

Corrado Lamberti



Capire l'Universo

L'appassionante avventura
della cosmologia

Prefazione di Margherita Hack



Springer

Le Stelle

Collana a cura di Corrado Lamberti

Capire l'Universo

**L'appassionante
avventura della
cosmologia**

Corrado Lamberti

 Springer

ISBN 978-88-470-1967-6
DOI 10.1007/978-88-470-1968-3

e-ISBN 978-88-470-1968-3

© Springer-Verlag Italia 2011



Questo libro è stampato su carta FSC amica delle foreste. Il logo FSC identifica prodotti che contengono carta proveniente da foreste gestite secondo i rigorosi standard ambientali, economici e sociali definiti dal Forest Stewardship Council

Quest'opera è protetta dalla legge sul diritto d'autore, e la sua riproduzione è ammessa solo ed esclusivamente nei limiti stabiliti dalla stessa. Le fotocopie per uso personale possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni per uso non personale e/o oltre il limite del 15% potranno avvenire solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da AIDRO, Corso di Porta Romana n. 108, Milano 20122, e-mail segreteria@aidro.org e sito web www.aidro.org.

Tutti i diritti, in particolare quelli relativi alla traduzione, alla ristampa, all'utilizzo di illustrazioni e tabelle, alla citazione orale, alla trasmissione radiofonica o televisiva, alla registrazione su microfilm o in database, o alla riproduzione in qualsiasi altra forma (stampata o elettronica) rimangono riservati anche nel caso di utilizzo parziale. La violazione delle norme comporta le sanzioni previste dalla legge.

Foto nel logo: rotazione della volta celeste; l'autore è il romano Danilo Pivato, astrofotografo italiano di grande tecnica ed esperienza

In copertina: la galassia M51 ripresa dal Telescopio Spaziale "Hubble" (M. Regan et al.; HHT, NASA, ESAV)

Layout copertina: Simona Colombo, Milano

Impaginazione: Erminio Consonni, Lenno (CO)

Stampa: GECA Industrie Grafiche, Cesano Boscone (MI)

Stampato in Italia

Springer-Verlag Italia S.r.l., Via Decembrio 28, I-20137 Milano

Springer fa parte di Springer Science+Business Media (www.springer.com)

*A Giusi,
che, dopo trent'anni di riviste,
desiderava un libro*

Prefazione di Margherita Hack

Con questo libro Corrado Lamberti accompagna il lettore passo passo attraverso il faticoso cammino che ha portato a conoscere l'evoluzione dell'Universo da quasi 14 miliardi di anni fa fino ad oggi.

Per secoli l'uomo è stato incuriosito e affascinato dalle stelle, quei misteriosi puntini luminosi che sembravano incollati sopra una grande cupola girevole che avvolgeva la Terra. Fra queste, che mantenevano invariate le loro posizioni relative – e che perciò erano chiamate stelle fisse –, si distinguevano cinque corpi splendenti che si muovevano fra le stelle in modo complesso e perciò chiamati dai greci pianeti, che significa “stelle erranti”, oltre naturalmente ai signori del giorno e della notte – il Sole e la Luna.

Fino al XVIII secolo gli astronomi hanno cercato di capire il perché di questi moti e hanno concentrato la loro attenzione su quello che rappresentava il loro Universo, il Sistema Solare. Già gli antichi avevano capito che la sfera delle stelle fisse aveva un raggio incommensurabilmente più grande di quello entro cui si muovevano i pianeti, il Sole e la Luna, e per molti secoli la sfera delle stelle fisse era rimasta un remoto scenario.

Galileo, grazie alle sue prime osservazioni col cannocchiale, aveva capito che la fascia della Via Lattea e le altre “stelle nebulose” altro non erano che “una congerie di innumerevoli stelle riunite insieme”, ma il suo principale interesse, in conseguenza della sua scoperta dei quattro maggiori satelliti di Giove – i “pianeti medicei” –, fu quello di vedervi una conferma del sistema copernicano. Inoltre, le sue misure di posizione della nova di Keplero, apparsa nel 1604, che dimostravano che essa era molto più lontana della Luna e apparteneva alla sfera delle stelle fisse, insieme con la scoperta che la Luna ha pianure e montagne come la Terra, smentivano i dogmi aristotelici secondo cui i corpi celesti erano perfetti e immutabili e addirittura fatti di materia diversa da quella terrestre.

L'interesse e le osservazioni del cielo al di fuori del Sistema Solare diventano centrali solo nel XVIII secolo, soprattutto per merito di William Herschel, coadiuvato dalla sorella Caroline e poi dal figlio John. Le ricerche di William si concentrano sulla Via Lattea: quanto è estesa, che forma ha, qual è la posizione del Sole in essa.

Per dare una risposta a queste domande manca un dato essenziale: la conoscenza delle distanze stellari. Il metodo delle parallassi si rivela inapplicabile, le distanze sono troppo grandi per potere ottenere qualche risultato con gli strumenti di allora, e infatti la prima parallasse, cioè la prima misura diretta di una distanza stellare, la si ottenne solo un secolo dopo, nel 1838, ad opera di Friedrich Wilhelm Bessel. La soluzione più semplice che si offriva ad Herschel consisteva nell'assumere che tutte le stelle avessero lo stesso splendore intrinseco e quindi che quanto più erano deboli, tanto più erano lontane. Con questa semplice grossolana ipotesi Herschel riuscì a stabilire la forma della Via Lattea, un disco molto schiacciato su cui si addensa la maggior parte delle stelle: in questo disco il Sole sembrava occupare una posizione centrale, perché eseguendo conteggi di stelle lungo un qualsiasi raggio del disco, il numero di stelle per grado quadrato pareva crescere nella stessa misura al diminuire dello splendore. Per secoli si era ritenuto che la Terra fosse al centro

Prefazione

dell'Universo, per ragioni religiose o filosofiche, e ora di nuovo si trovava che il Sistema Solare era al centro della Via Lattea.

Allo stesso risultato giunse più di un secolo dopo Jacobus Cornelius Kapteyn, utilizzando misure molto più attendibili di distanza delle stelle. Una decina d'anni dopo, fu Harlow Shapley, studiando la distribuzione degli ammassi globulari, invece di quella delle singole stelle, a ribaltare questa visione, scoprendo che il Sole occupa una posizione periferica. Ma la stessa causa che aveva tratto in errore Herschel, e poi Kapteyn, fece sovrastimare a Shapley la distanza del Sole dal centro della Via Lattea: la causa era l'ignoranza dell'esistenza delle polveri interstellari, scoperte solo nel 1930 dallo svizzero Trumpler.

