Righe in assorbimento interstellare di origine extragalattica

Lezione ISM 7

G. Vladilo

Importanza di studi interstellari extragalattici

– Ci permettono di

mettere alla prova modelli dello stato fisico ed evoluzione chimica in galassie diverse dalla nostra

– Differenze possono essere indotte da

variazioni nel livello di metallicità

- Difficili da studiare nella nostra Galassia, dove i gradienti di metallicità sono modesti
- Poichè la metallicità è un indicatore dello stato di evoluzione chimica, lo studio del mezzo interstellare in galassie di diverse metallicità permette di mettere alla prova modelli di evoluzione galattica

variazioni delle condizioni fisiche

- Ad esempio in galassie di bassa massa i venti galattici possono giocare un ruolo più importante, con conseguente espulsione di gas interstellare nel mezzo intergalattico

Sorgenti di fondo per spettroscopia interstellare extragalattica

- La spettroscopia di righe in assorbimento interstellari richiede alta risoluzione
  - Righe intrinsecamente sottili
  - Necessità di risolvere struttura multi-componente
- Le sorgenti di fondo per spettroscopia interstellare extragalattica devono essere intrinsicamente brillanti per permettere di ottenere spettri ad alta risoluzione
  - Sorgenti di fondo per galassie dell'Universo locale
    - Stelle supergiganti (per la galassie più vicine)
    - Supernovae
  - Sorgenti di fondo per galassie ad alto redshift
    - Quasars (QSOs)
    - Gamma Ray Bursts (GRBs)

Righe in assorbimento interstellare di galassie dell'Universo locale

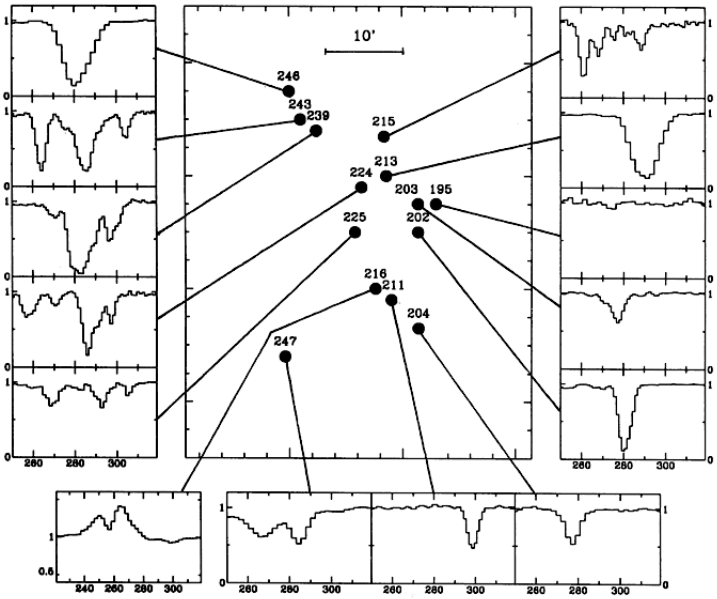
- Esempi
  - Stelle supergiganti nelle Nubi di Magellano
  - Supernove in galassie vicine
- Osservazioni ottenute più facilmente nel visibile
  - Limite per studi interstellari dato che le principali righe in assorbimento cadono nella banda ultravioletta
- In qualche caso spettri ad alta risoluzione ultravioletti
  - Ci permettono di studiare le abbondanze/deplezioni interstellari

Righe di assorbimento interstellari in galassie vicine
Stelle supergiganti come sorgenti di fondo
Esempio: stelle supergiganti nelle Nubi di Magellano

Studio del mezzo interstellare nella Large Magellanic Cloud (LMC)

Il gas interstellare nella regione di 30 Dor (LMC)

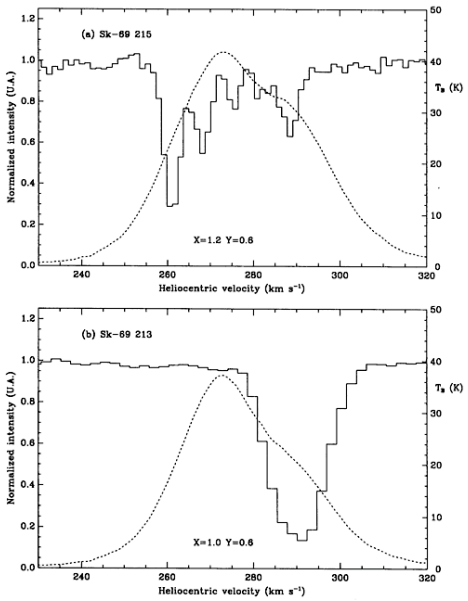
assorbimenti nella direzione di stelle supergiganti LMC



