

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Astronomia

Effetto Doppler e applicazioni astrofisiche

Tesi di laurea

Presentata da:

Girolamodibari Andrea

Relatore:

Chiar.mo Prof. Dallacasa Daniele

Anno accademico [2019-2020]

*Ai miei nonni: Anna, Odo, Andrea e Loreta
per l'amore eterno
a Lisa
compagna di vita
a Simone
miniera di tranquillità e supporto
a Pietro e Luca
fonti di ispirazione
a Matteo e Beatrice
fratelli per cui lottare
a Tommaso
per renderti fiero
a Annalisa
per aver sempre creduto in me.*

Indice

| | |
|--|-----------|
| Introduzione | 1 |
| Doppler | 1 |
| Aspetti Astrofisici | 1 |
| 1 Effetto Doppler | 5 |
| 1.1 Effetto Doppler non relativistico | 5 |
| 1.1.1 Osservatore e Sorgente in quiete | 5 |
| 1.1.2 Osservatore in moto e sorgente a riposo | 6 |
| 1.1.3 Sorgente in moto e osservatore a riposo | 6 |
| 1.1.4 Osservatore e sorgente in moto | 7 |
| 1.1.5 Effetto Doppler longitudinale | 7 |
| 1.2 Effetto Doppler relativistico | 7 |
| 2 Applicazioni Astrofisiche | 9 |
| 2.1 Allargamento Doppler delle righe spettrali | 9 |
| 2.2 Sistemi stellari multipli | 11 |
| 2.3 Curva di rotazione | 12 |
| 3 Redshift z | 13 |
| 3.1 Redshift cosmologico | 14 |

Introduzione

Doppler

Nel 1845 *Christian Andreas Doppler* analizzò un fenomeno fisico dalle numerose applicazioni che ancora oggi porta il suo nome; l'austriaco si accorse che la frequenza o la lunghezza d'onda percepita da un osservatore, raggiunto da un'onda emessa da una sorgente che si trovi in movimento rispetto all'osservatore stesso, risulta *apparentemente variata* rispetto al valore originale.

Doppler studiò prevalentemente le *onde sonore*, ma l'applicabilità dell'effetto può essere estesa a tutte le onde, con particolari attenzioni alle *onde elettromagnetiche*.

Risulta immediato intuire che in ambito astronomico, dove le distanze tra noi osservatori e i vari oggetti celesti siano imponenti¹ lo scambio di informazioni sia consentito solo attraverso *la radiazione luminosa*.

Si noti inoltre, come la *natura ondulatoria* delle onde elettromagnetiche riassunta nelle leggi di Maxwell sia il punto cruciale della possibilità di applicazione dell'effetto Doppler in ambito Astrofisico.

Applicando questo fenomeno alla radiazione proveniente da oggetti così distanti, è possibile ottenere informazioni relative alle *proprietà dinamiche e fisiche* di stelle o galassie, affidandosi esclusivamente, all'analisi della luce da esse emessa.

Aspetti Astrofisici

Per capire come, attraverso l'applicazione dell'effetto Doppler alla luce proveniente da oggetti celesti, sia possibile ricavare informazioni è necessario illustrarne alcune caratteristiche fondamentali.

Un generico corpo celeste, per esempio una stella, emette delle radiazioni che, in base al tipo di oggetto, si estendono su ampio range di frequenze rispetto a quello del visibile².

L'intensità della radiazione è una grandezza che caratterizza l'emissione e varia al variare della frequenza, in modo da restituire una distribuzione delle intensità definita come *spettro*.

¹Basti pensare che la stella più vicina dista 1,33 parsec

²Una piccola finestra cui appartengono le onde elettromagnetiche di frequenza ν compresa tra 790 e 435 THz

Lo spettro di una stella può essere approssimato da quello di *corpo nero*³, che emette seguendo una distribuzione definita come *plankiana*

$$B^{CN}(\nu, T) = \frac{2h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Come visibile in Fig.1, confrontando rispettivamente gli spettri di corpo nero a 5778° K⁴ e quello del Sole, si nota come il primo sia una buona approssimazione del secondo.

Il passaggio chiave è che *la radiazione prodotta nella fotosfera di una stella, deve attraversare gli strati più esterni, definiti come atmosfera stellare*. Questi strati sono solitamente più freddi della fotosfera e sono popolati da atomi; qui, attraverso interazioni di tipo *bound-bound*, viene assorbita energia dagli atomi a precise lunghezze d'onda.

La conseguenza principale di questo processo è la presenza nello spettro di righe di energia mancanti, chiamate *righe in assorbimento*.

Queste righe sono visibili in Fig.1 in corrispondenza delle frecce rosse; è segnalato anche l'elemento responsabile dell'assorbimento.

Ovviamente gli atomi eccitati dall'assorbimento di energia, ritorneranno allo stato iniziale, emettendo l'esatta energia assorbita precedentemente, che appariranno nello spettro come picchi a determinate frequenze, chia-

