

ASSOCIAZIONE ASTRONOMICA FELTRINA RHETICUS



CORSO DI ASTRONOMIA 2008 TEORICO-PRATICO DISPENSE

INDICE

BREVE STORIA DELL'ASTRONOMIA PLANETARIA

DI CARLO FERRIGNO ED ELENA VEDANA

PAG. 2

IL SISTEMA SOLARE

DI GABRIELE VANIN

PAG. 10

L'EVOLUZIONE STELLARE

DI CARLO FERRIGNO

PAG. 16

LA NATURA DELL'UNIVERSO

DI FABIO FONTANA

PAG. 28

TROVARE LA STRADA NEL CIELO

DI GABRIELE VANIN

PAG. 38

I MITI DELLE COSTELLAZIONI

DI GABRIELE VANIN

PAG. 42

BREVE STORIA DELL'ASTRONOMIA PLANETARIA

DI CARLO FERRIGNO
E ELENA VEDANA

LE ORIGINI

Metà del paesaggio in cui viviamo è occupato dal cielo, eppure, ai giorni nostri, forse per cultura troppo materialista o per il troppo inquinamento, abbiamo quasi dimenticato di guardarlo.

Così non era per gli uomini preistorici o per gli antichi, che spesso dormivano sotto un tetto di stelle; chissà cosa passava nelle loro menti osservando l'alternarsi del giorno e della notte, oppure la comparsa e la scomparsa della Luna, che illuminava le loro notti...

Vi sono però alcuni reperti che testimoniano che cosa potessero pensare: si accorsero presto che i fenomeni celesti erano regolari nel tempo e che costituivano delle scansioni utili (il Sole scandisce il susseguirsi dei giorni, mentre la Luna regola dei periodi più lunghi, le settimane e i mesi). Sia i Babilonesi che gli Egizi, sia i Maya, al di là dell'Oceano, avevano misurato con buona precisione la lunghezza dell'anno e stabilito dei calendari soddisfacenti, che accordavano abbastanza bene le esigenze civili con i ritmi del cielo. Inoltre, vi era una buona conoscenza dei movimenti apparenti e dei periodi della Luna e almeno di alcuni pianeti (v. fig. 1).

I GRECI

I primi a porsi il problema di dare una coerenza totalizzante alla visione del cosmo furono i Greci; in particolare si hanno notizie sicure dei sistemi cosmologici elaborati dai filosofi di Mileto. I Pitagorici furono i primi, invece, ad avere conoscenze astronomiche piuttosto elevate. Le notizie giunte fino a noi sono tuttavia scarse per il noto costume di tale setta che teneva nascoste le proprie conoscenze. Per certo si sa che essi riconobbero la sfericità della Terra e dei corpi celesti in genere, ma la cosa più importante era la concezione che vedeva il numero razionale come *archè*, da cui scaturiva la necessità di una descrizione armonica del mondo secondo le regole matematiche. Forse fu questa la ragione principale che li indusse ad adottare la sfera come modello dei cieli e della Terra. I Pitagorici, però, non si limitarono a questo. Un esempio è l'opera di Filolao, discepolo di Pitagora,

che immaginò un sistema con al centro un fuoco (*Hestia*) e con i pianeti, il Sole, la Luna, l'Antiterra (1), le stelle fisse che gli giravano intorno (fig. 2); i corpi celesti erano così dieci, numero di valenza sacra (2).



Fig. 1. *Tavoletta del XVI secolo a.C. che reca le registrazioni dei periodi di visibilità del pianeta Venere per un periodo di 21 anni (British Museum).*

In questo modo, però, non veniva fornita una previsione attendibile dei fenomeni celesti e fu così che, intorno alla prima metà del quarto secolo a.C., Eudosso di Cnido, uno dei più famosi matematici dell'antichità, introdusse un sistema di spiegazione e previsione dei moti, tramite il movimento di sfere concentriche alla Terra (fig. 3).

Dobbiamo al grande Giovanni Virginio Schiaparelli i calcoli e la comprensione precisa dell'ingegnoso modello: con esso si dava ragione dei movimenti di Sole, Luna, Mercurio, Giove e Saturno, mentre quelli di Marte e Venere erano troppo irregolari per essere spiegati con sufficiente precisione. Vi riuscì, seppure con notevoli margini di errore, imputabili all'imprecisione delle osservazioni, Callippo; mentre Eudosso spiegava il movimento del Sole e della Luna con tre sfere e dei pianeti con quattro, il suo successore aggiunse una quinta sfera per descrivere le evoluzioni di Marte e Venere. Naturalmente, esterna alle sfere dei pianeti, ma indipendente da esse, si muoveva la sfera delle stelle fisse, in 23 ore e 56 minuti, con verso opposto al movimento apparente dei pianeti su di essa.

I sapienti greci (ne abbiamo testimonianza so-

prattutto in Platone), conoscevano bene i movimenti apparenti delle stelle erranti che sembrano, ad un attento osservatore, tutt'altro che regolari: fra le stelle dello sfondo disegnano cappi, si fermano, avanzano e retrocedono con velocità diversissime. Il grande filosofo, però, era convinto che il mondo fosse disegnato secondo un'armonia matematica e che quindi le distanze dei pianeti fossero proporzionali a delle precise progressioni numeriche, rispecchiabili in armonie musicali: descrivendo nella *Repubblica* il mito di Er, Platone racconta che il fuso del mondo, arrotondato da Ananke (3), era composto, come una matrioska, da più fusi in cui si possono riconoscere gli otto corpi celesti, ai quali erano associati i canti mono-tono delle sirene, armonicamente assortiti (la stessa associazione di musica e astronomia tornerà con Keplero, nell'*Harmonices mundi*).

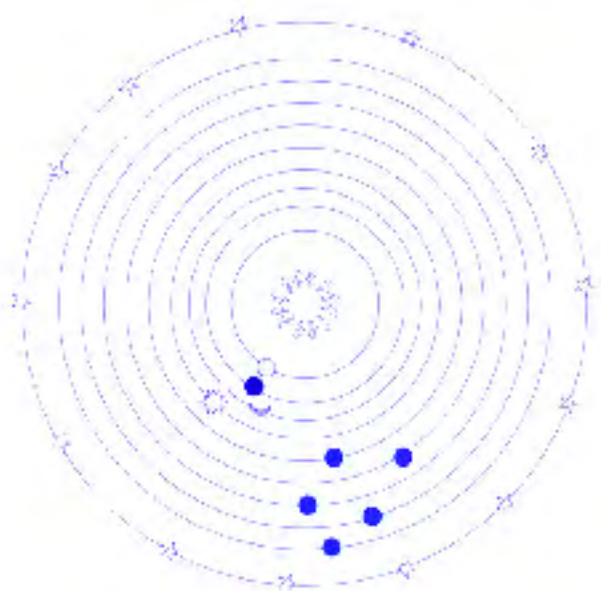


Fig. 2. Il modello planetario proposto dal pitagorico Filolao nel quinto secolo a.C. In ordine di distanza dal Fuoco Centrale si trovano Antiterra, Terra, Luna, Sole, Mercurio, Venere, Marte, Giove, Saturno, Stelle Fisse.

Nel *Timeo*, dialogo in cui affronta specificamente le questioni astronomiche, approfondendo il problema dell'origine e della formazione dell'universo, Platone afferma che il Demiurgo (4) ha impresso al mondo delle stelle il moto circolare uniforme, come suo moto naturale; questo pregiudizio ipoteccherà tutto lo sviluppo dell'astronomia fino a Keplero, dimostrando l'influenza del platonismo nella scienza.

In un passo molto discusso per la sua oscurità, il filosofo sembra inoltre affermare che la Terra è in quiete al centro dell'universo ed è guardiana del tempo, che si esprime nel movimento dei cieli. Il Demiurgo

ha, infatti, ordinato i moti in modo da farne scaturire una scansione regolare, da cui deriva il tempo umano, come misura della ripetibilità dei fenomeni (5).

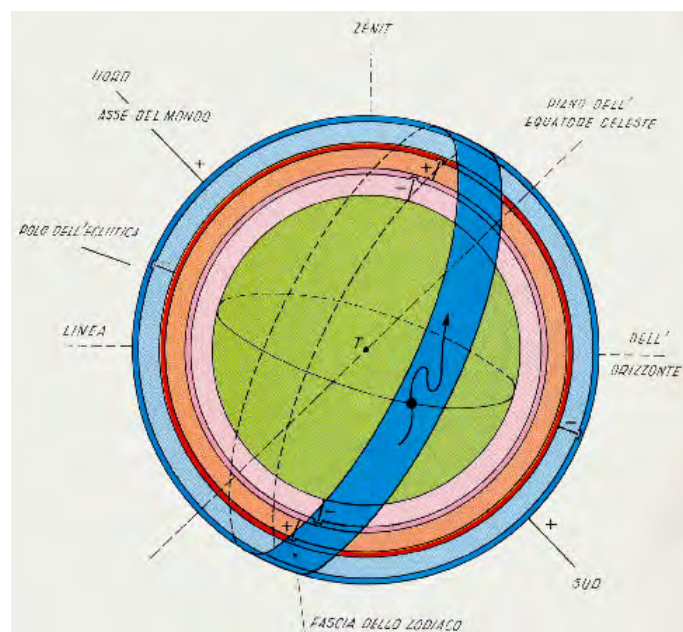


Fig. 3. Sistema delle sfere omocentriche secondo la teoria di Eudosso per un singolo pianeta. La sfera più esterna è quella delle stelle fisse, la fascia azzurra su di essa rappresenta la fascia zodiacale. La seconda sfera, impernata sulla prima produce il moto sull'eclittica. La terza sfera è impernata sull'equatore della seconda, la quarta è impernata sulla terza con un piccolo angolo fra gli assi di rotazione (da *Astronomia*, Curcio).

Il grande successore di Platone, Aristotele, nelle sue opere acroamatiche, finalizzate all'insegnamento, volse parecchia attenzione allo studio della natura e dedicò molte energie ai problemi astronomici, soprattutto nella loro omogeneizzazione ai problemi della fisica e modificò il sistema omocentrico, trasformandolo da puro modello geometrico in coerente insieme fisico e dinamico.

Aristotele pose la Terra, in base alla sua pesantezza, immobile al centro dell'universo, mentre gli altri corpi celesti, per la loro intrinseca leggerezza, occupavano posizioni superiori. Affermò la finitezza e la sfericità del mondo, come necessaria conseguenza del moto rotatorio della sfera delle stelle fisse (fig. 4). Distinse il mondo sublunare dal celeste: nel primo (il cosiddetto luogo imperfetto) regnava il divenire dei quattro elementi con i loro moti rettilinei verso i luoghi naturali, il secondo era costituito da etere ed era più perfetto perché più vicino al divino motore immobile che infondeva alle sfere cristalline, su cui erano fissati i pianeti, il movimento della perfetta ripetibilità, il circolare uniforme. Accolse quindi il sistema delle sfere omocentriche, ma lo adattò da puro strumento matematico a meccanismo fisico del

suo cosmo. Aggiunse 22 sfere, che dovevano trasmettere il movimento fra una sfera e l'altra, al sistema di Callippo, portandone così il numero totale a 55.

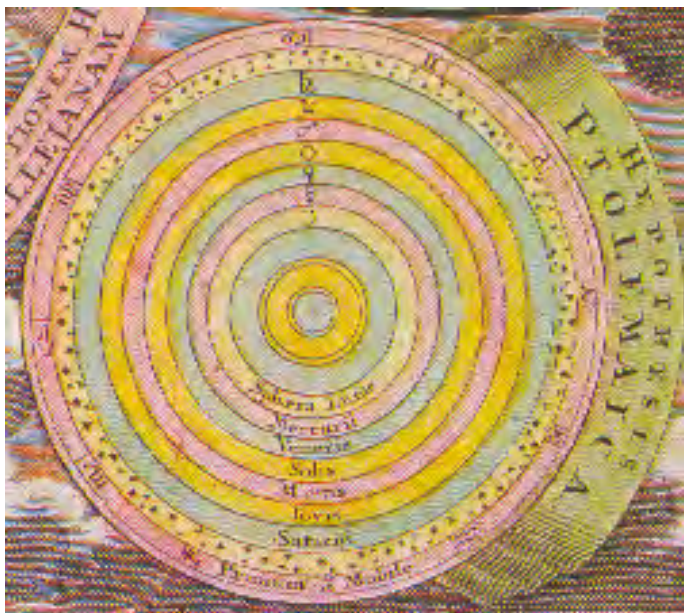


Fig. 4. Il cosmo aristotelico-tolemaico in un atlante del XVI secolo.

IL PERIODO ELLENISTICO E L'ETÀ ALESSANDRINA

Con la figura di Aristotele si chiude il periodo classico della civiltà e della cultura greca; il suo sistema fisico-matematico rimase insuperato anche in epoca ellenistica (6), nonostante in questo periodo fiorissero moltissimo le scienze in genere e la matematica in particolare. Il grande matematico Apollonio di Perge (240-170 a.C.) elaborò la teoria delle sezioni coniche ed un nuovo modello descrittivo per i movimenti dei pianeti. Si partiva dai presupposti platonici dei movimenti circolari uniformi e della centralità della Terra, per far muovere il pianeta su un piccolo cerchio, l'epiciclo, il cui centro si muoveva su un cerchio più grande, il deferente, centrato sulla Terra oppure, in un'altra versione, centrato in un punto spostato rispetto alla Terra, chiamato eccentrico (fig. 5).

Questo modello venne ripreso da Ipparco di Nicea (secondo secolo a.C.) e dal grande Tolomeo (secondo secolo d.C.), che lo perfezionarono, seppure in maniera diversa. Ipparco fu un grande osservatore: compilando il suo famoso catalogo stellare scoprì la precessione degli equinozi, mentre dai dati raccolti sui pianeti si accorse che bisognava unire le due ipotesi soprascritte per spiegare la diversa grandezza dei cappi descritti dai pianeti negli anni.

Tolomeo fu, eminentemente, un teorico, e diede una struttura definitiva al sistema: perfezionò la teoria della Luna e dei pianeti introducendo, per ridurre ancora

le irregolarità, anche un terzo punto simmetrico alla Terra rispetto al centro del deferente, l'equante, dal quale le velocità angolari erano uniformi. Mercurio costituiva un'eccezione, perché nella sua orbita l'equante era interno al segmento Terra-centro. Tolomeo lasciava inoltre inalterata rispetto a Ipparco la teoria solare. Invece, secondo la teoria data per la Luna, le dimensioni apparenti del satellite dovevano variare sensibilmente, cosa che in realtà non si verificava.

Tutto ciò non preoccupava moltissimo Tolomeo perché, probabilmente, il suo fine principale era prevedere le posizioni dei pianeti nel cielo in base agli strumenti matematici del tempo. Il suo sistema quindi non dava una spiegazione fisica, né tantomeno pretendeva di essere vero. Era solo uno strumento nelle mani degli astrologi alessandrini, il cui miglior rappresentante era sempre lui, Tolomeo: per trarre oroscopi precisi si dovevano utilizzare effemeridi accurate. Così, appare chiaro che la preoccupazione degli scienziati ellenistici ed alessandrini era prevalentemente estetica e che, d'altro canto, le divinazioni siderali ebbero un ruolo predominante nelle motivazioni che spinsero alla creazione di un modello planetario soddisfacente.

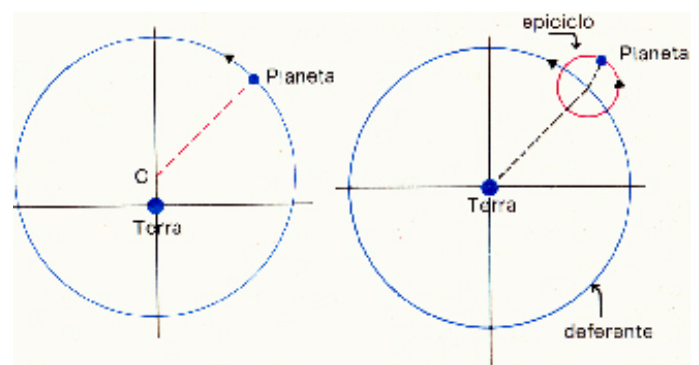


Fig. 5. Eccentrico (a sinistra), deferente ed epiciclo (da *Astronomia*, Curcio).

IL MEDIOEVO E GLI ARABI

L'opera di Tolomeo fu una grande sintesi del sapere matematico e astronomico dell'antichità; del resto il suo titolo, *Almagesto*, è emblematico (7). Nei secoli quest'opera ricevette un meritato riconoscimento, a tal punto da essere considerata sia dagli Arabi che, più tardi, dagli Scolastici, un'*Auctoritas*. L'*Almagesto* era infatti una vera enciclopedia astronomica, nella quale veniva riassunto l'insieme delle conoscenze dell'epoca. Queste teorie, tuttavia, non furono ben conosciute fra gli antichi né dai colleghi medievali di Tolomeo, che conservarono a fatica anche solo le principali idee della scienza matematica antica.

In Occidente, dopo che i Romani non diedero contributi significativi, le invasioni barbariche e la cieca ottusità dei padri della Chiesa seppellirono fra le ombre del Medioevo ogni sapienza laica. I padri Lattanzio e Cosma si scagliarono con ferocia inaudita contro la cultura pagana, che ritenevano contravvenisse all'assoluta e letterale verità delle *Sacre Scritture*. Con questo atteggiamento, che mirava a demolire anche l'astrologia, mantennero nell'ignoranza le uniche persone che sapevano leggere, i preti. Perfino S. Agostino, il più autorevole e, per certi versi, il più tollerante dei padri della Chiesa, costituì un ostacolo per il progresso della scienza, con la sua opinione che la ricerca scientifica era dannosa perché inutile alla salvezza del cristiano.

Per fortuna la vera superpotenza del Medioevo, l'Islam, si dimostrò tutt'altro che refrattaria alla sapienza greca e anzi, prima con la mediazione degli Indiani, che conobbero la cultura ellenista dopo Alessandro Magno, poi attingendo direttamente agli originali, approfondirono le conoscenze astronomiche di Tolomeo ed arrivarono anche a criticarle, dimostrando così l'alto livello raggiunto (fig. 6). Vi furono critiche all'equante, condotte secondo i principi platonici (8), furono compilati importanti compendi e commentari, effettuate osservazioni di alto livello, redatte nuove effemeridi e tavole dei moti planetari.



Fig. 6. Un astrolabio arabo. Questo straordinario strumento consentiva di fare calcoli, misure e previsioni su quasi ogni parte dell'astronomia posizionale. Non è noto se i Greci già lo conoscessero, ma certamente gli Arabi ne fecero un dispositivo veramente eccezionale, che ben rappresenta la naturale predisposizione di questo popolo per le scienze astronomiche.

Averroè criticò aspramente Tolomeo, perché non forniva una spiegazione fisica dei fenomeni, come aveva fatto Aristotele. Tuttavia ogni tentativo di far rivivere il sistema a sfere omocentriche di Aristotele risultò del tutto vano.

Le conoscenze arabe giunsero in Europa attraverso la Spagna dove, alla metà del XIII secolo, il re Alfonso di Castiglia compilò le famose *Tavole Alfonsine*, in cui rielaborava i calcoli di Tolomeo e li correggeva perché, nel giro di un millennio, gli errori si erano accumulati, tanto da rendere inattendibile ogni previsione.

LA RINASCITA DELL'ASTRONOMIA EUROPEA

Sempre nel XIII secolo un astronomo inglese, John of Holywood (Giovanni di Sacrobosco), scrisse un trattato di astronomia intitolato *De sphaera mundi*, nel quale venivano ripresi i tradizionali temi dell'astronomia planetaria alessandrina. Esso venne adottato da numerose università come libro di testo nonostante contenesse solo alcuni cenni sul sistema tolemaico, per di più copiati dagli *Elementi di astronomia* dell'astronomo arabo al-Farghani. Per inciso, la traduzione di quest'ultima opera, da parte di Gherardo da Cremona, fu fra le fonti astronomiche di Dante, sia per la *Commedia* che per il *Convivio* (il grande poeta, come risulta da innumerevoli passi della sua opera maggiore, rivela una vera predilezione e una profonda conoscenza dell'astronomia del suo tempo.)

Quello in cui si muove Dante è un modello aristotelico ampliato alla luce del cristianesimo, di Tolomeo, e della sintesi teologico-cosmologica di Tommaso D'Acquino (fig. 7). Esso comporta un punto di svolta nell'astronomia medievale, ma ci mostra la stretta connessione tra astronomia e visione sacra dell'universo. La *Divina Commedia* descrive un mondo simbolico in cui l'uomo abita la terra, che è a diretto contatto con l'Inferno, ma vede anche la perfezione delle nove sfere celesti; l'uomo può quindi elevarsi ad essere beato o rimanere legato alla materialità e venire dannato in eterno.

Nel *Convivio*, inoltre, Dante disquisisce sulle gerarchie angeliche in relazione ai movimenti celesti: l'astronomia risultava, quindi, in un certo qual modo, legata anche alla religione e una modifica dell'una implicava un cambiamento dell'altra.

Negli ultimi secoli del Medioevo aumentarono le critiche ad Aristotele tanto che, nel XIV secolo, i critici scolastici intaccarono dal punto di vista logico alcune affermazioni del maestro: in particolare

Nicola D'Oresme, un nominalista parigino, contestò, perché non veniva dimostrata da Aristotele, l'ipotesi dei moti naturali, che impediva di considerare la terra strutturalmente uguale agli altri pianeti. D'Oresme dimostrò possibile la rotazione della Terra sul proprio asse, sostenendo i principi di relatività ottica della Terra rispetto alle stelle fisse, che diventeranno colonne portanti delle opere di Copernico e Galilei; demolì, inoltre, l'argomentazione dello spostamento dalla verticale di un oggetto in caduta libera nel caso di terra rotante (9).

bisogno di intelligenze angeliche, oppure si poteva spiegare il moto di caduta perfettamente verticale con l'affermazione che il corpo non è solamente attratto in basso, ma riceve anche un impulso orizzontale.

Argomentazioni di questo tipo dimostrano che il clima umanistico e rinascimentale stava diventando molto favorevole alla nascita di una cultura laica, basata sì sulla sapienza antica, ma anche profondamente critica nei confronti di alcuni dei suoi aspetti.

UMANESIMO E RINASCIMENTO

Probabilmente il personaggio che meglio incarna questo cambiamento è Nicola Cusano, nato a Cusa nel 1401 e vescovo di Bressanone tra il 1450 e il 1464, anno della sua morte. Egli riteneva che Dio, nella sua trascendente infinità, si esplicasse nella natura, in cui non esiste un centro, né un limite estremo: la natura è quindi, secondo la concezione del Cusano, infinita e contiene infiniti mondi come il nostro; di conseguenza, la Terra non può essere al centro dell'universo.

Anche l'aspetto gnoseologico della filosofia del Cusano sembra ammettere in via di principio l'esistenza di infiniti mondi: l'esplicazione di Dio significa la sua contrazione in tutti gli elementi della natura; ne segue che infiniti sono i percorsi conoscitivi da poter scegliere e che quello cristiano non è l'unico possibile. D'altro canto, secondo Cusano, bisogna cercare l'idea del trascendente sintetizzando tutte le sapienze antiche e moderne, cogliendone la linfa comune; l'uomo, comunque, essendo finito, non potrà mai comprendere l'infinito e al massimo, sapendo di non sapere, sarà in uno stato di «dotta ignoranza» (10).

Si ricava, quindi, dalla figura di Cusano, un'apertura e una tolleranza che saranno il fondamento del migliore umanesimo ed il retroterra di una rivoluzione ormai imminente.

Dal punto di vista più strettamente astronomico, un universo infinito non poteva ruotare intorno alla Terra come il cielo sferico di Aristotele; perciò, Cusano ammise la rotazione della Terra sul proprio asse, ma riguardo a ciò non sviluppò una teoria soddisfacente (le asserzioni sul movimento della Terra sono descritte in passi che non brillano certo per chiarezza).

Più o meno nella stessa epoca si sviluppa a Firenze, presso l'Accademia di Careggi, una scuola di pensiero di importanza capitale: la scuola del neoplatonismo fiorentino, che spiegava l'essere imperfetto dei fenomeni come una degradazione dell'essere puro, cioè Dio. Il mondo diventava, quindi, il teatro degli influssi celesti che si intrecciavano in una fitta rete

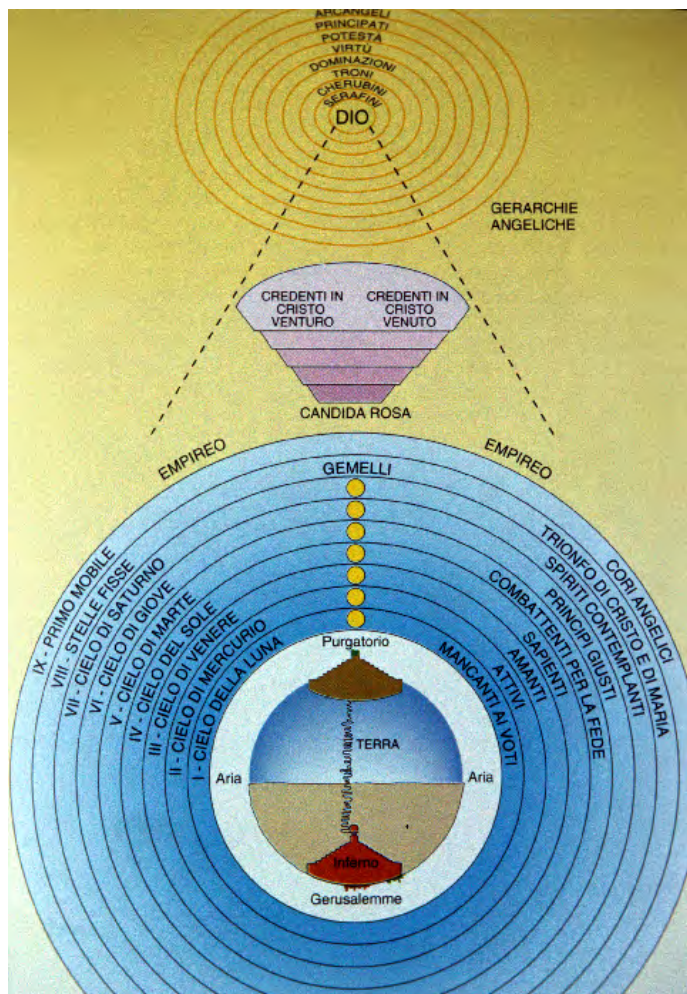


Fig. 7. L'universo tolemaico-aristotelico della Divina Commedia di Dante.

Galileo prese spunto anche da questi pensieri quando formulò la sua teoria del moto: di sicuro comunque apprese a Padova la teoria dell'impulso, concepita dal maestro di D'Oresme, Buridano. In questa, diversamente dalla dottrina peripatetica, si spiegava l'origine del moto violento con l'accumulazione di un impulso (al momento della partenza) che veniva consumato durante il movimento. Questo principio, che ora noi sappiamo errato, ebbe molti sostenitori ed anche conseguenze notevoli: si poteva ipotizzare che Dio, al momento della creazione, avesse impresso un impulso al mondo che per questo si muoveva senza

di *simpatie* che potevano essere colte e sfruttate dal sapiente-mago.

È evidente, in questo contesto, il ruolo preminente assunto dall'uomo: il mondo pervaso da influssi aveva un'anima, era un grande animale vivente che si rispecchiava, come in Cusano, negli enti singoli, in particolare nell'uomo che, non avendo un ruolo prestabilito, ma essendo posto al centro dell'universo per meglio vedere e capire, poteva autodeterminarsi e diventare, attraverso la propria anima, l'intermediario tra il divino e il terrestre.

Il sapiente-mago leggeva la natura come una grande metafora di Dio: l'elemento che meglio lo simboleggiava non poteva che essere il Sole, fonte di luce e calore, analoghi al bene e all'amore che si irradiano da Dio. Con argomentazioni di questo tipo Marsilio Ficino, il fondatore dell'Accademia di Careggi, afferma anche che l'unico luogo degno di una tale luce era il centro dell'universo, dove questa era stata posta per prima nella creazione; in altri scritti, però, il grande neoplatonico si contraddice e accetta la disposizione celeste degli antichi. La sua influenza sui posteri, in particolare su Copernico, non si esercitò comunque sul piano prettamente astronomico, ma sul piano delle convinzioni metafisiche, di cui il *De revolutionibus* è fittamente pervaso. In particolare, le argomentazioni citate sono oggetto del decimo capitolo del libro primo, dove si afferma inequivocabilmente: «In medio vero omnium residet sol».

TENTATIVI DI RIFORMA

La rivoluzione astronomica subisce anche il fascino del clima umanistico, in cui la ricerca filologica costituiva una delle fonti della verità. Intorno alla metà del XV secolo due astronomi tedeschi, Peurbach e Regiomontanus, rispettivamente maestro e discepolo, compirono l'impresa di raccogliere tutte le fonti in cui si prendeva in considerazione il sistema tolemaico, per darne una ricostruzione attendibile nell'*Epitome in Ptolemaei almagestum*. Quest'opera non fece fare progressi alla teoria planetaria ma, assieme alle accurate effemeridi calcolate da Regiomontano e ad un'altra opera di Peurbach, in cui si fondevano le teorie tolemaica ed aristotelica, contribuì alla diffusione della teoria tolemaica nell'Europa rinascimentale.

Anche la teoria aristotelica delle sfere omocentriche subì un tentativo di riesumazione da parte di due astronomi italiani: Amici, morto troppo giovane per lasciare contributi fondamentali, e Fracastoro, ricordato come il più geniale contemporaneo di Copernico. Fracastoro e Copernico probabilmente si in-

contrarono a Padova, negli anni «italiani» dell'astronomo polacco, dove discussero i problemi del sistema tolemaico.