Nel decennio che va dal 1920 al 1930 vengono avviate le esplorazioni che porteranno alla nascita della cosmologia osservativa. Con quello che è stato il primo grande telescopio moderno – il 2,5 metri di Monte Wilson, in California – ci si comincia a chiedere se la Via Lattea abbraccia tutto l'Universo, e se le “nebulose bianche” sono anch'esse immensi continenti stellari come la Via Lattea, oppure nubi di gas e polveri facenti parte della nostra Galassia.

Già dall'inizio del XIX secolo si aveva a disposizione la tecnologia necessaria per rispondere a domande sulla natura fisica delle stelle e delle nebulose – la spettroscopia –, ma solo il grande telescopio di Monte Wilson permetterà di ottenere spettri di oggetti così deboli come le nebulose. E gli spettri rivelano che ci sono due tipi di nebulose: quelle come la Via Lattea, formate da un enorme numero di stelle, e quelle che invece sono soltanto nubi di gas rarefatto.

Intanto, un'altra fondamentale scoperta, necessaria per stimare le distanze delle nebulose, è stata fatta da Henrietta Leavitt. Le stelle variabili di una data classe, quella delle Cefeidi, hanno l'importante proprietà che il loro splendore intrinseco è tanto maggiore quanto più lungo è il periodo di variabilità, cioè l'intervallo temporale che intercorre fra due massimi di splendore. Se in una nebulosa è presente una Cefeide, misurandone le variazioni luminose, e quindi il periodo, potremo risalire al suo splendore assoluto e, conoscendo dalle misure quello apparente, anche alla distanza.

Gli anglosassoni definiscono *serendipity* una scoperta del tutto inaspettata, quando si cerca una cosa e se ne trova un'altra. Le osservazioni degli spettri delle nebulose dovevano chiarire qual era la loro natura fisica, ma oltre a ciò si scopre che le “nebulose extragalattiche”, chiamate anche “universi-isole” e infine “galassie”, hanno spettri indicanti forti spostamenti verso il rosso di tutte le righe spettrali, che interpretate come effetto Doppler indicano che stanno tutte allontanandosi da noi a velocità di migliaia o anche decine di migliaia di km/s. Ma non soltanto: le velocità di allontanamento crescono proporzionalmente alla loro distanza: $V = H \cdot d$ è la famosa legge di Hubble, dove V è la velocità di allontanamento, d la distanza e H la costante di Hubble.

Queste osservazioni indicano che lo spazio in cui sono immerse le galassie si sta espandendo a una velocità tanto maggiore quanto maggiore è H . La conseguenza più immediata di queste osservazioni è che ci fu un tempo, tanto più remoto quanto più piccola è H , in cui tutto l'Universo osservabile, che si estende per miliardi di anni luce, doveva essere compresso in un punto a temperature e densità praticamente infinite. Questo istante, generalmente detto l'istante di inizio dell'Universo, è soltanto l'inizio dell'Universo osservabile. Così pure si parla comunemente del Big Bang e della fuga delle galassie, inducendo l'idea che si sia

verificata una grande esplosione che avrebbe scaraventato le galassie in tutte le direzioni. È una rappresentazione sbagliata: non sono le galassie che fuggono, ma è lo spazio che si espande e ciò spiega perché ci sembra che le galassie si allontanino a velocità proporzionali alla loro distanza. Se a una certa epoca t_1 la galassia A si trova a distanza d e la galassia B alla distanza d' e al tempo t_2 la scala dell'Universo si è raddoppiata, tutte le distanze saranno raddoppiate, anche quelle delle due galassie; perciò sembrerà che la galassia A abbia velocità $d/(t_2-t_1)$ e la galassia B velocità $d'/(t_2-t_1)$, proporzionali alla distanza. Lo spostamento verso il rosso, comunemente interpretato come un effetto Doppler, indica in realtà che anche la lunghezza d'onda della radiazione, come tutte le lunghezze, viene stirata dall'espansione dello spazio.

Le prime misure della costante di Hubble davano per H un valore superiore a 500 km/s ogni 3,26 milioni di anni luce, da cui seguiva che l'età dell'Universo era di 2 miliardi di anni, un risultato assurdo perché in tal caso la Terra sarebbe molto più vecchia dell'Universo! Quel valore di H si basava su misure sbagliate delle distanze, dovute a errori nell'assunzione dello splendore assoluto delle Cefeidi. Successive correzioni nella misura delle distanze hanno portato il valore di H a 200, poi a 100, infine al valore oggi accettato di circa 70, cosicché il tempo trascorso dal Big Bang è compreso fra 13,6 e 13,7 miliardi di anni, con un'incertezza di solo 100 milioni di anni. Soltanto una trentina di anni fa si stimava che l'età dell'Universo fosse compresa fra 10 e 20 miliardi di anni.

Dall'osservazione dell'espansione dell'Universo prendono le mosse le cosmologie moderne, con due modelli contrapposti: quello dell'Universo evolutivo, originato dal Big Bang, e quello dell'Universo stazionario, in cui la densità resta costante malgrado l'espansione perché si ipotizza che l'energia di espansione si trasformi in creazione di materia, conseguenza dell'equivalenza fra massa ed energia. Nel primo caso, l'Universo ha avuto un inizio ad altissime temperature, di cui si dovrebbero oggi osservare le conseguenze, mentre nel secondo caso non c'è mai stata una fase calda. La scoperta della radiazione fossile ad opera di Penzias e Wilson, nel 1965, e poi le successive sempre più dettagliate osservazioni dallo spazio col satellite COBE, il pallone stratosferico BOOMERanG, i satelliti WMAP e per ultimo Planck, ci hanno fornito l'immagine dell'Universo bambino, all'epoca cosmica di circa 400mila anni dopo il Big Bang, e con essa la prova definitiva a favore del modello evolutivo.

Oggi siamo in grado di ricostruire quello che è avvenuto nei primi 400mila anni, quando la materia era sotto forma di plasma, con i fotoni in moto zigzagante da una particella carica all'altra, senza potersi propagare per arrivare fino a noi a mostrarci l'immagine dell'Universo primordiale. Ma dalla temperatura e densità medie dell'Universo odierno possiamo ricostruire le condizioni dell'Universo primordiale, con la formazione di protoni e neutroni in cui sono imprigionati i quark, le reazioni nucleari che sintetizzano l'idrogeno pesante, due isotopi dell'elio e una piccola frazione di litio; possiamo avere una conferma della giustezza dei nostri calcoli confrontando le abbondanze cosmiche osservate con quelle calcolate per questi elementi e infine, dalle strutture osservate dell'Universo bambino, possiamo risalire alla composizione dell'Universo: solo un misero 4-5% per la materia normale, quella di cui siamo fatti noi e tutto ciò che ci circonda, un 24-25% di materia oscura, che non sappiamo cosa sia, che non emette alcun tipo di radiazione, ma fa sentire la sua presenza nell'Universo con la forza gravitazionale che esercita, e

Prefazione

un 70-72% dell'ancor più misteriosa energia oscura, che sarebbe responsabile dell'accelerazione dell'espansione.

