

Appendice A

Traccia storica

A.1 Introduzione

L'Astronomia è la scienza che studia la struttura, la dinamica e l'evoluzione degli oggetti che si osservano in cielo. È quindi una delle principali attività creative dell'uomo verso la comprensione dell'ordinamento dei fenomeni naturali. È anche la scienza più antica, in quanto il suo grande laboratorio è esteso sulla volta celeste e, almeno entro certi limiti, non ha richiesto all'origine grandi tecnologie: bastano l'occhio umano e un'attenta, regolare osservazione dei fenomeni.

L'Astronomia assunse agli inizi della civiltà una valenza di "magia" nell'illusione di poter collegare il verificarsi di fenomeni celesti (moto del Sole attraverso le costellazioni, eclissi, comparsa di comete, ecc.) con la predizione di eventi umani. Questa vana speranza portò all'astrologia, che ancora oggi vanta indebitamente un'origine scientifica. Va tuttavia detto che gli astrologi nel passato svolsero un'importante funzione di raccolta di dati osservativi sui moti planetari, che permisero agli astronomi (che spesso per sopravvivere si dovettero anche vestire da astrologi) di formulare le leggi fisiche della gravitazione.

Altre importanti funzioni dell'Astronomia furono quelle pratiche di predire l'evoluzione delle stagioni, fondamentale per le civiltà agricole, e di permettere di definire un sistema di riferimento "universale" in grado di guidare naviganti e nomadi in terre sconosciute.

L'inizio dell'Astronomia come scienza quantitativa nel mondo occidentale risale agli antichi Greci: Aristarco, Eratostene, Eudosso, Ipparco, Tolomeo svilupparono una completa interpretazione dei moti celesti a carattere geocentrico, già basata sulla conclusione scientifica che la Terra fosse sferica e non piatta e furono in grado di misurare con grande approssimazione le dimensioni della Terra e le distanze planetarie. Ipparco rivelò anche la precessione degli equinozi, un fenomeno molto sottile che porta il Polo celeste a compiere sulla volta celeste un'orbita circolare con raggio di circa 17 gradi in un tempo di 26 mila anni. Tolomeo nel II secolo d. C. presentò una teoria cinematica dei moti planetari che permetteva di interpretare tutte le orbite in termini di singoli cerchi o combinazioni di due o più cerchi. Il cerchio e la sfera

erano considerate curve e figure perfette: perciò, in accordo con le teorie filosofiche Aristotele, il cielo fu concepito come un sistema perfetto, incorruttibile, e quindi infinito nello spazio e nel tempo.

Si dovette attendere fino al XVI secolo per rivedere questa visione dell'Universo. Anzitutto Copernico mostrò come la descrizione dei moti planetari risultasse semplificata assumendo come centro di riferimento il Sole e non la Terra, trasformando il concetto geocentrico dell'Universo in eliocentrico. Quindi Tycho Brahe e Johannes Kepler mostrarono che le orbite dei pianeti non sono esattamente circolari, bensì ellittiche con piccole eccentricità e che valgono precise regole quantitative che legano la velocità orbitale alla distanza dal Sole e il periodo di rivoluzione intorno al Sole all'asse maggiore dell'ellisse.

Infine, 400 anni fa, Galileo compì il primo fondamentale progresso tecnologico con l'utilizzazione del cannocchiale per osservazioni astronomiche. Mostrò che i pianeti sono oggetti di dimensioni finite, che Venere ha fasi come la Luna, che il Sole non è puro e perfetto, bensì "corrotto" da macchie. Da quel momento la modellizzazione teorica e il progresso tecnologico strumentale si intrecciano in una gara travolgente che continua tuttora.

A.2 L'Astronomia antica

Esistono molti testi che trattano in gran dettaglio e con dovizia di informazioni la storia dell'Astronomia; ad esempio la *Storia dell'Astronomia* di J.P. Verdet [1]. Qui indicheremo solo le tappe più significative in un rapido sguardo d'insieme, limitando le indicazioni storiche all'Astronomia occidentale, perchè fu la sola a sviluppare un modello scientifico di Universo.

La prima fase è quella dell'Astronomia antica, che culmina con la formulazione della teoria tolemaica, incentrata sulla classificazione e interpretazione dei moti degli "astri", intendendo come tali il Sole, la Luna, i pianeti Mercurio, Venere, Marte, Giove, Saturno e le stelle. La differenza tra stelle e pianeti consisteva nel fatto che, mentre le stelle compiono nel cielo traiettorie regolari, questi ultimi presentano moti irregolari, anche retrogradi (in greco "planétes" significa appunto "errante"); un'osservazione che informò la costruzione di modelli di Universo per oltre 2000 anni.

Le osservazioni venivano effettuate con gli occhi, nel visibile, e senza grandi mezzi tecnici per acuire la visione. I Babilonesi raggiunsero precisioni molto elevate nelle osservazioni astronomiche così da far supporre ad alcuni storici che essi abbiano usato, per affinare la propria vista, lenti naturali di quarzo reperibili nelle sabbie desertiche. Ma gli unici strumenti di misura di cui abbiamo prove di esistenza furono varie forme di gnomoni, quadranti e sestanti per derivare le distanze angolari degli oggetti celesti, e seguire il moto dei pianeti e della Luna rispetto alle stelle, dette appunto "fisse", perché, pur ruotando giornalmente intorno alla Terra, mantenevano le loro disposizioni relative (Fig. A.1).



Fig. A.1 Antichi strumenti di osservazione

Alla presunta carenza di mezzi tecnici, gli astronomi antichi, dalla Grecia alla Cina, supplirono con accuratissime, regolari e attente osservazioni che permisero, ad esempio, a Ipparco di valutare fenomeni impercettibili come la precessione degli equinozi, che comporta una lentissima variazione del polo nord celeste (oggi prossimo alla Stella Polare appunto) su tempi dell'ordine delle decine di migliaia di anni. Eratostene si rese conto che il Sole culmina a tempi diversi in luoghi a longitudini diverse (ad esempio Alessandria ed Assuan in Egitto), e propose che ciò fosse facilmente spiegabile considerando la Terra sferica, e ne calcolò il raggio con una notevole approssimazione rispetto al valore oggi noto.

Va tuttavia citato il fatto che nel '900 alcuni pescatori scoprirono al largo della costa dell'isola di Antikythera nell'Egeo il relitto di una nave mercantile romana del I secolo a. C. tra i cui reperti, oltre a statue e suppellettili di grande interesse archeologico, fu trovata una scatoletta di bronzo delle dimensioni di 326×164×48

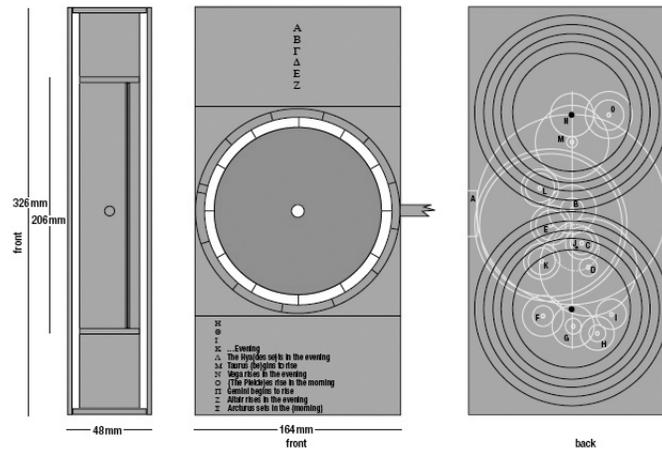


Fig. A.2 Lo schema del meccanismo di Antikythera

mm contenente un meccanismo basato su 30 ruote dentate. Dopo anni di studio gli studiosi sono giunti alla conclusione che si tratta di un raffinato meccanismo per calcolare i moti del Sole, della Luna e dei pianeti allora noti e della visibilità delle principali stelle e costellazioni (Fig. A.2). Non esistono altri esemplari o notizie di oggetti di tal genere, forse più usati per previsioni astrologiche che astronomiche; certo rivela la capacità degli astronomi dell'epoca di realizzare sistemi meccanici di alta precisione per gli studi astronomici.

