenti ingiustamente si ritruovavano, e di cui per una siccità di settecento mila scudi di oro, pochi anni avanti dal Padre contratta, e di poi dichiarata invalida, era stata spogliata; lo havevano reso degno dell’Odio, della Persecutione, e dell’Invidia di Molti. Per lo che, tratti nel suo parere molti Nobilissimi Giovani, risolse di fare una numerosa leva, & abbandonata, per qualche tempo la Patria, procacciarsi fra le Armi quella Gloria che già haveva ottenuta nelle Lettere, & essere con doppio scudo protetto dall’Inimico Livore.¹²

La ricerca di fortuna al di fuori della patria si trasforma in esilio: morirà in Spagna, ove sua madre disponeva di alcune rendite.¹³

In conclusione, la mia ipotesi identificativa è basata sull’assenza di altri cognomi genovesi assonanti, su studi e interessi coerenti dei coetanei Squarciafico e Cassini, nonché sull’esistenza del palazzo di villa degli Squarciafico nell’immediato levante genovese: sulla stessa collina di Carignano in cui villeggiava Gio. Battista Baliano.¹⁴

Se l’ipotesi sarà condivisa dagli studiosi, instillerà forse qualche dubbio sulla giovinezza dell’astronomo: più affascinato da spiriti ribelli, di quanto non abbia voluto ricordare nella sua virtuosa senescenza?

IL DOCUMENTO

Dal manoscritto *La Vie et les ouvrages de Jean-Dominique Cassini* (Bibliothèque nationale de France, département Cartes et plans, GE DD-2066 (1 RES), pp. 4, 5). I testi sono disponibili *online*, rispettivamente in: [primo brano] <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b55008233s/f12>, e: [secondo brano] <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b55008233s/f13>.

Riccardo Balestrieri, già direttore dell’Osservatorio Astronomico di Genova, è un astrofilo che si dedica da oltre vent’anni a studi di storia della scienza e della tecnica in Liguria e ne anticipa i risultati nell’ipertesto <http://uranieligustica.altervista.org>.

¹² G. SQUARCIAFICO, *Le politiche malattie della Repubblica di Genova e loro medicine*, Francoforte (falso luogo di stampa?), 1655, pp. 135-136.

¹³ A. DI RAIMONDO, *Opera citata*, p. 15.

¹⁴ IDEM, *Il palazzo di villa di Gio. Batta Baliano a Genova*, Erga, Genova, 2018.

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.

Spigolature astronomiche*

A cura di Annibale D'Ercole

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

Lo strano caso dell'ardente Mercurio

Claudio Elidoro

IN una precedente *Spigolatura* (giugno 2018) si era affrontato il problema della temperatura di una superficie planetaria, trascurando il potente effetto esercitato dalla presenza di un'atmosfera. Un effetto che, mentre nel caso della Terra si dimostra benefico e indispensabile per il sostentamento della vita così come la conosciamo, per il pianeta Venere genera un ambiente davvero terrificante, con temperature che rimangono costantemente intorno ai 753 K (480 °C). Per avere un minimo di refrigerio bisognerebbe salire in cima ai monti Maxwell, un massiccio che raggiunge gli 11 chilometri di altezza rispetto al suolo venusiano. Ma non facciamoci troppe illusioni, la temperatura si aggirerebbe comunque intorno ai 653 K (380 °C).

Ugualmente interessante – e forse di più – è il caso del pianeta Mercurio, sul quale ci eravamo soffermati nel corso della *Spigolatura* citata poc'anzi. Poiché il pianeta è privo di atmosfera, ci saremmo aspettati che le valutazioni che ci avevano portato a definire la temperatura di equilibrio vi trovassero pieno riscontro. Ricordiamo, a questo proposito, che con il termine “temperatura d'equilibrio” si intende la temperatura teorica che raggiungerebbe un pianeta riscaldato soltanto dalla sua stella, se si comportasse perfettamente come un corpo nero. In quella *Spigolatura* avevamo notato che nel calcolo intervenivano la distanza del pianeta dalla stella, le dimensioni e la temperatura della stella e la capacità della superficie planetaria di riflettere la radiazione che la investe (albedo).

* 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>.

Nel caso del pianeta Mercurio, i calcoli ci avevano portato a ottenere una temperatura di equilibrio di 438 K, vale a dire 165 °C. Esaminando i dati relativi alle temperature su Mercurio, però, è immediato notare come vi siano incredibili differenze di temperatura tra l'emisfero soleggiato (738 K, pari a 465 °C) e quello in ombra (89 K, pari a 184 °C sotto zero). A questo proposito, è pur vero che, facendo la media tra i due valori, otteniamo una temperatura abbastanza in linea con la temperatura d'equilibrio, ma rimane da capire come mai su Mercurio situazioni di gelo estremo possano alternarsi a condizioni di caldo davvero infernale.

Se per la temperatura minima è accettabile un così brutale raffreddamento della superficie, messa di fatto “a contatto” con il gelo profondo dello spazio interplanetario, è altresì perfettamente logico domandarsi come si possa avere una temperatura massima così distante da quella di equilibrio. Il cuore del problema, che affronteremo in dettaglio nel livello avanzato, è che si deve mettere in conto come varia l'emissione di una superficie al variare della temperatura. Nel caso di Mercurio, però, vi è anche un altro elemento che dovremo considerare ed è la sua davvero curiosa situazione orbitale.

Tanto per cominciare, Mercurio ha un'orbita molto ellittica. Il valore della sua eccentricità (il parametro, compreso tra 0 e 1, che descrive quanto un cerchio deve essere schiacciato per ottenere l'ellisse) è pari a 0,205. Di gran lunga il valore più alto tra i pianeti del Sistema solare. Fino all'agosto 2006, prima che venisse declassato a pianeta nano, nella classifica planetaria dell'eccentricità orbitale era Plutone ($e = 0,284$) a occupare il primo posto. In termini più concreti, mentre al perielio la distanza di Mercurio dal Sole è di 0,307 UA (46×10^6 km), all'afelio sale a 0,466 UA ($69,8 \times 10^6$ km), il che comporta una variazione di ben 23,8 milioni di chilometri.

Un secondo elemento da tenere presente è lo stretto legame tra la rotazione di Mercurio e la sua rivoluzione. Inizialmente si pensava che Mercurio fosse bloccato in una “rotazione sincrona”, cioè che rivolta verso il Sole ci fosse sempre la stessa faccia (come fa la Luna rispetto alla Terra). A metà degli

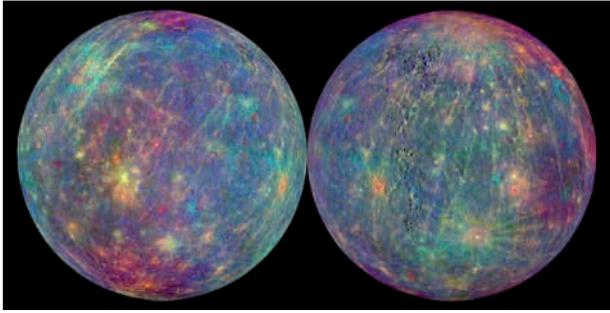


FIG. 1. La sonda Messenger, lanciata nel 2004, ha orbitato intorno a Mercurio dal 2011 al 2015, eseguendo, tra l'altro, questa completa mappa del pianeta (NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington).

anni Sessanta, però, gli astronomi scoprirono che non era così, ma che il pianeta ruotava per tre volte intorno al suo asse mentre completava due orbite intorno al Sole.

Anche su Mercurio, dunque, si alternano giorni e notti. La particolare situazione della risonanza orbitale, però, fa sì che per un abitante di Mercurio il giorno solare, cioè il tempo necessario al Sole per ripassare per lo stesso meridiano, sia di ben 176 giorni terrestri, vale a dire due anni mercuriani. L'esposizione ai raggi solari e, conseguentemente, quella al gelo del cielo notturno sono dunque incredibilmente lunghe, un fattore tutt'altro che trascurabile se vogliamo indagare sulle temperature di quella superficie planetaria. Per gli amanti della fantascienza, questo comporta che sia incredibilmente bassa la velocità con la quale si sposta sulla superficie di Mercurio il "terminatore", cioè la linea che segna il confine fittizio tra il giorno e la notte. Mentre sulla superficie della Terra – complici il giorno di gran lunga più breve e le dimensioni planetarie molto più grandi – il terminatore sfreccia a circa 1669 km/h, su Mercurio ha una velocità media di solo 3,6 km/h. La velocità di una tranquilla passeggiata, insomma.

Già che ci siamo, aggiungiamo un ulteriore curioso dettaglio sullo strano giorno di Mercurio. Poiché la velocità di rotazione e quella di rivoluzione non sono così differenti come avviene invece per i valori relativi al nostro pianeta, il moto del Sole nel cielo mercuriano è meno regolare di quello che osserviamo sulla Terra. Su Mercurio capita che, avvicinandosi al perielio, per qualche tempo la velocità di rivoluzione superi quella di rotazione, con il risultato che il Sole in cielo sembra arrestarsi e muoversi di moto retrogrado. È la conseguenza del fatto che il moto apparente da ovest a est dovuto alla rivoluzione ha momentaneamente la meglio sul moto apparente in senso contrario governato dalla rotazione.

Come anticipato, proviamo dunque a rivedere il bilancio tra la potenza assorbita e quella emessa dalla superficie del pianeta.

Prima di addentrarci nell'analisi, però, è bene ricordare l'espressione per la temperatura d'equilibrio

di un pianeta (T_p) che avevamo ottenuto nella Spigolatura dello scorso giugno:

$$T_p = \sqrt[4]{1-A} \cdot T_s \cdot \sqrt{\frac{R_s}{2d}} \quad (1)$$

Poiché i nostri ragionamenti riguardano la situazione di un pianeta del Sistema solare, nella (1) R_s e T_s sono il raggio e la temperatura del Sole, d la distanza del pianeta dal Sole e A l'albedo della superficie planetaria.

