

Beyond the Milky Way: an historical perspective

Edvige Corbelli¹ 

¹INAF - Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Firenze, edvige.corbelli@inaf.it.

Abstract: The discovery that what were once called spiral nebulae are other galaxies similar to our own, has modified our concept of the Universe and marked the beginning of extragalactic astronomy, of space exploration beyond the Milky Way, and of its time evolution. In this talk, I will summarize facts that have stimulated and driven Hubble's discovery 100 years ago that the distance to the Andromeda galaxy is much larger than any estimated size of the Milky Way. This had immediate revolutionary consequences and paved the way for the establishment of the space-time expansion law. Since then, our knowledge of galaxies and the Universe has made enormous progress. However, we are still missing a solution for a few relevant cosmic puzzles, which are shaping the next generation of telescopes and future astrophysical research.

Keywords: Cepheids, Nebulae, Galaxies, Hubble Constant, Dark Matter

1. Le nebulose: fra storia millenaria e scoperte recenti

La scoperta del mondo extragalattico è strettamente legata alla curiosità umana di scoprire la natura delle nebulose. Con il termine nebulosa, dalla parola latina *nebula* che significa nuvola o nebbia, storicamente si identificavano oggetti celesti diffusi che, al contrario delle singole stelle, erano estesi e senza un contorno ben definito. Nonostante ci siano riferimenti a nebulose o nebulosità celesti già nell'*Almagesto* di Claudio Tolomeo (100-170 d.C.), è nel *Libro delle Stelle Fisse* dell'astronomo persiano 'Abd al-Rahmān Ṣūfi (903-986 d.C.), scritto più di un millennio fa, che troviamo riferimenti a due grandi nubi del cielo notturno che oggi chiamiamo Nubi di Magellano, e a una piccola nube in una zona di cielo più a nord, dove oggi sappiamo essere la galassia di Andromeda (fig. 1a). Eppure, è trascorso solo un secolo da quando la scienza ha capito che queste nebulose descritte da Ṣūfi sono molto più lontane di qualsiasi altra stella visibile: sono nebulose extragalattiche, galassie al di là della Via Lattea. Attraverso i secoli, filosofi e astronomi osservarono ed elaborarono pensieri sulla natura delle nebulose, che mostravano forme ricorrenti o a volte uniche. Ma è solo grazie ai progressi della fisica che nel XIX secolo, dopo la nascita dell'astrofisica e la costruzione di grandi telescopi, è stato possibile stabilire con certezza alcune diversità nella natura delle nebulose. E solo un secolo fa, grazie alla curiosità umana sulla distanza e natura delle nebulose a spirale, che i progressi scientifici hanno ingrandito le dimensioni dell'Universo e, superando i confini della nostra galassia, hanno aperto le porte all'esplorazione dello spazio extragalattico e alla cosmologia. Quest'articolo ricorda la storia di questa scoperta nel suo centenario, iniziando dall'analisi di testi galileiani che ci ricordano come le nebulose abbiano appassionato gli osservatori del cielo da sempre. Concluderemo con brevi riferimenti ad alcuni fenomeni extragalattici e modelli cosmologici oggi molto sostenuti, mostrando come la storica domanda sulla *natura* e sulla *distanza* di ciò che osserviamo sia ancora attuale e non abbia ancora avuto una risposta definitiva.

1.1. Greggi di piccole stelle disseminate in modo mirabile

Nel 1610 Galileo Galilei scrive nel *Sidereus Nuncius* dell'importanza di aver risolto importanti questioni astronomiche, irrisolte da secoli, grazie allo sviluppo di nuove tecnologie, ovvero al suo cannocchiale. Egli annuncia con un senso di gioia e di soddisfazione sia di riuscire a misurare le distanze stellari, sia di aver compreso la natura della Via Lattea e delle nebulose. Riportiamo alcuni paragrafi del *Sidereus Nuncius* sottolineando i riferimenti a questi punti:

... osservai più volte con incredibile godimento dell'animo (incredibili animi iocunditate) le Stelle, tanto fisse che erranti; e vedendole tanto fitte, cominciai a pensare sul modo con cui potessi misurare le loro distanze; e finalmente lo trovai.

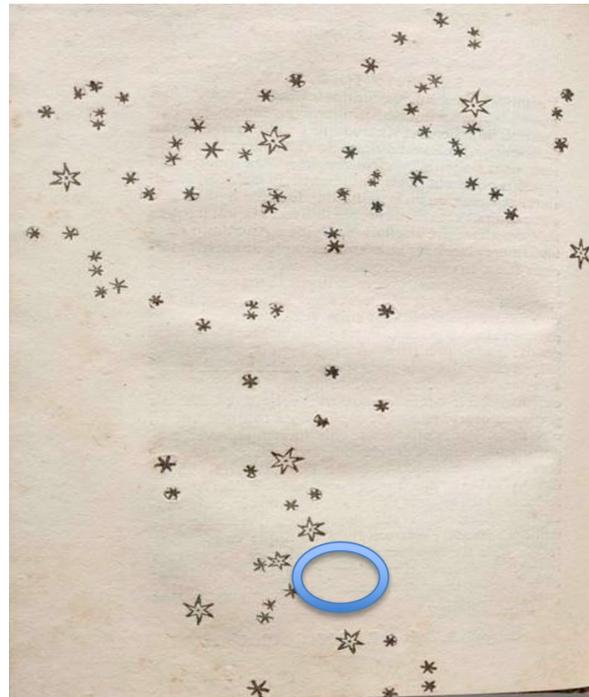
... la materia, della stessa Via Lattea, che in virtù del cannocchiale è dato scrutare tanto sensibilmente, da esserne risolte, con la certezza che è data dagli occhi, tutte le dispute che per tanti secoli tormentarono i filosofi, e noi liberati da verbose discussioni.

È infatti la galassia nient'altro che una congerie di innumerevoli Stelle, disseminate a mucchi; ché in qualunque regione di essa si diriga il cannocchiale, subito una ingente folla di Stelle si presenta alla vista... ma la moltitudine delle piccole è del tutto inesplorabile...

