

# Come si scopre l'esistenza della materia oscura?

di Daniele Gasparri

**Circa il 90% della materia contenuta nell'intero Universo non si riesce ad osservare direttamente poiché non emette radiazione elettromagnetica (luce) e non interagisce con la materia luminosa, se non attraverso la forza di gravità. In contrapposizione alle stelle e gas che luminosi si osservano facilmente nelle galassie e che prendono il nome di materia visibile o luminosa, il tipo che andremo ad analizzare si chiama materia oscura. Nessuno la osserva direttamente ma essa produce gran parte della forza di gravità che tiene insieme le galassie e, probabilmente, l'intero universo.**

Non si sa cosa sia esattamente la materia oscura perché nessuno, fino ad ora, è stato in grado di osservarla. Probabilmente si tratta di una combinazione tra oggetti formati da particelle conosciute, che per qualche motivo non emettono luce (pianeti, nane brune, buchi neri), e un mare di particelle nuove, dette non barioniche, ancora lungi dall'essere scoperte.

In queste pagine non voglio addentrarmi sulle speculazioni che si fanno su questo tipo di materia, piuttosto vorrei mettere in evidenza, attraverso un procedimento sperimentale-deduttivo, come si arrivi a teorizzare e a misurare la sua esistenza, sebbene nessuno l'abbia mai osservata direttamente. Come nel caso dei pianeti extrasolari, però, non c'è motivo di dubitare: non sempre ciò che non si vede risulta meno reale di quello che si può vedere direttamente; questo è un condizionamento del nostro cervello che fatica a credere in ciò che non può vedere. La scienza, fortunatamente, utilizzando dati con solide fondamenta, riesce a superare il blocco imposto dalla nostra esperienza, dal nostro intuito.

## La velocità di rotazione delle galassie a spirale

Cominciamo la nostra analisi partendo dalle galassie a spirale, oggetti a forma di disco sottile, le cui stelle ruotano attorno al centro.

Il moto delle stelle e dei pianeti attorno ad un centro di massa è di tipo Kepleriano, regolato cioè dalle leggi di Keplero; in particolare la velocità orbitale di qualsiasi corpo sottoposto alla forza di gravità di un altro è data dalla relazione:  $|v| = \sqrt{\frac{GM}{|r|}}$  dove M è la somma delle masse dei due corpi. La

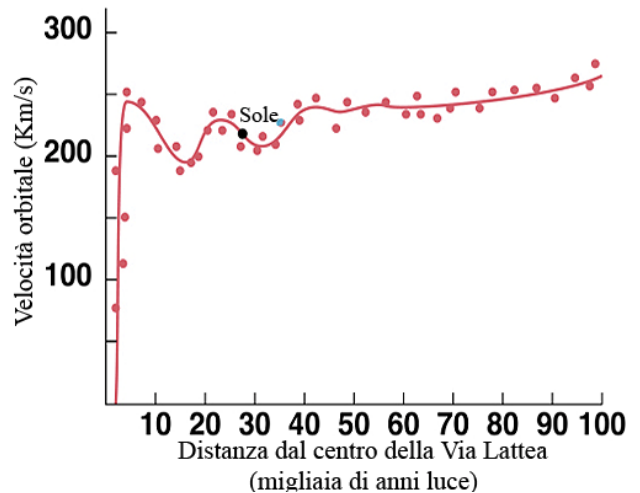
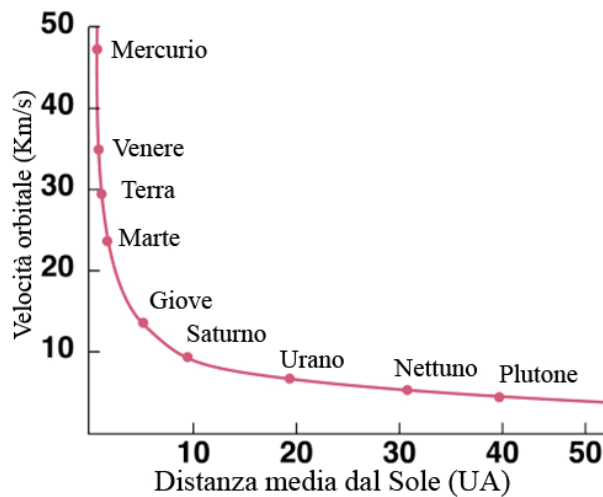
velocità angolare è definita dalla relazione:  $|\omega| = \left| \frac{v}{r} \right|$ ; sostituendo il valore (assoluto) della velocità,

