

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"

Corso di Laurea in Astronomia

Tesi di Laurea Triennale

L'enigma notturno Note sul paradosso di Olbers

**Relatore:
Prof. Peruzzi Giulio**

**Laureando:
Pozza Paolo**

Anno Accademico 2022/2023

Indice

1. Introduzione	1
2. L'enigma notturno	2
3. Prime risoluzioni	4
4. Progressi tecnologici e scientifici	6
5. Verso la soluzione	16
6. I vari contributi	22
7. Conclusione	30
Bibliografia	31

1. Introduzione

L'enigma notturno, conosciuto anche come il Paradosso di Olbers, è uno dei quesiti più intriganti dell'astronomia che essenzialmente esiste fin dall'alba dei tempi.

Esso prende il nome dall'astronomo tedesco Heinrich Wilhelm Olbers e pone la domanda sul come sia possibile che il cielo notturno sia buio sebbene il numero di stelle presenti nell'Universo sia infinito.

L'obiettivo di questa tesi è quello di arrivare alla soluzione del paradosso partendo innanzitutto dalle basi e dalla prima formulazione fornita da Giovanni Keplero.

Discuteremo quindi, i vari passi effettuati nel corso dei secoli che, facendo uso delle varie scoperte trovate come la scoperta delle nebulose, la prima osservazione della parallasse stellare, la scoperta delle galassie, l'invenzione della fotografia e del reticolo di diffrazione, la dimostrazione dell'esistenza dell'Effetto Doppler ed infine la prima misura della radiazione cosmica di fondo, hanno portato alla risoluzione dell'enigma, argomentando le diverse soluzioni proposte dai vari personaggi storici.

Procederemo poi mostrando i contributi alla luminosità del cielo forniti da diversi elementi, in particolare da: redshift cosmologico, galassie, assorbimento e diffrazione della luce, limitazioni dell'occhio umano.

Concluderemo sottolineando l'importanza di questo paradosso e di come esso abbia contribuito a forgiare la nostra comprensione attuale della struttura dell'Universo e delle sue proprietà fondamentali.

2. L'enigma notturno

L'eredità lasciata da Newton alle generazioni successive era un Universo senza fine, privo di un punto centrale o di limiti definiti, governato uniformemente da leggi universali da lui scoperte. Era naturale immaginare che questo vasto spazio fosse popolato da stelle distribuite in modo pressoché uniforme in tutte le direzioni. In effetti, secondo la prospettiva di Newton, questo era essenziale. Infatti durante i suoi studi sugli effetti gravitazionali si pose una domanda: se nell'Universo è presente una quantità smisurata di stelle, l'effetto combinato della loro forza di gravità dovrebbe essere enorme, ma allora perché la Terra, per esempio, non viene dilaniata da queste forze che la attraggono da tutte le direzioni?

Egli immaginava che in un Universo infinito, adeguatamente omogeneo e dove la distribuzione di stelle sia sfericamente simmetrica, le forze gravitazionali su larga scala si sarebbero bilanciate reciprocamente, prevenendo così una catastrofe cosmica, concetto che però formulò senza dimostrazioni dirette.

Tuttavia vi era un evidente problema riguardante l'Universo visto da Newton, un problema che esisteva fin dalla notte dei tempi e osservato per la prima volta dagli uomini primitivi: la notte appare buia.

Se l'Universo di Newton è infinito e dunque al suo interno è presente un'infinita distesa di stelle, come mai fra una stella e l'altra, sulla volta celeste, vediamo uno sfondo nero invece di essere uniformemente illuminato?

Naturalmente ci sarebbero delle occasioni in cui stelle fredde si interponerebbero tra noi e le stelle più luminose ma più lontane, ma ciò conferirebbe semplicemente un aspetto granulare a cielo notturno. In generale avremmo l'impressione di vivere al centro di un corpo nero cavo, la cui temperatura è di circa 6.000 gradi centigradi.

Il primo a comprendere l'importanza di questo dato fondamentale sembra sia stato Giovanni Keplero, astronomo, matematico tedesco e convinto sostenitore del sistema copernicano, noto principalmente per i suoi servizi come matematico imperiale e per lo sviluppo delle sue tre leggi sul moto planetario. Egli sfruttava questo paradosso per confutare quello che nel corso del XVII e XVIII secolo venne definito come Universo newtoniano, ossia come prova

indiscutibile di un Universo finito e limitato come infatti scrive in una lettera a Galileo: “più stelle ci sono, più esse affollano il cielo, e maggiore è la forza del mio argomento contro l’infinità dell’Universo” continuando poi ad esprimere che se lo spazio fosse ovunque riempito di stelle, “la volta celeste dovrebbe apparire luminosa come il Sole”.¹

¹ Keplero, *Dissertatio cum Nuncio Sidereo* (1610).

3. Prime risoluzioni

Una delle prime persone che tentarono di risolvere il quesito fu Edmond Halley, noto astronomo inglese al quale è attribuito il nome della cometa di Halley. Egli scrisse nel 1721 due brevi pagine intitolate *“Of the infinity of the sphere of fix’d stars”* in cui presentò due obiezioni ad un cosmo stellato limitato, circondato da un vuoto infinito. La prima obiezione sosteneva che il numero di stelle visibili aumentava con ogni miglioramento dei telescopi, la seconda invece, sottolineava che, secondo la gravitazione newtoniana, in un Universo finito tutte le stelle sarebbero attratte in un unico punto centrale dove sarebbero implose.

Secondo lui dunque la luce delle stelle più lontane risultava impercettibile anche per i telescopi più potenti dell’epoca e di conseguenza non contribuiva alla luminosità totale osservata.

Una spiegazione non soddisfacente dato che, come spiegato dall’astronomo svizzero Jean-Philippe de Chéseaux, sebbene la luminosità di una stella decresce col quadrato della distanza, con la stessa proporzione aumenta anche il numero delle stelle.

Chéseaux scrisse infatti: *“Grandi sfere immaginarie sono costruite con la terra al centro. Queste sfere crescono di raggio e formano gusci di spessore costante come strati di una cipolla. Il numero di stelle in un guscio aumenta con il suo raggio ma la luce ricevuta da ciascuna stella diminuisce. Questi due effetti, uno l’inverso quadrato, e l’altro come il quadrato della distanza, si compensano a vicenda e quindi tutti i gusci posseggono la stessa quantità di luce”*² (Fig. 1).

Il paradosso rimaneva quindi irrisolto.

Sebbene l’enigma notturno fosse noto tra gli astronomi dell’epoca, esso non divenne popolare per molto tempo. Cominciò ad essere ben "pubblicizzato" intorno al 1820 e in particolare nel 1823, quando l’astronomo tedesco Heinrich Olbers, da cui prende il nome questo fenomeno (paradosso di Olbers), scrisse un articolo intitolato *“On the transparency of Space”* dove rilanciò le ipotesi proposte da Chéseaux circa 80 anni prima nel 1744.

Egli formulò la sua soluzione attraverso un’analogia: se ci immaginiamo al centro di una foresta di alberi equamente distribuiti, con tronchi bianchi, allora vedremmo omogeneamente in ogni direzione, solamente bianco. Giustificò dunque l’assenza di luce implicando che lo

² Jean-Philippe Loys de Chéseaux, *Traité de la Comète*, 1744.

spazio fosse pervaso da un fluido etereo leggermente opaco, in grado di attenuare la luce stellare.

Chéseaux aveva calcolato che un'opacità 300 milioni di miliardi di volte inferiore a quella dell'acqua sarebbe stata sufficiente per oscurare il cielo.

Tuttavia anche questa ipotesi fu successivamente scartata in quanto, nel corso del tempo, la materia interstellare esposta alla radiazione si sarebbe inevitabilmente riscaldata, fino a irradiare con la stessa luminosità delle stelle.

Di conseguenza il problema rimase irrisolto per un lungo periodo.

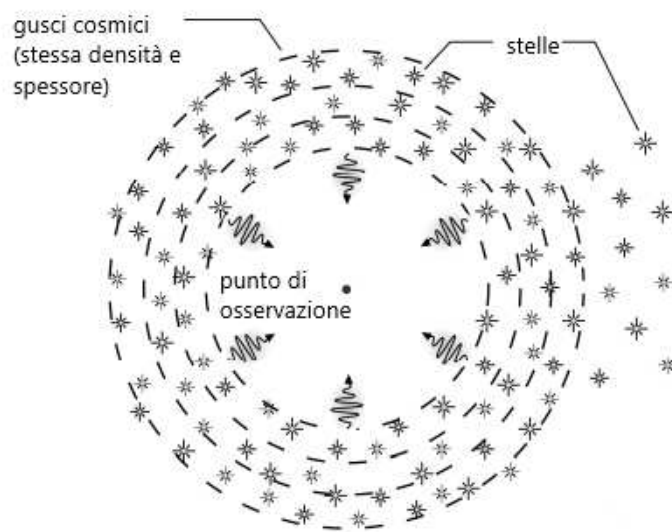


Figura 1. La quantità di luce che raggiunge l'osservatore è la stessa per ogni guscio sferico di uguale spessore come descritto da Jean-Philippe de Chéseaux.

