P I E R O T E M P E S T I

E N C I C L O P E D I A A S T R O N O M I C A

PRESENTAZIONE

Mi accinsi a redigere questa Enciclopedia, indirizzata ai cultori dilettanti di Astronomia, ben quarant'anni fa. Ora l'opera - abbandonata e ripresa innumerevoli volte - è praticamente completata. Rimane gran parte del lavoro di revisione: eliminazione di ripetizioni superflue (alcune sono volute per evitare al Lettore troppi scartabellamenti), adeguamenti allo stesso livello di trattazione, individuazione di lacune ecc. Un lavoro alquanto impegnativo che non so se data la mia età (94 anni compiuti) riuscirò a portare a termine, tanto più che hanno cominciato a farsi sentire certe avvisaglie di una non troppo lontana diminuzione della capacità di attendere al lavoro.

Ho pensato bene perciò di mettere in rete il testo mano a mano che diviene passabilmente pronto per la pubblicazione. Comincio con una prima *tranche*: tutte le voci attinenti alle lettere A, B, D e L per un totale di 165 pagine di 6 mila caratteri ciascuna. Con la speranza, ovviamente, di far seguire presto altre *tranches*. Passabilmente pronto, ho detto, perché il testo non è certo limato a dovere. Meglio così, ho ritenuto, piuttosto che sì gran mole di informazioni, pazientemente raccolte nel corso di decenni, debba andar perduta.

Per alcune delle voci di maggior estensione, viene premessa una trattazione succinta per chi volesse soltanto un'informazione orientativa. La trattazione più estesa è preceduta dal simbolo ●.

Sarò grato a che mi segnalerà errori, imprecisioni, omissioni poco perdonabili

Treviso, 7 agosto 2011 L'autore

Astronomia

L'Astronomia antica. Da Egiziani e Babilonesi alla Grecia classica.

Le prime notizie che si hanno di astronomia scientifica, ancorché vincolata e confusa con pregiudizi astrologici e religiosi, risalgono agli antichi popoli egiziano e babilonese. La conoscenza dell'Astronomia babilonese che non sia tratta da fonti di seconda mano risale a meno di due secoli fa, cioè a metà del XIX secolo, quando si cominciò a studiare le tavolette di argilla a quell'epoca scavate in gran numero in Mesopotamia.

E si cominciò a sfatare un vecchio pregiudizio, che ancor oggi però abbastanza popolare, che già in epoca antichissima i Babilonesi possedessero nozioni astronomiche avanzate quali la precessione degli equinozi e la regola per la previsione esatta delle eclissi. In realtà, come ha messo in evidenza Schiaparelli, le osservazioni sistematiche connesse ad una ben definita misura del tempo e quindi in grado di stabilire periodicità non palesi, hanno avuto inizio non prima dell'VIII secolo a. C.. Se già durante il I Impero babilonese, verso il XII secolo, Mercurio e Venere nelle loro apparizioni mattutine e serali erano stati riconosciuti ciascuno come un unico pianeta, fu solo nell'VIII secolo che riuscirono a calcolarne con buona precisione il periodo sinodico. Il grande sviluppo dell'Astronomia babilonese si ebbe però nei secoli successivi, nell'ambito del II Impero babilonese (608 - 538 a. C.), del dominio persiano (538 - 331 a. C.) e poi dei regni ellenistici durante i quali l'interazione con la scienza greca fu molto intensa ed astronomi mesopotamici quali Kidenas e Beroso godettero di grande reputazione. L'Astronomia babilonese scomparve quale attività nel 125 a. C. quando la regione cadde sotto il dominio dei Parti e ben presto delle antichissime città mesopotamiche rimasero solo rovine.

Quegli astronomi posero molta attenzione alla misura del tempo e degli angoli: da loro abbiamo ereditato il sistema sessagesimale e, attraverso gli Ebrei, la settimana; ma per il loro contributo in questo campo si veda sotto *Calendario*. Le loro osservazioni riguardavano essenzialmente le posizioni ed i cicli dei pianeti, del Sole e della Luna. I loro riferimenti erano l'orizzonte e l'eclittica. I dati di osservazione delle eclissi, la prima delle quali risale al 721 a. C., si usano ancora oggi per costruire la teoria del moto lunare e per verificare lungo i millenni il rallentamento della rotazione della Terra. La tendenza dell'Astronomia babilonese era scoprire le periodicità dei moti celesti ed escogitare algoritmi per effettuare previsioni; in ciò si riconosce la matrice di antiche esigenze di carattere astrologico, divinatorio. Quale esempio prendiamo la variabile velocità del Sole lungo l'eclittica: pare che sia stata studiata per primo con precisione da Eutemone ateniese, nel V secolo a. C. (attualmente il Sole percorre $61' \, 11''$/giorno all'apogeo (primi di gennaio) e $57' \, 13''$/giorno al perigeo (primi di luglio). Mentre i Greci per alcuni secoli furono indaffarati nei tentativi di spiegazione del fenomeno, i Babilonesi lo trattarono numericamente per ottenere con un calcolo rapido posizioni sufficientemente approssimate del Sole: ammisero che nel semestre tra la minima e la massima velocità, questa fosse uniformemente crescente e nell'altro semestre uniformemente decrescente.

Ecco un raffronto tra l'Astronomia babilonese e quella Greca nelle parole di Schiaparelli. *Il vero merito dei Babilonesi fu di avere, con l'osservazione assidua, e coll'arte del calcolo, stabilito le prime basi di una Astronomia scientifica. Partendo da questa, i Greci crearono l'Astronomia geometrica, cioè la descrizione dell'ordine e delle forme dei movimenti celesti. . . . . Appena avevano i Greci ricevuto da Babilonia (come dice Platone, o chi per lui, nell'Epinomide) le prime idee sul moto dei pianeti e i primi dati circa i loro periodi, che già nelle scuole si cominciò a disputare sulla struttura del sistema cosmico. Filolao ebbe il coraggio di far muovere la Terra in un'orbita; Eudosso la volle fissa e sulle poche osservazioni a lui accessibili osò costruire il suo sistema delle sfere omocentriche, un prodigio di eleganza e di acutezza geometrica. E finalmente, ancora prima del 250 a. C. i Greci arrivarono a comprendere con Eraclide Pontico e con Aristarco di Samo, che il problema del corso del Sole, della Luna e dei pianeti era un problema di moto relativo, che poteva risolversi in maniere differenti, le quali sono oggi conosciute coi nomi di sistema tolemaico, ticonico e copernicano. Ma queste brillanti speculazioni, a cui li aveva condotti il loro genio geometrico, potevano dare un'idea sommaria dello stato delle cose, non certamente potevano servire ad uno studio esatto, né ad assegnare con precisione il luogo degli astri per un istante qualunque. Non avevano base sufficiente d'osservazione; l'aritmetica voleva pure la sua parte, e questa fin allora era stata trattata dai Greci in forma puramente speculativa. Non bastava creare la teoria dei numeri, disputare sulle quantità irrazionali, cercar le due medie proporzionali fra due numeri; bisognava posseder l'arte del calcolo e della sua applicazione a casi concreti. Ebbene! Al momento opportuno, Alessandro, conquistata Babilonia, metteva a contatto i vecchi calcolatori ed osservatori indefessi di Accad col genio filosofico e speculativo dell'Ellade; dall'unione dei tre elementi: osservazione, teoria speculativa, calcolo, nacque nella scuola di Alessandria l'edifizio dell'Astronomia geocentrica, che dominò in Oriente ed in Occidente tutte le scuole fino ai tempi di Copernico.*

Ai Greci si devono le prime concezioni cosmologiche non basate sul mito, come erano tutte quelle dei popoli primitivi. All'inizio del VI secolo a. C. Anassimandro, della scuola jonica, considerò la Terra un tronco di cilindro in equilibrio nello spazio, sovrastato da semisfere concentriche contenenti in basso l'aria e le nubi e più sopra le stelle fisse, il Sole, la Luna ed i pianeti. Ma già pochi anni più tardi i pitagorici consideravano la Terra come sferica, idea poi, si ritiene, affermata con argomentazioni più scientifiche da Parmenide attorno al 500 a. C. Tuttavia pochi decenni dopo, Erodoto, il *Padre della storia*, dichiara dicerie le affermazioni che c'erano popoli nell'estremo nord che dormono per sei mesi l'anno, che i naviganti fenici avrebbero circumnavigato l'Africa e che guardando il Sole lo avrebbero visto percorrere il cielo da destra verso sinistra. Ma poco dopo il pitagorico Filolao accetta non solo la sfericità della Terra ma le attribuisce un moto orbitale facendole percorrere in 24 ore un cerchio attorno al *fuoco centrale*; esternamente alla Terra, la Luna avrebbe percorso il suo cerchio in 29,5 giorni ed il Sole in un anno. Fra la

Terra ed il Sole, sempre allineata con questi, dalla parte opposta all'emisfero greco, orbitava l'**Antiterra.* Si noti che il fuoco centrale non è il Sole e quindi il sistema non è eliocentrico; però Filolao appare essere il primo che osa togliere alla Terra il suo ruolo di centro del mondo. Tuttavia il primo vero astronomo greco è da considerare Eutemone, contemporaneo di Filolao, cui abbiamo già accennato. A lui si deve anche una determinazione della durata dell'anno tropico, fino ad allora assai più incerta. Probabilmente fu tale misura che consentì poco dopo a **Metone* di trovare il suo famoso ciclo. Ma eccelsa fama è rimasta nei millenni ad Eudosso di Cnido (409 - 355 a. C.), discepolo di Platone. Si ascrive a lui l'idea dell'intercalazione dell'anno di 366 giorni ogni 3 anni di 365 per mediare la durata dell'anno tropico, proposta che sarà accolta tre secoli più tardi nel calendario di Giulio Cesare. Ma la sua fama è legata *al sistema delle **sfere omocentriche:* ogni corpo celeste è fisso sull'equatore di una sfera centrata sul centro della Terra e che ruota uniformemente attorno ad un asse che a sua volta è portato da un'altra sfera concentrica rotante su un asse diverso. Con quattro sfere per ciascun pianeta, tre per il Sole e la Luna ed una per le stelle fisse, in totale 27 sfere, venivano rappresentati tutti i moti celesti secondo le conoscenze di allora. Per tener conto dell'inuguaglianza del moto solare lungo l'eclittica messo in evidenza dalla differente durata delle quattro stagioni e studiata poco prima da Eutemone e da Metone, Callippo, discepolo di Eudosso, aggiunse altre sfere arrivando ad un totale di 33.

Come fa notare J. Drayer nella sua *History of Astronomy*, con Eudosso e Callippo nacque l'Astronomia scientifica che va al di là della pura osservazione e delle pure considerazioni metafisiche: ha inizio quel continuo reciproco influsso dell'osservazione e della teoria che caratterizzerà lo sviluppo della scienza.

Il sistema delle sfere omocentriche fu accolto da Aristotele: mentre probabilmente, per Eudosso le sfere erano un artificio matematico per rappresentare il moto dei corpi celesti (l'equivalente di uno sviluppo in serie per riprodurne le irregolarità), Aristotele ne assunse invece la realtà fisica. Per Aristotele l'Universo è finito perché non può esistere spazio esterno e in un tempo definito non può compiere un giro una sfera di raggio infinito. Accolse anche la sfericità della Terra, ma, conformemente al suo metodo, non perché spiegava i dati di fatto qui sopra accennati, ma in quanto s'inquadrava nella sua concezione metafisica di perfezione. Nel suo sistema la sfera delle stelle fisse trascina le altre nel moto diurno perché è ivi il primo motore divino. Però per svincolare l'un dall'altro i gruppi di sfere dei vari pianeti aggiunge fra un gruppo e l'altro altre sfere animate di moto uguale e contrario, cosicché in totale costruisce un sistema di ben 55 sfere. E introduce il dualismo che condizionerà il sapere per oltre un millennio, dalla fine della civiltà ellenistica all'epoca di Galileo. Alto e basso, leggero e pesante sono assoluti, non relativi. La sfera più bassa, quella della Luna, divide il mondo di ciò che è imperfetto e corruttibile, di ciò che nasce e muore, dal sovrastante mondo celeste perfetto, divino, incorruttibile ed eterno. Il mondo terreno, quello sublunare è costituito dai quattro elementi terra, acqua, aria e fuoco (che non è la fiamma, ma il sostrato di questa), andando dal più pesante al più leggero. Il mondo celeste è costituito da una quinta essenza, l'*etere*, imponderabile ed incorruttibile, che permea tutto lo spazio e forma gli astri. Ciascun corpo segue il moto che gli è naturale e tende a raggiungere la posizione che gli è naturale. Nel mondo celeste il moto naturale è quello circolare, l'unico perfetto; nel mondo sublunare è quello rettilineo per cui tutti i corpi tendono verso il punto più basso, il centro della Terra. Ed è proprio per questa tendenza che, per Aristotele, la Terra è necessariamente sferica. Non può essere però animata di moto rotatorio non essendo tale moto naturale per la materia di cui è formata, la quale tende *naturalmente* verso il basso.

Dopo Callippo e Aristotele il sistema delle sfere omocentriche non trova ulteriore sviluppo. La grande variazione di luminosità dei pianeti lungo lo zodiaco, in particolare di Venere e Marte, lo aveva reso insostenibile. Se si voleva salvare il dogma della circolarità, l'unica possibilità era il sistema degli eccentrici.

Eraclide Pontico, di poco più giovane di Aristotile, accetta la rotazione della Terra in 24 ore, per cui non è più necessario per spiegare il moto diurno ricorrere al trascinamento da parte della sfera delle stelle fisse. Ad Eraclide è stata attribuita l'ipotesi che Mercurio e Venere anziché attorno alla Terra orbitassero attorno al Sole; in tale sistema, detto anche *egizio*, perché diversi secoli più tardi Macrobio nel suo commentario al *Somnium Scipionis* ne attribuisce la paternità agli Egiziani, resta immediatamente spiegato il fatto che questi due pianeti non appaiano mai oltre una certa distanza angolare dal Sole.

L'astronomia antica. L'era ellenistica.

Ma ormai si entra nell'era gloriosa della scienza ellenistica fiorita nell'area dei regni sorti dal disgregamento del vasto Impero di Alessandro Magno, che si estendeva dalla Grecia all'Egitto, dalla Mesopotamia ai confini dell'India. La fusione della mentalità razionalizzante della cultura greca con le conoscenze empiriche e tecnologiche egiziane, babilonesi, persiane, dette origine alla meravigliosa stagione culturale dell'*Ellenismo*. Le lettere, le arti e soprattutto le scienze ebbero uno sviluppo enorme e si arrivò ad un livello di conoscenze che solo quindici secoli più tardi, dopo la lunga notte medievale, sarebbero state nuovamente raggiunte. Basti ricordare i nomi di Euclide sistematizzatore della geometria, Apollonio che formula la teoria delle sezioni coniche, Archimede che eccelle nella matematica e nella fisica, Eratostene che misura la circonferenza della Terra, Aristarco ed Ipparco per l'astronomia, Erofilo per l'anatomia e la medicina, e via dicendo. Questa era si fa iniziare col 323 a. C., anno della morte di Alessandro, quando i diadochi tra aspre lotte se ne suddivisero il territorio. I principali stati così sorti furono l'Egitto, su cui regnarono per quasi tre secoli i Tolomei, con capitale Alessandria, fondata pochi anni prima dall'Imperatore; il Regno dei Seleucidi, capitale Antiochia, che comprendeva la Siria, la Mesopotamia, quasi tutta l'Asia Minore, la Persia e in epoca più tarda anche la Fenicia e la Palestina; il Regno degli Antigonidi, che comprendeva la Grecia e la Macedonia. Uno stato minore ma culturalmente molto importante fu il Regno di Pergamo, governato dagli Attalidi. Centro propulsore della cultura ellenistica fu

Alessandria con la sua famosa biblioteca fondata da Tolomeo I Sotero, per cui si parla anche di cultura alessandrina.

In tale ambito culturale, Aristarco di Samo, cui si deve il anche primo tentativo di misurare il rapporto fra le distanze del Sole e della Luna, propose, nella prima metà del III secolo a. C., il sistema eliocentrico: i moti celesti potevano essere spiegati ammettendo che la Terra e i pianeti orbitassero attorno al Sole e che la Terra inoltre girasse su se stessa in 24 ore. Ipotesi che però non godette di molto credito. E si cercò piuttosto di perfezionare il sistema geocentrico. Il fatto che i pianeti, e in particolare Venere e Marte, variassero fortemente di luminosità, portò, come già abbiamo visto, ad abbandonare le sfere omocentriche di Eudosso in favore del sistema degli *eccentrici mobili* accettato nel III secolo a. C. da Apollonio di Perga (Perga, 262 a.C. - Murtina, 190 a.C.). Secondo tale sistema, al centro dell'universo sta la Terra attorno alla quale girano su cerchi concentrici la Luna in 27 giorni ed il Sole in un anno: Mercurio e Venere seguono cerchi i cui centri sono sulla congiungente Terra-Sole e tali che la Terra resta sempre esterna. Gli altri tre pianeti seguono cerchi anche questi centrati sulla congiungente Terra-Sole ma così grandi da circondare sia il Sole che la Terra. Si otteneva così che la distanza di tutti questi corpi dalla Terra fosse variabile pur seguendo ciascuno un moto circolare e salvando la centralità della Terra. In tal modo si rendeva conto del fatto che Mercurio e Venere non si allontanano mai dal Sole oltre un dato angolo e soprattutto veniva spiegata la variazione di splendore mostrata dai pianeti.

Intanto nel Museo di Alessandria si era formata una scuola di osservatori che si servivano di strumenti graduati e in breve furono collezionate per le stelle posizioni ben più precise di quelle ereditate dai Babilonesi a dagli Egiziani. Quest'epoca che va dal III secolo a. C. al II d. C. è legata per l'Astronomia a tre grandi nomi: il già citato Apollonio (culmine dell'opera attorno al 230 a.C.), Ipparco (130 a. C.) e Tolomeo (140 d. C.). All'epoca di Ipparco, in contrapposizione alla teoria degli eccentrici mobili era già stata introdotta quella degli **epicicli.* Ogni pianeta segue, con moto uniforme, un cerchio il cui centro a sua volta segue, sempre con moto uniforme, un altro cerchio più grande centrato sulla Terra e detto *deferente.* Fissando opportunamente il rapporto fra i raggi dei due cerchi il moto apparente di ogni pianeta nel cielo viene rappresentato (vedi anche *sistema planetario*). Ipparco, valendosi delle osservazioni recenti, arrivò a scoprire la *precessione degli equinozi trovando così la vera giustificazione della differenza tra anno siderale ed anno tropico che a quell'epoca era divenuta palese. Confrontando le osservazioni alessandrine delle eclissi con quelle antiche dei Babilonesi, poté costruire una precisa teoria dei moti del Sole e della Luna, sempre nell'ambito del sistema geocentrico. Concluse che per il Sole erano valide due ipotesi: 1) Il Sole descrive in un anno tropico un cerchio di raggio r il cui centro dista dalla Terra della quantità er, essendo e un conveniente numero minore di 1; 2) Il Sole compie in un anno, tropico un giro lungo un epiciclo di raggio er; il centro dell'epiciclo compie, nello stesso tempo ma in senso opposto (W verso E), un giro su un cerchio di raggio r concentrico alla Terra. Entrambe le ipotesi erano sufficienti a rappresentare il moto del Sole entro $1'$, una precisione che sarà raggiunta solo da Tycho 17 secoli più tardi. Ipparco dette preferenza all'ipotesi degli epicicli con la quale tra l'altro era più facile rappresentare il complicato moto della Luna, assegnando al deferente lunare un'inclinazione di 5° sull'eclittica e facendolo rotare attorno all'asse di questa in senso retrogrado col periodo di 18,67 anni. Secondo un'affermazione di Teone di Smirne (II sec. d. C.), Ipparco favorì in generale l'ipotesi epiciclica perché gli appariva più credibile che il mondo fosse costruito simmetricamente rispetto al centro della Terra.

