

ALMA Mater Studiorum
Università degli Studi di Bologna

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea in Astronomia

Dipartimento di Fisica e Astronomia

Effetto Doppler e
Applicazioni Astrofisiche

Elaborato Finale

Candidato:

Simone Guidotti

Relatore:

Prof. Daniele Dallacasa

Sessione II° 1° seduta autunnale
Anno Accademico 2013/2014

INDICE

INTRODUZIONE	2
L'EFFETTO DOPPLER	3
STORIA	3
EFFETTO DOPPLER NON RELATIVISTICO	3
EFFETTO DOPPLER RELATIVISTICO	6
EFFETTO DOPPLER IN AMBITO ASTRONOMICO	8
REDSHIFT	9
REDSHIFT COSMOLOGICO	10
REDSHIFT GRAVITAZIONALE	11
BLUESHIFT	11
ALLARGAMENTO DOPPLER	12
APPLICAZIONI ASTROFISICHE	13
SISTEMI BINARI	13
CURVA DI ROTAZIONE	14
BIBLIOGRAFIA	16

INTRODUZIONE

L'effetto Doppler è quel fenomeno per cui un osservatore percepisce un segnale a frequenza o lunghezza d'onda diversa rispetto a quella emessa alla sorgente. Il segnale può essere sonoro o luminoso e l'effetto Doppler produce una variazione della tonalità del suono o del colore della luce. Quest'effetto fisico si verifica quando la sorgente e l'osservatore sono in moto relativo l'uno rispetto all'altro sulla loro congiungente, perciò è detto anche effetto Doppler radiale. Infatti, non considerando il caso relativistico, se l'osservatore si muove perpendicolarmente alla congiungente sorgente-osservatore non percepirà il cambio di frequenza.

In sostanza è “causato” dalla percezione dell'osservatore perché la frequenza del suono o della luce non cambia effettivamente, ma è proprio il fatto che ci sia un moto relativo tra la sorgente e l'osservatore che fa sì che quest'ultimo senta la variazione di frequenza.

Nella vita quotidiana abbiamo modo di sperimentare l'effetto Doppler ogni volta che udiamo il suono di un'ambulanza con le sirene spiegate: il suono si intensifica all'avvicinarsi del mezzo di soccorso e diminuisce progressivamente di intensità quando questo inizia ad allontanarsi da noi. Questo è accaduto perché la sorgente e l'osservatore erano in moto relativo tra loro, per cui nell'avvicinamento si è avuto un aumento di frequenza dell'onda sonora, e nell'allontanamento una diminuzione.

Allo stesso modo si opera in astronomia: osservando la luce proveniente da altre stelle, galassie, ammassi di galassie o più in generale sistemi, se ne osserva lo spostamento delle righe spettrali degli elementi che compongono quello spettro. In questo modo si può stabilire se si stanno avvicinando o allontanando, la velocità, la velocità di rotazione di stelle e galassie, ecc. Successivamente andremo ad analizzare i vari casi fisici, quando si muove o solo la sorgente o solo l'osservatore o entrambi, ma nel caso astronomico si interpreta quest'effetto come dovuto al solo moto della sorgente che ci invia luce con una certa lunghezza d'onda, che noi percepiamo spostata. Questo spostamento è chiamato “redshift” se lo spettro è spostato verso il rosso, cioè a lunghezze d'onda maggiori (indica un allontanamento della sorgente da noi) oppure “blueshift” se lo spettro è spostato verso il blu, cioè a lunghezze d'onda minori (indica un avvicinamento della sorgente da noi). I termini blueshift e redshift derivano dal fatto che questi due colori sono proprio gli estremi dello spettro visibile della luce.

L'EFFETTO DOPPLER

STORIA

Il fenomeno fisico che consiste nel cambiamento della frequenza o della lunghezza d'onda rispetto al valore originario, percepita da un osservatore raggiunto da un'onda emessa da una sorgente che si trovi in movimento rispetto all'osservatore stesso, prende il nome dal matematico e fisico Christian Andreas Doppler (Salisburgo, 29 Novembre 1803 – Venezia, 17 Marzo 1853). Egli scoprì l'effetto e lo analizzò per primo studiando i segnali sonori: nel 1845 ascoltando una banda che suonava su un treno in movimento, e confrontandola con i suoni di un'altra banda ferma vicino ai binari, notò che l'intensità sonora delle note variava dapprima con l'avvicinarsi del treno ad esso, per poi cambiare nuovamente durante l'allontanamento. Nel 1842 presentò alla Royal Bohemien society il documento che spiegava l'effetto Doppler, la sua più grande intuizione e solo successivamente qualche anno dopo fu confermata la sua tesi attraverso gli esperimenti. Il documento trattava il principio fisico per cui la frequenza di un segnale luminoso o sonoro era in relazione con la velocità relativa dell'osservatore. Dati i tempi, Doppler non poté concentrare i suoi studi sulla luce delle stelle, in quanto gli strumenti erano ancora arretrati per questo tipo di esperimenti. La sua teoria che trattava i segnali come onde longitudinali che si propagano nella materia, andò a completarne un'altra di Fresnel, la quale diceva che la luce è un'onda trasversale: Doppler non accettò mai la teoria di Fresnel, ma ciò non toglie che la sua scoperta non confutasse tale teoria. Infine nel 1846 Doppler pubblicò una trattazione completa di tale fenomeno considerando l'effetto contemporaneo del movimento sia della sorgente che dell'osservatore.

