

**Centro Studi “Mario Pancrazi”**



**2010**

**DOVE VA L'ASTRONOMIA**

*Dal sistema solare all'astronomia gravitazionale*

*a cura di Giampietro Cagnoli e Matteo Martelli*

**Quaderni di Ricerca e Didattica**

**2010**

Con il contributo di

**IMPRESA APPENNINO CENTRALE  
SINDACATO DI TERRITORIO**



Con la partecipazione di

**Liceo "Città di Piero" - Sansepolcro**



**ITIS "L. e A. Franchetti" - Città di Castello**



Si ringrazia la ditta **BUSATTI**



Si pubblicano gli Atti del Seminario 2010 – *Dove va l'Astronomia. Dal sistema solare all'astronomia gravitazionale*, svoltosi a Città di Castello, Auditorium Museo Diocesano, il 31 gennaio 2010. Il Quaderno ospita anche alcuni interventi di docenti e studenti dell'ITIS "L. e A. Franchetti" e del Liceo "Città di Piero".

Progetto Grafico: Santi Leonardo Vinci.

In redazione: Marinella Acquisti, Matteo Martelli, Gabriella Rossi

**Quaderno n. 3** della Serie "**R&D**" - **Ricerca e Didattica** - pubblicata dal Centro Studi "**Mario Pancrazi**" di Sansepolcro e diretta da Francesca Giovagnoli.

**ISBN 978 – 88 – 97200 – 01 – 7**

Autorizzazione N. 6/10 del Tribunale di Arezzo.

---

Stampa: *Tipografia* **l'Artistica** Selci Lama (PG)

Dicembre 2010

*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.  
e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto.*

*Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri  
son triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi  
è impossibile a intenderne umanamente parola;  
senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.*

*(Galileo Galilei)*

## SOMMARIO

**Matteo Martelli** - *Presentazione* 9

**Giampietro Cagnoli** - *Introduzione* 15

### **PARTE PRIMA - La riflessione degli studiosi**

**Ruggero Stanga** - *Trasformazioni: l'origine dei pianeti* 19

**Carlo Bradaschia** - *La Nuova Astronomia con le Onde Gravitazionali* 29

**Baldassarre Caporali** - *Filosofia e scienza nell'età moderna* 37

**Nicoletta Cosmi** - *I "segni celesti" nelle opere dell'uomo. Castel del Monte* 61

### **PARTE SECONDA - La parola agli studenti**

**Liceo "Città di Piero"** a cura di Maria Concetta Bianconi 77

**ITIS "Leopoldo e Alice Franchetti"** a cura di Giampietro Cagnoli 95

### **APPENDICE**

**Giandomenico Vaccarecci** - *Il telescopio va a scuola* 109

**Illustrazioni** I

**Publicazioni** XXXI



## Matteo MARTELLI\*

### *Presentazione*

Il 31 Gennaio 2010, a Città di Castello<sup>1</sup>, si è tenuto il Seminario *2010 - Dove va l'Astronomia. Dal sistema solare all'astronomia gravitazionale*, che ha registrato la partecipazione di studiosi, docenti, studenti e di un folto pubblico di appassionati. Il tema in oggetto ha suscitato l'interesse e la curiosità di giovani e adulti, desiderosi di avvicinarsi alle nuove frontiere della ricerca scientifica in ambito astronomico. La serata prevedeva una originale conclusione, che purtroppo l'inclemenza del tempo ha sciupato. E' stato impossibile frugare nel cielo alla ricerca di Marte con l'ausilio del telescopio montato sulla terrazza dell'Istituto "Franchetti". Nubi e fiocchi di neve ci hanno impedito di osservare il cielo e di partecipare ad una straordinaria esperienza collettiva. L'esame virtuale di costellazioni e pianeti, con l'ausilio di splendidi supporti digitali, ci ha in parte ripagato della delusione.

Ora, il Centro Studi "Mario Pancrazi" accoglie con soddisfazione, nella serie dei Quaderni, la pubblicazione delle conferenze degli studiosi che hanno partecipato al Seminario e degli interventi di docenti e studenti di due scuole medie superiori della Valtiberina umbra e toscana, elaborati in sintonia con le tematiche dibattute nel corso della serata seminariale.

L'osservazione dell'universo è stata una meravigliosa "pratica umana" fin dalle origini delle civiltà. Davanti agli occhi dell'uomo – come notava Galileo Galilei<sup>2</sup> - è da sempre aperto un "grandissimo libro", che da un lato lo affascina, dall'altro ne sollecita la comprensione. Fin dall'antichità erano tanti i fenomeni della natura da spiegare, da quelli basilari dell'alternarsi del giorno e della notte a quelli conditi di mistero che riguardavano la vita delle stelle. Col passare dei secoli a fianco dei metodi scientifici di osservazione si svilupparono pratiche divinatorie; accanto all'astronomia l'astrologia. Presso i popoli antichi l'osservazione degli astri era pratica

---

<sup>1</sup> Cfr. il Manifesto/Locandina (Fig. 68) riportato in questo quaderno alla pagina XIX delle *Illustrazioni*.

<sup>2</sup> Cfr. G. GALILEI, *Il Saggiatore*, in *Opere*, vol. I, Mondadori, Milano, 2008, p. 631 (*esergo* di questo quaderno). Galileo Galilei (Pisa 1564 – Arcetri 1642) è il fondatore del metodo sperimentale basato sull'uso del telescopio nelle osservazioni scientifiche.

quotidiana, simbolica e religiosa. Ed è stata l'archeoastronomia a documentare la "preistoria" del cielo. A metà dell'Ottocento Norman Lockyer<sup>3</sup> ha dimostrato che le piramidi egizie e i monumenti megalitici europei hanno orientamenti astronomici. Nel corso del Novecento è stata rivelata la cosmologia degli "antichi": dai Sumeri ai Cinesi, dagli Aztechi agli Inca ai Maya, dagli Egiziani ai Greci.

L'evoluzione della scienza astronomica, nel corso del XX secolo, ha radicalmente cambiato la visione che l'uomo aveva dell'universo. Gli studi hanno stabilito che l'universo è nato 12/15 miliardi di anni fa, in seguito alla grande esplosione del BIG BANG, come ironicamente ha definito l'evento Sir Fred Hoyle<sup>4</sup>. Le teorie elaborate dai grandi scienziati del nostro tempo<sup>5</sup> hanno impresso un'accelerazione senza precedenti alle indagini astronomiche, che ci hanno consentito non solo di conoscere il pianeta Terra, ma di studiare il Sistema Solare, la nostra Galassia e le altre galassie. Prima dei cannocchiali e dei telescopi si osservava il cielo a occhio nudo o si faceva ricorso a strumenti come gli astrolabi e i quadranti. Si deve a Galileo Galilei il grande salto di qualità nell'osservazione dell'universo. Lo scienziato pisano si costruì lo strumento per osservare il cielo e con il suo cannocchiale studiò il Sistema Solare, scoprì il rilievo lunare, le macchie solari, i quattro satelliti principali di Giove, le fasi di Venere, l'anello di Saturno, la natura stellare della Via Lattea. Dal 1609 la scienza astronomica, in barba alle condanne di autorità religiose e civili, ha registrato uno sviluppo progressivo, ha fruito degli apporti delle altre scienze (fisica, chimica, biologia), ha moltiplicato gli oggetti di studio. L'astronomia è diventata anche astrofisica e radioastronomia. Negli ultimi 50 anni, come dimostra anche questo Quaderno, si sono dilatate le frontiere della ricerca, grazie al lavoro dei centri di studio accademici e no, alle numerose missioni spaziali e alle attività promosse dalla NASA (National Aeronautics and Space Administration, istituita nel 1958), dall'ESA (Ente Spaziale Europeo, costituita nel 1974) e da altri enti nazionali ed internazionali<sup>6</sup>. E' nata l'astronomia gravitazionale che promette di rivoluzionare le nostre conoscenze dell'universo.

---

<sup>3</sup> Cfr. N. LOCKYER, astrofisico inglese nato a Rugby il 17 maggio 1836, morto a Sidmouth il 17 agosto 1920.

<sup>4</sup> Cfr. F. HOYLE (1915-2001), astrofisico e matematico inglese.

<sup>5</sup> Qui si ricorda, per tutti i grandi scienziati della nostra epoca, Albert Einstein (1879-1955), padre della teoria della relatività generale (1915) e Premio Nobel per la Fisica nel 1921.

<sup>6</sup> Per l'Italia si ricorda l'ASI (Agenzia Spaziale Italiana), nata nel 1988, che partecipa a numerosi programmi di ricerca internazionale.

Il Quaderno ospita una *Introduzione* di Giampietro Cagnoli, Vicepresidente del Centro Studi, fisico, docente presso l'ITIS di Città di Castello<sup>7</sup> e ispiratore del Seminario di Gennaio. Cagnoli illustra la genesi dell'iniziativa, collegandola alla manifestazione internazionale per l'Astronomia, e dà conto del coinvolgimento dei ricercatori di Firenze e di Pisa, dei docenti e degli studenti delle due scuole. Particolare rilievo riserva al collegamento della Scienza con la Tecnologia, osservando che “il connubio Scienza-Tecnologia ha portato l'Astronomia ad interessarsi ad oggetti sempre più distanti, ben oltre il nostro Sistema Solare, fino ad arrivare ai confini dell'Universo osservabile come impostoci dalla Teoria della Relatività. Così come l'Universo non finisce con il nostro Sistema Solare, allo stesso modo gli strumenti astronomici non si sono limitati a captare solo la luce visibile, ma hanno sviluppato delle tecnologie sempre più sofisticate, tali da osservare l'Universo non solo in tutte le bande dello spettro elettromagnetico ma anche intercettando la debole traccia dei neutrini e, si spera, delle onde gravitazionali in un prossimo futuro”

Nello studio delle costellazioni, dei pianeti e dell'universo nel suo insieme siamo passati dalle ipotesi basate sulla lettura della Bibbia a proposte di interpretazione della loro origine ed evoluzione sostenute su basi scientifiche. Prendiamo, ad esempio, il calcolo dell'età della Terra. Le moderne datazioni – scrive Ruggero Stanga – sono basate sullo studio del “decadimento radioattivo”. E la nuova tecnica ci porta non solo a valutare l'età della Terra in circa 4,3 miliardi di anni e quella del Sole in 4,57 miliardi, ma ci induce a rivedere le teorie sull'origine e sulla trasformazione dei pianeti. E proprio a quest'ultimo argomento lo studioso dedica la sua riflessione, osservando che la genesi dei pianeti non è separabile dalla formazione delle stelle. Noi conosciamo per ora 466 pianeti. Ma abbiamo inviato il satellite artificiale Keplero alla ricerca di altri pianeti per noi sconosciuti. Conosciamo, invece, la storia della vita sulla Terra, le cui prime testimonianze risalgono ad almeno 500 milioni di anni dopo la sua formazione. “I primi vertebrati risalgono a circa 500 milioni di anni fa”. Siamo certi che sulla Terra “la vita si è formata nel mare”.

Sulle onde gravitazionali incentra la sua attenzione Carlo Bradaschia, partendo dalla convinzione di Einstein, secondo cui le OG non sarebbero mai state percepite,

---

<sup>7</sup> Giampietro Cagnoli dal 1° settembre è in aspettativa, per cui ha lasciato temporaneamente la cattedra di Fisica presso la sezione del liceo scientifico-tecnologico (ora delle scienze applicate) dell'ITIS tifernate. Ha accettato l'incarico di Assistant Professor presso il Department of Physics and Astronomy dell'University of Texas at Brownsville.

e concludendo con l'illustrazione del Progetto Virgo, che mira a registrare i segnali delle OG e a contribuire in questo modo alla nascita dell'astronomia gravitazionale. Avremo informazioni sulle "zone" nascoste dell'Universo. Sapremo come era l'Universo dopo il Big Bang. Saremo in grado di formulare nuove ipotesi sull'evoluzione del Cosmo.

Il Centro Studi, fin dalla sua costituzione, ha cercato di coniugare la promozione della ricerca scientifica con l'insegnamento nelle scuole medie superiori. Gli incontri, i seminari, i convegni organizzati dal Centro hanno sempre mirato a coinvolgere sia gli studiosi, i professori universitari, gli accademici, sia i docenti e gli studenti delle scuole della vallata tiberina umbra e toscana<sup>8</sup>. Anche questa volta due istituzioni scolastiche si sono interrogate sulla scienza nell'epoca moderna, sulle implicazioni dell'astronomia nell'architettura, sui protagonisti della ricerca scientifica dal Seicento ad oggi, sulle applicazioni della scienza alla medicina, sulla radioastronomia. Docenti e studenti hanno partecipato a questo Quaderno con originali interventi e preziosi elaborati, a conferma che a scuola non solo si apprendono le conoscenze definite in sede scientifica, ma si maturano capacità e competenze per riflettere autonomamente sul sapere acquisito e proporre percorsi di riflessione critica autonoma.

Il primo contributo, come voce della scuola, è offerto da Baldassarre Caporali, studioso e insegnante di Filosofia nel Liceo "Città di Piero". Le considerazioni di Caporali ripercorrono la storia dei rapporti tra filosofia e scienza dal Seicento ad oggi e argomentano la critica all' <assolutismo> della scienza e alle derive <scientiste>. La delimitazione del confine tra scienza e metafisica, la denuncia del dogmatismo scientifico, la riconciliazione della scienza con il progetto di emancipazione illuminista sono alcuni dei capitoli dell'impresa culturale che può contribuire a rendere "più cogente l'interdipendenza tra Filosofia e Scienza, ripiegandole l'una nell'altra e rettificandole l'una attraverso l'altra, rendendo più autoriflessive le scienze e più *sperimentale* la Filosofia". In tale prospettiva, "una critica salvatrice della scienza (dalle insidie del dogmatismo) può tracciare il cammino ad un rinnovamento post-metafisico della filosofia".

---

<sup>8</sup> Cfr. a questo proposito i Quaderni 1 e 2, la mostra e il volume *A scuola di scienza e tecnica* (Aboca Museum Edizioni, Sansepolcro, 2009), il seminario su Luca Pacioli (*Luca Pacioli fra Arte e Geometria*, q. 2) e il convegno in occasione del Cinquecentenario della prima pubblicazione del *De Divina Proportione* (*Pacioli 500 anni dopo*, suppl. a questo quaderno).

Per poter leggere ed interpretare i “segni” e i “significati” delle opere d’arte occorre acquisire una “competenza linguistica”, è necessario conoscere i linguaggi e i glossari degli artisti. Le linee, le forme, gli spazi, la luce, la composizione, la struttura sono illustrati da Nicoletta Cosmi come una premessa al vocabolario dell’arte, a cui segue poi l’esame dei rapporti fra arte e osservazione del cielo. Allo studio dei “segni tracciati dall’uomo” segue l’analisi dei “segni celesti” nell’opera dell’uomo, e in particolare nei monumenti megalitici (il cromlech di Stonehenge, un vero e proprio osservatorio astronomico) e nel gioiello architettonico costruito da Federico II in Puglia, a Castel del Monte (un “concentrato di simboli cosmici e d’implicazioni astronomiche, geografiche, matematiche e geometriche”).

Notizie, curiosità, osservazioni storico-critiche emergono dagli elaborati degli studenti del Liceo “Città di Piero” di Sansepolcro che si soffermano sulla vita e le opere di alcuni scienziati (Copernico, Brahe, Keplero, Galilei) e sulla ricerca pittorica di Piero della Francesca. Particolarmente interessanti risultano le annotazioni sulla “fisica” della Risonanza Magnetica (RM), sulle radiazioni elettromagnetiche e sulla nascita e lo sviluppo della radioastronomia.

Sulle caratteristiche dei Telescopi Astronomici si sono interrogati i ragazzi dell’Istituto “Leopoldo e Alice Franchetti” di Città di Castello. Hanno illustrato le caratteristiche dei telescopi a disposizione di scienziati e astrofili; hanno esaminato le diverse montature (con particolare riguardo a quella del telescopio di Ugo Galli); hanno discusso le due aberrazioni: quella sferica e quella cromatica.

In *Appendice* si leggono con interesse e utilità le note di Gian Domenico Vaccarecci, Segretario Generale di Impresa Appennino Centrale – Sindacato di Territorio, “un’associazione di imprese con sede a Città di Castello, che si propone di sviluppare e tutelare la cultura di impresa nel territorio a cavallo del nostro Appennino”. Vaccarecci ripercorre rapidamente le tappe della vita e dell’opera di Ugo Galli (operaio meccanico, bidello, assistente tecnico, pittore, appassionato di astronomia), ne traccia l’essenziale profilo umano e professionale, ci presenta il “suo” telescopio, che i ragazzi di Sansepolcro e Città di Castello hanno avuto l’opportunità di ammirare nelle esposizioni allestite nell’ITIS “Franchetti” e nel Liceo “Città di Piero”.



## Giampietro CAGNOLI\*

### *Introduzione*

Il 10 Gennaio 2010 si è concluso a Padova l'Anno Internazionale dell'Astronomia IYA2009. Sia per la durata – più di un anno – che per la partecipazione – circa 815 milioni di persone di 148 paesi secondo le stime degli organizzatori – tale evento è stato tra quelli scientifici il più grande mai organizzato negli ultimi decenni. Sulla spinta di questo evento internazionale la scuola alla quale appartengo come insegnante di Fisica, l'ITIS “Franchetti” di Città di Castello, in collaborazione con il Centro Studi “Mario Pancrazi”, del quale mi onoro di essere vice presidente, hanno lentamente ma costantemente ideato e poi realizzato durante tutto il 2009 questo evento locale di divulgazione astronomica a Città di Castello, i cui atti ed altri lavori ad esso relativi vengono ora pubblicati in questo quaderno.

Il titolo dell'evento, la scelta degli argomenti e della data sono tutti legati da una trama che ora cercherò di spiegare.

La collocazione temporale del nostro evento, il 31 gennaio 2010, è stata favorita dalla coincidenza con l'opposizione di Marte, cioè con il periodo più favorevole per la visione del pianeta, ovvero quando esso transita alla minima distanza dalla Terra. Quale occasione migliore per dare all'evento tifernate un aspetto osservativo che non sempre accompagna i seminari astronomici? Così, invece di collocare il nostro evento all'interno dell'Anno Internazionale dell'Astronomia (AIA), abbiamo preferito associarlo ad un evento astronomico reale, legato all'osservazione favorevole del pianeta a noi più vicino, dando modo ai partecipanti al seminario di fare esperienza della pratica osservativa, quasi ad emulare le gesta di Galileo.

### **Posizione dei satelliti di Giove. Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze**

I pianeti del nostro Sistema Solare sono stati il primo oggetto di interesse astronomico per l'uomo e la loro osservazione ha rappresentato un passo importante

**\*Vicepresidente del Centro Studi “Mario Pancrazi”. Dal 1° settembre è in aspettativa come docente di Fisica presso la sezione del liceo scientifico-tecnologico (ora delle scienze applicate) dell'ITIS tifernate, e svolge l'incarico di Assistant Professor presso il Department of Physics and Astronomy dell'University of Texas at Brownswille.**

sia per lo sviluppo della moderna Astronomia in generale che per le teorie di Galileo (Cfr. Fig. 1) in particolare. Il 2009 è stato scelto proprio come AIA perché 400 anni prima Galileo osservò con un telescopio prima la Luna poi i satelliti di Giove ed il disco di Saturno, notando *stelle* che non erano visibili prima. Questo evento è considerato la nascita della moderna Astronomia: l'intelletto umano viene potenziato dall'uso della Tecnologia ed al tempo stesso la Tecnologia viene sviluppata per soddisfare la curiosità dell'uomo e la sua voglia di rispondere alle domande fondamentali sull'origine e sul futuro del nostro Universo. Da allora il connubio Scienza-Tecnologia ha portato l'Astronomia ad interessarsi ad oggetti sempre più distanti, ben oltre il nostro Sistema Solare, fino ad arrivare ai confini dell'Universo osservabile come impostoci dalla Teoria della Relatività. Così come l'Universo non finisce con il nostro Sistema Solare, allo stesso modo gli strumenti astronomici non si sono limitati a captare solo la luce visibile ma hanno sviluppato delle tecnologie sempre più sofisticate, tali da osservare l'Universo non solo in tutte le bande dello spettro elettromagnetico ma anche intercettando la debole traccia dei neutrini e, si spera, delle onde gravitazionali in un prossimo futuro.

È apparso quindi più che appropriato dare al nostro evento cittadino il titolo *2010. Dove va l'Astronomia*. Con esso si è voluto dare l'idea di un'Astronomia che non finisce con l'AIA, ma che è in continua evoluzione sia di soggetti di studio – dai pianeti all'Universo – che di tecnologie – dal telescopio di Galileo agli interferometri per le onde gravitazionali.

Gli argomenti delle due relazioni presentate hanno perfettamente reso il tema del seminario. Nel primo intervento Ruggero Stanga ha esposto le moderne teorie sulla nascita del Sistema Solare e sulla sua evoluzione. La relazione sia con l'esperienza osservativa di Galileo che con la prevista visione di Marte, purtroppo rovinata da una nevicata puntuale quanto inopportuna, è stata evidente. Inoltre si è potuto vedere come l'uso delle sonde spaziali, gioielli della migliore tecnologia mai sviluppata dall'uomo, abbia permesso agli scienziati di formulare teorie sulla formazione del nostro Sistema.

Nel secondo intervento Carlo Bradaschia ha illustrato le potenzialità insite nella rivelazione delle onde gravitazionali ed i principi di funzionamento dei rivelatori. L'Astronomia Gravitazionale è l'ultima frontiera aperta nello studio del Cosmo; le onde gravitazionali sono gli ultimi messaggeri di cui possiamo disporre per osservare l'Universo e gli oggetti in esso contenuti, in particolare quelli altamente energetici come stelle di neutroni e buchi neri; è il futuro che ci attende, la direzione

forse più importante dove sta andando l'Astronomia. Anche in questo caso, niente sarebbe possibile senza lo sviluppo di sofisticate tecnologie capaci di rivelare spostamenti più piccoli di un millesimo del nucleo atomico in oggetti di massa pari a qualche decina di chili.

A seguito del seminario anche altre attività sono state organizzate con lo spirito di portare l'Astronomia presso le scuole, mettendo in evidenza il connubio fondamentale tra Scienza e Tecnologia. Grazie al contributo dell'Impresa Appennino Centrale – Sindacato di Territorio ed all'impegno personale del suo Segretario Generale Gian Domenico Vaccarecci, è stato possibile lasciare in visione un telescopio rifrattore costruito dal tecnico Ugo Galli agli studenti del Liceo Scientifico Tecnologico dell'ITIS "Franchetti", il cui Dirigente Scolastico, Prof.ssa Valeria Vaccari, ha colto subito l'aspetto formativo particolare. Questo ha prodotto una serie di ricerche da parte degli studenti della classe quarta sui vari tipi di telescopi, sulle loro montature e sulle aberrazioni cui sono soggetti tali strumenti. Tali ricerche pubblicate in questo quaderno colgono gli aspetti essenziali del telescopio costruito da Ugo Galli, che per la qualità della realizzazione è senza dubbio un eccellente esempio, capace di rendere tutti gli aspetti essenziali di tale tipo di strumenti.

Vorrei concludere con un auspicio: che i lettori di questo quaderno possano trovare interessanti le informazioni su alcuni ultimi sviluppi dell'Astronomia ed avere soddisfazione nel vedere come sia stato possibile ed efficace avvicinare il mondo della Scienza a quello della comunità civile e della scuola.



# PARTE PRIMA

## *La riflessione degli studiosi*

**Ruggero STANGA\***

### *Trasformazioni: l'origine dei pianeti*

Il cielo notturno è punteggiato di stelle, che disegnano le costellazioni, alle quali sono stati associati fino dalla più remota antichità i miti propri della cultura di che le osservava. Le costellazioni tornano notte dopo notte inalterate, a misurare lo scorrere del tempo e il lento ritorno delle stagioni. Insieme alle stelle percorrono le vie del cielo anche alcuni astri erranti, più vivaci delle stelle, che si muovono fra le costellazioni: la Luna, Mercurio, Venere, Marte, Giove, Saturno.

Raramente, altri visitatori compaiono, per fare una veloce e, spesso, unica apparizione: le comete. Mentre le stelle appaiono distanti, il veloce movimento dei pianeti e delle comete li fa sembrare più vicini.

Non prima di Galileo Galilei, però, fu possibile avere le prime informazioni sull'aspetto della loro superficie, e non prima degli ultimi decenni del secolo scorso fu possibile metterci piede, sia grazie alle sonde interplanetarie automatiche, sia grazie alle missioni lunari del Progetto Apollo, che portarono allo sbarco sulla Luna di una dozzina di astronauti, a cavallo fra gli anni '60 e '70 del secolo scorso. Nel corso dei secoli, le osservazioni, i dati, e l'evoluzione di chimica e fisica permisero di affrontare il problema posto dalla costituzione ed origine delle stelle e dei pianeti, a cominciare dalla valutazione della età della Terra.

Verso la metà del 1600, John Lightfoot, studente del Christ College di Cambridge, determinò che la Terra era stata creata nel 3928 a.C., all'equinozio d'autunno, e qualche anno dopo, James Ussher, vescovo inglese, datò invece la creazione della Terra al pomeriggio del 22 Ottobre del 4004 a.C.

\* Dipartimento di Fisica e Astronomia, Arcetri, Firenze

Queste date non erano state ottenute dallo studio del soggetto, la Terra, ma erano state ricavate da una analisi della Bibbia, a cui erano stati applicati i calcoli fatti utilizzando le teorie di Keplero per risalire al giorno preciso; anche Keplero stesso e Newton, utilizzando le stesse fonti, erano arrivati a risultati simili. Per quanto ingenuo possa sembrare rifarsi unicamente alla Bibbia, questo era l'unico metodo possibile all'epoca. Tuttavia, già nel diciottesimo secolo, geologi e paleontologi si erano resi conto che non era possibile concentrare in circa 6000 anni tutta la storia della Terra. (Cfr. Fig. 2: *-Il Modulo Lunare visto dalla capsula Apollo 13*). Non riuscivano a spiegare come si erano formati le rocce sedimentarie, che richiedono tempi di formazione dell'ordine dei milioni di anni; l'esistenza di gole come il Grand Canyon, uno degli esempi più famosi, che poteva essere stato scavato dal fiume Colorado solo in milioni di anni; non riuscivano a capire come in soli 6000 anni si fossero formate ed estinte tutte le specie testimoniate dagli abbondanti reperti fossili: come mai non c'è traccia nella memoria storica dell'umanità di una rapida (addirittura su tempi scala di generazioni) variabilità delle specie viventi?

Edmund Halley, sempre nel XVIII secolo, osservò che gli oceani diventano sempre più salati, a causa del continuo apporto dei sali disciolti in piccolissime quantità nell'acqua dei fiumi. Bene, l'età della Terra non poteva essere troppo piccola, perché altrimenti gli oceani conterrebbero ancora acqua dolce; ma non potrebbe essere troppo vecchia, altrimenti tutti gli oceani sarebbero molto più salati, come il Mar Morto.

Verso la fine del XIX secolo, Lord Kelvin cercò di determinare l'età della Terra partendo dall'ipotesi che si fosse formata come roccia fusa, e calcolando il tempo che era necessario perché si raffreddasse fino alla temperatura attuale. Ottenne un valore fra 20 e 40 milioni di anni, ancora troppo corto per i requisiti della teoria darwiniana dell'evoluzione delle specie viventi. Al volgere del secolo, John Joly applicò il metodo suggerito da Halley, ed avendo stimato la velocità con cui gli oceani si arricchiscono di sale, arrivò ad una età fra gli 80 ed i 90 milioni di anni.

Le moderne datazioni usano un altro fenomeno fisico, il decadimento radioattivo. Come è noto, alcuni elementi non sono stabili, ma si trasformano in altri, emettendo elettroni o fotoni. Ad esempio,  $^{238}\text{U}$  decade in  $^{206}\text{Pb}$ . Il processo di decadimento è casuale, non sappiamo quale atomo di Uranio si trasformerà in Pb nel prossimo decadimento. Però sappiamo che di un dato campione di U, diciamo 1000 atomi, 500 atomi, la metà, decadranno in un tempo di 4.5 miliardi di anni.

Semplificando molto, è possibile stabilire l'età di una roccia misurando il quantitativo di  $^{238}\text{U}$  e di  $^{206}\text{Pb}$  contenuto. Con questa tecnica, si riesce a determinare che la roccia più antica sulla Terra ha un'età di circa 4.3 miliardi di anni (a causa del continuo divenire della Terra, di cui la deriva dei continenti e l'attività atmosferica sono manifestazione, rocce più antiche possono essere state fuse nel mantello, oppure possono essere state disaggregate per erosione), mentre i reperti lunari più vecchi hanno un'età di 4.5 miliardi di anni: molto di più delle stime di Kelvin e di Joly.