si ha:  $|\omega| = \frac{\sqrt{GM}}{|r|^{3/2}}$ . Una galassia non è composta da soli due corpi ma questa semplice relazione può

comunque essere utilizzata per descrivere il moto delle stelle attorno ad essa, almeno per le zone del disco più esterne.

Questo andamento si ha per un corpo posto ad una certa distanza r da un altro, la cui distribuzione di massa può immaginarsi uniforme e confinata all'interno dell'orbita del corpo considerato. In questi casi la velocità di rotazione ha l'andamento descritto dalla formula, suggerito dalla terza legge di Keplero: maggiore è la distanza dal centro di gravità, maggiore è il periodo di rivoluzione del corpo e minore è quindi la sua velocità orbitale.

Se la struttura e disposizione delle masse all'interno di una galassia a spirale rispecchiasse quella delle stelle e del gas che possiamo osservare, la curva di rotazione delle stelle del disco, in funzione della loro distanza dal centro, seguirebbe l'andamento appena visto, dato dalla terza legge di Keplero. In altre parole, si può dire che la curva di rotazione del disco galattico ha un andamento Kepleriano:

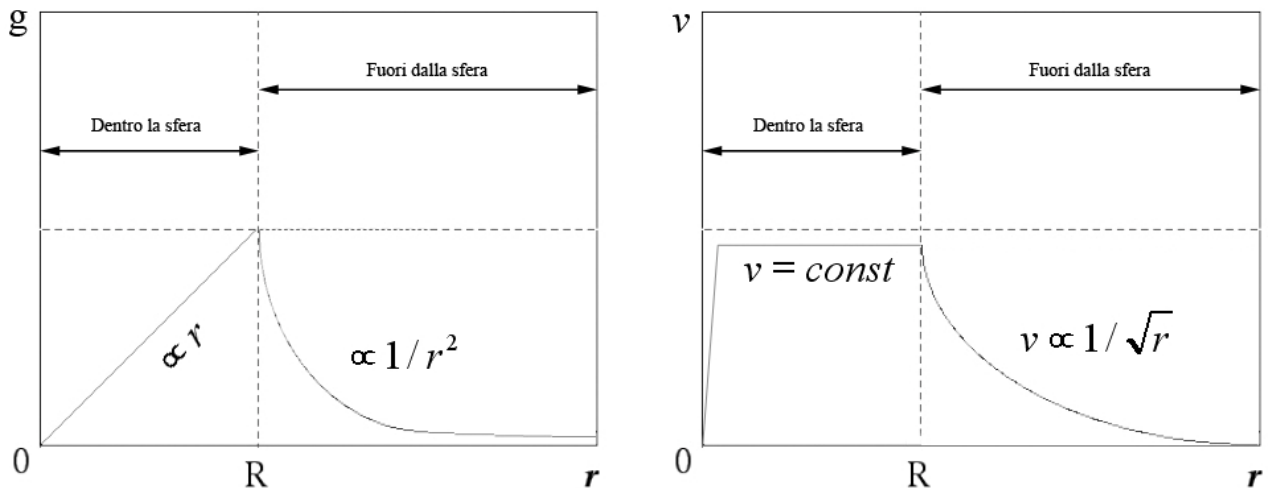


**A sinistra:** le velocità orbitali (lineari, non angolari) dei pianeti del sistema solare seguono l'andamento previsto dalla terza legge di Keplero. **A destra:** curva di rotazione della Via Lattea. Se la distribuzione di massa fosse quella visibile, dovremmo avere un andamento kepleriano. La curva è invece praticamente piatta. Ciò si spiega solamente con la presenza di una distribuzione di massa non visibile che avvolge l'intero disco galattico estendendosi ben oltre esso.

