Sistemi Damped Lyman α (DLA)

Lezione ISM 8
G. Vladilo

Sistemi Damped Lyman α (DLAs)

Articolo di approfondimento:
Wolfe et al. 2005, Ann.Rev.Astron.Astrophys., 43, 861

- Definizione:
  - Sistemi in assorbimento nei QSO con N(HI) > 2 x 10^{20} atoms cm^{-2}
    - Wolfe et al. 1986, ApJS 61, 249
    - Densità colonnare che ci si aspetta per dischi galattici lungo la visuale
- Principalmente selezionati/osservati con spettroscopia nella banda ottica
  - Per quasars particolarmente brillanti, anche nella banda UV
- Osservati talvolta anche come assorbimenti a 21 cm
  - Se il quasar ha un forte continuo radio

Sistemi Damped Lyman α (DLA)

Origine:

- Tutte le evidenze osservative puntano ad un origine nel mezzo interstellare di galassie ad alto redshift piuttosto che in nubi intergalattiche
  - Esamineremo varie di tali evidenze osservative nel corso di questa lezione

- Le "galassie DLA", selezionate in assorbimento, costituiscono una popolazione diversa da quelle selezionate con metodi tradizionali

Sistemi DLA: Confronto con altri tipi di galassie ad alto *z*

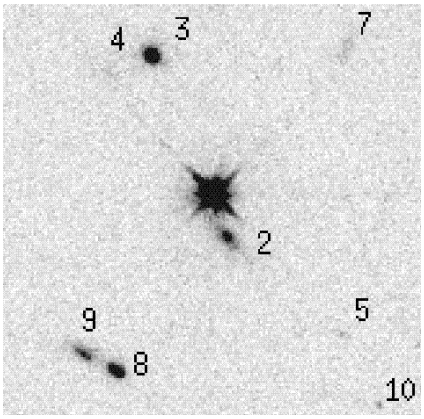
- Galassie Lyman-break (LBG)
  - Selezionate fotometricamente utilizzando la discontinuità di Lyman
    - La discontinuità è prodotta dal gas interstellare dentro le stesse galassie
  - Poichè la selezione è fotometrica, favorisce gli oggetti più brillanti
    - Sono galassie con alti tassi di formazione stellare
- Galassie Damped Lyman α
  - Selezionate in assorbimento
    - La selezione è indipendente dalla luminosità della galassia
      - Siccome esiste un'alta percentuale di galassie deboli, i sistemi DLA potrebbero rappresentare la componente di bassa luminosità della funzione di luminosità delle galassie ad alto redshift
    - Inoltre i bias osservativi tendono a far perdere le regioni ricche di gas/metalli/polvere
    - Sono galassie con bassi tassi di formazione stellare

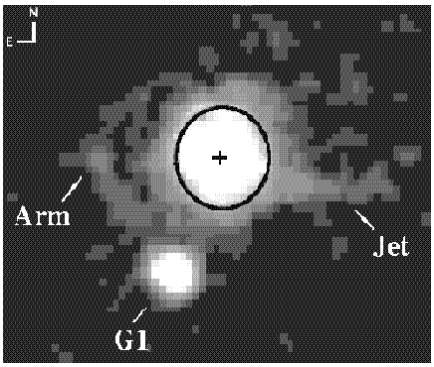
Sistemi DLA come galassie ad alto *z*
Imaging del campo del quasar

- Se è vero che i sistemi DLA si originano in galassie, dovremmo vedere galassie nel campo del quasar di fondo
- Per cercare tali galassie servono:
  - Fotometria del campo del quasar per identificare eventuali galassie candidate come responsabili dell'assorbimento DLA
  - Spettroscopia delle galassie candidate per misurarne il redshift
    - Se z(gal) = z(DLA) e se il parametro di impatto (distanza della galassia dal quasar nel piano del cielo) è consistente con le dimensioni tipiche di galassie si suppone di aver identificato la galassia ospite del sistema DLA
- Compito difficile e "time-consuming"
  - Le galassie sono tipicamente molto prossime al quasar
    - Necessario sottrarre la luce del quasar, estremamente più brillante di quella della galassia
  - La maggior parte delle indentificazioni sono state fatte a $z < 1$

Ricerca di galassie ospiti dei sistemi DLA a $z < 1$

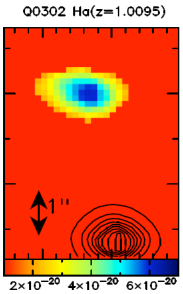
- Principali risultati
  - Varietà di tipi morfologici
  - Non c'è predominanza di galassie spirali
  - Esempio dei primi 19 casi studiati a z < 1
    - 5 candidate spirali
    - 2 galassie S0
    - 5 galassie nane/oggetti compatti
    - 6 galassie Low Surface Brightness
    - 1 campo senza candidati (no spiral)



