.

GUIA DE COSMOLOGIA – 2do Cuatrimestre 2002

Curso de postgrado u optativo de grado – Dept de Física, FCEyN-UBA

IV. : historia termica del universo – grados de libertad relativistas – camino libre medio – nucleosintesis: generacion de nucleos ligeros – limite cosmologico s/materia oscura – ultima: 5-11-2002

g_*) El numero total efectivo de grados de libertad relativistas de particulas –bosones y fermiones– que constituyen un gas diluido y debilmente interactuante (i.e., con masas $m \ll$T) esta dado por g_* , y g_* es una cantidad que depende de la temperatura T.
a) Si solo permanecen en equilibrio termodinamico los fotones, los electrones y los neutrinos (y sus antiparticulas), muestre que $g_* = 10.75$. En que rango de temperaturas del universo tiene validez este valor?
b) Ahora considere temperaturas menores, por debajo de aquella en la que electrones y positrones se aniquilan. Que valor obtiene para g_*? [recuerde que en este caso, fotones y neutrinos *no* poseen la misma T]
c) Es este ultimo el valor *actual* de g_*? Que suposicion esta haciendo sobre la masa de los neutrinos?
d) Ahora considere temperaturas por encima de los 300 GeV e incluya todas las particulas presentes en el modelo estandar de particulas elementales. Que valor obtiene para g_*?
e) Es este ultimo valor el maximo posible para g_*? O piensa Ud. que para energias muy altas (de gran unificacion, por ejemplo) g_* podria ser aun mayor? Si asi fuera, como surgen esos nuevos grados de libertad?
e) Por que no se incluye la contribucion de las particulas no-relativistas en la definicion de g_*? [Que hay en sus distribuciones de equilibrio –para la densidad de energia, por ejemplo– que *suprime* sus contribuciones?]

CLM) En epocas actuales, y si consideramos el universo en su totalidad, la radiacion interactua muy poco con la materia no relativista. Una forma de verlo es calcular el camino libre medio de los fotones. Este depende de la densidad del medio intergalactico, asi como tambien de su estado de ionizacion. Un valor aproximado para este camino libre medio puede estimarse suponiendo que toda la materia barionica del universo esta distribuida uniformemente y que se halla completamente ionizada. Sabiendo que la interaccion de radiacion y materia se rige por la difusion Thomson, cuya seccion eficaz es comunmente escrita $\sigma_{\rm T}$, calcule el valor para el camino libre medio de un foton. Diga ademas si este valor corresponde a un valor minimo del verdadero camino libre medio, y justifique. Compare el valor obtenido con el tamaño del universo observable hoy. Que concluye, estadisticamente, sobre la probabilidad de que un foton interactue con la materia?

nuc123) Empleando el programa NUC123
[ver, por ejemplo, `http://www.iafe.uba.ar/relatividad/gangui/cosmocurso/nuc123/`]
responda las siguientes preguntas:
1) El programa por 'default' selecciona un valor nulo para la constante cosmologica. Sin embargo, en la actualidad se piensa que Λ es la contribucion mas importante a la densidad critica, con $\Omega_\Lambda \sim 0.65$. Modifique los parametros de NUC123 para tener en cuenta este valor.
2) Compare grafica y numericamente la diferencia en las abundancias de los nucleos de los elementos ligeros producidas en los casos $\Lambda \neq 0$ y $\Lambda = 0$. Justifique sus resultados.
3) Como varian estas abundancias en caso de variar el numero de especies de neutrinos? Cual de los nucleos livianos es mas sensible a estos cambios?
4) Entre los parametros a modificar esta la vida media del neutron. Modifique el valor del programa y señale las diferencias notorias en las abundancias resultantes. Justifique.
5) Ud notara que la densidad de neutrones libres decrece abruptamente a partir de una determinada temperatura. Explique: por qué sucede esto?, cuál es esa temperatura? y dónde quedan esos neutrones que faltan?
6) Ud notara que entre los nucleos producidos no hay ninguno con 5 nucleones. De argumentos que justifiquen este hecho.
7) En un par de minutos, la temperatura del universo desciende unos cuatro ordenes de magnitud alrededor de los 10^9K. Que pasaria si se modificaran estos valores, tanto en el rango de variacion como en la temperatura alrededor de la cual la nucleosintesis toma lugar?
8) Como variarian la produccion del ^{4}He y del Deuterio si: i) la constante de Newton fuese significativamente diferente de su valor actual? ii) si el valor resultante de la densidad de bariones fuese mayor o menor que $\Omega_{\rm B}h^2 = 0.02$?
9) Finalmente, Ud se habra preguntado sobre qué son esos tres paramatros 'psi' que el menu del programa le permite modificar. Son parametros de degeneracion de los neutrinos, relacionados con su potencial quimico y que entran en forma directa en la relacion numerica entre neutrones y protones [ver manual del programa y libros(s) de la bibliografia sugerida]. Esta ultima relacion afecta a su vez la abundancia relativa (en masa) del ^{4}He, por ejemplo. Modifique estos parametros y señale las diferencias que encuentra.
10) En todos los casos, si se justifica, muestre los graficos apropiados, y no se olvide de señalar en estos los 'parametros del modelo' y los 'parametros del calculo' que Ud empleo.

