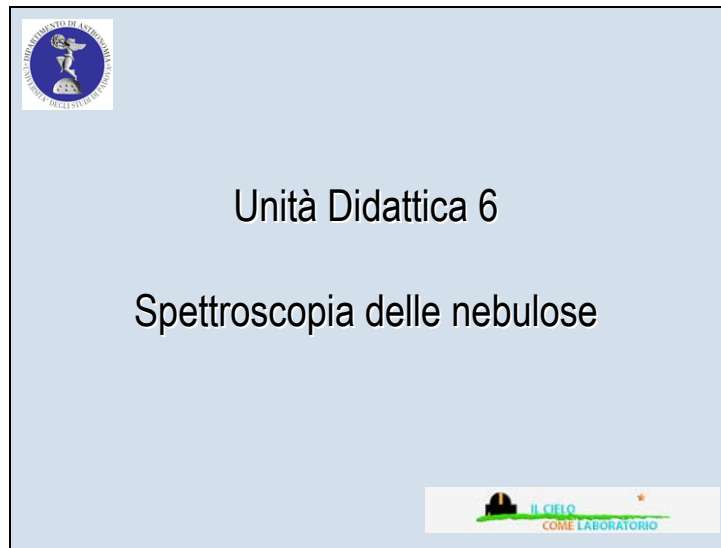
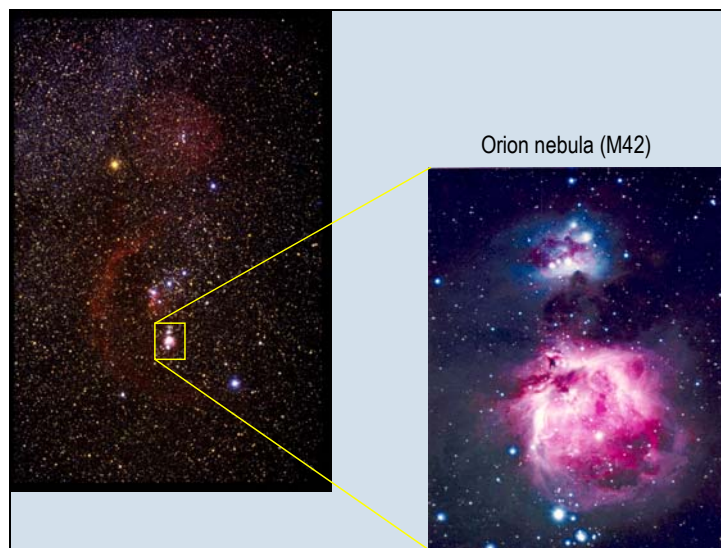


Diapositiva 1



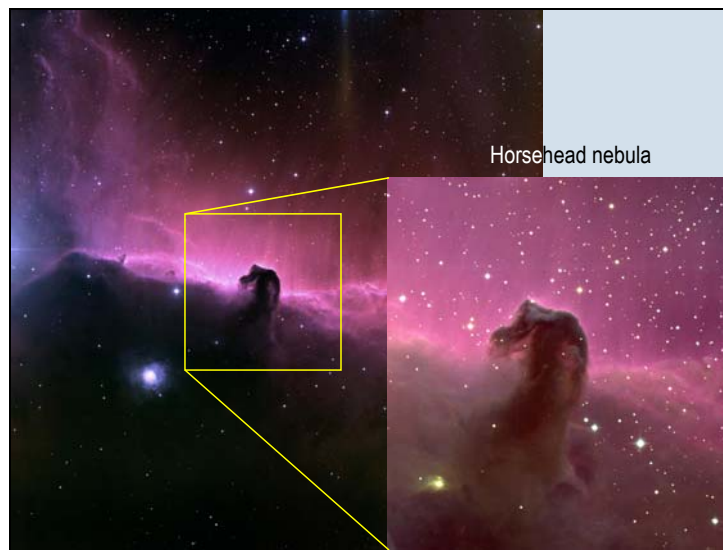
Questa unità presenta i fondamenti della fisica del gas ionizzato che servono a comprendere gli spettri a righe d'emissione osservati in alcune sorgenti astronomiche.

Diapositiva 2



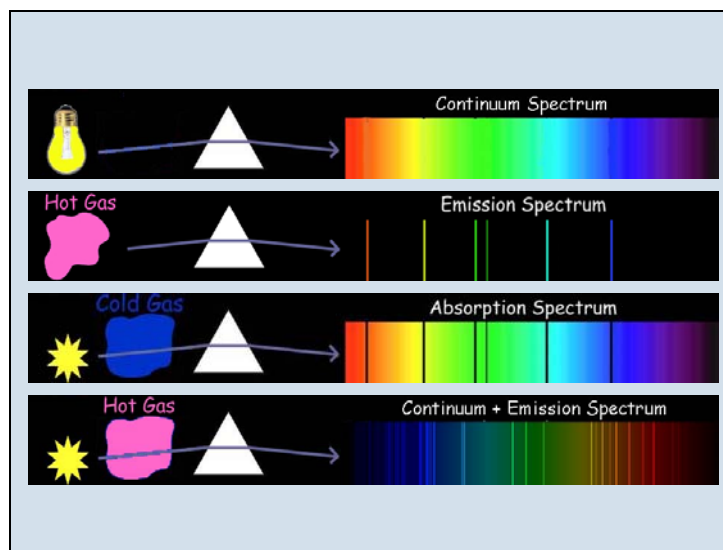
La più famosa nebulosa dell'emisfero nord : M42 o nebulosa di Orione.
A sinistra la costellazione di Orione, a destra un ingrandimento della zona, chiamata anche "la spada di Orione". I diversi colori indicano gas riscaldato contenente elementi chimici diversi.

Diapositiva 3



Un altro esempio sempre nella costellazione di Orione, questa volta nella “cintura” : la nebulosa Testa di Cavallo.