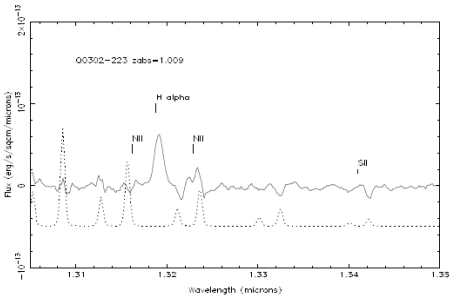


Studio delle galassie nel campo del quasar mediante "integral field spectroscopy"

- Integral field spettroscopy
  - Combinazione di imaging e spettroscopia
  - Ad ogni porzione di immagine viene associato uno spettro
  - Esempio:
    SINFONI @ ESO VLT
- Vantaggi
  - Possibilità di deconvolvere la luce del quasar nello spazio spettrale
  - In un'unica osservazione si ottengono tutte le informazioni utili per l'identificazione del candidato
    - Ad esempio il redshift di emissione delle galassie nel campo
  - Si può studiare la cinematica delle galassie

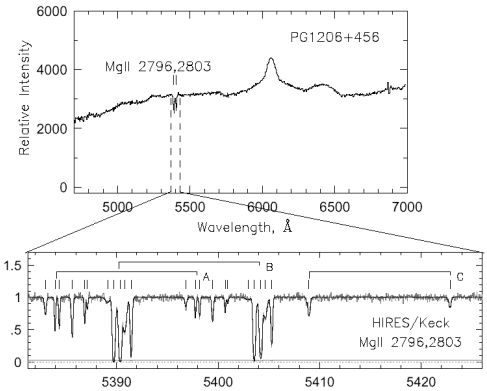


Peroux et al. 2010



Studi ad alta risoluzione spettrale di sistemi DLA

- Nella maggior parte dei casi le informazioni più dettagliate sui sistemi DLA si ottengono dalla spettroscopia ad alta risoluzione
- In particolare, si possono studiare
  - Cinematica
  - Stato di ionizzazione
  - Abbondanze chimiche
  - Gas molecolare



Cinematica dei sistemi DLA

- Importanza degli studi cinematici
  - Ci offrono vincoli su
    - Masse delle galassie
    - Modelli cosmologici di formazione di strutture

Cinematica: osservazioni

- Larghezza dei profili delle righe metalliche

  ⇒ Δv width encompassing 0.9 τ

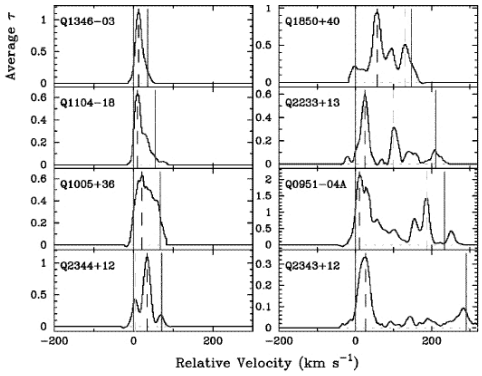
  Prochaska & Wolfe 1998, ApJ, 507, 113

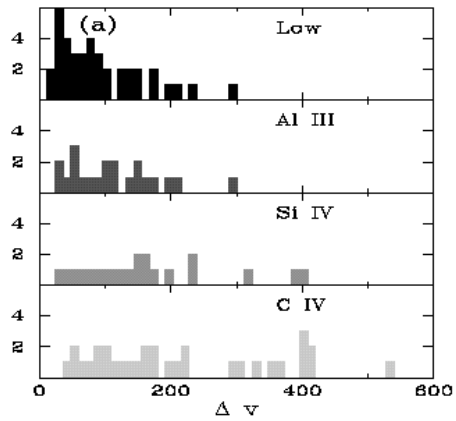
$$I_\nu = I_\nu(0) e^{-\tau_\nu}$$

- Risultati
  - La dispersione di velocità delle specie di bassa ionizzazione (regioni HI) è quella tipica di galassie di vario tipo
    - La larghezza massima dei profili è di circa 250 km/s

      Valore simile a quello della velocità di rotazione di una galassia spirale come la nostra
    - In numerosi casi profili con Δv < 100 km/s

      Galassie nane oppure effetto di proiezione di spirali
  - La dispersione di velocità delle specie di alta ionizzazione è maggiore
    - Probabilmente campionano volumi maggiori, come nel caso dell'alone della nostra galassia