Per determinare il bilancio energetico, iniziamo a valutare la potenza assorbita (P_{ass}) dalla superficie planetaria. Avremo che

$$P_{ass} = \frac{A_{ass} \cdot L_s \cdot (1-A)}{4\pi d^2} \quad (2)$$

espressione che tiene conto della porzione dell'area complessiva del pianeta colpita dalla radiazione (A_{ass}), della luminosità del Sole (L_s), dell'albedo planetaria (A) e della distanza (d) alla quale orbita il pianeta. Inserendo per L_s quanto ci dice l'equazione di Stefan-Boltzmann e semplificando, otteniamo

$$P_{ass} = A_{ass} \cdot \frac{R_s^2 \cdot \sigma \cdot T_s^4 (1-A)}{d^2} \quad (3)$$

Passando ora a valutare la potenza irradiata dalla superficie planetaria, troviamo che

$$P_{irr} = A_{irr} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_p^4 \quad (4)$$

espressione nella quale con ε viene indicata l'emissività della superficie (per definizione, se si tratta di un corpo nero $\varepsilon = 1$).

Se ora uguagliamo la (3) e la (4), semplifichiamo e risolviamo rispetto a T_p , otteniamo:

$$T_p^4 = \frac{A_{ass}}{A_{irr}} \cdot \frac{T_s^4 \cdot R_s^2 \cdot (1-A)}{\varepsilon \cdot d^2} \quad (5)$$

La temperatura planetaria descritta in questa espressione è detta temperatura "subsolare". Mettendo a confronto la temperatura ricavabile dalla (5) con la temperatura di equilibrio descritta dalla (1), possiamo notare alcune significative differenze. Se, per evitare confusioni, indichiamo la temperatura di equilibrio con T_E e la temperatura subsolare con T_S , possiamo infatti vedere che:

$$T_S^4 = T_E^4 \cdot \frac{4}{\varepsilon} \cdot \frac{A_{ass}}{A_{irr}} \quad (6)$$

Estraendo la radice quarta da entrambi i termini otteniamo

$$T_S = T_E \cdot \sqrt[4]{\frac{4}{\varepsilon} \cdot \frac{A_{ass}}{A_{irr}}} \quad (7)$$

Osservando quanto espresso nella (7), dunque, per giungere a determinare a quanto ammonti T_S , oltre

alla T_E e al fattore $\sqrt{2}$ dobbiamo mettere in conto un paio di altri importanti fattori che, purtroppo, sono tutt'altro che semplici da valutare.

Il rapporto tra la superficie riscaldata dalla luce solare e quella che irradia a sua volta l'energia accumulata è pari a 1 solamente nel caso di superficie bloccata in una "rotazione sincrona".

Questa situazione descrive piuttosto bene anche ciò che si verifica nelle regioni subsolari di un pianeta che ruoti molto lentamente. Se il pianeta, invece, non è bloccato nella curiosa situazione che vede il periodo di rotazione identico a quello di rivoluzione e siamo in presenza di un rotatore "veloce" (pensiamo, per esempio, alla Terra), quel rapporto vale $1/4$; nel caso in cui si tratti di un rotatore "lento" il valore sale a $1/2$.

Per valutare la (7), dunque, considerando la situazione di Mercurio e tenendo conto del fatto che si tratta di un rotatore estremamente lento, utilizzeremo per il rapporto tra le superfici il valore 1.

Il secondo fattore è l'emissività della superficie planetaria. Certamente, vista la sua essenza teorica, non ci potremo mai trovare dinanzi a un corpo nero perfetto, ma a un cosiddetto corpo grigio. Questo comporta che il valore di ϵ risulti sempre inferiore a 1. Nella nostra valutazione della (7), che ci porterà a determinare la temperatura subsolare della superficie di Mercurio, proveremo a impiegare il valore di 0,82, ottenuto sperimentalmente nel 1974 da Olav Hansen («Astrophysical Journal», 190, 715; 1975).

Per il nostro calcolo, infine, utilizzeremo il valore di T_E precedentemente determinato (438 K). Praticamente:

$$T_s = 438 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{0,82}} \cdot 1 = 651K \quad (8)$$

Immediato notare come il valore ottenuto nella (8) sia ancora molto distante dalle temperature massime su Mercurio (738 K). La causa, che già abbiamo anticipato nel livello base, sta nell'orbita molto ellittica del pianeta. Nei nostri calcoli, infatti, abbiamo impiegato il valore medio della distanza di Mercurio dal Sole (0,38 UA, cioè $5,79 \times 10^7$ km), ma non possiamo certo trascurare che la radiazione solare che colpisce il pianeta al suo perielio è oltre il doppio di quella che lo investe quando è all'afelio.

Per valutare correttamente il valore massimo della temperatura subsolare, dunque, dovremo moltiplicare il risultato ottenuto per un opportuno fattore k che tenga conto sia del rapporto tra la distanza che abbiamo impiegato e la distanza al perielio, sia del fatto che la legge che governa l'irraggiamento (legata ai quadrati delle distanze) ci impone di calcolare la radice quadrata di tale rapporto. Passando ai numeri, abbiamo

$$k = \sqrt[2]{\frac{d_{media}}{d_{perielio}}} = \sqrt[2]{\frac{0,387}{0,307}} = 1,125 \quad (9)$$

Tenendo conto del fattore espresso dalla (9), il valore della temperatura subsolare per Mercurio quando il pianeta è al perielio sale a 733 K. Un valore che corrisponde in ottima misura a quanto conosciamo delle temperature sperimentate nelle regioni più bollenti della superficie di Mercurio.

In ricordo di

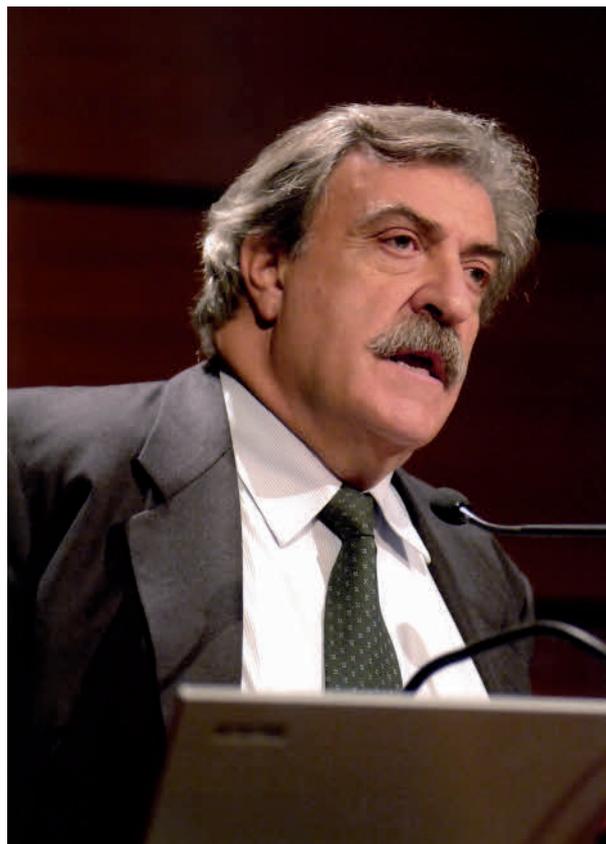
Giorgio G. C. Palumbo

[Torino, 7 settembre 1939 - Bologna, 20 giugno 2018]

GIORGIO PALUMBO venne al mondo a Torino il 7 settembre del 1939, «una mattina in cui il Sole non brillò...», come lui stesso scrisse citando una canzone di Tennessee Ernie Ford. In quei giorni, infatti, l'esercito di Hitler invadeva la Polonia e cominciavano anni molto bui per l'Europa. Giorgio racconta che, nonostante i suoi pochi anni di vita, il ricordo dei 144 raid aerei che costrinsero lui e sua madre a lasciare la città è sempre rimasto vivido nella sua memoria. La famiglia di Giorgio era economicamente modesta, suo padre era un operaio della FIAT e suo nonno (di origini pugliesi) faceva il fabbro, realizzava ferri di cavallo... «*In my life I have been very lucky*» scrive nella sua autobiografia, e io, da napoletana, non posso che connettere questo fatto a quei ferri di cavallo fabbricati dal nonno, chissà se lui ci ha mai pensato.

Quando scelse Fisica al posto di Ingegneria suo padre non fu molto contento, avrebbe preferito per il figlio un lavoro che avesse riscattato se stesso contro l'azienda. Ma Giorgio amava studiare, solo quello che gli piaceva naturalmente, ed era pur sempre «meglio che lavorare». Era convinto che il solo modo di conoscere il mondo reale fosse attraverso la fisica e l'esplorazione. Da adolescente trovò un lavoro estivo in Inghilterra, come raccoglitore di frutti di bosco, e da quella esperienza imparò cosa significassero davvero le parole *globetrotter* e *itchhiking*. Così, un bel giorno si diresse verso Capo Nord da solo, a bordo della sua Vespa 125 che a poche centinaia di km da Kiruna si fermò: il motore era fuso. Giorgio si diede da fare e lo riparò, riuscendo così ad arrivare a destinazione: sua madre era convinta che qualche santo lo avesse protetto, gran parte delle persone pensavano che fosse stato fortunato, Giorgio la pensava come Nietzsche: «Nessun vincitore crede al caso».

La tesi di Laurea con Carlo Castagnoli riguardava misure della capacità di penetrazione dei muoni nel Monte Bianco, a quel tempo ancora chiuso al traffico. Dopo la discussione della tesi di Laurea, il disinteresse di una platea di professori, più intenti a leggere il quotidiano che ad ascoltare i risultati della sua tesi sui 16 muoni rivelati, portò Giorgio a scegliere di fare il professore di scuola superiore e continuare la sua ricerca sui raggi cosmici durante il tempo libero. Finché un giorno, all'Istituto di Fisica, non trovò l'annuncio di un PhD presso l'Università dell'Alberta a Calgary, della quale, per sua stessa ammissione, dovette andare a cercare sull'atlante geografico l'esatta posizione.