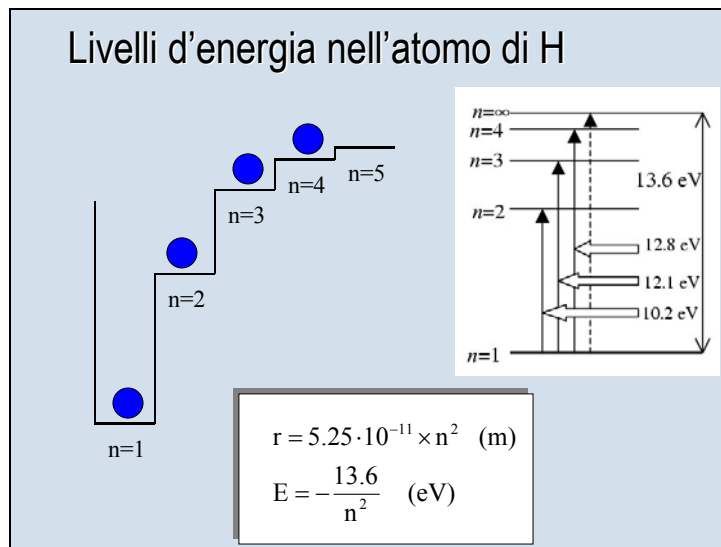
Diapositiva 4



Esempi di spettri. Dall'alto verso il basso:

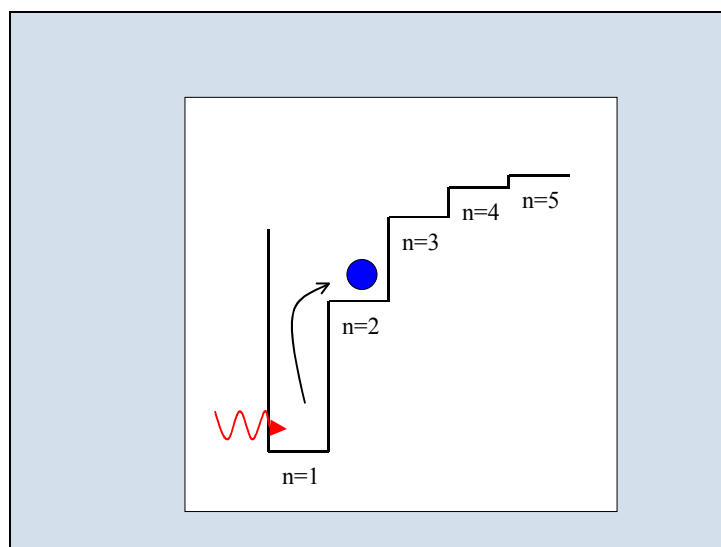
(a) una sorgente termica come quella rappresentata dal filamento incandescente di una lampadina emette uno spettro continuo, una distribuzione di energia con diversa intensità, ma a tutte le lunghezze d'onda; (b) un gas caldo, come ad esempio quello presente in una lampada al neon, produce uno spettro con brillanti emissioni (chiamate storicamente righe di emissione) a lunghezze d'onda ben precise; (c) una sorgente termica che emette radiazione la quale passa attraverso un gas più freddo, come accade nelle atmosfere stellari, produce uno spettro continuo solcato da righe scure, dette righe di assorbimento, a lunghezze d'onda ben precise; (d) una sorgente termica che riscalda un gas distante da essa produce uno spettro continuo molto debole solcato da brillanti righe in emissione, come accade nelle nebulose.

Diapositiva 5



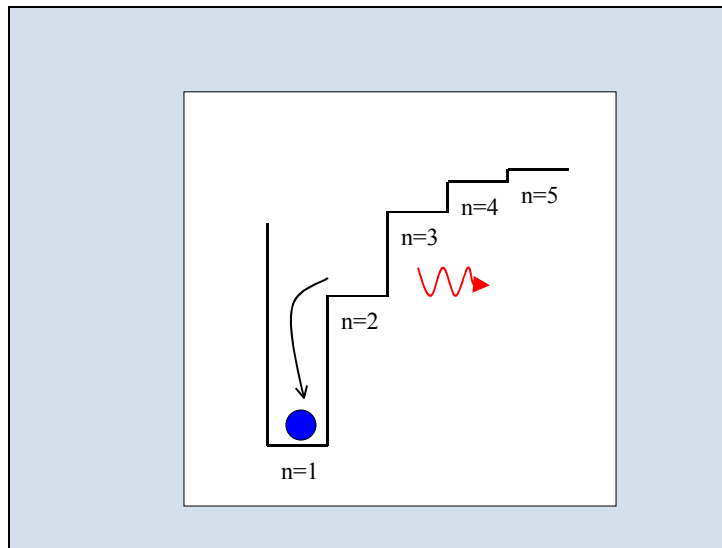
Dalla fisica atomica sappiamo che gli elettroni di un atomo possono trovarsi solo a su determinati livelli di energia e mai in posizioni intermedie. In questa diapositiva è rappresentato uno schema per l'atomo più semplice, l'atomo di idrogeno. Il livello $n=1$ si chiama livello fondamentale, i livelli $n>1$ sono livelli superiori o livelli eccitati. Le formule nel riquadrano riportano la distanza (in metri) di ogni livello di energia dal nucleo, e l'energia in ogni livello (in eV). Sono necessari 13.6 eV per poter strappare l'elettrone a livello fondamentale e liberarlo, ionizzando così l'atomo di idrogeno.

Diapositiva 6



Per poter far salire l'elettrone dal livello fondamentale al livello superiore, esso deve assorbire un fotone di energia $E=h\nu$ pari esattamente alla differenza di energia fra $n=1$ e $n=2$.

Diapositiva 7



L'elettrone a livello superiore è più instabile e spontaneamente tende ricadere a livello fondamentale. Nel fare questo perde energia sotto forma di un fotone esattamente identico a quello che gli ha permesso di salire da $n=1$ a $n=2$.