4. Progressi tecnologici e scientifici

Nel frattempo vi fu ampio progresso in ambito tecnologico: William Herschel infatti, l'astronomo e musicista tedesco naturalizzato britannico cominciò a costruire nel 1785, con l'aiuto del fratello Alexander e della sorella Caroline, il telescopio più grande al mondo (Fig. 2). Per fare ciò seguì un processo graduale e dapprima provò telescopi rifrattori utilizzando, come aveva fatto Galileo, una lente come obiettivo, mentre poi sfruttando un'idea di Newton sostituì la lente con uno specchio concavo adeguatamente lavorato e posizionato sul fondo dello strumento. Questa soluzione, nota come telescopio riflettore, gli permise di costruire strumenti di maggiori dimensioni e potenza, proprio come scrisse in una lettera nel 1783: *“Ero completamente determinato a migliorare i miei telescopi fino al limite massimo possibile”*.³

Completato nel 1789, il suo più grande telescopio aveva un'apertura di 1,2 metri, una lunghezza focale di 12 metri e raccoglieva 1.000 volte la luce del cannocchiale ideato da Galileo.

Fu così che Herschel, utilizzando i vari telescopi riflettori di diverse dimensioni da lui costruiti, scoprì il settimo pianeta del sistema solare, denominato Urano, due sue lune, Titania e Oberon, e due nuovi satelliti di Saturno, Encelado e Mimas, del quale studiò anche gli anelli con un dettaglio mai raggiunto prima.

Herschel era affascinato dall'abisso che si estendeva fra noi e le stelle tanto che tentò di decifrare la forma del sistema stellare contando le stelle visibili e misurandone la distanza, cosa assai difficile in quanto nessuna parallasse era ancora stata misurata. Cambiò dunque strategia affidandosi alla statistica e ipotizzando che le stelle all'interno della Via Lattea fossero distribuite uniformemente e che il suo telescopio potesse rivelarle tutte. In questa prospettiva, se in una direzione notava più stelle che in un'altra era perché da quella parte la Via Lattea si estendeva a distanze maggiori; in pratica utilizzò la densità di stelle come indicatore della posizione degli estremi della galassia, con la speranza di determinare anche la posizione del Sole nel sistema.

³ Lettera citata in Arthur Berry, *op. cit.*, p.325.

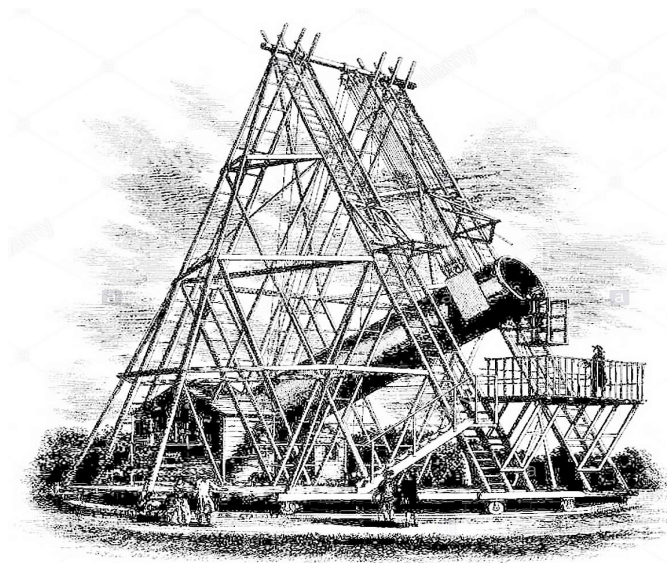


Figura 2. Il telescopio di 1,2 metri di apertura di William Herschel. Lo specchio principale è posto sul fondo dello strumento, mentre l'oculare, e quindi la sede dell'osservatore, si trova alla sommità.

Dal 1782 al 1802 William analizzò il cielo utilizzando un telescopio con apertura di circa mezzo metro e focale di 6 metri, ideale per compiere osservazioni estensive e sistematiche, e contò le stelle visibili in 3.400 campi di 15 minuti d'arco ciascuno, incontrando non di rado oggetti insoliti che la sorella annotava. Per raggiungere l'oculare, situato nella parte superiore del grande tubo, William dovette arrampicarsi su un'alta scala e raggiungere un terrazzino estremamente esposto. Lì, rimaneva immobile per ore, sfidando il freddo delle notti inglesi rischiando più volte la pelle come descrisse la sorella: *“Potrei scrivere una lunga lista di incidenti che per poco si rivelarono fatali per mio fratello, e anche per me.”*⁴

Fu così composta la prima mappa della galassia (Fig. 3), dove il Sole è segnato come una stella scura e non lontano dal centro.

Prendendo come unità di misura la distanza Sole-Sirio che Newton aveva valutato, trovò che la Via Lattea aveva una lunghezza pari a 850 volte quella distanza e uno spessore pari a 155 volte.

Tuttavia Herschel era ben cosciente dei limiti delle sue misure; aveva introdotto diverse approssimazioni rigorose e si era reso conto che lo spazio interstellare conteneva delle regioni opache, una specie di foschia disomogenea che poteva aver falsificato parte dei suoi conteggi.

⁴ Henry C. King, *The History of the Telescope*, Dover, New York 1979, p.128.

William dichiarò pertanto che i suoi risultati sulla forma della Via Lattea non erano conclusivi, e che le sue vere dimensioni erano ancora ignote.



Figura 3. La prima mappa della galassia realizzata da William Herschel: il piano della Via Lattea è orizzontale e il Sole si trova vicino al centro.

In ogni caso la composizione della mappa portò a diversi esiti. Una prima conclusione fu un'ulteriore conferma delle leggi di Newton. Nel tentativo di misurare le parallassi, William utilizzò una tecnica che richiedeva l'osservazione di stelle doppie; egli notò che, a distanza di tempo, la linea connettente le due stelle di una coppia era leggermente ruotata, ne dedusse quindi che le due stelle non erano vicine per colpa della prospettiva ma erano fisicamente legate, ossia orbitavano l'una intorno all'altra. Egli propose che le loro orbite obbedissero alla gravitazione newtoniana ma i suoi dati furono insufficienti per dimostrarlo. In seguito molti astronomi, tra cui suo figlio John, giunsero alla conferma di tutto ciò.

Un altro esito fu prodotto da una lista che William e Caroline compilarono di 2500 oggetti celesti che tuttavia non erano stelle e che chiamarono "nebulose". Questi oggetti apparivano come piccole macchie di luce lattiginose, con un aspetto sfumato e argenteo. Presentavano inoltre varie forme, con diversi gradi di lucentezza, granularità, dimensioni, come descrive con le sue parole: *"Ho visto nebulose doppie, triple, variamente disposte, alcune grandi connesse con altre più piccole; e nebulose lucide, strette ma molto estese, come filamenti luminosi; alcune erano a forma di ventaglio [...] e si diramavano da un punto luminoso; altre simili a comete, con un nucleo brillante al centro; oppure con stelle nebbiose circondate da una spessa atmosfera; un altro tipo ancora conteneva una nebulosità di tipo lattiginoso, come quel meraviglioso e inspiegabile fenomeno attorno alla stella Theta Orionis; altre infinite brillano di un tipo di luce debole e granulosa, che indica che potrebbero essere*

risolte in stelle".⁵ Alcune di queste erano già note da tempi precedenti come la nebulosa di Orione (M42) e quella di Andromeda (M31), e altre schedate da Charles Messier e presentate nel 1774 all'interno del suo catalogo di Messier contenente 110 oggetti tra cui principalmente nebulose e ammassi stellari.

Inizialmente Herschel pensò che si trattasse in tutti i casi di ammassi stellari e ipotizzò che le nebulose più estese e indefinite fossero ammassi troppo remoti per essere risolti in singole stelle distinte. Successivamente pensò che fossero interi sistemi stellari lontanissimi ma simili alla Via Lattea, idea già proposta precedentemente da diversi astronomi e studiosi.

Il filosofo tedesco Immanuel Kant aveva infatti avanzato l'ipotesi che il nostro sistema stellare non fosse unico, ma che fosse uno tra molti "universi-isola", paragonabili in dimensione e struttura alla nostra galassia.

In fine Herschel abbandonò l'idea che tutte le nebulose fossero ammassi di stelle e ciò fu dovuto ad una nuova osservazione. Egli aveva infatti notato un oggetto chiaramente di natura stellare, circondato da un alone di quella caratteristica luce lattiginosa tipica delle nebulose diffuse. Pensò che se l'alone fosse causato da una miriade di stelle non risolte, allora l'oggetto puntiforme centrale doveva essere di dimensioni enormi, una stella miliardi di volte più grande di tutte le altre, ipotesi inverosimile. Al contrario, se l'oggetto centrale era una stella, allora l'alone circondante doveva essere almeno in parte di natura gassosa.

Successivamente avanzò la teoria che le nebulose di gas diffuso rappresentassero uno stadio iniziale, a partire dal quale un processo di frammentazione guidato dalla gravità newtoniana, condensava il gas in grappoli di stelle, dando origine agli oggetti che osserviamo sotto forma di ammassi stellari.

Questa idea fu ispirata dal fatto che, sebbene non possiamo assistere in diretta all'evoluzione di corpi celesti nel tempo, possiamo riconoscere le diverse fasi del loro sviluppo negli oggetti che abbiamo davanti ai nostri occhi e affermò che *"non è forse la stessa cosa se assistiamo successivamente alla germinazione, fioritura, foliazione, fecondazione, declino, appassimento e corruzione di una pianta; oppure se un vasto numero di esemplari, selezionati in ciascuno degli stadi che la pianta attraversa nel corso della sua esistenza, è portato simultaneamente alla nostra vista?"*.⁶

⁵ A. Berry, *op. cit.*, p. 337

⁶ Micheal A. Hoskin, *William Herschel and the Construction of the Heavens*, Oldbourne, Londra 1963, p. 85

Alcuni anni dopo, più precisamente nel 1838, la prima parallasse stellare fu osservata da Friedrich Bessel, matematico, astronomo e geodeta tedesco. La misura fu effettuata su una stella appena visibile a occhio nudo, 61 Cygni, selezionata perché aveva il moto proprio più rapido fra le 7.600 stelle catalogate da padre Giuseppe Piazzi, un rinomato astronomo italiano.

