

C'era una volta

Come si determina l'età di stelle, galassie e dell'intero universo

di Antonaldo Diaferio



a. Illustrazione di Galileo Galilei (1564-1642), mentre mostra al Doge di Venezia il suo cannocchiale, il primo a essere utilizzato per osservazioni astronomiche, in piazza San Marco nell'agosto del 1609. Galileo, a destra del cannocchiale, venne a conoscenza del primo telescopio, o "tubo magico", inventato in Olanda nel 1608, e ne costruì uno suo nel 1609. Utilizzandolo scoprì numerose stelle invisibili a occhio nudo, le lune di Giove e montagne sulla Luna e pubblicò i suoi risultati nel *Sidereus Nuncius* (1610).

I moti periodici del Sole, della Luna e di tutta la sfera celeste hanno misurato lo scorrere del tempo per la maggior parte della civiltà umana, segnando le ore della giornata, il trascorrere dei mesi e degli anni. Tuttavia, nel passato, gli oggetti celesti non erano considerati assoggettati alla caducità propria del mondo terrestre. La maggior parte delle mitologie del mondo antico immaginava che tutti gli oggetti celesti fossero stati formati in un unico evento creativo e che fossero immutabili. Con l'apparizione di stelle *novae*, registrate nel mondo occidentale dal XVI secolo, e con le osservazioni del suolo lunare con valli e montagne a opera di Galileo all'inizio del '600, l'idea dell'immutabilità degli oggetti celesti cominciò a vacillare. La fine della dicotomia aristotelica tra cielo e terra e la spinta dell'Illuminismo prima e del Positivismo poi aprirono la strada al pensiero che gli oggetti celesti potessero nascere e morire.

Lo sviluppo delle scienze fisiche, la termodinamica e l'ottica *in primis*, con le prime osservazioni degli spettri stellari, ottenute facendo attraversare alla luce uno



b.

Nel 1896 A. H. Becquerel (1852-1908) scoprì accidentalmente che i sali di uranio impressionavano una lastra fotografica anche se non esposti alla luce del Sole. Il fenomeno divenne il progetto della tesi di dottorato di Marie Curie, che battezzò il fenomeno "radioattività". Utilizzando un elettrometro messo a punto dai fratelli Curie nel 1881, basato sull'effetto piezoelettrico da loro scoperto, Marie Curie scoprì che la radiazione emessa elettrizzava l'aria circostante e ipotizzò che la radiazione non fosse il risultato di qualche interazione ma venisse emessa spontaneamente dagli atomi di uranio: fu l'inizio della moderna fisica nucleare.

