

Formazione delle stelle di Popolazione III

M. Stiavelli

Discuterò le condizioni prevalenti nell'Universo dopo la ricombinazione, la formazione di idrogeno molecolare, e le condizioni per il raffreddamento di nubi primordiali che portano alla formazione di una popolazione stellare con metallicità primordiale.

Piano:

- le prime stelle si formeranno da perturbazioni di piccola massa
- queste perturbazioni avranno temperature piccoli e incapaci di raffreddarsi in assenza di idrogeno molecolare
- calcolare la quantita' di idrogeno molecolare primordiale richiede la conoscenza della ionizzazione residua.

Ionizzazione residua:

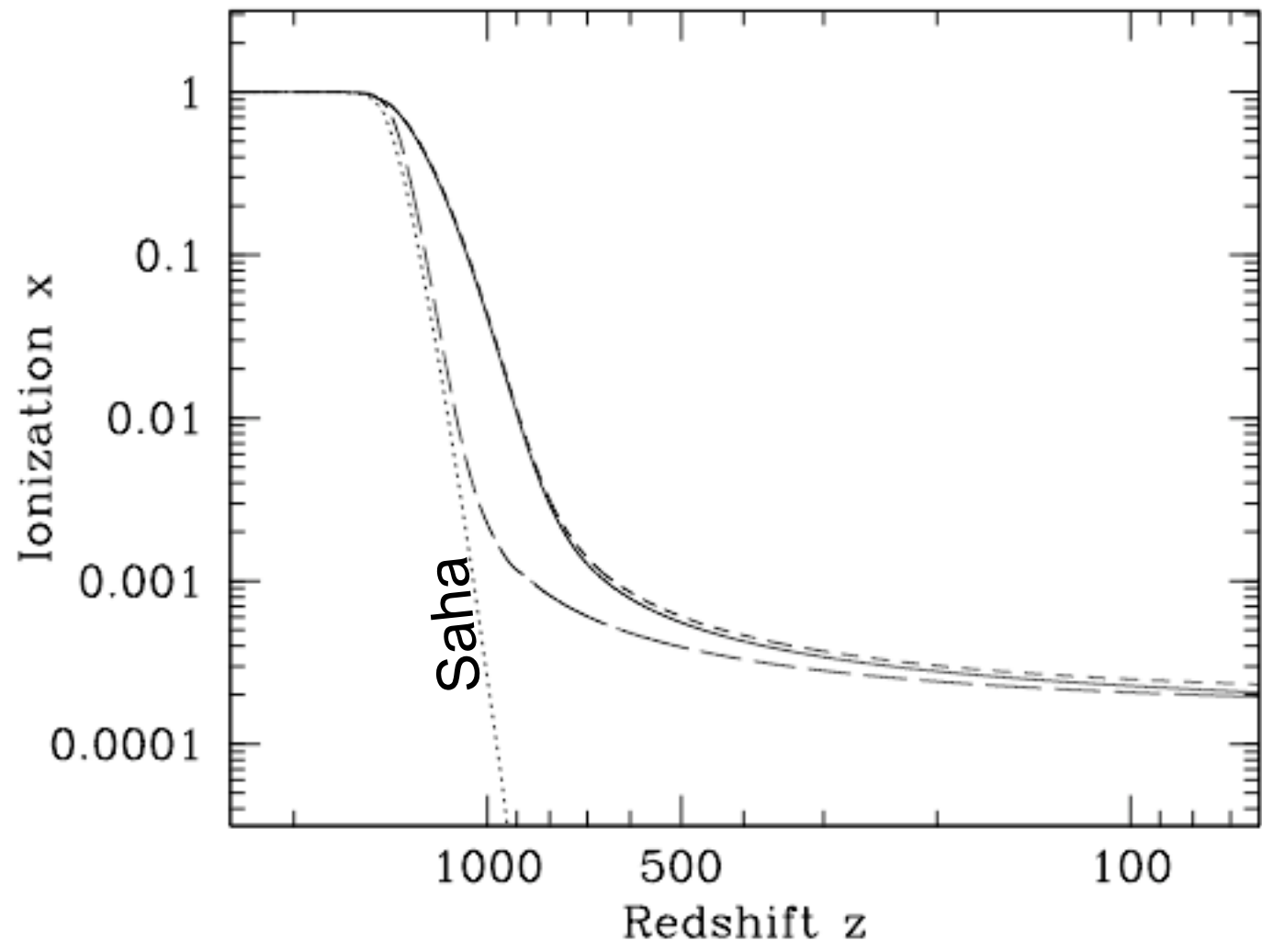
Con l'espansione dell'universo la temperatura della radiazione cosmica di fondo scende sotto quella necessaria per mantenere l'idrogeno neutro.

La temperatura corrispondente a $E_b = 13.6 \text{ eV}$ e' dell'ordine di 160 mila gradi K che si avrebbe a $z=58000$.

In realta' basta molto meno perche' ci sono molti piu' fotoni che non atomi d'idrogeno. Tenendo conto che ci sono circa 10^{10} fotoni per ogni atomo d'idrogeno basta che l'energia media dei fotoni sia tale che solo 1 su 10^{10} arriva all'energia di ionizzazione. Questo corrisponde a circa 23 mila gradi K ossia a $z=2520$. In realta' sono sufficienti energie anche inferiori perche' non e' necessario ionizzare in un singolo passo.

Una stima piu' precisa dell'andamento delle ionizzazione residua dell'idrogeno, x , in funzione della temperatura θ_0 del redshift) puo' venir fatto usando l'equazione di Saha (vedi anche il libro di Peebles).

Anche questa stima non e' pero' corretta perche' all'abbassarsi della temperatura e della frazione x le ionizzazioni e le ricombinazioni cessano di essere processi in equilibrio.

