



ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI

**ARCHEOLOGIA DELL'UNIVERSO:
DAL PRESENTE AL BIG BANG ATTRAVERSO
LE IMMAGINI DEI PIÙ POTENTI TELESCOPI**

MARIA FRANCESCA MATTEUCCI

Nel gennaio del 1610 Galileo Galilei puntò il suo cannocchiale verso la Via Lattea e scoprì che era fatta da miriadi di stelle, come scrisse nel *Sidereus Nuncius*: “*nihil aliud quam innumerarum stellarum coecervatim consitarum congeries*”. Prima di lui, si pensava che la Via Lattea o Galassia (dal greco

“gala”) fosse fatta di latte! Questa credenza proveniva dal mito greco che narra che la Via Lattea nacque dal latte perso da Ercole mentre veniva allattato dalla dea Hera, la quale allontanò il bambino dal suo seno perché era il figlio avuto da Zeus con una ninfa.

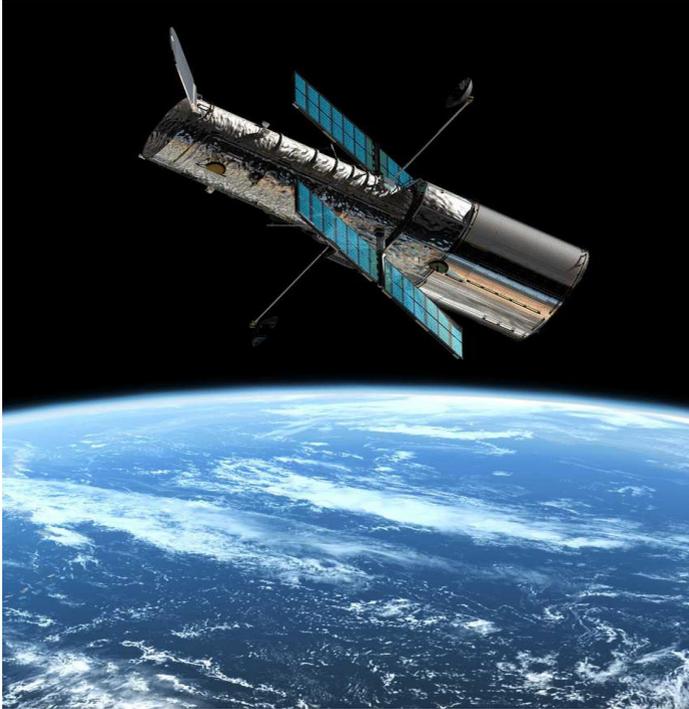
In altre culture la Via Lattea era: il grano seminato da Iside (Egitto), un grande fiume (Arabia) oppure polvere di stelle fatta di oro (Incas).

Con Galileo nacque la scienza ed il metodo scientifico moderno. Da allora in poi, la Fisica ha fatto passi da gigante e l’Astronomia, che ne fa parte, si è evoluta di pari passo.

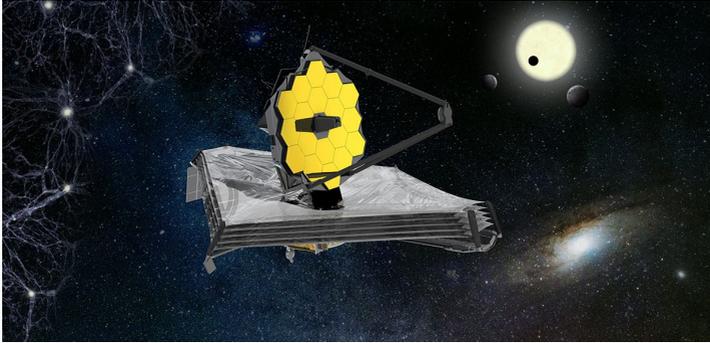
L’evoluzione dell’Astronomia è stata stimolata dalla costruzione di telescopi ottici sempre più grandi e più precisi. I telescopi ottici, infatti, constano di uno specchio che raccoglie la luce che viene poi convogliata al suo centro dove si trovano strumenti in grado di analizzarla, come gli spettroscopi. Più è grande lo specchio di un telescopio e più indietro nel tempo e nello spazio riusciamo ad osservare, poiché maggiore è la quantità di luce che riusciamo a raccogliere. I telescopi, al momento presente, si trovano a terra ma anche orbitanti nello spazio: questi ultimi servono ad evitare l’assorbimento delle lunghezze d’onda molto corte e molto lunghe da parte

dell'atmosfera terrestre, ma anche a migliorare la visione nella banda delle lunghezze d'onda ottiche. Fu grazie al telescopio di William Herschel, nel XVIII secolo, che si capì che la Via Lattea o Galassia è un insieme di stelle, di cui il sistema solare fa parte, disposte su un disco. A quell'epoca si pensava che la Terra fosse al centro di questo sistema mentre ora sappiamo che si trova alla periferia del disco, e meno male, perché al centro della nostra Galassia si trova un buco nero da 5 milioni di masse solari.

