

Capitulo 6 – La historia termica del Universo

6.1 Temperatura, energia y particulas

no solo la estructura, sino tambien el origen del Universo es un topico en la cosmologia

sabemos que

$$T \sim 1 + z$$

valido para aquellas componentes que ejercen presion --> fotones

galaxias y gas no ejercen presion: "polvo" --> estan "**decoplados**" de los fotones

viajar vuelta en tiempo: sucesivamente disociacion de estructuras

$z \sim 3$ ----> disociacion de cumulos de galaxias

$z \sim 10$ ----> disociacion de galaxias

$z = 14$ ---> disociacion de estrellas

$z = 1100$ ---> disociacion de los atomos , desde ahora:
participacion de la materia en la presion

composicion de Universo en secuencia de masa :

fotones, neutrinos, electrones, protones, nucleos de
helio, litio, berilio, boro -- y materia oscura

$z = 10^9$ ----> disociacion de nucleos

----> fisica esta dominado por interacciones entre las particulas

---> necesidad: aprender la fisica de las particulas

Unidades:

$$E = m c^2$$

masa equivalente a energia

usual expresar masas no en gramos, sino en **electron volt**

Kilo eV

Mega eV

Giga eV

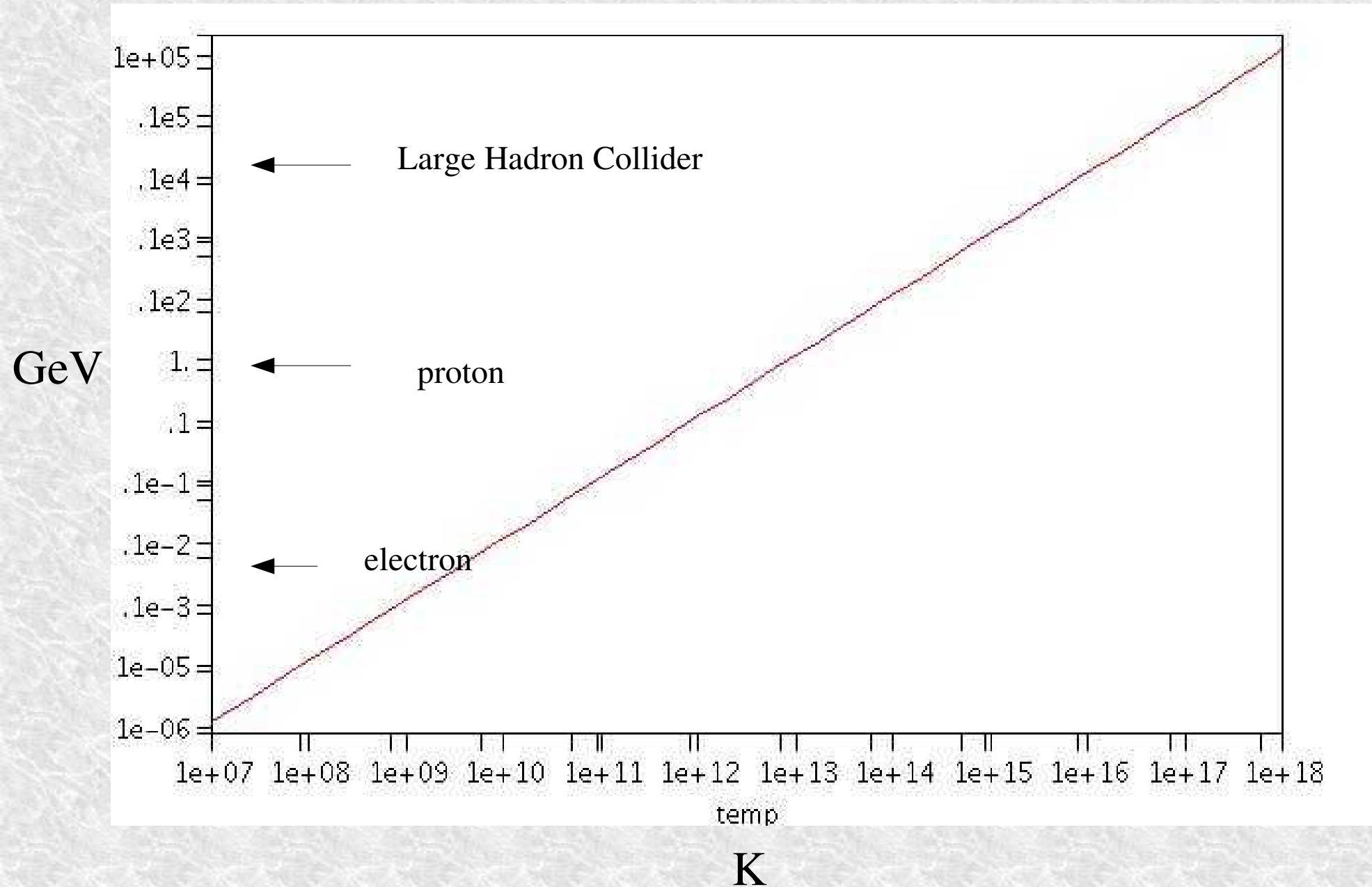
$$\begin{aligned} 1 \text{ eV} &= 1.60 \cdot 10^{-12} \text{ erg} \\ &= 1.78 \cdot 10^{-33} \text{ gramos} \end{aligned}$$