Dopo aver impiegato 5 anni per sviluppare lo strumento e per perfezionare la tecnica di misura, Bessel iniziò le osservazioni. Egli seguì attentamente la posizione della stella mentre la Terra percorreva la sua orbita annuale e rilevò uno scostamento di $\frac{1}{3}$ di secondo d'arco. Questo collocava 61 Cygni a una distanza di 657.000 UA, un valore paragonabile a quello che Newton aveva trovato per Sirio.

Egli, quando riportò la sua scoperta, fece notare che un raggio di luce emesso dalla stella impiegava 10,3 anni per raggiungere la Terra, calcolo basato sul valore di 280.000 km/s stimato a quel tempo per la velocità della luce. È importante sottolineare tuttavia che, il concetto di una velocità finita della luce, fu per la prima volta enunciato dall'astronomo danese Ole Rømer che nel 1676, sfruttando i ritardi osservati nelle eclissi della luna di Giove Io, lo determinò senza però fornirne una misura concreta. Gli storici hanno calcolato che, per i dati a disposizione di Rømer, la velocità della luce da lui calcolata era circa 170.000 km/s. Questa circostanza inaugurò l'anno luce e diffuse l'idea tra gli astronomi che osservare sorgenti lontane voleva dire osservarle come se fossero nel passato.

Herschel di ciò ne era consapevole, in particolare quando osservò che se le stelle più lontane si spegnessero noi continueremmo comunque a vederle, *“perché la loro luce continuerebbe a viaggiare dopo che sono scomparse”*.⁷

A portare avanti il quesito sulle nebulose posto da Herschel fu William Parsons, astronomo irlandese noto anche come 3° conte di Rosse. Egli nel 1845 terminò la costruzione di un telescopio addirittura più grande di quello di Herschel (Fig. 4), denominato Leviathan, capace di raccogliere più del doppio della luce attraverso l'uso di un specchio del diametro di 1,82 metri del peso di 4 tonnellate sistemato sul fondo di un tubo lungo quasi 17 metri.

Parsons riuscì a risolvere alcune nebulose in stelle ma altre rimasero irriducibilmente soffuse e sfocate. Tuttavia scoprì che alcune nebulose mostravano una chiara struttura a spirale, una forma completamente inedita per dei corpi celesti, mai vista né immaginata prima.

⁷ Helge S, Kragh, *Conception of Cosmos*, Oxford University Press, Oxford-New York 2007, p.97.

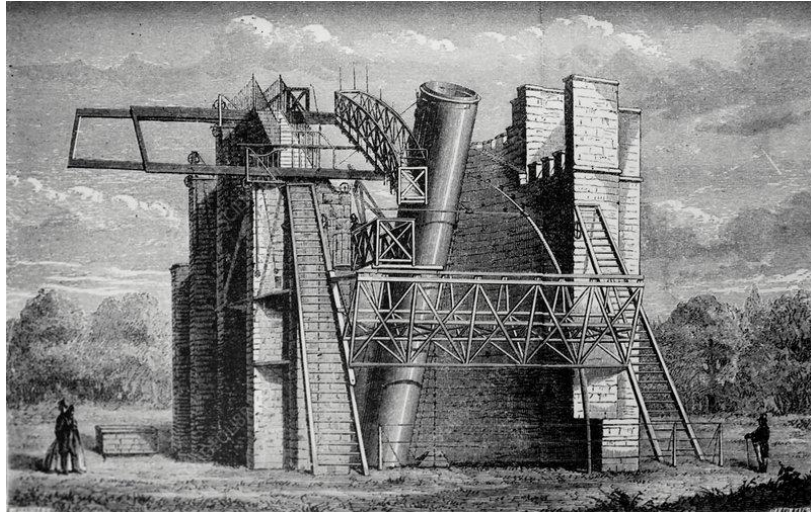


Figura 4. Il cosiddetto Leviathan costruito da William Parsons nel 1845 e localizzato a Parsonstown, ora chiamata Birr, in Irlanda.

Nel frattempo, durante il corso del XIX secolo, vi furono due importantissime innovazioni tecnologiche: l'introduzione della fotografia e dunque delle lastre fotografiche capaci di sorpassare l'occhio umano come rivelatori e che potevano raccogliere la luce di sorgenti molto deboli per lunghi periodi di tempo, e la nascita della spettroscopia.

Quest'ultima si basò sulla scoperta effettuata da Newton molti anni prima, il quale sosteneva che la luce del Sole poteva essere scomposta nelle sue componenti cromatiche facendola passare attraverso un prisma di vetro ottenendo così uno spettro di gamma dal rosso al viola. Due decenni dopo, Christiaan Huygens, matematico, astronomo e fisico olandese, provò la natura ondulatoria della luce, dimostrando che ogni colore corrisponde a una certa lunghezza d'onda.

Nel 1814 il fisico tedesco Joseph Fraunhofer rivelò la presenza nello spettro del Sole di una quantità di sottili righe scure, come se qualcosa avesse “mangiato” la luce in corrispondenza di certe lunghezze d'onda (Fig. 5).

Trent'anni più tardi invece, Gustav Kirchhoff e Robert Bunsen, due fisici dell'Università di Heidelberg, si dedicarono allo studio di questi fenomeni ponendo così le basi della spettroscopia.

Scoprirono che ogni gas aveva la capacità di assorbire la luce a certe precise lunghezze d'onda e, se lo stesso elemento chimico veniva eccitato, emetteva luce nelle stesse frequenze che assorbiva.

Nel 1860 Kirchhoff propose poi che le righe presenti nello spettro del Sole fossero il risultato dell'assorbimento di gas presente nell'atmosfera solare. Egli confrontò queste linee spettrali con quelle dei gas misurati in laboratorio dove riconobbe le stesse impronte e quindi la presenza degli stessi elementi.

Questa scoperta ebbe un'applicazione cruciale nel determinare cos'erano le nebulose; se infatti una nebulosa diffusa fosse stata in realtà un ammasso di stelle, il suo spettro avrebbe dovuto mostrare un fondo continuo solcato da righe scure come in un tipico spettro stellare; se, al contrario, fosse stata una nube di gas, il suo spettro doveva essere costituito solo da alcune righe brillanti.

Nel 1864 l'astronomo inglese Sir William Huggins determinò che si trattava di nuvole di materia allo stato gassoso, come scrisse qualche anno dopo: *“Guardai nello spettroscopio, ed ecco lo spettro che non mi aspettavo: una singola riga brillante!”*.⁸

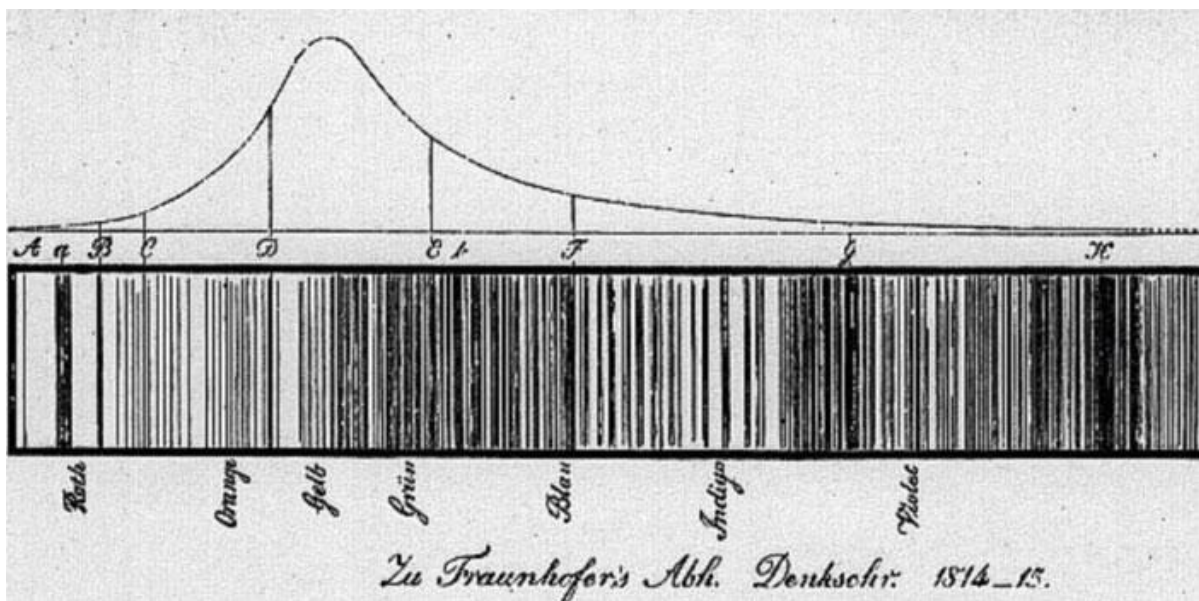


Figura 5. Lo spettro solare disegnato da Fraunhofer nel 1814. Da sinistra a destra i colori attraversano la sequenza dell'iride (rosso, arancione, giallo, verde, blu, indaco e violetto, indicati in tedesco) e corrispondono a lunghezze d'onda decrescenti. La curva nella parte superiore mostra l'intensità del continuo, che raggiunge il massimo nel giallo. Il diagramma in basso mostra le righe di assorbimento; le più marcate furono indicate da Fraunhofer con lettere in ordine alfabetico, una notazione che sopravvive ancora oggi.