Dalle figure emerge un dato molto strano e particolare: la velocità orbitale in funzione della distanza dal centro non rispecchia l'andamento appena descritto e messo bene in evidenza con le velocità orbitali dei corpi del sistema solare (notate anche i diversi ordini di grandezza delle velocità!). Una curva di velocità praticamente piatta assomiglia al caso (ideale) di un corpo immerso in una distribuzione di massa uniforme e sferica.

Consideriamo a questo punto un esempio ideale. Se ci troviamo sulla superficie terrestre o ce ne allontaniamo, per restare in orbita dovremmo avere una velocità orbitale di tipo Keplero, la quale diminuisce con l'aumentare della distanza. Se però ci tuffiamo al centro della Terra, le cose non sono così. Mentre andiamo verso il centro troviamo della massa in ogni direzione. In effetti, qualcuno saprebbe dirmi come varia la forza di gravità in funzione della distanza dal centro, dentro la Terra? Newton, il padre della gravitazione, c'era arrivato, dimostrando un teorema ancora di fondamentale importanza. All'interno di una sfera la forza di gravità cresce linearmente andando dal centro verso le zone periferiche, fino a raggiungere il massimo quando siamo sulla sua superficie. A questo punto tutta la massa responsabile del campo gravitazionale è sotto i nostri piedi: allontanandoci dalla sfera la gravità può solo diminuire poiché non incontreremo mai altra massa appartenente ad essa.

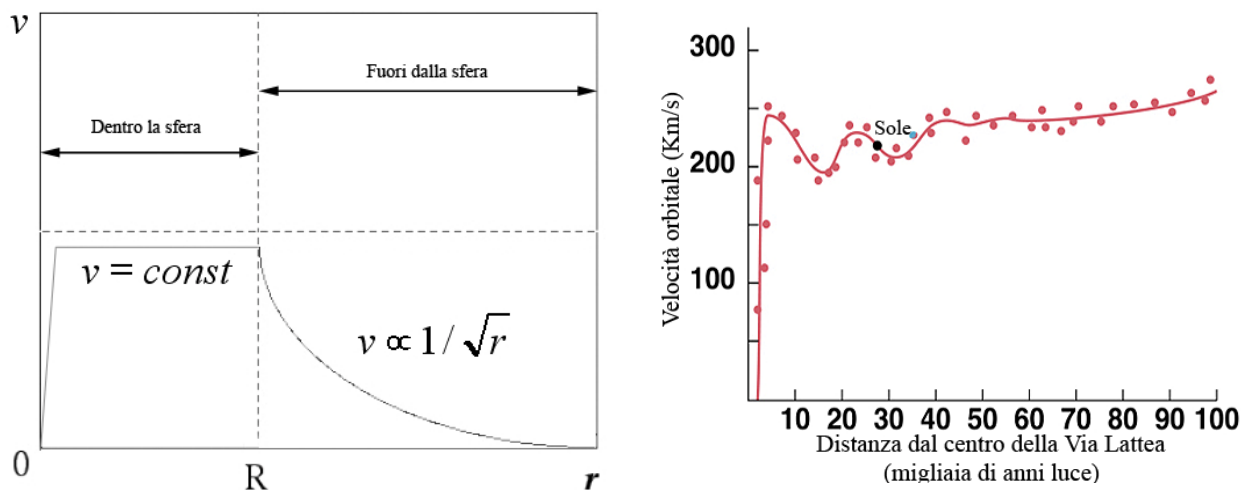
La velocità che dovrebbe avere un corpo per orbitare intorno (questo è impossibile nella realtà poiché la Terra è solida!) alla sfera è direttamente legata al campo gravitazionale attraverso la legge del moto di Newton (seconda legge della dinamica) e il suo andamento è assolutamente costante fino a quando ci troviamo dentro la sfera, cioè fino a quando c'è massa sia sopra che sotto di noi. Quando raggiungiamo la superficie, la velocità orbitale è massima per poi diminuire lentamente secondo il classico andamento Keplero.