Quale è invece l'età del Sole? Le metodologie più moderne danno un'età di 4.57 miliardi di anni. Sulla base di questi dati è dunque ragionevole pensare che l'intero Sistema Solare si sia formato in una ben precisa epoca. Ma come? A questo punto le teorie sulla formazione stellare debbono necessariamente incrociarsi con quelle sulla formazione dei pianeti. I nostri occhi sono sensibili solo ad una parte dell'intero spettro della radiazione emessa dal Sole e dalle altre stelle. I raggi ultravioletti ed i raggi gamma da un lato, la radiazione infrarossa e radio dall'altra sono precluse ai nostri occhi. Dagli ultimi decenni del secolo scorso, però, abbiamo saputo costruire strumenti (i radiotelescopi; i sensori infrarossi; i telescopi per raggi ultravioletti messi a bordo di satelliti) che hanno superato i nostri limiti fisiologici, e ci hanno permesso di scoprire nel cielo nuove strutture. Quelle che ci interessano in questo contesto sono le grandi nubi molecolari, che possono avere masse anche di qualche centinaia di migliaia di volte la massa del Sole, che sono composte da grani di polvere di qualche micrometro (millesimo di millimetro) di diametro, e da molecole anche complesse, costituite di carbonio, idrogeno, azoto. In cielo occupano regioni estese, che sebbene siano lontane anche migliaia di anni luce, possono apparire grandi anche quanto la Luna. La pressione del gas, che tende a fare espandere la nube, è sufficiente a bilanciare la forza di gravità, che invece tende a farla contrarre. Può succedere che una piccola porzione di queste nubi, dal diametro di qualche decina di migliaia di volte la distanza Terra-Sole, cominci a contrarsi, le cause possono essere molte. (Cfr. Fig. 3). In questa piccola porzione la forza di gravità localmente vince la pressione del gas, che quindi continua a collassare, trascinando con sé la polvere. In tempi piuttosto brevi su scala cosmica (qualche centinaio di migliaia di anni) il piccolo frammento della nostra grande nube originaria (la quale peraltro continua pressoché indisturbata la sua orbita intorno al centro della Galassia) rimpicciolisce, fino a dimensioni dell'ordine di qualche centinaio di volte la distanza Terra-Sole. Al suo centro

diventa molto compatta, la sua densità raggiunge valori simili a quelli che si trovano al centro del Sole, tanto che entrano in funzione le reazioni di fusione nucleare che sono la fonte dell'energia irradiata dal Sole.

A questo punto, è nata una nuova stella. Per quanto breve su scala cosmica, il tempo impiegato è molto lungo su scala umana: come abbiamo potuto determinare la storia di questo processo? Per fortuna, ci sono molti oggetti celesti, ciascuno in una fase differente del processo. Le osservazioni, e l'applicazione delle leggi fisiche, note dai nostri laboratori, e supposte vere anche nel laboratorio celeste, ci hanno consentito di definire il significato fisico e l'ordine temporale delle fasi che abbiamo citato. Il processo di formazione non è molto efficiente, e la gran parte della massa del frammento originale rimane sotto forma di gas e polvere, in un guscio intorno alla stella; la parte più interna del guscio viene dissolta dalla radiazione della stella appena formata: le molecole vengono scisse nei loro componenti, e i grani di polvere evaporano per via della radiazione molto intensa e molto energetica; la parte più esterna viene in parte dispersa dalla spinta fornita dalla radiazione emessa dalla stella; rimane un disco circumstellare di gas e di polvere, che giace sul piano perpendicolare all'asse di rotazione della giovane stella. Questa regione è la culla dove si formano i pianeti. I grani di polvere si aggregano con meccanismi ancora non chiari, dando origine poi a planetesimi, corpi con dimensioni dell'ordine del chilometro. Mentre strutture più piccole sono soggette ai moti turbolenti del gas residuo sul piano del disco circumstellare, i planetesimi hanno dimensioni tali che la forza di gravità dovuta alla loro massa diventa dominante, e possono dunque interagire gravitazionalmente. Le meteoriti, che contengono le rocce più antiche del Sistema Solare, con un'età di circa 4.56 miliardi di anni, e che si formarono in un tempo relativamente breve di non più di milioni di anni, e le comete conservano le tracce di questa fase della formazione del Sistema Solare.

Infine, i planetesimi si aggregarono, formando i pianeti, in tempi dell'ordine delle decine di milioni di anni. Ora, di sistemi planetari ne conosciamo uno, il nostro Sistema Solare, appunto, e questo scenario è perfettamente coerente con la sua storia, per come l'abbiamo ricostruita a partire dai risultati. Ma se lo scenario generale che abbiamo visto è vero, allora la genesi di sistemi planetari deve essere piuttosto frequente nella nostra Galassia e nell'Universo, dato che dovrebbe accompagnare la nascita di ogni stella. Ed eccoci alla ovvia domanda: quanti sistemi planetari esistono? (Cfr. Fig. 4).

Per quanto ovvia, non è assolutamente una domanda semplice: le tecniche osservative necessarie per dare una risposta sono estremamente spinte, a causa del fatto che i pianeti sono molto meno luminosi ed hanno una massa molo più piccola della stella intorno a cui orbita; solo da poco più di un decennio è stato possibile cercare di dare una risposta. Bene, di pianeti oggi giorno se ne conoscono 466, che orbitano intorno a circa 380 stelle (ma questi numeri sono in continua crescita), per cui alcune stelle sembra possiedano un sistema planetario complesso come il nostro. La maggior parte di questi pianeti è stata scoperta per via indiretta, determinando come la loro presenza modifica il moto della stella madre; solo di pochi esiste un'osservazione diretta (come quella in figura 3, che mostra anche il disco circumstellare). Per ottenerla abbiamo dovuto attendere la costruzione di telescopi con specchi dal diametro della decina di metri, ed abbiamo dovuto attendere che venissero sviluppati metodi capaci di correggere gli effetti di distorsione delle immagini causate dalla microturbolenza atmosferica. Per avere dettagli più precisi, dobbiamo rifarci al nostro Sistema Solare.

Oltre ai pianeti, una delle componenti più interessanti, e più utili, è rappresentata dalle comete. Esse sono composte di ghiaccio, di biossido di carbonio, di metano, mescolati con polvere interstellare. Si sono formate all'epoca della condensazione della nube protosolare, e trascorrono la gran parte della loro vita in una nube sferica, la nube di Oort, che orbita intorno al Sole a grande distanza, 1-1.5 anni luce. Occasionalmente, in seguito ad interazioni gravitazionali, una cometa viene iniettata in un'orbita che la porta vicino al Sole, ed allora si rende visibile ai nostri occhi. In qualche caso, l'interazione gravitazionale con i pianeti la costringe su un'orbita di raggio relativamente piccolo, che la mantiene sempre vicino al Sole. Le comete, dunque, rappresentano la testimonianza più antica della nube protosolare, almeno per il tempo che hanno vissuto nella nube di Oort, e le osservazioni delle comete nelle nostre regioni del Sistema Solare ci danno informazioni direttamente su quella antica epoca, almeno al loro primo passaggio, quando ancora l'irraggiamento del Sole non ne ha modificato la costituzione. L'energia che assume dal Sole fa via via sublimare le componenti più volatili, che vanno a costituire la chioma e la coda della cometa. Naturalmente, il processo avvia una disgregazione della cometa: mancando il ghiaccio, anche le poveri inglobate si disperdono nello spazio interplanetario. Il viaggio nella zona più interna del Sistema Solare si fa pericoloso, perché le comete rischiano di cadere sul Sole, o su un pianeta: qualche anno fa arrivò sui giornali la notizia della spettacolare

caduta su Giove della cometa Shoemaker-Levi. Questi incontri catastrofici possono avere conseguenze inattese: si stima, infatti, che la maggior parte dell'acqua sulla Terra sia stata portata da comete nel corso della sua formazione. Dall'analisi dei crateri presenti sugli altri pianeti, si sa che la fase più intensa di bombardamento da parte di meteoriti e comete era cessata circa 3.8 miliardi di anni fa, quindi già allora acqua in abbondanza doveva essere presente sulla Terra. In quell'epoca, l'eneo Archeano, l'atmosfera terrestre era priva di ossigeno; ma già ad allora si fanno risalire i primi residui batterici trovati sulla Terra. Ed ecco dunque un'altra domanda: come nascono questi batteri? Come si sono formati, o come sono stati formati? A questo punto, cominciamo ad affrontare un terreno impervio, sul quale solo da pochi decenni si comincia ad intravedere un sentiero: una nuova sintesi di Astronomia e Biologia, l'Astrobiologia.

Torniamo alle grandi nubi molecolari cui si accennava più sopra. Tecniche di radioastronomia hanno consentito di identificare molecole che vanno dall'acqua al metano, all'acido acetico, al metanolo, fino ai fullereni, composti da 60 e più atomi, passando per la glicina, che è il più semplice dei 20 amminoacidi che si trovano comunemente nelle proteine. Nel 2004, il satellite artificiale Stardust (NASA) passò nella regione della chioma della cometa Wild 2, e raccolse in un gel campioni della polvere direttamente originata dalla cometa. In un successivo passaggio orbitale accanto alla Terra, Stardust sganciò una capsula contenente il gel, che planò al suolo attaccata ad un paracadute. L'analisi delle polveri della cometa Wild 2 rivelò la presenza di glicina a bordo della cometa. I grani di polvere hanno un ruolo importante nella formazione delle molecole complesse. I grani visti da vicino presentano una superficie complessa, ricca di cunicoli e asperità; per di più gli atomi che compongono questa superficie si muovono gli uni rispetto agli altri, con una velocità legata alla temperatura del grano stesso: la superficie non è statica, ma si deforma continuamente, come la superficie di un tamburo. Gli atomi nelle nubi molecolari possono venire catturati dai grani, possono muoversi, scossi come sono dalla superficie, e venire a contatto con altri atomi, e reagire con essi, se la chimica lo consente. Poi, le nuove molecole possono venire espulse dai grani, sempre a causa della agitazione termica. In questo modo si riesce a spiegare come si possano essere formate nello spazio interstellare le molecole composte da numerosi atomi che la radioastronomia ha scoperto (Cfr. Fig. 5). Queste molecole riescono a sopravvivere al processo di condensazione della nube protostellare, come ci ha dimostrato Stardust. Nel 1969 cadde un meteorite in Australia vicino

al villaggio di Murchison; si raccolsero circa 100 kg di frammenti, che all'analisi mostrarono oltre 100 amminoacidi, compresa la glicina. La presenza di un isotopo dell'azoto, raro in ambiente terrestre, confermava l'origine extraterrestre degli amminoacidi. Non è dunque irragionevole pensare che almeno i mattoni fondamentali delle proteine siano letteralmente caduti sulla Terra dal cielo. Ancora un punto interessante: le prime testimonianze di vita sulla Terra risalgono a circa 500 milioni di anni dopo la formazione del pianeta, e dopo la fine dei bombardamenti meteorici. In fondo a questa serie di fatti e di ragionamenti sta la panspermia, cioè l'ipotesi che gli stessi batteri (che sulla Terra riescono a sopravvivere in ambienti estremi) si siano formati nello spazio interstellare, e che poi abbiano inseminato i pianeti, germinando là dove le condizioni lo consentivano. Come, ad esempio sulla Terra.

In questo quadro, le comete potrebbero essere le “navicelle spaziali” che hanno portato con sé grani di polvere e batteri. La panspermia applica un interessante cambiamento di prospettiva: pianeti non come ambienti primari in cui la vita si è formata, ma al più come incubatori; forme viventi elementari come costituenti, anche se in quantità modesta, dello spazio interstellare. Il problema dell'origine della vita viene spostato ad altro luogo; se questo modo di impostare il problema sarà fecondo, lo diranno gli eventi futuri; per ora, senza entrare nei dettagli, possiamo limitarci a dire che il modello della panspermia non è autocontraddittorio, ma non è nemmeno esclusivo: come tutti i modelli, consente di interpretare alcuni dati osservativi, che però possono essere spiegati in modo altrettanto convincente dal punto di vista scientifico da altri modelli più tradizionali, in cui la componente vitale non ha un ruolo importante nell'evoluzione fisica dell'Universo.

Le prime tracce di vita sulla Terra risalgono dunque a qualche centinaio di milioni di anni dopo la formazione del nostro pianeta, una breve frazione rispetto al tempo trascorso da allora fino ad oggi. Gli stromatoliti sono le più antiche testimonianze di forme di vita sulla Terra: si tratta di strutture sedimentarie che si formano in acque poco profonde per intrappolamento da parte di alghe azzurre e batteri di particelle sedimentarie, e vengono costruite a strati sovrapposti; le più antiche si fanno risalire ad oltre 3.5 miliardi di anni fa. In quell'epoca la atmosfera terrestre aveva una composizione ben diversa da quella attuale; in particolare, l'ossigeno era in pratica assente. Si è dovuto aspettare un paio di miliardi di anni perché comparissero i primi eucarioti, cioè i primi esseri ancora monocellulari, in

cui però il nucleo è ben differenziato e protetto da una membrana, dotati di citoplasma, in cui sono presenti organuli specializzati delimitati da membrane. Le prime piante, pluricellulari, sono venute circa 580 milioni di anni fa, le trilobiti, circa 540 milioni di anni fa: cominciava la cosiddetta esplosione del Cambriano, il periodo che vede un impressionante arricchimento delle forme di vita sulla Terra. All'inizio si trattava di creature marine, che vivevano negli oceani. I primi vertebrati risalgono a circa 500 milioni di anni fa.

La storia della vita sulla Terra non è stata sempre felice: in almeno cinque occasioni si sono avute estinzioni di massa che in poco tempo hanno portato alla scomparsa anche del 90% delle specie allora viventi. La prima di questa serie si è verificata circa 440 milioni di anni fa. Ma la vita è molto forte, evidentemente è difficile sradicarla completamente: ad esempio, dopo quella prima estinzione di massa, le forme viventi hanno cominciato a colonizzare anche le terre emerse, a cominciare dalle piante, a cui sono seguiti i primi artropodi, e via via, fino alla specie umana, comparsa circa 2 milioni di anni fa. Va rimarcata la scala temporale: se la comparsa della vita sulla Terra è avvenuta ben presto dopo la formazione del pianeta, lentissima è stata la successiva evoluzione, che ha richiesto 3.5 miliardi di anni per arrivare fino alle specie oggi viventi; e 3.5 miliardi di anni sono una frazione non trascurabile dell'età dell'Universo. Due riflessioni: la prima, che non è difficile immaginare che in molti sistemi planetari la vita si sia formata; la seconda, che invece specie complesse possono essere molto più rare.

Dunque, sulla Terra la vita si è formata nel mare, e lì è rimasta confinata per la maggior parte della sua storia. Tirando le fila di questa trama di eventi, possiamo fissare i criteri che, sulla base della nostra esperienza, ci possono suggerire dove è più probabile trovare forme di vita al di fuori del Sistema Solare. Intanto, occorre un sistema planetario, che ruota intorno ad una stella che abbia una evoluzione propria abbastanza lenta, da consentire lo sviluppo degli eventi che abbiamo visto. Stelle molto più grandi del Sole vanno escluse, perché compiono il loro ciclo evolutivo addirittura in decine di milioni di anni soltanto. Poi, la stella deve essere abbastanza stabile nel corso del tempo, e deve essere abbastanza luminosa da consentire la presenza di acqua allo stato liquido (e non solo ghiaccio o vapore) su almeno qualcuno dei pianeti che ruotano intorno ad essa. Viene definita una "zona abitabile", cioè una fascia intorno ad una stella, non troppo vicina ad essa, in modo che l'eventuale acqua presente su un pianeta che orbita a quella distanza non venga vaporizzata dalla radiazione luminosa troppo intensa e troppo calda,

ma non troppo lontana, che il calore fornito dalla stella stessa non sia così limitato, da non consentire la fusione della maggior parte di ghiaccio. Nel Sistema Solare, la zona abitabile esclude Mercurio e Venere, troppo vicini al Sole, include la Terra, almeno per ora; e forse ha compreso Marte in un passato remoto, quando il Sole era un po' più vivace di ora. Dei 466 pianeti extrasolari fino ad ora trovati, nessuno rispetta i criteri citati. Bisogna dire che i metodi di osservazione di cui ora disponiamo selezionano i pianeti più grandi e più vicini alla loro stella, in modo che la loro influenza dinamica sulla stella sia più grande, e quindi più facilmente osservabile. Da qualche mese è stato lanciato da NASA un satellite artificiale, Keplero, proprio con lo scopo di cercare altri pianeti, con metodologie più sensibili di quelle in uso fino ad ora. Osserverà centomila stelle, ripetutamente, per quattro anni, per vedere se esse presentano una diminuzione periodica della luminosità che potrebbe essere dovuta all'ombra gettata da un pianeta sulla stella stessa tutte le volte che si frappone fra la stella e noi.

Per ora, la ricerca di pianeti extrasolari nella zona abitabile di una stella di tipo solare non ha dato risultati; e se anche ne troveremo, questo non vorrà dire che avremo trovato un'altra civiltà evoluta. Le distanze fra i sistemi planetari sembrano comunque troppo grandi per avviare scambi con altri esseri evoluti. Per ora gli unici visitatori di altri mondi siamo noi, che abbiamo messo piede sulla Luna alcuni decenni orsono, e che continuiamo a spedire satelliti artificiali nello spazio interplanetario (Cfr. Fig. 6).



## Carlo BRADASCHIA\*

### *La Nuova Astronomia con le Onde Gravitazionali*

#### **Cosa sono le onde gravitazionali e perché ci interessano?**

Per rispondere a queste domande faremo spesso riferimento all'esempio delle onde elettromagnetiche, che ben conosciamo e che presentano molte caratteristiche simili, ma anche profonde differenze.

Quasi un secolo fa Einstein, formulando la Relatività Generale aveva previsto l'esistenza delle onde gravitazionali; esse sono prodotte da corpi dotati di massa, che si muovono con moto accelerato e consistono in oscillazioni del campo gravitazionale, che si propagano alla velocità della luce. Ma Einstein aveva anche previsto che le OG non sarebbero mai state percepite, data la estrema debolezza dei loro effetti. Solo sull'ultima affermazione non concordiamo ed intendiamo smentire il vecchio Albert rivelando le OG.

È una storia molto simile ad un'altra di alcuni decenni prima, quando Maxwell, dalle equazioni dell'elettromagnetismo, che aveva appena sviluppato, aveva dedotto l'esistenza di "onde elettromagnetiche" (EM): oscillazioni dell'omonimo campo, prodotte dal moto accelerato delle sorgenti del campo stesso, cioè delle cariche elettriche. Ma le onde EM non hanno riservato misteri, molto rapidamente abbiamo capito come si manifestano, abbiamo imparato a produrle e ad usarle: un gran numero di attività della nostra vita di tutti i giorni richiede l'uso di onde EM. In particolare per le osservazioni astronomiche: la luce ci porta immagini visibili dell'Universo; nelle epoche più remote si osservava ad occhio nudo, poi col cannocchiale di Galileo, oggi coi moderni telescopi terrestri e spaziali. Né possiamo dimenticare le immagini del cosmo ottenute mediante microonde, raggi  $x$  e  $\gamma$ .

E le OG? Ci possono aiutare ad osservare l'universo? Certamente! E le aspettative sono grandissime. Avendo osservato il cielo, finora, mediante radiazioni EM (la luce delle stelle è dovuta al "moto" degli elettroni alla loro superficie incandescente), la possibilità di osservarlo mediante radiazioni di tutt'altra natura, dovute al fatto che i corpi celesti hanno una massa, può riservare sorprese assolute.

\* I.N.F.N. Sezione di Pisa

In particolare, se ci ricordiamo che esiste, nell'Universo, una larga maggioranza di materia, la "materia oscura", che non riusciamo a vedere, ma della cui presenza siamo certi, poiché ne osserviamo gli effetti gravitazionali sul moto delle stelle. Almeno una parte di queste masse, muovendosi con accelerazione, potrebbe emettere OG che, captate, ci potrebbero dare un'immagine di una parte sconosciuta dell'Universo.

Il problema è, quindi, trovare un modo per sentire le elusive OG. Per capire come si possa rivelare il passaggio di OG, ricorriamo ancora al paragone con le onde EM. In quest'ultimo caso, il campo EM oscillante che le costituisce fa muovere le cariche elettriche che incontra, per esempio, gli elettroni in un filo conduttore (un'antenna), genera una corrente e quindi un segnale elettrico misurabile. Per descrivere l'effetto delle OG è utile ricorrere alla rappresentazione di un campo gravitazionale introdotta dalla Relatività Generale: la presenza di massa (o di energia) deforma lo spazio-tempo, costringendo i corpi dotati di massa a muoversi lungo traiettorie curvilinee (un sasso lanciato in aria ricade sulla terra); nel linguaggio newtoniano avremmo parlato di campo gravitazionale. Le OG sono, dunque, increspature della trama dello spazio-tempo che si propagano alla velocità della luce; il loro effetto è di dilatare e comprimere lo spazio (e il tempo), quindi di allungare e accorciare alternativamente le distanze fra corpi liberi. Misurando continuamente tali distanze si può rivelare il passaggio di OG, testimoniato, appunto, da eventuali oscillazioni.

#### Massa e spazio-tempo

*L'intima connessione fra massa e spazio-tempo stabilita dalla Relatività Generale si può esprimere dicendo: "lo spazio-tempo dice alla massa come muoversi, la massa dice allo spazio come piegarsi e al tempo come scorrere".*

*Ancora una volta non è molto diverso da ciò che possiamo dire parlando di elettromagnetismo: "i campi elettrici e magnetici dicono alle cariche elettriche come muoversi, le cariche e il loro moto determinano la forma dei campi elettromagnetici".*

*La differenza è che le correnti elettriche, le onde radio, la luce, ci sono molto più familiari, le comprendiamo più facilmente, essendo delle entità esterne a noi; viceversa lo spazio-tempo è "l'ambiente" entro cui si svolge la nostra vita. Pensare che lo spazio e perfino il tempo siano deformabili, che non siano entità assolute, ci sorprende; che queste deformazioni*

*oscillino e si propaghino come onde, alla velocità della luce, ci sconcerata. Eppure abbiamo delle prove inoppugnabili. Il sistema di navigazione satellitare GPS funziona proprio perché Einstein ci ha spiegato che il tempo scorre più o meno velocemente secondo la prossimità della massa: le sorgenti radio sui satelliti del GPS, lontani dalla massa terrestre, sono tarate a frequenze nominalmente diverse, per correggere questo effetto.*

Le equazioni di Einstein ci danno qualche ulteriore dettaglio: lo spazio viene compresso e dilatato alternativamente nelle due direzioni perpendicolari alla direzione di propagazione delle OG. Lo spazio si comporta come un blocco di gelatina: le distanze fra i corpi che vi sono immersi variano di conseguenza (Cfr. Fig. 7).

Un interferometro alla Michelson (dal nome del fisico che lo utilizzò per investigare l'esistenza dell'etere) sembra essere lo strumento ideale per rivelare le onde gravitazionali. Un fascio di luce prodotto da un laser di grande stabilità viene diviso in due da uno specchio semitrasparente ed inviato in due direzioni perpendicolari fra loro (Cfr. Fig. 8). Ognuno dei due bracci è limitato all'estremo lontano da uno specchio totalmente riflettente; i due fasci ritornano sullo specchio semitrasparente, si dividono nuovamente, e arrivano sovrapposti su un fotodiodo che misura l'intensità della luce che riceve. A causa dell'interferenza fra i due fasci riflessi sovrapposti, un interferometro è estremamente sensibile alla differenza di cammino ottico fra i due bracci ed alle sue variazioni. In condizioni normali le lunghezze dei bracci sono regolate in modo che i due fasci di ritorno si sovrappongano con uno sfasamento di mezza lunghezza d'onda e, quindi, si annullino (interferenza distruttiva); il fotodiodo, non ricevendo luce, non darà segnale. È chiaro a questo punto che una deformazione dello spazio-tempo produrrà, in generale, una variazione delle lunghezze dei bracci e i due fasci di ritorno non saranno più stabilmente in opposizione di fase; di conseguenza, un po' di luce arriverà al fotodiodo, che darà un piccolo segnale elettrico oscillante. In particolare un'onda gravitazionale che arrivi in direzione perpendicolare al piano dell'interferometro produrrà deformazioni dello spazio di segno opposto sui due bracci, sfruttando al massimo la sensibilità dello strumento. Gli interferometri esistenti hanno bracci adagiati sul terreno con lunghezze fino a 4 km, al fine di massimizzare il valore assoluto delle variazioni di lunghezza prodotte dalle deformazioni dello spazio; la misura è estremamente difficile, poiché le variazioni attese sono, al massimo, di un milionesimo di milionesimo di micron.

Nella realtà esiste una grande quantità di disturbi che possono produrre falsi segnali, dovuti a spostamenti reali degli specchi, o a variazioni del cammino ottico o della fase dei due fasci di luce. Un gran numero di accorgimenti raffinatissimi devono essere utilizzati per ridurre ad un livello accettabile tutti questi “rumori”. La lotta per ridurre questi rumori e' la vera sfida da vincere per la rivelazione delle onde gravitazionali.

### **Tecnologie estreme**

Tutti gli interferometri attualmente esistenti fanno ricorso a tecnologie d'avanguardia o addirittura sviluppate ad hoc per contenere entro limiti accettabili i disturbi di varie origini che potrebbero generare falsi segnali o, in altre parole, rendere i segnali veri indistinguibili da una miriade di segnali spuri.

Un interferometro per la rivelazione di onde gravitazionali si presenta come una grande “L” distesa sulla pianura. I due bracci perpendicolari lunghi 3 km (nel caso del progetto italo-francese VIRGO, nei pressi di Cascina, in provincia di Pisa Cfr. Fig. 9), sono costituiti da due tubi di 1,2 m di diametro, in cui è necessario fare un vuoto tale da ridurre la pressione dei gas residui ad un milionesimo di milionesimo di atmosfera, per consentire ai fasci di luce di propagarsi indisturbati su tali distanze (Cfr. Fig.10). Con un volume di circa 7000 m<sup>3</sup>, i tubi dei bracci di VIRGO sono il secondo più grande sistema da “ultra-alto-vuoto” del mondo, dopo quello dell'analogo progetto LIGO (USA). I tubi devono essere perfettamente rettilinei, compensando anche la curvatura terrestre che, su 3 km, dà una freccia di circa 20 cm (il campo gravitazionale terrestre è di gran lunga troppo debole per far curvare apprezzabilmente un fascio di luce!).

Il laser ha una stabilità eccezionale: la sua frequenza ( $3 \times 10^{14}$  Hz) varia, in un centesimo di secondo, di meno di un milionesimo di Hz.

Gli specchi devono avere una qualità estrema sia per riflettività che per rugosità residua (Cfr. Fig. 11). Per ottenere delle superfici con asperità non maggiori di qualche centesimo di micron sono state messe a punto apparecchiature e metodologie di misura uniche al mondo. Per la deposizione sotto vuoto degli strati superficiali a riflettività controllata è stato costruito un complesso impianto nel laboratorio di Lione.

Gli specchi che costituiscono l'interferometro non possono essere connessi

rigidamente al suolo, a causa delle vibrazioni sismiche sempre presenti, anche se non percettibili dai nostri sensi. Sono state create delle sospensioni antisismiche estremamente sofisticate, i “superattenuatori”, che attenuano di oltre mille miliardi di volte le vibrazioni sismiche, prima che arrivino agli specchi. Le oscillazioni residue delle superfici degli specchi sono, così, solamente quelle minuscole dovute all’agitazione termica degli atomi che costituiscono gli specchi stessi ed i fili a cui essi sono sospesi.

Per mantenere allineati tutti gli specchi dell’interferometro al livello di frazioni di micron, come richiesto, è necessario un complesso sistema di circuiti di controllo digitali, associati a sensori ed attuatori di estrema precisione.

Queste tecnologie, sviluppate autonomamente da VIRGO, o in collaborazione con numerose industrie, costituiscono un patrimonio di importanti conoscenze, potenzialmente utili anche al di fuori del mondo della ricerca.

Come aveva già riconosciuto Einstein, le onde gravitazionali hanno effetti così deboli, che non si ritiene che possano mai essere direttamente utilizzate per scopi pratici.

Nella ricerca fondamentale è sempre stato così: nessuno sa dove porterà e quali conseguenze e sviluppi potrà avere. Mezzo secolo fa, il laser è stato inventato nel tentativo di costruire un’apparecchiatura funzionante secondo i fondamenti della meccanica quantistica, senza immaginare che, in futuro, sarebbe stato utilizzato in chirurgia oftalmica, per leggere i prezzi nei supermercati, per stampare i giornali o come sorgente di luce per VIRGO.

## **Il Progetto VIRGO**

VIRGO è frutto della collaborazione nata da quasi due decenni, tra l’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN - laboratori di Firenze/Urbino, Frascati, Napoli, Perugia, Pisa, Roma I), e il Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS - laboratori di Annecy, Lyon, Orsay, Nice, Paris). La realizzazione del progetto è costata circa 80 milioni di Euro e richiede, nel solo laboratorio di Cascina, il lavoro di più di 50 persone fra ricercatori e tecnici addetti, mentre circa duecento persone sono attualmente coinvolte nei laboratori di ricerca italiani e francesi, sia per studiare in modo remoto il funzionamento dell’interferometro, sia per preparare e gestire i complessi programmi di analisi per i dati che vengono

raccolti. Da alcuni anni si sono aggiunti altri gruppi di ricerca da Amsterdam, Budapest e Varsavia.

La costruzione di VIRGO, iniziata nel 1997, è terminata nel 2003. Da allora è in corso una intensa attività di messa a punto dell'interferometro, alternata con periodi di raccolta dati e di "noise hunting": la caccia ai rumori che con la loro presenza mascherano gli eventuali segnali di OG. Nei periodi di raccolta dati, per un totale ad oggi di circa dodici mesi, VIRGO rimane in funzione giorno e notte raccogliendo tutti i segnali provenienti dall'Universo. Lavorando in collaborazione con i due interferometri del progetto statunitense LIGO, i dati vengono scambiati reciprocamente in tempo reale e analizzati in modo coerente su entrambe le sponde dell'Atlantico. L'utilizzo dei dati di tre interferometri permette di rigettare con altissima efficienza i segnali spuri, mentre dalla differenza di tempo d'arrivo delle OG sui diversi strumenti sarà possibile ricostruire la posizione nel cielo della sorgente.