Ed eccoci alla grande costruzione tolemaica. Nella prima metà del II secolo d. C., l'astronomo alessandrino Claudio Tolomeo raccolse la summa di tutta la scienza astronomica formulando il sistema geocentrico che da lui prese il nome. Accolse il sistema degli epicicli con deferente eccentrico, con la Terra priva anche di moto rotatorio, cosicché il moto diurno veniva assicurato dalla rotazione della sfera delle stelle fisse trascinante con sé le sottostanti sfere. Accettò il moto precessionale scoperto da Ipparco interpretandolo come una rotazione della sfera delle stelle fisse attorno ai poli dell'eclittica, rotazione che secondo i suoi calcoli si compie in 36.000 anni. Perfezionò la teoria del complesso moto lunare, precisandone l'*inuguaglianza*, poi detta **evezione*, scoperta da Ipparco. Una costruzione geometrico-cinematica mirabile, in grado di riprodurre perfettamente, entro la precisione dell'epoca ($10'$), tutti i moti degli astri regolari e che venne esposto nell'opera denominata, appunto, Μεγάλη σύνταξι ς cioè *Grande costruzione*, rimasta nota poi col nome di **Almagesto.* Un sistema inoltre che s'inquadrava perfettamente nello schema della scienza aristotelica e che rimarrà indiscusso e indiscutibile per 15 secoli.

L'Almagesto costituiva un trattato generale di Astronomia che razionalizzava ed esponeva tutto lo scibile astronomico, contenendo inoltre un catalogo con le posizioni di 1022 stelle, osservate da Ipparco e in parte forse dallo stesso Tolomeo. Un trattato che rimase la fonte di ogni sapere e base per ogni verifica dei moti celesti.

Tolomeo fu l'ultimo grande astronomo della gloriosa scuola alessandrina. La grande cultura ellenistica era in rapido declino. Dopo il vano tentativo di Cleopatra di riconquistare l'indipendenza all'Egitto (I secolo a. C.), il dominio romano sull'area di quella cultura divenne assoluto. Più che l'ignoranza scientifica dei Romani fu il fanatismo religioso a causarne la fine: da una parte il rifiuto degli autori pagani, non illuminati dal vero Dio, dall'altra l'interpretazione letterale della Bibbia. Di fronte allo spirito conciliativo degli scrittori cristiani greci, che presentano la religione cristiana come una filosofia, anzi la più alta delle filosofie, stanno gli scrittori latini dei primissimi secoli (alcuni per altro ammirevoli per la forza della Fede che li spinse ad affrontare volontariamente il martirio) per i quali la ragione è nemica della Fede (il *certum est quia impossibile est* di Tertulliano, di poco posteriore a Tolomeo) e la filosofia è la madre di tutte le eresie. Il mondo non può essere che quello descritto nelle Sacre Scritture, piatto e sovrastato dalle acque. Un secolo più tardi l'apologista Lattanzio deride quelli che credono che possano esistere gli

antipodi e nel VI secolo Cosma nell'opera *Topografia cristiana* si scaglia contro coloro che pur volendo essere cristiani ritengono, come i pagani, che il cielo sia sferico: la vera forma del cielo è infatti, secondo Cosma, quella del biblico tabernacolo.

L'astronomia nell'alto medioevo

Con l'editto di Costantino, i cristiani da perseguitati divennero persecutori. Nel 380 l'Imperatore d'Oriente Teodosio prescrive, pena gravissime sanzioni, il culto pagano. Nel 389 una furiosa turba di cristiani incitati dal vescovo Teofilo devastò la famosa biblioteca di Alessandria. Iniziò così la lunga notte dell'alto medioevo, particolarmente buia nel mondo latino. Per quanto concerne l'Astronomia, il sistema tolemaico ignorato, l'Almagesto sconosciuto: ogni conoscenza ricondotta ad un livello inferiore a quello pre-ellenistico. Non mancarono in quei secoli alcune men-ti non ottenebrate dal fanatismo. Quali Isidoro di Siviglia (570 - 636 d. C.) che nelle sue *Etimologie*, un'enciclopedia che ebbe grande diffusione nel medioevo, accetta la sfericità della Terra; il Venerabile Beda (672 - 736 d. C.) che nel trattato *De natura rerum*, riporta le affermazioni di Plinio circa la Terra sferica ed i sette pianeti che seguono attorno a questa orbite circolari. Ma le cosmografie di ispirazione cosmatiana, strettamente vincolate alla Bibbia continuavano a dilagare. Solo dopo il timido risveglio culturale con le scuole palatine istituite da Carlo Magno nell'ambito del ricostituito impero romano d'occidente con la nuova connotazione di Sacro, concezioni scientifiche cominciano a diffondersi. Nel IX secolo appare un'opera di anonimo dal titolo *De mundi coelestis terrestrisque constitutione liber* dove l'autore descrive il cosmo secondo le vedute di Isidoro e di Beda, ma in più dichiara provata la sfericità della Terra dal fatto che la durata del giorno chiaro è diversa alle diverse latitudini. A cavallo fra i due millenni troviamo poi la figura di Gerberto d'Aurillac, matematico e cultore di Astronomia che fu papa dal 999 al 1003 col nome di Silvestro II (il papa dell'anno mille) il quale a scopo didattico si valse di modelli delle sfere celesti e dei cerchi planetari. Scrisse inoltre un *Liber de astrolabio*, mostrando un'attenzione alla tecnica sicuramente appresa durante un suo lungo soggiorno nella Spagna islamica. Ma la rinascita dell'Astronomia nell'Europa cristiana può essere convenzionalmente datata col 1175, quando apparve la prima versione latina dell'Almagesto tradotto dall'arabo ad opera di Gherardo da Cremona della scuola dei traduttori di Toledo, celebre centro d'incontro delle tradizioni cristiana, islamica ed ebraica.

La scienza e in generale la cultura greco-latina era rimasta ibernata nelle biblioteche bizantine delle terre che furono culla della cultura ellenistica e che fra il VII e l'VIII secolo divennero terre islamiche. Ivi gli Arabi appresero l'Astronomia e la traghettarono, tre secoli più tardi, nel mondo cristiano. Fino al VII secolo gli Arabi erano un popolo nomade rimasto fuori dai grandi circuiti culturali; da metà di quel secolo avevano infatti esteso il loro dominio in tutta l'area della cultura ellenistica, all'infuori di Grecia, Magna Grecia, Tracia ed Asia Minore rimaste all'Impero bizantino, e si erano spinti fino all'occidente visigoto, cioè fino alla penisola Iberica e ad oriente fino all'Indo. Poterono quindi attingere anche alle nozioni astronomiche indiane. Sotto i Califfi abassidi, grazie al tesoro delle biblioteche sparse in quei territori, fiorirono le scienze, in particolare la Matematica, l'Astronomia e l'Ottica (per quest'ultima disciplina si veda **Luce*). Nel IX secolo, mentre nel mondo del Sacro Romano Impero e in quello Bizantino si cominciava appena ad osare di ammettere la sfericità della Terra, gli astronomi arabi fecero misure della circonferenza terrestre col metodo di Eratostene convenientemente aggiornato (vedi *Terra*): le opere di Archimede, Euclide, Apollonio, Tolomeo, . . . furono tradotte in arabo; del resto il nome stesso di Almagesto dato al trattato di Tolomeo è di origine araba.

Come dice Dreyer nella sua Storia dell'Astronomia, la conoscenza dell'astronomia tolemaica si sparse dall'Ebro all'Indo. Il più noto astronomo arabo è Al Battani, latinamente Albatenius, che nel IX secolo fece una nuova determinazione dell'obliquità dell'eclittica, rilevò che la longitudine dell'apogeo solare (oggi parleremmo di afelio) era notevolmente avanzata dai tempi di Tolomeo, scoprendo così la rotazione della linea degli absidi, cioè l'avanzamento del perielio.

La timida rinascita della scienza nel basso medioevo.

Gli Arabi fecero da ponte fra l'antica cultura e la sua riscoperta; oggi si direbbe che operarono un *by pass.* Con la riscoperta dell'Almagesto nella traduzione latina di Gherardo da Cremona (1175), le conoscenze astronomiche si diffusero rapidamente nel mondo cristiano. Anche se nel 1210 il Concilio provinciale di Parigi, dominato dagli ecclesiastici, proibì l'insegnamento della dottrina aristotelica alla Sorbona, e nel 1231 Gregorio IX dichiara la condanna provvisoria della *Fisica* e della *Metafisica* di Aristotele fin a che tali libri non vengano corretti (*donec corrigantur et expurgantur*), il flusso della nuova cultura divenne inarrestabile. Nel 1250, nella Spagna *reconquistada*, Alfonso X, Re di Castiglia, detto *el Sabio*, riunì a Toledo una cinquantina di dotti arabi, cristiani ed ebrei al fine di rivedere le basi dell'Astronomia. Ne sortì la redazione delle **Tabulae alphonsinae* che servirono al calcolo delle effemeridi per oltre tre secoli. Ad Alfonso X si devono pure i **Libros del saber de Astronomia*, enciclopedia delle conoscenze astronomiche dell'epoca. Nella stessa epoca Federico II ordinò numerose traduzioni di opere greche; Giovanni di Holywood (oggi Halifax, Inghilterra), noto come Sacrobosco redasse un trattato - il *De sphaera mundi* - che non era altro che un compendio dell'Almagesto, accessibile però ai meno esperti nelle tecniche astronomiche e che ebbe per secoli larghissima diffusione contribuendo in modo decisivo alla diffusione del sistema tolemaico.

La conoscenza del mondo sensibile che si insegnava prima nelle *scholae* di origine carolingia e poi nelle nascenti università era inquadrata nella verità rivelata cristiana: questo il concetto base della sapienza *scolastica* sviluppatasi dal X al XIV secolo.Inizialmente la ragione era ammessa solo nella misura in cui aiutava ad accettare le verità di fede, ma già con Gerberto D'Aurillac (papa Silvestro II, 999 - 1003) si trova l'indagine scientifica condotta indipendentemente, e con il monaco Abelardo (1079 - 1142) s'inizia l'opera di conciliazione tra ragione e fede che

sarà portata a compimento un secolo più tardi da Tommaso d'Aquino. Il francescano Ruggero Bacone (1214 - 1294) esce dallo schema aristotelico in cui fino ad allora ogni sapere razionale restava inquadrato: spazza via dalla filosofia naturale la fede cieca nell'autorità, afferma che la conoscenza si acquista con l'esperimento e l'indagine matematica, subendo per questo gravi persecuzioni; studia astronomia e geografia con mente libera sostenendo che la Terra è un punto di fronte all'immensità dei cieli.

Con Tommaso la scolastica raggiunge il suo culmine. L'Aquinate ammette che ci sono due vie per raggiungere la verità: la fede e la ragione. La fede però è infallibile, la ragione no. Comunque per via razionale è possibile raggiungere conoscenze anche elevate, ma c'è la verità rivelata che è inaccessibile alla ragione e qui, in ultima istanza, vale la fede. In tal modo riesce a conciliare la metafisica e la Fisica di Aristotele con la fede cristiana. E la cosmologia tolemaica, così bene inquadrata nella concezione aristotelica, con l'alto e basso assoluti, con la sua contrapposizione fra mondo terreno e mondo celeste, specchio del dualismo corpo ed anima, viene accolta dalla Chiesa.

La razionalità è accolta; ma nella sua espressione aristotelica, fissata una volta per tutte nei suoi testi conciliati col dogma cristiano. È consentito approfondire, sviluppare il pensiero aristotelico-scolastico, ma non certo sovvertirlo.
L'autorità di Aristotele, una volta eccettata dalla Chiesa, non può essere messa in discussione. Questa la concezione che dominerà autoritariamente ogni attività scientifica per oltre 4 secoli.

Menti illuminate, anche di ecclesiastici, continuano tuttavia ad indagare la natura anche al di là dei paletti posti dalla Chiesa. Con l'umanesimo, l'amore per il sapere profano cominciò a divampare inarrestabile e ne furono partecipi perfino le menti più illuminate della gerarchia ecclesiastica. La lingua greca, fino ad allora generalmente ignorata nel mondo latino ed anglo-germanico, cominciò ad essere studiata da molti per l'ansia di attingere direttamente all'antico patrimonio senza l'intermediazione delle traduzioni arabe. Nel secolo XV la ricerca di originali ellenistici divenne frenetica. Verso il 1450, pochi anni prima che i Turchi conquistassero Costantinopoli ponendo fine al più che millenario Impero d'Oriente, Bessarione, arcivescovo di Nicea, in seguito convertito al cattolicesimo, sbarcò a Venezia con una nave carica di migliaia di manoscritti (che costituiranno poi il nucleo della Marciana). Nicolò da Cusa (1401 - 1464), detto anche *Cusano*, vescovo di Bressanone e poi nominato cardinale, sostiene che la Terra non è il centro dell'universo che è infinito e quindi privo di centro. Nell'edificio tomistico della Fisica aristotelica col connesso sistema tolemaico cominciano ad aprirsi delle crepe. Roma avverte il pericolo e diviene sempre più guardinga, oscillando fra papati liberalmente tolleranti e papati severamente retrivi.

Sul piano tecnico è da ricordare che Bessarione propose una riforma del calendario giuliano per riportarlo in fase con l'anno tropico. Paolo Toscanelli che nel 1468 installò la famosa meridiana in S. Maria del Fiore a Firenze; con la precisione assicurata da questa furono fatte nuove determinazioni dell'obliquità dell'eclittica e della precessione degli equinozi. E che inoltre disegnò una mappa geografica della Terra dove l'oceano Atlantico, esteso per 126° in longitudine, divide l'Africa dalla Cina e dall'India e che sarà di base per il progetto di Colombo. Leonardo che fece la prima considerazione astrofisica: "dicono che il Sole non è caldo perché non è di color di fuoco, ma è molto più bianco e chiaro; io rispondo che quando il bronzo è liquefatto e più caldo esso è simile al color del Sole e quando è meno caldo ha più colore del foco".

Tali ricerche e tali istanze di indagine razionale erano isolate in una selva inestricabile di ibridazioni fra osservazioni astronomiche e cosmologie mitologiche, di credulità negli influssi degli astri sulle vicende umane, di magie bianche e nere, di presunte stregonerie ed esorcismi. L'astrologia era sovente invocata per gli affari di Stato ed anche cultori severi della scienza - da Toscanelli a Keplero - non potranno sottrarsi dal compiacere i potenti.

La rivoluzione copernicana.

E siamo alla rivoluzione copernicana. Nicolò Copernico di Torun (1473? - 1543), giovanissimo studiò giurisprudenza a Bologna dove s'interessò anche di Astronomia compiendo delle osservazioni; dopo un breve ritorno in patria frequentò le università di Padova e di Ferrara e qui nel 1503 si laureò in diritto canonico. Divenne poi canonico nel Capitolo del Duomo di Frauenburg e quivi attese alla costruzione del modello del mondo che lo avrebbe reso immortale. Non è dato sapere per qual via Copernico pervenne all'idea eliocentrica. Il moto di rotazione diurna era stato suggerito già da alcuni studiosi, ma un sistema che ponesse la Terra orbitante attorno al Sole era stato proposto solo da Aristarco quasi duemila anni prima ed era rimasto senza seguito. Il sistema fu esposto nell'opera **De revolutionibus orbium coelestium* alla quale Copernico lavorò per decenni. Si decise alla pubblicazione dopo lunga incertezza per la reazione che avrebbe suscitato, e si narra che la prima copia fresca di stampa gli fu portata sul letto di morte, nel 1543. Immenso fu lo scalpore che si levò. La grande maggioranza dei dotti respinse il nuovo sistema: solo pochi ne furono entusiasti sostenitori.

Il **sistema copernicano* risolveva il problema della rotazione diurna della sfera celeste col moto di rotazione della Terra attorno al proprio asse, e ciò eliminava la necessità del trascinamento di tutte le sottostanti sfere da parte della sfera delle stelle fisse. Circa il moto apparente dei pianeti, il moto orbitale della Terra risolveva il problema dell'**anomalia planetaria* (detta anche *seconda inuguaglianza*), ma restava inspiegata l'anomalia zodiacale, o prima inuguaglianza, che dopo si saprà esser causata dall'ellitticità delle orbite. Per questa Copernico, ancora vincolato al dogma dei moti circolari, dovette conservare il sistema degli epicicli, anzi complicando il modello tolemaico in quanto dovette ricorrere ad un doppio epiciclo, il maggiore ed il minore. Copernico aveva conservato quanto poteva dell'antico. Il suo sistema non era più semplice di quello tolemaico e nemmeno consentiva di ricavare effemeridi più precise.

Nel 1551 vennero infatti calcolate da E. Reinhold le prime tavole, che furono dette *prutenicae*, basate sul

sistema copernicano; ma non risultarono più precise delle precedenti. L'accettazione del nuovo sistema scaturiva più da un atteggiamento filosofico che non da un ragiona-mento puramente scientifico, cioè non scaturiva necessariamente dai fenomeni osservati. Galileo che pochi decenni più tardi sarà il più deciso e razionale sostenitore del sistema copernicano affermerà a proposito dell'ipotesi eliocentrica: ". . . né posso abbastanza ammirare l'eminenza dell'ingegno di quelli che l'hanno stimata vera ed hanno con la vivacità dell'intelletto loro fatto forza tale ai propri sensi, che abbiano potuto anteporre quello che il discorso gli dettava a quello che le sensate esperienze gli mostravano apertissimamente in contrario." E Copernico stesso nel *De revolutionibus* non trova di meglio per privilegiare il proprio sistema che dire *In mezzo a tutti sta il Sole. In effetti, chi in questo tempio bellissimo potrebbe collocare questa lampada in un luogo diverso o migliore di quello da cui possa illuminare tutto quanto insieme?* Anche se molti lo respingevano come assurdo, il sistema copernicano poteva essere accettato senza eccessiva resistenza come artificio matematico per calcolare in modo migliore le posizioni dei corpi celesti. Con questa limitazione poteva superare lo sbarramento autoritario posto dalla Chiesa. Lo scontro era sull'accettazione quale realtà fisica del mondo. Tant'è vero che per prudenza Andreas Osiander che curò a Norimberga la stampa del *De revolutionibus* inserì, all'insaputa dell'autore, una prefazione dove precisava che le ipotesi esposte non avevano la pretesa di essere vere, ma venivano proposte solo per facilitare i calcoli astronomici. D'altra parte il moto della Terra appariva in contrapposizione con fenomeni evidenti, come la caduta verticale dei gravi. Solo la critica galileiana, eliminerà tali contraddizioni.

Il sistema eliocentrico offriva la possibilità di stabilire le distanze relative dai vari pianeti dal Sole, distanze che tuttavia si trovavano già nascoste nei rapporti fra i diametri dell'epiciclo e quello del deferente del sistema tolemaico.

	Copernico	Valore moderno
Mercurio	0,3763	0,3871
Venere	0,7193	0,7233
Terra	1,0000	1,0000
Marte	1,5198	1,5237
Giove	5,2192	5,2028
Saturno	9,1743	9,5388

Quanto alla distanza del Sole, Copernico accetta il valore di Aristarco: parallasse 3' pari a 1142 raggi terrestri. Il fatto è che il raggio della Terra era ancora notevolmente incerto.

Fra i primi sostenitori della teoria copernicana ricordiamo il domenicano eretico Giordano Bruno che accettava il Sole quale centro del moto ma lo rifiutava quale centro dell'universo perché - sosteneva - questo è infinito e popolato da altri mondi simili al nostro. Affermazione questa che concorse con quelle più direttamente teologiche a portarlo al rogo. Mentre non mancavano autori che disquisivano ancora su numero e proprietà delle sfere omocentriche, Bruno salutò con entusiasmo la scoperta di Tycho che le comete attraversavano queste pretese barriere che ci avrebbero dovuto racchiudere. E dissentiva da Copernico che aveva conservato la sfera delle stelle fisse, che scompare nella concezione di un universo stellare infinito. E poco dopo Tommaso Campa-nella, anche lui domenicano eretico, pur avendo perplessità sul sistema copernicano, fu combattivo sostenitore del diritto di Galileo ad esporre e propagandare il proprio convincimento. Ricordiamo ancora W. Gilbert, autore dell'opera *De Magnete* apparsa nel 1600, primo studio sistematico sulle forze magnetiche, il quale accettò la rotazione della Terra sembrandogli più ragionevole ammettere che a girare in 24 ore fosse un piccolo corpo come la Terra e non l'immenso mondo celeste.