Un Universo che, entro l'ordine degli errori di osservazione, dovrebbe essere un Universo euclideo, piano, in cui la somma degli angoli di un triangolo è uguale a 180° , e non curvo e chiuso, come l'analogo tridimensionale della superficie di una sfera, su cui la somma degli angoli interni di un triangolo supera 180° , e nemmeno curvo e aperto come l'analogo della superficie di un iperboloide, su cui la somma degli angoli di un triangolo è minore di 180° .

Questo libro racconta la storia completa dei passi compiuti verso una sempre più completa comprensione dell'Universo, degli errori fatti, delle trappole contenute in quello che Galileo chiamava il grande libro della Natura, come l'illusione dei nostri sensi che sia la volta celeste a ruotare attorno a noi, o il Sole a ruotare attorno alla Terra, come l'invisibile presenza delle polveri interstellari, che ci faceva credere di essere al centro della Galassia; è anche una storia degli astronomi che hanno contribuito a questa grande impresa, della loro umanità.

Gli argomenti sono espressi con grande chiarezza e semplicità, anche in quelle parti più difficili e più lontane dal nostro senso comune che caratterizzano le ricerche cosmologiche odierne, nonché in quelle riguardanti i grandi interrogativi che sono la materia oscura e l'energia oscura.

È un libro che gli studenti dei licei dovrebbero leggere, non solo per acquisire la conoscenza delle idee più recenti sull'Universo, ma anche per toccare con mano come la fisica, scienza sperimentale, possa e debba essere impiegata per spiegare le osservazioni astronomiche.

Margherita Hack
febbraio 2011

Prologo

C'è una pulce annidata tra i peli del mio gatto, una pulce curiosa e megalomane, che si è messa in testa l'idea di indagare su chi, quando, come e perché edificò le maestose rovine del Machu Picchu. Tanta stolidità arroganza mi fa solo sorridere.

Eppure, a ben pensarci, avrebbe più motivi lei, la fastidiosa *Ctenocephalides*, di sghignazzare beffarda di me e della mia arroganza. Non ho forse io, uomo, la goffa pretesa di raccontare in questo libro l'origine e l'evoluzione dell'Universo? In fondo, il Machu Picchu dista dalla pulce solo 6 miliardi di volte la lunghezza del suo corpo, mentre se io provassi ad allineare 6 miliardi di corpi come il mio, messi in fila uno dietro l'altro come i grani di un rosario – e dovrei impegnare nell'operazione tutti gli abitanti del mondo –, non giungerei neppure a Venere o a Marte, che sono i pianeti più vicini. E, pensate un po', noi uomini abbiamo la presunzione di indagare l'intero Universo!

Occorrerebbe una catena di novemila miliardi di corpi umani per spingerci fino al confine esterno dei pianeti che circondano il Sole, e ci troveremmo ancora sull'uscio di casa. Perché il Sistema Solare è sconsolatamente piccolo al cospetto non dico dell'Universo, ma anche solo della nostra Galassia. Per arrivare alla stella più vicina, dovremmo sistemare in fila la bellezza di 220mila miliardi di corpi umani e ce ne servirebbero 150 miliardi di miliardi per approdare al centro della Via Lattea.

Né, qui giunti, saremmo andati molto lontano. Abbiamo appena mosso qualche passo fuori casa; ci siamo lasciati alle spalle il nostro quartiere e ora ci troviamo nel centro della nostra città, o meglio della nostra "isola", che è l'immagine solitamente usata per indicare le galassie che popolano l'Universo: di galassie se ne contano a miliardi, distanti l'una dall'altra milioni di anni luce. Una sterminata distesa di isolotti sparsi alla rinfusa in quel vasto oceano che è il Cosmo.

Per raggiungere la galassia vicina più simile alla nostra, quella che gli astronomi chiamano M31 e che possiamo scorgere anche a occhio nudo nella costellazione d'Andromeda, dobbiamo percorrere un tragitto che è quasi cento volte più lungo di quello che ci ha portati nel centro della Via Lattea. E quando finalmente fossimo su M31 avremmo compiuto solo il primo timido passo d'avvicinamento al mondo delle galassie: per attraversare l'intero Universo osservabile dovremmo infatti affrontare un cammino ancora migliaia e migliaia di volte maggiore.

La malefica sifonattera ha dunque le sue buone ragioni per deridere gli uomini. Se il mio micio decidesse di trasferirsi in Perù, con una giornata di volo aereo e un'altra di trasferimento in quota sulle Ande attorno a Cuzco porterebbe la sua ospite a visitare i siti che tanto l'appassionano. Due giorni soltanto. Noi umani, invece, con il veicolo spaziale più veloce che abbiamo mai costruito, in due giorni saremmo in grado di percorrere non più di 3 milioni di chilometri, la distanza che la luce copre in 10 secondi. Allo stato delle cose, le nostre speranze di andare a visitare personalmente Proxima Centauri, la stella più vicina al Sole, distante solo 4 anni luce, sono praticamente nulle. Se anche potessimo moltiplicare per 100 la velocità di crociera delle nostre astronavi ci occorrerebbero 7 secoli per giungere alla meta. Non facciamoci illusioni: siamo prigionieri di uno spazio angusto, al di fuori del quale non abbiamo speranza di mettere piede. Almeno per il momento. Su Proxima Centauri, se partissimo adesso, potrebbero semmai approdare i nostri pronipoti della trentesima generazione.

A proposito di generazioni, il Machu Picchu venne edificato seimila generazioni di

Prologo

pulci fa. E le pulci c'erano già allora. L'*homo sapiens sapiens*, l'uomo moderno, è comparso circa seimila generazioni umane fa. L'Universo ha un'età centomila volte maggiore, eppure noi abbiamo la presunzione di raccontarne tutta l'evoluzione passata, risalendo fino a epoche tanto lontane che non erano stati ancora generati neppure gli elementi chimici che ci costituiscono e che sono essenziali per la nostra sopravvivenza. Insomma, anche il confronto temporale con l'insetto parassita sembrerebbe giocare a nostro sfavore.

Eppure, noi, piccole pulci cosmiche, annidate su un minuscolo pianeta, un giorno riusciremo a vincere la scommessa di raccontare per intero e nel dettaglio la storia dell'Universo sconfinato che ci ospita.

