

Ginevra Trinchieri – 22 febbraio

Cos'è una galassia.

Qualcuno pensa che Hollywood si possa definire una galassia perché contiene tante stelle che gravitano attorno a un nucleo; in realtà noi ci occupiamo di un tipo diverso di galassie però la definizione è sostanzialmente corretta: cioè una galassia è un insieme di stelle (celesti) alle quali poi noi aggiungiamo gas, polveri e sistemi planetari che sono legati a ciascuna stella, con l'aggiunta di un elemento chiamato materia oscura, tutto legato dalla gravità. Tutti questi elementi insieme ruotano attorno a un nucleo. Quindi la definizione sostanzialmente non è sbagliata anche se gli elementi non sono le stelle di Hollywood.

La Via Lattea è la nostra Galassia: è la galassia per antonomasia infatti in letteratura la si trova scritta con la maiuscola sia che si usi in Via Lattea sia che si usi in Galassia. Ed è uno spettacolo abbastanza impressionante se uno riuscisse a vederlo come lo vedono dalle Hawaii piuttosto che dai deserti del Cile, in cui si vede questa curiosa striscia di stelle e in questo caso si vedono anche le altre due nubi di Magellano, le due galassie più vicine alla nostra galassia, che sono ben distinte e che sono visibili abbastanza bene ad occhio nudo. C'è tutta una letteratura e una mitologia legata alla Via Lattea: non se ne è occupata soltanto la mitologia greca bensì molte delle antiche civiltà l'avevano osservata e chiamata "fiume d'argento", "fiume celeste", "via della paglia"; ogni popolo aveva inventato una leggenda o storia della nascita della Via Lattea, della Galassia come di qualcosa di bello, di meraviglioso. A me piace molto quella del Sudafrica: una ragazzina ha buttato le ceneri e i lapilli di un fuoco acceso in cielo perché si era un po' arrabbiata con la mamma: questo mi sembra un comportamento molto umano e molto naturale di una figlia adolescente ...

Come sono fatte le galassie?

Le galassie hanno delle forme che avete già visto e sulle quali ritorneremo: sono sostanzialmente o ellittiche o spirali o irregolari; hanno un nucleo, una parte centrale attorno al quale tutto ruota. A volte si possono presentare con dei getti nucleari. Hanno un alone di stelle più o meno sferico. Se sono spirali, sono contraddistinte dalle braccia a spirale e queste braccia stanno su un disco che si vede molto più chiaramente se la galassia viene vista di taglio rispetto a vederla di faccia: di taglio è quando presenta il disco lungo la linea di vista, di faccia è quando si vedono le strutture a spirale - questa di faccia, questa è di taglio, questa è una condizione intermedia questa è una condizione di taglio con un grosso alone visibile anche in questo caso.

Di che cosa è fatta?

È fatta di tutti quegli elementi che avete visto fino ad oggi: sostanzialmente di stelle che possono essere calde, luminose e giovani, le stelle blu che si trovano per esempio negli ammassi aperti, di stelle fredde di colore giallo o giallo rosso che sono più simili per esempio al nostro sole, che sono distribuite o nel campo oppure possono essere raggruppate negli ammassi globulari; ciascuna di esse potrebbe avere un sistema planetario - non sappiamo ancora se tutte le stelle hanno un sistema planetario ma potenzialmente tutte le stelle lo potrebbero avere - Oltre a questo ci sono nubi di gas; le nubi di gas che possono essere freddi, tiepidi o caldi: per freddi si intende veramente freddi: -100° / -200° C, Gas tiepidi hanno temperature dell'ordine di 10.000° sostanzialmente sono delle grosse nubi di gas ionizzato, oppure molto caldo dell'ordine di milioni di gradi che riusciamo a rivelare con strumentazione X.

Altro elemento è la polvere: può essere un elemento disturbante, di assorbimento, come la polvere della nostra esperienza comune che opacizza qualunque cosa su cui si deposita e quindi crea delle bellissime forme: per esempio la nebulosa della testa di cavallo, dove si vede proprio l'assorbimento dovuto alle

polveri che sono distribuite con una forma di testa di cavallo. Oppure possono essere visibili come emissioni nella banda infrarossa, polveri che sono state riscaldate e quindi a loro volta riemettono .

Le galassie come tali sono abbastanza recenti : le conosciamo come strutture esterne alla nostra solo da meno di 100 anni. Galileo per primo è riuscito a distinguere attraverso l'uso del telescopio le singole stelle in queste "nuvole": per cui aveva capito che le Nebulae sono in realtà conglomerati di stelle che l'occhio non è riuscito a distinguere, ma siamo ancora abbastanza lontani dal concetto di galassia. Se ne era occupato Giordano Bruno parlando dei tanti innumerevoli, innumerabili mondi - probabilmente lui pensava più a una serie di tante terre piuttosto che tante galassie però non conosco abbastanza la filosofia e la letteratura su Giordano Bruno per essere certa di quello che dico. Messier è un personaggio importante perché ci ha lasciato un catalogo, che noi usiamo ancora oggi per indicare galassie note, vicine e famose: ad. Es M51, M31 - trentunesimo oggetto del catalogo di Messier ecc.

I primi esempi che abbiamo di disegni di queste nebulose vengono da Lord Rosse, un conte irlandese che aveva disegnato la forma di questi oggetti; alcuni sono risultati poi essere effettivamente galassie e altri sono risultati essere nebulose della nostra galassia.

Il confronto con le stesse immagini prese con telescopi moderni ci fa vedere come avesse in effetti trovato i tratti caratteristici di queste galassie e tutto sommato aveva fatto un buon lavoro; queste sono le prime immagini che noi abbiamo delle galassie.

Perché dico che sono degli oggetti abbastanza recenti?

Perché fino intorno agli anni '20 (1920) non c'era la certezza che questi oggetti fossero degli oggetti fuori dalla nostra galassia; si sapeva che erano degli agglomerati di stelle, con forme precise, però molti sostenevano che erano degli agglomerati di stelle della nostra galassia.