Andamento della forza di gravità (g, a sinistra) e della velocità orbitale (v, a destra) in funzione della distanza (R) per un oggetto qualsiasi, dentro e fuori una distribuzione sferica di massa. Fino a quando il corpo si trova immerso nella materia, la forza di gravità aumenta linearmente con la distanza e la velocità orbitale resta costante. Solamente alla distanza R tale che l'oggetto si trova fuori dalla distribuzione di massa che crea la gravità, si ha il tipico comportamento Kepleriano. Quando detto vale per distribuzioni di massa sferiche ma è applicabile anche ai dischi galattici.

Chiaramente l'esempio appena visto è un caso ideale, ma fornisce importanti basi per una prima analisi della curva di rotazione delle galassie.

Sappiamo infatti che la loro forma è a disco e quindi non sferica, ma la distribuzione della densità di materia visibile e quindi la forma del campo gravitazionale è simile a quello che si avrebbe con una sfera, dal diametro simile a quello del bulge (gran parte della massa visibile è concentrata in queste zone), che possiamo considerare alla stregua di una sfera. Quello che ci aspettiamo quindi è che, oltre questa zona molto densa e massiccia, la velocità di rotazione della galassia cominci a rallentare in modo simile ad un andamento kepleriano (non proprio esattamente allo stesso modo poiché c'è ancora massa all'esterno e la forma è a disco e non sferica). Quello che si osserva invece è un andamento strano, praticamente costante oltre un certo raggio. Riproponiamo qui la figura, confrontata con il caso ideale della sfera appena discusso:



**A sinistra:** Andamento della velocità orbitale di un corpo in orbita attorno ad una distribuzione sferica di massa; finché ci troviamo "immersi" nella massa, la velocità orbitale è costante, una volta fuori, quando non abbiamo più massa alle nostre spalle, la velocità diminuisce. **A destra:** esempio reale della curva di rotazione della nostra galassia: la velocità circa costante induce a pensare che la materia visibile sia confinata all'interno di un grande alone sferico di massa non visibile (oscura); notate la somiglianza con il tratto a velocità costante dell'esempio a sinistra. E' comunque importante notare che la rotazione avviene ancora in maniera differenziale; Tale aggettivo infatti si riferisce alla velocità angolare e non a quella orbitale. Quando questa è costante, come in questi esempi, la velocità angolare decresce con l'aumentare del raggio.

Siamo ora in grado di dare almeno una prima spiegazione a questo andamento.