Fracastoro, tuttavia, impiegò il suo genio in un'impresa che la storia boccherà, tentando di modificare il sistema di Aristotele per adattarlo ai nuovi standard osservativi. Dovette però confrontarsi con un'enorme complicazione del modello e con il problema delle variazioni di luminosità dei pianeti, da Fracastoro spiegate con differenze di densità e trasparenza dell'alta atmosfera. Evidentemente questo modello non soddisfaceva i canoni dell'armonica semplicità, sostenuta dai neoplatonici: nella storia della scienza, infatti, l'idea che le leggi di natura debbano essere semplici si è fatta strada fino ai giorni nostri e costituisce uno dei cardini della moderna epistemologia. Bisogna però fare una precisazione: la matematica armonica dei neoplatonici si basava su affinità numerologiche di carattere mistico, mentre l'universo della scienza è regolato da leggi matematiche, applicate alla materia in movimento per prevederne lo sviluppo, come puntualizzò Descartes.

COPERNICO

Si giunse così al grande rinnovatore, Niklas Koppernigk (1473-1543), conosciuto in Italia come Copernico. Egli nacque in Polonia e studiò all'università di Cracovia, ma soprattutto nelle più prestigiose università italiane, dove affinò le sue convinzioni astronomiche. Tornato in Polonia, dal 1506 fino alla morte visse a Frauenburg, nella Warmia, dove fu anche nominato canonico per intercessione dello zio.

Nella tranquillità di questo borgo polacco Copernico poté dedicarsi allo studio praticamente a tempo pieno poiché i problemi amministrativi della sua giurisdizione, peraltro da lui brillantemente risolti, erano scarsi. Già nel 1512 pubblicò un manoscritto, il *Commentariolus*, in cui si esponevano i caratteri principali del suo progetto; questo libriccino fece molto scalpore e molti intellettuali aspettarono con ansia la pubblicazione dell'*Opus magnus*. L'attesa doveva però durare a lungo, fino al 1539, quando G.J. Rheticus, attratto dalla fama di Copernico, si recò a Frauenburg e lo convinse a pubblicare il suo lavoro che era pronto già da 36 anni (almeno stando alle affermazioni contenute nella dedica di Copernico al papa Paolo III).

Nel primo libro della sua opera Copernico afferma che il sistema tolemaico non offriva previsioni attendibili e per di più non rispettava il postulato del moto circolare uniforme a causa dell'introduzione

dell'equante. Egli, perciò, si mise alla ricerca di sistemi alternativi al geocentrico e ne trovò cenni nelle opere di alcuni filosofi antichi, come Iceta, Eraclide Pontico, Filolao ed Ecfanto Pitagorico. Ma il contributo di Copernico andò oltre, muovendosi però sempre nel rispetto ferreo per le asserzioni di Platone sul moto circolare uniforme e sulla matematizzazione del cosmo (Copernico, naturalmente, aderiva alla filosofia neoplatonica ormai diffusa in tutta Europa).

Veniva così inseguita una rappresentazione dei fenomeni che rispondesse quanto più possibile ai dettami di una matematica e semplice armonia dell'ordine celeste; infatti, con una Terra in movimento e il Sole al centro (fig. 8) si spiegavano più naturalmente il moto retrogrado e la disposizione dei pianeti in ordine di distanza dal Sole, mentre si tentava di costruire un modello unitario e semplice per prevederne i movimenti.

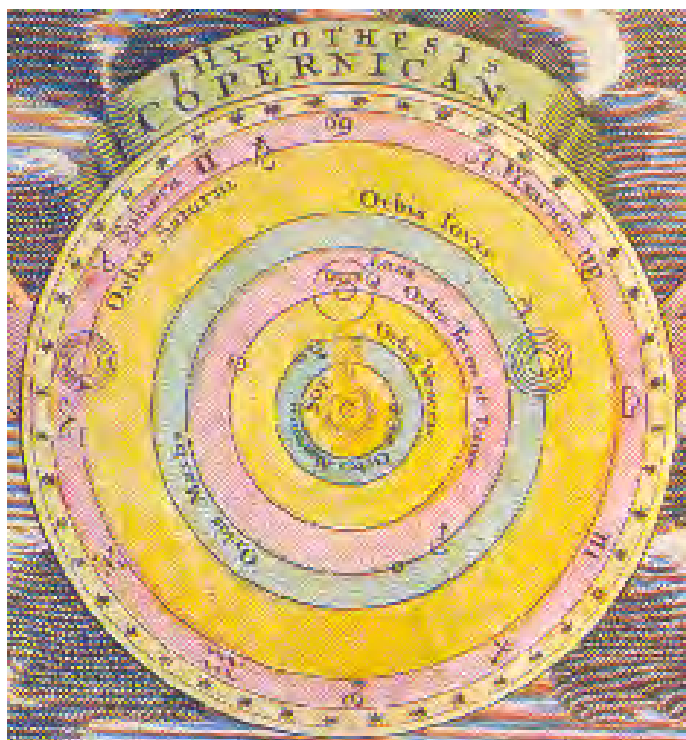


Fig. 8. Il modello copernicano, completato con le orbite dei satelliti gioviani scoperti da Galileo (da un Atlante del Cinquecento).

Il risultato finale non fu, però, così buono come i presupposti: c'erano modelli diversi per spiegare i moti di Mercurio, Venere, Terra e pianeti esterni. I loro deferenti erano centrati non proprio sul Sole, ma sul centro del deferente terrestre; nondimeno il Sole occupava una posizione abbastanza centrale da soddisfare la metafora neoplatonica di Dio. Inoltre, il numero totale di cerchi usati da Copernico era maggiore che in Tolomeo, mentre i calcoli fornivano effemeridi paragonabili all'antico modello, come dimostrò poi Erasmus Reinhold nelle *Tabulae Prutenicae* calcolate secondo il modello copernicano.

Probabilmente, come afferma Arthur Koestler, molte esitazioni di Copernico a pubblicare l'opera erano dovute alla consapevolezza di avere in parte tradito le attese, oltre che alla paura di essere deriso dagli ignoranti, come afferma nella dedica del *De revolutionibus*.

Ma allora, da dove proviene l'importanza astronomica di Copernico? Sicuramente molti intellettuali subirono il fascino della matematica armonia nonostante, nell'affermarla, si sconvolgesse un paradigma del mondo; molti di loro tuttavia non compresero a fondo le spiegazioni matematiche del trattato, ma si limitarono a usarlo come un utile strumento per prevedere più accuratamente le posizioni dei pianeti sullo Zodiaco. Bisogna infatti dire che, all'atto della stampa, un teologo luterano, Andreas Osiander, a cui Rheticus aveva affidato la pubblicazione dell'opera di Copernico, aggiunse una prefazione nella quale ammoniva il lettore a trattare il contenuto dell'opera come una pura ipotesi matematica, che non intaccava l'ordine antico del cosmo. È probabile invece che Copernico credesse nella verità fisica del proprio modello ma, paradossalmente, questa prefazione apocrifa può aver contribuito a salvare la sua opera dalla furia persecutrice della censura ecclesiastica fino al 1616, quando Galileo si decise a sostenere questa verità in modo aperto e ostinato.

In conclusione, l'opera di Copernico si propose come un ideale spartiacque fra la visione antica e la moderna, conservando molti difetti del passato, ma contenendo anche i germi di una libera rivoluzione del pensiero occidentale.

NOTE:

- 1) L'Antiterra, introdotta da Filolao per completare il numero dieci, era una ipotesi *ad hoc* e consisteva in un corpo celeste inosservabile dalla Terra.
- 2) Il numero dieci, considerato come il numero perfetto, era rappresentato da un triangolo avente quattro punti per lato ed uno al centro. Questo raffigurava la figura sacra per i Pitagorici, che solevano chiamarla *Tetractys*.
- 3) L'insieme della macchina filatrice, ossia l'intero cielo, mentre il fuso è l'asse del mondo.
- 4) «Divino artefice», dotato di intelligenza e volontà: si trova in una posizione intermedia fra le idee e le cose.
- 5) Probabilmente Platone, come i suoi successori, credette che l'unico movimento capace di garantire la regolare ripetizione dei fenomeni fosse il circolare uniforme, in accordo con la tradizione pitagorica.
- 6) Con le conquiste di Alessandro Magno e la perdita dell'indipendenza da parte delle *polis*, inizia il Periodo Ellenistico, caratterizzato da uno sviluppo culturale completamente diverso. Nascono filosofie nuove come

Stoicismo ed Epicureismo, volte ad affrontare, più che altro, i problemi dell'uomo, mentre in campo letterario ed artistico si assiste ad un fiorire di opere erudite e di indirizzo elitario.

7) L'opera si intitolava *Megale syntaxis*, ovvero *Grande composizione*: ben presto fu conosciuta però come *Meghiste*, ovvero la *Grandissima*, da cui gli Arabi trassero *Al magisti*, diventato poi *Almagesto*.

8) Si riteneva che dividere i centri del moto circolare e della velocità angolare uniforme contravvenisse ai dettami di Platone, argomentazione ripresa poi anche da Copernico.

9) Le sue ipotesi nascono spesso dall'osservazione di fatti quotidiani e comuni: in questo caso, infatti, portò l'esempio di una nave in movimento.

10) Un miscuglio di misticismo neoplatonico e cristiano fu da Cusano esposto nel *De docta ignorantia*, in cui afferma l'incapacità della mente umana di concepire l'assoluto, che coincide (per lui) con l'infinito matematico.

BIBLIOGRAFIA

Nicola Copernico. *Opere* (a cura di Francesco Barone), Torino, UTET, 1979.

Ahmed Djebbar. *Storia della scienza araba*, Milano, Raffaello Cortina, 2002.

Jean Louis Emil Dreyer. *Storia dell'astronomia da Talete a Keplero*, Milano, Feltrinelli, 1970.

Owen Gingerich. *Alla ricerca del libro perduto*, Milano, Rizzoli, 2004.

Michael Hoskin (a cura di). *Storia dell'astronomia di Cambridge*, Milano, RCS 2001.

Arthur Koestler. *I sonnambuli*, Milano, Jaca Book, 1982.

Thomas S. Kuhn. *La rivoluzione copernicana*, Torino, Einaudi, 1972.

Lucio Russo. *La rivoluzione dimenticata*, 4ª Ed., Milano, Feltrinelli, 1997.

Giovanni Schiaparelli. *Scritti sulla storia dell'astronomia antica*, 3 voll., Milano, Mimesis, 1998.

Gabriele Vanin. *Manuale di astronomia*, 2ª Ed., Feltre, Agorà, 2004.

Christopher Walker (a cura di). *L'astronomia prima del telescopio*, Bari, Dedalo, 1997.

<http://www.astro.uni-bonn.de/~pbrosche/astoria.html>

<http://galileo.imss.firenze.it/indice.html>

IL SISTEMA SOLARE

DI GABRIELE VANIN

INTRODUZIONE

Nel cielo stellato, fra le migliaia di fiammelle che sovrastano le nostre teste e che appaiono tutte mantenere le stesse posizioni le une rispetto alle altre, ve ne sono alcune che invece si spostano capricciosamente. Gli antichi, per distinguerle dalle altre, le chiamarono *planeti* (dal greco *planes*, «vagabondo»). Proprio il tentativo di comprendere e spiegare la dinamica di questi spostamenti improntò tutti i modelli cosmologici, ovvero i sistemi di descrizione della realtà universale. Fino in pratica al secolo scorso l'astronomia fu soprattutto, direi quasi esclusivamente, un'astronomia planetaria: le stelle fisse erano, almeno sperimentalmente, al di là della portata degli strumenti; speculativamente, invece, già dai tempi antichi qualcuno aveva tentato di comprendere la vera natura delle fiammelle lucenti e già Cusano e poi Bruno pensavano a esse come ad altrettanti soli.

Fino a Keplero, tuttavia, i modelli cosmologici si equivalsero, nel tentativo di spiegare i movimenti dei pianeti, soprattutto lo strano ritornare indietro percorrendo un ampio cappio prima di riprendere il moto diretto, ricorrendo ai postulati platonici dell'uniformità del moto e delle orbite circolari. Soltanto Keplero ebbe il coraggio di abbandonare definitivamente Platone e di proporre delle orbite planetarie ellittiche percorse con moto variabile.

Proprio ai tempi di Keplero, Galileo iniziava a usare per l'osservazione del cielo il cannocchiale, con il quale i pianeti non apparivano più come delle scintille di luce ma incominciavano a presentare un dischetto sensibile e poi, via via, maggiori particolari percepibili a strumenti sempre più perfezionati.

Negli ultimi quarant'anni, poi, con l'ottimo lavoro eseguito dalle sonde spaziali, la nostra conoscenza dei pianeti si è arricchita a dismisura. Ed è di questi risultati che fondamentalmente parleremo ora.

LA LUNA

La Luna è stata ovviamente il primo obiettivo spaziale e l'unico corpo celeste, fino a questo momento, su cui l'uomo ha posato il piede (v. fig. 9).

La topografia lunare è conosciuta quasi meglio di quella terrestre, anche se non sappiamo bene come il nostro satellite abbia avuto origine. In effetti, è molto

strano che un pianeta così piccolo come la Terra abbia un satellite così grande, caso unico fra i pianeti di tipo terrestre. Per spiegare la nascita della Luna quindi non appare tanto azzardato ipotizzare un meccanismo *ad hoc*: la collisione eccentrica fra la Terra primordiale e un planetoido della grandezza di Marte, che strappò via il mantello terrestre che, in seguito, andò a costituire il compagno del nostro pianeta. Questa ipotesi è l'unica che spiega bene la diversità di composizione chimica fra la Terra e la Luna.



Fig. 9. L'astronauta James Aldrin, dell'Apollo11, fotografato dal compagno Neil Armstrong sulla superficie lunare, durante la prima missione umana sul nostro satellite (NASA).

Le successive fasi della storia lunare sono meglio conosciute: dopo la formazione della crosta, il bombardamento da parte di asteroidi e meteoriti, fenomeno che interessò e interessa tuttora tutti i corpi del sistema solare, portò alla formazione dei crateri; gli urti da parte dei corpi impattanti più grossi, sui 30-100 km di diametro, portarono alla formazione di bacini circolari di 500-1000 km di larghezza il cui fondo in seguito si fratturò mettendo in comunicazione mantello e crosta. I bacini furono quindi progressivamente riempiti dalle lave fuoruscite in eruzioni estese e prolungate, e levigati, assumendo l'aspetto tanto familiare dei «mari». Questi processi terminarono circa 3 miliardi di anni fa e, da allora, la storia geologica lunare non ha conosciuto altri eventi che gli occasionali impatti.

IL SISTEMA SOLARE INTERNO

Mercurio (fig. 10) è stato sorvolato in tre riprese dalla sonda *Mariner 10* nel 1974, che ha fotografato circa il 40% della superficie. Da allora nessun altro veicolo spaziale ha ripreso da vicino il torrido pianeta (330 °C di temperatura sull'emisfero a giorno), anche se una missione della NASA, la *Messenger*, è già in viaggio verso Mercurio, che verrà raggiunto fra pochi mesi, e un'altra, dell'ESA, *Bepicolombo*, partirà nel 2012. Mercurio è completamente privo di atmosfera ed ha una superficie apparentemente molto simile a quella lunare, ricoperta di crateri di tutte le dimensioni; c'è però un unico mare, il bacino Caloris. La storia mercuriana è stata molto simile a quella lunare e la mancanza di mari può essere spiegata ammettendo l'influenza della maggiore gravità terrestre nel richiamare più grandi e numerosi proiettili sulla Luna.

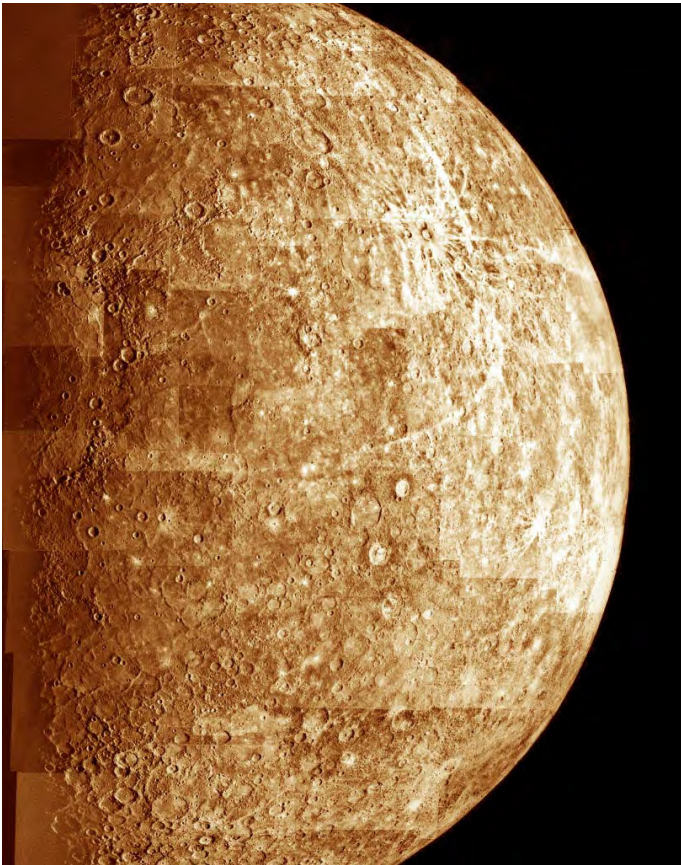


Fig. 10. Fotomosaico di Mercurio ottenuto da riprese della sonda *Mariner 10* nel 1974 (NASA-JPL).

È ovvio che tali proiettili caddero anche sul nostro pianeta, ma le tracce degli impatti sono state cancellate dall'erosione eolica e acquatica e soprattutto dai movimenti della crosta che, al contrario di quella degli altri pianeti, è stata ed è ancora molto attiva. Poiché asteroidi e meteoriti ancora cadono, con una frequenza piuttosto elevata, non è sembrata inopportuna la creazione di una rete di rilevamento, operativa dal 1997, dei cosiddetti *Near earth asteroids*, oggetti

in orbita solare che intersecano l'orbita della Terra e possono al limite cadervi sopra, con effetti assolutamente catastrofici. Giova ricordare che la storia delle ere geologiche rivela che sul nostro pianeta vi sono state delle grandi estinzioni di massa, delle quali quella dei dinosauri, avvenuta 65 milioni di anni fa, è ormai con una ragionevole base di certezza ascritta all'impatto di un asteroide di 10 km di diametro.

Venere, al contrario di Mercurio, ha una spessa atmosfera, 90 volte più densa di quella terrestre e composta quasi esclusivamente di anidride carbonica. Questa ha scatenato al suolo un'effetto serra a valanga che ha innalzato la temperatura del pianeta da 70 a 460 °C. Ciò forse ci ammonisce sul possibile futuro della Terra, se l'umanità non provvederà a bloccare le emissioni dei gas di serra, soprattutto, appunto, la CO₂. Nonostante la spessa coltre nuvolosa, comunque, la superficie di Venere è nota, grazie al rilevamento radar effettuato sia da terra, con il radiotelescopio di Arecibo, sia dalla sonda statunitense *Pioneer Venus*, sia dalle *Venera 13 e 14* sovietiche, sia soprattutto dalla *Magellan*, che ha lavorato sul pianeta nei primi anni Novanta. Ormai conosciamo il suo volto con una risoluzione di circa 100 m. La caratteristica prevalente del pianeta è la grande presenza di estese colate laviche, alcune delle quali sembrano molto recenti e fanno presumere che il pianeta sia ancora attualmente attivo (v. fig. 11).

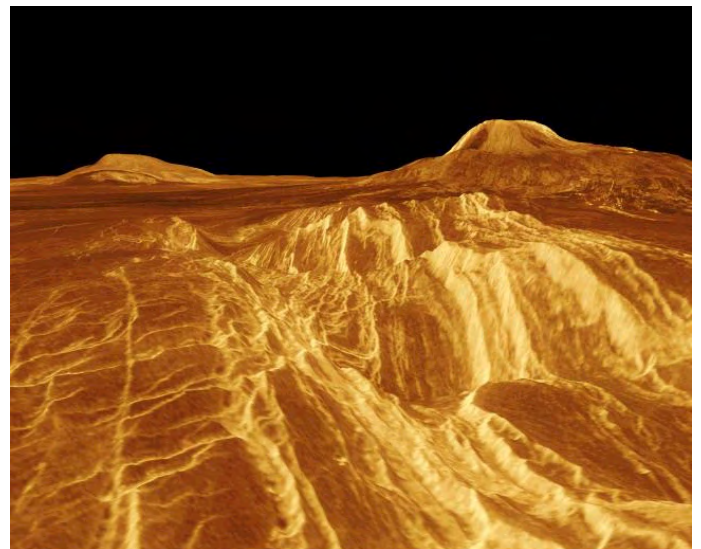


Fig. 11. Le grandi colate laviche che si estendono alla base dei vulcani *Sif Mons* e *Gula Mons* su Venere. Elaborazione computerizzata a partire da immagini della sonda *Magellan* (NASA-JPL)

Marte è stato esplorato soprattutto dai *Viking* americani fra il '76 e l'80, e dalle sonde *Mars Global Surveyor* e *Mars Odissey* fra la fine del ventesimo e l'inizio del ventunesimo secolo. Attualmente sono al

lavoro sul pianeta due sonde della NASA, la *Spirit* e la *Opportunity* e la *Mars Express* europea. Nel passato Marte era simile alla Terra, con estesi e profondi oceani e fiumi che scorrevano in superficie. In seguito, a causa della sua piccolezza e della maggiore lontananza dal Sole, si raffreddò e divenne arido. Si trovano sulla sua superficie imponenti strutture geologiche, fra cui un enorme canyon, la Valles Marineris, lunga 5000 km e larga 100, e quattro vulcani alti fra i 14 e i 21 km (v. fig. 12)! Sono ancora visibili sul pianeta le tracce fossili dei letti fluviali e dell'impronta di antichi ghiacciai. L'atmosfera marziana, probabilmente una volta abbastanza densa, è ora ridotta a 1/150 della densità di quella terrestre, ed è composta come per Venere essenzialmente di anidride carbonica. Marte ha due piccoli satelliti, Pobo e Deimo, che probabilmente sono due asteroidi catturati. Ciò è confermato dalla loro somiglianza con i vari asteroidi «visti da vicino» da varie sonde fra il 1991 e il 2005.

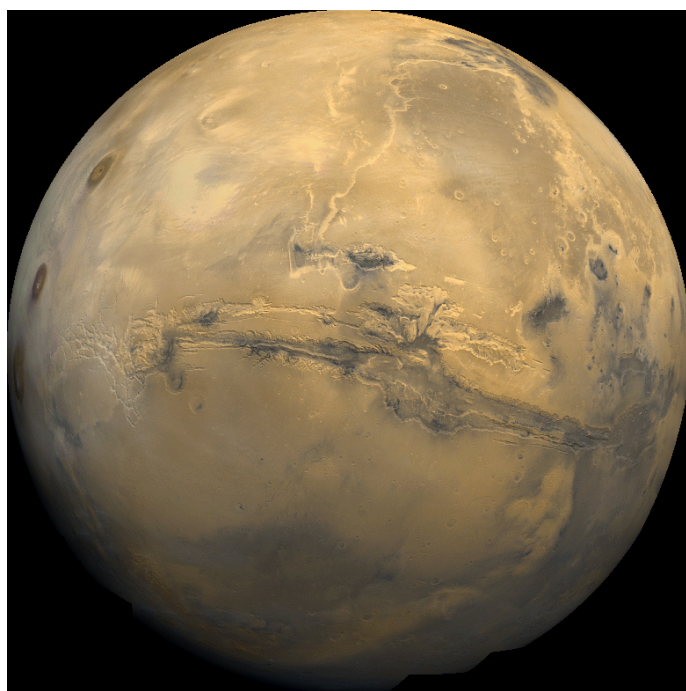


Fig. 12. Panoramica di Marte, compositata da un centinaio di riprese effettuate dalle Viking negli anni '70, nella quale spicca al meglio la Valles Marineris. Visibili anche due dei grandi vulcani marziani, a sinistra (NASA-JPL).

CORPI MINORI E ORIGINE DEL SISTEMA SOLARE

Gli asteroidi (fig. 13) o pianeti minori sono corpi di diametro compreso fra 1000 km (Cerere, il più grande) e pochi metri, che orbitano fra Marte e Giove. Se ne conoscono circa 400 000, ma si crede che ve ne siano milioni di diametro superiore a qualche chilometro. Sono il risultato della mancata costituzione di un pianeta in quella regione a causa della forte

influenza gravitazionale di Giove e sono importanti per lo studio delle origini del sistema solare perché dall'epoca della sua formazione non hanno quasi subito differenziazioni chimiche: costituiscono perciò una sorta di fossili antichissimi, studiando i quali sarà forse possibile confermare le attuali concezioni sull'origine e l'evoluzione del nostro sistema.



Fig. 13. La curiosa forma di Eros, il più grande degli asteroidi Earth-crossing, ripreso dalla sonda Near-Shoemaker nel 2000 (NASA-JPL).

Queste affermano che il sistema solare è nato circa 4,5 miliardi di anni fa, in seguito all'esplosione di una o due supernovae a una distanza di circa 60 anni luce. L'esplosione fornì sia lo spunto dinamico per il collasso della nube interstellare protosolare per mezzo dell'onda d'urto generata (fig. 14), sia il materiale pregiato, elementi complessi, formato nell'esplosione stessa, indispensabile per la costituzione di corpi planetari differenziati e soprattutto per l'avvio di una chimica organica che in seguito avrebbe generato la vita sul nostro pianeta. La nube protosolare, collassando, aumentò la velocità di rotazione e si appiattì, formando un disco contenente polveri e gas; le polveri cominciarono ad aggregarsi gravitazionalmente lungo il piano del disco e a formare ammassi granulosi che, collidendo fra loro, andarono a costituire aggregati più grandi, i cosiddetti *planetesimi*. Questi, ulteriormente aggregandosi, formarono gli embrioni planetari (fig. 15).

Nella parte più interna del sistema si formarono pianeti piccoli e rocciosi a causa del fatto che gli elementi volatili sfuggirono per l'elevata tempera-

tura e furono spazzati via dall'impetuoso vento solare che soffiava molto più intensamente di adesso. All'esterno, il gas poté permanere e fu catturato dagli embrioni di Giove, Saturno, Urano e Nettuno che quindi sono prevalentemente formati da idrogeno ed elio, i volatili più comuni nella nebulosa solare primordiale, come d'altra parte in tutto l'universo. Urano e Nettuno sono più piccoli di Giove e Saturno perché probabilmente dalle loro parti la nebulosa era più sottile e inoltre perché, muovendosi più lentamente, impiegarono più tempo ad aggregare gas, che sfuggì nel frattempo verso l'esterno. Verso l'esterno, spinte dall'influenza gravitazionale dei pianeti giganti, scapparono anche le comete, formate di roccia e ghiaccio, di dimensioni comprese fra 1 e 100 km (fig. 16). Esse si attestarono in un guscio chiamato nube di Oort, a distanze interstellari dal Sole. Da lì, le comete vengono proiettate verso l'interno del sistema solare quando una delle stelle vicine al Sole si avvicina ulteriormente, perturbando la nube. Se una cometa si approssima sufficientemente alla nostra stella, i ghiacci del nucleo sublimano formando la chioma e, in seguito, a distanze minori e sotto l'influenza del vento solare e della pressione della luce, la coda.

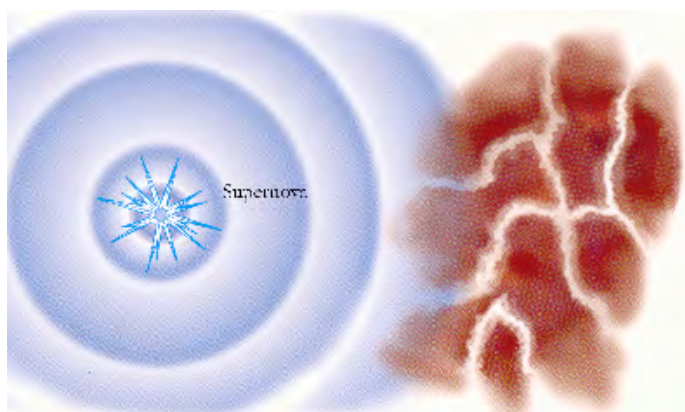


Fig. 14. Le onde d'urto e il materiale provenienti da una supernova vicina possono aver innescato la formazione del sistema solare (da Vanin. I grandi fenomeni celesti).

Dopo la formazione, a causa del riscaldamento dovuto agli impatti, alla contrazione gravitazionale e al decadimento degli elementi radioattivi, ciascun pianeta si differenziò: gli elementi pesanti affondarono andando a formare il nucleo, quelli più leggeri rimasero in superficie, andando a costituire mantelli e croste. Naturalmente l'interno dei pianeti presenta un volto articolato a seconda della composizione chimica di partenza: così Mercurio, Venere, la Terra e Marte possiedono una crosta solida, un mantello fluido e un nucleo, in parte solido e in parte liquido; Giove e Saturno presentano un'atmosfera esterna molto spessa (almeno 1000 km) di idrogeno ed elio, un mantello

profondissimo di idrogeno liquido, in parte allo stato molecolare e in parte metallico, e un nucleo interno, di rocce e ghiacci, relativamente piccolo; Urano e Nettuno sembrano invece avere una composizione indifferenziata, un unico strato a una pressione di due milioni di atmosfere, formato da una miscela di composti di idrogeno, ossigeno, carbonio e azoto.

