



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY "A. RIGHI"

SECOND CYCLE DEGREE

PHYSICS

Rivoluzioni scientifiche e dove trovarle: analisi critica del Grande Dibattito del 1920 secondo Thomas S. Kuhn

Supervisor

Prof. Federico Marinacci

Defended by

Paolo Brizzi

Co-supervisor

Prof.ssa Marcella Brusa

Graduation Session Luglio 2025

Academic Year 2024/2025

*Equipped with his five senses, man explores the universe around him and calls the
adventure Science.*

Edwin Powell Hubble

Indice

Introduzione	1
1 Il Pensiero Kuhniano	4
1.1 Paradigmi, scienza normale e rivoluzioni	4
2 Contesto storico e scientifico del dibattito	8
2.1 Alla base della piramide: Sir Isaac Newton e Charles Messier	8
2.2 Via Lattea e altri misteri: William e Caroline Herschel	11
2.3 Il Leviatano di Parsonstown	15
2.4 Il piccolo universo: Jacobus Kapteyn	17
2.5 L'ultimo tassello: Vesto Melvin Slipher	19
2.6 I protagonisti e le loro visioni	22
2.6.1 Harlow Shapley: vita, formazione e carriera	23
2.6.2 Heber D. Curtis: vita, formazione e carriera	25
2.6.3 Edwin Hubble: vita, formazione e carriera	26
3 Scienza e Storia nel Grande Dibattito del 1920	31
3.1 Il resoconto del Dibattito come fonte storica	31
3.2 I temi principali del Grande Dibattito	32
3.2.1 La dimensione della Via Lattea e la posizione del Sole	33
3.2.2 La natura e la distribuzione delle galassie a spirale	40
4 Il post-Dibattito	44
4.1 Il clima scientifico negli anni '20	44
4.2 Hubble e la prova definitiva	45
4.3 Reazioni alla scoperta	50
4.4 La moderna cosmologia	51
5 Il Dibattito agli occhi di Thomas S. Kuhn	54
5.1 Fase pre-paradigmatica	54
5.2 La scienza normale di Shapley	56

5.3	Le anomalie di Curtis	58
5.4	Il nuovo paradigma di Hubble	60
	Conclusioni	63
	Bibliografia	67

Introduzione

Fin da tempi antichi, il genere umano, animato dalla sua curiosità, ha alzato il proprio sguardo al cielo in cerca di risposte che definiscano e caratterizzino il suo ruolo nell'Universo.

In un tentativo continuo di miglioramento, molteplici branche scientifiche si sono formate, col preciso scopo di indagare e comprendere la natura che ci circonda.

Seguendo questo filone, in questo lavoro di tesi verrà analizzato uno di quei moderni rami della scienza, nello specifico dell'astrofisica, la *cosmologia* (dal greco antico κόσμος, "ordine" e λόγος, "discorso") definita come la disciplina che studia la struttura e le leggi che regolano e caratterizzano l'Universo nel suo insieme.

Sebbene il percorso dalla fondazione di una nuova scienza alla sua affermazione sia lungo, un elemento di questo processo che merita un'analisi, specifica per la sua importanza e per il contributo fondamentale che offre al progresso, è il dibattito avvenuto il 26 aprile 1920 tra due eminenti astronomi dell'epoca *Harlow Shapley* e *Heber Curtis* presso la National Academy of Sciences di Washington.

Noto storicamente come "**il Grande Dibattito**", fu uno degli eventi più significativi del XX secolo.

Mise infatti, in discussione la nostra concezione sulla struttura dell'Universo, incentrando il confronto tra i due astronomi su punti non chiari della cosmologia, quali le dimensioni della Via Lattea e la natura delle nebulose a spirale.

Il pensiero di Shapley sosteneva che la *Via Lattea rappresentasse l'intero Universo* e che le nebulose fossero parti integranti di essa, mentre in Curtis vi era l'idea di una *natura extra-galattica* delle nebulose, distaccate totalmente dalla struttura della nostra galassia.

Come si vedrà nei capitoli successivi tale dibattito non portò ad una diretta risoluzione della questione, che si ebbe solamente nel 1924 con il contributo di un altro illustre scienziato, *Edwin P. Hubble*, ma diede il via alla ricerca sulla natura e sulle proprietà delle galassie.

Oltre al puro valore scientifico, il Dibattito può e deve essere interpretato in prospettiva epistemologica utilizzando il "**modello delle rivoluzioni scientifiche**" proposto da uno tra i più eminenti filosofi della scienza del 900, **Thomas S. Kuhn**, secondo cui:

“I dibattiti scientifici non sono semplicemente confronti accademici, ma momenti di svolta nella storia della scienza che spesso portano a veri e propri cambi di paradigma” [23].

Se si ripercorre la storia della scienza, sono molteplici gli esempi che seguono questa concezione, tra i quali ricordiamo: il confronto tra il geocentrismo aristotelico e l'eliocentrismo copernicano, la disputa sulla natura della luce tra Newton e Huygens o anche il dibattito tra Einstein e Bohr sull'interpretazione della meccanica quantistica nel Congresso Solvay del 1927.

Esattamente come accadde per quei singoli eventi, anche il caso del Grande Dibattito del 1920 può essere considerato come mediatore di un cambiamento radicale nella nostra comprensione dell'Universo.

Per arrivare a interiorizzare i concetti che verranno approfonditi nei capitoli seguenti, può essere utile porsi, dunque, in una chiave di lettura “Kuhniana”, tramite cui possiamo pensare al sapere scientifico come un alternarsi di fasi di *scienza normale*, durante le quali un paradigma dominante fornisce il quadro di riferimento per la ricerca; di *sco-
perta di anomalie* che portano a una *crisi*; e di *rivoluzione scientifica* mezzo sfruttato per l'adozione di un nuovo paradigma.

Applicando al dibattito tra Shapley e Curtis la visione appena descritta, esso può essere interpretato in questi termini: la visione della Via Lattea come unico Universo costituiva il paradigma dominante dell'epoca, mentre le anomalie osservate (come la velocità radiale delle nebulose spirali o le considerazioni spettroscopiche, descritte successivamente) indicavano una crisi che era incombente; infine l'individuazione in M31, o nebulosa di Andromeda, di Cefeidi distanti circa 300.000 parsec compiuta da Hubble nel 1924 segnò la rivoluzione, confermando la validità del modello extragalattico e dando così vita ad un nuovo paradigma.

Questo lavoro si propone di analizzare il Grande Dibattito in una triplice prospettiva critica (storica, scientifica e filosofica), con l'obiettivo ultimo di rispondere alle seguenti domande di ricerca:

- Ricostruire il contesto storico e scientifico precedente al dibattito analizzando le teorie e le osservazioni disponibili durante i secoli XVIII, XIX e XX, per dare una panoramica su come è nata la necessità della discussione e come ci si è giunti.

- Esaminare il confronto tra Shapley e Curtis nei dettagli, considerando i principali argomenti a sostegno delle rispettive posizioni da un punto di vista storico e scientifico.
- Interpretare il Dibattito attraverso il modello kuhniano delle rivoluzioni scientifiche, valutando se e come si possa considerare un cambio di paradigma.
- Discutere l'impatto del Dibattito sulle successive scoperte cosmologiche e la sua rilevanza nella storia della fisica e della scienza.

Questi quesiti saranno approfonditi nei 5 capitoli strutturati brevemente come segue: il Capitolo 1 illustrerà i punti chiave della filosofia di Kuhn, esplicitando i concetti fondamentali usati per la successiva analisi del Grande Dibattito; nel Capitolo 2 il lettore verrà guidato su di un percorso fra le teorie e i personaggi susseguitesi dal 1700, descrivendo, le conoscenze preesistenti e le prime osservazioni sulle nebulose spirali, introducendo inoltre, i protagonisti del Dibattito che ha portato al nascere della cosmologia.

Si entrerà nel vivo dell'analisi nel Capitolo 3 descrivendo il Dibattito da un punto di vista storico e scientifico evidenziando tecniche, dati osservativi e le argomentazioni utilizzate.

Nel Capitolo 4 verranno trattate le conseguenze del dibattito sulla cosmologia successiva e l'avvento di Hubble che segnerà la fine del dubbio sulla natura galattica o meno delle nebulose.

Nel Capitolo 5 verrà applicata la prospettiva di Kuhn per comprendere la natura del cambiamento concettuale avvenuto con il progredire della discussione tra i due scienziati e con il contributo successivo di Hubble, riconducendosi così ai punti espressi nel capitolo iniziale e, con una riflessione sul ruolo dei grandi dibattiti scientifici nel progresso della conoscenza si arriverà alle conclusioni finali.

Attraverso questo studio, si propone un'analisi originale che porti a comprendere non solo l'importanza storica del Grande Dibattito, ma anche le dinamiche con cui la scienza evolve e si trasforma di fronte a nuove evidenze, offrendo un'ampia chiave di lettura sui processi di evoluzione e rivoluzione scientifica, con implicazioni che possono applicarsi anche oltre il caso specifico del *"Grande Dibattito del 1920"*.

1 Il Pensiero Kuhniano

Il capitolo si pone l'obiettivo di tracciare una panoramica del pensiero di Thomas S. Kuhn e di come esso, sviluppato in forma scritta nel *“La struttura delle rivoluzioni scientifiche”* (in edizione Piccola Biblioteca Einaudi, 2009) e in altre opere scientifico-filosofiche, possa essere sfruttato per dare una visione alternativa, non solo a tutto il contesto del Grande Dibattito, ma anche alle numerose rivoluzioni storiche-scientifiche che hanno caratterizzato e catalizzato lo sviluppo della conoscenza umana.

1.1 Paradigmi, scienza normale e rivoluzioni

La filosofia della scienza novecentesca è irrimediabilmente caratterizzata da un continuo scontrarsi di visioni critiche riguardo l'evoluzione del sapere e della ricerca scientifica.

In tale contesto **Thomas S. Kuhn**, di cui si può vedere una foto in figura 1.1, dà un contributo di estrema rilevanza diventando una delle più forti voci fuori dal coro.

Il fisico e filosofo statunitense centra il suo pensiero sulla *critica della visione cumulativa e lineare* della conoscenza, proponendone una linea *discontinua e storicamente collocata*.

Egli afferma che la scienza, non procede semplicemente tramite l'aggiungersi di nuove scoperte ad un corpus consolidato, ma è generata da un alternanza di fasi, tutte incentrate su un paradigma.

Con **paradigma** si intende, citando l'autore:

“L'insieme di realizzazioni scientifiche universalmente riconosciute che, per un certo tempo, forniscono modelli di problemi e soluzioni a una comunità scientifica”

ovvero, non è soltanto una teoria dominante ma costituisce una visione del mondo condivisa che stabilisce quali problemi scientifici siano rilevanti, quali metodi siano accettabili e quali criteri definiscano una soluzione soddisfacente per gli scienziati che lo accettano e approfondiscono.



Figura 1.1: Thomas S. Kuhn, credits: Encyclopædia Britannica.

Chiarito il concetto portante della visione Kuhniana, è doveroso illustrare come si susseguono le fasi di sviluppo del sapere per Kuhn:

- *Fase pre-paradigmatica*: In questa prima fase introduttiva, l'affermazione del paradigma è in uno stato prematuro, la disciplina è frammentata in numerose scuole di pensiero e teorie diverse, ogni gruppo di studio propone la sua visione con metodi e finalità che spesso divergono, o citando Kuhn:

“durante le prime fasi dello sviluppo di una scienza, differenti scuole si confrontano in un dibattito continuo su ogni questione fondamentale [...] ogni scuola appella a una parte diversa della natura e formula le sue osservazioni in termini propri e incompatibili con quelli delle altre”.

Questo periodo di contrasto fra punti di vista continua fino a quando una delle visioni prende il sopravvento sulle altre o grazie ad una capacità predittiva ed esplicativa superiore, o a causa del contesto storico-sociale che la favorisce.

- *Fase paradigmatica o scienza normale*: Superato il conflitto e affermatosi il paradigma specifico condiviso si entra nella fase della scienza normale, periodo di intensa attività scientifica, in cui, partendo dalle basi comuni, la comunità si impegna a risolvere quei problemi, o “*Rompicapo*”, interni al paradigma.

Durante tale fase quindi, non avvengono mutamenti, lo scienziato

“non mira a produrre novità, ma a risolvere ciò che il paradigma rende visibile e trattabile”

con lo scopo ultimo, di colmare il divario tra teoria e osservazione della natura.

Ciò che va chiarito è che, sebbene possa sembrare una fase statica e arida di novità, in realtà, dando per sicure le colonne portanti del sapere paradigmatico, note le regole da rispettare e previsti i possibili scenari di arrivo, lo scienziato è libero di immergersi nella ricerca raffinandola ai minimi dettagli (si formano in tale fase le branche specialistiche delle varie scienze).

- *Avvento delle anomalie e crisi:* Se la sicurezza della scienza normale appare rassicurante alla maggioranza degli scienziati, al contrario, per qualcuno di essi:

“la scoperta comincia con la consapevolezza di un’anomalia, cioè col riconoscimento che in natura esiste qualcosa che contraddice fortemente le aspettative indotte dal paradigma che governa la scienza normale”.

Perciò, quando un paradigma dominante non riesce a spiegare un crescente numero di fatti, detti appunto, **anomalie**, si aprono numerose discussioni su di esso che vanno a generare instabilità e una crescente **crisi**.

Con essa non si intende un fallimento puramente tecnico della ricerca, ma una messa in discussione di tutta la struttura concettuale e metodologica che la disciplina aveva fino a quel momento. Contemporaneamente, vi è la nascita di un crescente numero di nuove teorie che provano a chiarire, cercando alternative alla tradizionale spiegazione, ciò in cui il vecchio paradigma deficiava, in quella sottofase detta “*ricerca straordinaria*”.

- *Rivoluzione scientifica:* Con la ricerca straordinaria si arriva a pieno al passaggio chiave di tutto il percorso, la vera **rivoluzione scientifica**. Essa consiste nella *sostituzione* del paradigma precedente con uno più nuovo, più chiaro, più promettente e miglior risolutore dei rompicapi scientifici lasciati irrisolti.

Tale cambiamento non è limitato solo al sapere ma, come scrive Kuhn: “Quando i paradigmi cambiano, il mondo stesso cambia con essi”, ovvero vi è un cambiamento profondo nel modo in cui si guarda la realtà, evolvendosi da due visioni

inconciliabili e “*incommensurabili*”¹.

Con l’affermarsi del nuovo paradigma si rientra in una fase di scienza normale, in attesa che altre anomalie vengano trovate e ricominci il ciclo.

Nei successivi capitoli sarà analizzato come il Grande Dibattito del 1920 per la comunità scientifica (e in particolare per quella astrofisica) possa essere letto come un momento fondamentale di passaggio fra due paradigmi, rispecchiando il susseguirsi di queste fasi, schematicamente descritte in figura 1.2.

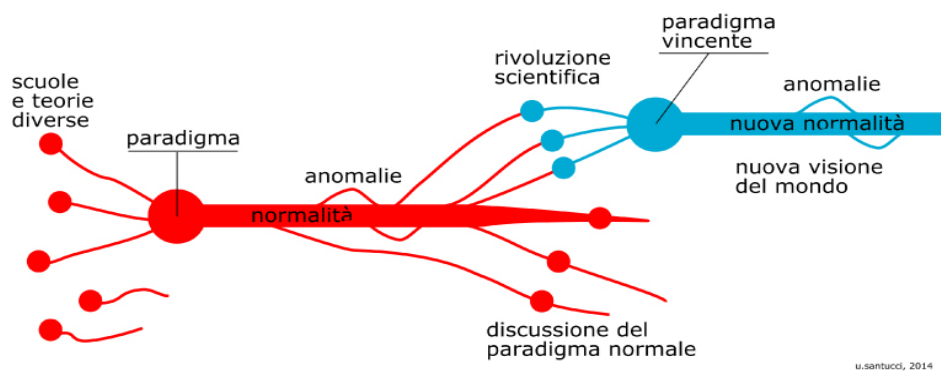


Figura 1.2: Struttura schematica delle fasi di sviluppo del sapere kuhniano, credits: [27].

¹Per Kuhn, **incommensurabilità** indica la non esistenza, per due paradigmi avversi, di “criteri neutrali per confrontarli, perché ognuno stabilisce standard diversi di prova metodo e significato”.

2 Contesto storico e scientifico del dibattito

Illustrata la lente di analisi nel primo capitolo, in questa sezione della tesi ci si inoltrerà in un percorso storico necessario per offrire una breve, ma ricca, panoramica riguardo agli studi sul cosmo che confluiranno successivamente nella cosmologia.

Si partirà osservando le condizioni subito dopo l'avvento di Newton e della sua famosa legge della gravitazione universale.

Continuando la narrazione, verrà approfondito l'immenso lavoro fatto da Messier, da William e Caroline Herschel e da Lord Rosse, scopritore della struttura a spirale delle galassie.

L'exkursus storico includerà gli studi svolti da Vesto Slipher e Jacobus Kapteyn, subito precedenti al vero e proprio Dibattito, e infine si concluderà descrivendo i tre protagonisti che rivoluzioneranno la nostra visione sulle galassie a spirale e sull'universo nel suo complesso.

2.1 Alla base della piramide: Sir Isaac Newton e Charles Messier

Per assimilare a pieno le questioni affrontate nel dibattito, è assolutamente necessario rendersi conto del lungo viaggio della scienza che ha portato il genere umano ad interrogarsi e a lavorare su di esse per trovarne soluzioni adeguate.

Per non rendere troppo tediosa la lettura, si è scelto di far cominciare il flashback a partire da fine 1600, momento in cui uno dei maggiori scienziati inglesi della storia comprese il meccanismo alla base della Natura.

Il 5 luglio 1687, **Sir Isaac Newton** pubblica, nei *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, o più semplicemente *Principia*, la legge di gravitazione universale, secondo la quale tutti i corpi dotati di massa si attraggono reciprocamente con una forza proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza che li separa.