Agli inizi del XX secolo, nel 1920, ci fu un Grande Dibattito ("Great Debate") tra due famosi astronomi americani dell'epoca, Harlow Shapley e Heber Curtis. Harlow Shapley sosteneva che gli oggetti che allora venivano chiamati *nebulae* fossero piccoli e si trovassero entro i confini della nostra Galassia, mentre Heber Curtis credeva che fossero altre galassie indipendenti dalla nostra.

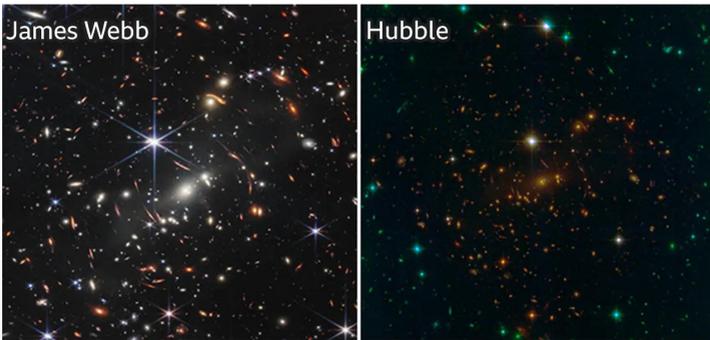


Il telescopio spaziale Hubble. Credito: European Space Agency



Il telescopio spaziale James Webb. Credito: NASA

SMACS 0723: James Webb v Hubble



Source: Nasa/Esa/CSA/STScI

B B C

Confronto tra le immagini della stessa porzione di cielo del telescopio Hubble e del telescopio James Webb.

Col progredire delle tecnologie astronomiche si arrivò al 1929, anno in cui l'americano Edwin Hubble puntò il suo telescopio a Mount Palomar (California) sulle *nebulae*. Il problema, fino ad allora, era stata la misurazione delle distanze astronomiche, fondamentale per interpretare l'Universo. Hubble, per la prima volta, misurò con precisione le distanze di queste *nebulae* e capì che erano lontanissime e non potevano far parte della Galassia, erano infatti altre galassie, risolvendo così il Grande Dibattito. La misura delle distanze avvenne attraverso l'utilizzo di una legge fisica, trovata dall'astronoma di Harvard Henrietta Leavitt nel 1912, che lega la luminosità delle stelle Cefeidi al periodo della sua variazione (le Cefeidi sono infatti stelle variabili). Nello scoprire le altre galassie, Hubble scoprì anche che si allontanano da noi con una velocità proporzionale alla loro distanza, e fu così che nacque la teoria dell'Universo in espansione, detta anche teoria del Big Bang. Bisogna notare che non sono le galassie ad allontanarsi con moto proprio, ma sono spinte dallo spazio in espansione. Va anche detto, ad onor del vero, che un paio di anni prima che Hubble facesse questa scoperta, un abate belga, Pierre Lemaitre, aveva intuito la possibilità dell'Universo in espansione ma aveva pubblicato la sua teoria in un oscuro

giornale belga in lingua francese. Al momento presente, il lavoro di Lemaitre è stato rivalutato e la legge di Hubble è stata ridenominata “legge di Hubble- Lemaitre”.

Ora sappiamo che le galassie contengono dalle centinaia alle migliaia di miliardi di stelle e che le galassie nell’Universo sono anch’esse centinaia di miliardi e forse anche di più. Queste scoperte le dobbiamo ai moderni telescopi sia da terra che dallo spazio. Riguardo a questi ultimi ricordiamo soprattutto il telescopio spaziale Hubble, lanciato in orbita nel 1990 ed ancora attivo, e suo figlio, il telescopio spaziale James Webb, lanciato in orbita il giorno di Natale del 2021.