C-McC) Cuando la tasa de interaccion Γ_ψ de ciertas particulas ψ se hace menor que H, estas particulas dejan de estar en equilibrio con el resto de la materia. Si esto sucede para una temperatura T tal que $x = m_\psi/T$ no es mucho mayor que 1, entonces el factor de supresion de Boltzmann no tuvo tiempo de actuar y quedan esperanzas de encontrar aun hoy una cierta abundancia de dichas particulas. [si las particulas ψ no tienen masa el argumento de Boltzmann no se aplica.]
Si definimos $Y_{\rm EQ} = n_\psi/s$ como el numero de particulas ψ por volumen comoviente, en el caso relativista, $x \ll 1$, tenemos que la densidad numerica n_ψ esta dada por $n_\psi = (3/4)(\zeta(3)/\pi^2)gT^3$ [si se trata de un fermion, si es boson omita el factor (3/4), vease el ej. **M0NU)** de la guia II], y la densidad de entropia s esta dada por $s = (2\pi^2/45)g_{*\rm S}T^3$, con

$$g_{*\rm S} = \sum_{\rm i=bosones} g_i \left(\frac{T_i}{T}\right)^3 + \frac{7}{8} \sum_{\rm i=fermiones} g_i \left(\frac{T_i}{T}\right)^3$$

En casos simples, esta abundancia $Y_{\rm EQ}$ se mantiene constante, y la idea es calcular su valor. De ahi podremos estimar un limite para la abundancia de particulas ψ. Empecemos de a poco entonces:
1- Escriba la expresion mas simple que pueda de $Y_{\rm EQ}$. Depende de T ?
2- Calcule la densidad de entropia s_0 hoy. [recuerde que hoy los grados de libertad relativistas estan dados por fotones y neutrinos no masivos.]
3- Habiendo resuelto 2- Ud. ya tiene una expresion de $n_{\psi 0}$ (hoy) en funcion de $Y_{\rm EQ}$. Si suponde ahora que las hipoteticas particulas ψ no son otra cosa que vulgares fotones, cuanto deberia valer $Y_{\rm EQ}$ para estos fotones? [Ud. ya sabe el valor de $n_{\gamma 0}$ hoy.]
4- Calcule nuevamente el valor de $Y_{\rm EQ}$ suponiendo que las particulas ψ son fotones pero ahora a partir de la expresion hallada en el punto 1- . Coincide este valor con el hallado en el punto 3- ?
5- Bien, los puntos anteriores fueron para calentarse las manos. Calcule ahora la abundancia remanente $\rho_\nu = n_\nu m_\nu$ de neutrinos masivos que se desacoplan cuando $x = m_\nu/T \ll 1$ (hot relic) en funcion de la masa m_ν.
6- Recordando ahora que la edad del universo impone un limite superior para la combinacion $\Omega_{\rm total}h^2 \lesssim 1$ [esto lo vimos en clase de problemas, ver "funcion edad"] estime un valor maximo para la combinacion $\Omega_\nu h^2$ y por consiguiente un valor maximo para la masa del neutrino [esto es lo que se llama un limite cosmologico sobre m_ν].
7- Esta cuenta para los neutrinos puede hacerse en general, para cualquier particula ψ. Escriba entonces la forma general del limite cosmologico para $\Omega_\psi h^2$ [esto le servira para cualquier 'hot relic' con temperatura de desacople arbitraria.]