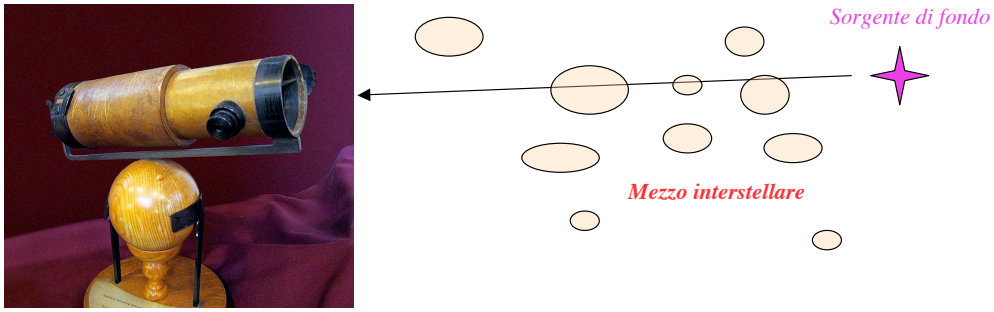
Spettroscopia di righe in assorbimento interstellari

Lezione ISM 6
G. Vladilo

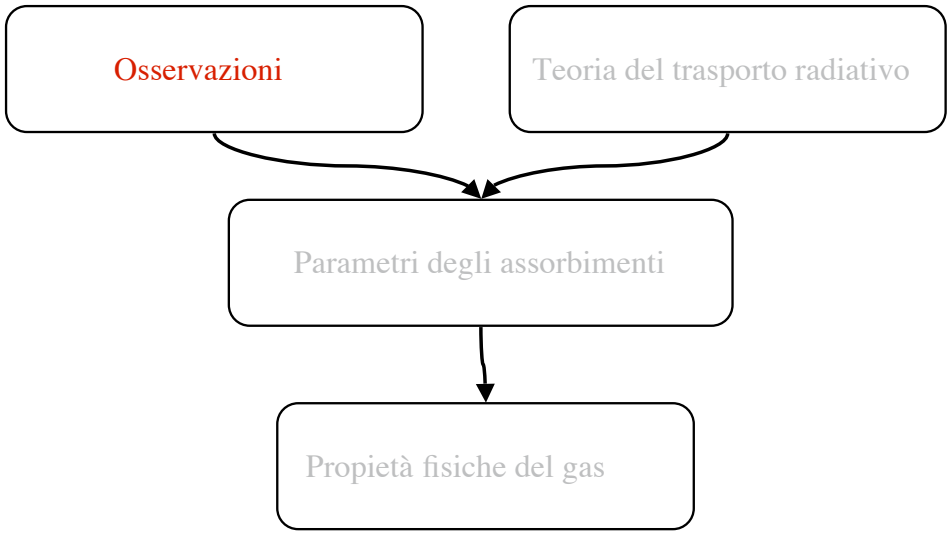
Spettroscopia di righe in assorbimento interstellari

Alta risoluzione
Bande spettrali: visibile e ultravioletta



Determinazione delle proprietà fisiche del gas

mediante spettroscopia di assorbimento visibile/ultravioletta



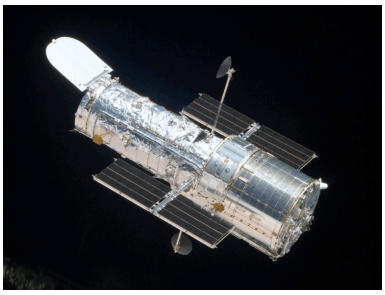
Osservazioni

Selezione delle sorgenti di fondo

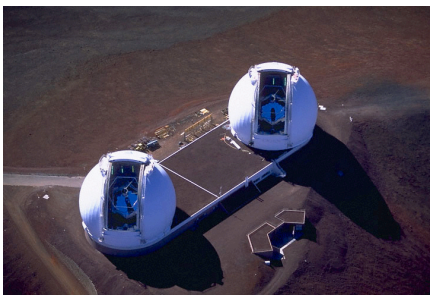
- Caratteristiche ottimali per spettroscopia di nubi lungo la visuale
  - Puntiformi
    - Angolo solido sotteso dalla sorgente infinitesimo
  - Continuo brillante
    - Per poter disperdere la luce ad alta risoluzione
  - Poche righe spettrali
    - Per evitare confusione con le righe interstellari
    - Per poter determinare il "continuo" più agevolmente
- Sorgenti di fondo nella Galassia
  - Stelle calde
    - Hanno molte meno righe fotosferiche rispetto alle stelle fredde
    - Hanno un continuo brillante nella regione ultravioletta
- Universo ad alto redshift
  - Quasars o Gamma Ray Bursts
    - Vedi lezione successiva

Spettroscopia ad alta risoluzione interstellare/intergalattica
Principali tipi di telescopi utilizzati

- Banda ultravioletta
  - Stati di ionizazione dominanti degli elementi chimici più abbondanti
  - Per osservare righe interstellari nella Galassia e nell'Universo locale
    - Il requisito dell' alta risoluzione nello spazio rende difficile osservare sorgenti di fondo a distanze cosmologiche
  - Satelliti con spettrografi UV ad alta risoluzione
    - Esempi:
      Copernicus, IUE, HST, FUSE