Fra i più convinti "copernicani" in ambito accademico troviamo Georg Rheticus, professore di matematica a Wittenberg ed allievo devoto di Copernico; e più tardi Giordano Bruno, Galileo, Keplero. Ma la maggior parte dei docenti di Matematica e Astronomia delle università, dove la dottrina aristotelica ed il sistema tolemaico erano insegnamenti curriculari, erano fieramente avversi. La Chiesa di Roma era impegnata nella lotta contro la riforma protestante e col Concilio di Trento (1545 - 1563) aveva messo in atto la controriforma. Respinte in teologia le innovazioni dei protestanti, prima fra tutte l'interpretazione individuale delle Sacre Scritture, riaffermò se stessa, perennemente illuminata dallo Spirito Santo, quale custode della rivelazione, quale unico magistero della Verità.

In filosofia naturale la verità era quella aristotelica nella versione tomistica. Non per niente nel 1565 Pio V proclamò Tommaso d'Aquino dottore della Chiesa. Messa in atto una rigida censura sulle espressioni del pensiero, come poteva sfuggire un'ipotesi sulla struttura del mondo, quale quella copernicana, che demoliva l'edificio tolemaico che Tomma-so aveva conciliato con la teologia cristiana e così saldamente ancorato alla Fisica aristotelica? Inoltre l'uomo veniva a perdere la sua posizione di privilegio, al centro dell'universo. Inevitabile quindi lo scontro con Galileo, sostenitore con acuti ragionamenti del sistema copernicano e demolitore della Fisica aristotelica.

In ambito protestante il rifiuto del sistema copernicano fu anche più accanito. Scrive Lutero: *Il folle* [Copernico] *vuole sovvertire tutta la scienza astronomica, ma come mostrano le Sacre Scritture, fu al Sole e non alla Terra che Giosué ordinò di fermarsi.* È curioso notare che fu un monaco agostiniano - Diego de Stuniga, teologo a Toledo - a sostenere nel 1584 che il moto della Terra si poteva desumere da certi passi della Bibbia. Si trattava di un'interpretazione molto forzata e comunque l'opera di Stuniga fu poi messa all'indice dei libri proibiti, insieme al *De Revolutionibus.*

L'affermazione del sistema eliocentrico.

La rivoluzione astronomica che sostituisce il sistema geocentrico con quello eliocentrico è legata a tre grandi nomi, oltre Copernico: Tycho, Galileo e Keplero.

Tycho Brahe (1546 - 1601) nell'isoletta di Hween, concessagli da Re di Danimarca, costruì una vera cittadella dell'Astronomia installandovi perfezionatissimi strumenti di sua ideazione (sestanti, quadranti murali ecc.) che egli descrisse nell'opera *Astronomiae instauratae mechanica* e gli consentirono di superare di gran lunga la precisione fino ad allora raggiunta nella misura delle posizioni degli astri. Ottenne posizioni entro 1', di fronte ai 10' cui si giungeva da

Tolomeo in poi. Tale successo fu dovuto alla stabilità degli strumenti (fino ad allora mobili) ed all'uso della scala ticonica. Fu anche il primo a prendere in considerazione la rifrazione nella determinazione della posizione degli astri. Con le posizioni così determinate compilò due cataloghi stellari che sarebbero stati di importanza decisiva. Osservò la famosa *nova* del 1572 (che oggi sappiamo essere stata una supernova): l'esito negativo del tentativo di misurarne la parallasse annua mostrò che si trovava a distanza assai maggiore della Luna e quindi apparteneva al mondo celeste e non era, come si era creduto per le novae un fenomeno atmosferico. Osservò anche varie comete: anche queste, per assenza di effetto di parallasse gli risultarono non meteore ma oggetti celesti e arguì che seguono orbite attorno al Sole ed il fatto che nessuna orbita circolare, o combinazione semplice di moti circolari, riuscisse a rappresentarne la traiettoria nel cielo risultò provare l'inesistenza di sfere cristalline solide. Tycho scoprì inoltre le perturbazioni lunari dette *variazione* ed *equazione annua.* Le principali inuguaglianze del moto della Luna divennero così note ad eccezione dell'accelerazione secolare che sarà scoperta un secolo più tardi.

Tycho rifiutò il sistema copernicano perché riteneva il moto della Terra in contrasto con le Scritture, sia perché l'assenza di parallasse stellare comportava una distanza eccessivamente grande fra l'orbita di Saturno e la sfera delle stelle fisse, sia infine per la presunta legge aristotelica del "moto naturale" per cui se la Terra fosse in moto rotatorio, un corpo cadente dall'alto di una torre dovrebbe cadere lontano dal piede della verticale verso ovest. Formulò un sistema ibrido, che resterà noto come *Ticonico*: la Terra al centro dell'universo; il Sole orbitante attorno alla Terra e tutti e cinque i pianeti orbitanti attorno al Sole. Non era altro che l'estensione dell'antico sistema, detto anche egizio, di Eraclide Pontico.

Si tenga presente che avendo mostrato le comete essere corpi celesti, Tycho aveva eliminato dall'Astronomia il concetto delle sfere celesti solide. Un merito accennato più volte da Keplero nelle proprie opere.

J. Kepler (1571 - 1630), allievo ed amico di Tycho dopo aver studiato teologia a Tübingen e poi Astronomia e Matematica come allievo del copernicano P. Mästlin, fu prima matematico a Graz, ma in seguito al bando contro i protestanti si trasferì a Praga, sempre nell'ambito dell'Impero, dove fu assistente di Tycho e nel 1601 gli successe nella carica di *matematico cesareo* dell'Imperatore Rodolfo II. Diversamente da Galileo, non indagò la struttura del mondo senza pregiudizi, anzi aveva un atteggiamento di fondo mistico che lo portava a coltivare pitagoricamente il simbolismo soprannaturale dei numeri ed a vedere nelle forme geometriche gli attributi divini. Nell'opera comunemente nota come *Mysterium cosmographicum* (1595) espone, infatti, un modello del sistema solare in cui stabiliva una relazione fra i cinque solidi regolari (cubo, tetraedro, ottaedro, dodecaedro e icosaedro) e le distanze dei cinque pianeti. Si occupò anche di ottica dove portò un contributo fondamentale fondando l'ottica geometrica e la teoria delle lenti e del cannocchiale (vedi **Luce*).

Fu convinto copernicano e avendo in mano il tesoro delle osservazioni del maestro, si mise a studiare l'orbita di Marte. Le osservazioni di Tycho misero in evidenza che deferenti ed epicicli non riuscivano a rappresentare il moto nel cielo di questo pianeta, che per l'accentuata eccentricità orbitale era quello che meglio si prestava a rivelare le insufficienze dei moti circolari. Abbandonando gli epicicli, tentò orbite circolari convenientemente eccentriche (ipotesi che da lui detta vicaria): il risultato migliore era ottenuto ponendo il Sole decentrato di 0,09 lungo la linea delle absidi. Ma fra le longitudini calcolate con tale modello e quelle osservate da Tycho trovò differenze che arrivavano a 8′. Solo la precisione di Tycho aveva quindi consentito di rilevare tali differenze. Dopo altri tentativi, arrivò per gradi alla scoperta delle orbite ellittiche e a dettare le sue tre famose **leggi*, pubblicate fra il 1609 (1ª e 2ª) ed il 1619 (3ª).

Lo stesso Keplero calcolò tavole basate sulle orbite ellittiche: le **Tabulae rudolphinae*, pubblicate nel 1627, che andarono a sostituire le copernicane *prutenicae*.

Galileo (1564 - 1642) dopo aver studiato medicina si dedicò alla matematica ed ebbe la cattedra in tale materia all'Università di Pisa. Qui compì le famose esperienze di caduta dei gravi dalla torre pendente e scoprì l'isocronismo del pendolo. Per un dissidio con la famiglia dei Medici, ottenne nel 1592 l'analoga cattedra a Padova dove per dovere d'ufficio insegnò l'Astronomia tolemaica benché fosse ormai convinto dell'ipotesi copernicana. Nel 1609, basandosi su descrizioni raccolte di uno strumento ottico inventato in Olanda, si costruì alcuni cannocchiali col migliore dei quali iniziò ad osservate il cielo. Annunciò le meravigliose scoperte in tal modo fatte nel **Sidereus Nuncius* pubblicato nel 1610. Gran parte delle verità tolemaico-aristoteliche venivano demolite. Le montagne sulla Luna violano il principio della perfetta forma sferica dei corpi celesti, la scoperta di 4 satelliti di Giove mostra che un corpo diverso dalla Terra può essere centro di moto. Rivelò inoltre che la Via Lattea è una congerie di minutissime stelle. Lo scalpore fu enorme e gran parte degli aristotelici rifiutarono tali scoperte ascrivendole alla fallacia dello strumento. Con la scoperta delle macchie solari, fatta poco dopo, Galileo dette un altro colpo all'aristotelismo mostrando fallace il concetto della perfezione e immutabilità dei corpi celesti.

Nel 1610 Galileo tornò nella sua Toscana come Matematico e Filosofo del Granduca. Quivi compì ancora osservazioni e pubblicò varie opere espletando anche un'alacre attività a sostegno del sistema copernicano con conversazioni e dibattiti in ambienti colti di Firenze e Roma. Ma la Chiesa romana, che con Innocenzo VIII aveva inasprito la lotta contro le eresie, si rese conto del pericolo che la nuova visione della scienza e del mondo rappresentava per la propria egemonia culturale e politica. Galileo sosteneva che le Sacre scritture hanno un fine diverso da quello di insegnare com'è fatto l'universo e non vi si devono cercare verità scientifiche: queste vanno lette nel gran libro della natura che ci sta aperto davanti.

Nel 1616 i teologi del S. Uffizio (dal 1588 tale era il nome preso l'inquisizione romana) dichiararono la proposizione *che il Sole sia centro del mondo e per conseguenza immobile di moto locale* stolta e assurda in filosofia e formalmente eretica in quanto contraddice in molti luoghi le sentenze della Sacra Scrittura nel signi-

ficato letterale e secondo la comune esposizione dei Santi Padri e dei dottori in teologia. Eretica l'affermazione che la Terra sia animata di moto rotatorio. D'altra parte, oltre le affermazioni bibliche anche l'intelletto umano era arrivato a considerare impossibile tale moto: come osare contraddire Aristotele per cui il moto di rotazione non è naturale per la Terra, non essendo naturale per la materia di cui è formata la quale tende naturalmente verso il basso cioè verso il centro della Terra e del cosmo. Ed è questa tendenza che ha obbligato la forma sferica.
Il *De Revolutionibus* entrò nell'Indice dei libri proibiti.

Nello stesso 1616 il S. Uffizio, tramite il cardinale R. Bellarmino, ammonì Galileo ad abbandonare la teoria copernicana ed a non sostenerla né insegnarla in qualsiasi modo (*quovis modo*), a voce o per iscritto. L'ammonizione era severa: qualora l'accusato si fosse ricusato di acconsentire lo si sarebbe dovuto incarcerare (*si vero non acquiverit, carceretur*). Gli storici sono molto in dubbio se l'ammonizione sia stata veramente contestata a Galileo nella forma messa a verbale, dato che nel processo che 16 anni più tardi ne seguì, non fu prodotto l'originale di tale verbale ma solo una minuta priva delle firme. Galileo continuò con prudenza le sue ricerche, ed alcuni anni più tardi, confortato dal giudizio favorevole di alti prelati illuminati e soprattutto fidando nella benevolenza del nuovo Papa, Urbano VIII, il fiorentino Maffeo Barberini che aveva più volte, da cardinale, manifestato apprezzamento verso l'attività dello scienziato, pubblicò l'opera principe, il manifesto della dottrina copernicana e della nuova scienza. Il famoso **Dialogo sopra i massimi sistemi*, pubblicato a Firenze nel 1632 con l'imprimatur della Chiesa.

L'opera risultò però sommamente pericolosa. L'atteggiamento del Papa dapprima ambiguo (vedi *Urbano VIII*) fu poi improntato a severità e Galileo, accusato di aver violato l'ammonimento e di averlo taciuto al censore ecclesiastico, fu processato a Roma e condannato. Il processo, con Galileo nelle carceri del S. Uffizio, durò dal 30 aprile al 22 giugno 1633, quando fu pronunciata la sentenza. Vecchio e impaurito, pronunciò in ginocchio la pubblica abiura: ". . . *Sono stato giudicato veementemente sospetto di eresia, cioè di aver tenuto e creduto che il Sole sia centro del mondo e che la Terra non sia centro e si muova. . . .Con cuor sincero e fede non finta abiuro, maledico e detesto li suddetti errori e eresie . . .e giuro che per l'avvenire non dirò mai più né asserirò, in voce o in scritto, cose tali per le quali si possa aver di me tal suspizione; ma se conoscerò alcun eretico o che sia sospetto di eresia lo denonziarò a questo Santo Offizio."* Dovette anche promettere di fare il delatore! Per questa abiura la condanna fu mite: carcere perpetuo. Considerato che si trattava del matematico del cattolicissimo Granduca di Toscana, il carcere fu commutato nel domicilio coatto nella sua villa ad Arcetri, sotto la stretta sorveglianza dell'inquisitore di Firenze che applicò il divieto di ricevere visite con particolare severità nei confronti dei suoi discepoli.

Nell'esilio di Arcetri Galileo attese all'ultima sua grande opera: i *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze.* Qui completando, ampliando e dando forma matematica alle precedenti conclusioni in gran parte già accennate nel *Dialogo*, indaga la struttura della materia e pone le basi della dinamica col principio di relatività del moto (relatività galileiana: con esperimenti compiuti all'interno di un sistema di riferimento è impossibile riconoscere se il riferimento è in moto rettilineo uniforme) dando il colpo decisivo alla fisica aristotelica. Implicitamente fu l'opera più demolitrice della vecchia dottrina, opera che sarebbe poi stata sviluppata e completata mezzo secolo dopo da Newton. L'inquisitore di Firenze non era in grado di comprendere il contenuto rivoluzionario dei *Discorsi*: dal momento che non si parlava né di Copernico né del moto della Terra, lasciò che il manoscritto uscisse: comunque Galileo per prudenza, tramite amici lo affidò ad uno stampatore olandese, fuori portata del S. Uffizio.

Galileo aveva demolito la fisica aristotelica mostrando false le argomentazioni contro il moto della Terra, *in primis*, per quanto concerne il moto diurno, quella della caduta verticale dei gravi. Tuttavia non aveva potuto provare la veridicità di tale moto. La prova incontrovertibile sarebbe stata trovata più tardi appunto con gli esperimenti di caduta dei gravi da parte di G. B. Guglielmini nel 1791 (vedi Terra) e nel secolo successivo con il famoso pendolo di *Foucault. Circa il moto orbitale, la prova sarebbe stata fornita da Bradley un secolo dopo con la scoperta dell'aberrazione della luce. La dinamica sarà sviluppata poi da Isacco Newton (1642 - 1727) con l'enunciazione dei principi della dinamica e della legge di gravitazione esposti nell'opera *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* apparsa nel 1687.
Con tale opera nasce la dinamica dei moti celesti.

La meccanica, iniziata da Galileo, prende forma rigorosa con Newton e le leggi dei moti celesti trovate empiricamente da Keplero divengono una conseguenza della legge di gravitazione. Sorge il problema dell'azione a distanza, già presente in Keplero il quale parla di *anima motrix* nel Sole e di forze magnetiche (nel 1600 era apparso il *De magnete* di Gilbert).

L'*Almagesto*, il *De Revolutionibus*, il *Dialogo sopra i massimi sistemi*, L'*Astronomia Nova*, l'*Harmonices Mundi* ed i *Principia* segnano tappe fondamentali dell'evoluzione dell'Astronomia e della scienza in generale. Fra Tolomeo a Copernico sono passati 1400 anni: da Copernico a Newton meno di 150. I progressi da qui in poi divengono talmente rapidi che in questa trattazione si deve di necessità andare per rapidi cenni.

Frattanto nuove meraviglie celesti contribuivano a infrangere vieppiù il tabù dell'incorruttibilità dei cieli. Oltre le montagne sulla Luna e le macchie sul Sole mostrate da Galileo, nel 1596 veniva scoperta la variabilità di luce di una stella della Balena, che periodicamente a poco a poco scompariva alla vista per riapparire dopo molti mesi. E nel 1667 fu scoperta una seconda stella di luce variabile, che, regolare come un faro, ripeteva le sue variazioni col periodo di 2 giorni e 21 ore. Si annunciava il capitolo delle stelle variabili che tre secoli più tardi risulterà basilare per le indagini sulla natura delle stelle e sul divenire del cosmo.

C. Hevelius (1611 - 1687) fu l'ultimo grande osservatore con strumenti privi di ottiche. Con grandi quadranti e sestanti da lui stesso costruiti misurò le posizioni di gran numero di stelle con precisione che gareggiava con quelle effettuate con l'ausilio del cannocchiale. Usò però il

cannocchiale per le osservazioni non astrometriche: con lui nasce, infatti, la topografia lunare (vedi *Selenografia*). Ma il cannocchiale progrediva rapidamente, specie per merito di Huygens e di G. Campani il quale costruì obbiettivi impareggiabili per l'epoca. Onde ridurre l'aberrazione di sfericità ed il cromatismo, si usavano rapporti focali molto grandi e quindi tubi molto lunghi e addirittura cannocchiali "in aria". Nel 1671 Newton ideò il telescopio riflettore, esente da cromatismo, e ne costruì alcuni esemplari.

Il primo catalogo che superò in precisione quello di Tycho fu dovuto a J. Flamsteed, primo direttore dell'Osservatorio di Greenwich: in base ad osservazioni effettuate con quadranti murali muniti di cannocchiale pubblicò nel 1725 un catalogo di 2935 stelle. Dalla precisione di $1'$ di Tycho sui era passati a $10''$, grazie non solo al cannocchiale, ma anche all'uso dell'orologio a pendolo, ideato da Huygens pochi anni prima.

Il cannocchiale aveva intanto reso possibile un altro risultato fondamentale. Innovando sull'antico metodo di Aristarco, era stata ottenuta la prima misura col metodo moderno della distanza del Sole. Risultato ottenuto nel 1672 da G.D. Cassini e M. Richer, che prendendo come base la distanza fra Parigi e Cayenna avevano misurato la parallasse di Marte " (vedi *Unità astronomica*) e da questa ricavata la parallasse solare in $9{,}5''$, cioè circa 21700 volte il raggio terrestre (in errore solo dell'8%, una precisione mirabile per l'epoca). Un enorme progresso rispetto ai $3'$ da quasi duemila anni ritenuti la migliore approssimazione. Siccome Snellius nel 1614, e con maggior precisione J. Picard nel 1670, avevano fatto col metodo di Eratostene la prima misura moderna della circonferenza meridiana terrestre, ottenendo, in unità moderne, $40.033\ \mathrm{km}$, la scala del sistema solare divenne così nota.

Gli sviluppi post newtoniani.

Nel 1705 Halley nell'opera *Astronomiae cometicae synopsis* annunciava il ritorno della cometa del 1682 per l'inverno 1758-59. Con la scoperta della periodicità di alcune, le comete entrarono a far parte dei corpi permanenti del sistema solare. Le strane e misteriose traiettorie delle comete risultarono spiegate come proiezione sulla sfera celeste di moti ellittici kepleriani.

Dalla legge di gravitazione newtoniana e dai principi della dinamica nasce la disciplina che sarà poi detta **Meccanica celeste* e che sarà sviluppata fra la metà del XVIII secolo e gli inizi del XIX da Clairaut, Laplace, Lagrange, Gauss.