Il gas interstellare nella regione di 30 Dor (LMC)

Confronto tra assorbimenti nel visibile ed emissione a 21 cm

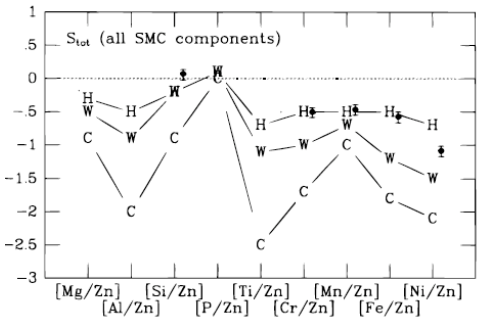
- Esempio di studio della struttura in profondità di una galassia vicina
- Studio della distribuzione in profondità degli strati di gas nella LMC
  - Nell'esempio si nota che lo strato di gas a ~270 km/s, rivelato in emissione en 21 cm, si trova oltre alle stelle
  - Le nubi ad altre velocità, viste in assorbimento nel visibile, si trovano di fronte alle stelle



Deplezioni interstellari nella Small Magellanic Cloud (SMC)

- Spettri UV ad alta risoluzione ottenuti con HST
  - Misure di abbondanze/deplezioni
- In mancanza di osservazioni di HI, come nell'esempio, si usano abbondanze di elementi volatili come riferimento per lo studio di abbondanze
  - Spesso si usa lo Zn
- Si confronta il pattern di deplezione osservato nelle nubi extragalattiche con i tipici pattern di deplezione Galattici
  - Nell'esempio si vede che il livello di deplezione nelle nubi SMC è molto basso
  - Potrebbe trattarsi di un effetto di metallicità: la metallicità della SMC è di circa un fattore 3 più bassa di quella Galattica
  - Meno metalli ⇒ meno polvere

Welty et al. (1997)



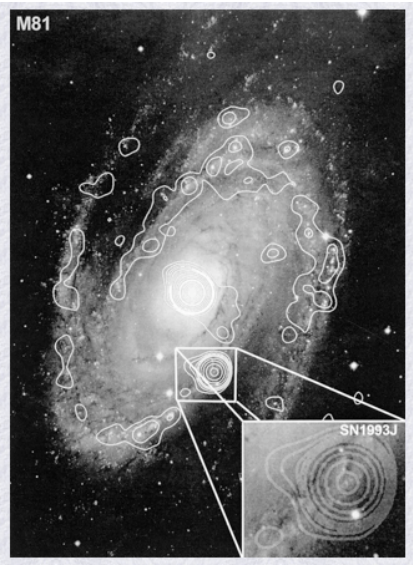
Spettro di assorbimento interstellare/intergalattico di supernove extragalattiche

- L'esplosione di una supernova in una galassia dell'Universo locale offre un'opportunità unica di ottenere spettri ad alta risoluzione di nubi di gas nella direzione della supernova che si trovino
  - Nel disco e nell'alone della nostra Galassia
  - Nubi ad alta velocità (HVCs) e nubi intergalattiche
  - Nubi nel disco e alone della galassia ospite della supernova

Spettro di assorbimento interstellare/intergalattico di supernove extragalattiche

- Le diverse componenti si possono distinguere mediante un'analisi delle velocità radiali
  - Se la supernova è sufficientemente brillante si possono studiare nubi lontane con un dettaglio comparabile agli studi di nubi del mezzo interstellare locale
- Il continuo spettrale delle supernove, nelle prime fasi dopo l'esplosione, è particolarmente adatto per studi interstellari ad alta risoluzione
  - Continuo essenzialmente piatto quando osservato ad alta risoluzione

Esempio di studio di mezzo interstellare/intergalattico nella direzione di una supernova: SN1993j in M81