Il nome VIRGO nasce dall'ambizione di riuscire a captare le OG emesse in eventi di Supernova avvenuti nell'ammasso di galassie della costellazione della Vergine (Virgo), che dista diverse decine di milioni di anni-luce dalla terra. In un ammasso di alcune migliaia di galassie si possono prevedere una decina di questi collassi gravitazionali all'anno.

La sensibilità attuale di Virgo non ci consente di raggiungere questo scopo, anche se la probabilità attuale di captare un segnale non è trascurabile: è dell'ordine del 5% in 12 mesi di osservazione continua. Per raggiungere il nostro scopo ed onorare il nome del progetto abbiamo preparato un programma di miglioramenti della strumentazione, coordinati con i colleghi americani, che dovrebbero aumentare la sensibilità di VIRGO e di LIGO di circa 10 volte entro il 2015. Con la capacità di osservare alcune decine di genuini eventi di OG all'anno, nascerà l'**astronomia gravitazionale**. Sarà finalmente possibile verificare alcune importanti predizioni della Relatività Generale, inaugurare un nuovo filone dell'astronomia e forse anche scoprire nuovi fenomeni del tutto non previsti.

## L'astronomia gravitazionale

Ogni volta che si è iniziato ad utilizzare un nuovo mezzo di osservazione astronomica, la nostra conoscenza del cosmo è stata rivoluzionata (il cannocchiale,

la radioastronomia, i telescopi satellitari, ecc.). Anche dall'astronomia gravitazionale l'attesa è grande. Non dobbiamo dimenticare che la materia "visibile" mediante radiazioni elettromagnetiche costituisce solo una piccola frazione della massa dell'Universo e che la radiazione gravitazionale è emessa dai corpi proprio perché dotati di massa.

Una gran parte del volume dell'Universo non è visibile poiché schermata da stelle e polveri opache alle onde elettromagnetiche. Così non è per le onde gravitazionali, che sono in grado di attraversare enormi quantità di materia e, quindi, anche di portarci preziose informazioni da zone nascoste dell'Universo o dall'interno densissimo di un collasso gravitazionale (supernova), o da altre situazioni fisiche in cui la deformazione dello spazio-tempo è estrema e enormi quantità di materia si muovono a velocità prossime a quella della luce (buchi neri, pulsar, stelle binarie coalescenti).

Oltre alle onde gravitazionali emesse da queste sorgenti e, forse, da quelle che non sappiamo nemmeno immaginare, c'è il fondo cosmologico, cioè quella radiazione gravitazionale che è stata emessa copiosamente durante il Big Bang e che ci aspettiamo che ancora oggi pervada tutto l'Universo. E' l'analogo gravitazionale del fondo cosmologico elettromagnetico (microonde), scoperto intorno al 1960. Questo studio ci ha portato informazioni su com'era l'Universo poche centinaia di migliaia di anni dopo l'esplosione primordiale e ci permette di fare importanti ipotesi sulla evoluzione del cosmo. Il fondo cosmologico gravitazionale ci porterebbe informazioni risalenti a una minuscola frazione di secondo dopo il Big Bang e sarebbe un complemento di informazione fondamentale. Purtroppo per rivelarlo dovremo aspettare la prossima generazione di interferometri, con sensibilità assai più elevata.

In ogni caso i risultati scientifici che prevediamo dai rivelatori attuali e quelli che non possiamo prevedere, ma che sicuramente ci sorprenderanno, costituiscono un patrimonio di conoscenze a cui non vogliamo assolutamente rinunciare.



## Baldassarre CAPORALI\*

### *Filosofia e scienza nell'età moderna*

#### 1. Le ragioni di una critica fenomenologica delle scienze naturali

La filosofia antica incontrava la scienza alla stessa latitudine della verità; pertanto, la purificazione dell'oggetto della conoscenza, in una incessante oscillazione tra fenomeno e modello, tra movimento e idealità, tra materia e forma, costituiva il suo impegno sempre rinnovato, il suo assillo. La scienza, in questo contesto, doveva ricavare il suo statuto dalla verità. L'*alétheia* indicava la via all'*epistème*, la fondava. Così una teoria della conoscenza, che ha bisogno dell'auto-riferimento, o dell'auto-riflessione, e non può riconoscersi solo indirettamente, grazie alle qualità cognitive del proprio oggetto, non poté nascere. La filosofia moderna, al contrario, ha trovato il suo perno proprio nell'auto-riflessione e, da Cartesio a Kant, proiettandosi o ritornando sui tanti problemi aperti dalla Rivoluzione Scientifica, ha raddoppiato il copernicanesimo astronomico in un copernicanesimo antropologico, o *trascendentale*. La teoria della conoscenza (*Erkenntnistheorie*), come specialità filosofica tipicamente moderna, è nata in questo passaggio, ed è nata dal ripiegamento del pensiero filosofico – riflessivo e fondativo ad un tempo - su una scienza della natura sempre più articolata e produttiva di effetti (dall'astronomia alla fisica, dalla biologia alla chimica) e, soprattutto, sempre più influente sull'opinione pubblica colta, come testimoniano gli echi delle dispute fra cartesiani e newtoniani, le sale di lettura del XVIII secolo, le sperimentazioni filantropiche di nuove tecnologie agricole, le invenzioni della prima rivoluzione industriale, il diffondersi di nuove istituzioni culturali, i cambiamenti dei costumi e perfino dello Stato. Scienza e teoria della conoscenza non coincidevano, ma la loro dualità era feconda. Poi, dall'Ottocento al Novecento, la scienza ha occupato il campo della teoria della conoscenza, o, per meglio dire, la teoria della conoscenza non ha potuto più giustificare il proprio compito, e, nel Novecento, è divenuta *teoria della scienza*. Da una tale situazione

\* Studioso e docente di Filosofia nel Liceo "Città di Piero" di Sansepolcro

emerge una questione di grande rilievo. Questa questione concerne l'intreccio multilaterale di atteggiamenti critici e dogmatici, illuministici e ideologici che il sapere scientifico sviluppa e consolida, un intreccio che la teoria della conoscenza, modellatasi sull'ideale della *critica della ragione*, prometteva di districare, insieme, naturalmente, ai propri non riconosciuti malintesi. Dove cercare, e come svolgere, in una tale situazione, una critica salvatrice, una critica che enuclei, recuperi e impieghi il "potenziale emancipativo" (Habermas) delle scienze moderne, scoprendone, al tempo stesso, le cecità metodologiche, le reticenze esplicative e gli abiti ap problematici? E' da questa domanda che conviene muovere.

Lo sviluppo moderno delle scienze ha conosciuto diramazioni tematiche e metodologiche tanto varie da rendere insicura, per non dire insidiosa, ogni spiegazione genealogica troppo vincolata alla, pur innegabile, rilevanza della fisica matematica. Eppure, insieme al problema del rapporto corpo-mente ed alla messa a punto del principio epistemologico dell'evoluzione nella biologia, la *matematizzazione della natura e del movimento*, condotta in direzione di una meccanica delle grandezze opposta alla meccanica qualitativa delle sostanze di Aristotele, costituisce uno dei punti di svolta del pensiero scientifico moderno. La matematica, a partire dalla fisica di Galileo, arma la teoria, sottrae le ipotesi al condizionamento dell'esperienza, delinea un mondo di relazioni e di fenomeni lontano dal mondo delle osservazioni comuni: "Galileo, il grande difensore del << sistema del mondo >> copernicano rese omaggio ad Aristarco e a Copernico, proprio perché furono abbastanza arditi da produrre teorie speculative che vanno oltre, e addirittura contraddicono, tutto ciò che crediamo di sapere dall'osservazione"<sup>1</sup>. Agli scivolamenti dogmatici dell'osservazione, qui tirati in ballo da Popper con un intento polemico nei confronti dell'empirismo, potrebbe comunque sostituirsi una sfuggente correlazione fra il ragionamento matematico e il senso comune, e in una tale correlazione la matematica non sarebbe più una fonte di capovolgimenti nell'orientamento quotidiano verso il mondo. Il filosofo americano Peirce, riferendosi ad un'opinione diffusa tra i fisici a proposito delle formulazioni galileiane sul moto, nota che Galileo "fa principalmente appello" al "senso comune" e al "lume naturale", e che si lascia sempre guidare dalla certezza

---

<sup>1</sup> K. R. POPPER, *Problemi, scopi e responsabilità della scienza*, in K. R. POPPER, *Scienza e filosofia*, trad. it., Einaudi, Torino, 1991, pag. 126.

che “la teoria vera sarà sempre una teoria semplice e naturale”, cosicché, “noi possiamo vedere la ragione per cui in dinamica dovrebbe essere veramente così”, basta soltanto pensare che “un corpo abbandonato alla sua inerzia” si muove in linea retta perché “la linea retta ci appare come la più semplice delle curve”<sup>2</sup>. Qui, il principio di semplicità, che attraversa tutta la Rivoluzione Scientifica fino alle *regulae philosophandi* di Newton, e che Copernico, Galileo e Newton hanno strappato alla logica nominalistica, dalla quale proveniva, proprio attraverso un realismo, di ascendenza pitagorica e platonica, della matematica, proietta il senso comune, come *lume naturale*, nell’universo della scienza. Allora emerge netta una questione, la questione della convergenza della matematica con uno stile di pensiero che, a seconda dei casi e dei metodi (o delle teorie della scienza), appare *in rotta o in armonia* con un modo di pensare comune, prescientifico, certamente, ma ben radicato in criteri logici saldi e collaudati. Anche se il problema consiste in una tale opposizione è tuttavia *il significato* del problema - ossia la sua configurazione a partire dalle conseguenze intellettuali della matematizzazione della natura - ad investire l’epistemologia del Novecento, per la quale il processo formativo della nuova fisica e della nuova meccanica è inseparabile da atteggiamenti di ricerca e da domande conoscitive non più derivabili dal contesto di idee dell’astronomia tolemaica e, soprattutto, dalla fisica aristotelica (già scossa, nel XVI secolo, dalla cinetica nominalistica dell’*impetus*). Se questa svolta può essere considerata, almeno in alcuni suoi importanti aspetti, come un mutamento di “paradigma”, secondo la famosa teoria di Thomas Kuhn, il complesso pragmatico e linguistico più influente del nuovo paradigma scientifico - un complesso destinato a condizionare le tecniche e i problemi, la logica e gli esperimenti dell’indagine scientifica moderna, e destinato a condizionarli in tutte le fasi del suo sviluppo e della sua normalità istituzionale<sup>3</sup> - è senz’altro costituito dalla traduzione di *stati di cose materiali e qualitativi* in *rapporti di misura spaziali*, in variabili ideali calcolabili sulla base di procedimenti geometrico-matematici. Nella teoria kuhniana dei paradigmi scientifici il paradigma indica un campo mutevole di relazioni, le molte linee intersecate di problemi comuni, le sedimentazioni di pratiche, di operazioni

<sup>2</sup> C. S. PEIRCE, *L’architettura delle teorie*, in C. S. Peirce, *Scritti di filosofia*, trad. it., Cappelli, Bologna, 1978, pag. 182.

<sup>3</sup> Cfr. T. KUHN, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, trad. it., Einaudi, Torino, 1978, pagg. 43-64.

logiche e di forme di comunicazione fra gli scienziati; indica, in fondo, la formazione di una tradizione di ricerca (la scienza normale quale sbocco delle rivoluzioni scientifiche), nella quale l'attività individuale di scoperta viene indirizzata, controllata e socializzata da regole intellettuali inavvertibili e indirette, da regole emergenti soltanto negli intrecci di ipotesi e di prove, da una sorta di senso comune della comunità scientifica. Per delinearne il carattere di tale paradigma Kuhn si richiama ai "giochi linguistici" di Wittgenstein, e cioè ad una mobilitazione controllata dei contesti d'uso di termini e di procedure. In tal modo i paradigmi appaiono – non senza qualche analogia con l'epistemologia strutturalista – come strutture sfuggenti e multilaterali, dislocate e profonde, irriducibili a regole determinate: "Il fatto che gli scienziati di solito non si chiedono, o non discutono, che cosa renda legittimo un particolare problema o una particolare soluzione ci induce a supporre che, almeno intuitivamente, essi conoscano la risposta. Ma si può anche semplicemente indicare che né la domanda né la risposta sono considerate rilevanti per la loro ricerca. I paradigmi possono essere anteriori, più vincolanti e più completi di ogni insieme di regole di ricerca che si possa inequivocabilmente astrarre da essi"<sup>4</sup>. Il *contesto di significazione* nel quale la matematica e il senso comune tendono a convertirsi l'una nell'altro diviene così riconoscibile. È in questo contesto che alcune importanti *esigenze fondazionali* della critica della conoscenza possono essere introdotte nella teoria della scienza.

Nella fase più avanzata dello sviluppo della fenomenologia, Husserl ha riunito in un'unica impresa filosofica la critica della scienza e il ripensamento (una sorta di *critica della critica*) delle fonti trascendentali della conoscenza. In questa prospettiva le scienze moderne, e in modo particolare ed esemplare le scienze matematiche della natura, sono apparse come l'indicatore storico e intellettuale di una curva del razionalismo occidentale verso un sapere disimpegnato nei confronti della *propria genesi di senso*, non più attirato, come avveniva nel razionalismo greco, in un sforzo auto-esplicativo concernente formulazioni, passaggi e forme logiche, verso un sapere, quindi, incapace di scavalcare i termini e le relazioni già istituiti per ricercare la loro provenienza prescientifica, indagando, per questa via, i prestiti fra il senso comune matematico e il senso comune del

---

<sup>4</sup> *Ibidem*, pag. 68.

mondo-della-vita (*Lebenswelt*). La critica di Husserl si appunta, così, sul misconoscimento galileiano della pratica del misurare e del calcolare celata al fondo delle idealizzazioni geometrico-matematiche<sup>5</sup>. Nell'*ordine formale* della scienza moderna lo stile intellettuale della misurazione si stacca completamente dall'orizzonte del mondo-della-vita, nel quale il sapere si esauriva e si rianimava nei fini pratici, e, in questo distacco, le grandezze e le idealità della fisica matematica promuovono un passaggio, storicamente decisivo, ad un procedimento di misurazione non soltanto più esatto, ma addirittura capace di conferire all'*esattezza* il carattere di un'*approssimazione all'infinito*, di un compito conoscitivo assolutamente nuovo. Husserl lo presenta in questo modo: "in virtù del riferimento del mondo alla matematica pura, in virtù del fatto che esso è il suo campo di applicazione, il <<sempre di nuovo>> assume il senso matematico di <<*in infinitum*>>; così *ogni* misurazione assume il senso di un'approssimazione a un polo ideale-identico anche se irraggiungibile, cioè a un'idealità determinata tra le idealità matematiche, oppure alla corrispondente configurazione numerica"<sup>6</sup>. Una volta compiuto il salto metodologico di Galileo - osserva Husserl - la progressione verso un linguaggio universale matematico delle scienze naturali fu uno svolgimento coerente, fino alla *mathesis universalis* di Leibniz, che avviò l'introduzione di modelli algebrici nella logica formale: "Leibniz intravide per primo, in anticipo sul suo tempo, l'idea universale e in sé conclusa di un pensiero algebrico estremo, di una <<*mathesis universalis*>>, come egli la chiamò e la pose come un compito per il futuro; ma soltanto nel nostro tempo si è giunti perlomeno a prospetterne un'elaborazione sistematica"<sup>7</sup>. Ma dove prende corpo, entro le linee della ricerca storico-genetica di Husserl, una critica fondazionale delle scienze moderne? Perché in esse, nel loro sviluppo epocale, considerato attentamente da Husserl, il razionalismo occidentale smarrisce i suoi problemi e i suoi fini? Su questa linea, la critica di Husserl alle "scienze europee" investe il disinteresse metodologico per i *presupposti di senso* delle operazioni astrattive da esse intraprese e perfezionate, per astrazioni conseguite sulla base di trasposizioni matematiche di stati di cose

---

<sup>5</sup> Cfr. E. HUSSERL, *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, trad. it., Il Saggiatore, Milano, 1993, pagg. 67-69.

<sup>6</sup> *Ibidem*, pag. 70.

<sup>7</sup> *Ibidem*, pag. 74.

qualitativi. La razionalità scientifica non è priva di presupposti, e il riferimento ad un *mondo-della-vita prescientifico* ha il compito di fornire uno strato ontologico-trascendentale di senso comune per *interrogare* i saperi quotidiani che tracciano il cammino delle scienze della natura. La Fenomenologia rinnova la critica della conoscenza guardando alla teoria della scienza.

Le teorie epistemologiche che, fra Ottocento e Novecento, hanno ricercato i contesti relazionali e orientativi della razionalità scientifica in direzione di esigenze conoscitive e di atteggiamenti mentali rimossi dalle specifiche impostazioni di ricerca - soprattutto quando le "ipotesi" sono state riferite ad un complesso di principi già costituito da una tradizione, come nel "Convenzionalismo", o quando sono state ridotte ad abbreviazioni logico-matematiche di fondamentali processi di indagine, come nel *rinnovato* "Strumentalismo" di Mach - si sono spesso impegnate nell'impresa dell'allargamento dell'orizzonte tematico, sociale e linguistico della scienza, un impegno che, agli inizi del pensiero scientifico, grazie a Bacone, a Galileo e a Cartesio, era stato indirettamente assolto dalla riflessione sul metodo. La Fenomenologia non è stata, nella formulazione critica dei problemi delle scienze naturali, un orientamento isolato, poiché anche il Pragmatismo americano, le post-wittgensteiniane filosofie analitiche del linguaggio ordinario, e perfino posizioni originali emerse in seno al marxismo<sup>8</sup> - per quanto lontanissimi dal progetto husserliano di una comprensione radicale della crisi della modernità, crisi profilata dallo smarrimento *scientifico* del *logos* greco - hanno scavalcato i limiti di un pensiero scientifico sciolto da ogni rapporto auto-giustificativo con la genesi pratico-sociale, comunicativa, culturale o logico-esistenziale (riconducibile, per esempio, al *conflitto fra certezza e dubbio*) dei propri modelli cognitivi. Ma a questa ricomparsa post-idealistica della *critica della ragione conoscitiva* come *critica della ragione scientifica*, nella quale il soggetto trascendentale legislatore cede il passo a tipologie eterogenee di intersoggettività, più o meno investite di uno statuto trascendentale e più o meno influenti nello sviluppo dei caratteri peculiari della comunità scientifica, si contrappone l'immagine neopositivistica della scienza. Questa immagine, per quanto imperniata anch'essa sulla riqualificazione del linguaggio come portatore di criteri di significato indispensabili alla scienza, appare

---

<sup>8</sup> Cfr. G. LUKÁCS, *Estetica*, trad. it., Einaudi, Torino, 1975, pagg. 3-104.

contemporaneamente rivolta ad inserire tutte le scienze – non soltanto le scienze naturali, ma anche le scienze umane e sociali – in una scala di dispositivi proposizionali di controllo degli asserti, proiettandosi così su un ideale scientifico completamente autarchico, talmente autarchico da divenire il modello di una epistemologia che interdice, quale *espressione metafisica priva di senso*, ogni pretesa esplicativa irriducibile a “*protocolli*” di verifica. La riduzione di tutte le forme del discorso - dalla dimostrazione indiretta all'accertamento genetico dei modi di validità, dalla componente immaginativa delle ipotesi alla riflessione dialettica sulla contraddittorietà situazionale di stati di cose - ad asserti elementari di tipo empirico è il compito metodologico dell'analisi positivista, e tutto ciò che resiste a questa messa a punto di protocolli viene squalificato come metafisico. “Risulta chiaro [...] che esiste un confine preciso fra due tipi di asserzioni. All'uno appartengono gli asserti formulati dalla scienza empirica: il loro senso si può stabilire mediante l'analisi logica; più esattamente, col ridurli ad asserzioni elementari sui dati sensibili. Gli altri asserti [...] si rivelano affatto privi di significato [...]. Spesso è possibile reinterpretarli quali asserti empirici; allora, però, essi perdono il proprio contenuto emotivo, che in genere è basilare per lo stesso metafisico. Il metafisico e il teologo credono, a torto, di asserire qualcosa, di rappresentare stati di fatto, mediante le loro proposizioni. Viceversa, l'analisi mostra che simili proposizioni non dicono nulla, esprimendo solo atteggiamenti emotivi”<sup>9</sup>. Sotto il titolo di metafisica, i neopositivisti del *Wiener Kreis* riconducono la tradizione filosofica, compresa buona parte della filosofia della scienza e l'*Erkenntnistheorie*, a fantasie pseudo-teoriche e a gusti soggettivi, mescolandola con la teologia, e trasferendo all'arte le esigenze umane e intellettuali sulle quali essa poggia. La ricerca di un *criterio di demarcazione* fra scienza e metafisica anima il dibattito epistemologico novecentesco, dopo aver preso il largo già con Kant; ma sono stati il primo Wittgenstein e i neopositivisti a vietare il ritorno autoriflessivo della conoscenza scientifica sulle sue basi extrascientifiche, ed a respingere, con questo ritorno, ogni diritto della “teoria”. Il *Tractatus* di Wittgenstein le toglie le radici *critiche* rendendo insensata, attraverso le regole di una *organizzazione proposizionale della formulabilità logica* dei fatti del mondo, la

<sup>9</sup> H. HAHN, O. NEURATH, R. CARNAP, *La concezione scientifica del mondo*, trad. it., Laterza, Bari, 1979, pag. 76.

*scepsi* filosofica: “Lo scetticismo è *non* inconfutabile, ma apertamente insensato, se vuol mettere in dubbio ove non si può domandare. Ché dubbio può sussistere solo ove sussista una domanda, solo ove sussista una risposta; risposta, solo ove qualcosa *possa* essere detto”<sup>10</sup>. Domanda e risposta cessano di intrecciarsi in un processo di ricerca, come nei dialoghi platonici o nelle Meditazioni di Cartesio, per ridursi a termini statici di complessi proposizionali. Eppure il dubbio – non soltanto quello, iperbolico, di Cartesio - si installa negli snodi principali dell'indagine scientifica e, spesso, vi si introduce proprio per ricollocare la scienza nelle attitudini, nei rapporti di vita e negli strati di sapere che, al tempo stesso, ne giustificano e ne contestano le pretese di validità. Nel pensiero pragmatistico di Peirce il tipo di credenza in cui sfocia la scienza, una credenza che appare tanto più solida quanto più suggerisce nuove fondazioni, si basa su un rinascente stato di dubbio, su un'irritazione intellettuale che orienta la ricerca: “L'irritazione del dubbio è il solo motivo immediato della lotta per ottenere la credenza. Per noi è certamente la cosa migliore che le nostre credenze siano tali da poter veramente guidare le nostre azioni in modo da soddisfare i nostri desideri; e questa riflessione ci farà rifiutare ogni credenza che non sembri essersi formata in modo da assicurare questo risultato. Ma la riflessione farà questo solo creando un dubbio al posto di quella credenza”<sup>11</sup>. Il dubbio, in Cartesio, nella Fenomenologia e nel Pragmatismo, non ricalca le orme dello scetticismo classico e si incorpora nella scienza come impegno auto-giustificativo mai completamente assolto e sempre risorgente. Husserl ha scorto i piani epistemologici (e, naturalmente, ontologico-trascendentali) di questo impegno: “Ciò che realizza la massima formazione di senso e la validità d'essere dell'a-priori matematico, come di qualsiasi altro a-priori obiettivo, è un'operazione idealizzante fondata sull'a-priori del mondo-della-vita”<sup>12</sup>. Il neopositivismo, legato ad una teoria criteriologica del significato, ha voltato le spalle a questi allargamenti, differenziazioni e riprese del senso.

L'immagine neopositivistica della conoscenza scientifica ha contribuito in modo decisivo a imprimere nell'immagine pubblica della scienza i due caratteri, le due note qualificative, che più la rendono riconoscibile nel nostro tempo, due

<sup>10</sup> L. WITTGENSTEIN, *Tractatus logico-philosophicus*, 6. 51., Einaudi Torino 1989.

<sup>11</sup> C. S. PEIRCE, *Il fissarsi della credenza*, in C. S. PEIRCE, *Scritti di filosofia*, op. cit., pag. 142.

<sup>12</sup> E. HUSSERL, *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, op. cit., pag. 168.

caratteri, la *convertibilità della logica e della matematica* e la *funzione convalidante delle proposizioni empiriche*, che sembrano esaurirne i compiti ed il pensiero. Gli scienziati, per quanto non si siano mai fatti indirizzare da teorie (anche se vi hanno spesso contribuito), non hanno contestato questa visione largamente influente della ricerca scientifica. Nel suo orizzonte tutte le scienze naturali hanno pagato un prezzo al primato della fisica matematica. Per questo la questione, sollevata da Husserl, della mancanza, nelle comunità di ricerca, di un interesse per l'esplicazione genetica delle basi e delle operazioni costitutive delle idealità matematiche, nelle *ridefinizioni di validità* che hanno segnato il passaggio dalle pratiche quotidiane del misurare al processo interminabile dell'esattezza, fornisce un indicatore prezioso per una critica salvatrice della scienza. Il compito principale di una tale critica è quello di mostrare la razionalità emancipatrice di alcune tipologie di argomentazione del pensiero scientifico.

## 2. Il fallibilismo e l'ideale critico post-kantiano

Il più tenace e influente problema critico della filosofia della scienza, il problema che ha messo in moto la filosofia critica di Kant, conferendole il suo carattere peculiare, è quello dei *confini fra la scienza e la metafisica*. Già in Kant, questi confini, che proteggono la *ragione teoretica* dall'illusione trascendentale, separano e collegano al tempo stesso, rendono decisive distinzioni degli usi e assegnazioni di facoltà, legittimano pretese di validità e di veracità, articolano fini e funzioni, e assolvono compiti tanto numerosi e delicati in quanto tutta la compagine ontologica della ragione (*Vernunft*) viene da essi ordinata, fino alla rinegoziazione di competenze e destinazioni nel contesto, complementare, della *ragione pratica*. Così, all'inizio dell'*Erkenntnistheorie*, la conoscenza scientifica della natura - la cui possibilità gnoseologica converge, per Kant, con quella dei giudizi sintetici a-priori, ingranati su esperienza e intelletto (*Verstand*), mentre disdice ogni influenza *costitutiva* dalla ragione, in quanto questa si ritira nella sfera dell'incondizionato, delle idee *regolative*, lascia dietro di sé, quale ineliminabile eredità dialettica, la questione, sfuggente e controversa, dell'individuazione del limite (*Grenze*) fra due fondamentali campi del sapere - i *concetti* dell'intelletto e le *idee* della ragione -, ed è in tale questione che successivamente prenderà corpo la contesa fra scienza e metafisica. La dialettica

trascendentale kantiana risolve la contesa attraverso l'ideale critico di una metafisica come scienza, ossia, di una scienza del limite della scienza: "La metafisica [...] nei tentativi dialettici della ragione ci conduce a dei veri limiti: e le idee trascendentali, appunto perciò che non si può fare di esse a meno, mentre pure noi non possiamo mai realizzarle in concreto, servono a indicarci non solo i limiti dell'uso della ragion pura, ma anche il modo di determinarli"<sup>13</sup>. La limitazione (*Begrenzung*) perde ogni carattere privativo, e non è neppure assimilabile ad una fuga nell'indeterminato, ma possiede tutti i requisiti di un criterio riflessivo di validità: "La limitazione del campo dell'esperienza per via di qualche cosa, che rimane sotto ogni altro rispetto ignoto, è pure una conoscenza che rimane alla ragione da questo punto di vista; per la quale essa non rimane chiusa entro il campo del sensibile e nemmeno può vagare fuori di esso, ma, come si conviene alla conoscenza d'un limite, si restringe al rapporto di ciò che è fuori con ciò che è dentro il limite stesso"<sup>14</sup>. Se, a partire da Kant, la crisi della metafisica è entrata in un processo di decantazione dagli esiti disparati - con uno snodo intermedio (Nietzsche) in cui l'approfondimento della crisi lasciava scorgere le consonanze fra *scepsi* e *scienze sperimentali* -, questa influenza decisiva esercitata dalla svolta kantiana è dipesa proprio dai compiti teorici da essa suggeriti attraverso una ricostituzione scientifica (e, quindi, critica) della metafisica, compiti che dovevano condurre ad una sempre più marcata esigenza di ripartizione di conoscenze, di operazioni logiche, di strutture linguistiche e di campi di significato fra stili d'indagine, di volta in volta, integrabili o esclusivi. Le scienze moderne e la metafisica hanno così formato una *dualità* di cui la filosofia della scienza, soprattutto nel Novecento, ha dovuto ampiamente occuparsi. Il Neopositivismo se ne è occupato in modo cogente, ma con il proposito di proscrivere la metafisica, incapace di soddisfare le condizioni protocollabili della significanza linguistica delle scienze empiriche. Le epistemologie fallibiliste hanno invece originalmente rielaborato il programma kantiano.

Quando viene chiamato in causa il fallibilismo, Popper è subito trascinato sulla scena. L'epistemologia fallibilista non si esaurisce certamente in lui, e le anticipazioni e i fiancheggiamenti pragmatistici di questa teoria della scienza

<sup>13</sup> I. KANT, *Prolegomeni ad ogni metafisica futura che vorrà presentarsi come scienza*, tra. It., Rusconi, Milano, 1995, pag. 223.