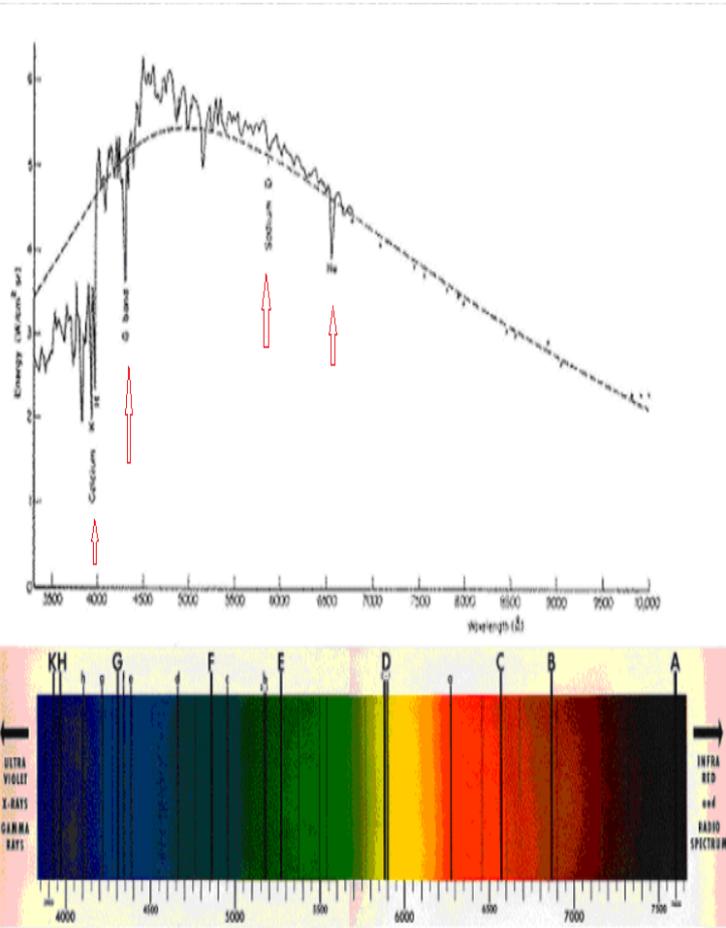


Figura 1: Spettro di corpo nero a 5778°K confrontato con quello del Sole. Sotto è presente uno spettro delle frequenze in correlazione alle righe di assorbimento.

³Il corpo nero è un oggetto ideale che assorbe completamente tutta la radiazione incidente e, in seguito, raggiungendo l'equilibrio termico, emette lo stesso quantitativo di radiazione assorbita. La distribuzione di intensità, varia in base alla temperatura assunta dal corpo nero.

⁴Temperatura della fotosfera solare.

mati righe in emissione determinando uno spettro definito come *spettro in emissione*.

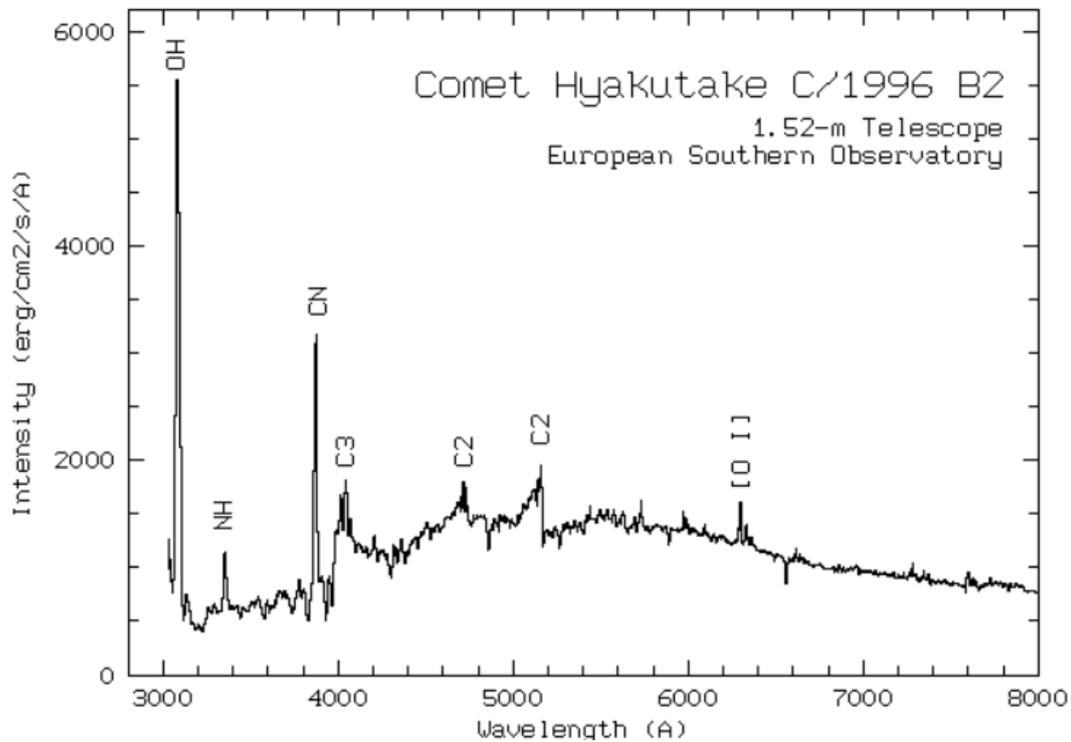


Figura 2: Spettro in emissione della cometa di Hyakutake, con righe di emissione associate agli elementi che emettono.

Queste quantità di energia assorbita o emessa, corrispondono a determinate frequenze, attraverso la legge⁵

$$E = h\nu$$

Il fenomeno di emissione o assorbimento è dovuto a salti da uno stato energetico ad uno più eccitato o viceversa. Il concetto cruciale è che il pacchetto di energia richiesto per la transizione, in base al tipo di transizione e dall'elemento considerato, è *sempre lo stesso*, così come la frequenza che ne corrisponde; per via di questa caratteristica questi valori di energia e frequenza possono essere tabulati in laboratorio.

Ottenuto, utilizzando lo *spettrometro*, il profilo spettrale di un oggetto celeste noteremo che alcune righe hanno caratteristiche particolari, ad esempio *non corrispondono alla frequenza prevista*, o hanno larghezza differente da quella aspettata.