Spettro interstellare della SN1993j in M81

- Righe interstellari di KI
  - Confronto con lo spettro di una stella di alone Galattico
  - Esempio di contaminazione con righe telluriche
    - Righe interstellari fortunatamente non contaminate da righe di O_2

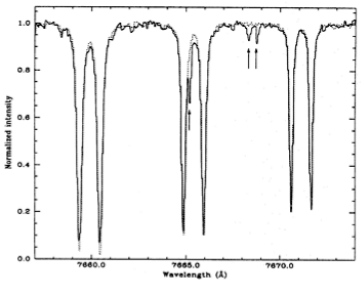


Fig. 1. Spectral region of the K I line λ7664.911Å. Smooth line: spectrum of SN 1993J. Dashed line: spectrum of the bright star HD 93521. The strong absorptions common to both spectra are due to atmospheric O_2. Weak interstellar/intergalactic absorptions visible only in the spectrum of SN 1993J are indicated with arrows

- Righe interstellari di NaI
  - Esempio di tracciamento del continuo
    - Esempio di spettro continuo di supernova nelle prime fasi dopo l'esplosione

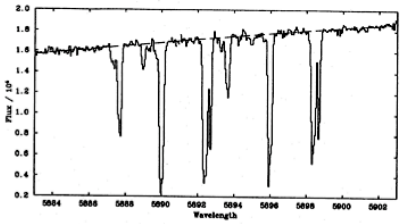
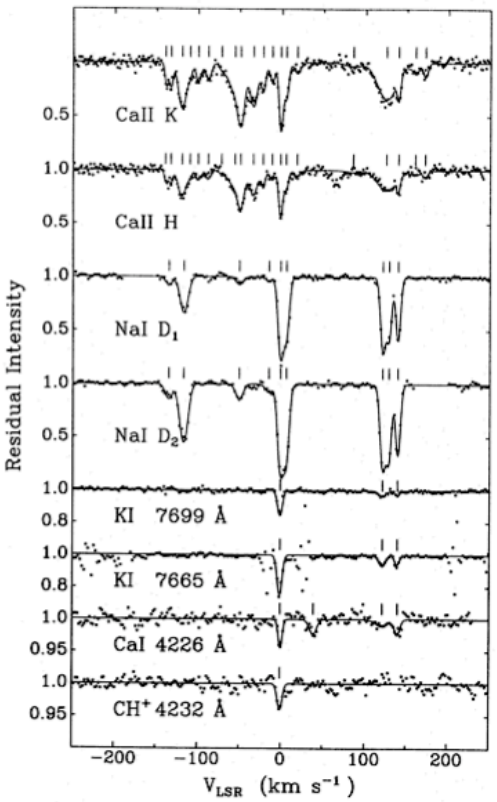


Fig. 2. Average spectrum of SN 1993J in the region of the Na I D_1 and D_2 lines. The adopted continuum is shown as a dashed line. The smooth spectrum of the supernova close to its maximum brightness is an ideal background for detecting narrow interstellar and intergalactic absorptions

Spettro interstellare/intergalattico della SN1993j in M81

- Componenti nel disco della nostra Galassia
- Nubi ad alta velocità attorno alla nostra Galassia
- Nubi interstellari di M81
- Componenti molto intense di origine non identificata
  - Nuba arricchita di metalli, probabilmente nello spazio intergalattico all'interno del gruppo di galassie di M81



Il mezzo interstellare di galassie ad alto redshift

- Redshift cosmologico
  - Definizione empirica
    - Basata sull'evidenza che gli spettri delle galassie sono spostati verso il rosso in accordo con la legge di Hubble

$$z = \frac{\lambda_{\rm obs} - \lambda_{\rm lab}}{\lambda_{\rm lab}}$$

  - Relazione con il fattore di scala che descrive l'espansione cosmologica
    - *R(t)* è il fattore di scala
    - metrica di Robertson-Walker nella relatività generale
      Non si tratta quindi di effetto Doppler

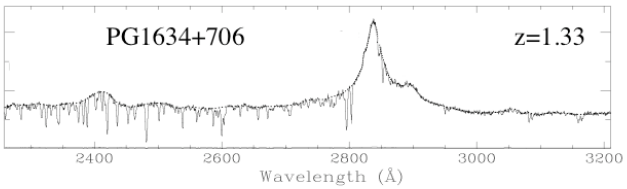
$$1 + z = \frac{\lambda_{\rm obs}}{\lambda_{\rm lab}} = \frac{\lambda(t_0)}{\lambda(t)} = \frac{R(t_0)}{R(t)}$$