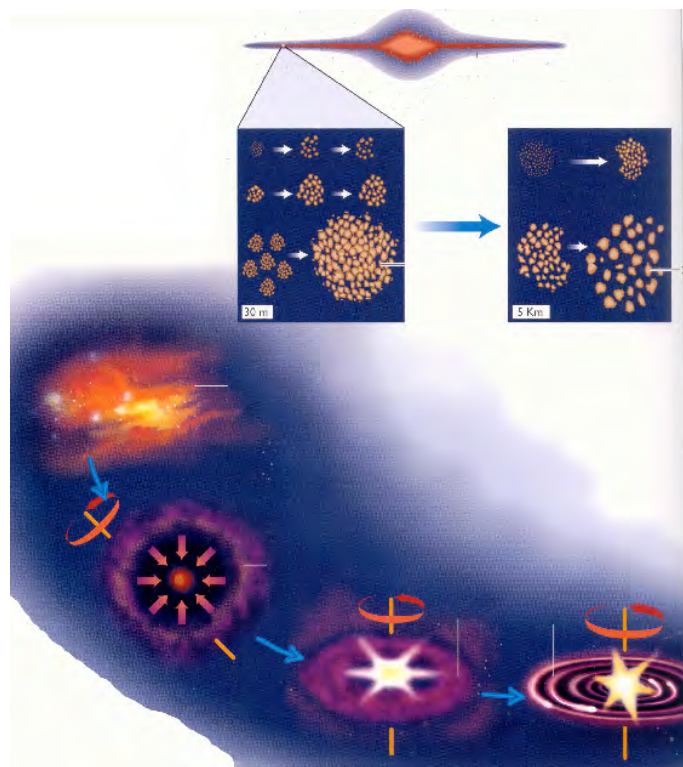


Fig. 15. Le successive fasi della formazione del sistema solare (da Vanin. I grandi fenomeni celesti).



Fig. 16. La cometa Tempel 1, ripresa dalla sonda Deep Impact il 4 luglio 2005 (NASA).

SISTEMA SOLARE ESTERNO

Giove e Saturno furono visitati in successione dai *Pioneer 10* e *11* e dai *Voyager 1* e *2* fra il 1977 e il 1981. Intorno a Giove orbitò, dal 1995 fino al 2003 la sonda *Galileo* e sta attualmente orbitando attorno a Saturno la sonda *Cassini-Huygens*, che nel 2000 sorvolò, di passaggio, Giove. Queste sonde ci hanno consegnato un quadro vario e articolato sulle atmosfere dei due pianeti. Giove (fig. 17) ha un'atmosfera variopinta organizzata in fasce e bande, con pennacchi, festoni, ovali chiari e scuri. La Grande Macchia Rossa, un'enorme struttura ciclonica che potrebbe contenere tre volte la Terra, è la sua caratteristica più saliente.

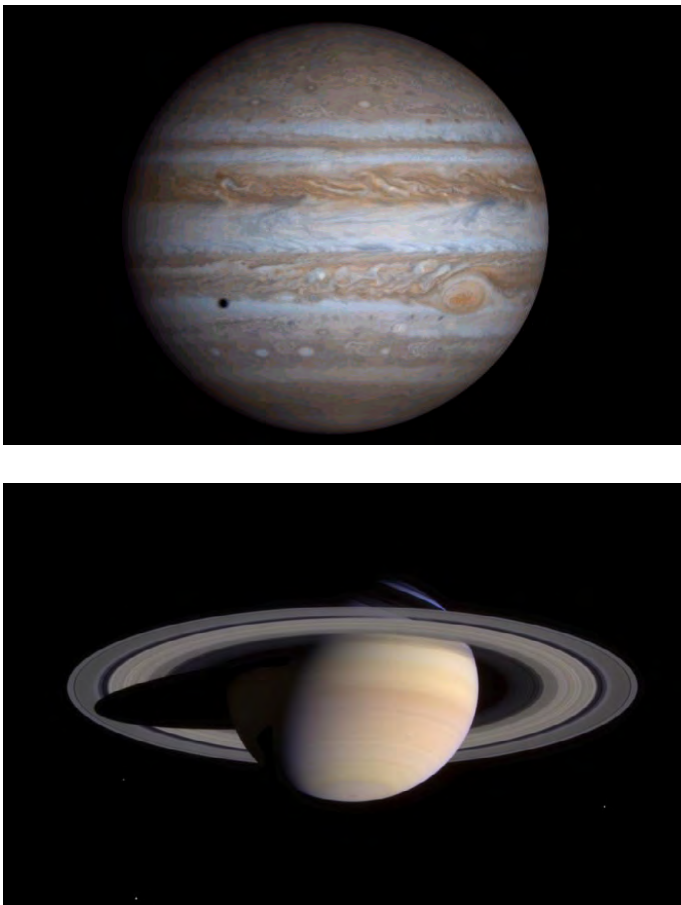


Fig. 17. Giove e Saturno ripresi dalla sonda Cassini rispettivamente nel 2000 e nel 2004 (NASA-JPL).

Saturno (fig. 17), probabilmente a causa della maggiore distanza dal Sole, ha un'atmosfera più smorta, sempre organizzata in strutture parallele all'equatore e presentante anch'essa delle estese perturbazioni, che compaiono però con periodicità trentennale.

Urano, avvicinato dal *Voyager 2* nel 1986, a causa di uno spesso strato assorbente di metano, non mostra strutture atmosferiche, mentre Nettuno, sorvolato dal *Voyager 2* nel 1989, nonostante la maggiore distanza dal Sole, è più attivo (fig. 18), rivelando soprattutto

una grande struttura maculare, di colore blu, simile alla macchia rossa gioviana. Tutti e quattro i pianeti possiedono un sistema di anelli, anche se solo quelli di Saturno sono visibili con telescopi terrestri. Essi sono formati da miliardi di minuscoli satelliti costituiti da roccia e ghiaccio e aventi dimensioni da pochi metri a qualche chilometro, orbitanti di conserva attorno ai pianeti e che di lontano sembrano costituire un insieme unico.

Giove, Saturno e Urano hanno anche un sistema di satelliti regolari (fig. 19), oltre ad alcuni satelliti irregolari, forse asteroidi catturati o corpi residuati dalla collisione di oggetti più grandi. Nettuno è privo di un sistema di satelliti regolari, forse a causa dell'evento che portò alla cattura del suo satellite maggiore, Tritone, che svuotò dei satelliti preesistenti, con la sua influenza, un'ampia regione attorno al pianeta. Forse in questo evento si ebbe anche la fuoruscita di Plutone e del suo satellite Caronte che erano anticamente, pare, satelliti di Nettuno.

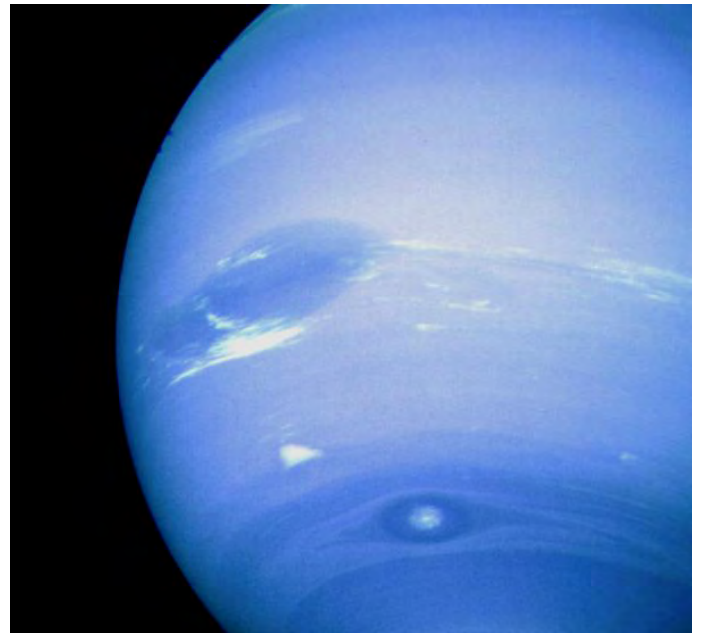


Fig. 18. Il pianeta Nettuno fotografato nel 1989 dal *Voyager 2* (NASA-JPL).

In effetti né l'orbita, molto eccentrica e inclinata, né le dimensioni (solo un quinto del diametro terrestre) di Plutone paiono tali da fargli meritare la patente di vero e proprio pianeta. Nondimeno, la coppia Plutone-Caronte, l'unica, per inciso, non ancora avvicinata da alcuna sonda (ma lo sarà nel 2015 dalla missione *New Horizons*, lanciata nel gennaio 2006) è quanto mai interessante perché il suo studio può illuminare la genesi e l'evoluzione del sistema solare più esterno, dove forse sono stati all'opera meccanismi diversi di aggregazione planetaria.

Di recente, la scoperta di diverse centinaia di corpi transnettuniani e transplutoniani dimostra che

Plutone e Caronte sono soltanto due membri fra i più cospicui di una cintura asteroidale esterna, la «cintura di Kuiper», da cui provengono le comete a corto periodo. Almeno tre di questi oggetti, Sedna, 2003 EL61 e 2005 FY9, sono più grandi di Caronte e uno, Eris, più grande addirittura di Plutone.

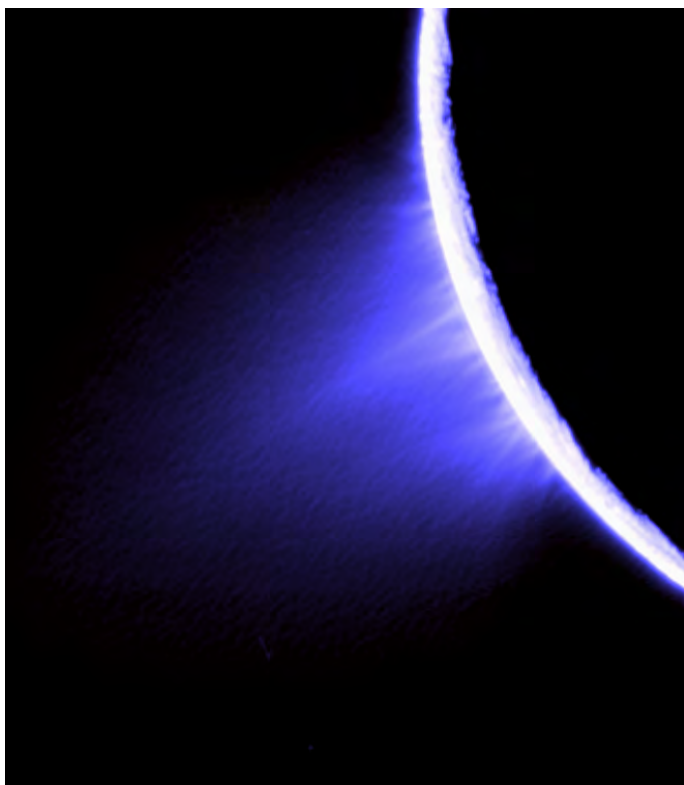


Fig. 19. *Encelado, uno dei satelliti più straordinari di Saturno, ha rivelato nel 2007, alle camere della sonda Cassini, di essere un corpo geologicamente attivo. Nell'immagine si vede l'azione di geyser che emettono dalla superficie getti gassosi, probabilmente vapore acqueo, nello spazio (NASA-JPL).*

Sotto questo profilo, appare condivisibile la decisione dell'Unione Astronomica Internazionale di declassare Plutone dal rango di pianeta maggiore e di creare una nuova categoria di oggetti che orbitano attorno al Sole, i pianeti nani, da affiancare agli otto pianeti maggiori e ai pianeti minori o asteroidi. Un pianeta nano è un corpo celeste di tipo planetario orbitante attorno ad una stella e caratterizzato da una massa sufficiente a conferirgli una forma sferoidale, ma che non è stato in grado di «ripulire» la propria fascia orbitale da altri oggetti di dimensioni confrontabili. Gli unici pianeti nani finora riconosciuti sono tre, Plutone, Eris e Cerere (quest'ultimo considerato in precedenza un asteroide), ma almeno altri 14, sia orbitanti fra Marte e Giove, sia esterni a Nettuno, potrebbero rientrare in questa categoria.

BIBLIOGRAFIA

- A.A.V.V. *I pianeti della stella Sole*, Le Scienze, Milano, 1982.
A.A.V.V. *Le missioni Voyager*, Le Scienze Quaderni, Milano, 1990.
Alessandro Braccisi, Giovanni Caprara e Margherita Hack. *Alla scoperta del sistema solare*, Milano, Mondadori, 1993.
Clark Chapman e David Morrison. *Catastrofi cosmiche*, Milano, Geo, 1991.
Peter Francis. *I pianeti: dieci anni di scoperte*, Torino, Boringhieri, 1985.
J. Kelly Beatty e Andrew Chaikin (a cura di). *The new solar system*, 3^a ed., Cambridge (USA) e Cambridge (UK), Sky Publishing Corporation e Cambridge University Press, 1990.
Gabriele Vanin. *I grandi fenomeni celesti*, Mondadori, Milano, 1997.
<http://photojournal.jpl.nasa.gov/index.html>
<http://www.solarviews.com/cap/index/index.html>
<http://www.nasa.gov/>
<http://www.esa.int/esaCP/index.html>
<http://www.shatters.net/celestia>
<http://www.astrosurf.com/avl>

L'EVOLUZIONE STELLARE

DI CARLO FERRIGNO

INTRODUZIONE

Come è stato detto ripetutamente, cercare di studiare l'evoluzione delle stelle è come dedurre dall'istantanea su una folla di persone le tappe della vita degli uomini. Il senso di questa metafora è che i tempi scala di evoluzione delle stelle sono generalmente troppo elevati per essere osservati in periodi storici. Osservando la globalità del cielo è però possibile capire dal numero di stelle che sono in una certa fase dell'evoluzione quanto essa dura. Per fare questo, da ormai quasi un secolo, viene utilizzato il diagramma Hertzsprung-Russel (H-R) in cui si inseriscono le stelle in punti di coordinate $\log T_e$, $\log L$ dove T_e e L rappresentano la temperatura efficace e la luminosità bolometrica intrinseca (v. fig. 20).

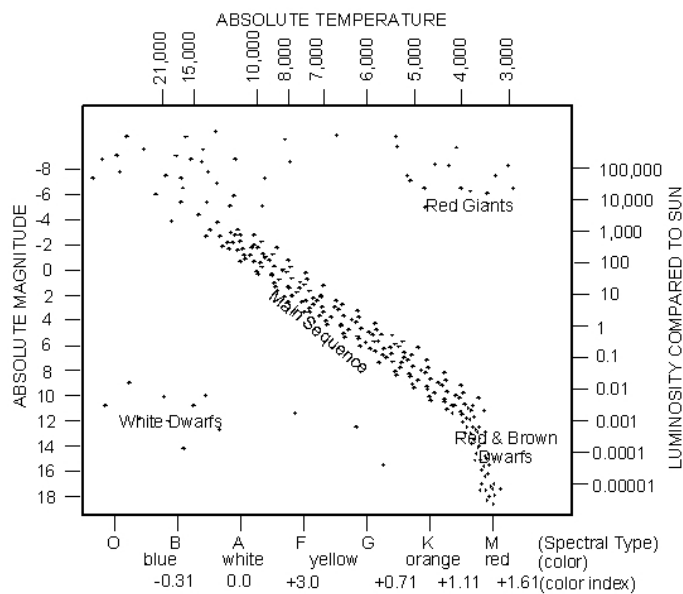


Fig. 20. Un tipico diagramma H-R: in ascissa inferiore è riportato il tipo spettrale, in ascissa superiore la temperatura assoluta, nell'ordinata di sinistra la magnitudine visuale assoluta e nell'ordinata di destra la luminosità rispetto al Sole (da L'Astronomia).

Per conoscere la prima è necessario disporre di un modello che descriva lo spettro di radiazione di una stella e questo è fornito dal corpo nero: si tratta di un corpo che assorbe tutta l'energia incidente ed emette solo in relazione alle proprie condizioni termodinamiche. Il modello prevede che per un corpo nero sferico l'energia totale emessa nell'unità di tempo, ovvero la luminosità, sia proporzionale a $R^2 T^4$ (relazione di Stefan), con R raggio del corpo nero e T temperatura e

che il picco di emissione sia proporzionale a T (legge di Wien). La temperatura che appare in queste formule è detta temperatura efficace T_e . Per determinare la luminosità bolometrica intrinseca è necessario conoscere la distanza della stella e la luminosità apparente; occorre inoltre disporre di un modello di emissione che permetta di passare dalla luminosità in certe finestre spettrali alla luminosità bolometrica. Questo compito viene svolto in modo eccellente dal modello di corpo nero, con alcune correzioni legate agli assorbimenti nelle atmosfere stellari (*blanketing*). Mentre la luminosità apparente è facilmente misurabile, la distanza è molto difficile da calcolare e, come è noto, l'unico metodo diretto è la parallasse trigonometrica annua. Soltanto con i dati del satellite *Hipparcos* si sono potute avere delle misure abbastanza precise anche per stelle molto distanti e solo attualmente gran parte delle classi di luminosità sul diagramma H-R sono coperte dalle misure di *Hipparcos*. Il raggio di utilizzo del metodo della parallasse è comunque inferiore al migliaio di parsec, circa un ottavo della nostra distanza dal centro galattico. Le distanze delle stelle più lontane vengono dedotte con metodi indiretti, che però contengono un grosso grado di incertezza. Sul diagramma H-R sono ben visibili delle zone più densamente popolate di stelle: esse sono la sequenza principale (MS, dall'inglese *main sequence*), il ramo delle giganti (GB, dall'inglese *giant branch*), il ramo asintotico delle giganti (AGB, dall'inglese *asymptotic giant branch*), la zona delle supergiganti e la sequenza delle nane bianche (WD, dall'inglese *white dwarf*). Queste zone corrispondono alle principali tappe dell'evoluzione delle stelle. È possibile inoltre, in base alla relazione di Stefan, tracciare delle zone di uguale raggio sul diagramma H-R: questo ci dà un'idea delle dimensioni reali delle stelle, una quantità misurabile solo in alcuni casi eccezionali tramite metodi interferometrici. Sul diagramma H-R si vedono spesso disegnate delle tracce evolutive contrassegnate dalla massa della stella: tale parametro è misurabile solo nei casi di sistemi doppi di distanza nota, quindi molto raramente, ma è il principale discriminante per l'evoluzione delle stelle.

LA NASCITA DELLE STELLE

È opinione diffusa che le stelle nascano per condensazione di una nube di gas e polveri. In particolare una grande nube di idrogeno si deve frammentare in molti nuclei densi che poi si contraggono in stelle, ma il meccanismo che genera questo processo è ignoto. Normalmente si presenta come ipotesi plau-

sibile l'interazione del fronte d'urto provocato da una supernova con il mezzo interstellare. Il fronte d'urto comprime il gas che si contrae attorno ad addensamenti locali che poi formano i nuclei densi. Per modellare la contrazione di un nucleo denso si usa l'accrescimento sferico che consiste nel trattare il nucleo denso come un serbatoio infinito di gas che può cadere sul centro di massa. L'accrescimento avviene attraverso una caduta libera radiale delle singole particelle che poi, incontrando la superficie della stella in formazione, rilasciano una gran quantità di energia cinetica (si può definire la superficie della stella in formazione come quella superficie in cui c'è un brusco innalzamento di densità e temperatura del gas). Quest'energia viene emessa sotto forma di fotoni di breve lunghezza d'onda (raggi X e ultravioletti) che poi degradano in raggi infrarossi interagendo con il gas e le polveri della nube sovrastante. Nel centro del nucleo denso si forma la protostella. Nelle regioni immediatamente adiacenti alla protostella si deve anche formare un disco di materia, dal quale origineranno eventuali pianeti. La necessità di un tale disco è postulata dal fatto che la maggior parte degli oggetti celesti presenta una rotazione intorno ad un asse. Sappiamo che il momento angolare in un sistema isolato si conserva e quindi il sistema che originò la stella doveva essere esso stesso in rotazione. Il gas anziché cadere radialmente sulla condensazione centrale spiraleggia andando a disporsi su un disco. Sono state notate numerose evidenze indirette di questi dischi attraverso gli spettri, e recentemente il Telescopio Spaziale li ha osservati direttamente attorno a molte stelle nella nebulosa di Orione. L'ostacolo principale per una formulazione teorica soddisfacente consiste nel giustificare la caduta di particelle di gas e polveri che formano il disco: occorre un meccanismo di dissipazione energetica la cui origine è sostanzialmente ignota. Indaghiamo ora la struttura della protostella. Una qualsivoglia massa è dotata di autogravità che tende a contrarre l'oggetto in un punto: se è presente una pressione, questa impedisce la contrazione. In assenza di degenerazione (si veda poi), la pressione P è legata alla temperatura del gas secondo l'usuale legge

$$P = k_B m^{-1} \rho T \quad (1)$$

con ρ densità del gas, k_B costante di Boltzmann e m massa media delle particelle che compongono il gas. La temperatura a sua volta è legata all'energia interna del gas che aumenta se l'oggetto si contrae. Trascuriamo in prima approssimazione l'aumento di densità legato alla contrazione. La protostella inizialmente è sostenuta dalla sola pressione generata in

seguito al riscaldamento prodotto dalla contrazione e, se non intervenissero altri fenomeni, la contrazione procederebbe all'infinito riscaldando sempre più il gas in una successione di stati di equilibrio a densità crescente. Se però la fonte dell'energia stellare fosse quella gravitazionale il tempo di vita delle stelle sarebbe troppo corto contrastando con le evidenze sperimentali dei tempi scala geologici. Quando la temperatura nel nucleo raggiunge il milione di gradi sono possibili delle reazioni di fusione nucleare che producono energia, che contribuisce a sostenere la pressione sia innalzando la temperatura sia attraverso la pressione di radiazione. Si instaura così un nuovo equilibrio in cui la stella non ha più bisogno di contrarsi per autosostenersi, ma trova nella fusione nucleare l'energia necessaria a bilanciare l'autogravità. La prima reazione nucleare che avviene in una protostella è la fusione del deuterio in elio, che necessita di una temperatura di innesco più bassa delle altre. La piccola percentuale di deuterio presente nel gas interstellare consente però la sopravvivenza della stella in questo stato solamente per qualche milione di anni. Rimane da chiarire quando e come avviene la transizione fra un sistema caratterizzato dalla presenza di una nube protoplanetaria e un sistema in cui la stella centrale è al massimo circondata da qualche pianeta. Questa transizione avviene prima dell'ignizione dell'idrogeno, nella fase in cui è esaurito il deuterio e la stella si contrae rilasciando una gran quantità di energia gravitazionale. In questo lasso di tempo avviene la produzione di un vento stellare molto intenso, il vento T Tauri, dal nome della prima stella su cui è stato osservato. Questo vento spazza lo spazio intorno alla stella diradando il disco protoplanetario ed estirpando l'atmosfera primordiale di eventuali pianeti di tipo terrestre.

LA FASE DI SEQUENZA PRINCIPALE

Dal diagramma H-R di fig. 20 si vede che la zona più densamente popolata è la sequenza principale, che quindi si caratterizza come la fase più lunga dell'evoluzione stellare. La struttura di una stella è quindi particolarmente stabile in questa fase e le fonti di energia sono molto abbondanti: la relativa semplicità del modello ci permette di trattare in maggior dettaglio i processi fisici che avvengono nelle stelle di sequenza principale. La tipica stella di sequenza principale viene approssimata come un corpo in equilibrio termodinamico locale, a simmetria sferica, in equilibrio idrostatico e

senza perdita di materia. Le approssimazioni vengono giustificate a posteriori dai modelli e preliminarmente dalle osservazioni perché il gradiente medio di temperatura previsto è di 10^{-2} K/m, la rotazione è generalmente molto lenta e quindi non distorce significativamente la simmetria, non si osservano flussi netti di materia cioè cambi in dimensioni e il vento stellare è trascurabile. Nelle altre fasi evolutive si fanno cadere alcune di queste approssimazioni secondo le particolari esigenze e si introducono leggi più generali. La prima legge che introduciamo è la conservazione della massa espressa dall'equazione:

$$dM(r)/dr = 4\pi r^2 \rho \quad (2)$$

dove $dM(r)$ è la massa contenuta in uno strato sferico di spessore dr . Questa è una legge generale che lega la quantità di massa negli strati con la densità, e permette di passare da una descrizione euleriana in cui la variabile indipendente è la coordinata radiale a una formulazione lagrangiana in cui la variabile indipendente è la massa di uno strato sferico: nel primo caso le leggi descrivono la materia che si trova in una determinata posizione, nel secondo l'elemento di materia detta le sue proprietà. La seconda legge fondamentale esprime l'equilibrio idrostatico:

$$1/\rho \, dP/dr = GM(r)/r^2 \quad (3)$$

dove $M(r)$ è la massa contenuta entro una sfera di raggio r e G è la costante gravitazionale. Questa legge descrive come il gradiente di pressione contrasti la contrazione gravitazionale bloccando la naturale caduta della materia verso il centro di massa. A questo punto abbiamo due equazioni in tre variabili $M(r)$, $P(r)$ e $\rho(r)$ nella formulazione euleriana. Necessitiamo quindi di un'equazione di stato che legghi pressione e densità: la (1) è generalmente sufficiente, ma in stelle di massa elevata bisogna tenere conto degli effetti della radiazione nell'equazione di stato e in stelle di piccola massa bisogna considerare una parziale degenerazione elettronica. Attualmente vengono utilizzate delle tabulazioni più raffinate delle leggi analitiche che tengono conto di vari fenomeni; in particolare molta attenzione è posta alla parziale degenerazione elettronica. Dalla (1) si vede però che introduciamo un'ulteriore variabile, la temperatura $T(r)$ e quindi abbiamo bisogno di un'altra equazione: nelle stelle c'è un notevole flusso di energia e quindi dobbiamo descrivere come il trasporto avvenga. Ci sono sostanzialmente due modi per trasportare energia: o il trasporto radiativo in cui

i mediatori sono i fotoni o il trasporto convettivo in cui l'energia è trasportata da movimenti macroscopici della materia. In casi di alta degenerazione elettronica è presente il trasporto conduttivo, analogo al trasporto che avviene nei metalli, dove infatti gli elettroni hanno un'equazione di stato degenera. Consideriamo una situazione di equilibrio termodinamico: la radiazione ha un'energia dipendente solo dalla temperatura secondo la usuale distribuzione di Planck:

$$u = aT^4$$

dove u è la densità di energia, T la temperatura e a la costante di radiazione definita in nota ⁽¹⁾. Mentre il flusso di energia F da un corpo di temperatura T è dato da ⁽¹⁾:

$$F = \sigma T^4.$$

Se una fonte di energia riscalda lievemente una regione si instaura un flusso di energia per riequilibrare la situazione; la differenza di flusso F_r tra due regioni che differiscono di dT in temperatura è (espandendo al primo ordine):

$$F_r = -4\sigma T^3 (dT/dr) dr$$

da cui ricaviamo:

$$F_r = -4\sigma T^3 / \kappa \rho (dT/dr)$$

sostituendo al posto di dr il cammino libero medio di un fotone $1/\kappa\rho$ dove il parametro κ esprime l'opacità del mezzo. Una trattazione rigorosa e qualche manipolazione portano all'equazione:

$$dT(r)/dr = -3/16\pi ac \, \kappa \rho / r^2 T^3 L(r) \quad (4)$$

che esprime il gradiente di temperatura in funzione della luminosità $L(r)$ uscente al raggio r : l'unica novità qui è il fattore numerico tre. Poiché abbiamo introdotto una nuova variabile, la luminosità, è necessario introdurre un'ulteriore equazione. L'opacità è il problema più spinoso in questa legge e viene tabulata in funzione della temperatura, della densità e della composizione chimica. Essa esprime sostanzialmente come l'energia interagisce con la materia: è quindi necessario usare la meccanica quantistica per esprimere delle leggi consistenti. È interessante notare come un sostanziale miglioramento sulle conoscenze sull'opacità avvenne quando al centro di Los Alamos venne tolto il segreto militare sugli studi riguardanti la propagazione dell'ener-

gia prodotta dalle bombe nucleari in atmosfera. Prima di passare alla quarta e ultima equazione che regola la struttura stellare discutiamo brevemente il meccanismo di trasporto convettivo. Si può dimostrare che se la luminosità uscente da una regione è più alta di un certo valore critico o se l'opacità è molto forte la soluzione delle equazioni, assumendo un trasporto radiativo, è instabile rispetto a variazioni di densità o temperatura. Questo significa che se la legge di trasporto fosse quella radiativa ogni riscaldamento di una porzione di materia porterebbe ad un allontanamento finito dalla posizione originaria. Questo è naturalmente inaccettabile sotto le ipotesi di equilibrio idrostatico: bisogna quindi cercare un meccanismo più efficiente di trasporto energetico. Vengono violate le condizioni di equilibrio termodinamico locale e idrostatico e quindi sarebbe necessario risolvere, numericamente, le equazioni dell'idrodinamica in presenza di radiazione, cosa estremamente complicata anche al giorno d'oggi e che non fornisce sostanziali miglioramenti rispetto alla teoria semiempirica della *mixing-length* (lunghezza di mescolamento). Questa teoria esprime la relazione tra temperatura e pressione in presenza di moti convettivi in funzione di due parametri in cui vengono riassunti la forma e le dimensioni delle celle convettive. Un'approssimazione ancor più cruda si può effettuare nelle regioni interne delle stelle dove l'opacità è bassa, mentre temperatura e luminosità sono molto alte: si può vedere come un moto convettivo può essere approssimato da un trasporto di energia di grandi elementi di materia che obbediscono all'equazione delle trasformazioni adiabatiche:

$$dT(r)/dr = \Gamma_2 - 1/\Gamma_2 \quad T/P \quad dP(r)/dr \quad (5)$$

dove $P(r)$ è la pressione al raggio r e Γ_2 è un coefficiente tipico delle trasformazioni adiabatiche di un gas generico funzione di composizione chimica, densità e temperatura. In questo caso si assume naturalmente che non venga prodotta energia nelle zone convettive, come da definizione di adiabaticità. È doveroso rilevare come la teoria della *mixing-length* sia inconsistente proprio nelle regioni esterne dove essa serve, cioè si basa su delle assunzioni che alla fine dei calcoli si rivelano non valide. Le previsioni finali sulla struttura ed evoluzione delle stelle sono però sorprendentemente buone rispetto ai dati osservativi e quindi la si usa comunque. L'ultima equazione di struttura stellare esprime la dipendenza della luminosità uscente da un guscio sferico dai meccanismi di produzione di energia:

$$dL(r)/dr = 4\pi r^2 \rho (\epsilon_n - \epsilon_v + \epsilon_g) \quad (6)$$

dove ϵ_n è il tasso di produzione di energia nucleare (potenza emessa) per unità di massa, ϵ_g il tasso di energia gravitazionale per unità di massa, ϵ_v è la perdita di energia a causa dei neutrini per unità di massa. Queste quantità sono funzione di densità, temperatura, composizione chimica e contengono una dipendenza temporale. Nella fase di sequenza principale tutte le stelle trasformano l'idrogeno in elio nel proprio nucleo o attraverso il ciclo protone-protone o attraverso il ciclo CNO. Quest'ultimo dà come risultato sempre la fusione di 4 protoni in ^4He , con gli elementi carbonio, azoto, ossigeno, che fungono da catalizzatori, velocizzando la reazione. Mentre il primo ciclo avviene a temperature più basse, il secondo è molto sensibile alla temperatura, essendo molto efficace a temperature alte e molto lento a temperature più basse. La fase di MS dura per una stella come il Sole circa 10^9 anni e la sua durata è inversamente proporzionale a una potenza della massa iniziale:

$$t_{\text{vita}} \propto M^\alpha.$$

con α coefficiente empiricamente ricavato dai modelli, compreso tra 1 e 3. Le stelle più massicce vivono quindi molto poco mentre le stelle di piccola taglia sono più parsimoniose e si fanno durare l'idrogeno più a lungo. La produzione di neutrini che sfuggono dalla stella senza interagire con la materia è importante a temperature dell'ordine di 10^8 - 10^9 K, quindi incide sensibilmente solo in fasi avanzate della vita di stelle massicce. Il suo effetto è di raffreddare delle regioni senza concorrere al flusso di energia elettromagnetica: infatti il neutrino interagisce solo con particelle sensibili all'interazione debole mentre il fotone è l'intermediario per l'energia elettromagnetica. Nella (6) il termine gravitazionale ϵ_g tiene conto della produzione di energia causata da un'eventuale contrazione di una regione della stella. Le equazioni (2), (3), (4), (5), (6) sono le equazioni di struttura stellare che, risolte con opportune tecniche numeriche, descrivono l'evoluzione delle stelle una volta assegnate le leggi di opacità, produzione di energia ed equazione di stato. In prima analisi le soluzioni sono funzione del raggio, delle abbondanze dei vari elementi e delle condizioni al contorno assegnate alle soluzioni del sistema di equazioni differenziali. Le abbondanze cambiano grazie alle reazioni nucleari e ai processi di mescolamento, mentre la dipendenza del raggio dal tempo è contenuta nel termine di produzione di energia gravitazionale. Le tracce evolutive sono prodotte dai processi di variazione della composizione chimica; infatti esiste un teorema che assicura come

la struttura di una stella sia determinata una volta noti massa e profilo di composizione chimica. La perdita di massa può chiaramente influire in certe fasi e porta ad un'evoluzione diversa da quella a massa costante. Senza la perdita di materia è impossibile ad esempio spiegare la presenza del ramo orizzontale e le fasi iniziali di stelle massicce. Spesso è difficile capire intuitivamente tutte le interazioni fra le diverse quantità in gioco: è quindi opportuno esprimere il teorema del viriale, che riguarda l'equilibrio complessivo tra l'energia gravitazionale e l'energia interna. Esso viene ottenuto integrando la (2) sul volume e si presenta come:

$$3(\gamma - 1)U + \Omega = 0 \quad (7)$$

dove Ω è l'energia gravitazionale, U l'energia interna e γ è un parametro che lega la pressione con l'energia interna, nel caso del gas perfetto è il rapporto tra i calori specifici a pressione costante e a volume costante, che vale $5/3$. Se il parametro γ cade a valori minori o uguali a $4/3$, il valore per un gas di fotoni, la stella è instabile e può andare incontro a un'esplosione. L'energia interna contenuta in materia e radiazione deve quindi bilanciare la forza gravitazionale; se questo non avviene la stella si contrae perché irradia energia a meno che la pressione sia prodotta da fenomeni non termici come la degenerazione elettronica. Le fonti da cui viene attinta l'energia interna che si manifesta in pressione sono le reazioni nucleari.

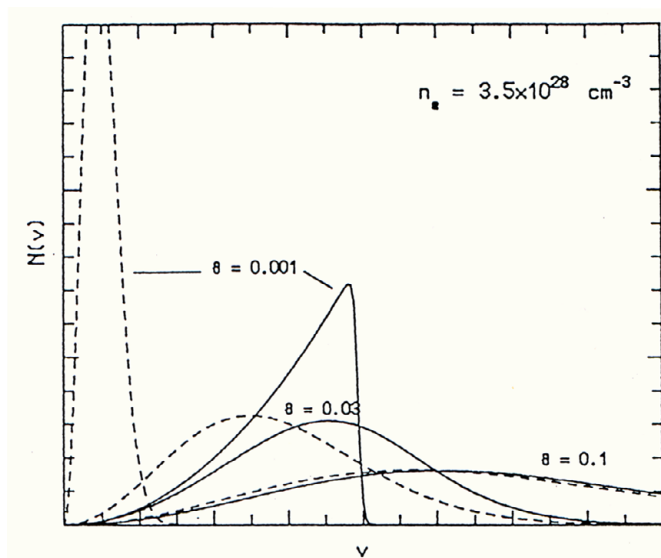


Fig. 21. Funzione di distribuzione di particelle fermioniche per tre valori diversi della temperatura $\eta = kT/m_e c^2$. Per confronto sono riportate anche le corrispondenti funzioni di Boltzmann (curve tratteggiate) (da Nobili. Dispense di astrofisica teorica).

Chiarite a grandi linee l'infanzia e l'età matura delle stelle vediamo cosa avviene dopo la fase di sequenza principale. Ad un certo punto l'idrogeno del nucleo

stellare, che generalmente non ha scambio di materiale con gli strati sovrastanti, si esaurisce e la stella va incontro a cambiamenti sorprendenti. Le fasi di vita successive necessitano però di alcune distinzioni che per essere definite abbisognano dell'introduzione del concetto di degenerazione elettronica.

LE FASI EVOLUTIVE LEGATE ALL'ESAURIMENTO DELL'IDROGENO

Un gas di elettroni diventa degenere quando raggiunge densità molto elevate (tipicamente 10^6 g/cm^3 , circa 2000 volte più del platino) rimanendo a temperature inferiori a qualche milione di gradi. Se il numero di elettroni per unità di volume è molto elevato e la temperatura non troppo alta ogni singolo elettrone occupa un volume nello spazio delle fasi dell'ordine di h^3 con h costante di Planck. Per il principio di esclusione di Pauli in questo volume non possono però coesistere più di 2 elettroni di spin opposto; i primi (2) elettroni occuperanno gli stati di energia più bassa e gli altri saranno costretti a porsi in stati di energia più elevata; nel limite di densità infinita gli stati sono occupati fino ad un valore dell'energia detta energia di Fermi (v. fig. 21). Negli stati oltre quest'energia non sono presenti elettroni. Il risultato netto, combinando la funzione di distribuzione nello spazio delle fasi e l'isotropia dei momenti, è una quantità di elettroni piccola a energia bassa, un picco nella distribuzione intorno all'energia di Fermi e l'assenza di una coda ad alta energia. Un altro modo di vedere le cose si può descrivere usando il principio di indeterminazione di Heisenberg:

$$\Delta p \Delta x \geq h / 4\pi$$

Si può infatti intuire che valori più alti del momento Δp implicano uno spazio reale occupato dagli elettroni più piccolo e quindi la possibilità di «impacchettare» più elettroni. La pressione del gas in questa condizione è dovuta unicamente agli elettroni ed è molto alta, rispetto ad un gas perfetto, per la presenza degli elettroni di alta energia il cui moto ha origine non termica, essendo un effetto quantistico. Si può assimilare la degenerazione elettronica alle ferie agostane in una località come Cortina. Supponendo che le persone vadano in ferie in coppia, non è desiderabile trovarsi in più di due per stanza (non più di due elettroni nello stesso stato); i primi che arrivano troveranno le stanze migliori che, vista l'omogeneità dell'offerta, saranno quelle a prezzo minore; queste però sono poche (i pochi stati a energia bassa). Man mano che aumenta l'afflusso rimarranno libere solo le

stanze a prezzo maggiore che, come si sa, a Cortina sono in gran numero; non è possibile però che i prezzi siano superiori a un certo limite (almeno nella nostra finzione); la maggior parte delle coppie si troverà quindi sistemata nelle stanze a prezzo massimo. Le proto-stelle con massa inferiore alle 0,08 masse solari vanno incontro, senza entrare in MS, alla degenerazione del gas di idrogeno nella parte interna, come Giove, sostenendo così la gravità; i pianeti molto piccoli come la Terra sono invece sostenuti dalle forze intermolecolari.

STELLE DI PICCOLA MASSA

Definiamo stelle di piccola massa quelle che al termine della MS sviluppano un nucleo di elio degenere (v. fig. 22). L'elio prodotto dal bruciamento dell'idrogeno rimane confinato nel nucleo e, non essendo più riscaldato dalle reazioni nucleari, deve cercare la fonte di energia che sostiene l'energia interna e quindi la pressione nella contrazione gravitazionale. L'elio necessita di temperature molto più alte di quelle raggiungibili prima della degenerazione di una massa così piccola (0,2-0,3 masse solari) per fondersi e diventare carbonio mediante il ciclo *triplo alfa*, una catena di reazioni nucleari il cui risultato netto è la fusione di tre nuclei di ^4He (particelle alfa) in un nucleo di ^{12}C e la produzione di una quantità di energia per nucleone pari ad un decimo di quella ottenuta nel bruciamento dell'idrogeno. Al termine della fase di MS le stelle sviluppano un nucleo di elio degenere. A questo punto il nucleo si autosostiene grazie alla pressione generata dalla degenerazione elettronica. Collassando sotto il proprio peso il nucleo provoca tre fenomeni principali: un rilascio di energia gravitazionale sotto forma di energia termica, l'aumento di densità del nucleo stesso e l'innalzarsi di temperatura e densità nelle regioni sovrastanti ancora ricche di idrogeno. Il primo fenomeno, mediante processi fisici non del tutto chiariti, provoca l'espansione degli strati esterni della stella, quindi il loro raffreddamento e la loro opacizzazione: nel diagramma H-R la stella inizia a salire il ramo delle giganti rosse diventando più luminosa e fredda. Il secondo fenomeno porta alla degenerazione elettronica del nucleo stellare che si comporta come una nana bianca, il terzo provoca l'innescò di reazioni di fusione nucleare dell'idrogeno in elio tramite il ciclo CNO in una regione a guscio attorno al nucleo degenere. Le stelle di massa compresa fra le 0,08 e le 0,8 masse solari non vanno oltre e si spengono con al centro il nucleo di elio degenere e sopra uno strato di idrogeno

ormai raffreddato. Quando però la massa è superiore alle 0,8 masse solari, ma non supera all'incirca le due (non esiste un valore preciso del limite superiore perché nelle fasi post sequenza principale oltre alla massa iniziale pesano altri parametri come la possibile perdita di massa, il grado di metallicità, la viscosità, il parametro di *mixing-length*, non tutti ben controllabili dal punto di vista teorico), il destino evolutivo è diverso.

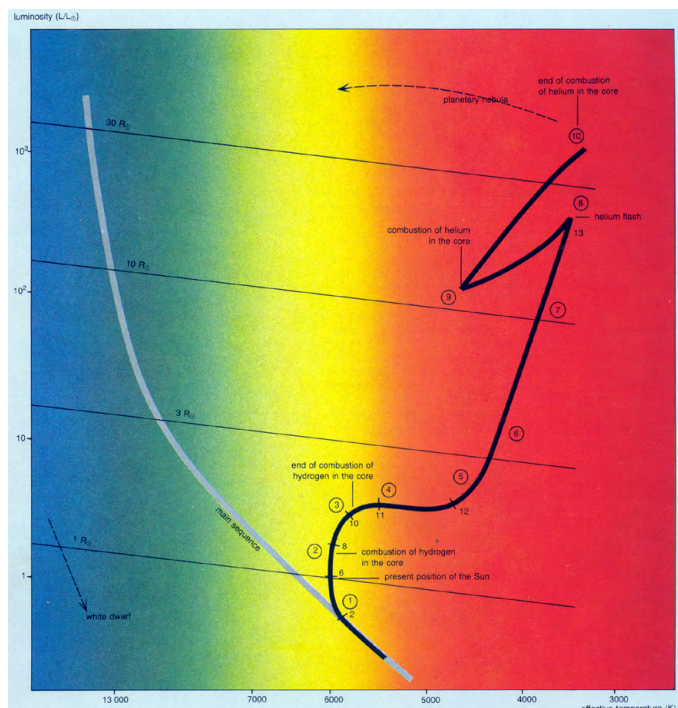


Fig. 22. Evoluzione di una stella di una massa solare nel diagramma H-R (da The Cambridge atlas of astronomy).

Le stelle di piccola massa (>0,8 masse solari) nella fase di gigante rossa sono composte da un nucleo di elio degenere, da un guscio di idrogeno che fonde in elio e da un'atmosfera molto rarefatta che può raggiungere anche dimensioni di qualche unità astronomica. Il bruciamento dell'idrogeno nel guscio innalza la temperatura delle regioni più esterne del nucleo dove si deposita un guscio di elio. I modelli al calcolatore mostrano che ad un certo punto (quando la massa del nucleo è di circa 0,5 masse solari) il rilascio di energia gravitazionale dovuto all'aumento di massa produce un aumento di temperatura che permette l'ignizione del ciclo *triplo alfa*. Il nucleo degenere a questo punto presenta un comportamento peculiare detto *helium flash* che consiste nell'ignizione violenta dell'elio del nucleo a gusci concentrici che procedono verso il centro. La violenza del fenomeno è dovuta alla forte rigidità e conducibilità termica di un gas degenere. In seguito all'aumento di temperatura l'elio perde la propria degenerazione e diventa un nucleo stabile che brucia elio, sovrastato da un guscio che brucia idrogeno.

Nel diagramma H-R la stella a questo punto torna vicino alla base del ramo delle giganti e vi rimane per un periodo dell'ordine di 10^8 anni, se il suo contenuto di metalli è abbastanza alto. Se la metallicità è bassa, come nelle stelle di alone galattico, il modello prevede uno spostamento verso la parte blu del diagramma H-R a luminosità costante: questa zona è detta ramo orizzontale delle giganti ed è caratterizzata da una piccola dispersione in luminosità a causa della costanza della massa del nucleo che subisce l'*helium-flash* (v. fig. 23).

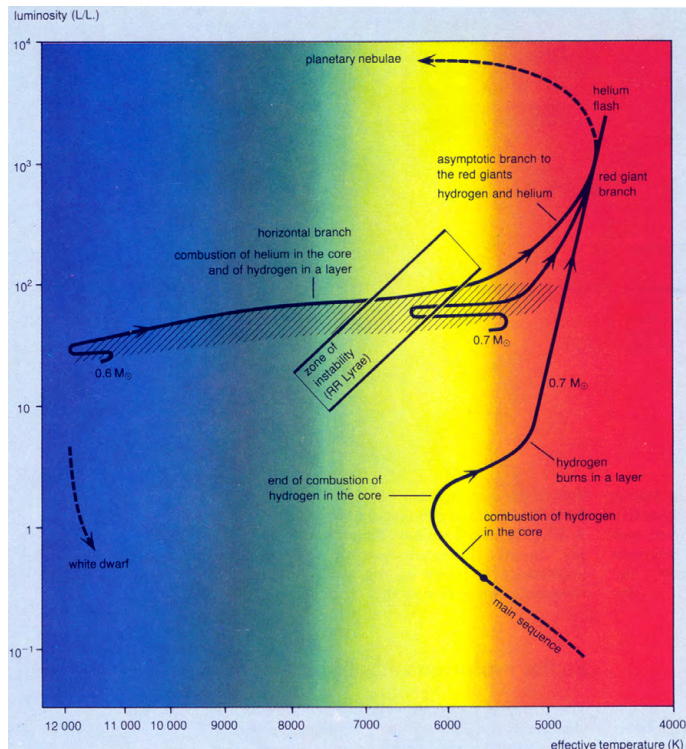


Fig. 23. Evoluzione di una stella povera di metalli. (da The Cambridge atlas of astronomy).

L'evoluzione successiva alla fase di bruciamento di elio nel nucleo è caratterizzata da uno spostamento nel diagramma H-R verso il ramo delle giganti, che si chiama fase di ramo asintotico delle giganti (AGB), molto simile al comportamento evolutivo di stelle di massa intermedia, e quindi lo affrontiamo al prossimo paragrafo.

STELLE DI MASSA INTERMEDIA

Definiamo stelle di massa intermedia quelle che alla fine della fase di MS non sviluppano un nucleo di elio degenere, bensì un nucleo in cui l'elio diventa carbonio tramite il ciclo *triplo alfa* e, nella fase successiva, sviluppano un nucleo di carbonio e ossigeno degenere. Il modello per le stelle di massa intermedia vale per una massa iniziale all'incirca compresa fra le due e le otto masse solari (non è

possibile dare valori precisi perché nei modelli intervengono altri parametri e soprattutto la perdita di massa). Per esemplificare il percorso evolutivo di stelle di massa intermedia studiamo la traccia sul diagramma H-R di una stella di 5 masse solari (v. fig. 24). I meccanismi che incontriamo si basano sempre sull'equilibrio termodinamico fra gravità, pressione e radiazione. Alla fine della fase di MS gli strati interni si contraggono, sviluppano energia e quindi gli strati esterni si espandono: la maggiore quantità di massa permette al nucleo di elio di raggiungere temperature abbastanza elevate per evitare la degenerazione innescando il ciclo *triplo alfa*. La stella trascorre in questo stadio evolutivo un periodo pari a circa un quarto del periodo trascorso in MS a causa della minore efficienza del ciclo *triplo alfa* rispetto al CNO. In questa fase la maggior parte della luminosità superficiale non è dovuta alle reazioni del nucleo di elio, ma ad un guscio di idrogeno che si trasforma in elio.

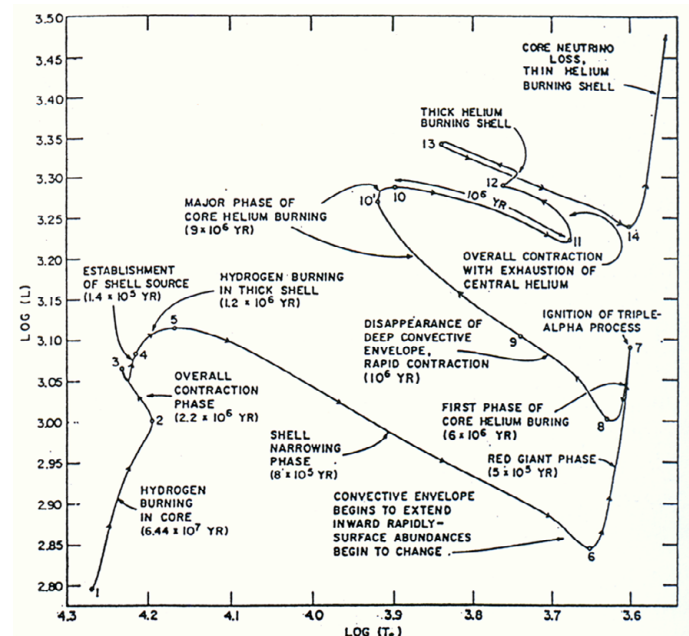


Fig. 24. Traccia analitica di una stella di cinque masse solari (da Iben, 1991).

In questa sommaria descrizione evitiamo di parlare dei grandi moti convettivi che trasportano materia dall'interno all'esterno della stella anche se sono molto importanti per il rimescolamento dei prodotti dei bruciamenti, che dà origine alla composizione superficiale osservabile in stelle di AGB. Diciamo solo che i moti convettivi diventano importanti quando il materiale è abbastanza rarefatto e freddo rispetto alla quantità di radiazione uscente da risultare opaco⁽³⁾ alla radiazione stessa: la materia assorbe energia e momento, quindi deve spostarsi verso la superficie facendo ridiscendere la materia raffreddata. Ad un certo punto la quantità di elio che brucia non

è più sufficiente a sostenere il peso della stella, che contrae il proprio nucleo fino a densità che provocano la degenerazione del carbonio, dell'ossigeno e dell'azoto prodotti in precedenza. A questo punto la stella risale il ramo asintotico delle giganti bruciando in gusci concentrici prima l'elio nella fase di *early-AGB* e poi innescando l'idrogeno nella fase di *thermal pulsing-AGB* (TPAGB). I processi in questa fase sono però molto complicati ed esula dai nostri scopi una descrizione completa. Ci limitiamo a dire che idrogeno ed elio bruciano in gusci in modo alternato, che l'ignizione dell'elio è abbastanza esplosiva ma non catastrofica, che è presente un'ingente nucleosintesi che avviene grazie alla cattura di neutroni e permette la formazione di isotopi pesanti, portati in superficie in continui rimescolamenti. In questa fase avvengono pulsazioni che sono correlate alla variabilità di lungo periodo, ad esempio delle stelle di tipo Mira. La fase successiva, se non ci fosse perdita di massa, sarebbe caratterizzata dall'aumento della massa del nucleo degenere che, una volta superata la massa limite (massa di Chandrasekar $M_{\text{ch}} \approx 1,4$ masse solari), esploderebbe dando origine ad una supernova (SN) con un rilascio di energia tipico degli eventi di tipo primo. Ma le supernovae di tipo primo non presentano le righe dell'elio, che invece sarebbero molto evidenti con un involucro ancora ricco di idrogeno di una stella di AGB ed inoltre sarebbero troppo frequenti in rapporto al tasso di SN effettivamente osservato nella nostra Galassia. Bisogna quindi invocare un meccanismo di perdita di massa che eviti alla stella il destino di SN espellendo gran parte del guscio ricco di idrogeno nello spazio; si tratta del vento, o supervento, a seconda della massa, che è il responsabile della comparsa delle nebulose planetarie.

EVOLUZIONE POST-AGB E COMPARSA DELLE NEBULOSE PLANETARIE

Se la stella progenitrice ha una massa piccola (0,8-1 masse solari) la fase di perdita del mantello gassoso in fase AGB può avvenire prima dell'inizio delle pulsazioni termiche cioè dell'innescò dell'idrogeno. Le stelle di massa compresa fra 1 e 2 masse solari vivono abbastanza a lungo per diventare stelle al carbonio, ovvero stelle in cui i rimescolamenti della fase TPAGB hanno portato in superficie una gran quantità di carbonio, e poi espellono la maggior parte del mantello appena dopo l'inizio delle pulsazioni termiche. Alcune considerazioni sono da effettuare sulla natura del vento stellare che produce una nebulosa planetaria: un vento collegato alla viscosità del gas, detto vento normale o di *Reimers*, può estrarre al massimo

10^{-6} masse solari all'anno, ma le dimensioni tipiche, la massa (0,1 masse solari) e la velocità di espansione di una nebulosa planetaria sembrano imporre che sia un evento della durata di un migliaio di anni e che estrae anche 10^{-4} masse solari all'anno a concludere l'esistenza di una stella di AGB. Questo evento è chiamato super-vento e probabilmente si presenta prevalentemente in stelle di massa intermedia, in cui un vento normale non riesce ad estrarre da solo l'involucro ricco di idrogeno. I meccanismi di emissione di questi venti non sono per nulla chiari, e le ipotesi teoriche al riguardo esulano dagli scopi del presente scritto. Al centro di una planetaria rimane il vecchio nucleo di carbonio arricchito dall'ossigeno prodotto da altre reazioni nucleari; lo stato del gas è naturalmente di degenerazione elettronica. Queste stelle sono tra le più calde conosciute, arrivando anche alla temperatura di centinaia di migliaia di gradi; grazie alla loro presenza possiamo ammirare le nebulose planetarie che risplendono grazie alla fotoionizzazione del gas prodotta dai fotoni ultravioletti emessi dal nucleo stellare (v. fig. 25).

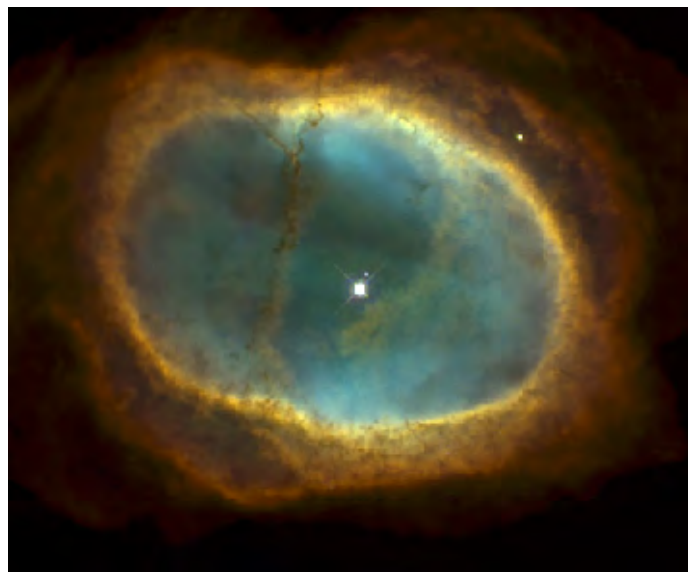


Fig. 25. La nebulosa planetaria NGC 3132 nelle Vele, detta anche la "Anulare Meridionale" fotografata dal Telescopio Spaziale. Si tratta di una delle più vicine planetarie, collocandosi a circa 2000 anni luce. Il suo diametro è approssimativamente di mezzo anno luce (Hubble Heritage Team/STScI/AURA/NASA).

Raffreddandosi, queste stelle in miniatura (hanno raggi dell'ordine del raggio terrestre) si vanno a disporre sul ramo delle nane bianche: esse non sono più stelle nel senso usuale della parola, ma masse di plasma in uno stato di degenerazione elettronica in cui l'attrazione gravitazionale è bilanciata solo dalla pressione esercitata dal gas di elettroni molto denso (tipicamente 10^6 g/cm³) che diventa degenere. Le nane bianche

hanno una massa che in media è di 0,6 masse solari con una dispersione piuttosto piccola, ma non si comprende bene il motivo di questa omogeneità di massa. La massa di una nana bianca non può comunque superare le 1,4 masse solari perché in tal caso nemmeno la pressione di degenerazione può bilanciare la gravità e il gas va incontro alla neutronizzazione, che descriveremo nel paragrafo dedicato alle stelle di neutroni.

STELLE MASSICCE E SUPERNOVAE DI TIPO II

Definiamo stelle massicce quelle stelle che non sviluppano né un nucleo di elio degenerare e nemmeno uno di carbonio degenerare dopo il bruciamento dell'elio. Queste stelle trascorrono il periodo di MS molto rapidamente (qualche milione di anni) dissipando in una grande luminosità il proprio idrogeno. All'esaurimento dell'idrogeno esse hanno un destino evolutivo simile ai precedenti, con la caratteristica di mantenersi però a luminosità costante, pur variando la temperatura superficiale. Dopo il bruciamento del carbonio in ossigeno, neon, magnesio, la stella può subire due diversi destini: se la perdita di massa è sufficientemente elevata si forma una nana bianca, composta dagli elementi sopra elencati, e circondata forse da una nebulosa planetaria; se invece rimane una quantità di gas elevata a sovrastare il nucleo, le stelle vanno incontro a tutti i bruciamenti fino al ^{56}Fe , elemento caratterizzato dalla più alta energia di legame per nucleone. La struttura che ne deriva è simile a quella di una cipolla, con gusci concentrici di materiale diverso e via via più pesante procedendo verso il centro (v. fig. 26).

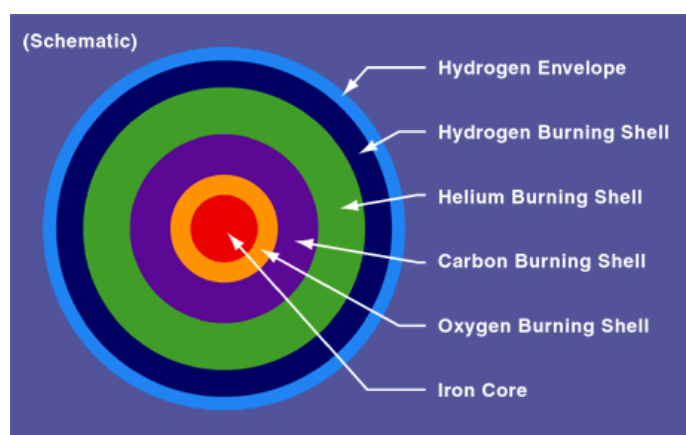


Fig. 26. Struttura di una stella massiccia prima di esplodere come supernova, con i diversi strati dove procede la combustione di elementi diversi. (da The Cambridge atlas of astronomy).