⁸ W. Huggins e M. Huggins, *The Scientific Papers of Sir William Huggins*, Wesley and Son, Londra 1909, p. 106-107

Nonostante tutti i progressi tecnologici, rimaneva una categoria di oggetti celesti che sfuggiva all'analisi spettroscopica: le nebulose a spirale. A causa della loro luce molto debole risultava estremamente difficile distinguere il loro spettro tra quello di tipo stellare e quello gassoso. A quei tempi vigevano due principali teorie: la prima considerava le nebulose a spirale come interi sistemi stellari paragonabili alla Via Lattea ma collocati a distanze inimmaginabili; la seconda e più accreditata teoria proponeva che si trattasse di nubi di gas rotanti nell'atto di generare nuove stelle.

A gettare le basi per la risoluzione di questo dilemma fu Henrietta Leavitt, astronoma statunitense che lavorò presso l'Osservatorio di Harvard come "donna computer" ovvero con la mansione di calcolatore manuale. Essa aveva il compito di analizzare migliaia di lastre fotografiche alla ricerca di stelle "variabili", la cui luminosità varia periodicamente nel tempo.

Nel 1912 confermò l'esistenza della relazione periodo-luminosità attraverso lo studio di 25 Cefeidi presenti nelle Nubi di Magellano. Pochi anni dopo fu possibile calibrare quella relazione legando il periodo di quelle stelle variabili alla distanza della sorgente.

Nell'aprile del 1920, il 26 per la precisione, ci fu un importante avvenimento storico definito oggi giorno come "*Il grande dibattito*" in cui, due fra i più autorevoli astronomi del momento, Harlow Shapley dell'osservatorio di Monte Wilson in California e Heber Curtis dell'osservatorio di Pittsburgh in Pennsylvania, avevano accettato di farsi portavoce delle loro contrapposte visioni nel dibattito pubblico intitolato "*La struttura dell'universo*".

Secondo i suoi studi, Shapley sosteneva che le dimensioni della Via Lattea fossero estremamente vaste, stimandole a circa 300.000 anni luce, con il Sole decentrato di circa 60.000 anni luce. Nella sua prospettiva, tutti gli oggetti celesti erano situati all'interno della galassia stessa oppure distribuiti in una sorta di alone alla sua periferia. Curtis, dall'altro lato, sosteneva che la Via Lattea fosse dieci volte più piccola rispetto alle stime di Shapley e che le nebulose a spirale fossero in realtà galassie esterne, analoghe alla nostra.

L'argomento più a favore della tesi di Shapley veniva dalle osservazioni di Adriaan van Maanen, collega di Shapley dello stesso osservatorio. Egli sosteneva, dopo aver confrontato una serie di lastre fotografiche della spirale M101 raccolte nell'arco di circa dieci anni, di aver rilevato una rotazione della nebulosa. Il problema tuttavia non era di certo il fatto che ruotasse ma, se davvero M101 era alle distanze pazzesche pensate da Curtis, allora quella

rotazione indicava che la spirale ruotava a velocità assurde, superiori alla velocità della luce. Shapley concluse quindi che le spirali non potevano essere così distanti ma dovevano necessariamente essere interne alla Via Lattea.

Un'altra problematica discussa era la distribuzione delle spirali sulla sfera celeste visto che sembravano sistematicamente evitare la zona centrale della Via Lattea (Fig. 6). Se le spirali erano galassie uniformemente distribuite nello spazio, come potevano evitare proprio il piano della nostra galassia? Secondo Shapley, ciò costituiva un ulteriore chiaro segnale che queste fonti erano in qualche modo legate alla struttura della Via Lattea stessa. Curtis, però, aveva una valida contro-interpretazione. Questa disposizione poteva essere il risultato della presenza di nubi di materia interstellare nel piano della nostra galassia, che avrebbero potuto facilmente oscurare la visibilità delle deboli spirali esterne in quella regione. Curtis continuò sostenendo che molte delle nebulose a spirale, viste di taglio, mostravano nubi opache proprio nel piano del disco e, se fossimo situati all'interno di una di queste galassie, probabilmente non avremmo visibilità delle sorgenti esterne esattamente nella regione centrale della galassia, proprio come avviene nel nostro caso.

Furono poi discussi numerosi altri argomenti come le dimensioni angolari delle spirali, i loro spettri, la luminosità superficiale, la comparsa occasionale di nuove sorgenti puntiformi al loro interno, le loro velocità di recessione e, su ciascuno di questi aspetti, i due contendenti fornivano interpretazioni discordi.

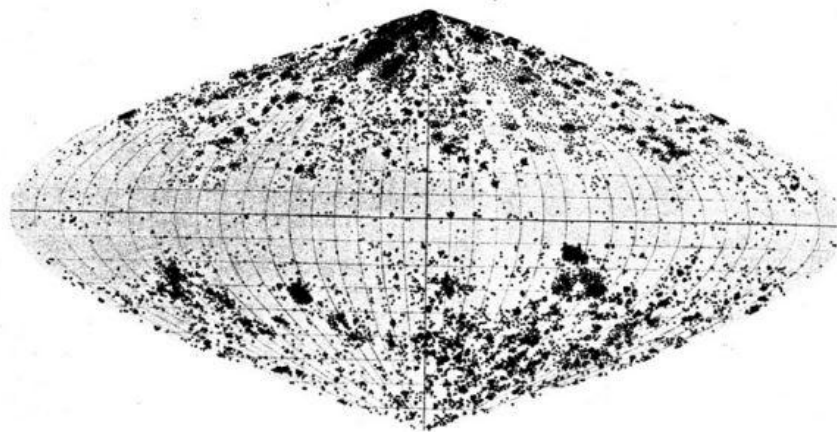


Figura 6. La distribuzione delle circa 11.500 nebulose note al tempo del dibattito fra Shapley e Curtis (C.V.L. Charlier, «How an infinite world may be built up», Arkiv för matematik, astronomi och fysik, 16, 1922). La griglia rappresenta una proiezione dell'intera sfera celeste, orientata in modo che il piano della Via Lattea coincida con la fascia centrale.

Fu infine, tra il 1923 e 1924, che Edwin Hubble, anche lui astronomo statunitense, riuscì a risolvere il problema utilizzando il telescopio più potente dell'epoca, un riflettore con apertura di 2,5 metri entrato in funzione qualche anno prima presso l'osservatorio di Monte Wilson (Fig. 7).

Hubble iniziò concentrando la sua ricerca sulle novae presenti principalmente nella spirale M31, stelle che aumentano improvvisamente la loro luminosità fino a migliaia di volte, per poi lentamente ritornare alla luminosità di partenza. In alcune nebulose a spirale aveva notato la comparsa improvvisa di debolissime sorgenti puntiformi che se interpretata come novae appartenenti alle nebulose stesse, la loro debole luminosità avrebbe indicato distanze immense, e quindi avrebbe confermato la natura extragalattica delle spirali.

Nel 1923 notò invece in una lastra fotografica un puntino luminoso che, secondo la sua memoria, non era presente nelle lastre precedenti. Tuttavia quando andò a confrontare quella lastra con quelle precedenti notò che la stella sembrava apparire e scomparire periodicamente, ogni 31 giorni, ossia con lo stesso pattern di una Cefeide. Successivamente Hubble trasformò la sua ricerca da una caccia alle novae in una caccia alle Cefeidi e nel giro di un solo anno riuscì a raccogliere centinaia di immagini di Andromeda (M31) e di M33, identificando in totale circa una trentina di Cefeidi. Successivamente misurò il loro periodo e, grazie alla relazione di Henrietta Leavitt, dedusse le distanze: 930.000 anni luce per Andromeda, 850.000 per M33. Queste distanze erano troppo grandi per essere interne alla nostra galassia, confermando così che le nebulose a spirale erano galassie distinte proprio come la Via Lattea.



Figura 7. Il telescopio Hooker da 2,5 metri con cui Edwin Hubble scoprì l'espansione dell'universo, localizzato nell'osservatorio di Monte Wilson, nella contea di Los Angeles, in California a 1742 metri di quota.

5. Verso la soluzione

Il dilemma sulle nebulose a spirale aveva decretato che il cosmo era davvero una vastissima distesa di galassie, ma fino a dove si estendeva quella moltitudine di galassie? Era possibile stabilirne un limite? Lo spazio newtoniano si adattava bene all'idea di un numero infinito di galassie distribuite in modo uniforme in ogni direzione, ma allora, se davvero le cose stavano così, risorgeva la stessa domanda: perché la notte è buia? Il problema persisteva.

Il primo ad aprire uno spiraglio nella direzione giusta non fu uno scienziato, bensì un grande scrittore e poeta. Edgar Allan Poe, fin da giovane appassionato di astronomia, scrisse nel 1848 ciò che lui intitolò *Eureka, un poema in prosa*, dove venne per la prima volta elaborata l'idea di un Universo collassante ossia di Universo non statico. Secondo Poe infatti non esisteva nulla che bloccava le stelle da scontrarsi l'una con l'altra e, attraverso l'uso di assunzioni metafisiche e pura logica, sviluppò ciò che riteniamo fu il primo concetto di un Universo in evoluzione all'interno della fisica newtoniana.