Il modello di Universo utilizzato dagli antichi, si occupò essenzialmente dello studio dei moti celesti e, per interpretare il moto retrogrado dei pianeti rispetto alle stelle fisse (Fig. A.3), fu sviluppato un sistema geometrico sistematizzato da Claudio Tolomeo nell'età ellenistica (intorno al 127-150 d.C.) nel suo testo "Megále Sýntaxis" ("Grande Trattato"), dagli arabi chiamato Almagesto. In tale cosmologia la Terra è una sfera immobile al centro dello spazio, la volta celeste con le stelle fisse ruotano intorno ad essa e i pianeti, il Sole e la Luna ruotano su un complesso sistema di sfere deferenti ed epicicliche (Fig. A.4). Ogni particolare deviazione del moto



Fig. A.3 Moto retrogrado apparente di Marte (72 giorni ogni 2 anni)

dei pianeti da quello della sfera delle stelle fisse veniva interpretato aggiungendo un'ulteriore sfera con un suo moto proprio: un sistema che oggi giorno i matematici chiamerebbero sviluppo in funzioni armoniche sferiche. Si trattava di un modello soddisfacente sulla base delle misure disponibili, sufficientemente completo e consistente, in grado di prevedere eclissi e occultazioni, e anche effetti su lunghi tempi scala come la precessione degli equinozi già citata.

Non dobbiamo quindi pensare all'Astronomia antica come errata perché geocentrica, bensì come ben costruita e onnicomprensiva. Poiché con i moti delle sfere si spiegava tutto, Aristotele assunse tale forma geometrica come perfetta per un Universo perfetto, immutabile e divino, di cui la Terra era il centro assoluto. Un salto, che a noi pare oggi ingiustificato, dal piano della scienza a quello della metafisica.

Il reale limite del modello di Universo aristotelico / tolemaico era piuttosto nella sua caratteristica puramente geometrica tanto cara ai Greci antichi, che non affrontava la spiegazione della ragione dei moti sferici, ma rimandava genericamente

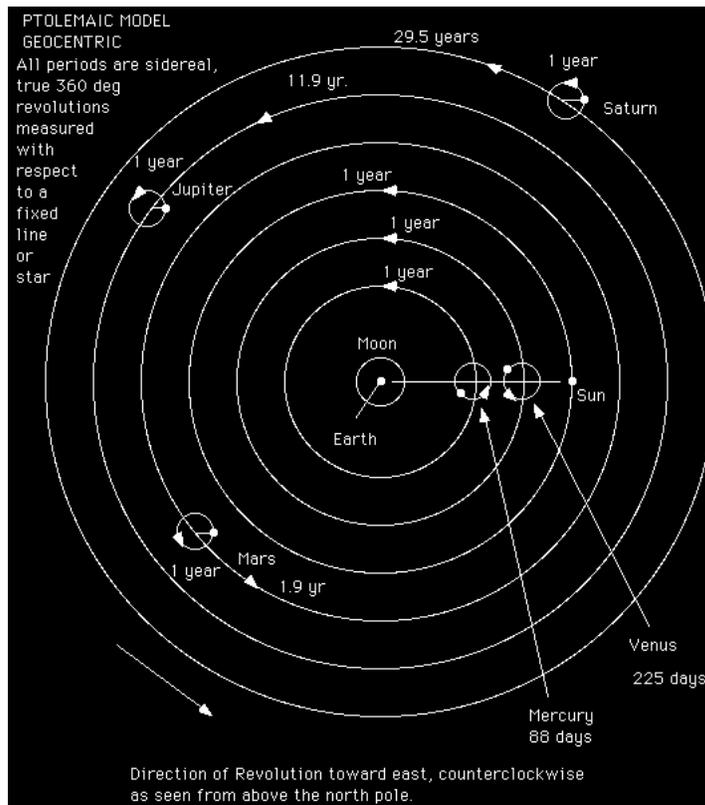


Fig. A.4 Il sistema tolemaico e moti epiciclici

il loro controllo ad un Demiurgo, onnipotente ed eterno, amante della perfezione. È però vero che Eratostene riconobbe che la Terra doveva essere sferica osservandone l'ombra sulla Luna durante le eclissi lunari; e fu in grado di misurarne il raggio con grande accuratezza entro i limiti degli strumenti di osservazione allora disponibili. Aristarco propose inoltre che il Sole, e non la Terra, fosse il centro dell'Universo: il suo sistema eliocentrico non ebbe tuttavia grande influenza sulla concezione corrente del mondo perché lontano dall'esperienza quotidiana.

Il Medioevo in Europa e la lentezza negli sviluppi tecnologici delle civiltà di altre parti del mondo non permisero per lungo tempo di superare questo livello di comprensione della natura dell'Universo. Anzi, in Europa l'Astronomia diventò sempre più vicina all'astrologia, un puro strumento di irrazionale approccio alla natura.

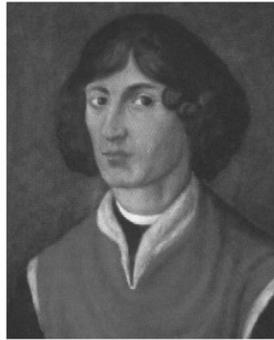


Fig. A.5 Niccolò Copernico (1473 - 1543) e Tycho Brahe (1546 - 1601)

A.3 Copernico, Keplero e Galileo

L'Astronomia copernicana nasce alla metà del XVI secolo dalla raccolta di una maggior quantità di dati e su tempi più lunghi di quelli utilizzati dagli antichi. Dalle osservazioni di Niccolò Copernico e soprattutto di Tycho Brahe (Fig. A.5) si evidenzia sempre più la difficoltà di spiegare i moti planetari in termini di sfere su sfere secondo lo schema tolemaico. Tale schema diventa troppo complicato da risultare inutilizzabile. Inoltre le previsioni del modello tolemaico sul succedersi delle stagioni diventano sempre più contraddette, entra in crisi il calendario.

Il primo passo a risolvere queste difficoltà venne compiuto con intuizione geniale da Copernico che propose, seguendo Aristarco, di trasferire il centro dell'Universo sul Sole: facendo ruotare pianeti e stelle, e anche la Terra, intorno al Sole, i moti dei pianeti sono calcolabili con maggior precisione. Inoltre Copernico suggerì che le stelle stesse non fossero altro che dei Soli posti a grande distanza. Il centro dell'Universo copernicano è una stella, il Sole, la sfera celeste lo racchiude con tante altre stelle e gli ruota intorno; nel mezzo i pianeti orbitano a velocità variabili. A questo punto la Terra è essa stessa un pianeta. Il grande contributo di Copernico sta nel fatto di essere riuscito a “vedere” i moti orbitali dei pianeti sottraendovi il moto della Terra intorno al Sole. Ma va anche detto che Copernico considerò il modello eliocentrico solo come un artificio matematico e non andò oltre a Tolomeo per quanto riguarda l'interpretazione del perché dei moti. La teoria copernicana sarebbe quindi rimasta un argomento di “geografia celeste” se non fossero intervenuti i contributi di Keplero e Galileo [3].

Giovanni Keplero ricavò le **leggi dei moti planetari** (Fig. A.6):

1. Le orbite dei pianeti sono ellissi di cui il Sole occupa uno dei fuochi; a parte la forma, quel che bisogna notare è che si tratta di orbite piane.
2. La velocità dei pianeti lungo i vari punti dell'orbita è inversamente proporzionale alla distanza dal Sole.

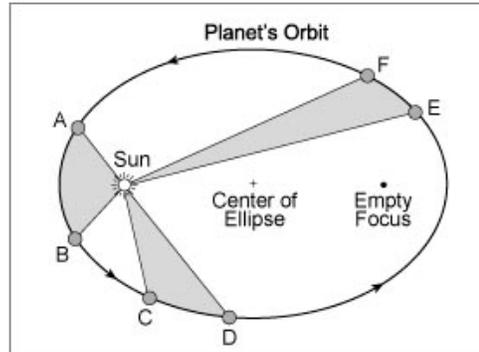


Fig. A.6 Johannes Kepler (1571 - 1630) e le leggi sui moti planetari

3. Il quadrato del periodo orbitale dei pianeti (il loro anno) è proporzionale al cubo del semiasse maggiore dell'ellisse.

Keplero aveva finalmente individuato le regole che governano i moti dei pianeti in modo quantitativo: era dunque possibile pensare a come li si potesse produrre [4].