Accanto a questi sviluppi teorici che rappresentano una fondamentale innovazione scientifica, le osservazioni fornivano sempre nuove informazioni decisive o rivelavano imprevisti aspetti del cosmo.

Nel 1676 O. Römer dall'osservazione dei tempi di rivoluzione dei satelliti di Giove dedusse la velocità finita della luce ottenendo, in unità moderne, $220.000\ \mathrm{km/s}$. La precisione delle sue osservazioni era stata notevolmente accresciuta dall'aver egli usato per primo il telescopio montato equatorialmente. Questo risultato permise a Bradley pochi decenni più tardi di interpretare correttamente il piccolo spostamento periodico annuo delle stelle da lui rilevato osservando la γ Draconis in epoche diverse dell'anno nel tentativo, vano, di misurarne la parallasse: aveva rilevato l'**aberrazione della luce*, scoperta da lui comunicata nel 1727. Poco dopo, con l'assidua osservazione, scoprì il fenomeno della **nutazione*. Le precise misure di posizione di oltre 3000 stelle da lui effettuate consentiranno a Bessel di redigere e pubblicare nel 1818 un catalogo di precisione fino ad allora inuguagliata.

Nel 1718 Halley annunciò che le posizioni di alcune stelle splendenti erano indubbiamente variate dai tempi di Tolomeo. Aveva scoperto il **moto proprio delle stelle*, fino ad allora considerate *fisse.* Le ricerche sistematiche sui moti delle stelle saranno iniziati poco dopo da T. Mayer.

Nel frattempo era entrato in scena Wilhelm Herschel (1738 - 1822), tedesco emigrato in Inghilterra. Si costruì telescopi riflettori di dimensioni mai prima raggiunte. Con tali strumenti scoprì nel 1781 Urano, raddoppiando di colpo l'estensione del sistema planetario. La fama raggiunta con tale scoperta gli consentì di costruirsi un potente riflettore di $1{,}80\ \mathrm{m}$ col quale compì memorabili ricerche che segnarono la prima grande svolta nel campo dall'Astronomia dai tempi di Galileo e Keplero. Fra queste ricorderemo le osservazioni e studi sulle **stelle doppie*. La prima di queste - Mizar - era stata scoperta da Benedetto Castelli, discepolo di Galileo, anche se il merito è soli-tamente attribuito a G.B. Riccioli che nel 1650 trattò di Mizar nell'*Almagestum Novum*. All'epoca di Herschel ne erano state elencate 72 e si discuteva ancora se si trattasse di accoppiamenti prospettici (le cosiddette doppie ottiche) o di stelle realmente vincolate tra loro come sostenevano Ch. Mayer e J. Lambert. Herschel misurando per numerose coppie le posizioni reciproche nel tentativo di rilevare la parallasse annua. Scoprì il moto orbitale costatando che seguiva le leggi di Keplero: con la comunicazione dei suoi risultati (1803) la legge di gravitazione di Newton si mostrò veramente legge universale. Lo studio delle orbite delle stelle doppie, o binarie, consentirà più avanti di misurare le masse delle stelle. Con i suoi conteggi stellari rivelò l'esistenza della **Galassia*, quale insieme di stelle appiattito e di enorme estensione di cui il Sole fa parte. La spiegazione del fenomeno della Via Lattea proposta pochi decenni prima da Th. Wright e da Kant trovava così conferma in precisi dati di osservazione. Col 1785 entrava nella scienza il concetto di Galassia.

Dai moti propri di poche stelle determinò inoltre il moto del Sole rispetto a queste fissandone l'apice in posizione non molto discosta da quella oggi accettata. Scoprì migliaia fra nebulose ed ammassi stellari elencandoli in tre celebri cataloghi apparsi fra il 1786 ed il 1802.

Nel 1758 J. Dollond mise in commercio i primi obbiettivi acromatici potenziando enormemente le possibilità strumentali. Gli effetti si fecero immediatamente sentire sia nell'astronomia planetaria che nell'Astronomia di posizione consentendo un netto miglioramento della precisione. I cannocchiali cessarono di avere quella lunghezza enorme che avevano fino ad allora, necessaria per ridurre l'aberrazione cromatica.

Frattanto, parallelamente con lo sviluppo della teoria newtoniana soprattutto ad opera di Clairaut e d'Alembert (vedi *Meccanica celeste* e *Massa*), si accumulavano rapidamente i risultati sperimentali. Con esperimenti di

laboratorio si ebbe presto un valore approssimativo della costante G che appare nella legge di gravitazione. Fu quindi possibile in base all'accelerazione di gravità ed al raggio di questa stabilire la massa della Terra e anche, essendo nota ormai con accettabile precisione il raggio orbitale, la massa del Sole. Per arrivare a "pesare" le stelle - almeno alcune stelle - ormai mancava solo la distanza. Nota questa, dagli elementi orbitali di una doppia sarebbe stato possibile stabilire la massa totale della coppia. E qualora si conoscessero le orbite assolute, le due singole masse.

Un traguardo fondamentale: la distanza delle stelle

Dal tempo di Galileo la parallasse delle stelle era il Santo Graal degli astronomi. Dapprima per avere una prova del moto orbitale della Terra; dalla fine del '600 in poi, non essendo più dubbia la validità della teoria eliocentrica, lo scopo era quello di misurare la distanza delle stelle. Il tentativo di Bradley sopra accennato e che lo portò alla scoperta dell'aberrazione non è che uno dei tanti. Il successo - che fu una tappa fondamentale nella storia dell'Astronomia - fu raggiunto da F. Bessel nel 1838, quando con il suo **eliometro* riuscì a misurare la parallasse della 61 Cygni, scelta perché il forte moto proprio la indicava come stella vicina. La parallasse risultò 0,31" ± 0,02" e quindi una distanza di 3,3 pc: 700 mila volte la distanza del Sole. Di tale successo Bessel dette comunicazione all'Accademia delle Scienze di Königsberg il 10 ottobre 1838 e la relazione apparve sulle *Astronomische Nachrichten* il 13 dicembre. La scalata all'universo stellare era cominciata.

Veramente qualche tempo prima di Bessel, F. Struve, capostipite di una generazione di astronomi famosi, a Dorpat, in Russia, mediante il micrometro filare applicato ad un rifrattore di 20 cm aveva rilevato per la parallasse di Vega 0,26" (oggi sappiamo che è 0,130"); ma non soddisfatto del risultato, nell'attesa di verificarlo, lo pubblicò un anno dopo quello di Bessel. In considerazione anche che era in errore per un fattore 2, di fronte all'errore del 6% della parallasse di Bessel, il risultato di Struve non è entrato nella storia. Anche un terzo uomo arrivò al successo quasi contemporaneamente: Th. Henderson, che nel 1833 aveva raccolto dal Capo di Buona Speranza un gran numero di osservazioni di stelle col cerchio meridiano. Queste misure, fra la quali era nascosta la parallasse dell'Alfa Centauri, furono elaborate solo alcuni anni più tardi, al ritorno di Henderson nella nativa Scozia. Fu allora che per questa stella rilevò una parallasse di 0,11" (il valore moderno è 0,750") e pubblicò il risultato nel gennaio 1839, tre mesi dopo l'annuncio di Bessel. Si noti che Henderson aveva misurato le posizioni col cerchio meridiano e quindi rispetto ai riferimenti fondamentali del cielo; perciò la sua parallasse era assoluta e non relativa come quelle di Bessel e di Struve. Lo stesso Bessel nel 1844 comunicò che il moto proprio di Sirio non era rettilineo uniforme ma oscillante attorno ad una retta con un ben preciso periodo (50 anni) e ne dedusse la presenza di una compagna invisibile - Sirio B - che sarà vista solo nel 1862 quando si ebbe a disposizione un perfettissimo obbiettivo acromatico di grande apertura.

I progressi del XIX secolo.

Il 1° gennaio 1800 Piazzi scoprì il primo **asteroide*, Cerere. Ben presto ne furono scoperti numerosi altri che sembrò andassero a colmare la lacuna che, secondo una legge di **Titius-Bode*, escogitata empiricamente pochi anni prima, esisteva tra Marte e Giove. Frattanto la Meccanica celeste ed il calcolo delle orbite con gli ultimi contributi di Lagrange, Laplace, Gauss si era proposta come concezione omnicomprensiva, in grado di spiegare la grande macchina dell'universo. Verso la metà del XVIII secolo A. Clairaut aveva iniziato lo studio degli effetti gravitazionali nel "moto dei due corpi" indotti da altri corpi molto lontani, cioè aveva iniziato il calcolo delle perturbazioni. Contributi essenziali furono portati tra la fine di quel secolo e la metà del successivo da Laplace, Lagrange, Gauss, Olbers. Lo studio delle deviazioni dall'ellisse kepleriana mostrate da Urano e non spiegabili completamente con le perturbazioni inflitte da Saturno e da Giove, indusse l'inglese J. Adams e il francese U. Le Verrier, indipendentemente uno dall'altro, ad individuarne la causa in uno sconosciuto pianeta orbitante al di là di Urano, calcolandone l'orbita ed un'effemeride: immediatamente cercato, il nuovo pianeta, che riceverà il nome di Nettuno, fu avvistato da J. Galle nel 1846 in grande prossimità della posizione indicata. La scoperta di Nettuno fu un trionfo dell'Astronomia e della Fisica newtoniana e contribuì fortemente all'affermarsi del determinismo laplaciano e del pensiero positivista.

Verso la metà del XIX secolo ebbe inizio un'opera generale di rassegna del cielo. Nel 1822, quasi tre secoli dopo l'esempio del Piccolomini, apparve l'*Atlas novus coelestis* di C. Harding nel quale in 27 carte erano riportate 40 mila stelle fra 90° e −30° di declinazione, per la prima volta senza le consuete figure mitologiche delle costellazioni e senza nemmeno i semplici allineamenti schematici. Quest'opera vide una seconda edizione nel 1856. Nel 1855 fu pubblicato il grande atlante di F. Argelander, noto come **Bonner Durchmusterung*, che contiene oltre 330 mila stelle dell'emisfero boreale ed è collegato con un catalogo che fornisce le relative posizioni e magnitudini. Nel 1883 fu pubblicata l'estensione fino alla declinazione −23°. Atlante e catalogo erano stati concepiti solo come strumenti di reperimento. E come tali hanno facilitato il lavoro di osservazione di numerose generazioni di astronomi fino ai giorni nostri.

Nel 1843 apparve l'*Uranometria nova* di Argelander che in 17 fogli rappresenta tutte le stelle visibili ad occhio nudo dal polo nord fino a −26° dette inizio all'opera di unificazione della nomenclatura. Nel 1863 venne pubblicato da Argelander il grande atlante della *Bonner Durchmusterung,* detta poi semplicemente *BD che con la successiva estensione australe riporta tutte le stelle fino alla decima magnitudine visuale dal polo nord fino alla declinazione −23°. L'atlante della BD ed il relativo catalogo sono ancora oggi strumenti fondamentali di lavoro per gli astronomi. La copertura dell'intero cielo fino al polo sud venne poi assicurata dall'*Uranometria argentina*, pubblicata da B. Gould nel 1879 in base ad osservazioni effettuate all'Osservatorio di Cordoba e che in 14 fogli riporta le stelle del cielo australe fino alla 7ª magnitudine.

Intanto fra il 1830 ed il 1858 erano apparse le *Carte dell'Accademia delle Scienze* di Berlino: opera proposta da Bessel per la ricerca degli asteroidi e costituita da 24 carte della zona equatoriale, una per ogni ora di ascensione retta,

fra $+15°$ e $-15°$ di declinazione. Fu mediante questo atlante che, nella notte del 24 settembre 1846, J. Galle scoprì Nettuno nella posizione indicata da Adams e Le Verrier.

Atlante e catalogo delle BD furono estesi a tutto l'emisfero australe con la *Cordoba Durchmusterung*, catalogo delle stelle fino alla 10ª magnitudine comprese fra $-22°$ e $-90°$ di declinazione basato su osservazioni visuali e pubblicato verso la fine del secolo. Ma per tali vaste opere cartografiche del XIX secolo si veda la voce *Cataloghi.*

Quelle ora accennate sono tutte opere volte ad assicurare la nomenclatura ed il rintracciamento degli astri in cielo. Altra cosa sono i cataloghi di precisione. Con la scoperta dei moti propri, un catalogo non rappresentava più lo stato immutabile del cielo stellato, e tanto meno quanto più è preciso. Per misurare i moti delle stelle bisognava quindi creare un riferimento di base, fissare una situazione istantanea dalla quale partire. A tale impresa si accinse Bessel. Ma creare ex novo un catalogo generale sarebbe stata un'impresa non solo ardua, ma anche vana perché in pochi decenni la situazione sarebbe mutata in misura ignota. Perciò Bessel decise di valersi di osservazioni fatte in precedenza, il più addietro possibile, confrontarle con osservazioni più recenti per determinare i moti propri e quindi ridurre tutte le posizioni ad una medesima epoca. Avendo così le posizioni precise di un certo numero di stelle fondamentali ad una data epoca comune e conoscendone il moto proprio, si sarebbe avuto in futuro un valido riferimento per stabilire gli spostamenti anche delle innumerevoli stelle che nell'ambito di pochi decenni apparivano immobili. Le più remote osservazioni di sufficiente precisione erano quelle fatte da Bradley fra il 1750 ed il 1762: dal confronto di queste posizioni con quelle determinate dal Piazzi fra il 1792 ed il 1813 e pubblicate nel 1814, Bessel redasse il catalogo di oltre 3 mila stelle noto col nome di *Fundamenta Astronomiae* (vedi *Cataloghi stellari*). Titolo quanto mai appropriato, poiché tale opera ha posto le fondamenta di tutta l'astronomia di posizione fino ai giorni nostri.

Ma si voleva disporre di un catalogo "di prima epoca" con un numero maggiore di stelle; di precisione ben maggiore delle opere di rassegna generale di cui si è detto. L'impresa fu realizzata con i famosi cataloghi dell'*Astronomische Gesellschaft* pubblicati fra il 1869 ed il 1924, dove sono date le posizioni di oltre 180 mila stelle fino alla nona magnitudine (vedi *AGK*), basati su osservazioni effettuate in numerosi osservatori e sul *Fundamenta* di Bessel. I moti propri rilevati da tali cataloghi consentirono all'inizio del XX secolo le prime ricerche sulla dinamica della Galassia.

Fra le opere astronomiche di base, non bisogna dimenticare le *tavole* redatte per passare dalla teoria generale dei moti celesti al calcolo delle effemeridi. Tra le tavole che segnano tappe importanti nella storia dell'Astronomia ricordiamo quelle di Tolomeo contenute nell'Almagesto, le tavole *Toledane*, costruite nell'XI secolo dagli Arabi, le *Alfonsin*e, redatte nel XIII secolo per ordine di Alfonso Di Castiglia. Tutte, ovviamente, basate sulla teoria tolemaica. Le *Prutenicae*, calcolate da Erasmo Reinhold, uno dei primissimi pochi copernicani, e pubblicate a Wittenberg nel 1551, appena 8 anni dopo la pubblicazione del *De Revolutionibus* furono le prime basate sulla teoria eliocentrica copernicana. Le *Rudolfine* pubblicate da Keplero nel 1627 furono le prime calcolate in base ai moti ellittici e per oltre un secolo le effemeridi dei pianeti del Sole e della Luna furono calcolate sulla base delle tavole di Keplero. Si cominciò in seguito a redigere tavole specializzate, come quelle per il Sole e la Luna di J. Mayer apparse nel 1752, come le tavole lunari di P. Hansen pubblicate nel 1857 in base ad una più precisa conoscenza del complesso moto lunare e che furono superate nel 1919 da quelle di E. Brown. Nel XX secolo sono apparse anche varie tavole per uso cronologico, come quelle di P. Neugebauer nel 1929.

Intanto col crescere dell'efficienza dei telescopi (i grandi riflettori ed i perfezionatissimi doppietti acromatici) le scoperte celesti si susseguivano. Nel 1844 Lord Rosse col suo "Leviathan of Parsonstown" di 1,82 m, scopriva le nebulose spirali. Nel 1862 col rifrattore di 46 cm veniva avvistato Sirio B, la cui esistenza era stata dedotta da Bessel per via empirico-teorica. Nel 1877 col rifrattore di 66 cm dell'Osser- vatorio di Washington venivano scoperti i due satelliti di Marte. Anche se i progressi nel campo del sistema planetario non erano certo paragonabili all'impetuoso sviluppo delle conoscenze in campo stellare, l'avvi- stamento nel 1846 del pianeta Nettuno nella posizione prevista da Adams e Le Verrier in base alle perturbazioni inspiegabili subìte da Saturno, fu un trionfo della meccanica newtoniana. Ed avevano inizio gli studi tassonomici delle superfici planetarie, in particolare di Marte. Nel 1830 Beer e Mädler pubblicarono la prima mappa areografica, impresa che sarà portata ad alto livello verso la fine del secolo da Schiaparelli, ideatore della nomenclatura marziana che sarà sostanzialmente conservata anche nell'areografia dell'era spaziale.

L'avvento della spettroscopia

Nei primi anni del XIX secolo, gli astronomi cominciarono a disporre di una nuova tecnica che entro pochi decenni si rivelerà potentissima. La spettroscopia. È noto che già Newton aveva studiato la dispersione della luce attraverso un prisma; ma avendo usato una fenditura di ingresso troppo larga aveva ottenuto la dispersione della luce solare nei vari colori senza che apparissero le righe scure che solcano lo spettro. Le osservò l'ottico Fraunhofer nel 1814 che ne elencò centinaia. Constatò inoltre che la Luna, i pianeti ed alcune stelle splendenti, come Procione e Capella, davano uno spettro uguale a quello del Sole; altre invece mostravano solo pochissime righe. Lo studio dello spettro cominciò a mostrare la sua grande potenza d'indagine nel 1859, quando J. Kirchhoff e R. Bunsen comunicarono i loro celebri risultati: un corpo solido incandescente, come un metallo, dà uno spettro continuo. Un gas se è portato a temperatura sufficientemente alta, come una fiamma, dà invece origine a righe luminose isolate che sono caratteristiche della specie chimica. Se, a temperatura sufficientemente bassa, è attraversato dalla luce di una sorgente continua dà nello spettro di questa righe oscure che occupano le stesse posizioni delle righe che è capace di emettere. Lo spettro di un gas si inverte: le righe di emissione diventano righe di assorbimento.

Il 27 ottobre 1959 Kirchhoff e Bunsen presentarono all'Accademia di Berlino una comunicazione che segnò una pietra miliare nella storia dell'Astronomia dando inizio a quella branca che sarà detta *astrofisica.* Molte delle righe che appaiono nello spettro del Sole risultavano le stesse che si producono in laboratorio nella luce di una fiamma che ha attraversato una sostanza gassosa. E le medesime risultavano luminose su un fondo oscuro se la sorgente di luce era la sostanza gassosa stessa.

Fino ad allora sulla struttura fisica del Sole si erano potute fare solo congetture. Ecco l'ipotesi che nel 1858, giusto un anno prima della presentazione dei risultati di Kirchhoff e Bunsen, F. Arago espone la sua opera *Astronomie populaire.* Il Sole è un globo oscuro circondato ad una certa distanza da uno strato gassoso paragonabile all'atmosfera terrestre quando è sede di uno strato continuo di nubi opache e riflettenti. Al di sopra, più o meno lontana, sta una seconda atmosfera, che Arago propone di chiamare *fotosfera*, altamente luminosa che col suo contorno fissa i limiti visibili dell'astro. Le macchie si formerebbero quando nelle atmosfere concentriche si aprono dei varchi corrispondenti che mettono in mostra il corpo oscuro sottostante. Se l'apertura nella fotosfera è alquanto più grande di quella nella sottostante atmosfera riflettente, la macchia nera appare circondata dalla caratteristica penombra. L'aprirsi del varco determina addensarsi della materia fotosferica tutto attorno e ciò darebbe ragione delle chiazze luminose, le facole, attorno ai gruppi di macchie. La fotosfera sarebbe circondata da una terza atmosfera tenuissima che apparirebbe come corona durante le eclissi totali.