La nostra forza è l'intelligenza, quella strana e prodigiosa facoltà che solo noi abbiamo, qui sulla Terra, di incuriosirci di tutto ciò che ci circonda, di voler conoscere e capire, di entrare nei complessi meccanismi che plasmano il mondo per ricostruirne la storia passata e prevederne quella futura, con l'intenzione di intervenire attivamente nei processi naturali per piegarli ai nostri fini. L'intelligenza ci ha reso abili, pratici, efficienti, anche se l'abilità non sempre è illuminata dall'intelligenza. Molto spesso operiamo male, sollecitati da impellenze che mal governiamo, da egoismi di classe sociale, o nazionali, che non tengono nel dovuto conto l'interesse generale della specie. Ma un giorno riusciremo a darci forme politiche di controllo e di comando che supereranno gli orizzonti spaziali e temporali angusti entro cui ancora oggi ragioniamo e operiamo. Solo allora potremo dire d'aver dispiegato tutto il potenziale della nostra mente. Ce la faremo? Sì, perché siamo esseri intelligenti.

Studiare l'Universo, sforzarsi di capirlo, stimola a muoversi in quella direzione. Quando ci si confronta con le smisurate dimensioni spazio-temporali della scena cosmica in cui siamo attori, da un lato si coglie la nostra piccolezza materiale, dall'altro si può pienamente apprezzare il valore grandioso di quel dono che la Natura ci ha fatto, l'intelligenza.

Per quel che ne sappiamo, non esistono altri esseri intelligenti nella Galassia. Nulla vieta che esistano, anche molto più intelligenti di noi, e personalmente sono propenso a pensare che sia così. Ma finché non ne avremo una prova certa, dobbiamo pensare che solo a noi uomini del pianeta Terra sia stata concessa questa formidabile prerogativa e allora guai a non farne tesoro, anzitutto per riflettere sull'Universo, che poi significa riflettere su noi stessi, sul nostro valore, sul senso da dare alla storia della nostra specie. Non si può essere uomini, degni di questo nome, senza essere anche un po' cosmologi.

Del resto, non c'è cultura umana che, nel passato, non abbia avvertito lo stretto legame che c'è tra l'uomo e il cielo e che, attraverso i suoi filosofi, non si sia sforzata di attribuire una dimensione cosmica al nostro essere uomini. Il cosmologo è il filosofo della natura dei giorni nostri, dell'epoca in cui il cielo può essere non solo cantato dai poeti, invocato dai sacerdoti, contemplato con stupore o scrutato con inquietudine, ma anche, finalmente, indagato con razionalità, misurato e oggettivamente compreso dalla scienza.

Ecco dunque il senso di questo libro: raccontare le conquiste della cosmologia nel modo più piano possibile, per favorire l'approccio all'argomento di quanti non abbiano specifiche conoscenze fisiche e astronomiche, acquisite attraverso studi superiori.

Divulgare la scienza è difficile. La cosmologia, poi, presenta aspetti altamente tecnici che mettono a dura prova le qualità del divulgatore. Mi sforzerò di rendere

i concetti il più possibile intuitivi, affinché il lettore possa coglierne almeno il senso generale, se non anche il loro significato fisico e matematico. Talvolta ricorrerò a esemplificazioni che al purista del linguaggio scientifico faranno storcere il naso, ma non esagererò in questo esercizio, ricercando il giusto equilibrio fra rigore e divulgazione, e comunque evitando che la semplificazione scivoli nella banalizzazione. Quando si renderà indispensabile, introdurrò anche qualche equazione e box d'approfondimento che però non richiedano conoscenze matematiche superiori a quelle di uno studente di liceo: questo perché il linguaggio della matematica ha una concretezza, oltre che un'elegante compattezza, che la lingua parlata non può neppure sognarsi di avvicinare.

Se, chiudendo l'ultima pagina, il lettore sarà un poco più conscio della propria dimensione cosmica, se gli capiterà di riflettere come non aveva mai fatto prima sulla storia degli uomini, inquadrandola nel contesto della storia dell'Universo, se gli si saranno spalancati davanti nuovi sconfinati orizzonti da esplorare, allora lo scopo del libro sarà stato raggiunto.

Se poi anche uno solo dei miei giovani lettori, stimolato da queste pagine, deciderà di intraprendere gli studi di fisica e la carriera del ricercatore astrofisico, allora la gratificazione per l'autore sarà massima. Ci sarà un cervello in più ad alimentare l'intelligenza collettiva della specie e tutti noi gli saremo grati per quanto egli contribuirà ad aprirci la mente, elevandoci dalla misera condizione di povere piccole pulci che non sanno guardare al di là di quattro peli di gatto.

Corrado Lamberti
cor.lamberti@virgilio.it
febbraio 2011

Sommario

Prefazione di Margherita Hack	VII
Prologo	XI
1. I precursori	1
Ammaliato dall'armonia	1
Caroline	3
La struttura dei cieli	5
La parallasse stellare	6
Una vecchia idea di Galileo	8
Carotaggi galattici	11
Non solo stelle	14
<i>Nebulae</i>	16
Nasce la cosmologia	18
2. Il problema della distanza	21
La nascita dell'astrofisica	21
Distanze e velocità	22
La Via Lattea di Kapteyn	26
Un metro per la Via Lattea	29
Le Cefeidi di Henrietta	32
3. Gli anni del Grande Dibattito	41
Un refuso fa piccola la Galassia	41
Shapley e le Cefeidi	42
La Galassia di Shapley: enorme, con il Sole in periferia	44
La Galassia di Curtis: piccola, con il Sole al centro	47
Un confronto duro, ma leale	50
Le argomentazioni di due campioni	52
Entrambi in errore, entrambi vincitori	55
4. La scoperta dell'Universo in espansione	59
Edwin Hubble, un <i>leader</i> nato	59
Folgorato da Slipher	61
Cefeidi nella nebulosa d'Andromeda	62
La lettera che distrusse l'Universo di Shapley	65
La classificazione morfologica delle "nebulose extragalattiche"	66
I lavori pionieristici di Vesto Slipher	68
La legge di Hubble	70
Dar fondo alle risorse empiriche	73

Sommario

5. Modelli cosmologici relativistici	77
Con gli occhi della mente	77
Il metodo dell'astronomo	78
Il Principio Cosmologico	80
Una legge sola	82
Lo spazio ha una forma?	84
L'Universo della Relatività Generale	88
Gli ingredienti del modello	93
L'Universo di Einstein e la costante cosmologica	94
6. Modelli d'Universo	101
I modelli FRW	101
Il fattore di scala	102
Ferme, eppure in moto	104
Tante distanze, tutte diverse	108
Come interpretare il <i>redshift</i> ?	112
Orizzonti	115
L'equazione di Friedmann	119
I parametri di densità e di decelerazione	122
7. Big Bang	129
Un nomignolo sarcastico	129
La radiazione cosmica di fondo	132
Il termometro dell'Universo	136
L'era radiativa	139
Il modello standard delle particelle elementari	142
L'unificazione delle forze	145
8. L'Universo dei primordi e l'inflazione	149
L'era di Planck	149
I problemi che l'inflazione risolve	151
Una provvidenziale asimmetria	155
La nucleosintesi primordiale	156
Libertà per i fotoni!	163
Omogeneo, ma non troppo	165
Germi oscuri	167
L'origine delle fluttuazioni	172

9. Cosmologia di precisione	175
Eredi di Hubble	175
Le SN Ia e l'espansione accelerata	180
Armonie cosmiche	185
I picchi acustici	190
L'enigma dell'energia oscura	196
L'energia oscura nella storia dell'Universo	200
Una nuova fisica?	203
Epilogo	205
Costanti fisiche e grandezze astronomiche	209
Indice	211

1 I precursori

Ammaliato dall'armonia

Nel suo realizzarsi, la Storia, con la S maiuscola, spesso si snoda attraverso percorsi insoliti e contorti.