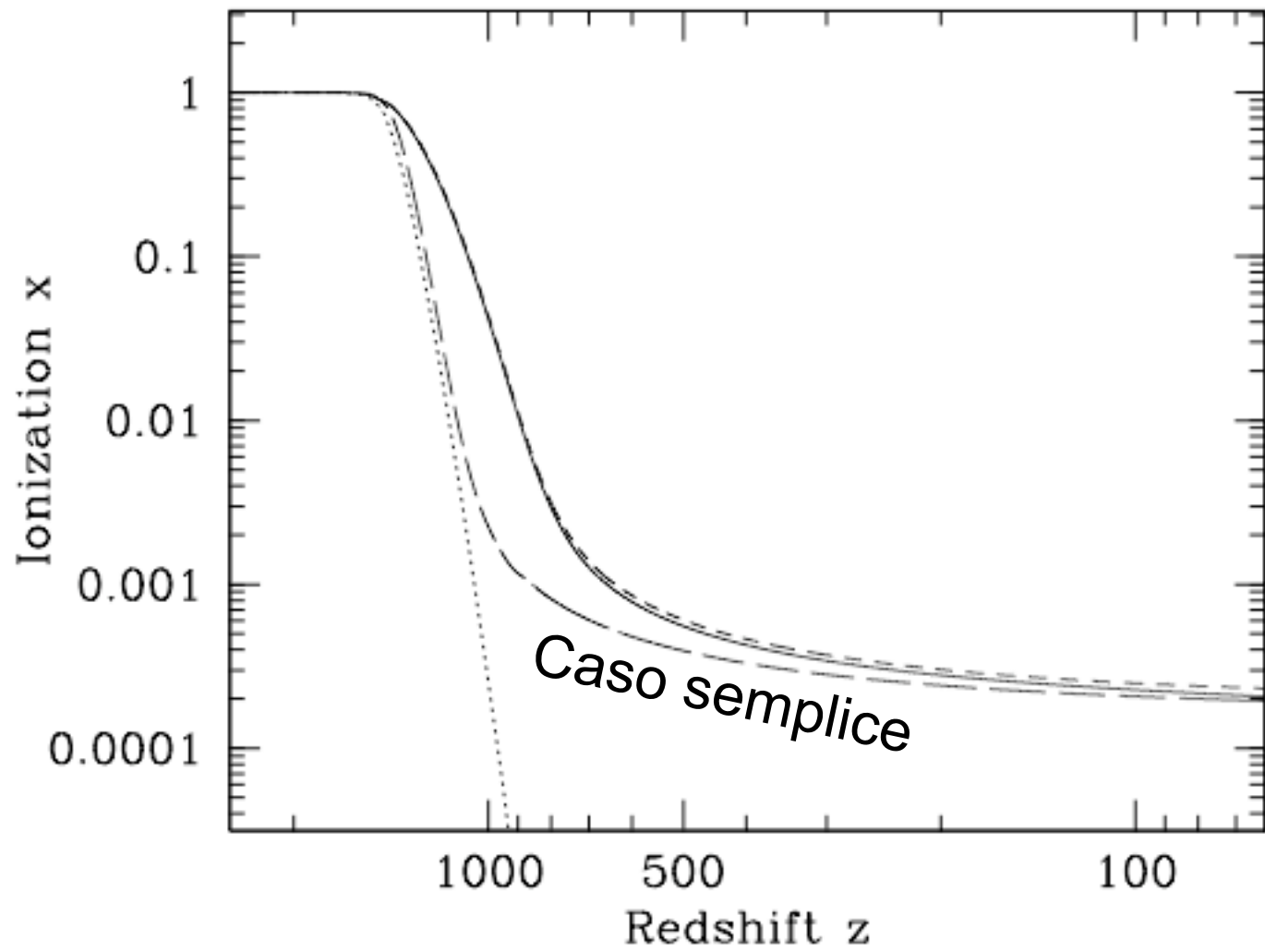


Un passo in piu' e' quello di scrivere il bilancio dei processi che producono elettroni e di quelli che li utilizzano per produrre idrogeno neutro;

$$dn_e / dt = - \alpha_H n_e n_p + \beta_H n_{2s}$$

Dove si tiene conto dei processi di ricombinazione che sono proporzionali al prodotto delle densita' (essendo la ricombinazione un processo a due corpi) e le reionizzazione che vengono considerate solo a partire dal primo stato eccitato visto che a $z < 2500$ non ci sono sufficienti fotoni abbastanza energetici da ionizzare in un singolo passo.

Una assunzione semplice ma sbagliata sarebbe quella di considerare lo stato 2s in semplice equilibrio termico con il fondamentale.



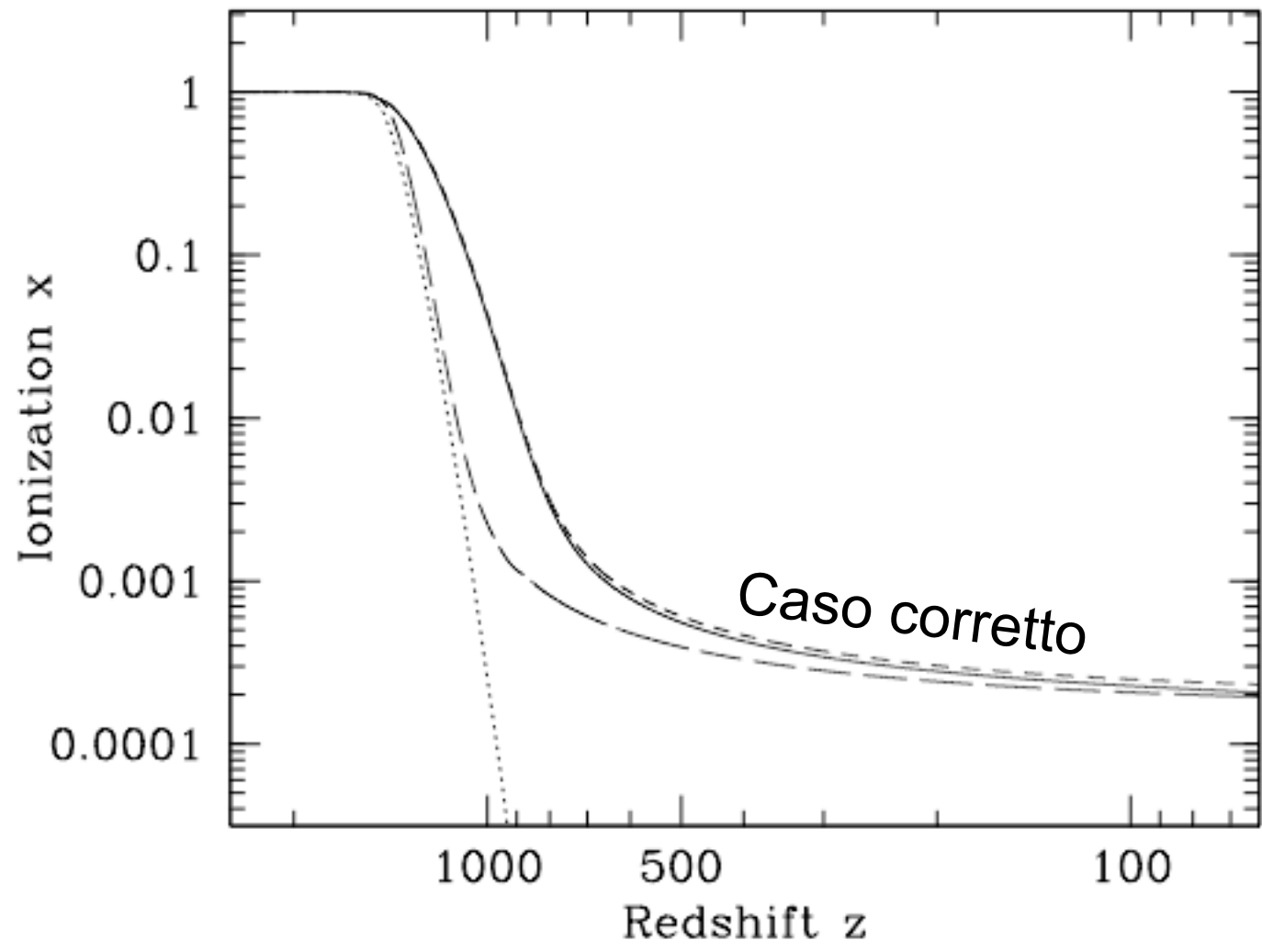
In realta' l'assunzione di equilibrio termico fallisce perche' la transizione tra il fondamentale e il primo livello eccitato comporta lo scambio di un fotone Lyman α . Se questo lo stato decade e il fotone viene emesso, verra' assorbito molto efficientemente da un altro atomo d'idrogeno cosi' che la popolazione del livello eccitato non cambia.

Questa popolazione cambiera' solo se il decadimento avviene tramite processo a due fotoni perche' nessuno dei due fotoni avra' energia sufficiente a causare una transizione al primo livello eccitato (questo e' il motivo per cui ci concentriamo sul 2s ignorando gli stati 2p).