E così partì l'estate successiva, dopo gli esami di maturità come commissario, e la sua avventura a Calgary, che cambiò per sempre la sua vita, cominciò con l'incontro su un piccolo aereo presso l'aeroporto di Shannon con una folla di ragazze urlanti, *fan* di un gruppo emergente rock vestito di nero e con i capelli lunghi. Solo dopo realizzò che questi erano... i Beatles!

Durante i quattro anni di PhD Giorgio lavorò con J.R. Prescott, un australiano, ottimo fisico ed insegnante, con il quale però lui non andava molto d'accordo a causa del loro approccio filosofico alla vita completamente diverso. Prescott era un puritano protestante ortodosso e sapeva sempre ciò che era giusto o sbagliato. Giorgio, da *mild anarchist*, era cresciuto leggendo Bertrand Russell ed era profondamente convinto che si debba seguire sempre chi ricerca la verità, ma bisogna fare molta attenzione a chi la trova.

Prescott pensava anche che il cibo italiano fosse poco salutare – «troppa pasta» diceva – ma per fortuna il fascino degli americani per il cibo mediterraneo salvò Giorgio da sgradevoli discussioni. Da piemontese *DOC* ha sempre amato la buona cucina e naturalmente il buon vino, come molti colleghi ed amici amano ricordare:

Un arrivederci presto nell'equivalente della *csárda* ungherese in cui ci conoscemmo forzatamente, avendo perso entrambi l'autobus della conferenza. Lì continueremo a cercare la soluzione ai problemi dell'Universo davanti a un'ennesima bottiglia di Tokaji. (ROBERTO SCARAMELLA)

I had the chance of interacting with Giorgio quite extensively during his long term visit at IRAP. I enjoyed every moment, and certainly those in which we shared and practiced our passion for wines. (DIDIER BARRET)

A Calgary e poi al DRAO in Penticton, Giorgio cominciò a lavorare alla progettazione di un esperimento per la rivelazione di impulsi radio da *Extensive Air Showers* (EAS) e partecipò ad una spedizione di volo da pallone per lo studio degli elettroni durante le *Aurorae* nella Hudson Bay.

Finché, nel 1967, non ci fu a Calgary la 10th *International Cosmic Ray Conference*, e lì Menotti Galli, che Giorgio aveva già incontrato in precedenza, gli offrì in maniera confusa un posto di lavoro a Bologna. Sposò Johanna di lì a poco e insieme tornarono in Italia. In realtà, il posto fisso al CNR arrivò solo dopo un paio di anni di contratti vari, quel giorno in cui si ritrovò con Menotti Galli e Marcello Ceccarelli, ordinario di Fisica sperimentale a Bologna, a prendere un caffè parlando del radiotelescopio di Medicina.

Ceccarelli gli chiese: «Giorgio, ti diverte quello che stai facendo?» E lui «Certo!». Allora Ceccarelli si voltò: «Galli, lascialo divertire allora»; il che significò che era appena stato assunto.

Intanto in Italia le lotte studentesche diventavano sempre più frequenti; gli studenti occuparono l'Istituto di Fisica e lavorare a Medicina, a 30 km da Bologna, risultò per Giorgio un'ottima soluzione.

In quegli anni entrò in contatto con il gruppo di Occhialini a Milano e conobbe due giovani scienziati, Nanni Bignami e Martin Turner, con i quali divenne poi grande amico. Nel 1970 ottenne una posizione come professore incaricato per il nuovo Corso di Laurea in Astronomia, attivato da un anno presso l'Università di Bologna. Aveva bisogno di uno stipendio più alto (nel 1974 nacque Jennifer) e sentiva la necessità di cominciare ad avere dei contatti con gli studenti.¹

Tra il 1972 e il 1980 Giorgio passò molto tempo all'estero. Ad Harwell, lavorando sulla rivelazione di microonde dalle esplosioni di supernovae, come previsto dalla teoria di Sterling Colgate, a Leiden, con una NATO *fellowship*, dove imparò molto di radioastronomia e conobbe scienziati come Jan Oort, da cui fu estremamente impressionato per la sua

¹ Mi fa piacere ricordare di essermi laureato con Giorgio come relatore nel luglio 1972, in quanto primo laureato in Astronomia all'Università di Bologna, e con una tesi che intendeva (sperava) di poter rivelare impulsi a 10 GHz per cercare coincidenze tra esplosioni di supernovae e onde gravitazionali... troppo avanti con i tempi e, come tipico di Giorgio, enormemente ottimista! (FABRIZIO BÒNOLI)



FIG. 1.

semplicità e determinazione, e Lou Allamandola, un chimico che ne sapeva molto più di astronomia che di chimica e che influenzò la sua carriera scientifica, portandolo più avanti ad occuparsi di astronomia molecolare e astrobiologia.

Leggendo nella sua autobiografia la parte sulle esperienze all'estero durante gli anni Settanta, mi torna alla mente quella volta che mi raccontò del '77 e dintorni a Bologna, in quel modo divertente ed ironico che aveva anche nel descrivere le situazioni più tragiche. In via Zamboni, dove Giorgio aveva lo studio, c'erano barricate e carri armati. Si sparava per strada ed era pericoloso persino andare a lavorare in Istituto di Astronomia, nella vecchia torre sopra il rettorato dell'Università. Giorgio sgattaiolava (immaginate come mimava il suo sgattaiolare) sotto i portici della zona universitaria, mentre molotov e proiettili volavano sulla sua testa. Finalmente, sano e salvo, arrivava nel suo ufficio e dalla finestra osservava ogni giorno quelle scene di guerra urbana e, tornando alla sua scrivania, cominciava a scrivere lettere di candidatura per posizioni all'estero: «*Dear Sir, please consider my application to your position ...*».

Ebbe la fortuna di trovarsi alla conferenza sui raggi cosmici in Colorado quando Jan Strong e Tom Cline gli parlarono di quei misteriosi lampi gamma scoperti casualmente dal satellite VELA. Tornato a Bologna, insieme a Graziella Pizzichini cominciarono a guardare i dati di OSO-6 e le eventuali coincidenze con gli eventi osservati da VELA. Furono il terzo o quarto gruppo al mondo a pubblicare sui *Gamma-Ray Burst* e il primo a Bologna a pubblicare su *Astrophysical Journal*: «Avevamo ottenuto i nostri 15 minuti di fama» dice, con la semplice ironia che lo contraddistingueva.

Nel 1976 nacque il suo secondogenito Jeremy e nel 1981 divenne professore associato e gli fu assegnato quel corso di Fisica dello Spazio che tanti noi studenti del Corso di Laurea in Astronomia abbiamo seguito.



FIG. 2.

Come radioastronomo Giorgio si occupò di tanti progetti, ma quello che ebbe il più ampio riconoscimento fu il catalogo delle velocità radiali di più di 28000 galassie. Il successo di quel lavoro, ci tiene a dirlo, fu dovuto principalmente al fatto di aver avuto degli ottimi studenti con il quale lavorare, dai quali imparò molto e che sono oggi degli ottimi scienziati.

L'ultima cosa che mi ha detto quando l'ho visto di recente è stata che era contento di vedere che così tanti dei suoi ex-allievi erano riusciti a diventare astronomi pagati. (SANDRO MEREGHETTI)

Nino Panagia un giorno gli chiese se avesse qualche idea per una proposta di osservazioni con il nuovo satellite per l'ultravioletto IUE. La risposta di Giorgio fu secca: «Io non so nulla di stelle e l'unica cosa che so delle galassie e che possono avere le supernovae». Le aspettative di beccarne una non erano altissime, ma la proposta fu sottomessa. Pochi mesi dopo esplose una brillante supernova in M100 e Giorgio ottenne da Giacconi la possibilità di osservarla in X con il satellite Einstein, il che gli portò un bel numero di pubblicazioni. In particolare, queste riguardavano l'emissione X molto debole del Nucleo Galattico Attivo di M100, un campo di ricerca quello sugli AGN sul quale ha formato tanti studenti e creato il suo piccolo gruppo presso il CNR, ora INAF, di Bologna.

Giorgio racconta che ad un certo punto sentì il bisogno di stimoli in un ambiente nuovo.

Cominciò a lavorare sui dati X di HEAO-1, si recò al Goddard dove collaborò con Massimo Persic e poi a Caltech per dare un *talk*, dove incontrò – la racconta come una delle esperienze più emozio-

nanti della sua vita – «*the most extraordinary Physicist I have and probably will ever meet in my life: Richard Feymann!*».

Il ritorno in Italia non fu semplice, anche per motivi familiari, fin quando nel 1992 cominciò quella che Giorgio stesso definisce la sua “Space Age”. L’Agenzia Spaziale Italiana (ASI) gli chiese di diventare membro dell’*Astronomy Working Group* (AWG) e di lì a poco tanti altri “eventi spaziali” si susseguirono: *Mission Scientist* dell’Osservatorio gamma INTEGRAL, rappresentante dell’AWG nell’*International Space Station User Panel* (ISSUP), membro di una commissione, insieme a Martin Turner, di scienziati europei che avrebbero dovuto proporre all’ESA nuove idee per future missioni X, da cui nacque il *mission concept* XEUS (i.e. ATHENA).

Alla fine degli anni Novanta, su suggerimento del suo vecchio amico Bignami, partecipò e fu selezionato

come coordinatore delle attività del settore Scienze dell’Universo dell’Agenzia Spaziale Italiana. Giorgio racconta che non ha mai avuto ambizioni politiche né alcun desiderio di sedere in posti di potere. Per la distribuzione dei finanziamenti ASI si servì sempre di *referee* esterni per la valutazione dei progetti e alcune persone si sentirono offese del fatto che lui stesso non avesse dato priorità ai suoi vecchi amici.

