

La materia oscura del universo: retos y perspectivas

A. Vázquez-González* y T. Matos

*Departamento de Física, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN,
Apartado Postal 14-740, 07000 México D.F., México,
e-mail: jvazquez@fis.cinvestav.mx, tmatos@fis.cinvestav.mx*

Recibido el 22 de abril de 2008; aceptado el 19 de septiembre de 2008

Entender la naturaleza de la materia oscura es uno de los retos más importantes de la física actual. En este trabajo se da una introducción didáctica a este tema, haciendo énfasis en los resultados observacionales que dan sustento a la existencia de la materia oscura. Se platica de los candidatos a este tipo de materia, de sus ventajas y problemas, además de las perspectivas inmediatas para entender su naturaleza.

Descriptores: Cosmología; materia oscura; energía oscura.

Understanding the nature of dark matter is one of the greatest challenges of modern physics. This paper gives an introduction to teaching this subject, doing an emphasis on the observational results that give sustenance to the existence of dark matter. We talk about candidates for this kind of matter, its advantages and problems, in addition to the immediate prospects for understanding the nature of it.

Keywords: Cosmology; dark matter; dark energy.

PACS: 98.80.-k; 95.35.+d; 95.36.+x

1. Introducción

En los últimos años se ha vivido una revolución silenciosa en el conocimiento humano. El descubrimiento de que la inmensa cantidad de objetos estelares tan solo contribuyen al 4 % del total de la materia en el Cosmos, mientras que el 96 % restante es de naturaleza aún desconocida, ha cambiado completamente nuestro paradigma sobre lo que pensamos es el Universo, su evolución y desarrollo.

Este 96 % de materia exótica se compone de un 73 % de materia gravitacionalmente repulsiva denominada **energía oscura**. Además de un 23 % de materia con carácter gravitacionalmente atractivo, comúnmente llamada **materia oscura**. En los últimos años una gran cantidad de científicos se han concentrado en analizar decenas de hipótesis sobre la posible naturaleza y origen de éstas componentes tan extrañas, sin embargo, con resultados no del todo satisfactorios, el misterio hasta ahora permanece.

El estudio de la materia oscura y sus posibles candidatos son los principales objetivos a tratar a lo largo de este trabajo. La materia oscura fue propuesta por primera vez en la década de los 30 como un componente especulativo del Universo, hoy en día ya es considerada como un ingrediente vital para el Cosmos: seis veces más abundante que la materia ordinaria, una cuarta parte de la densidad total y el componente principal para la formación de estructura en el Universo [1].

Durante más de 72 años han existido numerosos intentos por describir su composición, sin embargo, a pesar de que hasta ahora no se ha determinado completamente su naturaleza, se asume que está constituida por partículas sub-atómicas que interactúan débilmente. De esta manera la dinámica de estructuras a gran escala es consistente con las observaciones actuales [2].

Algunas partículas candidatas a materia oscura se discutirán con particular énfasis, como es el caso de neutrinos masivos, el axiÓN, partículas masivas con interacciones débiles (WIMPs), partículas supersimétricas que incluyen al neu-

trálino, una partícula predicha por la extensión mínima supersimétrica del modelo estándar de partículas, entre otros. Por otro lado, el desarrollo de nueva tecnología y la construcción de experimentos altamente sofisticados, nos conduce a pensar que estos años son cruciales para saber si algunos de estos candidatos se desearán o permanecerán como tales. En particular el año 2008 se torna especialmente interesante. A partir de mediados de año iniciará su funcionamiento el LHC, el acelerador de partículas del CERN, en donde se tendrá que ver la supersimetría. Si ésta no se observa, podremos desechar las partículas supersimétricas como candidatos a materia oscura. También están corriendo otros experimentos como Antares, Amanda, Dama, etc. que aunque son experimentos para detectar neutrinos, tienen una componente para detectar los WIMPs. Se espera que este año a lo más den resultados de su detección.

El modelo que se ha convertido en la teoría estándar para la formación de estructura, es el de **materia oscura fría (CDM)**. Sus predicciones se encuentran en concordancia con los datos a grandes escalas (\sim Mpc), así como en diversas explicaciones sobre las propiedades de las galaxias y cúmulos de galaxias. Sin embargo, a pesar de los grandes éxitos de CDM, éste presenta discrepancias en escalas menores (\sim kpc). Una de ellas se debe a que los perfiles de densidad predichos por CDM tienen un aumento abrupto en la densidad central, en contraste con las curvas de rotación observadas en galaxias pequeñas. Otro problema que presenta CDM en pequeña escala se basa en simulaciones numéricas. Éstas predicen la existencia de un número muy elevado de halos pequeños orbitando alrededor de estructuras mayores, por ejemplo la Vía Láctea, contrariamente al número de galaxias satélites observadas localmente. Existen varias propuestas para resolver o al menos darle la vuelta a estas inconsistencias, sin embargo no existe un consenso sobre si éstas resuelvan completamente el problema, como se mencionará más adelante.