A questo punto l'equilibrio diventa parossisticamente instabile perché non è possibile fondere il ferro ulteriormente senza fornire energia. La stella è costretta

a dissipare l'energia gravitazionale della materia senza beneficiare di un riequilibrio termico: il nucleo si contrae in maniera indefinita finché raggiunge una densità pari a quella del nucleo atomico; nemmeno la degenerazione elettronica lo riesce a sostenere, quindi gli elettroni collidono con i protoni per formare neutroni e una gran quantità di neutrini. A questo stadio la materia ha raggiunto il proprio limite di compattazione e quindi si produce un brusco contraccolpo che a sua volta provoca un'onda d'urto negli strati sovrastanti e li spazza via. La stella esplode rilasciando in un attimo una quantità di energia pari a quella che ha prodotto in tutto l'arco della sua vita ($\sim 10^{51}$ erg), divenendo luminosa per qualche giorno come l'intera galassia che la ospita. Questa energia è trasportata principalmente dai neutrini, come si è visto sperimentalmente durante l'esplosione della SN1987a, ma anche da raggi gamma, X e ultravioletti. La luminosità ottica è invece prodotta principalmente dalla degradazione dell'energia causata da decadimenti radioattivi di isotopi pesanti sintetizzati in gran numero nelle fasi finali di vita della stella. Al centro rimane un oggetto particolarmente compatto che, in base alla massa residua, diventa un buco nero o una stella di neutroni, mentre tutto intorno si espande velocemente (fra i 10 e i 20 000 km/s) un guscio, che darà origine al cosiddetto residuo di supernova. L'energia intrappolata dall'involucro ricco di idrogeno al passaggio del fronte d'urto spiega la curva di luce ottica a plateau di queste supernove, prodotta dal decadimento del $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ in ambiente opaco ai raggi gamma.

STELLE DI NEUTRONI, PULSAR E BUCHI NERI

Assieme alle nane bianche questi oggetti vengono comunemente definiti oggetti compatti perché la materia al loro interno è in uno stato super-denso⁽⁴⁾. Se la massa di una nana bianca si avvicina alla massa limite di $\approx 1,5$ masse solari il gas degenera di elettroni e protoni va incontro a dei processi che ne riducono l'energia libera. Molto rilevante è il processo beta inverso che consiste nella cattura di un elettrone energetico da parte di un protone per formare un neutrone (e un neutrino). Questo processo provoca il raffreddamento della parte interna e la perdita della pressione esercitata dagli elettroni per sostenere la nana bianca, che va incontro ad una rapida contrazione. La materia a questo punto è composta in massima parte da neutroni e il raggio diventa di qualche decina di chilometri con densità di 10^{14} g/cm³. La struttura interna di una stella di neutroni è a più strati: partendo dall'esterno si passa da nuclei

ed elettroni con un'atmosfera di particelle relativistiche fino ad un superfluido di neutroni e protoni. Se però la massa che va incontro alla neutronizzazione è superiore ad un certo limite che dipende dalle equazioni usate per descrivere l'equilibrio, ma che possiamo assumere poco superiore alle 1,5 masse solari, sopraggiungono delle altre instabilità legate alla curvatura molto accentuata dello spazio in presenza di grandi masse. Quando una massa M è compressa in una sfera di raggio

$$r_s = 2GM/c^2$$

detto raggio di Schwarzschild, nemmeno la luce può sfuggire dalla superficie, e si forma così un orizzonte oltre il quale non è possibile ricevere alcuna informazione. Si dimostra che un osservatore lontano vede cadere un corpo su questo orizzonte in un tempo infinito, mentre l'eventuale luce da esso emessa si affievolisce sempre più. All'interno dell'orizzonte la materia deve cadere verso il punto centrale che ha densità infinita: si forma cioè una singolarità, un punto dello spazio-tempo in cui tutte le proprietà fisiche perdono il proprio significato. Le stelle di neutroni sono piccole e non emettono luce, un buco nero addirittura trattiene su di sé tutta l'energia luminosa: tali oggetti sono quindi impossibili da vedere direttamente. Vi sono però evidenze indirette della loro presenza. Per vedere un buco nero bisogna sperare che vicino ad esso vi sia un'altra stella da cui possa succhiare materia. Quando il gas cade spiraleggiando sul buco nero rilascia una gran quantità di energia che si rende visibile sotto forma di raggi X, ultravioletti e luce visibile. Studiando la dinamica di questi sistemi doppi o tripli è possibile risalire alla massa del mostro cosmico che si annida sotto la coltre di materia e scoprire se si tratta di un buco nero o di una stella cannibale. Questo metodo ha portato alla scoperta di alcuni buchi neri. Per quanto riguarda le stelle di neutroni, nel 1967 fu percepito un segnale regolarmente pulsante con periodo di 1,3 secondi proveniente da un punto nella costellazione della Volpetta. Si pensò anche alla segnalazione da parte di civiltà intelligenti, ma la perfetta regolarità del segnale e l'enorme potenza emessa fecero scartare quest'ipotesi. Il modello escogitato per spiegare quest'emissione prevede la presenza di una stella di neutroni ruotante con un campo magnetico disassato rispetto all'asse di rotazione (v. fig. 27). La vorticosità angolare è dovuta alla conservazione del momento angolare durante la contrazione della stella originaria; quasi tutte le stelle ruotano sul loro asse, ad esempio il Sole lo fa con un periodo

fra i 25 ed i 27 giorni, ed una contrazione porta ad un aumento della velocità angolare. Il disassamento degli assi magnetico e rotatorio è fenomeno comune in astronomia e lo presenta anche la Terra. Una combinazione di effetti elettromagnetici produce una forte accelerazione delle particelle cariche dell'atmosfera stellare che fluiscono lungo le linee di forza del campo. Come nel campo di un magnete velocemente ruotante c'è una regione conica in cui le linee non si chiudono su se stesse: dentro questa regione le particelle cariche seguono un moto curvo che produce radiazione, che esce dalla pulsar come il fascio di un enorme faro cosmico. In questo modo possiamo vedere le stelle di neutroni e, studiandone l'emissione, scoprire anche la presenza di pianeti che girano loro attorno, come è stato fatto qualche anno fa.

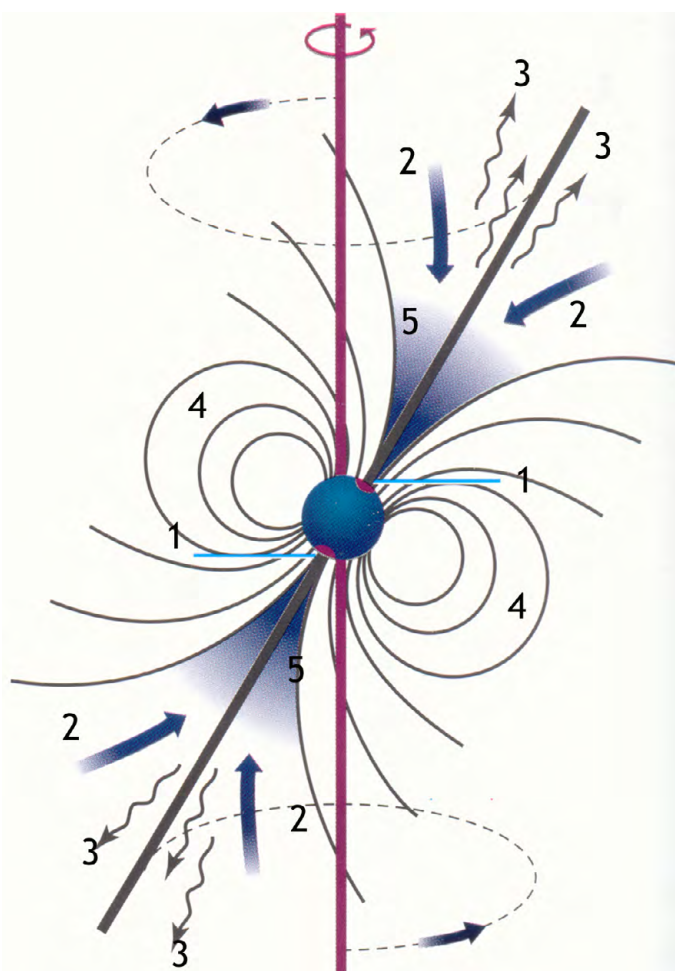


Fig. 27. Struttura di una pulsar. 1: macchie calde; 2: flussi di particelle; 3: radio emissione; 4: linee di forza del campo magnetico; 5: fasci di convogliamento degli elettroni. (da Vanin. Atlante fotografico dell'universo).

CENNI AI SISTEMI BINARI E SUPERNOVAE DI TIPO I

I meccanismi di formazione delle stelle permettono a molti astri di formarsi da un singolo nucleo denso. Dobbiamo aspettarci quindi che le stelle appena

nate siano raggruppate in ammassi. In effetti nel cielo vi sono due tipi di raggruppamenti di stelle: gli ammassi aperti e gli ammassi globulari. I secondi sono composti da stelle vecchie e si trovano nell'alone galattico quasi a formare uno stuolo di satelliti della Galassia, i primi sono invece composti da stelle generalmente giovani e si trovano sul piano galattico; un esempio tipico è costituito dalle Pleiadi (v. fig. 28). Gli ammassi aperti normalmente sono destinati a disperdersi a causa del moto di rotazione differenziale della Galassia. Abbiamo poi le associazioni OB, composte da stelle caldissime e molto massicce venute alla luce dal medesimo nucleo denso, che irradiano nello spazio grandi quantità di energia sotto forma di luce e potenti venti stellari. Le stelle degli ammassi sono piuttosto distanti le une dalle altre: si nota però che il legame gravitazionale può anche essere più forte e spesso osserviamo, fra le stelle solitarie, coppie, terne, anche famigliole di sei stelle i cui componenti sono talvolta molto vicini fra loro. In alcuni casi sono tanto vicini che se una delle stelle evolve espandendosi può gettare la propria materia sulla compagna che se ne nutre avidamente. Queste sono le cosiddette stelle simbiotiche, che presentano un vastissimo campionario di fenomeni a seconda degli stadi evolutivi. Da ricordare sono anche i fenomeni di nova, legati al trasferimento veloce di materia, che provoca esplosioni che si manifestano come aumenti improvvisi di luminosità. Esaminiamo più in dettaglio un esempio di questi processi: se una compagna della nana bianca subisce un'espansione, quest'ultima può strapparle parte del gas che si viene a trovare nel lobo di Roche del sistema. Se il tasso di trasferimento della materia è basso, si forma intorno al nucleo un involucro in cui l'idrogeno brucia, probabilmente in maniera instabile: esso perciò viene espulso con un'esplosione provocando un brusco innalzamento della luminosità detto *nova*. Se invece il trasferimento di materia è più veloce si forma un guscio in cui idrogeno ed elio bruciano, producendo materia che si aggiunge a quella già presente sulla nana bianca. Quando la massa finale supera le 1,44 masse solari (il limite di Chandrasekhar), la materia degenere si riscalda fino ad innescare la fusione del carbonio che però, date le particolari condizioni fisiche, si trasforma in un fenomeno esplosivo che distrugge completamente la stella in un'esplosione di supernova. Più eclatante è il caso che si verifica quando due nane bianche praticamente si fondono, all'origine di esplosioni di supernova ancor più energetiche di quelle precedentemente descritte nella sezione sulle stelle massicce, e dalle quali

non rimane alcun residuo centrale (SN di tipo I). Questo fenomeno produce una grande quantità di elementi pesanti, in particolare la luminosità ottica è prodotta nel guscio in espansione grazie al decadimento dei fotoni gamma prodotti dal decadimento $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ (la prima reazione ha un tempo di dimezzamento di 6,1 giorni, la seconda di 71 giorni). Dopo un mese i fotoni gamma possono sfuggire, ed altre fonti di energia, come l'interazione di positroni prodotti dai decadimenti radioattivi con il gas, danno origine alla coda di luminosità osservata.



Fig. 28. L'ammasso aperto delle Pleiadi ripreso con il telescopio da 200 mm dell'Osservatorio Reticus).

CONCLUSIONI

Lo studio dell'evoluzione stellare è un campo ormai consolidato e in cui sono stati raggiunti eclatanti risultati da quando nel 1969 Kippenham fece girare i primi codici FORTRAN sui computer a schede perforate. Rimangono però molti punti oscuri, riguardanti ad esempio le proprietà del trasporto convettivo e la diffusione di metalli negli interni stellari. Una gran quantità di studi è incentrata sull'evoluzione di stelle nella fase post-AGB, per cui le tracce evolutive sono al momento tutt'altro che soddisfacenti. Il grande interesse per il settore in questi anni è giustificato dalla volontà di prevedere l'evoluzione degli spettri delle galassie in base all'evoluzione della popolazione stellare: si può in questo modo risalire alla storia della formazione stellare nelle galassie e capire così i meccanismi alla base della nascita dell'universo come noi lo vediamo.

BIBLIOGRAFIA

- Hans Bethe e Gerald Brown. *Le Scienze*, 203, 70-79 (1985).
- Alessandro Bressan, Cesare Chiosi e Franco Fagotto. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 94, 63, (1994).
- Gustavo Bruzual e Stephane Charlot. *Astrophys. J.*, **405**, 538-553 (1993).
- Cesare Chiosi. *Dispense del corso di astrofisica teorica* (Univ. di Padova, Padova, 1998).
- Francesca D'Antona e Italo Mazzitelli, in *The astronomy and astrophysics encyclopedia*. (a cura di Stephen Maran), 837-839 (Van Nostrand e Cambr. Univ. Press, New York e Cambridge [UK], 1992).
- Alexei Filippenko. *Sky Telesc.*, **86**, 6, 30-36 (1993).
- Michel Fioc e Brigitte Rocca-Volmerange. *Astron. Astrophys.*, **326**, 950-962 (1997).
- Giovanni Godoli. *Il Sole*, Torino, Einaudi, 1982.
- Robert Harkness e Craig Wheeler. *Classification of supernovae* (Austin, 1993 [Preprint]).
- Icko Iben. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **76**, 55-114 (1991).
- James B. Kaler. *Stelle*, Bologna, Zanichelli, 1995.
- Rudolf Kippenhahn e Alfred Weigert. *Stellar structure and evolution* (Springler-Verlag, Berlino, 1990).
- Jean Pierre Luminet. *I buchi neri*, Firenze, Nardi, 1992.
- Ken'ichi Nomoto. in *The astronomy and astrophysics encyclopedia*, 890-892.
- Massimo Robberto. *L'Astronomia*, 170, 14-24 (1996).
- Noam Soker. *Le Scienze*, 287, 34-42 (1992).
- Steven Stahler. *Le Scienze*, 277, 28-36 (1991).
- Volker Weidemann. in *The astronomy and astrophysics encyclopedia*, 835-837.
- Achim Weiss e James Truran. in *The astronomy and astrophysics encyclopedia*, 839-842.
- Craig Wheeler. in *The astronomy and astrophysics encyclopedia*, 887-890.
- Stan Woosley e Tom Weaver. *Le Scienze*, 254, 20-29 (1989).
- <http://soho.nascom.nasa.gov/>
- <http://www.astro.uiuc.edu/~kaler/sow/sow.html>
- <http://casswww.ucsd.edu/public/astroed.html>
- <http://leo.astronomy.cz/sclock/sclock.html>

NOTE

(¹) $\sigma = ac/4 = 5,7 \cdot 10^{-5} \text{ erg/cm}^2/\text{K}^4/\text{s}$ con c velocità della luce.

(²) Si tratta di esemplificare la distribuzione statistica degli elettroni e quindi il concetto di sequenza temporale da noi usato non ha alcun significato fisico.

(³) Il grado di opacità dipende essenzialmente da pressione e temperatura del plasma; i moti convettivi si instaurano ogniqualvolta la radiazione prodotta negli strati interni non riesce ad essere trasportata per radiazione.

(⁴) Nel caso dei buchi neri non possiamo definire uno stato per la materia al suo interno perché ogni informazione che venga da regioni al di là dell'orizzonte degli eventi non è accessibile. Possiamo solo vedere gli effetti sulla curvatura dello spazio tempo e misurarli con un parametro che definiamo massa.

LA NATURA DELL'UNIVERSO

DI FABIO FONTANA

INTRODUZIONE

In questo articolo esamineremo come l'uomo abbia ampliato la propria comprensione della vera natura dell'universo in cui vive. Rispetto alle prime idee che si era fatto sull'origine dell'universo sono stati compiuti dei progressi notevoli e forse entro una ventina d'anni potremo avere la certezza di avere una visione completa della natura di quello che ci circonda.

I modelli che descriverò sono quelli che godono del consenso della maggior parte degli scienziati ma non possono ancora essere considerati definitivi. Nella mia descrizione cercherò di non utilizzare un linguaggio troppo specialistico e formale ma cercherò di accostare il più possibile i fenomeni descritti ad altri che sono più vicini alla nostra esperienza quotidiana. In questo modo pur non esprimendo i concetti in maniera rigorosa si potrà avere un'immagine più intuitiva che ne faciliterà la comprensione. Vedremo le teorie che spiegano la nascita, l'evoluzione e la morte dell'Universo. A questo riguardo voglio sottolineare che il compito della scienza è quello di spiegare come sia avvenuta la creazione e non il perché. Quest'ultimo obiettivo rimane campo esclusivo della metafisica, della teologia e della filosofia.

LA PROPAGAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE

La luce, i raggi X, i raggi gamma, le onde radio, sono sostanzialmente la stessa cosa e vengono dette onde elettromagnetiche. Queste si differenziano per la diversa frequenza di oscillazione del fotone che è la particella che le trasmette. Ora vedremo in che modo gli astronomi hanno la possibilità di verificare le condizioni dell'Universo nel passato. Nel 1675 l'astronomo olandese Ole Christensen Roemer osservando le eclissi dei satelliti di Giove notò degli scostamenti temporali tra le previsioni teoriche e la realtà. Successivamente egli notò che questi ritardi variavano proporzionalmente alla distanza relativa tra la Terra e Giove; da questo dedusse che la velocità di propagazione della luce doveva essere finita. Le misurazioni dell'epoca della distanza Terra-Giove erano abbastanza imprecise ed è per questo motivo che Roemer stimò il valore della velocità della luce in 225 000 Km/s.

Solo nel 1865 il fisico britannico James Clerk Maxwell riuscì ad unire le teorie parziali che descrivevano l'elettricità e il magnetismo e dimostrò teoricamente che le onde elettromagnetiche dovevano propagarsi ad una certa velocità finita.

Nel 1887 due fisici, Albert Michelson ed Edward Morley, eseguirono un esperimento molto accurato confrontando la velocità della luce nella direzione del moto della Terra con quella ad angoli retti rispetto a tale moto. Con loro grande sorpresa trovarono che la velocità nelle due direzioni era esattamente la stessa.

Nel 1905 Albert Einstein propose la Teoria della Relatività Speciale con cui dava la dimostrazione teorica che nulla può muoversi a velocità superiori a quella della luce. Egli, con la sua famosa formula di equivalenza tra massa ed energia $E = mc^2$, affermava tra l'altro che l'energia che un oggetto ha in conseguenza del suo movimento andrà a sommarsi alla sua massa rendendo sempre più difficile aumentarne la velocità. All'approssimarsi della velocità della luce l'oggetto aumenta sempre più rapidamente la sua massa cosicché per accrescere la sua velocità si richiederà una quantità di energia sempre maggiore. Nessun oggetto potrà mai raggiungere la velocità della luce perché a questo punto la sua massa diventerebbe infinita, quindi occorrerebbe una quantità infinita di energia per raggiungere tale velocità. Inoltre questa rimane costante a prescindere dal moto della sorgente emittente.

Il valore della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto è leggermente inferiore a 300 000 km/s. Per questo motivo la luce che proviene dal Sole viene percepita sulla Terra circa 8 minuti dopo la sua emissione, quindi possiamo vedere la nostra stella come si presentava 8 minuti prima della nostra osservazione. Allo stesso modo vediamo Alfa Centauri, la stella più vicina al nostro sistema solare, come si presentava 4 anni fa. Così, più un oggetto è lontano da noi e più lo vediamo distante nel passato. In questa maniera più riusciamo a scorgere oggetti lontani più possiamo risalire nel tempo verso le origini dell'Universo.

LE DISTANZE ASTRONOMICHE

Il sistema più antico per stabilire la distanza di un astro è quello della parallasse. Gli astronomi, sfruttando il moto orbitale della Terra, misurano lo spostamento apparente delle stelle ricavandone la distanza (fig. 29). Un esempio intuitivo di tale sistema è il seguente: se osserviamo da un finestrino laterale di un'automobile noteremo che gli alberi vicini sembra-

no spostarsi molto velocemente mentre quelli lontani risultano molto più lenti. Utilizzando delle formule trigonometriche ed eseguendo delle misurazioni precise si può risalire alla lontananza degli oggetti. Per tutti gli altri sistemi di determinazione delle distanze si usa il confronto tra luminosità apparente e luminosità assoluta. Prendiamo in esame l'esempio seguente: se veniamo illuminati da una lampadina posta a breve distanza la vedremo molto luminosa e più questa verrà allontanata da noi più la sua luminosità apparente tenderà a calare. Ora, se ne conosciamo la luminosità assoluta, potremo facilmente calcolarne la distanza. Se la lampada è contenuta all'interno di una casa possiamo presumere ragionevolmente che quest'ultima si trovi alla stessa distanza della fonte luminosa. Analogamente gli astronomi stimando la distanza di una stella possono desumere quella della galassia che la contiene.

Notevole fu il lavoro di William Herschel, che cercò di determinare la distanza delle stelle nella speranza di individuare la struttura della nostra galassia. La sua idea era la seguente: se tutte le stelle hanno lo stesso splendore intrinseco, dalla loro luminosità apparente si può risalire alla distanza. Infatti, quanto più debole risulta l'oggetto, tanto più lontana sarà la sua posizione rispetto a noi. Oggi sappiamo che l'ipotesi non è corretta perché le stelle hanno luminosità intrinseche che variano su valori molto ampi.

Attualmente vengono utilizzati degli astri, i cosiddetti indicatori, che possiedono una relazione che lega la loro luminosità assoluta a qualche altro parametro fisico osservabile. Gli oggetti indicatori di distanza possono essere divisi in tre categorie: gli indicatori terziari si basano sulle stime dei secondari e questi su quelle dei primari.

INDICATORI PRIMARI: sono costituiti da quattro classi di stelle che possiedono una luminosità assoluta determinata. Le variabili RR Lyrae sono stelle vecchie con una massa paragonabile a quella del Sole che grazie alla loro luminosità intrinseca consentono di stimare distanze fino a 300 000 anni luce. Le novae sono stelle variabili esplosive che aumentano la loro luminosità da un fattore 10 000 a 100 000. Dalle caratteristiche del declino della radiazione emessa dopo l'esplosione si può calcolarne la luminosità assoluta e quindi la distanza che può essere stimata fino a 3 milioni di anni luce. Le variabili cefeidi presentano una relazione tra luminosità assoluta, periodo di variazione luminosa e colore. Queste consentono di stimare distanze fino a 26 milioni di anni luce. Le supernovae raggiungono luminosità assolute molto elevate e quindi possono essere osservate anche a grande distanza. Queste possono essere di tipo I (che sono le

più brillanti e si distinguono per la rapida riduzione di radiazione emessa dopo l'esplosione) o di tipo II che sono circa due volte meno intense delle precedenti. Le supernovae, che raggiungono durante l'esplosione la luminosità di una galassia, permettono stime fino a circa 3 miliardi di anni luce e costituiscono gli indicatori che consentono di valutare la distanza di un oggetto con una precisione migliore rispetto a tutti gli altri. Il problema principale che presentano è quello di esplodere in una galassia una volta ogni 30 anni e quindi, per conoscere con precisione la distanza di una determinata galassia, sono necessarie osservazioni prolungate. Per questo motivo esse vengono utilizzate principalmente per la calibrazione di altri metodi (in particolare quello del *red-shift*).

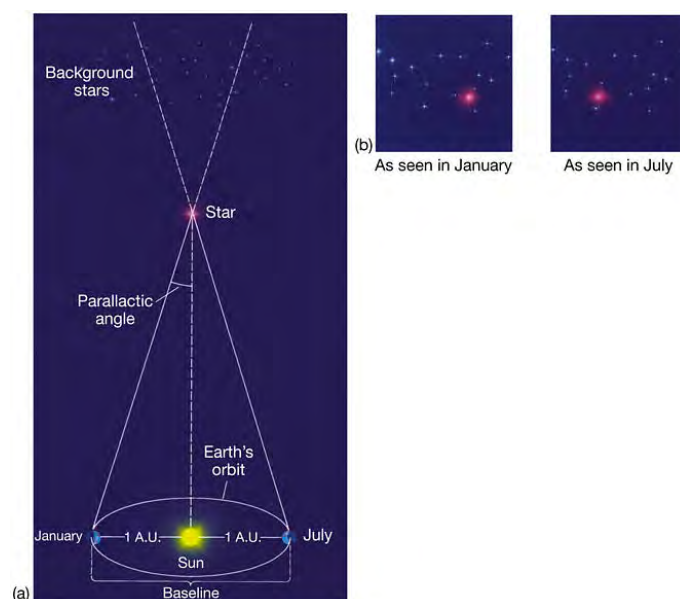


Fig. 29. Metodo della parallasse per trovare la distanza delle stelle vicine. Queste appariranno spostate rispetto a quelle lontane a causa della differenza di posizione dell'osservatore in due punti opposti dell'orbita terrestre (da Pearson Prentice Hall, Inc.).

INDICATORI SECONDARI: le stelle più luminose rosse e blu vengono considerate di una magnitudine intrinseca uguale per ogni sistema stellare. Le regioni di idrogeno due volte ionizzato (HII) presentano una relazione tra luminosità e dimensioni. Il metodo di Tully-Fisher si basa sulla relazione (scoperta nel 1977) tra luminosità e larghezza della riga di emissione a 21 cm dell'idrogeno neutro. Gli ammassi globulari più luminosi che sono situati intorno ad una galassia forniscono stime di distanza di scarsa precisione, quindi questo sistema non viene più utilizzato. La stima della loro distanza è eseguita desumendo una magnitudine assoluta uguale per gli ammassi più luminosi di ogni galassia.

INDICATORI TERZIARI: la classe di luminosità

stabilisce un rapporto tra morfologia delle galassie a spirale di tipo Sc e luminosità assoluta. Le galassie più brillanti di un ammasso consentono di stimare distanze fino a 300 milioni di anni luce supponendo che gli oggetti più luminosi di ognuno di questi possiedano lo stesso splendore intrinseco. Per stimare distanze su grande scala viene utilizzato un fenomeno fisico scoperto verso l'inizio del 1800 dal fisico austriaco Christian Doppler. Questo effetto è comune a tutti i tipi d'onda. Consideriamo per esempio le onde del mare: supponiamo di essere fermi con una barca al largo che oscilla al ritmo delle onde stesse e chiamiamo frequenza tale ritmo. Mettiamo ora in moto la barca e dirigiamoci, ad una certa velocità, contro la direzione da cui provengono le onde: in questo caso la barca sobbalzerà ad un ritmo più elevato perché incontrerà più onde nello stesso intervallo di tempo. Con diverso linguaggio diremo che la barca oscilla ad una frequenza maggiore. L'opposto accadrà quando la barca viene diretta nello stesso verso del moto ondoso, si avrà una frequenza di oscillazione più bassa.

Questo discorso è valido anche per le onde sonore ed è per questo motivo che ascoltando il rumore emesso da un'auto che viaggia a forte velocità percepiremo un suono più acuto mentre questa si avvicina e di tonalità più bassa quando si allontana. Se ora analizziamo il caso della radiazione elettromagnetica noteremo che la situazione risulta la medesima. Se un ipotetico motociclista vestito di bianco ci si avvicina a velocità prossime a quella della luce lo vedremo di colore tendente al blu per l'aumento della frequenza della radiazione emessa e quando si allontana lo vedremo con una tonalità tendente al rosso.

Per stimare distanze su grande scala si utilizza la legge di Hubble. Negli anni Dieci e Venti vari astronomi scoprirono indipendentemente che nello spettro di una galassia le righe risultavano spostate di un certo valore verso il rosso (*red-shift*), arrivando alla conclusione che la fonte emittente era in fase di allontanamento da noi. L'astronomo americano Edwin Hubble dimostrò che questo spostamento era dovuto al moto di espansione dell'universo. Nel 1929 Hubble enunciò una relazione che lega la velocità di allontanamento del corpo osservato, v , con la sua distanza, d , attraverso una costante, H_0 , chiamata costante di Hubble:

$$v = H_0 d.$$

Così, conoscendo il *red-shift* di un oggetto, si potrà stimarne la distanza. Il problema in questo caso è quello di conoscere con precisione la distanza di una galassia e di misurare lo spostamento verso il rosso

delle righe del suo spettro. Hubble però non riuscì a stimare con grande precisione il valore della costante di recessione inserita nella sua legge. Conoscendo questo valore possiamo, in base a quanto detto prima a proposito della velocità della luce, fare una stima sull'età dell'Universo che è compresa tra 10 miliardi di anni per $H_0=100$ e 20 miliardi di anni per $H_0=50$ (H_0 è espressa in km/s per milione di parsec, e un parsec è uguale a 3,26 anni luce).