Ciò che gli interessava veramente era che la maggior parte delle persone riconoscesse che il suo lavoro era stato fatto in modo appropriato e che fosse garantita una certa continuità ai progetti anno per anno, cosa non affatto scontata presso le agenzie di finanziamento italiane. Quando cambiò il Governo e Bignami non fu rinnovato, non c’erano più le condizioni per continuare bene quel lavoro. Giorgio si dimise e, a rischio di sembrare presuntuoso, lui stesso si definisce un’anomalia italiana, poiché la sua esperienza gli diceva che una volta in una posizione tutti lottano per rimanere al potere il più a lungo possibile.

Tornò a Bologna a fare il professore (nel frattempo divenne ordinario) e sposò Franca, in seconde nozze. Un po’ alla volta l’attività di insegnamento e la ricerca scientifica ripresero in modo regolare. Nel 2007 fu eletto Direttore del Dipartimento di Astronomia e nel 2009 scrisse l’autobiografia della quale questo articolo ne rappresenta un estratto.²

² Non si può non ricordare la grande attività di diffusione della cultura scientifica cui si dedicava con la stessa passione con cui si occupava di ricerca, coinvolgendo il pubblico con il suo entusiasmo, e la collaborazione con questa rivista, come attesta il grandissimo numero di recensioni eseguite (NdR).

Quell'anno Giorgio andò in pensione e alcuni suoi ex-studenti gli prepararono una sorpresa: tutti in classe l'8 maggio per l'ultima lezione del prof. Palumbo! «Avete trasformato un armadio pieno di tesi in un'aula piena di persone». (FIG. 1)

Il 7 settembre dello stesso anno poi, durante la conferenza "X-ray Astronomy" che si tenne a Bologna, festeggiammo con colleghi ed ex-studenti i suoi 70 anni. (FIG. 2)

Giorgio è stato relatore di più di 150 tesi di Laurea e diverse decine di tesi di Dottorato.

«La maggior parte di ciò che ho realizzato va condiviso con alcuni collaboratori e molti dei miei studenti dai quali ho imparato tanto» dice prima di concludere la sua autobiografia.

E io lascerei le conclusioni di questo nostro ricordo a lui stesso, a Giorgio, con l'ultima frase che dice:

People ask me what will I do next. I am sure there will be life after retirement. Marcello Ceccarelli gave me the right sentence

to close this already too long curriculum. «When death comes let's make sure she will find us alive».

Con immenso affetto,

Melania, Fabrizio, Massimo, Roberto, Paola, Mauro, Pino, Andrea, Giovanni, Mauro, Alberto, Filippo e tanti, tanti altri.

MELANIA DEL SANTO³

³ Questo mio ricordo di Giorgio Palumbo è stato voluto da molti suoi ex-studenti e colleghi, tutti comunque legati a lui da profonda amicizia extra-professionale. Tra questi voglio qui ricordare (in ordine sparso): FABRIZIO BÒNOLI, MASSIMO CAPPI, ROBERTO DELLA CECA, PAOLA GRANDI, MAURO DADINA, PINO MALAGUTI, ANDREA COMASTRI, GIOVANNI PARESCHI, MAURO GHIGO, ALBERTO CAPPI, FILIPPO FRATERNALI, SANDRO MEREGHETTI, ENRICO MASSARO, FRANCESCA MANULI, LAURO MOSCARDINI, ALDA RUBINI, GIANPAOLO VETTOLANI.

Marina Muzi

[Ancona, 28 novembre 1949 - Perinaldo (IM), 3 luglio 2018]

IL 3 luglio scorso si è spenta nella sua casa di Perinaldo la dott.ssa Marina Muzi. Per oltre vent'anni ha lavorato nel piccolo borgo che nel 1625 diede i natali a Giovanni Domenico Cassini, arricchendolo di contenuti scientifici e astronomici, spesso unici nel panorama nazionale ed internazionale. Nel corso di questi due decenni è stata la promotrice principale di un'opera di divulgazione e di didattica che è riuscita a cambiare il volto di un intero territorio, valorizzando la sua eredità storica e avvicinando scuole e grande pubblico verso il mondo dell'astronomia.

Marina era arrivata a Perinaldo nel lontano 1993. All'epoca, era stata costruita, da pochi anni, una piccola cupola all'interno dei locali comunali: il primo tassello dell'osservatorio "G.D. Cassini", che veniva aperto occasionalmente, a titolo amatoriale o privato. Intuendone le grandi potenzialità e animata da una profonda passione per l'astronomia, dopo qualche anno Marina ha preso in mano la gestione dell'osservatorio. Ben presto ha saputo coinvolgere astronomi ed appassionati, insieme ai quali ha iniziato un percorso di sviluppo delle capacità didattiche e divulgative degli stessi collaboratori e delle attività dell'Osservatorio: aperture programmate e rivolte ad un pubblico sempre più vasto e alle scuole ed eventi importanti, che hanno contribuito in maniera sostanziale alla divulgazione e alla didattica in campo astronomico nel Ponente Ligure e a far conoscere Perinaldo, nonché la storia e le attività del grande astronomo ligure del Seicento, in Italia e all'estero. Quando oggi si nomina Perinaldo come il "Poggio delle stelle", consapevolmente o meno si



parla di Marina. Il "Poggio delle stelle" – così coniato dalla sua carissima amica Anna Cassini, nel libro "Gio: Domenico Cassini. Uno scienziato del Seicento" – ... è Marina.

Per un ventennio, Marina ha saputo valorizzare competenze e capacità creative dei suoi collaboratori; insieme hanno elaborato e portato avanti progetti transnazionali "Interreg-Alcotra" (Programma europeo di cooperazione transfrontaliera tra



FIG. 1.



FIG. 2.

Francia e Italia: www.interreg-alcotra.eu/it), che hanno permesso di arricchire notevolmente le attività rivolte al pubblico, nonché il patrimonio strumentale dell'Osservatorio del Comune di Perinaldo (nuovi telescopi, planetario, materiale didattico, nuovi spazi osservativi), di rinnovare e aggiornare il locale Museo Cassini, creare percorsi astronomici in Perinaldo e fuori, con idee e strumenti originali e innovativi nel campo della divulgazione astronomica: il Meridiano Cassini, il Giardino del Sole, l'Esposizione permanente "Sole e Tempo", le "Finestre di stelle" nel borgo, il Giardino delle Stelle del Nord e soprattutto la Meridiana della Visitazione (linea meridiana nella chiesa di N.S. della Visitazione, popolarmente chiamata la "chiesa voluta dal Cassini sul meridiano") hanno fatto di Perinaldo un paese unico nel suo genere, non solo in Liguria, ma anche in Italia.

La realizzazione della Meridiana della Visitazione, in particolare, da Marina fortemente voluta, sicuramente non sarebbe stata possibile senza la sua presenza e il suo incessante e tenace lavoro di organizzazione e ricerca delle soluzioni alle varie problematiche, dalla progettazione, alla ricerca dei fondi necessari, alla gestione delle relazioni con i diversi attori coinvolti nella costruzione di quest'opera. D'altra parte, la realizzazione di un vero "strumento cassiniano" in una chiesa del Seicento non era certamente cosa di tutti i giorni e senza l'impegno di Marina difficilmente i risultati sarebbero stati così mirabilmente raggiunti (FIG. 1).

Il suo grande carisma, il suo impegno e la sua competenza le hanno permesso, nel corso degli anni, di intrecciare relazioni, professionali ma innanzitutto umane, con autorevoli personalità di istituzioni nazionali ed internazionali (ESA, ASI, INAF, SAIt, Observatoire de Paris, Observatoire de Nice ecc.). Ne sono testimonianza i convegni da lei organizzati, a partire dai primi, in occasione delle varie tappe della Missione Cassini-Huygens, fino a quello del "Gran Finale" della stessa missione, a quel tempo da lei stessa definito come il suo "ultimo impegno", organizzato a Sanremo nell'ottobre 2017 (FIG. 2). Do-

po pochi mesi, l'inizio della malattia che in breve tempo ha avuto ragione della sua instancabilità.

Al di là di ciò che parla di Marina, di ciò che ne resta e se ne respira, nel borgo natio di Cassini, e non è poco, la sua presenza è stata cercata, voluta ed è ora ricordata nei più disparati luoghi di cultura del Ponente Ligure, così come nella vicina e lontana Francia. Impossibile renderne conto in maniera esauriente: l'abbiamo già detto, Marina era instancabile. Conferenze, interventi, relazioni, accoglienze e attività divulgative, collaborazioni: dall'Osservatorio astronomico di Nizza, all'Università della Terza Età di Sanremo, alle scuole di ogni ordine e grado della provincia, di altre regioni e di Francia, alle serate di divulgazione astronomica diffuse nel territorio del Ponente Ligure, Marina è stata capace di contaminare con la sua passione pubblico dalle diverse origini e sensibilità. Ovunque era capace di raccontare e spiegare il cielo notturno, appassionando gli ascoltatori, anche ... sotto una spessa coltre di nuvole. Sì, l'abbiamo vista fare anche questo! Marina era capace di combattere la distrazione e catturare l'interesse e l'ascolto di adulti e bambini, in ogni contesto, spingendoli a "volgere lo sguardo al cielo". Così molti ora la ricordano come la "Signora delle stelle". Ad ogni evento, serata osservativa, intervento didattico, promosso da Stellaria (la locale Associazione di Promozione Sociale che si occupa principalmente di divulgazione e didattica dell'astronomia), ovunque sia, persone a volte sconosciute chiedono di lei. Così, oggi, ogni appuntamento col cielo è un appuntamento con Marina e, sebbene impossibile colmare il vuoto che ci ha lasciato, la sua assenza è per noi presenza che ci invita a proseguire e migliorare il lavoro che abbiamo intrapreso con lei.

GIANCARLO BONINI, NICOLÒ CONTE

*

3 luglio-3 agosto: un mese senza Marina. Tempo lunghissimo e vuoto, sospeso nell'attesa impossibi-

le della sua voce quotidiana, e inerzia dei pensieri, vana ricerca delle parole per condividere con gli amici il suo ricordo.