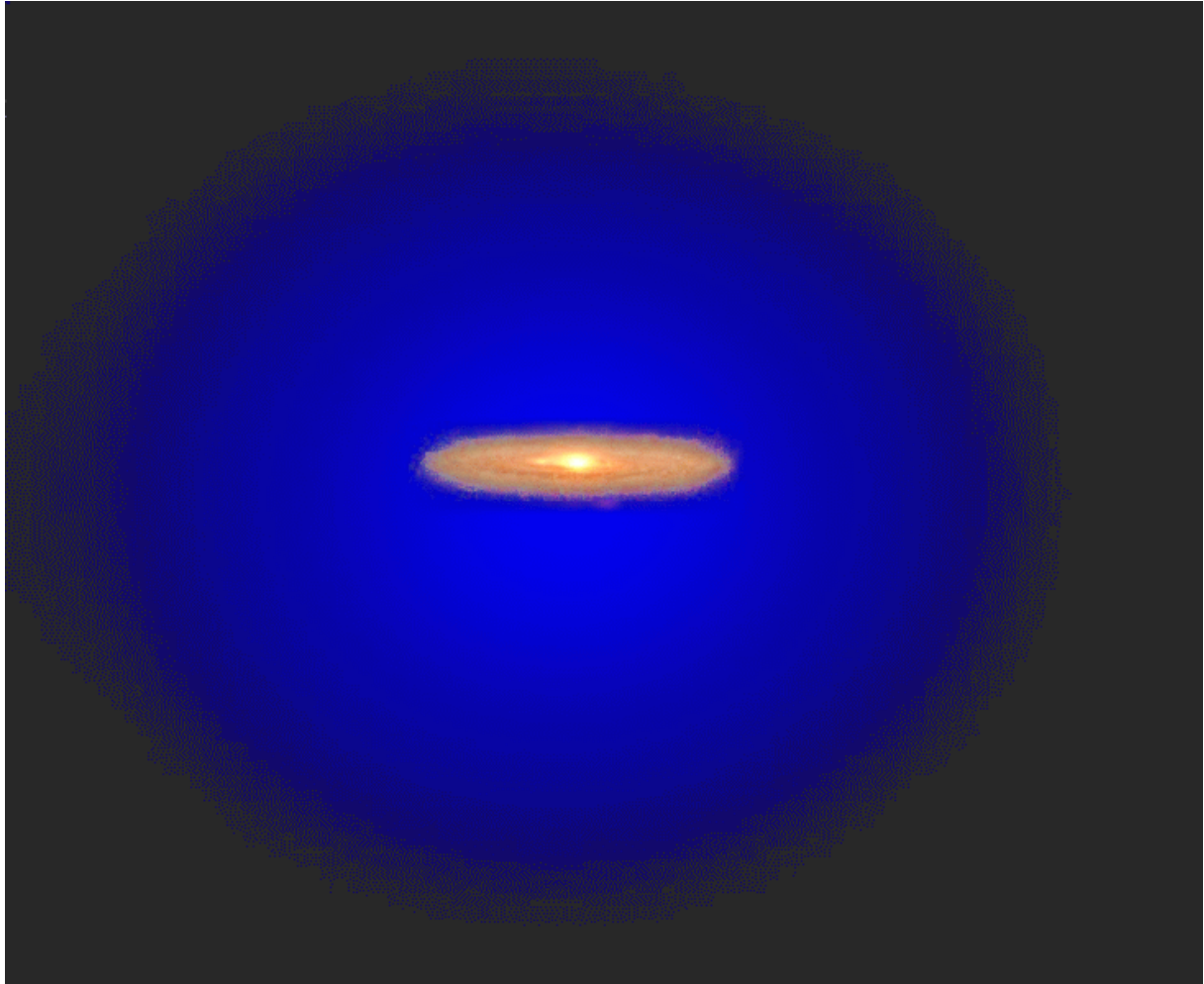
La curva di velocità piatta e costante significa che siamo ancora pienamente dentro la galassia, o meglio, che deve esserci un'enorme quantità di massa, che noi non riusciamo a vedere, lungo il disco visibile ed esternamente ad esso.

Questa massa mancante però non si riesce né a vedere né a capire di che tipo sia; si riesce solamente a postulare la sua esistenza in base all'attrazione gravitazionale che essa esercita sulle stelle e sulla materia visibile della galassia.