EFFETTO DOPPLER NON RELATIVISTICO

Sulla base degli esperimenti acustici eseguiti da Doppler si possono distinguere vari casi dell'effetto, a seconda che siano la sorgente o l'osservatore a muoversi. Se in acustica è possibile fare semplicemente questa distinzione perché esiste un mezzo materiale (aria) dove le onde si propagano, e quindi si può scegliere un sistema di riferimento rispetto al quale tale mezzo risulti fisso, nell'ottica (che riguarda i casi astronomici) invece non è possibile, perché manca un sistema di riferimento privilegiato, quindi per convenzione considereremo che a muoversi sia la sorgente. Inoltre l'effetto Doppler si presenta diversamente nel caso in cui le onde si muovano a velocità prossime a quelle della luce o nel caso in cui abbiano velocità non relativistiche: infatti, se nel secondo caso un osservatore che si muove perpendicolarmente alla congiungente sorgente-osservatore non percepisce alcun cambiamento della frequenza del segnale (quindi non risente dell'effetto doppler), nel caso relativistico questa componente prende parte alla risultante dell'effetto.

In seguito vengono illustrati brevemente i diversi casi:

- 1) sorgente ed osservatore fissi.

Si consideri una piccola sorgente puntiforme che emetta onde sonore nell'aria uniformemente in tutte le direzioni: se la sorgente vibra v_s volte al secondo, la frequenza delle onde emesse è v_s . Esse viaggiano nel mezzo con una velocità v e hanno perciò una lunghezza d'onda $\lambda = v/v_s$. Una volta giunte all'osservatore, queste hanno una frequenza v_0 uguale a v_s .

$$v_0 = \frac{\lambda}{V} = v_s$$

2) sorgente fissa, osservatore in moto verso la sorgente con velocità V_0 .

In questo caso l'osservatore riceve, nell'unità di tempo, oltre alle v_s onde del caso (1) della quiete relativa, anche le V_0/λ onde supplementari che si trovano sul cammino da lui percorso nell'unità di tempo. Per questo motivo l'osservatore percepisce una frequenza superiore a quella emessa dalla sorgente:

$$v_0 = v_s + \frac{V_0}{\lambda} = v_s \left(1 + \frac{V_0}{V} \right)$$

Nel caso contrario, cioè di allontanamento dell'osservatore dalla sorgente, la frequenza finale v_0 percepita risulterà minore della frequenza v_s emessa dalla sorgente e sarà descritta dalla relazione:

$$v_0 = v_s \left(1 - \frac{V_0}{V} \right)$$

In conclusione la relazione che descrive nel modo più generale lo spostamento dell'osservatore rispetto alla sorgente a riposo è la seguente:

$$v_0 = v_s \left(1 \pm \frac{V_0}{V} \right)$$

3) sorgente in moto verso l'osservatore con velocità V_s e l'osservatore fermo.

In questo caso la sorgente segue il moto dei fronti d'onda, quindi questi sembreranno più vicini rispetto al caso del sistema in quiete (caso 1) in cui la sorgente è ferma. Perciò la frequenza v_0 sarà maggiore rispetto a quella di partenza perché il numero di vibrazioni v_s emesse dalla sorgente nel percorrere nell'unità di tempo lo spazio $(V - V_s) \cdot \Delta t$ sono viste nello spazio $V \cdot \Delta t$, pertanto dovrà sussistere la relazione:

$$v_0 = v_s \left(\frac{V}{V - V_s} \right)$$

Nel caso contrario in cui la sorgente si allontana dall'osservatore basterà cambiare il segno alle velocità, ottenendo la relazione per la frequenza v_0 minore di v_s :

$$v_0 = v_s \left(\frac{V}{V + V_s} \right)$$

La formula generale che descrive questo tipo di effetto doppler non relativistico è data da:

$$v_0 = v_s \left(\frac{V}{V \pm V_s} \right)$$

con il segno (-) se la sorgente si avvicina, (+) nel caso contrario.