La svolta fu legata alla galassia di Andromeda o M31, che è qui raffigurata in una immagine dell'epoca, con i telescopi dell'epoca. Edwin Hubble studiando bene questa galassia si accorse di questa stellina in alto piccolissima e che - lui descrive - è una stella variabile; confrontando le osservazioni notte dopo notte si era reso conto che non solo era una stella variabile, ma era una stella variabile un po' particolare. In questa immagine si vede la stessa stella notata da, che è stato dedicato a questo signore ovviamente con una risoluzione diversa, una profondità di campo diversa ma sostanzialmente si vede che questa stella varia nel tempo; e questo cosa vuol dire?

Sostanzialmente ci permette di stabilire con una ragionevole certezza la distanza tra noi e quella stella; questo perché erano state trovate delle stelle speciali, che sono le stelle variabili Cefeidi, che variano di intensità con una periodicità. Cioè nel tempo la luminosità della stella varia con un periodo ben definito e tanto più è corto questo periodo tanto più sono intrinsecamente deboli queste stelle; cioè esiste una relazione tra la luminosità della stella e il suo periodo; per cui se tutte le stelle di tipo cefeide si comportano in questo modo noi possiamo usarle come candela campione. Questo vuol dire che, data che sappiamo qual è la luminosità ma la osserviamo con una intensità molto più bassa, sappiamo che questo è dovuto al fatto che è distante. Questo ci permette di dire, ha permesso di dire a Hubble, che misurando la luminosità vista per questo oggetto e misurando il periodo di quel oggetto [quindi definendo che è una stella cefeide], si risale alla luminosità vera della stella; confrontando la luminosità che la stella dovrebbe con la intensità misurata si ricava la distanza. Facendo questo ragionamento Hubble si rese conto che questa stella era ad una distanza dell'ordine di 700 Kiloparsec quando la nostra galassia è grande solo 30 kpc quindi la stella e M31 erano fuori dalla Via Lattea - non so se vi ricordate che i Kiloparsec sono una unità di misura comoda

per noi perché così usiamo dei numeri piccoli; ma un parsec corrisponde a 3 con 18 zeri centimetri e corrisponde anche circa a 1 anno luce cioè lo spazio che la luce percorre in un anno.

Così si stabilì senza grossi dubbi che Andromeda era fuori dalla nostra galassia; allora se Andromeda è fuori dalla nostra galassia allora forse anche le altre, molti degli altri oggetti nebulosi sono fuori dalla nostra galassia. Non tutti sono fuori dalla nostra galassia, ma molte delle nebulose, anche tra quelle catalogate da Messier sono oggetti extragalattici.

Quindi le galassie sono sistemi di gas e polveri, materia oscura, stelle, in rotazione attorno proprio al nucleo. Dimensioni di 30 kpc di diametro; una luminosità che è dell'ordine di 10^9 - 10^{12} luminosità solari - per ricordarvi la luminosità del sole è un'altra delle unità che noi usiamo e vale 4×10^{33} erg al secondo, che corrisponde a 4×10^{29} lampadine da 100 W. Hanno delle masse che variano da 10^{10} a 10^{13} masse solari - di nuovo si usa la massa del sole come numero comodo di riferimento e vale 2×10^{33} g.

La Via Lattea è una galassia tipica, contiene 400 miliardi di stelle, ha una luminosità tipica delle altre galassie; la nostra è una galassia abbastanza normale, niente di speciale non è tra le più brillanti non è tra le più deboli è una galassia a spirale ha un diametro di 30 kiloparsec e uno spessore di soltanto 300 parsec. Vi ha già fatto vedere Gabriele Ghisellini che noi siamo in una regione periferica del disco. Se potessimo vederci da fuori probabilmente vedremo una galassia che assomiglia a questo oggetto: però ricordiamoci che noi ci siamo dentro e questo è un vantaggio e uno svantaggio. Da dentro possiamo osservare tutto ciò che ci circonda molto bene perché è tutto molto vicino, è tutto molto più vicino di quello che possiamo fare studiando le altre galassie, però ci manca la prospettiva dal di fuori e quindi per riuscire a capire poi esattamente che cosa stiamo studiando abbiamo bisogno di studiare anche le altre galassie e di fare dei paragoni, dei paralleli per mettere insieme i due tipi di informazione: i dettagli che abbiamo dalla nostra galassia e invece la visione più globale, tridimensionale, dall'alto, ci viene dalle altre galassie.

Le galassie sono degli oggetti complessi perché sono formati da tante cose e quando noi osserviamo, osserviamo l'insieme di queste cose: e quindi con le osservazioni dobbiamo riuscire sia a interpretare quali sono gli ingredienti, sia a capire come questi ingredienti messi insieme interagiscono, da dove sono partiti, come mai sono quelli che vediamo oggi, perché le galassie che osserviamo oggi sono fatte proprio così e ovviamente ci chiediamo anche se riusciamo anche a capire che cosa succederà di quello che vediamo oggi nel futuro. Per fare questo ci vogliono alcuni ingredienti abbastanza semplici che comincio a introdurre: per prima cosa dobbiamo capire quanto sono distanti da noi, per riuscire a capire quali sono le loro proprietà intrinseche: la distanza serve per sapere le dimensioni, sapere quanta luce emettono, sapere che tipo di luce emettono. La morfologia è uno strumento che ci aiuta in parte a capire come sono fatte, come vedremo più avanti... è importante anche sapere dove vivono perché se vivono in un ambiente denso o se vivono in un ambiente rarefatto hanno più o meno occasioni di incontrare dei loro simili e quindi questo può portare anzi porta a delle conseguenze che possono essere anche disastrose; è importante anche riuscire a studiare bene l'universo locale perché esattamente come noi trasferiamo da quello che sappiamo della nostra galassia verso le altre galassie e viceversa così noi trasferiamo quello che impariamo dell'universo locale all'universo distante, per cercare di capire meglio come è fatto l'universo locale e cercare di capire meglio come è fatto l'universo distante, passare da come era l'universo a come è oggi, cercando di capire cosa è successo nel frattempo.

Come si misurano le distanze delle galassie? Le tecniche per misurare distanze che si usano per oggetti della nostra galassia [parametri ad esempio la parallasse] non riescono a misurare le distanze di oggetti al di fuori della nostra Galassia.