Ed ora, ancora una volta, lo spunto mi viene da lei, da quel suo messaggio all'indomani del convegno di Sanremo "Missione Cassini-Huygens: gran finale", che sembrava solo un saluto ed è stato invece un addio, non so quanto (in)consapevole.

Scriveva Marina:

Siete tutti nel mio cuore, Cassini mi ha catturato, grazie a voi, la prima volta venti anni fa!

È vero. Nell'ottobre del 1996, nella Chiesa parrocchiale di Perinaldo, Marina ha incontrato Cassini, e io ho incontrato Marina. Cercavo di illustrare a un gruppo di studiosi francesi la grande *Tela delle Anime*, antico dono del Cassini al suo paese natale, ma ero impacciata dal fatto di non conoscere abbastanza bene il francese. Ricordo che mi si avvicinò per offrirmi garbatamente il suo aiuto una signora dagli occhi luminosi e ridenti, e con un indimenticabile sorriso. Ci intendemmo subito, scoprendo via via la comune passione per la ricerca, lo studio, l'attenzione alla bellezza della natura e al fascino del cielo.

La passione di Marina per l'astronomia è esplosa poi come un fuoco d'artificio, spargendo scintille in ogni direzione e coinvolgendo un numero incalcolabile di persone, diverse per età, cultura, interessi, professione. Ma è soprattutto ai bambini che lei si è sempre rivolta con particolare attenzione ed entusiasmo.

Una carissima amica, che con me ha condiviso il dolore per la sua perdita, mi scrive oggi:

Marina delle stelle ..., così la sentivo chiamare dai bambini del paese, della scuola dove aveva insegnato e fatto fare tante cose nuove e belle, giochi, scoperte, disegni; distribuendo matite colorate, figurine, libretti ... Ha avuto doni per tutti e di questi dobbiamo fare tesoro. Ora di lei ci resta l'affetto che ha acceso, la bella storia che ha scritto con la vita che ha vissuto, e di questo dobbiamo sostentarci.

A ciascuno di noi, e siamo tanti, Marina ha lasciato il dono di un'amicizia forte, limpida, costruttiva. Vorrei che potessimo ritrovarci, tutti insieme, per riconoscenza ed affetto, per risentire la sua voce e il suo incoraggiamento, cercando ancora nel cielo profondo che lei ci ha aperto le stelle che le erano amiche.

ANNA CASSINI

A cura di Alberto Cappi

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

Mille1Notte

Storie dell'altro mondo

Massimo Capaccioli

Mediterraneo Editrice (Deneb), 2018

Copertina flessibile, pp. 176, € 15,00

ISBN 9788894280463

www.mediterraneoedizioni.net

COME ci spiega l'autore stesso nella sua premessa, questo libro raccoglie gli articoli (sottoposti a revisione) riguardanti temi e personaggi dell'astronomia da lui scritti e pubblicati con cadenza bisettimanale dal quotidiano *il Mattino di Napoli*. Definirli articoli è però riduttivo: i testi hanno infatti un taglio diverso da quello della classica divulgazione e si leggono piuttosto come dei racconti. Non a caso, d'altronde, il volume appartiene ad una collana di narrativa.

Si tratta di testi indipendenti, i cui argomenti si alternano senza alcun ordine prestabilito: possono dunque essere letti non sequenzialmente. E come si addice a dei racconti, non ci si addentra in dettagli tecnici, ma si affrontano tematiche generali e importanti dell'astronomia attraverso la narrazione di episodi storici, vicende umane e curiosità varie. Nelle storie emergono personaggi celebri e meno celebri, dal russo Korolëv al danese Tycho Brahe, dal francese Guillaume de Gentil all'italiano Ernesto Capocci (una figura estremamente interessante le cui vicende non mancano di suscitare una riflessione sui problemi del nostro Paese). Anche i temi scientifici trattati sono tra i più svariati: si va dai più antichi, come le maree o il calendario, a quelli moderni e contemporanei, come la materia oscura e i pianeti extrasolari, fino alla cronaca recente, come la costruzione dell'ELT, o la nota personale su una notte trascorsa al telescopio. Non si parla solo di scienza pura: affiorano considerazioni sulla politica della scienza o sull'etica: esemplari in questo senso le pagine che Capaccioli dedica allo scambio epistolare fra Ernst Stuhlinger, responsabile dell'estensione del progetto Apollo all'esplorazione umana di Marte, e una suora dell'ordine domenicano dei predicatori, la quale gli rimproverava l'uso di ingenti risorse che avrebbero potuto invece essere utilizzate per salvare bambini affamati. Inoltre, diversi racconti sono preceduti da citazioni che offrono spunti per un'ulteriore riflessione o strappano un sorriso.

Un grande pregio del libro è il suo stile, scorrevole, leggero ed ironico, che rivela come Capaccio-

li possieda, oltre alle doti dello scienziato, anche quelle dello scrittore.

Mille1Notte è dunque una piacevole lettura per chiunque, senza dubbio ideale per quei lettori umanisti che rifuggono dalle formule e magari dalla prosa un po' pesante di certi libri divulgativi, ma che si addice anche a lettori più esperti, i quali troveranno diversi spunti di riflessione e avranno modo di apprendere in modo gradevole qualcosa di nuovo su vicende e protagonisti della storia dell'astronomia.

ALBERTO CAPPI

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

*

La matematica e la sua storia

Dalle origini al miracolo greco

Bruno D'Amore, Silvia Sbaragli

Edizioni Dedalo, 2017

Copertina flessibile, pp. 360, € 22,00

ISBN 9788822002716

www.edizionidedalo.it

COME spiega nella sua prefazione Umberto Bottazzini, gli autori, fin dall'inizio, proclamano di non essere storici di professione: nella premessa leggiamo che hanno inteso scrivere «una storia della matematica a uso didattico o almeno divulgativo», utile «ai professori di scuola e di università che la vorranno proporre agli studenti più curiosi».

In effetti i due autori sono specializzati nella didattica della matematica e ciò si traduce in un testo sempre chiaro nelle spiegazioni e piacevole da leggere. Che i due autori non siano storici professionisti si potrebbe evincere dal sottotitolo: nessuno storico, credo, oserebbe oggi parlare di

«miracolo greco», in parte per il ragionevole motivo che nella storia non avvengono miracoli, in parte per una malintesa *political correctness* che si sente in dovere di minimizzare l'eredità culturale greca rispetto a quella di altre civiltà. Ma non bisogna farsi fuorviare dalla modestia degli autori, che nelle pagine del libro mostrano di conoscere molto bene il loro argomento. Fra l'altro il testo, che include naturalmente delle dimostrazioni, non si limita soltanto alla matematica pura, ma contiene anche ampie digressioni sulla storia, sulla filosofia e sull'arte.

Il primo capitolo riguarda la preistoria, il secondo le prime civiltà (Mesopotamia ed Egitto), mentre gli altri tre capitoli sono dedicati alla matematica greca.

Per quanto riguarda Mesopotamia ed Egitto, gli autori offrono una ottima sintesi, con efficaci esempi delle conquiste matematiche di queste civiltà. Sono presentati i sistemi di scrittura e di numerazione e sono descritte e discusse alcune delle più importanti tavolette cuneiformi e alcuni dei principali papiri con contenuto matematico. Volendo essere pignoli, in questa parte si sarebbero potuti includere un paio di interessanti sviluppi storici recenti che avrebbero potuto interessare i lettori, anche se naturalmente il testo ha uno scopo didattico e non pretende di essere esaustivo. Il primo sviluppo riguarda la soluzione delle equazioni di secondo grado: la "ricetta" babilonese per la loro soluzione, che può essere riscritta sotto forma di equazione, è in realtà la soluzione di un problema geometrico, come spiegato nel libro di Jens Høyrup, *L'algèbre au temps de Babylone*, recensito in passato in questa rubrica (2012, GdA 1, p. 58). L'altro sviluppo riguarda il calcolo dell'area del trapezio in un diagramma tempo-velocità, che serviva per determinare la posizione di Giove durante le retrogradazioni, una scoperta che si deve a Mathieu Ossendrijver (2016, *Science* 351, p. 482).

I tre capitoli riguardanti la civiltà greca costituiscono naturalmente la parte più estesa del volume (quasi i due terzi), e coprono i principali sviluppi della matematica greca ed ellenistica. Il terzo capitolo parte da Talete, discute il teorema di Pitagora, i paradossi di Zenone, e il sistema di numerazione greco. Nel quarto capitolo, fra altri temi, troviamo le testimonianze su Democrito che ne fanno un "precursore" del calcolo infinitesimale, le riflessioni sulla matematica di Platone, la logica aristotelica. Il quinto ed ultimo capitolo è dedicato agli *Elementi* di Euclide e ai contributi del grande Archimede di Siracusa. Anche qui note storiche, esempi e dimostrazioni si intrecciano in un testo didattico e ricco di informazioni. Il volume è corredato da una bibliografia generale e da una bibliografia specifica per ognuno dei cinque capitoli, oltre che da un indice dei nomi.

Non rimane che raccomandare questo libro a insegnanti, studenti e appassionati di matematica e

attendere il seguito della *Matematica e la sua storia* che ci è stato promesso dagli autori.

ALBERTO CAPPI

Bruno D'Amore, laureato in Matematica, in Filosofia e in Pedagogia, è PhD in *Mathematics Education* e PhD Honoris Causa in *Social Sciences and Education*. È stato professore ordinario di Didattica della matematica all'Università di Bologna.

Silvia Sbaragli è laureata in Matematica presso l'Università di Bologna, ed ha conseguito il PhD in *Mathematics Education*. Ha insegnato presso le Università di Bologna e Bolzano. Attualmente è professore SUPSI presso il Dipartimento Formazione e Apprendimento di Locarno.

