¿DE QUE ESTA HECHO EL UNIVERSO?
PIEZAS DE UN ROMPECABEZAS

Bruce Hoeneisen PhD.

ABSTRACT

The rotation curves of spiral galaxies and other evidences show that at least 90% of the matter in the universe is non luminous. ¿What is this "dark matter" made of?.
We present several pieces of this puzzle that has not yet been solved. We suggest that dark matter may be neutrinos with a mass of order 10 to 50 eV and a temparature of order 0.1 K.

RESUMEN

Las curvas de rotación de galaxias espirales (y otras evidencias) indican que por lo menos el 90% de la materia del universo se encuentra en una forma no luminosa llamada "materia obscura". La síntesis de núcleos pocos minutos despúes del "Big Bang" indica que no toda la materia obscura puede ser materia ordinaria formada de protones y neutrones. ¿Qué es la materia obscura que domina el universo? En el articulo presentamos algunas piezas de este rompecabezas que no acaba de armarse. Un modelo plausible es que la materia obscura es un gas auto - gravitante de fermiones no relativistas con una masa del orden de 10 a 50 eV y una temperatura del orden de 0.1 K.

1.- Introducción.

Las curvas de rotación de galaxias espirales y el movimiento de galaxias en grupos indican que por lo menos el 90% de la materia en el universo se encuentra en una forma no luminosa llamada "materia obscura". La síntesis de ^{4}He, D, ^{3}He y ^{7}Li que ocurrió pocos minutos después del "Big Bang" indica que esta materia obscura no es materia "ordinaria" formada de protones y neutrones.

¿Qué es la materia obscura que domina el universo? Se ha propuesto toda una gama de partículas exóticas que van desde el "axión invisible" con una masa de 10^{-5} eV hasta "huecos negros primordiales" con una masa mayor que 10^{40} eV. Por lo tanto está claro que no tenemos la mas remota idea de que está hecho el universo. En el articulo presentamos algunas piezas de este rompecabezas que aún no acaba de armarse.

2.- Gas ideal.

Se observa que las estrellas, los cúmulos globulares y el gas de galaxias espirales giran en torno del centro de la galaxia. La velocidad orbital v(r) de varias galaxias se presentan en la Figura 1[1]. Notamos que para $r > r_0 \approx 1$ kpc la velocidad orbital es aproximadamente independiente del radio r y tiene un valor tipico v_0 en el intervalo de 200 a 300 km/s. Para $r < r_0$ la velocidad orbital decrece.

Consideremos una estrella en órbita circular con $r > r_0$. La aceleración centrifuga es igual a la fuerza de gravitación por unidad de masa:

$$\frac{v_0^2}{r} = \frac{GM(r)}{r^2} \equiv -g \qquad (1)$$

Por simplicidad hemos supuesto que la galaxia tiene una densidad con simetria esférica. M(r) es la masa de la galaxia contenida dentro de una esfera de radio r. Notamos que la velocidad constante v(r) indica que M(r) es proporcional a r, lo que corresponde a una densidad proporcional a r^{-2}.

Las observaciones de v(r) de varias galaxias espirales indican que estas galaxias tienen un "halo" de materia no luminosa, llamada "materia obscura", que puede tener simetria esférica, y que tiene una masa al menos 6 veces superior a la masa visible en las estrellas. Solo se tienen cotas inferiores de las masas de galaxias espirales, ya que las velocidades orbitales no comienzan a decrecer aún a los mayores radios observados.