Si possono usare sostanzialmente due metodi di base. Uno è usare delle candele standard: come aveva fatto Edwin Hubble nel 1920, questo metodo consiste nell' individuare degli oggetti particolari di cui sappiamo esattamente la natura e quindi sappiamo con precisione la luminosità. Misurando il loro flusso, cioè la "brillanza" dell'oggetto come noi lo riveliamo dai nostri strumenti, e confrontando con la luminosità che noi sappiamo che questi oggetti dovrebbero, riusciamo a trovare qual è la distanza. Il problema di questi oggetti è che non sempre si trovano e si riescono a misurare i valori di candele standard nella galassia in questione, non sempre le candele standard risultano essere davvero standard: anche le cefeidi stesse hanno creato dei problemi con le misure di distanze, perché in un primo tempo non ci si era accorti che esistono due tipi di cefeidi che seguono due leggi diverse e quindi non considerarle in modo corretto e separatamente ha portato a misure di distanza sbagliate. Con l'aumentare della distanza diventa sempre più difficile riconoscere le candele standard nelle galassie perché diventano sempre più deboli quindi sempre cresce la difficoltà di capire la esatta natura degli oggetti.

Un altro modo per misurare le distanze delle galassie è quello di sfruttare l'espansione dell'universo, cioè l'evidenza che le galassie si allontanano l'una dall'altra, tutti da noi e noi da tutti. Quindi possiamo sfruttare la velocità di allontanamento delle galassie per misurare quanto sono lontane. Per questo dobbiamo ringraziare di nuovo il nostro amico Hubble, che aveva capito che esiste una relazione semplice tra la velocità di allontanamento delle galassie e la loro distanza: in questo diagramma Hubble aveva messo la velocità di allontanamento e la misura della distanza delle galassie e aveva visto che stavano tutte più o meno allineate intorno a una retta. Questo voleva dire che sostanzialmente esiste una costante di proporzionalità tra quanto una galassia è distante e quanto veloce si allontana da noi. Nel giro di due anni è stato possibile aumentare la scala delle distanze di un fattore 10, e la relazione era ancora valida. Con gli anni le dimensioni del diagramma continuano ad aumentare e quindi sappiamo adesso che questa è una regola che funziona su grandi scale, quindi avendo la possibilità di misurare qual è la velocità di allontanamento delle galassie si può risalire a quale è la distanza della galassia da noi. Ovviamente questo dipende dalla nostra capacità di conoscere in modo quantitativo i parametri della legge che lega le due misure: poiché sappiamo che $velocità = Costante \times Distanza$, è necessario conoscere il valore della costante, che è un parametro molto importante che si chiama costante di Hubble, in onore sempre di questo astronomo.

Come si misura la velocità delle galassie?

Sfruttando le proprietà della luce. Sappiamo la luce "bianca" che noi vediamo in realtà è composta da luce a diversi colori combinati che si scompone quando attraversa un prisma -- il fenomeno dell'arcobaleno è l'esempio più semplice di questa proprietà della luce. Non solo: sappiamo che quando la luce attraversa la materia, acquisisce delle informazioni in più che si evidenziano nelle righe di assorbimento o nelle righe di emissione, in funzione di che cosa attraversa. Questo lo avete già visto perché si vede anche nello spettro del sole, nello spettro di tutte le stelle: attraverso la dispersione della luce che noi otteniamo dai corpi celesti si possono identificare delle righe. In alcuni casi queste righe servono per identificare quali elementi sono presenti nella stella oppure quali elementi sono presenti nella parte esterna della stella che la luce ha attraversato. In questo caso le righe possono servire anche per misurare la velocità delle galassie.

Come?

Usando un altro dei fenomeni che voi certamente conoscete: l'effetto Doppler, cioè il fenomeno per cui le onde, sia le onde sonore, che le onde luminose quando si allontanano o quando si avvicinano ad alta

velocità subiscono delle trasformazioni: si allungano quando l'oggetto si allontana e si accorciano quando l'oggetto si avvicina.

Questa è una diversa rappresentazione della distribuzione della luce che proviene per esempio da una galassia, rappresentata in forma grafica in funzione della sua lunghezza d'onda: sempre rimanendo nella banda ottica, queste deviazioni a lunghezze d'onda specifiche sono righe di assorbimento, se c'è un difetto rispetto al "continuo", cioè al tratto orizzontale di riferimento, oppure di emissione, se c'è un eccesso. Dalla lunghezza d'onda a cui compaiono queste deviazioni sappiamo gli elementi che hanno causato le righe, e quindi possiamo sapere quali elementi compongono la galassia. Se osservassimo questa stessa galassia che si allontana da noi a velocità sempre più elevate, vedremmo che per esempio che questa riga di emissione si sposta, rispetto alla sua posizione iniziale, e questo spostamento è verso il rosso [onde più lunghe] perché è l'oggetto si sta allontanando. Quindi quando le galassie si spostano, le righe si muovono, e se noi riusciamo ad identificare la riga che stiamo misurando [in questo esempio la riga H-alfa dell'idrogeno], conosciamo la lunghezza d'onda "rest frame" cioè a riposo, a galassia "ferma". Misurando la differenza di lunghezza d'onda, che sostanzialmente è il redshift, e moltiplicando per la velocità della luce, conosciamo la velocità di allontanamento delle galassie. Per cui parlare di redshift o parlare di velocità di allontanamento è la stessa cosa e questa misura ci porta in maniera abbastanza semplice a trovare qual è la distanza nella galassia usando - e qui ritorna la famosa costante di Hubble - questa costante che una volta noto quanto vale ci permette di passare da una misura [redshift] all'altra [distanza].

Come siamo arrivati a sapere qual è la costante di Hubble?

Per avere una misura buona della costante di Hubble c'è voluto qualche decennio. All'inizio il suo valore era decisamente diverso da quello che usiamo oggi. Il valore iniziale era molto più alto, ma negli ultimi 30/40 anni il valore trovato tra diversi esperimenti si è assestato intorno a 50-100 km/s, e l'ultimo valore, che usiamo adesso, per la costante di Hubble vale 73 km al secondo. Con questo numero possiamo passare dalla misura della velocità di allontanamento alla distanza: con la distanza abbiamo modo di trovare le informazioni sulle proprietà intrinseche degli oggetti.

Classificazione delle galassie.