Inoltre (meraviglia ancor più grande) le Stelle chiamate fino a oggi dai singoli astronomi nebulose, sono greggi di piccole Stelle disseminate in modo mirabile; e mentre ciascuna di esse, per la sua esilità, ossia per la grandissima lontananza da noi, sfugge alla nostra vista, dall'intreccio dei loro raggi si genera quel candore. (Galilei, 1993, pp. 8,29-30) (Fig. 1b)



(a)



(b)

Fig. 1: (a) Una principessa rappresenta la costellazione di Andromeda nel libro di al-Šūfi. I cerchi rossi sono le stelle della costellazione e la loro grandezza è proporzionale alla luminosità apparente. Nel libro l'autore riporta dell'esistenza di una piccola nube vicino alla stella brillante (Mirach) sulla cintura della principessa, coincidente con la bocca del pesce. (b) le stelle della cintura e della spada della costellazione di Orione sono disegnate da Galilei nel *Sidereus Nuncius*. La nebulosa di Orione, visibile anche a occhio nudo nella zona indicata dall'ellisse azzurra, non viene riportata perchè la sua nebulosità non viene risolta in stelle dal cannocchiale di Galilei.

Questo scriveva Galileo Galilei dopo aver osservato le nebulose, quelle zone di cielo in cui scorgeva solo una luce diffusa e biancastra. Per molte di queste nebulose il suo cannocchiale gli rivelava la loro natura stellare: una moltitudine di stelle, indistinguibili se osservate a occhio nudo. Questa scoperta indusse Galilei a credere che tutti gli oggetti nebulari fossero fatti di stelle, anche quelli in cui queste ultime

non erano distinguibili con il suo strumento. Questa speculazione galileiana sappiamo essere corretta per alcune nebulose ma non per tutte: ad esempio le nebulose dove oggi si formano le stelle, come la nebulosa di Orione, sono per lo più gassose. La radiazione delle poche stelle massicce appena nate riscalda la nube di gas in cui queste hanno avuto origine, e il gas emette luce anche nel visibile. Galilei, sembra invece essere convinto di non riuscire a scomporre la luce diffusa di queste nebulose in stelle per un problema strumentale, ovvero legato con la risoluzione del suo cannocchiale, e pertanto non le riporta nei suoi disegni. Le stelle in un suo disegno intitolato *Nebulosa Orionis* sono in realtà stelle di una regione della costellazione molto diversa.

1.2. L'astronomo nell'XIX secolo: fra comete vaganti e nebulose fisse

Alla fine del XVIII secolo inizia un lungo periodo di sviluppo di strumenti progettati con crescente sensibilità e risoluzione per scrutare le profondità celesti, e in particolare per scoprire nuove comete. La scoperta di nuove comete, nebulose che cambiavano velocemente posizione rispetto alle stelle fisse essendo vicine e viaggiando attraverso il Sistema solare, trasse beneficio dalla localizzazione di altre nebulose la cui luminosità e posizione invece non cambiava rispetto alle stelle vicine. Sorsero dunque i primi cataloghi delle nebulose fisse che contenevano sia nebulose irrisolte dallo strumento usato dall'osservatore, che nebulose risolte in ammassi stellari. I cataloghi di nebulose e ammassi stellari come quello di Charles Messier pubblicato nel 1771 e di William Herschel pubblicato nel 1786 furono fra i primi che, contenendo un numero congruo di oggetti osservabili dall'emisfero boreale, passarono alla storia. Fu solo verso la metà del XIX secolo che la risoluzione dei telescopi fu sufficiente per esaminare in dettaglio le forme delle nebulose e scoprire che esisteva una forma molto ricorrente: quella a spirale. Più i telescopi diventavano potenti e più la peculiare forma a spirale di alcune nebulose risultava evidente.

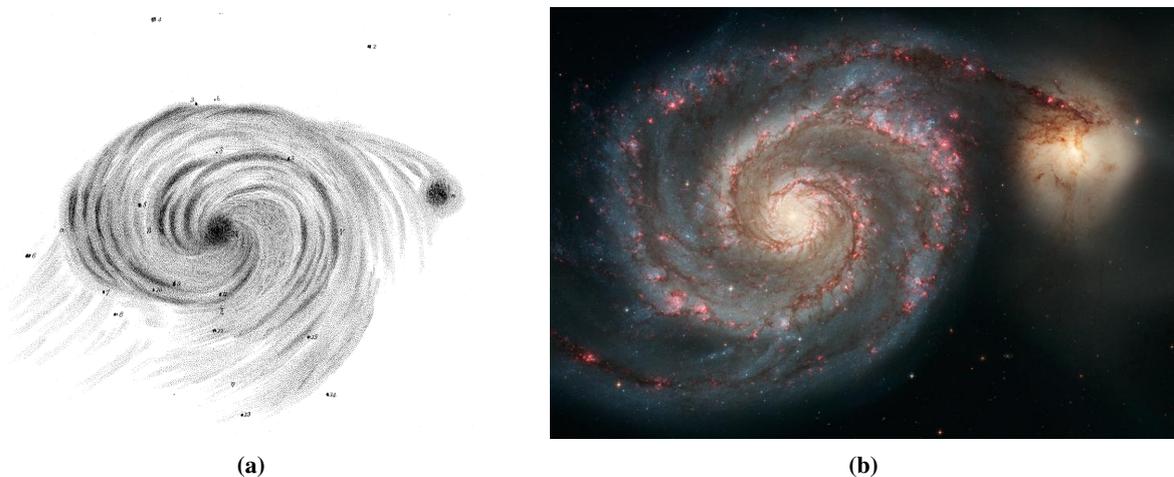


Fig. 2: (a) M51 illustrata da Lord Rosse nel 1850. (b) Immagine composta, ottica e $H\alpha$, di M51 ottenuta tramite l'Hubble Space Telescope.

La nebulosa a spirale per eccellenza, M51, viene ritratta senza una chiara forma a spirale da John Herschel nel 1833, mentre nel 1845 e nel 1850 William Parsons, III conte di Rosse, usando il telescopio più potente dell'epoca di ben 1,8 m, la rappresenta con una chiara forma a spirale e dinamica che suggerisce un movimento rotatorio interno (Fig. 2a). I disegni delle nebulose a cura di astronomi, come Wilhelm Tempel all'Osservatorio di Arcetri, e di illustratori come Étienne L. Trouvelot all'Harvard College Observatory e a Parigi, stimolarono ancor di più l'interesse e le ricerche sulla natura delle nebulose, per comprendere se queste fossero stellari o gassose. Le analisi della loro distribuzione in cielo e delle loro forme, insieme a modelli speculativi sulla loro origine ed evoluzione diventano pervasivi e ricorrenti.