Attorno alla metà del XVIII secolo, l'attenzione degli astronomi era ancora tutta indirizzata sulla dinamica degli oggetti del Sistema Solare. La legge di gravitazione universale di Isaac Newton era relativamente fresca d'enunciazione (1687) e stava dimostrando la sua straordinaria efficacia nello spiegare la forma delle orbite e i moti periodici dei pianeti. L'attività prevalente nei grandi Osservatori statali che Francia e Inghilterra avevano fondato negli ultimi decenni del XVII secolo era la sistematica perlustrazione telescopica dei dintorni dei pianeti conosciuti, alla ricerca di eventuali satelliti, oltre che la caccia a nuove comete; attività che si rivelavano produttive e che venivano incoraggiate dal continuo miglioramento degli strumenti d'osservazione. Per gli astronomi del tempo, la dinastia dei Cassini a Parigi e gli Astronomi Reali inglesi Edmond Halley, James Bradley, Nevil Maskelyne, la realtà del Cosmo si esauriva, di fatto, entro i confini del Sistema Solare.

Più in là, a distanze che si intuiva fossero abissali, ma che ancora non si sapeva misurare, v'era il cielo delle stelle fisse, quel fondale punteggiato da astri di diversa brillantezza e colore che nessuno aveva ancora avuto l'ardire di indagare seriamente, limitandosi a sfruttarlo come sistema a cui riferire le misure di posizione di pianeti e comete. Le stelle rappresentavano niente più che una distesa di immobili puntini disegnati sul lenzuolo nero del cielo che parevano essere messi lì apposta perché gli astronomi potessero rendersi conto degli spostamenti dei corpi celesti mobili, gli "astri erranti" degli antichi, e misurarli accuratamente.

Assorbiti com'erano dagli eventi che si svolgevano sul proscenio, gli astronomi professionali non si davano cura del fondale. Fu un astrofilo a restarne dapprima incuriosito, poi affascinato, fino al punto di dedicarvi per intero la propria vita.

Quando, nel 1757, a 19 anni, il giovane Friedrich Wilhelm Herschel abbandonò la natia Germania per l'Inghilterra, a seguito della Guerra dei Sette Anni e dell'invasione della sua Hannover da parte delle truppe francesi di Luigi XV, tutto avrebbe potuto immaginare per il suo futuro, fuorché che fosse destinato a diventare il più celebrato osservatore del cielo del suo tempo, il più rinomato costruttore di telescopi, lo scopritore di Urano, l'iniziatore delle indagini cosmologiche moderne.

La Storia, dicevamo, spesso si snoda attraverso vie bizantine. Come giunse Herschel all'astronomia? Nato in una famiglia in cui il padre, bandista della Guarnigione militare, decise di educare alla musica tutti i figli maschi (erano in quattro), il giovane non frequentò scuole pubbliche, come del resto i fratelli e le due sorelle. Il reddito familiare era quel che era e non sarebbe bastato per dare un'istruzione scolastica a tutti. Il padre Isaac non poté far altro che affidare la formazione culturale dei figli al maestro della modesta



Ritratto di William Herschel (1738-1822) più che settantenne.

scuola della Guarnigione, incaricato, in particolare, di insegnare loro il francese. Costui, tuttavia, era uomo di una certa cultura, con predilezioni per la filosofia e la scienza, e, avendo potuto apprezzare l'intelligenza vivace del piccolo Wilhelm, non disdegnò di affiancare all'insegnamento della lingua quello di altre discipline, come la logica e la metafisica. Molti anni dopo, Herschel pagò un tributo di riconoscenza al suo vecchio maestro, benedicendo la buona sorte che gliel'aveva fatto incontrare: "A questa fortunata circostanza indubbiamente io devo se, benché amassi tantissimo la musica, e facessi considerevoli progressi in quel campo, decisi che d'allora in poi mi sarei dedicato con entusiasmo, in ogni momento libero da impegni lavorativi, al perseguimento del Sapere,

che riguardai come un Bene superiore, fonte di felicità, al quale risolsi di affidare tutte le mie scelte di vita" (in *Lettera al Dr. Hutton*, 1782).

Lasciata Hannover e la banda del reggimento della Guardia, in cui suonava l'oboe, giunto in Inghilterra, anglicizzato il nome in Frederick William, il giovane campava come strumentista e impartendo lezioni private di musica. Nella città termale di Bath che l'aveva accolto divenne ben presto organista della Octagon Chapel. L'armonia musicale lo ammaliava e, per puro caso, si trovò un giorno fra le mani un libro di Robert Smith, docente all'Università di Cambridge, che affrontava il tema della teoria dell'armonia sotto il profilo matematico. Se lo bevve in un sorso, apprezzando le notevoli capacità divulgative dell'autore, del quale si precipitò ad acquistare anche le opere precedentemente date alle stampe.

Tra queste, v'era un volumetto in cui Smith, che era astronomo, oltre che fisico e matematico, sviluppava la neonata teoria dell'ottica geometrica; in quelle pagine, William trovò non solo formule e grafici, peraltro utilissimi, ma anche capitoli nei quali venivano illustrati i procedimenti manuali per la lavorazione di lenti e specchi, e infine una sezione nella quale l'autore descriveva gli oggetti celesti che un buon telescopio avrebbe potuto mostrare. Fu dopo la lettura di questo *A Complete System of Optiks* che in Herschel si sviluppò la febbre dell'astronomia, che dapprima si affiancò all'entusiasmo da sempre manifestato per la musica, poi lo sopravanzò nettamente, a mano a mano che il Nostro raccoglieva consensi e risultati sempre più gratificanti.

Fu dunque un incontro del tutto casuale quello di William Herschel con l'astronomia: un incontro che si rivelerà particolarmente fortunato per la storia della scienza, essendo destinato ad aprire un capitolo nuovo nello studio del cielo. L'entusiasmo di un giovane neofita riuscirà infatti a spalancare nuove visioni e a indicare nuovi orizzonti anche all'astronomia professionale, inaugurando l'indagine sulla nostra Galassia e sull'Universo, su ciò che Herschel chiamava "la struttura dei cieli".