Il contributo di Galileo Galilei (Fig. A.7) fu duplice. Da un lato, con l'utilizzo del **cannocchiale**, "occhiale a cannone", rivelò che i pianeti tutti possono avere fasi come la Luna, il che indica che si tratta proprio di corpi sferici illuminati dal Sole, distinti dalle stelle; scoprì i satelliti di Giove, mostrando che non tutti i corpi celesti ruotano intorno al Sole, e tanto meno intorno alla Terra; osservò le macchie solari, cancellando il concetto che i corpi celesti fossero perfetti e immutabili [5]. Inoltre con i suoi esperimenti sulla caduta dei gravi, sul piano inclinato e sul pendolo fondò il metodo scientifico, detto appunto **metodo galileiano**, e introdusse il principio d'inerzia: i corpi non soggetti ad alcun agente esterno rimangono in quiete o si muovono di moto rettilineo uniforme. In tal modo divenne chiaro il fatto

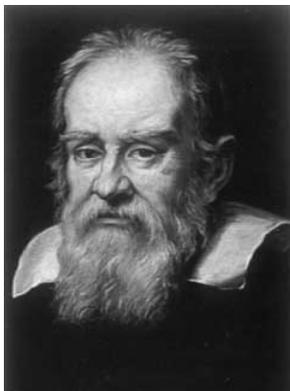


Fig. A.7 Galileo Galilei (1564 - 1642) e Isaac Newton (1642 - 1727)

che i moti planetari, tutt'altro che rettilinei e uniformi, rimandavano ad un agente esterno. Questo fu proprio il punto che lo mise in difficoltà con la Chiesa: le leggi di Keplero avrebbero permesso di ricavare le caratteristiche dell'agente esterno, quindi del Demiurgo; Dio invece deve essere conoscibile solo attraverso le Scritture.

A.4 La Gravitazione Universale

Più lontano dal controllo della Chiesa di Roma, Isaac Newton (Fig. A.7) raccolse l'eredità di Galileo e, con le sue grandi capacità matematiche, ricavò la legge che “muove il Sole e l'altre stelle”, quella che oggi chiamiamo la **legge di gravitazione universale**. I moti planetari sono dovuti all'azione del Sole; ma tutte le masse si sentono attraverso questa forza che è anche quella che ci tiene attaccati alla superficie della Terra, che fa “cadere” allo stesso modo la mela e la Luna:

$$F = \frac{GM_1M_2}{r^2} . \quad (\text{A.1})$$

Newton pubblicò i suoi *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* nel 1687 [2], dando inizio al primo periodo dell'Astronomia teorica.

Nei due secoli successivi Christiaan Huygens, Leonhard Euler, Jean Baptiste Le Rond d'Alembert, Pierre Simon de Laplace e Joseph-Louis Lagrange furono i più grandi esponenti dello studio della meccanica celeste, con cui si pervenne all'interpretazione dinamica delle orbite dei pianeti e dei loro satelliti e successivamente alla predizione dell'esistenza di pianeti ignoti agli antichi. Lagrange mostrò anche come sia importante studiare il moto dei singoli pianeti tenendo conto non solo dell'azione del Sole, ma anche di quella di tutti gli altri pianeti. Tuttavia non esiste alcuna soluzione analitica completa del problema a molti corpi. Giovanni Plana, allievo di Lagrange a Torino, impostò lo studio del problema a molti corpi con l'applicazione del metodo perturbativo e lo applicò al calcolo dettagliato del moto della Luna.

A fianco degli studi teorici, nel XVII e XVIII secolo ebbero grande sviluppo le tecniche osservative, che perfezionarono i cannocchiali di Galileo e Newton. Tra i contributi osservativi più importanti occorre ricordare quelli di Giovanni Domenico Cassini su Giove e gli anelli di Saturno, di Edmund Halley sulle comete e sulla catalogazione delle stelle, di James Bradley e Tobias Mayer sui moti propri stellari. Nel 1781 William Herschel, originario di Hannover, trasferitosi in Inghilterra, scoprì Urano, il primo pianeta non noto agli antichi; in seguito William e il figlio John Herschel si dedicarono alla catalogazione di stelle deboli e nebulose con telescopi sempre più grandi, cercando di comprenderne la distribuzione. Charles Messier produsse nel 1771 il primo grande catalogo di oggetti nebulari; nel 1801 Giuseppe Piazzi scoprì il pianetino Cerere; nel 1837 Friedrich Bessel ricavò la prima distanza stellare (quella della stella 61 Cygni) col metodo della parallassi che discuteremo in seguito.

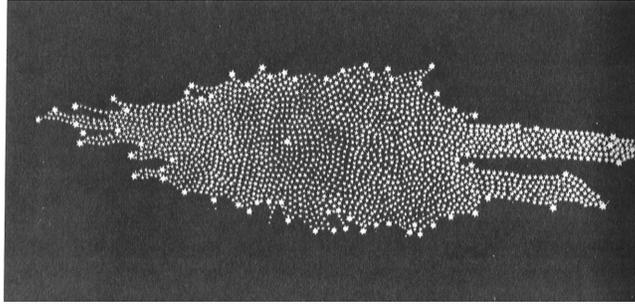


Fig. A.8 Il modello della Via Lattea secondo William Herschel, con il Sole prossimo al centro

Così, si giunse alla metà del XIX secolo alla definizione dell'Universo come un insieme di stelle e nebulose disposte a grandi distanze dal Sistema Solare, fino a un milione di volte maggiori delle distanze planetarie. L'**Universo delle stelle**, come proposto da Herschel, appariva schiacciato a forma di disco che noi vediamo proiettato sulla sfera celeste nella Via Lattea già ben nota agli antichi. Il Sole si troverebbe in una posizione centrale nel disco, perché la Via Lattea non mostra grandi differenze lungo l'intera circonferenza, includendo anche l'emisfero sud (Fig. A.8).

In quegli anni fu anche sperimentata la finitezza della velocità della luce, già sospettata da Galileo che ne tentò invano la misura. Nel 1676 Ole Rømer, proprio studiando i ritardi nel succedersi delle eclissi del satellite Io di Giove, fu in grado di misurare che i segnali luminosi viaggiano ad una velocità grande ma finita, che oggi sappiamo essere di 300.000 km al secondo. Pertanto, date le grandi dimensioni della distribuzione delle stelle al di fuori del Sistema Solare, la nostra conoscenza di oggetti astronomici posti a grandi distanze risulta ritardata nel tempo: guardare lontano, significa guardare anche indietro nel tempo. Vediamo la Luna più giovane di un secondo, il Sole di oltre 7 minuti, la stella Proxima Centauri di circa 3 anni, le stelle più lontane e deboli di parecchie migliaia di anni.

A.5 La nascita dell'Astrofisica

Il XIX secolo segnò l'avvento di una nuova metodologia nell'Astronomia, l'Astrofisica, dedicata allo studio della struttura fisica degli oggetti celesti, pianeti, stelle e nebulose [6]. Ciò fu reso possibile dalla nascita della **spettroscopia** ad alta sensibilità e risoluzione, in grado di disperdere la luce delle stelle nelle varie componenti. Il metodo era già stato utilizzato da Newton per il Sole. Inoltre William Herschel intorno al 1800 aveva mostrato che l'emissione del Sole si estendeva al di là del visibile, nella banda che chiamò appunto infrarossa. Ora si poteva applicare lo stesso metodo anche all'emissione molto più debole delle stelle.

Si fu così in grado di valutare quantitativamente il fatto che le stelle non sono tutte eguali, ma hanno diversi colori. Il loro spettro, cioè la distribuzione della loro

luminosità alle varie frequenze, segue la cosiddetta **legge del corpo nero** di Gustav Robert Kirchhoff: proprio come si trattasse di giganteschi “forni” a varie temperature, secondo la teoria termodinamica giunta in quegli anni alle prime sistemazioni teoriche.

Padre Angelo Secchi alla Specola Vaticana nella seconda metà del XIX secolo fu tra i primi astronomi a classificare le stelle in base a questa proprietà. Nel 1814 Joseph von Fraunhofer aveva già scoperto che lo spettro del Sole è solcato da un numero grandissimo di righe di assorbimento, attraverso le quali è possibile calcolare la situazione termodinamica dettagliata dell’atmosfera solare e la sua composizione chimica, confrontando lo spettro solare con gli spettri dei gas rarefatti in laboratorio. Mentre fino ad allora delle stelle si era soltanto misurato il flusso totale di radiazione, ora si poteva valutarne l’intensità nei vari colori, cioè l’energia specifica, e ciò permise di concludere che erano sfere gassose ad elevate temperature tenute insieme dalla forza di gravità.

Così a metà del XIX secolo Hermann von Helmholtz poté cimentarsi nei primi calcoli sulla struttura del Sole, mostrando l’inadeguatezza dei combustibili chimici per sostenerne l’esistenza al livello di irraggiamento attuale per più di qualche centinaia di migliaia di anni, un tempo troppo breve rispetto all’età della Terra stessa, pari a 4.5 miliardi di anni come mostrato dalle radioattività delle rocce. Nacque l’Astrofisica teorica, con problematiche che dalla Meccanica Celeste e dallo studio delle orbite si muovevano verso la fisica della struttura dell’Universo e della sua origine.