*

A Portable Cosmos Revealing the Antikythera Mechanism, Scientific Wonder of the Ancient World

Alexander Jones

Oxford University Press; 2017

Copertina rigida, pp. 312, € 23,00

ISBN 9780199739349

global.oup.com

Ho avuto occasione di ammirare per la prima volta il meccanismo di Antikythera al Museo Archeologico di Atene nell'agosto del 2006, pochi mesi prima che fosse pubblicato su *Nature* l'articolo di Tony Freeth e collaboratori, grazie al quale l'oggetto divenne celebre trovando spazio su quotidiani e settimanali di informazione. Fino ad allora era rimasto un curioso reperto noto quasi esclusivamente agli addetti ai lavori e, per la verità, anche agli appassionati di OOPart (*Out of place artifacts*).

La mia emozione di fronte a quel reperto non è stata inferiore, anche se di tipo diverso, a quella che ho provato verso i capolavori artistici esposti nello stesso museo. La vista di ingranaggi e scale graduate in un meccanismo di bronzo che sembrava appartenere al XIX secolo e proveniva invece da una nave romana naufragata nei pressi dell'isola di Antikythera (nell'antichità nota in realtà col nome di Aigila) nel I secolo a.C., dava un senso di straniamento e al tempo stesso suscitava ammirazione per la civiltà ellenistica che lo aveva prodotto.

Nel 2008 il meccanismo di Antikythera è stato oggetto di un secondo articolo su *Nature*, cui sono seguiti altri articoli specialistici, qualche articolo di divulgazione e un libro (*Decoding the Heavens*, della giornalista scientifica Jo Marchant) centrato soprattutto sugli aspetti umani della scoperta e dello studio del manufatto. Non è però facile, a partire dalle pubblicazioni su *Nature* e da quelle precedenti (oltretutto non immediatamente disponibili) dovute a quei pochi studiosi che si sono interessati al meccanismo, come Michael Wright e Derek De Solla Price, comprenderne funzionamento e implicazioni; pertanto sentivo da tempo la mancanza di un libro

che ne fornisse un'introduzione adeguata. Ebbene, questo libro ora esiste, e devo dire che non ha deluso le mie aspettative. È stato scritto da Alexander Jones, storico ed esperto di scienza antica, che fra l'altro è stato *referee* del primo articolo di Freeth e collaboratori ed è stato poi coinvolto nelle successive ricerche che hanno portato al secondo articolo su *Nature* del 2008.

Il libro copre tutti gli aspetti legati al meccanismo. I primi due capitoli sono dedicati alla storia della scoperta, un argomento interessante di per sé. Il fatto che ci sia pervenuto questo inestimabile oggetto è dovuto ad una concatenazione di eventi solo per noi fortunata: in primo luogo la tempesta che ha affondato la nave sulla quale viaggiava il meccanismo, proteggendolo da una quasi certa distruzione nel periodo successivo al crollo dell'Impero Romano (pochissimi bronzi si sono salvati); poi la seconda tempesta nel 1900, che ha spinto due barche di pescatori di spugne a cercare riparo proprio nel luogo dove era affondata quasi duemila anni prima la nave romana e a tuffarsi scoprendo il relitto e permettendo il successivo recupero del suo prezioso carico. Inoltre, il meccanismo appena ripescato era ricoperto da stratificazioni e, stando ad una testimonianza, sarebbe stato ributtato in mare dall'equipaggio che lo aveva appena recuperato se non fosse intervenuto un ufficiale della marina, Periklis Rediadis, che aveva notato una protuberanza metallica in mezzo alle incrostazioni. Oltre alle vicende del recupero, Jones descrive i primi studi e le prime ipotesi avanzate dagli studiosi nei primi anni dopo la scoperta, alcuni dei quali (in particolare il filologo tedesco Albert Rehm), hanno intuito alcune funzioni astronomiche dello strumento.

Segue nel terzo capitolo una presentazione generale del meccanismo, quale avrebbe potuto apparire alla sua epoca ad un osservatore. Era caratterizzato nella sua parte posteriore da due grandi quadranti con solchi spiraleggianti: quello superiore era suddiviso in 235 caselle, corrispondenti al numero di mesi lunari nei 19 anni solari del ciclo di Metone (un quadrante interno più piccolo segnalava la ricorrenza di quattro importanti eventi sportivi del mondo greco, tra i quali le Olimpiadi), mentre quello inferiore era suddiviso in 223 caselle, corrispondenti al numero di mesi lunari nei 18 anni del ciclo di Saros. Su ciascun quadrante una lancetta si muoveva in senso orario seguendo i solchi. Nella parte anteriore si trovava invece un quadrante circondato da una scala rappresentante il calendario egizio e dallo zodiaco, dove diverse lancette indicavano le posizioni del Sole, della Luna e dei cinque pianeti sullo zodiaco. Queste lancette erano mosse da ingranaggi nascosti all'interno del meccanismo (vi erano ben 37 ruote dentate), i quali a loro volta venivano posti in movimento manualmente girando una manopola. Informazioni preziose per la comprensione del meccanismo si sono trovate nelle iscrizioni, leggibili purtroppo solo parzialmente, che si trovavano attorno ai quadranti e sulle tavole di bronzo che ser-

vivano a proteggere il meccanismo, che era racchiuso in origine in un contenitore di legno.

Vengono poi esaminati nei capitoli successivi tutti quegli aspetti scientifici e culturali dell'astronomia antica che sono rilevanti e necessari per la piena comprensione del funzionamento del meccanismo, e ne viene spiegata la loro implementazione. Viene anche dato spazio, naturalmente, all'astronomia mesopotamica e al suo influsso su quella greca e di conseguenza sul meccanismo, anche se l'autore sottolinea che il meccanismo di Antikythera è a tutti gli effetti un prodotto della scienza e cultura greca.

Il quarto capitolo esamina il problema dei calendari nell'antica Grecia, posto dalla volontà di armonizzare il calendario lunare con quello solare. Il quinto capitolo esamina il moto del Sole e della Luna, con le soluzioni escogitate dai greci per spiegare l'anomalia del loro moto, e i *parapegmata*, sorta di previsioni meteorologiche in funzione del sorgere o tramontare di certe costellazioni. Il sesto capitolo riguarda le eclissi e descrive il ciclo di Saros e altre relazioni più precise; attraverso questi cicli era possibile predire la possibilità di una eclissi di Luna o di Sole. Il settimo capitolo è dedicato al moto dei pianeti, con la loro descrizione in termini di eccentrici e di epicicli, e al modo in cui questo moto è stato riprodotto nel meccanismo. Nell'ottavo capitolo viene descritta la parte "ingegneristica", ovvero come funzionava il meccanismo attraverso i suoi ingranaggi, che permetteva così di ottenere "automaticamente" numerose informazioni astronomiche, pur con una certa approssimazione, dando modo di seguire non solo il moto del Sole, della Luna e dei pianeti, ma anche le fasi lunari e le eventuali eclissi.

Infine, il nono e ultimo capitolo affronta brevemente il difficile problema del significato del meccanismo: qual era la sua funzione? L'autore esclude l'utilizzo in mare e quello astrologico, per i quali non avrebbe avuto una particolare utilità, ma anche l'impiego come strumento scientifico, data l'insufficiente precisione; Jones ritiene invece che il meccanismo avesse soprattutto una funzione didattica.

Alla fine della lettura il meccanismo di Antikythera non appare un artefatto alieno, ma un prodotto della scienza e della cultura del suo tempo che, anzi, avrebbe potuto essere più preciso e migliore: in effetti Jones osserva come molte delle funzioni si basino su conoscenze che sono espone nell'*Introduzione all'Astronomia* di Gemino, un trattato divulgativo. Detto questo, l'oggetto non perde nulla del suo fascino, anzi. Rimane una straordinaria testimonianza delle conoscenze, delle capacità tecnologiche e dell'ingegno di una civiltà che ha avuto l'ambizione di comprendere e riprodurre il funzionamento dell'universo: un'ambizione che ci ha lasciato in eredità insieme a quella parte di conoscenze che sono sopravvissute ai secoli bui.

ALBERTO CAPPI

Alexander Jones è Professor of the History of the Exact Sciences in Antiquity presso la New York University. Si inte-

ressa in particolare della storia e della trasmissione delle scienze matematiche, in modo particolare dell'astronomia. Ha curato diverse edizioni di testi scientifici greci. Nel 2006 ha ottenuto il *Francis Bacon Award in the History and Philosophy of Science and Technology*.

★

L'origine di (quasi) tutto Per fare una torta, devi prima inventare l'Universo

Graham Lawton, Jennifer Daniel
Edizioni Dedalo (Gli asteroidi), 2017
Copertina flessibile, pp. 255, € 24,00
ISBN 9788822057020
www.edizionidedalo.it

APRIMA vista questo libro sembra essere solo una versione abbellita della celeberrima rubrica della Settimana Enigmistica "Forse non tutti sanno che...". Infatti ogni capitolo si apre con una domanda abbastanza intrigante o buffa (ad esempio, «da dove viene la lanugine dell'ombelico?») e ampio spazio viene riservato alle illustrazioni. Quindi, prima di essere letto, potrebbe apparire un libro che presenta curiosità varie, adatto magari per trascorrere del tempo sotto un ombrellone ma non per imparare davvero qualcosa di serio.

Eppure le apparenze ingannano. Basta cominciare a leggerlo per rendersi subito conto che in quel testo molto succinto si trova una miriade di informazioni molto interessanti, stimolanti e aggiornate.

Il tema dominante è l'origine delle cose, il filo conduttore di ogni domanda che è posta come titolo di ogni capitolo. I capitoli sono poi organizzati in sezioni (*L'Universo, Il nostro Pianeta, La vita, La civiltà, La conoscenza*).

Forse la parte più "normale" è proprio quella astronomica, almeno per chi ha già letto qualcuna delle numerose pubblicazioni che hanno sviscerato il tema in lungo e in largo; il libro catalizza invece l'interesse del lettore quando affronta l'origine del linguaggio, dei soldi o della sepoltura dei defunti.