È possibile conoscere il valore della costante misurando indipendentemente la velocità di recessione di un oggetto extragalattico e la sua distanza utilizzando qualcuno dei metodi citati sopra. Attualmente le stime effettuate con i vari sistemi non raggiungono ancora un accordo soddisfacente e differiscono ancora per un valore due. La tecnica basata sulle supernovae di tipo Ia fornisce risultati fra i 45 e i 60 km/s x Mpc, sostanzialmente in accordo con il valore trovato dal Telescopio Spaziale utilizzando gli ammassi globulari della galassia NGC 4881 nell'ammasso della Chioma di Berenice e con altri metodi; i risultati più recenti ottenuti usando la tecnica basata sulle cefeidi, utilizzando sempre lo Space Telescope, parlano di un valore compreso fra 69 e 80 km/s x Mpc, sostanzialmente in accordo con quelli derivanti dall'impiego della relazione di Tully-Fischer e del confronto fra morfologia e luminosità assoluta delle galassie.

LA SCOPERTA DELL'UNIVERSO EXTRAGALATTICO

Nel 1845 lord Rosse, un conte irlandese, aveva costruito a sue spese un telescopio molto grande per l'epoca. Questo era dotato di una montatura grossolana che gli consentiva un puntamento molto approssimativo. Per superare questo ostacolo tecnico egli puntava il suo strumento in una data direzione e successivamente tenendolo immobile attendeva che gli oggetti, grazie alla rotazione terrestre, passassero all'interno del campo visivo. Durante una delle sue osservazioni vide un oggetto (fig. 30) che era stato scoperto nel 1773 da Charles Messier che lo aveva scorto come una pallida nebulosa. Il conte irlandese grazie al suo strumento ne evidenziò la forma a spirale. Già allora taluni pensarono che tale oggetto fosse un enorme e remoto sistema stellare analogo al nostro, tuttavia passarono diversi decenni prima che questa ipotesi venisse confermata.

All'epoca si riteneva che l'universo fosse infinito, uniforme e più si aumentava la potenza strumentale più sarebbe aumentato il numero degli oggetti osservabili. Soltanto nel 1924, dopo l'entrata in funzione del telescopio di monte Wilson, dotato di uno

specchio del diametro di 2,54 metri, vennero fatti sostanziali progressi nella comprensione della struttura dell'universo.



Fig. 30. La galassia M 51, la prima nella quale fu evidenziata la forma a spirale, in una bellissima immagine dell'astrofilo americano George Greaney.

LA NOSTRA POSIZIONE NELL'UNIVERSO

Grazie alle tecniche descritte in precedenza gli astronomi sono riusciti a dedurre la nostra posizione nell'universo. Questa è conosciuta con un basso grado di precisione su larga scala ma ci consente di stabilire che siamo situati in una zona molto comune. Ci troviamo nella periferia della nostra Galassia, la Via Lattea, in un sito abbastanza povero di stelle. La Via Lattea è composta da circa 500 miliardi di stelle, ha un asse maggiore di 100 000 anni luce ed un asse minore di circa 30 000 anni luce. La morfologia reale può essere ricostruita solo con i radiotelescopi e con metodi indiretti in quanto le nubi di polvere che sono interposte tra la Terra e la gran parte della Galassia ci occulta la vista alla lunghezza d'onda visibile (fig. 31).

Per osservare il nucleo galattico è anche possibile usare frequenze maggiori rispetto a quelle ottiche che essendo più energetiche riescono ad attraversare le nubi interposte. Per capire come ciò avviene si può prendere in considerazione l'esempio seguente: se

interponiamo una mano tra l'antenna di una radio e la sorgente emittente non avremo alcun problema di ricezione mentre, se l'illuminiamo con una torcia elettrica, la luce emessa sarà completamente assorbita. Nel caso di un'emissione di raggi X, che sono più energetici di quelli della luce visibile, la radiazione attraversa senza ostacoli gli strati esterni della mano e viene assorbita esclusivamente dalle ossa. Se una sorgente emette raggi gamma questi attraverseranno completamente il corpo interposto. Allo stesso modo per vedere la morfologia di gran parte della galassia si deve osservare nelle onde radio o rilevare le emissioni di raggi X e gamma.

Allontanandoci dalla Via Lattea troviamo la Grande Nube di Magellano che è una galassia nana situata a circa 160 000 anni luce da noi. La grande forza di gravità della nostra galassia la sta catturando e in un futuro molto lontano verrà inglobata all'interno della nostra. La Piccola Nube di Magellano è un'altra galassia satellite della Via Lattea ed è leggermente più lontana della precedente essendo distante da noi circa 200 000 anni luce. Anche in questo caso si presume che, forse tra due miliardi di anni, verrà inglobata all'interno della nostra. Da stime recenti pare che ci sia una terza galassia nana ancora più lontana e sovrapposta alla Piccola Nube di Magellano.

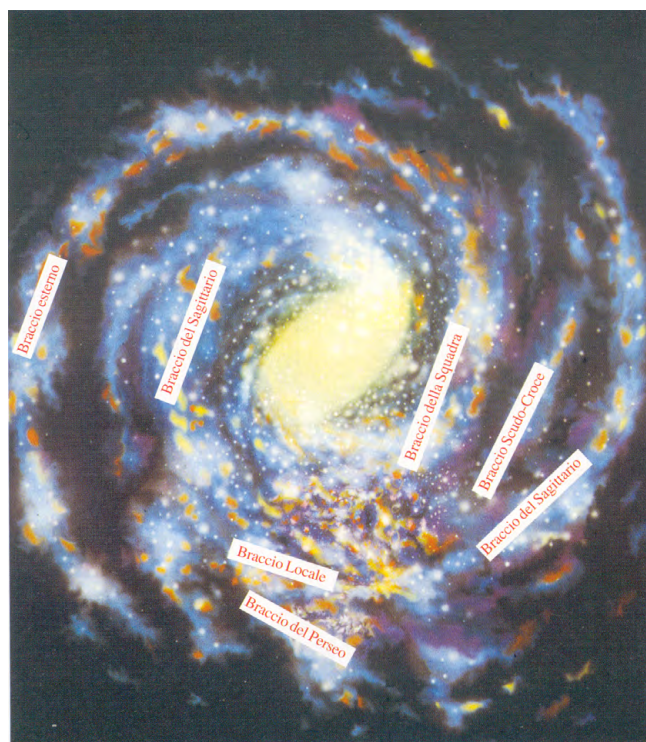


Fig. 31. L'aspetto della Via Lattea ricostruito in base all'apporto di diversi tracciatori, idrogeno neutro, nubi molecolari, nebulose, associazioni stellari (da Vanin. Astronomia Viva).

Andando ancora più lontano arriviamo ai confini del Gruppo Locale che è formato da una trentina di

galassie per lo più nane ed è esteso per circa cinque milioni di anni luce. Procedendo su scala sempre più ampia troviamo che il Gruppo Locale fa parte di un superammasso galattico composto da una quantità enorme di oggetti. Questo si chiama Superammasso Locale, è composto da una trentina di ammassi di galassie e il centro gravitazionale è situato nel sistema della Vergine che contiene la maggior parte della massa dell'intera struttura. Su larghissima scala la materia si dispone in filamenti posti all'estremità di bolle immense di spazio vuoto (fig. 32).

LE TEORIE COSMOLOGICHE

Storicamente, le teorie cosmologiche più accreditate sono state due, quella dello Stato Stazionario e quella del Big-Bang (fig. 33). La Cosmologia dello Stato Stazionario venne formulata dal fisico inglese Fred Hoyle e altri nel 1946 e successivamente fu abbandonata. Negli anni Novanta essa è stata riproposta, da Hoyle stesso, Burbidge e Narlikar, con delle profonde variazioni rispetto alla stesura iniziale; anche il nome è mutato: Cosmologia dello Stato Quasi Stazionario. Secondo la teoria originaria, non ci sarebbe mai stata un'esplosione primordiale e l'espansione dell'universo dovrebbe essere eterna. La creazione di materia sarebbe continua e bilancerebbe l'espansione mantenendo una densità costante. Questa teoria si fonda sul Principio Cosmologico Perfetto che stabilisce che, a grande scala, l'universo mantiene il medesimo aspetto, sia nel tempo che nello spazio. Per questo motivo ammette una creazione continua data da piccole esplosioni in cui viene generata la materia.

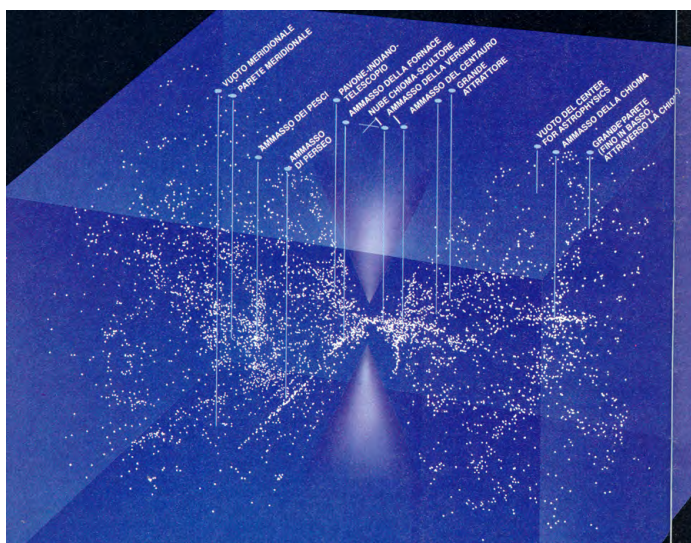


Fig. 32. La distribuzione irregolare delle galassie a grandissima scala: lo spazio rappresentato ha circa 150 megaparsec di raggio (da Le Scienze).

La teoria del Big-Bang è stata formulata nel 1948 ed è quasi unanimemente accettata dalla comunità scientifica. Ora vedremo in dettaglio, secondo questa teoria, come è nato l'universo, come si evolve e quale sarà la sua fine. La materia come il tempo non possono essere divisi infinitamente trovando unità sempre più piccole ma esistono dei limiti oltre i quali non ci si può spingere. L'unità spaziale più piccola misura 10^{-33} cm ed è detta lunghezza di Plank. La luce impiega esattamente 10^{-33} secondi per percorrere tale distanza e questa è l'unità fondamentale del tempo. A queste scale spazio-temporali sono presenti delle fluttuazioni quantiche in cui per brevissimi istanti si creano spontaneamente delle particelle per poi scomparire nuovamente. Attualmente non siamo in grado di descrivere l'universo dal tempo 0 al tempo 10^{-43} secondi perché non abbiamo ancora una teoria che leghi coerentemente la meccanica quantistica e la teoria della relatività. Per questo motivo inizieremo a descrivere la nascita dell'Universo quando questo aveva una dimensione di 10^{-33} cm e un tempo di 10^{-43} secondi; infatti, per limiti inferiori, non ha più senso parlare di spazio-tempo.

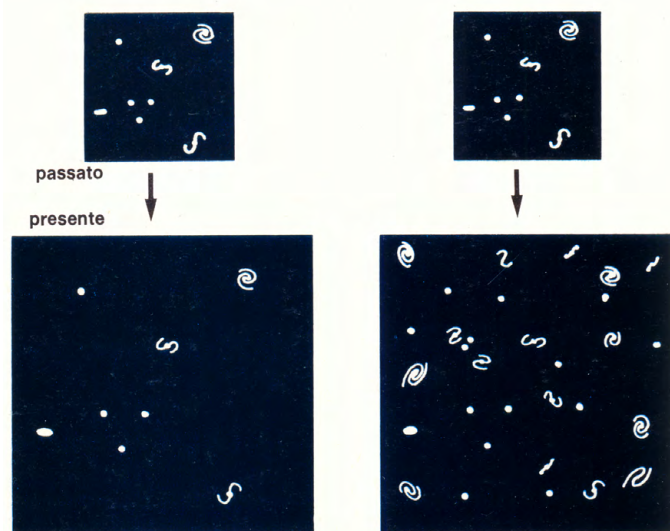


Fig. 33. Nello Stato Stazionario l'universo mantiene sempre lo stesso aspetto nel tempo (a destra), nella Cosmologia del Big Bang (a sinistra) l'universo evolve e si diluisce nel tempo (da Astronomia, Curcio).

Per effetto di uno stato di eccitazione delle particelle subatomiche presenti entro il volume precedentemente descritto, il valore della pressione interna di questa «sfera» fornì l'energia necessaria per l'espansione dell'Universo. Le quattro interazioni fondamentali erano unite in un'unica forza e si separarono solo quando l'Universo raggiunse una temperatura più bassa rispetto a quella presente in quell'istante iniziale. Le forze fondamentali presenti in natura sono le seguenti:

l'**interazione gravitazionale** che è di gran lunga la più debole ma la sua forza si somma sempre, ha un lungo raggio d'azione e la particella che la trasmette è il gravitone che attualmente non è ancora stata osservata;

l'**interazione nucleare forte** che opera su scale molto ridotte e mantiene la coesione del nucleo atomico. Le particelle che la trasmettono sono il pione e il gluone;

l'**interazione elettrodebole** che opera su scale ridotte e agisce sui leptoni (elettrone e positrone). La particella che la trasmette è contrassegnata dalla lettera W;

l'**interazione elettromagnetica** che ha un grande raggio d'azione ed è trasmessa dal fotone.

Al tempo di Plank si ha la separazione della forza di gravità dalle altre tre interazioni fondamentali, la densità dell'universo è di 10^{94} g/cm³ e la temperatura è di 10^{32} gradi Kelvin. A 10^{-36} secondi l'interazione nucleare forte si separa dalle altre. Questa è quella che mantiene la coesione dei nuclei atomici che però in questo istante non esistono ancora. Ora inizia una fase molto importante per ottenere un universo come noi lo osserviamo attualmente, la cosiddetta fase inflattiva. L'universo inizia ad espandersi in maniera esponenziale raddoppiando le sue dimensioni ogni 10^{-35} secondi. Con questa rapida espansione si possono spiegare le seguenti caratteristiche:

- 1) l'attuale uniformità dell'universo visibile.
- 2) l'attuale velocità di espansione che senza questa fase avrebbe fatto collassare l'Universo su se stesso.
- 3) il rapporto tra la forza repulsiva iniziale e la forza gravitazionale che ha una precisione di una parte su 10^{60} .
- 4) l'assenza di rotazione dell'universo. Come una pattinatrice quando ruota su se stessa allargando le braccia rallenta la sua velocità di rotazione, così l'Universo ha bloccato il suo moto rotatorio.

A 10^{-32} secondi si ha un brusco rallentamento dell'espansione dovuto ad una transizione di fase. Nella fase inflattiva l'universo si è raffreddato molto rapidamente scendendo sotto la temperatura critica di 2 milioni di gradi Kelvin e questo porta alla cosiddetta «nucleazione».

Si formano all'interno dell'universo, che ora ha un diametro di 10 centimetri, delle «bolle» che si espandono alla velocità della luce e nel cui interno si blocca la fase inflattiva. Quando i confini di queste bolle entrano in contatto tra loro l'energia che viene liberata alza nuovamente la temperatura media dell'Universo che rallenta lentamente la sua espansione grazie alla forza gravitazionale. Un'analogia tra questa transizione di fase e la nostra esperienza quotidiana è la seguente: se si raffredda lentamente dell'acqua questa

scenderà sotto la sua temperatura critica che ne consente la trasformazione in ghiaccio. In seguito si formano al suo interno dei cristalli in posizioni casuali che si espandono fino a quando tutto il liquido diventa solido.

A 10^{-12} secondi si separano anche la forza elettromagnetica e quella elettro debole. Con l'abbassamento della temperatura i quark si stabilizzano e si aggregano in triplette dando origine a protoni e neutroni.

Da 1 secondo a 3 minuti cominciano a formarsi i nuclei degli atomi degli elementi leggeri come l'idrogeno, l'elio, il deuterio e il litio.

A 100 000 anni si forma la radiazione cosmica di fondo che noi oggi possiamo rilevare e che costituisce una delle prove fondamentali per convalidare la teoria del Big-Bang. In particolare la fase di rapida espansione spiega l'omogeneità osservata di questa emissione elettromagnetica.

A 300 000 anni la luce e la materia si disaccoppiano, l'universo diventa trasparente e abbastanza freddo da permettere la formazione di atomi leggeri (idrogeno, elio e litio). Ora l'universo non è più molto uniforme, ci sono zone con differente densità che favoriscono l'aggregazione della materia che costituirà gli ammassi di galassie. La materia inizia a condensarsi, a formare degli aggregati detti protogalassie e successivamente iniziano a formarsi i quasar.

LA FORMAZIONE DELLE GALASSIE

I due modelli che descrivono la formazione delle galassie non sono ancora generalmente accettati dalla comunità scientifica perché mancano ancora degli elementi che possano fare chiarezza su certi aspetti controversi.

materia calda: questo modello prevede che la materia primordiale sia dotata di una temperatura molto alta. Per ottenere il collasso gravitazionale, avendo un'energia cinetica elevata, sarebbe necessaria una grande quantità di massa. Per questo motivo si sarebbero formati prima i superammassi poi gli ammassi e così via fino alle galassie. Questo modello spiega egregiamente le forti velocità peculiari delle galassie su larga scala.

materia fredda: questo modello è quello che viene considerato più realistico e prevede il ciclo inverso di formazione. Quindi si sarebbero formate prima le galassie, poi gli ammassi ed infine i superammassi. L'incertezza tra questi due modelli è data dal fatto che non si conosce la natura della materia oscura dell'universo. Infatti quella che noi vediamo è stimata essere solo il 10% di quella esistente.

Questa categoria di oggetti venne scoperta per l'intensa emissione di onde radio e quando per la prima volta si trovò una controparte ottica, 3C 273, si notò che questa era di apparenza stellare. Il suo spettro mostrava larghe righe di emissione che apparentemente erano incompatibili con quelle degli elementi più diffusi nell'universo. Analizzando lo spettro di 3C 273 l'astronomo Schmidt notò che le righe di emissione potevano essere quelle dello spettro dell'idrogeno ma fortemente spostate verso il rosso per l'effetto Doppler. Venne calcolata la velocità di recessione che risultò essere pari a 47 000 km/s. Non poteva trattarsi di una stella perché sarebbe sfuggita alla nostra Galassia da molto tempo. Quindi l'unica alternativa plausibile era che si trattasse di una galassia molto lontana, o meglio del nucleo di una galassia lontana, e la sua velocità fosse dovuta al moto di recessione dell'Universo. Sfruttando la legge di Hubble venne stimata una distanza di 2 miliardi di anni luce. Conoscendo la distanza di 3C 273 e la sua luminosità apparente si può stimare una luminosità intrinseca circa mille volte più intensa di quella della nostra galassia.

Poiché 3C 273 variava abbastanza repentinamente di luminosità, si dedusse che non poteva essere di grande dimensione: non poteva cioè essere più grande dell'intervallo corrispondente di variazione luminosa, ovvero appena qualche mese luce. Per questo motivo gli astronomi si trovarono in difficoltà nell'escogitare un processo di conversione della massa in energia così tremendamente efficiente con così poco spazio a disposizione. Se l'energia emessa dal nucleo fosse dovuta a reazioni di fusione nucleare, come avviene nelle stelle, sarebbe necessario convertire in energia, nell'arco del tempo di vita di un quasar, stimato all'incirca in un milione di anni, circa un miliardo di masse solari. Inoltre le ipotesi di una superstella centrale o di un ammasso stellare molto compatto non rendono conto della fenomenologia osservata.

Per questo motivo l'unico «motore» plausibile poteva essere un buco nero con una massa di 100 milioni di volte quella solare e con un diametro pari a due volte quello dell'orbita terrestre (300 milioni di chilometri). Questo può produrre energia con un'efficienza circa 40 volte maggiore rispetto alla fusione nucleare e quindi comporta anche una necessità notevolmente minore di materia. In questo caso la radiazione luminosa non viene emessa direttamente dal buco nero in quanto quest'ultimo ha la proprietà di assorbire qualsiasi forma di energia ma è data dalla materia che viene assorbita. L'energia irraggiata di-

pende fortemente dal modo in cui questa precipita all'interno del buco nero. Nel caso di un accrescimento sferico la quantità di radiazione emessa non sarebbe molto elevata in rapporto alla massa catturata ed è per questo motivo che l'ipotesi più plausibile è quella di un disco di accrescimento. Si ritiene che questa seconda configurazione sia molto più probabile, tenendo conto del fatto che la galassia che ospita il quasar è in rotazione. Infatti anche nel caso di galassie ellittiche la rotazione non è trascurabile ed influisce sulla dinamica della materia situata nei pressi del buco nero.

Nel disco i vari strati di gas, interagendo con quelli adiacenti, perdono momento angolare a causa dell'attrito viscoso e spiraleggiando si portano lentamente verso l'interno finché, raggiunte le zone limitrofe al buco nero, la materia non trova più ostacoli e precipita in caduta libera. Il movimento radiale della materia provoca la dissipazione dell'energia gravitazionale posseduta inizialmente dal gas, provocandone un forte riscaldamento fino a temperature di parecchi milioni di gradi. Questo modello è coerente anche con la variabilità dei quasar essendo le dimensioni della fonte emittente particolarmente contenute. Perpendicolarmente al disco di accrescimento sono presenti due getti molto collimati di materia che viene espulsa a velocità relativistiche. Non si conosce con precisione quale sia la causa di questo fenomeno molto energetico ma sono state fatte varie ipotesi che devono ancora essere confermate. Quella più realistica chiama in causa dei forti campi magnetici e dei moti vorticosi nel disco di accrescimento.

In una eccezionale immagine ottenuta con il Telescopio Spaziale si è osservato nel nucleo della galassia NGC 4261 il disco di accrescimento di un buco nero di 100 milioni di masse solari. All'interno della galassia M 87, inoltre, sempre il Telescopio Spaziale ha trovato evidenza di una notevole concentrazione di massa e ha misurato velocità del gas, fino a 800 km al secondo, che si muove probabilmente all'interno di un colossale disco di accrescimento, formato attorno a un buco nero di due o tre miliardi di masse solari.

Ci sono altri tipi di oggetti che possiedono delle caratteristiche simili a quelle dei quasar, come le galassie attive e gli oggetti BL Lacertae. Si pensa che questi appartengano alla medesima categoria di astri ma siano osservati sotto un diverso angolo di prospettiva. Inoltre si ritiene che moltissime galassie abbiano nel loro nucleo un buco nero che sia momentaneamente invisibile per lo scarso apporto di materia o perché ci sia momentaneamente occultato da nubi di polvere e gas. Anche nel centro della nostra galassia si ipotizza la presenza di un buco nero momentaneamente inattivo.

LA CLASSIFICAZIONE DELLE GALASSIE

Ora vediamo come vengono classificate morfologicamente le galassie (fig. 34). Si ritiene che quelle ellittiche siano le più giovani e grazie alla loro evoluzione assumano la tipica forma a spirale, ma questa teoria non è accettata completamente. Le galassie ellittiche presentano una concentrazione di stelle che cresce gradualmente man mano che ci si avvicina al nucleo. Queste sono generalmente povere di gas e mediamente il rapporto tra asse maggiore e minore varia da 1 a 3. Le galassie lenticolari si presentano con delle caratteristiche intermedie tra le ellittiche e le spirali. Le galassie a spirale hanno tre zone caratteristiche: il bulge, che assomiglia ad una piccola galassia ellittica, l'alone, che è una struttura sferica molto meno ricca di stelle, e il disco, che ha uno spessore 10 - 20 volte inferiore al suo diametro ed essendo ricco di gas presenta un'intensa formazione stellare. Le galassie a spirale barrate si distinguono per la caratteristica barra che collega il nucleo con i punti in cui iniziano a svilupparsi i bracci.

LA MATERIA OSCURA

Si pensa che una parte significativa della materia che compone l'universo sia oscura e quindi non rilevabile utilizzando la strumentazione attuale. Nonostante questo, sfruttando le leggi che governano le interazioni gravitazionali possiamo conoscere qualche particolare sulla sua natura. La velocità di rivoluzione delle stelle attorno al centro galattico dipende dalla massa dello stesso. Quanto questa sarà maggiore, tanto più elevata sarà la velocità di rivoluzione della materia orbitante. Da misurazioni realizzate utilizzando l'effetto Doppler risulta che la velocità della materia visibile non corrisponde a quella che dovrebbe essere se questa fosse l'unica fonte di energia gravitazionale. Infatti, se così fosse, la velocità misurata dovrebbe essere massima nelle zone prossime al centro galattico e dovrebbe diminuire lentamente man mano che ci si allontana dal nucleo. Dalle osservazioni eseguite risulta invece che questa si mantiene pressoché costante fino all'estrema periferia della galassia.

Utilizzando i radiotelescopi è stata rilevata della materia che si estende per circa il doppio del diametro della galassia in luce visibile, ma anche questa non presenta una diminuzione di velocità significativa. Delle varie ipotesi formulate sulla composizione di questa massa invisibile si possono escludere le seguenti:

si può escludere che sia formata da stelle deboli

perché se fossero nelle quantità indicate dalle equazioni gravitazionali sarebbero abbastanza luminose per essere osservate;

si può escludere che sia composta da nubi di idrogeno perché la quantità di materia sarebbe troppo esigua per non essere rilevata.

Attualmente non abbiamo spiegazioni che non possano essere confutate ma quelle elencate qui di seguito sono quelle che sembrano più probabili:

materia sotto forma di piccole nubi di idrogeno collassate in nane brune che sono stelle troppo piccole per innescare reazioni termonucleari al loro interno;

materia concentrata sotto forma di buchi neri o particelle elementari dotate di piccola massa;

materia concentrata sotto forma di buchi neri collassati direttamente senza aver dato inizio a reazioni termonucleari. In questo caso dovrebbe essere rilevabile un effetto di lente gravitazionale. La cosa più probabile è che la materia oscura sia composta da tutte queste categorie che sommano i loro contributi.

LE GALASSIE INTERAGENTI

Il caso di NGC 4038 e NGC 4039, le famose «antenne», è un classico esempio di galassie interagenti (fig. 35). La loro forma è irregolare e non è possibile farle rientrare nelle categorie descritte in precedenza. Gli oggetti che presentano questo tipo di morfologia vengono detti «peculiari».

Inizialmente, per giustificare questa forma anomala venne presa in considerazione la possibile presenza di fortissimi campi magnetici che riuscissero a contenere la materia delle «antenne» nella forma osservata. Successivamente venne anche ipotizzata la presenza di un tipo di interazione non ancora conosciuto. Solo con l'utilizzo del calcolatore elettronico ci si rese conto che questa forma era dovuta solo all'interazione gravitazionale. Con un lavoro pubblicato nel 1972 i fratelli Toomre diedero una brillante spiegazione al fenomeno. Simulando al calcolatore l'incontro tra due galassie, riuscirono ad ottenere delle immagini che ricordavano quelle di molti oggetti peculiari. Inizialmente vengono impostati i valori delle masse dei due corpi e le loro velocità relative, poi si simula l'interazione e se ne controlla la morfologia da diverse angolazioni. Per eseguire queste elaborazioni si considera significativa l'interazione tra i due nuclei galattici mentre le stelle vengono considerate di massa trascurabile.

Questo procedimento, detto «metodo dei tre corpi ristretto», è attualmente eseguibile anche con un semplice personal computer.



Fig. 34. Dall'alto, una galassia ellittica, una lenticolare, una spirale normale e una spirale barrata, fotografate dal Very Large Telescope dell'ESO, da 16 m di diametro.

Si possono effettuare anche simulazioni più complesse utilizzando il «sistema degli n corpi» in cui tutti i punti rappresentativi vengono considerati di massa non trascurabile ma in questo caso la procedura risulta molto più articolata. Con entrambi questi metodi si visualizzano gli oggetti da diverse angolazioni per ottenere un'immagine che si accordi con le osservazioni.

Da questi calcoli possiamo dire che l'interazione tra NGC 4038 e NGC 4039 è iniziata circa 80 milioni di anni fa. Contrariamente a quanto si può pensare, in uno scontro tra due sistemi molto difficilmente le stelle entrano in collisione, ma grazie alla forza gravitazionale vengono «lanciate» in varie direzioni. Inoltre, più è bassa la velocità relativa tra le due galassie che collidono, maggiori saranno le deformazioni morfologiche dei corpi coinvolti.

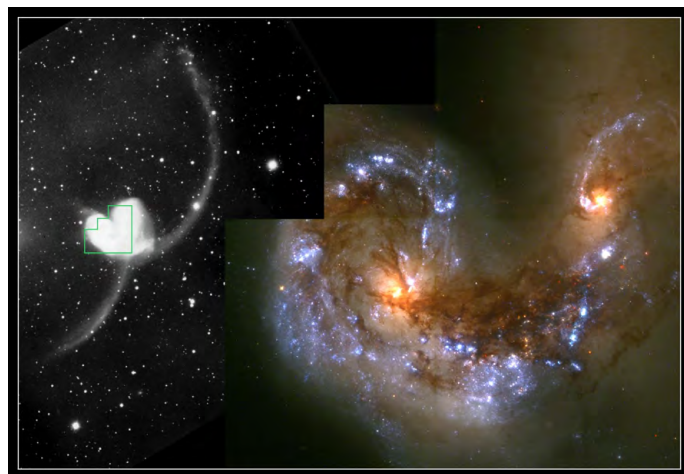


Fig. 35. In alto, le famose Antenne, esempio di galassie interagenti, nel riquadro come sono visibili in un telescopio terrestre, a destra riprese dal Telescopio Spaziale Hubble (B. Whitmore, STScI/NASA). In basso un gruppo di galassie interagenti, ripreso dal telescopio statunitense Gemini, uno dei più grandi del mondo, da 8 m di diametro, ubicato alle isole Hawaii.

LA FINE DELL'UNIVERSO

Abbiamo visto come è nato l'universo, come si è evoluto e come ci si presenta oggi. Ora vedremo cosa possiamo dire sul suo futuro e sulla sua fine. L'evoluzione futura dipende fortemente dalle condizioni iniziali del sistema (fig. 36). Possiamo prendere in considerazione tre diverse ipotesi dipendenti dal parametro «Omega» che indica il valore della densità dell'universo.