otra formula:

$$E = \frac{3}{2} k_B T$$

$$E [GeV] = 1.3 \cdot 10^{-13} T [K]$$

Temperatura - energia



6.2 Partículas --- el modelo estándar

tres familias de partículas elementales (fermiones)

familia electronica	electron
	electron-neutrino
	up quark
	down quark

familia mionica	mion
	mion-neutrino
	charm-quark
	strange-quark

familia tauonica	tauon
	tauon-neutrino
	up-quark
	down-quark

todas las partículas

```
graph LR; subgraph Family1 [familia electronica]; direction TB; F1_1[electron]; F1_2[electron-neutrino]; F1_3[up quark]; F1_4[down quark]; end; subgraph Family2 [familia mionica]; direction TB; F2_1[mion]; F2_2[mion-neutrino]; F2_3[charm-quark]; F2_4[strange-quark]; end; subgraph Family3 [familia tauonica]; direction TB; F3_1[tauon]; F3_2[tauon-neutrino]; F3_3[up-quark]; F3_4[down-quark]; end; F1_3 --> TLP[todas las partículas]; F2_2 --> TLP; F3_2 --> TLP;
```

y las partículas de interacciones (bosones);

fotón ---> fuerza entre cargas --> electromagnetismo

gluón ---> fuerza entre quarks --> interacción fuerte

W-bosón ---> fuerza entre neutrinos --> interacción débil

gravitón (?) --> fuerza entre masas ---> gravitación

y las anti-partículas de cada partícula

partículas (no elementales!) compuestas de quarks

baryones -- composición de tres quarks (ejemplo: protones --uup)

mesones – composición de dos quarks (quark-antiquark)

Leptones: electron, mion, tauon y los neutrinos correspondientes

Casi todas las particulas son inestables!

Particulas elementales estables:

electron, los 3 neutrinos, foton

up-quark, down-quark, strange-quark(?)

Particulas compuestas estables: proton

Propiedades de las particulas – parametros conservados

masa, carga, espin, numero leptonico, numero barionico, sabor(quarks)

todos los parametros estan cuantizados, salvo **masa**
responsable para las masas (segun del modelo estandard):

el boson “Higgs” (no detectado)

quizas mas particulas estables ??? Weakly Interacting Massive
Particles (WIMPS)

atras del modelo estandard:

supersimetria --> cada fermion/boson tiene un
boson/fermion supersimetrico como pareja