Questi fenomeni sono causati dall'effetto Doppler, mediante cui possiamo ricavare informazioni riguardo all'oggetto stesso, come per esempio il suo

⁵ $h = 6.6 \times 10^{-27} \text{ ergs}$

moto radiale.

Concludendo, nel caso di una stella in moto di allontanamento o avvicinamento da noi osservatori, le righe in assorbimento trasleranno rispettivamente verso frequenza più alte (rosse) o basse (blu), questi spostamenti prendono il nome di *redshift* o *blueshift*.

1 Effetto Doppler

E' doveroso, prima di analizzare le applicazioni e conseguenze dell'effetto Doppler, fornire una *corretta formulazione a livello fisico e matematico del fenomeno*.

La trattazione sarà differenziata per il caso con velocità relativa tra osservatore O e sorgente S molto minore della velocità della luce

$$v \ll c$$

e il *caso relativistico* in cui è necessario tenere in considerazione le implicazioni della relatività speciale.

1.1 Effetto Doppler non relativistico

Si rende ora necessaria un'altra discriminazione basata sulle *possibili combinazioni di moto e quiete tra osservatore O e sorgente S* , le quali restituiscono cinque possibili scenari.

Per questa trattazione si terrà in considerazione una sorgente S di onde acustiche e un osservatore O , con un fissato sistema di riferimento solidale con il mezzo di trasmissione delle onde, e si supporrà che S e O possano muoversi lungo la loro congiungente.

La frequenza emessa dalla sorgente verrà indicata con ν_s mentre quella ricevuta dall'osservatore con ν_{oss} .

1.1.1 Osservatore e Sorgente in quiete

La sorgente emette onde acustiche con frequenza ν_s e lunghezza d'onda λ che si propagano a velocità v ; la frequenza dell'onda emessa ν_s è definita come

$$\nu = \frac{v}{\lambda}$$

risulta ovvio notare che la frequenza dell'onda, ν_{oss} , che giunge all'osservatore O fermo è uguale a ν_s , ossia la frequenza dell'onda emessa dalla sorgente.

1.1.2 Osservatore in moto e sorgente a riposo

In questo caso la sorgente S è a riposo e l'osservatore O gli sia in moto di avvicinamento o allontanamento con velocità costante v_0 ; la frequenza ricevuta dall'osservatore è uguale alla somma della frequenza emessa dalla sorgente ν_s e dal termine correttivo ⁶

$$\frac{v_0 v}{\nu_s}$$

dato dalla variazione dei fronti d'onda intercettati dal suo moto di avvicinamento o allontanamento.

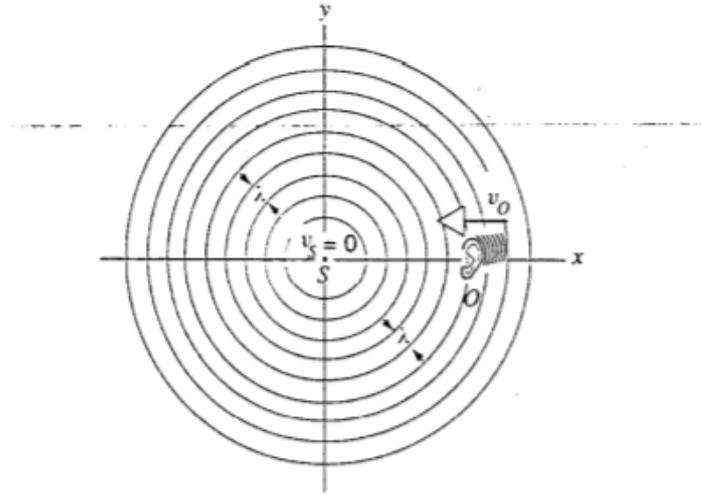


Figura 3: Caso: Osservatore in moto e sorgente a riposo

$$\nu_{oss} = \nu_s + \frac{v_0}{\lambda} = \nu_s \left(1 \pm \frac{v_0}{v}\right) \quad (1)$$

1.1.3 Sorgente in moto e osservatore a riposo

Si consideri ora il caso in cui l'osservatore O sia a riposo rispetto al mezzo di trasmissione e la sorgente S gli si avvicini con velocità costante v_s .

Dal momento che la sorgente segue il moto dei fronti d'onda, questi risultano più vicini di quanto sarebbero in condizioni di sorgente ferma; ossia la frequenza ricevuta dall'osservatore ν_{oss} è maggiore di quella emessa ν_s dalla sorgente.

Al contrario se la sorgente si

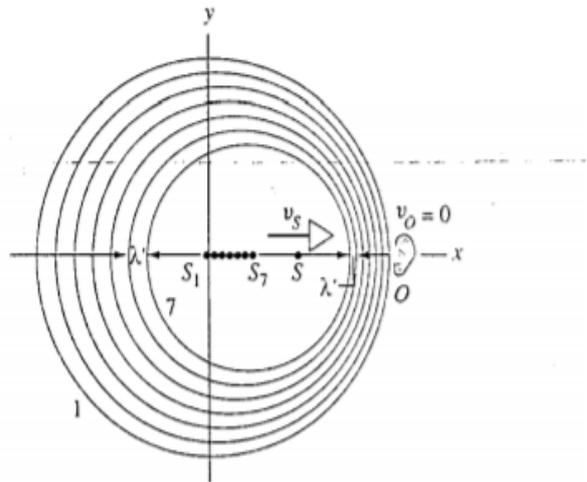


Figura 4: Caso: Sorgente in moto e osservatore a riposo

⁶ v è la velocità di propagazione del suono nel mezzo considerato

allontanasse la frequenza ricevuta ν_{oss} sarebbe quindi minore di quella emessa ν_s . La frequenza vista dall'ossevatore sarà quindi

$$\nu_{oss} = \frac{v}{(v \pm v_s)/\nu_s} = \nu_s \frac{v}{v \pm v_s} \quad (2)$$