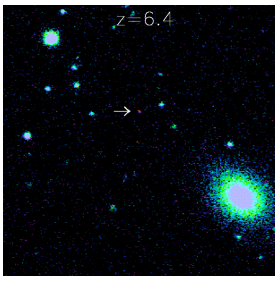
Righe in assorbimento interstellare di galassie ad alto redshift

- Vantaggi
  - Possono essere direttamente osservati mezzi interstellari a diversi redshift e quindi si possono sondare direttamente diverse fasi dell'evoluzione galattica
    - Comparando galassie dello stesso tipo a diversi redshift
  - Le principali righe interstellari, che cadono nell'ultravioletto nel sistema di riferimento delle galassie ad alto redshift, possono essere osservate nel visibile grazie allo spostamento verso il rosso
    - I potenti telescopi da terra possono essere usati per studi interstellari di righe in assorbimento in galassie ad alto redshift
      - Paradossalmente è più difficile studiare lo spettro interstellare di galassie vicine come le Nubi di Magellano in quanto si richiede l'uso di satelliti spaziali con spettrografi ultravioletti ad alta risoluzione

Quasars come sorgenti di fondo per studi di righe in assorbimento interstellari/intergalattiche

- Sorgenti puntiformi intrinsicamente brillanti, ideali per questo tipo di studi
  - Hanno un numero relativamente piccolo di righe intrinseche, generalmente allargate
  - La più importante è l'emissione di Ly_α
    - Da cui si deduce il redshift (di emissione) del quasar, z_e
- Potenziali problemi
  - Il continuo presenta fenomeni di variabilità su diverse scale di tempo
    - Per gli studi di righe di assorbimento in genere non è un problema
    - È un problema se si vogliono fare misure di estinzione del quasar

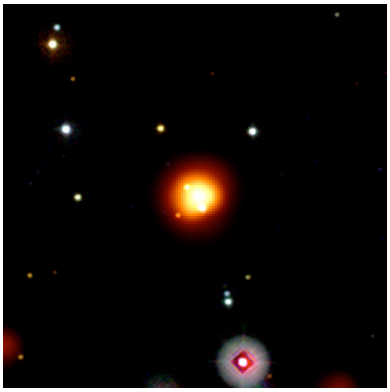




Gamma Ray Bursts come sorgenti di fondo
per studi di righe in assorbimento interstellari/intergalattiche

- GRBs
  - Fenomeni esplosivi che si manifestano principalmente nei raggi γ e X
    - Con osservazioni follow-up si possono osservare anche in altre bande
  - Le esplosioni intrinsicamente più potenti dell'Universo
    - Nelle prime fasi dopo l'esplosione possono essere osservate a risoluzione spettrale relativamente alta
  - Osservabili a distanze cosmologiche
    - Esempio estremo
      - z=6.7 nel caso di GRB 080913

GRB 080913



Sorgenti di fondo per studi di righe in assorbimento interstellari extragalattici
Confronto tra Quasars e GRB

- Dal punto di vista osservativo
  - Il QSO può essere osservato in qualsiasi momento
    - Si possono ottenere spettri di alto segnale rumore ripetendo le osservazioni
    - Svantaggio: estremamente difficile studiare le galassie lungo la visuale del quasar
      - problema di contrasto nell'immagine
  - Il GRB può essere osservato ad alta risoluzione per un tempo molto limitato, subito dopo l'esplosione
    - Difficoltà di ottenere spettri ad alta risoluzione di alto rapporto segnale su rumore
    - Vantaggio: quando il GRB svanisce, si può studiare la galassia ospite

- Diversità di mezzi interstellari campionati
  - La visuale dei quasar campiona preferenzialmente regioni interstellari extragalattiche povere di gas e polvere
    - Risultato di due diversi tipi di bias osservativi
  - Il GRB esplode all'interno di una regione ricca di gas della galassia ospite
    - Ci permette studiare regioni interstellari di questo tipo in galassie ad alto redshift