Diapositiva 8

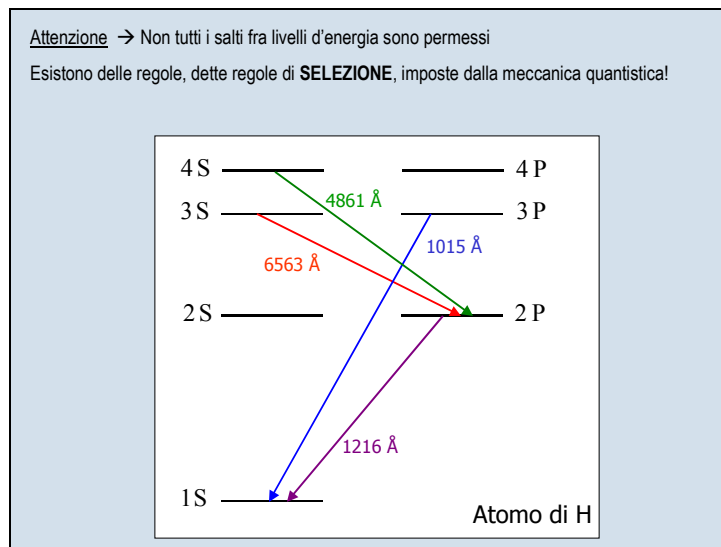
$$E_2 - E_1 = -13.6 \times \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (\text{eV})$$
$$\left. \begin{array}{l} n_2 = 2 \\ n_1 = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow E_2 - E_1 = \Delta E = 10.2 \quad (\text{eV})$$
$$\Delta E = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda} \Rightarrow \lambda = 1216 \text{ \AA}$$

costante di Planck
 $h = 6.6 \times 10^{-27} \text{ erg s}$

velocità della luce
 $c = 3 \times 10^{10} \text{ cm s}^{-1}$

Esempio numerico applicato al salto di energia fra $n=1$ e $n=2$.
Esso corrisponde a un fotone di lunghezza d'onda 1216 \AA , ossia un fotone che appartiene alla regione ultravioletta dello spettro elettromagnetico.

Diapositiva 9



Livelli di energia dell'atomo di idrogeno. Questo genere di diagrammi sono noti anche come diagrammi di Grotrian.
I salti possibile dell'elettrone fra i diversi orbitali corrispondono a fotoni di diverse lunghezze d'onda, e sono regolati dalla meccanica quantistica.

Diapositiva 10

Le transizioni

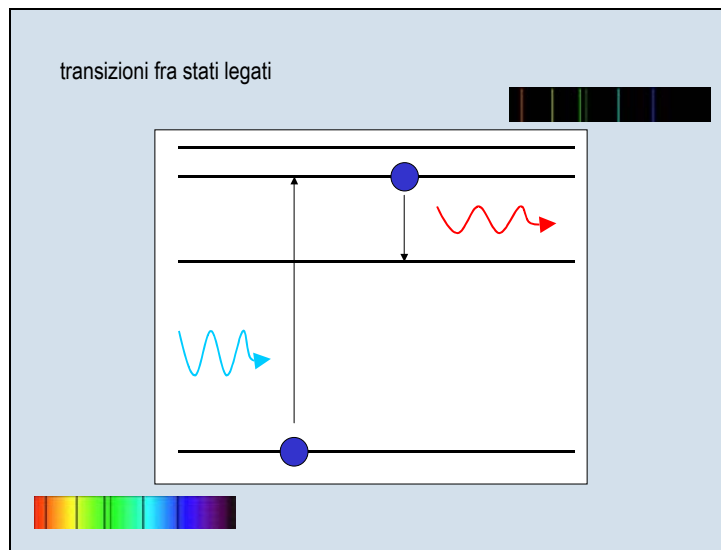
- Transizioni fra stati legati
(bound-bound)
- Transizioni fra stati legati e stati liberi
(bound-free, free-bound)
- Transizioni fra stati liberi
(free-free)

$A^0 = \text{AI}$
$A^+ = \text{AII}$
$A^{++} = \text{AIII}$
$A^{+++} = \text{AIV}$

I salti di energia degli elettroni fra livelli (detti anche stati) si chiamano transizioni. Esistono transizioni fra stati legati, ossia salti di energia all'interno di un atomo, transizioni fra stati legati e liberi, ossia ionizzazioni dell'atomo che perde uno o più elettroni, e ricombinazioni degli elettroni liberi con ioni, e infine transizioni fra stati liberi, ossia variazioni di energia degli elettroni liberi dovuti a particolari processi fisici.

Nel riquadro è riportata la nomenclatura tipicamente adottata: 0 oppure I indicano l'atomo neutro, + oppure II indicano l'atomo che ha perso un elettrone, ++ oppure III indicano l'atomo che ha perso due elettroni, etc.

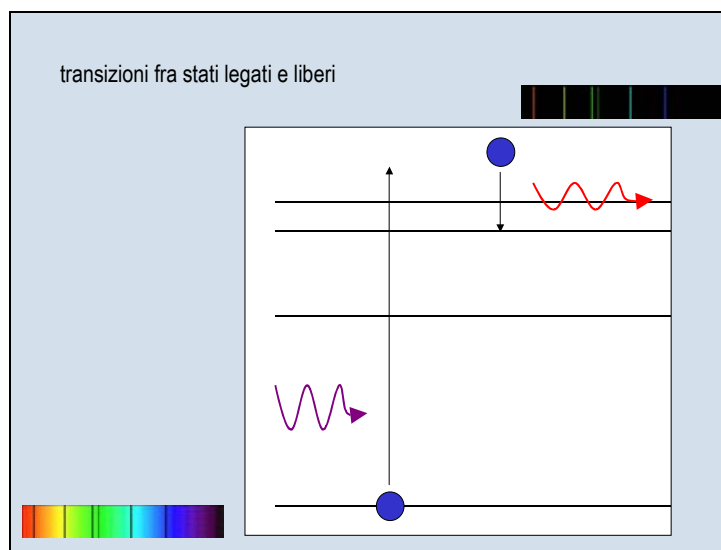
Diapositiva 11



Ogni transizione produce un particolare spettro.