Supongamos que el halo de materia obscura de las galaxias es un gas ideal no relativista auto - gravitante de particulas de masa m en equilibrio a temperatura T_0. En este caso la densidad de la materia obscura viene dada por las ecuaciones de Newton

$$\nabla \cdot g = -4\pi G\rho \qquad (2)$$

la ecuación de equilibrio mecánico

$$\nabla P = \rho g \qquad (3)$$

y la ecuación de estado de un gas ideal

$$P = \frac{\rho k T_0}{m} \qquad (4)$$

Ensayamos una solución particular de la forma r^{-n}. La única solución de este tipo tiene n = 2:

$$\rho = \frac{kT_0}{2\pi G m r^2} \qquad (5)$$

Esta densidad corresponde a una masa

$$M(r) = \frac{2kT_0}{Gm} r \qquad (6)$$

y a una velocidad orbital independiente de r:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2kT_0}{m}} \qquad (7)$$

Para un gas ideal $m\langle v_t^2\rangle/2 = 3kT_\gamma/2$, de manera que la velocidad térmica eficaz de las partículas de materia obscura es

$$\sqrt{\langle v_t^2\rangle} = \sqrt{3/2}\, v_\gamma = 270\ [km/s] \quad \frac{v_\gamma}{220\ km/s} \qquad (8)$$

comparable a las velocidades de las estrellas en las galaxias.

3.- Temperatura.

Para estimar la temperatura de la materia obscura debemos hacer suposiciones adicionales. Supondremos que las partículas de materia obscura son remanentes estables del "Big Bang". Como la materia obscura se ha "visto" solo a través de su interacción gravitacional, supondremos (por analogía con los neutrinos) que las partículas de materia obscura se desacoplan antes de la recombinación electrón - positrón[2]. En este caso los neutrinos y la materia obscura tienen la misma temperatura y se enfrían de acuerdo a la relación $T_\gamma \propto a^{-1}$ mientras estas partículas son ultrarelativistas. a es el parámetro de expansión del universo. Las partículas de materia obscura se vuelven no-relativistas a una temperatura del orden de

$$T_n \approx mc^2/3k \qquad (9)$$

y luego se enfrían de acuerdo a la relación $T_\gamma \propto a^{-2}$ si no interactúan electromagnéticamente. Por lo tanto en este caso la materia obscura tiene una temperatura presente

$$T_\gamma = T_n \left[\frac{a_n}{a}\right]^2 = \frac{T_\nu^2}{T_n} \qquad (10)$$

Sustituyendo T_γ de (7) y T_n de (9) en (10) obtenemos

$$mc^2 \approx \sqrt{6}\ kT_\nu \frac{c}{v_\gamma} = 30\ eV \frac{T_\nu}{100\ K} \frac{220\ km/s}{v_\gamma} \qquad (11)$$

donde T_ν es la temperatura efectiva de los neutrinos (sin masa) a la cual la materia obscura se separó de la expansión general del universo para formar los halos de las galaxias. La temperatura actual de los neutrinos (sin masa) es $T_\gamma/1.401 = 2$ K, donde $T_\gamma = 2.7$ K es la temperatura actual de los fotones de la radiación cósmica. El factor 1.401 se debe al calentamiento de los fotones durante la recombinación de electrones y positrones[2]. La densidad media de una galaxia es del orden de $10^3 \approx (50)^3$ veces la densidad media del universo. Por lo tanto estimamos que la temperatura efectiva T_ν es 10 a 100 veces la temperatura actual de los neutrinos. Por lo tanto la masa de las partículas de materia obscura es del orden de 6 a 60 eV.

4.- Densidad.

Obtengamos la densidad media de las partículas de materia obscura. La densidad numérica de partículas de un gas ultrarelativista de potencial químico cero está dada por[2]

$$\frac{N}{V} = 0.1218 \left(\frac{kT_\gamma}{\hbar c}\right)^3 \left(N_b + \frac{3}{4} N_f\right) \qquad (12)$$

Para ser específicos supondremos que la materia obscura está dominada por una sola especie de partícula - antipartícula, con potencial químico cero, que son fermiones de Dirac de spin 1/2. En este caso $N_b = 0$, y el número de grados de libertad de fermiones es $N_f = 4$.

La densidad numérica de partículas estables de materia obscura varía en proporción a a^{-3}.

La temperatura de los fotones varía en proporción a a^{-1}, salvo por un incremento de la temperatura de los fotones en un factor 1.401 durante la recombinación de electrones y positrones. En consecuencia la densidad numérica presente de partículas de materia obscura es

$$\frac{N}{V} = 0.1218 \cdot 3 \left[\frac{kT_\gamma}{1.401 \cdot \hbar c}\right]^3 \frac{N_f}{4} \qquad (13)$$

donde $T_\gamma = 2.7$ K es la temperatura presente de los fotones.