ELEMENTARY PARTICLES

NOVA

	CONTEXT	MASS	CHARGE	SPIN	STRENGTH	RANGE	OBSERVED?	SPARTICLE
BOSONS (forces)								
GRAVITON	gravity	0	0	2	10^{-38}	infinite	no	gravitino
PHOTON	electromagnetism	0	0	1	10^{-27}	infinite	yes	photino
GLUON	strong force	0	0	1	10^{-20}	10^{-13}	indirectly	gluino
WEAK GAUGE BOSONS								
W ⁺	weak force	80,000	1	1	10^{-13}	10^{-16}	yes	W ⁺ wino
W ⁻	weak force	80,000	-1	1	10^{-13}	10^{-16}	yes	W ⁻ wino
Z ⁰	weak force	91,000	0	1	10^{-13}	10^{-16}	yes	zino
HIGGS BOSON	weak force	>78,000	0	0	[?]	[?]	no	Higgsino
FERMIONS (matter)								
LEPTONS, FAMILY 1:								
ELECTRON	radioactive decay	0.51	-1	1/2	n/a	n/a	yes	selectron
ELECTRON NEUTRINO	atomic structure	0?	0	1/2	n/a	n/a	yes	electron sneutrino
QUARKS, FAMILY 1:								
UP	atomic nuclei	5	2/3	1/2	n/a	n/a	indirectly	up squark
DOWN	atomic nuclei	9	-1/3	1/2	n/a	n/a	indirectly	down squark
LEPTONS, FAMILY 2:								
MUON		106	-1	1/2	n/a	n/a	yes	muon slepton
MUON NEUTRINO		~0	0	1/2	n/a	n/a	yes	muon sneutrino
QUARKS, FAMILY 2:								
CHARM		1,400	2/3	1/2	n/a	n/a	indirectly	charm squark
STRANGE		170	-1/3	1/2	n/a	n/a	indirectly	strange squark
LEPTONS, FAMILY 3:								
TAU		1,784	-1	1/2	n/a	n/a	yes	tau slepton
TAU NEUTRINO		>35	0	1/2	n/a	n/a	yes	tau sneutrino
QUARKS, FAMILY 3:								
TOP		174,000	2/3	1/2	n/a	n/a	indirectly	top squark
BOTTOM		4,400	-1/3	1/2	n/a	n/a	indirectly	bottom squark

6.4 Reacciones entre partículas

parametros conservados: energia, momento, carga, numero leptónico,
numero barionico, espin

creacion de pares y anihilacion

$$\gamma \rightarrow \textit{particula} + \textit{anti-particula}$$

conservacion de energia --> suma de energias de los fotones debe ser
por lo menos la suma de particula+anti-particula

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

$$\text{energia del foton} > 2 \times 0.511 \text{ KeV}$$

$$\gamma \rightarrow p^- + p^+$$

$$\text{energia del foton} > 2 \times 0.938 \text{ GeV}$$

conservacion del momento:

fotones (como particulas relativistas) tienen momento

$$p = \frac{E}{c} > 2m_e c$$

----> electrones no pueden tener este momento

----> creacion de pares necesita dos fotones o una tercera particula

anihilacion - el proceso reverso

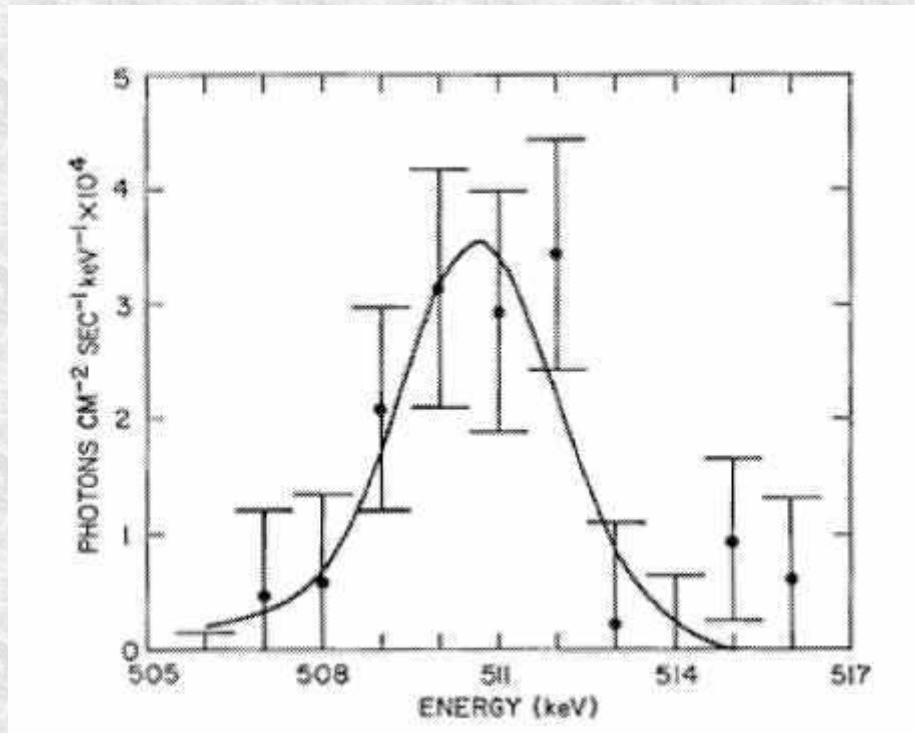
$$\text{particula} + \text{anti-particula} \rightarrow 2\gamma$$

$$\text{ejemplo: } e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$$

2 fotones con 511 keV cada uno

Desvio: radiacion de 511 keV del centro galactico

conocido desde 1977 - experimento con globo



Leventhal et al. 1978, ApJ 225, L11

caracteristicas:

extendido ---> aprox. 8 grados

taza de anihilacion:

$1.5 \cdot 10^{43}$ /s ---> mucho!