Un altro grosso lavoro che Hubble ci ha lasciato è stato una classificazione morfologica degli oggetti: sempre intorno agli anni '20 Hubble aveva osservato un certo numero di galassie e le aveva classificate in modo abbastanza semplice sulla base della loro forma. In questo diagramma aveva diviso le galassie in Ellittiche, spirali e Irregolari. Poi aveva diviso le ellittiche in funzione del loro schiacciamento, mentre per le spirali aveva scelto una classificazione basata sulla importanza relativa tra le braccia e il bulge. Aveva anche notato in alcune la presenza di una barra e quindi aveva diviso le spirali lungo questa specie di forcella dove la differenza tra la parte di sopra e la parte di sotto è la presenza di questa una barra, e per il resto le galassie si allineano in funzione di quanto sono importanti le braccia rispetto al bulge centrale. Ovviamente c'è tutto il resto, le irregolari che non sono classificate perché non seguono una regola di classificazione.

Perché è importante questa classificazione morfologica? Perché è vero che è basata sulla forma ma ha anche delle grosse implicazioni su che cosa queste galassie contengono, come sono nate, dove vivono, che cosa hanno avuto nel loro passato. Cioè non è solo un raggruppamento empirico, l'aspetto morfologico non è solo una forma di bellezza o di forma, ma la forma ha anche un significato. La classificazione di Hubble non è essa stessa una classificazione evolutiva cioè implica che le galassie prima sono ellittiche poi diventano spirali e poi diventano irregolari o viceversa, cioè una galassia non percorre quella forcella durante la sua evoluzione: però a ogni posizione di quella forcella corrispondono delle proprietà, delle

caratteristiche specifiche - ovviamente questo vale in media, anche qui ci sono le eccezioni, però mediamente le galassie ellittiche sono delle galassie di colore rosso perché sono formate da stelle vecchie e perché sono delle strutture evolute che hanno fatto il loro corso, il loro destino e adesso non stanno facendo niente, sono ferme nella loro evoluzione. Le spirali invece sono di colore blu, o più blu, e tanto più blu quanto più sono spirali di tipo "late". dalla parte lontana dalle ellittiche. Sono di colore blu perché contengono stelle giovani, soprattutto nelle loro nella parte delle braccia, e quindi sono strutture giovani ancora in grado di creare stelle. Le irregolari sono quegli oggetti dalle situazioni più complesse: non sono neanche galassie giovani sono proprio in evoluzione, e non hanno un colore di classe, ma possono essere gialle e rosse e blu e verdi con le forme più strane proprio perché sono un risultato di una evoluzione abbastanza complessa.

Ovviamente quando si parla di colore di una galassia si parla del colore che risulta dalle componenti che la compongono, principalmente dovuto alle stelle che la compongono: se ci sono tante stelle che hanno un colore giallo, il colore globale sarà giallo, se ci sono tante stelle blu il colore sarà blu. Per questo il colore - che poi è legato alla forma - ci dice qual è il tipo di popolazione stellare che la galassia contiene. In modo equivalente, se ci sono le polveri, si potranno vedere delle strisce di assorbimento, o colori alterati rispetto a galassie che non hanno polveri. Quindi tutto quello che è dentro le galassie noi lo riusciamo a vedere come somma di tanti fenomeni, che sono sostanzialmente gli ingredienti che avete studiato o comunque di cui abbiamo parlato finora.

Un altro esempio un po' più quantitativo della relazione tra colore e forma si vede in questo grafico. In ordinata ci sono i tipi morfologici di galassie dal tipo ellittico al tipo irregolare, mentre in ascissa il colore, che è dato dalla differenza tra immagini prese in due filtri diversi. Si vede che il colore cambia in modo abbastanza continuo, senza grossi salti al variare del tipo morfologico. Questo sostanzialmente indica una sorta di continuità, transizione di popolazioni stellari, tra le galassie ellittiche che sono rosse e le galassie spirali che sono blu.

In questa rappresentazione si vede lo stesso tipo di fenomeno che abbiamo discusso finora. Questo spettro, che è rappresentato graficamente come quello che vi avevo fatto vedere prima, rappresenta una galassia di tipo ellittico. Se lo si confronta con quello di fianco, che invece è quello di una stella, di tipo simile a quello del sole, si vedono delle bande di assorbimento, e il continuo con questa forma caratteristica, si vede che i due sono molto simili - e questo significa che se sommiamo tante stelle di questo tipo verrà fuori un oggetto che assomiglia abbastanza a quella originale, e si ottiene quella galassia di tipo ellittico; se invece a aggiungiamo, a questo tipo di stelle - che c'è ovunque perché queste sono le stelle normali e in gran numero - aggiungiamo delle stelle di tipo diverso, aggiungiamo dei gas, aggiungiamo delle polveri allora gli spettri cambiano, cambiano completamente rispetto allo spettro della galassia ellittica e vediamo sono delle caratteristiche diverse: se vediamo delle righe di emissione, che nelle galassie ellittiche tipicamente, non vediamo vuol dire che in questa galassia ci sono dei gas caldi, gas caldissimi, si vedono assorbimenti dovuti a elementi diversi, e questo vuol dire che ci sono elementi diversi compongono questa galassia rispetto alla Ellittica di riferimento.

Quindi la forma in qualche modo ci aiuta a capire qual è il contenuto.

Adesso passiamo ad un altro argomento che ci serve a capire l'ultimo ingrediente che esiste nelle galassie e che peraltro è un ingrediente fondamentale. Se noi studiamo una galassia a spirale e cerchiamo di capire come si muovono le stelle e la materia che le compone, ci aspettiamo che nella parte vicina al nucleo, nella parte del bulge, tutto si muova come un corpo rigido cioè tutte le stelle si muovono come unico corpo. Per questo ci aspettiamo è che la velocità delle stelle dipenda sostanzialmente dal raggio: più sono lontane dal

centro più ruotano velocemente. Viceversa nel disco ci aspettiamo che la materia ruoti sostanzialmente come il nostro sistema solare e quindi la velocità rispetto al raggio decrescerà a mano a mano che ci allontaniamo dal centro. Combinando questi due tipi di relazione la curva di rotazione delle stelle che ci aspettiamo, cioè come le stelle ruotano in funzione della loro distanza dal centro, è di questo tipo: prima la velocità cresce mano a mano che ci allontaniamo dal centro della galassia e poi incomincia a decrescere a gradi raggi, nel disco.