2. Dalla nascita dell'astrofisica al grande dibattito

I grandi pensatori del passato, come filosofi e matematici, si sono trovati ad affrontare questioni fondamentali per la sete di conoscenza che ha sempre caratterizzato il genere umano, come l'esistenza di altri mondi o la grandezza dello spazio cosmico. Anche per quel che riguarda la natura delle nebulose, una prima risposta, forse la prima documentata, la troviamo nel trattato *An original theory or new hypothesis of the universe* di Thomas Wright (1750), un astronomo, matematico e architetto inglese. In questa pubblicazione l'autore spiega come la forma apparente della Via Lattea vista dalla Terra sia dovuta al fatto che noi siamo immersi in un insieme di stelle distribuite in un sistema piatto (tipo un disco) e ipotizza (senza però dimostrarlo) che le nebulose siano altri sistemi stellari, simili alla Via Lattea ma situati al di fuori di essa, a grandi distanze da noi. Qualche anno dopo, riprendendo l'idea di Wright, Immanuel Kant (1755) sostiene il concetto dell'esistenza di altre galassie da lui definite come Universi Isola. Un secolo dopo, Stephen Alexander (1852) ipotizza che la Via Lattea abbia anch'essa una forma a spirale analoga a quella osservata per M51. Bisognerà però aspettare ancora un secolo per avere una prova scientifica che viviamo in una galassia a spirale, dopo che Jan Oort (1959) pubblica le mappe dell'emissione del gas a 21-cm della Via Lattea evidenziandone i bracci a spirale.

La curiosità di capire diversità e similitudini fra oggetti puntiformi come le stelle e oggetti più estesi come le nebulose, insieme ai progressi della fisica, ha rivoluzionato l'astronomia aprendo le porte a una nuova disciplina: l'astrofisica, lo studio della natura degli astri. L'astrofisica nasce grazie alla spettroscopia, che analizza l'intensità della luce nelle varie frequenze, con le prime misure accurate dello spettro solare fatte da Joseph von Fraunhofer intorno al 1814. Fraunhofer nota nello spettro righe di assorbimento, ovvero l'assenza di radiazione intorno a specifiche frequenze. Simili assorbimenti furono osservati alcuni anni dopo anche negli spettri stellari fornendo la prova della natura stellare del Sole. La nuova disciplina, l'astrofisica, ha avuto bisogno di un progresso scientifico e tecnologico durato più di un secolo per comprendere la natura delle nebulose contenute nei cataloghi. Nei primi cinquanta anni, ovvero dal 1814 al 1864, importanti scoperte di astrofisica svelano caratteristiche delle stelle e delle nebulose come ad esempio:

- la misura delle distanze stellari di Friedrich W. Bessel con l'implicazione che il Sole è una stella;
- la misura di moti grazie all'effetto Doppler;
- la diversità morfologica fra alcune nebulose, di forma ellittica e a spirale dimostrata da Parsons;
- la scoperta di elementi chimici sulla superficie solare e la natura gassosa delle stelle da parte di Gustav Kirchhoff;
- la diversità delle stelle (si veda Henry Draper, Angelo Secchi e Giovan Battista Donati);
- l'esistenza di nebulose gassose grazie alla presenza di righe di emissione osservate da William Huggins mentre gli ammassi stellari mostravano righe di assorbimento.

Le nebulose a spirale restavano avvolte nel mistero perchè gli spettri non davano indicazioni chiare sulla loro natura, gassosa o stellare. La loro forma lasciava supporre una sorta di attività e movimento che spesso veniva connessa con modelli di sistemi planetari in formazione o di incontri fra sciami di meteoriti. Qualche anno dopo, grazie all'utilizzo della fotografia, introdotta da Draper, astronomi come Isaac Roberts svelarono la morfologia a spirale anche di nebulose meno brillanti come M33 (Roberts, 1895).

2.1. L'addio alle stelle fisse e le cefeidi come candele standard

Nella seconda metà del XIX secolo, le illustrazioni delle nebulose a spirale sono pubblicate nei giornali illustrati e nei libri di astronomia per il pubblico. Grazi all'impegno di Camille Flammarion, fondatore

della Società astronomica francese nel 1887, i nuovi concetti di astrofisica vengono divulgati e raggiungono i circoli culturali parigini. L'incisione Flammarion, di ignoto artista che appare in uno dei suoi libri, ritrae l'astronomo che si affaccia oltre la volta celeste delle stelle fisse e osserva i colori, il movimento, la struttura e la variabilità degli oggetti celesti in un cielo nuovo che diventa il simbolo dei progressi dell'astrofisica. Per Parigi è l'epoca della costruzione della Torre Eiffel, simbolo della scienza che diventa parte della cultura, e dell'esposizione universale. La città diventa fonte di scambi culturali e di ispirazione, e le conoscenze astronomiche raggiungono ambiti diversi come quello artistico. *La Notte Stellata* di Vincent van Gogh ad esempio, condensa in un solo dipinto importanti scoperte sulla diversità delle stelle e la discussione scientifica sulla natura delle nebulose a spirale (Corbelli, 2025). La forma geometrica posta al centro del dipinto richiama infatti la nebulosa a spirale M51 disegnata da Parsons e ne sottolinea la rilevanza. La tecnica pittorica dell'artista ne evidenzia ancor di più il movimento, mentre l'assenza di colore rispetto ad altri oggetti celesti nel dipinto potrebbe indicarne la poca conoscenza e la difficoltà di osservazione a occhio nudo.