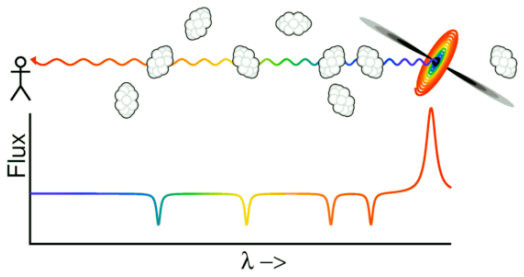
Regioni interstellari nella direzione di sorgenti di fondo a distanze cosmologiche

Effetti di selezione

- Effetti di estinzione
  - Se le regioni interstellari lungo la visuale contengono troppa polvere, si ha un effetto di estinzione della sorgente di fondo
    - Poichè l'estinzione cresce verso l'ultravioletto e poichè, in generale, la banda ultravioletta a riposo è quella da noi osservata nel visibile, l'effetto di estinzione può non essere trascurabile
  - Come conseguenza di questo effetto, le visuali troppo ricche di gas e polvere non saranno osservabili ad alta risoluzione in quanto la sorgente di fondo tenderà a essere oscurata
- Effetti geometrici
  - Per galassie interposte in maniera casuale lungo la visuale della sorgente di fondo, la cross-section geometrica aumenterà per le regioni galattiche più esterne
    - La probabilità di intersezione è più alta per regioni a grandi distanze galattocentriche
  - Le regioni galattiche più esterne sono generalmente meno ricche di gas e polvere

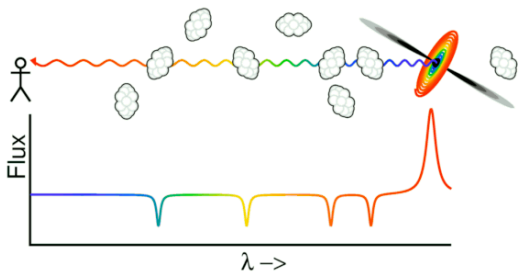
Spettroscopia in assorbimento di quasars

- Principali vantaggi osservativi degli studi in assorbimento
  - Per studi interstellari di galassie lungo la visuale
    - Possibilità di studiare le proprietà fisiche e chimiche di galassie ad alto reshift con un'accuratezza ineguagliabile
      - Grazie alla luminosità intrinseca del quasar di fondo
    - Possibilità di studiare galassie di bassa luminosità ad alto redshift
      - Tali galassie sono deboli e tendono a non essere sottostimate nelle surveys

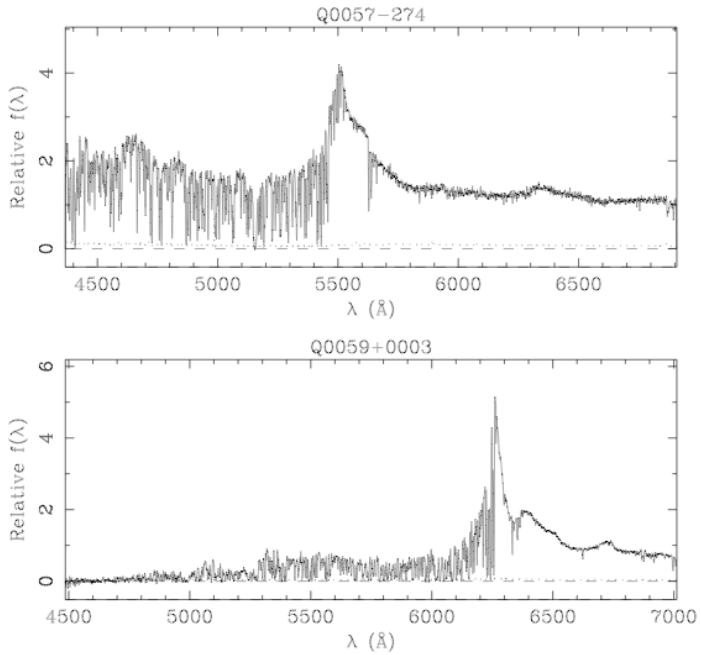


Righe di HI interstellari/intergalattiche negli spettri di quasars

- La transizione Lyα dell'HI gioca un ruolo fondamentale
  - L'idrogeno è l'elemento più abbondante
  - La transizione Lyα (λ_{riposo}= 1215 Å) ha la forza di oscillatore maggiore
- Nubi di HI a redshift z lungo la visuale del quasar
  - assorbono a $\lambda = (1+z)$ 1215 Å
- Possono essere osservate fino al redshift di emissione del quasar, z_e
  - Le nubi a $z > z_e$ non assorbono in quanto si trovano oltre al quasar
- Le righe Ly_α si trovano pertanto nell'intervallo 1215 Å $< \lambda <$ $(1+z_e)$ 1215 Å
  - La porzione di spettro a lunghezze d'onda più corte dell'emissione Ly_α del quasar