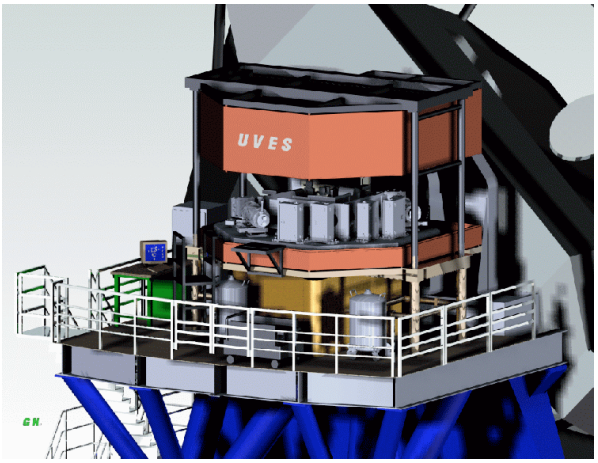


- Banda visible
  - Possibile osservare da Terra righe in assorbimento UV originate in sorgenti astronomiche ad alto redshift
    - Le righe interstellari o intergalattiche originate nell'ultravioletto vengono spostate verso il rosso diventando osservabili da terra
  - Grandi telescopi da terra: grazie al loro diametro è possibile raccogliere abbastanza fotoni da sorgenti poste a distanze cosmologiche e ottenere spettri ad alta dispersione
    - Esempi dotati di spettrografi ad alta risoluzione
      Telecopi Keck 10 m (Hawaii)
      ESO VLT 8.2 m (Cile)



Spettroscopia interstellare/intergalattica
Principali caratteristiche degli spettrografi

- Risoluzione spettrale
  - $R=\lambda/\Delta\lambda$
  - Per spettroscopia interstellare $R \sim 10^4 - 10^5$
- Copertura spettrale
  - Formato "echelle"
  - Permette avere buona copertura spettrale nonostante l'alta risoluzione
- Profilo strumentale
  - Forma ben definita
- Stabilità
  - Nel corso dell'osservazione
  - Possibilmente nel corso di diverse notti o periodi ancora più lunghi



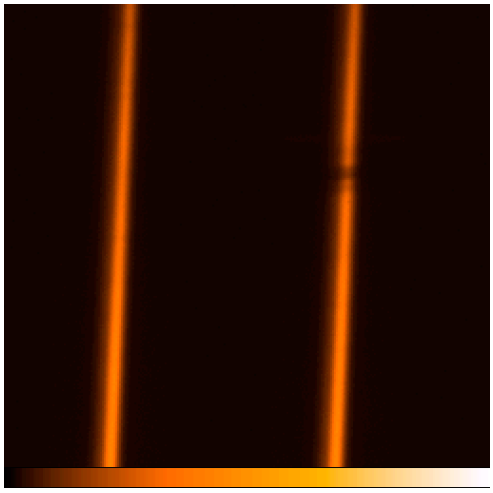
Esempio
Dati tecnici dello spettrografo UVES presso ESO/VLT

Table 2: Observational Capabilities and Expected Performance

	Blue	Red
Wavelength range	300 - 500 nm	420 - 1100 nm
Resolution-slit product	41,400	38,700
Max. resolution	~80,000 (slit 0.4")	~110, 000 (slit 0.3")
Limiting magnitude (1.5hr, S/N~10, seeing 0.7")	18.0 at R = 58,000 in U (slit 0.7")	19.5 at R = 62,000 in V (slit 0.7")
Overall detective quantum efficiency (DQE) (from top of the telescope, wide slit)	12 % at 400 nm	14 % at 600 nm
Camera	dioptric F/1.8, 70 μm/arcsec field 43.5 mm diam.	dioptric F/2.5, 97 μm/arcsec field 87 mm diam.
CCDs and pixel scale	2K x 4K, EEV 15 μm pixels (0.22 arcsec/pix)	mosaic of two (EEV + MIT/LL) 2K x 4K, 15 μm pixels (0.16 arcsec/pix)
Echelle	41.59 g/mm, R4 mosaic	31.6 g/mm, R4 mosaic
Crossdispersers (g/mm and wavelength of max. efficiency)	#1: 1000 g/mm, 360 nm #2: 660 g/mm, 460 nm	#3: 600 g/mm, 560 nm #4: 312 g/mm, 770 nm
Typical wavelength range/frame CD#1(#2) and CD#3(#4)	85 (126) nm in 33 (31) orders	200 (403) nm in 37 (33) orders
Order separation (minimum)	10 arcsec or 40 pixels	12 arcsec or 70 pixels

Esempio
Spettro “echelle”

Esempio
Riga di assorbimento interstellare in uno spettro “echelle”