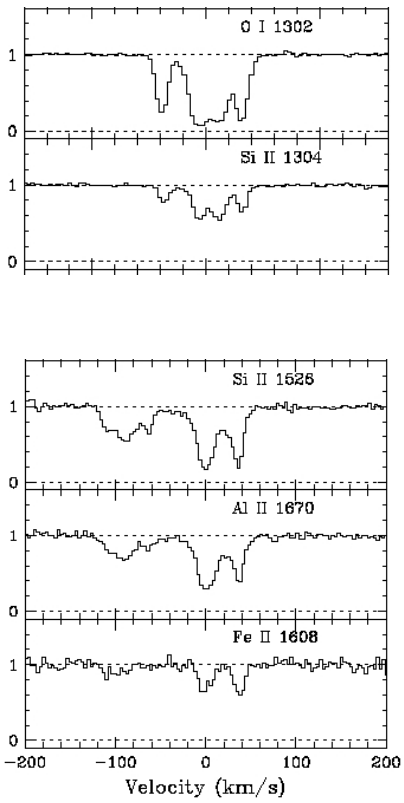


Stato di ionizzazione dei sistemi DLA

- Importanza degli studi di ionizzazione
  - Vincoli su
    - Campo di radiazione intergalattico ad alto redshift
    - Struttura di ionizzazione nel gas diffuso di galassie primordiali
  - Correzioni di ionizzazione
    - Possono essere necessarie per stimare le abbondanze chimiche a partire dalle densità colonnari delle specie osservate

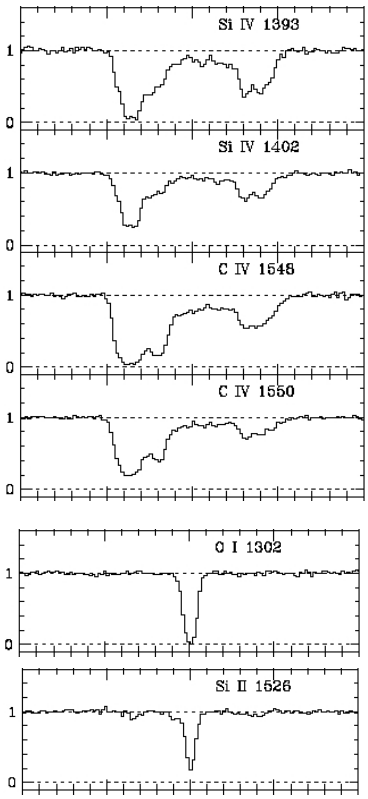
Specie di bassa ionizzazione

- Le specie comunemente studiate nei sistemi DLA sono quelle dominanti in regioni HI
  - Per elementi con $IP_I > 13.6$ eV
    - lo stato dominante è neutro
      e.g. N I, O I, Ar I ...
  - Se $IP_I < 13.6$ eV e $IP_{II} > 13.6$ eV
    - lo stato dominante è quello una volta ionizzato
      e.g. C II, Mg II, Al II, Si II, Fe II ...
- Situazione analoga a quella già studiata nelle regioni HI del mezzo interstellare Galattico
  - Regione HI immersa in un campo di radiazione con fotoni < 13.6 eV
- Le specie di bassa ionizzazione mostrano stessi profili in velocità radiale
  - Origine comune in regioni HI



Specie di alta ionizzazione

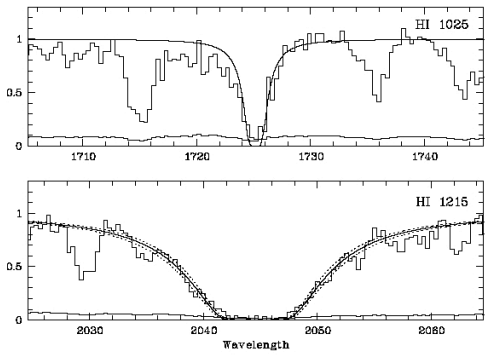
- I sistemi DLA mostrano anche specie di alta ionizzazione:
  - C IV, Si IV, …
- Tali profili hanno profili in velocità simili
  - Origine comune in gas di alta ionizzazione
- Specie di bassa e alta ionizzazione hanno differenti profili di velocità
  - Il gas neutro e ionizzato provengono da diverse regioni delle galassie DLA
  - Le regioni ionizzate sono più estese