Non mancano le vere e proprie curiosità, come la storia dell'infestazione dei pidocchi sull'uomo, chi ha inventato la carta igienica, perché c'è voluto tanto ad inventare la ruota, che comunque insegnano strappando un sorriso.

Il tutto con un linguaggio leggero e divertente adatto ai ragazzi che vogliono soddisfare la propria curiosità... e risvegliare quella curiosità "ragazzina" degli adulti.

SANDRO BARDELLI

Graham Lawton, dopo aver conseguito una laurea in biochimica e un master in comunicazione della scienza presso l'*Imperial College* di Londra, da anni lavora al *New Scientist*, dove ricopre il ruolo di responsabile editoriale. I suoi articoli e le sue opere gli sono valsi numerosi riconoscimenti.

Jennifer Daniel è un'autrice e illustratrice che collabora stabilmente con il *New York Times* e il *New Yorker* e crea animazioni e illustrazioni per svariate case editrici. Direttrice creativa presso Google, ha vinto numerosi riconoscimenti per i suoi lavori di *visual storytelling*.

★

La pazza scienza Risultati serissimi da ricerche stravaganti

Luca Perri, Angelo Adamo
Sironi (Galapagos 80), 2017
Copertina flessibile, pp. 202, € 18,50
ISBN 9788851802813
www.sironieditore.it

SE fossi Ministro della Pubblica Istruzione consiglierei caldamente ai docenti delle scuole medie superiori (e a qualsiasi cittadino "virtuoso") di diffondere ed approfondire insieme agli studenti questo "pazzo" libro.

Potrà sembrare una affermazione un po' forte, magari dubitando che io ne tragga un qualche dividendo sugli incassi, ma, leggendolo, me ne sono proprio convinto. Perché?

Perché anch'io, come scrive Luca a pag.135:

ho potuto verificare negli anni trascorsi facendo divulgazione [...] che nasciamo tutti scienziati entusiasti [e che] la curiosità, la voglia di scoprire e la fantasia tendono a svanire più tardi con l'età, quando si inizia a percepire la Scienza come una entità astrusa e distaccata dal nostro quotidiano.

Come molto opportunamente scrive Paolo Attivissimo nella incisiva prefazione:

serve un approccio diverso, che accenda e rinvigorisca la scintilla della meraviglia prima che venga smorzata dalla coltre di disciplinato conformismo, che faccia scoprire il profondo, appagante divertimento della scoperta. Si può imparare divertendosi; cosa più importante, divertendosi si può anche imparare ad imparare.

Ma, direte, che cosa c'è di così straordinario in questo libro? Certamente lo stile scanzonato e irriverente, pieno di battute e di pagine che stupiscono e che, insieme alle illustrazioni fantasmagoriche e graffianti di Angelo Adamo – astronomo, grande divulgatore, musicista, fumettista – rendono la lettura leggera e davvero molto divertente. Tutto ciò è indubbiamente un grande merito di Luca Perri, giovane astrofisico molto brillante e competente, ma quello che secondo me rende questo libro speciale nella sua "pazzia" è la scelta di come presentare e illustrare l'essenza della scienza. E cioè: non scegliendo ed illustrando, ad esempio, i premi Nobel, ma trattando con acume e grande lucidità i premi *IgNobel* (vedi Cap. 1-13, pp. 19-132 e Appendici I e II), ed estraendone indicazioni e conclusioni (vedi pp. 133 e seguenti) cruciali per creare le basi indispensabili alla costruzione di un metodo (l'algoritmo) ottimale per capire la realtà e per un processo di for-

mazione culturale ed anche sociale di ogni studente e cittadino.

In poche parole, prima di passare ad una brevissima descrizione sintetica dei contenuti davvero curiosi e stimolanti, la linea guida che sottende il libro non è quella di irridere le ricerche “ignobili” premiate e descritte, come una superficiale lettura ed una banale interpretazione del premio *IgNobel* potrebbero fare pensare. Ma anzi, mira a fare capire che la ricerca scientifica procede proprio grazie alla creatività, all’apertura mentale, alla “vena di follia”, spesso spinta al limite dell’assurdo e perfino del ridicolo. È storia oramai nota di quante volte idee e ricerche che partono da premesse strampalate o assurde si siano invece poi rivelate, alla prova dei fatti, delle geniali intuizioni con enormi ricadute, anche economiche, sulla vita di tutti.

Che cosa è dunque il premio *IgNobel*? Nato nel 1991, viene ogni anno assegnato a dieci ricercatori autori di ricerche “strane, divertenti, strampalate”, che siano state però pubblicate su riviste scientifiche professionali ed autorevoli nei vari settori. Come Luca scrive:

perché mai l’Università di Harvard e il MIT, non la – seppur gloriosa – ProLoco di Poggibonsi, spendono ogni anno una grossa quantità di tempo e denaro per organizzare un premio da consegnare alla gente che usa fette di maiale per tamponare l’emorragia al naso?

Tredici capitoli illustrano e spiegano in modo semplice e scanzonato, insieme alle illustrazioni, l’importanza dei risultati e delle possibili conseguenze di ricerche che hanno protagonisti incredibili, con una varietà di animali (libellule, api, cani, scarabei, polli etc.), spaghetti, muffe, fiocchi d’avena e così via, ma anche temi legati ad esempio alla tanto declamata meritocrazia e all’economia. La sequenza di casi trattati o anche solo citati è davvero multiforme, divertente, incredibile, ma sempre stimolante.

Come detto, la conclusione che, da sola, vale tutto il libro, sta nella dimostrazione concreta, pagina dopo pagina, risata dopo risata, che tutti noi, giovani soprattutto, ma anche anzianissimi, finché viviamo, non dobbiamo porre limiti alla nostra curiosità, fantasia, voglia di conoscere, scoprire e capire, perché anche le cose più apparentemente banali e impensabili possono contribuire non solo a migliorare noi stessi, ma anche ad accrescere il bagaglio universale della conoscenza e del bene comune.

In particolare, trovo anche importante il fatto che in questo libro, insieme alle tante cose bizzarre e raccontate sempre in modo brioso e coinvolgente, ci sia spazio per spiegare in modo chiaro e con esempi eclatanti (conquista della Luna, LHC e CERN di Ginevra, Centro Nazionale di Oncologia di Pavia etc. vedi pp. 134-142) l’incredibile impatto della ricerca su tutto. Luca Perri conclude:

[...] l’entusiasmo che alcune persone provano nel fare ricerca o nell’apprezzare i risultati a cui questa conduce sembra infatti non bastare a fugare i dubbi di molti. Il discorso del FATTI NON FOSTE A VIVERE COME BRUTI colpisce davvero pochi. Perché dunque uno Stato dovrebbe investire in ricerca di base? Perché fa bene NON all’anima, ma al portafoglio.

FLAVIO FUSI PECCI

Luca Perri, dottorando in Astrofisica, è molto attivo nell’ambito della divulgazione scientifica. Vincitore italiano e finalista internazionale al concorso per giovani divulgatori scientifici *FameLab 2015*, è articolista e ospite in qualità di esperto per diverse testate giornalistiche, radiofoniche e televisive di carattere nazionale.

Angelo Adamo, astronomo con un master in Comunicazione della scienza, è laureato in Linguaggi del fumetto e in Musica per utilizzo multimediale. Sul suo blog *squidzoup.com* si diverte a scrivere corredando i testi di fumetti, illustrazioni, spartiti e video musicali.

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

Astronomia oggi

- Il mistero di CR7: stelle di terza popolazione o buco nero a collaso diretto? (A. PALLOTTINI) (PREMIO 'GIUSEPPE LORENZONI' 2017), n. 1, p. 2
- Dischi protoplanetari nell'era di ALMA (G. DIPIERRO) (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2017), n. 1, p. 6
- Cent'anni di cosmologia (R. CACCIA), n. 1, p. 13
- La funzione iniziale di massa stellare: universale o variabile? Implicazioni per l'evoluzione delle galassie (F. FONTANOT), n. 2, p. 2
- Sistemi tripli di buchi neri nell'era dell'astronomia gravitazionale (M. BONETTI) (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2018), n. 4, p. 5
- La scienza dei pianeti extra-solari nell'era degli Extremely Large Telescopes: strumenti di simulazione scientifica e tecnologica per spettroscopia ad alta risoluzione. I casi di ESPRESSO e ELTIHIRES (M. GENONI) (PREMIO 'PIETRO TACCHINI' 2018), n. 4, p. 13
- Rosetta: la prima osservazione dell'interno ghiacciato di un nucleo cometario (M. PAJOLA) (PREMIO 'GIUSEPPE LORENZONI' 2018), n. 4, p. 21

Astronomia e società

- Responsabilità della scienza e crisi culturale europea (S. D'AGOSTINO), n. 3, p. 2
- Scienza, temperamento, razza (G. L. Andriani (1901-1964)), n. 4, p. 2

Didattica

- A proposito delle leggi di Keplero (M. CITTÀ, M. GENCHI, S. SPALLINO, M.A. FIASCONARO), n. 1, p. 34
- Esperienze didattiche nel Corso di laurea in Astronomia di Bologna (C. BARTOLINI), n. 1, p. 41
- Premio SAIt 'G. V. Schiaparelli' 2018 (E. BETTONTE, A. SAMUELLI, E. TOMASI, F. SALVATI), n. 3, p. 28
- L'ASTRONOMIA MULTI-MESSENGER: DIDATTICA, RICERCA, CULTURA E SVILUPPO DEL TERRITORIO. SEZIONE DIDATTICA DEL LXII CONGRESSO NAZIONALE DELLA SAIt-TERAMO 2018 (a cura di C. DEL PINTO, A. CITTADINI BELLINI), n. 4, p. 24
- Occasioni per la didattica della filosofia: *Indicazioni nazionali*, epistemologia e astronomia (F. GALLO), n. 4, p. 24
- Rappresentazione di una stella: considerazioni geometriche, simboliche e didattiche (C. DEL PINTO), n. 4, p. 37