Questa deduzione fornì un quadro teorico coerente per spiegare il moto dei pianeti, suggerendo che l'Universo fosse regolato da leggi fisiche immutabili e valide ovunque;

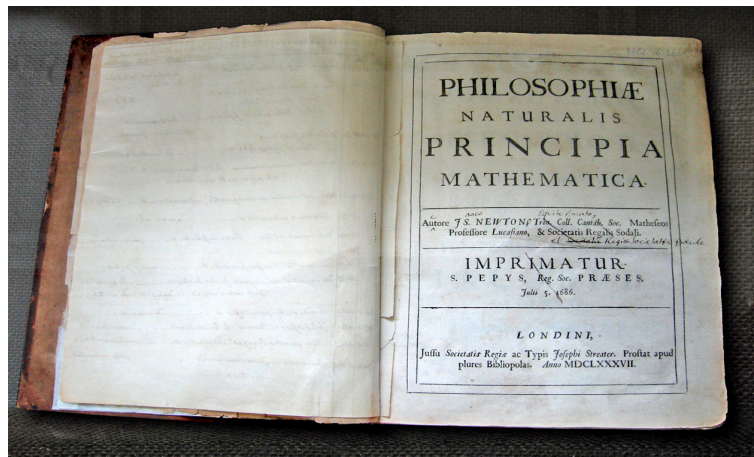


Figura 2.1: Copia della prima edizione dei Principia del 1687, credits: Wikipedia.

per la prima volta, i movimenti celesti non erano più spiegati attraverso principi qualitativi, come nell'antica fisica aristotelica oggetto d'interesse fino a Galileo Galilei, ma attraverso leggi matematiche interpretabili analiticamente e universali.

La gravitazione newtoniana implicava che ogni corpo nell'Universo influenzasse ogni altro corpo attraverso una forza che agiva a distanza, indipendentemente dalla loro posizione nello spazio.

Tale ragionamento portò a una concezione deterministica del cosmo, in cui l'evoluzione futura dell'Universo, caratterizzato come **infinito, omogeneo e statico**, poteva essere, almeno in linea di principio, predetta con precisione a condizione di conoscere le condizioni iniziali di tutti i corpi celesti presi in considerazione.

Questa necessità di analizzare dettagliatamente l'universo sarà caratteristica fondante per l'astronomia osservativa, branca che per almeno due secoli a seguire dalla "*rivoluzione newtoniana*", sarà di centrale importanza nello sviluppo scientifico.

Grazie infatti al miglioramento del telescopio, una moltitudine di scienziati ebbero la possibilità di ampliare le conoscenze umane sull'Universo e sulle sue componenti, fra essi è necessario citare quelli i cui contributi hanno influenzato, in maniera più o meno diretta, il Dibattito in analisi.

Il primo della serie, **Charles Messier** (1730-1817), noto anche come il '*cacciatore di comete*', per mezzo di un modesto telescopio, posto in una torre di un hotel parigino, si dedicò ad osservazioni celesti con lo scopo, non di annotare le scoperte e dar vita, come poi successe, ad uno dei cataloghi più importanti della storia dell'astronomia, ma per



Figura 2.2: Ritratto di Charles Messier, credits: Cambridge University Press.

approfondire la ricerca della cometa di Halley² (ragione per cui gli venne affibbiato un tale soprannome).

Nonostante fosse spinto da un obiettivo diverso, lo scienziato francese lascerà comunque la sua impronta indelebile nella storia grazie proprio al sopracitato catalogo; la raccolta di appunti venne pubblicata in una prima versione nel 1774, composta da 45 oggetti, e ampliata successivamente fino a raggiungere 110 oggetti, comprendenti *nebulose*, *ammassi globulari* e *galassie*.

Tra gli elementi più significativi inclusi nel catalogo, di cui la **M-** affiancata al numero associa la paternità della scoperta a Messier, vi sono:

- *M-1 o Nebulosa del Granchio*: il resto di supernova associato all'esplosione osservata nel 1054 dagli astronomi cinesi e arabi, in figura 2.3.
- *M-31 o Galassia di Andromeda*: la più grande galassia vicina alla Via Lattea, di cui Messier non aveva ancora riconosciuto la vera natura.
- *M-42 o Nebulosa di Orione*: una delle nebulose più brillanti e studiate, osservata già in precedenza ma inclusa nel catalogo per facilitarne il riconoscimento.

²**Edmond Halley** (1656-1742), scienziato contemporaneo e forte sostenitore delle idee sulla gravità di Isaac Newton, tanto che pagò le spese di pubblicazione dei *Principia*. Grazie all'applicazione di tali idee, calcolò il periodo orbitale e previde così i ritorni della cometa a lui successivamente dedicata.

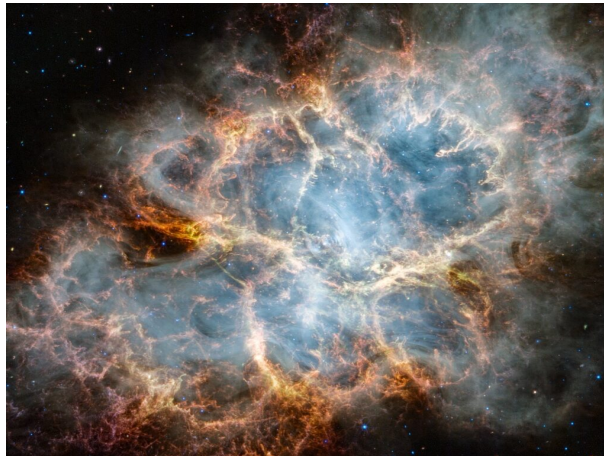


Figura 2.3: Messier-1 o nebulosa del granchio, vista dagli occhi del telescopio spaziale James Webb, scoperta proprio da Messier nelle sue notti di osservazione, credits: HubbleSite-gallery (NASA-ESA).

Sebbene Messier non diede mai importanza alla loro natura fisica, il suo lavoro fu fondamentale per il progredire dell'astronomia osservativa perché permise agli astronomi di avere una lista di riferimento per lo studio degli oggetti celesti diffusi.

L'importanza del catalogo di Messier si riflette nell'uso continuativo dei dati da lui ottenuti; il suo lavoro, infatti, venne riutilizzato abbondantemente per i successivi studi di William Herschel e di altri astronomi del XIX secolo.

2.2 Via Lattea e altri misteri: William e Caroline Herschel

Un passo in avanti verso il problema del 1920 venne fatto da due altri astronomi, e anche musicisti di discreta bravura, **William** (1738-1822) e **Caroline Herschel** (1750-1848), in figura 2.4.

I due scienziati britannici sono ritenuti figure cardine nel campo dell'astronomia osservativa. È infatti a loro attribuita la scoperta nel 1781 del pianeta Urano, risultato che portò ai due scienziati una straordinaria fama, tanto da garantire il sostegno economico per le ricerche future direttamente dalla Corona inglese.

Non più preoccupati dagli aspetti finanziari, riuscirono a dedicarsi a pieno all'osservazione sistematica del cielo, costruendo per lo scopo telescopi sempre più potenti.

Il più celebre fra essi, oltre che il più grande dell'epoca, è il riflettore da 1,2 metri di dia-



Figura 2.4: Ritratto di William e Caroline Herschel, credits: Wikipedia.

metro con cui scoprirono oltre 2500 nebulose e ammassi stellari, molti dei quali ignoti prima di allora.

Tuttavia, a differenza di Messier, sia William sia Caroline erano interessati non solo a catalogare gli oggetti, cosa che fecero comunque egregiamente, ma a tentare di spiegarne e comprenderne la natura ultima.

Riguardo ciò, una prima osservazione che fecero, fu quella di stabilire che le nebulose fossero prettamente agglomerati di stelle e non solo semplici nubi di gas³; una seconda, ma non per importanza, fu di mappare, o a tentare almeno di farlo, *la struttura della Via Lattea*.

Determinare tale struttura tridimensionale era stato un problema che per secoli aveva sfidato gli astronomi: prima degli Herschel, la concezione dominante della Galassia era piuttosto vaga, si sapeva che fosse una fascia luminosa di stelle visibile nel cielo notturno, ma la sua reale natura e la nostra posizione al suo interno erano ancora questioni irrisolte.

Per ovviare a ciò, i due scienziati inglesi, applicarono un approccio empirico e sistematico, il *metodo della statistica stellare*: ipotizzarono che, contando il numero di stelle

³Non gli era parso plausibile che tutti quei sistemi potessero originarsi da un semplice effetto di proiezione e così aveva pensato, correttamente, che quei gruppetti di stelle dovessero essere tenuti assieme dalla stessa forza che Newton aveva mostrato essere in azione sia sulla Terra sia nel Sistema Solare, estratto da [29].

visibili in diverse direzioni e analizzandone la distribuzione, fosse possibile dedurre la forma della Galassia e la posizione del Sole al suo interno.

Suddivisero quindi il cielo in 648 regioni, contando il numero di stelle in ciascuna di esse e ponendo come condizione iniziale un'uniformità della loro distribuzione, da una maggiore densità di astri avrebbero ricavato una più elevata profondità della Galassia lungo l'eventuale linea di vista in analisi.

Seppur rudimentale, il metodo era innovativo, poiché per la prima volta si cercava di dedurre la struttura della Via Lattea con un criterio quantitativo piuttosto che con semplici speculazioni filosofiche, seguendo la rivoluzione dei criteri scientifici già introdotta da Newton.

Stabilito il modello teorico e confrontatolo con i dati delle loro osservazioni, proposero in ultimo la struttura detta della **Galassia a disco allungato**, riprodotta nell'immagine 2.5; oggi si definirebbe come simile a un ellissoide appiattito (appiattito perchè le stelle erano distribuite prevalentemente lungo il piano della Via Lattea).

Inoltre dopo averne dedotto la struttura, dal fatto che il numero di stelle si riduceva in modo uniforme lungo tutte le direzioni conclusero che il Sole si trovasse effettivamente vicino al centro della Galassia; tale ipotesi, che successivamente si rivelò errata, rappresentò comunque un progresso significativo per sviluppi futuri.

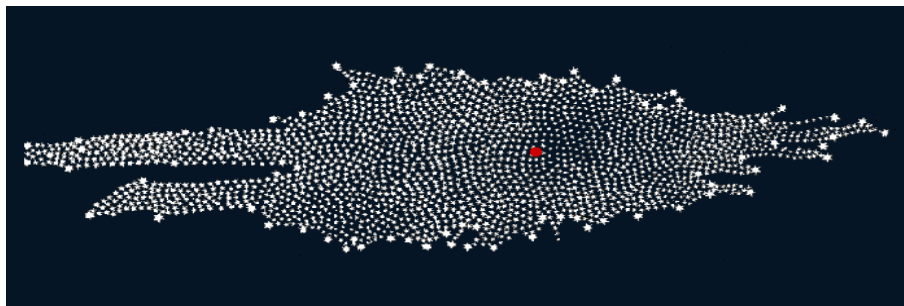


Figura 2.5: La forma della Via Lattea per William e Caroline Herschel nel 1785 secondo la disposizione delle stelle; il Sole (indicato da un pallino rosso) era immaginato nei pressi del suo centro. Credits:articolo [26] tratto dall'originale del 1785.

La loro mappa inoltre, mostrava una distribuzione stellare che si assottigliava gradualmente verso i bordi, suggerendo che la Via Lattea avesse un'estensione finita piuttosto che essere infinita in tutte le direzioni, andando contro le concezioni dell'epoca, molto

più vicine al concetto di universo newtoniano infinito, descritto precedentemente nel capitolo.

Insieme alle varie novità, il modello però, portava con sé alcune lacune significative che lo rendevano approssimativo:

- mancata considerazione della polvere cosmica e del relativo effetto di estinzione⁴, che attenua e arrossa la luce delle stelle lontane.
Questa lacuna li portò a sottostimare la distanza di molti astri, facendo apparire la Galassia più piccola di quanto fosse realmente;
- esclusione delle stelle deboli a causa dei limiti tecnici dei loro telescopi, seppur avanzati per gli standard dei contemporanei;
- difficoltà nel determinare la terza dimensione della galassia, avendo un metodo basato su conteggi stellari “bidimensionali”, non avevano la possibilità o le tecniche per determinare le reali distanze fra gli astri.

Nonostante tali limitazioni, il tentativo degli Herschel di mappare la Via Lattea come entità strutturata fu una pietra miliare nella storia dell’astronomia, fonte di ispirazione per astronomi successivi tra cui **Jacobus Kapteyn** (1851-1922), che un secolo dopo ritentò con successo una mappatura (più nel dettaglio nel paragrafo 2.4) e lo stesso **Harlow**

⁴L’estinzione interstellare è il fenomeno per cui la luce delle stelle viene assorbita e diffusa dalla polvere cosmica, riducendone l’intensità e alterandone il colore. Il fenomeno segue una legge esponenziale:

$$A_\lambda = 2.5 \log \left(\frac{F_{\lambda,0}}{F_\lambda} \right) = 1.086 \tau_\lambda$$

dove A_λ è l’estinzione in magnitudini alla lunghezza d’onda λ , $F_{\lambda,0}$ e F_λ sono rispettivamente il flusso intrinseco e quello osservato, e τ_λ è la profondità ottica del mezzo.

L’estinzione è maggiore alle lunghezze d’onda più corte (Blu e UV), causando il reddening descritto dall’indice colore:

$$E(B - V) = A_B - A_V$$

dove A_B e A_V sono le estinzioni nelle bande blu e visibile. L’estinzione totale è spesso parametrizzata dal rapporto:

$$R_V = \frac{A_V}{E(B-V)}$$

che tipicamente vale ~ 3.1 per la Via Lattea.

Shapley (1885-1972), uno dei protagonisti del dibattito sul quale si focalizza questo lavoro di tesi e di cui verrà data una descrizione nei paragrafi successivi, che puntualizzò la posizione periferica del nostro astro rispetto al centro galattico.

2.3 Il Leviatano di Parsonstown: il nuovo occhio sull'Universo

Se, come si è visto nel paragrafo precedente, anche in tempi precedenti ai nostri era necessario per dedicarsi alla ricerca qualcuno che potesse far da mecenate, in questo specifico caso si andrà a trattare di qualcuno che non fu limitato da una tale problematica. Di **William Parsons** (1800-1867), meglio conosciuto come *terzo conte di Rosse*, evidenziamo come, a differenza dei precedenti astronomi, la sua posizione sociale molto elevata gli permise imprese non proprio da tutti. Fra di esse, la più nota è proprio quella suggerita nel titolo della sezione, la costruzione di un gigantesco telescopio, noto come **il Leviatano di Parsonstown**⁵.

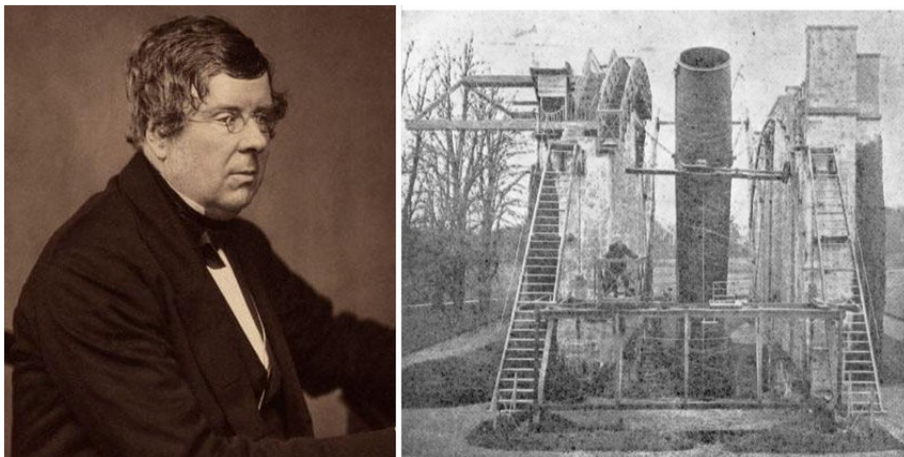


Figura 2.6: A sinistra un'immagine di Lord Rosse; a destra viene raffigurato il Leviatano, si nota l'imponenza del riflettore, credits: Encyclopædia Britannica.

Tale telescopio, ultimato e operativo dal 1845, era talmente imponente da dover essere sostenuto, come si vede in figura 2.6, da una struttura perimetrale fissa dotata di carrucole e contrappesi per l'orientamento; caratterizzato da un specchio (da ciò com-

⁵Il **leviatano** nella storia è raffigurato come un mostro maestoso di grandi dimensioni. Tale caratteristica voleva essere suscitata, come sottolineato dal nome affibbiato al telescopio, a chiunque se lo trovasse davanti.

prendiamo la sua natura di riflettore) con un diametro di 1,8 metri, considerato il più grande dell'epoca.

Questo primato sarà battuto solamente anni dopo, nel 1917, dal *telescopio Hooker* sull'*osservatorio del monte Wilson* (osservabile in figura 2.7), luogo, per l'appunto dove avverranno la maggioranza delle scoperte, contestazioni ed ipotesi esplorate dai protagonisti del Dibattito del 1920, e che permise di ribadire anche, pochi anni dopo, le conferme e teorie proposte da Hubble.

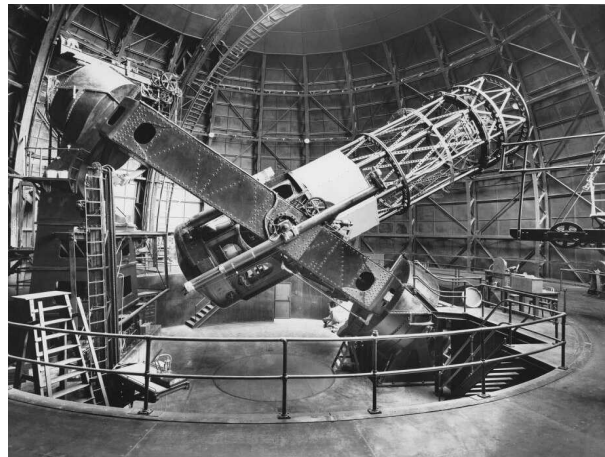


Figura 2.7: Telescopio Hooker del Mount Wilson observatory in California, credits: Huntington Digital Library.

Il famoso strumento del Lord inglese, oltre alla valenza ingegneristica poco rilevante per il lavoro qui sviluppato, grazie alle dimensioni senza precedenti rispetto ai telescopi usati da Messier e dagli Herschel, diede un contributo insostituibile all'astronomia osservativa, permettendo di scorgere dettagli mai visti delle nebulose, entrando ancora di più dentro la loro natura intrinseca.