Dall'altra parte dell'oceano Atlantico, fra i progetti affidati a un gruppo di donne dello Harvard College Observatory (alle donne era vietato utilizzare i telescopi ed era concesso di avere solo incarichi di supporto) c'era anche quello di misurare la brillantezza apparente delle stelle sulle lastre fotografiche e di scoprire stelle variabili. Nei primi anni del XX secolo Henrietta Swan Leavitt misurando la variabilità di stelle nella Piccola Nube di Magellano, lavoro molto difficile a causa della elevata densità e bassa luminosità apparente delle stelle, notò che alcune stelle variabili erano tanto più luminose quanto più lungo era il periodo della loro variabilità. Al contrario delle nove, queste stelle, dette cefeidi, mostravano un periodo regolare di variabilità che andava da qualche giorno a qualche mese. La variabilità di queste stelle nella loro fase evolutiva di giganti è dovuta a una pulsazione regolare: la stella si contrae e si espande. Il fatto che Henrietta Leavitt stesse misurando la luminosità di stelle cefeidi appartenenti allo stesso oggetto, e quindi approssimativamente alla stessa distanza, implicava che le luminosità apparenti fossero collegate da un unico fattore moltiplicativo a quelle intrinseche. Esisteva dunque una relazione fra il periodo di variabilità e la luminosità intrinseca e in generale, misurando il periodo e la luminosità apparente, si poteva risalire alla distanza (dopo aver calibrato la relazione). Le stelle cefeidi potevano dunque essere usate come candele standard. Il messaggio alla base di questa scoperta era chiaro: per misurare quanto lontane fossero le nebulose a spirale occorreva trovare in essa delle stelle cefeidi.

2.2. *Il grande dibattito sulla natura delle nebulose a spirale e sulla grandezza dell'universo*

Dopo più di cinquanta anni di domande sulla natura delle nebulose a spirale, gli astronomi si ritrovarono il 26 aprile 1920 durante il congresso dell'Accademia delle Scienze, tenutosi nella sala dello Smithsonian Museum of Natural History a Washington D.C., per ascoltare il dibattito dei portavoce di due diverse opinioni: Harlow Shapley e Heber Curtis. Il tema dell'incontro era: la natura delle nebulose a spirale e la grandezza dell'Universo. Questo incontro passò alla storia come il Grande Dibattito o Dibattito di Shapley-Curtis.

Shapley sostenne la tesi che l'Universo contenesse una sola galassia, la nostra, e che le nebulose a spirale fossero sistemi gassosi all'interno della Via Lattea. Una Via Lattea molto più grande di quanto stimato in precedenza con il Sole non situato al centro. Shapley aveva raggiunto questa conclusione perchè aveva stimato le distanze di ammassi globulari usando il metodo delle cefeidi e supponeva che le nebulose a spirale occupassero l'alone della Via Lattea similmente agli ammassi globulari, ma essendo gassose non era possibile misurarne la distanza.

Curtis argomentò il contrario ovvero che l'Universo contenesse molte galassie. Le nebulose a spirale erano esse stesse delle galassie fatte di stelle, con dimensioni simili alla Via Lattea ma situate oltre i suoi confini. Curtis argomentava questo perchè usava la luminosità apparente di stelle novae nella galassia

di Andromeda per stimarne la distanza. Al contrario di Shapley, era convinto che il Sole fosse al centro della Via Lattea e sottostimava le dimensioni fisiche di quest'ultima. Curtis non era convinto che le stelle potessero pulsare regolarmente e spiegava le variazioni di luminosità delle cefeidi come sistemi binari.

Il pubblico non uscì convinto né di una tesi né dell'altra.

3. Edwin Hubble scopre una stella cefeide in Andromeda

Edwin P. Hubble (1889-1953) si avvicina all'astronomia solo dopo la morte del padre, dopo aver frequentato un master in legge a Oxford per volere paterno. Durante il dottorato frequenta l'Osservatorio di Yerkes, dove qualche anno prima aveva svolto osservazioni anche Giorgio Abetti, e dedica la sua prima pubblicazione a una rassegna di un'opera galileiana. L'apertura a Monte Wilson del telescopio da 100-inch Hooker, che rimase il telescopio più potente al mondo fra il 1917 e il 1949, fu la sua fortuna perché il direttore, George E. Hale, aveva bisogno di personale e gli offrì subito un lavoro. Hubble iniziò la sua carriera a Monte Wilson solo dopo essere tornato dalla Francia, dove si era recato per servizio durante la Prima Guerra Mondiale, riprendendo i suoi studi sulle nebulose a spirale. Il telescopio Hooker era uno strumento che poteva risolvere il problema molto dibattuto sulla grandezza dell'Universo e sulla natura delle nebulose a spirale perché poteva cercare di osservare stelle variabili in queste ultime, soprattutto nelle più estese perché più vicine. Nel 1923 Edwin Hubble intraprese un progetto sulle stelle novae nella nebulosa di Andromeda. Se queste fossero state candele standard, poteva determinare la distanza della nebulosa. Ma Hubble sapeva che c'erano diverse incertezze sul considerare le novae come candele standard. Meglio sarebbe stato individuare stelle variabili periodiche come le cefeidi. Nella notte fra il 5 e 6 ottobre 1923 Hubble prese le immagini di un braccio a spirale di Andromeda e da un confronto con un'immagine precedente notò tre novae appuntandole sulla lastra con 'N'. Si rese però conto, probabilmente da un confronto con diverse lastre della stessa zona fatte in tempi diversi, che una delle 3 novae era invece una stella pulsante con un periodo regolare di circa 31 giorni. Questa era dunque una stella cefeide che Hubble chiamava *variabile*. Pertanto tolse la 'N' e scrisse 'VAR'! sulla lastra. Qualche mese dopo, il 19 febbraio del 1924, Hubble scrisse a Shapley inviandogli la curva di luce della cefeide e la distanza stimata che indicava che Andromeda era a più di 3 volte le dimensioni della Via Lattea stimate da Shapley. Questi, convinto della bontà del metodo delle cefeidi per la determinazione delle distanze, disse subito ai colleghi: "*Ho qui una lettera che ha distrutto il mio Universo*".