Il XIX secolo vide in generale l’espandersi dell’attività in campo astronomico con la costituzione dei primi grandi osservatori. Potè così iniziare lo studio sistematico della distribuzione delle stelle nello spazio combinato con la classificazione dei loro tipo spettrale, quindi della loro configurazione fisica.

Un’importante scoperta della fisica, che si rivelò di fondamentale importanza per l’Astronomia, è dovuta a Hippolyte Fizeau. Nel 1848 fu in grado di mostrare in laboratorio che le onde luminose subiscono l’**effetto Doppler**, già ben noto per le onde acustiche. Se sorgente (stella) e osservatore (telescopio) sono in moto relativo di allontanamento, le componenti spettrali, in particolare le righe, sono spostate verso il rosso; se viceversa si avvicinano le componenti spettrali sono spostate verso il blu. In particolare vale la seguente legge

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \pm \frac{v}{c} \quad (\text{A.2})$$

dove v è la velocità relativa di allontanamento (+) o avvicinamento (-) e c la velocità della luce, che Fizeau fu in grado di misurare con elevata precisione. Dunque, dall’osservazione della deformazione degli spettri stellari rispetto a quelli di laboratorio, si può ricavarne la velocità del moto relativo alla Terra. Dato il numero limitato di moti propri osservabili in alcune stelle vicine, lo spostamento Doppler è il metodo più diretto di misurare i moti degli oggetti celesti. Ne derivarono subito le indicazioni che l’Universo è tutt’altro che immutabile, anzi è caratterizzato da una dinamica globale molto violenta.

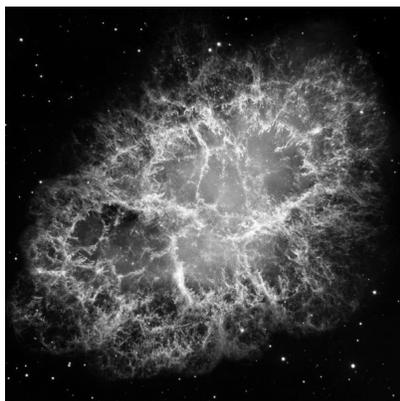


Fig. A.9 La nebulosa del Granchio

Un altro elemento veniva a disturbare il concetto di Universo immutabile. Gli astronomi incominciarono a rivelare la comparsa di oggetti stellari non cometari che improvvisamente appaiono nelle profondità dello spazio, aumentano rapidamente la loro luminosità e poi scompaiono nel nulla. Eventi del genere erano già stati registrati in tempi lontani, in particolare dai Cinesi, che le soprannominavano “stelle ospiti”. Un evento particolarmente famoso fu la stella ospite dell’anno 1054 d.C. nella costellazione del Granchio, dove oggi si osserva una nebulosa con una dinamica molto ricca, a indicare il resto di una gigantesca esplosione (Fig. A.9). Tanto fu grande quell’evento che oggi lo cataloghiamo, insieme ad altri, come **supernova**. Lo stesso Tycho nel 1572 fu testimone dell’apparire di un’altra supernova proprio mentre osservava Venere; Keplero e Galileo ne osservarono un’altra nel 1604. Dunque le stelle cambiano, evolvono!

A.6 L'evoluzione stellare

Nel 1908 le ricerche sistematiche sugli spettri e le luminosità assolute delle stelle permisero di mostrare che le temperature e le luminosità delle stelle sono strettamente collegate. Ejnar Hertzsprung e Henry Norris Russell costruirono indipendentemente un diagramma osservativo diventato oggi fondamentale per la comprensione della struttura ed evoluzione delle stelle, che mostrava come le stelle blu, le più calde in termini della curva di corpo nero, sono anche le più luminose, mentre quelle rosse, cioè le più fredde, sono le meno luminose. Il diagramma di Hertzsprung - Russell è rappresentato schematicamente in Fig. A.10: la maggior parte delle stelle si dispone lungo quella che si chiama la “sequenza principale”, che conferma appunto il fatto che le stelle più calde sono anche le più luminose.

Studiando sistemi di stelle binarie, fu possibile verificare che è la massa, cioè la quantità di materia autogravitante, a definire le caratteristiche di una stella,

in particolare il suo colore e luminosità. Questo risultato era però reso incerto dall'impossibilità di spiegare l'origine della potenza delle stelle: nessun combustibile noto era sufficientemente potente. Si dovette aspettare fino al 1939 quando Hans Bethe comprese che le **reazioni termonucleari** (poi anche usate nei reattori nucleari) potevano risolvere il dilemma in quanto capaci di trasformare in energia quantità non trascurabili della massa dei nuclei atomici di cui è costituita la materia, secondo il principio di equivalenza $E = mc^2$ della teoria della relatività di Einstein; mentre le reazioni chimiche raggiungono al massimo una trasformazione $\sim 10^{-8}mc^2$, con le reazioni termonucleari che trasmutano l'idrogeno in elio si raggiunge un'efficienza $\sim 10^{-2}mc^2$.

Con quest'ultimo tassello nella fisica delle stelle, fu possibile produrre modelli fisici che riproducevano le caratteristiche misurabili delle stelle osservate, permettendo anche di ricavare i dati sull'interno opaco. Il pioniere di questi modelli era stato Helmholtz, cui seguirono Robert Emden, Martin Schwarzschild, Subrahmanyan Chandrasekhar. Nel contempo divennero disponibili gli elaboratori elettronici ad elevata potenza di calcolo che permisero di sviluppare tali modelli tenendo conto dei processi e fenomeni fisici dettagliati.

Fu possibile comprendere che il Sole brucia idrogeno al suo interno trasformandosi in elio, mentre altri tipi di stelle, le cosiddette stelle giganti, sono in fasi di vita più avanzate in cui è l'elio che brucia a sua volta trasformandosi in carbonio. Si noti che l'espressione "brucia" non ha nulla a che fare con un qualunque processo chimico, bensì è solo modo di esprimere il fatto che una reazione fisica di trasmutazione nucleare porta alla produzione di energia termica.

Pertanto fu possibile calcolare come le stelle evolvono cambiando nel tempo. Si passò dai modelli statici delle stelle ai **modelli evolutivi**. Si calcolò che le stelle si distaccano dal gas interstellare per collasso dovuto alla forza di autogravitazione; nel collasso si surriscaldano al punto di raggiungere l'innesco delle reazioni termonucleari, prima fra tutte quella dell'idrogeno. Esaurito il combustibile, la stella diventa di nuovo preda dell'autogravitazione, andando incontro ad un nuovo sur-

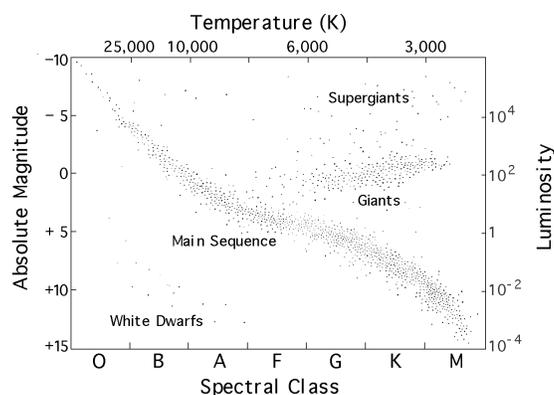


Fig. A.10 Schema del diagramma di Hertzsprung-Russell

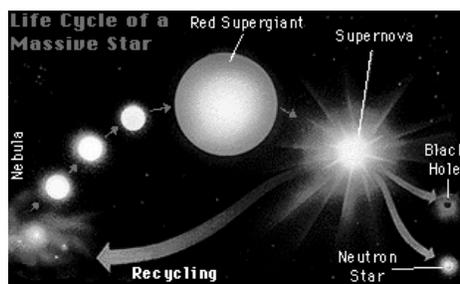


Fig. A.11 Il ciclo di vita di una stella di grande massa

riscaldamento e alle condizioni di innesco di successive reazioni. Si tratta di una progressiva battaglia tra la forza di gravità che tende a ridurre la massa gassosa ad un punto e la pressione termica sprigionata dalle reazioni termonucleari. Fino ad un punto in cui la gravità prevale e il collasso finale è violento e diventa esplosivo, trasformando le stelle in nebulose planetarie o supernovae. In Fig. A.11 è ripotato lo schema dell'evoluzione di una stella di massa maggiore del Sole verso la fase supernova.