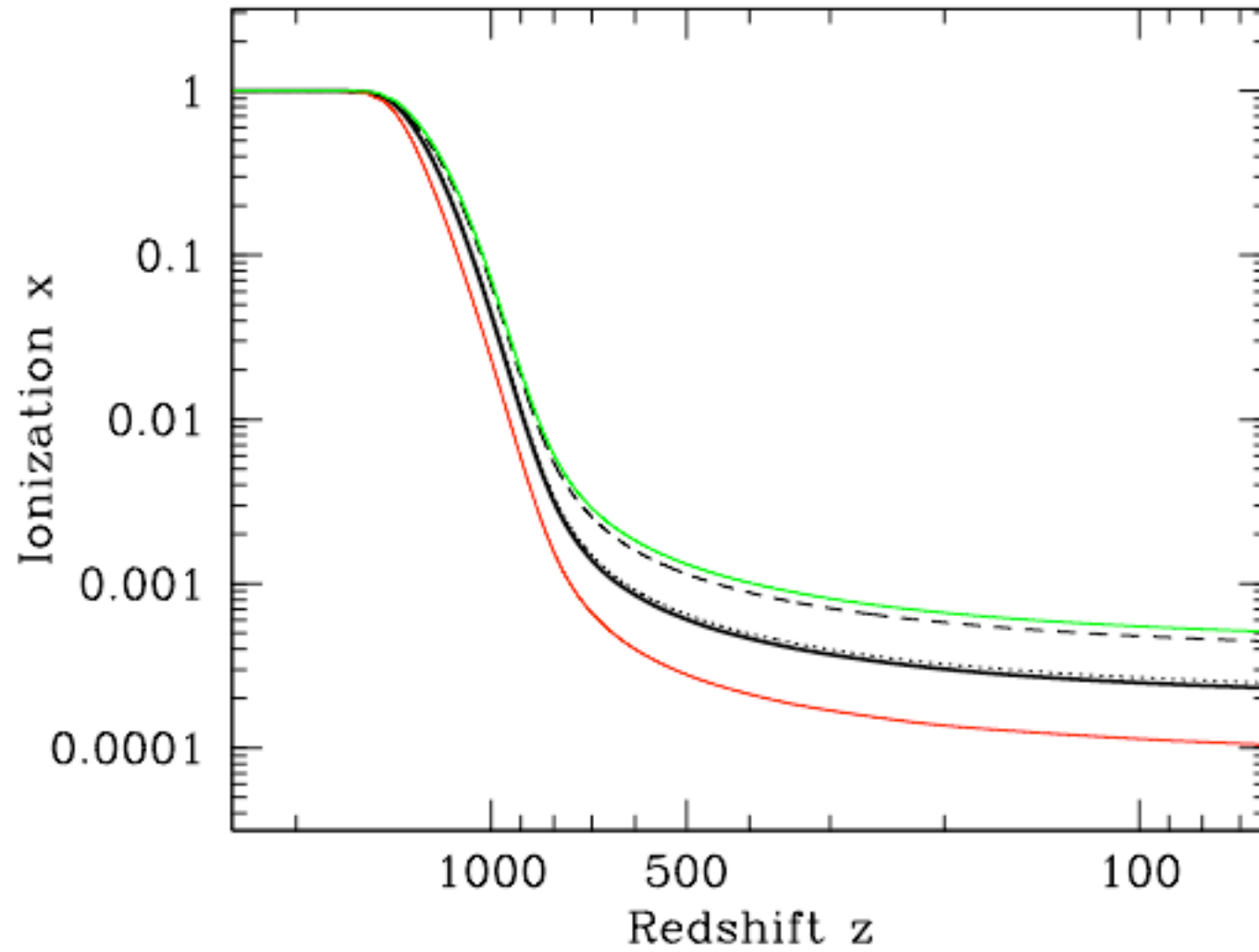
Un altro fattore e' il tasso di espansione dell'Universo perche' l'espansione portera' fuori risonanza i fotoni Lyman α e gli impedira' di eccitare altre transizioni.

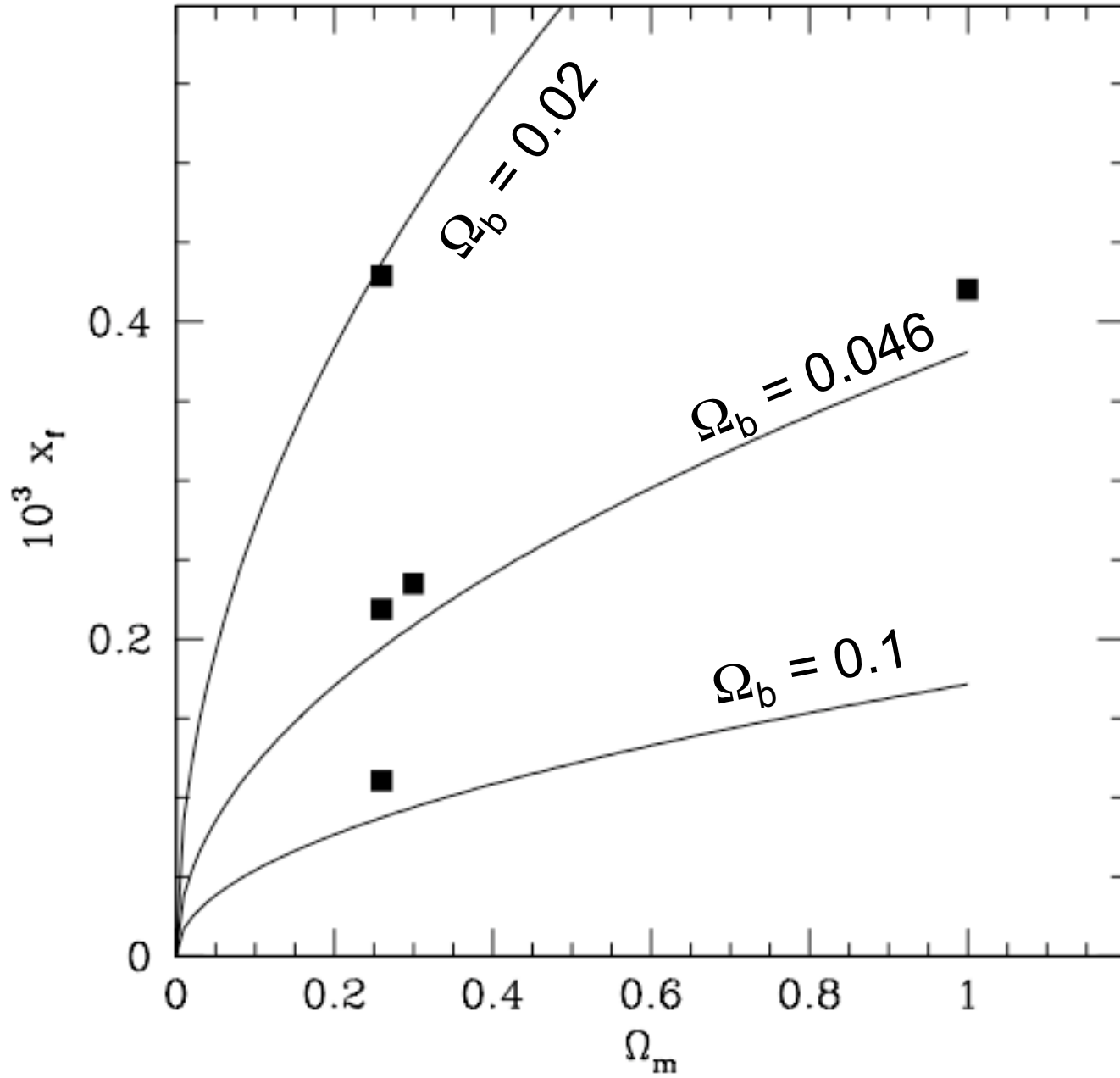
Peebles (1968) considero' questi effetti e li raccolse in un fattore correttivo C da aggiungere all'equazione considerata in precedenza.

Nota: L'aggiunta di questo fattore rendere l'equazione numericamente "stiff" e piu' difficile da integrare.