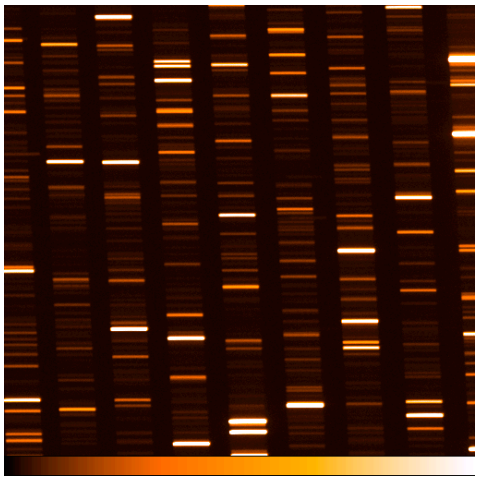


Osservazioni:
Riduzione dei dati

Principali passi della riduzione dati

- Calibrazione delle immagini bidimensionali
  - Sottrazione del ‘bias’
  - Calibrazione del ‘flat field’
    - Permette correggere differenze di efficienza di singoli pixels
    - Si utilizza una lampada per illuminare il CCD in maniera omogenea
  - Estrazione dello spettro
    - Da immagine bidimensionale a spettro unidimensionale
    - ‘Merging’ degli ordini dello spettro “echelle”
  - Calibrazione in lunghezza d’onda
    - Trasforma lo spazio dei pixels in spazio delle lunghezze d’onda
    - Si utilizza lo spettro delle righe in emissione di una lampada

Esempio
Spettro di emissione della lampada di laboratorio usata per la calibrazione in lunghezza d’onda

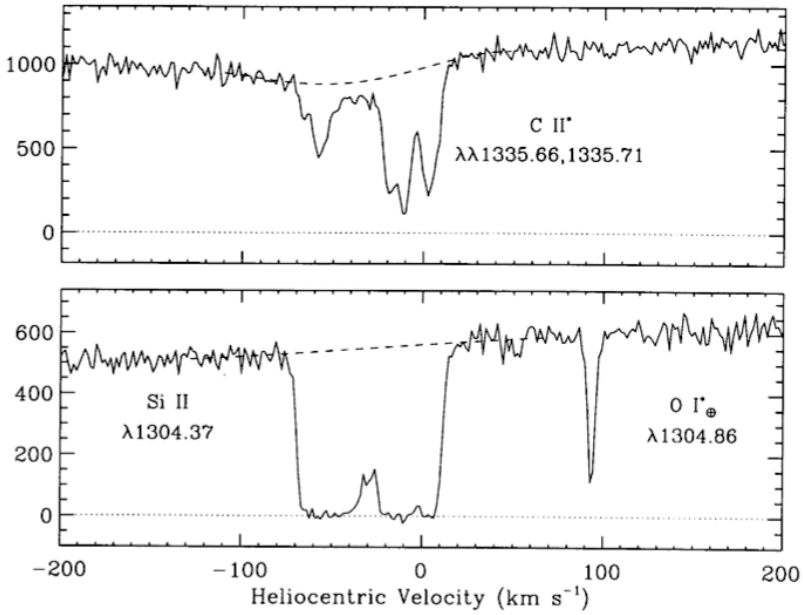


Osservazioni
Riduzione degli spettri unidimensionali

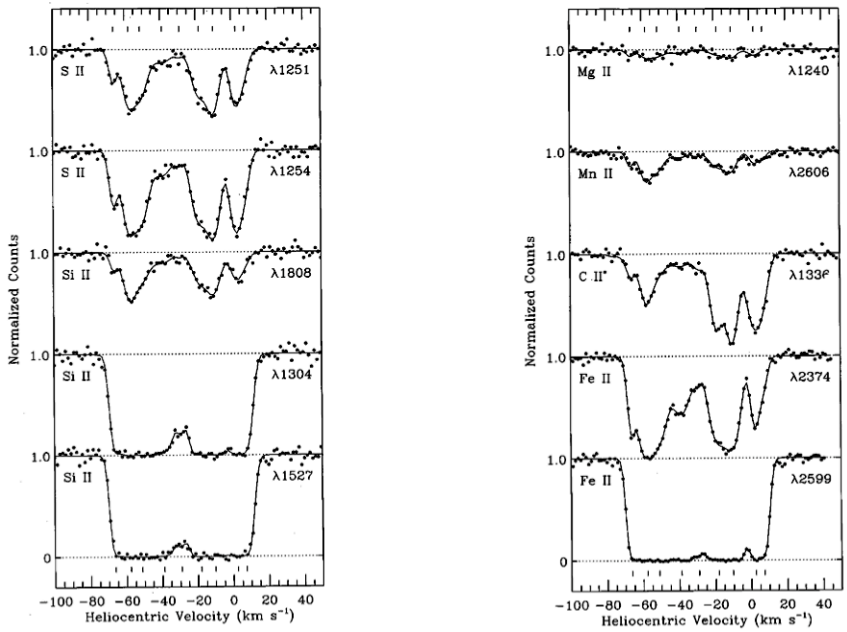
- Principali passi
  - Tracciamento del "continuo"
  - Normalizzazione al "continuo"
  - Conversione da lunghezze d'onda a velocità radiali

- Il significato di "continuo" nella spettroscopia interstellare
  - L'uso corretto del termine "continuo" si riferisce a processi di emissione free-free della sorgente di fondo (non righe)
  - Questo significato rigoroso è quello che si adotta negli studi della fisica della sorgente di fondo (stelle o quasars)
  - Nella spettroscopia interstellare talvolta si usa il termine "continuo" per indicare una porzione dello spettro della sorgente di fondo su cui cade un assorbimento interstellare
    - tale porzione di spettro usata come "continuo" potrebbe in realtà anche includere una riga, magari allargata, della sorgente di fondo