Escribimos la densidad media del universo en la forma $\rho = \Omega_\gamma \rho_c$, donde

$$\rho_c = 1.88 \cdot 10^{-26} \cdot h_\gamma^2\ [kg/m^3] \qquad (14)$$

es la densidad crítica[3]. El parámetro de Hubble reducido h_γ tiene un valor observado en el intervalo 0.4 a 1[3], y Ω_γ está en el intervalo 0.05 a 4[3].

Dividiendo la densidad de masa ρ por la densidad numérica (13) se obtiene la masa de las partículas de materia obscura:

$$m = 48\ [eV]\ \Omega_\gamma h_\gamma^2 \frac{4}{N_f} \qquad (15)$$

5.- Gas de Fermi.

Para entender porqué la velocidad orbital $v(r)$ se reduce para $r < r_\gamma \approx 1$ kpc, y para evitar la singularidad de la densidad (5) en $r = 0$, supondremos que la materia obscura es un gas de fermiones que se vuelve degenerado para $r < r_\gamma$. Suponemos que estos fermiones no tienen carga eléctrica.

La presión de un gas degenerado no relativista de Fermi está dada por[4]

$$P = \frac{2E}{3V} = \frac{3^{2/3}\pi^{4/3}\hbar^2}{2^{2/3}5m^{8/3}} \rho^{5/3} \qquad (16)$$

(para ser específicos hemos tomado una especie dominante de partícula - antipartícula de Dirac de spin 1/2). E/V es la densidad de energía cinética del gas.

La transición de un gas no degenerado a un gas degenerado ocurre a $E \approx NkT_\gamma$, lo que implica que las presiones (4) y (16) son aproximadamente iguales. Igualando estas presiones a la densidad dada por (5) con $r = r_\gamma$ obtenemos:

$$r_0 \approx \frac{3^{1/2}\pi^{1/2}\hbar^{3/2}}{2\cdot 5^{3/4}G^{1/2}m^{7/4}(kT_0)^{1/4}} \qquad (17)$$

Sustituyendo T_0 de (7) obtenemos la masa de las partículas de materia obscura en función de v_0 y r_0:

$$m \approx \frac{3^{1/4}\pi^{1/4}\hbar^{3/4}}{(10)^{3/8}G^{1/4}r_0^{1/2}v_0^{1/4}}$$

$$= 40\ [eV]\left(\frac{1\ kpc}{r_0}\right)^{1/2}\left(\frac{220\ km/s}{v_0}\right)^{1/4} \qquad (18)$$

En resumen, tenemos tres estimaciones independientes de la masa de las partículas de materia obscura que son compatibles entre si: (11), (15) y (18). Estas "coincidencias" refuerzan la hipótesis de que las partículas de materia obscura son fermiones que son remanentes estables del "Big Bang". Ver Fig. 1.

6.- El teorema virial.

Consideremos materia obscura con la densidad (5) para $r < R$ y densidad $\rho = 0$ para $r > R$. Al final tomamos el limite $R \longrightarrow \infty$. La energía potencial gravitacional de esta materia obscura es

$$V = \int_0^R -\frac{GM(r)}{r}\rho 4\pi r^2 dr = -\frac{4k^2T_0^2}{Gm^2}R = -\frac{G[M(R)]^2}{R} \qquad (19)$$

y su energía cinética es

$$E_c = \int_0^R \frac{3}{2}kT_0\frac{\rho}{m}4\pi r^2 dr = \frac{3k^2T_0^2}{Gm^2}R = \frac{3G[M(R)]^2}{4R} \qquad (20)$$

En comparación, una esfera homogénea de masa M y radio R tiene

$$V = -\frac{3GM^2}{5R} \qquad (21)$$

Recordemos que un sistema ligado gravitacionalmente (con órbitas finitas y no relativistas) satisface el teorema virial:

$$\text{Energía total} = E_c + V = -\langle E_c\rangle \qquad (22)$$

$\langle E_c\rangle$ es el valor medio de la energía cinética de las partículas del sistema. Notamos que la energía total de la materia obscura es negativa, pero no lo suficientemente negativa como para cumplir con el teorema virial. La materia obscura no se acopla al campo electromagnético. Por lo tanto no puede perder energía por radiación (como lo hace un plasma para formar una estrella). Por este motivo la materia obscura forma un halo extendido: para contraerse tendría que radiar energía.