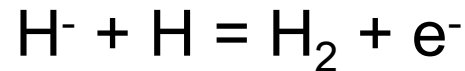
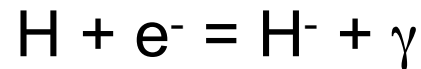
Dipendenza dalla cosmologia



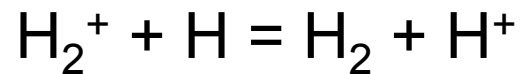
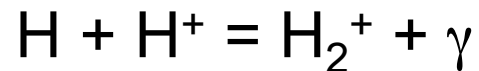


Formazione di idrogeno molecolare

Ci sono due canali principali per la formazione di idrogeno molecolare (Lepp & Shull 1984):



e

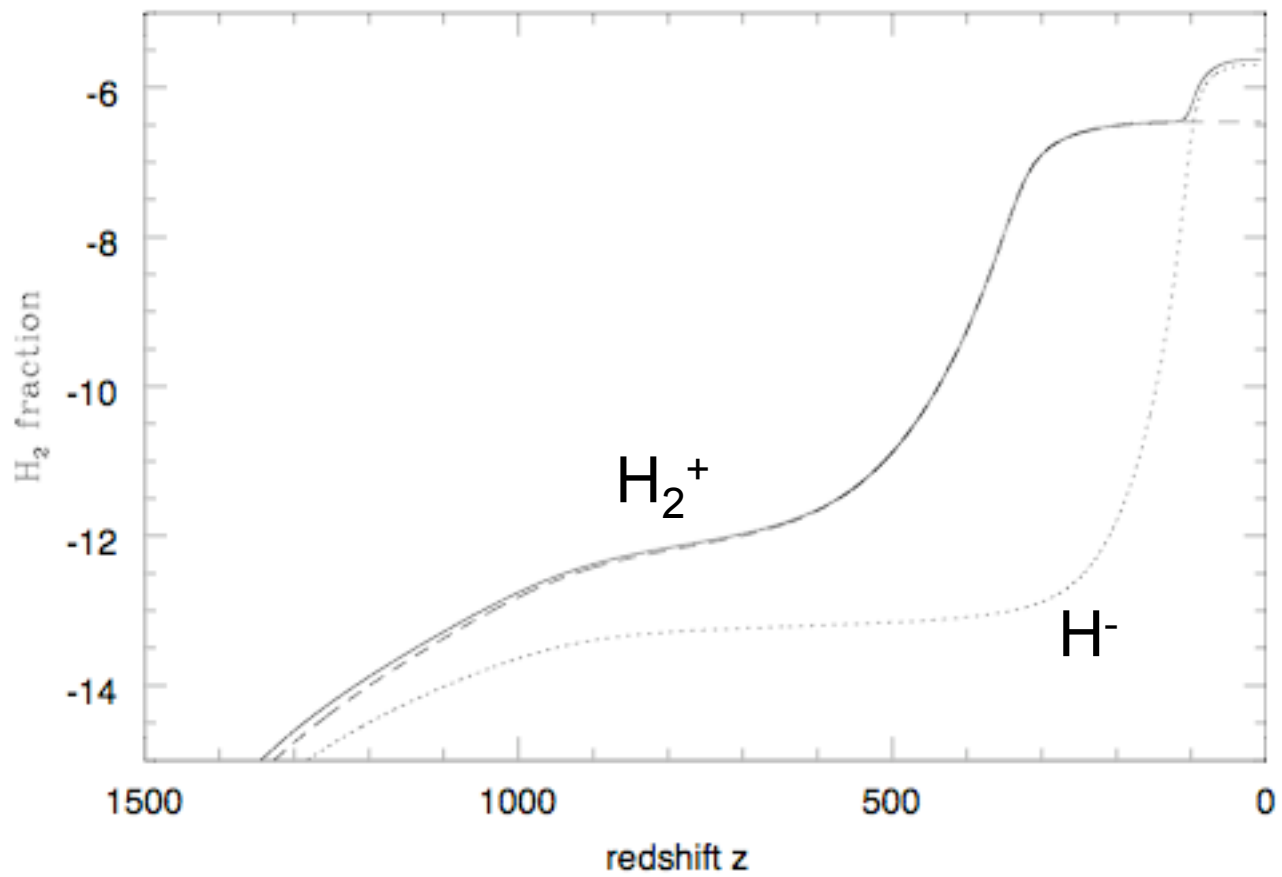


Per entrambe le catene la seconda reazione e' molto veloce rispetto alla prima e la produzione sara' cosi' determinata dalla prima. Entrambe hanno un catalizzatore e in entrambe una reazione coinvolge la radiazione.

I catalizzatori sono elettroni e protoni. Quindi il tasso di produzione di idrogeno molecolare dipendera' dalla ionizzazione residua.

Il fatto che una reazione coinvolga fotoni rende possibile la reazione di foto-dissociazione che procede in direzione opposta. Questo significa che entrambe le reazioni avranno una temperatura massima = un redshift massimo dove saranno efficienti.

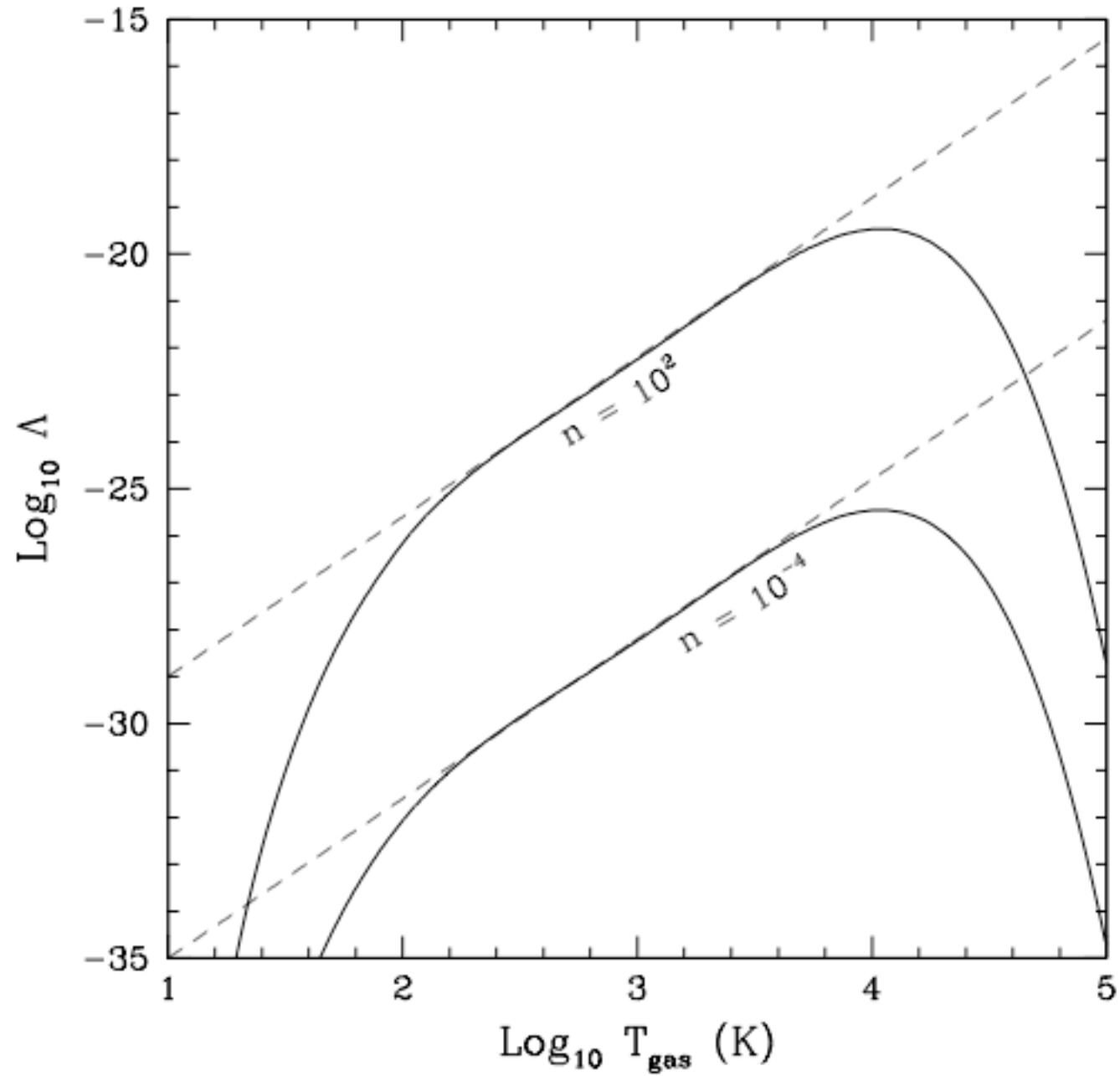
Essendo reazioni a piu' corpi la produzione di idrogeno molecolare avverra' essenzialmente al piu' basso redshift dove le foto-dissociazioni diventano inefficienti perche' a redshift piu' basso la densita' che diminuisce ridurra' aa probabilita' di reazione.