Altre prove sperimentali, alcune note fin dagli anni 30 del 900, della presenza di questa massa oscura in grandi quantità si hanno sempre analizzando gli effetti gravitazionali che essa produce su stelle, galassie e ammassi di galassie. Eccone alcune:

- **Velocità orbitale delle galassie negli ammassi:** le galassie, confinate negli ammassi, ruotano in modo non ordinato, attorno al centro di massa dell'ammasso, con velocità che dipendono dalla massa totale e dalla distanza dal centro. Dall'analisi del moto di questi oggetti possiamo risalire ad una stima della massa totale dell'ammasso, molte volte maggiore rispetto a quella stimata in base alla materia luminosa: la materia visibile è una frazione molto piccola di quella totale
- **Velocità orbitale delle stelle nelle periferie delle galassie:** le stelle nel disco esterno della nostra Galassia ruotano con velocità orbitali di circa 200 Km/s. Questa velocità è superiore alla velocità di fuga dalla galassia, se la sua massa è solamente quella visibile. In altre parole, dovremmo assistere ad un fenomeno di evaporazione: le stelle delle periferie dovrebbero lasciare la Via Lattea e disperdersi nello spazio. Tuttavia ciò non succede e le orbite sono piuttosto stabili; questo significa che ci deve essere della massa che non vediamo che aumenta il campo gravitazionale della galassia e consente velocità orbitali così alte.
- **Lenti gravitazionali:** la presenza di una grande massa è in grado di distorcere lo spazio-tempo nelle sue vicinanze. Senza entrare troppo nei dettagli, questo significa in pratica che la luce proveniente dallo spazio lontano che dovesse trovare sul suo cammino un oggetto molto massiccio (una galassia gigante oppure un ammasso di galassie) verrebbe scomposta, deviata ed amplificata dall'intenso campo gravitazionale, producendo un effetto simile a quello di una lente. L'intensità dell'effetto di lente gravitazionale è proporzionale alla massa dell'oggetto che la provoca: la massa necessaria per produrre alcune lenti osservate è centinaia di volte maggiore di quella visibile e misurabile.

Da cosa è composta e come è possibile non vedere una tale quantità di materia, che si pensa costituisca oltre il 90% dell'intero Universo? Al momento non si sa con precisione, ma si pensa essa sia costituita sia da materia ordinaria (cosiddetta barionica) sottoforma di nubi di gas diffuse e oggetti non stellari come pianeti, nane brune, pulsar e nane bianche (molto difficili da vedere a grandi distanze, dalla loro bassa luminosità intrinseca) e buchi neri, sia da materia non barionica, più esotica, che si pensa ne costituisca il 90%. A tal proposito si sono fatte molte ipotesi ma nessuna ancora ha trovato reale riscontro: un mare di neutrini o particelle ancora non scoperte come monopoli magnetici, particelle supermassicce tutte accomunate dal fatto di interagire solo gravitazionalmente con la comune materia e generalmente chiamate WIMP (Weakly Interacting Massive Particles: particelle massive debolmente interagenti). Il dibattito è ancora aperto e lungi da una conclusione: il problema della massa mancante è una delle grandi sfide che l'astrofisica moderna deve cercare di risolvere nei prossimi anni. L'unica prova certa che abbiamo a disposizione in questo momento è che in ogni galassia è presente un gigantesco alone di materia oscura, la cui densità è molto minore di quella del gas visibile. Nelle regioni centrali del disco prevale la materia visibile, mentre nelle parti esterne la materia oscura, responsabile anche del cosiddetto processo di frizione dinamica, alla base della cattura, da parte delle grandi galassie a spirale, di ammassi globulari o galassie satelliti. Questo è lo stesso processo che porterà le nubi di Magellano, satelliti della Via Lattea, ad essere letteralmente fagocitate entro qualche decina di milioni di anni.



Gli aloni di materia oscura che circondano le galassie a spirale (ma anche le ellittiche e gli ammassi) sono molto più estesi dei confini visibili e contengono ingenti quantità di massa, responsabile della curva di rotazione piatta e delle alte velocità orbitali. L'unico modo per scoprire la materia oscura è analizzare gli effetti gravitazionali prodotti su quella visibile poiché questo è l'unico modo con cui interagisce con l'ambiente.