7.- Distancia entre galaxias.

Según la Figura 1 el halo de una galaxia tiene un radio de por lo menos 100 kpc. ¿Hasta donde se extiende el halo? Supongamos que el halo de una galaxia se extiende hasta la "proxima" galaxia. Con esta suposición calcularemos la "distancia media" d entre galaxias (definimos d de tal manera que d^3 es el volumen medio por galaxia). Para ello igualamos la densidad media del halo en una esfera de radio R con la densidad media del universo:

$$\frac{M(R)}{4\pi R^3/3} = \frac{v_0^2R/G}{4\pi R^3/3} = \rho \equiv \Omega_0\rho_c \qquad (23)$$

Tomando $d^3 \equiv 4\pi R^3/3$ se obtiene

$$d = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/6}\frac{v_0}{(G\Omega_0\rho_c)^{1/2}} = 5[Mpc]\frac{v_0}{220km/s}\Omega_0^{-1/2}h_0^{-1} \qquad (24)$$

Las distancias entre galaxias son del orden de magnitud de 3 Mpc, de manera que es posible que el halo de una galaxia se extienda hasta el halo de la "proxima" galaxia.

Si el halo de una galaxia ocupa un volumen d^3, la masa media de materia obscura correspondiente a una galaxia es

$$M = 3.5\cdot 10^{13}M_0\left(\frac{v_0}{220\ km/s}\right)^3\Omega_0^{-1/2}h_0^{-1} \qquad (25)$$

En contraste, la masa bariónica de una galaxia es del orden de $10^{11}M_0$ a $10^{12}M_0$.

8.- Extensión del halo de una galaxia.

La velocidad térmica eficaz de las partículas de materia obscura está dada por (8). Según la ley de Hubble, la velocidad de recesión de dos puntos del fluido cosmológico separados una distancia R es $v = H\cdot R$, donde $H = 100h_0[km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}]$[3] es la constante de Hubble. Igualando estas dos velocidades obtenemos

$$R = 2.7[Mpc]\frac{v_0}{220\ km/s}h_0^{-1} \qquad (26)$$

El halo de una galaxia termina "en promedio" a este radio. Notamos que las distancias (24) y (26) son del mismo orden.

9.- Edad del universo.

La edad del universo está dada por[2]

$$t = \frac{2}{n}\sqrt{\frac{3}{8\pi G\rho}} \propto a^{n/2} \propto T^{-n/2} \qquad (27)$$

donde n = 4 si domina la radiación, y n = 3 si domina la materia. La densidad del universo en $[kg/m^3]$ cuando los fotones tienen temperatura T es

$$\rho = \rho_r + \rho_m = 2.24\cdot 10^{-31}(T/2.7K)^4N_{ef} + \Omega_0\cdot 1.88\cdot 10^{-26}h_0^2(T/2.7K)^3 \qquad (28)$$

El término proporcional a T^4 corresponde a partículas ultra relativistas (radiación), y el término proporcional a T^3 corresponde a partículas no-relativistas (materia). Mientras el universo está dominado por radiación se tiene

$$t = 3.26\cdot 10^{20}[s] \frac{1}{(N_{ef})^{1/2}(T[K])^2} \qquad (29)$$

El "número efectivo de grados de libertad" antes de la recombinación electrón - positrón está dado por[2]

$$N_{ef} = 2 + \frac{7}{8}(\underbrace{4}_{\text{fotones}} + \underbrace{2}_{\text{electrones y positrones}} + \underbrace{2\cdot N_\nu}_{\text{neutrinos y antineutrinos}}) \qquad (30)$$

N_ν es el número equivalente de sabores de neutrinos - antineutrinos sin masa (ver Sección 10). La recombinación de electrones y positrones calienta los fotones un factor 1.401 sin calentar los neutrinos (que ya se han desacoplado). El número efectivo de grados de libertad después de la recombinación de electrones y positrones está dado por[2]

$$N_{ef} = 2 + \frac{7}{4} N_\nu \frac{1}{(1.401)^4} \qquad (31)$$

10.- Bariosintesis.