In questo libro, dove affronta argomenti riguardanti la finitezza dell'Universo, la natura delle nebulose, la forma della Via Lattea, l'esistenza di altre galassie e persino di un multiverso, si espone a riguardo del paradosso di Olbers con: *“L'idea che l'Universo contenga materia illimitata non solo è insostenibile, ma anche impossibile e assurda. [...] tutte le osservazioni del firmamento rifiutano il concetto di un'infinità assoluta dell'Universo di stelle” e “Se la successione delle stelle fosse infinita, il fondo del cielo presenterebbe una luminosità uniforme [...]. L'unico modo, quindi, in cui in questo stato di cose potremmo comprendere i vuoti che i nostri telescopi trovano in innumerevoli direzioni, sarebbe di supporre la distanza del fondo invisibile così immensa che nessun raggio da essa è ancora stato in grado di raggiungerci”*.⁹

Eureka è un raro esempio di letteratura che precede e aiuta l'avanzata della scienza del suo tempo e, in questo caso, il saggio può essere considerato come il primo libro sulla cosmologia newtoniana.

Un altro importante passo verso la risoluzione del problema fu la dimostrazione dell'esistenza dell'Effetto Doppler, verificata nel 1845 (Fig. 8).

⁹ Edgar Allan Poe, *Eureka*, 1848.

Quest'effetto, valido per le onde luminose, esprime che se una stella si avvicina a noi, la sua luce ci arriverà con lunghezze d'onda più corte, questo significa che il suo spettro sarà spostato verso la parte blu (blueshift) in proporzione alla velocità con cui si avvicina; vale ovviamente anche il contrario ossia che se una stella si allontana da noi, la sua luce ci arriverà con lunghezze d'onda più lunghe e il suo spettro sarà spostato verso la parte rossa (redshift). La misura di uno spostamento nelle lunghezze d'onda porta quindi a una misura della velocità.

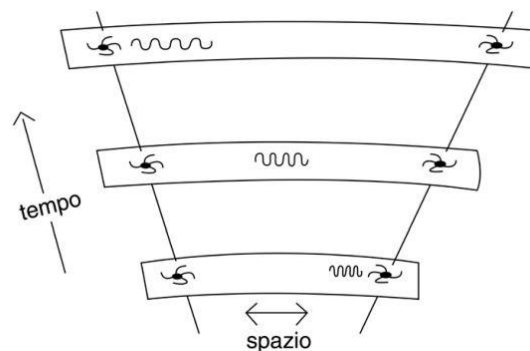


Figura 8. L'immagine illustra il redshift cosmologico: le galassie sono ferme in uno spazio che si dilata.

Un tentativo significativo di risolvere il paradosso di Olbers fu registrato nel 1901 in un articolo scritto da William Thomson, anche conosciuto come Lord Kelvin (a cui è attribuito l'unità di misura per la temperatura assoluta), pubblicato nel *Philosophical Magazine*. I calcoli da lui forniti possono essere considerati come le prime soluzioni quantitative nel modello di un Universo statico e, se adattati al modello di un Universo in espansione, le sue soluzioni rimangono ancora valide. I suoi calcoli, insomma, possono essere visti come una versione più chiara e matematicamente rigorosa di quelli realizzati da Chéseaux circa 150 anni prima.

Kelvin sosteneva che anche se fossimo in Universo stellato con un raggio di un trilione di anni luce, il cielo notturno non sarebbe ancora coperto di stelle a causa del raggio più limitato dell'Universo visibile. Egli infatti scrisse: *“Quindi, se tutte le stelle della nostra vasta sfera cominciassero a brillare allo stesso tempo... in nessun caso la luce raggiungerebbe la terra da più di una porzione eccessivamente piccola di tutte le stelle”*.

Kelvin pensava che la densità media di stelle in quello che lui chiamava *“la grande sfera dell'Universo”*, cioè il numero di stelle per volume di anni luce cubici, fosse molto bassa,

molto minore del valore effettivo trovato in prossimità del nostro sistema solare. Questo renderebbe la quantità di luce proveniente dall'Universo ancora più limitata e forzerebbe la luce originata dalle stelle più lontane ad impiegare ancora più tempo per raggiungerci. Dunque che l'Universo sia eterno o di età finita, per Kelvin, la condizione generale per avere un cielo buio può essere semplicemente riassunta nel fatto che la grandezza dell'Universo sia limitata.

Il primo ad applicare l'Effetto Doppler per misurare la velocità radiale delle nebulose a spirale fu Vesto Slipher, un astronomo statunitense, che nel 1924, dopo 12 anni di ricerca, misurò le velocità di 41 nebulose a spirale delle quali ben 36 mostravano un redshift; si stavano dunque allontanando dal punto di osservazione.

Nel 1927, utilizzando ciò che Slipher aveva trovato, Georges Lemaître, sacerdote, fisico ed astronomo belga, realizzò che il redshift delle galassie era sintomo dell'espansione dell'Universo. In modo rigoroso dimostrò che in uno spazio in espansione le galassie si allontanano le une dalle altre con una velocità proporzionale alla loro reciproca distanza (oggi nota anche come "legge di Hubble"): una galassia a distanza doppia di un'altra si allontana due volte più velocemente. Lemaître sviluppò infine un modello evolutivo compatibile con i dati disponibili, concludendo che *"la recessione delle nebulose extragalattiche è un effetto cosmico dell'espansione dell'Universo"*.¹⁰

Questo lavoro fu fondamentale per la formulazione della teoria dell'espansione dell'Universo e segnò l'inizio della moderna cosmologia.

Successivamente raccolse i dati disponibili per le velocità di recessione di 42 galassie, traducendo le loro luminosità apparenti misurate da Hubble, in stime approssimative della loro distanza, e calcolò la velocità di espansione dell'Universo: 625 km/s per megaparsec. Due anni dopo Edwin Hubble completò una nuova serie di misure sulla velocità di recessione e sulla distanze, utilizzando come indicatori le Cefeidi e le stelle più brillanti presenti in ciascuna galassia, e pubblicò un nuovo valore per la velocità di espansione dell'Universo simile a quello proposto da Lemaître ma con una maggiore precisione: 500 km/s per megaparsec.

¹⁰ Georges Lemaître, *"Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques"*, *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, vol. 47, 1927.

Il calcolo della velocità di espansione dell'Universo svelò la presenza di una nuova regione dell'Universo, una regione che rimarrà per sempre fuori dalla nostra portata e invisibile ai nostri occhi. In poche parole esiste un orizzonte degli eventi, chiamato *cosmic event horizon*, al di sopra del quale qualsiasi cosa si allontana da noi più velocemente della velocità della luce e dunque ogni fonte luminosa non contribuisce alla luminosità del cielo visto che la sua luce non ci raggiungerà mai (Fig. 9).

Questa fu la serie di scoperte che diede vita al modello cosmologico del Big Bang, modello contrario a quello usato fino ad allora di un Universo statico. Questo nuovo modello cosmologico, di vitale importanza per i calcoli e assunzioni fornite nella successiva sezione, è costituito da due importanti assunzioni; la prima è ovviamente che l'Universo è in espansione, la seconda invece è che la distribuzione di materia su distanze sufficientemente grandi può essere considerata uniforme.

E' importante notare che il modello cosmologico del Big Bang riguarda solamente l'inizio e il "presente" dell'Universo, esistono infatti diversi modelli evolutivi per quanto riguarda il futuro dell'Universo ma ognuno di essi comincia con un Big Bang o con uno stato al tempo zero di densità infinita. Questi modelli evolutivi vanno però oltre lo scopo di questa tesi per cui non verranno trattati oltre questa piccola nota.

Un ulteriore progresso si ottenne quando nel 1964 fu misurata per la prima volta la radiazione cosmica di fondo, prova del modello del Big Bang, da Arno Penzias e Robert Wilson. Con l'aiuto di Robert Dicke confermarono che l'Universo primordiale doveva essere dominato non dalle particelle di materia, ma da fotoni ad una temperatura di migliaia di gradi kelvin e che nel tempo l'espansione dell'Universo avrebbe rapidamente diluito quella radiazione. Se così fosse stato, ancora oggi l'intero spazio dovrebbe essere permeato da un mare di onde elettromagnetiche a una temperatura molto bassa, al massimo di qualche decina di kelvin, nella frequenza delle microonde.

Quella radiazione che misurarono poteva essere considerata come la luce "fossile" dell'Universo primordiale visto da una distanza inimmaginabile, una luce che ha viaggiato da quel momento fino ad oggi, proprio come Herschel aveva compreso.

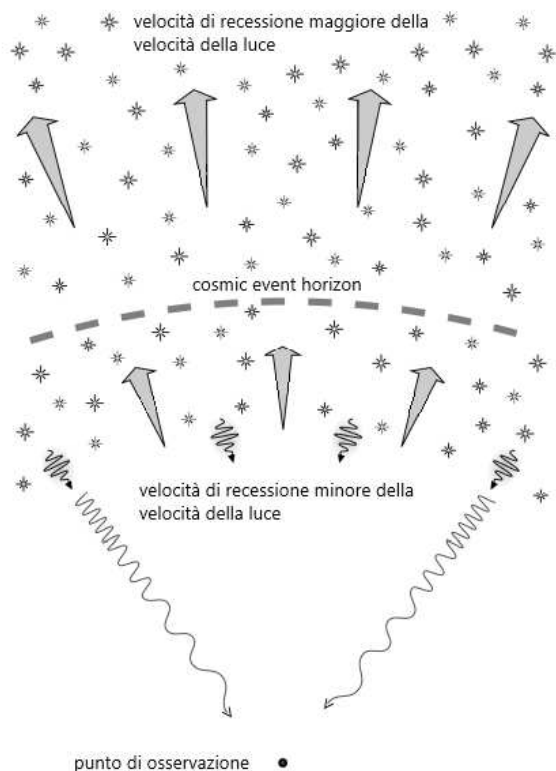


Figura 9. L'immagine mostra il limite dell'universo osservabile delimitato dal *cosmic event horizon*. Solamente le stelle al di sotto del limite contribuiscono alla luminosità del cielo.