Una settimana dopo l'invio della lettera a Shapley, Edwin Hubble sposa Grace Burke e parte per una breve luna di miele visitando l'Osservatorio di Arcetri a Firenze (gli sposi firmarono nel registro degli ospiti). Ad Arcetri era allora direttore Giorgio Abetti, che ha sempre mantenuto stretti contatti con i colleghi statunitensi. Verso la fine del 1924 Hubble aveva scoperto 36 novae e 12 cefeidi in Andromeda e aveva stimato una distanza di 900.000 anni luce. Sotto consiglio dello stesso Shapley scrisse un articolo "*La natura extragalattica delle nebulose a spirale*" per la riunione dell'American Astronomical Society dove presentò il risultato a gennaio del 1925, nonostante la maggioranza degli astronomi fosse già a conoscenza della grande scoperta. Nel 1928 Hubble si reca a Leiden per l'assemblea generale dell'IAU e accetta l'invito di Abetti per il primo seminario scientifico dell'Osservatorio di Arcetri: "Le riunioni in Arcetri ebbero inizio nella primavera del 1928 con una conferenza del Dott. E. Hubble astronomo dell'Osservatorio di Monte Wilson in California, qui di passaggio, sui vari tipi di nebulose extragalattiche." (Abetti, 1934)

4. La misura delle distanze e il dibattito sul valore della costante di Hubble

La misura delle distanze in astronomia richiede l'utilizzo di metodi che variano a seconda della distanza stessa. In campo extragalattico si utilizzano molto *candele standard*, come le cefeidi, o *rigelli standard*.

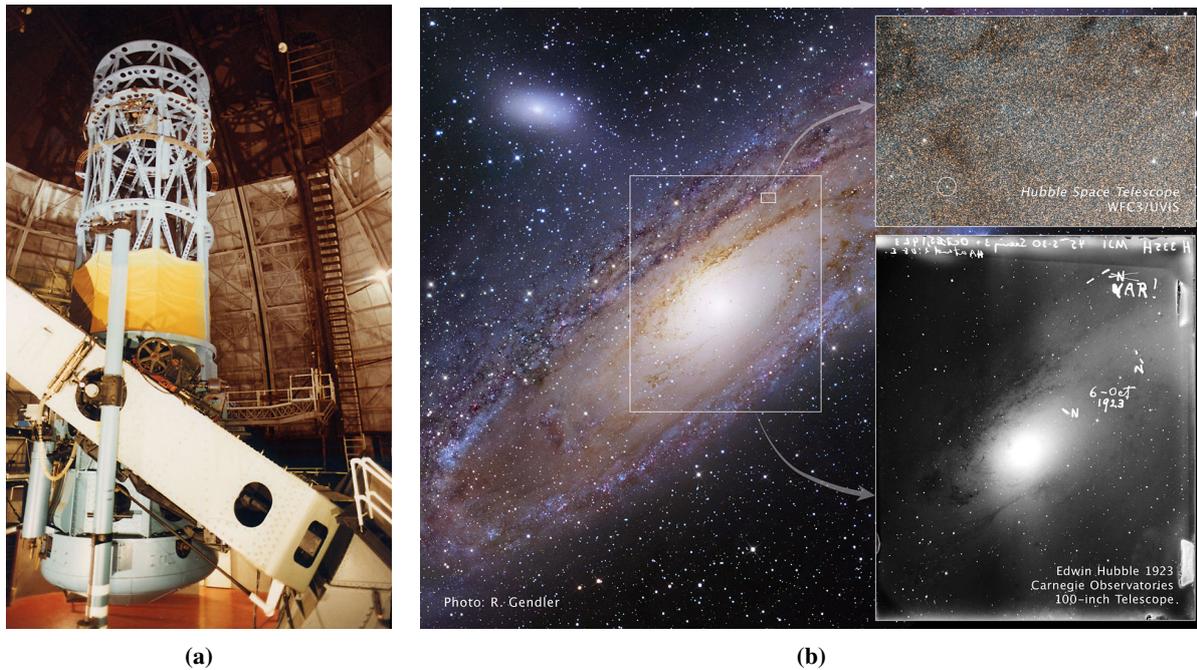


Fig. 3: (a) Il telescopio da 100 inch (2.5 m) Hooker all'Osservatorio di Monte Wilson. (b) la galassia di Andromeda con a destra due pannelli che ingrandiscono la regione dove fu scoperta la prima cefeide; in alto la regione dove fu scoperta la prima cefeide; in basso la lastra originale di Edwin Hubble con le sue annotazioni (E. Hubble, NASA, ESA, Gendler, Levay and the Hubble Heritage team)

Nel primo caso si fa riferimento a una classe di oggetti che hanno sempre la stessa luminosità intrinseca, nel secondo si fa riferimento a oggetti che hanno sempre le stesse dimensioni fisiche. Hubble, che riuscì a identificare cefeidi in galassie del Gruppo Locale, non avendo la risoluzione sufficiente per misurare la distanza di nebulose a spirale più lontane, ne stimò le distanze utilizzando come candele standard le stelle più brillanti (Galilei invece cercava di usare i diametri stellari come righelli standard). Con queste stime ebbe sufficienti dati per verificare la legge di espansione dello spazio-tempo e fornire una prima

Ghazizadeh
 Maggio 1924
 Hubble
 Alexander Birchler
 Edwin Hubble
 Grace Burke Hubble
 Mt. Wilson Observatory
 Pasadena, California, U.S.A.

Fig. 4: La firma di Edwin Hubble a Grace Burke Hubble in visita all'Osservatorio di Arcetri durante la loro luna di miele (Maggio 1924). Archivio Storico dell'Osservatorio di Arcetri.

stima della costante H_0 .