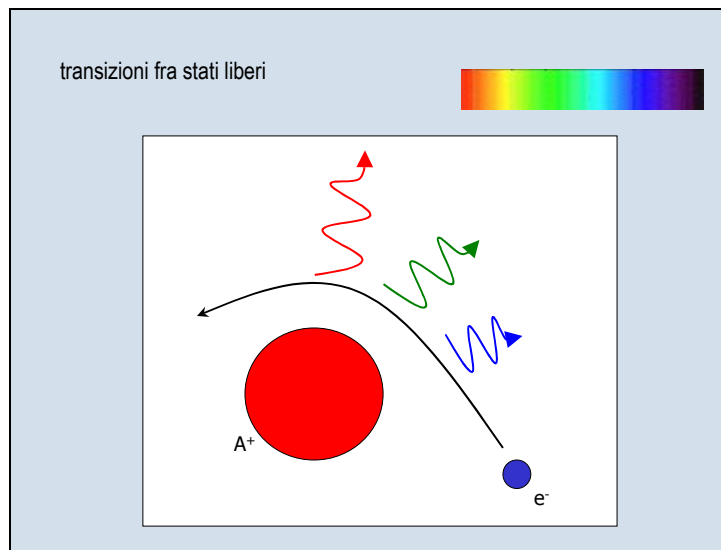
Le transizioni fra stati legati sono causa di righe in assorbimento quando l'elettrone passa da un livello di energia più basso a uno più alto, e in emissione quando l'elettrone cade da un livello di energia più alto a uno più basso.

Diapositiva 12



Le transizioni fra stati legati e stati liberi sono causa di righe in assorbimento quando l'elettrone da un livello di energia dell'atomo si sgancia da esso diventando libero, e in emissione quando l'elettrone libero si riaggancia con uno ione raggiungendo un certo livello di energia.

Diapositiva 13



Le transizioni fra stati liberi riguardano elettroni che si sono sganciati dal loro ione e si muovono liberamente. Essi avranno una certa energia cinetica, che potrà variare per assorbimento o emissione di radiazione. Ad esempio, se un elettrone passa vicino a uno ione, quest'ultimo tenterà di riprenderselo rallentandolo. Ma se l'elettrone rallenta perde energia e la perde sotto forma di radiazione. Non essendo l'elettrone legato ad alcun livello energetico quantizzato, emetterà fotoni di qualsiasi lunghezza d'onda e lo spettro risultante sarà uno spettro continuo.

Diapositiva 14

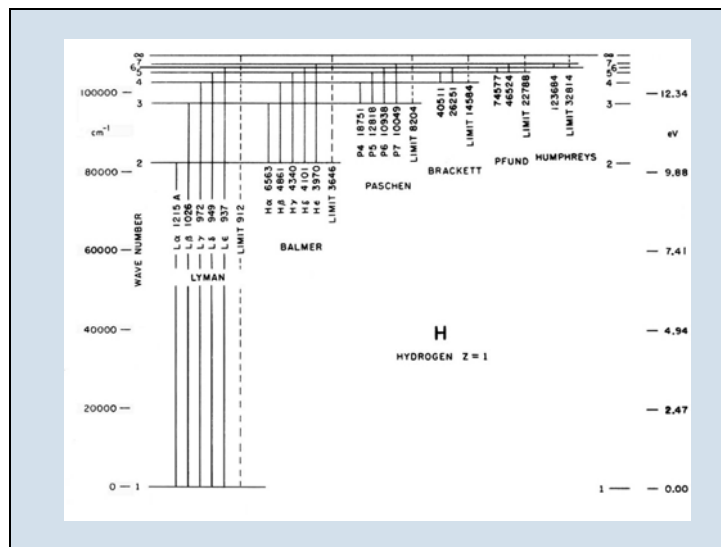
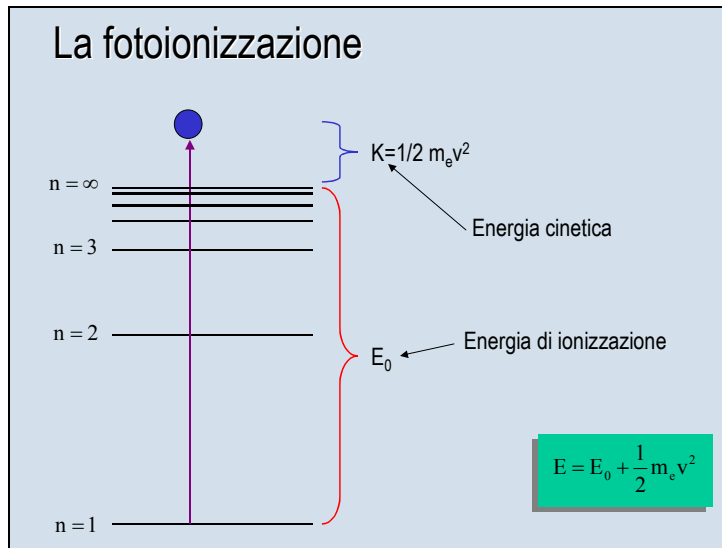


Diagramma di Grotrian dell'atomo di idrogeno.

Le transizioni fra il livello fondamentale e i livelli superiori vengono chiamate Serie di Lyman, e indicate con Ly seguite da una lettera greca. Ad esempio Ly α è la transizione 1 - 2 corrispondente a un fotone di lunghezza d'onda 1216 Å, Ly β è la transizione 1 - 3, Ly γ la 1 - 4 e così via. La transizione 1 - ∞ (ovvero la ionizzazione) corrisponde a un fotone di 912 Å e si chiama "testa della serie". Tutti questi fotoni sono fotoni ultravioletti.

Nel visibile abbiamo la Serie di Balmer, indicata con H α 6563 Å, H β 4861 Å, H γ 4340 Å, etc. Seguono poi le Serie di Paschen e Brackett nel vicino infrarosso e altre serie nel medio e lontano infrarosso.

Diapositiva 15



La fotoionizzazione è una transizione fra uno stato legato e uno stato libero, ottenuta tramite assorbimento di radiazione.

Poiché ci vuole una certa energia per strappare un elettrone a un atomo, chiamata anche potenziale di ionizzazione, quando l'atomo è colpito da un fotone con energia maggiore di quella di ionizzazione, si libera un elettrone con energia cinetica pari alla differenza fra l'energia fornita all'elettrone e quella impiegata dall'elettrone per liberarsi.