Con una densità uguale a quella critica la velocità di recessione tenderà a 0 ma non vi arriverà mai.

Se questo valore di densità è inferiore a quello critico, la forza gravitazionale della materia non sarà in grado di fermare l'espansione. Per questo motivo nei primi due casi esaminati la fine dell'universo sarà la medesima. Le stelle bruceranno lentamente il loro combustibile allontanandosi sempre più le une dalle altre. L'espansione continuerà all'infinito e l'universo diventerà buio e sempre più freddo. La materia si aggregherà formando delle enormi galassie oscure con al centro dei buchi neri con una massa di circa 1000 miliardi di volte quella del Sole. In seguito rimarranno solo questi oggetti che, secondo le teorie più recenti, dovrebbero evaporare in un tempo dell'ordine di 10^{220} anni (l'età attuale dell'universo è di circa 10^{10} anni).

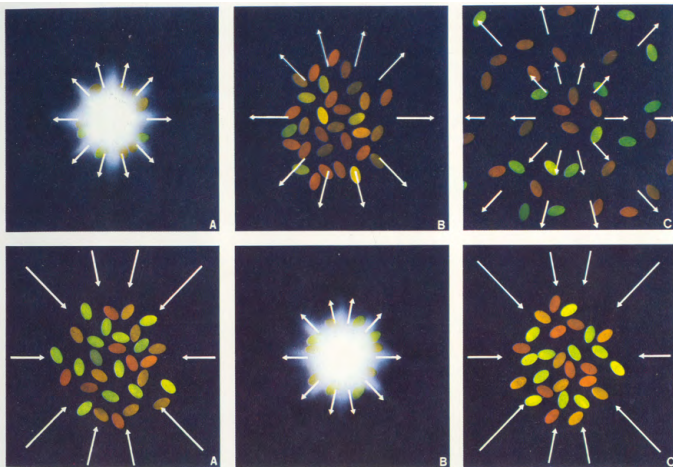


Fig. 36. A seconda di qual è la densità attuale dell'universo esso è destinato a espandersi indefinitamente (in alto), oppure a chiudersi su se stesso per poi, eventualmente, riespandersi (in basso) (da Atlante Mondadori dell'universo).

Nel terzo caso la forza di gravità esercitata dalla massa presente nell'universo rallenterà sempre più la velocità di recessione fino ad innescare un processo di inversione di moto. Non potendo misurare la densità dell'universo non possiamo dire quando si arresterà l'espansione, quindi possiamo solo fare delle ipotesi. Se questo valore è uguale al doppio di quello critico

l'universo si espanderà fino a raggiungere il doppio delle dimensioni attuali e poi comincerà a contrarsi. Saranno passati circa 100 miliardi di anni dal Big-Bang e la temperatura media sarà di 1,5 gradi Kelvin (-271,5 gradi centigradi). Quest'ultima inizierà a salire gradualmente come la densità finché tutto collasserà in una zona molto ristretta avente massa e temperatura quasi infinite. Questo scenario è conosciuto come Big Crunch ed è considerato quello più probabile. Per questo modello è prevista anche la possibilità di un universo oscillante ovvero che esploda nuovamente dopo il collasso in un nuovo Big Bang.

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. *Cosmologie a confronto*, Torino, Boringhieri, 1976.
A.A.V.V. *Cosmologia*, Le Scienze Quaderni, Milano, 1987.
AA.VV. *Quasar e buchi neri*, Le Scienze Quaderni, Milano, 1993.
John Boslough. *I signori del tempo*, Milano, Garzanti, 1995.
Massimo Capaccioli. *Il divenire dell'universo*, Roma, Curcio, 1986.
Kitty Ferguson. *Dalla Terra alle galassie*, Milano, Longanesi, 2001.
Stephen Hawking. *Dal big bang ai buchi neri*, Milano, Rizzoli, 1988.
Nigel Henbest e Heather Couper. *The guide to the galaxy*, Cambridge (UK), Cambridge University Press, 1994.
Fred Hoyle. *Galassie, nuclei e quasar*, Torino, Einaudi, 1970.
Paolo Maffei. *L'universo nel tempo*, Milano, Mondadori, Milano, 1982.
Dennis W. Sciama. *La relatività generale*, Bologna, Zanichelli, 1972.
<http://www.stsci.edu/resources/>
<http://www.slac.stanford.edu/BFROOT/>
<http://www.eso.org/welcome.html>
<http://cfa-www.harvard.edu/>
<http://www.mat.uc.pt/~sbatista>

TROVARE LA STRADA NEL CIELO

DI GABRIELE VANIN

LE COSTELLAZIONI CIRCUMPOLARI

La Stella Polare, e quindi l'Orsa Minore, si trova prolungando di cinque volte la linea che unisce Merak e Dubhe (Alfa e Beta Ursae Majoris), i cosiddetti «Indicatori dell'Orsa».

La costellazione di Cefeo si trova prolungando, dalla parte opposta, l'allineamento effettuato partendo da Merak e Dubhe per trovare la Polare: dopo un percorso lungo circa la metà di quello fra gli «Indicatori» e la stella del Nord si arriverà approssimativamente sulla punta del pentagono di Cefeo, Errai o Gamma (v. fig. 37).

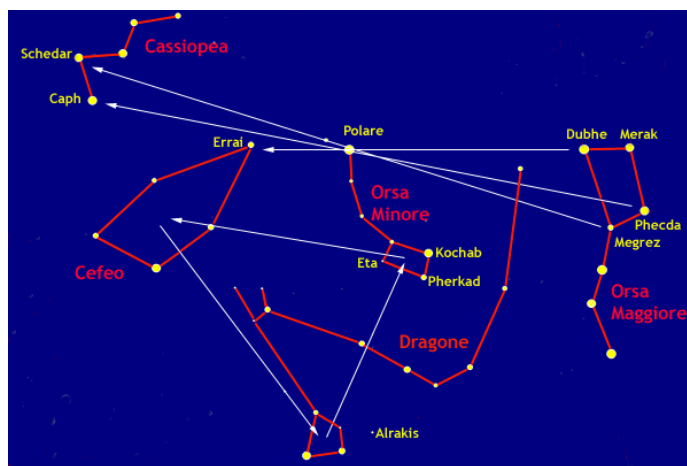


Fig. 37. Come trovare le costellazioni circumpolari. (da Vanin. Primi passi in astronomia).

Cassiopea si troverà facilmente, partendo da Megrez, Delta Ursae Majoris: tracciando una linea che passi per la Polare, la prolungheremo dalla parte opposta più o meno della stessa quantità, arrivando quasi esattamente su Alfa Cassiopeae, Schedar.

Partendo invece da Gamma Ursae Majoris (Phecda), sempre passando per la Polare, si arriva su Beta Cassiopeae (Caph). Si noti come l'Orsa Maggiore e Cassiopea girino attorno al polo come i piatti di una bilancia e quando una è alta sull'orizzonte l'altra è bassa, e viceversa.

L'altra grande costellazione circumpolare, il Dragone, non è così facile da indicare. La sua testa, però, forma approssimativamente un triangolo scaleno con il quadrilatero di Cefeo e il carro dell'Orsa Minore (i rapporti fra i lati sono grossomodo di 5, 6 e 7). Il resto della costellazione si snoda prima fra Cefeo e Orsa Minore, poi fra le due Orse.

IL CIELO PRIMAVERILE

Vediamo ora, in sintesi, alcuni altri allineamenti utili per trovare le altre principali costellazioni, cominciando con il cielo primaverile (fig. 38).

La grande costellazione del Leone si trova facilmente con due allineamenti condotti ancora dall'Orsa Maggiore. Prendendo come indicatrici Megrez e Phekda, la Delta e la Gamma Ursae Majoris, e riportando verso sud il segmento che le unisce per circa una decina di volte, arriveremo abbastanza vicino a Regolo; utilizzando invece Merak e Dubhe arriveremo all'incirca nel centro della costellazione.



Fig. 38. Come trovare le costellazioni primaverili. (da Vanin. Primi passi in astronomia).

Un altro allineamento, a partire dalle tre stelle del timone del Grande Carro, ci fa arrivare, con una curva, su Arturo nel Bifolco.

Prolungando l'allineamento, ulteriormente incurvandolo, troviamo Spica nella Vergine e, appena dopo, il quadrilatero del Corvo.

Anche l'individuazione dei Cani da Caccia non è difficile, con la stella più brillante, Cor Caroli, che forma un angolo retto con le due ultime stelle del timone del Grande Carro.

IL CIELO ESTIVO

Per il cielo estivo, occorre rintracciare innanzitutto il Triangolo Estivo, che unisce Vega, nella Lira, a Deneb, nel Cigno e ad Altair, nell'Aquila. La sua individuazione non dovrebbe di per sé porre problemi,

ma esso si può anche trovare utilizzando ancora una volta l'Orsa Maggiore, e ancora l'allineamento tra Phekda e Megrez, questa volta però dalla parte opposta a dove si trova il Leone: riportando il segmento per una quindicina di volte si arriva abbastanza vicino a Deneb (v. fig. 39).



Fig. 39. Come arrivare dall'Orsa Maggiore al Triangolo Estivo. (da Vanin. Primi passi in astronomia).

L'allineamento fra Vega e Altair conduce al centro del triangolo che individua la costellazione del Capricorno (lontano da Altair i due terzi della distanza fra le due stelle, v. fig. 40).

IL CIELO AUTUNNALE

Per il cielo autunnale conviene partire da Cassiopea. Prolungando la linea tirata da Beta ad Alfa, Caph e Schedar, per circa quattro volte, arriveremo su Gamma Andromedae, Almach, e da lì al resto della costellazione e al quadrato di Pegaso (fig. 41).

Sempre partendo da Cassiopea, prolungando di circa cinque volte l'allineamento fra la Gamma e la Delta, troveremo la Alfa Persei, Mirfak (fig. 41).

Sotto Andromeda si trovano due piccoli ma inconfondibili gruppi, Triangolo e Ariete (fig. 42). Un po' più a ovest, sotto Andromeda e Pegaso, si dipanano,

debolissime, le stelle che formano la costellazione dei Pesci. La costellazione inizia con una specie di grande e irregolare "Y" sotto Andromeda e termina con un caratteristico pentagono sotto il quadrato di Pegaso. Per finire, a sud dei Pesci troviamo la Balena.

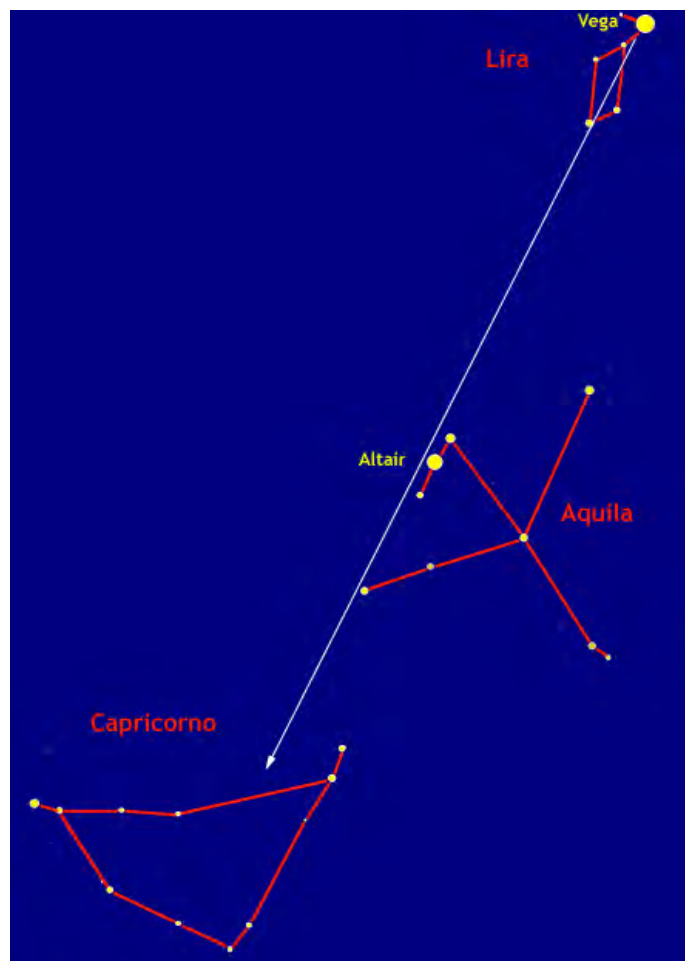


Fig. 40. Da Vega e Altair al Capricorno (da Vanin. Primi passi in astronomia).

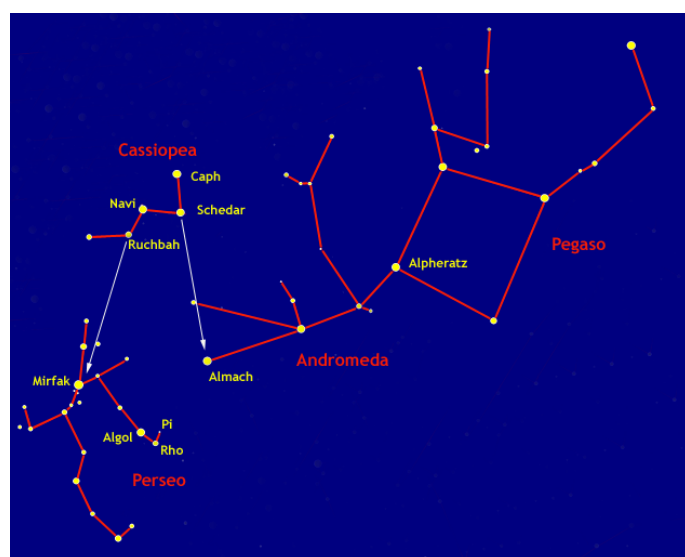


Fig. 41. Come arrivare da Cassiopea ad Andromeda, Perseo e Pegaso (da Vanin. Primi passi in astronomia).

La costellazione zodiacale autunnale dell'Acquario è facile da scoprire servendosi del Cigno (fig. 43):

prolungando per tre volte l'allineamento fra le stelle del braccio corto della cosiddetta Croce del Nord si perviene alla caratteristica "Y" che contraddistingue la costellazione.

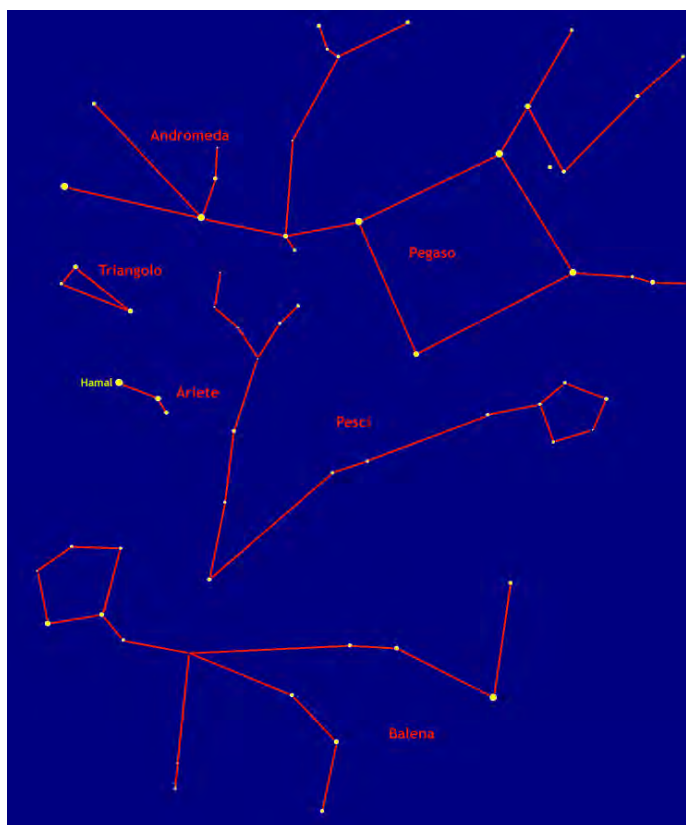


Fig. 42. Ariete, Triangolo, Pesci e Balena (da Vanin. Primi passi in astronomia).

Al di sotto dell'Acquario appare la costellazione del Pesce Australe: per trovarla si parte dal lato occidentale di Pegaso e lo si prolunga verso sud di tre volte (fig. 44).

IL CIELO INVERNALE

Per il cielo invernale, il riferimento principale è la costellazione di Orione. Questa si può trovare attraverso l'Orsa Maggiore: prolungando la linea che unisce Phekda e Merak di circa sei volte si arriva a Betelgeuse (fig. 45).

La cintura di Orione si trova proprio a metà strada fra Aldebaran e Sirio (v. fig. 46). Sotto la cintura si trova la spada, dove le viste migliori possono già, forse, intravedere la Grande Nebulosa di Orione.

Prolungando l'allineamento fra Bellatrix e Betelgeuze si arriva facilmente anche a Procione, nel Cane Minore.

L'allineamento fra Rigel e Bellatrix conduce all'Auriga, che d'altra parte si trova facilmente essendo congiunta al Toro.

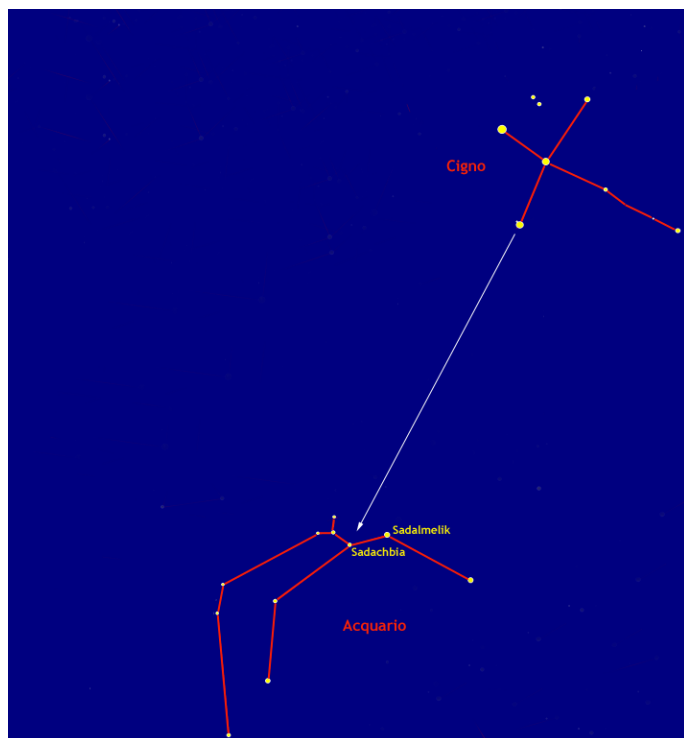


Fig. 43. Dal Cigno all'Acquario (da Vanin. Primi passi in astronomia).

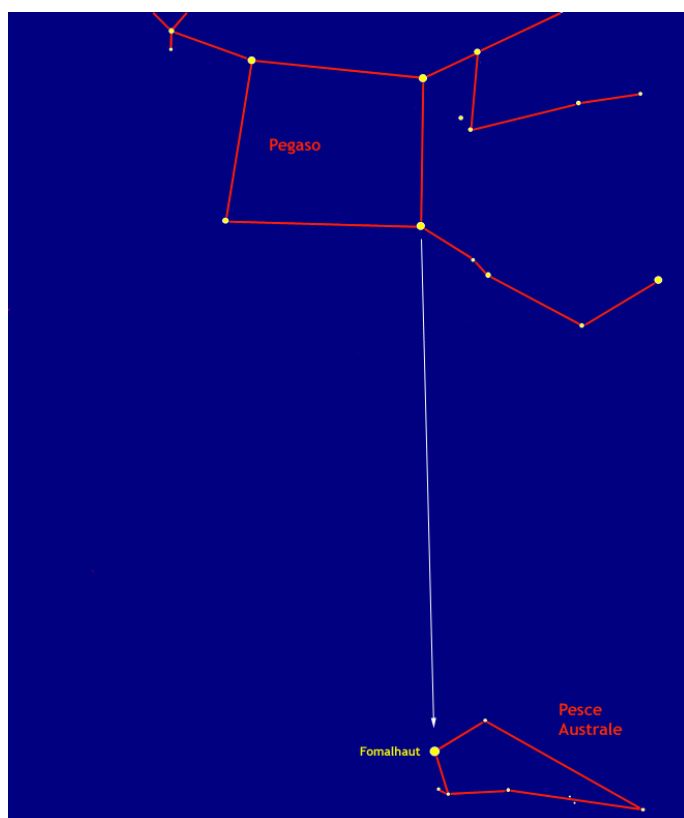


Fig. 44. Da Pegaso al Pesce Australe (da Vanin. Primi passi in astronomia).

Accanto all'ammasso delle Iadi, che formano il muso del Toro, vi sono le Pleiadi, dalla forma inconfondibile.

La linea che unisce Rigel a Betelgeuze, se prolungata verso l'alto, porta a individuare i Gemelli.

I Gemelli si trovano anche ricorrendo all'Orsa Maggiore: l'allineamento fra Megrez e Merak, se

prolungato di circa quattro volte, porta approssimativamente su Polluce (fig. 45).

Dall'Orsa Maggiore, di nuovo, si arriva anche all'Auriga, prolungando di quattro volte l'allineamento fra Megrez e Dubhe (fig. 45).

L'allineamento fra Betelgeuze e la Kappa Orionis, Saiph, può servire per rintracciare la piccola costellazione della Lepre (fig. 46).

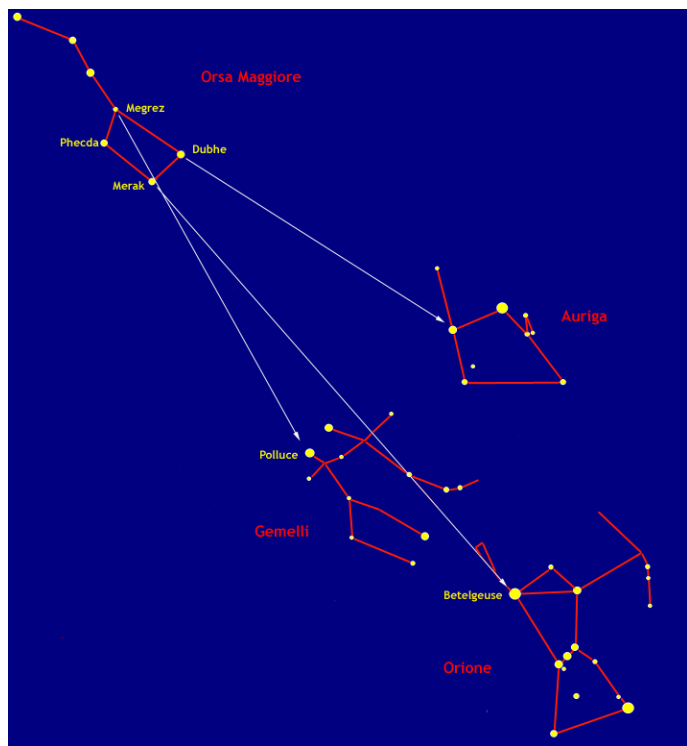


Fig. 45. Dall'Orsa Maggiore a Orione e ai Gemelli (da Vanin. Primi passi in astronomia).



Fig. 46. Come rintracciare le principali costellazioni invernali (da Vanin. Primi passi in astronomia).

Anche la «V» delle Iadi può servire da indicatrice: il braccio superiore punta verso Auriga, quello inferiore verso i Gemelli, mentre la punta della «freccia» è diretta verso la testa della costellazione autunnale della Balena che dista dalle Iadi circa quattro volte la lunghezza della freccia stessa (fig. 46).

Un'altra costellazione invernale, molto debole, il Cancro, può essere trovata utilizzando la linea che unisce la Beta (Denebola) e la Gamma (Algieba) del Leone e prolungandola verso ovest della stessa distanza che separa le due stelle: si arriva proprio in prossimità dell'ammasso del Presepe, M 44 (v. fig. 47).

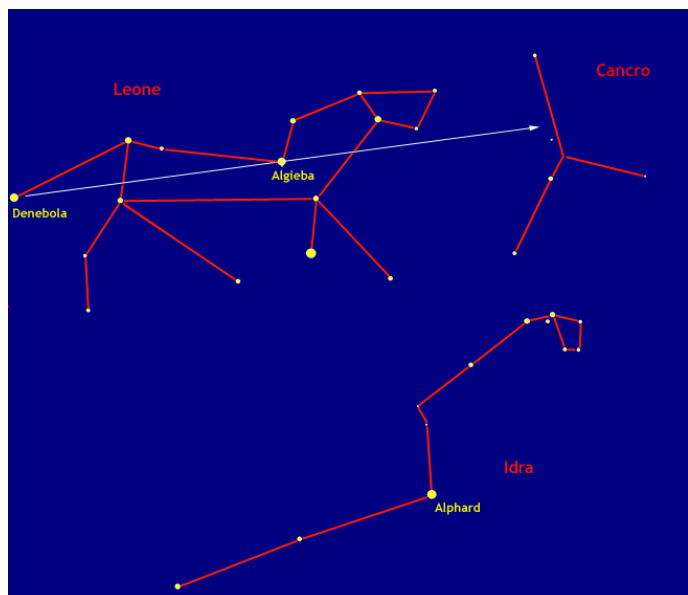


Fig. 47. Dal Leone al Cancro (da Vanin. Primi passi in astronomia).

BIBLIOGRAFIA

- Pierre Bourge e Jean Lacroux. *Il manuale pratico di astronomia*, Bologna, Zanichelli, 1987.
 Wolfgang Schroeder. *Astronomia pratica*, Milano, Longanesi, 1967.
The Sky Astronomy Software, Golden (Colorado), Software Bisque, 1992.
 Gabriele Vanin. *Primi passi in astronomia*, Sirio, Milano, 2007).
<http://server1.wikisky.org/>
<http://www.fourmilab.ch/yoursky/>

I MITI DELLE COSTELLAZIONI

DI GABRIELE VANIN

La più famosa leggenda riguardante le costellazioni è indubbiamente quella di **Andromeda** (fig. 48), che collega fra loro non meno di sei gruppi, la storia di una principessa etiope, che aveva la sola disgrazia di avere per madre una regina (**Cassiopea**) che parlava troppo, vantandosi di essere più bella delle Nereidi, le ninfe del mare. Ciò produsse la collera di Poseidone, che mandò un orribile mostro marino, (rappresentato dalla **Balena**) a devastare le coste d'Etiopia. Il padre di Andromeda, re **Cefeo**, andò dall'oracolo di Ammone per sapere che cosa doveva fare per allontanare dal paese la calamità. Dopo avergli spiegato il motivo della collera del dio, l'oracolo disse allo sconvolto sovrano che l'unico modo per far finire le devastazioni era sacrificare la figlia al mostro. Andromeda venne perciò incatenata ad uno scoglio, in attesa dell'orrenda fine. Così la trovò **Perseo**, di ritorno dall'uccisione della Medusa, la cui testa, nel profilo della costellazione, è segnata dalla posizione di Algol.



Fig. 48. Piero di Cosimo. Andromeda liberata da Perseo, 1513 circa. Firenze, Galleria degli Uffizi.

L'eroe era dotato di ali proprie (i sandali alati donatigli dalle Ninfe Stigie), e non volava quindi in groppa a **Pegaso**, come vogliono versioni probabilmente apocrife. Il cavallo alato è comunque connesso a Perseo, in quanto nacque dal sangue di Medusa, quando Perseo le tagliò la testa. Informatosi di quanto era successo e fattosi promettere in sposa la figlia da Cefeo e Cassiopea se fosse riuscito a liberarli dal mostro, Perseo abbatté l'orrenda creatura in una battaglia descritta da Ovidio con grande forza ed accenti emotivi. A malincuore, i re mantennero la promessa, mentre Andromeda, grata e riconoscente, accettò con gioia l'unione con il campione che si era già coperto di gloria in imprese precedenti. Tuttavia, Cassiopea

si rimangiò la promessa e, d'accordo con Fineo, zio e precedente fidanzato di Andromeda, complottò contro Perseo. Ma questi, scoperto l'inganno, sgominò i nemici mostrando loro la testa della Gorgone. Dopo il matrimonio, Perseo portò Andromeda in Grecia, dove divenne re di Tirinto non potendo tornare ad Argo, la sua patria, perché vi aveva ucciso accidentalmente il re, suo nonno Acrisio. Qui dovettero vivere felici e contenti, dal momento che ebbero non meno di 13 figli!



Fig. 49. François Bucher. Giove e Callisto, 1750 circa, Mosca. Museo Pushkin.

Un'altra storia famosa è quella di Callisto, una ninfa della dea della caccia Artemide (fig. 49). Zeus la vide e volle sedurla ma, poiché essa fuggiva gli uomini (le ancelle di Artemide, come la dea stessa, avevano fatto voto di castità), prese le sembianze di Artemide per possederla. Callisto, nonostante l'inganno, resistette coraggiosamente alla forza del dio ma non ci fu nulla da fare. Callisto rimase incinta e il fatto fu scoperto quando Artemide e le compagne si fermarono a lavarsi presso una fonte. Artemide, furiosa, la scacciò e la moglie di Zeus, altrettanto adirata, inferì sull'incolpevole ninfa trasformandola in orsa, una trasformazione che Ovidio racconta con toni raccapriccianti (quanti autori moderni di *fantasy* e *horror* sono debitori delle *Metamorfosi*?). Molti anni

dopo, Arcade, il figlio nato dalla violenza di Zeus, andando a caccia nei boschi, incontrò, inconsapevole, la madre che, riconosciutolo e guardandolo fissamente, cercò di avvicinarlisi. Arcade, spaventato, fu lì lì per colpirla con una freccia mortale quando Zeus, infine impietosito per la sorte della sua vittima, impedì il delitto e portò in cielo entrambi trasformando Callisto nell'**Orsa Maggiore** e Arcade nella costellazione di Artofilace (in greco «guardiano dell'orsa», chiamata in seguito (sembra per la prima volta da Omero nell'*Odissea*) Bootes (in greco «pastore di buoi, bovaro, bifolco»). Il nome della stella più luminosa del **Bovaro**, Arturo, ha più o meno lo stesso significato di «guardiano dell'orsa». A questo nuovo affronto Era reagì rabbiosamente, facendo in modo che per l'eternità alla Grande Orsa fosse impedito di lavarsi nelle acque dell'oceano. E in effetti, a quel tempo, a causa del moto precessionale, l'Orsa Maggiore era circumpolare anche alle latitudini della Grecia.