I risultati di Kirchhoff consentirono immediatamente di dare inizio ad una prima vera e propria fisica e chimica del Sole. Un primo modello grossolano fu quello di un corpo con le stesse proprietà ottiche di un solido incandescente circondato da uno strato di gas a temperatura più bassa che produce le righe di assorbimento. La fotosfera e sopra questa lo strato invertente. Nel 1877 Secchi affermerà il Sole essere un corpo incandescente la cui superficie esterna presenta tutte le accidentalità proprie di una massa gassosa che assorbe parte della luce proveniente dall'interno.

Lo stesso Kirchhoff, dopo aver individuato le righe caratteristiche di vari elementi chimici, nel 1861 pubblicò un primo atlante delle righe spettrali del Sole con l'identificazione di vari elementi. In particolare vi dette per certa la presenza del ferro e del magnesio Si era arrivati a ciò che era ritenuto impossibile: stabilire la composizione chimica degli astri. Era nata l'Astrofisica.

Subito dopo W. Huggins, col suo spettroscopio visuale applicato ad un modesto telescopio ottenne un risultato fondamentale: trovò che le stelle danno spettri simili a quello del Sole ma con differenze legate alla diversità di colore. Confrontando gli spettri di alcune stelle molto splendenti con una mappa dello spettro di 26 elementi chimici concluse che le stelle sono composte almeno in parte dalla stessa materia del Sole e della Terra. Tale risultato fu pubblicato nel 1863. Nel 1864 fece la sorprendente scoperta che certe nebulose davano, invece dello spettro continuo come il Sole e le stelle, uno spettro a righe luminose, cioè uno spettro di emissione. Quindi, secondo le leggi di Kirchhoff enunciate appena 4 anni prima, queste nebulose erano costituite da gas. Fra le righe di emissione, caratteristiche di nebulose diffuse e di quelle dette planetarie, predominava, insieme alla riga rossa dell'idrogeno (la C di Fraunhofer), una coppia di righe verdi che ancora per decenni non si riuscirà ad attribuire ad alcun elemento chimico conosciuto. Si pensò allora ad un ipotetico elemento detto **nebulio.*

Fra il 1868 ed il 1871 una serie di quattro eclissi totali di Sole è rimasta gloriosa. Nell'eclisse del 18 agosto 1868 P. Janssen poté osservare che le **protuberanze* davano righe di emissione: quindi erano costituite da gas caldo. Considerando i risultati di Kirchhoff enunciati nove anni prima, ritenne che tali righe potevano vedersi anche fuori eclisse. Infatti il giorno successivo riuscì a vedere la riga rossa dell'idrogeno. Allo stesso risultato arrivò indipendentemente N. Lockyer osservando la medesima eclisse e l'*Académie des Sciences* ricevé notizia di entrambi i risultati contemporaneamente nell'ottobre 1868. Nell'eclisse del 7 agosto 1969 il Padre Secchi osservò le protuberanze ponendo la fenditura parallela al bordo del disco: spostandola radialmente poté ottenerne le immagini per sezioni successive, inaugurando così un metodo di osservazione routinario che sarà applicato ancora per quasi un secolo. Nello stesso anno unitamente a L. Respighi iniziava la serie delle osservazioni giornaliere del bordo del Sole. Janssen aveva inoltre osservato tra le varie righe luminose, fra cui una gialla molto vicina alla D del sodio che non si riuscì ad identificare nello spettro di nessuno degli elementi conosciuti. Lockyer allora suppose che fosse dovuta ad un elemento ancora sconosciuto cui dette il nome di elio. Elemento che sarà reperito quasi trent'anni più tardi in minerali di uranio.

Mentre nel 1868 Janssen aveva osservato per la corona uno spettro continuo, nell'eclisse del 1869 l'americano Ch. Young riuscì ad osservare una riga di emissione verde mostrando così che anche la corona era un gas caldo. Una riga che fu poi osservata anche nello spettro delle aurore polari. Per la successiva occasione Young si era preparato ad osservare un fenomeno: se le leggi di Kirchhoff erano valide, le righe di Fraunhofer dovevano essere prodotte da uno strato di gas sovrastante la fotosfera e più freddo di questa, per cui quando la Luna giunge a coprire interamente il disco fotosferico e prima che copra anche il detto strato sovrastante, le righe oscure devono apparire luminose. E constatò, infatti, il meraviglioso fenomeno nell'eclisse del 22 dicembre1870. Era stato scoperto lo **spettro-lampo*. Fu la riprova definitiva delle leggi di Kirchhoff e l'Astronomia fisica poté avanzare su basi sicure.

Nel 1862 Secchi dette inizio mediante un **prisma-obbiettivo* all'osservazione sistematica degli spettri stellari. Osservate migliaia di stelle, giunse alla prima classificazione raggruppando gli spettri in quattro gruppi fondamentali da lui detti "tipi". la classificazione, basata sulla presenza e sull'intensità di determinate righe, risultava anche una classificazione per colore e quindi, come sarebbe risultato ovvio in seguito, una classificazione per temperatura. Venivano distinte quattro classi fondamentali ordinatamente succedentisi dalle stelle più azzurre a quelle più rosse, aggiungendo una classe a parte per le poche stelle

particolari che mostrano righe *di emissione*, cioè luminose anziché oscure (vedi *Secchi*, *classi spettrali del*). Per rudimentale che fosse, la classificazione aveva già un profondo significato fisico. Infatti le classi del Secchi risultarono ordinate secondo la temperatura decrescente e la temperatura è risultata poi essere il parametro predominante nella struttura degli spettri stellari determinando insieme e il colore della stella ed il complesso delle righe di Fraunhofer. Nel 1879 J. Stefan trovava che il potere emissivo del corpo nero cresce con la quarta potenza della temperatura assoluta; nel 1893 W. Wien trovava la proporzionalità inversa fra lunghezza d'onda del massimo d'intensità dell'irraggiamento e temperatura assoluta. Ciascuna di queste due leggi era una chiave per stabilire la temperatura del Sole.

Nel 1885 J. Balmer (vedi) aveva trovato una formula empirica che rappresentava le lunghezze d'onda delle quattro righe visuali dell'idrogeno. Subito dopo Huggins trovava che la formula soddisfaceva anche le lunghezze d'onda di alcune righe ultraviolette nebulari. Ne concluse che anche tali righe sono dovute all'idrogeno.

Nel quarantennio trascorso dalle ipotesi di Arago, la conoscenza della struttura fisica del Sole era certo progredita verso un modello basato su un coerente insieme di leggi fisiche. Si sapeva ormai che si trattava di un globo delimitato da una superficie a temperatura circa 6000 gradi - la fotosfera - che emette radiazione continua, circondata da un sottile strato gassoso a più bassa temperatura - la cromosfera - che "emette e assorbe" le righe spettrali, a sua volta circondata da una vastissima, tenuissima e misteriosa atmosfera osservabile solo durante le eclissi totali - la corona - che emette debole luce continua con sovrammesse righe luminose. Circa la natura del globo fotosferico, per quanto se ne sapeva allora uno spettro continuo poteva essere originato solo da un corpo solido o liquido, quest'ultimo ritenuto meno probabile data la temperatura. D'altra parte però le macchie in continua formazione ed evoluzione, le **facole* e la **granulazione* che Janssen aveva scoperto nelle immagini fotografiche, mostravano che la superficie di tale globo non è statica, ma attiva e turbolenta. Allo sviluppo della fisica solare contribuì largamente l'introduzione nel 1891 dello **spettroeliografo* e l'opera di G. Hale, protagonista in questo campo.

Per indagare la natura degli astri, accanto alla spettroscopia stava maturando in questi tempi la fotometria stellare. Nei primi decenni del XIX secolo la scala per la stima dello splendore delle stelle era sostanzialmente quella delle magnitudini dell'Almagesto. Dopo alcuni tentativi, da parte soprattutto di J. Herschel, di ideare una scala più adeguata e razionale, N. Pogson nel 1860 propose la scala ancor oggi in uso. Sarà possibile da allora stabilire stelle-campione e cominciare, pochi decenni dopo, a costruire, valendosi di fotometri visuali appositamente ideati, cataloghi fotometrici basilari.

Un'operazione svolta sostanzialmente lungo due filoni: quello americano e quello tedesco. L'americano ad opera di E. Pickering, all'Harvard, che si concretò fra il 1884 ed il 1908 nell'*Harvard Photometry* e nell'**Harvard Revised Photometry* che globalmente contenevano le magnitudini di diecine di migliaia di stelle di entrambi gli emisferi. Quello tedesco con la **Potsdamer Durchmusterung*, portata a compimento nel 1907, con minor numero di stelle, ma di maggior precisione dei cataloghi americani.

Nel frattempo era venuta a maturazione una tecnica di osservazione che avrebbe avuto largo impiego in Astronomia. La fotografia. Daguerre brevettò la sua invenzione nel 1838. Nel 1845 Fizeau e Foucault ottennero una daguerrotipia del Sole nella quale apparivano gruppi di macchie. Ma ottenere immagini di stelle avrebbe richiesto tempi di posa proibitivi. Fu solo quando apparvero le assai più sensibili lastre al collodio, che G. P. Bond col rifrattore di 38 cm dell'Osservatorio di Cambridge ottenne una foto di Mizar con immagini così nitide che fu possibile misurare la separazione con la precisione di 0,1". Nel 1864 fu disponibile il primo doppietto corretto per la fotografia, fece cioè la sua comparsa l'**astrografo*.

Nel 1900 venne pubblicato il primo catalogo con magnitudini fotografiche per l'emisfero australe, la **Cape Photographic Durchmusterung* realizzata da D. Gill e J.Kapteyn.

La fotometria trovò campo specifico di ampia applicazione nelle *stelle variabili.* La prima era stata scoperta da D. Fabricius nel 1596: appariva e spariva dalla vista secondo un periodo di circa un anno; un fenomeno tanto meraviglioso nel cielo delle stelle fisse fino ad allora ritenuto immutabile, che a tale stella fu dato il nome di *Mira.* Altre stelle con appariscenti variazioni di luminosità si aggiunsero a questa, ma molto lentamente. A metà del XIX secolo se ne conoscevano 18; fra queste la β Persei - Algol - ben visibile ad occhio nudo la cui luce presentava col periodo rigorosamente stabile di 2 giorni e 21 ore indebolimenti della durata di poche ore che la riducevano ad un terzo. Per spiegare il fenomeno J. Goodricke nel 1785 suppose trattarsi di eclissi da parte di una stella oscura coorbitante. La conferma venne nel 1889, quando H. Vogel e J. Scheiner, a Potsdam, misurarono nello spettro velocità radiali oscillanti col medesimo periodo delle variazioni di luce: le prime applicazioni astrofisiche dell'effetto Doppler. La spettroscopia stellare aveva infatti proprio in quegli anni cominciato a trarre grande vantaggio dall'introduzione della tecnica fotografica che poteva ormai valersi delle lastre a secco che avevano soppiantato il lungo e complicato processo delle lastre a collodio. In tal modo era diventato possibile effettuare misure precise di velocità. Vogel e Scheiner a Potsdam ed E. Pickering all'Harvard furono pionieri in tale campo. Quest'ultimo nel 1889 aveva scoperto nello spettro della componente principale della doppia visuale Mizar una doppia serie di righe che mostravano velocità radiali opposte e con ugual periodo, mostrando così che si trattava di una doppia talmente stretta da non consentire la separazione visiva delle due componenti il cui moto orbitale però veniva palesato dall'effetto Doppler Entravano in campo le **doppie spettroscopiche*.

Nel frattempo l'astronomia classica vedeva iniziare un nuovo campo di ricerca: nel 1898 H. von Seeliger poneva infatti le basi della **statistica stellare*, pubblicando i risultati ottenuti elaborando con i metodi matematici da lui ideati i dati forniti dalla *Bonner Durchmusterung* e dalla *Cordoba Durchmusterung*.

L'avvento dell'Astrofisica e l'Astronomia del XX secolo.

Il nuovo campo d'indagine - lo studio della natura fisica degli astri - si imponeva sempre più, e l'americano S. Langley nel 1884 dette ad un suo libro il titolo, un tantino presuntuoso, *The New Astronomy* quasi a significare che da quando Keplero aveva pubblicato la sua *Astronomia Nova* aveva avuto inizio ancora una nuova era. Pochi anni dopo l'americano G. Hale cominciò a fare uso del termine *Astrofisica.* Fino ad allora era facile distinguere il campo della ricerca astronomica tradizionale che riguarda posizioni, moti e distanze degli astri ed il loro orbitare, dal campo dello studio della loro natura fisica. Ma da quando la spettrografia rese possibile la misura delle velocità radiali i due campi hanno cominciato ad intersecarsi sempre più fino a divenire - oggi - inestricabili. Non solo divenne possibile ricavare spettroscopicamente l'orbita di sistemi binari e in certi casi stabilirne le masse entrando quindi nel campo della meccanica celeste, ma fu possibile sfruttare in modo nuovo e ben più potente i dati sui moti propri che si potevano sempre più ricavare dai grandi cataloghi stellari di posizione. E divennero disponibili nuovi metodi per la determinazione della distanze delle stelle (vedi *Parallassi statistiche*).

Nei primi anni del nuovo secolo, l'orizzonte della ricerca astronomica si allargò smisuratamente mirando a una descrizione dell'universo in toto. Nasceva la Cosmologia scientifica. Con i metodi di Seeliger, due decenni dopo l'olandese J. Kapteyn costruì il modello della Galassia entrato nella storia col nome di *Universo di Kapteyn* (vedi *Galassia*); risultato che fu pubblicato nel 1922: il Sole al centro di un sistema ellissoidico di 50 miliardi di stelle schiacciato sul piano della Via Lattea, di 9000 pc come massima estensione e che si conserva per **autogravitazione*; la densità stellare è massima nella regione del Sole e diminuisce con la distanza dal centro. La posizione centrale del Sole e le dimensioni più piccole di quelle poi accertate, erano originate dall'aver Kapteyn ignorato l'effetto dell'assorbimento della luce negli spazi interstellari. L'universo di Kapteyn ebbe vita breve. A relegarlo fra le memorie storiche fu soprattutto la tecnica fotometrica che nei precedenti anni aveva visto un grande sviluppo. Nel 1908, fotometrando stelle della Piccola Nube di Magellano Miss H. Leavitt aveva scoperto una correlazione fra periodo di variazione luminosa e magnitudine delle stelle variabili dette cefeidi da lei ivi scoperte in gran numero. Correlazione che venne poi precisata da E. Pickering nel 1912 e che è rimasta nota come *Relazione periodo-luminosità* o anche come *relazione di Leavitt.* Se si fosse potuta conoscere la magnitudine assoluta (in pratica la distanza) anche di una sola cefeide, sarebbe stato possibile calcolare la distanza di qualsiasi altra cefeide in base al periodo. Siccome era chiaro fin da allora che queste stelle sono di alta luminosità e quindi riconoscibili fino a distanze galattiche molto grandi, si sarebbe in tal modo avuto in mano una potente chiave per scandagliare l'universo. Ma nessuna cefeide era abbastanza vicina per misurarne la parallasse trigonometrica. Il problema fu affrontato da H. Shapley, allora astronomo al Mt Wilson. In base ai moti propri ed alle velocità radiali di un piccolo numero di cefeidi sparse per la Galassia, riuscì a determinarne la parallasse statistica. La relazione periodo-luminosità era calibrata e divenne così utilizzabile per la determinazione delle distanze siderali, fino ad allora confinata entro le possibilità del metodo trigonometrico (e cioè non oltre un centinaio di parsec).

Applicando tale relazione alle cefeidi presenti in numerosi ammassi globulari, Shapley trovò le distanze di questi sistemi, che apparivano addensati in direzione del centro della Galassia, distanze comprese fra 6 e 60 kpc. E ne ricavò il suo modello di Galassia. Un sistema appiattito di 80 kpc di diametro e 15 kpc di spessore al centro, concentrico con il sistema sferoidico degli ammassi globulari. Il Sole sul piano galattico a 15 kpc dal centro. Più tardi si saprà che quelle dimensioni erano eccessive: non si era infatti tenuto conto dell'assorbimento della lucein prossimità del piano galattico La scoperta delle relazione periodo luminosità delle cefeidi fu comunicata nel 1912, la Galassia di Shapley fu presentata nel 1917.

Insoluto era ancora il problema delle spirali: se fossero sistemi interni alla Galassia oppure lontanissimi sistemi analoghi a questa (in quegli anni molti ritenevano che la "nebulosa" di Andromeda fosse un sistema solare in formazione). Su questo tema nel 1920 si svolse un pubblico dibattito fra Shapley, che sosteneva le spirali appartenere alla Galassia, e H. Curtis, astronomo al *Lick Observatory*, che sosteneva l'ipotesi opposta, facendo sua l'idea kantiana degli universi-isola. Discussione che è passata alla storia come il "*Grande dibattito". Nessuno dei due contendenti, che, secondo le nozioni del tempo, avevano ciascuno prodotto validi argomenti, uscì vittorioso. Ma i tempi incalzavano. Nel 1917 era entrato in funzione sul Mt. Wilson il riflettore di 100 pollici: il più grande del mondo. Con questo strumento pochi anni dopo E. Hubble scoprì e studiò una dozzina di cefeidi nella "nebulosa" di Andromeda. Applicando la relazione periodo-luminosità risultò una distanza di 300.000 pc: la "nebulosa" era ben al di fuori della Galassia, anche con le dimensioni valutate da Shapley, e quindi un'altra galassia. Anche se la notizia aveva cominciato a circolare fra gli "addetti ai lavori" da qualche mese, l'annuncio ufficiale di questo fondamentale risultato fu fatto al 33° Convegno dell'*American Astronomical Society* in Washington, il 1° gennaio 1925. Il Grande Dibattito si era concluso: il concetto degli universi-isola era provato.

Frattanto era stata portata a compimento un'opera di basilare importanza: un catalogo con i tipi spettrali di tutte le stelle fino alla 9ª magnitudine. Una classificazione degli spettri iniziata all'Osservatorio di Harvard, da E. Pickering e W. Fleming negli ultimi anni del XIX secolo, fu rielaborata da Miss Annie Cannon studiando migliaia di immagini fotografiche di spettri ottenuti col prisma-obbiettivo. Definiti i vari tipi spettrali in base alla presenza e intensità di determinate righe, mostrò che tali tipi disposti in successione progressiva risultavano ordinati anche secondo la temperatura fotosferica: la ben nota sequenza O, B, A, F, G, K, M, (N, R, S) che va dalle caldissime e stelle azzurre alle fredde stelle rosse. Fra il 1911 e il 1915, Miss Cannon classificò visualmente mediante un oculare più di 300 mila spettri. Il risultato fu pubblicato fra il 1918 ed il 1924 nei volumi del cosiddetto **Henry Draper Catalogue* contenenti 225.300 stelle. Opera che è rimasta per tutto il XX secolo quale fonte per una prima informazione sullo spettro di una

stella. Annie Cannon, insieme con Williamina Fleming, Henrietta Leavitt e Antonia Maury, tutte più o meno contemporanee, sono rimaste note come le ”donne di Harvard” che hanno un posto d’onore nella storia dell’Astronomia moderna.