E' infatti connessa e attribuita al Leviatano la scoperta della **natura a spirale di determinate nebulose**, fra le tante osservate da Lord Rosse, quali M33, M99, M100.

La più nota e forse già vista nella sua vita dal lettore, è M51 o *the Whirlpool Galaxy*.

Questa infatti, come si nota dalle immagini 2.8 e 2.9, vista prima dagli occhi di Lord Rosse e poi con uno strumento moderno, fu la prima nebulosa in cui si distinse chiaramente una morfologia ordinata, suggerendo che non si trattasse di un ammasso caotico di gas e polveri, ma di una struttura più complessa "*costellata di stelle*" per citare le parole



Figura 2.8: M51 osservata da Lord Rosse, che tracciò tale schizzo, a mano, sul suo taccuino nel 1845 circa, credits: [16].

di Lord Rosse [24], che diede il via ad una, più matura e coerente, classificazione per morfologia delle nebulose.

Tuttavia, nonostante i passi da gigante in avanti che, nei primi anni ma anche nei decenni a seguire, le osservazioni del Leviatano e la sua esistenza in sé come pioniere tecnologico dei moderni telescopi (dove accade che più grande è lo specchio, più sarà potente il telescopio) portarono allo studio della natura degli oggetti celesti; ancora mancano due tasselli per avere una panoramica completa sul come e perché si generò il dibattito ed immergersi all'interno.

2.4 Il piccolo universo: Jacobus Kapteyn

Jacobus Cornelius Kapteyn (1851-1922) è considerato uno dei padri fondatori dell'astronomia galattica, data la fondamentale scelta di rappresentare la struttura tridimensionale della Via Lattea sfruttando un metodo totalmente statistico.

La sua idea era basata sull'osservazione sistematica di un campione di dati molto esteso sulle caratteristiche stellari ⁶; dividendo il cielo in 206 aree equamente distribuite e facendo un'analisi accurata delle stelle al loro interno (registrandone posizione, magnitu-

⁶Database fornitogli dalla collaborazione internazionale di più astronomi e osservatori, descritto nel suo articolo *Plan of Selected Areas*.



Figura 2.9: M51 come la vediamo oggi nell'immagine ottenuta dal Hubble Space Telescope, possiamo notare le similitudini strutturali fra le due immagini, nonostante mezzi decisamente diversi in fatto di potenza risolutiva, credits: Wikipedia.

dine apparente e moto proprio) poteva fare considerazioni sulla distribuzione spaziale (in funzione della distanza dal Sole) e sulla cinematica.

Condizioni necessarie per la riuscita del metodo usato e per la formulazione della congettura sulla struttura dell'universo, erano: la distribuzione statisticamente uniforme delle stelle nello spazio e la totale assenza di assorbimento interstellare (ad oggi notabilmente errate, ma valide idee all'epoca).

Ipotizzando ciò, l'astronomo olandese riuscì a delineare un primo schema della galassia, oggi noto come **universo di Kapteyn**, intesa come un disco appiattito di circa 30.000 anni luce di diametro e circa 10.000 di spessore, con il Sole posto vicino al centro, in fig. 2.10.

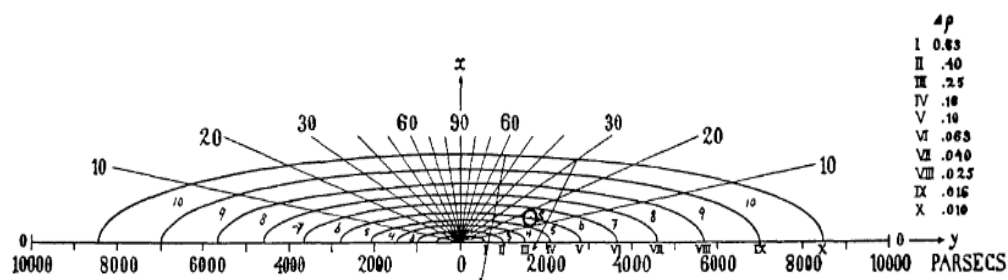


Figura 2.10: Diagramma dell'universo di Kapteyn, credits: [6].

Nei paragrafi successivi, si comprenderà come questa idea di universo, elaborata tra il 1914 e il 1920, fosse a metà fra le due raccontate nel Grande Dibattito: da un lato accettava le dimensioni ridotte della nostra galassia con il Sole in posizione centrale tipicamente associate a Curtis, ma dall'altro portava avanti l'idea di universo galatto-centrico sostenuta da Shapley.

In qualsiasi modo venga visto, la metodologia accurata ed il lavoro di collaborazione su più fronti che portò a tale risultato Kapteyn, rende di indubbia importanza il lavoro dell'astronomo olandese, tanto da essere base e ispirazione per successive indagini statistiche astronomiche.



Figura 2.11: Immagine di Jacobus Kapteyn, credits: Wikipedia.

2.5 L'ultimo tassello: Vesto Melvin Slipher

La punta della piramide che completa questa digressione storica sull'astronomia osservativa e sulla cosmologia tra fine XVIII e inizio XX secolo, venne posta da uno scienziato di oltre-oceano, uno tra i più sottovalutati e meno studiati astronomi del periodo, oscurati tutti dalla profonda ombra di Edwin Hubble, **Vesto Melvin Slipher** (1875-1969).

Ciò che portò di differente lo scienziato americano alla comunità scientifica, fu un alternativo tipo di approccio alla ricerca, non si limitò infatti all'osservazione diretta degli oggetti celesti, ma li analizzò con *metodi basati sulla spettroscopia*, così da ricavare informazioni fondamentali su natura e movimento delle nebulose.

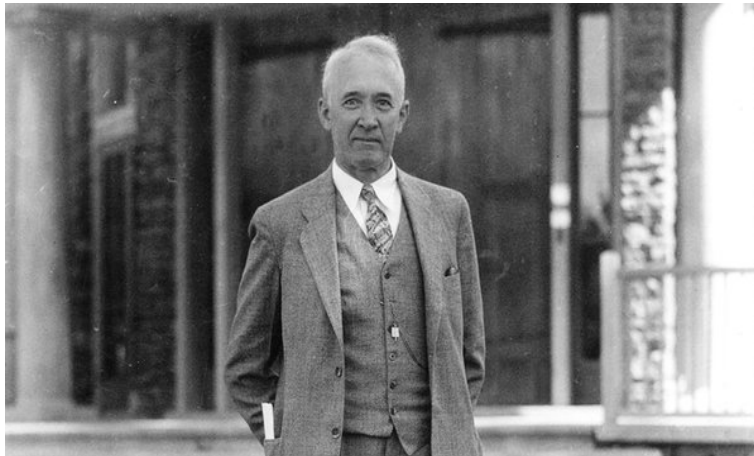


Figura 2.12: Vesto Melvin Slipher a Flagstaff in Arizona nel 1932, credits: University of Chicago Library.

Tale tecnica della **spettroscopia astronomica** era basata, appunto, sull'analisi degli spettri stellari⁷, da ciò era possibile in successivi passaggi la determinazione di parametri come: composizione chimica, temperatura e ultimo ma assolutamente non meno rilevante, *il moto radiale della sorgente luminosa rispetto all'osservatore*.

Slipher sfruttò dei fenomeni derivanti direttamente dall'effetto Doppler, ovvero, il **Blue-shift** o spostamento verso il blu e il **Redshift**, o spostamento verso il rosso: il primo implica che se un oggetto si avvicina, la lunghezza d'onda si accorcia e nello spettro vediamo le sue righe spostarsi verso il blu, il secondo invece fa notare come un allontanamento del corpo sposti le righe di emissione verso, appunto, il rosso.

Lo studioso americano riuscì a scorgere tali modifiche grazie ad uno spettrografo a prisma connesso al telescopio dell'osservatorio Lowell in Arizona negli USA.

Le prime misure fatte dallo statunitense furono sulla galassia più vicina alla nostra, M31 o meglio la **Nebulosa di Andromeda**. Quello che osservò dallo spettro, è che la nebulosa si stava muovendo verso la Terra in maniera significativa (circa 300 km/s) ovvero si trovò dinanzi un caso di blueshift (poi comprenderà che era un particolare di poche galassie,

⁷Con il termine **spettro**, si intende la decomposizione della luce in diverse lunghezze d'onda, tramite un prisma o un reticolo di diffrazione. Si possono osservare tre tipi principali di spettri: continuo (emesso da corpi incandescenti), di emissione (righe luminose prodotte da gas eccitati) e di assorbimento (righe scure sovrapposte a uno spettro continuo, dovute all'assorbimento selettivo di certe lunghezze d'onda da parte di un gas). L'analisi dello spostamento di tali righe permise la successiva scoperta dell'allontanamento delle galassie.



Figura 2.13: L'osservatorio di Lowell Flagstaff in Arizona, ancora oggi in uso, credits: Wikipedia.

più solite ad allontanarsi dalla Terra).

La deduzione lo spinse a continuare la ricerca scrutando altre galassie a spirale, e nel 1914 stabilì che la maggioranza di esse presentavano un redshift elevato, ovvero che si allontanavano in maniera rilevante dall'osservatore.

Nel 1917 era arrivato a misurare la velocità radiale⁸ di circa 25 nebulose a spirale, osservando il loro allontanarsi a velocità fra 300 e 1000 km/s; ciò che comprese da questo moto generale fu che, tali oggetti, non appartenessero tutte allo stesso luogo celeste, ovvero non fossero tutte parte di un'unica grande galassia.

Questo risultato fu il più prossimo alla discussione che nel 1920 sconvolgerà il mondo scientifico, ma non solo, gli stessi dati raccolti da Vesto Slipher furono usati direttamen-

⁸Con **velocità radiali delle galassie** ci si riferisce alla componente della velocità di una galassia osservata lungo la linea di vista dell'osservatore. In altre parole, queste descrivono la velocità con cui una galassia si allontana o si avvicina rispetto alla Terra. La velocità radiale può essere misurata attraverso lo spostamento verso il rosso (redshift) o verso il blu (blueshift) delle linee spettrali emesse dalla galassia. La relazione tra lo spostamento spettrale e la velocità radiale è data dalla formula:

$$v_r = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

dove:

- v_r è la velocità radiale della galassia.
- c è la velocità della luce (circa 3×10^5 km/s).
- $\Delta\lambda$ è il cambiamento nella lunghezza d'onda osservato.
- λ è la lunghezza d'onda originale della linea spettrale.

te da Hubble per stabilire la più nota legge di Hubble, senza di essi molto probabilmente tale conclusione sarebbe arrivata con molti anni di ritardo.

Sottolineando tale sottovalutato contributo, cominciamo nel prossimo paragrafo a conoscere i protagonisti del Grande Dibattito, traendo dalle tappe del cammino percorse fino a questo punto, l'insegnamento che l'avanzamento scientifico umano è un processo lento, ricco di fallimenti da cui ripartire per arrivare a risultati inimmaginabili.

2.6 I protagonisti e le loro visioni

Il Grande Dibattito del 1920 tra Harlow Shapley e Heber Curtis non fu soltanto uno conflitto di dati e modelli teorici, ma il risultato di due percorsi scientifici profondamente differenti, sia in termini di formazione che di metodologia.

Assunto ciò, l'obiettivo di questa sezione è l'analisi del contesto accademico e professionale dei due astronomi, mettendo in luce come le rispettive esperienze di vita abbiano influenzato la loro posizione nel dibattito.

Definendo in maniera approfondita le due differenti visioni cosmologiche si sta entrando nella fase di crisi, primo elemento del ragionamento kuhniano, in cui due diversi paradigmi sono in contrasto a causa e con lo scopo di colmare il vuoto di conoscenza presente nella scienza.



Figura 2.14: A sinistra Heber Curtis, a destra Harlow Shapley, credits: I.A.A. n°62.

2.6.1 Harlow Shapley: vita, formazione e carriera

Harlow Shapley nacque a Nashville, Missouri, nel 1885, si avvicinò allo studio dell'astronomia quasi per caso, dopo aver intrapreso i primi studi universitari in giornalismo.

Cambiato ambito di ricerca, ottenuti laurea e master in astronomia tra il 1910 e il 1911 si spostò, per proseguire la sua formazione presso l'Università di Princeton sotto la guida di Henry Norris Russell, uno dei maggiori teorici dell'astrofisica stellare dell'epoca.

E' proprio durante la permanenza a Princeton che conseguì il dottorato con una tesi sullo studio delle orbite di 90 sistemi binari, creando di fatto una nuova branca dell'astronomia delle stelle binarie.

Grazie anche a questo risultato, si guadagnò fama tale da ottenere un ambito posto nello staff dell'osservatorio del Mount Wilson in California, in figura 2.7, luogo centrale per lo sviluppo della cosmologia e per il più generale avanzamento dell'astronomia, prima con Shapley, successivamente con Hubble.

Il passaggio di carriera da dottorando a ricercatore in California fu punto chiave di svolta per lo scienziato americano. Egli infatti focalizzò il suo lavoro di ricerca sugli ammassi globulari⁹ e si avvicinò all'uso delle stelle variabili Cefeidi come strumenti per la determinazione delle distanze cosmiche.

Era noto già prima di Shapley che la distribuzione degli ammassi globulari nel cielo fosse altamente asimmetrica (concentrati prevalentemente in un emisfero), così come il fatto che molti di essi contenessero numerose stelle variabili Cefeidi, la cui luminosità assoluta poteva essere stimata in base ai loro periodi di variazione luminosa, grazie alla relazione scoperta da Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) nel 1912.

Forte di queste conoscenze, Shapley intraprese uno studio sistematico della distribuzione spaziale degli ammassi globulari, osservabile in figura 2.15), posizionandoli ai bordi della Via Lattea ne individuò le grandi dimensioni.

Calcolò inoltre, che il centro di essa *"si trovasse a circa 50.000 anni luce di distanza da noi, in direzione della longitudine galattica 325°, nella costellazione del Sagittario"*, come affermò nel suo articolo [4].

Tramite il suo lavoro, la Via Lattea iniziò a essere riconosciuta per ciò che realmente è: un sistema stellare almeno dieci volte più grande di quanto stimato in precedenza da

⁹Un **ammasso globulare** è un denso insieme sferoidale di stelle gravitazionalmente legate, tipicamente composto da centinaia di migliaia o milioni di stelle vecchie poste solitamente nell'alone di una galassia, dove con alone si intende la regione di spazio che circonda una determinata galassia.

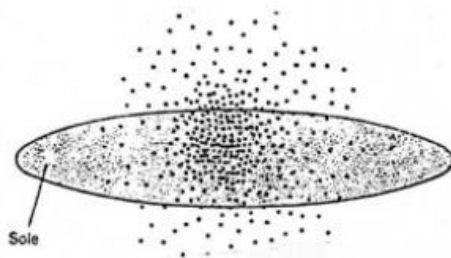


Figura 2.15: Distribuzione degli ammassi globulari nell'Universo di Shapley, si nota come siano distribuiti fuori dal piano galattico, credits: [21].

studiosi come Herschel e Kapteyn, con il Sole situato in una posizione decentrata (studi successivi evidenziarono come in realtà la misura dello scienziato statunitense fosse ampiamente sovrastimata).

Come si può essere compreso dalle precedenti considerazioni, l'approccio di Shapley era fortemente quantitativo, basato su misurazioni fotometriche e statistiche, caratterizzato da una piena convinzione nel ruolo delle Cefeidi come indicatori di distanza. Una tale solidità di pensiero lo portò a diffidare delle teorie contrastanti, come quella di Curtis, basate su misure di parallasse delle nebulose spirali, che indicavano *distanze maggiori* di quelle compatibili con una Via Lattea unica.

La teoria di Shapley quindi, che quindi interpreta le nebulose¹⁰ come regioni interne alla Via Lattea andava a consolidare quell'idea di universo unitario e compatto che rifletteva a pieno il concetto di **scienza normale** espresso da Kuhn: ovvero, tentava di spiegare le anomalie osservate analiticamente, senza però provare ad abbandonare il paradigma dominante di unica galassia.

Dopo aver preso parte al dibattito, l'astronomo americano continuò comunque a dare contributi al campo della cosmologia, assunse anche la carica di direttore dell'osservatorio di Harvard fino al ritiro dalla carriera accademica.

Negli anni non fu solo un noto scienziato, ma anche scrittore, oratore e politico, fino a

¹⁰Il termine **nebulosa** veniva utilizzato per indicare una vasta categoria di oggetti celesti dall'aspetto diffuso, spesso osservati come macchie luminose nel cielo notturno. La classificazione non faceva distinzione tra nebulose galattiche (come le nebulose a emissione o le nebulose planetarie) e quelle che oggi sappiamo essere galassie esterne alla Via Lattea. In particolare, le nebulose a spirale costituivano uno dei punti centrali della controversia tra Shapley e Curtis, proprio perché la loro vera natura – sistemi stellari indipendenti o oggetti interni alla nostra Galassia – era ancora oggetto di Dibattito.

quando si spense, il 20 ottobre 1972, in Colorado.

2.6.2 Heber D. Curtis: vita, formazione e carriera

Heber Curtis nacque a Muskegon, in Michigan nel giugno 1872, come per il collega precedentemente descritto, anche egli non iniziò i suoi studi interessandosi alla scienza, ma, inizialmente si laureò in letteratura classica e per circa cinque anni insegnò letteratura greca e latina al Napa College della California.

Studiando, nel tempo libero dall'insegnamento, astronomia e astrofisica capì la sua vera vocazione nel 1900, quando accompagnò come volontario in una spedizione di osservazione stellare un gruppo di astronomi provenienti dall'osservatorio di Lick.