La galassia NGC 7496 vista dal telescopio Hubble e dal telescopio James Webb. Credits: Reddit.

Il telescopio Hubble è stato il primo telescopio ottico ad osservare l'Universo senza il filtro dell'atmosfera terrestre e ci ha inviato immagini mozzafiato. Orbita ancora a 500 km sopra la nostra testa ed impiega circa 90 minuti a fare un giro intorno alla Terra. James Webb osserva anche la luce nella banda infrarossa ed è deputato a scoprire le prime stelle e le prime galassie che si sono formate nell'Universo. Le immagini che ci ha inviato e ci invia, da un'orbita a 1,5 milioni di km dalla Terra, sono ancora più nitide ed esplorano un Universo ancora più lontano nel tempo di quanto faccia il telescopio Hubble. Il fatto che osservi la luce infrarossa è perché la luce delle galassie più lontane, quelle che si allontanano più velocemente, ci arriva molto più rossa di quando è stata emessa. Questo fenomeno di arrossamento è dovuto all'aumento della lunghezza d'onda della luce emessa da un corpo che sta allontanandosi da noi e in questo caso il moto è l'espansione dell'Universo. Lo spostamento verso il rosso della luce emessa da galassie che si allontanano da noi è noto col nome di "redshift" ed è usato per misurare la distanza delle galassie stesse. Ricordiamo qui che un anno luce è una misura di spazio, ovvero è lo spazio percorso dalla luce in un anno alla velocità di 300.000 km al secondo.

Le galassie sono state classificate da Hubble in tre grandi gruppi: le galassie ellittiche, le galassie spirali (a cui appartiene a Via Lattea) e le galassie irregolari, e questa classificazione si riferisce alla loro morfologia ma anche al loro contenuto stellare. Le galassie ellittiche hanno forme sferoidali, le galassie spirali sono dominate da un disco di stelle dal cui centro si dipartono delle braccia spirali, mentre le irregolari non hanno una forma precisa. Le ellittiche sono fatte di sole stelle, le spirali per la maggior parte da stelle ma anche da gas e infine le irregolari sono dominate dal gas. Questo indica che le diverse galassie hanno avuto storie di formazione stellare differenti.

Si chiama *archeologia galattica* lo studio delle proprietà delle galassie a noi vicine attraverso la composizione chimica delle loro stelle e del loro gas, da cui partiamo per ricostruire all'indietro la loro storia di formazione ed evoluzione nel tempo. Questa disciplina consente anche di capire la formazione degli elementi chimici che conosciamo, quelli della tavola di Mendeleev.



Extremely Large Telescope (ELT).

Credits: European Southern Observatory (ESO).

Occorre partire da studi dettagliati di come evolvono le stelle e di come si formano gli elementi chimici al loro interno. Sappiamo che durante il Big Bang, l'evento che ha dato inizio al nostro Universo, si formarono solo elementi leggeri quali l'idrogeno, l'elio, il deuterio ed il litio. Poi, a causa della espansione dell'Universo, la densità e la temperatura della materia barionica erano troppo basse per consentire ulteriori reazioni di fusione nucleare. Pertanto, tutti gli altri elementi chimici, dal carbonio all'uranio ed oltre, sono stati forgiati

dentro le stelle. Poiché tra quegli elementi ci sono quelli biogenetici, è chiaro che noi siamo *figli delle stelle*.

Le stelle nascono, vivono e muoiono e alla loro morte restituiscono al mezzo interstellare i prodotti dei bruciamenti nucleari avvenuti al loro interno. In questo modo la concentrazione di elementi pesanti cresce nel mezzo interstellare e tale processo è noto col nome di evoluzione chimica galattica. Negli ultimi 12 miliardi di anni, la concentrazione degli elementi pesanti è aumentata di 1000 volte.

Attraverso il confronto tra i risultati di dettagliati modelli teorici, che cercano di riprodurre la storia evolutiva delle galassie considerando la storia di formazione stellare, la nucleosintesi e vari altri processi fisici, ed i dati osservativi provenienti dalla spettroscopia delle stelle e del gas, riusciamo non solo a risalire alla storia delle galassie ma anche all'origine stellare degli elementi chimici.