Diapositiva 16

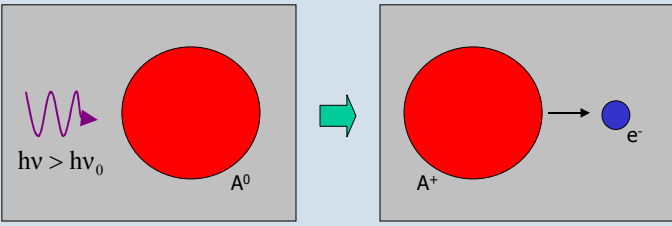
Condizione per avere fotoionizzazione: $E \geq E_0$ cioè $\nu \geq \nu_0$

	I	II	III	IV
H	13.6			
He	24.6	54.4		
O	13.6	35.1	54.9	77.4
N	14.5	29.6	47.5	77.5
S	10.4	23.3	34.8	47.3

Potenzi di ionizzazione (eV)

Per fotoionizzare un atomo ci vogliono fotoni con energia maggiore di quella di ionizzazione, ossia con frequenza più alta di un valore di soglia minimo. La tabella riporta i potenziali di ionizzazione (in eV) di alcuni fra i principali elementi chimici presenti nelle nebulose, cioè idrogeno, elio, ossigeno, azoto e zolfo.

Diapositiva 17

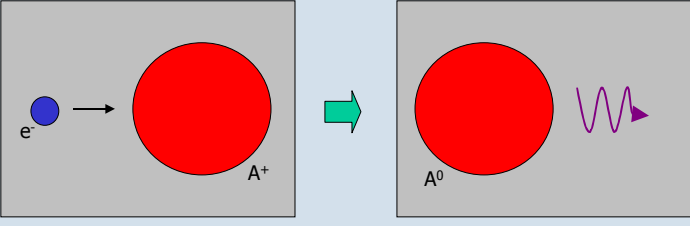


La probabilità che un fotone ionizzante ($\nu > \nu_0$) sia catturato da un atomo è uguale per qualsiasi fotone ionizzante di qualsiasi frequenza?
→ **NO!**

Essa dipende da ν^{-3} , cioè è più bassa per fotoni ad alta frequenza, ossia per fotoni molto energetici.

Diapositiva 18

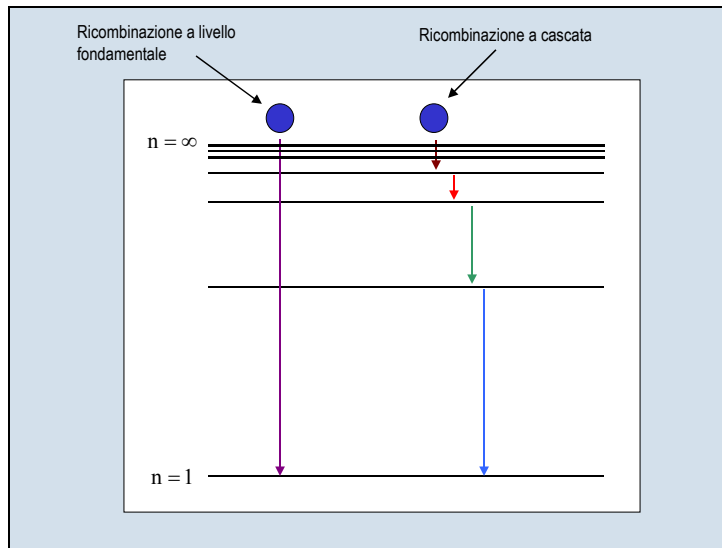
Righe di ricombinazione



La probabilità che un elettrone libero (con velocità v) sia catturato da un atomo è uguale per qualsiasi elettrone di qualsiasi velocità? → **NO!**

Essa dipende da v^{-2} , cioè è più bassa per elettroni ad alta velocità, ossia per elettroni con energia cinetica elevata.

Diapositiva 19



Quando un elettrone si ricombina con uno ione può farlo andando ad agganciarsi direttamente al livello fondamentale e quindi emettendo un fotone sicuramente ultravioletto, oppure può agganciarsi a un livello superiore e poi raggiungere il livello fondamentale cascando da un livello al successivo e emettendo ogni volta un fotone di energia.

Diapositiva 20

$$\epsilon_v = h\nu_{m,n} \cdot N_m \cdot A_{m,n}$$

emissività della riga

energia del fotone emesso (erg)

densità di atomi con elettroni a livello m (cm⁻³)

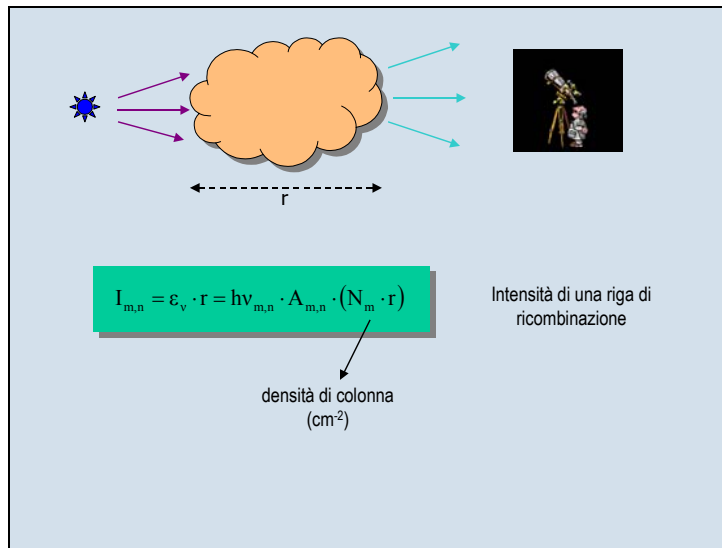
probabilità di transizione spontanea dal livello m a livello n (s⁻¹)

Quanto impiega un elettrone a scaricarsi dal livello 2 al livello 1?