Questo interesse verso l'universo si trasformò in lavoro dopo aver ottenuto nel 1902 il dottorato in astronomia, specializzandosi in astrofotografia e spettroscopia sotto la supervisione di Ormond Stone, direttore dell'osservatorio dell'Università della Virginia; tali tecniche caratterizzeranno il suo intero metodo di ricerca e l'approccio al dibattito. Per 18 anni lavorò incessantemente come astronomo all'osservatorio di Lick dove ottenne i risultati più importanti della sua carriera accademica, tra cui quelli discussi nel dibattito con Shapley; studiò infatti numerose nebulose spirali, attraverso un grande quantitativo di lastre fotografiche ottenute con il rifrattore da 36 pollici e alla sua forte competenza nell'astrofotografia. Raccolto un ampio archivio di dati, focalizzò gli studi:

- sulla *morfologia* delle galassie, composte da miliardi di stelle, prova del fatto che non erano semplici nubi di gas interne alla Via Lattea ma sistemi esterni ad essa.
- sulla *formazione stellare* nelle galassie, osservando condensazioni luminose nei bracci delle nebulose, che interpretò come aree in cui si generano gli astri; tali osservazioni poi fornirono una base per la comprensione delle galassie come sedi di intensa attività stellare.
- sulle *novae*¹¹, eventi stellari in cui varia la luminosità dell'astro, tanto che per Cur-

¹¹Le **novae** sono eventi transitori che si verificano in sistemi binari stretti, dove una nana bianca sottrae materiale (principalmente idrogeno) dalla sua stella compagna. Quando la pressione e la temperatura sulla superficie della nana bianca diventano sufficientemente alte, innescano una reazione di fusione nucleare esplosiva, che provoca un improvviso aumento della luminosità: la stella diventa decine di migliaia di volte più luminosa, per poi tornare lentamente al suo stato originario. Le novae non distruggono la nana bianca, a differenza delle supernovae di tipo Ia che accumulando massa superano il limite di stabilità terminando il loro ciclo vitale con una esplosione distruttiva.

tis, erano segno di distanze molto maggiori rispetto a quelle previste dal modello ad unica galassia di Shapley.

Per arrivare a comprendere tali elementi, Curtis adottò un metodo diverso da quello di Shapley, basato su statistica e deduzioni teoriche, incentrato sull'analisi dei dati; sfruttò particolarmente quelli ottenuti da Vesto Slipher, nel dettaglio nel paragrafo 2.5, sulle velocità radiali delle nebulose, interpretando che le alte velocità riscontrate, fino a 1000km/s, rispetto ai 100km/s delle stelle nella nostra galassia, provassero la loro natura extragalattica. Inoltre, evitò di affidarsi alla sola stima delle distanze sfruttando le Cefeidi come candele standard¹² e alla legge periodo - luminosità, preferendo un metodo geometrico più diretto ovvero la stima dell'angolo di parallasse, nonostante fosse, come anche sottolineato nel dibattito da Shapley, un metodo poco efficace per oggetti lontani come le altre galassie.

Negli anni successivi al dibattito continuò a dedicarsi all'astronomia, svolgendo altre spedizioni osservative e diventando divulgatore di scienza con la diffusione dei suoi scritti, fino a quando, nel gennaio del 1942, si spense nella sua casa accanto all'osservatorio, ulteriore prova di quanto la sua vita fosse stata dedicata pienamente allo spingersi ai più estremi limiti dell'universo conosciuto.

2.6.3 Edwin Hubble: vita, formazione e carriera

Una delle personalità più note e importanti della storia dell'astronomia, a tal punto da aver un telescopio spaziale a lui dedicato, ed in particolare per il suo ruolo di risolutore delle questioni del Grande Dibattito, è Edwin Hubble; nato a Marshfield, nel Missouri, il 20 novembre 1889, fin dall'inizio della sua carriera si dedica alla scienza studiando biologia all'università di Chicago.

Nella stessa città scoprì la passione per il cosmo e per le osservazioni celesti, diventando assiduo frequentatore dell'osservatorio di Yerkes, in figura 2.18, edificato proprio vicino a Chicago, dove riuscì a sviluppare le basi di fisica teorica e astronomia osservativa. Tali competenze gli permisero di ottenere il dottorato in astrofisica nel 1917, con una tesi

¹²Una **Candela standard** è oggetto astrofisico la cui magnitudine assoluta è nota con buona precisione, impiegato per determinare distanze cosmiche. Il confronto tra magnitudine apparente e assoluta consente di ricavare la distanza d in parsec, dalla formula 1.

Un esempio classico di candela standard sono le *supernovae di tipo Ia*, le cui caratteristiche fotometriche permettono di stimarne con elevata accuratezza la luminosità intrinseca, rendendole strumenti fondamentali per la misura delle distanze extragalattiche.



Figura 2.16: Immagine storica dell'osservatorio di Lick, credits: Detroit Photographic Co./Library of Congress.

"Photographhic invastigations of faint nebulae", sulle nebulose studiate tramite lastre fotografiche, che precederà i lavori più rilevanti fatti successivamente all'osservatorio di Mount Wilson.

Dopo un parentesi militare dovuta alla prima guerra mondiale, Hubble trovò la sua collocazione nel team di astronomi del sopracitato osservatorio californiano; qui dotato del telescopio più potente del mondo per l'epoca, il *telescopio Hooker* da circa 2,5 metri di diametro (in figura 2.7), riuscì ad indagare le nebulose a spirali con una precisione, fino a quel momento, mai ottenuta.

Fu proprio studiando la più nota di questi oggetti cosmici, la nebulosa di Andromeda (M31), disegnata e descritta inizialmente dal conte Rosse (nel capitolo 1), osservabile nella figura 2.9, che scoprì il passaggio mancante, non colto dai suoi predecessori: tramite l'analisi di lastre fotografiche a lunga esposizione, individuò nella galassia la presenza di alcune stelle variabili Cefeidi; applicando la ormai nota legge periodo-luminosità di Henrietta Leavitt riuscì a calcolare la distanza di Andromeda dall'osservatore, stimandola a circa 2,5 milioni di anni luce.

Un tale risultato implicava l'impossibilità che M31 appartenesse alla Via Lattea e quindi la presenza di galassie separate andava a confermare la tesi di Heber Curtis, aprendo le porte alla cosmologia EXTRAgalattica.

Il metodo con cui Hubble ottenne tale scoperta era sintesi ed unione di quello dei due protagonisti del Grande Dibattito, combinava alla fotografia astronomica su lastre, che



Figura 2.17: Edwin Hubble, credits: american institute of Physics and science photo library.

gli permetteva di osservare anche piccole variazioni nella luminosità di oggetti lontani, con una solidissima base teorica, tra statistica e spettroscopia.

Tale metodologia, insieme a tecniche e dati ottenuti da Vesto Slipher, lo portò anche a definire una delle leggi più importanti dell'astronomia, **la Legge di Hubble**¹³, in figura

¹³La **legge di Hubble** (rinominata dal 2018 di Hubble-Lemaître, data la quasi contemporaneità ed indipendenza della scoperta riconosciuta ai due scienziati dall'IAU) esprime la proporzionalità tra la *velocità di recessione* di una galassia e la sua *distanza* dalla Terra, come evidenza dell'espansione dell'universo. La formulazione classica della legge è:

$$v = H_0 \cdot d$$

dove:

- v è la velocità di allontanamento (dedotta dallo *spostamento verso il rosso*, o *redshift* z).
- d è la distanza della galassia.
- H_0 è la *costante di Hubble*, il parametro che misura il tasso di espansione dell'universo (valori attuali stimati tra 67 e 74 km/s/Mpc, a seconda del metodo di misura).

Per galassie relativamente vicine, ovvero per $z \ll 1$, vale l'approssimazione classica:

$$v \approx c \cdot z$$

dove c è la velocità della luce e il redshift z si definisce come:

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{osservata}}}{\lambda_{\text{emessa}}}$$

Diversamente da un semplice effetto Doppler classico, il redshift cosmologico riflette l'espansione dell'universo nel tempo, come previsto dalla relatività generale Einsteiniana.



Figura 2.18: Osservatorio di Yerkes, luogo dei primi studi di Hubble, credits: National Geographic.

2.19: essa rapporta distanza e velocità di recessione delle galassie e fornisce la prima evidenza osservativa di un *universo in espansione*, andando a negare la vecchia concezione di universo statico.

Dopo aver donato al mondo una nuova legge rivoluzionaria, nei circa 20 anni successivi, fino alla morte nel 1953, continuò a lavorare sulla cosmologia osservativa, classificando galassie e studiandone le loro proprietà, come ad esempio la densità in funzione della distanza, fermato nel suo incessante progredire solo dal secondo grande conflitto mondiale.

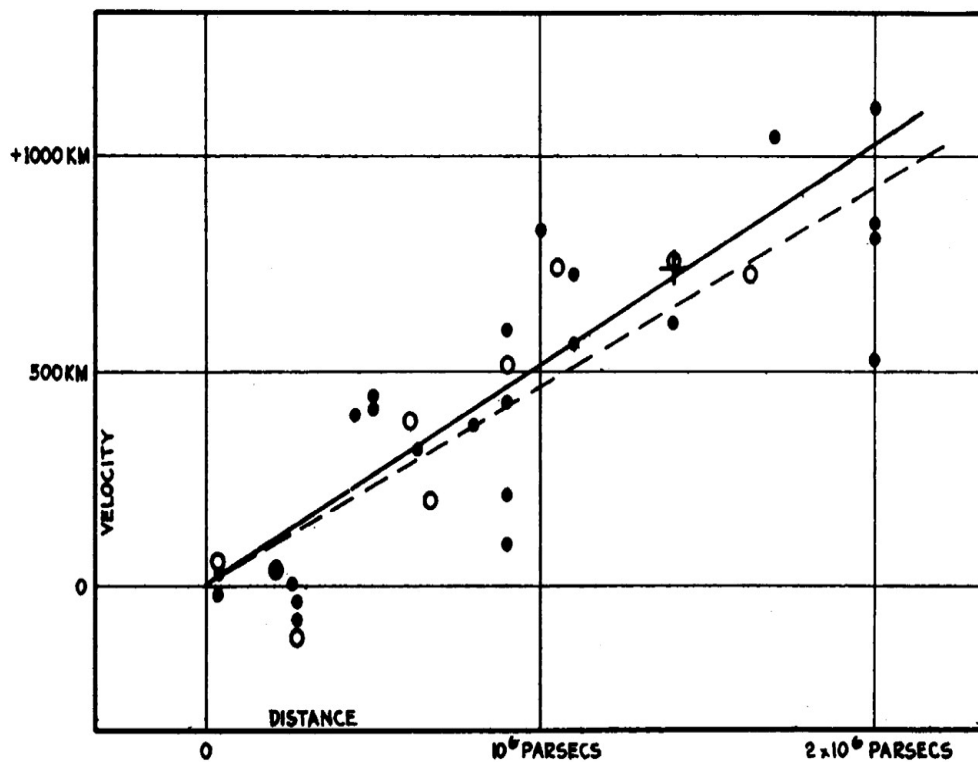


Figura 2.19: Grafico ottenuto con dati di che Hubble raccolse e da cui definì la legge omonima, tratto dall'articolo del 1929 [12], è facilmente comprensibile la relazione lineare tra le due variabili distanza(x) e velocità (y).

3 Scienza e Storia nel Grande Dibattito del 1920

In questo capitolo, si darà spazio all'analisi dello resoconto ufficiale, che riporta la discussione tra Shapley e Curtis, definendone le sue caratteristiche di fonte storica e confrontando con una chiave di lettura puramente scientifica le opinioni dei due scienziati, mostrando dati, metodologie e risultati per i temi principali che vennero trattati.

3.1 Il resoconto del Dibattito come fonte storica

Il Grande dibattito si tenne la mattina del 26 aprile 1920 presso lo *Smithsonian Museum of natural History* di Washington (di cui si riporta una foto 3.1); tuttavia, la formalizzazione come pubblicazione arrivò solo l'anno successivo attraverso il *Bulletin of the National Reserach Council*, la cui copertina viene riportata in figura 3.2.

L'opera venne redatta dagli stessi protagonisti, in maniera tale da poter scrivere un resoconto rigoroso e autorevole delle loro posizioni, senza che eventuali interpretazioni esterne potessero distorcere le loro visioni.

Il resoconto costituisce, quindi, una preziosa fonte storica e storiografica grazie alla sua natura di testimonianza diretta di un'importante discussione scientifica tenutasi in un contesto pubblico e istituzionale.

Questa registrazione dettagliata permette di osservare in maniera approfondita le modalità divulgative adottate, tra cui l'uso del linguaggio tecnico, la presentazione delle evidenze empiriche e le strategie impiegate per sostenere le rispettive posizioni, in maniera molto simile a ciò che avviene ancora oggi.

Ciò che lo caratterizza come fonte è la chiarezza con cui sono riportati gli interventi scendendo nel dettaglio, descrivendo l'ordine degli argomenti e le reazioni immediate del pubblico, aspetti che offrono agli storici una rara opportunità di analizzare la struttura e le dinamiche del dibattito scientifico dell'epoca.

Andando a vedere questa fonte *storica primaria* da una **prospettiva storiografica**, si nota come il documento risulti fondamentale per comprendere le dinamiche sociali e istituzionali che influenzavano la scienza nel primo Novecento (periodo in cui i dibattiti

Sfruttando l'applicazione di tecniche e dati diversi, i due scienziati portano avanti le loro idee giustificandole rispetto alla teoria avversa e nel complesso, seppure con ipotesi e tesi diverse, entrambe le narrazioni seguono una struttura lineare, sviluppando questi due argomenti:

- la dimensione della Via Lattea e la posizione del Sole;
- la natura e la distribuzione delle nebulose a spirale.

Come facilmente si nota, gli elementi trattati sono quesiti che l'astronomia ha sempre ritenuto centrali e per cui numerose generazioni di scienziati si sono adoperati per trovarne risposta, come si evince nel percorso storico affrontato al capitolo 1.

3.2.1 La dimensione della Via Lattea e la posizione del Sole

Il primo fra i temi, e punto cardine per i due scienziati, è lo studio delle dimensioni della Via Lattea, all'epoca ancora dubbie.

Su questo tema Shapley e Curtis danno vita ad un confronto fra modelli cosmologici e visioni totalmente divergenti.

Shapley infatti, sostenne che la nostra Galassia è estremamente estesa, stimando una dimensione di circa 300'000 anni-luce di diametro, ben oltre le più conservative previsioni dell'epoca.

Come accennato nella sezione 2.6 le ipotesi da lui teorizzate erano basate sull'analisi della distribuzione e della distanza degli ammassi globulari nell'universo conosciuto, sfruttando un *metodo fotometrico*, il cui funzionamento consiste, riportando le parole di Shapley:

*“nel determinare in qualche modo la luminosità reale di una stella, cioè la sua cosiddetta **magnitudine assoluta**, e poi nel misurarne la **magnitudine apparente** [...] e usando una semplice formula è possibile determinarne la distanza.”*

Tali stelle citate sono appunto *le Cefeidi*¹⁵, usate da Shapley, come strumenti di calibrazione fotometrica. Lo studio di tali oggetti cosmici, permetteva così un confronto diretto fra le caratteristiche degli astri vicini alla Terra, nei “*pressi del vicinato solare*”, e quelli più lontani negli ammassi globulari, paragonabili fra loro essendo di tipo spettrale¹⁶ simile.

La “*semplice formula*” è quella del modulo di distanza usata ancora oggi:

$$m - M = 5 \cdot \log(d) - 5 \quad (1)$$

- m è la *magnitudine apparente*, una misura della brillantezza osservata di un oggetto celeste, così come appare dalla Terra. Essa quantifica l'intensità del flusso luminoso ricevuto, ed è espressa su una scala logaritmica inversa, per cui a valori numerici più bassi corrispondono oggetti più luminosi;
- M è la *magnitudine assoluta*, è una misura della brillantezza intrinseca di un oggetto celeste, espressa in termini del flusso che esso emetterebbe se fosse osservato da una distanza standard di 10 parsec. In altre parole, rappresenta la magnitudine apparente che l'oggetto presenterebbe se il flusso luminoso ricevuto fosse quello corrispondente a tale distanza, senza attenuazioni dovute all'assorbimento interstellare;
- d è la *distanza* tra osservatore e stella calcolata, anch'essa in parsec.

¹⁵Le **stelle Cefeidi** sono una classe di stelle variabili pulsanti la cui luminosità varia periodicamente a causa di cicli di espansione e contrazione del loro involucro esterno. Hanno la fondamentale proprietà di presentare una relazione ben definita tra il periodo di variazione della luminosità e la loro magnitudine assoluta, nota come legge periodo-luminosità, caratteristica che le rende ottimi indicatori di distanza su scala galattica ed extragalattica.

¹⁶I **tipi spettrali stellari** costituiscono una classificazione delle stelle basata sull'analisi del loro spettro elettromagnetico, cioè sulle righe di assorbimento visibili nella luce emessa. Questa divisione riflette principalmente la temperatura superficiale della stella ed è strettamente legata al suo colore apparente: le stelle più calde emettono più intensamente nel blu e nell'ultravioletto, mentre quelle più fredde brillano soprattutto nel rosso e nell'infrarosso.

La sequenza spettrale standard per l'epoca di Shapley era: O, B, A, F, G, K, M, nota come “classificazione di Harvard” e tuttora in vigore, ordinata in senso decrescente di temperatura (da oltre 30.000 K per le O a meno di 3.500 K per le M), e determinato il tipo attraverso l'analisi spettroscopica, permette di stimare, confrontando con i valori medi già noti, la magnitudine assoluta M della stella, ovvero la sua luminosità intrinseca.

Uno degli ostacoli nell'applicazione del metodo, era il determinare in maniera affidabile M , e per risolvere ciò, Shapley, sfruttò ancora l'idea presupposta di “*probabile uniformità universale dei fenomeni tra Cefeidi galattiche e quelle degli ammassi*”.

Infatti, con la tecnica della **parallasse statistica**, ovvero, usando le informazioni a lui note sui moti propri delle Cefeidi vicine, dopo aver selezionato le più “brillanti”, ne stimò la distanza media e da essa, con la formula 1, la Magnitudine assoluta, come spiega:

“Ho ottenuto le magnitudini assolute per un certo numero di stelle [...] a partire dai loro moti propri, sull'ipotesi che tutte le stelle abbiano approssimativamente la stessa velocità spaziale media.”