All'interno delle stelle, durante la loro vita, si susseguono una serie di reazioni di fusione nucleare, che partendo dall'idrogeno arrivano fino alla formazione del ferro. Elementi più pesanti del ferro non possono venire prodotti da reazioni di fusione (atomi che si uniscono per formarne uno più

pesante con emissione di energia), poiché la loro formazione richiederebbe una sorgente di energia esterna. In altre parole, noi fisici diciamo che il nucleo di ferro possiede la massima energia di legame per nucleone e quindi nuclei più pesanti tendono a spaccarsi piuttosto che ad unirsi. Pertanto, tutti gli elementi più pesanti del ferro vengono sempre prodotti negli interni stellari ma attraverso reazioni di cattura di neutroni su nuclei pesanti come appunto il ferro.

Dal confronto dei modelli con le osservazioni, abbiamo capito che gli elementi pesanti quali carbonio, ossigeno, magnesio, silicio e calcio (detti elementi-alfa) sono prodotti soprattutto dalle stelle massive che esplodono come supernovae da collasso del nucleo, mentre il ferro proviene soprattutto da nane bianche (cadaveri densissimi di stelle come il Sole) che esplodono in un sistema binario (supernova di tipo Ia), mentre gli elementi molto pesanti come l'oro sono prodotti dalla fusione di due stelle di neutroni (cadaveri iperdensi di stelle massive), e anche durante le esplosioni di supernovae.

Perché le stelle muoiono? Ogni stella arriva alla fine di una sequenza di reazioni di fusione che può arrestarsi anche ad elementi più leggeri del ferro, quali il carbonio. Ciò dipende

dalla massa iniziale delle stelle da cui a sua volta dipende la capacità di raggiungere alte temperature nel nucleo.

Ad esempio, stelle come il nostro Sole non riescono ad accendere combustibili nucleari oltre il carbonio e muoiono raffreddandosi e diventando sempre più dense. Le stelle massive invece accendono tutti i combustibili nucleari fino al ferro. Quando si trovano con un nucleo di ferro, questo inizia a contrarsi scaldandosi, ma il ferro non può subire ulteriori reazioni di fusione e così continua a contrarsi fino a trovare un equilibrio o come stella di neutroni o come buco nero, dopo aver espulso il mantello esterno nel mezzo interstellare.

I cadaveri stellari sono quindi quel che resta, sia dopo la perdita tranquilla del mantello esterno della stella sia dopo l'esplosione di una supernova. Le nane bianche sono i cadaveri di stelle con masse che vanno da quella del Sole a circa 8 volte maggiore, sono oggetti molto densi e compatti (un fagiolo che pesi come un camion); le stelle di neutroni sono quel che resta, dopo l'espulsione del mantello, di stelle con masse maggiori di 8 volte la massa del Sole ma non più grandi di 30-40 volte la massa del Sole. Sono oggetti compattissimi, ancora di più delle nane bianche (immaginate una massa di una volta e mezza quella del Sole in un raggio di

circa 10 Km), e la loro densità è come quella di una goccia di pioggia che contenga tutta la popolazione mondiale! I buchi neri sono i cadaveri di stelle molto massicce (di massa maggiore di 30-40 volte la massa del Sole) e sono oggetti che in Fisica si definiscono a densità infinita.

I telescopi spaziali come Hubble hanno osservato la nascita e la morte delle stelle, ma anche le galassie lontane e lontanissime, fino a 13 miliardi di anni fa (l'età stimata dell'Universo è circa 13.7 miliardi di anni). Il telescopio James Webb sta producendo immagini spettacolari di grandi campi del cielo dove si vede una densità di galassie mai immaginata prima. James Webb ci sta mostrando un Universo lontano come non l'avevamo mai visto prima e si sta avvicinando al tempo in cui si formarono le prime stelle e le prime galassie che illuminarono di nuovo l'universo dopo le "dark ages".

La storia andò così: a 300.000 anni dopo il Big Bang, gli atomi di idrogeno e degli altri elementi leggeri si ricombinarono (forse sarebbe meglio dire si combinarono), poiché fino ad allora la materia si trovava in uno stato ionizzato (elettroni separati dai nuclei degli atomi), la radiazione si disaccoppiò dalla materia e tale radiazione è ancora presente tra noi, è la radiazione di fondo cosmico nella banda delle microonde,

corrispondente ad una temperatura bassissima, di pochi gradi superiore allo zero assoluto, che è -273 gradi centigradi. Tale radiazione si è raffreddata così tanto a causa del suo lungo tragitto di più di 13 miliardi di anni.