Questa legge, che oggi conosciamo come legge di Hubble-Lemaître, si può scrivere per l'Universo odierno come

$$V(\text{km/s}) = H_0 D(\text{Mpc}) \quad (4.1)$$

dove V è la velocità di espansione dello spazio-tempo che allontana le galassie le une dalle altre ed è misurata tramite l'effetto Doppler di righe spettrali delle galassie. La distanza delle galassie dalla Via Lattea in Mpc è D , e H_0 è il valore a $t=0$ (oggi) della costante di proporzionalità, detta di Hubble, in unità di km/s/Mpc. Questa costante è l'inverso di un tempo e fornisce una stima approssimata dell'età dell'Universo. La legge di espansione dello spazio-tempo è il risultato di diversi contributi. Sicuramente sono da citare Leavitt, per la relazione periodo-luminosità delle cefeidi, Vesto M. Slipher per la misura delle velocità di recessione sfruttando l'effetto Doppler, Georges H.J.E. Lemaître che fornì i presupposti teorici della relazione, e Hubble che stimò le distanze extragalattiche. Se indicatori diversi delle distanze non danno risultati concordi, questo genera incertezze sul valore di H_0 . Il valore della costante H_0 è stato molto discusso nell'ultimo secolo e anche oggi ci sono controversie (vedi *Hubble tension*) dovute per lo più ai moti peculiari delle galassie, causati dall'attrazione fra strutture gravitazionalmente legate (e dunque a una cattiva stima della velocità di espansione V), e/o alla dipendenza della distanza stimata dall'indicatore di distanza usato. La relazione periodo-luminosità delle cefeidi, ad esempio, dipende da alcune caratteristiche stellari come la metallicità. Inoltre, c'è una dipendenza dal modello cosmologico se l'indicatore è connesso con la struttura dell'Universo primordiale, come ad esempio per indicatori che si relazionano con la radiazione cosmica di fondo.

Riportiamo di seguito l'evoluzione storica del dibattito sul valore di H_0 in km/s/Mpc dai tempi di Hubble ai giorni nostri con un'indicazione di alcuni astronomi protagonisti del dibattito e dei metodi usati per la misura delle distanze (vedi anche [Tully, 2023](#)):

1929-1936, $H_0=500-530$, E. Hubble, M. Humason, cefeidi e altre candele standard

1931-1935, $H_0=290-865$, F. Oort, A. Eddington, varie candele standard, modelli di espansione

1956 -1958, $H_0<100$, W. Baade, diversità nelle popolazioni di cefeidi come candele standard

1974 -1986, $H_0=50-100$, A. Sandage, G. Tamman, G. de Vaucouleurs, diverse candele standard

1977 -1986, $H_0=75-95$, A. Fischer, M. Aaronson, A. Dressler, relazione Tully-Fisher, moti peculiari

1984 -2000, $H_0=65-72$, G. Tamman, A. Sandage, W. Freedman, R. Giovanelli, supernovae, cefeidi, relazione Tully-Fisher

2001-2024, $H_0=67.4\pm 0.6-74.0\pm 1.4$, Radiazione Cosmica di Fondo versus candele standard (relazione Tully-Fisher, cefeidi, lenti gravitazionali, supernovae, etc.)

Misure sempre più accurate degli indicatori di distanza degli ultimi anni implicano oggi discrepanze sul valore di H_0 , più piccole ma significative. Il valore più basso (67.4) deriva da misure di proprietà dell'Universo primordiale e utilizza un modello cosmologico. Quello più alto invece (74.0) è basato su vari indicatori di distanza, come le candele standard. La possibile evoluzione cosmica di queste ultime e la bontà del modello cosmologico sono oggi oggetto di studio per diminuire la discrepanza sui valori di H_0 . Nuovi sviluppi tecnologici e nuovi telescopi hanno fra le loro motivazioni principali quella di migliorare ancora le misure di distanza e i parametri cosmologici (vedi Euclid, Square Kilometer Array, Rubin Observatory, Extremely Large Telescope). Il James Webb Space Telescope ha osservato recentemente la galassia più lontana mai osservata, quando l'universo aveva solo 300 milioni di anni.

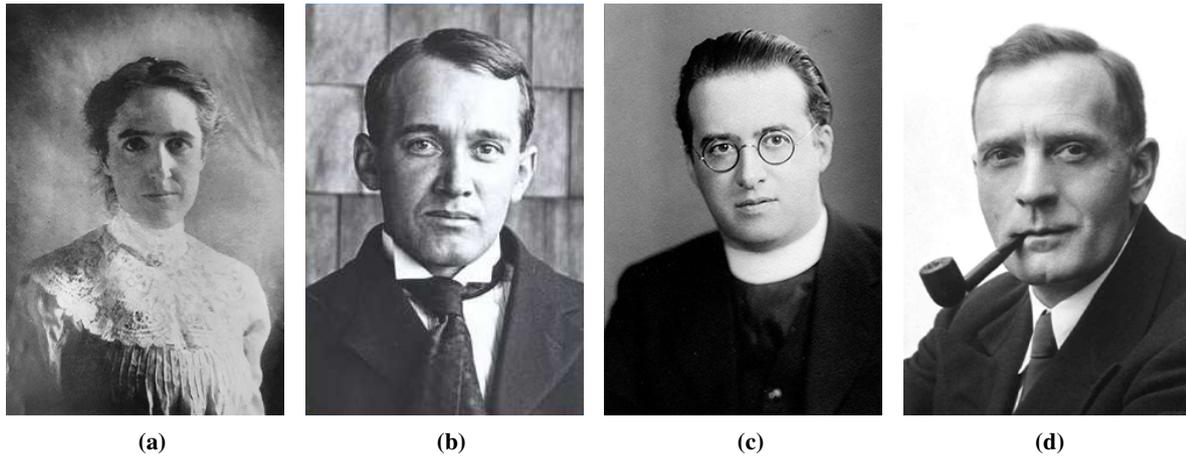


Fig. 5: Protagonisti della scoperta della legge di espansione dello spazio-tempo: H. S. Leavitt (a), V. M. Slipher (b), G. H. J. E. Lemaitre (c), E. P. Hubble (d).

5. Dagli universi isola alla ragnatela cosmica

Un secolo fa, la prova dell'esistenza di altre galassie fu una rivoluzione copernicana di uguale portata a quella che tolse al Sole e alla Terra il privilegio di essere luoghi unici al centro del cosmo. Il concetto di Universo riassunto successivamente da E. Hubble (1936) con la frase "Lo spazio cosmico è per lo più vuoto, se non fosse che occasionalmente e separati da enormi distanze troviamo sistemi stellari simili alla nostra galassia" è però notevolmente cambiato da allora.