Nota questa grandezza e il periodo di ciascuna stella scelta, costruì quella che è definita *retta di calibrazione* per la relazione-periodo luminosità, in figura 3.3; applicando la relazione alle Cefeidi negli ammassi distanti, di cui conosceva periodo e magnitudine apparente da studi precedenti del Mount Wilson Observatory, ricavò infine la distanza da lui cercata. I dati trovati dallo studio, riportati in figura 3.5, indicano negli ammassi

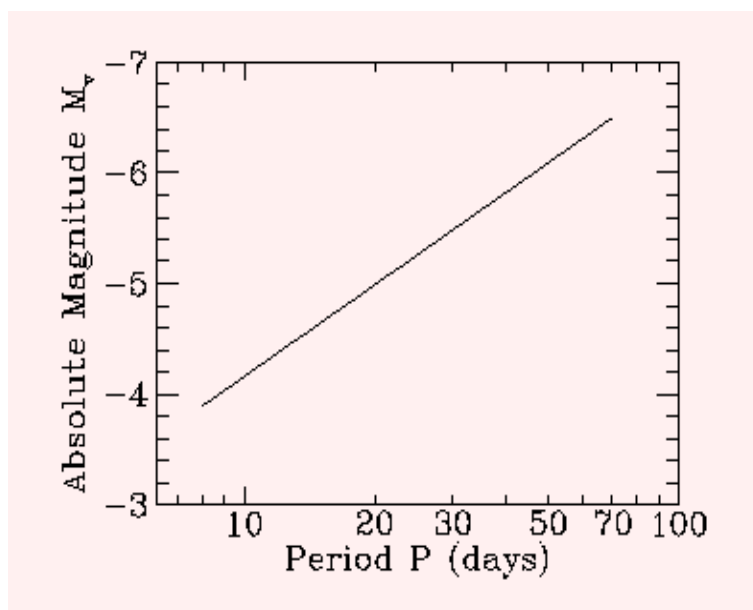


Figura 3.3: Retta di calibrazione per la relazione periodo-luminosità trovata da Shapley, differisce da quella della Lewitt perchè sull'asse Y ha la magnitudine assoluta invece che apparente, credits: [19].

vicini una magnitudine assoluta media negli pari a -0.8, successivamente corretto a -1.1.

Trovato il valore per quelli vicini, e supposto simile e comparabile per quelli lontani, l'unica cosa da fare era applicare il tutto ad un caso particolare. L'ammasso su cui concentrò maggiormente l'osservazione e la ricerca, fu **l'ammasso di Ercole** o M13 (di cui si ha una foto in 3.4); di questo ammasso Shapley propose valori di Magnitudini diversi, per condizioni iniziali differenti: una a 36.000 anni-luce, l'altra a 3.600 anni-luce di distanza dall'osservatore (si veda la figura 3.6).



Figura 3.4: M13, ammasso globulare situato nella costellazione di Hercules sfruttato da Shapley nei suoi studi, credits: Wikipedia.

Quello che notò è che se Messier-13 fosse stato a 3600 anni luce di distanza la sua luminosità sarebbe dovuta essere intorno a +3 o più debole, valore, a meno di rottura della proposizione di paragonabilità, incompatibile con quello ottenuto dai dati sugli ammassi vicini, mentre al contrario, il valore trovato per 36.000 anni luce era estremamente vicino a quello supposto corretto dalla teoria.

Validate con tale tesi le magnitudine usate, calcolò numericamente le distanze per gli ammassi, e teorizzò le dimensioni della Via Lattea, supponendole estese, almeno quanto quelle dei suoi componenti (ammassi):

“Quando accettiamo l’idea che la distanza dell’ammasso di Ercole sia tale da rendere i suoi fenomeni stellari in armonia con quelli stellari locali, le sue stelle più brillanti sono

	<i>M</i>
Ursa Major system	−1.0
Moving cluster in Perseus	−0.5
Hyades	+1.0
Scorpio-Centaurus cluster	−2.5
Orion nebula cluster	−2.5
Pleiades	−1.0
61 Cygni group ¹	+1.0

Figura 3.5: Tabella contenente le misure di Magnitudine assoluta media usate nello studio da Shapley, credits: [5].

6. Let us now examine some of the conditions that would exist in the Hercules Cluster (Messier 13) on the basis of the two opposing values for its distance:

	36,000 light-years	3,600 light-years, or less
a. Mean absolute photographic magnitude of blue stars (C. I. <0.0)	0	+5, or fainter
b. Maximum absolute photographic magnitudes of cluster stars	Between −1.0 and −2.0	+3.2, or fainter
c. Median absolute photovisual magnitude of long-period Cepheids	−2	+3, or fainter
d. Hypothetical annual proper motion	0.004	0.04, or greater

Figura 3.6: Confronto dell'ammasso di Ercole a distanze diverse, sono elencati i dati ottenuti sfruttando diverse sorgenti, credits: [5].

giganti tipiche, le sue Cefeidi paragonabili alle nostre, ne consegue che gli ammassi globulari più deboli e più piccoli sono ancora più distanti dei 36.000 anni luce. Un terzo di quelli oggi conosciuti si trova a una distanza superiore ai 100.000 anni luce; il più lontano è oltre i 200.000 anni luce, e il diametro dell'intero sistema degli ammassi globulari è di circa 300.000 anni luce."

L'opinione di Shapley per quanto concerneva la posizione del Sole era decisamente netta, infatti:

*"Conseguenza dell'accettare la teoria secondo cui la forma e l'estensione del sistema galattico è che il Sole si trova ad essere molto lontano dal centro della galassia [...] a **non meno di 50.000 anni-luce** da esso."*

Il suo punto di vista non si limitò alla pura scienza, ma rifletté anche, su come gli studiosi prima di lui fossero stati vittima, non solo, di mezzi inefficienti per misurare le distanze, ma anche, di un pensiero prettamente antropocentrico che insisteva col porre l'uomo e la Terra al centro, ingannando e celando la verità, come narrano le sue parole:

"Fummo così convinti che il nostro piccolo pianeta fosse al centro dell'universo e che i suoi dèi terrestri avessero creato e giudicato tutto, da illuderci riguardo al cosa c'era attorno a noi."

Curtis invece, nel suo intervento contesta profondamente le tecniche e la visione di Shapley. Provò a confutare la teoria sugli ammassi globulari sviluppandone una alterna-

tiva più legata all'**analisi delle novae extragalattiche** osservate all'interno delle nebulose a spirale, la cui interpretazione poteva essere decisiva per ridimensionare l'universo galattico ipotizzato dal collega.

Lo scienziato statunitense preferiva un approccio di tipo più empirico e conservativo, basato sull'impiego di metodi osservativi ben consolidati, evitava l'uso di strumenti innovativi come la relazione periodo-luminosità affidandosi più a conteggi e classificazioni stellari, intuibile dall'ampio uso di dati numerici e grafici lungo tutta la durata del testo. A prova di ciò vi è la rispettosa critica che Curtis propone all'estensivo uso delle Cefeidi nella determinazione di distanza e distribuzione degli ammassi globulari. Partendo dalle tre ipotesi chiave della teoria Shapley, le confuta una alla volta:

- Sulla *stretta relazione tra magnitudine assoluta e durata del periodo per le Cefeidi della nostra Galassia* afferma quanto essa sia molto limitata.

Egli non nega in toto, l'esistenza della curva periodo-luminosità, ma ne esprime riserve sulla sua precisione ed universalità definendola ancora incerta per le Cefeidi. Tale relazione contiene insita in essa una notevole dispersione nei dati osservati: non tutte le stelle con lo stesso periodo hanno effettivamente la stessa luminosità, portando, come si vedrà ad un grafico non affidabile quanto pensava Shapley.

Supporre questo, significava per Curtis, dare spazio a margini di errore significativi nel calcolo delle distanze, che si sarebbero propagati usando le stime locali su popolazioni di ammassi distanti.

- Sulla generalizzazione che *Cefeidi con periodi identici hanno magnitudini assolute identiche ovunque nell'universo* ciò che Curtis evidenzia con le sue parole è l'errata estensione della validità della curva a cefeidi di ambienti astrofisici diversi. Non essendo, almeno per l'epoca, ambienti conosciuti a fondo, Curtis suggeriva la necessità di cautela nella trattazione di stelle presenti in essi, la cui luminosità poteva essere modificata da parametri sconosciuti.
- Sulla *derivazione della distanza assoluta degli ammassi* che dipendono interamente da caratteristiche di un campione di sole 11 stelle produce la critica più forte; Curtis non accetta l'iper selezione fatta da Shapley nel campione di Cefeidi in analisi, egli afferma che:

“La verifica finale di una relazione funzionale consiste nella concordanza ottenuta quando questa viene applicata a dati simili non impiegati originariamente per dedurre la relazione stessa [...] ma se quando viene applicata ad essi non risulta coerente entro limiti ragionevoli, saremmo giustificati nel sospendere il nostro giudizio.”

Con tali parole egli andava a riferirsi al grafico in figura 3.7, proposto per l'occasione, in cui andava a confrontare l'andamento della curva calcolata da Shapley, con i dati noti, teoricamente compatibili, di altre Cefeidi.

Curtis osservò, e il lettore può verificare, come la maggioranza dei dati usati si discosta dalla curva generata, ergo non dovrebbe essere accettata come probabile prima di ulteriori verifiche.

Negata la validità del metodo tramite Cefeidi, osservò che, anche usando un altro tipo stelle al posto delle sopracitate, il risultato non sarebbe cambiato anche andando a lavorare su una classe di stelle numericamente più ampia, come **le giganti**. Si accorse che tenendo conto dei parametri stellari ricavati da studi precedenti e soprattutto considerando l'arrossamento delle stelle negli ammassi, elemento mai citato o tenuto in analisi da Shapley, le dimensioni calcolabili per la Galassia rimanevano dell'ordine dei **30.000 anni-luce** con gli ammassi posti a massimo 10.000 anni-luce, decisamente sottodimensionati rispetto a quelle del collega Shapley.

Va sottolineato, come si leggerà nella prossima sezione, che l'argomento degli ammassi globulari non era centrale per Curtis, ma venne citato, solo allo scopo di confutare la teoria a lui opposta.

Per quanto concerne la posizione del Sole nella galassia, facendo riferimento al modello di galassia a disco di Kapteyn, Curtis suppose che occupasse una posizione centrale, incentrando il ragionamento sull'ipotesi di *isotropia osservativa*: se il numero di stelle visibili in ogni direzione diminuisce regolarmente con la distanza, e non vi sono evidenti variazioni asimmetriche, è naturale dedurre che il punto di osservazione (cioè il Sole) si trovi in una posizione prossima al centro della distribuzione.

In sintesi, da ciò che si è letto si comprende come l'approccio di Curtis fosse molto conservativo e legato ai precedenti studi.

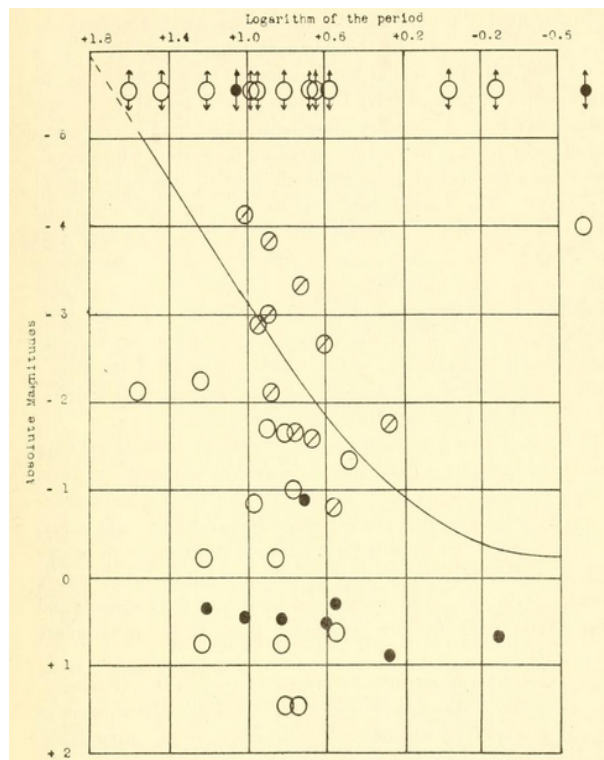


Figura 3.7: Confronto tra le magnitudini assolute delle Cefeidi e la curva di correlazione periodo-luminosità. I cerchi rappresentano le magnitudini stimate a partire dalla componente trasversale del moto proprio, mentre i punti neri indicano le parallassi determinate direttamente. Le undici stelle utilizzate da Shapley per calibrare la curva sono evidenziate con una barra sovrapposta. Le frecce associate ad alcuni cerchi in alto indicano casi in cui la parallasse o la componente del moto proprio risulta negativa, rendendo la magnitudine assoluta indeterminata. Questo evidenzia i limiti del campione usato da Shapley per la calibrazione, credits: [5].

3.2.2 La natura e la distribuzione delle galassie a spirale

Per lo sviluppo dell'analisi di tale tema, si è preferito, come si leggerà, un ordine invertito, per primo si delinea il pensiero di Heber Curtis, che nel suo intervento dà più spazio all'argomento e lo tratta in maniera più profonda, solo successivamente verrà esposta l'idea di Shapley, più concisa e "superficiale".

Curtis come detto in precedenza, teorizzava la natura extragalattica delle nebulose a spirale, con la visione metaforica di *universi-isola* simili alla Via Lattea, ognuno dotato,

però di una propria struttura stellare ed evoluzione.

La prima caratteristica che andò ad analizzare fu la distribuzione delle galassie, affermando che fossero:

“concentrate dove le stelle son più rare (ai poli galattici), e per niente dove le stelle son più numerose (lungo il piano galattico).”

Ovvero, essendo nota la forma lenticolare e appiattita della galassia, in cui la maggior parte delle stelle e delle nubi di gas e polvere (o nebulose con anelli periferici di materia oscurante) sono concentrate lungo il piano galattico, la anomala distribuzione delle nebulose a spirale doveva essere segno di distanze molto ampie, tali da posizionarle fuori dalla Via Lattea stessa, rendendole “universi isolati”. Aggiunse inoltre che il moto di recessione, o come la chiamavano gli oppositori, “una gran forza di repulsione”, di queste da noi, poteva spiegarsi facilmente pensando al fatto che la stessa Via Lattea presentasse una struttura a spirale e che si stesse allontanando relativamente alle altre, moto relativo che era giustificato, ad esempio, dal contemporaneo avvicinamento della galassia di Andromeda.

Altro argomento che portò a favore della natura extragalattica, fu l'osservazione spettroscopica, tecnica da lui studiata in maniera approfondita sin dal periodo di dottorato, delle galassie, il cui risultato fu indistinguibile da quello fornito dallo spettro integrato delle Via Lattea, ovvero quello atteso da una vasta aggregazione stellare.

Ultimo argomento, ma non meno importante, portato da Curtis fu la correlazione fra novae galattiche e delle novae nelle galassie lontane.

Come spiegato dalle parole di Curtis:

“esse aumentano improvvisamente la propria luminosità, per poi calare in modo più lento fino a raggiungere una luminosità diecimila volte inferiore a quella iniziale [...] esse così forniscono un metodo per determinare le distanze approssimative delle spirali”

e pertanto tali eventi stellari potevano essere usati come candele standard e confrontati in diversi ambienti galattici.

Nel dettaglio quello che fece Curtis fu confrontare le magnitudini delle novae osservate in M31 o Nebulosa di Andromeda (secondo le sue stime posizionata a circa 500.000 anni luce), con quelle galattiche (per cui la magnitudine assoluta media era compresa tra -3 e +7), osservabile in figura 3.8.

	Absolute magnitudes			
	Four galactic novae of known distance	Sixteen novae in Andr. if at distances of,—		
At maximum	—3	500,000 l. y.	20,000 l. y.	
At minimum	+7	—4	+3	
		+6?	+13?	

Figura 3.8: Tabella di confronto tra magnitudini di novae a distanza possibile di 20.000 a.l. (teoria di Shapley) o 500.000 a.l, credits: [5].

Quello che comprese è che si raggiungeva la compatibilità delle misure supponendo una grande distanza dall'osservatore, ovvero confermando l'idea di spirali extragalattiche; in caso contrario le novae, nonostante la loro potenza, sarebbero dovute essere caratterizzate da magnitudini estremamente basse, inusuali per eventi del genere e ritrovati in pochissimi casi nell'universo.

Riassumendo quanto appena detto, una tale visione extragalattica permetteva di connettere i fenomeni visti nella nostra galassia, la sua composizione, possibile morfologia ed evoluzione alle altre nebulose; nonostante ciò l'elemento che contraddistinse Curtis in tutte le sue affermazioni fu la capacità di riconoscere ancora l'incertezza nella conoscenza dei tempi, che tendeva verso una galassia da dimensioni ristrette ma non al punto da permettere affermazioni definibili dogmatiche; vi erano ancora delle falle in entrambe le teorie che si sarebbero palesate quando ulteriori evidenze sarebbero state disponibili.

Shapley trattò meno la natura delle nebulose, concentratosi maggiormente sugli ammassi globulari precedentemente descritti, quello che fece è riportare 3 studi che evidenziavano elementi contro la natura extragalattica, si riportano qui le parole da lui pronunciate:

“tre studi recenti mettono in discussione la teoria secondo cui le nebulose a spirale siano galassie comparabili alla nostra:

- *Nessuna delle nebulose a spirale conosciute ha una luminosità superficiale bassa quanto quella della nostra;*

- *La distribuzione della luce e del colore nelle spirali tipiche portano a concludere che non possono essere sistemi stellari ma oggetti gassosi;*
- *le recenti misurazioni nella spirale M33 indicano che queste brillanti galassie non lo sono a sufficienza per uscire dal diametro da me teorizzato.”*

Nonostante ciò, come Curtis prima di lui, anch'egli comprese che la via migliore da percorrere, seppur chiarendo la sua convinzione, era quella dell'incertezza, affermando che non si potesse escludere altrove nello spazio, la presenza di sistemi uguali o più grandi del nostro, del tutto oltre la portata degli strumenti ottici e delle scale di misura allora utilizzati.

Esplicitate le posizioni dei due scienziati, si ha finalmente chiara l'estrema diversità di concezioni presenti all'epoca sulle questioni cosmologiche.

Dalle reazioni che vennero generate dallo scambio di idee, analizzate nel prossimo capitolo, comprenderemo come una tale varietà di pensiero se sfruttata al meglio e usata come strumento di confronto, si un'ottima base per la ricerca e per il progresso scientifico.