<sup>14</sup> *Ibidem*, pag. 237.

sono altrettanto importanti delle contestazioni post-popperiane di Popper, da parte di Kuhn, di Lakatos e di Feyerabend; ma, in relazione all'oscillazione dei ruoli fra scienza e metafisica, è in Popper che si trova l'elaborazione teorica originale, un'elaborazione che ha restituito la scienza all'orizzonte storico e culturale delle forme del sapere umano. Nell'epistemologia popperiana il *criterio di demarcazione* fra scienza e metafisica viene strappato all'opposizione fra asserti dotati di significato ed asserti privi di significato, al punto che, attraverso il passaggio dal metodo neopositivistico della *verificazione* al metodo della *discussione critica* delineato da Popper, la distorsione di una demarcazione così riduttiva ed escludente da fare della metafisica uno pseudo-problema, diviene, *essa stessa*, uno pseudo-problema<sup>15</sup>. Inoltre, secondo Popper, insieme alla metafisica, o a ciò che questo titolo designa nella purificazione protocollare del circolo di Vienna, anche molte teorie scientifiche, sicuramente quelle più interessanti e decisive, cadrebbero vittime della demarcazione ricalcata sulla significanza, se i neopositivisti fossero così coerenti da applicare ad esse il loro metodo. Nel contesto della Fisica, per esempio, la formazione delle teorie scientifiche dipende spesso da *problemi* e da prospettive di ricerca generati da cosmologie speculative che il modello empiristico della verificabilità degli asserti respingerebbe. Se, piuttosto che sviluppare criticamente i problemi di una teoria metafisica della natura, dirimendo l'intrico di deduzione, osservazione e immaginazione in essa racchiuso, si invalida l'intera teoria, ci si preclude, a causa di questa opzione metodica, la comprensione delle fonti autentiche del sapere scientifico. I naturalisti ionici sono stati per Popper un caso significativo di misconoscimento da rettificare: “[...] le teorie di Anassimandro non sono in effetti false, e quindi non-scientifiche? Sono false, lo riconosco, ma lo stesso vale per tante teorie, basate su innumerevoli esperimenti, accettate dalla scienza moderna fino a poco tempo fa e di cui nessuno si sognerebbe di negare il carattere scientifico, sebbene siano oggi ritenute false. [...] Una teoria falsa può rappresentare una conquista, quanto una vera. E molte teorie false hanno giovato alla ricerca della verità più di altre, meno interessanti, ancor oggi accettate. Le teorie false possono infatti essere di aiuto in molteplici modi: per esempio, suggerendo alcune

---

<sup>15</sup> Cfr. K. R. POPPER, *La demarcazione fra scienza e metafisica*, in K. R. POPPER, *Congetture e confutazioni*, trad. it., Il Mulino, Bologna, 2003, pagg. 435-450.

modifiche più o meno radicali, e stimolando la critica. Così, la teoria di Talete che la terra galleggia sull'acqua, riapparve in forma modificata in Anassimene, e, in tempi più recenti, nella teoria di Wegener sulla deriva dei continenti<sup>16</sup>. La pretesa di espungere la metafisica in nome di una controllabilità delle teorie tramite asserti osservativi, riponendo in essi tutti i vincoli formali destinati a delimitare i diversi tipi di ipotesi, stacca le teorie dalla radice intellettuale di ogni ricerca, che si trova sempre nella formazione, nella riformulazione e nel rinnovamento di problemi, problemi risolvibili soltanto in via provvisoria e *per suggerirne di nuovi* che proseguano e migliorino le indagini e i controlli; ma proprio in questa restituzione della scienza ad un dibattito che ne seleziona gli interessi ed identifica le opportunità o le carenze di spiegazioni accettate o di tradizioni dimenticate, esercitando così una critica contestuale e orientata di ogni sapere acquisito, il pensiero filosofico, spesso confuso dal criterio di significanza con il fantoccio metafisico da abbattere, si reintroduce all'interno dei confini del pensiero scientifico. La dinamica di Newton ha fornito a Popper un eccellente banco di prova per la contestazione del metodo induttivo, per quanto lo stesso Newton avesse avallato le ragioni di tale metodo: "Newton asseriva che la verità della sua *teoria* poteva essere ricavata logicamente dalla verità di certi *asserti osservativi*. [...] Una delle maggiori conquiste di Kant sta nel fatto che egli, stimolato da Hume, comprese che questa opinione era paradossale. Kant vide più chiaramente di chiunque, prima o dopo di lui, quanto era assurdo supporre che la teoria di Newton potesse essere derivata dalle osservazioni"<sup>17</sup>. In Newton, le astrazioni della teoria conferivano alle osservazioni il loro senso e la loro funzione: "è della massima importanza il fatto che non possiamo mai – ripeto, mai – osservare qualcosa come le *forze* newtoniane. Evidentemente, dato che queste vengono definite in modo che possono essere misurate misurando le accelerazioni, possiamo in effetti *misurare* le forze; e possiamo a volte misurare una forza prescindendo dall'accelerazione, per esempio, con l'aiuto di una bilancia a molla. *E tuttavia, in tutte queste misurazioni, senza eccezioni, presupponiamo sempre la verità della dinamica newtoniana*"<sup>18</sup>. Nella

---

<sup>16</sup> K. R. POPPER, *Ritorno ai presocratici*, in K. R. POPPER, *Congetture e confutazioni*, op. cit., pagg. 243-244.

<sup>17</sup> K. R. POPPER, *Lo status della scienza e della metafisica*, in K. R. POPPER, *Congetture e confutazioni*, op. cit., pag. 319.

<sup>18</sup> *Ibidem*, pagg. 320-321.

polemica contro l'induzione empiristica e contro il metodo neopositivista della riduzione protocollare degli asserti, prende corpo un'*esigenza critica decisiva* della teoria fallibilista di Popper, quella della ricostituzione del confine fra scienza e metafisica come demarcazione interna di prospettive integrate e integrabili. Il progetto kantiano di una metafisica come scienza diviene un carattere peculiare della teoria della scienza.

Ma quali aspetti della scienza mette in risalto la teoria fallibilistica di Popper? Dove si trova, per questa teoria, il tratto propriamente scientifico della scienza, la sua irrinunciabile base logica? La risposta rende perspicuo il nome impiegato per indicarla. Per Popper, infatti, la conoscenza scientifica ricava il suo carattere ipotetico e sperimentale non tanto dall'elaborazione formale di asserzioni empiriche orientate su un dispositivo "verificazionistico" di controllo, ma dalla costituzione problematica di ogni spiegazione scientifica, da una costituzione logica così problematica da rendere assolutamente convergenti controllo empirico e tentavi di critica, invenzione di nuovi esperimenti e ricerca delle debolezze della teoria. Il valore scientifico non dipende quindi dalla solidità e dall'inattaccabilità di una teoria, ma, al contrario, dalla sua *confutabilità*; e la verità di una spiegazione risiede negli errori che essa permette di scoprire e di correggere, per giungere a nuove ipotesi e a nuove critiche, a nuove e migliori confutazioni. Alla verifica neopositivista si oppone la *falsificazione*. Questa, traccia e matrice di una scienza fallibilista, ricolloca l'osservazione nella prospettiva della teoria, poiché, come Popper ha insistentemente ripetuto, "ogni osservazione è impregnata di teoria". Una teoria scientifica non può appoggiarsi sulla *tabula rasa* di una coscienza osservativa staccata da ogni dibattito epistemologico, indifferente alla selezione critico-sperimentale di argomenti e di ipotesi, e ridotta a un semplice registro tassonomico; ma deve, fin dall'inizio, lasciarsi impegnare in una "*discussione critica*" sollecitata da teorie rivali; e soltanto un complesso di caratteristiche logiche, che la indirizzino verso spiegazioni capaci di provocare nuove discussioni critiche, costituirà la componente più affidabile della sua scientificità. L'insegnante che "suggerisse al giovane scienziato desideroso di fare scoperte: <<va in giro e osserva>>, darebbe un cattivo consiglio; mentre lo guiderebbe correttamente se gli dicesse: <<Cerca di imparare quali sono i temi dibattuti oggi dalla scienza e di scoprire dove insorgano delle difficoltà e interessati delle divergenze di opinione. Sono questi i problemi che devi affrontare>>. In altri termini, si dovrebbe studiare

l'attuale *stato dei problemi*"<sup>19</sup>. Lo scienziato viene, in tal modo, riconsegnato alla lunga vicenda storica della generazione obliqua, ritardata o laterale delle teorie, della sopravvivenza fruttuosa delle anticipazioni inadeguate, al punto che la pratica scientifica, proprio nel suo carattere operativo e produttivo, diviene perspicua soltanto nel suo fondo di questioni riproponibili e traducibili.

Per quanto Popper, su questa linea metodologica, recuperi alla scienza, insieme alla funzione orientativa della metafisica, l'attenzione verso le tradizioni culturali che possono confluire nella "tradizione della discussione critica" – una formulazione singolare, al limite dell'ossimoro, chiaramente rivolta contro gli opposti partiti degli empiristi e dei cartesiani –, l'orizzonte intellettuale della sua scienza fallibilistica abbraccia anche, quale modello *storiografico* rivale, la teoria dei paradigmi di Kuhn, nella quale non il *problem-solving*<sup>20</sup>, ma la dicotomia fra *scienza normale* e *scienza rivoluzionaria* è il fulcro della critica filosofica dei presupposti influenti nelle impostazioni di ricerca. Il contrasto fra Popper e Kuhn è infatti un indice significativo dell'attrazione fallibilistica per l'ampio continente di esperienze intellettuali - disposte in differenti livelli di elaborazione, dalle filosofie naturalistiche agli ideali sociali, dai miti cosmogonici ai simboli religiosi – che si rende visibile, anche se in profili parziali e indefiniti, in ogni dibattito scientifico. Confrontabilità delle teorie o cambiamento di paradigmi, o delle *cornici* intellettuali, è questo il nodo della discussione. "L'astronomia di Tolomeo è tutt'altro che inconfrontabile con le teorie di Aristarco e di Copernico", osserva Popper, e fornisce questo argomento: "Sostengo che le teorie che propongono soluzioni agli stessi problemi o a problemi simili tra loro siano in genere confrontabili, e che gli esami comparativi siano sempre possibili e fecondi – tanto è vero che li eseguiamo"<sup>21</sup>. Kuhn, al contrario, riconduce le teorie fisiche al complesso integrato di regole formative che, nella forma di stili di pensiero condivisi, preparano gli oggetti della ricerca. Di conseguenza le forze propulsive delle rivoluzioni scientifiche risiedono più nel raccordo linguistico di esperienze, di tentativi di spiegazione, di imprese conoscitive e di trasformazioni culturali comuni ad un'epoca che non nelle singole,

<sup>19</sup> K. R. POPPER, *Per una teoria razionale della tradizione*, in K. R. POPPER, *Congetture e confutazioni*, op. cit., pag. 222.

<sup>20</sup> K. R. POPPER, *La conoscenza e il problema corpo-mente*, trad. it., Il Mulino, Bologna, 2006, pagg. 76-77.

<sup>21</sup> K. R. POPPER, *Il mito della cornice*, in K. R. POPPER, *Il mito della cornice, Difesa della razionalità e della scienza*, trad. it., Il Mulino, Bologna, 2004, pagg. 82-83.

pur decisive, svolte teoriche: “Fin dall’inizio del XVI secolo, i migliori astronomi d’Europa in numero sempre crescente riconoscevano che il paradigma dell’astronomia non era riuscito a risolvere i suoi problemi tradizionali. Questo riconoscimento preparò il terreno sul quale fu possibile a Copernico abbandonare il paradigma tolemaico ed elaborarne uno nuovo. La sua famosa prefazione costituisce ancor oggi una descrizione classica di uno stato di crisi”<sup>22</sup>. La rilevanza metodologica dei problemi, un autentico contrassegno dell’euristica del fallibilismo, compare qui in una veste olistica, come indicatore di uno stato di crisi. Ma la posizione di Popper è, ancora una volta, molto lontana da quella di Kuhn, poiché, per Popper, soltanto la frammentazione dei complessi concettuali e proposizionali delle teorie - e, quindi, la *determinatezza* dei singoli problemi - assicura alla discussione critica quella funzione di controllo di cui necessita il dispositivo epistemologico falsificazionista<sup>23</sup>. La ricostruzione della contesa potrebbe proseguire accumulando altre questioni, ma gli aspetti della scienza fallibilista fin qui delineati lasciano ben intravedere gli interessi teorici che hanno dominato il dibattito filosofico-scientifico in seguito al rinnovamento popperiano del programma criticistico.

Nella prospettiva fallibilista, dove l’avanzamento conoscitivo riceve il suo primo impulso dalla falsificazione, acquista una rilevanza non trascurabile la risistemazione del concetto epistemologico di verità, direttamente coinvolto nell’antitesi vero-falso. Infatti, se il contenuto conoscitivo delle teorie dipende dal loro contenuto di falsità, piuttosto che dalla loro veridicità, il significato logico e ontologico della “verità”, legato a tante e contrastanti vicissitudini filosofiche, richiede una radicale riformulazione. Popper lo ha riformulato guardando ad una duplice esigenza: salvare il principio della *corrispondenza* (ormai liberata dall’armonicismo dogmatico dell’*adaequatio rei et intellectus*) e collocare la verità sotto il segno della kantiana “*idea regolativa*”. Le due condizioni hanno suggerito a Popper un’utilizzazione assai originale dell’argomento di Tarski concernente la complementarità dei linguaggi coinvolti nella verità di un’asserzione d’esistenza (un *meta-linguaggio* in cui parliamo e un *linguaggio oggetto* di cui parliamo:

---

<sup>22</sup> T. KUHN, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, op. cit., pag. 93.

<sup>23</sup> K. R. POPPER, *Verità, razionalità e accrescimento della conoscenza scientifica*, in K. R. POPPER, *Scienza e filosofia*, op. cit., pag. 198.

l'asserzione <<la neve è bianca>> corrisponde ai fatti se, e soltanto se, la neve è bianca), poiché Popper, sulla base di questa fondazione logica della relazione disgiuntiva tra vero e falso (ancora limitata, nella tradizione della logica aristotelica, alla semplice definizione), ha potuto associare la verità alla ricerca veicolata dalla discussione critica. Così la *negazione*, la *contraddizione* ed il controllo tramite *confutazioni* divengono, proprio grazie al loro rapporto privilegiato con l'errore, funzioni logiche della verità, e questa, perdendo ogni connotazione oggettuale, ogni *essenzialismo* ontologico, si risolve interamente nel processo conoscitivo. Una sorta di logica della contraddizione, certamente apparentabile alla *dialettica* trascendentale di Kant (il cui principio risale, in fondo, ad Aristotele), prende corpo nella gnoseologia popperiana: "La contraddizione è [...] veramente il mezzo principale con cui riusciamo a scoprire la falsità, e a sapere, quantomeno, che una teoria è falsa. Naturalmente sappiamo anche a quel punto che la sua negazione è vera. Ma questo normalmente non ci dice molto, perché la negazione di una teoria con un alto contenuto informativo ha sempre un contenuto informativo molto basso. Più alto è il contenuto informativo di una teoria, più basso è il contenuto informativo della sua negazione. Non ricaviamo quindi molta verità, normalmente, una volta che abbiamo confutato una teoria. Ma almeno sappiamo dove non cercare la verità, e possiamo proseguire la nostra ricerca. La verità funziona quindi a grandi linee come un'idea regolativa nella ricerca della verità, o nella critica"<sup>24</sup>. L'apprezzamento metodologico della variazione quantitativa del contenuto informativo delle teorie, con l'inversione probabilistica delle possibilità di errore, è un aspetto decisivo della falsificabilità<sup>25</sup>, nella quale il concetto di verità viene caricato di due compiti convergenti, uno riguardante la relazione capovolta fra l'aumento dell'informazione e la debolezza della teoria, l'altro riguardante la progressività generale della conoscenza (come approssimazione alla verità), orientata dall'idea, di cui Popper scopre una lontana radice in Senofane, della somiglianza al vero, della *verosimiglianza*<sup>26</sup>. I vari lati dell'indagine si coordinano attraverso una teoria della verità capace di organizzare prove e di tradurre indicazioni di ricerca.

<sup>24</sup> K. R. POPPER, *La conoscenza e il problema corpo-mente*, op. cit., pag. 130.

<sup>25</sup> Cfr. K. R. POPPER, *Verità, razionalità e accrescimento della conoscenza scientifica*, in K. R. POPPER, *Scienza e filosofia*, op. cit., pagg. 165-168.

<sup>26</sup> *Ibidem*, pagg. 195-198.

Su questo terreno il fallibilismo si incontra con l'epistemologia pragmatista di Dewey, un indirizzo che, a ben vedere, ha percorso molti suoi temi. Nel pragmatismo di Dewey, inoltre, i tratti *sperimentalistici* e relazionali della conoscenza saldano insieme, fin dall'inizio, le situazioni pratiche di vita e le spiegazioni scientifiche, e il sapere passa continuamente da un campo all'altro, in entrambe le direzioni, cosicché ogni aumento di conoscenza scaturisce da un ampliamento dei *significati* di stati di cose nel mondo, e ritorna agli uomini e alle società umane nella forma di nuovi significati e di più appropriati *processi comunicativi*. La verità, allora, si desostantivizza anche sul piano linguistico: "Come la conoscenza, la verità è una relazione esperita tra cose e non ha alcun significato al di fuori di tale relazione, non più di quanto aggettivi come confortevole rispetto ad un alloggio, corretto rispetto ad un discorso, persuasivo rispetto ad un oratore, ecc. hanno valore se separati dalle cose *specifiche* cui essi sono applicati. Logica ed epistemologia guadagnerebbero molto dal fatto di tradurre il nome <<verità>> con l'aggettivo <<vero>> e con l'avverbio <<veramente>>, e ciò almeno fino al momento in cui non ci saremo pienamente familiarizzati con il fatto che <<verità>> è un nome astratto che riassume una qualità presentata da situazioni specifiche in riferimento ai propri contenuti particolari"<sup>27</sup>. Questo *sperimentalismo radicale* allarga il principio dell'esperienza alla logica della conoscenza, conferisce all'esperienza mentale una base sociale, uno sfondo antropologico intessuto nei bisogni e nella comunicazione di individui e società, e, tracciando un tale cammino, individua e raccoglie, con consapevolezza retrospettiva, quelle tendenze della scienza moderna che meglio hanno caratterizzato il rapporto cogente fra la formulazione di *ipotesi* e il continuo *rinnovamento* dei saperi, fra il mondo dell'*opinione* e delle pratiche quotidiane e le *astrazioni* esplicative più mediate e indirette. L'ideale scientifico pragmatista misura il valore della conoscenza dalle possibilità di indagine che essa suggerisce attraverso i risultati raggiunti. "Già Leonardo annunciò la nascita del metodo della scienza moderna quando disse che la vera conoscenza comincia con l'opinione. Quest'affermazione ha in sé un significato rivoluzionario; nessun'altra affermazione può essere così sconvolgente per la logica tradizionale. Non che l'opinione sia qualche cosa di più dell'opinione o di una supposizione non confermata

---

<sup>27</sup> J. DEWEY, *La teoria sperimentale della conoscenza*, in J. Dewey, *Logica sperimentale, teoria naturalistica della conoscenza e del pensiero*, trad. it., Quodlibet, Macerata, 2008, pag. 87.

e non accertata; queste supposizioni tuttavia possono essere adoperate; quando vengono adoperate come ipotesi portano alla sperimentazione. Diventano allora precorritrici della verità e la mente viene liberata dalla prigionia delle credenze precedenti. [...] Assunta in questa forma, l'opinione era fonte di nuove storie, l'inizio di operazioni che terminavano in nuove conclusioni. Il suo valore stava non in se stessa né in un particolare regno di oggetti a cui venisse applicata, ma nella direzione di ricerche che aveva messo in moto"<sup>28</sup>. Al processo antidogmatico del sapere scientifico, che appoggia nuove ipotesi su ogni scoperta, corrisponde un arricchimento incessante dei controlli *comunicativi* sulle situazioni sociali problematiche, dal momento che il miglioramento delle descrizioni dei contesti d'azione richiede un costante sviluppo di indicatori di significato, di topiche argomentative e di regole logiche, e un simile repertorio di attitudini si fonda sulla natura sociale, o, per meglio dire, associativa, del linguaggio. Abbiamo scoperto, scrive Dewey, "che tutte le cose hanno una fase di potenziale comunicabilità, cioè che ogni cosa cui si può pensare ha la possibilità di entrare a far parte del discorso, l'attribuzione retrospettiva di significati e di relazioni logiche alle cose nella loro immediatezza è del tutto naturale; non commette alcun male, salvo quando l'attribuzione è dogmatica e letterale"<sup>29</sup>. Quando sono le imprese conoscitive, rese sempre più indipendenti e universali dall'articolazione logica dei significati delle cose, a improntare la verità scientifica - nei tanti piani dell'interazione linguistica, dalla vita quotidiana alla comunità degli studiosi -, questa verità va a coincidere con "modalità specifiche di ricerca", cambiando nel numero la propria qualità, divenendo "*le verità*"<sup>30</sup>. Così il pragmatismo, pur disimpegnandosi dal problema del confine tra scienza e metafisica, corrobora la scienza fallibilista.

### 3. Scienza e Illuminismo

L'espressione "critica salvatrice", introdotta all'inizio di questo scritto, acquista, dopo il percorso compiuto, una piena perspicuità. Essa designa, infatti, un

---

<sup>28</sup> J. DEWEY, *Esperienza e natura*, trad. it., Mursia, Milano, 1990, pagg. 123-124.

<sup>29</sup> *Ibidem*, pagg. 141-142.

<sup>30</sup> J. DEWEY, *La teoria sperimentale della conoscenza*, in J. DEWEY, *Logica sperimentale, teoria naturalistica della conoscenza e del pensiero*, op. cit., pag. 95.

orientamento filosofico imposto dall'ambivalenza dello sviluppo di quel complesso di conoscenze, di scoperte, di criteri euristici, di presupposti ontologici e di pratiche sperimentali che si riassume nel titolo "scienza moderna", indipendentemente dalle svolte teoriche da essa conosciute, indipendentemente, cioè, dalla questione, piuttosto spigolosa, dei cambiamenti di paradigma che potrebbero essere indiziati con il passaggio dal sistema di Galileo e di Newton alla fisica di Planck, di Einstein e di Heisenberg. Questa ambivalenza, nell'indagine fenomenologico-genetica di Husserl, emerge dall'ostruzione della consapevolezza epistemologica retrospettiva del pensiero scientifico moderno circa la portata, i modi e le fasi di una matematizzazione della natura che riflette l'idealizzazione di rapporti quantitativi sempre più lontani dai *plena* percettivi, ancora riconoscibili nelle spiegazioni teoriche della dinamica aristotelica<sup>31</sup>. Alla scienza moderna non va quindi rimproverata una sorta di onnivora aspirazione cognitiva e ordinatrice – come lamentano gli "irrazionalisti" vecchi e nuovi -, ma va rimproverato l'atteggiamento opposto, ossia il parziale diniego delle più radicali richieste del razionalismo moderno. Queste richieste consistono semplicemente nella soddisfazione discorsiva di esigenze di validità, fino al limite dell'auto-justificazione fondativa e della genesi del senso. Husserl chiama *Urstiftung* (fondazione originaria) questa impresa teoretica. In essa la scienza non soltanto non diviene prometeica, ma conquista finalmente un pensiero filosofico del limite, un pensiero in cui l'impegno autocritico possa rinnovarsi continuamente. Gli argomenti fallibilistici ne forniscono la prova, e la "discussione critica" popperiana rende cauta la scienza apparentandola all'*ideale di autonomia* del razionalismo filosofico. Ad una "critica salvatrice" corre pertanto l'obbligo di legare la scienza al progetto culturale di emancipazione dell'Illuminismo.

In questa prospettiva la filosofia della scienza può reinvestire continuamente il patrimonio di concetti logici e di principi metodologici messo a punto nel dibattito sulla ricerca, e socializzato nei piani di lavoro della comunità scientifica (con i suoi strumenti ed esperimenti), in un contesto di relazioni e di istituzioni che si profila sempre accanto alla scienza, fornendole le motivazioni e beneficiando dei suoi risultati. La conoscenza scientifica può inserirsi così in una rete di processi

---

<sup>31</sup>Cfr. T. KUHN, *La rivoluzione copernicana. L'astronomia planetaria nello sviluppo del pensiero occidentale*, trad. it., Einaudi, Torino, pagg. 1972, 108-121.

culturali capaci di accrescerne, insieme, il *ruolo pubblico* e la *rilevanza pedagogica*, e ciò in quanto la fondamentale istanza del controllo, ossia del criterio di conferma e di accettazione delle teorie, viene affidato alla competizione aperta delle argomentazioni e assicurato nella *comunicazione* intellettuale regolata dagli ideali epistemologici della discussione critica. Una tale filosofia della scienza dovrebbe spingere il pensiero scientifico verso una sorta di *quaestio juris* concernente la validità di presupposti formali non indagati, o, per meglio dire, non indagati nelle loro radici prescientifiche. In esse diviene visibile il rapporto genetico (o, se si preferisce, genealogico) e pluridimensionale fra linguaggi e condotte di vita, fra pratiche e atteggiamenti, fra strumenti e interessi; e questo rapporto, che nell'ordine radicalmente "disantropomorfizzato" delle spiegazioni scientifiche si muta nelle molte correlazioni funzionali fra ipotesi ed esperienze, assume il significato di un banco di prova per ogni impresa di ricerca che intenda tenere uniti la *critica* metodologica e l'*emancipazione* intellettuale e sociale. Questo progetto illuministico, o neoilluministico, è stato delineato da Jürgen Habermas: "L'uso critico si serve di argomenti per ponderare, valutare, giudicare e giustificare la scelta di criteri; e dunque introduce nella discussione orientamenti e atteggiamenti che trascendono il linguaggio. Nessuna asserzione che si riferisca alla realtà è suscettibile di controllo razionale se non si esplica la connessione che esiste tra argomenti e atteggiamenti. Le descrizioni non sono indipendenti dai criteri che vengono in esse applicati; e i criteri riposano su atteggiamenti che hanno bisogno di essere giustificati mediante argomenti a loro difesa, ma nel contempo non sono suscettibili di dimostrazione deduttiva. Quando gli atteggiamenti vengono mutati sotto l'influenza di argomenti, una motivazione siffatta unisce, evidentemente, una coerenza logica incompleta con una empirica. L'unica coerenza di questo tipo si basa sulla forza della riflessione, che vince il potere dell'imperscrutato portandolo a coscienza. La consapevolezza emancipante traduce la coerenza logica in coerenza empirica. E' proprio questa la funzione della critica: essa supera il dualismo di fatti e criteri e crea il *continuum* di una discussione razionale che altrimenti si spezzerebbe senza mediazione in decisioni e deduzioni"<sup>32</sup>. Considerate in base al

---

<sup>32</sup> J. HABERMAS, *Contro il razionalismo dimezzato dei positivisti*, in T. W. ADORNO, K. R. POPPER, R. DAHRENDORF, J. HABERMAS, H. ALBERT, H. PILOT, *Dialettica e positivismo in sociologia*, trad. it., Einaudi, Torino, 1974, pagg. 251-252.

loro contesto, queste parole di Habermas sono state rivolte contro Popper; sono, pertanto, un documento, il documento di un dibattito purtroppo infecondo. Del resto, le due tipologie critiche, di Habermas e di Popper, appaiono tanto eterogenee da contenere in sé, nella loro costituzione teorica, la spiegazione del fallimento della discussione. Tuttavia, questa eterogeneità non significa distanza. Le due critiche convergono infatti nella denuncia della distorsione cognitiva prodotta dalla doppia riduzione neopositivistica, testimoniata tanto dal rimodellamento dell'esperienza attraverso l'atomismo proposizionale quanto dallo svuotamento protocollare del linguaggio; e, in entrambi i filosofi, questa denuncia riconduce la scienza dietro la scienza stessa, o fuori dal cerchio dei suoi oggetti già preparati, dei suoi compiti già definiti; la riconduce cioè in quelle situazioni culturali e intellettuali che contengono gli orientamenti instabili di saperi senza controllo, e proprio per questo sovrabbondanti di significato, anche se tali situazioni si configurano, in Habermas e in Popper, in modi molto diversi, sulla base della *Lebenswelt* della fenomenologia ermeneutica nell'uno (Habermas) ed attraverso l'evoluzionismo culturale del *problem-solving* nell'altro (Popper). In questa competizione, che in una circostanza ha assunto il carattere della diatriba, è stata comunque la prospettiva di Habermas a ritrovare, attraverso l'ampliamento ermeneutico del campo della marxiana critica dell'ideologia, e attraverso l'integrazione in esso dell'orizzonte antropologico dei processi di intesa, il nesso fra un *sapere scientifico restituito all'auto-riflessione* e il progetto filosofico di *emancipazione* dell'Illuminismo. Quando una rinata critica fondazionale della scienza - ormai lontana dall'ideale kantiano dell'*Erkenntnistheorie* - diviene un'auto-justificazione di "pretese di validità" - in un contesto ontologico ed epistemologico ormai completamente affrancato dalle vecchie partizioni in teoretico e pratico -, una comprensione ermeneutica del rapporto fra stili culturali e tipologie discorsive e dimostrative deve necessariamente affiancare la messa a punto di dispositivi logici che ancorino la scienza alla fuga delle correzioni e dei ribaltamenti. Questo aspetto della "teoria critica" di Habermas non può non incontrarsi, seppur in mezzo a forzature e ad adattamenti unilaterali, con il falsificazionismo di Popper: "La critica va dall'argomento all'atteggiamento e dall'atteggiamento all'argomento, realizzando, in questo movimento, la razionalità comprensiva, che nella naturale ermeneutica del linguaggio quotidiano è all'opera per così dire spontaneamente, ma nelle scienze deve essere ripristinata mediante la discussione critica, a ricongiungere i momenti separati del linguaggio formalizzato e delle esperienze

oggettivate. Solo perché questa critica stabilisce un rapporto non deduttivo fra i criteri scelti e gli stati di fatto empirici, e può commisurare un momento all'altro, è esatta la tesi che secondo le premesse di Popper sarebbe insostenibile: «...che noi possiamo imparare; con i nostri errori e con la critica; e che possiamo imparare nella sfera dei criteri proprio *allo stesso modo* che nella sfera dei fatti»<sup>33</sup>. Rendendo reciprocamente contraddittori premesse e metodo del falsificazionismo, Habermas fa un torto di non poco conto a Popper. Ciononostante un passo importante viene compiuto, poiché sulla via tracciata da questa “critica” (largamente debitrice nei confronti del pragmatismo di Dewey), la *pars construens* dell'*epoché* husserliana dei principi delle scienze moderne comincia a delinearci. È qui che la scienza può riconciliarsi con l'Illuminismo.