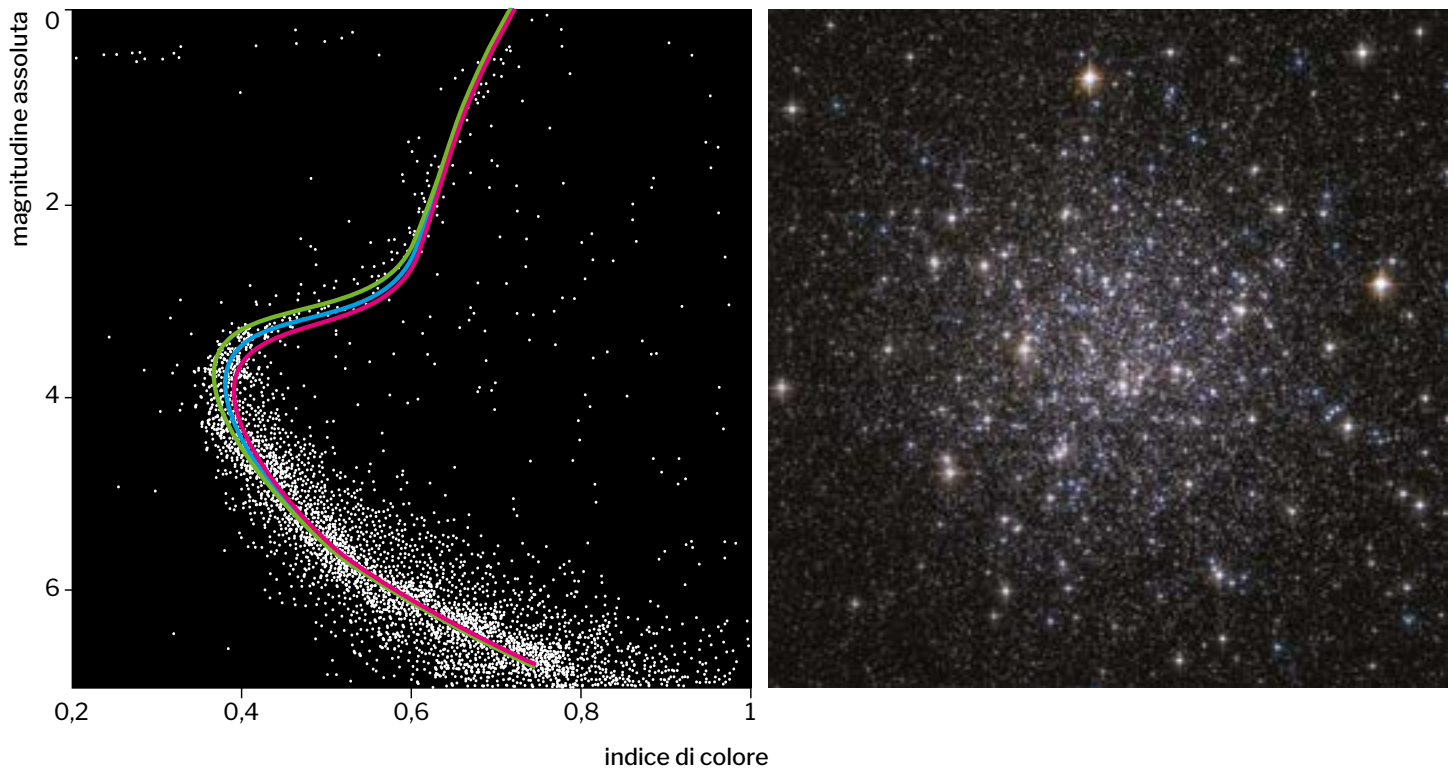
spettroscopio sufficientemente sensibile, dimostrò, oltre ogni ragionevole dubbio, che le stelle sono dei sistemi che obbediscono alle stesse leggi della fisica del mondo terrestre. Le stelle producono energia e quindi devono spegnersi quando ne esauriscono la fonte. È naturale dunque chiedersi quale sia la loro età.

Nel 1863 Lord Kelvin suggerì che il Sole, come le altre stelle, trasformasse la sua energia gravitazionale in radiazione elettromagnetica durante una lenta contrazione dovuta all'attrazione gravitazionale generata dalla propria massa. Il rapporto tra l'energia gravitazionale del Sole e la sua luminosità fornisce un'età del Sole dell'ordine di 100 milioni di anni: un tempo ben più lungo dei 6000 anni che, sembra, già san Barnaba nel I secolo d.C. assegnò all'età della Terra, una stima considerata affidabile fino al 1600. Nel '700 gli studiosi convinti della correttezza di questa stima cominciarono a diminuire. Nel 1778, la creatività di Georges-Louis Leclerc, primo conte di Buffon, suggerì una delle prime ipotesi di un meccanismo naturale per la formazione della Terra: la Terra avrebbe avuto origine dalla collisione tra una cometa e il Sole, generando una sfera infuocata che si sarebbe raffreddata in circa 75.000 anni.

Lo strumento per la stima dell'età della Terra arrivò sul finire del XIX secolo con la scoperta di Antoine Henri Becquerel di un fenomeno nuovo e inaspettato: la radioattività. Gli elementi radioattivi si trasformano in altri elementi chimici e la loro

abbondanza relativa varia con il passare del tempo. I rapporti di abbondanze degli elementi di una catena radioattiva, come per esempio gli isotopi dell'uranio e del piombo, sono quindi degli orologi naturali. Nel 1921, c'era un consenso diffuso tra i fisici e i geologi che l'età della Terra, basata sull'età delle sue rocce stimata con i rapporti isotopici, fosse di almeno 2 miliardi di anni, ben maggiore dell'età del Sole secondo Kelvin. In altre parole, il Sole doveva essere più vecchio e quindi avere una fonte di energia diversa da quella ipotizzata da Kelvin.