### **Rapporto massa-luminosità**

La materia oscura, oltre ad essere il costituente principale dell'alone esterno delle galassie a spirale (tanto da dare la forma piatta alla curva di rotazione) ed essere implicata in molti processi dinamici (e forse anche di formazione galattica), è presente anche nelle galassie ellittiche e negli ammassi di galassie, come già precedentemente accennato; in effetti ovunque vi sia materia visibile è sempre presente anche materia oscura con una massa almeno 10 volte maggiore.

Un modo veloce per stimare la sua presenza è quello di utilizzare il rapporto massa-luminosità, riferito a quello solare.

Vediamo innanzitutto la relazione tra massa e luminosità

La luminosità (assoluta) delle stelle appartenenti alla sequenza principale (oltre il 90% del totale) è proporzionale alla loro massa, secondo la relazione:  $L \propto M^\alpha$  (dove  $\alpha \approx 3,5$ ). Assumiamo che la gran parte delle stelle del disco galattico sia di sequenza principale. Misurando la luminosità assoluta totale abbiamo una stima della massa stellare media. Se applichiamo questa semplice relazione per il disco visibile della Via Lattea, troviamo un valore di circa 0,7 masse solari: questo dato ci dice che la massa media stellare è composta da stelle più piccole del Sole. Ciò sembra contraddire la presenza di grandi e luminose stelle blu osservabili in ogni spirale. In realtà questo è ciò che si chiama un bias osservativo: le stelle blu sono di gran lunga le più luminose e concentrate

prevalentemente nei bracci a spirale, mentre le stelle giallo-rosse sono molto meno luminose, più piccole e sparse su tutto il disco galattico.

Quando osserviamo una galassia la concentrazione lungo i bracci e la maggiore luminosità delle stelle blu-azzurre ci crea l'illusione che esse siano la componente prevalente del disco, ma in realtà questa è appunto un'illusione. Secondo i modelli di formazione stellare infatti, il numero di stelle di piccola massa (paragonabile o minore di quella solare) che vengono create è tra le 100 e le 1000 volte maggiore rispetto alle stelle blu-azzurre; in altre parole, in una zona di formazione stellare, si crea una stella blu ogni circa 1000 stelle giallo-rosse. Ma non è tutto, poiché questo rapporto è valido solo durante il processo di formazione: le stelle blu infatti evolvono molto rapidamente mentre quelle giallo-rosse vivono molto più a lungo ed il rapporto va ancora di più in favore di quest'ultime. Benché quindi molto evidenti (e concentrate nei bracci), le giganti blu sono in numero nettamente minore rispetto alle classi G-K-M; non a caso la grande maggioranza delle stelle nelle vicinanze del nostro sistema solare è costituita da stelle estremamente rosse (classe K-M).

Non deve quindi stupire che la massa stellare media del disco (a prescindere dalla materia oscura) sia minore di quella solare: a volte ciò che si osserva con gli occhi può trarre in inganno e servono strumenti di misura più oggettivi.

Il rapporto massa-luminosità serve a dare una stima della massa oscura (non necessariamente sempre esotica, anche buchi neri, nane brune, gas freddo) di galassie e ammassi di galassie. Il metodo è abbastanza semplice: si misura, rispetto al Sole, la luminosità della galassia e la sua massa, attraverso l'analisi del moto delle componenti (stelle o galassie negli ammassi) e poi si effettua il rapporto tra la massa e la luminosità (esprese in unità solari). Il numero che ne deriva ci dà indicazioni su quante volte la massa totale è maggiore di quella responsabile dell'emissione della luce che osserviamo. In un tipico disco galattico la massa media delle stelle è intorno a quella del Sole e si può pensare quindi che essa emetta all'incirca la stessa radiazione della nostra stella, rispetto alla massa. Se tutta la massa emettesse radiazione, il rapporto massa-luminosità sarebbe molto simile ad 1 o addirittura minore per i dischi galattici popolati anche da stelle blu, che emettono più radiazione rispetto al sole, a parità di massa. Misurando il rapporto massa-luminosità delle galassie rispetto a quello solare, possiamo avere informazioni sulla popolazione stellare e sulle quantità di massa luminosa e oscura. Nelle regioni interne della Via Lattea ad esempio il rapporto arriva a 10. Cosa significa? Che c'è molta più massa rispetto a quella che dovrebbe emettere luce, massa non visibile e quindi oscura. Parte di essa sarà costituita da gas freddo, enormi nubi molecolari e polvere (materia barionica) che si riesce ad osservare e misurare nei dischi galattici.