Agli inizi del novecento era progredita la classificazione spettrale, ma la fisica delle stelle era ancora rudimentale. Ci si era resi conto che la sequenza dei tipi spettrali di Harvard era una sequenza di temperature decrescenti ma doveva aspettare il secondo decennio perché dall'insieme dei dati fotometrici e spettroscopici si cominciasse ad aprire uno spiraglio tramite la distinzione fra stelle nane e giganti. Ciò soprattutto grazie a quel potente mezzo d’indagine costituito dal *diagramma HR*, cioè dalla relazione fra magnitudine assoluta e tipo spettrale di Harvard mostrata indipendentemente da E. Hertzsprung e da H. Russell (1910 - 1914). E in quegli anni fu fatta l'importante scoperta delle *nane bianche*. La compagna di Sirio intuita da Bessel era stata finalmente avvistata nel 1862 come una stellina di massa uguale a quella del Sole (come mostrava la sua orbita attorno alla stella principale) ma 400 volte meno luminosa. Quando nel 1915 si riuscì a Mt Wilson ad ottenerne lo spettro, tale stellina risultò ad alta temperatura e quindi per apparire così debole, di dimensioni molto piccole: una massa pari a quella solare in un globo grande poco più della Terra: si erano scoperte le *nane bianche* la cui fisica sarà spiegata dieci anni più tardi da S. Chandrasekhar. Come vedremo, in quei medesimi anni A. Eddington stava sviluppando la teoria della struttura interna delle stelle e Chandrasekhar aveva mostrato che lo stato di nana bianca è quello terminale dell'evoluzione di una stella di massa non troppo maggiore di quella del Sole.

La nascita della cosmologia moderna

Nel 1913 V. Slipher iniziò con uno spettrografo applicato al rifrattore di 61 cm del *Lowell Observatory* un programma di osservazione che si rivelerà fatidico: la misura delle velocità radiali di "nebulose" spirali. Trovò subito che quella di Andromeda risultava avvicinarsi con la velocità di 300 km/s. Le velocità fino ad allora misurate in stelle erano dieci volte più piccole e la notizia fu accolta da un'autorità in materia quale W. Campbell con alquanto scetticismo: bisognava valutare il margine di errore. Ma l'anno successivo M. Wolf a Heidelberg e W. Right al Lick confermarono i dati di Slipher. Su 15 spirali 11 risultavano animate da velocità fino a 1100 km/s ed eccetto due casi (M31 ed M 32) si trattava di velocità di allontanamento.

Nel 1917 Einstein nel suo epocale articolo intitolato *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorien* proponeva un modello di universo basato sulla teoria della Relatività Generale: un universo statico, illimitato ma finito. W. De Sitter poco dopo proponeva un suo modello relativistico di universo "quasi vuoto" (densità estremamente bassa) dove il tempo rallenta quanto più un osservatore è lontano. Era nata cosmologia la moderna. Questi modelli attrassero però attenzione solo quando nel 1919, con l'osservazione, durante l'eclisse totale del 29 maggio 1919, della deflessione della luce da parte del campo gravitazionale del Sole nella misura prevista da Einstein.

Nel modello di De Sitter era previsto il rallentamento dei tempi osservabile col crescere della distanza dell'osservatore previsto dal modello di de Sitter, poteva essere l'interpretazione dei *redshift* di Slipher. Infatti al rallentamento corrisponde per l'osservatore una maggior lunghezza d'onda. Tanto che nel 1923 Eddington nell'opera *The Mathematical Theory of Relativity* afferma: ”Si è opposto all'universo di de Sitter il fatto che non appena vi si introduce della materia diviene non-statico: ma questa proprietà ora si rivela più a favore che a negazione del modello.”

De Sitter aveva affermato che se il suo modello rappresentava una buona approssimazione delle effettive proprietà dell'universo era da aspettarsi l'esistenza di una relazione fra *redshift* e distanza. Come abbiamo visto, due anni dopo, il fenomeno cominciava ad essere accertato. Nel 1922 A. van Maanen e C. Wirtz misero in evidenza che mediamente le spirali quanto più piccole, e quindi presumibilmente quanto più lontane, tanto più alta è la velocità di allontanamento che mostrano (sovente, interpretando il fenomeno come effetto Doppler, si usavano indifferentemente i termini *redshift* o allontanamento). Per passare però da questa generica constatazione alla stesura di una precisa relazione mancava la determinazione delle distanze delle spirali. Nel 1924 con la scoperta e lo studio delle cefeidi nella "nebulosa" di Andromeda, Hubble trovò la chiave per affrontare il problema. La famosa relazione fra *redshift* e distanza cui pervenne in pochi anni non fu un risultato inatteso. Anzi, Hubble iniziò il suo programma di determinazione delle distanze proprio allo scopo di verificare il modello cosmologico di de Sitter.

Si doveva ormai misurare il *redshift* in galassie troppo deboli per lo strumento del Lowell: la mano passò a M. Humason che lavorava col 100 pollici del Mt Wilson. Le velocità radiali si potevano misurare anche per spirali troppo lontane per potervi riconoscere le cefeidi le quali erano fotometrabili allora solo per la "nebulosa" di Andromeda, per la "nebulosa" irregolare NGC6822 e poche altre. Su queste Hubble tarò altri indicatori di distanza, stelle più luminose delle cefeidi e precisamente le *novae* e le giganti blu.

Dopo la stella nuova improvvisamente apparsa nel cielo nel 1572 e l'altra osservata anche da Keplero nel 1604 altre stelle dette latinamente **novae* erano apparse, e verso metà degli anni ’20 del secolo scorso se ne conoscevano una trentina di cui 9 apparse in "nebulose" spirali. Il confronto delle magnitudini di quest'ultime con quelle delle *novae* galattiche forniva uno degli argomenti che inducevano Curtis a sostenere la natura extragalattica delle spirali. Lasciava perplessi il fatto che la prima nova apparsa nella "nebulosa di Andromeda, nel 1885, era arrivata alla 7ª magnitudine, mentre le altre in Andromeda raggiungevano appena la 17ª. E ugualmente debolissime erano le *novae* apparse nelle altre spirali ad eccezione di una apparsa nel 1895 in una spirale del Centauro e che pure aveva raggiunto la 7ª magnitudine. A meno di non ammettere che questa spirale fosse eccezionalmente vicina, era chiaro che, almeno nel mondo delle "nebulose", esistevano due categorie di *novae* di luminosità diversa per 4 ordini di grandezza. Ma quali erano da considerare "normali", cioè analoghe a quelle

che appaiono sparse nella Galassia? Le due molto splendenti, e quindi le rispettive "nebulose" erano lontane poche migliaia di parsec, oppure le tante più deboli che indicavano distanze dell'ordine del milione di parsec? Come abbiamo visto, il dilemma fu risolto nel 1924 da Hubble: le *novae* normali erano le numerose più deboli. Le altre enormemente più luminose furono dette *supernovae.* Assumendo che le novae di Andromeda avessero mediamente la stessa luminosità delle *novae* galattiche, si poteva in base alla magnitudine apparente risalire alla distanza della spirale in cui apparivano. Oltre alle *novae*, altre stelle sono più luminose delle cefeidi: le blu (proprio un decennio prima si era cominciato a rivelare le relazioni fra luminosità e tipo spettrale e riconosciuta la divisione tra stelle giganti e nane). In base alle distanze ricavate con le cefeidi, Hubble poté constatare che le stelle più luminose di una galassia hanno sempre la stessa luminosità e quindi valersi di queste a distanze dove le cefeidi non erano più osservabili. Poté così raggiungere la distanza dell'ammasso di galassie della Vergine (che oggi sappiamo essere il più vicino dei grandi ammassi) che gli risultò lontano 2 milioni di parsec. Messi in relazione queste distanze con i *redshift* misurati da Slipher e da Humason, risultò che in media il redshift cresceva proporzionalmente alla distanza. Interpretando lo spostamento verso il rosso come effetto Doppler, ne risultava che le galassie di allontanano tanto più velocemente quanto più sono lontane: in formula, $v = Hr$ dove r è la distanza e H la costante di proporzionalità, la famosa *costante di Hubble.* Il valore allora ricavato per H fu $500\ \mathrm{km/s}$ per megaparsec. valore che poco più di vent'anni dopo subirà una drastica riduzione. Tale storico risultato fu annunciato da Hubble nel 1929 e la formula prese il nome di **legge di Hubble.*

Il modello di universo di de Sitter in cui questa legge s'inquadrava era allora stato abbandonato; ma ottennero grande considerazione i modelli relativistici di universo in espansione enunciati pochi anni prima da A. Fridmann (1923) e da G. Lemaître (1927). In quest'ultimo faceva comparsa il concetto di "atomo primordiale", nell'istante iniziale che poi prenderà il nome di *Big Bang.*

Nei modelli relativistici, l'universo (lo spazio) può essere piatto, come lo spazio comune che avvertiamo e l'unico in cui vale la geometria euclidea; o può essere ellittico oppure iperbolico, a seconda che la densità della materia è uguale, minore o maggiore di un certo valore critico che dipende dal valore della costante di Hubble. Einstein per evitare che il suo universo, da lui concepito statico, si contraesse per effetto della gravità, introdusse un costante, detta *cosmologica*, che rappresentava matematicacamente l'effetto di un forza, di origine non definita, che sulle grandissime distanze arriva ad equilibrare la gravità. La grande scoperta di Fridman fu che le equazioni della Relatività generale avevano anche soluzioni non statiche, per cui l'universo poteva contrarsi o espandersi. La condizione di staticità di Einstein era solo un caso particolarissimo. Perciò la costante cosmologica venne abbandonata. Ora, la legge di Hubble mostrava che dei tre casi matematicamente possibili, in natura si era avverato quello dell'espansione.

Nel 1931 Eistein e de Sitter formularono il modello di universo in espansione con densità uguale a quella critica che rende lo spazio piatto (geometria euclidea) con espansione rallentata e perenne. Un modello che era già stato proposto da Lemaître ma che è rimasto noto come universo di Einstein-de Sitter e che è stato accettato dalla maggioranza dei cosmologi per oltre mezzo secolo, quando l'esplorazione delle grandi distanze cosmologiche indusse dubbi sempre più consistenti.

Facendo il conto a ritroso con la velocità di espansione trovata da Hubble, risultò che l'istante iniziale si poneva a non più di 2 miliardi di anni fa. Questo limite, che è inversamente proporzionale alla costante H, fu detto *età dell'universo* o più propriamente **tempo di Hubble.* Un limite che per oltre vent'anni avrebbe costituito una pesante ipoteca sulle teorie cosmologiche e quelle sull'evoluzione stellare, nonché sull'età trovata per il sistema solare. La misura della costante di Hubble, impresa ardua per la difficoltà di misurare le grandi distanze extragalattiche ha impegnato gli astronomi per 70 anni prima di arrivare ad un valore preciso al 5%. Fino agli anni '90 l'incertezza arrivava fino ad un valore 2, dando altrettanta incertezza" all'età cosmologica dell'universo.

L'espansione dell'universo, divenuto concetto generalmente accettato fin dalla metà degli anni '30, venne consolidato a partire dal 1952 quando ebbe inizio, con Baade, la revisione delle distanze extragalatttiche che eliminò il paradosso di una Terra più vecchia dell'universo, pur restando la discordanza fra l'età cosmologica ed età dedotta per via astrofisica a seconda del valore attribuito alla costante di Hubble. Il modello di universo che godeva del più largo consenso era quello detto di Eistein-de Sitter, a geometria piatta e senza costante cosmologica, noto anche come Big Bang canonico. Un universo, nella sua struttuta e nel suo divenire, governato unicamente dalla materia con espansione in progressivo rallentamento. Fin dagli anni '70 sempre più insistenti voci critiche si levavano contro tale modello, voci che proponevano la reintroduzione della costante cosmologica che avrebbe risolto il problema dell'età dell'universo. Ma fu solo nel 1998 che il diagramma di Hubble, esteso grazie alle supernovae a 10 miliardi di anni luce, mostrò che l'espansione sta accelerando rendendo necessaria la reintroduzione della costante comologica. Con quel clamoroso annuncio è risultato che il divenire dell'universo è dominato da un quid di natura sconosciuta, detto *energia oscura*.

Mentre si indagava la struttura del cosmo, procedevano rapidamente le ricerche sulla struttura dei componenti basilari dell'universo: le stelle.

Alla fine del primo decennio del novecento erano disponibili i vasti cataloghi fotometrici già accennati e ad Harvard era proceduto il lavoro di classificazione spettroscopica. Inoltre si disponeva di un sostanzioso numero di parallassi trigonometriche. Si cominciava perciò ad avere a disposizione un sufficiente numero di dati per un'indagine statistica sulle luminosità e sui tipi spettrali. Come già accennato, nel 1910 il danese E. Hertzsprung pubblicò i risultati di una ricerca sulla relazione fra luminosità ed il tipo spettrale delle stelle, per cui le stelle rosse, cioè degli ultimi classi spettrali risultavano o

altamente luminose oppure molto deboli; dato che la temperatura era approssimativamente uguale, le stelle dei due tipi dovevano essere le une di raggio molto grande, tanto che Hertsprung le chiamò *giganti*, e le altre di raggio molto piccolo. Trovò, insieme ad altri ricercatori, una relazione fra l'intensità di certe righe spettrali e la luminosità di una stella offrendo così un nuovo poderoso strumento per estendere la misura delle distanze stellari molto al di là del limite raggungibile trigonometricamente. Nel 1913 l'americano H. Russell ottenne risultati analoghi mettendo in grafico la relazione fra spettro e luminosità per alcune centinaia di stelle di cui era noto tipo spettrale e distanza. Aveva costruito il diagramma che B. Strömgren chiamò **diagramma di Hertzsprung-Russell*, poi detto semplicemente diagramma HR. Le stelle azzurre risultavano tutte di grande luminosità, diecine di migliaia di volte il Sole; con l'avanzare del tipo spettrale (e quindi col diminuire della temperatura) la luminosità decresce regolarmente fino a stelle molto più deboli del Sole. Nel diagramma dove in ordinata è la luminosità ed in ascissa il tipo spettrale, la maggior parte delle stelle viene a trovarsi in una fascia che discende dall'alto a sinistra verso il basso a destra e che sarà detta *sequenza principale.* Ma per i tipi G, K ed M al di sopra della sequenza delle stelle deboli si aveva una fascia di stelle molto più luminose, le giganti rosse già riconosciute da Hertzsprung: alle stelle deboli degli ultimi tipi spettrali Russell dette il nome di *nane.* Gli astronomi con tale diagramma venivano in possesso di uno strumento che si rivelerà potentissimo per scandagliare lo spazio e per datare e studiare l'evoluzione delle stelle e dei sistemi stellari.

Frattanto il modello a globo solido o liquido circondato da uno strato di gas "assorbente" che genera le righe spettrali usato da Kirchhoff per interpretare lo spettro solare veniva abbandonato essendocisi resi conto che anche una massa di gas di densità e temperatura sufficientemente alte può dare uno spettro continuo. Si cominciò a delineare il modello di atmosfera stellare per cui lo strato invertente è la fotosfera stessa (vedi *Sole*). Il 14 dicembre 1900 M. Planck aveva presentato la relazione in cui proponeva l'ipotesi della quantizzazione dell'energia e dava la sua famosa formula per la radiazione del corpo nero. Era nata la fisica quantistica.

Nel 1913 N. Bohr propose il suo famoso modello di atomo quantizzato che consentirà l'interpretazione delle righe spettrali riconoscendo quelle dovute ad atomi a vari livelli di ionizzazione; ciò soprattutto in base alla formula dettata da M. Saha nel 1921 che dà, per la varie specie atomiche, la distribuzione degli atomi fra due livelli contigui di ionizzazione in funzione della temperatura e della pressione. Con la teoria della ionizzazione di Saha divenne chiaro il significato della sequenza dei tipi spettrali di Harvard. Inoltre fu così possibile determinare la temperatura delle atmosfere stellari (in particolare quella solare) anziché assumere come approssimazione quella fotosferica ricavabile tramite la formula di Stefan o l'**indice di colore*. Fra l'altro fu possibile rendersi conto che il **nebulio* non era altro che ossigeno doppiamente ionizzato e il **coronio* un gruppo di elementi in alti livelli di ionizzazione.

Per la definizione stessa di fotosfera, è evidente che dall'interno delle stelle non ci perviene nessuna informazione diretta. La struttura interna può essere investigata solo tramite modelli teorici cui viene imposto il soddisfacimento di "condizioni al contorno" imposte dai dati di osservazione (temperatura fotosferica, massa, diametro). Nel 1870 il fisico J. Lane, ammettendo che le leggi dei gas trovate negli esperimenti terrestri fossero valide anche per le stelle, aveva suggerito che queste fossero globi gassosi in equilibrio fra la pressione gravitazionale e la pressione elastica dei gas. Nel 1907 il fisico R. Emden costruì un modello matematico di una sfera di gas perfetto in equilibrio termodinamico con trasporto di calore per via conduttiva e convettiva stabilendo le condizione affinché la sfera possa essere delimitata da una superficie di raggio finito e a densità e pressione nulle. Contemporaneamente K. Schwarzschild aveva ipotizzato che il calore potesse trasmettersi all'interno della sfera per via radiativa: a temperature sufficientemente elevate tale forma di propagazione poteva divenire di gran lunga prevalente. Subito dopo intervenne il più famoso fra gli indagatori della struttura delle stelle: A. Eddington che fra il 1916 e il 1924 costruiva il modello stellare ad equilibrio radiativo detto *modello canonico di Eddington*, che ancorché oggi superato da modelli più precisi e appropriati alle varie condizioni, resta valido nelle linee generali. Da tale modello Eddington ricavò la relazione fra massa e luminosità, per cui la luminosità delle stelle della sequenza principale cresce circa con il cubo della massa; relazione di importanza rilevante che avrebbe consentito di valutare la massa di una stella in sequenza principale in base al tipo spettrale e alla luminosità. Divenne così possibile una valutazione della massa di stelle singole, pur restando sempre fondamentale la misura ottenuta mediante le stelle doppie.

A fianco dell'indagine sulla struttura delle stelle, in quegli anni si sviluppò notevolmente quella sulla struttura della Galassia. Già nel 1904 J. Hartmann aveva scoperto con le righe interstellari del calcio l'esistenza di materia gassosa nello spazio interstellare. Nei decenni immediatamente successivi fu scoperta la presenza di numerosi altri atomi e molecole, nonché di pulviscolo diffuso. Per analogia con tante altre galassie, si riteneva che anche la nostra avesse struttura spirale, ma riconoscere i vari bracci era tutt'altro che facile. Solo dopo che Baade ebbe constatato nella galassia di Andromeda che i bracci non sono addensamenti generali di stelle, ma soprattutto di giganti e supergiganti blu e di materia diffusa, si riuscì nel 1951 a individuare i tre bracci di spirale più vicini. Si trattava, in effetti, solo di tronconi: una vera e propria mappa dei bracci spiali si otterrà pochi anni dopo grazie alla radioastronomia. Frattanto nel 1927 J. Oort, a seguito di risultati ottenuti da B. Lindblad, dettò le formule che danno la velocità di rotazione (locale) della Galassia in base ai moti propri ed alle velocità radiali di stelle di distanza nota (e molto grande). Sono le famose *formule di Oort* in base alle quali fu possibile trovare che il Sole impiega 230 milioni di anni a compiere un giro attorno al centro galattico e stimare la massa della Galassia in $10^{11}\mathcal{M}_{\odot}$.

Ma si presentò ben presto un problema, che ha assillato a lungo gli astronomi. La massa di grandi sistemi stellari dedotta per via dinamica, in base all'azione gravitazionale, risultava sistematicamente molto maggiore di quella deducibile in base alla luminosità. E questo sempre, per la

nostra e altre galassie e per gli ammassi di galassie. La materia che si manifesta sotto forma di stelle e di nebulose è appena l'1% di quella che si manifesta attraverso gli effetti gravitazionali. È il problema della *massa nascosta*

Rimaneva ancora il vecchio problema della fonte dell'energia irradiata dal Sole e dalle stelle. Verso metà del XIX secolo il fisico J. Mayer aveva proposto l'ipotesi meteoritica per cui l'energia sarebbe fornita dalla caduta sul Sole di una continua pioggia di meteoriti. Ipotesi ben presto abbandonata soprattutto perché il conseguente aumento di massa avrebbe comportato in tempi storici un' alterazione dei moti planetari che le osservazioni escludono. Nel 1854 l'altro famoso fisico H. Helmholtz pensò al meccanismo della contrazione gravitazionale che avrebbe potuto garantire il presente flusso di energia per 50 milioni di anni. Tale ipotesi ebbe vita più lunga dato che la scala dei tempi così assicurata soddisfaceva i geologi che nella seconda metà del XIX secolo avevano cominciato ad esigere tempi così lunghi per la storia della Terra. Fu però ben presto criticata dagli astronomi anche per il fatto che l'entità della contrazione necessaria avrebbe provocato una progressiva avvertibile, ma non constatata, diminuzione del periodo delle cefeidi.