1.1.4 Osservatore e sorgente in moto

Nel caso invece in cui sia l'osservatore sia la sorgente siano in moto lungo la retta congiungente $O-S$ con velocità rispettivamente v_0 e v_s la frequenza ricevuta dall'osservatore ν_{oss} sarà data dalla somma dei fenomeni sopracitati implicando una variazione alla frequenza emessa dalla sorgente ν_s

$$\nu_{oss} = \nu_s \frac{v \pm v_0}{v \mp v_s}. \quad (3)$$

Dunque, in generale, *l'avvicinamento tra sorgente e osservatore implica sempre un aumento della frequenza, mentre un allontanamento ne causa una diminuzione.*

Per generalizzare si potrebbe introdurre *il moto del mezzo attraversato dalle onde acustiche*, esemplificando un ipotetico moto dell'aria, sommando a numeratore e denominatore dell'equazione (3), un termine V_m .

1.1.5 Effetto Doppler longitudinale

L'effetto Doppler longitudinale è la generalizzazione della casistica analizzata sopra, nel caso in cui sorgente S o osservatore O abbiano componenti della velocità estranee alla congiungente $S-O$.

Contribuiscono al fenomeno, infatti, solamente le componenti della velocità lungo la direzione $S-O$, le quali sono facilmente ottenibili moltiplicando le velocità per il *coseno* dell'angolo θ definito dalla direzione $S-O$ e la velocità dell'oggetto (sorgente o osservatore) in moto.

Per esempio, nel caso in cui la sorgente sia in moto e l'osservatore fermo si avrà

$$\nu_{oss} = \frac{\nu_s}{1 \pm \frac{v_s}{v} \cos\theta} \quad (4)$$

1.2 Effetto Doppler relativistico

Come già sottolineato precedentemente, riveste un ruolo particolarmente importante, in ambito astronomico, l'applicazione dell'effetto Doppler e delle sue conseguenze alla radiazione luminosa; le quali però, per via della loro velocità di propagazione $v_s \sim c$, possono risentire delle implicazioni di uno

dei lavori pubblicati da Einstein nel 1905, ossia della *relatività speciale*. In primo luogo, contrariamente alla trattazione effettuata per le onde sonore, applicando l'effetto Doppler alla luce, è *risultato impossibile identificare un mezzo di trasmissione* relativamente a cui si muovono sorgente e osservatore. In sostanza i casi di moto della sorgente S con osservatore O in quiete e viceversa (capitoli: 1.1.2-1.1.3) sono indistinguibili.

Le variazioni relativistiche sono dovute all'introduzione del *concetto di dilatazione temporale*; si definiscono inoltre le seguenti quantità:

- Il fattore di Lorentz $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_s^2}}$
- $\beta = \frac{v}{c}$

Introducendo una sorgente S in moto e un osservatore O fermo si avrà τ_s e τ_{oss} , definiti come periodo di vibrazione emesso dalla sorgente e il corrispettivo ricevuto dall'osservatore. Essi risentiranno di una variazione legata *al fattore di Lorentz*⁷ $\tau_{oss} = \gamma\tau_s$.

Tenendo in considerazione che

$$\nu_{oss} = \frac{1}{\tau_{oss}} = \frac{1}{\gamma\tau_s} = \frac{\nu_s}{\gamma} \quad (5)$$

si può giungere alla formulazione relativistica dell'effetto Doppler, a partire dall'*effetto Doppler longitudinale* con la correzione data dal *fattore di Lorentz* ottenendo

$$\nu_{oss} = \nu_s \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta\cos\theta} \quad (6)$$

La legge dell'effetto Doppler longitudinale si ottiene per $\cos\theta = \pm 1$, con il più/meno che indica rispettivamente un avvicinamento/allontanamento relativo tra sorgente e osservatore

$$\nu_{oss} = \nu_s \frac{\sqrt{1-\beta_r^2}}{1 \pm \beta_r} \quad (7)$$

con $\beta_r = \frac{v_r}{c}$, e v_r velocità relativa tra sorgente e osservatore.

Nell'approssimazione di v_r , e di conseguenza β_r , piccolo si ha

$$\frac{\sqrt{1-\beta_r^2}}{1 \pm \beta_r} = \sqrt{\frac{(1-\beta_r)(1+\beta_r)}{(1 \pm \beta_r)^2}} = \sqrt{\frac{1 \pm \beta_r}{1 \mp \beta_r}} \approx \sqrt{1 \mp 2\beta_r} \approx 1 \mp \beta_r \quad (8)$$

Da cui discendente

$$\nu_{oss} = \nu_s(1 \mp \beta_r) \quad (9)$$

⁷Risulta ovvio, data la definizione di β che se $v_s \ll c$, β sia approssimabile a zero, e γ tenda a uno rendendo $\tau_{oss} = \tau_s$.

Questi risultati furono confermati sperimentalmente per la prima volta da Ives e Stilwell nel 1938. Risulta notevole inoltre, che la formula relativistica predica un *effetto Doppler trasversale*, effetto puramente relativistico, perchè non esiste un corrispondente effetto Doppler trasversale nella fisica classica.