Nel caso di particolare interesse astronomico in cui la velocità della sorgente V_s è molto minore di v , è possibile sviluppare in serie, arrestandosi al primo termine, la formula per la frequenza v_0 finale:

$$v_0 = v_s \left(\frac{V}{V \pm V_s} \right) = v_s \left(1 \pm \frac{V_s}{V} \right)^{-1} = v_s \left(1 \mp \frac{V_s}{V} + \dots \right)$$

Questa relazione spiega che per velocità dell'onda molto grandi rispetto a quelle della sorgente o dell'osservatore, non si è in grado di distinguere se a muoversi sia il primo o il secondo, ma si può solo dire che essi sono in moto relativo l'uno rispetto all'altro.

- 4) sorgente in moto con velocità V_s e osservatore in moto con velocità V_0 , nella stessa direzione.

Questo caso è una combinazione dei due tipi di effetto doppler trattati precedentemente nei casi (2) e (3). Avvengono simultaneamente ed indipendentemente, per cui:

$$v_0 = v_s \left(\frac{V \pm V_0}{V} \right) \cdot \left(\frac{V}{V \pm V_s} \right) = v_s \left(\frac{V \pm V_0}{V \pm V_s} \right)$$

Occorre ricordare che ogni moto dell'osservatore e/o della sorgente l'uno verso l'altra aumenta la frequenza, mentre un allontanamento la diminuisce.

- 5) moto della sorgente, del mezzo con velocità V_m e dell'osservatore lungo la stessa direzione.

Nel caso del suono si può pensare ad un moto dell'aria con velocità V_m , pertanto alla formula del caso precedente va aggiunto un termine:

$$v_0 = v_s \left(\frac{V \pm V_m \pm V_0}{V \pm V_m \pm V_s} \right)$$

- 6) moto della sorgente e dell'osservatore in direzioni diverse.

Questo è il caso più generale e reale possibile: solo le componenti della velocità nella direzione sorgente-osservatore portano ad un effetto doppler cosiddetto longitudinale, quindi bisogna considerare le componenti longitudinali.

EFFETTO DOPPLER RELATIVISTICO

In questa sede verrà trattato il comportamento di effetto doppler di tipo relativistico nel caso di onde elettromagnetiche: se per le onde acustiche si necessita di un mezzo nel quale esse possano propagarsi, quindi i casi in cui la sorgente sia in moto oppure ferma non sono equivalenti, nella nostra trattazione delle onde elettromagnetiche non si nota una sostanziale differenza. Non essendoci alcun mezzo di propagazione, si parlerà di una velocità relativa sorgente-osservatore, dato che non c'è alcun modo di definire se a muoversi sia l'uno o l'altro perché la velocità delle onde è indipendente da entrambi i moti (sorgente e osservatore).

Parlando appunto di caso relativistico, cioè con velocità prossime alla velocità della luce, si dovrà tener presente degli effetti relativistici, primo fra tutti la dilatazione dei tempi. Questa conseguenza delle trasformazioni di Lorentz implica che un intervallo di tempo non è lo stesso per due osservatori in moto relativo; l'osservatore fisso misura un intervallo di tempo più lungo di un fattore γ di quello misurato dall'osservatore mobile, nel caso in cui il fenomeno avvenga in un punto fisso del sistema mobile.

Se si considera una sorgente S con periodo di vibrazione τ_s , tale periodo per l'osservatore O fermo è:

$$\tau_0 = \gamma \cdot \tau_s$$

$$\text{con } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \text{ e } \beta = \frac{V}{c}$$

L'allontanamento di S da O determina un $\Delta\tau_s$ tra un fronte d'onda e l'altro pari a:

$$\Delta\tau_s' = V \frac{\tau_s'}{c} = \beta \frac{\tau_s}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Quindi per l'osservatore ricevente O nel caso in cui la sorgente sia in allontanamento si avrà:

$$\tau_0 = \tau_s \sqrt{\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)}$$

Quest'espressione vale anche se è l'osservatore ad allontanarsi e la sorgente è a riposo perché, come detto in precedenza, non si può definire chi sia dei due a muoversi parlando di onde elettromagnetiche. Invece nel caso opposto di avvicinamento sorgente-osservatore si avrà:

$$\tau_0 = \tau_s \sqrt{\left(\frac{1-\beta}{1+\beta}\right)}$$

Dal momento che la frequenza ha un andamento inversamente proporzionale al periodo, le formula per la frequenza sono facilmente ricavabili dalle precedenti: nel caso in cui S e O siano in avvicinamento si ottiene:

$$v_0 = v_s \sqrt{\left(\frac{1-\beta}{1+\beta}\right)}$$

Nel caso opposto di avvicinamento si ha:

$$v_0 = v_s \sqrt{\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)}$$

In generale l'effetto doppler classico non relativistico si può riassumere con la formula di un osservatore fermo e del moto della sorgente puntiforme in una direzione che forma un angolo θ con la direzione sorgente-osservatore:

$$v_0 = \frac{v_s}{1 - \beta \cos \theta}$$

Per ricavare la formula relativistica basta sostituire la frequenza v_s con v_s/γ , ottenendo così:

$$v_0 = v_s \frac{\sqrt{(1-\beta_s^2)}}{1 - \beta_s \cos \theta}$$

Da questa relazione si può calcolare un caso particolare del fenomeno, cioè per $\cos \theta = \pm 1$, a seconda dell'avvicinamento (+) o dell'allontanamento (-) relativo sorgente-osservatore, si ricava la legge relativistica dell'effetto doppler longitudinale:

$$v_0 = v_s \frac{\sqrt{(1-\beta_r^2)}}{1 \pm \beta_r}$$

dove $\beta_r = V_r/c$ e V_r indica la velocità relativa sorgente-osservatore.

Per bassi valori di β , e quindi di V_r , la formula scritta sopra si riduce alla seguente:

$$v_0 \cong v_s (1 \mp \beta_r)$$

Infatti se trattiamo il caso di avvicinamento sorgente-osservatore si ha:

$$\frac{\sqrt{(1-\beta_r^2)}}{1-\beta_r} = \sqrt{\left(\frac{(1-\beta_r)(1+\beta_r)}{(1-\beta_r)^2}\right)} = \sqrt{\left(\frac{1+\beta_r}{1-\beta_r}\right)} \cong \sqrt{(1+2\beta_r)} \cong 1 + \beta_r$$

Invece nel caso di allontanamento relativo sorgente-osservatore:

$$\frac{\sqrt{(1-\beta_r^2)}}{1+\beta_r} = 1 - \beta_r$$

Nel caso particolare in cui la sorgente si muova perpendicolarmente alla congiungente sorgente-osservatore, $\cos \theta = 0$, perciò:

$$v_0 = v_s \sqrt{1 - \beta^2} \cong v_s \left(1 - \frac{\beta_r^2}{2} + \dots \right)$$

Tale espressione indica il cosiddetto effetto doppler trasversale, per cui non si verificherà né un avvicinamento né un allontanamento, ma è solamente una conseguenza del fenomeno relativistico della dilatazione del tempo per cui si osserverà una variazione della direzione da cui la sorgente sembra emettere. Questo particolare fenomeno è proporzionale a β^2 , quindi di assai più difficile osservazione, tanto che non era mai stato messo in evidenza prima dell'avvento della teoria della relatività ristretta.

EFFETTO DOPPLER IN AMBITO ASTRONOMICO

L'effetto Doppler ha un'importanza fondamentale nell'ambito astronomico perché è lo strumento principale utilizzato dagli astronomi per ricavare la maggior parte delle informazioni riguardanti i corpi celesti. Per esempio grazie ad esso si scoprirono i sistemi binari di stelle considerate, sulla base delle loro immagini, erroneamente singole, si può utilizzare per calcolare la velocità di avvicinamento o allontanamento delle stelle e delle galassie da noi e per misurare la velocità di rotazione di stelle e galassie. L'effetto Doppler si può inoltre utilizzare per calcolare la velocità di avvicinamento o allontanamento delle stelle e delle galassie e per misurare la velocità di rotazione di stelle e galassie.

Prendendo ad esempio il Sole, questo emette radiazione luminosa dalla sua fotosfera ad una temperatura di circa 6000 K: supponendo che una stella emetta uno spettro elettromagnetico con buona approssimazione simile a quello emesso da un corpo nero, la luce per giungere a noi deve attraversare l'atmosfera stellare, la quale è più fredda della superficie solare. In essa sono presenti dei gas che assorbono certe frequenze dello spettro cosicché a noi giungerà uno spettro continuo su cui sono sovrapposte delle righe scure, che sono caratteristiche delle sostanze che si trovano nell'atmosfera stellare. Visto che la posizione delle righe può essere misurata con grande precisione, dal loro studio si ricava la composizione chimica dell'atmosfera stellare. Il ruolo dell'effetto doppler entra in gioco quando si osservano stelle, galassie o altri sistemi lontani da noi: il loro spettro elettromagnetico riporta righe di assorbimento/emissione degli elementi spostate rispetto ai valori tabulati in laboratorio utilizzando una sorgente stazionaria.

Dal momento che lo spettro elettromagnetico si estende da alte frequenze (quindi basse lunghezze d'onda) nel rosso fino a basse frequenze (quindi alte lunghezze d'onda) nel blu, se la sorgente di cui osserviamo lo spettro è in allontanamento da noi osserveremo un redshift, cioè le righe di assorbimento/emissione saranno spostate verso il rosso, mentre si avrà un blueshift, cioè le righe di assorbimento/emissione saranno spostate verso il blu se la sorgente è in avvicinamento verso di noi.