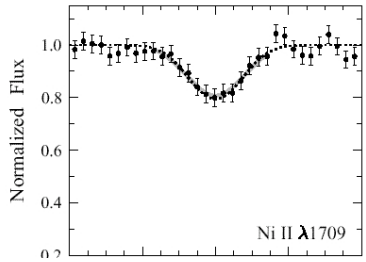


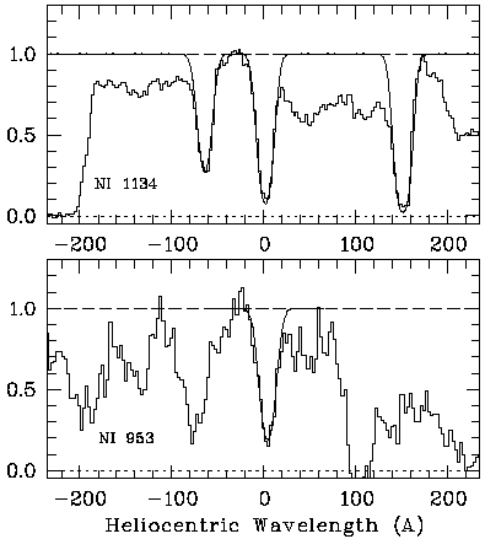
Abbondanze chimiche nei sistemi DLA

- Importanza degli studi di abbondanze chimiche
  - Test osservativo diretto delle prime fasi di evoluzione chimica galattica
    - Complementare a studi di stelle povere di metalli nella nostra Galassia e galassie povere di metalli nell'Universo locale
  - Identificazione della storia evolutiva delle galassie DLA sulla base dei loro pattern di abbondanze chimiche
  - Studio dell'evoluzione chimica "cosmica"
    - Arricchimento di metalli mediato su grandi volumi dell'Universo, in funzione del redshift
    - Test di modelli di "cosmic chemical evolution"
  - Test delle predizioni della nucleosintesi del Big Bang (BBN) in siti astrofisici poco evoluti

Misure di abbondanze: densità colonnari







- Misure accurate di *N*(HI)
  - Profilo di Damping delle righe Ly α
  - Altre righe della serie possono aumentare l'accuratezza della misura
- Misure accurate di *N*(metalli)
  - Per righe non saturate, in particolare quelle lines fuori dalla foresta di Ly α

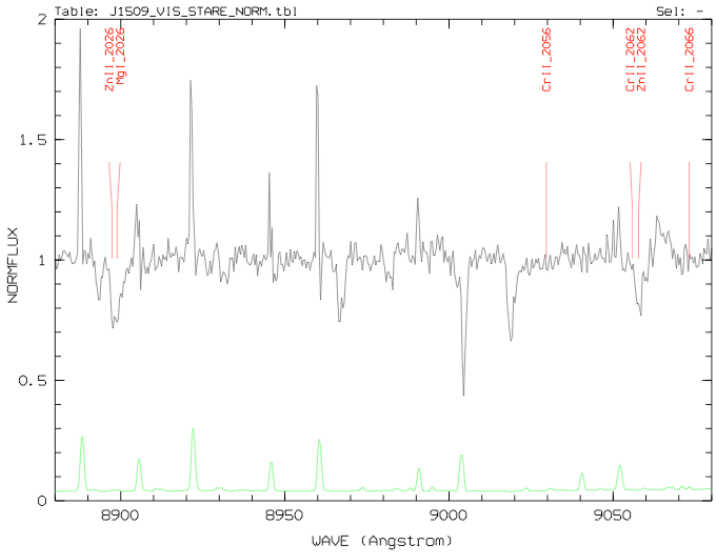
Dalle densità colonnari alle abbondanze

- Accuratezza delle misure di densità colonnare
  - Per HI tipicamente ±0.1 dex
  - Per righe metalliche ±0.05 dex o ancora più accurato
- Correzioni di ionizzazione
  - Generalmente trascurabili per le specie dominanti in regioni HI
- Correzioni per effetti di deplezione dovuti alla polvere
  - Per gli elementi refrattari potrebbero essere abbastanza più grandi degli errori di misura

Abundanze chimiche nei sistemi DLA

Lo zinco come tracciante della metallicità

- Da studi interstellari locali sappiamo che lo zinco è relativamente volatile
  - Buon tracciante del livello di metallicità, non influenzato dalla polvere
- Surveys di zinco (e cromo) nei sistemi DLA
  - Possibili anche a risoluzione spettrale intermedia (R ~ 10^4)
- Esempio di attualità: spettrografo X-shooter all'ESO VLT
  - Grandissima copertura spettrale (da 300 nm a 2500 nm)
  - Risoluzione intermedia (R ~ 4000/14000)



- Esempio di spettro di spettro di quasar a redshift ~ 6 osservato a risoluzione intermedia con X-shooter
- Sono visibili le righe dello ZnII e CrII

Figura: cortesia Valentina D'Odorico

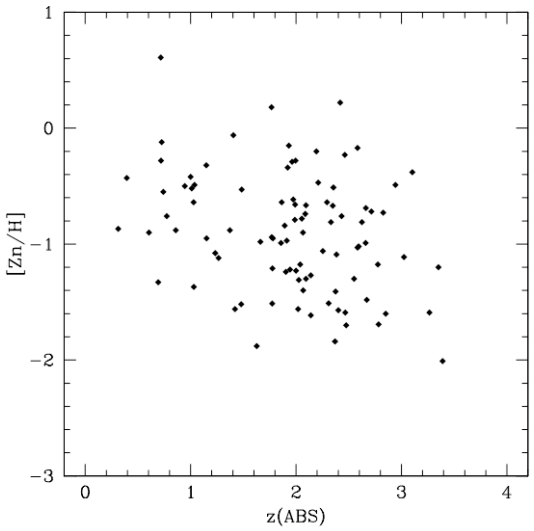
Abundanze chimiche nei sistemi DLA
Lo zinco come tracciante della metallicità