Il rapporto tra luminosità e massa ci dà quindi informazioni sulla popolazione stellare e sul contenuto di materia oscura in ogni galassia.

Utilizzando questo strumento per le spirali, secondo il diagramma di Hubble, scopriamo che la classificazione non rispecchia solo la forma ma anche la composizione e distribuzione della materia al loro interno. Le spirali di tipo Sa hanno rapporti (medi) di  $\langle M/L_B \rangle = 6,2 \pm 0,6$ ; le Sb di  $\langle M/L_B \rangle = 4,5 \pm 0,4$  e le Sc di  $\langle M/L_B \rangle = 2,6 \pm 0,2$ . Questi valori portano a delle importanti considerazioni:

- 1) i rapporti sono, nel migliore dei casi, almeno 2 volte e mezzo maggiori rispetto a quelli solari, quindi c'è in ogni caso molta più materia di quella che emette radiazione.
- 2) La massa totale delle galassie non dipende dal tipo di spirale secondo la classificazione di Hubble; questo significa che non ci sono differenze significative di massa tra i tipi Sa, Sb e Sc (quest'ultime sono solo leggermente meno massicce delle Sa).

D'altra parte il rapporto massa-luminosità varia sensibilmente a seconda del tipo. Questo comportamento si spiega solamente assumendo che è la luminosità complessiva a variare a seconda del tipo galattico. Poiché la massa resta costante e quindi costante può essere pensato anche il rapporto tra massa oscura e luminosa, è evidente che quest'ultima debba emettere più luce rispetto al Sole: questo succede quando la massa della popolazione stellare media è superiore a quella solare. Infatti le stelle blu-azzurre hanno un rapporto massa-luminosità minore di quello solare (cioè emettono più luce in funzione della massa rispetto a quando faccia

il Sole). Un rapporto massa-luminosità minore, con massa che resta costante, può far pensare alla presenza crescente di giovani stelle blu-azzurre. In effetti, esaminando il colore dei diversi tipi, emerge che le Sa sono mediamente più rosse delle Sc, in accordo con quanto suggeriscono i loro rapporti massa-luminosità.

Le spirali Sa, definite early type, perché poste all'inizio del diagramma di Hubble (che una volta si pensava avesse un significato evolutivo) sono più rosse delle Sc, dette anche late type, molto più ricche di giovani e giganti stelle di classe spettrale O-B. Poiché queste stelle hanno vita breve, possiamo affermare che le galassie late-type abbiano un tasso di formazione stellare maggiore delle early-type e quindi contengano maggiori quantità di gas freddo (e caldo). In effetti le osservazioni confermano quanto appena ipotizzato.

- 3) Il rapporto massa-luminosità può essere utilizzato anche per indagare le regioni centrali del bulge. I moti stellari attorno al centro galattico lasciano pensare ad una massa molto maggiore di quella che si vede. In effetti, ad esempio, il rapporto massa-luminosità al centro della galassia di Andromeda (M31) è oltre 35 volte superiore rispetto a quello solare: questo significa che in una regione di pochi anni luce di diametro esiste una notevole massa che non emette luce (oscura): queste sono le tipiche condizioni per postulare l'esistenza di un buco nero (consolidate dall'analisi del moto delle stelle ad esso vicine) con una massa dell'ordine delle milioni di volte quella del Sole.