Ma il problema era che qualsiasi teoria doveva soddisfare le esigenze dei geologi che richiedevano tempi dell'ordine di miliardi di anni. Nel 1650 J. Ussher, arcivescovo di Armagh, sommando le generazioni bibliche aveva stabilito che il mondo era stato creato, secondo il calendario giuliano prolettico, il 23 ottobre del 4004 a. C. Ma già nel 1715, Halley, libero da ogni vincolo mitologico, aveva proposto di stabilire l'età dei mari in base al loro grado di salinità valutando, senza quantificarla, un'età incomparabilmente maggiore. Alla fine del XIX secolo con tale metodo fu valutata per gli oceani un'età di 80 milioni di anni; e già nel 1867 Ch. Lyell in base agli spessori delle stratificazioni aveva calcolato per la crosta terrestre un'età di 240 milioni di anni. Il convincimento di un mondo stazionario, nato così com'è oggi, per via catastrofica come l'atto di creazione biblico, era ormai largamente superato: la geologia e la paleontologia (Darwin) parlavano chiaro. Aveva preso il sopravvento la teoria uniformitaria per la quale la stratificazione delle rocce, la formazione delle montagne, il deposito dei sedimenti sono avvenuti con lenti processi tuttora in corso. I conti con l'età del Sole cominciavano a non tornare. E nemmeno con l'età della Terra calcolata da fisici ed astronomi: Kelvin aveva calcolato che alla crosta terrestre per raffreddarsi dallo stato di fusione all'attuale temperatura sarebbero occorsi non più di 40 milioni di anni. Ma il disaccordo divenne drammatico all'inizio del secolo scorso, quando si cominciò a datare le rocce col metodo della radioattività, fenomeno scoperto da Becquerel nel 1896.

Nel 1904 i fisici E. Rutherford e F. Soddy formularono la prima teoria generale del decadimento radioattivo. In base a questa, nel 1907, B. Boltwood pubblicò le prima datazione di minerali misurando decadimento dell'uranio: per le più antiche rocce fossilifere risultava un'età di 500 milioni di anni. Per le rocce più antiche in generale, altre datazioni dettero età di oltre 2 miliardi di anni. Il responso della radioattività mise in imbarazzo i geologi che richiedevano diecine di milioni di anni.

La fisica nucleare non era ancora nata (Rutherford scoprirà il nucleo dell'atomo nel 1911), ma in considerazione dell'enorme quantità di energia per unità di massa rivelata dalla radioattività i due fisici ritennero che l'energia del Sole potesse essere di origine subatomica. Infatti, sostenevano, esser presumibile che tale quantità di energia fosse contenuta anche nei comuni atomi stabili.

Per decenni si rimase incerti sul meccanismo atto a liberare l'energia richiesta per tempi così lunghi. Si pensò alla trasformazione della materia in energia secondo la formula $E = Mc^2$ conseguente alla Relatività ristretta enunciata nel 1905. In particolare J. Jeans pensò al reciproco annientamento fra elettrone e protone. L'attuale luminosità del Sole potrebbe essere così mantenuta per 10.000 miliardi di anni. Nel 1919 Rutherford ottenne nel *Cavendish Laboratory* la prima trasmutazione nucleare, cioè per la prima volta realizzò il sogno degli alchimisti trasformando un elemento chimico in un altro. Si presentò allora la possibilità che l'energia delle stelle fosse generata da un processo simile, che per analogia con le reazioni chimiche fu detto *reazione nucleare*. Di fronte ai dubbi che tali reazioni innescate artificialmente in laboratorio potessero verificarsi spontaneamente nella misura richiesta dal flusso di energia solare, nel 1920 Eddington pronunciò la famosa affermazione: *Ciò che è stato possibile nel Cavendish Laboratory può essere non troppo difficile nel Sole.*

Nelle reazioni nucleari solo una piccola frazione della massa viene convertita in energia. Ammettendo che l'efficienza fosse solo un centesimo e che solo un decimo della massa solare potesse subire le opportune reazioni, il Sole avrebbe potuto irraggiare per 10 miliardi di anni. Nel 1929 R. Atkinson avanzò la preveggente ipotesi che gli elementi chimici venissero sintetizzati nelle stelle partendo dal più semplice: l'idrogeno. Dopo che Eddington negli anni '20 aveva delineato la struttura interna delle stelle, l'ipotesi fu infine concretata in una precisa teoria nel 1938 dai fisici H. Bethe e C. von Weiszäcker che individuarono la catena di reazioni che in un nocciolo del Sole a 15 milioni di gradi trasmutano l'idrogeno in elio liberando da un grammo di idrogeno $1{,}75\times10^6$ kWh di energia. Per la specificazione di tali reazioni si veda la voce *Sole.* I successivi modelli della struttura del Sole mostrarono che solo l'idrogeno del nocciolo è disponibile per la trasmutazione in elio: fatti conti, risultò che il Sole può mantenere l'attuale luminosità per 10 miliardi di anni (oggi sappiamo che la trasmutazione dell'idrogeno in elio è la fonte di energia per tutte le stelle che appartengono, come il Sole, alla sequenza principale del diagramma HR). Si era trovata la sorgente dell'energia stellare e la discordanza con il tempo di Hubble diveniva meno insuperabile.

Nel 1948 R. Alpher e G. Gamow rifacendosi all'attimo iniziale di Lemaître, avevano esposto la teoria che da una sostanza iniziale ad altissima temperatura - una mescolanza di neutroni, protoni ed elettroni - si formassero, per cattura di neutroni, l'elio e in successione gli altri elementi: nasceva il modello del *Big Bang caldo*. Ma la Fisica nucleare mostrava che la succcessione delle reazioni si sarebbe arrestata all'elio (la cosiddetta barriera dell'elio), cosicché

risultava impossibile la formazione degli elementi più pesanti sia nel Big Bang caldo che nell'interno delle stelle. E il problema rimase finché Hoyle e Fowler non individuarono il processo, detto triplo α, che consentiva il superamento della barriera.

Fu così possibile a M. Burbidge, R. Burbidge, A. Fowler e F. Hoyle costruire la teoria della **nucleosintesi* stellare secondo cui tutti gli elementi chimici oltre l'idrogeno possono essere sintetizzati nelle stelle: i più leggeri del ferro nei processi che forniscono l'energia che assicura l'equilibrio del globo stellare, i più pesanti nell'esplosione delle supernovae. La relazione con questo fondamentale risultato fu pubblicata nel 1957 e fra gli astrofisici è rimasta nota col nome di B^2FH. Da allora l'evoluzione delle stelle in base alla massa iniziale poté essere tracciata, con i tempi di permanenza nella sequenza principale e i sempre più rapidi stadi successivi di gigante evoluta. I tempi di evoluzione risultarono 12 miliardi di anni per una stella di massa solare. Frattanto nel 1952 W. Baade aveva annunciato la duplicità della relazione periodo-luminosità delle cefeidi: quelle osservate nelle galassie vicine erano risultate di oltre 1,5 magnitudini più luminose di quelle utilizzate da Shapley per i suoi scandagli della Galassia. Le distanze extragalattiche venivano così ad essere raddoppiate e l'età dell'universo saliva a 4 miliardi di anni. Il disaccordo con l'età geologica della Terra era risultato di colpo pressoché sanato.

In seguito la scala delle distanze extragalattiche sarebbe stata ulteriormente allungata e il tempo di Hubble sarebbe salito fino a una ventina di miliardi di anni. Un tempo sufficiente a contenere anche gli oggetti più antichi che si conoscano: gli ammassi globulari. D'altra parte negli stessi anni in cui Gamow accettando la teoria del Big Bang indagava sulla sintesi primordiale degli elementi chimici, H. Bondi, Th. Gold ed Hoyle proponevano la teoria dello **stato stazionario* dell'universo, secondo cui la struttura generale dell'universo resta invariata attraverso il tempo: l'espansione di Hubble è ammessa ma non esiste un inizio. Per compensare la diminuzione di densità che seguirebbe all'espansione si postulava la creazione continua di materia.

L'età della Terra cessò di essere un tema di disputa fra astronomi, geologi e paleontologi. Il disaccordo ora era interno all'Astronomia: i risultati astrofisici che davano per gli ammassi globulari e in generale per la Galassia un'età maggiore di quella dell'universo indicata dai cosmologi si basa soprattutto sul valore della costante di Hubble. La caccia a valori sempre più attendibili della costante H ha impegnato per decenni e decenni varie équipes di astronomi col risultato di valori alquanto discordanti ma generalmente tendenti alla diminuzione. Dai $200-250$ km/s/Mpc, del 1952, ai $50-100$ degli anni '80, e ai 70 km/s/Mpc di fine secolo. E ciò portava ad un corrispondente allungamento dell'età dell'universo. Una tendenza a sanare la discordanza.

Se da metà dell'ottocento a metà del novecento le conoscenze nel campo della geologia e dell'astronomia solare e stellare erano immensamente progredite, non altrettanto si può dire per quelle sul sistema planetario. Notevoli progressi indubbiamente ci sono stati, ma niente di paragonabile all'enorme sviluppo delle conoscenze nel campo della fisica solare e stellare, della struttura della Galassia e dell'universo extragalattico. Dopo l'exploit della scoperta di Nettuno, è da ricordare l'associazione da parte di Schiaparelli, di sciami meteorici con determinate comete. La conferma spettroscopica nel 1891 della struttura a particelle degli anelli di Saturno. L'introduzione nello stesso anno della fotografia per la ricerca degli asteroidi, le regolarità strutturali della fascia asteroidale, la scoperta di una diecina di nuovi satelliti e la mappatura di Marte soprattutto da parte di Schiaparelli verso la fine dell'ottocento e di E. Antoniadi nei primi decenni del novecento. La constatazione che di Venere, Giove e Saturno si vedeva solo la superficie gassosa; poi la rivelazione con l'analisi spettroscopica della presenza di ammoniaca e metano su Giove e Saturno (la presenza di "bande" indecifrabili nello spettro di questi pianeti era stata fatta da Huggins e Secchi) e di anidride carbonica su Venere. La scoperta di Plutone nel 1930 venne salutata come un nuovo successo della meccanica celeste, ma oggi sappiamo che il nuovo pianeta (o asteroide?), con la sua piccolissima massa, non era certamente il corpo che causava le perturbazioni inspiegate nel moto di Nettuno.

Era inoltre notevolmente progredita la teoria delle orbite planetarie. Negli ultimi decenni del XIX secolo S. Newcomb costruì basilari *teorie* dei moti planetari che sono state universalmente utilizzate fino al 1960 per i pianeti interni e fino al 1984 per quelli esterni. La teoria della Luna culminò con le tavole di Brown pubblicate nel 1919. Ma la conoscenza della fisica, dell'origine, dell'evoluzione, dei corpi del sistema solare non aveva visto nel XX secolo progressi di rilievo.

La svolta ebbe inizio nel 1950, che fu un anno decisivo per gli studi sul sistema solare. F. Whipple suggerisce che le comete siano costituite da un conglomerato di rocce e ghiacci, i quali, avvicinandosi la come al perielio comincino a sublimare formando chioma e coda. È il modello a *palla di ghiaccio sporco*, che spiega nelle linee generali l'insieme dei fenomeni cometari. Oort propone l'ipotesi che il sistema solare sia circondato da un insieme di miliardi di nuclei cometari. È la famosa *Nube di Oort.* Per effetto di perturbazioni esterne alcuni di tali nuclei cadono in continuazione verso il sistema solare interno, a formare le comete nuove, parte delle quali tornano su orbite di fortissima eccentricità verso la nube, altre vengono costrette dall'azione gravitazionale dei pianeti su orbite a corto periodo. Con questo serbatoio di comete a 10 mila unità astronomiche dal Sole, trovarono soluzione vari problemi di dinamica orbitale delle comete.

L'avvento della radioastronomia

Immediatamente dopo la fine della seconda guerra mondiale gli astronomi avevano cominciato a servirsi di un nuovo potente strumento d'indagine: il radiotelescopio. La capacità delle onde a frequenza radio di superare le barriere - nubi di goccioline atmosferiche - e banchi galattici di pulviscolo - insuperabili per le radiazioni ottiche, l'enorme ampiamento della regione spettrale osservabile, l'impiego dell'eco (la tecnica radar) per misurare le distanze con altissima precisione, vincevano largamente lo svantaggio dell'assai minor potere risolutivo (per avere la stessa risoluzione di un telescopio ottico, un radiotelescopio che lavori su onde di un metro deve avere un diametro un

milione di volte maggiore). Dapprima si usarono radio antenne militari, poi si passò a parabole e tralicci sempre più grandi, come nel 1957 il paraboloide di 76 m di diametro di Jodrell Bank e nel 1963 quello di 305 m di Arecibo. Allo scarso potere risolutivo si rimediò ampiamente nei decenni successivi mediante i radio interferometri che, lavorando su basi di centinaia ed anche migliaia di chilometri sono arrivati a superare le prestazioni dei più grandi strumenti ottici. Alla radio astronomia si deve, già all'inizio degli anni '50 tramite l'osservazione della riga a 21 cm dell'idrogeno neutro (che non dà righe ottiche) la tracciatura dei bracci spirali della Galassia. Fra i risultati memorabili dei primi due decenni della nuova tecnica, ricorderemo ancora la scoperta delle potenti radiosorgenti alcune identificate con residui nebulari di supernovae altre extragalattiche poi individuate anche otticamente e dette *quasar*. Nell'ambito del sistema solare, la tecnica radar consentì nel 1962 di ottenere con grande precisione la distanza di Venere e ricavare il valore dell'unità astronomica con precisione tale da rendere obso- leta la tecnica tradizionale della parallasse trigonometrica.

A metà novecento vecchi problemi insoluti dell'astronomia planetaria erano il periodo di rotazione di Mercurio e di Venere. Per quest'ultimo pianeta i numerosi tentativi con osservazioni visuali, anche da parte di osservatori provetti come Schiaparelli, E. Antoniadi, A. Dollfus, erano falliti per l'assenza di macchie permanenti e corotanti con l'invisibile globo solido. Nel 1962 osservazioni radar consentirono di stabilire che il pianeta ruota in senso retrogrado col periodo di 243 giorni. Nel 1965 con la medesima tecnica fu trovato per il periodo di rotazione di Mercurio un valore attorno a 59 giorni con l'incertezza di alcuni giorni; G. Colombo intuì allora che il vero valore era quello in risonanza: 2/3 col periodo di rivoluzione: 58,65 giorni.

Oltre che con l'identificazione dei bracci spiraliformi della Galassia, lo studio dei quasar e la scoperta delle radio galassie, la radio astronomia portò un contributo diretto alla cosmologia con la scoperta, nel 1965, della **radiazione cosmica di fondo*, una scoperta epocale che confortò la teoria del Big Bang e rese indifendibile la teoria rivale dello stato stazionario dell'universo.

Le ricerche via radio si sono poi talmente interlacciate con quelle condotte per la tradizionale via ottica, che sarebbe difficile e farraginoso fare due trattazioni storiche separate.

1957: inizia l'era spaziale.

Frattanto nel 1957, col lancio dello *sputnik* sovietico, il primo satellite artificiale della Terra, ebbe inizio l'era spaziale. Nel 1959 la sonda sovietica *Lunik 2*, raggiunge la Luna e si schianta al suolo; un mese dopo la *Lunik 3* ci dà le prime immagini dell'altra faccia della Luna. Ed hanno inizio le esplorazioni *in loco* del sistema planetario. Nel 1962 l'americana *Mariner 2* sorvola Venere; nel 1965 la *Mariner 4* sorvola Marte e ci rivela che il pianeta è fittamente craterizzato. Il 21 luglio 1969 l'*Apollo 11* sbarca i primi uomini sulla Luna (E. Aldrin ed N. Armstrong) dove rimarranno 15 ore, per risalire col modulo di atterraggio al modulo rimasto in orbita lunare e che li riporterà a Terra. Altre esplorazioni umane sulla Luna seguiranno fino al 1972. Oltre ai rilievi in loco furono portati sulla Terra campioni di roccia lunare. Sonde senza equipaggio sorvolarono poi Mercurio e si avvicinarono o atterrarono su Venere (nel 1975 si ebbe la prima immagine del suolo di questo pianeta) e su Marte. Nel 1979 le **Voyager 1* e *2* attraversarono il sistema di Giove e nel 1980-81 Saturno, scoprendo fra l'altro numerosi altri satelliti. La *Voyager 2* nel 1986 rasentò Urano e nel 1989 Nettuno arricchendo enormemente le scarsissime informazioni fisiche che si avevano su questi remotissimi pianeti. Frattanto, fra il 1990 e il 1993, la **Magellano* in orbita attorno a Venere ci aveva fornito col suo altimetro radar una mappa altimetrica praticamente completa del pianeta. Fra il 1995 e il 2003 la **Galileo*, in orbita attorno a Giove, dopo aver rilasciato un modulo di discesa per rilievi sull'atmosfera del pianeta, fornì una ricca messe di informazioni sui satelliti. Nel 2004 la sonda *Cassini* è entrata in orbita attorno a Saturno compiendo un circuitazione ogni 19 giorni, giovandosi più volte dell'aiuto gravitazionale di Titano per studiare ora l'uno ora l'altro dei maggiori satelliti.

In tal modo, nel corso di questi cinquant'anni si è rigogliosamente sviluppata una nuova branca dell'Astronomia: la **Planetologia*.

Nell'Astronomia stellare, nel primo decennio del novecento si cominciò a tentare di costruire il quadro dell'evoluzione delle stelle. Dapprima si pensò che le stelle nascessero come globi incandescenti dalla condensazione di nebulose diffuse, ritenute a temperatura elevatissima (essendo che davano righe luminose) e si raffreddassero progressivamente per l'irradiazione dell'energia. Una stella quindi nasceva luminosissima e caldissima e quindi bianco-azzurra, per finire debole e rossastra. Nel corso di tale evoluzione lo spettro si modificava secondo la sequenza di Harvard (presentata proprio in quegli anni) dal tipo B verso l' M. In altre parole seguendo quella che poi si sarebbe chiamata la *sequenza principale.* Quando, nel 1913, costruito il diagramma HR, risultò che le stelle rosse si distinguevano in nane e giganti, lo stesso Russell propose una teoria evolutiva che, per quanto ben presto smentita, conteneva preveggenti intuizioni. Le stelle nascerebbero da materia diffusa fredda, probabilmente le nebulose oscure, quali grandi globi a bassa temperatura e quindi rossastri: le giganti rosse. Contraendosi sotto la pressione gravitazionale si riscalderebbero passando dal color rosso, al giallo, al bianco azzurrastro. A questo punto però la densità è divenuta tale che non valgono più le leggi del gas perfetto, per cui l'irraggiamento di energia provoca il raffreddamento e la stella continuando a contrarsi segue la sequenza dei colori in senso inverso: dal bianco azzurrastro, al giallo, al rosso finendo quindi come nana rossa. Questa teoria ebbe breve vita: la scoperta delle nane bianche, che evidentemente non rientravano in tale schema; la conclusione di Eddington che anche le nane rosse possono essere considerate costituite da gas perfetto, e infine l'acquisizione della consapevolezza che le stelle dovevano disporre di una sorgente di energia diversa da quella gravitazionale, e proveniente probabilmente dall'annientamento di materia. Le basi della teoria attuale dell'evoluzione stellare furono poste negli anni '40 e '50, dopo era stata

individuata la basilare reazione che trasmuta l'idrogeno in elio; e in riguardo alle fasi più avanzate, con l'apparizione della relazione B^2HF sulla sintesi stellare degli elementi più pesanti dell'elio.