- Risultati di studi di abbondanze di zinco
  - Metallicità media dei sistemi DLA
    - Nell'intervallo: -2.5 < [Zn/H] < +0.5
    - Valor medio: [Zn/H] ~ –1.1
- Abbondanza di zinco nei sistemi DLA consistente con un'origine in galassie di bassa metallicità
  - Galassie nelle prime fasi evoluzione chimica
  - Oppure galassie con basso tasso di formazione stellare

Lo zinco come tracciante della metallicità nei sistemi DLA

- Evoluzione della metallicità con il redshift
  - Il livello di metallicità tende ad aumentare con il tempo cosmico
    - In accordo con l'idea che l'evoluzione chimica porta ad un arricchimento in metalli del mezzo interstellare
  - Ma con una notevole dispersione ad ogni valore di redshift

Database di densità colonnari di ZnII nei DLA aggiornato al 2011 (circa 100 misure)



Interpretazione della

dispersione in metallicità delle galassie DLA

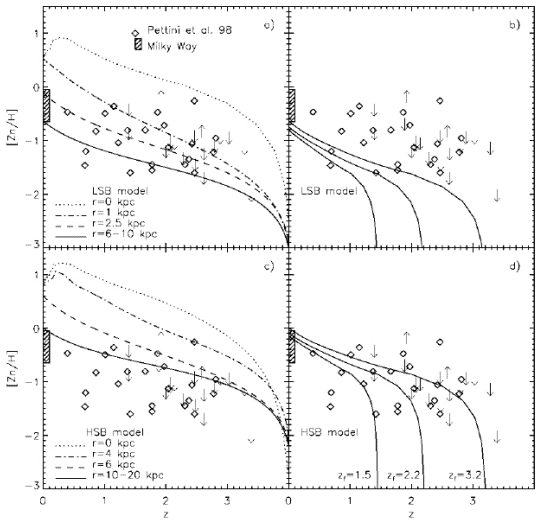
– Scatter intrinseco di una popolazione eterogenea di regioni interstellari in diversi tipi di galassie

Il confronto con modelli di evoluzione chimica galattica

dimostra come galassie con diversi tassi di formazione stellare, diversi redshift di formazione osservate a diverse distanze galattocentriche, portano a una dispersione nel diagramma [Zn/H] vs redshift

Esempio in figura:

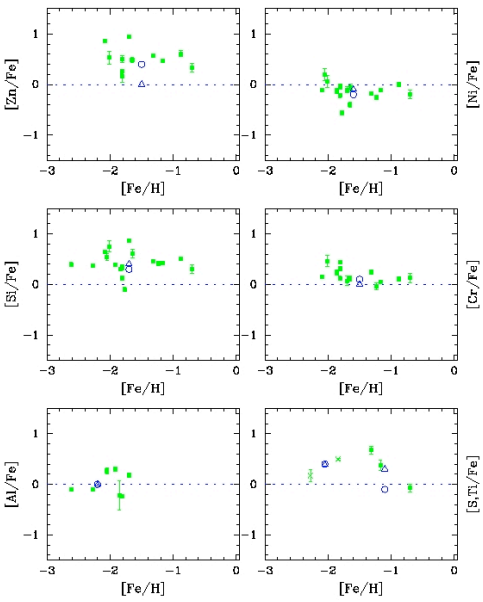
Jimenez, Bowen & Matteucci 1999



Abundanze chimiche nei sistemi DLA

Elementi chimici fuori dalla foresta di Lyman

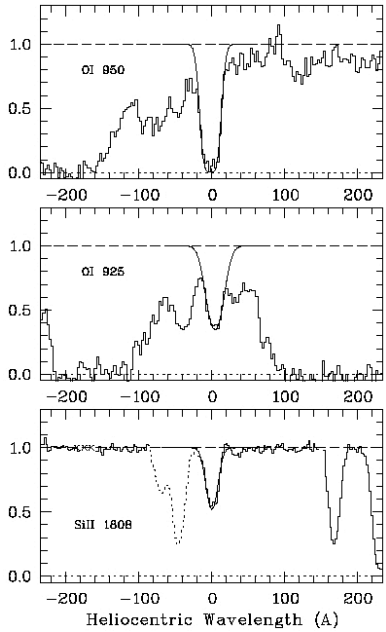
- Misurabili molti elementi chimici
  - Si, Al, Cr, Mn, Fe, Zn, Ni
- Misurabili con difficoltà alcuni elementi importanti
  - C, N, O, S
    - Per via delle righe molto saturate o contaminate dalla foresta di Lyman
- Principali risultati
  - I rapporti elemento su elemento hanno uno scatter relativamente basso
  - Il rapporto [Si/Fe] > 0
    - Simile a quanto osservato in stelle Galattiche di bassa metallicità
  - Alcuni rapporti difficili da interpretare
    - In termini di modelli di evoluzione chimica galattica