4 Il post-Dibattito

Dopo aver affrontato il dibattito, il panorama scientifico non rimase neutrale, ognuno preferì una delle due parti e vi si schierò. Con un breve resoconto della situazione immediatamente successiva al dibattito, in questo capitolo si descriverà la scoperta di Hubble che farà pendere l'ago della bilancia, finalmente, verso la teoria correntemente accettata.

Verranno descritti il metodo, gli strumenti (fisici e matematici) e i ragionamenti che permisero di arrivare alla soluzione del rompicapo tanto discusso durante il Dibattito del '20. Infine verrà illustrata una panoramica di ciò che accadde dopo Hubble e di come la conferma della teoria di Curtis e la successiva legge di Hubble fecero nascere la cosmologia e con essa un dibattito tutto nuovo.

4.1 Il clima scientifico negli anni '20

Sebbene il vero e proprio Dibattito non si era concluso con un paradigma vincente, esso fornì lo spunto di riflessione che portò a comprendere la necessità di dare chiarezza alla questione.

Negli anni immediatamente successivi al dibattito ci fu chi diede ragione a Curtis (nebulose come universi-isola) e chi a Shapley (nebulose come parte della Via Lattea).

Ad esempio, a favore di quest'ultimo si schierò l'astronomo olandese-americano **Adriaan Van Maanen** (1884-1946), suo collega all'osservatorio di Mount Wilson. Ciò che Van Maanen credeva di aver osservato, era una lenta *rotazione angolare in alcune nebulose a spirale*, nel dettaglio M33, M81 e M101, che, se confermata, avrebbe implicato velocità tangenziali superiori a 10.000 km/s rendendo, di fatto, incompatibile l'ipotesi delle nebulose come galassie distanti¹⁷.

¹⁷Ciò Van Maanen fece fu prendere fotografie della stessa nebulosa confrontandole a distanza di 10-12 anni; da ciò sfruttando un micrometro misurava lo spostamento laterale apparente di alcune strutture luminose rispetto al centro galattico.

Calcolato questo spostamento angolare (in arcosecondi/anno), nota la distanza dell'oggetto in questione, poteva ottenere infine la velocità tangenziale reale.

A prova di ciò porto l'esempio su M101; se tale nebulosa si trovasse ad 1 milione di anni luce, dalla stima di Curtis, e si trovasse una rotazione apparente di 0.02 arcosecondi/anno si osserverebbe una velocità tangenziale pari a 10.000 km/s fuori qualsiasi scala fisica, e tesi confutatoria della teoria degli universi-isola.



Figura 4.1: Nelle foto osserviamo M33 o *del Triangolo*, M81 o *galassia chioma di Berenice* e M101 o *della girandola*, le galasse che studiò Van Maanen nella sua critica a Curtis, credits: Wikipedia.

La risposta di Curtis fu netta, tanto che espresse immediatamente dubbi e scetticismo nei confronti di tali risultati.

Egli pensava fosse difficile da credere che si potesse rivelare ad occhio una rotazione così lenta, come quella che sarebbe dovuta esistere se le nebulose fossero davvero extragalattiche, e riteneva, inoltre, che non si sarebbe dovuta sopravvalutare l'affidabilità di movimenti così piccoli, misurati su immagini a lunga esposizione.

Nonostante in primo periodo l'ipotesi di Van Maanen portò favore alla teoria di Shapley, i dubbi di Curtis ebbero fondamento.

Infatti, le successive indagini, soprattutto quelle condotte da Hubble, decretarono l'idea viziata da errori di calcolo e soprattutto da un uso scorretto della strumentazione.

Gradualmente, grazie anche al perfezionamento di strumenti idonei a risolvere stelle nelle nebulose a spirale, ci si stava avvicinando inesorabilmente alla risoluzione del dilemma.

Sarà proprio il momento di *eureka* di Edwin Hubble che permetterà il superamento del dilemma.

4.2 Hubble e la prova definitiva

Come brevemente anticipato nel paragrafo precedente, il dibattito seppur avesse chiarito quali fossero le due possibili risposte alla natura delle nebulose a spirale, non aveva individuato la prospettiva corretta.

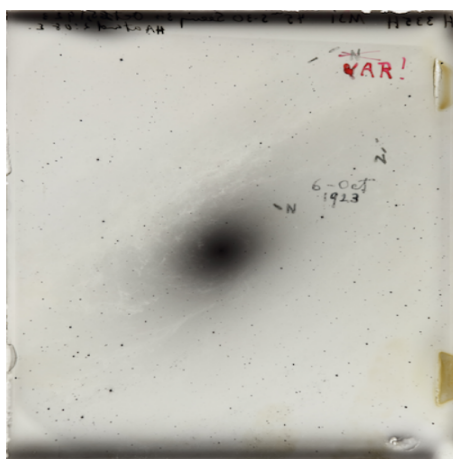


Figura 4.2: Lastra H335H su cui annotò tre astri etichettati come “N”; accorgendosi che uno di questi mostrava variazioni di luminosità cancellò l’etichetta “N” e la sostituì con la scritta “VAR!”, in rosso, indicando che si trattava di una stella variabile, da Carnegie institute of science, credits: archivi fotografici del Carnegie Science.

Il risolutore di questo rompicapo fu Edwin Hubble, introdotto nel paragrafo 2.6.3. Egli presentò, nel 1925, con l’articolo “*Cepheid in Spiral Nebulae*” [10] osservazioni che risultarono cruciali per la dimostrazione della natura extragalattica delle nebulose, convalidando con tali argomentazioni la teoria di Curtis.

Ciò che fece, utilizzando l’avanzato telescopio Hooker dell’osservatorio di Mount Wilson (figura 2.7), fu imprimere dal settembre del 1923, su molte lastre fotografiche, la nebulosa M31 e con una lunga esposizione riuscì a cogliere dettagliatamente le fonti luminose provenienti da quella zona di spazio.

Il momento topico avvenne nella notte tra il 5 e il 6 di ottobre. Hubble con un’esposizione di circa 45 minuti impresse tre stelle sulla **lastra H335H**, dove la prima H sta per Hooker e la seconda per Hubble, segnate in nero e con a fianco la lettera N di Novae (figura 4.2).

Come spiegato in precedenza la nova è un fenomeno transitorio in una stella, che aumenta la sua luminosità per poi tornare com’era in precedenza allo stato iniziale, ciò che rese celebre tale lastra fu che una delle 3 individuate in realtà, dopo un’attenta osservazione, aveva una caratteristica differente dalle altre, era presente in lastre impresse nei giorni precedenti, nello specifico in H331H del giorno prima e addirittura in lastre in archivio fino al 1909.

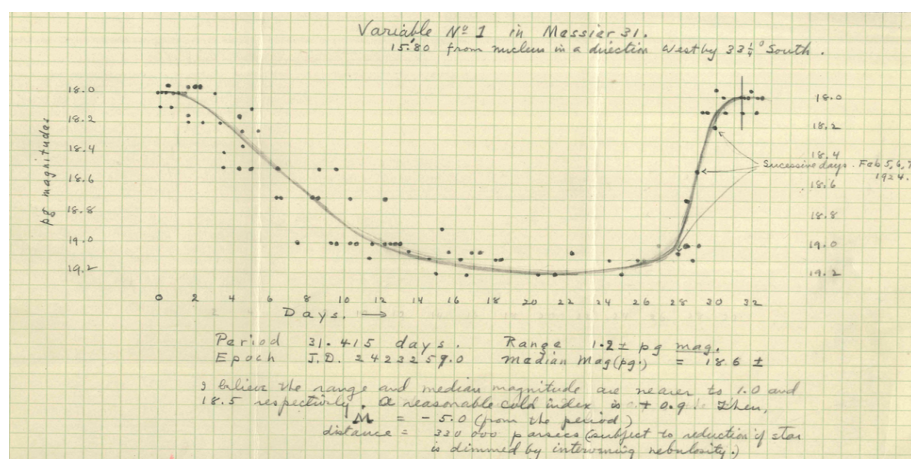


Figura 4.3: Curva di luce tracciata a mano da Hubble della Cefeide M31-V1 nel 1924; sul foglio sono appuntati i dati fondamentali per calcolarne la distanza dalla Terra; credits: Archivi universitari di Harvard.

Il significato di questo ritrovamento era estremamente rilevante, una fluttuazione in luminosità periodica, e non isolata, implicava che tale stella non fosse una nova, bensì una Cefeide, da cui, se si fosse calcolato il periodo e la magnitudine apparente media, si sarebbe potuto dedurre, applicando la formula inversa¹⁸ dell'equazione 1, la distanza da Terra e risolvere così, il mistero delle nebulose a spirale.

Ciò che Hubble fece successivamente quindi, fu determinare, tramite nuove osservazioni, la magnitudine e con i dati ottenuti produsse quella che è la curva di luce caratteristica di una Cefeide, in figura 4.3.

In essa sono facilmente leggibili i risultati ottenuti, un periodo di 31.41 giorni e una magnitudine apparente media pari a 18,6; inoltre, dal periodo calcolò una magnitudine assoluta per M31-V1 pari a -5.0.

Un valore calcolato così alto, poteva solo essere indice del fatto che, la nebulosa M31 fosse in realtà una galassia a sè stante, lontana dalla Terra circa 1 milione di anni luce,

¹⁸La formula inversa usata era ottenuta, partendo da:

$$m - M = 5 \log_{10}(d) - 5 \quad (2)$$

ricavando così la distanza (d) in parsec:

$$d = 10^{\left(\frac{m-M+5}{5}\right)} \text{ pc} \quad (3)$$

misura comunque sottostimata rispetto a quella attuale, pari a 2.5 milioni di anni luce. Tale errore, simile a quello fatto da Shapley nella stima delle dimensioni della Via Lattea è dovuto proprio alla calibrazione errata della relazione P-L che Henrietta Swan Lewitt aveva dedotto anni prima¹⁹.

Fatte queste deduzioni, come anticipato, egli continuò incessantemente il lavoro, espandendo la ricerca di Cefeidi anche alla galassia M33 o galassia del triangolo, e in NGC 6822 o galassia di Barnard, applicando in entrambe la stessa metodologia ebbe un riscontro positivo, calcolando distanze incompatibili con la collocazione interna alla Via Lattea come descritto nell'articolo [10] del 1925.

Risorse così il mistero della natura della nostra galassia, e un fatto storico curioso, è che uno tra i primi a conoscere il responso di tali ricerche fu proprio il co-protagonista della vicenda, Shapley, a cui Hubble, comunicò la smentita della teoria tramite una corrispondenza privata alla fine del 1924 [9].

Nonostante avesse cambiato decisamente la visione dell'uomo sul cosmo, facendo riformulare l'idea stessa di nebulosa nel più moderno concetto di **galassia**, Hubble non limitò la sua curiosità, ma la indirizzò sullo studio della morfologia delle galassie con l'articolo del 1926 "*Extragalactic nebulae*" [11].

Come ben descritto nel testo, Hubble, dedicandosi allo studio sistematico di centinaia di altre nebulose a spirale, introduce una **classificazione morfologica rigorosa delle galassie**.

Le distinse, esclusivamente secondo caratteristiche osservabili tramite lastre fotografiche di cui si hanno esempi in figure 4.4 e 4.5, in 4 macro famiglie:

- *Ellittiche (EO-E7)*, prive di struttura spiraliforme e apparenti con diversa ellitticità;
- *Spirali normali (Sa, Sb, Sc)*, con bracci ben delineati e nuclei centrali di varia compattezza;

¹⁹L'errore in calibrazione era dovuto al fatto che, se si crede che una Cefeide sia più luminosa di quanto lo sia realmente ovvero sovrastimando la magnitudine assoluta M , misurando la sua magnitudine apparente e applicando la formula nella nota precedente, ciò che si ottiene è un modulo della distanza, $m-M$ alto, e calcolando la distanza si trova che sia sovrastimata (come per Shapley). Il problema che rese la misura di Hubble sottostimata fu dovuto alla combinazione di più sviste: lo scambio, nella calibrazione, tra cefeidi di tipo II con quelle più luminose di tipo I e la mancata correzione dell'estinzione stellare, seppur essi portano a risultati opposti, il primo effetto dominò sul secondo e produsse la sottostima nota.

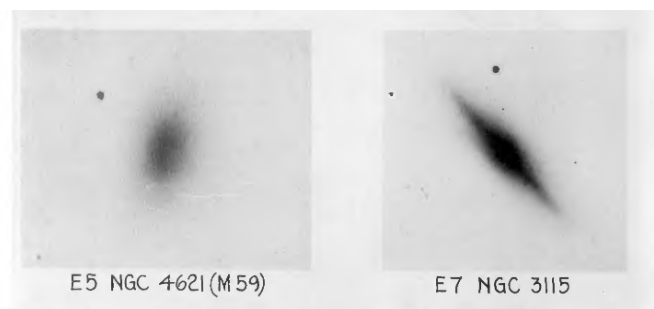


Figura 4.4: Due lastre fotografiche di galassie ellittiche, credits: [11].

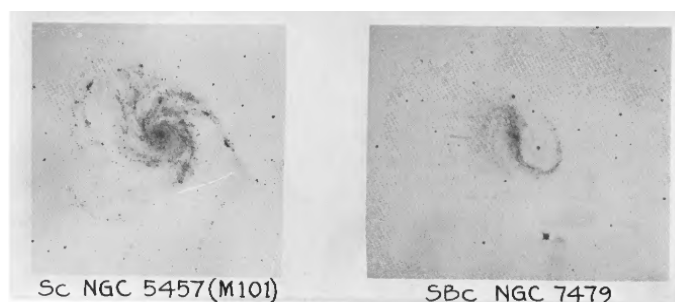


Figura 4.5: Due lastre fotografiche di galassie a spirale, credits: [11].

- *Spirali barrate* (*SBa*, *SBb*, *SBc*), con una barra luminosa centrale da cui si dipartono i bracci;
- *Irregolari* (*Irr*), prive di simmetria o struttura regolare.

Oltre alla classificazione, visibile nel suo complesso in figura 4.6, quantificò parametri fondamentali come distribuzione spaziale, densità e luminosità delle galassie osservate e dopo averne registrato un alto numero, stabilì inoltre, che la distribuzione nel cielo di tali oggetti extragalattici fosse **isotropa**, allontanando finalmente la concezione che la nostra galassia occupasse una situazione centrale nell'universo.

Nel 1929 completò le sue ricerche pubblicando un nuovo articolo, "*A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*" [12], definito uno dei più importanti e rivoluzionari del tempo.

Nel suo scritto determinò e descrisse la legge empirica che regola la velocità di allontanamento delle galassie dall'osservatore; formula che, nella determinazione e discussione dei suoi parametri, senza saperlo dà l'inizio un nuovo dibattito sulle galassie, defini-

bile come la prosecuzione di quello del 1920 (visto che, la risoluzione di tale problema, porterebbe con sé un nuovo punto di svolta nella cosmologia moderna).

A differenza di quello del passato incentrato sulla ricerca dei valori rappresentanti la dimensione della galassia, il dibattito moderno si focalizza sul problema scientifico definito come **la tensione di Hubble**, i cui dettagli saranno dati nel paragrafo 4.4.

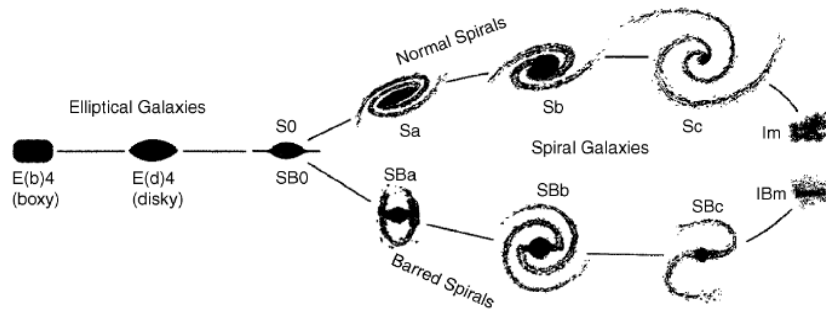


Figura 4.6: Classificazione morfologica delle galassie costruita da Hubble, meglio nota come 'La forchetta di Hubble, credits: [22].

4.3 Reazioni alla scoperta

Tornando ai tempi che furono, le scoperte di Hubble tra il 1923 ed il 1930 provocarono un profondo riassetto nella visione del cosmo all'interno della comunità scientifica; come anticipato, con i primi due articoli ([10] e [11]) andò a risolvere il dubbio, centro del dibattito tra Curtis e Shapley. Proprio a quest'ultimo è infatti attribuita la frase [9]:

"This destroys my universe"

riferendosi appunto, a come le novità furono strumento di *rottura epistemologica* dal punto di vista concettuale e interpretativo nell'idea di universo.

Ma non solo, i dati e le novità proposte da Hubble furono usate anche come mezzo di conferma per teorie precedentemente pensate da altri scienziati: ad esempio quelle di K. Lundmark e C. Wirtz che avevano tentato di interpretare in chiave "dinamica" le osservazioni colte dagli spettri di nebulose a spirale.

Il primo in particolare, già nel 1921, affermò nel suo articolo [7] una tale domanda:

“Un'altra questione è: dato che l'unica differenza tra le fenditure in Messier 33 e quelle nella Via Lattea sembra essere che le prime abbiano dimensioni pari a circa 1/100 di quelle della Via Lattea, ciò significa che gli oggetti nella spirale si trovano a distanze 100 volte maggiori rispetto agli oggetti corrispondenti nella nostra Galassia?”

quasi anticipando la soluzione data da Hubble²⁰.

Il secondo analizzando le misurazioni spettroscopiche disponibili all'epoca, in particolare i redshift ottenuti da Vesto Slipher, notò che le galassie con diametri apparenti più piccoli, e quindi presumibilmente più lontane, mostravano tendenzialmente spostamenti verso il rosso maggiori.

Nell'articolo pubblicato nel 1922 [8], suggerì che queste osservazioni potessero essere interpretate come indicazione di una velocità di allontanamento crescente con la distanza, idea qualitativamente interpretabile come un'anticipazione della legge di Hubble del 1929.