Según el Modelo Standard de la evolución del universo, los neutrinos se desacoplan en un rango de temperaturas alrededor de $T \approx 2\cdot 10^{10}$ K = 1.7 MeV, la relación neutrón/protón se "congela" a $T \approx 8\cdot 10^9$ K = 0.7 MeV, y los electrones y positrones se aniquilan en un rango de temperaturas alrededor de $T \approx 2\cdot 10^9$ K = 0.17 MeV (calentando los fotones un factor 1.401 sin calentar los neutrinos que ya se han desacoplado).

Los únicos isótopos producidos en cantidades significativas durante los primeros minutos del universo son ^{4}He, D, ^{3}He y ^{7}Li. La abundancia primigenia de estos isótopos (antes del reprocesamiento en estrellas) está determinada por $\eta \equiv n_b/n_\gamma$ (la relación entre las densidades numéricas de bariones y fotones), N_ν (el número equivalente de sabores de neutrinos - antineutrinos de masa cero a la temperatura $T \approx 0.7$ MeV), y $\tau_{1/2}$ (la vida media del neutrón). Las abundancias primigenias observadas están de acuerdo con los cálculos si $4\cdot 10^{-10} < \eta < 7\cdot 10^{-10}$, $2 < N_\nu < 4$ (o equivalentemente $9 < N_{ef} < 12.5$ a $T \approx 0.7$ MeV), y 10.4 min $< \tau_{1/2} <$ 10.8 min. El intervalo permitido de η indica que la densidad del universo en protones y neutrones está en el intervalo $2.7\cdot 10^{-28}$ a $4.7\cdot 10^{-28}$ kg/m^3, de manera que no toda la materia obscura puede ser bariónica si $\Omega_b \approx 1$.

En la Tabla 1 presentamos el número efectivo de grados de libertad antes y después de la recombinación electrón - positrón para varios numeros de sabores y masas de neutrinos - antineutrinos.

Sabores	Masa [MeV]	$2\cdot N_\nu$	N_{ef} antes	N_{ef} después
Neutrinos de Weyl:				
2	0	2·2	9	2.91
3	0	3·2	10.75	3.36
4	0	4·2	12.5	3.817
5	0	5·2	14.25	4.271
Neutrinos de Dirac:				
3	$0 < m_1 < 0.7$; m_2, $m_3 > M$	1·4	9	2.91[1]
3	$0 < m_1$, $m_2 < 0.7$; $m_3 > M$	2·4	12.5	3.817
3	$0 < m_1$, m_2, $m_3 < 0.7$	3·4	16	4.725
Neutrinos de Weyl y Dirac:				
3	$m_1 = 0$; $0 < m_2 < 0.7$; $m_3 > M$	2+4	10.75	3.36
Neutrinos de Majorana:				
3	$0 < m_1$, m_2, $m_3 < 0.7$ Mev	3·2	10.75**	3.36

Tabla 1. Número efectivo de grados de libertad antes y después de la recombinación electrón - positrón para 2, 3, 4 y 5 sabores de neutrino - antineutrino de Weyl, de Dirac o de Majorana con las masas indicadas. El número efectivo de grados de libertad N_{ef} determina la densidad de radiación en el universo según (28).

[1] La columna "N_{ef} después" es válida si las masas menores que 0.7 MeV son además menores que 0.17 MeV.