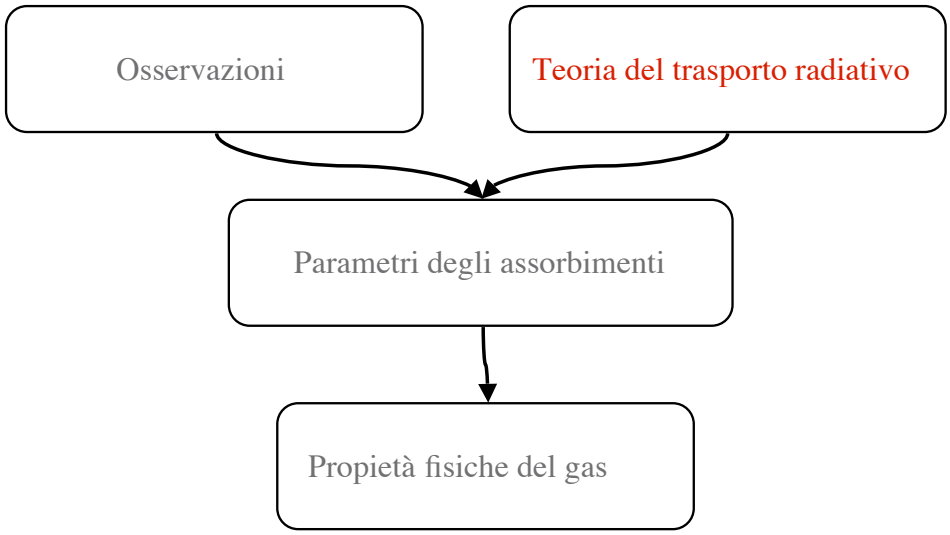
Esempio
Normalizzazione al 'continuo'



Righe interstellari
Esempi di: ‘componenti’ (o ‘nubi’), ‘blend’, saturazione



Determinazione delle proprietà fisiche del gas
mediante spettroscopia di assorbimento visibile/ultravioletta



Equazione del trasporto radiativo

$$dI_\nu = -\kappa_\nu I_\nu ds + j_\nu ds$$

I_ν intensità specifica [erg Hz^{-1} sr^{-1} cm^{-2} s^{-1}]
κ_ν coefficiente di assorbimento [cm^{-1}]
j_ν coefficiente di emissione [erg cm^{-3} Hz^{-1} sr^{-1} s^{-1}]
ds cammino geometrico [cm]

Introducendo la profondità ottica τ_ν definita dall'espressione

$$d\tau_\nu = \kappa_\nu ds$$

L'equazione del trasporto radiativo diventa

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = I_\nu - \frac{j_\nu}{\kappa_\nu}$$

L'equazione del trasporto

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = I_\nu - \frac{j_\nu}{\kappa_\nu}$$

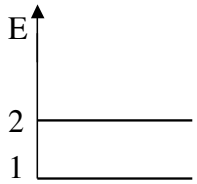
Ha la seguente soluzione formale

$$I_\nu = I_\nu(0)e^{-\tau_\nu} + \int_0^{\tau_\nu} \frac{j_\nu}{\kappa_\nu} e^{-(\tau_\nu - t_\nu)} dt_\nu$$

Questa soluzione si semplifica
se l'angolo solido sotteso dalla sorgente di fondo, $\delta\omega$, è infinitesimo.
In tal caso il coefficiente di emissione j_ν può trascurarsi
purchè il gas emetta isotropicamente.
Per le stelle di fondo $\delta\omega \leq (10^{-3}\ \text{arcsec})^2 \Rightarrow \delta\omega/4\pi \leq 2 \times 10^{-17}$ sr.
Pertanto l'angolo solido è a tutti gli effetti infinitesimo.
La soluzione dell'equazione del trasporto
per sorgenti di fondo puntiformi è pertanto

$$I_\nu = I_\nu(0)\, e^{-\tau_\nu}$$

Coefficiente di assorbimento per una transizione tra due livelli elettronici



$$\kappa_\nu = \frac{h\nu_0}{c}\left(n_1 B_{12} - n_2 B_{21}\right)\Phi_{\Delta\nu}$$

$$\int \Phi_{\Delta\nu}\, d\Delta\nu = 1 \qquad \Delta\nu = \nu - \nu_0$$

Per fotoni visibili/UV in una tipica nube interstellare si ha

$$kT \ll h\nu_0$$

Quindi il livello superiore non è popolato e si ha

$$n_2 B_{21} \ll n_1 B_{12}$$

Il coefficiente di assorbimento assume la forma semplificata per righe visibili/UV

$$\kappa_\nu = \frac{h\nu_0}{c}\, n_1 B_{12}\, \Phi_{\Delta\nu}$$

Dal coefficiente di assorbimento alla profondità ottica

$$\kappa_\nu = \frac{h\nu_0}{c}\, n_1 B_{12}\, \Phi_{\Delta\nu}$$

$$\frac{h\nu_0}{c} B_{12} = \left(\frac{\pi e^2}{m_e c}\right) f \qquad\qquad N = \int n_1\, ds$$

f "forza di oscillatore"

f è adimensionale; per transizioni forti è dell'ordine dell'unità

N densità colonnare

N si misura in atomi cm^{-2}

$$\tau_\nu = \left(\frac{\pi e^2}{m_e c}\right) f\, N\, \Phi_{\Delta\nu}$$

Riassunto
L'equazione del trasporto radiativo si semplifica

- Quando la sorgente di fondo di fondo è puntiforme
  - Per esempio una stella o un quasar
    - Non serve conoscere il coefficiente di emissione

$$I_\nu = I_\nu(0)\, e^{-\tau_\nu}$$

- Quando la differenza di energia tra i livelli elettronici è maggiore dell'energia cinetica del gas
  - Solo il livello fondamentale è popolato

$$\tau_\nu = \left(\frac{\pi e^2}{m_e c}\right) f\, N\, \Phi_{\Delta\nu}$$

Forma semplificata dell'equazione del trasporto per righe interstellari visibili/UV

$$I_\nu = I_\nu(0)\, e^{-\tau_\nu} \qquad \tau_\nu = \left(\frac{\pi e^2}{m_e c}\right) f\, N\, \Phi_{\Delta\nu}$$