Le curve di rotazione osservate però ci dicono che è così; la velocità delle stelle cresce attorno al nucleo e poi si assesta a un valore costante, non si vede la decrescita aspettata, ma la velocità continua ad essere alta fino agli ultimi punti osservati. Questo si riesce a spiegare soltanto aggiungendo un'altra componente al modello -- l'influenza della famosa materia oscura. Se noi aggiungiamo della materia oscura a ciò che costituisce le galassie, con certe caratteristiche, riusciamo a riprodurre la curva di rotazione delle stelle. Quindi abbiamo risolto un problema ... e ne abbiamo introdotto un altro! La materia oscura si trova nelle galassie, negli ammassi, e' necessaria ovunque e ne parlerete nelle lezioni successive... però che cosa sia nessuno lo sa, eppure non è una quantità trascurabile, anzi in generale e' la componente dominante; nella parte molto centrale, le stelle, la componente luminosa è ancora quella che domina, più ci si allontana dal centro più e aumenta la massa di questa componente che non sappiamo cosa sia e che però e' necessaria per spiegare il fenomeno che vediamo cioè che le stelle e la materia continuano a girare con una velocità che è costante. L'evidenza diventa ancora più stringente se ci allontaniamo rispetto al centro della galassia : ad esempio in questa immagine si può estendere la curva di rotazione al di fuori della regione popolata dalle stelle, nella regione in cui si vede gas freddo, e questo rafforza la necessità di avere materia oscura che la tiene insieme il sistema.

Come si misurano queste curve di rotazione?

Anche in questo caso usiamo l'effetto Doppler e usiamo il fatto che l'oggetto che ruota presenta una parte che si avvicina e una che si allontana da noi; usando le piccole differenze in lunghezza d'onda che si riescono a misurare se confrontiamo la parte della galassia che viene verso di noi o la parte della galassia che si allontana da noi si riesce a misurare la velocità di rotazione lungo l'asse - questa è un'altra rappresentazione di uno spettro: nella direzione orizzontale c'è la dimensione spaziale, cioè il raggio o la distanza dal nucleo della galassia che e' la striscia più brillante. Allontanandosi nelle 2 direzioni. si vede che le "strisciate" sono più alte o più basse (cioè a lunghezze d'onda diverse) a destra l'emissione e' a una lunghezza d'onda leggermente più bassa rispetto alla parte sinistra e questo vuol dire che la parte di destra si avvicina a noi mentre la parte di sinistra si allontana nel moto di rotazione; così noi misuriamo la rotazione delle galassie.

Ho detto che possiamo capire cosa c'è in una galassia osservandola ma e' importante poterla osservare a tutte le lunghezze d'onda disponibili perché le diverse lunghezze d'onda ci danno informazioni su cose diverse.

Alcuni elementi si vedono soltanto ad alcune lunghezze d'onda e quindi osservare un oggetto nella banda "ristretta" che corrisponde a quella del nostro occhio non ci permette di avere delle informazioni fondamentali per sapere che cosa c'è in questi oggetti.

Voi sapete che lo spettro elettromagnetico è molto più largo che non quello che il nostro occhio vede e quindi se noi riusciamo a guardare questi oggetti in tutte le lunghezze d'onda possibili riusciamo a capire e a vedere degli elementi e dei costituenti di queste galassie che emettono in maniera diversa nelle diverse lunghezze d'onda; inoltre abbiamo bisogno di andare a guardare in alcuni casi fuori dall'atmosfera perché

per fortuna nostra i raggi ultravioletti e i raggi X vengono bloccati dall'atmosfera e quindi dobbiamo uscire dall'atmosfera per catturare queste emissioni. A volte ci conviene anche uscire dall'atmosfera perché la nostra capacità di vedere al di sopra delle nuvole è decisamente più efficace che non vedere al di sotto delle nuvole, non solo perché quando ci sono le nuvole queste oscurano la radiazione, ma l'atmosfera stessa che si "muove" crea delle immagini meno nitide. Per questo i telescopi sono spesso in luoghi i più alti possibili. Essere al di sopra dell'atmosfera è importante a qualunque lunghezza d'onda; come una dimostrazione di questo, ecco il confronto dello stesso oggetto visto da un telescopio da terra che ha 8 m di diametro e visto dallo spazio con un telescopio molto più piccolo: comunque si vedono dei dettagli che da terra si perdono.

Detto questo, guardiamo le galassie in tutte le loro forme possibili per cercare di capire che cosa possiamo vedere, che cosa vediamo se guardiamo alle diverse lunghezze d'onda.

Questa è una galassia normale, famosa: è il vortice o M51, con una sua compagna, in una immagine nell'ottico. Se la guardiamo invece nell'ultravioletto la compagna non c'è più e quello che vediamo della galassia è una struttura un po' diversa: molti più noduli sulla struttura delle braccia semplicemente perché quello che noi stiamo osservando sono stelle giovani, stelle giovanissime in questo caso che sono distribuite nelle regioni di formazione stellare; la compagna evidentemente è formata da stelle vecchie e quindi non ha nessun tipo di formazione stellare e quindi in questo tipo di luce emette pochissimo o quasi niente. Se noi la guardiamo nella banda X vediamo anche qui una cosa ancora diversa: vediamo delle sorgenti discrete che appaiono come puntini che sono distribuiti non necessariamente in una distribuzione di braccia a spirale come le stelle e vediamo del gas caldo che è distribuito anche quello sia nella galassia principale che nella compagna; quindi se guardiamo nei raggi X vediamo degli oggetti, che poi sono le famose binarie X, e vediamo del gas molto caldo che non vedremmo in nessun'altra banda di emissione. Se ci spostiamo dall'altra parte dello spettro e guardiamo nell'infrarosso, vediamo la popolazione stellare più vecchia quindi vediamo tutto più smussato, non vediamo più questi noduli di formazione stellare perché i noduli di formazione stellare nell'infrarosso non emettono in modo particolare mentre quello che emette è il tipo di stelle normali che sono distribuite un po' ovunque nel disco e sono meno influenzate dalla forma delle braccia. Queste stelle sono ben presenti nella galassia compagna che adesso ritorna in pieno splendore perché non avendo più tolto la parte di formazione stellare di cui lei proprio non si interessa è ritornata a fare la sua parte. Altrettanto nell'emissione radio si vede che la distribuzione è molto più allargata come nelle immagini che vi avevo fatto vedere prima ed è molto più allargata dell'alone delle stelle. Quindi guardare questi oggetti a diverse lunghezze d'onda ci dà informazioni sui tipi diversi di elementi che costituiscono la galassia. Questo è un esempio ma ce ne sono tanti altri.