Oltre ai movimenti relativi sorgente-osservatore e ai già sopra citati usi, l'effetto doppler è utilizzato in astronomia anche per altri due importantissimi fenomeni: il redshift cosmologico grazie al quale si studia l'espansione cosmologica dell'Universo e il redshift gravitazionale grazie al quale si osservano i fenomeni di attrazione gravitazionale di cui daremo qualche cenno.

REDSHIFT

Il redshift è il fenomeno per cui per effetto Doppler le righe dello spettro vengono spostate verso il rosso, cioè la frequenza dell'onda elettromagnetica osservata è minore della frequenza emessa alla sorgente. Ciò indica un allontanamento della sorgente dall'osservatore oppure, essendo in moto relativo, un allontanamento dell'osservatore dalla sorgente.

Il redshift, indicato con z , è un numero puro cioè senza unità di misura ed è definito come segue:

$$z = \frac{\lambda_{osservata} - \lambda_{teorica}}{\lambda_{teorica}}$$

dove:

$\lambda_{osservata}$ =lunghezza d'onda misurata dall'osservatore

$\lambda_{teorica}$ =lunghezza d'onda emessa dalla sorgente (tabulata)

La condizione che determina se si sta parlando di redshift o blueshift è il fatto che z sia maggiore o minore di zero: nel primo caso, cioè di allontanamento della sorgente si avrà $z > 0$, mentre nel secondo, cioè quando c'è avvicinamento relativo, si ha $z < 0$.

Ora prendendo in esame il primo caso distinguiamo due differenti situazioni: se la velocità v di allontanamento dall'osservatore è molto minore della velocità della luce c , allora il redshift è approssimabile con la formula:

$$z = \frac{V_r}{c}$$

Nel secondo caso di velocità di allontanamento vicina alla velocità della luce bisogna tener conto delle relazioni relativistiche:

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

Analogamente per la frequenza, essendo il reciproco della lunghezza d'onda, ad un aumento di λ corrisponderà un ν minore, per cui:

$$z = \frac{\nu_{emessa} - \nu_{osservata}}{\nu_{osservata}}$$

In generale la condizione per cui il redshift può essere approssimato all'effetto doppler è $z \ll 1$.

Fino ad ora si è analizzato il fenomeno chiamato redshift in un contesto generale, ma ne esistono tre tipi causati ognuno da un fenomeno differente:

- 1) il redshift approssimabile all'effetto doppler dovuto all'allontanamento relativo sorgente-osservatore di cui abbiamo già trattato sopra;
- 2) il redshift cosmologico dovuto all'espansione dell'Universo, per cui le lunghezze

- d'onda aumentano perchè si “crea” nuovo spazio tra sorgente e ricevente;
- 3) il redshift gravitazionale nel quale intervengono effetti di attrazione gravitazionale dovuti a grandi campi gravitazionali.

REDSHIFT COSMOLOGICO

Il redshift cosmologico è l'effetto doppler dovuto all'espansione dell'Universo e comporta anch'esso un allontanamento sorgente-osservatore. L'osservazione della radiazione luminosa proveniente da galassie lontane ha portato alla scoperta che le righe di assorbimento dello spettro sono spostate verso il rosso di una quantità che è proporzionale alla distanza delle galassie dalla nostra. Ciò porta alla conclusione che le galassie si stanno allontanando da noi con una velocità che è tanto maggiore quanto maggiore è la loro distanza da noi.

Questo è proprio quello dapprima ipotizzato e poi scoperto da Hubble nel 1929 tramite la relazione:

$$V = H_0 \cdot d$$

che mostra come la velocità di allontanamento V delle galassie rispetto alla nostra sia direttamente proporzionale alla loro distanza d , quindi le galassie più lontane si allontaneranno più velocemente. H_0 è la costante di Hubble, il cui valore attuale è stimato intorno a $2,176 \cdot 10^{-18}$ Hz (o 67,15 km/Mpc·s). La legge di Hubble fu la prima vera prova a sostegno dell'espansione dell'Universo e provocò l'abbandono definitivo di tutte le altre teorie dell'Universo stazionario.

Da essa si può ricavare anche il redshift z : partendo dalla formula generale del redshift

$$\frac{\lambda_{oss} - \lambda_{teor}}{\lambda_{teor}} = z \text{ si può ricavare:}$$

$$z = \frac{a(t_0)}{a(t)} - 1$$

con $a(t)$ fattore di scala proporzionale alla lunghezza d'onda di un'onda elettromagnetica emessa al tempo t , e $a(t_0)$ fattore di scala proporzionale alla lunghezza d'onda di un'onda elettromagnetica ricevuta al tempo t_0 .