Usando puramente un punto di vista matematico, esiste un'altra soluzione al paradosso di Olbers: i frattali.

Strutture frattali come la spugna di Menger possono avere superficie infinita e contemporaneamente volume nullo, mostrando inoltre una distribuzione ripetuta dei loro punti indipendente dal loro ridimensionamento.

Supponiamo di avere galassie, ammassi e ordini superiori di superammassi di galassie dove la loro energia e massa viene distribuita in modo frattale. A causa della struttura frattale i volumi più grandi dovrebbero contenere relativamente minore quantità di materia ed energia, infatti il contenuto di energia, e quindi anche di radiazione, per volume scende al di sotto di un dato limite solo se il volume totale preso in considerazione è sufficientemente grande.

Quindi se le stelle e galassie fossero distribuite in una struttura frattale, anche detta *fractal cosmology*, allora la densità media di una qualsiasi regione diminuirebbe con l'aumento dell'area della regione considerata. In questo modo risulta irrilevante l'appoggio alla teoria del Big Bang per risolvere il paradosso di Olbers.

Dunque anche se il cielo dovesse essere statico, infinito o eterno, un cielo visto come frattale rimarrebbe buio durante la notte.

Questa risoluzione del paradosso, proposta per la prima volta da Carl Charlier nel 1908 e successivamente riportata alla luce da Benoît Mandelbrot nel 1974, è ancora dibattuta all'interno del mondo cosmologico in quanto, affinché essa sia considerata valida, è necessario avere una dimensione frattale minore o uguale a 2, cosa che non sempre è vera visto che la dimensione frattale dell'Universo varia in base all'area considerata. Alcune analisi di galassie luminose all'infrarosso dimostrano infatti che la loro dimensione frattale risulta 2 fino a circa $20 \text{ Mpc}/h$ mentre tende a salire a 3 oltre quella distanza.

Questo significa che la materia può essere considerata sparsa in maniera isotropica a grandi distanze cosa che non fa comodo alla teoria frattale che predilige una distribuzione di materia anisotropica a grandi scale.

6. I vari contributi

In questa sezione analizzeremo i vari contributi che influenzano la luminosità del cielo notturno evitando di discutere i fattori “ovvi” che la condizionano come i diversi strati dell’atmosfera terrestre, la presenza del Sole e il grande aiuto della Via Lattea.

Realisticamente parlando, il contributo all’oscurità notturna fornito dall’espansione dell’Universo rappresenta poco più della metà dell’effetto, il resto è fornito semplicemente dalla bassa distribuzione delle stelle e galassie che brillano per un tempo finito nell’Universo. Se volessimo quantificare questi effetti troveremmo che l’età finita dell’Universo conta come una riduzione di un fattore 10 nell’intensità della radiazione intergalattica mentre gli effetti relativistici, e in particolare l’espansione dell’Universo, contano come una riduzione di un fattore di circa 3, questo è stato calcolato, nel 1991 da Paul S. Wesson, basandosi sul fatto che la temperatura media di una galassia è una funzione decrescente nel tempo e considerando modelli di Universo in espansione e statici in modo tale da separare l’influenza degli effetti relativistici, come descritto nell’articolo da lui pubblicato.

Prendiamo ora per esempio la galassia di Andromeda e prendiamo in considerazione il tempo di viaggio della luce. Questa galassia è distante “solamente” circa 2,5 milioni di anni luce, ma anche così, la velocità finita della luce implica che occorrono circa 2,5 milioni di anni affinché i suoi fotoni arrivino a noi, il che significa che vediamo Andromeda com’era intorno a 2,5 milioni di anni fa. Questo è ancora più significativo per galassie più lontane dove esse vengono viste, in principio, com’erano attorno al tempo della loro formazione a circa $1,6 \times 10^{10}$ anni fa (in pratica è molto difficile osservare queste galassie perché appaiono estremamente deboli), ciò vuol dire che esiste un limite superiore oltre il quale esauriamo effettivamente il numero di galassie da poter osservare.

L’espansione cosmologica contribuisce dunque a risolvere il paradosso di Olbers ma non è sufficiente dal punto di vista qualitativo e logico.

Basta infatti considerare che nell’enigma notturno abbiamo due tipi di infinito coinvolti; l’infinito numerabile associato al conteggio delle stelle e il non numerabile associato all’idea di un Universo eterno e di dimensione infinita.

Se prendiamo ora per esempio il cielo notturno popolato di stelle notiamo che il contributo della luminosità media delle stelle a qualsiasi distanza rimane sempre lo stesso dal momento che il numero di stelle, che cresce con l'area di cielo considerata, compensa il calo della luminosità apparente che diminuisce in modo proporzionale alla distanza della stella come d'altronde spiegato da Chéseaux nel capitolo 3.

Ciò indica che è sufficiente considerare la vastità dell'Universo e un numero finito di stelle visibili per spiegare il cielo scuro di notte.

Possiamo fare un semplice calcolo per trovare la densità media di stelle nel nostro Universo; secondo la cosmologia, il volume dell'Universo è di circa $(1,4 \times 10^{10} \text{ anni luce})^3$ mentre il numero di stelle presenti al suo interno è intorno alle 10^{22} . Quindi il numero medio di anni luce cubici per una stella sta tra i 100 e i 1000 anni luce. Da questo calcolo si vede chiaramente che il nostro Universo è perlopiù vuoto.

E' importante notare però che sebbene l'espansione cosmologica contribuisca solo a poco più di metà dell'oscurità notturna, essa diminuisce lo splendore del cielo sia aumentando le distanze tra gli oggetti celesti, sia diminuendo il potere luminoso delle sorgenti spostando la loro emissione verso il rosso.

Gli effetti relativistici ci permettono infine di fornire un valore effettivo all'intensità della luce intergalattica pari a $2 \times 10^{-4} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, calcolato attraverso l'uso del tasso medio di produzione di energia per unità di massa luminosa, la densità media di materia luminosa e l'età massima delle galassie.

Analizziamo ora il contributo delle galassie, fonte principale di luce dell'Universo, discutendo in primis quante galassie sono presenti in un'unità d'area del cielo e quanto questo influisce nelle nostre osservazioni. Considerando galassie con massa stellare $M_* > 10^6 M_\odot$ troviamo in media una densità di $10.000 \text{ galassie per arcmin}^2$ che corrisponde a circa $3 \text{ galassie per arcsec}^2$. Se una galassia media è più larga di $0,32 \text{ arcsec}$ allora è certo che ogni parte del cielo è occupata almeno in parte da una galassia.

Sembra quindi che ci siano abbastanza galassie da coprire l'intero cielo e se abbassiamo il limite imposto a $10^5 M_\odot$ allora il numero di galassie aumenterebbe di un fattore di ~ 7 rendendo quasi certo che tutto il cielo sia coperto da galassie.

Questo dimostra che in media ogni punto del cielo dovrebbe contenere almeno parte di una galassia, tuttavia la maggior parte di questi oggetti hanno alti redshifts, con la maggioranza, circa 66%, aventi $z > 5$. Visto che la maggior parte di queste galassie sono estremamente deboli e visto che non possono essere facilmente osservate con la moderna tecnologia, possiamo rilevare la loro presenza solamente attraverso la radiazione cosmica di fondo e dunque, anche se le galassie più tenui che non rileviamo dominano il numero totale di galassie nell'Universo, non contribuiscono in modo sostanziale alla luminosità del cielo.

Le galassie aventi alti redshift rientrano in un altro argomento già annunciato precedentemente riguardante il potenziale assorbimento della luce da parte di gas, polvere ed altri fattori.

Se consideriamo ora quali galassie possiamo effettivamente vedere, troviamo che le galassie con redshift $z \sim 5$ dovrebbero essere comunque rilevate.

Galassie a redshift maggiori hanno la loro luce spostata a lunghezze d'onda superiori a 700 nm e ai redshift più estremi hanno l'intero settore del blu del loro spettro assorbito in quello che viene chiamata "foresta Lyman-alfa" costituente la somma delle linee spettrali d'assorbimento che derivano dalla transizione Lyman alfa dell'idrogeno neutro nella luce di galassie particolarmente lontane.

A lunghezze d'onda tendenti più al blu di quest'ultime, tutta la luce avrebbe origine nell'ultravioletto che tuttavia verrebbe assorbita da gas e polvere presente all'interno delle galassie ospiti, nel mezzo intergalattico circondante la galassia stessa e lungo la linea collegante la sorgente all'osservatore. Questa luce ultravioletta ionizzerebbe tuttavia l'idrogeno, che poi si ricombinerebbe, emettendo nel nuovo processo nuova luce sotto forma della linea Lyman- α a $121,5 \text{ nm}$ e altre linee più tendenti al rosso. Questa emissione, trovata per lo più nel vicino infrarosso per sistemi a $z > 5$, risulta al di fuori della finestra della luce visibile.