La chiamata in causa dell'Illuminismo è, in queste pagine, certamente vaga, quasi un segno direzionale, o un indice assiologico posticcio rispetto ad assetti di sapere scientifici, estranei, per loro natura, a fini e a progetti. Perciò, le perplessità che possono sorgere a causa dell'impiego di un termine così ambivalente, di un termine, cioè, che si riferisce sia ad un'epoca di fervida e feconda confusione fra la filosofia e le scienze naturali (dal naturalismo spinoziano di Diderot, alleato con il formidabile avvio della biologia e della chimica moderne, all'immagine di Newton in Voltaire e in Kant) sia ad un programma pedagogico e intellettuale di emancipazione (l'*Aufklärung*; il kantiano *uso pubblico* della ragione), devono essere dissipate. Tali perplessità scompaiono se i molti lati dell'Illuminismo, ripetuti nell'ampiezza semantica del termine tedesco che lo designa (*Aufklärung*), vengono riconsegnati al piano che ne contraddistingue l'orizzonte storico: il piano dell'auto-legislazione razionale dell'uomo, nella scienza e nella morale. “Kant rese all'uomo la morale, come gli aveva reso la scienza”<sup>34</sup>, ha scritto Popper, lasciando scorgere la natura esemplare dell'Illuminismo kantiano. In questo quadro filosofico, le scienze naturali - e più specificamente la fisica, la moderna fisica galileiano-newtoniana - trovano il loro asse nel complesso delle funzioni conoscitive umane, cosicché l'auto-riflessione che le identifica e le separa, le giustifica e le orienta, e che, soprattutto, le sottrae alle illusioni e ai malintesi dogmatici della vecchia metafisica,

---

<sup>33</sup> *Ibidem*, pag. 253.

<sup>34</sup> K. R. POPPER, *La critica kantiana e la cosmologia*, in K. R. POPPER, *Congetture e confutazioni*, op. cit., pag. 314.

una tale auto-riflessione, attestata nel modo più incisivo dalla parola “*critica*”, diviene, in stretta correlazione con la svolta del pensiero scientifico da essa accompagnata, la prospettiva dalla quale prende corpo un progetto di emancipazione a largo raggio, un progetto del quale la filosofia pratica di Kant inizia a delineare la fisionomia. Ricondurre la scienza all’Illuminismo equivale pertanto a situare ogni ricerca particolare e definita sul terreno della *critica* dei presupposti e dei linguaggi, equivale a spingerla verso la problematizzazione radicale - al limite della *scepsi* - dei residui e dei depositi di tradizioni che gli scienziati hanno spesso assorbito e filtrato, ma raramente interrogato (basti pensare alla fitta trama di rapporti che lega insieme l’alchimia e la chimica moderna); equivale infine a rendere più cogente l’interdipendenza fra Filosofia e Scienza, ripiegandole l’una sull’altra e rettificandole l’una attraverso l’altra, rendendo più auto-riflessive le scienze e più *sperimentale* la filosofia. Così, una critica salvatrice della scienza (dalle insidie del dogmatismo) può tracciare il cammino ad un rinnovamento post-metafisico della filosofia. Per questo nuovo profilo della filosofia, Dewey ha trovato la definizione di *critica delle critiche*<sup>35</sup>. L’ideale scientifico fallibilista, ossia la scienza che si revoca nella successione delle spiegazioni, costeggia sempre questa filosofia.

Lungo la via aperta da un pensiero post-metafisico capace di sostare sui limiti, sulle interferenze e sulle traduzioni che contemporaneamente staccano e correlano i saperi, deve riconfigurarsi anche la dibattuta questione della dualità fra scienze naturali e scienze sociali (o, a seconda dei contesti, scienze umane), nata dalla contrapposizione neostoricista e neokantiana, ben rappresentata da Dilthey e Windelband, fra scienze della natura e scienze dello spirito (*Natur-Geisteswissenschaften*), orientate sulle uniformità oggettive delle leggi di natura le prime, rivolte all’individualità e al tessuto, empaticamente accessibile, dei vissuti storici comuni le seconde. Il neopositivismo, naturalmente, aveva messo da parte questa distinzione, ma soltanto per estendere il modello nomologico alle scienze sociali, per sbarazzarsi di altri dannosi malintesi metafisici. Al contrario una filosofia critica della scienza - una filosofia sperimentale - si libera della vecchia opposizione in quanto scorge in essa un misconoscimento degli aspetti *probabilistici* e *indiziari* delle scienze della natura. L’esemplare discordanza, messa in risalto da

---

<sup>35</sup> Cfr. J. DEWEY, *Esperienza e natura*, op. cit., pag. 285.

Carlo Ginzburg, fra un criterio della generalizzazione quantitativa, proprio della fisica moderna, e un procedimento indiziario, proprio della conoscenza storica<sup>36</sup>, ha il merito di ben formulare i termini del problema, ma fraintende completamente le relazioni fra questi termini. Le scienze naturali, infatti, ricondotte alla scepsti degli assunti metodologici, o alle condizioni formali dei controlli fallibilistici, divengono indiziarie, per quanto la generalizzazione costituisca sempre l'orizzonte delle ipotesi. Nelle scienze storiche questo nesso permane, per quanto differiscano le tipologie di congettura, sviluppate fino al limite della finzione e della controfattualità. Si può dire, quindi, che le scienze naturali e le scienze storiche differiscono soltanto per le tipologie di ipotesi e per l'uso di queste nella generalizzazione. Con questa riconquistata unità del sapere, perde definitivamente significato la vecchia separazione *umanistica* fra umanesimo e scienza, e va aggiunto - il fatto è degno di nota - che si tratta di una perdita preannunciata proprio dalle scienze *umane*, dalle più avvertite e spregiudicate epistemologie delle scienze umane, da Lévi-Strauss e da Foucault, mentre le critiche alle carenze di auto-riflessione fondativa della fisica matematica moderna hanno trascinato con sé, soprattutto nella fenomenologia di Husserl, una sfumata istanza umanistica. Un *umanesimo scientifico* è invece quanto potrebbe promettere una scienza capace di auto-riflessione accompagnata ad una filosofia sperimentale, ad una "critica delle critiche". Ma verso quali compiti dovrebbero dirigere la consegna illuministica dell'emancipazione, questi due indirizzi dell'indagine e della ricerca? Due indicazioni, fra tante, si impongono: l'allargamento di una *ragionevole disposizione comunicativa* nelle relazioni umane e sociali e la *difesa del pianeta* da uno sviluppo industriale ormai completamente fuori controllo.

---

<sup>36</sup> Cfr. C. GINZBURG, *Spie, radici di un paradigma indiziario*, in C. GINZBURG, *Miti, emblemi, spie, morfologia e storia*, trad. it., Einaudi, Torino, 2005, pagg. 158-193.

## Nicoletta COSMI\*

### *I "segni celesti" nelle opere dell'uomo. Castel del Monte*

Il legame tra l'arte e l'osservazione del cielo, dei corpi che lo abitano e dei loro influssi sulla vita dell'uomo, ha origine remota. Le antiche civiltà si sono sempre messe in relazione spaziale tra il loro ambito e ciò che vedevano oltre il loro orizzonte; ne subivano il fascino e il mistero. La più antica opera d'arte con una rappresentazione del cielo e delle sue costellazioni è collocata nel tempo mitico degli dei, ed è attribuita al dio Efesto. Omero, nel XVIII libro dell'*Iliade*, descrive lo scudo di Achille, realizzato da Efesto, così: "E fece per primo uno scudo grande e pesante/ornandolo dappertutto; un orlo vi fece, lucido/triplo, scintillante, e una tracolla d'argento. /Cinque dell'ampio scudo eran le zone,/e gl'intervalli, con divin sapere,/d'ammiranda scultura avea ripieni. /Ivi ei fece la terra, il mare, il cielo/e il Sole infaticabile, e la tonda / Luna, e gli astri diversi onde sfavilla / incoronata la celeste volta, /e le Pleiadi, e l'Iadi, e la stella/d'Orion tempestosa, e la grand'Orsa/che pur Plaustro (Carro)si noma. Intorno al polo/ella si gira ed Orion riguarda,/dai lavacri del mar sola divisa./(...)Il gran fiume Ocean l'orlo chiudea/dell'ammirando scudo (.....)". Ma non voglio parlare delle innumerevoli opere in cui il cielo è stato riprodotto, attraverso tanti secoli di storia dell'arte, da tanti artisti, espresse in tanti linguaggi diversi e dal contenuto culturale e filosofico che riflette il pensiero e le conoscenze dell'uomo e del suo tempo. Il mio percorso porterà a presentare alcune strutture architettoniche di epoche diverse, ma che hanno in comune delle linee, delle direttrici o dei "segni celesti".

#### 1. I "segni" tracciati dall'uomo

La conoscenza delle proprietà percettive dei segni visivi, delle loro possibilità di composizione, dei loro usi comunicativi, estetici o funzionali, costituisce il primo passo per acquisire una competenza "linguistica", ossia per accedere ai significati racchiusi nell'aspetto strutturale di un'opera d'arte. L'utilizzazione dei segni si presta ad attivare la comunicazione, a trasmettere informazioni, ad evocare

\* Docente di Storia dell'Arte nel Liceo "Città di Piero" di Sansepolcro

sensazioni, idee, emozioni, contribuendo a crearne l'aspetto estetico e i significati. Alla base del linguaggio visivo ci sono elementi portanti come il "punto", la "linea", la "forma", lo "spazio", la "luce", l'"ombra", il "volume", la "composizione" e "linea-forza", che sono indispensabili per leggere anche una struttura architettonica.

Il "punto" è un segno primario perché da esso si genera la "linea", che può essere considerata una successione infinita di punti; punto e linea possono assumere forme, aspetti e significati diversi. La "linea" può essere retta, curva, spezzata; può essere presente in natura o nell'opera creata dall'uomo: la "linea orizzontale" è quella che ai nostri occhi separa il cielo dalla terra, la linea di un mare calmo, di una pianura; e il procedere lungo una linea come questa ci viene naturale, non richiede sforzi, trasmette tranquillità e serenità. La "linea verticale", ascendente o discendente che sia, è sempre dinamica. Se sale, è la linea dello slancio, dell'ascesa verso l'alto (cattedrale gotica), ma che ha la base saldamente piantata sulla linea orizzontale, che rappresenta la terra. La "linea obliqua" spezza l'equilibrio (torri gemelle del World Trade Center di New York, viste dal basso), in compenso è dinamica e ricca di tensione, perché si oppone sia alla linea verticale sia a quella orizzontale. Le sensazioni legate alla linea curva, variano a seconda dell'ampiezza dell'arco che descrive: una linea curva distesa, ampia, ha un andamento armonioso (Frank Lloyd Wright, *Guggenheim Museum*, New York, ); una linea curva che si chiude disegnando un cerchio rappresenta in un certo senso la perfezione, la forma conclusa in sé, completa ("Cromlech" di Stonehenge). Le linee miste, nelle quali si susseguono rette e curve, assumono diversi significati, secondo la direzione prevalente (Frank O. Gehry, *Museo Guggenheim*, Bilbao).

Le "forme" in natura sono innumerevoli, ma anche le forme più complesse, possono essere ricondotte a forme geometriche elementari o anche dette forme-base. Le forme-base sono pochissime: *il triangolo equilatero, il quadrato, il cerchio*. L'uomo ha da sempre attribuito alle forme-base, in ogni cultura anche la più antica e lontana, un valore simbolico, cioè la capacità di esprimere l'idea di un equilibrio naturale, spirituale o addirittura universale. *Il triangolo equilatero* rappresenta una tra le forme più stabili che esistano in natura, e comunica una sensazione di immobilità. Si tratta di una forma molto usata, sia in architettura, sia per l'ornamentazione geometrica. Anche *il quadrato* è una forma che comunica un forte senso di solidità e di equilibrio; fin dall'antichità più lontana ha il significato di un ordine nel caos. Dal punto di vista religioso, in varie culture orientali, ma anche nell'antica Grecia, rappresenta per esempio l'unione

tra la Terra e il mondo celeste. Nella cultura cristiana è simbolo della Terra e questa è la ragione per cui molte chiese antiche hanno una struttura architettonica quadrata, coperta da una cupola che rappresenta il mondo celeste. Ma dove è più evidente il significato ordinatore del quadrato è nel fatto che moltissime città, sia europee sia orientali, erano nell'antichità chiuse nella sicurezza e nella perfezione del perimetro quadrato di mura. L'antica Roma, quella di Romolo, era detta per la sua forma "Roma quadrata". Ogni accampamento romano aveva la pianta quadrata: al suo interno le strade si intersecavano ad angolo retto. Il *cerchio* è da sempre considerato la forma geometrica perfetta e il suo valore simbolico è legato a concetti come "eternità, divinità, completezza". Non ha inizio né fine, né direzione né orientamento, è l'infinito, il Cosmo; raffigura anche l'idea del movimento, dello scorrere ciclico del tempo.

Lo "spazio" è un luogo misurabile in tre dimensioni: altezza, larghezza e profondità. Sperimentiamo lo spazio come qualcosa di concreto; in esso, infatti, ha luogo tutta la nostra esistenza. Il problema della terza dimensione è sempre presente ogni qualvolta che un artista lavora in forma bidimensionale, in quanto non è possibile trasferire tutte le qualità di un oggetto o la profondità di un ambiente su una superficie piana. Si ricorre perciò ad alcune strategie figurative, attraverso le quali, chi osserva l'opera può ricostruire nella sua mente i volumi e lo spazio. Gli accorgimenti figurativi usati con tale scopo sono chiamati "indici di profondità" e possono fare riferimento ai processi mentali di chi osserva oppure a quegli stessi indizi che l'uomo utilizza ogni giorno per fare inferenze sulle dimensioni dell'ambiente. Le diverse modalità di rappresentare lo spazio, sono specifiche di una cultura, di un periodo storico o di una corrente artistica e la loro conoscenza e il loro riconoscimento contribuiscono a dare significato ad un'opera d'arte. La percezione dello spazio è poi una componente fondamentale nella fruizione dell'architettura, perché ciò che la caratterizza rispetto alle opere visive è l'essere fornita di un volume esterno e di un spazio interno, nel quale è possibile entrare. La percezione di un'architettura varia, perciò, se la si osserva dall'esterno o dall'interno, e in entrambi i casi è determinata dalla struttura dell'edificio e dalla posizione dell'osservatore. Dall'interazione fra esterno e interno si ricostruisce la percezione globale dell'opera nella mente di chi guarda. Proprio per l'importanza che un edificio assume in relazione allo spazio, sia interno che esterno, esiste sempre una corrispondenza fra le caratteristiche strutturali, le qualità percettive e i caratteri funzionali e simbolici di un'opera architettonica.

La “luce” e l’“ombra” sono aspetti sempre presenti nel mondo visibile, fondamentali anche nella rappresentazione e nella fruizione artistica. La luce è l’elemento che mette in evidenza i colori, dà rilievo alle forme, ai volumi, allo spazio. Nell’arte la luce ha avuto inoltre un significato simbolico e spesso, nelle raffigurazioni di carattere religioso, è stata usata quale aspetto evocativo della luce divina. Per comprendere la funzione della luce nella percezione dell’opera d’arte occorre distinguere le opere a due dimensioni, ad esempio un disegno o una pittura, da quelle a tre dimensioni, quali la scultura o una architettura che, oltre all’altezza e alla lunghezza, possiedono uno spessore e occupano lo spazio anche in profondità. Nelle opere a due dimensioni la luce costituisce un elemento segnico, usato intenzionalmente dall’artista per trasmettere concetti e significati. Nelle opere a tre dimensioni, la luce è una componente attiva del processo percettivo perché, in relazione ai volumi, alcune parti risultano illuminate e altre in ombra. Mettendo in risalto sporgenze e rientranze, la luce fa percepire dunque sia la forma che gli spessori dell’opera. Le opere tridimensionali non hanno tutte le stesse caratteristiche rispetto allo spazio, in rapporto al quale possono essere a bassorilievo, ad altorilievo, a tutto tondo, oppure, come un’opera d’architettura, avere uno spazio esterno e uno interno. La loro percezione è sempre comunque condizionata dalla luce, dalla sua qualità e dalla sua provenienza.

Effetti della luce: “*ombre proprie e ombre portate*”. L’ombra propria è quella situata sopra l’oggetto ed è percepita come sua parte integrante. Sempre per effetto della luce si formano all’esterno della figura altre ombre, proiettate sul piano o su altre forme poste in prossimità: sono le ombre portate. L’ombra portata, avendo origine dall’oggetto, ne riflette la forma, anche se in modo più o meno distorto. Il suo orientamento e la sua lunghezza dipendono dalla provenienza della luce. Se la fonte luminosa è posta in alto l’ombra è breve; se è collocata in basso, l’ombra è allungata e gradualmente meno incisiva. Un fattore di grande importanza nella definizione delle ombre è dunque la provenienza della luce: luce laterale, frontale, luce diffusa e controlloce.

Significati simbolici della luce. La forte espressività della luce, la sua provenienza dall’alto, la sua funzione di illuminazione, il suo essere fonte di vita, ne hanno determinato in tutto il corso dell’arte un uso espressivo e simbolico associato soprattutto all’idea del soprannaturale, espressione di luce divina e di salvezza delle anime. Nelle tavole medievali di carattere sacro la luce divina era simboleggiata dal fondo d’oro, evocativo del trascendente. L’oro assumeva il

significato di luce divina sia per il colore luminoso e brillante che per la sua preziosità, associati entrambi alla magnificenza di Dio. La luce, con la sua intensità e le sue proprietà percettive, è stata usata come metafora di concetti più ampi e non raffigurabili concretamente. Un'opera di architettura si colloca con i suoi volumi nello spazio; la sua forma e la sua struttura sono messe in evidenza dalla luce, che produce ombre sulle sue superfici, che crea effetti di uniformità, oppure interruzioni e articolazioni varie. Per effetto della luce un edificio chiuso e squadrato quale una piramide dell'antico Egitto (*Piramide di Cheope, Il Cairo*), presenta contrasti netti di tono nelle diverse superfici. Le ombre uniformi valorizzano la geometria della struttura e ne mettono in evidenza la compattezza omogenea delle pareti prive di qualsiasi apertura. La costruzione è nettamente delineata e separata dall'ambiente circostante.

Provenienza e intensità della luce all'interno. All'interno, l'intensità e la direzione delle luci incidono sulla percezione dello spazio, sulla sua espressività, sui percorsi percettivi e reali, a cui è invitato l'osservatore. Nel *Pantheon*, tempio romano a pianta circolare, privo di aperture sulle pareti, la luce proviene da un'apertura posta in alto al centro. Accompagnata dalla forma della cupola e dalla circolarità dell'edificio, la luce si diffonde in modo uniforme, valorizzando gli elementi strutturali e la loro crescente animazione. Nelle antiche cattedrali gotiche, la luce filtra attraverso le vetrate colorate, che contribuiscono a dare all'ambiente la particolare e suggestiva atmosfera che la caratterizza. Oltre a favorire il raccoglimento dei fedeli e a guidare il loro percorso interno, la luminosità soffusa diventa simbolo della luce divina, attraverso cui l'uomo può accostarsi a Dio e alla salvezza spirituale che egli offre ai credenti.

La "*composizione*", una struttura in equilibrio. Il concetto di struttura indica che ogni elemento assume significato nel rapporto con gli altri e il significato dell'insieme è dovuto a quello di tutte le sue parti nelle loro relazioni reciproche. I caratteri della struttura concorrono a definire il significato di un'opera e in quelle non figurative sono il principale mezzo di comunicazione su cui si attiva l'interpretazione del fruitore. Nella comunicazione visiva e artistica l'uomo ha organizzato le forme a volte in modi ordinati e regolari, a volte liberi e senza regole, in una molteplicità di composizioni che variano in relazione alle funzioni comunicative dell'arte, agli ideali estetici di un singolo, di un'epoca o di una civiltà. Un'immagine, un'opera d'arte, viene percepita come una composizione,

ossia come un insieme unitario, delimitato, concluso, dotato di una sua compiutezza. E' come se gli elementi che la formano avessero raggiunto una posizione di equilibrio nel quale ogni elemento è necessario e tutti contribuiscono al significato dell'insieme. Non tutte le parti di una composizione assumono la stessa importanza per chi osserva. Alcune zone attraggono maggiormente lo sguardo quasi fossero centri focali, assumono cioè un maggior "peso" percettivo, altre sembrano essere attraversate da vettori, ossia da linee-forza attive presenti nella composizione. In relazione, alla distribuzione di questi elementi all'interno del campo l'equilibrio strutturale può essere percepito come "statico" o "dinamico".

L'equilibrio è statico ed equilibrato, quando l'occhio percepisce l'immagine e tende a fermarsi al suo interno, attratto dal "peso". L'opera di Piero della Francesca con la raffigurazione della *Natività* (Cfr. Fig. 12), presenta una struttura dotata di equilibrio statico, per la disposizione delle figure su coordinate orizzontali e verticali che creano andamenti e linee-forza in direzione analoga. La collocazione delle figure, nella parte centrale del campo, dà a questa zona un maggior peso compositivo che guida l'attenzione dell'osservatore sul fulcro della scena e concorre a mettere in risalto la descrizione dell'evento. L'equilibrio è dinamico dove l'effetto percettivo del peso suggerisce l'idea di una forma che tenda a sfuggire alle leggi di gravità, quasi sia spinta verso l'esterno da una forza diagonale, una tensione verso l'esterno che rende l'immagine instabile e dinamica. Il dinamismo strutturale è presente nelle opere di quegli artisti che hanno voluto trasmettere l'idea di una situazione animata, concitata o addirittura in movimento.

Nel *Trasporto del Cristo morto* (Cfr. Fig. 13) di Raffaello, la figura del Cristo costituisce la zona di maggior peso; la sua disposizione e quelle delle altre figure, orientate in diagonale, produce il dinamismo strutturale che diventa anche espressivo del moto di dolore che pervade la scena.

Le "linee-forza" sono andamenti o collegamenti virtuali che si formano per il risalto che assumono alcune figure o per alcuni collegamenti tra le forme dovuti alla loro disposizione o ai loro rapporti. I principi per cui si formano le linee-forza sono gli stessi che producono i raggruppamenti: vicinanza, somiglianza e buona forma, relativi a figure, colori, luci e ombre. La prevalenza di linee-forza orizzontali e verticali produce nella composizione effetti di equilibrio statico, di stabilità nelle figure e nella scena. Le linee-forza orizzontali evocano il mondo concreto, il

terreno su cui l'uomo cammina o i piani d'appoggio necessari per le sue azioni; quelle verticali rimandano invece a qualcosa di attivo e vitale, stabile e in equilibrio. Il mosaico *Giustiniano e la sua corte* (Ravenna S. Vitale) è un esempio di composizione caratterizzata da un equilibrio statico. I personaggi frontali e rigidi, accostati l'uno all'altro e tutti di una medesima altezza, producono nella struttura una successione di linee-forza verticali e altre due ad andamento orizzontale che delimitano le figure in basso e in alto. La composizione si percepisce statica, rigida, regolarmente ordinata. Nell'opera *La parabola dei ciechi* di Pieter Bruegel il Vecchio, le linee-forza principali attraversano il quadro in diagonale; l'occhio e l'immaginazione sono guidati verso l'inevitabile caduta dei personaggi raffigurati. Le immagini che si sviluppano seguendo linee oblique o diagonali possono comunicare un'impressione di movimento e d'instabilità.

## 2. I "segni celesti" nell'opera dell'uomo: il cromlech di Stonehenge

I "cromlech": secondo l'ipotesi più accreditata, si tratterebbe di luoghi sacri legati al culto del Sole, l'astro regolatore dei cicli del giorno e della notte e di quelli stagionali. Di qui il valore simbolico della pianta (formata da un cerchio contornato da raggi, talvolta racchiusi in un altro cerchio) e delle stesse ombre proiettate dalle pietre, che sono in relazione con le varie posizioni del sole (Cfr. Fig. 14).

L'arte preistorica è specchio dell'evoluzione dell'uomo e della sua necessità di esprimersi e di comunicare. Di volta in volta assume questi significati: ha fini magici, quando vuol propiziare il buon esito della caccia o la fertilità della Terra; ha fini di culto, quando si riferisce a divinità naturali, quali il Sole e gli astri; è realistica quando vuole comunicare fatti o eventi attraverso una successione d'immagini. Le prime forme di architettura risalgono al tempo in cui l'uomo si stanziava in comunità sedentarie. Le costruzioni destinate a resistere nel tempo sono quelle destinate al culto: è il caso dei monumenti realizzati con grandi pietre, definiti "megalitici". Il "menhir" (dal bretone "men", pietra, e "hir", lunga), costituito da una pietra infissa nel terreno, è posta probabilmente ad indicare un luogo di sepoltura. Il "dolmen" (dal bretone "doul", tavola, "men", pietra), caratterizza sepolcri collettivi, o forse dei luoghi sacri. Si compone di due pietre verticali infisse nel terreno, cui è sovrapposta una lastra orizzontale. Questo è il primo sistema

costruttivo utilizzato dall'uomo e prende il nome di "trilitico", perché composto da tre pietre: due verticali "piedritti" che sostengono una orizzontale, l'architrave. Applicazione monumentale del sistema trilitico è quella del "cromlech" (dal bretone "crom", rotondo, e "lech"). Si tratta di una serie di dolmen disposti in modo da formare figure circolari concentriche. Il più noto è quello di Stonehenge, presso Salisbury, nell'Inghilterra meridionale; costruito in tre fasi, tra il 4600 a.C. e il 1500 a.C.:

Nella prima fase (Cfr. Fig. 15), venne costruito un terrapieno circolare del diametro di un centinaio di metri, delimitato da un piccolo fossato. In direzione nord-est, dal terrapieno parte la "avenue", un viale lungo più di mezzo chilometro, circondato da due terrapieni e piccoli fossati. All'ingresso del viale, è posta la Heel Stone (pietra del calcagno), il "menhir" alto 5 metri, posto all'inizio del viale d'accesso.

Nella seconda fase (Cfr. Fig. 16), furono scavate 56 buche, ugualmente distanziate l'una dall'altra, del diametro di cm. 80 e profonde cm.70. Queste buche sono disposte in modo circolare all'interno del terrapieno; chiamate le Buche di Aubrey, dal nome dell'antiquario inglese che nel 1649 scoprì il monumento. In questo cerchio vi sono 4 stazioni, denominate coi numeri 91, 92, 93 e 94, costituite da due pietre e due piccoli tumuli disposti in modo da formare un rettangolo perfetto. I due lati corti del rettangolo formato dalle quattro stazioni, sono paralleli all'asse del monumento passante per il centro e la Heel Stone.

Alla terza fase (Cfr. Fig. 17), appartiene un'altra serie di buche, ora coperte, disposte su due cerchi concentrici, denominati cerchi Y e Z. Il cerchio Y presenta 30 buche, il cerchio Z invece ne ha 29, sono profonde circa 90 centimetri. All'interno, un grande anello che è formato da 30 imponenti triliti, detto cerchio di Sarsen (nome della località da cui provengono le pietre e distante una trentina di chilometri), alte oltre i 6 metri, del peso di 25 tonnellate. Il cerchio ha un diametro di 29 metri e mezzo. Le 30 pietre verticali sono sormontate da architravi che si incastrano, attraverso un incavo, nella protuberanza presente sulla sommità di ogni "piedritto". Si forma, così, un ulteriore cerchio in alto. Delle 30 pietre del cerchio di Sarsen, una è la metà delle altre. Sempre in questa fase fu eretto un altro anello più piccolo, costituito da pietre più scure, le "bleu stones", che circondano i 5 triliti centrali, disposti a ferro di cavallo. Le pietre blu, provenienti dal nord dell'Inghilterra, sono in tutto 59 e disposte a ferro di cavallo con l'apertura verso il viale d'accesso.