In questi anni stiamo infatti vivendo un'altra rivoluzione di uguale portata a quella di un secolo fa, con tutte le sue incertezze: le galassie non sono isole d'Universo immerse in uno spazio vuoto. Esse sono situate lungo filamenti di gas caldo e materia oscura, distribuiti come i fili di un'enorme ragnatela che permeano il cosmo. Dove questi fili si intersecano e la densità del gas diventa più alta cresce anche il numero di galassie che sembrano aggregarsi a piccoli o grandi gruppi. Questa visione dell'Universo è il frutto di lunghe campagne osservative e di simulazioni numeriche di formazione delle strutture nell'Universo partendo dal Big Bang. Eppure nelle mappe dell'Universo giovane le prime fluttuazioni che si sono formate e che hanno originato le prime galassie, avevano una distribuzione meno strutturata di quella delle galassie oggi. Esistono evidenze che l'Universo sia diventato sempre più disomogeneo con il tempo, formando numerosi gruppi di galassie e strutture molto estese come i filamenti di gas e galassie. Queste disomogeneità sono il risultato della forte attrazione gravitazionale fra galassie vicine, che nelle zone dense vince sull'espansione dello spazio-tempo, e alcune di queste anziché allontanarsi fra loro hanno incontri molto ravvicinati fino a fondersi in un'unica galassia. Questi sono i moti peculiari delle galassie che per decenni hanno confuso le misure delle velocità di espansione.

Oggi pensiamo che l'evoluzione delle galassie sia legata a quella di altre parti di Universo come il mezzo intergalattico, immaginiamo le galassie non più come sistemi isolati che si allontanano inesorabilmente le une dalle altre lasciandosi trascinare dall'espansione dell'Universo. Il gas tenue nei filamenti potrebbe alimentare le galassie stimolando la formazione di nuove stelle, e al tempo stesso le galassie potrebbero immettere nello spazio circostante gas con elementi pesanti tramite venti e violente esplosioni. È auspicabile che in futuro nuove idee e nuovi strumenti possano fornire maggiori evidenze e dettagli di come lo spazio che circonda le galassie influenza e sia influenzato dalla presenza delle galassie stesse. Restiamo in attesa di poter costruire una vera mappa della distribuzione, temperatura e moto del tenue gas intergalattico intorno alle galassie.

Ma perché tutto questo avviene se lo spazio-tempo nell'espandersi trascina con sé tutto ciò che contiene? Perché le galassie oggi sono distribuite in maniera più disomogenea rispetto al passato? Il colpevole

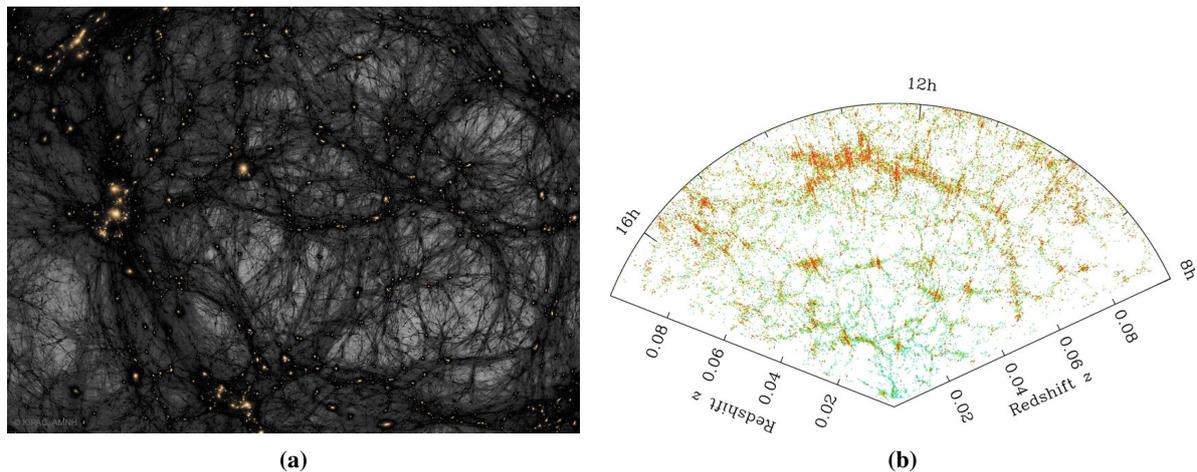


Fig. 6: (a) Le simulazioni numeriche di un Universo dominato da materia oscura fredda ci forniscono immagini di come essa sia distribuita insieme a quella ordinaria nell'Universo odierno (pannello di sinistra). All'intersezione dei filamenti le zone più dense, in giallo, ospitano galassie, gruppi e ammassi di galassie (Tom Abel & Ralf Kaehler). (b) Una mappa della distribuzione delle galassie osservate mostra come esse siano disposte lungo filamenti (M. Blanton and the SDSS). Il tenue gas dei filamenti non emette ma può assorbire luce di oggetti più distanti.

è una materia che non assorbe o emette luce, chiamata materia oscura. Ancora non la conosciamo, ma sappiamo che ha alcune caratteristiche. La piccola ampiezza delle perturbazioni nel fondo cosmico supporta un modello di materia oscura fredda, i cui costituenti si muovono lentamente, non hanno carica elettrica, interagiscono poco con la materia ordinaria e si aggregano perchè sentono la mutua attrazione gravitazionale. La materia ordinaria che conosciamo e di cui sono fatte le stelle o i pianeti (gli elementi chimici che troviamo nella tavola periodica degli elementi), chiamata dagli astronomi materia barionica, costituisce solo una piccola frazione della massa dell'Universo. Le prime evidenze di questa materia, chiamata materia oscura, sono state fornite dall'osservazione dei moti nelle e delle galassie e successivamente dalle lenti gravitazionali. La materia oscura si aggrega prima su piccole scale formando piccole galassie e poi strutture sempre più grandi trascinando con se, grazie alla gravità, la materia ordinaria. Senza la materia oscura non riusciamo a spiegare come si sia passati da un Universo quasi omogeneo a un Universo strutturato come è quello odierno. Nel suo complesso questo tipo di Universo viene chiamato gerarchico. Non abbiamo ancora certezze dell'esistenza di strane particelle che invociamo come costituenti della materia oscura, e continuiamo a cercarle nelle zone più dense del cosmo, negli esperimenti con gli acceleratori sulla Terra o con bersagli nascosti nelle sue profondità. Né sappiamo quale frazione della crescita in massa di una galassia provenga dall'accrescimento di gas intergalattico e quale invece sia dovuta alla fusione con altre galassie o sia presente sin dalla nascita. Dall'infinitamente grande all'infinitamente piccolo: le più grandi strutture dell'Universo dipendono dalla natura di particelle infinitamente piccole. Ingredienti, quali materia ed energia oscura che regolano l'evoluzione di questo ambiente, dell'Universo, saranno oggetto di ricerche e nuovi sviluppi tecnologici nel futuro.