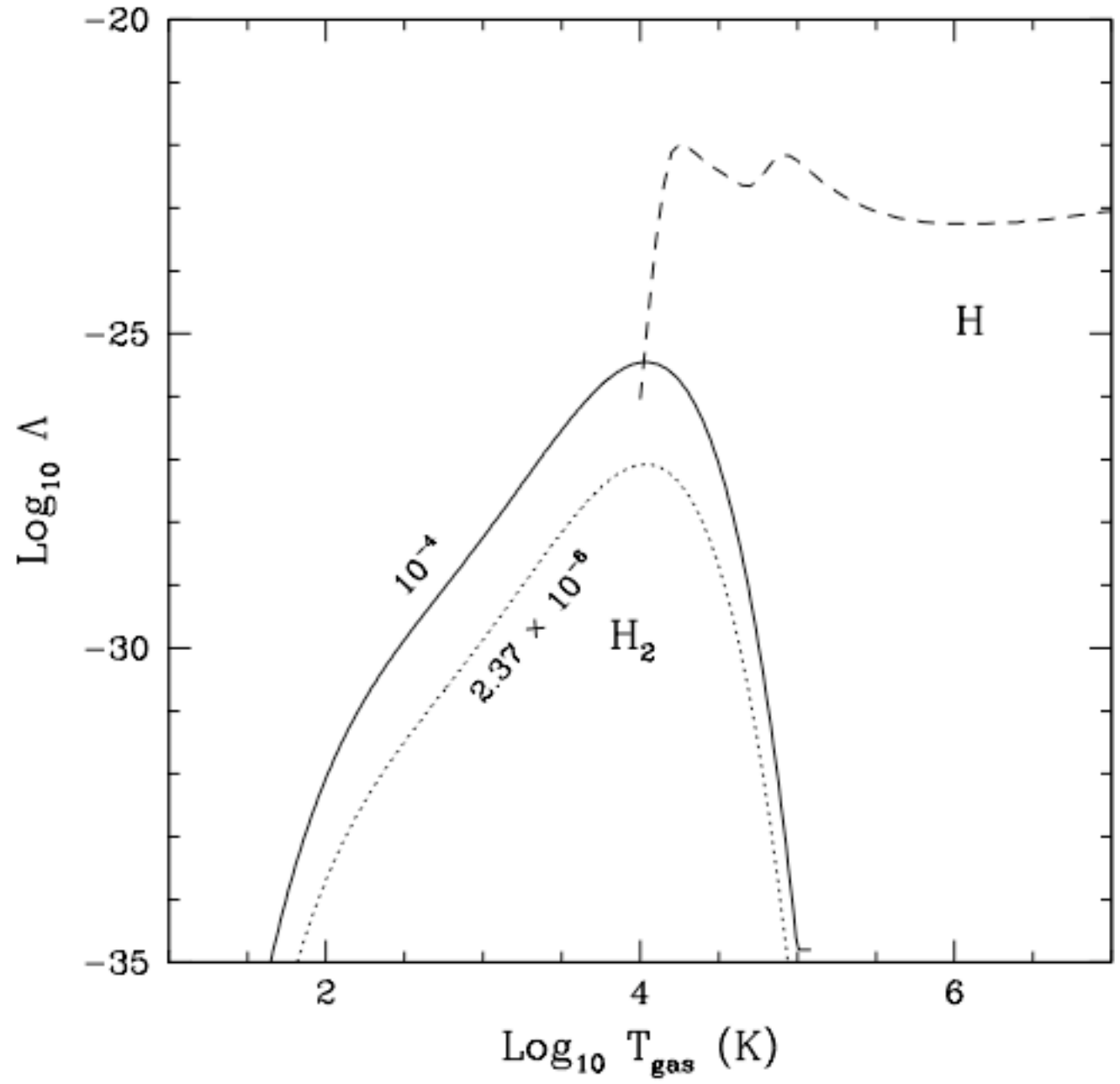
Raffreddamento da idrogeno molecolare

La capacita' di raffreddare un gas viene spesso riassunta in una funzione di raffreddamento (cooling function) che riassume le probabilita' di transizione, le reazioni chimiche (se importanti) e gli effetti delle collisioni.

Galli e Palla hanno calcolato una cooling function per l'idrogeno molecolare usata comunemente in cosmologia. La capacita' di raffreddamento dipendera' dall'abbondanza di idrogeno molecolare e dalla densita' di idrogeno.