Il concetto di Universo in evoluzione rappresenta una grande conquista della moderna Astronomia rispetto ai modelli antichi. L'Universo non è più immutabile, neppure infinito nello spazio e nel tempo. Quali le conseguenze? Il primo passo dev'essere dunque la definizione dei suoi limiti spaziali, se li possiamo raggiungere.

A.7 Le distanze delle stelle

La distanza degli oggetti celesti è la grandezza fisica più difficile da misurare, eppure fondamentale per definire tutte le altre: ad esempio, per valutare quanto potente è una stella non basta sapere quanta radiazione ne riceve il nostro telescopio, ma anche quanto è distante da noi, perché il flusso di radiazione decade in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Ad esempio, una stella debole può essere intrinsecamente debole, oppure molto luminosa, ma lontanissima. Di conseguenza tutta la fisica delle stelle, e degli altri corpi celesti, dipende anzitutto dalla distanza.

Purtroppo però, proprio a causa delle grandi distanze in Astronomia, non possiamo avere una visione stereoscopica della distribuzione di stelle: tutto ci appare appiattito, all'infinito. Possiamo aumentare le capacità di visione tridimensionale combinando osservazioni del cielo separate di sei mesi, quando la Terra si trova da parti opposte del Sole, quindi a distanza di 300 milioni di chilometri; esattamente come fanno i geografi quando traggono punti di riferimento da due posizioni di distanza relativa nota. Il metodo è quello della cosiddetta triangolazione, basata sulla ricostruzione trigonometrica di triangoli di cui siano misurati i lati e i due angoli adiacenti.

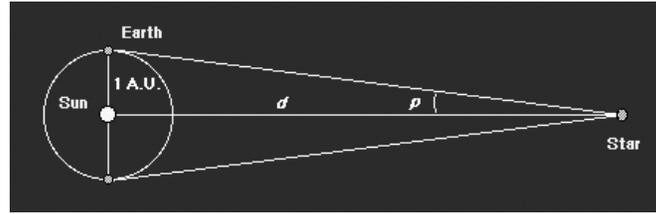


Fig. A.12 Lo schema delle misure di parallasse annua

Ebbene in Astronomia alcune stelle assumono posizioni relative differenti quando osservate a sei mesi di distanza: sono stelle “in primo piano”, ma la maggior parte di esse non mostrano alcun cambiamento, sono praticamente stelle fisse. Questo avviene perché, quando il triangolo ha una base troppo piccola rispetto all’altezza, gli angoli adiacenti sono praticamente ambedue di 90 gradi. Oggi solo i telescopi permettono di raggiungere risoluzioni inferiori a qualche centesimo di secondo d’arco e quindi la distanza maggiore che possiamo misurare con questo metodo è:

$$p = \frac{150 \text{ milioni di km}}{d} = 0.01 \text{ arc sec} = 4.848 \times 10^{-8} \text{ radianti} \quad (\text{A.3})$$

$$d = 3.086 \times 10^{20} \text{ cm} = 100 \text{ parsec} = 326 \text{ anni luce} . \quad (\text{A.4})$$

Tali misure dirette sono dette **misure di parallassi**, essendo questo il nome dell’angolo θ sotto cui viene “visto” il raggio dell’orbita terrestre dalla stella (Fig. A.12).

Come si possono misurare le distanze maggiori, quelle cioè delle stelle “fisse”? La fisica stellare permette, come abbiamo visto precedentemente, di concludere che tutte le stelle di una data massa hanno la stessa luminosità e lo stesso colore. Pertanto, individuata una stella con lo stesso colore del Sole (in realtà si richiede che abbia lo stesso spettro), si può concludere che ne deve avere la stessa luminosità. Se appare diversamente luminosa, significa che il suo flusso di radiazione è modificato dalla distanza. Dal confronto tra la luminosità apparente e quella che avrebbe se fosse alla stessa distanza del Sole, si può dunque valutarne la distanza. Definendo come luminosità assoluta della stella quella che avrebbe se fosse alla distanza di 10 parsec, si può scrivere:

$$L_{\text{apparente}} = L_{\text{assoluta}} \left(\frac{10 \text{ pc}}{\text{distanza in parsec}} \right)^2 . \quad (\text{A.5})$$

Quindi, confrontando la luminosità apparente di una stella con quella assoluta dedotta dalle caratteristiche spettroscopiche tramite il diagramma di Hertzsprung-Russell, se ne ottiene la distanza. Questo metodo è detto delle **parallassi spettroscopiche**.

Nel 1912 l’astronoma Henrietta Leavitt all’Harvard College Observatory (Fig. A.13) scoprì un fatto di fondamentale importanza per lo sviluppo della misura delle distanze delle stelle: una classe di stelle variabili, il cui prototipo è la stella δ della costellazione del Cefeo, da cui dette **variabili Cefeidi**, mostra una precisa relazione



Fig. A.13 Henrietta Leavitt (1868 - 1921)

di proporzionalità tra periodo di variabilità e luminosità assoluta:

$$\log \left(\frac{L_{media}}{L_{Sole}} \right) = 1.15 \log P_{giorni} + 2.47 . \quad (\text{A.6})$$

Pertanto con una misura di periodo di variabilità (si tratta di stelle con periodi tipici di 5 - 10 giorni) e curva di luce sinusoidale molto regolare) si ricava direttamente la luminosità assoluta, che, confrontata con quella apparente, permette di avere direttamente la distanza. Le Cefeidi sono quindi preziosi **indicatori di distanza**, ancor oggi i più accurati disponibili. Anche altre classi di variabili (RR Lyrae, W Virginis) hanno infatti simili correlazioni periodo - luminosità assoluta, e anch'esse possono essere utilizzate come indicatori di distanza.

Un altro tipo di indicatore sono le supernove, cioè gli eventi esplosivi che caratterizzano la fine della vita delle stelle. La luminosità massima raggiunta dalle supernove è caratteristica del tipo di esplosione che dipende dalla massa della stella; pertanto risulta possibile dare una valutazione della luminosità assoluta del fenomeno e, confrontandola con quella apparente, giungere ancora ad una misura di distanza. Poiché le supernove raggiungono luminosità pari a 10 miliardi di Soli, esse sono gli indicatori migliori per le grandissime distanze.

A.8 La Via Lattea

Agli inizi del XX secolo il concetto di Universo era quello di un vasto sistema di stelle e nubi di gas rarefatto a forma di disco di cui il Sole occupa una posizione centrale: in gran parte si adattava allo schema della Via Lattea proposto da William Herschel fin dal 1780.

Questo modello fu sostanziato quantitativamente da Jacobus Kapteyn nel 1922 sulla base di un'accurata statistica della distribuzione di stelle. Il problema scientifico fu la ricostruzione della geografia tridimensionale dell'Universo con la misura

delle distanze delle stelle secondo i metodi descritti nel precedente paragrafo: Kapteyn giunse alla conclusione che gli estremi del disco dovessero trovarsi ad almeno 6.000 anni luce.

Contemporaneamente però un altro astronomo, Shapley, giungeva ad un modello completamente diverso. Si era occupato non delle stelle singole, ma di quei meravigliosi globi di stelle che vanno sotto il nome di **ammassi globulari** (Fig. A.14).



Fig. A.14 L'ammasso globulare NGC 6093

Si tratta di sistemi fino a 100.000 stelle, gigantesche “lampadine” cosmiche, facili quindi da rivelare. Per gli ammassi è possibile una buona misura delle distanze in quanto il metodo delle parallassi spettroscopiche può essere applicato agli spettri di tutte stelle dell'ammasso che ovviamente si trovano circa alla stessa distanza. In realtà si confrontano il diagramma di Hertzsprung - Russell dell'ammasso con quello delle stelle vicine con distanze note e si opera la sovrapposizione delle sequenze principali: in tal modo si ha la differenza tra luminosità assoluta e apparente, e quindi si ottiene la distanza in modo più affidabile che non riferendosi a singole stelle.

Utilizzando tale tecnica combinata con il metodo periodo - luminosità delle stelle variabili osservate in 93 ammassi, Harlow Shapley ricostruì la disposizione tridimensionale degli ammassi globulari, ricavando che alcuni di essi sono ben più lontani delle stelle fino ad allora osservate. Inoltre essi non sono raccolti in un disco, bensì in uno sferoide di dimensioni dell'ordine dei 150.000 anni luce, il cui centro di simmetria è nella direzione della costellazione del Sagittario, ben 25.000 anni luce lontano dalla posizione del nostro Sistema Solare. Improvvisamente l'Universo poteva diventare 10 volte più grande di quanto immaginato da Kapteyn e non più centrato sul Sole (Fig. A.15).