Para tener mejor entendimiento sobre la dinámica del Universo sin tener que recurrir a la materia oscura, han surgido diversas propuestas basadas por ejemplo en modificaciones a la teoría de Einstein o en particular a la dinámica de Newton (MOND), dimensiones extras o simplemente modelos soportados por “un mejor entendimiento de la física de formación de galaxias”, los cuales, hasta ahora, no han sido del todo exitosos.

2. Primeras evidencias

La mayoría de los astrónomos, cosmólogos y gente dedicada al estudio de la física de partículas están convencidos de que al menos el 23 % del total de la masa del Universo es algún tipo de materia no-luminosa. Esta última conocida comúnmente como “materia oscura” [3,4].

Los primeros signos de la existencia de este tipo de materia aparecieron con los estudios de los movimientos celestes realizados durante la década de los 30. Uno de ellos, encabezado por el astrónomo contemporáneo Ernst Julius Opik (1922) [5], cuyo trabajo se enfocaba en el análisis de diversos modelos para la distribución de masa en galaxias. Basándose en estos estudios, Opik concluyó que la galaxia Andrómeda debía contener más masa que aquella detectada visualmente, pero que interactúa con su entorno sólo gravitacionalmente. Sin embargo, Opik no contaba con ninguna referencia sobre el problema con el que se enfrentaba y, por tanto, él concluyó que los resultados arrojados eran tan sólo errores.

Más tarde, el astrónomo holandés Jan Hendrik Oort (1932) [6] examinó la cinemática de las estrellas en las regiones limítrofes de la Vía Láctea. Oort calculó la cantidad de masa necesaria en la galaxia de tal manera que las estrellas se mantengan gravitacionalmente en sus órbitas. Además, con un método independiente estimó la masa real del total de las estrellas interiores. Comparando ambos resultados, él concluyó que la dinámica presentada por la Vía Láctea, sólo puede ser explicada si ésta contiene un doscientos por ciento de masa superior a la materia luminosa.

En 1933 el astrofísico Fritz Zwicky [7], basándose en el número de estrellas y su brillo, examinó la dinámica interna del cúmulo de galaxias Coma Berenice. Zwicky estimó la masa de las galaxias que componen este cúmulo y de esta manera calculó las velocidades correspondientes a las galaxias en movimiento. Con esto, él proporcionó la evidencia de que la masa luminosa en el cúmulo de Coma era mucho menor que el total de la masa necesaria para mantener a las galaxias unidas gravitacionalmente. Zwicky fue el primero en plantear la existencia de la materia oscura como algún tipo de “materia faltante” que no había sido detectada y a su vez proveería suficiente masa y gravedad para mantener el cúmulo unido.

A pesar de las numerosas contribuciones de docenas de científicos, el tema de la materia oscura no fue considerado seriamente sino hasta 1977, cuando el trabajo de investigación de la astrónoma Vera Cooper Rubin [8] indicó que las galaxias para ser estables requieren de una cantidad mucho

mayor de masa que la observada. Ella descubrió esto midiendo la velocidad rotacional de las estrellas cerca del centro de las galaxias (se pensaba que éstas rotaban de manera análoga al Sistema Solar, en el cual los planetas exteriores rotan más lentamente que aquellos cercanos al Sol). De hecho, ella encontró que la velocidad rotacional de las estrellas que componen a las galaxias espirales no disminuye en las regiones cercanas a sus límites. En nuestra galaxia, la Vía Láctea, las estrellas se mueven a través del espacio a 240 km/s aproximadamente, sin importar el lugar en que estén situadas, esto es, las estrellas cercanas al centro de la galaxia y las estrellas lejanas localizadas en los brazos de la espiral parecen moverse a la misma velocidad. Esta velocidad no era la esperada si se calculaba considerando sólo la atracción gravitacional.

La presencia de este tipo de materia en galaxias espirales fue la explicación más plausible para justificar la irregularidad en las curvas de rotación de estas galaxias (Fig. 1), como se discutirá a continuación.

3. Materia oscura en pequeñas escalas

Para calcular las velocidades de rotación de las estrellas o nubes de hidrógeno localizadas en las afueras de los centros galácticos, es suficiente con emplear correctamente la teoría de gravitación de Newton. Esto se debe a que los campos gravitacionales involucrados en este tipo de fenómenos astrofísicos son tan débiles que no es necesario acudir a la teoría de la relatividad general.