Il metodo di assorbimento rimuove quindi la luce del continuo ultravioletto presente a lunghezze d'onda inferiori al limite di Lyman, e non permette la sua reintroduzione nello stesso intervallo di lunghezze d'onda oppure in lunghezze d'onda più blu, dove rientrerebbe quindi all'interno dell'ottico. Inoltre, parte di questa luce potrebbe anche essere assorbita dalla polvere che, visto che stiamo discutendo galassie ad alto redshift ossia quando

l'Universo aveva al massimo solo pochi *Gyr*, verrebbe poi riemessa nel lontano infrarosso, sempre al di fuori dell'intervallo visibile.

Abbiamo dunque determinato che l'assorbimento della luce da parte di gas e polvere influenza l'oscurità del cielo almeno per quanto riguarda galassie aventi redshift $z \sim 5$.

In realtà è dimostrato che, contrariamente all'intuizione comune, anche un meccanismo attenuante arbitrariamente debole è sufficiente per rendere lo sfondo del cielo piuttosto scuro, indipendentemente dalle dimensioni dell'Universo e dalla sua espansione, sempre che esso operi su larga scala. Inoltre tale attenuazione esiste già sotto forma della natura ondulatoria della luce.

Applicazioni della legge di propagazione della luce mostrano che non è rilevante quanto forte sia l'attenuazione, finché è diversa da 0 si ha un limite effettivo alla quantità di Universo osservabile. Se per esempio consideriamo un Universo di età ~ 15 *Gyr* (anche se le misure più attuali forniscono un valore poco al di sotto di 14 *Gyr*) allora basta un'attenuazione di $9 \times 10^{-25} \text{ dB/m} = 8 \times 10^{-9} \text{ dB per anno luce}$. Realisticamente parlando questa quantità è maggiore della realtà perché non è stata presa in considerazione la diffrazione fornita dai corpi non luminosi, dalla loro gravità, e l'estinzione causata dalla polvere intergalattica nelle nostre vicinanze, che contribuiscono in modo significativo alla luminosità del cielo.

Come precedentemente detto un'attenuazione di questo tipo esiste già ed è causata dall'intrappolamento e dalla diffusione delle onde di diffrazione in successione. Una successione di piccoli angoli di diffrazioni infatti possono sommarsi fino ad una grande deviazione totale dal percorso originario del raggio di luce, ottenendo un cambiamento nell'ampiezza significativo. Per esempio tre incontri con angoli di 60° sono abbastanza per sommarsi nell'inversione del contributo del raggio di luce provocando così un'attenuazione naturale.

Ovviamente questo tipo di attenuazione è più significativa in regioni densamente popolate come all'interno di galassie piuttosto che in regioni sparse presenti tra galassie.

Sia nell'Universo reale che nello scenario di Olbers quindi, la luce proveniente da una sorgente distante situata in linea retta, geometricamente priva di ostacoli, con l'osservatore, viene diminuita dalla diffrazione dovuta ad ostacoli presenti ad di fuori della linea congiungente. Secondo Fraunhofer però questa perdita verrebbe compensata se una quantità sufficiente di luce diffratta da altrove potesse ricongiungersi al percorso congiungente e il

sapere comune suggerisce che le deflessioni ripetute devono essere trattate come una cammino casuale che porta ad una lenta diffusione dei fotoni, cosa che non produrrebbe quindi una riduzione netta della luminosità media. Tuttavia, ci sono problemi con questa visione, perché mentre è ragionevole supporre che gli oggetti diffrattivi siano distribuiti in modo casuale, i loro movimenti grossolani non sono casuali e sono piuttosto lenti in relazione alle distanze interstellari.

Un ulteriore fattore che influenza la luminosità della volta celeste è determinato dalle piccole fonti di radiazioni locali presenti nel nostro sistema solare come la *Kuiper Belt*, situata nella parte esterna del nostro sistema solare, tra le 30 AU e le 55 AU, e contenente diverse migliaia di corpi di svariate dimensioni.

Dopo la scoperta di Plutone nel 1930, molti studiosi sospettarono che il pianeta non fosse l'unico oggetto localizzato oltre l'orbita di Nettuno (anche definito "transnettuniano") e nel 1943 fu per la prima volta ipotizzata da Kenneth Edgeworth, astronomo irlandese, l'esistenza di diversi corpi di più piccole dimensioni causati dalla scarsa densità di materia nella nebulosa solare primordiale, insufficiente per formare dei pianeti ma abbastanza per creare una miriade di corpi minori. Successivamente, nel 1951, Gerard Kuiper, astronomo olandese da cui prende il nome questa regione esterna del nostro sistema solare, speculò sull'esistenza di un simile disco formatosi nei primi stadi evolutivi del sistema solare, costituito da "*resti di ammassi originali che hanno perso molti membri che a loro volta sono diventati asteroidi vaganti, proprio come è accaduto con gli ammassi galattici che si sono dissolti in stelle*".¹¹ Diversi anni dopo, nel 1992, fu scoperto il primo oggetto appartenente alla Fascia di Kuiper (escludendo la luna di Pluto, Charon, scoperta nel 1978), Albion, un pianeta minore. Sino al 2018 sono stati scoperti oltre 2.000 corpi e si sospetta l'esistenza di oltre 100.000 oggetti di dimensioni superiori ai 100 km di diametro.

Questi oggetti, che chiameremo KBO, sono classificati in 3 classi dinamiche:

- KBO classici, con orbite approssimativamente circolari e semiassi maggiori di 41 – 47 AU.
- KBO risonanti, noti anche come Plutini, in risonanza orbitale con Nettuno.
- KBO sparsi, con orbite eccentriche $e \sim 0,5$ e distanze del perielio di 30 – 38 AU.

¹¹ Kuiper, G.P. (1951). "On the origin of the solar system". In Hynek, J.A. (ed.). *Astrophysics: A Topical Symposium*. New York City, New York, US: McGraw-Hill. pp. 357–424.

La massa totale dei KBO più grandi, ossia con raggio $50 - 500 \text{ Km}$, è $\sim 0,1 - 0,2 M_{\oplus}$ per quanto riguarda i KBO classici e risonanti, mentre per quelli sparsi è $\sim 0,05 M_{\oplus}$.

Questo tipo di corpi celesti contribuisce in modo limitato alla luminosità del cielo, per cui non entreremo in dettaglio sulla loro influenza. Basta sapere che misure effettuate a magnitudini apparenti di $\sim 40 - 50$, quindi in punti del cielo molto scuri, mostrano un conteggio elevato di KBO presenti nel nostro sistema solare che a loro volta irradiano in ottico e nel lontano infrarosso in base alla loro dimensione, temperatura ed albedo, mostrando quindi una chiara relazione tra questi¹².

L'oggetto più luminoso della *Kuiper Belt*, e incidentalmente anche il più grande, è Plutone che ha una magnitudine assoluta di $M = -0,45$ e magnitudine apparente di $m = 15,1$.

Se prendiamo ora come riferimento il Sole, troviamo che il cielo notturno è 22 milioni di volte più scuro del cielo diurno e che il Sole è 11 milioni di volte più luminoso della somma di tutte le altre stelle dell'Universo.

Detto questo, osserviamo il problema sull'oscurità della volta celeste sotto un punto di vista aggiuntivo posto dalle possibilità e limitazioni dell'occhio umano, esaminando dunque il problema al contrario di come fatto fino ad ora, ossia partendo dall'occhio e finendo nell'Universo.

L'occhio umano è spesso paragonato ad una macchina fotografica e, mentre i suoi principi di base sono uguali a quelli di una macchina fotografica, ci sono delle differenze sostanziali. La differenza più importante è che l'occhio integra ciò che vede in un periodo di tempo relativamente breve mentre la fotocamera può integrare per un periodo di tempo arbitrariamente lungo, deciso dal fotografo. Tipicamente l'occhio umano ha un momento di relax di circa $0,1 \text{ s}$, significa cioè che se un lampo di luce dura $0,1 \text{ s}$ oppure $0,001 \text{ s}$ il nostro occhio non riesce a distinguerli.

Inoltre c'è bisogno di una quantità di luce minima perchè il nostro occhio riesca a distinguere un oggetto chiaramente. Non tutti gli umani sono uguali ma tipicamente sono richiesti molte migliaia di fotoni perchè il nostro occhio riesca a vedere un oggetto e per quanto riguarda l'astronomia, una persona media riesce a vedere una stella fino alla magnitudine apparente di $6,5$, equivalente a ricevere circa 6500 fotoni/s . Questo vuol dire che se per esempio

¹² Calcoli e misurazioni disponibili in Kenyon, Scott J., and Rogier A. Windhorst. "The Kuiper Belt and Olbers Paradox." *arXiv.org*, 2000, <https://doi.org/10.1086/318885>.

muovessimo il Sole sempre più lontano, arriveremmo ad un punto in cui non lo vedremo più in quanto la quantità di fotoni che arrivano alla nostra retina non sarà sufficiente a stimolarla, il Sole diventerebbe effettivamente invisibile.

E' importante notare che il numero di fotoni al secondo per unità di angolo solido provenienti dal Sole non cambia; quello che effettivamente cambia è il numero totale di fotoni al secondo che raggiungono i nostri occhi.