- Nelle condizioni che stiamo considerando <u>non c'è dipendenza dallo stato fisico del gas</u>
  - Vantaggio
    - si possono ricavare densità colonnari senza conoscere lo stato fisico del gas
  - Svantaggio
    - Limitazione nella derivazione dei parametri fisici del gas

Profilo delle righe: meccanismi di allargamento

- Allargamento naturale
  - "Radiation damping"
    - Conseguenza del principio di indeterminazione di Heisenberg
  - Caratterizzato da un "profilo di Lorentz"
    - δ costante di 'radiation damping'
- Allargamento termico
  - Effetto Doppler
    - Distribuzione maxwelliana delle velocità
  - Caratterizzato da un profilo gaussiano
    - *b* parametro di allargamento

      Legato alla dispersione di velocità lungo la linea di vista, σ

      Dipende dalla temperatura e dalla turbolenza

      ξ dispersione di velocità di turbolenza

$$\Phi_{\Delta\nu}^{\text{damping}} = \frac{\delta/\pi}{\delta^2 + \Delta\nu^2}$$

$$\delta = \frac{1}{4\pi} \sum_l A_{ul}$$

$$\Phi_{\Delta\nu}^{\text{doppler}} = \frac{\lambda}{\sqrt{\pi}\, b}\, e^{-(\frac{\Delta\nu}{b})^2}$$

$$b = \sigma\sqrt{2}$$

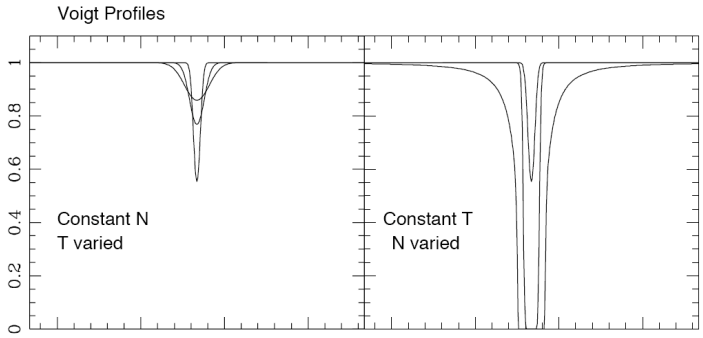
$$b = \left(\frac{2kT}{A\, m_{\text{H}}} + 2\xi^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

Profilo di Voigt

- Nel caso generale bisogna considerare entrambi i tipi di allargamento
  - Il profilo risultante, ottenuto dalla convoluzione del profilo naturale e di quello doppler, si chiama "profilo di Voigt"

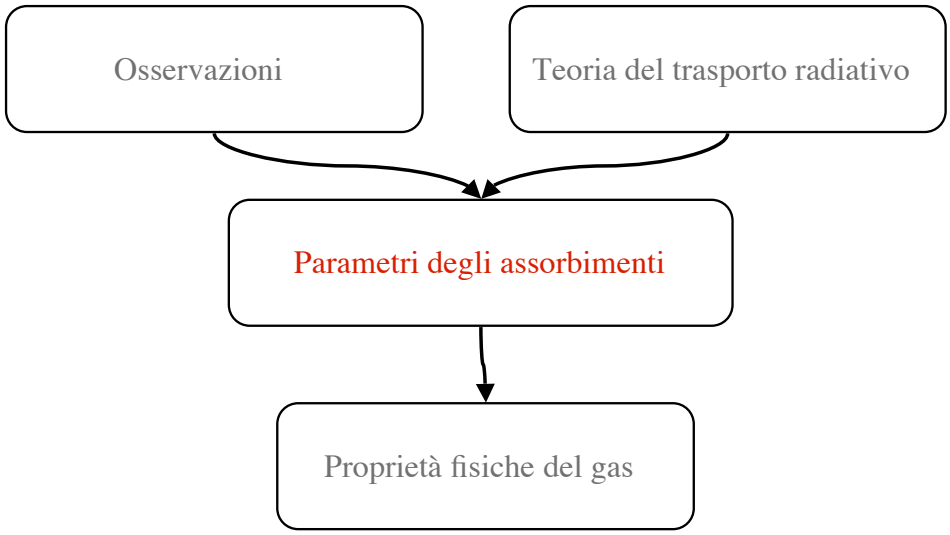
$$\Phi_{\Delta\nu}^{\text{voigt}} = \Phi_{\Delta\nu}^{\text{damping}} \otimes \Phi_{\Delta\nu}^{\text{doppler}}$$