All'interno di quest'ultimo recinto sono disposti i 5 triliti, di cui solo tre sono ancora intatti, al cui centro è la pietra dell'altare. Approfonditi studi hanno permesso di scoprire alcuni dei segreti di Stonehenge: il complesso megalitico serviva per calcolare con precisione la successione delle stagioni. Si tratterebbe cioè di un *osservatorio astronomico preistorico* (Cfr. Fig. 18). Nel 1740, William Stukeley nota che l'asse del monumento (la direttrice centro-Heel Stone) è diretta a nord-est dove sorge il Sole il 21 giugno, Solstizio d'estate (Cfr. Fig. 19). Quando all'alba il Sole attraversava i triliti allineati e colpiva la Heel Stone, era l'inizio dell'estate. Quando all'alba il Sole attraversava i due triliti agli estremi del semicerchio interno, era l'inizio dell'inverno, il 21 dicembre, Solstizio d'inverno.

Se le popolazioni primitive hanno trovato con difficoltà i movimenti del Sole sulla volta celeste, molto più difficile deve essere stato scoprire i moti della Luna (Cfr. Figg. 20 e 21). Ci sono una serie di allineamenti che mostrano le direzioni dei quattro punti di intersezione, chiamati i "nodi" della Luna. La Luna si trova in questi punti una volta ogni 18,6 anni. Se si analizza la quantità di pietre e di buche, si scoprono delle cose interessanti. I cerchi di buche denominati Y e Z sono in tutto 59, che è il doppio di 29,5 cioè il numero di giorni del "mese sinodico". Le pietre blu, "bleu stones", sono sempre 59, mentre le pietre del cerchio di Sarsen sono 30, una metà delle altre, quindi sono da considerare 29 e mezzo.

Ora consideriamo le buche di Aubrey. Come è stato detto, sono in tutto 56 e dividendo per tre si ottiene circa 18,6, che è il tempo che impiega la linea dei "nodi" a compiere un giro completo. Stonehenge era quindi utilizzato dagli antichi sacerdoti come un osservatorio luni-solare.

### **3. Castel del Monte: perfezione stereometrica e summa degli studi astronomici e filosofici**

#### ***a. Federico II di Svevia***

"Federico II fu, come uomo politico, un mirabile camaleonte. Imperatore universale, erede del divo Giulio – ma anche e soprattutto di Carlomagno, di Ottone I e del suo avo Federico I – e tuttavia ora accomodante, ora intransigente con le autonomie e le comunità locali tedesche e italiane; crociato e al tempo stesso amico

del sultano d'Egitto; custode come unto del Signore dell'ortodossia cristiana e fiero nel suo ruolo di rex et sacerdos sancito dal rito dell'incoronazione eppure incline a ricerche, inquietudini e simpatie che lo portavano forse vicino, se non all'empietà e all'eresia, a forme di pensiero che con qualche forzatura cronologica si potrebbe chiamare "libero"; re assoluto e capo di una ben strutturata gerarchia di burocrati nel regno di Sicilia e princeps feudale in Germania ....."<sup>1</sup>.

L'Italia meridionale è dominata, nella prima metà del secolo XIII, dalla figura di Federico II (1194-1250). Uomo di grande cultura, protettore di poeti e poeta egli stesso, accoglieva nella propria corte legisti latini, dotti ebrei, mercenari arabi, trovatori scesi appositamente nell'Italia meridionale, insieme ai poeti della "scuola siciliana"; in essa sono presenti le attività intellettuali dei matematici arabi e del sommo Leonardo Fibonacci, si sviluppano nuove conoscenze di astronomia e di astrologia. I prodotti artistici del tempo, creati entro quest'ambito culturale, sono equilibratamente misurati, giungendo talvolta alla perfezione stereometrica come nel Castel del Monte nei pressi di Andria, in Puglia (Cfr. Fig. 22). La forma di questa struttura nasce da un modulo geometrico così ben calcolato da far riflettere sull'influenza che hanno avuto gli studi matematici degli arabi: le misure e le proporzioni dell'edificio, infatti, sono calcolate, oltre che in sezione aurea, anche in relazione alle ombre determinate dal sole al suo ingresso nei vari segni zodiacali, rivelando che il castello è la "summa" degli studi astronomici, matematici e filosofici dei dotti greci, latini, arabi, presenti in gran numero alla corte di Federico II.

### ***b. Struttura***

L'intensa rete di castelli federiciani (Cfr. Fig. 23) è caratterizzata da una costante: la simmetria e il geometrismo nel disegno dell'impianto architettonico. Il punto d'arrivo dell'evoluzione e del perfezionamento architettonico di uno schema geometrico, che va dal quadrato all'ottagono, è rappresentato da *Castel del Monte*. E' utile mettere in relazione le piante dei castelli fatti erigere da Federico II e varie

---

<sup>1</sup> Cfr. F. CARDINI, *Federico II di Svevia, stupor mundi*, Editalia, 1994, pag. 7.

fortezze del Medio Oriente, tutte a pianta regolare. Federico, avrebbe visto questi castelli durante la crociata del 1228-1229 e avrebbe imitato le loro piante per le fortezze dell'Italia meridionale. Nel caso di *Castel del Monte* si può ipotizzare che la forma rettangolare, del tipo "castrum", si sia trasformata, raddoppiando le torri angolari, in un ottagono, e che, nello stesso tempo, all'esterno si sia ottenuta la conservazione del tipo "donjon". I "donjons" francesi erano costruzioni difensive medievali che consistono in un alto anello di mura, con diversi vani interni a forme poligonali ottagonali, trapiantate in Italia meridionale dai Normanni.

La forma ottagonale di *Castel del Monte* è una variante delle diverse possibilità di variare costruttivamente il tipo "castrum" e "donjon", una variante perfetta sotto l'aspetto architettonico. La pianta poligonale di *Castel del Monte* o della torre ottagonale (Cfr. Fig. 24) di Enna, permette di stabilire un'analogia diretta con lo schema delle costruzioni militari persiane, come il Castello di Kah-i Khurra (XIII secolo) (Cfr. Fig. 25).

È importante inoltre pensare all'uso "imperiale" della struttura ottagonale, testimoniato dalla Cappella Palatina, in cui Carlo Magno materializza l'asserto della "Translatio Imperii" (da Roma a Bisanzio, da Bisanzio ad Aquisgrana), alla quale Federico II si rifà con il suo *Castel del Monte*, edificio simbolico per eccellenza, in cui la Translatio sembra giungere sino all'affermazione dell'identità, con Cristo, del più laico degli imperatori. Bisogna considerare anche l'impianto ottagonale della chiesa federiciana di *Santa Maria Maggiore* a Lanciano (Cfr. Fig. 26). Inoltre, la prima importante chiesa del mondo cristiano, dopo il 313, è quella della *Natività* di Bethlemme (Cfr. Fig. 27), che presenta un corpo ottagonale rivolto ad Oriente. Si può notare la connessione tra la chiesa di Bethlemme, e quindi tra l'idea della Natività e della Concezione, strettamente legata alla persona di Maria, e la figura dell'ottagono rivolto verso oriente. Il numero otto è il numero del cosmo spirituale: rappresenta "la cupola del cielo, se si addiziona l'unità al numero dei sette pianeti".

Secondo Tertulliano, l'otto è il numero "perfetto" perché costituisce il risultato della somma dei cinque sensi e dei tre sensi spirituali. Secondo la tradizione biblica, otto serafini sorreggono il trono divino. Il numero otto è il numero simbolico per eccellenza: della rinascita, della rigenerazione e quindi del compimento, con la Resurrezione, dell'opera di salvezza. Parallelamente, dopo i sei giorni della Creazione e il settimo del riposo di Dio, il mondo era nato, compiuto, nell'ottavo giorno dopo l'inizio della creazione. Per questa simbologia, la forma ottagonale sembrava particolarmente adatta al battistero (il *Battistero di San Giovanni* in Laterano e il *Battistero di San Giovanni* di Firenze). La simbologia dell'ottagono legata al

battistero si adatta all'ideologia federiciana: l'ottagono di Castel del Monte può rappresentare una specie di "battistero laico"; anche Federico è il novello Adamo, il nuovo Uomo; esente dal peccato per il suo essere stato unto imperatore.

Presso i neoplatonici e i neopitagorici, la cui filosofia aveva molto influenzato la cultura islamica, si trova un simbolismo che sta alla base del significato universale delle regole matematiche: l'organizzazione del mondo si fonderebbe su un cerchio generato da quadranti rotanti. La figura originale del quadrato è intesa come generatrice della terra con i suoi quattro elementi, terra, aria, acqua e fuoco, le quattro stagioni e i quattro punti cardinali. Come ha dimostrato Heinz Götze, nel suo libro *Castel del Monte*<sup>2</sup> del 1988: un ottagono è generato dalla rotazione di 45° di due quadrati rispetto ai loro assi, che moltiplicano le forze simboliche della figura originale. In molte chiese islamiche e cristiane, infatti, l'ottagono si rivela il tramite dal regno della terra (quadrato) verso l'immortalità, verso il cielo infinito (il mandala). Questa forma geometrica, sebbene i lati non possano raggiungere tutti i punti segnati dalla linea che chiude il cerchio della circonferenza (la quadratura del cerchio), s'inserisce in questa figura raddoppiando il quadrato. Federico II aveva la sua organizzazione mentale pilotata verso le idee, ma anche verso la sostanza e la forma. Credeva nella stretta analogia fra numeri, astronomia, astrologia, cosmologia, fenomeni naturali.

Il significato simbolico del quadrato e del cerchio è considerato alla stessa stregua anche nell'Estremo Oriente: anche nella tradizione cinese, come dimostra il *Tempio del Cielo* a Pechino di forma circolare, il quadrato rappresenta la terra, i punti cardinali rappresentano i quattro elementi, mentre il cerchio rappresenta il cielo. La figura di base di *Castel del Monte* è identica alla figura della stella ottagonale che nelle architetture paleocristiane, bizantine e musulmane era considerata come simbolo mandalico, come forma di base per i grandi santuari, e che veniva utilizzata a scopo monumentale, nei più svariati modi. Le chiese e le moschee venivano intese come immagine del mondo e della trascendenza divina. L'imperatore scelse questa forma, perché era in cerca di un'architettura simbolica che esprimesse la sua idea d'Impero e sicuramente conosceva il linguaggio simbolico medievale e i relativi segni. A *Castel del Monte* Federico II ha applicato il concetto di chiesa come immagine del mondo, a simboleggiare il potere temporale affidatogli

---

<sup>2</sup> Cfr. H. GÖTZE, *Castel del Monte*, Milano, 1988.

direttamente da Dio; qui ha costruito la sua Aquisgrana e la sua Cappella nella Rocca come simbolo del proprio compito divino.

Non si può non fare quest'ultima considerazione: questa struttura è anche un esempio dell'influenza di Vitruvio sull'architettura del XIII secolo. La sua pianta, presenta un chiaro rapporto con quanto scritto da Vitruvio nel *De Architectura*, sulla pianta ottagonale di una città ideale (Cfr. Fig. 28) e sulle costruzioni che seguono le regole da lui enunciate. L'interesse per l'architettura non si limitava agli edifici da lui commissionati, ma anche all'acquisto e alla traduzione d'importanti manoscritti sulla scienza e la tecnologia. Federico era anche interessato alla natura dei venti alla quale Vitruvio dedica un passo nel suo trattato.

Questo è in accordo con le sue vedute sull'astrologia e l'astronomia e convalida l'ipotesi secondo cui la pianta della città ideale di Vitruvio, che proviene ed è in stretta relazione con l'origine dei venti, servisse di modello per il *Castel del Monte*. Un altro punto di somiglianza con il *De Architectura* di Vitruvio, è il rifornimento idrico: l'acqua è fornita da un'unica cisterna sul tetto e solo in Vitruvio troviamo tramandato questo sistema.

### *c. Il sole: l'architetto del Castello di Federico II*

Riassumendo: la costruzione ha forma ottagonale, agli otto angoli si trovano altrettante torri ottagonali, il suo cortile è pure ottagonale e conta otto sale a pianterreno ed otto al primo piano, tutte a forma trapezoidale e tutte uguali.

Nel suo aspetto più ingegneristico *Castel del Monte* è geometricamente scandito dal Sole, tutta la sua progettazione pare legata alla progressione di solstizi ed equinozi. La costruzione è un concentrato di simboli cosmici e quindi d'implicazioni astronomiche, geografiche, matematiche e geometriche.

Tutti gli spazi chiusi della struttura sono scanditi dal Sole, mediante ombre reali e teoriche, all'ingresso dell'astro nei segni zodiacali.

Un gioco di diagonali condotte nel cortile schiude un angolo di 47° pari a quello del cono della precessione degli equinozi e quindi il doppio dell'angolo d'inclinazione dell'asse terrestre rispetto all'asse dell'eclittica. Chiara allegoria della Terra, perché è questa inclinazione del suo asse a determinare il ritmo delle stagioni e della vita animale e vegetale.

La latitudine su cui sorge il castello e il valore della culminazione del Sole all'equinozio sono racchiusi nel triangolo formato dall'altezza della parete Sud del cortile, dalla larghezza del cortile stesso e dall'ipotenusa ideale che congiunge questi due elementi.

Soltanto a tale latitudine i punti dell'orizzonte in cui sorge e tramonta il Sole alle date dei solstizi, congiunti idealmente tra loro, tracciano un rettangolo in rapporto aureo del quale il *Castello del Monte* si colloca al centro.

E soltanto a quella latitudine l'ombra di un bastone piantato verticalmente, rilevata un'ora prima e un'ora dopo mezzodì nel giorno degli equinozi, spazia un angolo di  $45^\circ$  che, aperto al centro di una circonferenza, sottende una corda che è il lato dell'ottagono.

Inoltre, significativa è la presenza numerosa, nella struttura, della divina proporzione o rapporto aureo col relativo numero d'oro (1,618), che ritroviamo, già prima di entrare, nel timpano del portale (un triangolo isoscele in cui i lati sono sezione aurea della base), nonché negli archi ciechi che affacciano dal piano superiore nel cortile, nelle sale trapezoidali dove il lato minore è sezione aurea di quello maggiore.

Tutte queste correlazioni col Cielo e con la Terra, nonché l'impiego del numero d'oro e della divina proporzione erano sempre presenti nei monumenti antichi che dovevano assolvere una funzione sacra e *Castel del Monte*, che probabilmente doveva simboleggiare la fusione delle tre religioni monoteiste (cristiana, ebraica e musulmana), fondeva già nella sua struttura le leggi dell'universo: astronomia, matematica e geometria. Obbedendo perciò il *Castello* ai rapporti dettati dal Sole e dalla matematica, non poteva tener conto di un modulo di misura che fosse applicato in tutte le sue parti perché la progettazione era soprattutto uno sviluppo armonico di forme geometriche. Il modulo iniziale c'è, è il più coerente, il più nobile: il rettangolo aureo (Figg. 29, 30, 31).

I quattro rettangoli in rapporto aureo, sovrapposti fra loro a formare una croce greca e una croce di S. Andrea, creano due ottagoni, uno interno (il cortile) e uno esterno, determinano la posizione delle pareti interne ed esterne delle sale. I triangoli isosceli, che sporgono fuori dall'ottagono maggiore, determinano, con la loro altezza, lo spessore delle mura del *Castello* e, con la misura dei cateti, la misura dei lati delle torri ottagonali angolari. La serie di rette che uniscono il centro della figura con i vertici dei lati determina la forma trapezoidale delle varie sale.

Infine, la distribuzione spaziale degli elementi architettonici obbedisce a precise indicazioni dettate dal Sole nel suo volgere nel corso dell'anno. Vitruvio, celebre architetto romano vissuto nel I sec. a. C. al tempo dell'imperatore Augusto, ci ha descritto l'"analemma" (un diagramma dalla forma a "8") nel suo trattato *De Architectura*, nel I libro, come di un disegno geometrico, in base al quale possiamo stabilire le lunghezze delle ombre di un bastone alle date in cui il Sole entra nei diversi segni zodiacali, conoscendo la latitudine del luogo in cui andiamo a piantare il bastone (lo gnomone). Se disegniamo, quindi, l'analemma, dando allo gnomone la medesima altezza della parete originale del cortile, e lo sovrapponiamo alla sezione del *Castello*, nella stessa scala, vedremo che le ombre ottenute dal disegno di Vitruvio andranno a scandire tutti gli elementi architettonici. La gnomonica è, quindi, lo studio delle ombre proiettate da un bastone infilato in terra, ombre che consentono di stabilire le ore del giorno, i giorni dell'anno, la latitudine del luogo, la forma e la grandezza della Terra (Figg. 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39).



## PARTE SECONDA

### *La parola agli studenti*

Liceo "Città di Piero" - Sansepolcro\*

#### *Un bilancio di curiosità e di apprendimenti*

*“Ogni rivoluzione ha reso necessario l'abbandono da parte della comunità di una teoria scientifica una volta onorata, in favore di un'altra incompatibile con essa, ha prodotto, di conseguenza, un cambiamento dei problemi da proporre all'indagine scientifica e dei criteri secondo i quali la professione stabiliva che cosa si sarebbe dovuto considerare come un problema ammissibile o come una soluzione legittima di esso”.*

T. Kuhn

#### **Premessa**

Cosmologia deriva dai termini greci *κόσμος* (ordine, armonia) e *λόγος* (studio). La cosmologia è quindi lo studio di qualcosa di ordinato. Ora, *κόσμος* è usato anche nel significato di universo, mondo; pertanto sembra esserci nella cultura greca, quindi *in nuce* nel pensiero occidentale, una sorta di preconetto concernente l'universo come qualcosa di ordinato. Infatti Aristotele associava la perfezione dell'universo e la sua finitezza, unicità ed eternità: considerare l'universo infinito avrebbe significato ammettere l'incompletezza, essendo per definizione l'infinito mai compiuto.

Una rivoluzione della "scienza" è soprattutto una rivoluzione dei suoi metodi. Con essi cambia il modo di rapportarsi alla realtà e quindi cambia l'immagine dell'universo. La scienza sperimentale non è la scienza che si affanna a dare risposte

\*A cura di Giulia Grassini, Serena Rosadi, Niccolò Terreri

Classe V sez. A - a.s. 2008/2009 - Liceo Scientifico.

Docente: Maria Concetta Bianconi.

circa l'essenza delle cose. La scienza non prescinde dall'osservazione, nel senso che pretende di produrre risultati numerici. Le qualità misurabili sono l'orizzonte dell'indagine scientifica.

## L'uovo di Piero

La ricerca pittorica di Piero della Francesca mira a fermare ogni oggetto in una forma geometrica ideale. L'arte figurativa rinascimentale, come quella classica e neoclassica, enfatizza la perfezione e quindi l'immobilità di ogni particolare della natura; ma, a differenza di queste ultime, trova la sua ragione nell'armonia matematica.

Nella *Pala* di Brera, *summa* delle esperienze pierfrancescane, la composizione si svolge secondo un complesso di linee curve che schematizzano e definiscono la scena in un impianto prospettico che congela l'afflato del momento, edificato con matematico rigore.

La circonferenza domina la scena non soltanto strutturalmente, ma anche prospetticamente e concettualmente: se il punto di fuga conduce alla Madonna, lo sguardo viene guidato non soltanto dalle linee rette, ma è la marcata insistenza di circonferenze concentriche sulla volta a canalizzare l'attenzione.

Tali circonferenze si succedono prima nell'arco, poi nella conchiglia, la cui forma schiacciata viene compensata da quella ellissoidale dell'uovo.

L'uovo, su cui la luce cade uniformemente a sottolinearne la forma, rappresenta il fulcro concettuale dell'opera.

Esso sintetizza i fondamenti matematici della pittura di Piero, il cui intento non è quello di un matematico ma di un artista che vuole rappresentare il sentimento che chiunque prova di fronte all'assoluta perfezione della matematica.

La rivoluzione astronomica del '500 prende vita a partire dall'arte, per poi proseguire in un dibattito sia filosofico che "scientifico", un dibattito che si sviluppa durante i secoli avvenire. Nostra intenzione è quella di richiamare l'attenzione del lettore, su questo dibattito, cogliendone soprattutto il lato filosofico.

## Niccolò Copernico

“Sebbene l’idea mi sembrasse assurda, poiché sapevo che ad altri prima di me era stata data la libertà di immaginare una cosa del genere ..., pensai che anche a me sarebbe concesso di ricercare se, assunto per ipotesi un certo moto della Terra, fosse possibile trovare dimostrazioni della rivoluzione delle sfere celesti più sicure delle loro [cioè di quelle tolemaiche]. Assunti quindi i moti che nell’opera io attribuisco alla Terra....., non solo tutti i fenomeni trovano conferma, ma anche l’ordine e la magnificenza di tutte le stelle (compreso i pianeti) e le sfere e il cielo stesso risulta così collegato che in nessuna sua parte non si può spostare nulla senza generare confusione delle parti e del tutto.”

“Non posso trovar termine all’ammirazione mia come abbia possuto [...] nel Copernico la ragione tanta violenza al senso, che contro a questo ella si sia fatta padrona del loro credere.” (Galileo Galilei)

L’astronomo polacco Niccolò Copernico (1473 Torun– 1543 Frombork) con la sua teoria eliocentrica segna la svolta verso un’astronomia che si basa non tanto su una teoria filosofica come quella aristotelico- tolemaica, quanto su principi ricavati da un ideale matematico neopitagorico di semplicità, nonché su nuove esigenze pratiche. Propose, quindi, un’interpretazione del moto dei pianeti basata sull’ipotesi eliocentrica, mostrando come le difficoltà che incontrava la cosmologia tolemaico-aristotelica si risolvessero ammettendo la rotazione della terra intorno al sole e intorno al proprio asse. In questo modo veniva rafforzata l’ipotesi che la natura tende a raggiungere i suoi effetti coi mezzi più semplici.

Copernico supera la teoria elaborata dal filosofo greco, che prevedeva un geocentrismo in cui la terra è circondata da otto sfere compatte e impenetrabili che ruotano intorno ad essa, non prevedendo però la rotazione di questi corpi celesti, che rimangono incastonati in esse. (Aristotele stesso aveva riscontrato delle anomalie nel sistema delle sfere: le variazioni di luminosità di Venere e Marte gli avevano reso necessario moltiplicare il numero delle sfere fino a 55).

In realtà egli si chiese se non fosse possibile qualche altro modello per spiegare i moti degli astri, dal momento che era evidente che i matematici non avevano le idee chiare: erano incapaci di prevederne i moti e non riuscivano a rendere coerentemente conto del moto delle stelle e dei pianeti. Così si chiese se non esistesse una teoria sicura del meccanismo dell’universo e si mise a cercare nel

passato modelli alternativi a quello dominante. Trovò opinioni riportate da voci autorevoli (Cicerone) e in particolare prese spunto dalle convinzioni di alcuni pitagorici. Nonostante le imprecisioni, la centralità dell'uomo nel creato era un elemento di sicurezza che la Chiesa aveva voluto salvaguardare, supportata anche dal senso comune, non solo del volgo, ma generalmente proprio di una persona di buon senso che osservava da un punto fisso il cielo e perciò percepiva reale il movimento del Sole piuttosto che quello della Terra attorno ad esso. "Nessun uomo nel pieno possesso delle proprie facoltà mentali, oppure dotato delle più elementari nozioni di fisica, potrà mai credere che la Terra, grave e tarda per il suo proprio peso e per la sua massa, si agiti su e giù girando attorno al suo centro".

Nel *De revolutionibus orbium caelestium* Copernico inizia a scardinare i capisaldi della teoria geocentrica, fondando la sua nuova ipotesi su uno studio matematico rigoroso ed approfondito dei dati riscontrati personalmente e da altri astronomi. Ipotizzando una visione eliocentrica, i calcoli sulla previsione delle posizioni degli astri risultavano semplificati e più precisi. Un approccio del genere è, più che scientifico, antimetafisico, non distante dalle raccomandazioni di Ockham. Resta da notare comunque che Copernico è ancora un metafisico.

Copernico sconvolge il sistema del mondo. Eppure egli trascina nel suo nuovo mondo molte caratteristiche e strutture del vecchio mondo. Il mondo di Copernico non è un universo infinito, la forma perfetta è quella sferica e il moto naturale circolare. I pianeti non si muovono in orbite, ma sono trasportati da sfere cristalline che ruotano e che hanno realtà materiale. Nel modello eliocentrico a cambiare è l'impostazione dell'universo, poiché il Sole si trova al centro ed è immobile, mentre sono i pianeti a ruotare attorno ad esso. Rimangono comunque delle caratteristiche del modello precedente, su alcune delle quali tornerà Keplero.

Da notare che la storia dell'astronomia è influenzata dal contesto storico in cui muove i suoi primi passi. Copernico aveva dato un'interpretazione realistica della propria teoria, ma della stampa del manoscritto si occupò il teologo Osiander, che fece precedere l'opera da una prefazione che interpretava la teoria di Copernico in senso puramente strumentale. Ovvero, tale modello era semplicemente un utile strumento di calcolo e non riguardava la reale natura delle cose celesti. La teoria di Copernico risultò rivoluzionaria proprio perché non si limitò a rattoppare il sistema tolemaico che ormai era divenuto obsoleto, ma propose un nuovo paradigma. Anche se questo nuovo paradigma incontrò problemi nuovi, aggravava tuttavia quelli insormontabili del vecchio sistema, definito da Copernico un 'mostro'.

Il successo di Copernico non fu immediato. La maggior parte degli astronomi accettò la verità matematica del sistema copernicano, negandone però quella fisica, seguendo quanto aveva intuito Osiander.

## **Tycho Brahe**

“Presi a meditare tra me stesso profondamente se mai si potesse trovare una qualche ipotesi che non fosse in contrasto né con la matematica né con la fisica, e che non dovesse sfuggire di nascosto alle censure teologiche [...] quasi insperatamente mi venne in mente in quale maniera debba essere disposto opportunamente l'ordine delle rivoluzioni celesti così che fosse preclusa ogni occasione per tutte queste incongruenze.”

La difficoltà di imporre la novità del sistema copernicano in un contesto culturale nel quale era ancora radicato il sistema geocentrico, venne riproposta dal delinearci del sistema di Tycho Brahe (Castello di Knutstoep 1546, Praga 1601); d'altra parte, però, il merito di Tycho Brahe fu quello di favorire il definitivo abbandono del modello tolemaico-aristotelico, anche se l'intento dell'astronomo danese era stato soltanto quello di proporre una mediazione. Egli fu il più grande astronomo osservatore ad occhio nudo di tutti i tempi. A lui si deve l'abbandono della cosmologia delle sfere cristalline. Giunse a questa scoperta attraverso lo studio del tragitto delle comete. Si sostituiva così il concetto di orbita a quello di sfera. Inoltre egli osservò nel cielo l'apparire di stelle nuove, molto luminose e in precedenza non rilevate, che sparivano in fretta.

Brahe non era un copernicano, ma al tempo stesso considerava incoerente il modello tradizionale, e non aveva preferenze per l'uno o per l'altro. La soluzione da lui proposta fu quella del compromesso. Il sistema di Copernico e quello di Brahe si equivalgono geometricamente, cambiando però il punto di riferimento: tutti i pianeti ruotano intorno al Sole, ma questo e la Luna ruotano intorno alla terra. Egli affidò il proprio sistema al suo allievo Keplero, che però era affezionato alla simmetria del sistema copernicano e rifuggì infine dal compromesso.

## Johannes Kepler

Non ci fu forse mai un ricercatore scientifico che, come Johannes Kepler, accogliesse tante influenze, pur assumendo verso di esse un atteggiamento critico, e la cui immaginazione volasse così in alto e la cui mente restasse nondimeno così fredda; che si lasciasse tanto trasportare dalla propria immaginazione e fosse poi in grado di esaminare con sobrietà e pazienza se i suggerimenti di questa fossero effettivamente sostenibili. Solo questa combinazione di ispirazione ed esattezza rese il suo pitagorismo veramente fecondo e mantenne il suo misticismo matematico al servizio della scienza. Misticismo, matematica, astronomia e fisica sono strettamente, anzi inestricabilmente associate nella sua mente.

Keplero nacque nel 1571 nei pressi di Stoccarda e morì a Ratisbona nel 1630.

Fu un fervido sostenitore del modello copernicano e un ammiratore dei modelli neoplatonici e neopitagorici nel campo delle matematiche, profondamente affascinato da tutto ciò in cui si potesse scorgere un'armonia matematica; aveva una concezione mistica delle scienze naturali. Attribuì un carattere matematico alla divina Ragione di Dio. Keplero, quindi, basandosi su suggestioni pitagoriche, considerava Dio un matematico che aveva creato il mondo secondo parametri armonici e geometrici.

Più profondamente di Copernico è un metafisico. Nell'opera *Armonia mundi* è esposta una descrizione del Sole come forza motrice dei moti celesti. La convinzione che l'Universo doveva essere stato creato prendendo a modello la perfetta armonia dei numeri e delle figure geometriche lo portò in un primo tempo a cercare di spiegare il numero dei pianeti (sei con la Terra) e le dimensioni delle loro orbite intorno al Sole mediante la successione delle sfere inscritte e circoscritte ai cinque solidi perfetti della geometria.

Partendo dalla prima sfera, quella di Saturno, nonché la più esterna, si procede verso l'interno inscrivendo un solido geometrico regolare che a sua volta circoscrive la sfera successiva. La sfera della Terra era inscritta nel dodecaedro inscritto nella sfera di Marte, e così via per Venere (icosaedro) e per Mercurio (ottaedro).

A differenza di Tolomeo, il modello di Keplero non doveva essere solo qualitativo, ma doveva corrispondere alle osservazioni entro i limiti assai precisi dei dati ottenuti da Brahe. Questa caparbia ricerca della precisione *pene usque ad insaniam* (fin quasi ad impazzirne), la fervida immaginazione e il coraggio di abbandonare

qualsiasi teoria davanti all'evidenza dei fatti lo porteranno ad assumere dapprima che la velocità dei pianeti sull'orbita non fosse costante e successivamente che l'orbita non fosse circolare ma ellittica, con il Sole in uno dei suoi fuochi, abbandonando così definitivamente l'assioma platonico che imponeva ai pianeti solo moti circolari ed uniformi.