La regione a lunghezze d'onda più corte dell'emissione Ly α viene chiamata foresta di Lyman α



Intervallo di redshift in cui si riescono ad osservare gli assorbimenti interstellari/intergalattici di Lyα

- Il valore minimo di redshift è limitato dalla copertura spettrale dello spettro
  - $z > 0$ se lo spettro ha copertura UV fino a 1215 Å
  - $z > 1.8$ per spettri nel visibile
    - a redshift più bassi la Ly α cade nell'ultravioletto

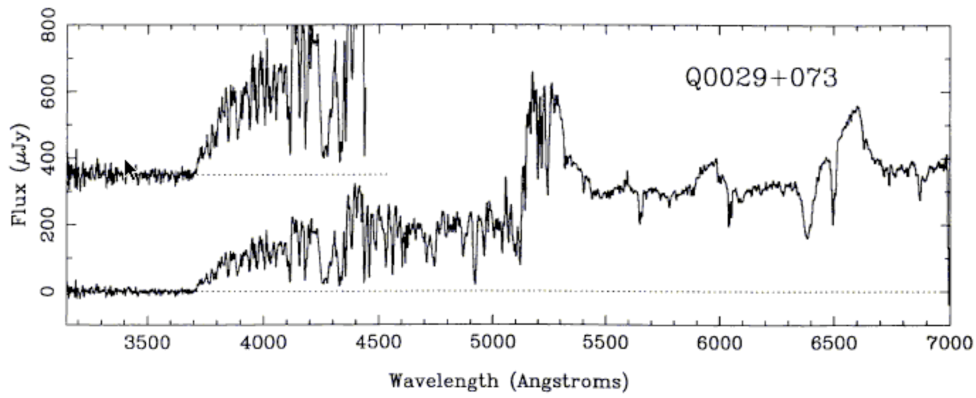
- Il valore massimo di redshift è limitato dal redshift di emissione del QSO, z_e
  - In pratica fino a $z \sim 5 - 6$
    - Ma i QSOs a $z > 3$ sono molto meno numerosi che a redshift più bassi

La discontinuità di Lyman nello studio dell'Universo ad alto redshift

- Nubi HI interstellari/intergalattiche assorbono fotoni con energia $h\nu > 13.6$ eV <u>nel proprio sistema di riferimento</u>
  - Discontinuità di Lyman a $\lambda < 912$ Å
- Nubi HI a redshift z daranno pertanto luogo a una discontinuità a $\lambda < 912\ (1+z)$ Å <u>nel sistema di riferimento dell'osservatore</u>

- Questo succede non solo per le nubi viste in assorbimento negli spettri di quasar, ma <u>anche per le galassie ad alto redshift osservate in emissione</u> che contengano nubi di HI
  - Lo spettro di tali galassie mostrerà una discontinuità a $\lambda < 912\ (1+z)$ Å
  - Su tale effetto di basa la tecnica di rivelamento delle "Lyman-break galaxies" (LBGs)
  - La discontinuità è facile da evidenziare con misure fotometriche
    - è facile scoprire un gran numero di tali galassie ad alto redshift