Il modello cosmologico più accettato oggi prevede che l'Universo sia permeato da energia e materia oscura, con la materia comune che rappresenta solo il 5% di esso, per lo più distribuita con densità bassissime nella vastità dello spazio intergalattico. La materia comune, detta barionica e fatta dai costituenti atomici che conosciamo, rappresenta solo il 16% della materia totale. Il resto è materia oscura. Le osservazioni supportano questo modello cosmologico ma ci sono ancora attriti e controversie da risolvere, fra cui quelli relativi al valore della costante H_0 . Alcuni astronomi studiano possibili limiti della legge di gravitazione universale per spiegare osservazioni con modelli diversi, senza materia o energia oscura. La natura delle galassie è dunque ancora oggi sconosciuta, perchè la loro massa potrebbe essere dominata da particelle di natura ignota. Abbiamo fatto grandi progressi dai tempi di Hubble ai giorni nostri nell'astronomia

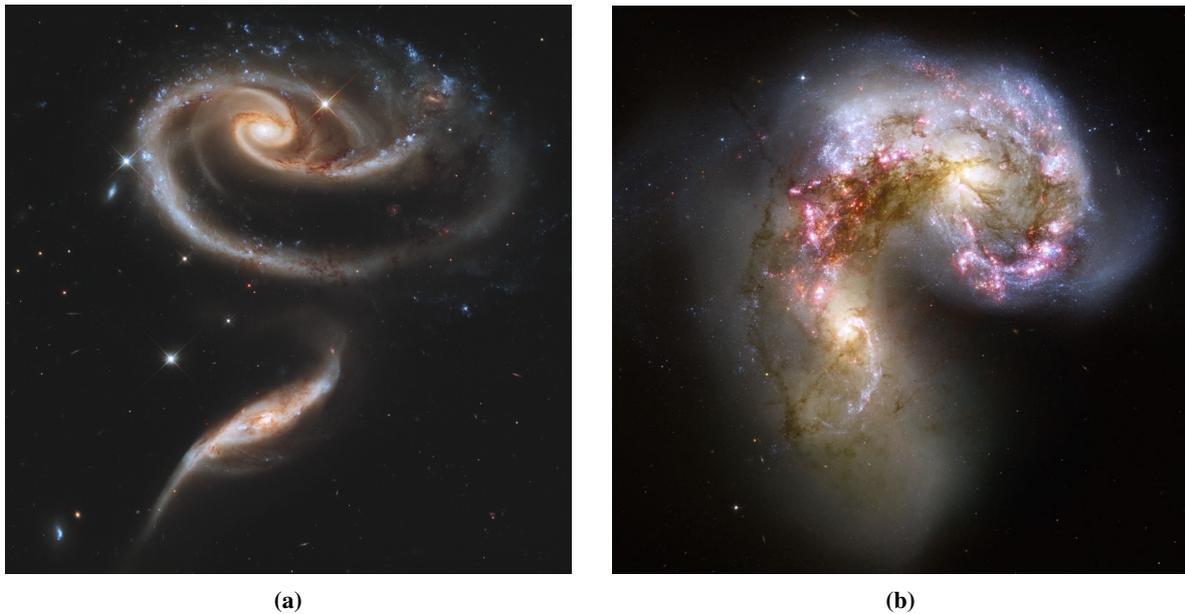


Fig. 7: Galassie interagenti. (a) Le galassie, Arp273, sentono la mutua attrazione distorcendosi e sviluppando un'intensa formazione stellare. Nel futuro diventeranno un'unica galassia più grande. (b) Le Antennae, due galassie in procinto di formare un'unica galassia (NASA, ESA and the Hubble Heritage team)

extragalattica, ma abbiamo ancora domande importanti a cui rispondere negli anni che verranno.

Bibliografia

- Alexander, S. (1852). "On the origin of the forms and the present condition of some of the clusters of stars, and several of the nebulae", *Astronomical Journal*, 2, pp. 95-96.
- Corbelli, E. (2025). "Depictions of a lunar eclipse and the dawn of astrophysics in van Gogh's paintings", *Journal of Astronomical History and Heritage*, 28(1), pp. 240-256.
- Galilei, G. (1993). *Sidereus nuncius*. A cura di Battistini, A., traduzione di Timpanaro Cardini, M. Venezia: Marsilio.
- Hubble, E.P. (1925). "Cepheids in spiral nebulae", *The Observatory*, 48, pp. 139-142.
- Hubble, E.P. (1936). *The Realm of Nebulae*, London: Milford,
- Kant, I. (2009). *Storia universale della natura e teoria del cielo*. A cura di Scarpelli, G. & Velotti, S. Roma: Bulzoni.
- Oort, J.H. (1959). "A summary and assessment of current 21-cm results concerning spiral and disk structures in our galaxy", in Bracewell R.N. (ed.), *IAU Symposium*, 9, 30 July-6 August, 1958. Stanford: Stanford University Press, pp. 409-415.
- Roberts, I. (1895). "Photograph of the spiral nebula M33 Trianguli", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 56, pp. 70-72
- Tully, R.B. (2023). "The Hubble Constant: A Historical Review", [arxiv.org](https://arxiv.org/abs/2308.10111).
- Wright, T. (1750). *An original theory or new hypothesis of the universe*. London: Chapelle.

Fonti d'archivio

- Abetti, G. (1934). *Lettera a Magnifico Rettore della R. Università di Firenze, con allegata "Relazione sull'attività del seminario Matematico Fisico Astrofisico per il quinquennio 1928-1933"*. Archivio Storico dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri, *Fondo Giorgio Abetti, Corrispondenza*, B. 54, f. 2.