Caroline

Herschel cominciò a costruire lenti per telescopi, mettendo a frutto la teoria appresa sul libro di Smith. Le sue prime realizzazioni furono strumenti a lente (telescopi rifrattori), che però egli giudicò troppo costosi e soprattutto poco maneggevoli, a causa dell'eccessiva estensione del tubo che le lunghe focali imponevano. Perciò, li abbandonò quasi subito, preferendo loro i riflettori, strumenti a specchio.

Gli specchi non erano ricavati da vetro, ma da una speciale lega di bronzo (lo *speculum*) che aveva il pregio d'essere relativamente facile da lavorare; il difetto era la scarsa riflettività (non era stata ancora introdotta la tecnica dell'argentatura della superficie riflettente). Poiché uno specchio secondario deviatore, anche questo fatto in *speculum*, introducendo una seconda riflessione avrebbe ancor più ridotto la luce trasmessa all'occhio dell'osservatore, Herschel decise a un certo punto di abbandonare lo schema del classico telescopio newtoniano, che prevedeva appunto lo specchietto piano secondario, a favore di un disegno ottico in cui lo specchio primario parabolico, con l'asse leggermente disallineato da quello ottico, andava a formare l'immagine alla sommità del tubo e lateralmente ad esso, dove l'oculare poteva raccogliertela direttamente, senza ulteriori riflessioni.

L'osservatore – Herschel stesso: mai si sarebbe privato di quel piacere – doveva quindi appollaiarsi su una piattaforma rialzata, oppure arrampicarsi su una scala, per poter apprezzare la visione telescopica; là sopra, sarebbe stato poco agevole portarsi appresso il taccuino su cui annotare ciò che l'oculare via via mostrava. Oltretutto, sarebbe occorso un lume per scrivere, il che avrebbe vanificato l'adattamento dell'occhio all'oscurità, che veniva conseguito abituandolo alle condizioni di buio totale per almeno una mezz'oretta prima di intraprendere le osservazioni, il tempo necessario alla pupilla per dilatarsi al massimo e predisporre a raccogliere anche i particolari più evanescenti degli oggetti celesti. Occorreva dunque un assistente che, dentro casa, in una stanza illuminata, trascrisse ordinatamente le descrizioni dettate a voce dall'osservatore, insieme con le stime di luminosità e le misure di posizione. L'assistente era la sorella Caroline, con la quale William aveva tanto insistito affinché lo raggiungesse in Inghilterra.

Caroline era di dodici anni più giovane e, fra tutti i fratelli, era quella a cui William era più affezionato. Ad Hannover non aveva ricevuto alcuna educazione. La madre, di vedute ristrette, le insegnò a cucinare e a riassetare la casa, ma niente più. La tenne alla larga persino dalla scuola della Guarnigione, per tema che, appreso il francese, la giovane nutrisse qualche ambizione di autonomia economica proponendosi come governante nelle case patrizie della città. Ancora da adulta, quando ormai era da tutti considerata se non proprio una donna di scienza, almeno una provetta astronoma osservatrice, per eseguire semplici calcoli matematici Caroline doveva consultare in continuazione le tabelle.

Invitandola a Bath, William, che restò scapolo fino a età avanzata, pensava di ricevere dalla sorella un aiuto nella cura della casa. Caroline accolse l'invito nell'estate del 1772 e, sulle prime, se non se ne pentì, poco ci mancò. Lei avrebbe voluto ricevere lezioni di canto dal fratello, per poterlo affiancare nei concerti, ma questi era troppo preso dagli impegni lavorativi per impartirgliene. Come se non bastasse, nella primavera successiva, William, folgorato dall'astronomia, trasformò l'intera abitazione in un'officina ottica e

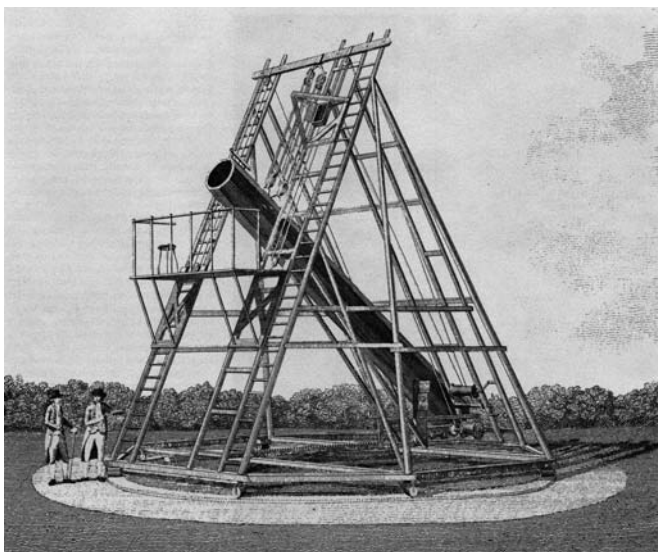
Capire l'Universo

meccanica. C'erano utensili dappertutto: il reparto meccanico per la costruzione delle montature era in cantina; il reparto ottico occupava tutte le stanze della casa, compresa parte della cucina. Mentre William lucidava i suoi specchi, e l'operazione poteva durare settimane, per dodici o più ore al giorno, lei gli teneva compagnia leggendogli qualche libro e talvolta, come ebbe poi a ricordare, persino imboccandolo, quando la particolare fase della politura dello specchio imponeva al fratello di proseguire ad oltranza, reprimendo persino i più elementari bisogni fisiologici.

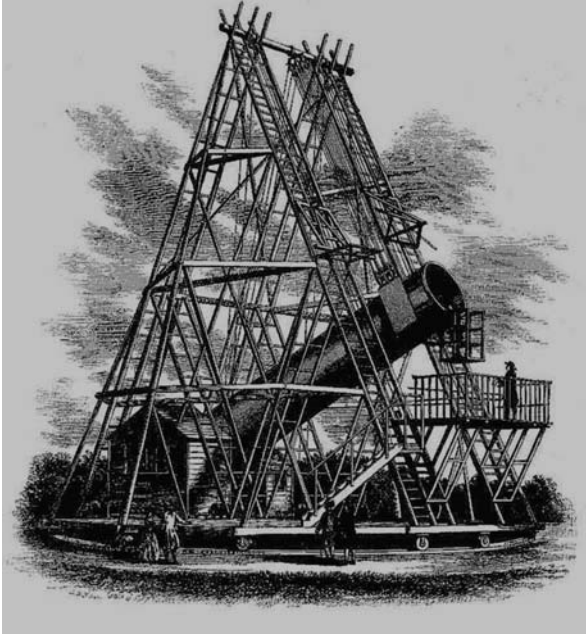
A William aveva preso la smania dello strumento sempre più grande, sempre più perfetto. Dai 10-15 cm di diametro dei primi telescopi, passò ben presto a uno strumento di 30 cm e 6 m di focale, che però si rivelò difficile da manovrare, per cui i mesi successivi vennero dedicati allo studio e alla realizzazione di una montatura che consentisse di puntarlo agevolmente verso la regione di cielo desiderata e di inseguirla per qualche tempo, compensando la rotazione diurna della volta celeste, senza che l'osservatore dovesse distogliere lo sguardo dall'oculare.