Esempio di discontinuità di Lyman nello spettro di un quasar



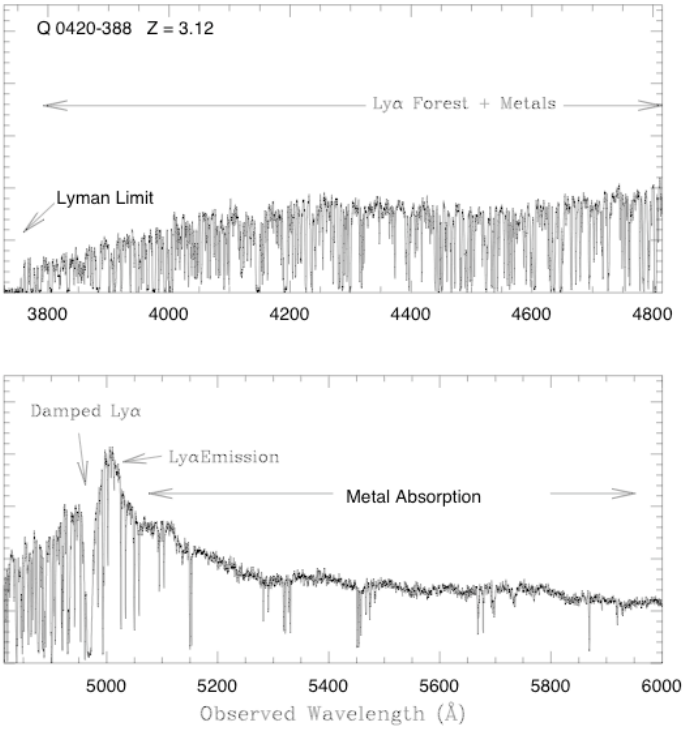
Righe interstellari/intergalattiche dei metalli

- Nello spettro del quasar le righe dei metalli possono cadere
  - dentro la foresta di Lyman
    - quando $\lambda_{met,rest}\,(1+z_{nube}) < 1215\,(1+z_e)$ Å

      In tal caso è difficile rivelarle e tracciare il continuo a causa della "contaminazione" dello spettrto da parte delle righe della foresta
  - fuori dalla foresta di Lyman
    - quando $\lambda_{met,rest}\,(1+z_{nube}) > 1215\,(1+z_e)$ Å

      In questo caso è facile rivelare le righe e tracciare il continuo

Esempio di spettro di quasar con assorbimenti interstellari/intergalattici di righe metalliche

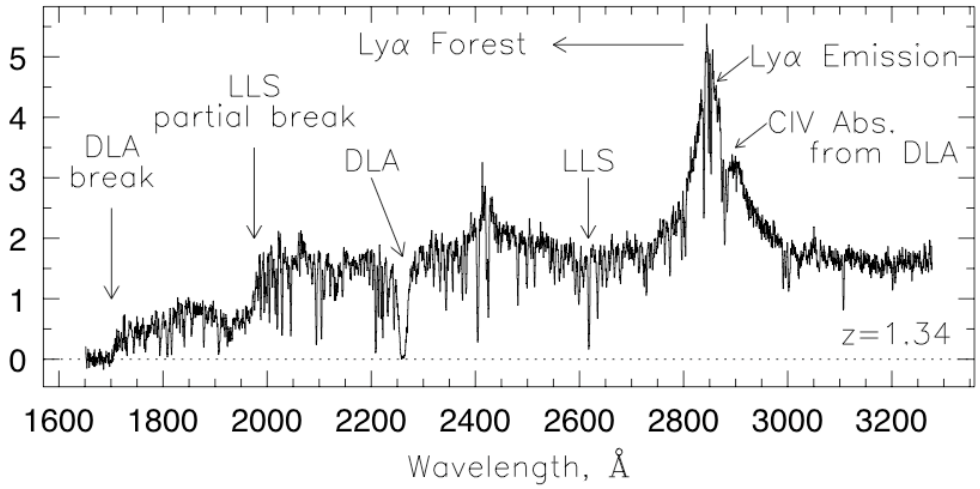


Clasificazione dei sistemi di righe in assorbimento negli spettri di quasars

- Basata principalmente sugli assorbimenti HI
  - In ordine crescente di densità colonnare di HI:
    - Foresta di Ly α
    - Sistemi Lyman Limit
    - Sistemi Damped Ly α
- Oppure basata sugli assorbimenti delle righe metalliche
  - Sistemi Mg II
  - Sistemi C IV

- A causa di limitazioni osservative spesso un dato sistema si classifica solamente sulla base del tipo di assorbimento HI oppure solo sulla base delle righe metalliche
  - Ad esempio limitazioni di copertura spettrale implicano limitazioni di intervallo di redshift osservabile, e quindi di tipo di righe osservabili
  - A seconda dell condizioni di osservabilità <u>uno stesso tipo di nube potrebbere essere classificato in diversi modi</u>