Abundanze chimiche nei sistemi DLA
Elementi chimici dentro dalla foresta di Lyman

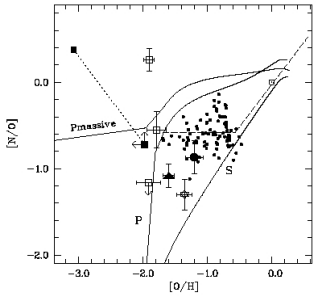
- Solo dentro la foresta di Lyman si riescono a misurare
  - N, O, e S
- Misure non facili
  - richiedono il fit simultaneo di diverse righe per riconoscere possibile contaminazione de parte di righe della foresta di Lyman
  - Ciononostante, in certi sistemi le righe risultano essere ben misurabili
    - Anche con buona accuratezza
- Non si riesce quasi mai a misurare
  - C
  - ha righe saturate fuori dalla foresta
- Esempio in figura
  - Prime misure di righe di OI dentro la foresta di Lyman
    - z=3.390 system to Q 0000-26

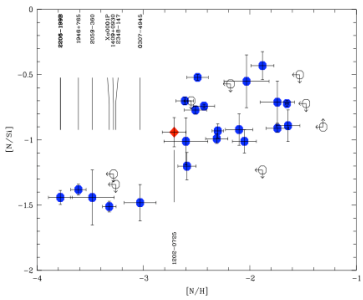
      Molaro et al. 2000



Abbondanze chimiche nei sistemi DLA
Elementi chimici dentro la foresta di Lyman

- Esempio di risultati
  - Il rapporto N/O si comporta diversamente rispetto a quello misurato in stelle di bassa metallicità
  - È tipicamente più basso
- Questo ed altri risultati suggeriscono che l'evoluzione chimica dei sistemi DLA sia generalmente diversa da quella della Galassia

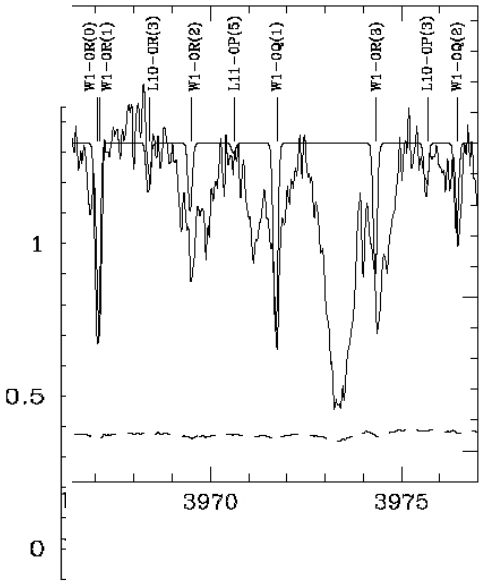




Gas molecolare nei sistemi DLA

- Importanza degli studi molecolari
  - Stime dei parametri fisici del gas
    - Temperatura, densità
    - Campo di radiazione
  - Studio del "filling factor" geometrico del gas molecolare in galassie primordiali
  - Test della connessione tra molecole e polvere in galassie primordiali
- Ricerche di H_2
  - Transizioni elettroniche nella banda UV
  - Surveys osservative
    - Con UVES al VLT

      Noterdaeme et al. (2008)

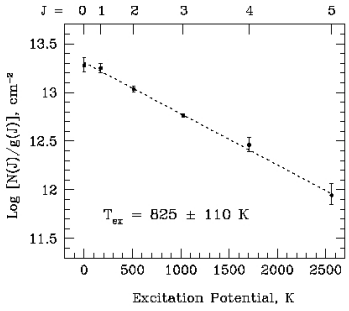


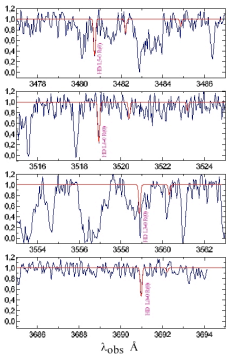
Gas molecolare nei sistemi DLA

- Esempi di risultati
  - Temperatura di eccitazione
    - Esempio di misura dello stato fisico del gas

      Levshakov et al. 2001
  - Molecola HD
    - Possibilità di misurare il rapporto D/H in nubi poco evolute dal punto di vista chimico