L'osservazione ottica e radio concorsero negli anni '60 a sviluppare un campo d'indagine che avrebbe aperto nuovi insospettati aspetti del cosmo. Nel 1934 W. Baade e F. Zwicky avevano chiamato *supernovae* le eccezionali *novae* 10 mila volte più luminose delle altre, come quella apparsa nel 1885 nella galassia di Andromeda. Nel 1942 ci si era resi conto, in base alla velocità di espansione, che la nebulosa Granchio, nel Toro, che era nota anche come intensa sorgente di onde radio, doveva essersi formata 900 anni prima e la sua posizione coincideva con quella di una luminosissima *nova* apparsa nel 1054. Sia la distanza che la curva di luce desunta dalle descrizioni dell'epoca, mostrarono che si trattava di una *supernova*: la nebulosa era il residuo di quell'esplosione. All'interno della nebulosa venne individuato anche il residuo stellare: una debole stellina di alta temperatura. Altre residui nebulari di *supernovae* vennero individuati, sia con i telescopi ottici che con quelli radio, qua e là per il cielo, alcuni identificati con supernovae apparse in epoca storica.

A metà degli anni '60 fu definitivamente accertato che le novae sono tutte stelle binarie e che si tratta di esplosioni termonucleari non distruttive su nane bianche in coppia stretta con stelle normali. In quegli stessi anni fu interpretato anche il fenomeno delle supernovae come collasso finale di una stella di grande massa arrivata al termine della propria evoluzione attiva oppure come esplosione catastrofica di una nana bianca in coppia con una stella normale. Il collasso spontaneo si ha per le supernovae già dette di tipo II in base alla curva di luce; l'altra evenienza per le supernovae dette di tipo Ia.

Nel 1967 un radiotelescopio scopriva serendipicamente una stella straordinaria: inosservabile otticamente, si manifestava con impulsi radio che si ripetevano ad intervalli rigorosamente uguali di 1,34 s. Altre sorgenti simili furono ben presto scoperte e furono battezzate **pulsar*. Una di queste si rivelò essere la stellina centrale della nebulosa Granchio, che mostrava un periodo ancora più breve: 0,033 s; un'altra fu trovata nella nebulosa *Vela*, pure residuo di una supernova risalente ad oltre 10 mila anni fa. Il fenomeno fu spiegato, già nel 1969, con l'effetto faro da parte di un minuscolo e compattissimo corpo rotante col periodo osservato ed emettente radio onde entro un ristretto cono. Un corpo di 20 km di diametro e raccogliente una massa pari a quella del Sole, di densità quindi pari a quella nucleare, cioè 10^{14} g/cm^3; 100 milioni di volte la densità di una nana bianca. L'esistenza di un tale corpo, costituito praticamente solo da neutroni, era stata proposta nel 1932 dal fisico L. Landau quale esito finale di una stella di grande massa quando ha esaurito tutta la riserva di energia nucleare disponibile; nel 1934 Baade e Zwicky avevano suggerito che le ipotetiche stelle iperdense di Landau, dette *stelle neutroniche*, potessero esser generate nelle esplosioni delle *supernovae*. La scoperta delle pulsar mostrò la reale esistenza di tali straordinari corpi e contribuì all'interpretazione delle *supernovae*.

L'osservazione dei **neutrini* di origine solare, effettuate fin dagli anni '70 con rivelatori posti in profondità nel sottosuolo e più tardi nei ghiacci dell'Antartide, nonché dei neutrini provenienti dalla supernova 1987A hanno consentito la prima verifica *diretta* della teoria sulla produzione dell'energia stellare e sul meccanismo dell'esplosione delle supernovae.

La finestra sul cosmo, già così allargata dai radiotelescopi, fu completamente spalancata dalle sonde spaziali con l'estensione dell'osservazione dalla parte opposta dello spettro elettromagnetico, cioè dall'ultravioletto lontano fino ai raggi X e γ. E fu anche eliminata la lacuna dell'infrarosso, regione spettrale intermedia fra il limite inferiore del dominio radio e quello superiore del dominio ottico (in senso stretto), lacuna che era stata solo molto parzialmente colmata con gli osservatori di alta montagna, apporto dell'era spaziale. L'osservazione dei raggi X cosmici cominciò nel 1962 con strumenti portati da razzi stratosferici che rivelarono varie sorgenti localizzate fra cui una identificata con la nebulosa Granchio. Ma l'Astronomia X divenne una branca importante dell'Astrofisica nel 1970 col lancio del satellite specializzato **Uhuru*, che fornì una prima mappa e un primo catalogo delle sorgenti X. Seguirono altri satelliti specializzati fra cui ricorderemo il **Copernicus* (1972), il **ROSAT* (1990), l' *XMM. Le sonde spaziali portarono anche decisivi contributi alla cosmologia. Uno dei più notevoli è quello dato dal satellite COBE che nel 1991 confermò la tesi che la radiazione cosmica di fondo (RCF) è un fossile del Big Bang. La successiva sonda, denominata MAP, di assai maggior potere risolutivo, riuscì, all'inizio del nuovo secolo, a mostrare nella mappa della RCF le "macchie" di temperatura interpretate come residuo fossile delle condensazioni primigenie che avevano dato origine alle galassie.

Da non dimenticare l'impetuoso progredire delle tecniche di osservazione telescopica nell'ultimo quarto del XX secolo. Dall'osservazione effettuata direttamente dall'astronomo nella cupola, magari al gelo delle notti invernali, con l'occhio all'oculare del cannocchiale di guida per mantenere la stella sul crocicchio, alle comode sedute nella sala sottostante davanti al monitor e ad una tastiera mentre il puntamento del telescopio è controllato automaticamente dal computer. Anzi, basta che fornisca le indicazioni necessarie e le osservazioni possono essere fatte dal personale tecnico Evoluzione questa avvenuta sul finire degli anni '70. Data storica, nelle tecniche di osservazione, è stata il 6 settembre 1982, quando un programma di osservazione col telescopio per l'infrarosso da 3,8 m sul Mauna Kea, alle Hawaii, venne condotto mediante computer dall'Osservatorio di Edimburgo. Dalla fine degli anni '80, con l'avvento del recettore CCD al posto della lastra fotografica, l'astronomo trova i dati di osservazione estratti in forma digitale e pronti per lo studio già alla fine della seduta di osservazione. L'ultima lastra fotografica al 200" del Palomar fu esposta il 29 settembre 1989.

Il Grande Telescopio Spaziale, denominato **Hubble Space Telescope* e in orbita dal 1990, ha consentito osservazioni spettroscopiche e fotometriche dall'ultravioletto all'infrarosso con potere risolutivo spinto al limite della diffrazione. Nello stesso decennio per l'osservazione da

Terra si è passati dai grandi telescopi tradizionali di 5 e 6 metri, ai telescopi di nuova generazione di aperture fino agli 8 m con specchi monolitici e fino a 10 m con specchi a tasselli. Strumenti dotati di quel prodigio tecnologico che è ottica **adattiva* che ha reso l'osservazione da Terra nel campo ottico competitiva con quella da satellite.

Il potere di penetrazione di tali strumenti ha recentemente consentito di usare le *supernovae* quali indicatori di distanza fino ad oltre 3000 Mpc. La verifica della legge di Hubble fino a distanze di molti miliardi di anni-luce utilizzando quali potenti indicatori di distanza le supernovae di tipo Ia, ha portato, prima a reintrodurre la costante cosmologica di Einstein onde sanare il dilemma dell'età dell'universo, poi nel 1998 è sfociata nella sensazionale scoperta che l'espansione dell'universo non rallenta, come fermamente si era creduto fino ad allora, ma accelera!

I pianeti extrasolari

Nel 1995 fu annunciata la scoperta del primo pianeta extrasolare, un pianeta gigante (almeno metà della massa di Giove) col periodo di circa 4 giorni orbitante attorno ad una stella distante 13 pc. Una scoperta non dovuta all'osservazione dallo spazio extraterrestre, ma a un repentino avanzamento tecnologico della spettroscopia. Il pianeta si era rivelato spettroscopicamente attraverso l'effetto Doppler causato dal moto orbitale indotto nella stella. Un risultato inseguito invano per oltre mezzo secolo per via astrometrica, era stato improvvisamente raggiunto per via spettroscopica. Ciò grazie a tecniche di ultima generazione che hanno accresciuto la precisione di un fattore 20 rispetto alla tradizionale spettrografia su lastra fotografica. Seguirono in rapida successione numerose altre scoperte. Nel 2006 i pianeti extrasolari noti erano 240, tutti giganti. La caccia a un pianeta di taglia terrestre è ancora aperta.

Astronomia delle alte energie È quella che si basa sull'osservazione delle radiazioni di alta energia (fotoni di frequenza X e superiore) e delle particelle ad alta velocità. Si può dire che questa branca si sia inaugurata nel 1902 quando misure effettuate da palloni stratosferici portarono a concludere che l'atmosfera è soggetta ad un bombardamento di particelle ionizzanti di altissima energia di origine extraterrestre ma non provenienti dal Sole: i raggi cosmici. Però lo studio dei fotoni di alta energia ($> 0{,}1$ keV; $\lambda < 124$ Å) con la localizzazione e lo studio di ben definite sorgenti ha avuto inizio il 19 giugno 1962, quando un razzo progettato da un'équipe guidata da R. Giacconi portò ad alta quota un contatore Geiger per rivelare raggi X. Fu rivelata l'esistenza di una radiazione X diffusa proveniente dall'intero cielo e di una sorgente "puntiforme" nello Scorpione che prese il nome di **Scorpio X-1*. Ma l'AAE prese veramente corpo con gli appositi satelliti, primi dei quali gli **HEAO* operanti fra il 1977 ed il 1981. Si veda anche *Astronomia* γ ed *Astronomia* X.

Nel campo delle alte energie sovente invece che tramite frequenze o lunghezze d'onda ci si esprime dando le corrispondenti energie del fotone secondo la relazione fondamentale

$$E = h\nu = hc/\lambda \cong 12{,}4/\lambda \text{ keV}$$

con λ espressa in Å. Per un conteggio estemporaneo di ordine di grandezza si può usare la regola che un fotone X duro di 1 Å ha l'energia di un elettrone accelerato dalla tensione di 10 kV, cioè 10 keV.

Ecco la ripartizione convenzionale della radiazione elettromagnetica di alta energia secondo la lunghezza d'onda, l'energia e la frequenza:

	λ (Å)	E	ν = 2,42 ×
	0,0000124	1 GeV	10^{17} MHz
γ	0,0124	1 MeV	10^{14} "
	0,124	100 keV	10^{13} "
	1,24	10 keV	10^{12} "
X	12,4	1 keV	10^{11} "
	124	0,1 keV	10^{10} "

Astronomia fondamentale È quell'astronomia di base che concerne la determinazione dei riferimenti e delle costanti fondamentali: equatore celeste, punto d'Ariete, obliquità dell'eclittica, costante di precessione, costante di aberrazione, unità astronomica ecc., nonché la formulazione delle **teorie del moto* apparente del Sole, della Luna e dei pianeti ed il calcolo delle relative effemeridi, la valutazione del tempo universale e siderale e le correlate variazioni della velocità di rotazione della Terra, e inoltre la determinazione delle posizioni, delle parallassi e dei moti propri delle stelle di riferimento e la conseguente compilazione dei **cataloghi fondamentali*. Si può ascrivere all'Astronomia fondamentale anche la misura delle parallassi trigonometriche di stelle deboli e la compilazione dei cataloghi stellari parziali e generali. A partire dalla metà del ventesimo secolo l'Astronomia fondamentale si è valsa anche di osservazioni fotometriche per la determinazione di posizioni della Luna e di pianeti tramite le **occultazioni lunari*.

In epoca moderna strumenti di questa branca dell'Astronomia sono stati essenzialmente il cerchio meridiano, lo strumento dei passaggi, l'astrolabio di Danjon. In tempi relativamente recenti è intervenuta anche l'astronomia radar e in più recenti ancora gli specifici strumenti a bordo del satellite **Hipparcos*. Per quanto concerne le stelle deboli, l'Astronomia fondamentale è sostanzialmente **Astrometria*, ma si preferisce parlare di astrometria specificamente, con riferimento ad astri molto deboli per i quali sono inutilizzabili gli strumenti classici e ci si serve della tecnica fotografica o elettronica (CCD). D'altra parte quando si usano le tecniche con rivelatori di immagini per la determinazione di posizioni di lontanissime galassie al fine di stellina descrive attorno a **Sagittarius A*, al centro della Galassia, si è fatta indubbia-mente Astrometria. La discriminante è il fine della ricerca: se si vogliono determinare i riferimenti fondamenti (e tra questi sono da considerare anche il moto del Sole e della Luna) si fa Astronomia fondamentale. Se invece si vuole studiare un oggetto che interessa in sé, si fa Astrometria in senso specifico.

Astronomia gamma (γ)

Astronomia basata sull'osservazione della radiazione γ (vulgo, *raggi gamma*) cioè la radiazione elettromagnetica di

lunghezza d'onda $< 1{,}24$ Å (energia del fotone ≥ 100 keV). Al di sopra di $1{,}24$ Å comincia la regione X (*raggi X*). Convenzionalmente *raggi X e gamma* costituiscono il dominio delle alte energie.

La radiazione γ di origine termica è trascurabile: perché una frazione sensibile dell'energia emessa da una sorgente termica cada nella regione spettrale γ, occorrono temperature di milioni di gradi; temperature che esistono nel nocciolo delle stelle, ma i fotoni γ ivi originati, interagendo con la materia, decadono in fotoni di più bassa energia, e sono questi che dopo milioni di anni fuoriescono dalla fotosfera. La radiazione γ che ci perviene dal cosmo è direttamente originata da reazioni nucleari ed è quindi radiazione discreta che dà righe spettrali: le cosiddette **righe nucleari* oppure è radiazione da frenamento. In sostanza, l'osservazione di tale radiazione ci può dare informazioni dirette su fenomeni che coinvolgono alte energie per particella.

Essendo l'atmosfera terrestre del tutto opaca a tale radiazione le osservazioni si possono compiere solo tramite satelliti e sonde fuori atmosfera. Un fotone gamma è altamente energetico (milioni di volte i fotoni ottici) ed a tali energie la radiazione si manifesta con la sua natura quantistica e non può essere rivelata con i tradizionali mezzi riflettenti e focalizzanti dell'ottica. In altre parole, essendo la lunghezza d'onda gamma sempre molto minore delle distanze interatomiche nei solidi, è impossibile focheggiare tale radiazione con i consueti metodi dell'ottica, nemmeno ad incidenza radente come si fa per i raggi X molli. La rivelazione viene fatta osservando i singoli fotoni tramite l'effetto fotoelettrico oppure l'effetto Compton. Viene osservata mediante scintillatori in cui un cristallo ogni volta che è attraversato da un fotone γ emette un lampo di luce che viene rivelato ed amplificato da un fotomoltiplicatore. O con camere a scintille, dove la rivelazione avviene tramite l'ionizzazione e la conseguente traccia luminosa prodotta dai fotoni in un opportuno gas. Non potendo la radiazione γ essere focalizzata come quella ottica ed X, non è possibile ottenere direttamente immagini della sorgente. Per molto tempo ci si è dovuti contentare di una localizzazione assai modesta mediante l'uso di opportune griglie d'ingresso, come nel satellite **COS-B*; poi si è riusciti a ricostruire l'immagine tramite l'artificio della **maschera codificata* anteposta al rivelatore.

Il problema dell'osservazione della radiazione gamma cosmica è nell'estrema debolezza del flusso che ci perviene, anche dalle sorgenti più intense, malgrado l'altissima energia dei fotoni. Ad esempio il rivelatore del COS-B, con un'area di raccolta di $100\ \mathrm{cm}^2$ e un campo di vista di $1400°$ quadrati (equivalente ad un cono circolare di $18°$ di semiapertura), raccoglieva circa un fotone all'ora! (nel campo ottico, da una stella di magnitudine 10 sulla stessa superficie arrivano in un'ora mille miliardi di fotoni). Perciò occorre un tempo di osservazione molto lungo onde raccogliere un numero di fotoni statisticamente significativo.

Può sorprendere, ma l'astronomia gamma risale all'inizio del XX secolo, quando V. Hess con osservazioni da pallone stratosferico scoprì la presenza di raggi gamma nella radiazione ionizzante nota come **raggi cosmici*. Nel 1958, ancora da pallone stratosferico furono osservati raggi gamma provenienti da un brillamento solare. Nel 1971 da pallone stratosferico fu rivelata radiazione gamma pulsata col periodo $0{,}033$ s. Lo strumento - uno scintillatore privo di direzionalità - non consentiva di localizzare la sorgente, ma il periodo rivelò che la sorgente non poteva esser altro che la famosa pulsar Granchio. Ma osservazioni sistematiche cominciarono con i satelliti. Primo fu l'**OSO 3* (con il solito contatore a scintille) nel 1968; seguito dal **SAS 2* nel 1972 il quale tra l'altro rivelò l'emissione dell'altra famosa pulsar, quella delle Vele (lo scarso potere risolutivo - diversi gradi - non permetteva di per sé l'individuazione delle sorgenti, ma anche in questo caso l'identificazione con il ben noto oggetto ottico e radio fu evidente), e inoltre scoprì la sorgente rimasta nota come **Geminga*. Un notevole progresso nella conoscenza dell'universo in raggi γ si ebbe col satellite dell'ESA **COS-B* messo in orbita nel 1975 che fornì la prima mappa del "cielo gamma". Furono rivelate oltre ad un'emissione di fondo addensata sul piano galattico, numerose sorgenti γ localizzate pure a basse latitudini galattiche; fra queste emergevano le emissioni già note attribuite alle due pulsar, Geminga ed il quasar 3C-273. Si osserva anche radiazione gamma diffusa, gran parte della quale si ritiene originata da interazione dei raggi cosmici con la materia interstellare (Bremsstrahlung).

Nel 1977 osservazioni da pallone stratosferico rivelarono un intenso flusso di radiazione monocromatica a $0{,}063$ Å, la ben nota **riga di annichilimento* che appariva provenire dal centro della Galassia. Il satellite **GRANAT*, nel 1990, appurò che la sorgente non coincide esattamente col centro ma ne dista $15'$. Nel 1997 il satellite **SMM* riuscì finalmente a rivelare righe nucleari: quelle emesse dalla supernova 1987A, a $0{,}022$ Å e $0{,}010$ Å, originate dal decadimento del cobalto 56 in ferro 56. Risultò così verificata la teoria sull'origine degli elementi pesanti esposta nel 1957. Nel 2002 fu messo in orbita il satellite **INTEGRAL (International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory)* con il fine precipuo dell'osservazione delle righe nucleari.

Un fenomeno di straordinaria importanza e spettacolarità è quello del **lampi* γ, le improvvise emissioni di brevissima durata che balenano qua e là nel cielo. Scoperti sul finire degli anni '60, il fenomeno rimase a lungo misterioso, essendo ignota la distanza delle sorgenti. Poi, nel 1998 si è appurato che risiedono in galassie e sono collegate all'esplosione di supernovae. L'energia emessa è enorme: dell'ordine di 10^{50} erg. Gli eventi più energetici che si conoscano dopo il big bang. Anche se ormai il fenomeno è localizzato, il meccanismo fisico ne è ancora ampiamente inesplorato.

Proprio per lo studio dei lampi, fu messo in orbita nel 1991 dalla NASA il satellite **GRO* (*Gamma Ray Observatory*) il quale tra l'altro rivelò Geminga come pulsar γ, poi nel 1996 da un consorzio italo-olandese il **BeppoSAX* e nel 2004, ancora dalla NASA, il **Swift*. Il GLAST, *Gamma-ray Large Area Space Telescope,* rinominato poi FERMI dopo il lancio, effettuato dalla NASA, l'11 giugno 2008, ha portato con sé il Large Area Telescope (LAT) e il GLAST Burst Monitor (GBM).