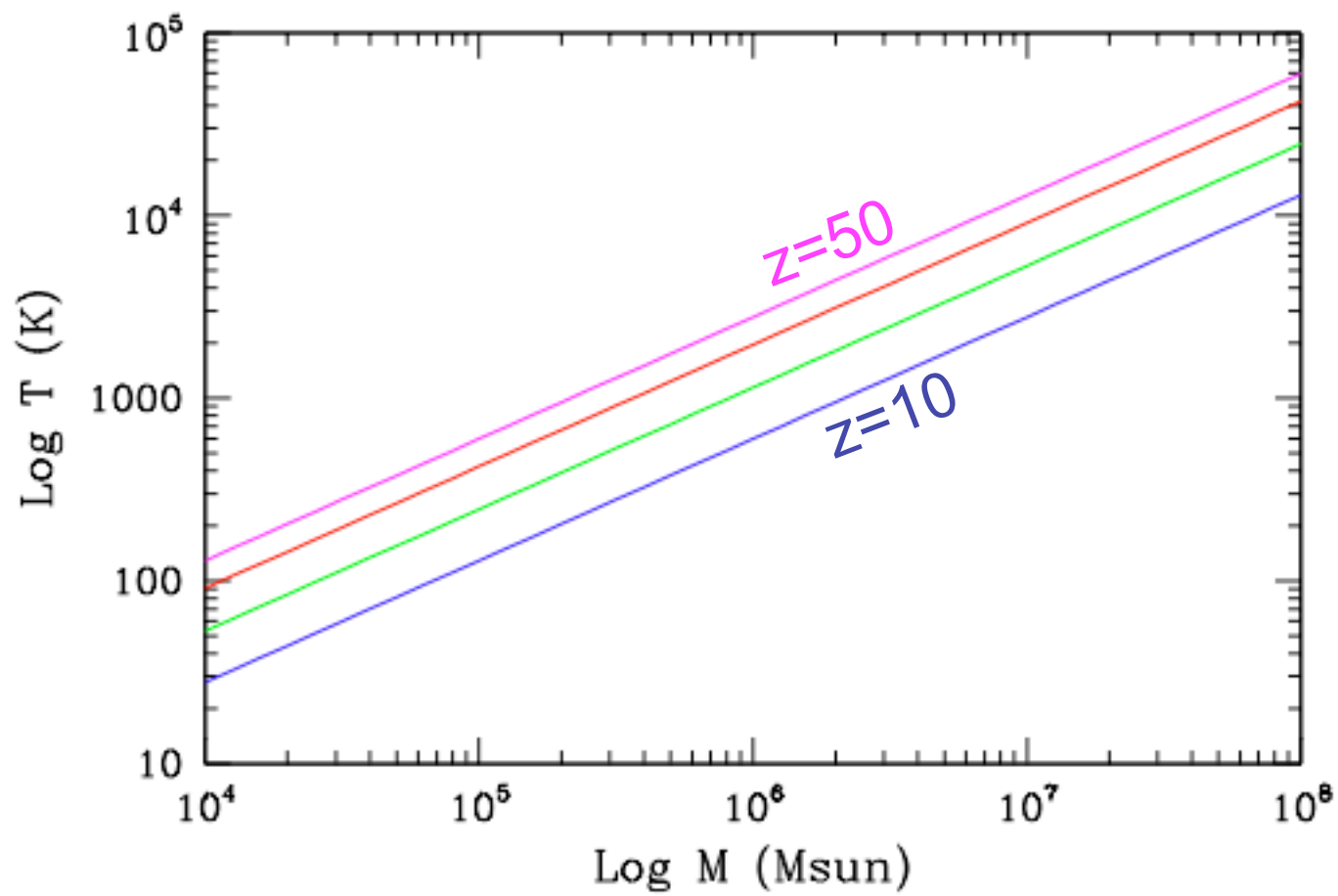
Confrontando la cooling function da idrogeno molecolare con quella per idrogeno atomico si vede come la seconda sia molto piu' efficiente fintanto che la temperatura supera i 10^4 gradi K.



Virial temperature

Per una perturbazione con una certa massa la temperatura virial dipende dal redshift solo tramite la densità che varia come $(1+z)^3$.

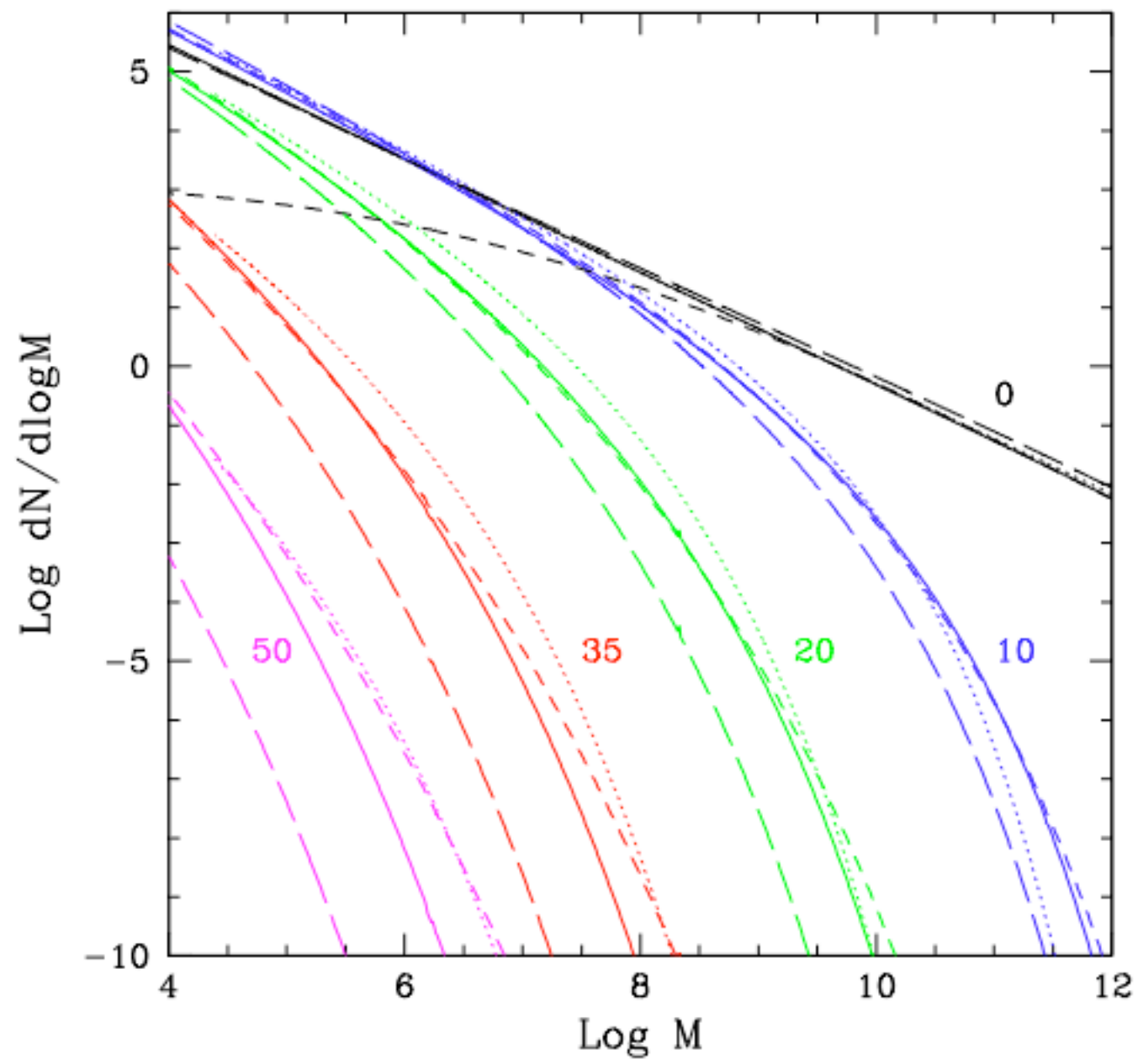
Si noti che anche per parametri cosmologici con costante cosmologica, la descrizione $\Omega=1$ è applicabile con discreta precisione se il redshift è 10-50.