$\Delta t \approx 10^{-8} \text{ s} \Rightarrow A_{2,1} \approx 10^8 \text{ s}^{-1}$

Consideriamo una nube di gas il cui spettro mostra righe in emissione. L'energia contenuta in una riga dipenderà da almeno tre fattori: (1) l'energia del fotone emesso, (2) la densità di atomi i cui elettroni si trovano in uno stato eccitato, (3) la probabilità che ha l'elettrone di cadere al livello energetico inferiore. Questi tre fattori danno come risultato l'emissività della riga, cioè l'energia emessa ad una certa lunghezza d'onda (o frequenza) in ogni secondo da un centimetro cubo di gas.

Diapositiva 21



Un centimetro cubo di gas emette radiazione in tutte le direzioni, ma l'osservatore riceve radiazione da una direzione soltanto chiamata "linea di vista". Perciò è possibile definire lo spessore r della nube di gas lungo la linea di vista, e moltiplicandola per l'emissività si ottiene il flusso della riga di emissione che viene effettivamente osservato.

Diapositiva 22

$$\frac{I_{3,2}}{I_{4,2}} = \frac{h\nu_{3,2}}{h\nu_{4,2}} \cdot \frac{N_3}{N_4} \cdot \frac{A_{3,2}}{A_{4,2}}$$

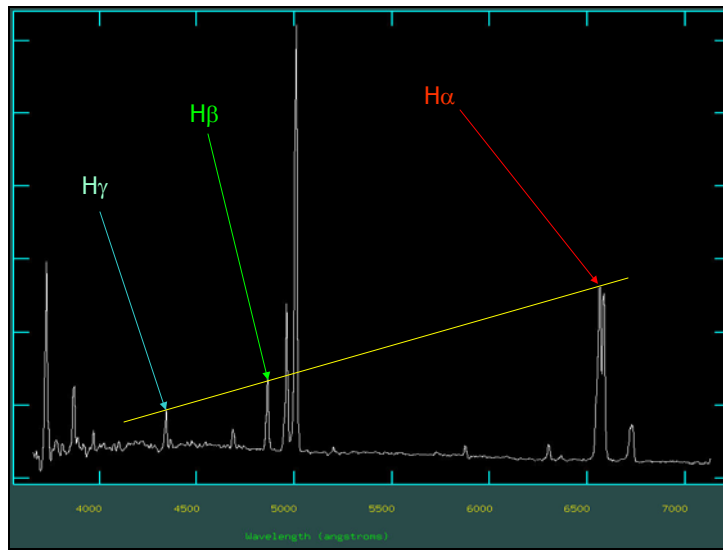
Decremento di Balmer

T=10 000 K	$I_{H\alpha}/I_{H\beta}$	2.87
	$I_{H\gamma}/I_{H\beta}$	0.47
	$I_{H\delta}/I_{H\beta}$	0.26
	$I_{H\epsilon}/I_{H\beta}$	0.16

Nota l'espressione matematica del flusso di una riga, è possibile calcolare il rapporto di flusso fra due righe, che dipende dal rapporto delle frequenze (o lunghezze d'onda) delle due transizioni, dal rapporto fra la densità di atomi, e infine dal rapporto delle probabilità di transizione. Questi valori sono calcolabili grazie alla meccanica quantistica e assumendo alcuni parametri fisici sulle condizioni del gas.

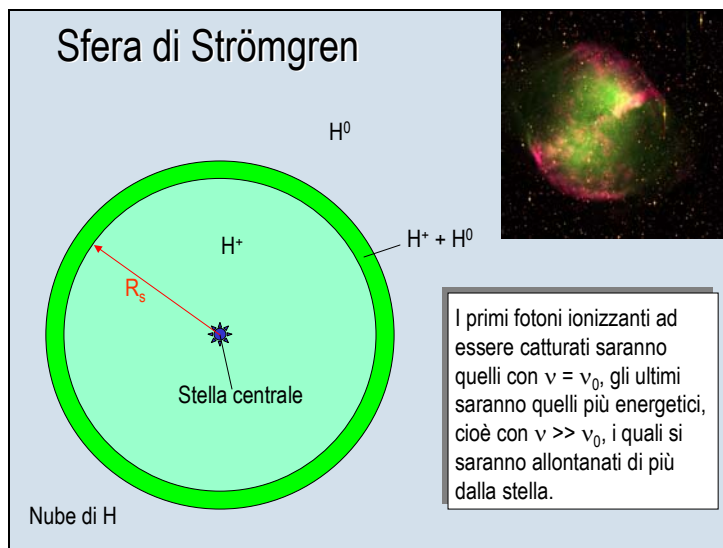
Ad esempio, per un gas di idrogeno a temperatura di 10 000 K, i rapporti di flusso fra H β e le altre righe della serie di Balmer mostra un generale andamento decrescente noto come Decremento di Balmer.

Diapositiva 23



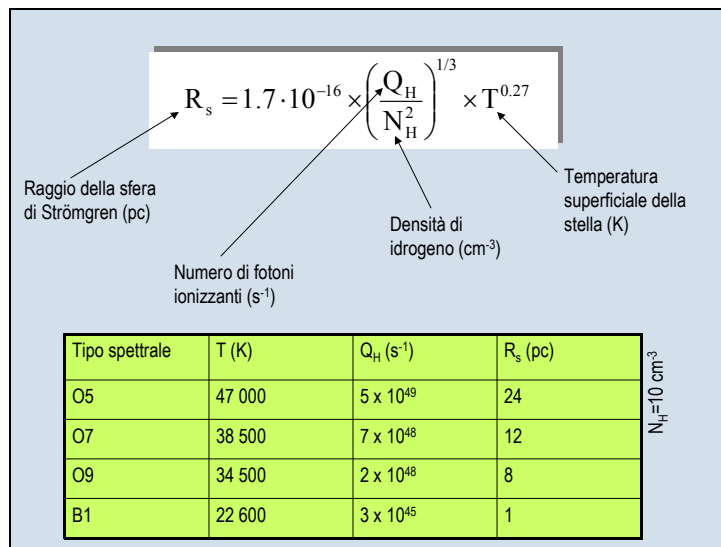
Questo grafico è lo spettro visibile con righe in emissione di una sorgente astronomica. La linea gialla marca l'andamento decrescente delle righe H α , H β e H γ .