Successivamente, dal momento che per velocità molto minori della velocità della luce c il redshift è approssimabile all'effetto doppler, ho che $z \approx \frac{V}{c}$ quindi:

$$z = \frac{H_0 \cdot d}{c}$$

Si può notare che l'approssimazione per $z \ll 1$ attuata da Hubble è giusta perché quando egli studiò questo fenomeno il campo delle distanze accessibili era tale che le velocità erano sempre piccole. L'interpretazione più semplice di questo allontanamento è quello in termini di un'esplosione iniziale, il Big Bang, in cui al tempo $t=0$ le varie “parti” dell'Universo sono state scagliate in tutte le direzioni. Per avere una stima di quanto sia

lontano questo avvenimento basta calcolare l'inverso della costante di Hubble:

$$\frac{1}{H_0} = 15 \text{ miliardi di anni}$$

Questa è una sovrastima perchè c'è stato un rallentamento dovuto all'attrazione gravitazionale mutua di corpi che si stanno allontanando.

In sostanza il redshift cosmologico non indica il mero allontanamento tra sorgente e osservatore, ma segnala l'espansione dello spazio tra essi; infine il termine Cosmologico sta a significare che queste osservazioni di espansione possono essere fatte da qualunque punto dell'Universo e si noterà allo stesso modo questo fenomeno.

REDSHIFT GRAVITAZIONALE

Il redshift gravitazionale è lo spostamento verso valori maggiori della lunghezza d'onda della luce emessa da una sorgente che si trova in un campo gravitazionale. Fu misurato per la prima volta sulla Terra negli anni Sessanta studiando sia i raggi gamma emessi/assorbiti dai nuclei atomici sia la luce proveniente dal Sole, ma per quest'ultima si ottennero risultati scarsi a causa del movimento della superficie solare che introduce il redshift dovuto all'effetto Doppler.

Il fenomeno è chiamato spostamento di Einstein perché deriva dalle leggi della Relatività generale esposte dallo stesso scienziato tedesco e consiste nella perdita di energia da parte di un fotone della radiazione elettromagnetica quando esce da un campo di gravitazione, quindi la sua lunghezza d'onda aumenta spostando così lo spettro verso frequenze minori e cioè verso il rosso. Il valore di z (redshift) varierà a seconda dell'intensità del campo, ma in ogni caso ogni qualvolta una radiazione elettromagnetica incontra regioni di campo magnetico più deboli, la radiazione subirà uno spostamento dello spettro verso il rosso, quindi una diminuzione della frequenza.

Gli oggetti celesti che si prestano alla misurazione del redshift gravitazionale sono le nane bianche, stelle molto compatte: questo strumento è un mezzo importante per capire la struttura di questi corpi perché ci fornisce il valore del rapporto $\frac{\text{massa}}{\text{raggio}}$ che, unito al valore $\frac{\text{massa}}{\text{raggio}^2}$ ricavato da misurazioni della gravità superficiale per via spettroscopica, permette di ottenere i singoli valori della massa e del raggio.

BLUESHIFT

Il blueshift è l'opposto del redshift e consiste in uno spostamento delle righe spettrali dello spettro elettromagnetico verso il blu, cioè verso frequenze maggiori e lunghezze d'onda minori. Ciò nel calcolo di z comporta che questo numero puro sia negativo, quindi se una sorgente si sta avvicinando ad un osservatore fermo, quest'ultimo percepirà il segnale con una frequenza maggiore di quella emessa alla sorgente. La causa non è riconducibile solo

allo spostamento di un oggetto come nel caso delle stelle, ma esiste anche la possibilità che questo fenomeno si verifichi quando gli effetti gravitazionali delle galassie superino l'effetto di espansione dell'Universo come accade nel Gruppo Locale, cioè l'insieme di galassie di cui fa parte anche la Via Lattea. Un esempio palese di Blueshift si ha proprio nel Gruppo Locale sopra citato dove si può osservare che le righe dello spettro della Galassia di Andromeda sono shiftate verso il blu a causa di un avvicinamento della suddetta galassia con la nostra Via Lattea. Secondo una stima potrebbero collidere tra 3/4 miliardi di anni e in quel caso non si assisterebbe ad alcun urto geometrico perché le galassie sono essenzialmente fatte di vuoto quindi queste si attraverseranno come due fantasmi, ma dal punto di vista degli effetti gravitazionali e dei gas sarà un disastro perché questi hanno una grande superficie d'urto: le due galassie faranno un'oscillazione armonica fino a diventare tra 7/8 miliardi di anni un'unica galassia ellittica di grandi proporzioni.