Esempi delle diverse classi di assorbitori negli spettri di quasars



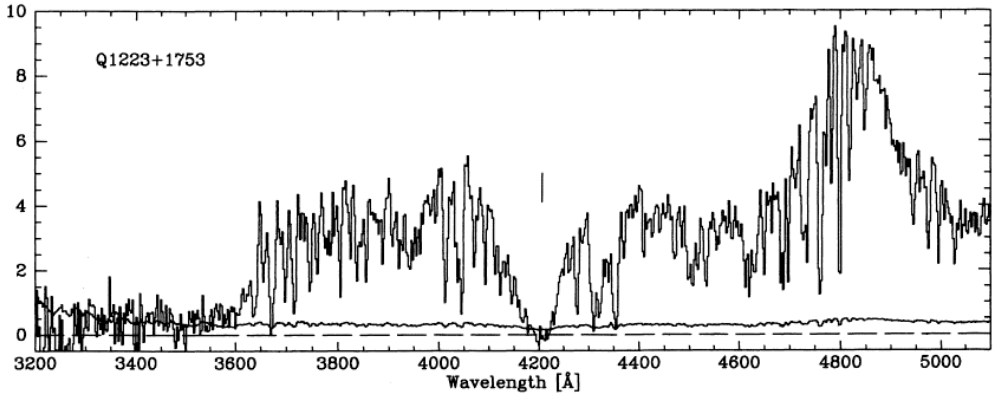
Sistemi Damped Ly α (DLAs)

Sistemi con maggior densità colonnare di HI

Profili di assorbimento Ly α con ali lorentziane (damping wings)

Definizione classica: N(HI) > $10^{20.3}$ atoms cm^{-2}

Tale valore di soglia alto dovrebbe selezionare mezzi interstellari di galassie lungo la visuale del quasar piuttosto che nubi intergalattiche

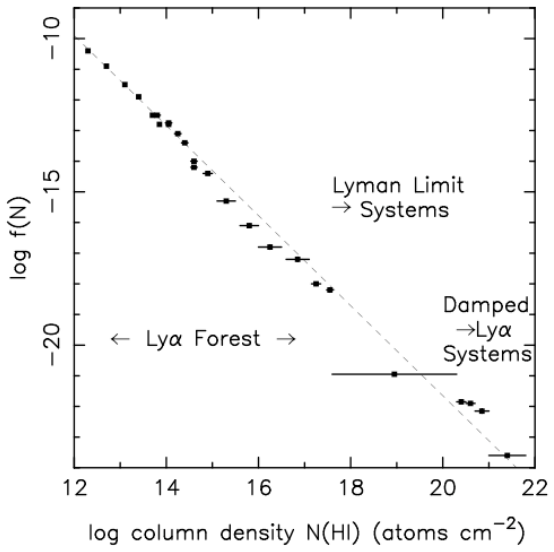


Confronto delle diverse classi di assorbitori nei quasars

Frequenza degli assorbitori a diverse densità colonnari di HI

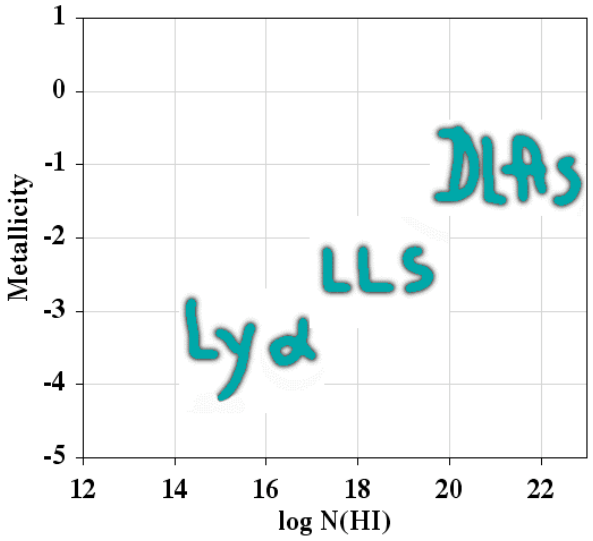
I sistemi DLA sono i più rari

La loro frequenza è in accordo con un origine in galassie poste lungo la visuale



Confronto delle diverse classi di assorbitori nei quasars

Livello di metallicità

I sistemi DLA hanno il livello di metallicità più alto

La loro metallicità è consistente con un origine in galassie poste lungo la visuale