Raggiunta una soluzione soddisfacente, la applicò alla montatura della sua successiva realizzazione, uno strumento del diametro di 46 cm, sempre con focale di 6 m, completato nel 1783, di cui Herschel fu particolarmente soddisfatto, sia per la qualità ottica (aveva introdotto la sua variante allo schema di Newton), sia per la montatura e per il disegno della piattaforma osservativa, che garantivano una certa comodità d'osservazione.

Ancora non sazio, si avventurò infine nella costruzione di un telescopio di 1,2 m di diametro e 12 m di focale, il più grosso strumento del suo tempo, che ebbe una vita tribolata e che operò solo fin verso il 1811, quando lo specchio si deteriorò, sconsigliando il prosieguo dell'attività scientifica.



Il telescopio maggiormente utilizzato dai fratelli Herschel per le loro rassegne celesti fu il riflettore di 46 cm e 6 m di focale. Da notare l'impalcatura destinata a ospitare l'osservatore. William da lì dettava misure e descrizioni; dentro casa, Caroline annotava tutto con cura maniacale.



Il telescopio di 1,2 m di diametro e 12 m di focale, il più grosso strumento del suo tempo, era difficile da manovrare. Venne utilizzato solo in rare occasioni e dismesso dopo il 1811.

Ormai Herschel s'era conquistata la fama di abile ottico e costruttore di strumenti, tanto che privati e istituzioni gli commissionavano specchi e telescopi. Si valuta che ne abbia realizzati ben più di cento e la loro vendita costituiva un introito importante per il bilancio familiare, visto che gli impegni lavorativi in campo musicale si andavano progressivamente riducendo di pari passo con il crescere del suo fervore per le osservazioni astronomiche.

La struttura dei cieli

William Herschel non era particolarmente attratto da satelliti, comete e pianeti, ossia dai corpi del Sistema Solare. Benché debba la sua fama soprattutto alla scoperta di Urano (13 marzo 1781), il primo pianeta del Sole ad essere scoperto in tempi storici, e pur avendo rivelato per primo l'esistenza di un paio di satelliti di questo pianeta (Oberon e Titania, 1787, col 46 cm) e di un altro paio di Saturno (Mimas ed Enceladus, 1789, col telescopio di 1,2 m), ad affascinarlo veramente era la congerie di puntini luminosi incastonati sul fondale scuro del cielo. E si prefisse di osservarli, contarli, catalogarli. Come scrisse nel 1811: "L'obiettivo ultimo e vero di tutte le mie osservazioni è sempre stato la conoscenza della struttura dei cieli". L'Universo era il suo interesse, non il Sistema Solare. La cosmologia, non la meccanica celeste.

Avrebbe voluto perlustrare sistematicamente ogni angolo della volta celeste, ma si rese subito conto che sarebbe stata un'impresa troppo impegnativa puntare le varie re-

Capire l'Universo

gioni ed inseguirvi le sorgenti. Così, adottò la strategia di mantenere fisso il telescopio per tutta la notte, puntandolo a un'altezza che la notte successiva sarebbe stata di un poco diversa, e di descrivere ad alta voce tutto ciò che la rotazione della volta celeste via via gli portava dentro l'oculare. Caroline, dentro casa, piegata su un tavolo con la penna in mano e con un occhio all'orologio a pendolo, prendeva nota di tutto: senza il suo contributo, William non avrebbe potuto portare a termine le sue rassegne celesti, che in totale furono quattro, realizzate con strumenti sempre più potenti. Ogni notte veniva esplorata una sottile striscia di cielo; in seguito, accostando con pazienza le varie strisce, era possibile ricomporre una mappa completa di tutto il cielo osservabile dall'emisfero settentrionale, nonché catalogare gli oggetti in esso presenti.

Herschel voleva anzitutto comprendere come si distribuissero le stelle nell'Universo. Sulla volta celeste, anche chi osservi a occhio nudo si rende subito conto che la distribuzione non è per nulla omogenea: le stelle si addensano fortemente in quella striscia lattiginosa che attraversa tutto il cielo lungo un cerchio massimo e che gli antichi greci chiamarono Via Lattea. Ma a che distanza stanno le stelle da noi? C'è un metodo che renda possibile ricostruire la vera distribuzione spaziale (tridimensionale) delle stelle a partire dalla loro disposizione (bidimensionale) sulla volta celeste? Fin dove si estende l'Universo stellare? E il Sole sta nei pressi del centro del tutto, o piuttosto in posizione decentrata e periferica? Erano questi gli interrogativi che Herschel si poneva. Le sue rassegne celesti miravano a stabilire le dimensioni e il contorno del mondo siderale. Ma per farlo bisognava essere in grado di rilevare la distanza delle stelle.

La parallasse stellare

La misura delle distanze stellari era il problema che aveva angustiato generazioni di astronomi, da Copernico in poi, e che ancora nessuno aveva risolto: tra l'altro, era uno degli argomenti più convincenti che gli oppositori del modello eliocentrico agitavano per screditare l'asserito moto orbitale della Terra intorno al Sole. Per quale motivo?

Facciamo un semplice esperimento. Stendiamo il braccio davanti a noi, chiudiamo il pugno della nostra mano con l'eccezione di un dito, che terremo dritto in verticale e che ci servirà da indice. Ora guardiamo il dito con il solo occhio destro (chiuderemo il sinistro) e conserviamo memoria del punto preciso (P_1) sul muro della nostra camera in cui il dito si proietta. Ripetiamo l'operazione con l'occhio sinistro, con il destro chiuso, e prendiamo nota del nuovo punto di proiezione (P_2). I due punti saranno diversi: se chiuderemo alternativamente gli occhi vedremo il nostro dito "saltellare" da P_1 a P_2 , e viceversa, come se si spostasse rispetto alla parete di fondo. È il ben noto fenomeno della *parallasse*: un oggetto relativamente vicino, se traggurato da due posizioni differenti (la distanza tra le due è detta *base parallattica*), apparirà proiettarsi in due punti diversi della parete che ci sta di fronte che assumiamo sia parecchie volte più lontana dai nostri occhi di quanto sia il dito. Anzi, portiamoci davanti alla finestra e ripetiamo l'operazione nei confronti del lontano orizzonte, in modo da essere certi che lo sfondo sia molto lontano.