ALLARGAMENTO DOPPLER

L'effetto Doppler comporta conseguenze anche a livello microscopico: infatti si osserva un allargamento delle righe spettrali, il cosiddetto allargamento doppler. Ciò deriva dal fatto che la radiazione emessa verrà spostata in frequenza a seconda della velocità della particella emittente e dal fatto che essa si stia allontanando o avvicinando. Tale velocità aumenta all'aumentare della temperatura, perciò uno dei problemi principali della teoria cinetica dei gas risiede nel determinare il numero di elettroni con velocità compresa in un certo intervallo. Per ovviare a questa problematica si prende in considerazione la distribuzione di Maxwell-Boltzmann:

$$N(0, u) = \int_0^u \frac{e^{-\frac{v^2}{u_0^2}}}{\sqrt{\pi} \cdot u_0} dv$$

dove $N(0,u)$ rappresenta il numero di elettroni aventi velocità compresa tra 0 e u dove si sono considerate solo le componenti lungo la linea di vista perché è la velocità radiale, cioè quella che congiunge sorgente e osservatore, che comporta l'effetto Doppler; ν è la frequenza di una riga spettrale emessa da un elettrone a riposo e u_0 indica il valore più probabile delle velocità delle particelle di un gas che è uguale a:

$$u_0 = \sqrt{\frac{2kT}{M}}$$

con k (costante di Boltzmann)= $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/k, T la temperatura in kelvin e M la massa molecolare.

Nonostante l'effetto Doppler sia un ostacolo alla migliore risoluzione del profilo della riga, tramite esso si può ricavare la temperatura nelle alte regioni dell'atmosfera, soprattutto per i gas a bassa pressione.

Il gas emette una linea di cui se ne possono misurare facilmente la larghezza $\Delta\lambda$ e il profilo; da qui si può ricavare la temperatura dalla seguente formula:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 2u_0 \frac{\sqrt{\log 2}}{c} = \frac{2}{c} \sqrt{\frac{2kT \log 2}{M}}$$

con λ_0 lunghezza d'onda a riposo.

In presenza di turbolenze al termine sotto radice va aggiunto un termine ζ che indica la velocità di tale turbolenza. Questo effetto assume particolare importanza nelle giganti e supergiganti rosse a basse temperature dove ci si aspetterebbe di trovare righe sottili.

Il problema cruciale dello studio sta nell'identificare esattamente la riga, l'elemento e la sua posizione nello spettro. Per questo motivo si ricorre alla ricerca delle righe presenti in molte atmosfere planetarie (come il doppietto del sodio e quello dell'ossigeno) nelle quali non ci sono contenimenti e il libero cammino medio delle particelle è elevato, perciò si può avere un profilo netto delle righe e una buona base per le misure dell'allargamento doppler.

APPLICAZIONI ASTROFISICHE

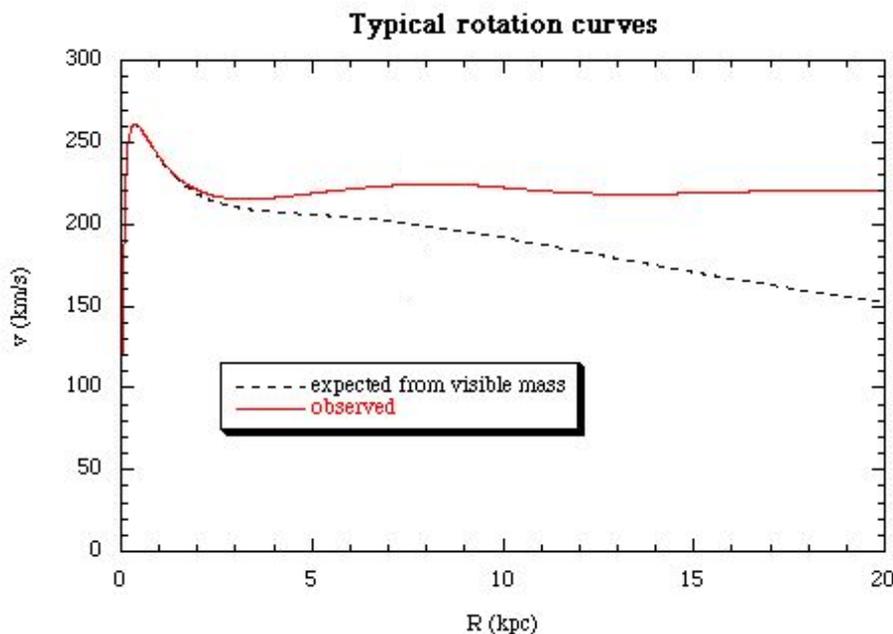
Come detto in precedenza l'effetto doppler è usato in astronomia in vari ambiti. Oltre a studiare l'avvicinamento o l'allontanamento di stelle o galassie già analizzato in precedenza, di seguito ci concentreremo su altre due applicazioni: lo studio dei sistemi binari e la ricerca della curva di rotazione delle galassie.