De donde vienen los positrones?

Posibilidades:

- 1) decaidas de nucleos radioactivos: ^{56}Co , ^{26}Al , ^{44}Ti
producidos en SN Ia y estrellas masivas
por ejemplo: $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe} + e^+ + \nu$
- 2) decaida de piones producidos por choques con protones de radiacion cosmica con nuclei del espacio interestelar
- 3) produccion de pares por fotones de alta energia de objetos compactos (supermassive black hole)
- 3) especulativo: anihilacion de particulas de materia oscura (WIMPS)

hasta ahora: ninguna explicacion satisfactoria

vuelta a partículas: -- mas reacciones

muy importante: "scattering" Compton:

$$e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma \quad \text{y con positrones}$$

leptones pueden ganar energia (Compton) o perder energia (Compton inverso)

Reacciones con neutrinos:

$$e^- + \text{anti-}\nu \rightarrow e^+ + \nu \quad \text{y reverso}$$

$$\nu + \text{anti-}\nu \rightarrow e^+ + e^- \quad \text{y reverso}$$

6.5 Un Universo caliente, pero no tan caliente

bien entendido --- la física de interacción débil y de electromagnetismo
---> todas las reacciones con leptones

menos bien entendido: ---> la física de interacción fuerte
(cromodinámica cuántica)
---> todas las reacciones bariónicas

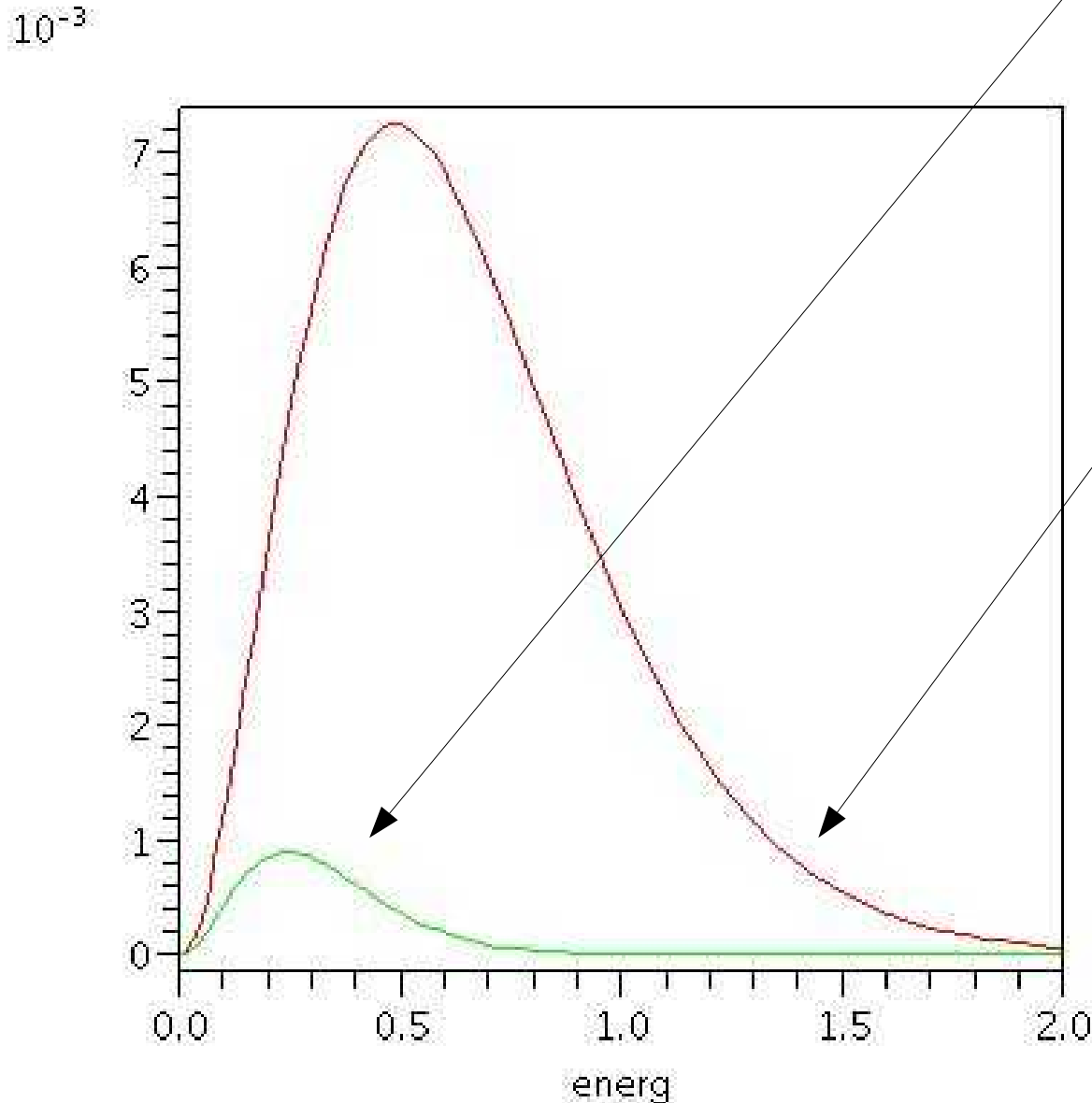
entonces: empezamos en un instante, cuando bariones ya no participaron
en reacciones