In questo caso ci sono tre galassie che nella banda ottica appaiono come tre galassie carine una vicina all'altra. Se guardate invece nella banda di emissione del gas freddo vi rendete conto che qualcosa è successo tra questi oggetti: o erano tutti insieme prima e poi si sono dispersi, uno si è portato via un pezzo di gas dell'altra quest'altra chissà se è passata... qualche forma di interazione tra questi tre oggetti c'è stata e quindi non possiamo studiare un oggetto e dimenticarci degli altri due perché hanno una storia comune, quindi dobbiamo in qualche modo cercare di capire l'uno anche in vista di quello che ha fatto o farà l'altro. Molto rapidamente questo è un altro esempio: questa galassia ellittica sembra una ellittica tipica, alla fine della sua evoluzione, che adesso non ha più evidenza di attività di formazione stellare. Però se la guardiamo nella banda X, vediamo che invece ha un sacco di attività, ha una quantità di gas - queste immagini sono tutte sulla stessa scala - distribuita al di fuori di dove sono le stelle ed ha una forma che non ricorda assolutamente quella delle stelle: quindi in questa banda di emissione si vede che c'è attività. Se poi la guardiamo nel radio, la scala è ancora più grande, qualche fenomeno fisico deve essere riuscito a far arrivare le particelle e il campo magnetico a distanze così grandi, dove non ci sono neanche più le stelle: di

questo penso vi parlerà più avanti Anna Wolter perché c'entrano molto i nuclei delle galassie. Però sono tutti fenomeni che noi dobbiamo scoprire e trovare e scopriamo e troviamo solo guardando a diverse lunghezze d'onda. Vi faccio vedere anche degli altri esempi molto rapidamente: questa è una galassia ellittica brillante e vicina, Centauro A, che guardata a diverse lunghezze d'onda cambia completamente ancora una volta... è sempre lo stesso oggetto visto a lunghezze d'onda diverse: in questa immagine [ottico, vicino IR] vedete una banda di assorbimento molto forte, in nel lontano IR vedete è l'unica cosa visibile ed è dovuta alla polvere calda. Nella banda X vedete tante sorgenti X, queste famose binarie che sono tantissime e distribuite ovunque nella regione dove ci sono anche le stelle, e poi vedete anche un getto che è lo stesso getto che ritrovate nel radio ma che invece non avete nessun modo di vedere ed evidenziare nelle altre bande del ultravioletto, dell'infrarosso. Nell'ultravioletto trovate una grossa attività proprio ai bordi della banda di assorbimento della polvere - quindi sono tutte informazioni importanti di cui tenere conto. Altrettanto per un altro oggetto abbastanza famoso, la galassia Sombrero, che anche in questo caso guardata a diverse lunghezze d'onda ha delle forme diverse e dà delle informazioni diverse.

Quindi è importante cercare di capire e di raccogliere e avere informazioni sulle galassie a tutte le lunghezze d'onda per cercare di capire di che cosa sono fatte mettendo insieme tutte le informazioni; le galassie poi noi le vediamo adesso così: ma erano così anche nel passato? sono oggi come erano prima? come diventeranno? cosa sappiamo di che cosa ha fatto sì che questi oggetti siano quelli che vediamo oggi?

Beh questa sarebbe probabilmente una lezione completamente a sé, ed è anche una lezione abbastanza difficile perché non tutti sono d'accordo su cosa è successo e su cosa succederà, su come si sono create le galassie. Una delle cose su cui però più o meno tutti sono abbastanza d'accordo è che c'era una forma di proto-nube e che la formazione è legata al tipo di Proto-nube: in funzione della densità, del tipo di moto e dalla rapidità di raffreddamento si sono potute formare galassie di tipo ellittico oppure delle galassie di tipo spirale. Però una volta formate dalla Proto-nube, la loro evoluzione dipende moltissimo da che cosa hanno incontrato nella loro vita; non solo dipende da quello che c'è dentro [evoluzione delle stelle che le compongono ad esempio] ma dipende anche da quello che c'è fuori; se per esempio due galassie si incontrano, potrebbero incontrarsi avere e una storia appassionata e uscire con forme diverse [le galassie irregolari], a seconda di quale è stato il tipo di interazione e i tipi di galassie che si sono trovati quando si sono scontrati; quindi capite che è abbastanza difficile avere un'idea precisa di cosa è successo, perché noi vediamo le galassie come sono adesso e possono aver seguito diversi percorsi per arrivare ad essere così: per cui non starò molto a dilungarmi su questa cosa perché potrebbe essere un ciclo di lezioni intero.

Però aggiungo che più guardiamo questi oggetti e più troviamo delle cose strane; vi avevo detto che le ellittiche sono degli oggetti rossi; beh alcuni degli oggetti rossi che noi abbiamo guardato fino ad adesso, guardandoli nell'ultravioletto mostrano emissione blu: quindi ci sono dei fenomeni che fino ad adesso pensavamo di avere capito e invece forse dobbiamo ripensare meglio; lo stesso questa galassia sembra che perda dei pezzi... quindi le osservazioni a lunghezze d'onda diverse e le osservazioni ad alta precisione e profonde ci forniscono evidenza del fatto che le galassie si trasformano: quindi ci si aspetta che molti tipi di trasformazione siano intervenuti tra gli oggetti che osserviamo ad epoche lontane e quelli che vediamo oggi, e quindi sì le galassie si creano, evolvono, non so dire se muoiono ma comunque si trasformano e diventano un'altra cosa.