Esaminiamo dunque le tre leggi formulate da Keplero.

La prima è la legge delle orbite e riguarda la loro forma.

Esse sono ellittiche (con un'eccentricità non elevata), e il Sole occupa uno dei fuochi. Inoltre le orbite sono pressoché complanari (solo Plutone ha un'inclinazione diversa di circa 17 gradi).

La seconda è la legge delle aree e interessa la velocità: il raggio vettore (che collega la posizione della Terra a quella del Sole) percorre aree uguali in tempi uguali, determinando momenti di velocità maggiore (fino a un massimo di 30,3 km/s) in perielio e momenti di velocità minore (fino a un minimo di 29,3 km/s) in afelio. Ciò è importante anche nel valutare la diversa durata delle stagioni astronomiche.

La terza è la legge dei periodi, o legge armonica, che prescrive l'equazione  $t^2 = kd^3$ , che considera tutti i pianeti, e nel caso della terra assume come valori  $t =$  un anno terrestre,  $k = 1$  e  $d =$  un'unità astronomica.

## Galileo Galilei

Nacque a Pisa nel 1564 da un musicista e commerciante, e studiò matematica, legando lo studio della matematica ad osservazioni sulla natura. Si dedicò all'insegnamento a Padova, poi fu a Firenze, dove si concentrò su ricerche astronomiche. Venne processato a Roma, dal Tribunale dell'Inquisizione, causa del suo copernicanesimo. Morì ad Arcetri nel 1642.

L'atteggiamento scientifico di Galileo appare caratterizzato da uno spirito pieno di vitalità, diverso dalla figura di un freddo e dimesso razionalista. Galileo fu in realtà un fisico, nel senso moderno della parola, piuttosto che un astronomo; tuttavia portò dei contributi essenziali all'affermarsi del pensiero copernicano. Tali contributi riguardarono sia gli aspetti strettamente scientifici sia quelli più generali relativi al dibattito culturale e al rapporto tra Scienza e Fede. Un grande aiuto gli venne dato dal cannocchiale, che lui costruì servendosi di un modello

rudimentale, fornitogli da un “fiammingo”. Fu comunque Galileo ad introdurre il cannocchiale all'interno della pratica scientifica.

Nel 1610 pubblicò a Venezia il *“Sidereus Nuncius”*, nel quale riportava i risultati delle sue osservazioni, che testimoniavano irregolarità sulla superficie lunare, contro la teoria aristotelica che voleva le sfere celesti immutabili e perfette. Inoltre l'orizzonte astronomico si allargava per la scoperta di innumerevoli stelle e dei satelliti di Giove, che Galileo battezzò “Stelle Medicee”, spezzando ancora una lancia a favore della teoria copernicana.

“... Grandi invero sono le cose che in questo breve trattato io propongo alla visione e alla contemplazione degli studiosi della natura. Grandi, dico, sia per l'eccellenza della materia per se stessa, sia per la novità loro non mai udita in tutti i tempi trascorsi, sia anche per lo strumento, in virtù del quale quelle medesime cose si sono rese manifeste al senso nostro. Gran cosa è l'aggiungere, sopra la moltitudine delle stelle fisse che fino ai nostri giorni si son potute scorgere con la naturale facoltà visiva, altre innumerevoli stelle non mai scorte prima d'ora, ed esporle alla vista in numero più di dieci volte maggiore di quelle già note.

[...] Bellissima cosa, e oltremodo a vedersi attraente, è il poter rimirare il corpo lunare, da noi remoto per quasi sessanta diametri terrestri, così da vicino, come se distasse soltanto due di dette misure; ... e quindi con la certezza che è data dall'esperienza sensibile, si possa apprendere non essere affatto la Luna rivestita di superficie liscia e levigata, ma scabra e ineguale, e allo stesso modo della Terra, presentarsi ricoperta in ogni parte di grandi prominente, di profondi valli e di anfratti”.

Nel 1632, confidando nella benevolenza di Urbano VIII Barberini, già suo estimatore quando era ancora cardinale, Galileo pubblicò il suo capolavoro: *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, un'opera di tipo trattatistico-scientifico, sebbene scritta come un dialogo filosofico, che riscosse un successo così largo che la Chiesa, l'anno dopo, la inserì nell'Indice dei Libri Proibiti. Nonostante la lettera introduttiva sia una dissimulazione, attraverso la quale Galileo cerca di conformarsi alle opinioni dominanti nel suo tempo, nel corso dell'opera si rivelano apertamente le idee anti-aristoteliche dello scienziato, così come appare la sua adesione a quelle copernicane. L'importanza letteraria del *Dialogo* consiste soprattutto nella sua accessibilità ad un pubblico colto di non specialisti, un significativo esempio di moderna divulgazione scientifica.

I personaggi del dialogo sono Simplicio, Salviati e Sagredo, rispettivamente

l'aristotelico, il copernicano e il pubblico aperto alla novità e disposto a conoscere le ragioni dell'una e dell'altra parte. Galileo fu nuovamente processato e costretto infine all'abiura di tutte le sue teorie. Occorre precisare che Galileo non si oppose all'abiura, probabilmente per evitare la distruzione dei risultati dei suoi studi, e per permettere che la ricerca fosse portata avanti dai suoi discepoli, convinto e fiducioso che i tempi sarebbero stati presto maturi per accogliere ed accettare ciò che lui aveva scoperto.

Alla radice degli attriti tra Galileo e la Chiesa sta l'interpretazione letterale della Bibbia, che non potendo essere contraddetta risultava in netta opposizione con le asserzioni dello scienziato. D'altronde anche il lavoro di Copernico veniva perlopiù accettato nell'interpretazione strumentalistica, in base alla quale essa non descriveva la realtà delle cose, che si poteva invece rinvenire nel Testo Sacro. Galileo era fondamentalmente un sostenitore della teoria copernicana e suffragava tale teoria attraverso il suo metodo di ricerca.

“più aristotelicamente filosoferete dicendo che il cielo è alterabile perché così mi mostra il senso, che se direte che il cielo è inalterabile perché così ha discorso Aristotele”

Di fatto, il problema della distinzione tra fede e scienza affonda le radici nel problema della scolastica: la conciliazione tra fede e filosofia.

Galileo nelle *Lettere Copernicane* propose una soluzione per il problema del rapporto tra scienza e fede, sostenendo che l'insegnamento della Bibbia riguardava il destino dell'uomo e non la conoscenza della natura. La Scrittura non è un trattato di astronomia: l'interpretazione della Bibbia è appropriata ai bisogni della fede; pertanto la scienza sperimentale e la fede non sono in contrasto.

Il cosmo in Galileo è il gran libro della natura scritto in caratteri matematici, ma, a differenza di Keplero, questo punto di vista non ha un'impronta mistica e "pitagorica", tanto che fede e scienza sono due concetti distinti ed autonomi. Galileo non grava la natura di altro che del suo carattere matematico, mentre Keplero si sforza di ritrovare in essa un significato armonico ulteriore, al punto che accoglierà con ostilità la nuova dell'esistenza dei pianeti medicei, che rendevano un pianeta simile al sole, l'oggetto più massivo della 'galassia'. Trovava in questo una sproporzione, una mancanza d'armonia.

Nella *Lettera a Madama Cristina di Lorena, granduchessa di Toscana* (1615) Galileo scrive: "mi par che nelle dispute di problemi naturali non si dovrebbe cominciare dalle autorità di luoghi delle Scritture ma dalle sensate esperienze e dalle dimostrazioni necessarie.[...] Pare che quello degli effetti naturali che o la sensata esperienza ci pone dinanzi agli occhi o le necessarie dimostrazioni ci

concludono, non debba in conto alcuno esser revocato in dubbio, nonché condannato per luoghi della Scrittura che avessero nelle parole diverso sembiante.”

La cosmologia subisce un cambiamento di paradigma. Adotta il metodo della scienza, procedendo in base ad osservazioni e verifiche sperimentali di teorie. Non si basa più sul “mondo di carta” dell'autorità dei filosofi.

## *Principi fisici della Risonanza Magnetica\**

La Risonanza Magnetica (RM) è un esame diagnostico che permette di visualizzare l'interno del nostro corpo senza effettuare operazioni chirurgiche o somministrare pericolose radiazioni ionizzanti.

Ideata e messa a punto intorno al 1980, la Risonanza Magnetica ha subito nel corso degli anni un costante processo di evoluzione tecnologica. Oggi, grazie alla sua estrema precisione diagnostica e all'assenza quasi totale di effetti collaterali, si è conquistata un ruolo di primaria importanza nella diagnosi di numerosissime malattie.

Prima di affrontare problemi di natura tecnica, riguardanti i principi fisici su cui si basa la RM, occorre inserire in un quadro storico le importanti scoperte scientifiche che hanno portato alla messa a punto di questo sofisticato *macchinario*.

A scoprire il fenomeno della risonanza furono nel 1946 i fisici americani Felix Bloch ed Edward Purcell, studiando i protoni. Entrambi i ricercatori ebbero il Nobel nel 1952. Da allora la Risonanza Magnetica venne utilizzata prevalentemente per studiare la struttura chimica delle sostanze. Soltanto nel 1973 Paul Lauterbur quasi per caso individuò un campo magnetico modificato a causa dell'irregolarità in un magnete. Fu cercando di comprendere lo strano fenomeno provocato dall'incidente tecnico che si aprì la strada alla diagnosi con la Risonanza Magnetica. Peter Mansfield perfezionò ulteriormente la tecnica: introdusse variazioni più forti in campi magnetici più potenti, ottenendo così immagini molto più dettagliate.

Il fenomeno della Risonanza Magnetica (RM) può essere indotto su una varietà di nuclei diversi. La formazione delle immagini RM si basa tuttavia sull'induzione del fenomeno RM sui nuclei dell'idrogeno, poiché molto abbondanti nei tessuti umani (il 70% circa del nostro corpo è infatti composto da  $H_2O$ ).

Il nucleo dell'idrogeno ( $^1H$ ) è costituito da un singolo protone. Ciascun protone possiede una carica elettrica, inoltre ha la caratteristica particolare di ruotare attorno al proprio asse, cioè possiede un momento angolare intrinseco o "spin". Come conseguenza, poiché il protone ha una carica elettrica, il moto di rotazione

**\*A cura di Matteo Cesari**

**Studente del Liceo Scientifico "Città di Piero" di Sansepolcro (AR)**

**Classe VD, a.s. 2009/2010**

produce un momento magnetico con orientamento parallelo al momento angolare. Si può immaginare il protone come una particella che ruota intorno al proprio asse e che, ruotando, produce un campo magnetico che lo rende simile ad un piccolissimo magnete (Cfr. Fig. 40).

In assenza di campo magnetico esterno, i momenti magnetici sono disposti casualmente nello spazio (Cfr. Fig. 41).

Quando il paziente viene immerso nel campo magnetico del tomografo RM (il macchinario della RM può essere pensato come un grande solenoide), i momenti magnetici associati ai nuclei di idrogeno nel corpo del paziente tendono ad orientarsi lungo la direzione del campo magnetico (come l'ago di una bussola si orienta verso una calamita).

Più precisamente, mentre i nuclei di idrogeno ruotano intorno al proprio asse, quest'ultimo ruota a sua volta attorno alla direzione del campo magnetico esterno, mantenendo con esso un angolo costante. Questo moto complesso è detto moto di precessione, ed è simile al moto di una trottola attorno al campo gravitazionale terrestre (Cfr. Fig. 42).

La frequenza di precessione (ovvero il numero di rotazioni compiute in 1 secondo) è caratteristica del nucleo atomico, è proporzionale alla forza del campo magnetico applicato ed è chiamata frequenza di Larmor (ad esempio per il protone, nucleo dell'idrogeno, in presenza di un campo magnetico di 1 Tesla, la frequenza di Larmor è di 43 milioni di Hertz e raddoppia in presenza di un campo magnetico di 2 Tesla).

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (42,5 \text{ MHz/T})$$

Due sono le principali caratteristiche di questo moto di precessione (Cfr. Fig. 43):

- può avvenire in direzione parallela o anti-parallela a  $B_0$ . Alla configurazione parallela corrisponde uno stato energetico inferiore, più stabile e quindi più probabile;
- avviene con fasi di rotazione diverse (se i momenti magnetici fossero le lancette di tanti orologi, queste segnerebbero ore diverse).

A questo punto i momenti magnetici dei singoli nuclei di idrogeno si sommano generando un campo magnetico rilevabile anche a livello macroscopico, orientato con la stessa direzione e lo stesso verso del campo magnetico  $B_0$  applicato all'esterno

(la configurazione parallela è infatti la più frequente). Globalmente, pertanto, quando si immerge il paziente nel campo magnetico del tomografo, il corpo del paziente risulta "magnetizzato".

Volendo rappresentare su un sistema di assi cartesiani il fenomeno della precessione per un singolo protone, ci si presenta una situazione simile a quella della Figura 44 (Cfr. Fig. 44)

A questo punto viene inviato al paziente un impulso elettromagnetico (cioè un'onda elettromagnetica di durata limitata) a radiofrequenza (RF), cioè della stessa lunghezza d'onda delle trasmissioni radiofoniche o dei cellulari. Per comprendere cosa avviene in seguito si deve specificare che un'onda elettromagnetica può essere descritta come un campo magnetico e un campo elettrico (o elettromagnetico) oscillanti perpendicolarmente tra di loro (Cfr. Fig. 45).

Le principali caratteristiche di questo impulso sono:

- la sua frequenza di oscillazione è esattamente pari alla frequenza di Larmor
- il campo magnetico  $B_1$ , componente dell'onda elettromagnetica, deve essere di intensità molto minore rispetto a  $B_0$  e perpendicolare a questo.

In tal modo viene fornita energia al corpo del paziente, così che alcuni nuclei di H passano ad uno stato energetico superiore. Questo effetto ha come conseguenza una diminuzione della componente della magnetizzazione in direzione z, ma compare una componente della magnetizzazione sul piano xy.

Se l'impulso ha durata sufficiente, si può creare la situazione in cui  $M_z=0$  e  $M_{xy}$  è massima: la magnetizzazione che era diretta come z, dopo l'impulso RF, si è piegata di un angolo  $90^\circ$  sul piano xy (Cfr. Fig. 46).

Questo fenomeno di interazione tra il campo magnetico  $B_0$  e il campo magnetico  $B_1$  dell'impulso RF con frequenza uguale alla frequenza di Larmor, con assorbimento di energia da parte dei nuclei, rappresenta il fenomeno di Risonanza Magnetica.

Quando l'impulso RF viene interrotto, i nuclei, interagendo con la materia circostante, tendono a ripristinare il loro stato originale. Durante questa fase il sistema restituisce l'energia assorbita, sotto forma di onde elettromagnetiche della stessa frequenza dell'impulso RF (segnale RM). Questi segnali vengono dunque elaborati ed interpretati, riuscendo così a produrre immagini come quelle riportate in Figura 47 (Cfr. Fig. 47).



## *La radioastronomia e le sue applicazioni\**

Come si è visto per la Risonanza Magnetica, le onde elettromagnetiche rappresentano un'importante risorsa nell'ambito scientifico. Queste vengono utilizzate sia per ricerche di tipo microscopico, sia anche per ricerche che indagano fenomeni macroscopici: ne è un esempio la radioastronomia.

Prima di analizzare gli strumenti di cui questa scienza si serve e quali siano state le più importanti scoperte scientifiche a cui si è giunti attraverso questi mezzi, occorre soffermarsi sul concetto di radiazione elettromagnetica.

Tutto ciò che ci circonda è osservabile solamente perché illuminato e la luce non è altro che un insieme di radiazioni elettromagnetiche, che si propagano con una velocità costante e finita ( $c \sim 300\,000\text{ km/s}$ ). Ogni radiazione può essere rappresentata come un'onda, distinguibile dalle altre per frequenza  $\nu$  e lunghezza d'onda  $\lambda$ . (Cfr. Fig. 48)

La frequenza di un'onda è il numero di oscillazioni complete che un punto dell'onda compie nell'unità di tempo e si misura in hertz (Hz); la lunghezza d'onda è la distanza tra due massimi o due minimi e si misura in multipli e sottomultipli del metro (m).

Poiché le onde elettromagnetiche si muovono tutte alla stessa velocità, la loro frequenza è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda.

$$c = \nu \lambda$$

La luce visibile è costituita da radiazioni elettromagnetiche con lunghezze d'onda comprese tra 400 e 700 nm circa. Il campo delle radiazioni elettromagnetiche si estende tuttavia oltre l'intervallo di lunghezze d'onda visibili e comprende i raggi ultravioletti, i raggi x, i raggi  $\gamma$  (radiazioni con maggiore frequenza rispetto alla luce visibile), i raggi infrarossi, le microonde e le onde radio (radiazioni con minore frequenza rispetto alla luce visibile).

Le radiazioni elettromagnetiche trasportano energia sotto forma di fotoni. Ogni fotone (secondo le teorie quantistiche) trasporta una quantità definita e discreta di energia, tanto che può essere considerato una particella di luce. L'energia dei

**\*A cura di Matteo Cesari.**

**Studente del Liceo Scientifico "Città di Piero" di Sansepolcro (AR)**

**Classe VD, a.s. 2009/2010.**

fotoni dipende dalla frequenza, le due grandezze sono infatti direttamente proporzionali, secondo la formula:

$$E = hv$$

dove  $E$  rappresenta l'energia,  $h$  la costante di Planck ( $6,63 \cdot 10^{-34}$  Js) e  $v$  la frequenza (Cfr. Fig. 49)

Nella radioastronomia, così come per la Risonanza Magnetica, si utilizzano le onde radio, ovvero quelle che hanno una lunghezza d'onda superiore al metro. Questa scienza ha avuto un notevole sviluppo negli ultimi 30 anni e ha fornito un contributo prezioso alla ricerca.

Come molte tra le principali scoperte, anche quella della radioastronomia fu quasi accidentale: essa ebbe infatti origine da ricerche sui parassiti atmosferici che, nel gergo dei radiotecnici, sono quella specie di rumori udibili quando si accende un apparecchio radio in condizioni atmosferiche perturbate. Il protagonista della nascita di questa nuova scienza fu Karl Jansky che nel 1933 pubblicò i risultati delle sue prime osservazioni.

Egli, appena laureatosi radioingegnere, accettò di recarsi in un piccolo paesino del New Jersey per realizzare un progetto che aveva come obiettivo l'eliminazione dei rumori di fondo e interferenze che disturbavano i circuiti transoceanici di una compagnia marina. Mentre parte del suo lavoro si svolgeva su lunghezze d'onda intorno ai 4000 m, egli sperimentava anche su onde di 14,6 m.

Nel marzo del 1929 Jansky fece il disegno e iniziò la costruzione della famosa antenna e del suo apparato ricevente (Cfr. Fig. 50).

Dopo la costruzione del suo ricevitore, cominciò per Jansky il lungo, prosaico lavoro di raccogliere dati, ossia le caratteristiche e le intensità dei rumori ricevuti su 14,6 m di lunghezza d'onda, tenendo conto della loro direzione d'arrivo e del tempo. Ne risultò una classificazione in cui si distinguevano tre gruppi di rumori: il primo provocato dai temporali locali, il secondo da temporali lontani ed un terzo gruppo. "Questo gruppo – egli notava – è composto di un sibilo persistente di origine ancora sconosciuta. Ci vorrà ancora qualche altro mese di osservazioni prima di poterne dedurre qualcosa".

La caratteristica principale era che la massima intensità di questo rumore sembrava giungere da una misteriosa trasmittente in moto così regolare attraverso il cielo da potersene prevedere in anticipo la posizione anche per lunghi periodi di tempo. Dopo un anno di osservazioni ecco che il massimo del disturbo proveniva di nuovo dalla medesima direzione trovata nelle osservazioni fatte un anno prima.

Nessuna stazione radio avrebbe potuto lanciare un segnale continuo di simile frequenza, variandone costantemente la direzione nel corso dell'anno. Inoltre questa medesima regolarità scartava l'ipotesi di rumori provocati da perturbazioni atmosferiche. Il suo continuo avanzare lungo il giro dell'orizzonte alle diverse ore del giorno e col procedere delle stagioni fece pensare a Jansky che l'origine dovesse ricercarsi fuori della Terra, e prima di tutto ipotizzò che dipendesse dal Sole. Ben presto, invece, si avvide che non coincideva con il Sole, ma si spostava regolarmente in avanti di 4 minuti ogni giorno (questo si spiega per i due moti di rivoluzione e di rotazione che la Terra compie).

Quella particolare specie di segnali che egli aveva individuato, che rassomigliava ad un sibilo, non proveniva dunque né da trasmettenti terrestri, né da tempeste e nemmeno dal Sole, ma addirittura da un luogo del cielo nella costellazione del Sagittario. Essa, secondo gli astronomi, contrassegnava il cuore stesso della Via Lattea, distante all'incirca 27000 anni luce. La "giostra" era diventata così il primo radiotelescopio.

Con la nascita della radioastronomia sono stati assai numerosi ed importanti i vantaggi anche per l'astronomia classica. Nel tempo inoltre si sono perfezionati sempre più i radiotelescopi, tanto che essi oggi riescono ad elaborare e percepire segnali molto deboli.

La grandezza tipica di un radiotelescopio a parabola è di 25 metri. Il grande diametro dei questi telescopi è necessario perché le emissioni radio in arrivo dai corpi celesti sono debolissime (Cfr. Fig. 51).

La costruzione delle antenne è invece meno difficile di quanto possa sembrare perché, come in ogni telescopio, la loro superficie può permettersi di contenere errori non più grandi di una piccola frazione della lunghezza d'onda osservata. Mentre per i telescopi ottici questo comporta precisioni elevatissime (milionesimi di millimetro), per i radiotelescopi errori di interi millimetri sono a volte accettabili.

La debolezza delle emissioni radio celesti fa sì che i radiotelescopi moderni siano, grazie al loro grande diametro e alla sofisticata tecnologia dei ricevitori, estremamente sensibili.

I radiotelescopi possono osservare molti tipi di oggetti diversi: le *pulsar* radio o i *quasar* sono gli esempi più famosi e spettacolari, ma osservazioni egualmente importanti e possibili solo con i radiotelescopi sono la mappatura dell'idrogeno (che consente di ricavare la "geografia" della nostra e delle altre galassie in modo molto accurato) e la misura dell'abbondanza dei diversi elementi e molecole nello

spazio. I radiotelescopi sono anche usati per compiti come la comunicazione con le sonde spaziali attualmente in viaggio, e per misure riguardanti il moto della Terra e la deriva dei continenti.

Uno dei traguardi nel campo della radioastronomia è la scoperta della *radiazione cosmica di fondo* (CMBR), avvenuta nel 1964 per opera di Penzias e Wilson, due radioastronomi che lavoravano per il Bell Telephone Laboratory, lo stesso per cui operava Jansky quando fece le sue scoperte. La rivelazione della radiazione cosmica di fondo costituisce, insieme al moto di espansione dell'universo e alle abbondanze chimiche di He regolari in ogni luogo dell'Universo (inspiegabili se questo fosse stato prodotto solo dalle stelle), una delle prove del Big Bang.

I due studiosi eseguivano ricerche finalizzate a misurare l'intensità delle onde radio emesse dalla nostra Galassia, per eliminare i rumori di fondo che potevano impedire una corretta analisi di altri segnali radio. Tuttavia con un radiotelescopio captarono un rumore radio persistente che proveniva uniformemente da tutte le direzioni del cielo e che si manteneva costante nonostante gli sforzi di correzione di difetti dell'antenna.

Si trattava di radiazioni elettromagnetiche a bassa energia con lunghezza d'onda variabile tra 60 cm e 0,6 mm, con un massimo in corrispondenza del valore di 0,2 cm.

Perplessi per i risultati ottenuti, Penzias e Wilson si misero in contatto con gli astrofisici di Princeton i quali, attraverso modelli teorici, avevano avanzato l'ipotesi che una radiazione fossile, residua del Big Bang, permeasse tuttora l'Universo. Secondo tali modelli, la radiazione fossile sarebbe costituita da fotoni, che avrebbero percorso l'Universo in espansione trasformandosi in onde radio a causa dell'effetto Doppler.

Successivamente, grazie alle misurazioni effettuate con il COBE (1989) e con il WMAP (2001), si è dimostrato che la radiazione scoperta dai due radioastronomi era proprio la radiazione fossile. Si dimostrò inoltre che la radiazione cosmica di fondo presenta lievi variazioni di intensità nelle diverse variazioni dello spazio. Ciò significa che la materia nell'Universo primordiale non era distribuita in modo omogeneo: tali fluttuazioni di temperatura (dell'ordine di 0.0002 K) permisero la formazione delle Galassie.

## ITIS “Leopoldo e Alice Franchetti” di Città di Castello\*

### *Caratteristiche dei Telescopi Astronomici*

#### **Introduzione.**

Come funziona un telescopio? Perché ci sono tanti tipi di telescopi? E quello di Ugo Galli che tipo di telescopio è? Ecco alcune domande che gli studenti stessi si sono poste e che hanno dato il via al lavoro di ricerca che alcuni alunni della classe 4<sup>a</sup>E (a.s. 2009/10) dell'ITIS “Franchetti” – Liceo Scientifico Tecnologico – hanno svolto nell'ultima parte dell'anno scolastico. Il lavoro ha prodotto tre testi qui riportati insieme. Il primo è un'introduzione ai telescopi astronomici e presenta i vari tipi di strumenti disponibili sia per gli scienziati che per gli astrofili. Nel secondo testo vengono discusse le varie montature dei telescopi. Il telescopio di Ugo Galli ha proprio nella meccanica solida e precisa della montatura il suo punto di forza ed il testo qui presentato spiega quali sono le caratteristiche generali di questa importante componente dei telescopi. Infine, nell'ultimo testo vengono discusse le due aberrazioni dei telescopi: la sferica e la cromatica. In particolare l'ultima aberrazione ha per anni penalizzato i rifrattori rispetto ai riflettori e solo recentemente i rifrattori stanno riguadagnando il mercato nell'ambito degli strumenti amatoriali.

#### **I telescopi astronomici**

I telescopi astronomici sono strumenti ottici attraverso i quali è possibile esplorare l'Universo che ci circonda. Sostanzialmente si tratta di strumenti in grado di catturare molta più luce di quanto non possa fare l'occhio umano e quindi di rivelarci oggetti altrimenti a noi invisibili. Inoltre, consentono un notevole

**\*A cura di Nicola Belei, Matteo Campanelli, Andrea De Angelis, Michele Ferri, Sara Gragnoli, Paola Gravina, Enrico Manfroni, Davide Stoppelli.**

**Classe IV Liceo Scientifico Tecnologico, a.s. 2009-2010 - Docente : Giampietro Cagnoli.**

ingrandimento dell'immagine, fattore determinante nell'osservazione dei pianeti e importante per cogliere fuggevoli dettagli della Luna e del Sole.

Anche oggi la maggior parte delle persone pensa che ciò che distingue il telescopio sia la sua capacità di "ingrandire", mentre questo aspetto è secondario rispetto, ad esempio, all'apertura dell'obiettivo, e quindi alla quantità di luce che il telescopio riesce a raccogliere e alla sua capacità di distinguere due stelle molto vicine (potere risolutivo). Le altre caratteristiche salienti di un telescopio sono la sua lunghezza focale e lo schema ottico.

Vediamo insieme di che si tratta. Esistono innumerevoli tipi di telescopi, diversi per schema ottico, prestazioni e prezzi, e quindi adatti ad un utilizzo sia professionale sia amatoriale. Per quanto se ne discuta, non esiste il telescopio perfetto, ma il miglior compromesso secondo le proprie esigenze. Una prima classificazione dei telescopi può essere quella legata ai mezzi ottici utilizzati per la costruzione degli obiettivi: *lenti o specchi*.

*I telescopi a lenti* sono detti rifrattori. Nella Fig. 52 ne vediamo raffigurato lo schema ottico.

Il telescopio rifrattore, grazie ad un insieme di lenti, sfrutta il fenomeno della rifrazione per focalizzare l'immagine.

La luce raccolta dall'obiettivo è focalizzata sul punto F, ove si trova anche il fuoco dell'oculare.

È proprio attraverso l'oculare che si osserva l'immagine inquadrata.

Secondo la posizione occupata dall'oculare nel cammino ottico dei raggi luminosi, avremo rifrattori di tipo kepleriano (i più diffusi) o galileiano.

La nascita del telescopio rifrattore si è soliti farla risalire appunto a Galileo, il quale ne mostrò la prima applicazione a Venezia nel 1609. In realtà, le prime lenti furono costruite nel 1607 da occhialai olandesi che le applicarono a strumenti rudimentali di pessimo potere risolutivo. Le proprietà delle lenti, nondimeno, erano note da tempo e a Galileo deve farsi risalire il merito del perfezionamento e del primo uso astronomico.

Esistono anche dei rifrattori nei quali tale aberrazione è stata corretta in misura maggiore (refrattori semi-apocromatici) e quelli, costosissimi, nei quali il residuo d'aberrazione cromatica è talmente basso da essere considerato praticamente nullo: i rifrattori super apocromatici.

In questi ultimi, l'obiettivo può essere costituito da un doppietto o un tripletto di lenti con vetri a bassa dispersione e con trattamenti antiriflesso multistrato che garantiscono un'elevatissima trasmissione dell'energia luminosa incidente.