Oltre, quindi, a essere mezzo di conferma, l'idea proposta da Hubble che giustifica un universo “dinamico” e non più statico porta negli anni '30, molti altri scienziati a lavorare sul tema, citandone brevemente alcuni: Allan Sandage, successore di Hubble all'osservatorio di Mount Wilson continuò a perfezionare il valore della costante H_0 , spiegata nella nota 13; altri come Eddington, de Sitter e Lemaitre, lavorarono approfondendo le implicazioni teoriche di un universo non statico, gettando le basi per quella che sarà la teoria del Big Bang.

Con Hubble, quindi, non solo si ha un ampliamento della scala cosmica e una riformulazione dell'idea di universo, da eterno e immutabile a dinamico ed in continua evoluzione, ma anche una totale *rivoluzione scientifica*, in cui la comunità ridefinisce i confini del sapere scientifico e tenta di formulare leggi fisiche accessibili per quantificare questo progresso verso le profondità cosmiche.

4.4 La moderna cosmologia

Come spiegato in precedenza, con Hubble e la sua legge del 1929, vi è la definitiva accettazione della natura extragalattica delle nebulose e con essa un nuovo capitolo nel gran-

²⁰Approfondimenti in <https://arijmaki.wordpress.com/2009/11/21/knut-lundmark-extragalactic-distance-scale/>

de libro della *cosmologia*: un paradigma basato sull'interpretazione dei redshift galattici come effetto dell'espansione dell'universo, una nuova prospettiva, totalmente inedita che nonostante chiarisca alcuni dubbi, ne solleva molti altri anche più problematici dei precedenti.

Come Kuhn racconta, con un nuovo paradigma si ha la nascita di nuove branche della fisica, e proprio seguendo queste parole, la cosmologia post rivoluzione Hubbleana si emancipa dall'astronomia osservativa tradizionale, diventando sempre più una disciplina teorica interconnessa a stretto giro con la relatività generale di Einstein, sviluppata sempre agli inizi del 1900.

La "semplice" legge espressa in '*A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*' ([12]) viene reinterpretata considerando le soluzioni cosmologiche dell'equazione di campo ideata da Einstein, dando vita alla metrica nota oggi come: **metrica FLRW** (da Friedmann, Lemaitre, Robertson e Walker) che descrive un universo omogeneo e isotropo in espansione continua.

Teoria e osservazione all'unisono rendono ancora più approfondito e complesso il paradigma cosmologico, andando a confluire nel dopoguerra nell'idea che tutto fosse stato generato dal Big Bang.

Stabilito un nuovo momento di scienza normale, il processo di ricerca e approfondimento continuò in maniera incessante. Ad oggi il paradigma fondante della cosmologia è quello detto paradigma Λ CDM (Lambda-Cold Dark Matter) che spiega, o almeno tenta di farlo, sia l'espansione, sia i nuovi concetti di energia e materia oscura introdotti tra anni '90 e 2000 [28].

Tale modello, raffinato sia nella teoria sia nell'osservazione, come per ogni processo storico scientifico, mostra tuttavia anch'esso delle anomalie: la più nota è la **tensione di Hubble**.

Con *tensione di Hubble* si intende la discrepanza tra le varie misurazioni della costante H_0 su diverse sorgenti, di cui, le più considerate sono state ottenute da Supernovae di tipo Ia e dalla misurazione della CMB, o radiazione di fondo cosmico.

Il primo, più diretto, metodo è basato sull'uso di Cefeidi e supernovae di tipo Ia come candele standard, per mezzo della loro luminosità intrinseca.

Le Cefeidi consentono infatti di calibrare la luminosità delle supernovae Ia nelle galassie relativamente vicine e una volta fatto ciò, queste ultime possono essere osservate a

distanze molto maggiori, permettendo così di inferire il valore di H_0 , usando la relazione tra distanza e redshift.

Con questa metodologia, detta *distance ladder*, si è “trovato” un valore pari a circa 73 km/s/Mpc (da [32]).

Il secondo metodo, indiretto, sfrutta i dati sulle anisotropie²¹ della CMB ottenuti dal satellite PLANK.

Fittando i dati ottenuti dei parametri del modello cosmologico Λ CMD, si deduce il valore di H_0 pari a circa 67,5 km/s/Mpc (da [30]), decisamente più basso di quello localmente calcolato.

Attualmente la discrepanza risulta essere di circa 5,6 km/s/Mpc, ben oltre i 5σ , statisticamente accettati per la compatibilità di due valori.

Questa tensione è alla base delle ricerche della comunità scientifica, bramosa di comprendere se ci sia o meno il bisogno di rielaborare il paradigma attuale per cercare una nuova fisica.

Ma non solo, se ne possono citare altre ancora come, senza entrare nei dettagli tecnici: la natura e la composizione di energia e materia oscura, l'origine dell'inflazione cosmica e la questione dell'asimmetria barionica (questioni approfondibili in [25]).

Studiandole notiamo come, nonostante la scienza diventi progressivamente più matura, capace di elaborare calcoli di complessità inimmaginabile e in grado di costruire strumentazioni più potenti e accurate, essa porti con sé elementi che possono diventare fonte di forte crisi.

Sebbene sconveniente in apparenza, il fatto stesso di trascinarsi dietro tali anomalie è giustificato durante la ricerca scientifica dalla natura stessa della conoscenza, intesa da Kuhn come una lenta stratificazione di fallimenti e successi.

Questo ragionamento porta a far comprendere che, seppur superato storicamente, il Dibattito del 1920 e il modello storiografico che esso rappresenta, è utile per capire appieno il presente e, forse, per anticipare il futuro della scienza.

²¹Le **anisotropie della radiazione cosmica di fondo** sono minime variazioni di temperatura e densità osservate nello spettro della CMB. Esse rappresentano le basi delle future strutture cosmiche, come galassie e ammassi, e forniscono informazioni fondamentali sulla composizione, l'espansione e l'evoluzione dell'Universo.

5 Il Dibattito agli occhi di Thomas S. Kuhn

Dopo aver connesso all'interno del capitolo 3 e del capitolo 4 la storia, la scienza dietro al dibattito e la soluzione portata da Hubble, bisogna proseguire il processo fondendo il tutto con i principi filosofici Kuhniani.

In questo capitolo verranno quindi, collegati gli eventi accaduti tra 1915 e 1929 alle le fasi di cambio di paradigma e rivoluzione scientifica, analizzati in dettaglio nel capitolo 1 e più approfonditamente definiti nel suo saggio [23] da Thomas S. Kuhn.

Ciò che verrà evidenziato è come la visione del filosofo sia estremamente compatibile con il l'ordine degli eventi accaduti negli anni pre e post Dibattito, e come tale Dibattito storico possa essere portato come prova della validità della modello epistemologico del filosofo americano.

5.1 Fase pre-paradigmatica

Nel modello epistemologico kuhniano, la fase pre-paradigmatica è, come anticipato nel capitolo 1, quella in cui una disciplina scientifica, pur esistendo come ambito di indagine, non ha ancora raggiunto l'unità del proprio quadro teorico e la comunione di tutte le pratiche di ricerca; non è ancora presente un paradigma che domina su tutte le scuole di pensiero, ma una molteplicità di approcci e visioni contrastanti, ciascuno dei quali con i propri metodi, criteri di valutazione e concetti di base.

Per delineare una fase di tal genere nel contesto della cosmologia osservativa di fine ottocento e dei primi due decenni del secolo successivo, bisogna tenere a mente le parole di Kuhn:

"In assenza di un paradigma condiviso, tutti i fatti che potrebbero interessare la scienza sono ugualmente rilevanti; il risultato è una scienza disorganizzata, in cui ogni ricercatore tenta di definire da sé il campo, i problemi e i metodi più appropriati."

Applicandole al contesto astronomico, si comprende come la comunità scientifica, pur essendo dotata di strumenti sempre più avanzati e tecnologie innovative, fosse caratterizzata dal non raggiungimento un quadro concettuale unificato su struttura e dimensioni dell'universo.

Un esempio di tale mancanza si ritrova nello studio delle nebulose a spirale, osservate e catalogate dagli Herschel, Messier e Lord Rosse con il Leviatano (capitolo 2). Tali nebulose erano oggetto di ipotesi contrastanti e divergenti: una parte della comunità scientifica le reputava ammassi gassosi o luogo di formazione stellare incluse nella Via Lattea; altri invece già le rappresentavano come Universi-isola autonomi dal nostro. Non solo la natura di oggetti celesti, come le nebulose, era fonte di dubbio, ma gli stessi metodi per determinarne distanze e proprietà erano fonte di dibattito: alcuni scienziati preferivano metodi geometrici come quello parallattico, che però era di difficile applicazione, se non impossibile da applicare a corpi lontani, altri invece davano fiducia a statistica e spettroscopia, considerando valide prove, ad esempio, gli studi sulle velocità radiali di Slipher e le varie stime delle magnitudini. Conseguenza di ciò è la creazione di una moltitudine di metodologie di analisi scollegate fra loro, con risultati spesso spesso contraddittori.

Come il filosofo americano afferma:

“Durante la fase pre-paradigmatica di un campo, ogni scuola tenta di mostrare la superiorità della propria concezione della natura su quella dei concorrenti.”

Tali parole sono specchio della situazione corrente nei primi decenni del 1900, periodo di pura coesistenza di modelli radicalmente diversi, da quello più piccolo di Kapteyn (spiegato in 2.4) ellissoidale e privo di strutture comparabili a quello più 'esteso' di astronomi come Lundmark o Wirtz, citati nel capitolo 4.3, che pensavano le nebulose come oggetti esterni anche se non giustificando le idee con prove osservative certificate.

Altro elemento che categorizza questo periodo come fase pre-paradigmatica è intrinseco nella natura della cosmologia del periodo. Essa infatti non aveva ancora assunto lo status di branca fisica autonoma, i vari quesiti rientravano all'interno di varie discipline dalla meccanica celeste all'astronomia stellare e ancora non si era pensata e formata una comunità unica che pensasse ai problemi specifici della disciplina, (i cosiddetti "rompicapi Kuhniani") o che formasse un linguaggio tecnico condiviso o anche che pubblicasse riviste specializzate; sintomo di ciò era la grande frammentazione delle ricerche.

Questa fase si concluderà solo con l'opera di Harlow Shapley che, con il suo metodo basato sullo studio di Cefeidi applicate agli ammassi stellari portò all'emergere di un primo

paradigma coerente raccolto in una singola disciplina, quella della *cosmologia galatto-centrica*: il suo modello è basato su dati sistematici, analizzati con una metodologia che ben definiva la struttura dell'universo, ponendo il Sole decentrato in una galassia di estreme dimensioni. Tale paradigma rappresenterà a pieno quello della scienza normale andando a surclassare gli altri in autorevolezza.

Fondamentale è comprendere come tale fase, seppur possa sembrare confusionaria, sia invece estremamente significativa; mostra infatti, come il sapere scientifico non nasca né lineare né ben strutturato, ma come un processo frammentato colmo di incertezze concettuali e metodologiche, fino a quando un paradigma non riesca a trovare la via giusta per unificare le voci all'interno della polifonia.

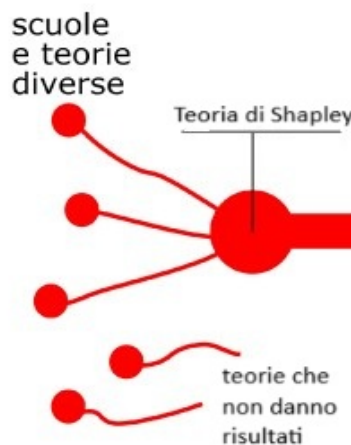


Figura 5.1: Visione schematica dell'evoluzione del paradigma, da molteplici opinioni a quella più supportata di Shapley, adattata da [27].

5.2 La scienza normale di Shapley

Come detto nel paragrafo precedente, la fase pre-paradigmatica si conclude con l'affermazione su tutti di un paradigma specifico che assume la posizione dominante e dà la base per il periodo di scienza normale.

Di tale processo viene presentata una rappresentazione schematica in figura 5.1, adattata a sua volta da fig. 1.2 tratta da [27], ed è intuitivamente riconoscibile nella la teoria di Shapley del primo ventennio del 900.

Con la vittoria di un paradigma su gli altri si entra nella fase di scienza normale, fase più lunga nello schema Kuhniano, di ogni tradizione scientifica matura. In essa gli scienziati appartenenti alla comunità incentrata sul paradigma si adoperano, *"presumendo che la comunità scientifica sappia com'è fatto il mondo"*, a estendere e raffinare i risultati ottenuti all'interno del paradigma dominante; ovvero assumono il compito di risolutori di rompicapi ben definiti di cui migliorare la conoscenza, la precisione e la coerenza rispetto alla teoria accettata.

Se si entra nel dettaglio del Dibattito cosmologico del 1920, la posizione di Shapley, ampiamente descritta nel capitolo 3, si colloca pienamente all'interno della fase di scienza normale.

Infatti, ciò che propose e difese nel resoconto del Dibattito [5] era incentrato sul paradigma di galassia al centro di tutto: un'idea di intero universo contenuto nella Via Lattea, vista come un'enorme struttura ellissoidale popolata da stelle, ammassi globulari e nebulose ed in cui il Sole, collocato perifericamente in direzione del Sagittario, era simbolo metaforico di rottura col passato (inteso come rottura dalla concezione newtoniano-tolemaica con il sistema solare al centro).

Rispettando le parole kuhniane, per cui durante la scienza normale:

"si mira ad ampliare l'ampiezza e la precisione con cui i fatti corrispondono alle previsioni della teoria",

Shapley riprese i concetti tramandati dai precedenti astronomi andando, secondo la sua opinione, a limarli e raffinarli. Testimonianza di ciò è, ad esempio, l'uso alternativo della relazione periodo-luminosità e la determinazione della distribuzione degli ammassi globulari, che rispecchiano appieno le attività fondanti della scienza normale: perfezionamento, estensione, applicazione di metodi esistenti ai nuovi dati osservativi. Entrando più nel dettaglio, per Shapley, le nebulose a spirale non erano viste come oggetti estranei al paradigma, fonti di problemi, ma venivano interpretate come elementi galattici, la cui classificazione, posizione e velocità erano fenomenologie spiegabili o da spiegare secondo il linguaggio e le strutture concettuali del paradigma vigente. Com'è riportato nel saggio Kuhniano, inoltre:

"il lavoro degli scienziati è quasi interamente rivolto all'interno del paradigma, alla soluzione di enigmi che esso stesso rende possibili"

che tuttavia, più spesso di quanto si possa pensare, portava anche ad una considerazione sbagliata di ogni anomalia, ogni deviazione dai dati che venivano considerate temporane o dovute ad errori sperimentali.

Una dinamica di questo genere era sintomo di resistenza epistemica al cambiamento, i dati discordanti dalla teoria della scienza normale non erano interpretati come possibile segno di cedimento del paradigma, ma corretti localmente tramite ipotesi forzate e spesso ad hoc (nel dibattito i dati misurati da Slipher vengono reputati da Shapley come semplici indicatori di fenomeni galattici locali), o come meglio spiegato:

“i dati che contraddicono le attese non vengono abbandonati, bensì reinterpretati alla luce della teoria dominante”.

Tutto questo finto senso di certezza e sicurezza, viene meno quando, altri scienziati provenienti da altre scuole, riprendono in mano le anomalie non risolvibili, notando come esse, se osservate nel complesso, si andassero ad accumulare, a tal punto da dover dare loro un peso specifico maggiore e invertendo così, il senso di marcia nella ricerca dato dal paradigma dominante.

5.3 Le anomalie di Curtis

Come detto in precedenza, la fase di scienza normale può venir compromessa da osservazioni che il paradigma dominante non riesce a spiegare in modo soddisfacente e questi casi, come anticipato nel capitolo 1 vengono chiamati anomalie, schematicamente raffigurate in figura 5.2.

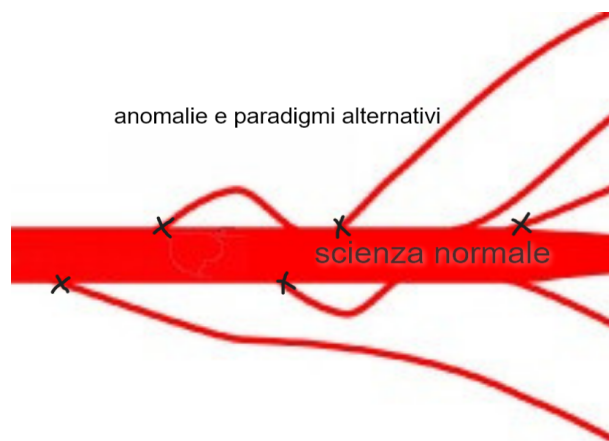


Figura 5.2: Visione schematica dell'evoluzione del paradigma, si nota come da alcune anomalie (croci in nero) nel flusso della scienza normale, partano nuovi percorsi che possono generare una crisi e poi una rivoluzione scientifica, adattata da [27].

Ciò che differenzia questa fase dalla prossima (di vera e propria crisi) è che tali punti di contrasto non vengono né immediatamente riconosciuti, né immediatamente risolti, ma la loro permanenza darà la spinta verso il nuovo paradigma, come afferma Kuhn infatti:

“una nuova teoria [...] emerge soltanto dopo una lunga fase di crescente insoddisfazione per il modo in cui il paradigma gestisce certi problemi”.

Se si prova a collocare all'interno del panorama cosmologico e nello specifico del Dibattito queste caratteristiche, la prima manifestazione di esse che viene in mente è la posizione di Heber Curtis; essa seppur non potesse essere considerata come una teoria alternativa completamente sviluppata, pronta a sostituire quella galattocentrica, come espresso nel paragrafo 3.2, è sicuramente un punto di partenza ben consolidato che andava a mostrare i limiti esplicativi e anche predittivi della teoria dominante, seppur non confutandola.

Delle varie anomalie, almeno due sono estremamente rilevanti per rievocare questo malcontento verso la teoria Shapleyana: il primo è sicuramente la distribuzione spaziale delle nebulose a spirale, che essendo isotropa sulla sfera celeste e non concentrata sul piano galattico risultava difficile da spiegare, se non considerando le nebulose come sistemi analoghi alla Via Lattea ma esterni ad essa, e perciò opposto all'idea del paradigma dominante.