- Caratteristiche del profilo di Voigt
  - Il 'core' della riga è dominato dall'allargamento doppler (profilo Gaussiano)
  - Le ali delle righe sono dominate dall'allargamento naturale (profilo di Lorentz)



Determinazione dei parametri delle righe

mediante spettroscopia di assorbimento visibile/ultravioletta



Parametri fisici ricavabili dall'analisi degli assorbimenti interstellari

- Principali parametri
  - Densità colonnare, N
  - Parametro d'allargamento (broadening parameter), b
  - Velocità radiale, V_r
- Per l'analisi delle righe si usano le seguenti tecniche
  - Curve di crescita
  - Spettri sintetici
- Entrambi i metodi sono basati sulle stesse equazioni descritte in precedenza

$$I_\nu = I_\nu(0)\, e^{-\tau_\nu} \qquad \tau_\nu = \left(\frac{\pi e^2}{m_e c}\right) f\, N\, \Phi_{\Delta\nu}$$

$$\Phi_{\Delta\nu}^{\mathrm{voigt}} = \Phi_{\Delta\nu}^{\mathrm{damping}} \otimes \Phi_{\Delta\nu}^{\mathrm{doppler}}$$

Curva di crescita

Tecnica classica, di semplice applicazione

Non usa l'informazione sul profilo di riga

- Larghezza equivalente

$$W_\lambda = \int \left[1 - \frac{I_\nu}{I_\nu(0)}\right] d\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \int \left(1 - e^{-\tau_\nu}\right) d\nu$$

- Parte lineare della curva ($\tau_\nu << 1$)

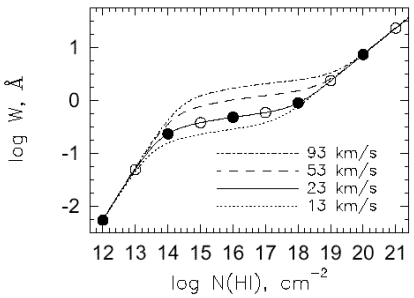
$$\frac{W_\lambda}{\lambda} = \frac{\pi e^2}{m_e c^2} \lambda f N$$

- Parte saturata della curva

$$\frac{W_\lambda}{\lambda} \approx b \left(\ln \frac{\lambda f N}{b}\right)^{\frac{1}{2}}$$

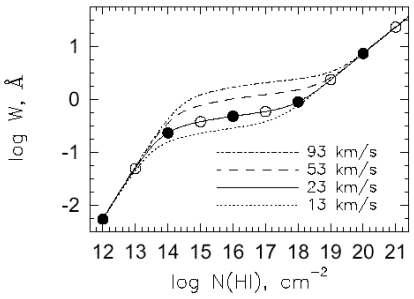
- Parte di 'damping' della curva

$$\frac{W_\lambda}{\lambda} \approx \left(\lambda^2 f N \delta\right)^{\frac{1}{2}}$$



Limiti del metodo della curva di crescita

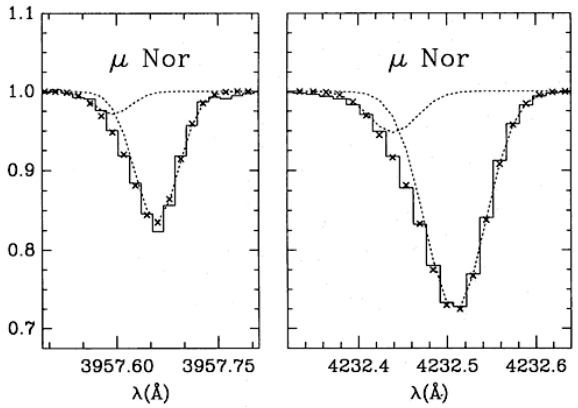
- Le densità colonnari si determinano accuratamente solo nella parte lineare
- Nella parte di saturazione l'errore è di vari ordini di grandezza
  - Si può ottenere un limite inferiore su *N*
- Nella parte damping si può nuovamente misurare *N* con una certa accuratezza
- Per misurare *b* occorrono almeno due righe, una nella parte lineare e una nella parte di saturazione
  - Impossibile misurare *b* nella parte damping



Spettri sintetici

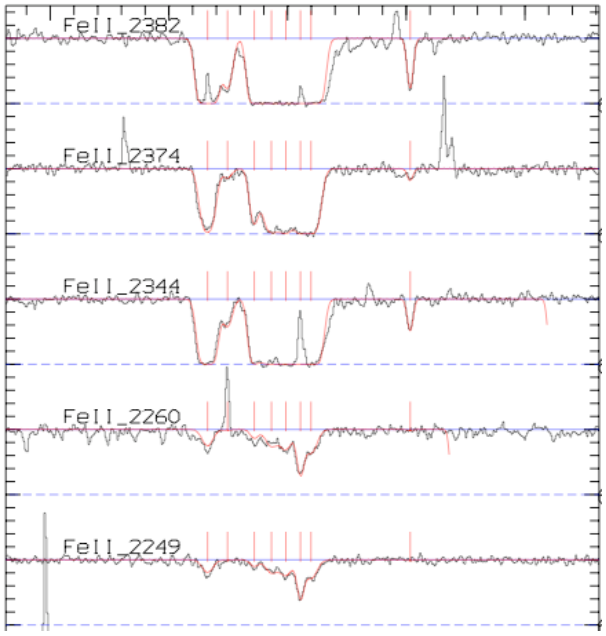
Tecnica che utilizza l'informazione contenuta nel profilo di riga
Permette di risolvere 'blends' di righe