Questa previsione discende dall'equazione

$$\nu_{oss} = \nu_s \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta}$$

in cui ponendo $\theta = 90^\circ$ si ha:

$$\nu_{oss} = \nu_s \sqrt{1 - \beta^2} \tag{10}$$

Quindi se la nostra linea di osservazione è a 90° rispetto alla *direzione del moto relativo*, dovremmo osservare una frequenza ν_{oss} *inferiore* rispetto alla frequenza ν_s della sorgente.

La spiegazione è effettuata in termini di dilatazione temporale. Se si considera la *sorgente in moto* come un orologio che vibra con oscillazioni elettromagnetiche, vedremo un dato numero di oscillazioni in un tempo che è *più lungo* del tempo proprio. Ossia, nella nostra unità di tempo vediamo un numero di oscillazioni *più piccolo* di quello che si vede nell'unità di tempo del riferimento proprio.

Perciò osserviamo una *frequenza inferiore a quella propria*.

2 Applicazioni Astrofisiche

Come già anticipato precedentemente le applicazioni dell'effetto Doppler in astrofisica sono numerose e importanti. Infatti tutti gli oggetti celesti, sorgenti di onde elettromagnetiche sono in moto relativo rispetto ai nostri strumenti di osservazione, che siano a Terra o in orbita. Dall'agitazione termica di *nubi di gas*, alle *stelle in rotazione* rispetto al centro galattico, passando dai *sistemi binari* o dalle *galassie in allontanamento*, tutti subiscono uno spostamento nello spettro causato dall'effetto Doppler.

2.1 Allargamento Doppler delle righe spettrali

L'effetto Doppler, oltre a causare una *traslazione del centroide della riga* a causa del moto *macroscopico* relativo tra corpo celeste e il nostro punto di osservazione, può essere riscontrato anche a livello *microscopico*; infatti si misura la sua influenza persino nella radiazione emessa dai gas presenti nel mezzo interstellare, attraverso un fenomeno chiamato *allargamento*

Doppler.

Si consideri infatti il caso di una nube ferma rispetto all'osservatore. Gli atomi al suo interno sono in moto termico e le frequenze del sistema a riposo sono spostate o verso il rosso o verso il blu, a seconda della direzione della velocità radiale v_r propria di ogni particella rispetto all'osservatore. Si parla infatti di *redshift* quando la particella si allontana e di *blueshift* quando si avvicina, come mostrato in Fig.5.

Per l'effetto Doppler⁸, in condizioni di $\gamma \approx 1$ si ha che

$$\nu_{oss} = \nu_s(1 + \beta \cos\theta) = \nu_s(1 + \frac{v_r}{c})$$

da cui si può ottenere il $\Delta\nu$ come $\Delta\nu = \nu_{oss} - \nu_s$ ottenendo quindi

$$\Delta\nu = \nu_s \frac{v_r}{c} \quad (11)$$

La velocità radiale quindi è pari a

$$v_r = c \frac{\nu_{oss} - \nu_s}{\nu_s} \quad (12)$$

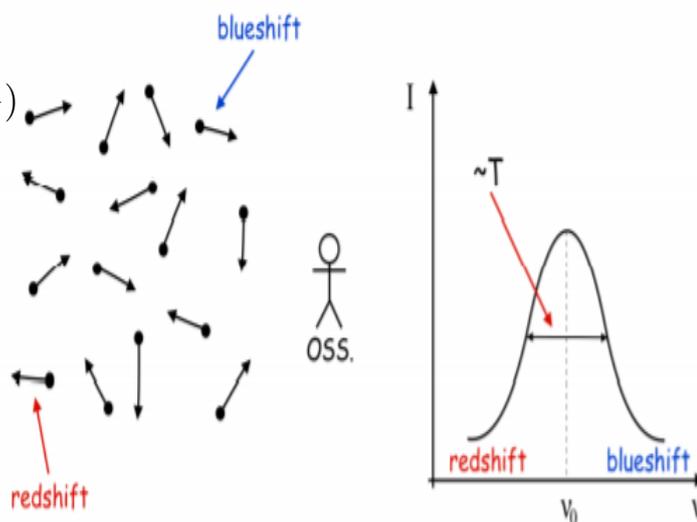


Figura 5: Allargamento Doppler

La forma dello spettro della riga viene modificata, ma l'energia resta invariata. Moti puramente sistematici danno luogo ad uno spostamento della riga, ma, poichè la nube è soggetta a moti termici con distribuzione di velocità Maxwelliana, avremo una velocità più probabile data da

$$v_r = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

che sostituita nella Formula 11 ci fornirà la misura dell'allargamento dovuto all'*agitazione termica* della sorgente

$$\Delta\nu_D = \frac{\nu_s}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (13)$$

Si può generalizzare questo effetto nelle stelle dove la possibile presenza di *moti convettivi* impone l'aggiunta di un termine di velocità v_{turb} sotto radice.

⁸Formula 9

E' importante notare come l'allargamento della riga $\Delta v_D \propto T^{1/2}$, quindi maggiore sarà la temperatura, e quindi la velocità delle molecole all'interno della nube, tanto maggiore sarà l'effetto di questo fenomeno. Ragionando al contrario è inoltre possibile ricavare la temperatura dell'oggetto a partire dall'allargamento osservato per mezzo dello spettrografo.

Questo allargamento agisce prevalentemente nel *core* della riga a causa della rapida decrescita esponenziale tipica della *distribuzione masswelliana delle velocità*.

Il *centroide* $\nu_0 \equiv \nu_s$ non si sposta se la nube è ferma rispetto all'osservatore.

Se invece la nube si

allontana da noi, il centroide si sposta verso il rosso. In questo caso, il *redshift delle particelle viene accentuato*, mentre il *blueshift* viene attenuato. Questo spiega la forma asimmetrica della riga in Fig.6 , che non è più una *gaussiana*.