Secondo punto critico esposto da Curtis fu la misurazione da parte di Slipher di velocità radiali estremamente alte; oggetti aventi velocità anche superiori a 500 km/s non potevano essere considerati vincolati gravitazionalmente alla Via Lattea, se non forzando la mano e considerandoli, in assenza di un chiaro quadro interpretativo, come anomalie trascurabili.

Oltre a queste due più di concetto, Curtis fece anche una critica metodologica sull'uso delle cefeidi negli ammassi.

Sottolineando la scarsità di materiale analizzato (solo 11 cefeidi erano il campione preso in considerazione da Shapley), rende evidenti i limiti epistemici del paradigma e la tensione che tali segni di indebolimento portano con sé.

Nella trascrizione del dibattito ([5]) si possono trovare ulteriori anomalie che come suggerisce il filosofo statunitense in [23]:

“esse (le anomalie) aumentano finché il paradigma esistente non riesce più a sostenere le pressioni che vi si esercitano”.

Tuttavia, nonostante queste, Curtis preferisce evitare la formulazione rigorosa della nuova teoria: i suoi universi isola, prima dell'avvento di Hubble, sono deduzioni rivoluzionarie, ma scarsamente supportate osservativamente.

Tale mancanza di chiarezza è il punto chiave nel passaggio dalla scienza normale alla crisi, è infatti difficile scorgere nel nuovo paradigma un'effettiva soluzione ai problemi aperti, finché il precedente continua ad esistere.

Curtis quindi, se fosse stato analizzato da Thomas Kuhn, sarebbe stato categorizzato come una figura di mezzo, che si muove ancora nel panorama della scienza normale ma che genera piccole crepe; fratture che verranno sfruttate da Hubble, come si vedrà nel seguente paragrafo, per la rivoluzione del sapere, vista come, riportando un passo del saggio ([23]):

“non una semplice revisione, ma la fine di un paradigma e la nascita di uno nuovo.”

5.4 Il nuovo paradigma di Hubble

Si è infine arrivati all'ultima fase del modello di rivoluzione scientifica di Kuhn, schematicamente riassunta nell'immagine 5.3.

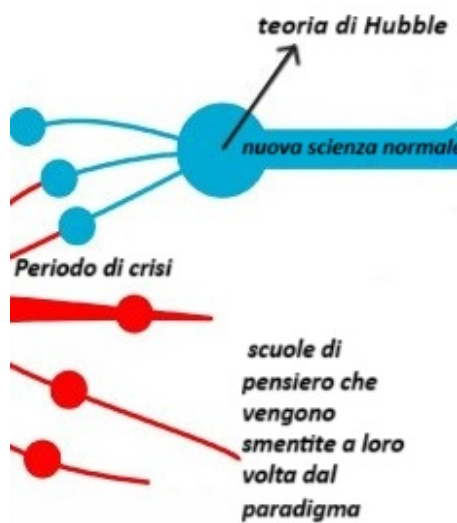


Figura 5.3: Visione schematica dell'evoluzione del paradigma, dalle anomalie alla rivoluzione scientifica, adattata da [27].

In questa vi è il passaggio dal numero crescente di anomalie, che scalfiscono la capacità esplicativa del paradigma dominante, alla crisi totale di questo e al seguente instaurarsi del nuovo modo di vedere la scienza.

Seppure possa sembrare idealmente un processo rapido, in realtà l'instabilità generata dalle anomalie può protrarsi per molti anni, durante i quali varie teorie alternative provano a decifrare e spiegare coerentemente ciò che il vecchio schema non riusciva più a comprendere, fino a quando una di esse prevarrà sulle altre formando la base per il nuovo paradigma.

Ritornando al caso specifico in esame, nel paragrafo precedente si è descritto, per la cosmologia del primo 900, un buon numero di anomalie sperimentali e metodologiche che, nel periodo tra il 1920 (anno del Grande Dibattito) e 1924 (anno della scoperta rivoluzionaria di Hubble), hanno messo in luce i limiti del paradigma Shapleyano, rendendo naturale il passaggio successivo nella sequenza delle fasi di cambio di paradigma.

La crisi generata da Curtis, infatti, assume dal 1924, con i contributi di Edwin Hubble la caratterizzazione di rivoluzione, un cambiamento che non ridefinisce solo le risposte, ma le stesse domande considerate scientifiche; prima con l'articolo del 1925 e poi con il successivo del 1929, viene affermata una nuova cosmologia, dove l'universo è: in

espansione, dinamico e composto da miliardi di galassie; in cui la staticità e finitezza spaziale si perdono del tutto.

Il cambiamento, come anche in altre rivoluzioni scientifiche non è solo teorico ma anche linguistico e percettivo: le nebulose non furono più considerate oggetti da classificare all'interno della Galassia, ma elementi indipendenti da scoprire, fondando su di esse nuove branche scientifiche; le velocità radiali da anomalie inspiegabili divennero prove dell'espansione del cosmo.

In questo passaggio della filosofia Kuhniana, quindi, non varia solo il sapere ma anche chi lo genera e usa. La comunità scientifica infatti attraversa un processo di trasformazione totale: i vecchi strumenti perdono centralità, nuovi metodi si impongono e l'educazione scientifica, dai manuali alle metodologie, viene riorganizzata attorno alla nuova cornice teorica. Per Kuhn infatti:

“La scienza normale che segue una rivoluzione si basa sul nuovo paradigma, che reimpone l'unità della scienza”.

Tramite questi passaggi, quindi, si insedia negli anni '30, il nuovo paradigma extragalattico: i telescopi vengono orientati alla mappatura delle galassie, le velocità radiali sono fonti di informazioni sulla loro dinamica e lo spazio cosmico infinito diventa uno scenario in continua evoluzione.

La rivoluzione, oltre che puramente scientifica, è storica e filosofica; un cambiamento culturale che porta con sé, in realtà, un cambiamento globale della società nel suo rapportarsi alla conoscenza.

Conclusioni

Il percorso sviluppato in questa tesi ha avuto come obiettivo l'analisi del Grande Dibattito tra Harlow Shapley e Heber Curtis, svoltosi nel 1920 sotto l'egida del National Research Council, non solo come confronto di due opinioni scientifiche e astronomiche differenti, ma come un vero e proprio caso epistemologico paradigmatico, interpretabile alla luce del modello proposto da Thomas Kuhn ne *“La struttura delle rivoluzioni scientifiche”*.

Una tale natura ibrida del punto di vista di osservazione della questione, ha permesso, sia di evidenziare il rigore scientifico e importanza storica delle posizioni assunte dai due scienziati protagonisti, sia di collocare l'evento e i successivi sviluppi all'interno di una riflessione più estesa sullo sviluppo della conoscenza e sul suo carattere rivoluzionario. Per definire questa idea, nel capitolo 1 si è data, prima, una panoramica della filosofia di Thomas Kuhn, base della “griglia epistemologica” sfruttata per l'analisi; poi, nel capitolo 2, una ricostruzione storica del contesto scientifico antecedente al dibattito, in tutta la sua eterogeneità, privo di un paradigma condiviso.

Dal percorso attraverso le diverse teorie è emerso il carattere dell'astronomia osservativa (e successivamente della cosmologia) a cavallo tra Ottocento e Novecento legato ad ipotesi speculative (come la uniformità statistica stellare e la mancanza di assorbimento per Kapteyn), limiti osservativi (dettati da un progresso della tecnologia non coincidente con quello scientifico) e tensioni teoriche irrisolvibili (come la discussa questione universo finito o infinito).

Tutte caratteristiche tipiche della fase *pre-paradigmatica* kuhniana, in cui centrale era l'attesa di una scuola dominante in grado di riunire, o cancellare, tutte le idee sotto un'unica ala.

Avanzando cronologicamente, sono state descritte le posizioni dei due co-protagonisti del Dibattito: **Shapley**, la cui attitudine incarnava a pieno i tratti distintivi della *scienza normale* Kuhniana (paradigma galattocentrico, uso esteso delle Cefeidi ed universo coincidente con la Via Lattea); **Curtis**, individuato come agente di disturbo del paradigma, in grado di sollevare *anomalie rilevanti* (isotropia nella distribuzione delle nebulose, la presenza di novae e l'errata interpretazione delle velocità radiali delle nebulose a spirale), pur non avanzando una teoria compiuta alternativa.

L'analisi del resoconto del Grande Dibattito, supportata da riferimenti da me tradotti in italiano nelle citazioni presenti in questo lavoro, ha mostrato come tale tensione crescente non è solo simbolo di crisi dell'astronomia, ma è indice di un dislivello epistemico profondo: a calcoli precisi, metodi apparentemente senza punti ciechi e una forte coerenza interna nella posizione di Shapley, si oppone un linguaggio più esplorativo e aperto all'incompletezza di Curtis, in una asimmetria che all'inizio darà ragione a Shapley, ma che, a lungo termine, sarà la base per la rivoluzione portata da Hubble. Proprio quest'ultimo sarà il riformatore della disciplina, qualificabile forse come il fondatore di essa, che grazie alle scoperte delle Cefeidi in M31 nel 1924 e alla formulazione della legge di espansione dell'universo, nel noto articolo del 1929, darà il colpo finale al paradigma galatto-centrico compiendo la vera *rivoluzione scientifica* come pensata da Thomas Kuhn.

Alla luce dei concetti espressi nel saggio del filosofo della fisica statunitense, si può considerare il Dibattito del 1920 come la soglia tra due epoche della cosmologia; passaggio che non è solo concettuale ma riguardante tutte le dimensioni della conoscenza e che porta con sé una riconfigurazione:

- *dell'intera pratica scientifica*: la comprensione della natura a più galassie del cosmo, portò la necessità della nascita di una branca specifica, distinguendo i cosmologi dagli altri astronomi osservativi, e portò con sé la necessità di revisionare l'idea di distanza cosmica, essendosi aperto all'uomo un panorama inatteso e sconosciuto;
- *dei metodi di osservazione*: dopo il dibattito iniziò un uso sistematico della spettroscopia e del redshift come metodo di osservazione, che culminò nel 1929 con la Legge di Hubble;
- *della formazione dei nuovi scienziati*: non bastava più osservare. ma i nuovi astronomi dovevano sviluppare la capacità di interpretare a fondo ciò che le nuove informazioni sulle galassie portavano;
- *della struttura istituzionale della scienza* seppur in maniera meno evidente delle altre, la ricerca si stava man mano istituzionalizzando, si iniziarono a formare collaborazioni internazionali, tra cui nel 1919 l'Unione Astronomica Internazionale, che crebbe progressivamente di importanza.

La tesi ha inoltre mostrato che il paradigma extragalattico nato con Hubble non è un punto di arrivo definitivo, ma, come per tutti i modelli storici-scientifici incorre nel tempo in nuove anomalie, diventate negli ultimi anni molto rilevanti.

Fra di esse, si è scelto di citare *la tensione di Hubble*, uno dei problemi cardine della cosmologia moderna e possibile rappresentante di un'incombente nuova crisi per il paradigma attuale (modello Λ CDM).

Sebbene non si possa parlare già di rivoluzione, approfondendo la questione, si possono osservare in essa *i segni distintivi* che in passato hanno contraddistinto e preceduto proprio *la fase di crisi*, sottolineando ancor di più, la fondamentale importanza del lavoro svolto sul Grande Dibattito, nel ruolo di riferimento per l'interpretazione delle novità che la ricerca scientifica porta con sé.

Si è tentato all'interno di questo lavoro, specificatamente nel capitolo 5, di non limitare lo studio ad una prospettiva puramente storica o scientifica, ma si è voluto a mostrare come la filosofia della scienza, nello specifico della fisica, offra strumenti estremamente adatti alla comprensione della dinamica della conoscenza scientifica, e possa fungere da collante tra le due discipline (storia e scienza).

La lente kuhniana scelta è una possibile base per l'interpretazione di eventi, scelte teoriche e pratiche osservative non solo come semplici dati cronologici, ma come stratificate fasi di uno sviluppo cognitivo regolamentato; processo che ha insito in sé la natura del mutamento scientifico: non banale, non attribuibile al singolo e non lineare ma storicamente situato, fusione di una moltitudine di contributi.

In definitiva, ciò che si è tentato di far trasparire è come riconsiderando storicamente e filosoficamente i dibattiti del passato è possibile leggere la scienza non come una semplice somma di scoperte, ma come un susseguirsi di visioni del mondo in conflitto, in crisi e in trasformazione, pronte a dare una nuova prospettiva, applicabile alla quotidianità scientifica e al futuro che attende l'umanità.

Ringraziamenti

Addio, miei faticosi anni universitari.

La mia opera è terminata.

Qui, infine, sulle rive del mare, si scioglie la nostra Compagnia.

Non vi dirò "Non piangete", perché non tutte le lacrime sono un male.

*Ma continuate a osservare, come, seppur passati, sarete sempre indelebili nella mia
lunga e prosperosa vita.*

Riferimenti bibliografici

- [1] "Cosmologia" da Enciclopedia Treccani. (<https://www.treccani.it/enciclopedia/cosmologia/>).
- [2] V. M. Slipher, "The radial velocity of the Andromeda Nebula", Lowell observatory bulletin No. 58, January 1913. (https://www.researchgate.net/publication/234273083_The_radial_velocity_of_the_Andromeda_Nebula).
- [3] V. M. Slipher, "Spectrographic Observations of Nebulae.", Popular Astronomy 23, 21-24, January 1915. (https://www.researchgate.net/publication/278671685_Spectrographic_Observations_of_Nebulae).
- [4] H. Shapley, "Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters. XII. Remarks on the arrangement of the sidereal universe.", Astrophysical Journal, 49, 311-336, June 1919. (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1919ApJ...49..311S/abstract>).
- [5] Harlow Shapley and Heber Curtis, "The Scale of the Universe", Bulletin of the National Research Council, Vol.2. Part 3, May 1921. (<https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015017842272&seq=5>).
- [6] J. C. Kapteyn, "First Attempt at a Theory of the Arrangement and Motion of the Sidereal System", The Astrophysical Journal, vol. 55, IOP, p. 302, 1922.
- [7] K. Lundmark, "On the Motions of Spirals", 34, 198, 108, 1922.
- [8] C. Wirtz, "Einiges zur Statistik der Radialbewegungen von Spiralnebeln und Kugelhaufen", Astr. Nachr. 215, 349, 1922.
- [9] E. Hubble, "To H. Shapley, :New cepheid variables and photographic period-luminosity curve worked up from the Magellanic Clouds", HUB 612, Online Archive of California, Aug 1924.
- [10] E. Hubble, "Cepheids in spiral nebulae.", The Observatory 48, 139-142, 1925. (<https://adsabs.harvard.edu/full/1925Obs...48..139H>).

- [11] E. Hubble, "Extragalactic nebulae", *The Astrophysical Journal*, vol. 64, IOP, pp. 321-369, 1926. (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1926ApJ...64..321H/abstract>).
- [12] E. Hubble, "A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae", E. Hubble, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Volume 15, Issue 3, pp. 168-173, March 1929. (<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.15.3.168>)
- [13] W. de Sitter, "THE SIZE OF THE UNIVERSE", *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 44, No. 258, pp. 89-104, April 1932. (<https://www.jstor.org/stable/40668911>).
- [14] E. Hubble, "The Realm of the Nebulae", Yale University Press, 1936.
- [15] A. Pannekoek, "History of astronomy", G. Allen and Unwin Ltd., London, 1961.
- [16] Earl of Rosse, "William Parsons, third Earl of Rosse", *Hermathena*, No. 107, pp. 5-13, 1968. (<https://www.jstor.org/stable/23040086>).
- [17] M. Crowe, "Modern Theories of the Universe: From Herschel to Hubble.", Dover Publications, 1994.
- [18] V. Trimble, "The 1920 Shapley-Curtis Discussion: Background, Issues, and Aftermath", *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol.107, No. 718, pp. 1133-1144, december 1995. (<https://www.jstor.org/stable/40680661>).
- [19] Ferrarese et al., "The Extragalactic Distance Scale Key Project. IV. The Discovery of Cepheids and a New Distance to M100 Using the Hubble Space Telescope, 1996.
- [20] O. Gingerich, "A Brief History of Our View of the Universe", *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 111, No. 757, pp. 254-257, March 1999. (<https://www.jstor.org/stable/10.1086/316324>).
- [21] D. Azzaro & G. Battisti & C. Del Sole, "Atlante Grafico delle Galassie", Unione Astrofili Italiani, 2007.

- [22] P. Schneider, "Extragalactic Astronomy and Cosmology: an introduction." Springer, 2006.
- [23] T.H. Kuhn, "La struttura delle rivoluzioni scientifiche", Piccola Biblioteca Einaudi, 2009 [versione originale 1962].
- [24] O. W. Nasim, "The 'Great Spiral' in Lord Rosse's astronomical record books and beyond", The British Journal for the History of Science , Vol. 43, No. 3, pp. 353-389, September 2010. (<https://www.jstor.org/stable/40962540>).
- [25] A. Mazumdar, "The origin of dark matter, matter-anti-matter asymmetry, and inflation", arXiv:1106.5408 Cornell University, 2011. (https://arxiv.org/abs/1106.5408?utm_source=chatgpt.com).
- [26] M. Hoskin, "The Construction of the Heavens: William Herschel's Cosmology.", 2012.
- [27] U. Santucci, "12 passi per ottenere ciò che vuoi", Franco Angeli Skilla editore, 2014. (<https://www.skilla.com/blog/salti-di-paradigma-verso-un-nuovo-modello-di-pensiero/>).
- [28] G. Bertone et al., "History of dark matter" Reviews of Modern Physics, 90(4), 045002, 2018.
- [29] P. Focardi, "L'uomo e il cosmo", 1088press, Bologna 2019.
- [30] N. Aghanim et al., "Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters", Astronomy & Astrophysics, vol. 641, A6, 2020. (<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>).
- [31] Di Valentino et al., "In the realm of the Hubble tension-a review of solutions", Classical and Quantum Gravity, vol. 38, no. 15, 2021. (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021CQGra..38o3001D/abstract>).
- [32] Adam G. Riess et al., "A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with 1 km s⁻¹ Mpc⁻¹ Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SHOES Team", The Astrophysical Journal Letters, vol. 934, no. 1, L7, July 2022. (<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac5c5b>).