Diapositiva 24



Guardando l'immagine di una nebulosa, viene da chiedersi se i suoi bordi esterni indicano che non vi è altro gas al di là di essi, oppure se stiamo vedendo solo i confini della fotoionizzazione. In molti casi è vera questa seconda ipotesi. In effetti, i fotoni ionizzanti "corrono" all'interno della nube di gas e vengono man mano catturati. Da una certa distanza in poi dalla stella centrale non ci sarà più alcun fotone ionizzante e il gas sarà neutro. Questa distanza massima entro cui il gas è ancora ionizzato si chiama raggio di Strömgren e la nube di gas entro il raggio di Strömgren si chiama sfera di Strömgren. Esiste ovviamente un guscio sottile entro il quale convive gas ionizzato e gas neutro.

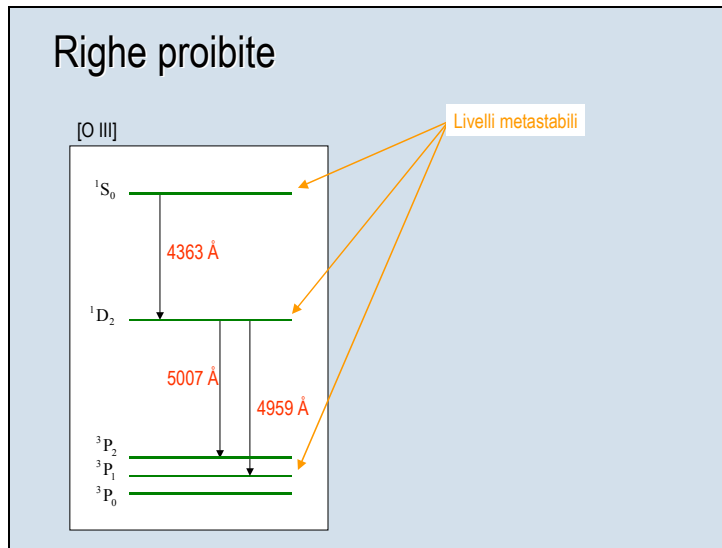
Diapositiva 25



Il alto è riportata la formula del raggio di Strömgren, in unità di parsec. Essa è proporzionale alla temperatura superficiale della stella, al numero di fotoni ionizzanti che essa produce e infine è inversamente proporzionale alla densità di atomi. Infatti, più una stella è calda, più il suo massimo di emissione si sposta nell'ultravioletto, la regione dei fotoni ionizzanti. Inoltre, minore è la densità di atomi nel gas ionizzato e più distante riusciranno ad andare i fotoni ionizzanti.

In basso è possibile vedere l'estensione tipica di una nebulosa quando essa è fotoionizzata da stelle di tipo spettrale diverso.

Diapositiva 26

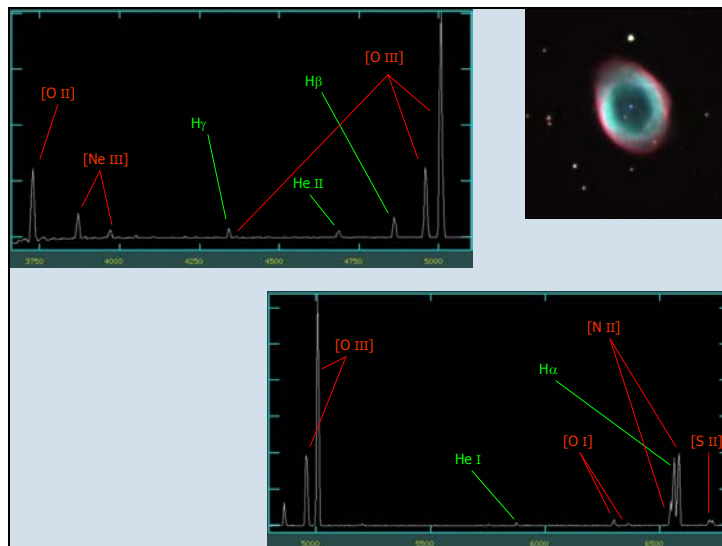


Nello spettro di una nebulosa si osservano numerose righe di elementi più pesanti dell'idrogeno e dell'elio (chiamati genericamente metalli), che sarebbero proibite secondo le regole della meccanica quantistica.

Queste righe provengono da transizioni fra livelli di energia, detti metastabili. La nomenclatura per le righe proibite prevede l'utilizzo delle parentesi [] entro cui viene indicato lo ione con il suo stato di ionizzazione.

Nella figura in questione è riportato il diagramma di Grotrian con le transizioni proibite per l'ossigeno ionizzato due volte ([O III]).

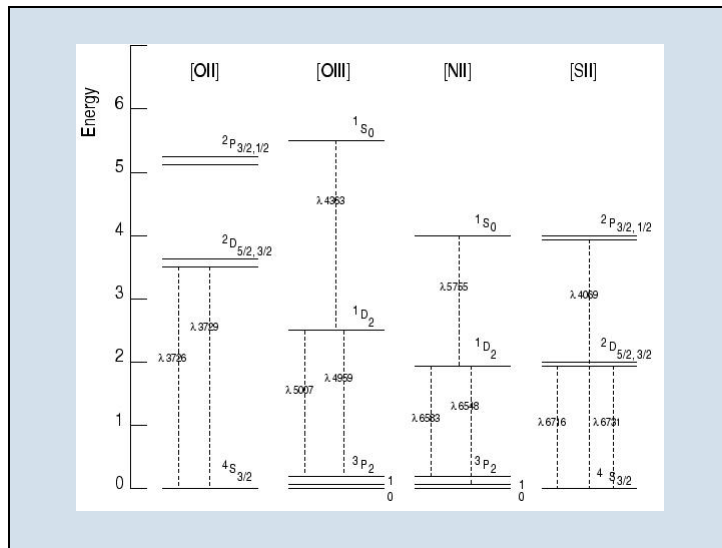
Diapositiva 27



Spettro della nebulosa planetaria ad anello (ring nebula) nella costellazione della Lira ottenuto al telescopio di Asiago.