Infine, un'ulteriore contributo all'allargamento della riga può essere dato dalla *rotazione* degli oggetti celesti, quali stelle o galassie. Infatti il moto rotazionale costante di questi corpi contribuirà all'effetto Doppler con una parte del corpo in allontanamento (*redshift*) e una in avvicinamento (*blueshift*).

Ovviamente, maggiore è la velocità di rotazione, maggiore è l'allargamento della riga spettrale; attraverso questo effetto è possibile determinare la *velocità di rotazione* di alcuni corpi celesti tramite l'analisi della larghezza delle righe spettrali⁹.

2.2 Sistemi stellari multipli

Al contrario della nostra esperienza, legata al sistema solare, sono numerosi i *sistemi stellari multipli*; ossia due o più stelle legate *gravitazionalmente*.

⁹Nel caso in cui l'asse di rotazione non coincida con la direzione di osservazione

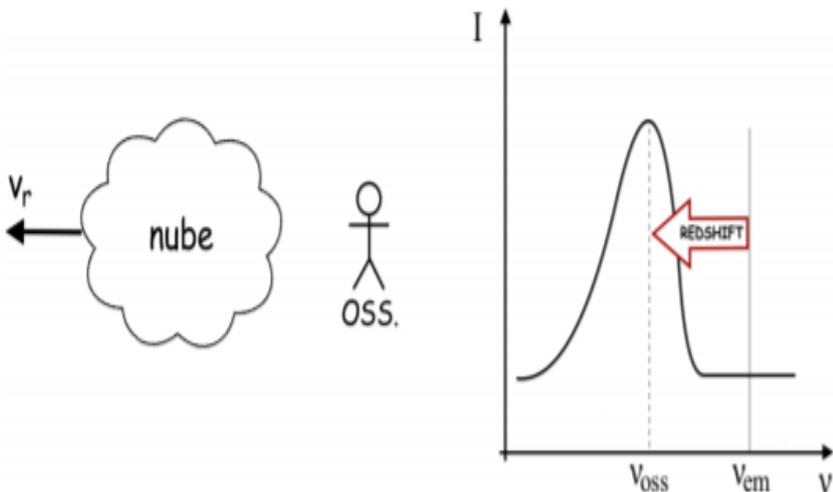


Figura 6: Effetto Doppler dovuto al moto relativo della nube

Questo legame influenza le orbite degli oggetti, facendo sì che le stelle orbitino intorno a un *comune baricentro*. Mettendosi nella situazione più semplice, cioè un *sistema binario*, la distanza che separa le due stelle è molto minore della distanza che intercorre dal nostro sistema di osservazione al sistema multiplo. Per questo motivo, questi tipi di sistemi sono spesso *irrisolvibili*, in altre parole è complesso distinguere le singole stelle, che invece ci appariranno come una sola.

Ciò nonostante si può sfruttare l'effetto Doppler, nel caso il piano orbitale delle stelle lo permetta.

Ossia esiste un *intervallo di tempo* in cui le velocità dei due corpi hanno la direzione della linea di vista, ma verso opposto: una stella che si allontana ed una stella che si muove verso l'osservatore.

In queste condizioni è possibile notare nello spettro del sistema un allargamento e sdoppiamento delle righe, a causa dal redshift imposto dalla stella in allontanamento e dal blueshift della stella in avvicinamento.

Le stelle binarie risolte mediante lo studio delle conseguenze dell'effetto Doppler sullo spettro vengono definite *Binarie Spettroscopiche*.

2.3 Curva di rotazione

La *curva di rotazione* di una galassia descrive la velocità della rotazione delle stelle in funzione della loro lontananza dal centro.

Nelle galassie a spirale ci si aspetterebbe di vedere una curva discendente¹⁰, ossia tanto più una stella è lontana dal centro galattico, tanto più lenta è la sua orbita. Invece, prima tra tutti Vera Rubin nel 1969, studiando la galassia Andromeda si accorse che i dati mostravano più che una curva una retta orizzontale. Si ritiene che questo andamento sia causato da enormi quantità di materia non ordinaria e non ancora osservata, presenti all'esterno della nostra galassia¹¹.

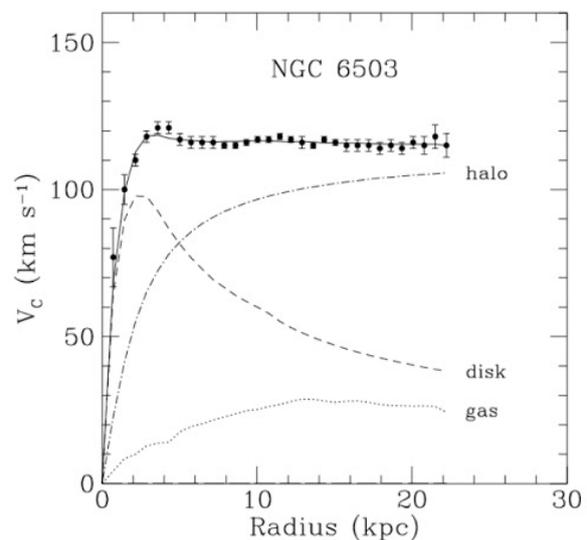


Figura 7: Curva di rotazione.

¹⁰La cosiddetta *caduta kepleriana*

¹¹Questa materia prende il nome di *Materia Oscura*.