El ancho de la particula Z implica que hay exactamente 3 sabores de neutrino - antineutrino con masa menor que 46 GeV. Además se tiene[3, 5] $m_{\nu_e} < 18$ eV, $m_{\nu_\mu} < 0.25$ MeV (< 0.014 MeV según supernova SN1987A), y $m_{\nu_\tau} < 35$ MeV (> 34 MeV o < 0.014 MeV según supernova SN1987A). En la Tabla 1 se supone que particulas y antiparticulas con masa m > M se han recombinado antes de que T descienda a 0.7 MeV, de manera que no contribuyen a N_ν. Para que esto ocurra con neutrinos con acoplamientos de la Teoria Standard se requiere M > 2 GeV. Tomando en cuenta todo lo anterior, se concluye que la única alternativa de la Tabla 1 compatible con los experimentos y con particulas de materia

obscura de masa del orden de 40 eV es la señalada con doble asterisco. Al parecer la solución del enigma de la materia obscura requiere "física nueva" mas allá de la Teoría Standard.

$$M = \frac{4}{3}\pi(2ct)^3 \rho_d = 2.43\cdot 10^{12} M_\odot \left(\frac{10^4 K}{T}\right)^3 \left(\frac{3.36}{N_{ef}}\right)^{3/2} \Omega_0 h_0^2 \qquad (32)$$

Notamos que la materia obscura de una galaxia (25) entra al horizonte cuando la temperatura de fotones es

$$T = 4.15\cdot 10^5 [K]\Omega_0^{1/2} h_0 \frac{220\ km/s}{v_0} \left(\frac{3.36}{N_{ef}}\right)^{1/2}$$

$$= 35.6[eV]\Omega_0^{1/2} h_0 \frac{220\ km/s}{v_0} \left(\frac{3.36}{N_{ef}}\right)^{1/2} \qquad (33)$$

12.- Temperatura a la cual la materia obscura se vuelve no-relativista.

La materia obscura de masa (15) se vuelve no relativista a una temperatura de los fotones

$$T_{NR} = 1.401\ T_d \approx 1.401 \frac{m}{3} = 22.4[eV]\Omega_0 h_0^2 \frac{4}{N_f} \qquad (34)$$

A temperaturas menores la velocidad de las partículas de materia obscura es $c(a_{NR}/a)$. Es interesante notar que las temperaturas T_{NR} y (33) son similares.

11.- Materia obscura dentro del horizonte.

La distancia al horizonte es 2ct si domina la radiación. La masa de materia obscura dentro del horizonte mientras domina la radiación está dada por

13.- De la radiación a la materia

Se tiene $\rho_r = \rho_0$ a una temperatura de los fotones

$$T_{eq} = 6.75\cdot 10^4 [K]\Omega_0 h_0^2 \frac{3.36}{N_{ef}}$$

$$= 5.8[eV]\Omega_0 h_0^2 \frac{3.36}{N_{ef}} \qquad (35)$$

A temperaturas mayores domina la radiación ($t \propto a^2 \propto T^{-2}$), y a temperaturas menores domina la materia ($t \propto a^{3/2} \propto T^{-3/2}$).

14.- Atenuación de perturbaciones de densidad ("Free streeming").

Calculamos la "distancia reducida" recorrida por una partícula de materia obscura referida al instante t_{eq}:

$$D_{eq} = \int_0^0 v(t)\, dt \frac{a_{eq}}{a(t)} =$$

$$D_{eq} = \int_0^{t_{NR}} c\, dt \left(\frac{t_{eq}}{t}\right)^{1/2} + \int_{t_{NR}}^{t_{eq}} c\, dt \frac{(t_{NR} t_{eq})^{1/2}}{t} + \int_{t_{eq}}^{\infty} c\, dt \left(\frac{t_{NR}}{t_{eq}}\right)^{1/2} \left(\frac{t_{eq}}{t}\right)^{4/3} = c\, t_{eq}^{1/2}\, t_{NR}^{1/2} \left[5 + \ln\left(\frac{t_{eq}}{t_{NR}}\right)\right] \qquad (36)$$

Multiplicando este resultado por T_{eq}/T_0 obtenemos la distancia reducida recorrida por una partícula de materia obscura referida al instante presente:

$$D_0 = 19[Mpc]\Omega_0^{-1} h_0^{-2} \left(\frac{3.36}{N_{ef}}\right)^{1/2} \frac{N_f}{4} \qquad (37)$$