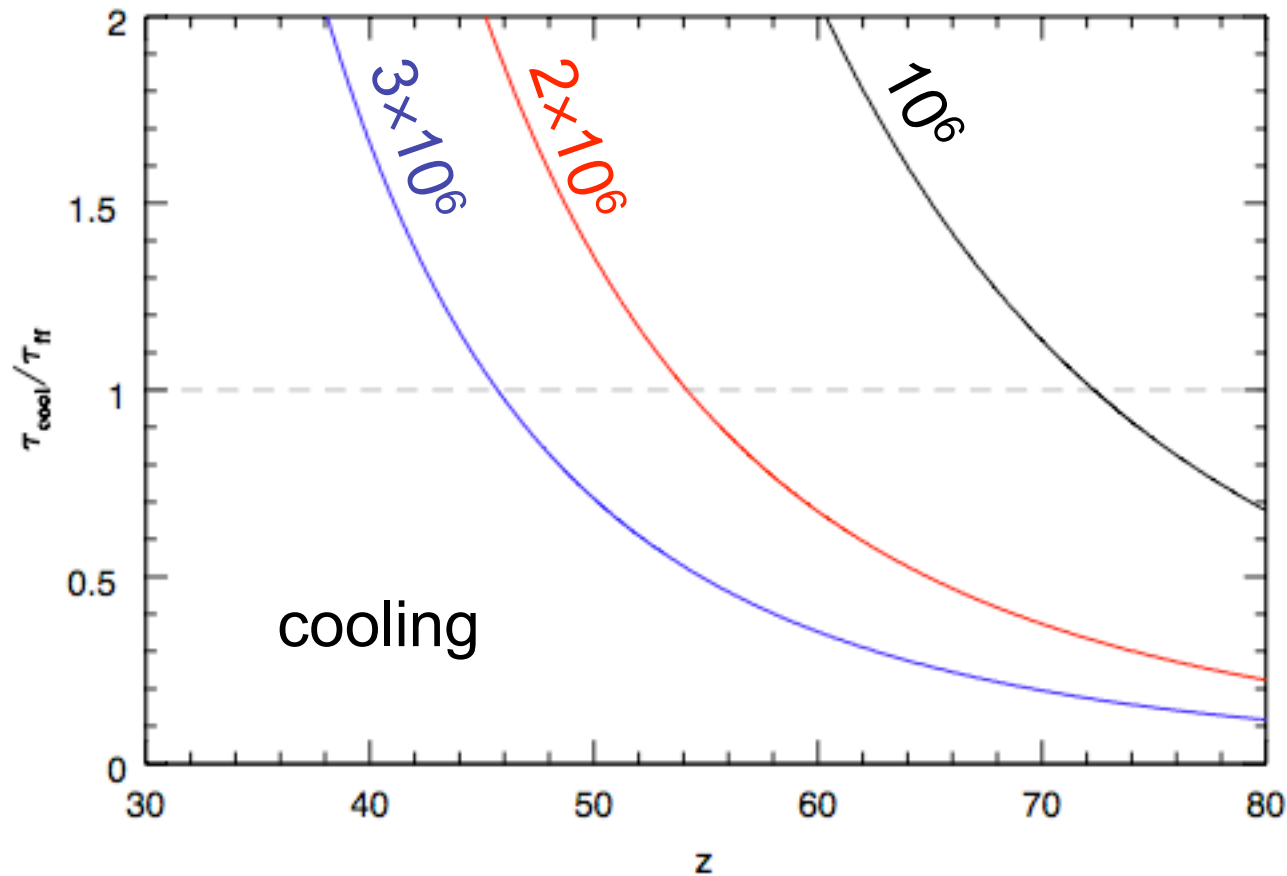
Cooling

10^8 masse solari possono raffreddarsi efficientemente grazie all'idrogeno atomico. L'idrogeno molecolare e' necessario per masse inferiori.

Perche' non consideriamo semplicemente le stelle di prima luce come quelle formate da questi aloni? -->
Perche' essi sono molto rari ad alto redshift!

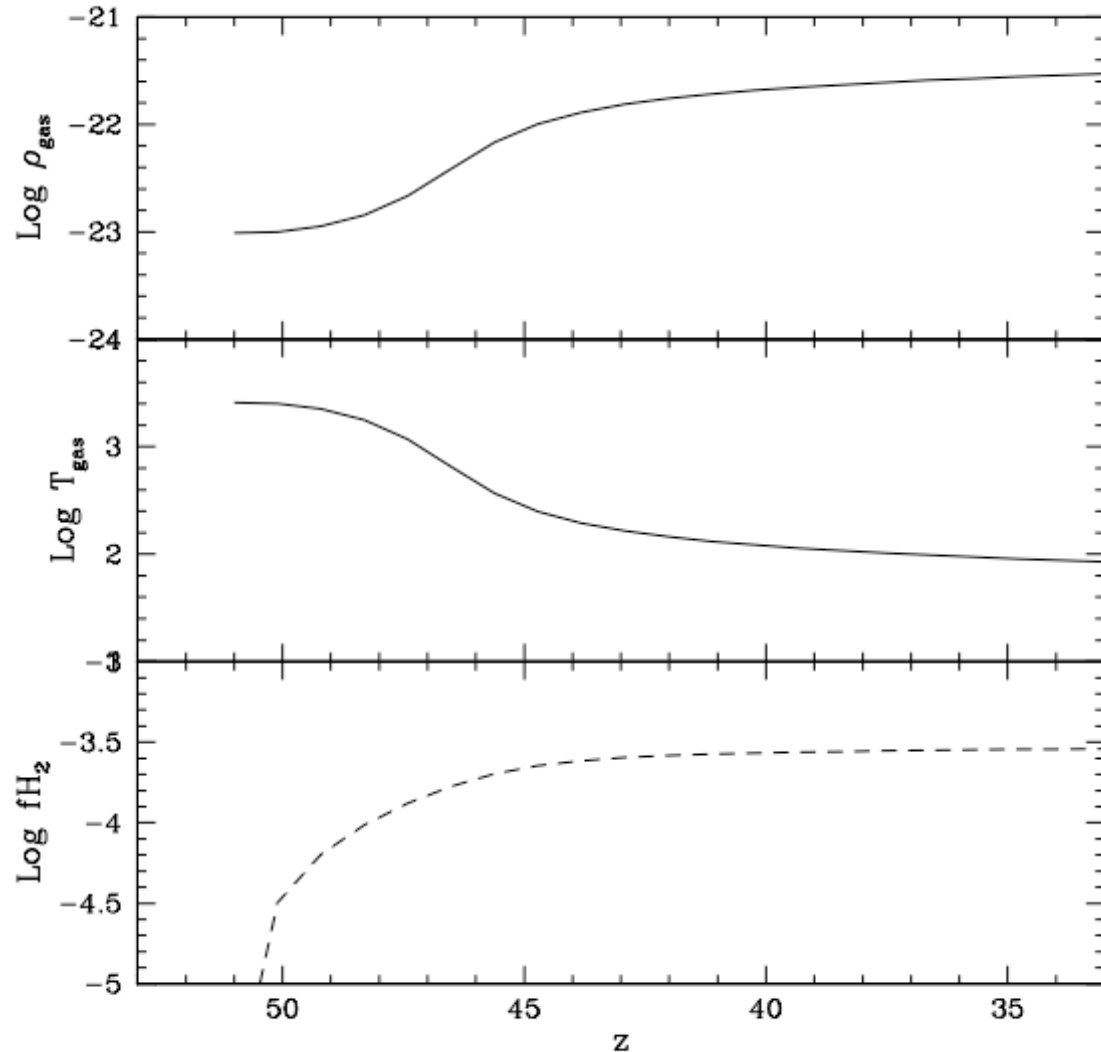


L'abbondanza primordiale di idrogeno molecolare e' troppo bassa per garantire un raffreddamento efficiente. Possiamo stimare l'efficienza dal rapporto tra tempo di raffreddamento e tempo di caduta libera.



