

## **Radiació còsmica de fons**

Elaborat per Joan Miró Ametller

Isòtropa, distribució pròxima a Planck. Cos negre.

Població relativa de fotons

1

$$dN_\nu \propto \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

experimental: 2'736 K

Nombre fotons, amb T en K:

$$N_\nu(T) = 20T^3$$

densitat d'energia

$$\rho(T) = 8'0 \cdot 10^{-36} T^4 \text{ g cm}^{-3}$$

Amb T = 2'736 K,  $N_\nu = 441 \text{ fotons cm}^{-3}$  i  $\rho_\nu = 4'18 \cdot 10^{-20} \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3} \equiv 4'5 \cdot 10^{-34} \text{ g cm}^{-3}$ .

### **Isotropia**

Càlcul del recorregut lliure mitjà de fotó de radiació fòssil en univers actual

Secció eficaç de Thompson de dispersió d'electrons lliures en

$$e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$$

$$\sigma = 6'6 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2$$

Si tots electrons dispersos i lliures

$$\lambda = \frac{1}{\sigma n_e} = 10^{13} \text{ anys - llum}$$

1000 vegades radi univers observable (el càlcul, en realitat, subestima  $\lambda$ ). La gran majoria d'electrons en àtoms i molècules o en astres opacs. Avui, univers transparent a fotons de radiació fòssil (temps de reacció amb electrons més grans que edat univers).

Interaccions que canvien direcció fotons ( dispersió elàstica, assegura isotropia) i les que també canvien distribució (dispersió inelàstica, espectre tèrmic).

A  $T > 3000 \text{ K}$ , àtoms H dispersos i ionitzats.  $\lambda$  reduït. A  $z = 10^3$ ,  $\lambda = 10^2$ , i horitzó  $10^6$  anys-llum. Univers opac a radiació. Isotropia radiació fòssil revela que almenys s'arribà a aquesta T en el passat.

### **Isotèrmia**

Cal una T mínima per obtenir distribució de Planck. Les reaccions més eficaces són *free-free*. A prop protó, electró passa d'estat lliure a estat lliure d'energia diferent emetent o absorbint un fotó. La probabilitat de la reacció és proporcional a producte de densitats d'electrons i protons multiplicat per secció eficaç proporcional a  $(k_B T/h\nu)^3$ .

Llavors

$$\lambda_{ff} \propto \frac{T^{7/2}}{\rho^2}$$

Aleshores, per a la radiació fòssil va caler en el passat  $T > 3 \cdot 10^6$  K i potser  $3 \cdot 10^8$  K

### **Expansió i distribució tèrmica**

L'espectre tèrmic aconseguït a T elevada es manté per interacció amb electrons fins aparició de H a  $3 \cdot 10^3$  K. Període en que matèria i radiació estan a la mateixa temperatura.

Després de desacoblament electromagnètic, la matèria ja no afecta radiació fòssil. Les  $\lambda$  dels fotons s'allarguen, els fotons perden energia inversament proporcional a factor d'escala. La distribució de amplituds no és afectada per expansió.

Entre instants  $t_1$  i  $t_2$ , el fotó passa d'energia  $E_1 = h\nu_1$  a  $E_2 = h\nu_2$  essent

$$E_2 = h\nu_2 = h\nu_1 \frac{R_1}{R_2}$$

El nombre de fotons en covolum és el mateix. El n de fotons per unitat de volum minva com  $(R_1/R_2)^3$ . En 1, la forma de la distribució no varia, però afecta T de manera que

$$T_2 = T_1 \frac{R_1}{R_2}$$

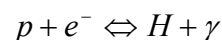
és a dir,  $T \propto 1/R$ .

El moviment de l'observador fa variar T amb el cosinus de l'angle de moviment: màxim de  $3'4 \cdot 10^{-3}$  K. Velocitat Terra  $620 \text{ km s}^{-1}$  en direcció costel·lacions de Centaure i Hidra. (Components: moviment Terra en torn Sol, Sol en Galàxia, Galàxia en cúmul Virgo i component suplementària de font ignorada).

### **Termodinàmica i transició H-plasma**

Energia enllaç en àtom H  $13'6 \text{ eV}$ , correspon a  $T = 1'5 \cdot 10^5$  K. H però es forma a T 40 vegades més baixa.

La reacció



electrons existeixen en 2 estats lliures o lligats a H. En un volum determinat, amb E total fixa, calculem estat ionització (estat macroscòpic) que correspon al major nombre d'estats microscòpics  $\Omega_{\text{max}}$ . Dos factors: demogràfic (més estats quan més partícules; afavoreix plasma, amb e i p lliures; en fase atòmica el nombre de partícules és dues vegades menor); l'altre és energètic (formació H allibera E i fa augmentar S)

Primer factor

En fase plasma, e i p considerats lliures

$$Z_i = \frac{V}{\lambda_i^3}$$

$\lambda_{i_i}$  és longitud d'ona (De Broglie) tèrmica de partícula i

$$\lambda_{ii} = \frac{h}{mv_{ii}}$$

$v_{ii}$  velocitat tèrmica

Si tots els àtoms ionitzats, entropia del plasma

8

$$Z_{plasma} = Z_e Z_p = \frac{V}{\lambda_{te}^3} \frac{V}{\lambda_{tp}^3}$$

Segon factor

Si tots els electrons lligats a àtoms, essent B energia enllaç en àtom, S del sistema és

9

$$Z_H = \frac{V}{\lambda_{tp}^3} e^{B/k_B T}$$

A baixa T, exponencial predomina sobre factor preexponencial (augment S per alliberació enllaç compensa pèrdua S per disminució partícules). Això determina T de transició.

A una T i densitat, podem calcular la fracció ionitzada x que fa màxima l'entropia total

$$x = \frac{n_e}{n_{nuc}}$$

$n_e$ , n electrons lliures;  $n_{nuc}$  n de nucleons

10

$$\frac{x}{1-x} = \frac{(2\pi m_e k_B T)^{3/2} e^{-B/k_B T}}{n_{nuc} h^3}$$

Per a univers  $\Omega = 0'1$  i  $H_0 = 100 \text{ km s}^{-1} \text{ megaparsec}^{-1}$

T/K	x
2700	0'00011
2970	0'0124
3240	0'303
3780	0'954
4860	1'000

### Estudi radiació fòssil

a. intensitat radiació en totes direccions esfera celeste

b. amplitud en funció longitud d'ona

fluctuacions primordials i formació de galàxies

estructura a gran escala de l'univers

densitat còsmica

destí del cosmos

Quan  $z = 1000$ , la massa necessària per formar galàxia,  $10^{11} M_\odot$  ocupava un covolum que abraçaria un angle entre 3 i 30 segons (segons  $\Omega = 0'1$  o  $\Omega = 1$ )

un cúmulo de galàxies ocuparia  $5\Omega$  minuts (entre 0'5 i 5 minuts)

L'horitzó en moment desacoblament fa un angle de  $2\sqrt{\Omega}$  graus a l'ña nostre esfera celeste (entre 0'6 i 2 graus). S'han detectat homogeneïtats d'aquesta dimensió.

COBE ha detectat inhomogeneïtats de dimensió angular superior a 10 graus, que indiquen dominis superiors a l'horitzó; les fluctuacions primordials no han estat esborrades per desacoblament. Es planteja problema d'horitzons