I rifrattori sono caratterizzati da:

- Elevata nitidezza e contrasto delle immagini
- Assenza d'ostruzione
- Semplicità meccanica e affidabilità
- Tubo ottico chiuso (ridotta turbolenza interna e buona protezione dalla sporcizia)
- Costo elevato a parità di apertura rispetto ad altri schemi
- Ingombro elevato.

Sono quindi indicati per:

- Osservazione e fotografia della Luna, dei pianeti e delle stelle multiple
- Fotografia del cielo profondo (deep-sky) solo con aperture superiori ai 12 cm
- Osservazione terrestre

Sono invece sconsigliati per:

- Osservazione di oggetti piccoli e deboli del cielo profondo (galassie e nebulose)
- Fotografia deep-sky con aperture inferiori ai 12 cm.

Il classico *telescopio a specchi* è il riflettore newtoniano, che prende il nome dal suo inventore, Isaac Newton. Il telescopio riflettore, grazie ad un insieme di specchi, sfrutta il fenomeno della riflessione per focalizzare l'immagine.

In questi telescopi, l'obiettivo è costituito da uno specchio parabolico (specchio primario) che riflette e focalizza la luce sull'oculare attraverso un'apertura praticata sul fianco del tubo principale, dopo che il fascio è stato deviato mediante uno specchio piano (specchio secondario).

Nella Fig. 53 riportiamo lo schema di un riflettore newtoniano.

I riflettori Newton sono caratterizzati da:

- Buona correzione delle principali aberrazioni ottiche
- Buona nitidezza, ostruzione e presenza di sostegni a crociera delle grandi aperture relative ( $f / 4 - f / 8$ )
- Tubo ottico aperto (nessuna protezione dalla sporcizia e dall'ossidazione)
- Costo contenuto a parità di apertura rispetto ad altri schemi
- Peso ed ingombro contenuto (fino a 1000 mm di focale)

Sono quindi indicati per:

- Uso generico (stelle e pianeti, ideale per i principianti)
- Osservazione e fotografia del cielo profondo (deep-sky)

Sono invece sconsigliati per:

- Osservazione terrestre.

Esiste una categoria di telescopi che adotta uno schema misto (*catadiottrico*), nel quale sono presenti sia specchi che lenti. Il più famoso catadiottrico è senz'altro lo Schmidt-Cassegrain (SC), uno degli strumenti più diffusi fra gli amatori evoluti. Lo schema ottico è riportato in Fig. 54.

Lo *Schmidt-Cassegrain* è composto di uno specchio primario concavo sferico e di uno specchio secondario convesso, anch'esso sferico, inserito in una lastra correttiva posta all'imboccatura del tubo. Per quest'ultima, anche se in realtà si tratta di una lente con potere convergente al centro e divergente ai bordi (superficie di Schmidt), si usa il termine "lastra" perché essa non modifica la focale complessiva del sistema, ma serve esclusivamente a correggerne le aberrazioni ottiche residue.

L'immagine si forma posteriormente al tubo, dietro un foro praticato al centro dello specchio primario. Come si può vedere dallo schema, questo gioco di specchi riduce notevolmente l'ingombro complessivo dello strumento, rendendolo compatto e facilmente trasportabile.

Gli Schmidt-Cassegrain sono quindi caratterizzati da:

- Eccellente correzione delle principali aberrazioni ottiche
- Buona nitidezza
- Elevata ostruzione del secondario
- Grandi aperture relative ( $f / 6.3 - f / 10$ )
- Tubo ottico chiuso (bassa turbolenza interna e notevole durata delle ottiche)
- Assenza di sostegni a crociera sul secondario (migliore qualità dell'immagine)
- Grandi aperture a costi ragionevoli
- Peso ed ingombro contenutissimi
- Tiraggio elevato
- Grande disponibilità di accessori
- Grande versatilità

Sono quindi indicati per:

- Uso generico (stelle e pianeti, ideali per gli amatori evoluti)
- Osservazione e fotografia di pianeti e cielo profondo (deep-sky)
- Osservazione terrestre

Un altro tipo di telescopio catadiottrico è il *Maksutov-Cassegrain*, il cui principio è adottato anche in molti teleobiettivi per uso fotografico. Lo schema ottico è simile a quello dello Schmidt-Cassegrain, ma al posto della lastra correttrice il MC ha una vera e propria lente a menisco, sulla cui superficie interna è ricavato per alluminatura lo specchio secondario. La lente a menisco deve avere uno spessore tale che la sua aberrazione sferica negativa, sommata a quella dello specchio secondario, compensi l'aberrazione sferica positiva del primario.

I Maksutov-Cassegrain sono caratterizzati da:

- Ottima correzione delle principali aberrazioni (in particolare di quella cromatica)
- Eccellente nitidezza
- Elevata lunghezza focale (forti ingrandimenti)
- Ridotta ostruzione del secondario
- Aperture relative piccole ( $f / 15 - f / 20$ )
- Tubo ottico chiuso (bassa turbolenza interna e notevole durata delle ottiche)
- Assenza di sostegni a crociera sul secondario (migliore qualità dell'immagine)
- Peso ed ingombro contenuti
- Tiraggio elevato
- Gran disponibilità di accessori

Sono quindi indicati per:

- Osservazione e fotografia di Luna e pianeti
- Fotografia del cielo profondo (con riduttore di focale)
- Osservazione del cielo profondo.

Sono invece sconsigliati per:

- Osservazione di oggetti estesi.

Sebbene col termine “telescopio” si indichi solitamente il telescopio ottico, operante nelle frequenze della luce visibile, esistono telescopi sensibili anche alle altre frequenze dello spettro elettromagnetico.

Bande di visibilità dei telescopi.

L'atmosfera terrestre assorbe buona parte delle radiazioni elettromagnetiche provenienti dallo spazio, con l'importante eccezione della luce visibile e delle onde radio. Per questa ragione, l'osservazione da terra è limitata all'uso dei telescopi ottici e dei radiotelescopi.

I primi sono collocati preferibilmente in luoghi alti o isolati (montagne, deserti), in modo da ridurre l'influenza della turbolenza atmosferica e dell'inquinamento luminoso.

Per l'osservazione nelle rimanenti bande dello spettro elettromagnetico (microonde, infrarosso, ultravioletti, raggi X, raggi gamma), che sono assorbite dall'atmosfera, si utilizzano quasi esclusivamente telescopi orbitali o collocati su palloni aerostatici ad alta quota (Cfr. 55)

### ***Radiotelescopi (Cfr. Fig. 56)***

I radiotelescopi sono *antenne radio* che, al pari degli specchi dei telescopi che lavorano in ottico, focalizzano la radiazione amplificandola nel fuoco geometrico dell'antenna (dove è posto il detector) che raccoglie il segnale radio. Le antenne sono a volte costituite da una griglia di fili conduttori, le cui aperture sono più piccole della lunghezza d'onda osservata.

I radiotelescopi sono spesso usati a coppie, o in gruppi più numerosi, per ottenere diametri "virtuali" proporzionali alla distanza tra i telescopi. I gruppi più grandi hanno collegato telescopi sui lati opposti della Terra.

I radiotelescopi lavorano sulle frequenze radio degli oggetti celesti, compiendo osservazioni in questo settore dell'astronomia che presenta il vantaggio di non dipendere (come nel settore ottico) né dalle condizioni meteorologiche, né dall'alternanza giorno-notte.

### ***Telescopi gamma e raggi X***

I telescopi per raggi X e raggi gamma hanno altri problemi, principalmente derivanti dal fatto che questi raggi possono attraversare il metallo e il vetro. Usano in genere degli specchi a forma di anello, messi quasi paralleli al fascio di luce incidente, che viene riflessa di pochi gradi: questa caratteristica determina una

differente qualità costruttiva e tecnica del telescopio. Gli specchi sono in genere una sezione di parabola ruotata.

*Telescopio Cerenkov.* Il telescopio Cerenkov rivela la caratteristica radiazione emessa da particelle gamma che attraversano l'atmosfera. Queste particelle assorbite dall'alta atmosfera terrestre originano un segnale che è da considerare l'equivalente del "bang" supersonico per le onde sonore. Le particelle, infatti, viaggiano ad una velocità maggiore rispetto a quella della luce (della luce nell'aria, ma comunque a velocità inferiore di quella della luce nel vuoto). Il lampo Cerenkov viaggia nella stessa direzione dello sciame, e può essere rivelato dai telescopi Cerenkov. Esso si avvale di uno specchio primario e di un secondario dove è posta la strumentazione di rivelazione. Questi telescopi vengono denominati IACT (Imaging Air Èerenkov Telescopes).

### ***Le montature dei telescopi***

La montatura di un telescopio è la parte meccanica che sostiene la componente strumentale ottica e la strumentazione osservativa (*fotometro, spettrografo, CCD*).

A causa della rotazione della Terra, il Sole e tutti gli astri (stelle e pianeti) ci appaiono compiere un moto diurno descrivendo orbite quasi circolari. Il moto apparente dei pianeti rispetto al cielo delle stelle fisse risulta invece molto più complesso.

A causa invece del moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole, il Sole ci appare descrivere, rispetto al cielo delle stelle fisse, un moto annuo quasi circolare (eclittica). Tutte le stelle, apparentemente ferme ed immutabili tanto da meritarsi l'appellativo di stelle fisse, vengono trascinate da Est verso Ovest da una rotazione (moto apparente del cielo) contraria a quella della Terra ed imperniata attorno all'asse celeste, che farà loro descrivere delle traiettorie circolari che risulteranno essere parallele fra loro e concentriche ai poli celesti.

La funzione principale della montatura è quella di compensare il moto di rotazione della terra intorno al proprio asse. Quindi la funzione della montatura è quella di eseguire un moto di rotazione che abbia lo stesso verso di quella apparente del cielo. Il risultato che si ottiene è che l'oggetto da osservare rimane al centro del nostro campo di osservazione.

Per essere davvero efficiente, una buona montatura deve rispondere a tre requisiti fondamentali:

1. Requisito meccanico: la montatura deve essere improntata alla massima rigidità; esente da flessioni o vibrazioni, che mantenga una velocità costante nel suo moto di inseguimento in modo da mantenere sempre al centro del campo visivo l'oggetto inquadrato senza *fughe*. Infine deve essere costituita da una meccanica precisa ed esente da *giochi meccanici* che possano precludere la sua precisione.

2. Requisito elettronico: un elemento importante per un telescopio è oramai la presenza di un controllo elettronico dei movimenti, in modo da poter gestire tramite una pulsantiera o persino un computer la gestione e il puntamento dei corpi celesti.

3. Requisito informatico: ossia il software deve essere in grado di comunicare con l'elettronica e la meccanica dello strumento. Questo requisito consente non solo di puntare un oggetto, ma anche di annullare gli errori strumentali tramite correzioni del moto, e consente persino la possibilità di gestire lo strumento per via remota (via internet ad esempio).

### *Tipi di montature*

L'azimutale è più semplice da costruire, costituita dal moto dei due assi principali azimut ed elevazione. Il telescopio, per mantenere l'oggetto osservato al centro del campo, deve eseguire i moti nei due assi: l'orizzontale e il verticale. C'è un altro inconveniente: la rotazione del campo. Tutto questo è risolto da un sistema di motori controllati da un computer. Questo tipo di montatura è utilizzato nei telescopi amatoriali più economici oppure per i telescopi professionali di grandi dimensioni, a causa della maggior semplicità e leggerezza della stessa: requisito indispensabile per sostenere specchi del diametro di alcuni metri, sorretti da strutture pesanti diverse tonnellate.

La montatura equatoriale, ha uno degli assi di rotazione inclinato in funzione della latitudine del luogo (questa è la sua caratteristica fondamentale). Questa inclinazione consente (a fronte di un puntamento della montatura rispetto il Polo Nord Celeste) di "inseguire" i corpi celesti mediante un solo movimento. La presenza di un solo moto, infatti, consente anche per i telescopi amatoriali di raggiungere il medesimo scopo, senza dover avere l'ausilio di sofisticata attrezzatura e software di supporto: (un semplice motorino è sufficiente).

Le tipologie di montature equatoriali sono:

- Montatura alla tedesca
- Montatura a forcella
- Montatura inglese
- Montatura fotografica
- Montatura a ferro di cavallo

La montatura alla tedesca (Fig. 57) è adatta a tutti i tipi di telescopio. Nella scelta è da tenere presente che un tubo lungo, a parità di peso, è più difficile da sostenere in modo stabile di uno corto; inoltre la montatura alla tedesca ha bisogno dei contrappesi, a differenza della montatura a forcella. In questa montatura il telescopio è sempre posizionato da una parte ( Est o Ovest del meridiano dell'osservatore). D'altra parte la montatura alla tedesca permette una maggiore libertà di movimenti (usatissima nel campo amatoriale).

Se si insegue un oggetto da Est ad Ovest, dal sorgere al tramonto, quando questo si trova al meridiano, per poterne proseguire l'osservazione occorre riposizionare il telescopio invertendo la posizione telescopio-contrappesi. Questa montatura consente l'accessibilità al Polo.

La montatura a forcella (Fig. 58) è adatta solo a strumenti corti (come i Cassegrain o gli Schmidt-Cassegrain). Questa montatura è analoga all'azimutale, ma con la forcella che sta al posto dell'asse polare. E' la più pratica delle equatoriali. Il telescopio è fissato all'interno di una forcella che punta il Polo Nord Celeste. Consente l'accessibilità al polo e non ha problemi di reversibilità degli assi. La forcella deve essere della massima robustezza per non subire flessioni all'estremità dove è situato l'intero peso strumentale del tubo ottico; può accedere a qualsiasi punto del cielo, ma quando il telescopio viene puntato verso il Polo Nord celeste (tubo del telescopio parallelo alla forcella) non c'è posto per la testa quando si vuole osservare direttamente l'immagine con l'occhio.

Il problema si aggira con l'introduzione di un prisma a 90° gradi al quale eventualmente si aggiunge un tubo di prolunga nei telescopi grandi. Uno svantaggio della montatura a forcella è la pressione che possono subire i bracci soprattutto a basse latitudini.

La montatura inglese risolve il problema della reversibilità degli assi al meridiano: il telescopio è situato al centro di una culla che punta verso il Nord celeste. Questa montatura non consente l'accesso al polo. Una variante di questa montatura va

considerata la Montatura inglese fuori asse. Quest'ultima presenta un robusto asse al cui lato è posizionato il telescopio e dalla parte opposta i contrappesi. Ricorda un po' la montatura tedesca e presenta anch'essa il problema della reversibilità degli assi ma consente l'accesso al polo.

Montatura fotografica Unisce i vantaggi della montatura alla tedesca ed all'inglese. Inoltre è assai compatta e non presenta il problema della reversibilità degli assi al meridiano.

### ***Gli assi del telescopio***

Diamo una prima visione quindi al telescopio, e agli assi intorno ai quali è permesso il movimento:

Fig. 59 - Montatura equatoriale alla tedesca,

Fig. 60 - Montatura equatoriale a forcella.

Banalmente *stazionare o mettere in posa* un telescopio significa rendere parallelo l'asse d'ascensione retta alla direzione dell'asse polare (quindi l'asse di declinazione verrebbe a giacere su un piano parallelo al piano equatoriale). Come fare? Iniziamo con il dire che la bontà dello stazionamento che andiamo ad effettuare dipende anche dall'utilizzo che dobbiamo fare del telescopio. Se vogliamo osservare la luna, magari a ingrandimenti anche non esagerati, allora non ha senso perdere molti minuti per ottenere uno stazionamento a regola d'arte; se invece dobbiamo fare fotografia a lunga posa, allora la messa in posa del telescopio deve essere perfetta.

Procediamo nell'elencare tutte le operazioni necessarie per la messa in posa.

Prima operazione: assicurarsi che il telescopio sia *in bolla*, ovvero che l'asse immaginario che passa verticale tra le gambe del treppiede e attraverso la montatura sia perpendicolare al terreno. Se la nostra montatura non dispone di una bolla possiamo procurarcene una da utilizzare per regolare opportunamente le gambe estensibili del treppiede da campo. Ora la procedura si divide, a seconda che la nostra montatura sia equipaggiata o meno con un cannocchiale polare.

Stazionare senza il cannocchiale polare:

1) Orientare il telescopio verso nord (come nelle Figure 59 e 60). L'allineamento con il Nord deve essere il più preciso possibile. Per aiutarci possiamo utilizzare una bussola oppure la stella polare stessa. Se osserviamo spesso dalla stessa postazione potrebbe essere una buona idea quella di rintracciare una volta per tutte la direzione

del nord in modo molto preciso, e segnare sul pavimento i punti dove appoggiare le gambe del treppiede. L'ideale sarebbe tracciare una linea che punta a nord e un'altra, esattamente perpendicolare alla prima, dove appoggiare le punte delle restanti due gambe del treppiede.

2) A questo punto dobbiamo inclinare la montatura di un angolo pari al valore della latitudine del luogo da dove state osservando (Esempio: Milano  $45^\circ$ , quindi l'angolo  $X^\circ$  in figura dovrebbe essere appunto di 45 gradi). Non ci resta che attivare il motorino orario, se la nostra montatura ne possiede uno, oppure inseguire manualmente l'oggetto osservato agendo solo sulla manopola del moto in ascensione retta.

Possedendo una montatura equatoriale alla tedesca, l'inclinazione della montatura può essere fatta una sola volta (Fig.61). Se eseguiamo l'operazione con sufficiente precisione non ci sarà più bisogno di ritoccare il valore impostato (a meno di trasferimenti a latitudini sensibilmente differenti, di almeno mezzo grado).

Importante: possedendo una montatura equatoriale alla tedesca, anche se non si è dotati di cannocchiale polare è possibile adottare un metodo che simuli la presenza dello stesso. Tutto sta nel puntare a occhio nudo la stella polare attraverso il foro vuoto che dovrebbe contenere il cannocchiale polare, agendo sui movimenti micrometrici di azimut e altezza della montatura. Inutile dire come l'errore di puntamento commesso sia evidente, ma risulta comunque minore rispetto a quello derivante da una sommaria messa in stazione del telescopio.

Stazionare il telescopio mediante cannocchiale polare.

Il cannocchiale polare (Fig. 62) è quel piccolo cannocchiale posto all'interno della montatura, più precisamente lungo l'asse di ascensione retta. Attualmente solo le montature equatoriali alla tedesca possono disporre di questo utile strumento. In Fig. 11 possiamo vedere dove viene posizionato un cercatore polare, ed un possibile reticolo che viene inciso su un vetrino posto all'interno del cannocchiale polare stesso.

Per allineare la montatura è sufficiente dunque individuare visualmente la stella polare (si rimanda alla figura a destra), puntare la zona interessata mediante il cercatore polare e far coincidere la stella polare e le altre stelle disegnate sul vetrino con gli astri veri e propri che osserveremo attraverso il piccolo cannocchiale. Ovviamente il movimento va indotto agendo sulle regolazioni micrometriche di azimut e altezza della montatura stessa.

## *Le aberrazioni delle lenti*

In generale lo studio delle immagini prodotte dalle lenti viene condotto in particolari condizioni di seguito elencate:

- sorgenti luminose monocromatiche (luce costituita solo da radiazioni di una sola lunghezza d'onda);
- sistemi ottici di piccola apertura;
- raggi incidenti e rifratti parassiali.

Quando queste condizioni non sono soddisfatte, le immagini possono risultare sfumate, confuse, e persino distorte, tanto che la loro forma geometrica non corrisponde più a quella dell'oggetto. Questi difetti, noti come *aberrazioni*, non sono dovuti a imperfezioni tecniche e costruttive dei sistemi ottici, ma derivano dalla rifrazione della luce attraverso le superfici curve delle lenti.

Le aberrazioni sono di due tipi: *cromatiche e sferiche*.

L'*aberrazione cromatica* si verifica tutte le volte che la sorgente luminosa non è monocromatica e cioè in tutte le applicazioni astronomiche perché i pianeti, le stelle doppie e le nebulose emettono diversi colori.

La distanza focale di una lente è legata al proprio indice di rifrazione, e poiché quest'ultimo varia al variare della lunghezza d'onda (dispersione), la lente presenta lunghezze focali diverse per i differenti colori di un fascio policromatico e dunque potere convergente (o divergente) variabile. La convergenza è maggiore per i raggi violetti, che risultano più deviati, mentre è minore per le radiazioni corrispondenti al rosso. Se l'oggetto è una stella la sua immagine sarà composta da una serie di punti, ognuno dei quali corrisponde a una componente monocromatica del fascio. Se l'oggetto ha una estensione finita (pianeta o nebulosa) la sua immagine presenterà bordi iridescenti.

I telescopi riflettori non sono soggetti all'aberrazione cromatica perché in essi non avviene la rifrazione. La lastra correttrice degli Schmidt-Cassegrain ha una rifrazione di debole intensità tale da non presentare problemi di aberrazione cromatica.

Nei telescopi rifrattori l'*aberrazione cromatica* (Fig. 63) si può ridurre o eliminare utilizzando più lenti, di materiali e focali diverse, poste direttamente a contatto fra loro e scelte in modo tale che le imperfezioni cromatiche si compensino a vicenda.

L'*aberrazione sferica* (Fig. 64), invece, si presenta quando un fascio luminoso con un fronte d'onda piuttosto esteso attraversa una lente la cui apertura non soddisfa le condizioni cosiddette di "Gauss". Anche in questo caso il potere

convergente (o divergente) non è lo stesso per tutti i raggi: assume all'incirca lo stesso valore per i raggi che arrivano nella zona centrale della lente, mentre varia in un certo intervallo per i raggi marginali, che non colpiscono il bordo.

Come si osserva nella seguente figura, dove sono stati presi in considerazione solo raggi più esterni di un fascio parallelo all'asse ottico, i raggi di luce che attraversano settori diversi della lente sono focalizzati in punti differenti. I raggi usciti dalla lente si intersecano fra loro delimitando una superficie detta "caustica di rifrazione".

L'aberrazione sferica condiziona la formazione dell'immagine poiché solo porzioni limitate dell'oggetto sono riprodotte fedelmente. Anche gli specchi sferici convergenti e divergenti hanno lo stesso problema di aberrazione sferica. Gli effetti di questa aberrazione possono essere minimizzati o eliminati totalmente lavorando le superfici delle lenti in maniera diversa da quella sferica. Si hanno così le *lenti asferiche* (Fig. 65).

Al fine di eliminare l'aberrazione sferica negli specchi, si usano lastre correttive, come negli Schmidt-Cassegrain, oppure superfici riflettenti iperboliche, come nei telescopi professionali più grandi degli osservatori in Cile, nelle Canarie e nelle Hawaii

**Fonti:**

- Antonio Caforio e Aldo Ferilli, *Fisica 2*, Le Monnier Editore, Firenze.
- Giuseppe Ruffo, *Lezioni di Fisica 2*, Zanichelli Editore, Bologna.
- Immagini provenienti dal Volume *Fisica 2* e dal sito web della ditta Edmund Optics.



# APPENDICE

**Gian Domenico VACCARECCI\***

## *Il telescopio va a scuola*

Impresa Appennino Centrale - Sindacato di Territorio, è una associazione di imprese con sede a Città di Castello, che si propone lo scopo di sviluppare e tutelare la cultura di impresa nel territorio a cavallo del nostro Appennino, alla confluenza di ben quattro regioni: Toscana, Umbria, Marche e Romagna. Al momento ci risulta il primo e, finora, unico Sindacato di Territorio in Italia. Affianchiamo con piacere la nostra presenza alle iniziative del Centro Studi Mario Pancrazi, come in quest'evento sull'astronomia, perché ci offre l'occasione di rivolgerci ai giovani nel momento più delicato della loro esperienza formativa, e sono proprio loro i destinatari privilegiati del nostro messaggio all'insegna dello sviluppo di una cultura di impresa basata su valori etici irrinunciabili. **Faber est suae quisque fortunae**, "Ciascuno è l'artefice del proprio destino": è la massima latina, che abbiamo scelto come motto. Sentiamo il bisogno di citarla in questa occasione, perché si attaglia perfettamente all'esperienza di vita di Ugo Galli, "l'artefice" del telescopio.

Ugo Galli, ha avuto nella sua vita due grandi passioni: la meccanica e la pittura. Egli nasce nel 1942 in provincia di Brescia, durante la Seconda Guerra Mondiale. La sua è una famiglia povera, come ce n'erano tantissime a quei tempi, e lui è il quarto di cinque fratelli.

Di risorse per studiare, in famiglia, non ce ne sono, e per questo, a meno di dieci anni, è già nella bottega di un fornaio, in cambio di pane e latte per la famiglia. A dodici anni entra a lavorare in fabbrica, dove, osservando gli altri, impara il mestiere di meccanico. La sua è una scuola pratica, senza l'ausilio di alcun libro, ma che consente di diventare un bravissimo meccanico. Questa sua competenza e questa sua capacità lo portano a Sansepolcro nel 1961, assunto come responsabile meccanico di una fabbrica del posto. Anni dopo anche Ugo ha l'opportunità di

**\*Segretario Generale di Impresa Appennino Centrale Sindacato di Territorio**

entrare a scuola, non come studente, ma sempre lavorando, questa volta come custode. I professori prendono a cuore questo giovanotto taciturno e riservato, lo esortano e lo aiutano a studiare. Ugo prende la licenza media nel 1970, a 28 anni! Grazie a ciò ed alle sue competenze e capacità di meccanico, entra in ruolo come Assistente Tecnico in un Liceo Classico. Tra i professori, estimatori della sua manualità, ce sono alcuni appassionati di Astronomia, che iniziano il Galli a questa scienza. Gli forniscono libri e trattati e così Ugo inizia a studiare astronomia appassionandosi in breve ad astri e galassie. Il “meccanico” è irresistibilmente attratto dal fascino del misterioso e perfetto meccanismo che muove l’universo, e per cercare di capirne le regole e meglio osservare gli astri, mette in pratica le sue competenze e la sua straordinaria capacità manuale, realizzando da solo, tra il 1974 ed il ’75, il “suo” telescopio ( Cfr. Fig. 66).

Nello stesso periodo Ugo Galli comincia a leggere anche libri di storia dell’arte e di pittura, sua grande passione sin dall’infanzia e, sempre come autodidatta, dipinge, utilizzando tecniche e stili più disparati, dimostrando una confidenza istintiva anche con questa disciplina. Inizia da copista, per poi sviluppare ed acquisire stile e personalità propria. Nella sua vita Galli ha realizzato decine di opere, senza mai sentire l’esigenza di esporle pubblicamente in una mostra. Tanti sono i quadri che ha ceduto in cambio di tele, colori e pennelli, o regalato ai professori delle scuole dove ha lavorato, “barattandoli” con libri e lezioni delle materie che a lui interessavano. Nel 2008 la Società Balestrieri di Sansepolcro gli ha commissionato il dipinto per il Palio della Balestra di quell’anno. Nella sua realizzazione (Cfr. Fig. 67) Ugo si è ispirato a De Chirico, dando forma ad uno dei più bei palii mai visti sinora.

La storia di Ugo Galli, la sua vita e le sue esperienze, si coniugano perfettamente con lo spirito che ha dato vita ad Impresa Appennino Centrale - Sindacato di Territorio. Ci spingono ad esortare i nostri studenti, i nostri giovani, a fare propria la massima latina: ragazzi, siate “artefici del vostro destino”! Non a tutti è dato di poterlo essere! Noi abbiamo la fortuna di essere nati qui e adesso!

Cosa significa? Pensiamo ai bambini che nascono nell’Africa nera, che sono destinati a morire in larga parte entro il quinto anno della loro vita: essi non hanno neppure il tempo e la possibilità, di acquisire la consapevolezza della loro esistenza!

Ma noi no! Noi siamo nati nel cuore dell’Italia, tra il Tevere e l’Arno, dove, in una manciata di chilometri di distanza tra loro, sono nati grandi personaggi del

Rinascimento, da Piero della Francesca a Michelangelo Buonarroti, da Raffaello Sanzio a Leonardo da Vinci; in questa terra che il raffinato ed elegante critico d'arte Philippe Daverio, qualche tempo fa, ha definito la "Mesopotamia d'Italia", dove è nata e si è sviluppata la cultura del Rinascimento, la cultura che ha fatto grande l'Italia e l'Europa.

Noi, cari ragazzi, non solo abbiamo la consapevolezza della nostra esistenza, ma abbiamo anche gli stimoli e gli esempi da poter seguire per costruire il nostro destino! Ecco perché dobbiamo prendere esempio da Ugo e dalla sua umiltà, per cercare di dare il meglio di noi stessi, ed **essere artefici del nostro destino**. Ecco perché vi abbiamo proposto, nella vostra scuola, un compagno di banco per un periodo lungo: il telescopio di Ugo Galli. Per oltre un mese, nell'ITIS "L. e A. Franchetti" di Città di Castello e nel Liceo "Città di Piero" di Sansepolcro, avete potuto osservarlo e studiarlo con l'aiuto dei vostri professori; avete potuto provare emozioni di fronte ad un manufatto così singolare e coinvolgente.

Impresa Appennino Centrale – Sindacato di Territorio cerca di aiutare i giovani della nostra terra in tale missione, **sviluppando e tutelando la cultura di impresa e valorizzando il nostro territorio**, anche e soprattutto attraverso la valorizzazione delle persone e della loro esperienza di vita, come nel caso di Ugo Galli.

La nostra terra e la sua storia racchiudono le singole storie di migliaia di anonime persone, che come lui, quotidianamente, costruiscono il proprio destino, con umiltà, consapevolezza e determinazione.