Secondo un'altra storia, l'Orsa Maggiore rappresenta una ninfa di Creta, Elice, che avrebbe allevato, assieme alla ninfa Cinosura, Zeus bambino. Poiché esse venivano inquisite dal padre di Zeus, Crono, che voleva punirle, Zeus le trasformò entrambe in costellazioni, l'Orsa Maggiore e l'**Orsa Minore**, assumendo egli stesso la forma del **Dragone**. Quest'ultima costellazione, tuttavia, vanta molte altre connessioni con il mito. Secondo alcune fonti, si tratterebbe del drago che custodiva la sorgente di Ares, presso la quale Cadmo fondò la città di Tebe. Per la sua uccisione, Cadmo dovette servire otto anni Ares come schiavo. Altri dicono che si tratti di Ladone, il drago guardiano dei pomi delle Esperidi. Questi pomi d'oro erano stati dati da Gaia ad Era come dono di nozze e in seguito la dea li aveva fatti piantare nel suo giardino, vicino al monte Atlante. Le Esperidi erano tre Ninfe della Sera, che aiutavano Ladone nell'opera di sorveglianza. Dopo che il drago fu ucciso da Eracle durante la sua dodicesima fatica, la sua immagine venne posta in cielo da Era a premio della sua fedeltà.

Continuando con Eracle (**Ercole**), la costellazione che lo rappresenta ha probabilmente il maggior numero di collegamenti con le altre. La cosa curiosa è che nei testi antichi essa viene indicata come «L'inghinocchiato» e il solo Eratostene (III sec. a.C.) la cita col nome che verrà poi usato continuativamente a partire dal Cinquecento. Desto anche un po' di stupore il fatto che l'eroe, in cielo, venga rappresentato a testa in giù (prerogativa, peraltro, anche di Pegaso). Tuttavia, come fatto notare recentemente, la costellazione potrebbe essere stata inventata in Mesopotamia dove, 5000 anni fa, per effetto della precessione, essa sarebbe apparsa molto più verso

nord e quindi perfettamente dritta sopra l'orizzonte settentrionale. È anche possibile che in Mesopotamia il gruppo rappresentasse un eroe di cui l'Eracle greco non è che una versione tarda, Gilgamesh, un semidio la cui storia è narrata su tavolette cuneiformi che risalgono al 2700 a.C. L'epopea di Gilgamesh ha molti punti in comune con quella di Eracle ed entrambe non sono altro che una metafora del percorso del Sole (e della Luna) attraverso i dodici segni dello Zodiaco (le dodici fatiche).



Fig. 50. Pollaiuolo. Ercole e l'Idra, 1475 circa, Firenze, Galleria degli Uffizi.

Nella mitologia greca Eracle è l'eroe di gran lunga più famoso. Nacque da Zeus e da Alcmena, la più bella e saggia di tutte le mortali, in una notte nella quale il dio prese le sembianze del marito di lei, Anfitrione. Il piccolo venne chiamato Alcide (da *Alkè*, forza) e già dalla culla diede prova della sua grande forza, strangolando i due serpenti che Era, al solito gelosissima, aveva mandato per ucciderlo. Da adulto raggiunse la bella statura di quattro cubiti e un piede (205 cm). Fu indotto alla pazzia dalla moglie di Zeus e si macchiò di una serie di orrendi delitti per purificarsi

dei quali andò dall'oracolo di Delfo. La Pizia gli ingiunse di mettersi al servizio del cugino Euristeo per undici anni e di chiamarsi da quel momento in avanti Eracle («gloria di Era»). Euristeo impose ad Eracle dodici imprese quali nessun uomo avrebbe mai saputo compiere. Molte di queste sono ricordate in cielo.

La costellazione del **Leone** rievoca la prima fatica, l'uccisione del leone di Nemea, un animale terribile e dalla pelle invulnerabile, tanto che per averne ragione Eracle dovette afferrarlo fra le braccia e soffocarlo.

Durante la battaglia nella quale Eracle uccise l'idra di Lerna (seconda fatica, fig. 50), un mostro dal corpo di cane e nove teste, che uccideva chiunque gli passava vicino con il suo alito mefitico, Era inviò contro Eracle un granchio gigantesco, simboleggiato dalla costellazione del **Cancro**, che, prima di essere schiacciato inesorabilmente, riuscì a mordere l'eroe al tallone. Queste prime due imprese furono utili a Eracle ai fini dell'equipaggiamento: la pelle del leone gli servì da armatura per tutta la vita e col sangue velenosissimo dell'idra trasformò le punte delle sue frecce in armi micidiali.

Andando a caccia del cinghiale Erimanzio, durante la terza fatica, Eracle ebbe a che fare con i Centauri e, inavvertitamente, ferì con una freccia il più celebre fra essi, Chirone, rappresentato in cielo sia dalla costellazione del **Centaurio** che da quella del **Sagittario**. Chirone, saggio e sapiente, molto amico degli uomini, ha questa forma perché il padre Crono, per generarlo, si era unito a Filira, una figlia di Oceano, sotto forma d'un cavallo. Protettore del padre di Achille, Peleo, fu il tutore dello stesso Achille, di Giasone, di Asclepio e del dio Apollo, ai quali insegnò la musica, la caccia, l'arte della guerra, la morale e la medicina. Poiché la ferita gli produceva un dolore insopportabile, ed era inguaribile, Chirone desiderò di morire per porre fine al tormento; ma era nato immortale e riuscì a trovare pace soltanto quando Prometeo si offrì di cedergli il suo diritto alla morte.

Alla settima fatica è collegata la costellazione del **Toro**, che rappresenta il Toro di Creta. Questo era il bianchissimo animale che aveva rapito per conto di Zeus Europa, figlia di Agenore, re di Tiro, di cui il dio s'era invaghito (secondo una variante però Zeus stesso s'era trasformato in toro); oppure, secondo un'altra storia, si trattava del toro fatto uscire dal mare dagli dei per testimoniare il buon diritto di Minosse di governare su Creta. Poiché, però, Minosse non sacrificò, come aveva promesso, l'animale, Poseidone ispirò nella moglie di Minosse, Pasifae, un insano amore per il toro. Dall'unione nacque il celebre Minotauro. Il dio del mare, inoltre, rese furioso il toro che Eracle, poveretto, ebbe l'incarico di riportare, vivo, a Euristeo.

Durante la già ricordata dodicesima fatica, attraversando il Caucaso, sulla strada che doveva portarlo al giardino delle Esperidi, Eracle uccise con una **Freccia l'Aquila** che divorava il fegato di Prometeo. L'Aquila, tuttavia, può anche rappresentare l'uccello del quale Zeus prese le sembianze per rapire Ganimede, il bellissimo giovanetto del quale il dio si era innamorato e che fu portato nell'Olimpo diventando il coppiere degli dei (fig. 51). Pure la Freccia è stata variamente identificata: potrebbe anche rappresentare i dardi con cui Eracle uccise gli uccelli del lago Stinfalo, nella quinta fatica, oppure la freccia con la quale Apollo sterminò i Ciclopi o, ancora, la freccia di Cupido. Al di là delle fatiche, molte sono le imprese attribuite ad Eracle che, fra una e l'altra, ebbe anche il tempo di generare 70 figli.

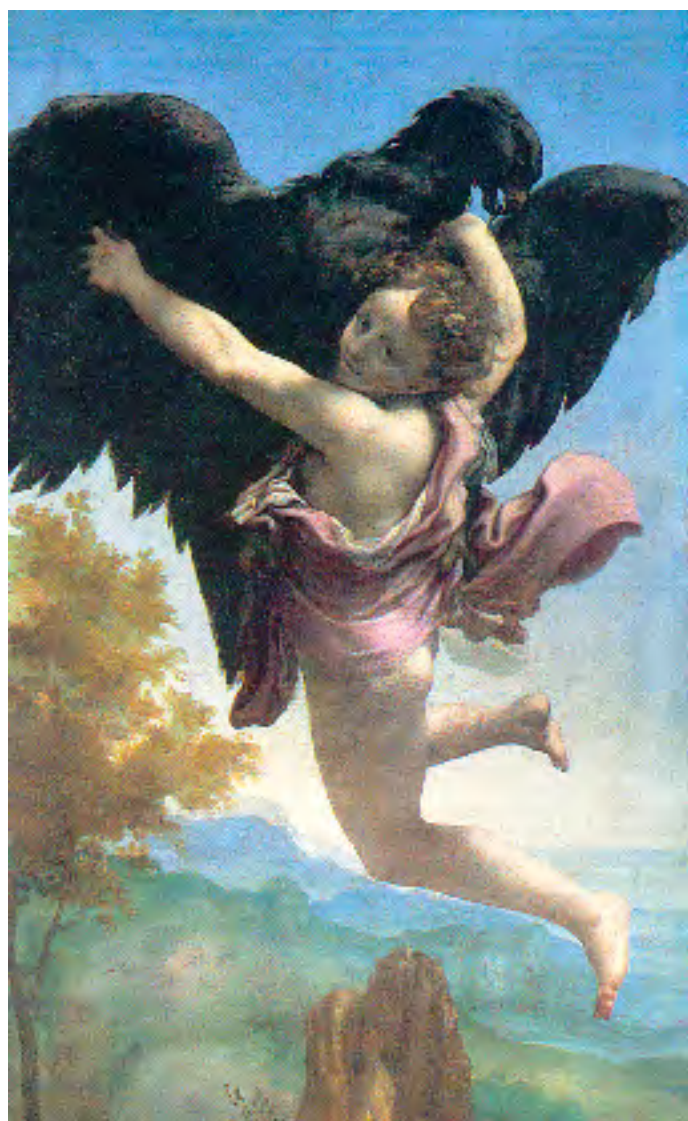


Fig. 51. Correggio. Il ratto di Ganimede, 1531. Vienna, Kunsthistorisches Museum.

Un altro famoso eroe è rappresentato dalla costellazione di **Orione**, che celebra le gesta del gigante della Beozia, figlio di Poseidone, bello, abilissimo nella caccia e prodigiosamente forte. Orione visse

molte avventure, in alcune delle quali appare per la verità come una losca figura, di ubriacone e violentatore. Preferisco citare quella a lui più favorevole, anche perché decisamente più suggestiva. A un certo punto della sua vita Orione incontrò Artemide, che non rimase insensibile al fascino del giovane che, come lei, amava la caccia e la vita nei boschi. Apollo, fratello di Artemide, sapendo della fama del giovane e temendo per la virtù della sorella, riferì a Gaia delle dicerie sul conto di Orione, inducendola a liberare contro l'eroe un gigantesco **Scorpione**. Nel titanico scontro, Orione, dopo averle provate tutte ed essersi reso conto dell'invulnerabilità dell'animale, si gettò in mare nel disperato tentativo di sfuggirgli. Fu però visto da Apollo che, sottilmente, fece credere alla sorella che si trattava di un furfante che aveva cercato di violentare una delle sue ancelle. La invitò quindi a punirlo, trafiggendolo con una freccia. La dea, adirata, non fallì il colpo, ma quando la risacca portò a riva il corpo dell'amico, Artemide, riconoscitolo, fu presa dalla disperazione. Piangendo e supplicando, invocò l'intervento di Asclepio, perché ridonasse la vita al giovane. Ma, mentre Asclepio si apprestava a tentare l'intervento divino, Zeus si oppose, fulminandolo. Allora, Artemide chiese, almeno, che l'immagine di Orione potesse essere ricordata, per sempre, fra le stelle. Zeus accondiscese, ma Apollo, testardo nella sua convinzione di aver agito bene, pretese la stessa sorte per lo Scorpione: così, Zeus pose i due ai lati opposti del cielo, in modo che l'animale non potesse più nuocere ad Orione.

Anche Asclepio è ricordato in cielo, nella costellazione di **Ofiuco**, che regge il **Serpente**, diviso in Capo e Coda. Ofiuco in greco significa «serpentario» o «incantatore di serpenti» e probabilmente quest'attributo è dovuto alla rappresentazione abituale di Asclepio, raffigurato con dei serpenti avvolti attorno ad un bastone. Asclepio è figlio di Apollo e imparò l'arte della medicina, come detto, dal centauro Chirone. Divenne così bravo, come abbiamo visto, da essere in grado di resuscitare i morti, utilizzando il sangue della Gorgone, che aveva virtù miracolose, avuto in dono da Atena.

In cielo finì anche la **Lepre**, una delle prede abituali di Orione. È noto inoltre che le costellazioni del **Cane Maggiore** e del **Cane Minore** rappresentano i cani da caccia di Orione. In effetti, però, in origine il Cane Maggiore era il Cane per antonomasia, e rappresentava un cane da caccia, Lelape, che non mancava mai la preda, appartenuto ad Artemide e donato da questa alla sua ancella Procri. Oppure, era Mera, il cane dell'eroe Icario, che introdusse la vite nell'Attica e fu ucciso dai contadini ubriachi. La figlia di Icario,

Erigone, fu guidata da Mera sulla tomba del padre, dove si suicidò; poi, anche il cane morì sulla tomba del padrone e Dioniso, in segno della sua fedeltà, lo trasformò in costellazione. Il Cane Minore era semplicemente Procione (dal greco *prokion*, che significa «che precede il cane», poiché sorge prima di Sirio, la stella principale del Cane). In seguito, già con Arato, il cane divenne il compagno di Orione, e Procione, dall'epoca di Vitruvio (primo secolo a.C.), iniziò a essere definito in vari modi, settentrionale, sinistro, primo, finché si affermò l'appellativo di Minore.



Fig. 52. Leonardo Da Vinci. Leda e i suoi due figli Castore e Polluce (fine XV-inizio XVI sec.). Roma, Galleria Borghese.

Fra le figure più importanti di eroi figurano senz'altro Castore e Polluce, i **Gemelli** di Sparta, la cui nascita è connessa alla costellazione del **Cigno** e a una delle tante scappatelle extraconiugali di Zeus. Il dio, questa volta, si innamorò di Leda, moglie di Tindaro, eroe spartano. Leda, per sfuggire a Zeus, si trasformò in oca ma il dio, mutatosi in cigno, la possedette ugualmente (fig. 52). In seguito Leda depose un uovo dal quale nacquero Castore e Polluce, nonché Elena, «la più bella donna del mondo», causa della guerra di Troia, e Clitennestra. Secondo una versione della storia, peraltro, il marito di Leda, Tindaro, fece

l'amore con lei poco dopo l'amplesso con Zeus; da questa unione nacquero Castore e Clitennestra, mentre solo Elena e Polluce sarebbero di stirpe divina. Peraltro, il nome con cui sono globalmente chiamati Castore e Polluce, Dioscuri, significa «figli di Zeus». Dei due, Castore è soprattutto un forte guerriero, Polluce un eccellente pugilatore. I due trovarono la morte durante una lite con i cugini Ida e Linceo per la divisione del bottino procurato da una razzia di bestiame. Castore fu ucciso da Ida e Polluce uccise Linceo. Zeus allora uccise Ida con un fulmine e offerse a Polluce di salire nell'Olimpo con lui. Ma Polluce non voleva separarsi dal fratello, destinato agli Inferi, e Zeus, allora, concesse loro di restare ciascuno metà del tempo negli inferi e metà nell'Olimpo.



Fig. 53. Bernardo Strozzi. Berenice, Bergamo, Galleria dell'Accademia Tadini.

Forse la più poetica storia dell'antichità classica, anche perché parla di persone realmente esistite, è quella della **Chioma di Berenice** (fig. 53). Berenice era una regina egiziana, sposa del Faraone Tolomeo III Evergete, della dinastia dei Lagidi (284 ca.-221 a.C.). Egli fu un grande sovrano e sotto di lui la monarchia ellenistica egiziana conobbe un grande splendore e, di nuovo, dopo i tempi dell'Antico Impero, la divinizzazione del sovrano raggiunse l'apice. Nel 246 a.C., poco dopo le nozze, Tolomeo dovette partire per una campagna bellica, molto pericolosa, contro Seleuco

II di Siria. Berenice, molto timorosa delle sorti del marito, fece voto, se fosse tornato sano e salvo, di sacrificare agli dei gli splendidi capelli. Così avvenne, la chioma fu recisa e fatta appendere nel tempio di Afrodite. Un bel giorno però essa scomparve, nella più grande costernazione della corte. Tutti i sapienti convocati per cercare di svelare il mistero sulla misteriosa sparizione furono incapaci di indicare la minima traccia. Un famoso astronomo del tempo, Conone, ebbe però l'idea giusta: prendendo un gruppo di stelle *amorfe* (come si chiamavano quelle che nei cataloghi non erano raggruppate in costellazioni) appena dietro il Leone, considerate fino a quel momento rappresentanti il ciuffo di peli della coda dell'animale, costituì una nuova costellazione, spiegando ai presenti che i riccioli della regina erano lassù, in cielo, portati dagli dei che, non avendo mai visto nulla di più bello, li volevano sempre vicini a loro. Questa storia fu cantata da Callimaco in un'elegia di cui rimangono solo alcuni versi e poi da Catullo, il cui carme è ritenuto una traduzione adattata del poema greco originale.

Eppure, per quasi 2000 anni la nuova costellazione non trovò posto in cielo, appena nominata da Tolomeo (che chiama tre delle stelle del Leone *plokamos*, «treccia», senza ulteriori specificazioni) e Igino, e ignorata da Manilio (questi ultimi due sono poeti romani vissuti fra il primo secolo a.C. e il primo secolo d.C., autori di importanti opere sui miti delle costellazioni). Ma già nel carme di Catullo le indicazioni sulla sua posizione in cielo non potevano essere più precise.

La costellazione comparve per la prima volta soltanto nel 1551, su un globo del famoso cartografo fiammingo Gerhard Kramer (Mercatore), ma con il nome di *Cincinnus* («riccioli»). Fu Tycho il primo ad adottare, nel suo catalogo del 1602, posizione e nome attuali. Nel citato canto di Catullo si trova anche un riferimento interessante alla costellazione della **Corona Boreale**, che rappresenta un dono divino. Arianna, cretese, figlia di Minosse e Pasifae, si innamorò di Teseo, quando questi andò a Creta per uccidere il Minotauro. Gli diede il famoso gomitolo per trovare la strada del ritorno nel Labirinto. Poi, i due scapparono insieme per sfuggire alla collera di Minosse, ma Teseo abbandonò Arianna su un'isola, mentre dormiva. Però l'eroina fu presto consolata poiché sull'isola arrivò il dio Dioniso, che se ne innamorò, la sposò e la condusse sull'Olimpo. Come regalo di nozze Dioniso dette ad Arianna uno splendido diadema d'oro, opera di Efesto, che divenne in seguito una costellazione (fig. 54).

Un'altra storia che merita di essere raccontata è quella del musico di Lesbo, Arione, la cui bravura

viene celebrata nei *Fasti* di Ovidio.

Durante un viaggio dalla Sicilia a Corinto, i marinai della nave che lo trasportava complottarono per ucciderlo e rubargli il denaro che aveva guadagnato col canto. Apollo gli apparve in sogno svelandogli il complotto e promettendogli il suo aiuto. Al momento dell'aggressione, Arione chiese ai nemici di concedergli la grazia di cantare per l'ultima volta. Alla sua voce, dei delfini uscirono dal mare e Arione, fidando nell'aiuto del dio, si buttò in acqua. Un delfino lo portò sul dorso fino a riva. Apollo, in ricordo dell'episodio, trasformò in costellazioni il *Delfino* e la *Lira* di Arione. Più verosimilmente, però, quest'ultimo gruppo rappresenta il magico strumento inventato da Ermete e da lui donato ad Apollo, il quale a sua volta lo regalò a Orfeo, il musico degli Argonauti.



Fig. 54. Tintoretto. Arianna, Venere e Bacco, 1576, Sala dell'Anticollégio, Palazzo Ducale, Venezia.

Restando a questo tema, in cielo è ricordata la Nave Argo che partì, sotto la guida di Giasone, alla ricerca del mitico vello d'oro, nella Colchide. Argo significa «rapido» ma era anche il nome del costruttore della nave. Essa, compresa nelle 48 costellazioni dell'*Almagesto* di Tolomeo, venne in seguito smembrata da Lacaille, nel 1752, in quattro parti: la **Carena**, le **Vele**, la **Poppa** e la **Bussola**. Soltanto le ultime due sono visibili, parzialmente e molto basse, nei nostri cieli di fine inverno. Il vello d'oro è collegato alla storia di Frisso ed Elle, che il padre, Atamante, volle sacrificare a Zeus, su suggerimento della seconda moglie, Ino. Ma Zeus mandò in soccorso ai bambini un **Ariete** alato dal vello d'oro che li sottrasse all'orribile fine. Durante il viaggio, Elle cadde e annegò nel mare, ma Frisso giunse salvo nella Colchide. Qui, in segno di gratitudine, sacrificò l'ariete a Zeus e ne offrì

il vello al re Eete che l'aveva benevolmente accolto. Il vello fu inchiodato ad una quercia in un bosco sacro al dio Ares. Fu poi preso da Giasone, il capo degli Argonauti, al termine di mille mirabolanti avventure, e portato da questi a suo zio Pelia, sovrano di Iolco, in Tessaglia, che lo aveva richiesto come pegno del diritto di Giasone a rivendicare il trono che era stato di suo padre, Esone.

Un'altra costellazione, la **Vergine**, è collegata a numerose leggende. Rappresenterebbe Erigone, la figlia di Icaro prima citata che si impiccò ad un albero alla morte del padre e fu poi trasformata in costellazione. Oppure sarebbe Parteno, figlia d'Apollo e Crisotemi, morta giovane e portata da Apollo fra le gemme celesti. Più verosimilmente, però, rappresenta Astrea, o Dike, la Giustizia, figlia di Zeus e di Temi, che diffondeva fra gli uomini la bontà e la giustizia al tempo dell'Età dell'oro. Ma, finita la mitica età ed essendosi la malvagità impadronita del mondo, Dike prese a odiare il genere umano e fuggì in cielo. Infine, la costellazione è stata identificata anche come Demetra, la dea delle messi, o sua figlia Persefone, moglie di Ade, signore degli Inferi.

Un'altra storia interessante, riportata da Ovidio nei *Fasti*, collega le costellazioni del **Corvo** con quelle della **Coppa** e dell'**Idra**. Un giorno Apollo spedì un bianco corvo a prendere dell'acqua con una coppa, ma esso si attardò vicino a un albero di fichi, attendendo che maturassero; poi, tornando dal dio, disse che un serpente d'acqua, che aveva peraltro catturato e trasportava fra le zampe, era stato la causa del ritardo. Apollo, adirato, punì l'animale rendendolo nero ma, in seguito, ne pose l'immagine fra le stelle, assieme a quella della coppa e al serpente, rappresentato dall'Idra.

Due costellazioni caratterizzate da una mitologia piuttosto complessa sono quelle della **Bilancia** e dell'**Eridano**.

La Bilancia non esisteva presso i Greci. Quella zona del cielo era conosciuta come le Branche (*kelai*), intendendo, ovviamente, le chele dello Scorpione. Così le chiama, ripetutamente, Arato, che le considera come una costellazione a sè stante, come del resto Tolomeo. Eratostene e Ipparco, invece, le consideravano parte dello Scorpione. Ipparco, tuttavia, le chiamava anche *zugos*, che vuol dire proprio «bilancia». In seguito, anche Tolomeo usò entrambi i nomi, e così fecero gli scrittori latini, per i quali il gruppo era di volta in volta Chelae, Jugum, Libra, con predilezione, soprattutto nei commentari scientifici, per l'ultimo nome. D'altra parte è noto che spesso si rivendica a Roma l'invenzione del dodicesimo segno dello Zodiaco, rappresentante Ottaviano Augusto, vi-

sto come divino dispensatore di giustizia, basandosi sul passo di Virgilio che celebra l'imperatore, la cui nascita avvenne proprio quando il Sole si trovava nelle Branche. Tuttavia lo stesso Virgilio nomina la Bilancia come segno già esistente e parla espressamente dei dodici segni dello Zodiaco. Inoltre, alcuni ritengono che il gruppo sia stato formato ancora in Mesopotamia, già con questo nome, come l'orientalista inglese Robert Brown, secondo il quale l'asterismo *Sugi* («il giogo del carro»), formato dalle stelle Alfa e Beta Librae, ha molte assonanze con lo *zugos* greco e con lo *jugum* romano.

Eridano è il nome di un fiume divino, figlio di Oceano e di Teti, generalmente collocato nell'Europa nordoccidentale. Variamente identificato con l'Ebro, con il Reno, con il Rodano o con il Po, quest'ultima ipotesi sembra la più probabile, com'è dimostrato anche dal racconto degli Argonauti che, entrandovi dall'Adriatico, lo risalgono fino al paese dei Celti.

D'altra parte altri dissero che rappresentava l'Eufrate o il Nilo, in quest'ultimo caso abbastanza a ragione, in effetti, poiché, come il fiume egiziano, Eridano in cielo segue un percorso lungo i meridiani.

Concludiamo brevemente con i miti relativi alle rimanenti costellazioni visibili dai nostri cieli (in tutto o per la maggior parte al di sopra di -30° di declinazione):

L'**Acquario** ha sempre rappresentato, fin dai tempi dei Babilonesi, un uomo che getta acqua da un otre verso la bocca del sottostante **Pesce Australe** (la cui stella più luminosa, Fomalhaut, significa proprio, dall'arabo *Fum al Hut*, «la bocca del pesce»). Secondo l'astronomo tedesco Ideler questa rappresentazione era collegata al fatto che il Sole si trovava in quel segno durante la stagione piovosa e a riprova citava la vicinanza ad altre costellazioni aventi connessioni con l'acqua: Capricorno, Balena, Delfino, Eridano, Idra, Pesci, Pesce Australe.

L'**Auriga** rievoca l'eroe Trochilo, di Argo, figlio di Io, la sacerdotessa di Era amata da Zeus. È ritenuto l'inventore del carro, particolarmente di quello sacro all'Era di Argo.

Il **Capricorno** rievoca Amaltea, la capra che allattò Zeus quando il dio, per sfuggire al padre Crono che voleva divorarlo, venne portato da Gaia nella grotta Dittea, a Creta. Anche la stella Capella dell'Auriga, tuttavia, potrebbe rappresentare questo mito.

Il **Cavallino**, sconosciuto a Ipparco, Igino, Manilio e Vitruvio, è stato introdotto da Tolomeo. Mitologicamente, è stato variamente identificato con Celere, fratello di Pegaso, donato da Mercurio a Castore, o con Cillario, dato da Era a Polluce o infine con il cavallo di cui il dio Crono prese le sembianze

per giacere con Filira, unione da cui nacque, come detto più sopra, Chirone.

Il **Triangolo** era conosciuto dai Greci come *Deltoton* (Arato), a causa della sua forma simile alla lettera Delta, e perciò assimilato al Delta del Nilo, o come *Trigonon* (Ipparco e Tolomeo), e identificato con la Sicilia, per la sua forma triangolare.

I **Pesci** rappresentavano, per i Greci, Afrodite ed Eros, che si trasformarono in pesci buttandosi nell'Eufrate per sfuggire alla furia del gigante Tifone; secondo gli autori latini, invece, essi erano i pesci che trasportarono i due attraverso le acque del fiume per trarli fuori pericolo, nello stesso episodio.

Tutte le altre costellazioni visibili sono invenzioni recenti: la **Giraffa** e l'**Unicorno** furono introdotte dall'astronomo tedesco Jacob Bartsch nel 1614. **Cani da Caccia**, **Leone Minore**, **Lince**, **Lucertola**, **Scudo**, **Sestante** e **Volpetta** sono stati introdotti da Hevelius nel 1687 nella sua opera *Uranographia*. Due di queste meritano un cenno. Lo Scudo di Sobieski ricorda Giovanni III Sobieski, re di Polonia, che nel 1683, alla testa del suo esercito salvò Vienna assediata e l'intera Europa dalla capitolazione di fronte alla minaccia ottomana. L'intera *Uranographia* di Hevelius, in effetti, è dedicata a re Giovanni, poiché il suo altro titolo è *Firmamentum Sobiescianum*. I Cani da Caccia si trovano anche in una carta di Peter Bienewitz (Petrus Apianus) del 1536, *Imagines syderum coelestium*, ed è a lui, quindi, che andrebbe attribuita l'invenzione della costellazione.

BIBLIOGRAFIA

- Alfredo Cattabiani. *Planetario*, Milano, Mondadori, 1998.
 Robert Graves. *I miti greci*, Milano, Longanesi, 1983.
 Pierre Grimal. *Enciclopedia dei miti*, Milano, Garzanti, 1990.
 Ian Ridpath. *Mitologia delle costellazioni*, Padova, Muzzio, 1994.
 Giuseppe Maria Sesti. *The glorious constellations*, New York, Abrams, 1991.
 Gabriele Vanin. *I nomi delle stelle*, Milano, Sirio, 2004.
<http://www.iconos.it/index.php?id=18>
<http://www.comfychair.org/~cmbell/myth/myth.html>
http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/art_and_music/art_archive.html