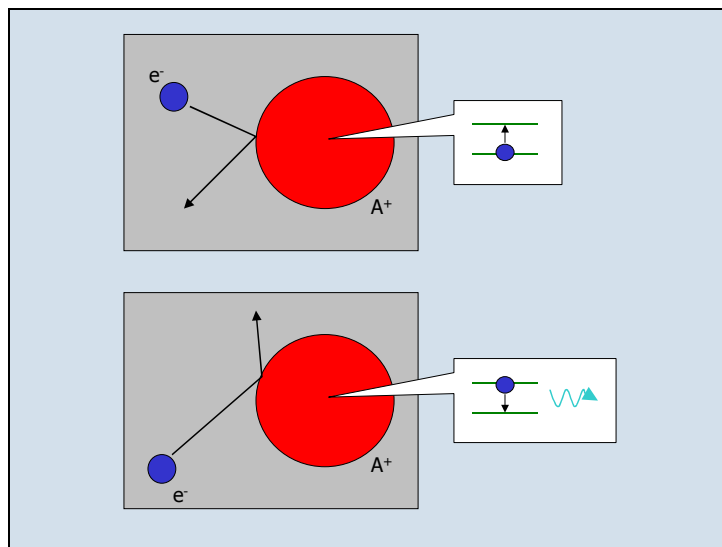
E' stato spezzato in due parti per consentire una migliore identificazione delle righe emesse. In verde sono indicate le righe permesse o di ricombinazione di idrogeno e elio, mentre in rosso le righe proibite di ossigeno, azoto, zolfo e neon. L'ossigeno in particolare si presenta in tre stati di ionizzazione: neutro, ionizzato una volta e due volte.

Diapositiva 28



Diagrammi di Grotrian per le principali righe proibite presenti nello spettro visibile di una nebulosa. L'asse delle ordinate è l'energia dei livelli in eV.

Diapositiva 29



La domanda ovvia è : se queste transizioni sono proibite, e quindi se l'elettrone al livello fondamentale non può assorbire un fotone che gli consenta di salire al livello metastabile superiore, perché si vedono le righe proibite negli spettri?
 Il meccanismo che si sostituisce all'assorbimento di radiazione è l'assorbimento di energia tramite urto. L'urto degli ioni con elettroni liberi sufficientemente energetici è in grado di trasferire agli elettroni legati l'energia necessaria per saltare sul livello metastabile. E viceversa con conseguente emissione di radiazione.
 E' così che energia cinetica viene convertita in energia radiativa.

Diapositiva 30

Le collisioni fra atomi (neutri o ionizzati) ed elettroni liberi sono responsabili della formazione delle righe proibite.

In realtà esiste una probabilità di transizione spontanea anche nelle righe proibite, ma questa è molto più bassa che nel caso delle righe permesse.

$\Delta t_{\text{perm.}} \approx 10^{-8} \text{ s} \Rightarrow A_{2,1} \approx 10^8 \text{ s}^{-1}$
 $\Delta t_{\text{proi.}} \approx 10^2 \text{ s} \Rightarrow A_{2,1} \approx 10^{-2} \text{ s}^{-1}$
 $\frac{A_{2,1}(\text{perm.})}{A_{2,1}(\text{proi.})} \approx 10^{10}$

Diapositiva 31

Che valore deve avere la densità elettronica N_e per consentire di osservare una transizione proibita fra due livelli m e n ?

N_e è troppo bassa \Rightarrow

- poche eccitazioni $n \rightarrow m$
- poche diseccitazioni $m \rightarrow n$
- dominano le transizioni spontanee

N_e è troppo alta \Rightarrow

- dominano le collisioni
- eccitazioni da n e m verso livelli superiori a m
- pochi atomi con elettroni al livello m

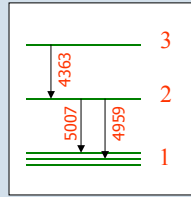
Densità critica N_c

\rightarrow Esiste un valore di N_c per ogni riga proibita
 \rightarrow Le righe proibite raggiungono la max intensità per $N_e = N_c$

Diapositiva 32

Misura di T_e

Utilizzando le righe di [O III] a 4363, 4959 e 5007 Å si ottiene:



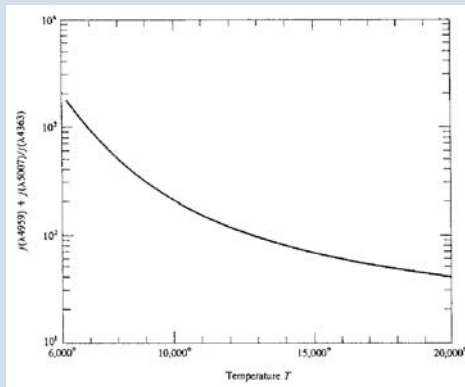
$$\frac{I(4959) + I(5007)}{I(4363)} = \frac{7.73 \times e^{\frac{3.29 \cdot 10^4}{T_e}}}{1 + 4.5 \cdot 10^{-4} \times \frac{N_e}{\sqrt{T_e}}}$$

Diapositiva 33

Per $N_e < 10^5 \text{ cm}^{-3}$ questo rapporto è funzione solo di T_e :

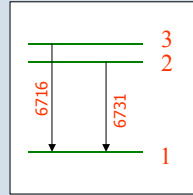


$$\frac{I(4959) + I(5007)}{I(4363)} \approx 7.73 \times e^{\frac{3.29 \cdot 10^4}{T_e}}$$



Misura di N_e

Utilizzando le righe di [S II] a 6716 e 6731 Å si ottiene:



I_{6716}/I_{6731} dipende molto da N_e e poco da T_e

Se N_e è bassa: $\frac{I_{6716}}{I_{6731}} \rightarrow 1.5$

Se N_e è alta: $\frac{I_{6716}}{I_{6731}} \rightarrow 0.4$