Per ottenere la curva di rotazione dove le stelle terminano, e quindi è impossibile dedurre la velocità di rotazione dal moto delle stelle stesse, si ricorre allo studio del moto, mediante *effetto Doppler*, di enormi bolle di idrogeno atomico HI ai confini delle galassie a spirale. L'analisi delle nubi di HI è utile perchè presenta le seguenti proprietà:

- Emettendo alla lunghezza d'onda di 21 cm^{12} , la galassia risulta quasi trasparente.
- E' uno dei pochissimi fenomeni *radio* che emette una riga, su cui poter fare una misura di Effetto Doppler¹³.

3 Redshift z

Ricapitolando, il *redshift* è il fenomeno per cui la luce o un'altra radiazione elettromagnetica emessa da un oggetto in allontanamento, per via del *effetto Doppler*, risulta possedere una frequenza minore osservata rispetto a quella emessa dalla sorgente.

Il redshift è definito usando la lettera z .

La velocità di recessione, cioè la velocità con cui si allontana un oggetto da noi, è misurata dalla differenza tra lunghezza d'onda emessa da una sorgente, λ_e , e osservata λ_{oss} ; in condizioni non relativistiche¹⁴ le formule per descrivere l'effetto Doppler ci daranno

$$\frac{v_r}{c} = \frac{\lambda_{oss} - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_e} \quad (14)$$

Da cui tenendo, in considerazione la relazione $\frac{v_r}{c} = z$, discende

$$z \equiv \frac{\lambda_{oss} - \lambda_e}{\lambda_e}$$

Mentre nel caso relativistico, $v \approx c$, si ha

$$1 + z = \frac{\sqrt{1 + \frac{v}{c}}}{\sqrt{1 - \frac{v}{c}}}$$

Nel caso quindi, in cui $z > 0$ la sorgente avrà un moto di allontanamento da noi osservatori.

Per valori di $z \ll 1$ il redshift è approssimabile come effetto Doppler.

¹²Corrispondente frequenza 1420,405 MHz

¹³A differenza di *Sincrotrone* e *Bremsstrahlung*, caratterizzate da emissione continue che non permettono misure di Effetto Doppler

¹⁴ $v \ll c$

Nelle condizioni in cui z non sia molto minore di uno, il parametro z non identifica più i moti relativi tra stelle o galassie e osservatore, e rende necessaria l'introduzione del concetto di *espansione dell'universo*.

3.1 Redshift cosmologico

Il concetto di *espansione dell'universo* si deve all'astronomo *Edwin Hubble* nel 1929. Studiando alcune stelle con distanza conosciuta, notò una relazione empirica tra la distanza degli oggetti, D , e il redshift, legati tra loro da un coefficiente chiamata *costante di Hubble*¹⁵ definita come H_0

$$v_r = H_0 D \quad (15)$$

da cui sostituendo v_r si ottiene

$$z = \frac{H_0 D}{c} \quad (16)$$

Le conseguenze della *legge di Hubble* sono fondamentali nella cosmologia; la relazione impone infatti che tutti gli oggetti celesti si allontanino gli uni dagli altri con velocità tanto maggiore quanto maggiore è la distanza tra di loro. Per valori piccoli di z , ossia nell'universo prossimo, i moti radiali¹⁶ degli oggetti sono ancora rilevanti e vale l'approssimazione del redshift come effetto Doppler.

Mentre se consideriamo dei valori di z maggiori, vale a dire l'*universo lontano*, il *redshift cosmologico* non è da considerarsi come misura della velocità propria del corpo celeste, quanto più come l'espansione dello spazio tra sorgente e osservatore.

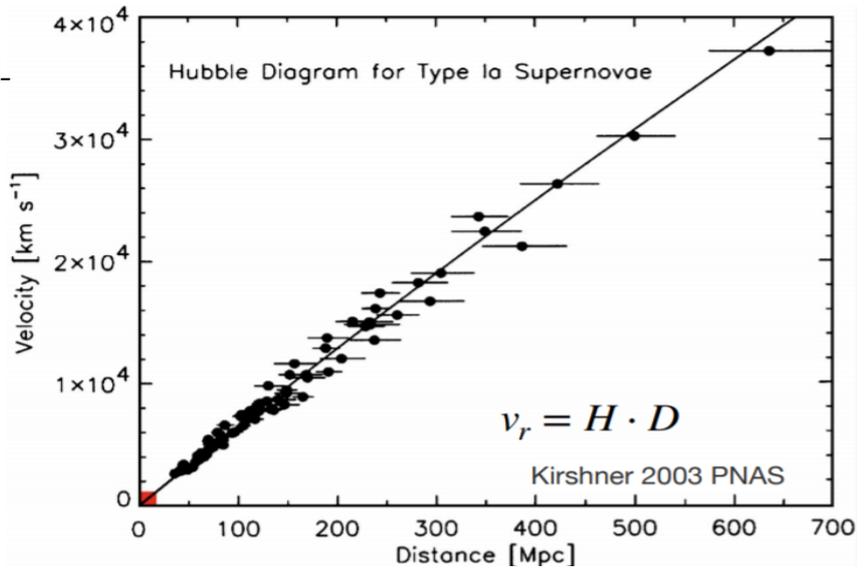


Figura 8: Grafico velocità-distanza. La disposizione delle galassie lungo la retta implica la proporzionalità tra distanza e velocità di allontanamento, da cui deriva la legge di Hubble

¹⁵La misura di H ricavata dallo studio sulle supernovae è $H \approx 74.03 \pm 1.42 \frac{km}{sMpc}$.

¹⁶Dettati dalle velocità peculiari dei singoli oggetti.