      Varshalovic et al. 2001





Evidenze di polvere nei sistemi DLA

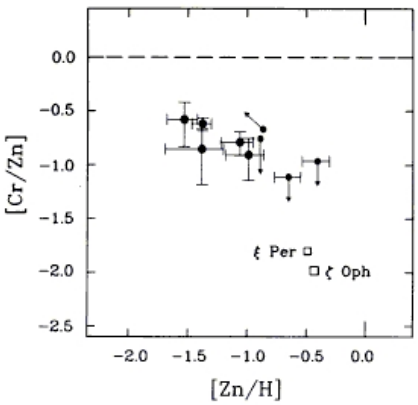
- Effetti di deplezione
- Correlazione tra deplezioni e H_2
- Estinzione dei quasar di fondo
- Misure di silicati

Evidenze di polvere nei sistemi DLA
(1) Effetti di deplezione

- Rapporti di abbondanze degli elementi del gruppo del Fe
  - Dovrebbero tracciarsi tra loro nel corso dell'evoluzione chimica
    - Così si osserva, ad esempio, nelle stelle povere di metalli della Galassia
  - Nei sistemi DLA invece si ha

    [Cr/Zn] < 0

    [Fe/Zn]<0
  - Rapporti simili a quelli misurati nel mezzo interstellare Galattico
    - Conseguenza degli effetti di deplezione
    - Esempio in figura: [Cr/Zn]



Evidenze di polvere nei sistemi DLA
(2) Correlazione tra deplezione e H_2

- I sistemi DLA nei quali si riesce a misurare H_2 hanno alti valori di deplezione
  Noterdaeme et al. 2008
- Risultato consistente con l'ipotesi che la deplezione degli elementi sia un effetto della polvere associata alle molecole

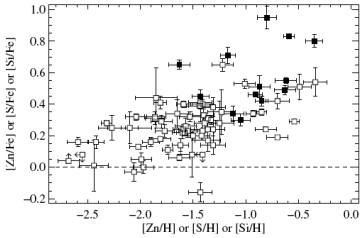


Fig. 6. A correlation (5.3σ confidence level) exists in the overall UVES sample between dust-depletion factor, [X/Fe], and metallicity, [X/H], with X either Zn, S or Si.

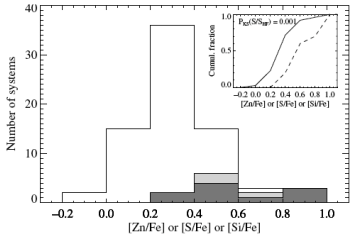
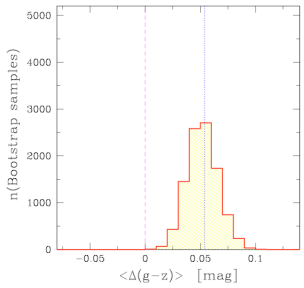
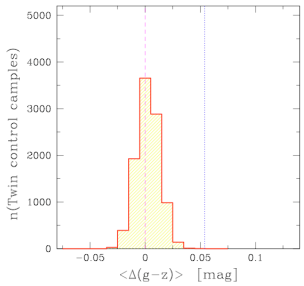


Fig. 7. Distribution of depletion factors from the overall UVES sample ($\mathcal{S}$; solid), sub-samples $\mathcal{S}_{H2}$ (grey) and $\mathcal{S}_{HF}$ (dark grey). It is clear from these histograms that the distribution of depletion factors for H_2-bearing systems is different from that of the overall sample. This shows clearly that H_2-bearing DLAs are more dusty than the rest of the DLAs. The

Evidenze di polvere nei sistemi DLA
(3) Estinzione media dei quasars di fondo

- Confronto tra un campione di quasars con sistemi DLA e un campione di controllo senza sistemi DLA
  - Ricerca di evidenze di estinzione
    - Nel continuo spettrale
    - Nei colori fotometrici
  - Misura estremamente difficile
    - L'estinzione media è piccola in quanto le regioni ricche di gas/metalli/polvere sono rare tra i sistemi DLA
    - Esiste una dispersione intrinseca negli spettri (colori) dei quasars
  - Risultati controversi in letteratura
    - Detezione a 3σ basata sui colori dei quasar
    - Arrossamento medio <E(B-V)> ~ 0.006 mag
      Vladilo et al. (2008)