tarea: encontrar estados de equilibrio para leptones

encontrar densidades de energía y densidad para leptones

encontrar su compartimiento en un Universo en expansión

Curva Planck para dos temperaturas: $T = 10^{12}$ K, $T = 2 \cdot 10^{12}$ K



con $T = 2 \cdot 10^{12}$ K,
bariones pueden ser
creados

$T = 10^{12}$ K: fotones no
tienen la energia de
crear protones

GeV

con $T = 10^{12} \text{ K}$ --> estamos en la era de radiacion !

$$R(t) \sim 1/T$$

hoy dia $T = 2.73 \text{ K}$ --> $R(T = 10^{12} \text{ K}) = 2.73 \cdot 10^{-12}$

consideramos la razon entre Ω_m y Ω_{rad} en esta epoca:

$$\frac{\Omega_{rad, 10^{12}}}{\Omega_{m, 10^{12}}} = \frac{\Omega_{rad} R^{-4}}{\Omega_m R^{-3}} \approx \frac{10^{-5}}{0.3} \frac{1}{2.73 \cdot 10^{-12}} = 1.2 \cdot 10^7 \quad \text{muy grande!}$$

en este epoca, el Universo era muy muy plano, como muestra la siguiente consideracion

para cualquier $R(t)$:

$$\Omega_{tot}(R) = \frac{\rho_{tot}(R)}{\rho_c(R)} = \frac{\rho_m(R) + \rho_{rad}(R) + \rho_{\Lambda}(R)}{\rho_c(R)}$$

cada uno de estos terminos comporta como, por ejemplo

$$\frac{\rho_m(R)}{\rho_c(R)} = \frac{\Omega_m \rho_c}{R^3 \rho_c(R)} = \frac{\Omega_m}{R^3} \frac{H_0^2}{H^2(R)}$$

entonces

$$\Omega_{tot}(R) = \frac{H_0^2}{H^2(R)} \left(\frac{\Omega_m}{R^3} + \frac{\Omega_{rad}}{R^4} + \Omega_{\Lambda} \right)$$

despues de subtraerlo de la ecuacion de expansion:

$$1 - \Omega_{tot}(R) = \frac{kc^2}{R^2 H_0^2 H^2(t)}$$

pero en un Universo dominado por radiacion

$$H^2(t) \approx H_0^2 \frac{\Omega_{rad}}{R^4}$$

entonces $\Omega_{tot} - 1 \rightarrow 0$ para R suficientemente pequeño

tenemos entonces un Universo que empieza practicamente plano
(un problema a lo cual regresamos despues) y dominado por radiacion,
que significa para la edad (nuestra formula)

$$t(R) = \frac{1}{H_0} \int_0^R \frac{dR'}{R'^2}$$

para una temperatura $T = 10^{12}$ K y $R = 2.73 \cdot 10^{-12}$:

$$t = 10^{-7} \text{ s}$$

6.6 Fotones, neutrinos y su decoplamiento

El Universo consta de fotones, neutrinos, bariones

Idea basica:

- 1) tenemos muchas reacciones entre particulas y fotones
- 2) la taza de las reacciones depende de la temperatura
- 3) tenemos equilibrio (y la distribucion correspondiente) cuando las tazas de reacciones son mucho mas rapidos que la taza de expansion
- 4) cuando la taza de una reaccion se vuelve mas lenta que la taza de expansion, las particulas decoplan
- 5) ocurre para bariones (no lo consideramos), neutrinos, y fotones

para aprender mejor , consideramos la densidad de energia y la densidad numerica para bosones (fotones) y fermiones (electrones, neutrinos)

para fotones: funcion de Planck --> densidad de energia por frecuencia

$$u(\nu) d\nu = \frac{2h}{c^3} \frac{\nu^3 d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

integrar sobre frecuencia y cambio de variable $x = h\nu/kT$

$$u = \frac{2}{c^3} \frac{(kT)^4}{h^3} \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1}$$

el integral es $\frac{\pi^4}{15}$ no tan basico !

densidad de energia

$$u = \frac{2\pi^4}{15c^3} \frac{(kT)^4}{h^3} = a T^4$$

con a : constante de radiacion

$$a = 7.56 \cdot 10^{-15} \text{ erg cm}^{-3} \text{ K}^{-4}$$

para obtener el flujo bolometrico (erg/s/cm^{-2}), multiplicamos con c y dividir por 6 (numero de los lados de un cubo)

--> flujo para $T=2.73 \text{ K}$: $4 \cdot 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

--> bastante! para una observadora en el espacio intergalactico la radiacion del fondo es la fuente mas brillante

ahora: la **densidad numerica** de los fotones:

dividir la densidad de energia por $h \cdot \nu$ y integrar

densidad numerica

$$n = \frac{2}{c^3} \left(\frac{kT}{h} \right)^3 \int_0^\infty \frac{x^2 dx}{e^x - 1}$$

el integral es

$$2\zeta(3) \approx 2.404$$

siendo $\zeta(x)$ la funcion de Riemann

$$\zeta(3) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3}$$

para $T = 2.73 \text{ K}$ ---> $n = 420 \text{ cm}^{-3}$

Ahora para los neutrinos (fermiones):

neutrinos son partículas relativistas --> energía $E = p \cdot c$
usamos el momento p en lugar de frecuencia y c en lugar de h
(no es estrictamente válido: solo para energías altas)

energía por volumen y por dp :

$$u_{\nu} dp = \frac{2}{h^3} \frac{p c p^2 dp}{e^{pc/kT} + 1}$$

y la densidad de la energía

$$u_{\nu} = \frac{2}{h^3} \int_0^{\infty} \frac{p c p^2 dp}{e^{pc/kT} + 1}$$

Ahora para los neutrinos (fermiones):

neutrinos son particulas relativistas --> energia $E = p \cdot c$
usamos el momento p en lugar de frecuencia y c en lugar de h
(no es estrictamente valido: solo para energias altas)

energia por volumen y por dp :

$$u_{\nu} dp = \frac{2}{h^3} \frac{p c p^2 dp}{e^{p c / k T} + 1}$$

y la densidad de la energia

$$u_{\nu} = \frac{2}{h^3} \int_0^{\infty} \frac{p c p^2 dp}{e^{p c / k T} + 1}$$

$$x = p c / k T \longrightarrow u_{\nu} = \frac{2 k^4}{(c h)^3} T^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x + 1}$$

Escribimos:

$$\frac{1}{e^x - 1} - \frac{1}{e^x + 1} = \frac{2}{e^{2x} - 1}$$

multiplicar con x^3 y cambiar el variable $y = 2x$

$$\int_0^\infty \frac{x^3}{e^x + 1} = \frac{7}{8} \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1}$$

entonces para la **densidad de energia** en neutrinos:

$$u_\nu = \frac{7}{8} a T^4$$

para una familia de neutrinos

principalmente, es valido para cualquier fermiones relativistas

para la densidad numerica (sin derivacion):

$$n_\nu = 3 \zeta(3) \left(\frac{k}{h c} \right)^3 T^3 = \frac{3}{4} n_\gamma$$

hasta ahora: todo en equilibrio

la reaccion mas importante que mantiene el equilibrio es

$$\begin{aligned} & -\dot{\chi} \\ & -\dot{\chi} + e \exp \dot{\chi} \\ & \nu + \bar{\nu} = e \exp \dot{\chi} \end{aligned}$$

funciona cuando

$$k T > 2 m_e c^2$$

cuando $k T < 2 m_e c^2$ los neutrinos no tienen suficiente energia para crear pares de electrones y positrones

---> para los electrones, la reaccion $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$
es la mas importante ahora ---> se aniquilan!