I due punti di vista furono successivamente riconciliati. Kapteyn non aveva potuto tener conto dell'effetto di assorbimento della luce delle stelle da parte del mezzo interstellare che ne riduce fortemente la luminosità e ne cambia anche lo spettro. Quindi aveva sistematicamente sottovalutato le distanze stellari, ma soprattutto non aveva considerato che il sistema stellare potesse estendersi ben più in là di quanto

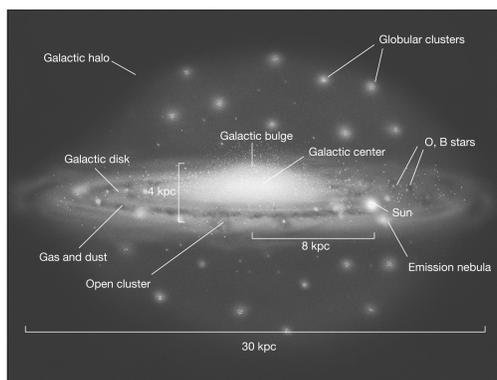


Fig. A.15 Il modello di Shapley della Via Lattea

osservabile: la nostra visione del disco galattico è ridotta dalla “nebbia” assorbente del mezzo interstellare.

Gli ammassi globulari sono potenti “lampadine”, ma soprattutto sono presenti anche fuori del disco, in un alone sferoidale che contiene poco gas interstellare, poca “nebbia”. Per questo Shapley poté vedere più lontano. E notiamo soprattutto che arrivò a dimostrare che il Sole non è al centro dell’Universo di stelle. Un’altra rivoluzione copernicana si era consumata, anche se meno drammatica della prima.

Negli anni successivi fu possibile studiare il moto del Sole rispetto alle stelle vicine, ricavare il moto d’insieme di gruppi fisici di stelle e ricostruire che il disco della Via Lattea ruota intorno al centro nella costellazione del Sagittario. La velocità di rotazione cambia alle diverse distanze dal centro seguendo le leggi della dinamica kepleriana; in particolare il Sistema Solare si trova a 25.000 anni luce dal centro, ha una velocità di rivoluzione di 220 km s^{-1} e compie una rivoluzione in 240 milioni di anni.

In effetti Il Sistema Solare compie anche delle oscillazioni rispetto al piano del disco: fra 15 milioni di anni la Terra sarà al di sopra del disco, libera dalle “nebbie” del mezzo interstellare, e l’umanità, se sarà sopravvissuta, potrà avere una fantastica visione diretta dei ricchi ammassi di stelle nelle regioni centrali della Via Lattea.

A.9 Le galassie esterne

La prima metà del XX secolo rappresenta un periodo di grande sviluppo tecnologico dell’Astronomia ottica. Il più grande telescopio rifrattore con una lente da 1.02 m operava a Yerkes dal 1897. A Mount Wilson fu inaugurato il telescopio riflettore Hooker con specchio da 2.5 m nel 1905 e nel 1948 iniziò ad operare a Mount Palomar il riflettore Hale con specchio da 5.1 m (Fig. A.16), che è rimasto per grande tempo il maggior strumento al mondo. Mount Wilson e Mount Palomar hanno consentito all’umanità di osservare oltre la Via Lattea.



Fig. A.16 Il telescopio Hale dell'Osservatorio di Mount Palomar

Nel 1923 Edwin Hubble (Fig. A.17) utilizzò il telescopio Hooker per osservare la nebulosa di Andromeda e ottenne una fotografia storica: mostrò che essa era un insieme gigantesco di stelle e tra esse poté identificare una Cefeide. Quando applicò la legge di Leavitt, ne ottenne una distanza 2.25 milioni di anni luce, quasi 1000 volte maggiore delle dimensioni della nostra Galassia. Quella nebulosa doveva rappresentare un oggetto distinto dalla Galassia, probabilmente un “Universo isola” come la Galassia appunto.

Proprio tre anni prima, nel 1920, Shapley aveva affrontato un'accesa discussione con il collega Heber Curtis alla National Academy of Sciences a Washington sulla natura delle nebulose catalogate da Messier prima e più recentemente da Lord Rosse, che aveva costruito a proprie spese un gigantesco telescopio da 2 m in Irlanda (il Leviatano). Con quello strumento Lord Rosse aveva riconosciuto che molte delle nebulose presentavano una chiara struttura a spirale. Secondo Curtis questo indicava che si trattava di “Universi isola”, strutture stellari a disco rotanti analoghe alla Via Lattea, la nostra Galassia. Shapley era invece dell'opinione si trattasse di oggetti all'interno della Via Lattea, quindi di relativamente piccole dimensioni, simili agli ammassi; questa volta perse la scommessa.

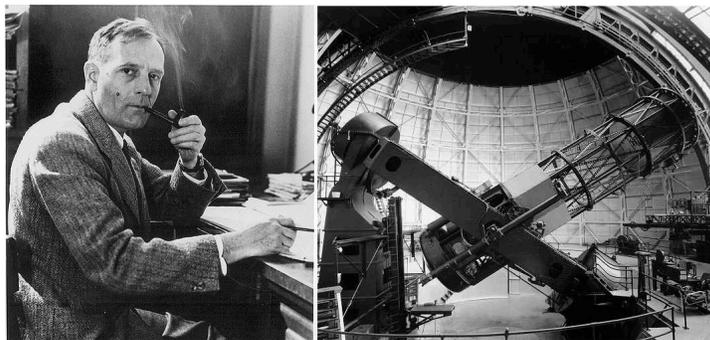


Fig. A.17 Edwin Hubble e il telescopio Hooker dell'Osservatorio di Mount Wilson

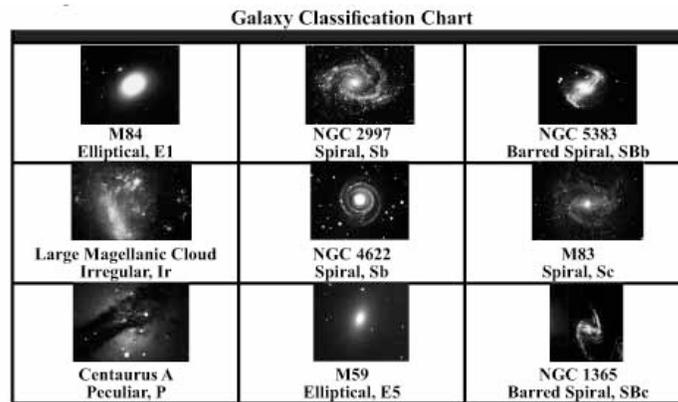


Fig. A.18 Tipi di galassie secondo la classificazione morfologica di Hubble

La soluzione al dibattito venne appunto da Mount Wilson: Hubble fu in grado di risolvere la nebulosa di Andromeda in stelle, una delle quali con la caratteristica curva di luce delle Cefeidi. Era nato l'**Universo delle galassie**, migliaia di volte più grande di quanto fino allora ipotizzato. Hubble continuò le sue indagini sulle galassie esterne, classificandole in tre classi morfologiche (Fig. A.18): spirali, spirali barrate e lenticolari (circa 77% del totale), ellittiche (20%), irregolari (3%). Ancora non sappiamo con certezza quali siano i processi di formazione ed evoluzione delle galassie dei vari tipi, ma certamente il fattore fisico che divide ellittiche e spirali è il momento angolare: le ellittiche hanno basso momento angolare, le spirali alto. Si può facilmente comprendere questa dicotomia come quello che i fisici chiamano l'effetto "ballerina". La ballerina che ruota rapidamente e contrae le proprie braccia distese vedrà crescere la propria velocità angolare. Inoltre il gas galattico (stelle e gas interstellare) subirà anche un progressivo schiacciamento in un piano perpendicolare all'asse di rotazione: si formerà il disco delle spirali. Nelle ellittiche tutto ciò non si verifica perché ruotano lentamente e quindi mantengono una forma più sferoidale.

Peraltro non è chiaro come si differenzino le condizioni iniziali che portano alle galassie dei due tipi. Attualmente alcune evidenze suggerirebbero che le galassie ellittiche possano formarsi dalla coalescenza di due o più spirali, con grande dissipazione di momento angolare nell'interazione gravitazionale. Va detto che la collisione di galassie non è un urto nella comune accezione del termine, non si hanno cioè scontri tra particelle o stelle. Essa è puramente determinata dall'interazione gravitazionale, è quindi una specie di grande marea che deforma quelle enormi distese di gas. Anche il mondo delle galassie non è dunque immutabile, anzi mostra caratteristiche dinamiche molto attive.