Un altro importante fattore da considerare è il nostro potere risolutivo, conosciuto anche come acutezza visiva, importante quando cerchiamo di distinguere più oggetti molto vicini tra loro. Come sappiamo infatti, a causa della natura ondulatoria della luce, può esserci della diffrazione che può risultare in un disco di Airy e, se per esempio due stelle vicine nel cielo hanno il loro disco di Airy che si sovrappone, il nostro occhio non riuscirà a distinguerle, vedrà semplicemente un oggetto solo ma di dimensioni più grandi. Generalmente parlando, ogni stella presente in 30 arcsec da un'altra non sarà distinta dal nostro occhio risultando dunque in un unico oggetto più grande, per fare un confronto, la Luna piena è circa 30 arcmin .

Se ora costruiamo un modello del nostro Universo, senza porre limiti della grandezza quindi infinito, e lo riempiamo di stelle simili al Sole in massa e dimensioni anche all'interno del nostro limite di risoltezza, troviamo che il numero di fotoni che raggiungono il nostro occhio sono $\sim 1,6 \times 10^{13} \text{ fotoni/s}$, il che produce un cielo notturno circa 1000 volte più buio del Sole. Ovviamente il nostro cielo notturno è molto più scuro di questo risultato e ciò è dovuto al fatto che abbiamo considerato un Universo infinito.

Se infatti poniamo un limite alla grandezza massima del nostro modello a $\sim 13 \times 10^9 \text{ LY}$, dobbiamo preoccuparci della densità stellare che varia in base alla distanza considerata, da 10^{-8} LY^{-3} per una densità intergalattica a 10^{-3} LY^{-3} per una densità galattica come per la Via Lattea ($2 \times 10^{-3} \text{ LY}^{-3}$). In questo caso anche considerando densità stellare una o due volte più piccole della nostra densità locale risulta facile ottenere un oscurità notturna più significativa. Se per esempio consideriamo la prima stella in linea di vista ad una distanza di 50 LY , e una densità stellare di $2 \times 10^{-4} \text{ LY}^{-3}$, allora il numero di fotoni che arrivano ai nostri occhi risulta $\sim 2 \times 10^5 \text{ fotoni/s}$, considerevolmente meno del modello con Universo infinito. E' importante considerare che il nostro cielo notturno è molto più luminoso dell'esempio

precedente dato che la stella più vicina a noi, Proxima Centauri, dista solamente 4,25 *LY* e che viviamo in una regione della nostra galassia ad alta densità stellare.

Vediamo quindi che risulta relativamente semplice costruire un Universo che porta ad un cielo buio tenendo solamente conto della sensibilità minima dell'occhio umano, il suo potere risolutivo, la dimensione finita delle stelle e la finitezza del nostro Universo.

7. Conclusione

Comprendiamo ora dunque il significato dell'oscurità del cielo. In primo luogo, il paradosso dell'oscurità assumeva implicitamente che la luce delle stelle potesse raggiungerci da qualsiasi distanza, e quindi da qualsiasi tempo nel passato; tuttavia, in un Universo che ha un'età finita, la luce ha avuto a disposizione solo un tempo limitato, per quanto esteso, per viaggiare. Pertanto, non tutte le stelle hanno avuto il tempo di inviare la loro luce fino a noi. In secondo luogo l'Universo si sta espandendo e questa espansione ha l'effetto di diminuire in maniera non indifferente l'energia dei fotoni che provengono da fonti lontane le cui lunghezze d'onda della luce vengono "stirate" fino al punto da renderle completamente invisibili ai nostri occhi.

D'altronde abbiamo visto che la finitezza dell'Universo e la sua espansione continua sono solo 2 tra i diversi fattori che possono influenzare la luminosità dell'abisso spaziale e che in realtà è relativamente semplice ottenere un cielo buio basandosi solamente sulla limitazione dell'occhio umano oppure sul numero ristretto di sorgenti luminose presenti nell'Universo. La risoluzione del paradosso di Olbers ha quindi portato una rivoluzione totale della nostra comprensione dell'Universo, sia per quanto riguarda le scale locali che sulle enormi scale, a partire dalla concezione newtoniana di Universo e gravità, e finendo con un modello cosmologico interamente nuovo illustrante la creazione e lo sviluppo fino ai tempi attuali di ciò che chiamiamo l'Universo moderno.

Bibliografia

1. Il grande spettacolo del cielo, Marco Bersanelli, Sperling & Kupfer, 2016.
2. HARRISON, E. Olbers' Paradox. *Nature* 204, 271–272 (1964)
<https://doi.org/10.1038/204271b0>.
3. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 128, Issue 1, June 1964, Pages 33–47, <https://doi.org/10.1093/mnras/128.1.33>.
4. Assis, A. K. T. "On Hubble's law of redshift, Olbers' paradox and the cosmic background radiation." *Apeiron* 12.10 (1992).
5. Tipler, Frank J. "Johann Madler's resolution of Olber's Paradox." *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 29, NO. 3/SEP, P. 313, 1988 29 (1988): 313.
6. Wesson, P.S. The extra-galactic background light: A modern version of Olbers' paradox. *Space Sci Rev* 44, 169–176 (1986), <https://doi.org/10.1007/BF00227231>.
7. E. R. Harrison, Olbers' Paradox and the Background Radiation Density in an Isotropic Homogeneous Universe, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 131, Issue 1, December 1965, Pages 1–12, <https://doi.org/10.1093/mnras/131.1.1>.
8. Maddox, John. "Olbers' paradox has more to teach." *Nature* 349.6308 (1991): 363.
9. Sarkar, Subir, and Bryn Jeffries. "The solution to Olbers' paradox." *Physics World* 15.10 (2002): 17.
10. Arpino, Mauro, and Fabio Scardigli. "Inferences from the dark sky: Olbers' paradox revisited." *European journal of physics* 24.1 (2002): 39.
11. Guruprasad, V. "An optical solution of Olbers' paradox." *arXiv preprint astro-ph/9909340* (1999).
12. Guy. S. M. Moore, Resolution of Olbers' Paradox for Fractal Cosmological Models, *Progress of Theoretical Physics*, Volume 87, Issue 2, February 1992, Pages 525–528, <https://doi.org/10.1143/ptp/87.2.525>.
13. Couture, Gilles. "Olber's paradox revisited in a static and finite Universe." *European journal of physics* 33.3 (2012): 479.
14. Wesson, P. S. "Olbers' paradox in astronomy: history, nature and resolution." *Science Progress (1933-)* (1989): 133-146.

15. Ranzan, Conrad. "Olbers' Paradox Resolved for the Infinite Nonexpanding Universe." *American Journal of Astronomy and Astrophysics* 4.1 (2016): 1-14.
16. DANDEKAR, THOMAS. "Olbers' Paradox." *Nature (London)*, vol. 351, no. 6321, 1991, pp. 21–21, <https://doi.org/10.1038/351021b0>.
17. LEE, JAMES B. "Olbers' Paradox in Concert Halls?" *Nature (London)*, vol. 352, no. 6332, 1991, pp. 202–202, <https://doi.org/10.1038/352202a0>.
18. Mattila, Kalevi, and Petri Väisänen. "Extragalactic Background Light: Inventory of Light Throughout the Cosmic History." *Contemporary Physics*, vol. 60, no. 1, 2019, pp. 23–44, <https://doi.org/10.1080/00107514.2019.1586130>.
19. Stinner, Arthur. "Why Is the Sky Dark at Night?: Teaching the Evolution of Our Models of the Cosmos." *Interchange (Toronto. 1984)*, vol. 45, no. 3-4, 2014, pp. 123–31, <https://doi.org/10.1007/s10780-015-9244-8>.
20. "O Is for Olbers' Paradox." *Wittgenstein's Beetle and Other Classic Thought Experiments*, Blackwell Publishing Ltd, 2005, pp. 62–64, <https://doi.org/10.1002/9780470776551.ch15>.
21. Kenyon, Scott J., and Rogier A. Windhorst. "The Kuiper Belt and Olbers Paradox." *arXiv.org*, 2000, <https://doi.org/10.1086/318885>.
22. Conselice, Christopher J., et al. "THE EVOLUTION OF GALAXY NUMBER DENSITY AT $z < 8$ AND ITS IMPLICATIONS." *The Astrophysical Journal*, vol. 830, no. 2, 2016, p. 83–, <https://doi.org/10.3847/0004-637X/830/2/83>.
23. de Oliveira, Samuel Rocha. "Por Que o Céu é Escuro à Noite? Considerações Geométricas Com Um Olhar Histórico e Pedagógico Do Paradoxo de Olbers." *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 42, 2020, <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2020-0381>.
24. Molaro, Paolo, and Alberto Cappi. "Edgar Allan Poe: The First Man to Conceive a Newtonian Evolving Universe." *arXiv.org*, 2015, <https://doi.org/10.48550/arxiv.1506.05218>.
25. WESSON, P. S. "Olbers's Paradox and the Spectral Intensity of the Extragalactic Background Light." *The Astrophysical Journal*, vol. 367, no. 2, 1991, pp. 399–406, <https://doi.org/10.1086/169638>.
26. Roos, Matts. "Expansion of the Universe - Standard Big Bang Model." *arXiv.org*, 2008, <https://doi.org/10.48550/arxiv.0802.2005>.

27. Gentry, Robert V. *New cosmic center Universe model matches eight of Big Bang's major predictions without the FL paradigm*. No. EXT-2003-022. 2003.
28. Jones, D. Olbers' uproar. *Nature* 384, 29 (1996), <https://doi.org/10.1038/384029a0>.