Due ingredienti suggerirono la soluzione: il primo era il fatto che la radioattività mostrava che un elemento chimico può trasformarsi in un altro elemento chimico, un fenomeno del tutto nuovo e sorprendente. Il secondo ingrediente era la possibilità di trasformare massa in energia, in accordo con la teoria della relatività ristretta di Albert Einstein del 1905. I due elementi chimici più leggeri, l'idrogeno e l'elio, hanno una massa in rapporto di 1 a 4. Tuttavia la somma della massa di 4 atomi di idrogeno è leggermente superiore alla massa dell'atomo di elio. Se il Sole fondesse idrogeno per formare elio, questa piccola differenza di massa potrebbe fornire al Sole l'energia necessaria per sopravvivere per miliardi di anni. Questa ipotesi fu avanzata per la prima volta da William Draper Harkins nel 1915, ripresa da Jean Perrin nel 1919 e ancora da Sir Arthur Eddington nel 1920. La formulazione della meccanica quantistica nel 1925, applicata a reazioni termonucleari da



c. Diagramma HR (a sinistra) dell'ammasso globulare M68 (a destra). In ascissa è riportata la temperatura utilizzando l'indice di colore. In ordinata è riportata la luminosità in termini di magnitudine assoluta. Gli ammassi globulari sono sistemi stellari contenenti alcune centinaia di migliaia di stelle in un volume di qualche parsec (pc) cubo (1 pc = 3,26 anni luce). La posizione delle stelle degli ammassi globulari nel diagramma HR si sovrappone a una curva, detta "isocrona", derivata per stelle di massa diversa ma con la stessa età. Il confronto tra le isocrone dei modelli di evoluzione stellare e il diagramma HR restituisce l'età degli ammassi. Nella figura sono mostrate tre isocrone: quella superiore corrisponde a una popolazione di stelle di 12 miliardi di anni, quella intermedia a una di 13 miliardi di anni e quella inferiore a una popolazione di 14 miliardi di anni. La figura suggerisce che M68 abbia un'età di circa 13 miliardi di anni. Si stima che gli ammassi globulari più vecchi della Via Lattea abbiano circa 14 miliardi di anni, con un'incertezza di circa 1 miliardo di anni.

Hans Bethe nel 1939, confermò queste intuizioni su basi oltremodo solide. Se le reazioni termonucleari sono la principale fonte di energia delle stelle, diventa naturale chiedersi quale sia l'evoluzione di una stella dalla sua nascita fino all'esaurimento del combustibile nucleare. Si crea pertanto un intreccio indissolubile tra lo studio dell'evoluzione stellare e la fisica nucleare e la termodinamica: oggi si stima che il Sole viva circa 10 miliardi di anni. Il tempo di vita di una stella diminuisce con l'aumentare della massa della stella, poiché l'efficienza di bruciamento del combustibile nucleare aumenta proporzionalmente alla massa. Per esempio, la vita di una stella di 4 masse solari dura circa un quinto di quella del Sole. I modelli di evoluzione stellare permettono di stabilire la traiettoria di una stella nel piano luminosità-temperatura superficiale, visualizzabile nel diagramma di Hertzsprung-Russell (HR) (vd. fig. c e anche in Asimmetrie n. 9 p. 12, ndr). Con ragionamento inverso, la posizione di una stella osservata oggi nel diagramma HR, nota la sua massa e la sua composizione chimica, permette di stabilire la sua età. Per esempio, si