- Per ogni componente visibile nello spettro si definisce una set di 'trial parameters' (parametri di prova)
  - N, V_0, b
- Si calcola lo spettro sintetico $[I_\nu/I_\nu(0)]^{trial}$ a partire dalle equazioni del trasporto
- Si convolve lo spettro sintetico per il profilo strumentale dello spettrografo
- Si itera tale procedura fino a trovare il'best fit' tra spettro sintetico e spettro osservato



Spettri sintetici: esempi

- Vantaggi
  - Possibile risolvere blends di righe
  - Possibile, in linea di principio, misurare b da una sola riga allargata termicamente
- Esempio di fit simultaneo
  - Si utilizzando diverse transizioni dello stesso ione
    - 5 transizioni di FeII
    - 8 componenti



Fattori che limitano l'accuratezza delle misure:

Forze dell'oscillatore

Basate su valori di laboratorio

Possono cambiare nel corso degli anni

Ion	λ(vacuum) Å	*f* (Morton)	*f* (Revised)	Technique[b]	Source[c]
C II.....	2325.403	4.48×10^{-8}	5.80×10^{-8}	E	1
Mg II.....	1240.3947	1.34×10^{-4}	6.25×10^{-4}	I	4
	1239.9253	2.68×10^{-4}	1.25×10^{-3}	I	4
Si II.....	2335.123	3.72×10^{-6}	4.25×10^{-6}	E	8
	1808.0126	5.53×10^{-3}	2.18×10^{-3}	E,T	2,11
	1304.3702	1.47×10^{-1}	8.60×10^{-2}	I,T	3,11
	1526.7006	2.30×10^{-1}	1.10×10^{-1}	I,T	3,11
Cl I.....	1088.0589	1.59×10^{-2}	8.10×10^{-3}	E	9
	1097.3692	4.23×10^{-2}	8.80×10^{-3}	E	9
	1347.2396	1.19×10^{-1}	1.53×10^{-1}	E	9
	1363.4476	9.77×10^{-2}	5.50×10^{-2}	E	9
Ar I.....	1048.2199	2.44×10^{-1}	2.57×10^{-1}	E	10
	1066.6599	6.65×10^{-2}	6.40×10^{-2}	T	10
Cr II.....	2056.254	1.40×10^{-1}	1.05×10^{-1}	E	5
	2062.234	1.05×10^{-1}	7.80×10^{-2}	E	5
	2066.161	6.98×10^{-2}	5.15×10^{-2}	E	5
Fe II.....	1608.4511	6.19×10^{-2}	6.19×10^{-2}	I,E	6,13
	1611.2005	2.22×10^{-4}	1.02×10^{-3}	I	6
	2249.8768	2.51×10^{-3}	1.82×10^{-3}	E	7,12
	2260.7805	3.72×10^{-3}	2.44×10^{-3}	E	7,12
	2374.4612	2.82×10^{-2}	3.26×10^{-2}	I,E	6,12
	2586.6500	6.46×10^{-2}	6.84×10^{-2}	I,E	6,12
Zn II.....	2026.136	5.15×10^{-1}	4.89×10^{-1}	E	5
	2062.664	2.53×10^{-1}	2.56×10^{-1}	E	5

Atomi e ioni

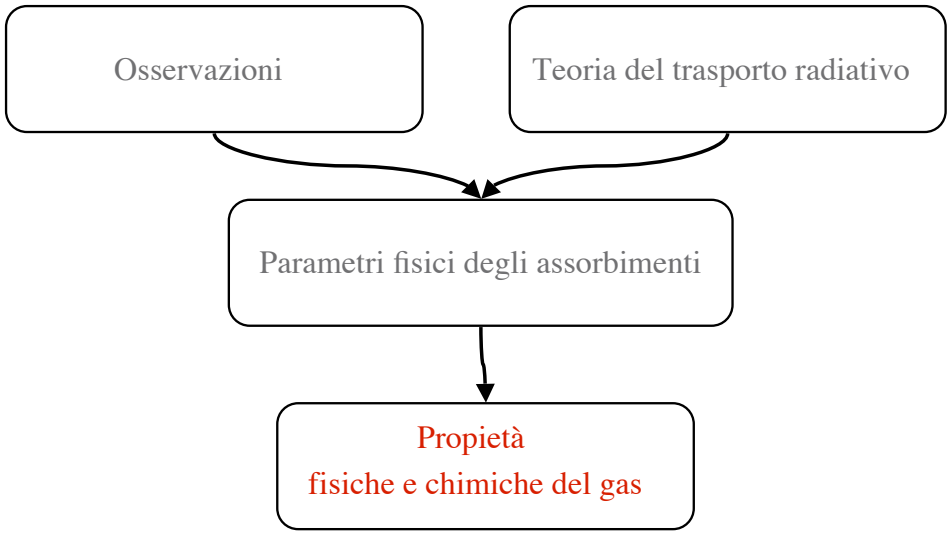
con transizioni di risonanza nella banda ultravioletta