L'altro argomento che volevo toccare rapidamente, soprattutto come introduzione a prossime lezioni è il fatto che le galassie vivono in ambienti diversi: ci sono quelle che vivono in campi poco densi e sono isolate e quelle che vivono nei centri abitati densamente. Anche in questo caso mediamente possiamo dire che il tipo morfologico e il colore, la forma sono abbastanza legati al tipo di ambiente nel quale gli oggetti vivono;

per esempio gli oggetti rossi, le ellittiche tendono a abitare nei campi densi mentre gli oggetti blu, irregolari e giovani tendono a essere un po' più isolate e questo è un'altra delle informazioni che la morfologia a suo tempo ci aveva dato ed è un'altra delle informazioni di cui tenere conto.

L'ultimo ingrediente prima di lasciarvi. Nella definizione di galassia tutto gira attorno al nucleo; io dei nuclei non vi ho parlato, perché i nuclei sono degli oggetti speciali. Però tutto gira intorno quindi il nucleo è un ingrediente importante nelle galassie: i nuclei possono essere normali oppure attivi; i nuclei attivi sono evidenti, sono argomento di discussione della prossima volta se non sbaglio. Ma ci sono anche i nuclei più normali che non hanno manifestazioni spettacolari. La nostra Galassia è una di quelle che ha un nucleo normale; ma essendo la nostra Galassia e quindi essendo "vicina" noi possiamo studiare e misurare e cercare di capire per quanto possibile anche questo nucleo che è debole e meno spettacolare di altri. Ovviamente per arrivare al nucleo, noi che siamo in questa posizione un po' periferica, dobbiamo attraversare un braccio, un altro braccio, cioè tutta la materia che c'è tra noi e il centro della galassia. Come si vede da questa immagine, il laser che punta il nucleo - quanto sia la precisione del laser verso la centro della galassia - mostra che il nucleo è nella parte più scura del piano perché c'è tanta materia, incluso tanta polvere, che impediscono di guardarlo direttamente.

Già osservando nell'infrarosso si riesce a vedere un pochettino meglio: però anche in questo caso è un po' difficile riuscire a dire che quello lì veramente è il centro della nostra galassia... un affarino che proprio è anche piccolo rispetto alle stelle che gli stanno intorno. Se lo guardiamo nell'infrarosso più lontano si vede che in questa posizione c'è un nucleo un po' più vivace, il punto più brillante in questa marea di oggetti; nel radio che d'altra parte è anche la banda in cui è stato per la prima volta identificato quello che poi è stato definito il nostro centro galattico, invece è la sorgente più brillante.

Perché sappiamo che è lì il centro della galassia? Perché le stelle in quella posizione ruotano e ruotano intorno al centro di massa che è il nostro oggetto Sagittario A. Come lo sappiamo? Vi aveva fatto vedere un'animazione Monica Colpi un paio di lezioni fa che dimostrava come le stelle girano intorno a un centro di massa. Quello che volevo farvi vedere io invece è semplicemente l'evidenza dovuta al fatto che prendendo delle immagini a distanza di quattro anni l'una dall'altra si vede effettivamente che gli oggetti, le stelle, queste 4/5 stelle del centro galattico, si muovono: cioè si vede in pochi anni che queste stelle si sono spostate. Studiandole per una decina di anni, si riescono proprio a ricostruire i moti delle stelle intorno al punto centrale e questo fa sì che si riesca a stabilire qual è il centro intorno a cui tutte queste stelle ruotano: questo qui è il nucleo della nostra galassia, che non è facile da identificare, non sarà facile da identificare in altri oggetti. Ma questo ci dice che è vero quando io dico che la galassia ruota attorno al nucleo, il nucleo c'è e si vede, è a otto kiloparsec da noi, ha una massa modesta rispetto ad altri nuclei, è un buco nero di una massa grossa ma non grossissima, i mostri quelli veri ve li faranno vedere la prossima volta. Vi ho detto tutto quello che c'è nelle galassie... Tutto ruota attorno al nucleo che si chiama Sagittario A.

Grazie

D. Come si evidenzia questa materia oscura? cioè nell'infrarosso mi pare di aver capito... ho visto una nube azzurrina...

R. no, no, no non si evidenzia proprio... Quello che non vi ho detto e che avrei dovuto dirvi è che in quasi tutte le immagini, i colori sono falsi colori, sono delle rappresentazioni per facilitare la visualizzazione. Ma la materia oscura si chiama oscura proprio perché è oscura, non si vede. E non perché assorbe o perché è

oscura perché produce assorbimento come quello dovuto alle polveri. Proprio noi non sappiamo dov'è, com'è fatta, come è distribuita se non in modo indiretto: non abbiamo modo di farla vedere, se non nel fatto che la gravità ci dice che c'è della massa che noi non vediamo e questa massa c'è perché altrimenti l'oggetto si comporterebbe in maniera diversa; questo è l'unica evidenza che noi abbiamo ma non abbiamo modo di fotografarla.

D. Quindi quelle immagini sono una rappresentazione fatta studiando varie parti attorno alla galassia e capendo che quindi arriva lì...

R. Noi sappiamo che ci deve essere questa materia, sappiamo che soprattutto se ci allontaniamo dal centro della galassia la materia totale che circonda la galassia cresce molto di più di quello che noi riusciamo a vedere; cioè se noi sommiamo la massa delle stelle, la polvere - che riusciamo in qualche modo a vedere perché la polvere ci impedisce di vedere e quindi sappiamo che c'è della polvere - la polvere calda, che misuriamo perché emette nell'infrarosso, il gas che emette nell'X, le binarie qualunque ingrediente a noi noto e lo sommiamo, sommiamo sostanzialmente delle inezie rispetto quella che conosciamo. Non riusciamo a trovare abbastanza oggetti per far sì che sommando tutti questi oggetti abbiamo la massa totale che noi vediamo; quella massa totale manca è la massa mancante.

D. Ma questa materia scura ruoterebbe intorno al nucleo insieme alle altre parti visibili?

D. Potrebbe essere il nucleo?

R. No perché il nucleo sappiamo dov'è; questa massa è distribuita in modo da essere molta di più fuori a grandi raggi da centro rispetto a dentro.