Nel 1929 Hubble compì un'altra fondamentale scoperta. Dalle osservazioni spettroscopiche su un buon numero di galassie di cui aveva anche misurato la distanza attraverso il metodo delle Cefeidi, giunse a concludere che le galassie tendono ad avere spettri spostati verso il rosso. Se interpretato come effetto Doppler dinamico,

questo dato comporta che esse si allontanano dalla nostra Galassia. Inoltre esiste una ben precisa correlazione lineare tra velocità di allontanamento e distanza, nel senso che le galassie più lontane si allontanano più velocemente:

$$v = Hd . \quad (\text{A.7})$$

Si tratta della nota **legge di Hubble**, dove H è detta costante di Hubble (Fig. A.19). Tra l'altro con questa legge si possono misurare le distanze di galassie lontanissime e non risolubili in stelle a partire dallo studio dello spostamento delle righe spettrali.

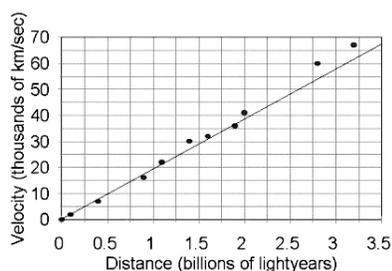


Fig. A.19 Legge di Hubble: correlazione tra velocità di recessione e distanza

A.10 Le “altre” Astronomie

A partire dagli anni '30 gli astronomi si resero conto che gli oggetti cosmici e in particolare proprio le galassie sono forti emettitori in bande elettromagnetiche diverse dal visibile. Nacque così per prima la radioastronomia, che ha il vantaggio di poter essere fatta con radiotelescopi a Terra, poi negli anni '60 l'Astronomia a raggi X, che richiede che i rivelatori vengano portati da sonde e satelliti artificiali al di sopra dell'atmosfera che assorbe completamente queste lunghezze d'onda. E quindi vennero le Astronomie dei raggi ultravioletti, infrarossi e gamma, che pure richiedono osservazioni al di sopra dell'atmosfera terrestre.

Il contributo di queste Astronomie non è solo complementare a quanto si osserva nella banda ottica. In queste diverse lunghezze d'onda si rivelano oggetti ed eventi invisibili nell'ottico, o che nell'ottico sono poco brillanti: ad esempio, le radiogalassie, i quasar e le pulsar nella banda radio, le regioni di formazione stellare nell'infrarosso, i venti supersonici intorno a stelle calde e le nebulose planetarie nell'ultravioletto, le binarie compatte, i buchi neri e le galassie attive nei raggi X (Fig. A.20).

Per quanto riguarda la catalogazione delle galassie distanti e quindi deboli, le osservazioni radio e X permettono di selezionare le galassie da osservare nell'ottico e che sarebbero “perse” nei cataloghi stellari dove le galassie, molto deboli, si con-

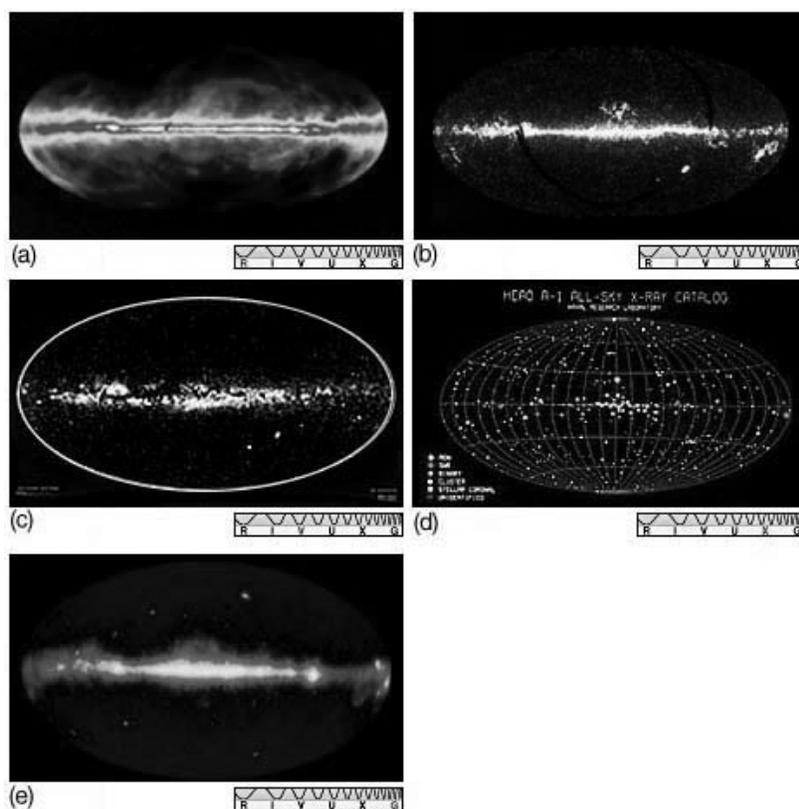


Fig. A.20 Il cielo alle diverse lunghezze d'onda: (a) radio, (b) infrarosso, (c) ottico, (d) raggi X, (e) raggi gamma

fondono con le stelle. Più in generale, si può dire che le mappe radio del cielo ci mostrano la distribuzione di radiogalassie, quasar e galassie attive: osservando con i radiotelescopi si rivela il cielo delle galassie più distanti e più attive. E similmente succede per le mappe X, anche se nella banda X sono molto brillanti anche un gran numero di oggetti galattici.

A.11 L'Universo alle grandi scale

I telescopi di Mount Wilson e in seguito di Mount Palomar sono stati tra gli anni 1920 e 1960 gli strumenti con cui l'Astronomia moderna ha classificato le galassie e ha iniziato a farne la mappa della distribuzione spaziale. In particolare, applicando il metodo della legge di Hubble per le misure di distanza, quei telescopi furono utilizzati per misure spettroscopiche di galassie deboli che richiedevano pose fotografiche

su tempi molto lunghi, anche più notti successive. Negli ultimi dieci anni sono entrati in operazione raffinati telescopi di nuova tecnologia, il Multi-Mirror Telescope (MMT), il New Technology Telescope (NTT), lo Hubble Telescopio Spaziale (HST, Fig. A.21), il Keck Telescope, il Very Large Telescope e sono stati sviluppati rivelatori ben più efficienti delle lastre fotografiche, come i rivelatori di fotoni e le camere CCD (Charge Coupled Devices).



Fig. A.21 Lo Hubble Space Telescope ripreso dallo Space Shuttle

La distribuzione tridimensionale delle galassie su grandi scale, tra i 30 e i 300 milioni di anni luce, è dovuta al paziente lavoro di gruppi di astronomi che si sono dedicati a misurare gli spettri di galassie in regioni selezionate del cielo (non possediamo ancora una mappa delle galassie su tutto il cielo, perché occorrerà prendere miliardi di spettri). Le prime mappe globali della distribuzione di galassie risalgono a George Abell, John Huchra, Margaret Geller, Marc Aaronson, Alan Dressler. Oggi esistono mappe estese e/o profonde: l'Hubble Space Telescope Guide Catalog, la 2MASS Redshift Survey, la 6dF Galaxy Redshift Survey, la Sloan Digital Sky Survey.

Si è osservato che le galassie non sono distribuite uniformemente, ma si aggregano in gruppi, ammassi e superammassi, secondo una gerarchia ben definita, probabilmente risalente alle fasi primordiali in cui le galassie si sono formate. L'immagine dell'Universo su grande scala è quella di una spugna, con grandi vuoti circondati da ammassi di galassie addensati sulle superfici interstiziali tra vuoti (Fig. A.22). Lo spazio tra le galassie contiene gas intergalattico molto caldo, osservabile a raggi X.

La nostra Galassia, pur essendo una cospicua spirale, non ha nulla di peculiare: ancora una volta una rivoluzione di tipo copernicano si è compiuta. Siamo in un angolo esterno della Galassia, che non ha di per sé alcuna caratteristica fuori dal comune, e siamo ben lontani dall'esser al centro dell'Universo.