• SISTEMI BINARI

I sistemi binari sono insiemi di due stelle che orbitano intorno al centro di massa comune; la più luminosa costituisce la stella primaria, mentre l'altra viene chiamata secondaria. Queste, avendo tra loro una distanza minima (astronomicamente parlando) rispetto alla distanza che le separa dall'osservatore, cioè dalla Terra, risultano come un'unica stella ma con comportamenti anomali. Poiché le due stelle di un sistema binario ruotano l'una attorno all'altra, l'osservatore riceve luce di lunghezza d'onda variabile proprio grazie all'effetto Doppler. Un caso lampante fu scoperto nel 1889 dall'astronomo Charles Edward Pickering che studiò il sistema Mizar: vide che era costituito da due stelle, Mizar A e Mizar B e per questo costituiva un chiaro esempio di sistema binario spettroscopico, cioè rilevabile solo attraverso uno spettroscopio in grado di rilevare il movimento alternato delle due stelle. È solo attraverso l'acquisizione dello spettro di un oggetto celeste che si può misurare con buona precisione la posizione delle righe (di emissione e/o di assorbimento) che confrontata con la posizione "di laboratorio" ci indica se è presente o meno uno spostamento per effetto Doppler, ossia dovuto alla presenza di un movimento radiale. Nel caso delle binarie spettroscopiche che costituiscono un sistema di stelle in rotazione rispetto al centro di gravità, le righe spettrali possono essere doppie (distinte) oppure, se il sistema è molto stretto, solo allargate ma con una periodicità che riflette la rotazione. Esiste anche un altro tipo di sistema binario: le binarie visuali, le quali possono essere risolte semplicemente attraverso un potente telescopio.

• CURVA DI ROTAZIONE

La curva di rotazione di una galassia è una particolare curva ottenuta attraverso l'effetto Doppler, che descrive come varia la velocità delle varie parti di una galassia al variare della distanza dal centro. Lo studio delle galassie a spirale è più semplice, quindi prenderemo in considerazione la galassia M31 conosciuta anche con il nome di Galassia di Andromeda. Osservandola attraverso uno spettroscopio si nota che nella parte del disco che si allontana, la lunghezza d'onda delle righe spettrali sarà leggermente spostata verso il rosso, mentre nella parte che si avvicina le lunghezze d'onda sono spostate verso il blu. Confrontando gli spostamenti a varie distanze dal centro e usando le leggi della gravità e della meccanica si può conoscere come la densità della materia nella galassia varia con la distanza dal centro. Il tipico grafico di una curva di rotazione ha questo aspetto:



Si può scomporre in tre parti:

- 1- Bulge: l'andamento di velocità è lineare con la distanza;
- 2- Disco: l'andamento è piatto e la velocità si mantiene costante;
- 3- Bracci: l'andamento dovrebbe decrescere ma rimane piatto;

Per le leggi di Keplero nei bracci di spirale ci si sarebbe aspettato un andamento decrescente della curva come $V \sim \frac{1}{\sqrt{R}}$ ma ciò non accade e il regime rimane piatto. Ciò indica che la curva di rotazione non segue un andamento kepleriano e il fatto notevole della costanza della velocità estesa fino ai bordi lontani della galassia dove viene emessa poca luce sta ad indicare che la luminosità non è un'indicazione della massa. Così oggi molti astronomi ritengono che il regime piatto sia dato dalla presenza di materia oscura, materia di cui se ne conoscono gli effetti gravitazionali ma non si sa da che cosa sia composta. Per stimare le curve di rotazione si ricorre principalmente all'osservazione dell' $H\alpha$ a $6562,81\text{\AA}$ per osservazioni ottiche e dell'HI, l'idrogeno neutro che emette a 21 cm, nel radio, perché tramite quest'ultimo si può tracciare una mappa di tutta la galassia

che si sta osservando in quanto l'HI ha una lunghezza d'onda maggiore della polvere, che assorbe ad alte frequenze e riemette nell'infrarosso, quindi non viene assorbito e può oltrepassarla.

BIBLIOGRAFIA

- G. Giacomelli, L. Gregorini, *"Fisica generale. Elettromagnetismo e ottica"*, Carocci, 1994
- Gill T.P., *"The Doppler Effect: An Introduction to the Theory of the Effect"*, Logos Press, 1965
- D. Dallacasa, *"Processi di Radiazioni e MHD"*, Dispensa
- Internet:
 - <http://www.inaf.it/it>
 - <http://www.nasa.gov>
 - <http://www.phy6.org/stargaze>
 - <http://www.treccani.it/>