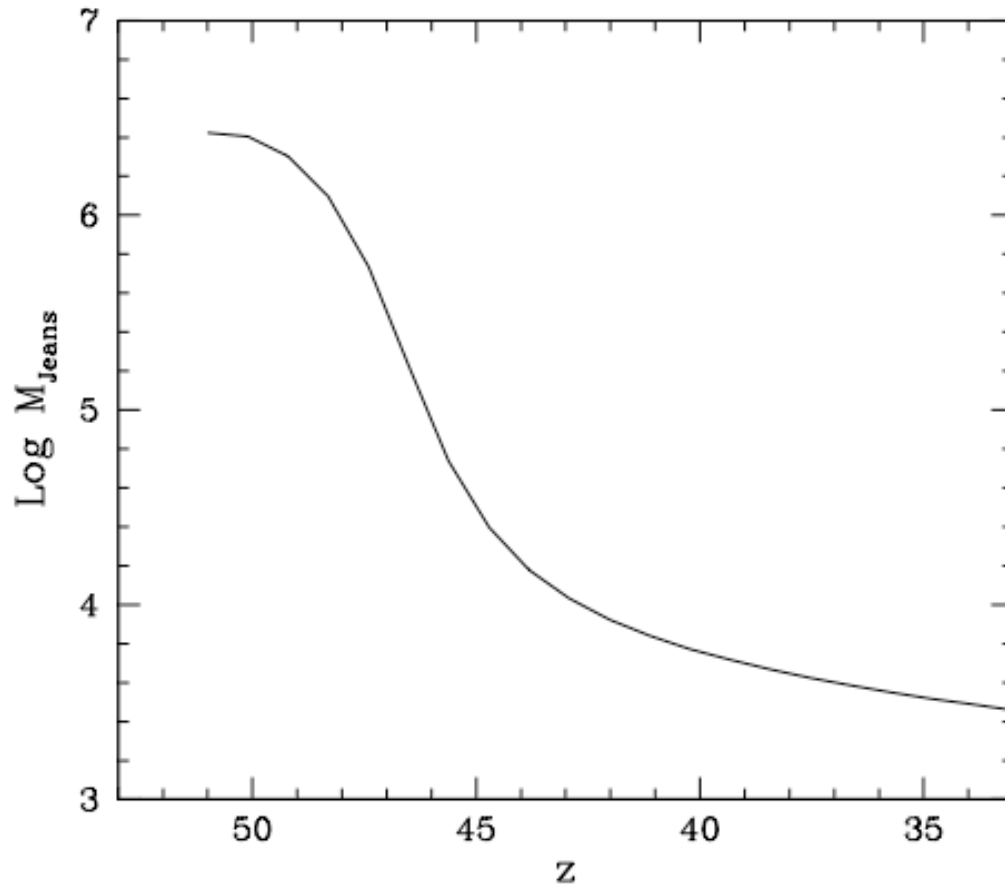
Ancora idrogeno molecolare

Ulteriore idrogeno molecolare puo' formarsi negli aloni virializzati (che sono piu' densi del mezzo circostante). Questo li rendera' in grado di collassare ulteriormente.



Jeans mass

Un collasso anche modesto permette di ridurre la mass di Jeans abbastanza da consentire l'instabilita' gravitazionale.

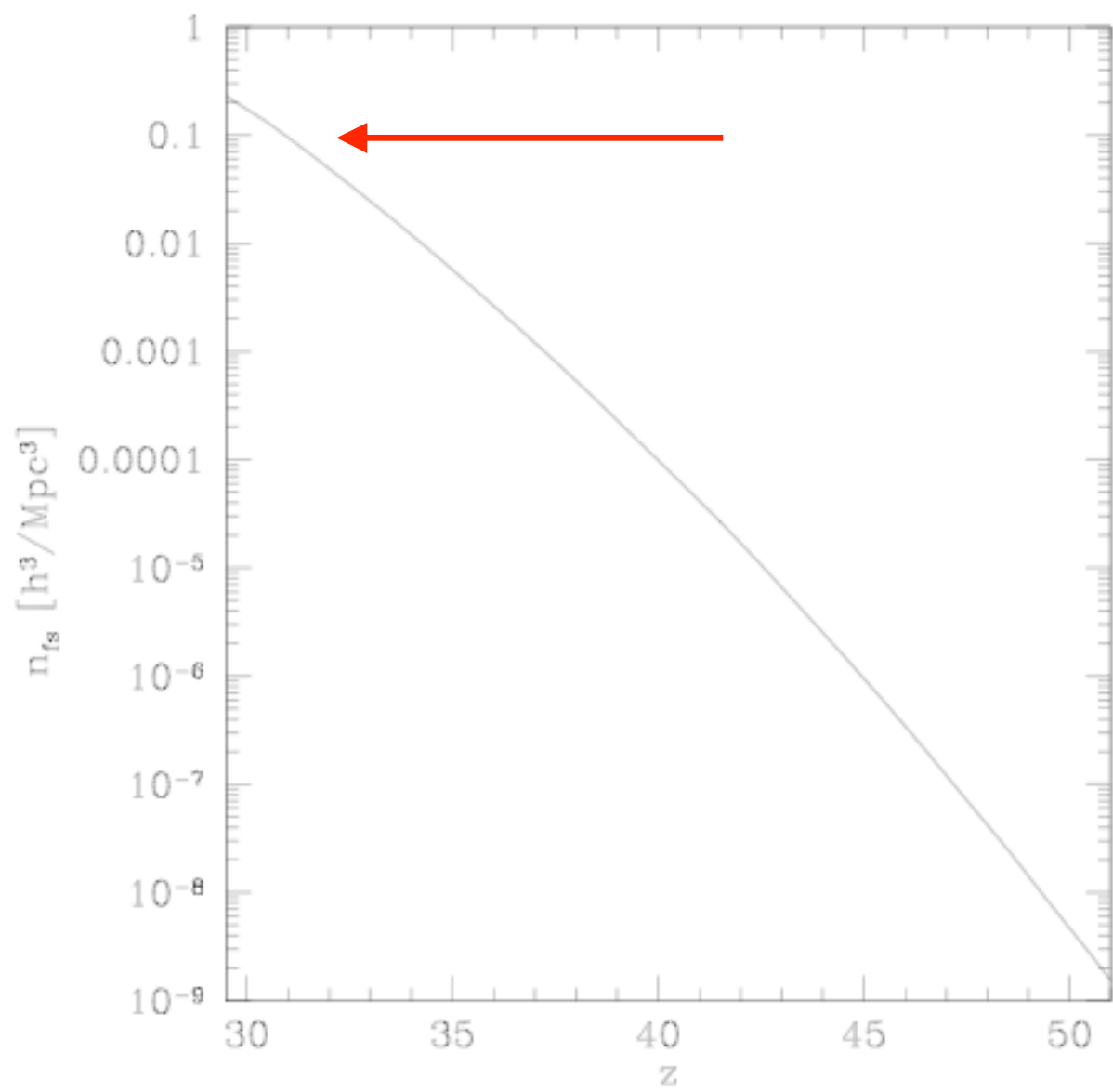


Quando finisce l'era delle stelle di popolazione III?

La formazione di stelle di popolazione III puo' finire in due modi:

1- quando il campo di radiazione ultravioletta formato dalle stelle di popolazione III distrugge l'idrogeno molecolare primordiale impedendo la formazione di ulteriore idrogeno molecolare negli aloni non piu' schermati. Stelle di popolazione III da aloni che si raffreddano con idrogeno atomico rimangono possibili.

2- quando le esplosioni di supernova aumentano la metallicita' sopra la soglia che consente la formazione di stelle di popolazione III.



Ricapitolazione

- 1- l'idrogeno molecolare gioca un ruolo fondamentale nella formazione delle stelle di popolazione III
- 2- la quantità primordiale di idrogeno molecolare dipende dalla ionizzazione residua e protegge gli aloni schermandoli dalla radiazione ultravioletta.
- 3- il ruolo del raffreddamento di un alone virializzato e' quello di consentire l'instabilità di Jeans
- 4- stelle di popolazione III inizieranno a formarsi intorno a $z=50$ ma saranno molto rare
- 5- se la terminazione dell'era delle stelle di popolazione III e' causata dalla distruzione dell'idrogeno molecolare questo avviene intorno a $z=30$.

Referenze

Cosmologia: Peebles

“Principles of Physical Cosmology”

First stars review: Bromm&Larson, 2004,
ARAA, 42, 79-118

Proceedings of STScI Dark Ages mini-
workshop (on line)

In futuro: Stiavelli, “First stars and
reionization, Wiley.