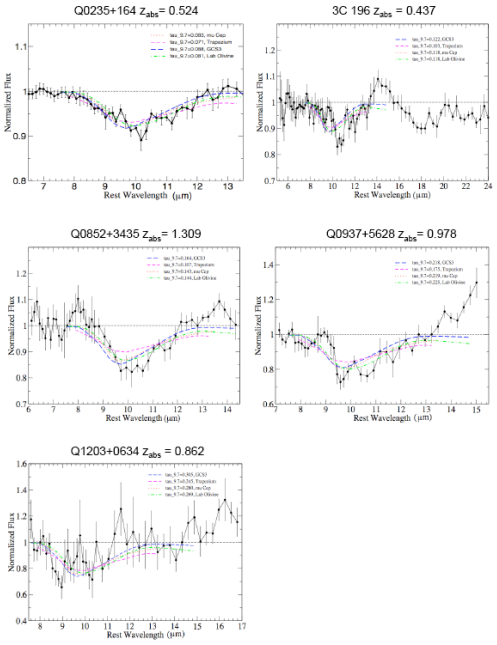




Evidenze di polvere nei sistemi DLA
(4) Osservazione di silicati

- Trovate evidenze dirette di silicati in sistemi DLA di redshift relativamente basso
  - $0.4 < z < 1.3$
- Osservazioni fatte con lo spettrografo IRS sullo Spitzer Space Telescope
  - Trovata la riga in assorbimento dei silicati a 9.7 μm

    Kulkarni et al. (2010)
- Con strumentazione più potente in futuro si potranno cercare silicati in sistemi DLA a redshift più alto



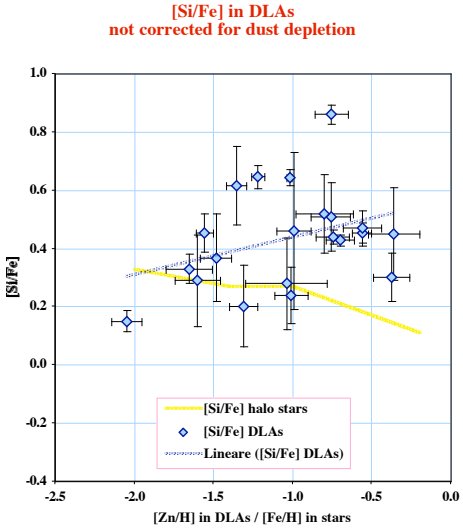
Esempio di studio di abbondanze chimiche: il rapporto [α/Fe] nei sistemi DLA

- Strumento diagnostico dell'evoluzione chimica
  - Conseguenza delle differenti scale di tempo per l'arricchimento del mezzo interstellare da parte dei prodotti:
    - delle supernove di tipo II (ricche in elementi α-capture)
    - e delle supernove di tipo Ia (ricche in elementi del gruppo del Fe)
- Ad esempio, il rapporto [α/Fe] è sovra-solare nelle stelle Galattiche povere di metalli
  - Tipicamente [α/Fe] ~ +0.5 dex a metallicità [Fe/H] ~ -2 dex
- Se i sistemi DLAs fossero progenitori delle odierne spirali come la Via Lattea, ci aspetteremmo
  - Un'evoluzione chimica simile a quella seguita dalla Via Lattea
  - [α/Fe] ~ +0.5 dex nei primi stadi evolutivi

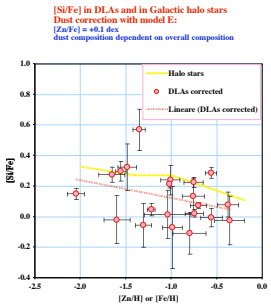
Studio del rapporto [Si/Fe] nei sistemi DLA <u>senza tener conto</u> della polvere

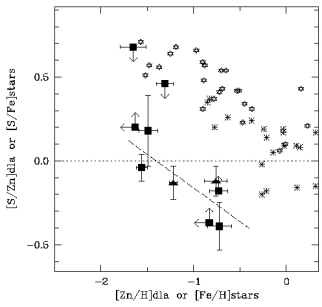
- Il [Si/Fe] è un indicatore di [α/Fe]
  - Tipicamente si misura [Si/Fe] > 0
  - Risultato originariamente interpretato come effetto di evoluzione chimica, per similitudine con quanto osservato nelle stelle povere di metalli nella Via Lattea
  - Un'attenta analisi rivela però delle contraddizioni
    - Il rapporto [Si/Fe] tende a crescere con la metallicità

      anzichè a diminuire con la metallicità, come si osserva nelle stelle povere di metalli
  - Considerato che il Fe ha generalmente un grado di deplezione maggiore del Si, si è studiata la possibilità che [Si/Fe] > 0 sia principalmente un effetto di polvere



Studio del rapporto [α/Fe] nei sistemi DLA <u>tenendo conto</u> della polvere





- Si può affrontare il problema della polvere in due modi diversi
  - Usando un metodo per la correzione degli effetti di deplezione
  - Usando solo elementi volatili: ad esempio [S/Zn] come "proxy" (surrogato) di [Si/Fe]
- Entrambi metodi indicano consistentemente lo stesso risultato
  - A parità di metallicità, il rapporto [α/Fe] nei sistemi DLA è un po' più basso che nelle stelle povere di metalli della Via Lattea
  - Il risultato suggerisce che l'evoluzione chimica dei sistemi DLA è generalmente più lenta di quella della Via Lattea
  - Le galassie DLA hanno un basso tasso di formazione stellare, oppure formazione stellare intermittente