Per dare un contenuto quantitativo alla nostra esperienza, misuriamo la separazione angolare tra le due posizioni proiettate: conoscendo la distanza che c'è tra i nostri occhi, con un po' di trigonometria, dalla misura di quest'angolo potremo calcolare facilmente

la distanza tra i nostri occhi e il dito. E questo lo si capisce anche in modo intuitivo, senza troppi calcoli matematici. Immaginiamo infatti di piegare un poco il braccio per avvicinare il dito agli occhi: chi non capisce che le due posizioni tra le quali il dito saltellerà sono ora più discoste? In modo analogo, l'angolo parallattico risulterà maggiore se manteniamo il braccio teso come prima ma se, per qualche misterioso motivo, i nostri occhi dovessero lasciare le loro posizioni, allargandosi fino alla distanza delle orecchie. Ovvero, se aumentasse la base parallattica. Insomma, dovrebbe essere chiaro che c'è una precisa relazione matematica tra la lunghezza della base parallattica, l'angolo di parallasse e la distanza del dito, tale per cui, conoscendo le prime due è immediato ricavare la terza.

Pensiamo ora a una stella relativamente vicina al Sole, per esempio Sirio, la più brillante del cielo, che oggi noi sappiamo distare solo 8,6 anni luce. Se chiudiamo ora un occhio, ora l'altro, forse che la vedremo "saltellare" in cielo? Certamente no: la base (la distanza tra i nostri occhi) è troppo piccola e l'angolo parallattico risulta perciò essere infinitesimale, collocandosi al di sotto di ogni possibilità di concreta misurazione. Né migliora di molto la situazione se facciamo compiere la misura a due osservatori posti in città diverse, distanti centinaia di chilometri, o addirittura agli antipodi, l'uno al Polo Nord e l'altro al Polo Sud della Terra. Ancora la base è troppo ridotta in proporzione alla distanza di Sirio, e l'angolo parallattico piccolissimo.

Se vogliamo utilizzare la base più estesa che si possa immaginare qui sulla Terra, dobbiamo sfruttare quella che ci mette a disposizione il nostro pianeta nel suo moto di rivoluzione attorno al Sole. Basta infatti compiere le misure di posizione della stella a sei mesi di distanza, quando la Terra transita per due punti dell'orbita diametralmente opposti, e avremo una base estesa quanto è larga la sua orbita.

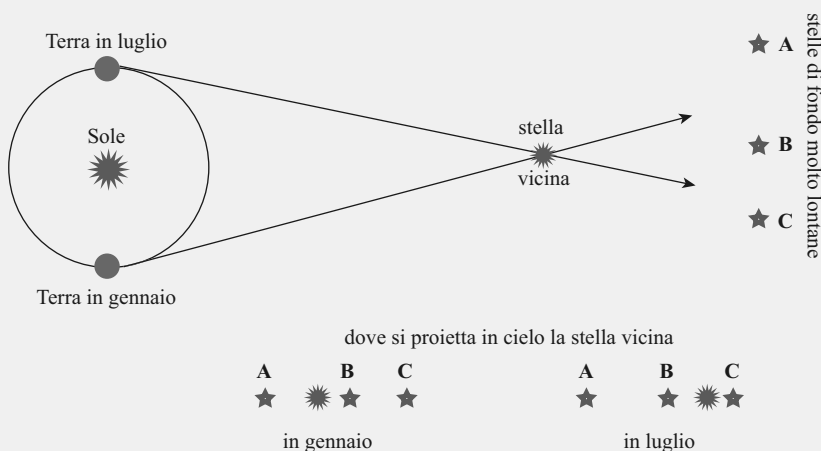
Anche così, tuttavia, a causa dell'enorme distanza che ci separa dall'Universo siderale, l'angolo che tipicamente si misura è dell'ordine di un'esigua frazione di secondo d'arco: decimi o centesimi di secondo d'arco, un angolo piccolissimo. Per averne un'idea, si pensi che 1 secondo d'arco (1"), che rappresenta la tremilaseicentesima (1/3600) parte di 1 grado (1°), è l'angolo di separazione tra le luci di posizione di un'auto che osserviamo quand'è lontana 400 km da noi. Nel caso di Sirio, che pure è una tra le stelle più vicine al Sole, l'angolo da misurare è circa un terzo di secondo d'arco: per la precisione, 0",379.

Naturalmente, tutto ciò ha un senso se la Terra davvero orbita attorno al Sole, perché altrimenti, se fosse ferma al centro del Sistema Solare, come voleva Tolomeo, la base sarebbe nulla e non ci sarebbe alcun effetto parallattico. Poiché tutti gli sforzi fatti nel XVII secolo per misurare la parallasse annua stellare non avevano dato alcun frutto, era buon gioco per i tolemaici sostenere l'immobilità della Terra. Per i copernicani, a partire da Galileo e Keplero, la spiegazione era diversa: se la misura era impossibile per i telescopi dell'epoca, occorreva solo attendere con pazienza lo sviluppo di strumenti più potenti. In effetti, bisognò attendere non poco affinché la previsione si avverasse. La prima parallasse stellare venne infatti misurata solo due secoli dopo, nel 1838, da Friedrich W. Bessel, sulla stella 61 Cygni.

La mancata rilevazione della parallasse stellare stava segnalando agli astronomi del XVII e XVIII secolo che l'Universo è sterminato nella terza dimensione spaziale, la profondità.

La parallasse e il parsec

Una stella osservata da punti diametralmente opposti sull'orbita terrestre si proietta sulla volta celeste in due posizioni diverse. Si assume come riferimento per la misura delle posizioni un insieme di stelle (o di altre sorgenti celesti) che siano molto lontane, così da non essere soggette esse stesse ad alcun effetto di parallasse. La misura dello spostamento apparente consente di ricavare la distanza della stella da noi; anzi, questo è il metodo più sicuro (l'unico veramente affidabile) che gli astronomi abbiano a disposizione per misurare le distanze degli astri.



Osservata a sei mesi di distanza, per effetto della parallasse una stella relativamente vicina sembra mutare posizione rispetto alle stelle lontane.

Gli astronomi definiscono l'angolo di parallasse p di una stella come la metà dello spostamento parallattico (vedi figura) o, equivalentemente, come l'angolo sotteso

Una vecchia idea di Galileo

Dopo che anche James Bradley, terzo Astronomo Reale, attorno al 1725 aveva tentato senza successo di misurare la parallasse di una stella (per la precisione, della *gamma* Draconis), Herschel attaccò il problema riprendendo in considerazione un ingegnoso suggerimento che Galileo aveva espresso nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*: lo spostamento parallattico di una stella sarebbe stato assai più semplice da misurare se, invece di riferire la posizione stellare a un punto "canonico" del cielo, come il polo celeste, oppure lo zenit dell'osservatore, con tutti gli errori che ciò potrebbe comportare in sede di riduzione delle misure, la si fosse riferita a un punto angolarmente vicino alla stella in questione, discosto solo pochi primi d'arco da essa (1 primo d'arco, l', è pari a 60") e perciò presente nello stesso campo telescopico.