Stato di ionizzazione dominante in regioni HI

Atoms[a] (1150 < λ < 3200 Å)	Z^b	IP(eV)[c] (I to II)	IP(eV)[c] (II to III)	$\log(X/H)_m + 12^d$
H I	1	13.60	...	12.00
D I	1	13.60	...	....
B II	5	8.30	25.15	2.88±0.04
C I, C I*, C I**, C II, C II*, C IV	6	11.26	24.38	8.55±0.05
N I, N V	7	14.53	29.60	7.97±0.07
O I, O I*	8	13.62	35.12	8.87±0.07
Mg I, Mg II	12	7.65	15.04	7.58±0.02
Al II, Al III	13	5.99	18.83	6.48±0.02
Si I, Si II, Si II*, Si III, Si IV	14	8.15	16.35	7.55±0.02
P I, P II, P III	15	10.49	19.73	5.57±0.04
S I, S II, S III	16	10.36	23.33	7.27±0.05
Cl I	17	12.97	23.81	5.27±0.06
Cr II	24	6.77	16.50	5.68±0.03
Mn II	25	7.44	15.64	5.53±0.04
Fe II	26	7.87	16.18	7.51±0.01
Co II	27	7.86	17.06	4.91±0.03
Ni II	28	7.64	18.17	6.25±0.02
Cu II	29	7.73	20.29	4.27±0.05
Zn II	30	9.39	17.96	4.65±0.02
Ga II	31	6.00	20.51	3.13±0.03
Ge II	32	7.90	15.93	3.63±0.04
As II	33	9.81	18.63	2.37±0.05
Se II	34	9.75	21.19	3.35±0.03
Kr I	36	14.00	24.36	3.23±0.07
Sn II	50	7.34	14.63	2.14±0.04
Tl II	81	6.11	20.43	0.82±0.04
Pb II	82	7.42	15.03	2.05±0.03

Determinazione delle proprietà fisiche e chimiche del gas

mediante spettroscopia di assorbimento visibile/ultravioletta



Propietà fisiche e chimiche

ricavabili dai parametri N, V_0 y b

- Parametro di allargamento, b
- Temperatura cinetica
  - Misurando b per atomi con diversa massa in una data nube si può, in linea di principio, ricavare T

$$b = \left(\frac{2kT}{A\, m_{\mathrm{H}}} + 2\xi^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

  - Dipende dalla massa atomica, A
    - Il metodo è più efficiente per atomi di piccola massa
    - Per fare misure accurate serve una risoluzione spettrale molto alta al fine di distinguere tra allargamento doppler e profilo strumentale
- Microturbolenza
  - Con questo tipo di misure si può, in linea di principio, rilevare la presenza di microturbolenza

Propietà fisiche e chimiche
ricavabili dai parametri N, V_0 y b

Velocità radiali, V_0

- Distanza cinematica di una nube
  - Misurando la velocità radiale V_0 di una nube lontana di coordinate Galattiche *(l,b)* si può dedurre la distanza della nube usando un modello di rotazione Galattica differenziale
- Origine di diverse specie atomiche o ioniche
  - Con un'analisi fine delle velocità radiali si può capire se diverse specie provengono dallo stesso volume fisico oppure no
- Cinematica di regioni interstellari
  - Comparando le velocità radiali di diverse nubi si può studiare la cinematica di una data regione del mezzo interstellare

Propietà fisiche e chimiche
ricavabili dai parametri N, V_0 y b

Densità colonnari, N

- Ci permettono di studiare lo stato di ionizzazione e le abbondanze chimiche

- Stato di ionizzazione
  - Rapporti di densità colonnari di due stati di ionizzazione di uno stesso elemento
    - N(Si IV)/N(Si II), N(Mg II)/N(Mg I)
  - Danno informazione sullo stato fisico del gas
  - Ad esempio, se vale l'equilibrio di ionizzazione tra due ioni si possono porre vincoli su
    - campi di radiazione, densità elettronica o temperatura cinetica

$$\frac{n(\mathrm{X}^{i+1})}{n(\mathrm{X}^{i})} = \frac{\Gamma_i + C_i(T)\, n_e}{\alpha_{i+1}(T)\, n_e}$$

Propietà fisiche e chimiche
ricavabili dai parametri N, V_0 y b

- Abbondanze chimiche
  - Dai rapporti di densità colonnari di elementi nello stato di ionizzazione dominante
    - N(MgII)/N(HI), N(MgII)/N(FeII)
  - Correzioni di ionizzazione
    - Se il gas è parzialmente ionizzato, o ionizzato, bisogna fare un modello di ionizzazione, aiutandosi coi rapporti di ionizzazione, per poter stimare le correttamente le abbondanze se gli ioni osservati non sono (completamente) dominanti
  - Effetti di deplezione dovuti alla polvere
    - Per ridurre l'impatto di tali effetti si usano, se possibile, elementi volatili per stimare le abbondanze chimiche o la metallicità
    - Oppure si fanno misure in nubi con poca polvere

Propietà fisiche e chimiche
ricavabili dai parametri N, V_0 y b

- Rapporti isotopici
  - Rapporti di densità colonnari di due diversi isotopi in una data nube
    - Esempio: $N(^{12}C)/N(^{13}C)$
  - Caso particolare di misure di abbondanze chimiche
    - Presenta alcuni vantaggi osservativi
  - Le correzioni di ionizzazione e di deplezione sono generalmente trascurabili nella misura del rapporto isotopico
    - Tali correzioni incidono in maniera pressocchè uguale per entrambi isotopi