Non può essere il nucleo perché noi sappiamo dov'è il nucleo, sappiamo misurare la massa ed è di 4×10^6 , piccola rispetto a quella di altri ingredienti che arrivano a 10^9 - 10^{10} - 10^{11} mentre la quantità totale di materia oscura è molto superiore. Ed è anche molto più grande della massa misurata del nucleo. Il nucleo sappiamo che è al centro mentre la massa oscura no. Alcune proprietà della materia oscura le sappiamo, certamente sappiamo che non è nel centro.

D. Le galassie girano, noi giriamo, tutti girano attorno a qualcosa...

R. No, l'universo non gira; la nostra galassia gira intorno al nostro nucleo, le altre galassie girano intorno al proprio nucleo. Le galassie invece non ruotano nell'Universo -- si allontanano l'una ma non c'è un centro dell'universo intorno a cui giriamo.

D. quindi è come se la materia oscura non la posso vedere perché ci sono dentro...

R. Beh ma siamo dentro anche alle stelle in qualche modo... Per un certo periodo, prima di sapere che non era così, la materia oscura poteva essere il gas caldo, che circonda la Galassia, che forma un alone attorno alla nostra Galassia per esempio oppure intorno ad altre galassie. Se non osserviamo nella banda X non lo vediamo e in linea di principio la materia oscura avrebbe potuto essere questo gas caldo. Però ora sappiamo che non basta, perché è troppo poco: ha massa piccola, o comunque paragonabile alla massa di stelle. Se fosse 10 volte, 100 volte, 1000 volte di più potrebbe essere lui... Il problema è che più osserviamo le galassie e l'universo più scopriamo che questo non è vero: cioè non può essere gas caldo perché è il gas caldo lo sappiamo misurare e non basta; non può essere gas freddo perché anche quello lo sappiamo misurare e anche quello non basta; non può essere gas tiepido... Ora, non abbiamo provato tutto, tutto perché i telescopi hanno delle capacità limitate; Anche quando osserviamo ad es. cioè in infrarosso usiamo certe bande dell'infrarosso non tutto l'infrarosso perché se ci dessero milioni e milioni

costruiremmo tutto e riusciremmo a costruire strumenti per osservare qualunque cosa perciò c'è ancora la possibilità che ci sia un gas che invece di essere a 10 milioni di gradi sia 200 mila milioni e noi ancora non l'abbiamo misurato e che quello costituisce la materia oscura; non abbiamo escluso tutto però abbiamo escluso tutte le cose plausibili che noi oggi riusciamo a misurare e nessuna di queste è materia oscura; abbiamo migliorato il problema rispetto a qualche anno fa, ma solo di una frazione piccolissima.

D. Ma costante di Hubble che dimensioni ha?

R. è $1/\text{tempo}$; l'inverso del tempo è l'inverso dell'età dell'universo per cui è abbastanza importante sapere qual è la costante di Hubble se vogliamo sapere che età abbiamo.

D. Domanda brutale. Lei la mattina decide oggi studio la M51; accende il computer e va in un database internazionale di questi telescopi questo Hubble e così via e si mette studiare... Oppure si è prenotata una indagine particolare di una zona dell'universo

R. Tutte e due le cose. Se io voglio che il telescopio guardi quell'oggetto particolare allora devo chiederglielo, devo fare domanda al comitato che decide cosa deve guardare il telescopio e fare in modo che la mia domanda sia scientificamente valida in modo che questo comitato, che è formato da miei pari [cioè miei colleghi] leggendo la domanda dica "beh questa è una proposta interessante, sono d'accordo sul fatto di usare lo strumento per fare questo tipo di ricerca". Allora questa proposta "riceve tempo" e lo strumento guarderà quest'oggetto M51 - per dirne uno - e lo guarderà per il tempo che io richiedo. I dati mi vengono dati e sono miei tutti miei per un anno mediamente, li posso guardare solo io, dopo di che a un anno e un giorno questi dati sono messi in un database, in un archivio e diventano pubblici per cui chiunque altro li può guardare.

D. Ma lei le sue scoperte però le dissemina...

R. Io le scoperte prima le scopro e prima le scrivo e meglio è!!! Però io stessa possono usare quello stesso archivio nel quale il mio oggetto va, oppure altri archivi, perché questo procedimento è già successo con altri, e quindi io posso fare sia la richiesta - oggi mi sveglio voglio guardare quell'oggetto e quindi tra un anno finalmente qualcuno mi dirà che posso farlo, ci vogliono dei tempi tecnici e non sempre le domande vanno a buon fine! - oppure prendere e analizzare quello che già esiste, che è già negli archivi pubblici. Comunque il processo è duplice ci sono dei casi in cui qualcun altro ha avuto già l'idea di guardare quell'oggetto per cui è inutile che io faccia la domanda di osservarlo di nuovo. Io vado a prendere i dati direttamente da un archivio perché dopo un anno, soprattutto per alcuni grandi telescopi e satelliti che sono preziosi, cioè sia costano parecchio quando uno lo costruisce sia sono unici e molto richiesti e quindi i dati non possono diventare patrimonio di una persona sola, sono in un archivio, Quindi prima o poi tutti possono accedere ai dati.

D. I corpi celesti ruotano tutti in un'unica direzione?

R. Da destra a sinistra, sinistra a destra, dall'alto in basso, dal basso in alto ognuno fa esattamente come gli pare ciascuno intorno al proprio nucleo. Mentre nelle spirali tutte le stelle fanno così in modo ordinato, nelle ellittiche ognuno fa quello che vuole, le stelle hanno moti caotici... Anche le spirali hanno eccezioni: mediamente tutto ruota nella stessa direzione, ma ci sono anche degli elementi [gas/stelle] contro rotanti che però di solito sono indici di oggetti che sono stati acquisiti in un secondo tempo, per cui anzi trovare che ci sono delle stelle o gas che ruotano in senso inverso rispetto alla maggior parte della materia è importante, tipico delle galassie che stanno facendo qualcosa di diverso, indica una galassia da studiare perché questo è un oggetto strano, nuovo o presumibilmente un oggetto che ha avuto un incontro con un

'altra galassia e questa cadendo si è portata dietro la sua storia: e siccome quando uno cade, cade come gli capita, si porta dietro la sua rotazione.