Storia

- 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), n. 1, p. 24
- Huygens e Cassini: appuntamento su Saturno, trecento anni dopo (A. CASSINI), n. 2, p. 7
- La riscoperta dell'opera di Secchi sugli spettri prismatici (P. BONIFACIO), n. 2, p. 16
- Draghi, serpenti, ippopotami e coccodrilli: la costellazione del Drago nella tradizione egizia e mesopotamica (S. BUSCHERINI), n. 3, p. 5
- Un Gesuita contro tutti: astronomia e pensiero di Giovanni Battista Riccioli (F. MARCACCI), n. 3, p. 11
- Il cerchio meridiano e la determinazione delle posizioni delle stelle nel XIX secolo (P. PAURA, C. SASSO), n. 3, p. 21

Cent'anni fa

- D. RANDAZZO, I. CHINNICI (a cura di)
n. 1, p. 43; n. 2, p. 20; n. 3, p. 36; n. 4, p. 41

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

- «Carissimo zio...». 1908: da Elsa a Giovanni Virginio (Schiaparelli) (I. AROSIO), n. 1, p. 45
- Ricordando Angelo Secchi: *Cronaca della spedizione in Spagna per l'eclisse del 1860* (I. CHINNICI), n. 2, p. 23
- Galileo e Viviani? (S. BIANCHI), n. 3, p. 38
- Gasparo Squarciafico: un amico genovese di Gio. Domenico Casini? (R. BALESTRIERI), n. 4, p. 44

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

- Un tè con Einstein navigando sul fiume (A. D'ERCOLE), n. 1, p. 49
- La temperatura di equilibrio (C. ELIDORO), n. 2, p. 27
- Verità, mezze verità e falsità sulla forza di Coriolis (A. D'ERCOLE), n. 3, p. 42
- Lo strano caso dell'ardente Mercurio (C. ELIDORO), n. 4, p. 47

Rubrica dei lettori

- Marino Perissinotto. Un astrofilo d'altri tempi, un astrofilo di serie "A" (P. CAMPANER), n. 2, p. 30

In ricordo di:

- Vito Francesco Polcaro (ANPI, E. ANTONELLO, R. FALCONE, S. GAUDENZI, C. ROSSI, R. VIOTTI, P. UBERTINI), n. 3, p. 47
- Giorgio G.C. Palumbo (M. DEL SANTO), n. 4, p. 50
- Marina Muzi (G. BONINI, N. CONTE, A. CASSINI), n. 4, p. 53

Biblioteca (a cura di A. CAPPI)

- G. AMELINO-CAMELIA, *Oltre l'orizzonte. Quali nuove frontiere per la fisica?* (recens. di R. De Carli), n. 3, p. 53
- V. BARONE, P. BIANUCCI, *L'infinita curiosità. Breve viaggio nella fisica contemporanea* (recens. di A. Simoncelli), n. 2, p. 33
- C. BARTOCCI, L. CIVALLERI, *Numeri. Tutto quello che conta da zero a infinito* (recens. di A. Simoncelli), n. 3, p. 54
- G.F. BIGNAMI, *Le rivoluzioni dell'universo. Noi umani tra corpi celesti e spazi cosmici* (recens. di G.G.C. Palumbo), n. 2, p. 33
- M. CAPACCIOLI, *MilleNotte. Storie dell'altro mondo* (recens. di A. Cappi), n. 4, p. 56
- A. CIMATTI, *L'universo oscuro. Viaggio astronomico tra i misteri del cosmo* (recens. di A. Buzzoni), n. 1, p. 53
- N.F. COMINS, *Destinazione spazio. Una guida per coloni e turisti* (recens. di M. Orlandi), n. 1, p. 54
- B. D'AMORE, S. SBARAGLI, *La matematica e la sua storia. Dalle origini al miracolo greco* (recens. di A. Cappi), n. 4, p. 56
- A. DINIS, SJ, *A Jesuit against Galileo? The Strange Case of Giovanni Battista Riccioli Cosmology* (recens. di F. Marcacci), n. 3, p. 54
- A. FROVA, *Luce. Una storia da Pitagora a oggi* (recens. di A. Cappi), n. 2, p. 35
- P. GRECO, *La scienza e l'Europa. Dal Seicento all'Ottocento* (recens. di G.G.C. Palumbo), n. 2, p. 36
- P. GRECO, *L'origine dell'universo* (recens. di M. Bellazzini), n. 2, p. 37
- C. GUAITA, *L'esplorazione delle Comete. Da Halley a Rosetta* (recens. di G.G.C. Palumbo), n. 3, p. 57
- A. JONES, *A Portable Cosmos. Revealing the Antikythera Mechanism, Scientific Wonder of the Ancient World* (recens. di A. Cappi), n. 4, p. 57
- S. KELLY, M. LAZARUS DEAN, *Endurance. Un anno nello spazio, una vita di scoperte* (recens. di M. Orlandi), n. 2, p. 38
- G. LAWTON, J. DANIEL, *L'origine di (quasi) tutto. Per fare una torta, devi prima inventare l'Universo* (recens. di S. Bardelli), n. 4, p. 59
- G. MONTANARI, *L'astrologia convinta di falso col mezzo di nuove esperienze, e Ragioni Fisico-Astronomiche, o sia la caccia del Frugnuolo* (recens. di S. Bianchi), n. 2, p. 40
- P. NATARAJAN, *L'esplorazione dell'universo. La rivoluzione che sta svelando il cosmo* (recens. di A. Adamo), n. 2, p. 42

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

L. PERRI, A. ADAMO, *La pazza scienza. Risultati serissimi da ricerche stravaganti* (recens. di F. Fusi Pecci), n. 4, p. 59
P. ODIFREDDI, *Dalla Terra alle lune* (recens. di C. Barbieri), n. 1, p. 55
G. SEVERINO, *The Structure and Evolution of the Sun* (recens. di M. Marconi), n. 3, p. 58
M.F. SIMEONI, *I ragazzi del San Marco. I primi italiani nello Spazio* (recens. di M. Orlandi), n. 3, p. 59
A. VANCE, *Elon Musk. Tesla, SpaceX e la sfida per un futuro fantastico* (recens. di M. Orlandi), n. 1, p. 57

D. VERARDI, *Logica e magia. Giovan Battista Della Porta e i segreti della natura* (recens. di P. Nava), n. 1, p. 58

LXII Congresso Nazionale della SAI
Teramo, 2-5 maggio 2018, n. 1, p. 61

Premio 'Pietro Tacchini'
XIII edizione – 2018, n. 1, p. 62

Indici degli autori

A. ADAMO, n. 2, p. 42
ANPI, n. 3, p. 47
E. ANTONELLO, n. 3, p. 47
I. AROSIO, n. 1, p. 45
R. BALESTRIERI, n. 4, p. 44
C. BARBIERI, n. 1, p. 55
S. BARDELLI, n. 4, p. 59
C. BARTOLINI, n. 1, p. 41
M. BELLAZZINI, n. 2, p. 37
E. BETTONTE, n. 3, p. 28
S. BIANCHI, n. 2, p. 40; n. 3, p. 38
M. BONETTI, n. 4, p. 5
P. BONIFACIO, n. 2, p. 16
G. BONINI, n. 4, p. 55
S. BUSCHERINI, n. 3, p. 5
A. BUZZONI, n. 1, p. 53
R. CACCIA, n. 1, p. 13
P. CAMPANER, n. 2, p. 30
A. CAPPI, n. 2, p. 35; n. 4, p. 56, 57
A. CASSINI, n. 2, p. 7; n. 4, p. 44
I. CHINNICI, n. 1, p. 43; n. 2, p. 20, 23; n. 3, p. 36; n. 4, p. 41
M. CITTÀ, n. 1, p. 34
A. CITTADINI BELLINI, n. 4, p. 24
N. CONTE, n. 4, p. 53
S. D'AGOSTINO, n. 3, p. 2
R. DE CARLI, n. 3, p. 53
C. DEL PINTO, n. 4, p. 24, 37
M. DEL SANTO, n. 4, p. 53
A. D'ERCOLE, n. 1, p. 49; n. 3, p. 42
G. DIPIERRO, n. 1, p. 6

C. ELIDORO, n. 2, p. 27; n. 4, p. 47
R. FALCONE, n. 3, p. 47
M.A. FIASCONARO, n. 1, p. 34
F. FONTANOT, n. 2, p. 2
F. FUSI PECCI, n. 4, p. 59
F. GALLO, n. 4, p. 24
S. GAUDENZI, n. 3, p. 47
M. GENCHI, n. 1, p. 34
M. GENONI, n. 4, p. 13
F. MARCACCI, n. 3, p. 11, 54
M. MARCONI, n. 3, p. 58
P. NAVA, n. 1, p. 58
M. ORLANDI, n. 1, p. 54, 57; n. 2, p. 38; n. 3, p. 59
M. PAJOLA, n. 4, p. 21
A. PALLOTTINI, n. 1, p. 2
G. PALTRINIERI, n. 1, p. 24
G.G.C. PALUMBO, n. 2, p. 33, 36; n. 3, p. 57
P. PAURA, n. 3, p. 21
F. SALVATI, n. 3, p. 28
D. RANDAZZO, n. 1, p. 43; n. 2, p. 20; n. 3, p. 36; n. 4, p. 41
C. ROSSI, n. 3, p. 47
A. SAMUELLI, n. 3, p. 28
C. SASSO, n. 3, p. 21
R. SERRA, n. 1, p. 24
A. SIMONCELLI, n. 2, p. 33; n. 3, p. 54
S. SPALLINO, n. 1, p. 34
E. TOMASI, n. 3, p. 28
P. UBERTINI, n. 3, p. 47
R. VIOTTI, n. 3, p. 47

*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