stima che il Sole abbia un'età di 4,6 miliardi di anni, con un'incertezza di circa il 10%. Questa età è in accordo con l'età della Terra stimata oggi con i rapporti isotopici delle sue rocce. Concludiamo quindi che l'età del sistema solare sia di 4,6 miliardi di anni, come confermano anche le misure dei rapporti isotopici nei meteoriti. Utilizzare la posizione delle stelle nel diagramma HR può essere usato per stimare l'età di un'intera popolazione di stelle nate nello stesso istante, ossia "coeve". Per sistemi stellari in cui le stelle non siano coeve, come le galassie, si può ragionevolmente ipotizzare che l'età sia confrontabile con l'età delle loro stelle più vecchie, almeno tra quelle osservate. Per esempio, l'età della Via Lattea dovrebbe essere simile all'età della sua stella più vecchia attualmente nota: HD 140283. Questa stella ha un'età stimata tra i 12 e 14 miliardi di anni, a seconda dei modelli evolutivi e della composizione chimica adottati. Questa età è sostanzialmente identica all'età degli ammassi globulari della Via Lattea, a ragionevole conferma che circa 13 miliardi di anni sia l'età della nostra galassia. L'età di circa 13,8 miliardi di anni



d.
Heinrich Wilhelm Olbers (1758-1840) enunciò il paradosso che prende il suo nome per la prima volta nel 1823. Medico di giorno e astronomo amatoriale durante la notte, si dedicò completamente all'astronomia dal 1822.

sembra essere anche l'età di tutto l'universo. La predizione di un universo dinamico di Alexandr Friedmann del 1922, basata sulla relatività generale, fu confermata dalla misura dell'espansione dell'universo a opera di George Lemaître nel 1927 e definitivamente da Edwin Hubble nel 1929. È naturale immaginare che l'origine dell'espansione coincida con la nascita del nostro universo osservabile.

Come per le stelle, che necessitano di un modello di evoluzione stellare per stimarne l'età, anche l'universo ha bisogno di un modello per descriverne l'espansione e risalire alla sua età. Il modello oggi più accreditato, il modello LCDM, è fornito dalla relatività generale nella forma del modello di Friedmann-Lemaître. Ora, il modello LCDM può descrivere le proprietà statistiche del fondo di radiazione a microonde (CMB), ossia lo spettro di potenza delle sue anisotropie, se poniamo la nascita dell'universo a 13,8 miliardi di anni fa. L'aspetto più suggestivo di questo risultato è che coincide, come anticipato, con l'età delle stelle più vecchie che osserviamo.

Il modello LCDM presenta tuttavia un numero non indifferente di discrepanze con le osservazioni, sia sulla scala delle galassie sia su grande scala. Per esempio, il tasso di espansione dell'universo, la costante di Hubble-Lemaître H_0 , stimato con misure di distanze di stelle variabili e supernovae è maggiore del valore richiesto dalle misure del CMB interpretate dal modello LCDM più di 6 volte l'incertezza della misura. È una discrepanza molto significativa che ha effetti sulla stima dell'età dell'universo, che è inversamente proporzionale a H_0 . Quale che sia l'età dell'universo osservabile, è pressoché certo che non sia infinita: è il buio della notte a fornircene la prova. Se l'universo fosse eterno, la luce generata da una stella, per quanto lontana, avrebbe avuto il tempo di raggiungerci e il cielo sarebbe luminoso anche di notte. L'incompatibilità tra il cielo buio e un universo di età infinita, un paradosso che Heinrich Olbers enunciò nel 1823 ma che fu messo a fuoco, presumibilmente per la prima volta, da Thomas Digges nella seconda metà del XVI secolo, è risolta solo assumendo che l'universo abbia un'età finita. Sorprendentemente, questa soluzione non fu suggerita da un fisico, ma nel 1848 da Edgar Allan Poe nel suo saggio "Eureka": l'intuito geniale non ha confini disciplinari!

Biografia

Antonaldo Diaferio è professore di astronomia e astrofisica presso l'Università di Torino. Ha lavorato allo Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics di Cambridge (MA, USA) e al Max-Planck-Institut für Astrophysik di Garching (Monaco), Germania. È socio dell'Accademia delle Scienze di Torino e presidente di Infini.to, Planetario di Torino e Museo dell'Astronomia e dello Spazio "Attilio Ferrari". Si occupa di cosmologia, teoria della gravitazione e struttura su grande scala dell'universo.