La masa contenida en una esfera de radio D_0 es

$$M = 8.0\cdot 10^{15} M_\odot \Omega_0^{-2} h_0^{-4} \left(\frac{3.36}{N_{ef}}\right)^{3/2} \left(\frac{N_f}{4}\right)^3 \qquad (38)$$

Debido a "free streeming" las perturbaciones de densidad correspondientes a masas menores que (38) se "suavizan". Notamos que (38) es del orden de 100 veces la masa de materia obscura correspondiente a una galaxia (25).

15.- Crecimiento de las perturbaciones de densidad

A partir del instante t_{eq} las perturbaciones de densidad de partículas no relativistas de materia obscura (dentro o fuera del horizonte) comienzan a crecer debido a la gravedad según la ley

$$\frac{\delta\rho}{\rho} \propto t^{2/3} \propto a \propto T^{-1} \qquad \text{para } \delta\rho/\rho \ll 1 \qquad (39)$$

Las perturbaciones de densidad corresponden aproximadamente a 100 o mas masas galácticas (25); perturbaciones de densidad correspondientes a masas menores son "suavizadas" por "free streeming".

16.- Temperatura de Fermi

La temperatura de Fermi de partículas y de antipartículas de materia obscura en un universo homogéneo es[4]

$$T_f = 1.03\cdot 10^{-5} [K] h_0^{-2} \Omega_0^{-1} \left(\frac{T}{2.7K}\right)^2 \qquad (40)$$

Notamos que $T = T_f$ a $T = 60.8[eV] h_0^2 \Omega_0$. En consecuencia la materia obscura no relativista y homogénea es no degenerada.

17.- La formación de galaxias

Describimos una secuencia plausible de eventos que condujeron a la formación de galaxias. Utilizamos los resultados obtenidos en las Secciones anteriores. Para ser específicos tomamos

$$1 = \Omega_0 = h_0 = \frac{N_{ef}}{3.36} = \frac{N_f}{4} = \frac{v_0}{220\ km/s}$$

(Entre paréntesis damos los valores correspondientes a $h_0 = 0.5$.) T es la temperatura de fotones y T_d es la temperatura de la materia obscura. Según (15), las partículas de materia obscura tienen una masa de 48 eV (12 eV).

a) T = 35.6 eV (17.8 eV), T_d = 25.4 eV (12.7 eV). La masa (25) de materia obscura de una galaxia, $M = 3.5 \cdot 10^{13} M_0$ ($7 \cdot 10^{13} M_0$), entra al horizonte.

b) T ≈ 22.4 eV (5.6 eV), T_d ≈ 16 eV (4.0 eV). La materia obscura se vuelve no relativista.

c) T = 5.8 eV (1.5 eV), T_d = 1.1 eV (0.27 eV), $\bar{\rho}_m = 2.9 \cdot 10^{-13}$ kg/m^3 ($1.1 \cdot 10^{-15}$ kg/m^3). Comienza a dominar la materia.

Las fluctuaciones de densidad de materia obscura (que corresponden a masas iguales o mayores que $\approx 8 \cdot 10^{15} M_0$ ($1.3 \cdot 10^{17} M_0$)) comienzan a crecer según (39). En retrospectiva la amplitud de las fluctuaciones de densidad debieron haber sido $\delta\rho / \rho \approx 3.4 \cdot 10^{-3}$.

d) T ≈ 0.35 eV = 4000 K, T_d ≈ 0.0039 eV = 45 K, $\bar{\rho}_m \approx 6 \cdot 10^{-17}$ kg/m^3 ($1.5 \cdot 10^{-17}$ kg/m^3).

Se forman átomos de hidrógeno y helio, y se desacoplan los fotones[2]. Las perturbaciones de densidad de materia obscura debieron tener una amplitud $\delta\rho / \rho \approx 0.06$ (0.015). Los átomos neutros comienzan a concentrarse en los pozos de potencial de la materia obscura.