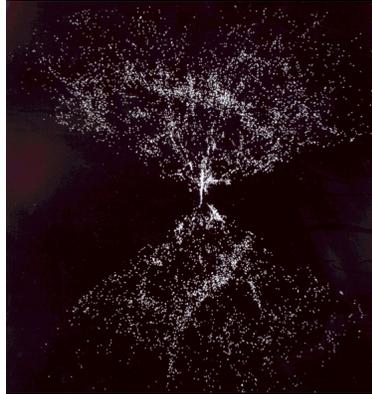


Fig. A.22 Aggregazioni di galassie nella struttura a grande scala

A.12 La Cosmologia fisica

Negli stessi anni in cui Hubble osservava che tutte le galassie appaiono allontanarsi tra loro, Albert Einstein (Fig. A.23) propose la teoria della Relatività Generale con cui divenne possibile sviluppare veri e propri modelli cosmologici (fisici e non soltanto metafisici). Einstein tentò con una certa difficoltà di sviluppare modelli di Universo statici, in cui cioè, a parte effetti dinamici locali, l'insieme delle galassie su grandi scala rimanesse immutabile: anche Einstein, come più tardi riconobbe egli stesso, era caduto nel pregiudizio di considerare l'Universo chiuso e senza evoluzione.



Fig. A.23 Storica foto di Einstein, Hubble e Humason al telescopio di Mount Palomar

Invece Friedmann calcolò che le soluzioni più coerenti delle equazioni di Einstein cosmologiche producevano modelli in cui l'Universo delle galassie si espande o si contrae mantenendo immutati i rapporti di distanze relative tra le galassie: pro-

prio come prevede la legge di Hubble, che è quindi contenuta nelle soluzioni di Friedmann. Oggi la legge di Hubble mostra che l'Universo è in espansione.

Se quindi fossimo in grado di far tornare indietro il tempo, vedremmo un Universo sempre più denso e compatto: le galassie e le stelle si fonderebbero infine in un'unica "zuppa cosmica" molto calda, come ci dice la semplice considerazione fisica che un gas compresso si surriscalda. L'Universo è dunque iniziato da una violenta espansione dello spazio-tempo, un'inflazione, che venne ironicamente definita da Hoyle negli anni '40 il **big-bang**, nome che poi è rimasto nell'uso comune. Esiste qualche segno di tale evento, oltre la recessione delle galassie? Alpher, Bethe e Gamow proposero nel 1942 che dovesse essere rimasta da quella fase calda una componente di radiazione di corpo nero in fase di raffreddamento; prevedero che oggi essa dovesse essere scesa alla temperatura di 3 gradi assoluti, circa 270 gradi centigradi sotto la temperatura di congelamento dell'acqua.

Nel 1965 Arno Penzias e Robert Wilson rivelarono tale **radiazione di fondo di corpo nero** attraverso misure nelle microonde, e fu possibile calcolare che essa rappresenta la radiazione energeticamente dominante nello spazio (Fig. A.24).



Fig. A.24 Arno Penzias e Robert Wilson davanti all'antenna con cui scoprirono nel 1965 la radiazione cosmologica di fondo

Tornando ai modelli di Friedmann, egli mostrò anche come due tipi di Universi in espansione sono possibili: quelle di **Universo aperto**, in cui il fattore di scala cresce indefinitamente, e quelle di **Universo chiuso** in cui il fattore di scala cresce fino ad un massimo per trasformarsi arrestarsi e tornare a decrescere verso zero. Il modo di distinguere in quale tipo di Universo ci troviamo a vivere richiede di misurare le sottili deviazioni che la legge di Hubble lineare subisce quando si osservi il comportamento di galassie lontanissime. Finora questo compito non è ancora stato svolto, nonostante l'utilizzo dei più raffinati telescopi di nuova tecnologia, incluso l'NTT, l'HST, il Keck, e rivelatori ben più efficienti delle lastre fotografiche come i rivelatori di fotoni e i CCD.

Un altro modo di affrontare la questione è legato alla ragione fisica per cui l'Universo può essere aperto o chiuso. L'espansione cosmologica avviene a seguito del big-bang primordiale, in cui la materia è stata dotata di una quantità di energia cinetica, e che però è rallentata dall'autogravitazione di tutta la materia dell'Universo.

A seconda del prevalere della spinta cinetica o dell'autogravitazione si avranno espansioni senza fine o espansioni che si arresteranno per trasformarsi in collassi. La spinta può essere valutata dalla legge di Hubble stessa; l'autogravitazione richiede la misura della massa dell'Universo. Problema questo non facile: sia perché è difficile essere sicuri di "contare" tutta la materia visibile, sia perché è oggi chiaro che la maggior parte della materia gravitante dev'essere sotto forma di una forma esotica di materia, detta appunto **materia oscura**, capace di interagire solo gravitazionalmente e in nessun altro modo con la materia visibile di cui siamo fatti noi e i nostri rivelatori.

La presenza di materia oscura può essere valutata dalla dinamica delle galassie che è appunto determinata dalla forza gravitazionale: su scale di gruppi e ammassi di galassie è possibile calcolare quanta materia oscura è necessaria per determinare i moti osservati. Come già detto, i risultati sono che la materia oscura può essere in quantità oltre 10 volte superiore alla materia visibile.

Nel 1998 due gruppi di osservatori della California, specializzati nella rivelazione di supernove in galassie lontane, hanno utilizzato le supernove di tipo SNe Ia per ricalibrare la legge di Hubble: abbiamo già detto infatti che la luminosità assoluta delle supernove al loro massimo ha un valore tipico e quindi permette una valutazione della distanza; le SNe Ia corrispondono ad un collasso di nana bianca con liberazione di energia gravitazionale ben definita. Quel che risulta dai loro dati è che le galassie lontane con supernove di tipo SNe Ia risultano più distanti di quanto previsto dalla legge di Hubble (anche eventualmente tenendo conto di effetti relativistici). Ciò può essere dovuto a due principali ragioni: (i) le supernove in galassie lontane, e quindi risalenti a tempi molto primitivi nella vita dell'Universo, sono diverse da quelle attuali, sebbene tutte le loro caratteristiche fotometriche e spettrali non sembrino differenti; (ii) l'Universo sta accelerando, cioè la legge di Hubble va modificata introducendo un progressivo aumento della velocità di espansione dell'Universo. Quale forma di energia può dare origine a un tale effetto? Tanto per continuare nella terminologia già adottata, si parla di **energia oscura**. Il risultato è ancora molto preliminare e forse potrà essere falsificato da future osservazioni: tuttavia è importante notare come le nostre attuali conoscenze comportino che l'Universo sia dominato dall'energia oscura (73%) e dalla materia oscura (23%), mentre la materia a noi nota appare solo una piccola componente di circa il 4% (Fig. A.25).

A.13 Conclusione

Il significato di questa rapida cavalcata attraverso la storia antica e recente dell'Astronomia è stato quello di generare il quadro d'insieme. Abbiamo scoperto che la nostra Terra è un pallido punto azzurro che orbita nelle vicinanze di una stella del tutto comune, che a sua volta compie una rotazione intorno al centro della Galassia da cui è molto lontana. La Galassia non è a sua volta particolarmente importante. E

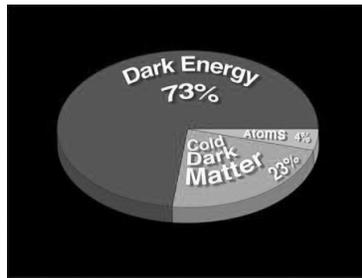


Fig. A.25 Percentuali delle componenti di materia/energia dell'Universo

l'Universo sembra essere uguale in tutte le sue parti se si guarda alla struttura complessiva.

Eppure in questo Universo ci siamo noi, una civiltà si è qui formata. E questo fatto può forse condizionare in futuro l'evoluzione globale. Anche se insignificanti, siamo giunti a comprendere lo schema fisico in cui ci troviamo e forse lo potremo in futuro influenzare. Dobbiamo quindi procedere oltre nella nostra ricerca. Che cosa ha determinato il big-bang, quali processi fisici governano la materia, lo spazio e il tempo nei momenti iniziali della nascita dell'Universo? Possono esistere altri Universi, al di fuori e separati dal nostro? Queste (e altre ancora) sono le domande che dobbiamo affrontare.

Bibliografia

1. J. P. Verdet – *Storia dell'Astronomia*, Longanesi, 1995
2. I. Newton – *Principi Matematici della filosofia naturale*, Classici della scienza, Torino Utet, 1965
3. N. Copernico – *Opere: De Revolutionibus*, Classici della scienza, Torino Utet, 1979
4. J. Kepler – *Astronomia nova, seu, Physica coelestis, tradita commentariis De motibus stellae martis, ex observationibus G.V. Tychoonis Brahe*, 1609
5. G. Galilei – *Opere* Casa Editrice Riccardo Ricciardi, Collana La Letteratura Italiana, 1953
6. J. Gribbin – *Enciclopedia di Astronomia e Cosmologia*, Garzanti, 2005