Questa radiazione di fondo cosmica è molto importante poiché ci porta le informazioni sulla materia al momento del disaccoppiamento e contiene, sapendo ben interpretare, la spiegazione di come si sono formate le prime galassie nonché i cosiddetti parametri dell'Universo. Tale informazione la si deduce dalle piccolissime fluttuazioni in temperatura di una radiazione peraltro molto isotropa; da questo studio si è riusciti a dedurre i parametri dell'Universo, ovvero la sua composizione, che appare essere dominata al 68% da una forma sconosciuta di energia ("dark energy"), costituita per il 27% da una forma sconosciuta di materia oscura ("dark matter"), e solo per il 5% dalla materia che conosciamo. Questa sconvolgente scoperta è stata confermata anche dalla legge di Hubble-Lemaitre misurata per oggetti molto lontani, in particolare grazie alle luminosissime supernovae Ia.

Che cos'è l'energia oscura? Non lo sappiamo, ma sappiamo che domina l'Universo e produce un'accelerazione nella sua espansione. Cosa è la materia oscura? Ancora non l'abbiamo

capito ma misuriamo gli effetti di questa materia oscura che è presente in tutte le galassie e gli ammassi di galassie (insiemi di più di 1000 galassie).

Ritorniamo al momento del disaccoppiamento: da allora in poi e per circa 1 miliardo di anni l'Universo si è trovato al buio e tutto era immerso in una nebbia opaca di idrogeno, poiché i fotoni erano fuggiti. Le dark ages si conclusero con la luce delle prime stelle e delle prime galassie.

È proprio questo momento in cui l'Universo si illumina di nuovo che noi vogliamo studiare con il telescopio James Webb e con altri telescopi che saranno costruiti in futuro.

Ad esempio, è in costruzione il più grande telescopio ottico da terra che sia mai stato pensato, l'Extremely Large Telescope (ELT), da parte dell'European Southern Observatory (ESO) in Cile nel deserto di Atacama, dove già si trova il very Large Telescope (4 telescopi con uno specchio da 8 metri di diametro), ciascuno sempre dell'ESO. Questo unico enorme telescopio avrà uno specchio con un diametro di 39 metri! Riuscirà a vedere proprio fino alle prime stelle. Si immagina che la sua risoluzione è tale che consentirebbe di vedere un cucchiaino a New York stando seduti in un caffè di Roma.

Tutti i moderni telescopi già esistenti, contando anche i telescopi spaziali che misurano le radiazioni che non arrivano sulla Terra, come i telescopi che vedono i raggi X, Gamma e le microonde, hanno consentito importanti scoperte negli ultimi anni. Ne ricordo alcune: COBE, Boomerang, WMAP e Planck hanno misurato le fluttuazioni del fondo cosmico nelle microonde, il telescopio Hubble ha consentito di rivelare enormi buchi neri al centro delle galassie, di costruire la legge di Hubble-Lemaitre per oggetti lontanissimi, di associare i lampi gamma ("Gamma Ray Bursts") a regioni che contengono stelle massicce che esplodono come supernovae nelle galassie, ha consentito di misurare massa e orbita di pianeti extra-solari. Più recentemente, le onde gravitazionali, ipotizzate da Einstein nel 1916 sono state rivelate grazie alla collaborazione Ligo-Virgo (un sistema di interferometri a terra) e di capire che sono originate dalla fusione di oggetti molto densi, quali le stelle di neutroni e i buchi neri. In futuro, saremo in grado di rivelare anche onde gravitazionali di bassa frequenza grazie a LISA, un interferometro spaziale che consiste di 3 satelliti, piazzati ai vertici di un triangolo equilatero, e separati l'uno dall'altro da una distanza di 2,5 milioni di Km. Si sta al momento progettando e discutendo

di un altro telescopio da terra, a guida italiana (INFN), che misurerà onde gravitazionali e si chiamerà Einstein.

Anche lo studio dei neutrini avrà un grande sviluppo in futuro grazie all'esperimento Super-Kamiokande, che osserverà i neutrini di bassa energia emessi durante le esplosioni di supernovae.

Cosa ci resta da capire? Tantissime cose, ma cito le più eclatanti: la natura della energia oscura e della materia oscura, la formazione delle prime stelle e prime galassie, l'evoluzione delle galassie e degli ammassi di galassie.

C'è ancora tutto un Universo da scoprire e forse non è nemmeno l'unico!