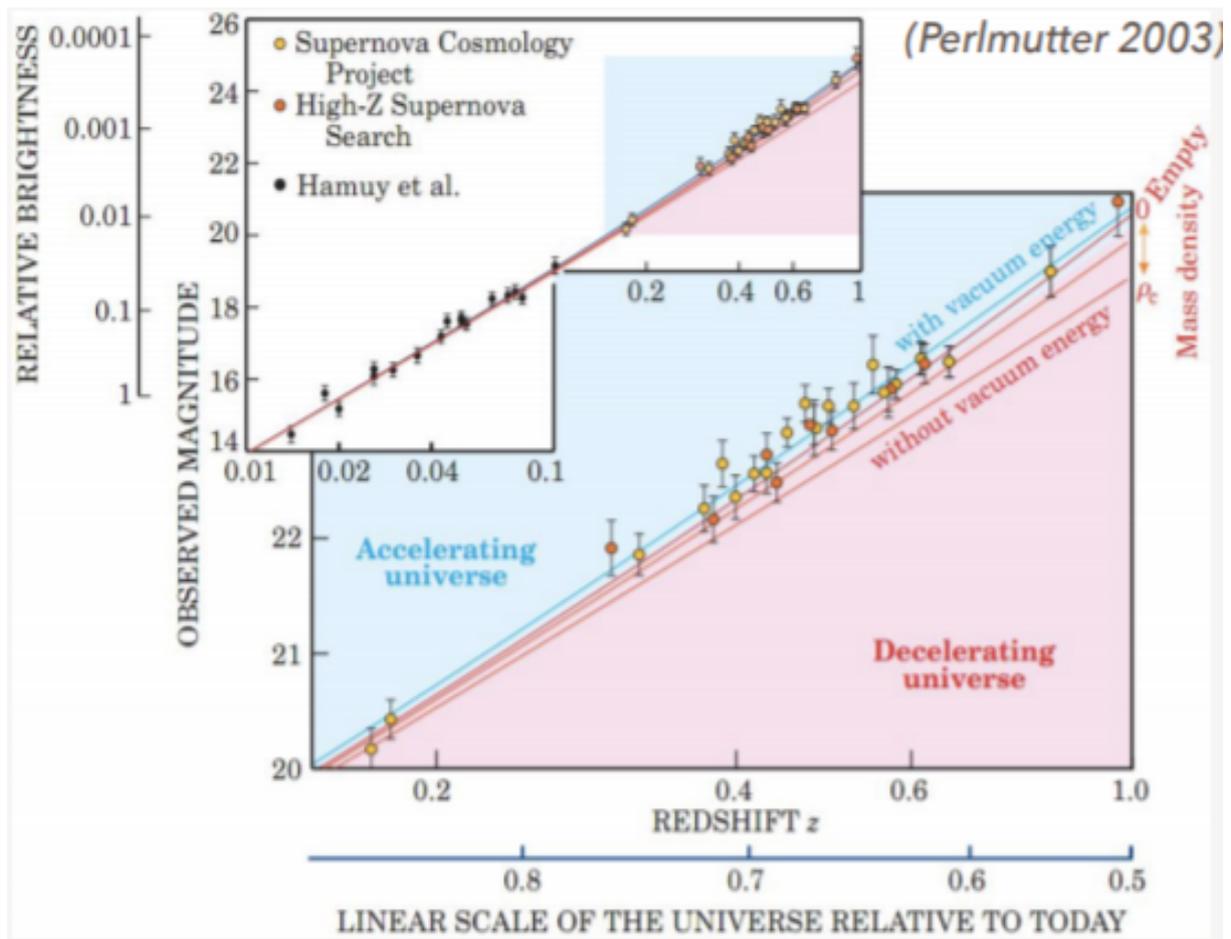


Figura 9: Grafico magitudine osservata-redshift. Da notare le supernovae a $z \sim 1$ ricadono nella parte superiore alla bisettrice, confermando la teoria dell'universo in espansione accelerata.

Inoltre le scoperte effettuate dal gruppo *High-z*, negli anni 90, sulle supernovae¹⁷ ad alti valori z , hanno messo in mostra come l'espansione dell'universo non sia costante ma accelerata (Fig.9), richiedendo l'introduzione di un termine di tensione negativa che ne causi l'accelerazione.¹⁸. Si sottolinea inoltre che la terra non è un punto privilegiato di osservazione, poichè in qualsiasi punto dell'universo si vedrebbe lo stesso effetto.

Risulta ora chiara l'importanza e la potenza di questa relazione che ci permette di stimare la *distanza* di un oggetto a partire dalla misura di z .

¹⁷Lo studio è effettuato sulle supernovae perchè l'esplosione rilascia una quantità di energia fissa, $E \sim 10^{49} \text{ erg}$, e si possono utilizzare come *candele standard*.

¹⁸Questo termine è identificato come *energia oscura*.

Riferimenti bibliografici

- [1] D.Halliday & R.Resnick & K.S.Krane (2001), *Fisica 1*, C.E.A
- [2] Richard P. Feynman (2001), *La fisica di Feynman: 2*, Zanichelli
- [3] D.Halliday & R.Resnick & K.S.Krane (2004), *Fisica 2*, C.E.A
- [4] R.Resnick (2009), *Introduction to Special Relativity*, John Wiley & Sons Inc
- [5] Karttunen H. et al. (2009), *Fundamental Astronomy*, Pringer Verlag
- [6] D.Dallacasa (2019), *Processi di Radiazione e MHD*, Dispense
- [7] F.Ferraro (2019), *Astrofisica Stellare*, Dispense
- [8] L.Ciotti (2019), *Astrofisica Extragalattica*, Appunti
- [9] Condon & Matthews (2018), *Λ CDM Cosmology for Astronomers*, PASP