El tiempo de frenado respecto de la radiación cósmica de átomos (electrones) es mucho mayor (menor) que la edad del universo. (¿O son las fluctuaciones de densidad de la componente bariónica las semillas que originan las galaxias?)

e) T ≈ 0.020 eV = 234 K (58 K), $T_d \approx 1.3 \cdot 10^{-5}$ eV = 0.15 K (0.037 K), $\bar{\rho}_m \approx 1.2 \cdot 10^{-20}$ kg/m^3 ($4.7 \cdot 10^{-23}$ kg/m^3). Se tiene $\delta\rho / \rho \approx 1$ de manera que los excesos de concentración de materia obscura se desacoplan de la expansión del universo.

A partir de ahora T_d permanece constante. Notamos que la densidad (5) a r = 1 kpc es $6 \cdot 10^{-20}$ kg/m^3, del mismo orden que $\bar{\rho}_m$. T_d se obtuvo de (7). Las estructuras se forman "de arriba hacia abajo": primero los grupos de galaxias, luego las galaxias, luego las estrellas.

f) T ≈ 11K, T_d ≈ 0.15 K (0.037 K), $\bar{\rho}_m = 1.3 \cdot 10^{-24}$ kg/m^3 ($3 \cdot 10^{-25}$ kg/m^3). Se encienden los quasares con Z ≈ 3, correspondientes a un corrimiento hacia el rojo un factor 1 + Z ≈ 4.

g) Hoy T = 2.7 K, T_d ≈ 0.15 K (0.037 K) y $\bar{\rho}_m = 1.88 \cdot 10^{-26}$ kg/m^3 ($4.7 \cdot 10^{-27}$ kg/m^3).

18.- Conclusiones

Las curvas de rotación de galaxias espirales dan soporte al escenario según el cual la materia obscura es un gas auto - gravitante de fermiones con una masa del orden de 10 a 50 eV y una temperatura del orden de 0.1 K que son remanentes estables del "Big Bang". Una posibilidad es que las partículas de materia obscura sean neutrinos masivos de Majorana.

El modelo en su etapa actual es insatisfactorio en los siguientes aspectos:

a) No entendemos la masa de las galaxias. ¿Porqué no tienen una masa 100 veces mayor?

b) No entendemos el crecimiento de las fluctuaciones de densidad hasta formar los halos estables de las galaxias. ¿Cual era la velocidad de rotación v_0 de las galaxias espirales cuando el universo tenía la mitad de la edad actual?

Referencias

(1) Rubin, Science, 1983.

(2) Steven Weinberg, "The first three minutes", Basic Books, 1977. Bruce Hoeneisen, "Equilibrio térmico y la evolución del universo", POLITECNICA XI No. 2, p 201, 1986. Michael S. Turner, "Cosmology and particle physics", ?.

(3) Particle Properties Data Booklet, North-Holland, 1988.

(4) Charles Kittel, "Thermal physics", John Wiley and Sons, 1969.

(5) J. A. Grifols and E. Massó, preprint, (1990).

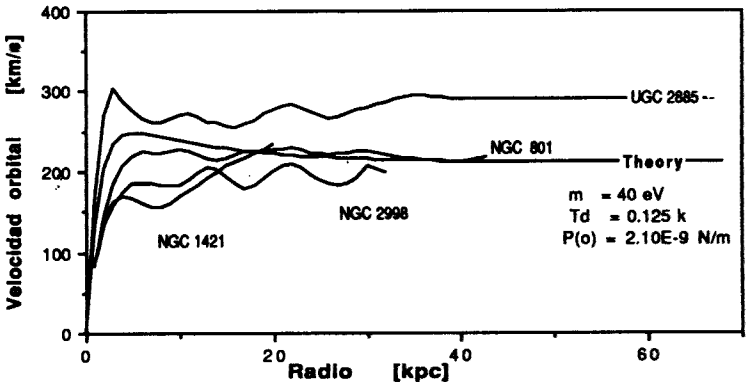

Figura 1. Curvas de rotación de galaxias espirales Sc(1).