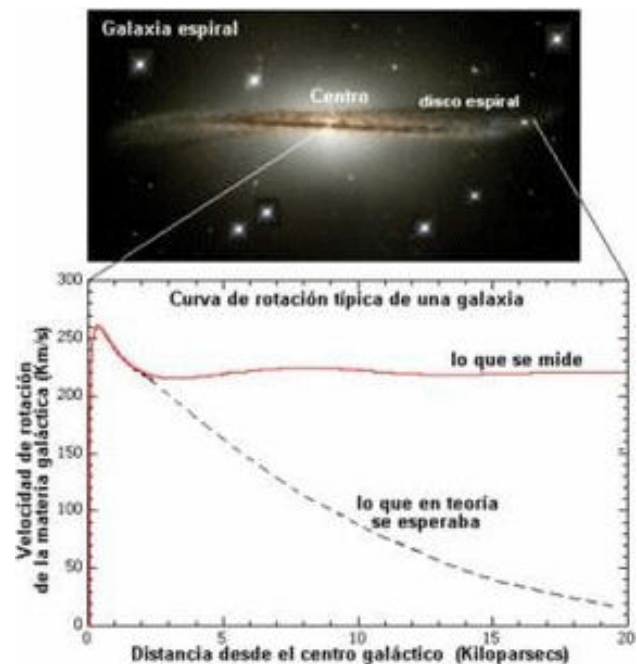


FIGURA 1. Discrepancia mostrada en una galaxia espiral debido a lo observado en su material luminoso (con línea punteada usando segunda ley de Newton) y a lo observado en las velocidades de rotación (línea continua usando corrimiento al rojo de sus estrellas) [9].

Utilicemos como ejemplo nuestro Sistema Solar. Consideremos un planeta localizado a una distancia promedio r al centro del sol. Si el planeta se encuentra en su órbita de manera estable, la ley de Newton implica un equilibrio entre la fuerza centrífuga y la fuerza gravitacional dado por $v^2(r)/r = GM(r)/r^2$, donde $v(r)$ es la velocidad orbital promedio del planeta y $M(r)$ es la masa total localizada dentro de la órbita. Por lo tanto,

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}. \quad (1)$$

En este caso, la masa total $M(r)$ dentro de la órbita se estima principalmente por la masa solar $M_{\odot} = 1.989 \times 10^{30}$ kg; como se esperaba, $v(r)$ disminuye con un incremento en la distancia r . Esto es, cuanto mayor es la distancia r , más débil es la atracción solar y por tanto la velocidad orbital decrece: Plutón, cien veces más lejos que Mercurio, se desplaza diez veces más lento.

Para las galaxias la situación es muy parecida. Las estrellas giran en torno al centro galáctico, lo que les permite compensar la atracción del campo gravitatorio producido por la masa concentrada en el interior y de esta manera evitar el colapso en el núcleo central. Si la galaxia tiene una distribución de masa que puede aproximarse como esférica o elíptica, la Ec. (1) puede utilizarse como una buena estimación. Además, si la distribución de masa se encuentra concentrada en la parte visible de la galaxia, uno esperaría que $v(r) \propto 1/\sqrt{r}$ para distancias lejanas al centro de la galaxia. ¡Sin embargo, las observaciones indican otra cosa!

Los astrónomos, por medio del efecto Doppler, observan que esta velocidad se mantiene prácticamente constante alrededor de 100 - 200 km/s, lo que implica curvas de rotación aproximadamente planas. Esto es, estrellas alejadas del centro de la galaxia giran con la misma velocidad orbital que estrellas próximas. Siendo que la distribución de materia luminosa nos indica que entre más alejada esté una estrella del centro de la galaxia su velocidad debe decaer como $1/\sqrt{r}$.

Aún más, ésta planicidad nos dice que para distancias lejanas, externas a la parte visible de la galaxia, $M(r)/r$ generalmente es igual a una constante, lo que implica que $M(r)$ aumenta linealmente con r . Así, sugiriendo fuertemente que las galaxias se encuentran inmersas en una estructura gigantesca formada por algún tipo de materia no luminosa aún desconocida, un halo de materia oscura mucho más grande que la misma galaxia.

3.1. Parámetro de densidad

Usualmente los cosmólogos expresan la densidad de masa promedio del Universo ρ en unidades de la llamada *densidad crítica* $\rho_c = 1.88h^2 \times 10^{-26}$ kg/m³, claramente una cantidad extremadamente pequeña comparada con la densidad del agua 10^{-3} kg/m³. Mediante estas cantidades se define el parámetro de densidad como

$$\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c}. \quad (2)$$

Si $\rho > \rho_c$ ($\Omega > 1$) nos encontramos en un Universo con geometría esférica, el cual se expande hasta alcanzar un punto máximo para más tarde contraerse (Universo cerrado). Si $\rho < \rho_c$ ($\Omega < 1$) la geometría de este Universo será hiperbólica y éste se expandirá por siempre (Universo abierto). En el caso crítico $\rho = \rho_c$ ($\Omega = 1$), indica que el Universo tiene una geometría plana y también se expandirá por siempre [10].

De esta manera, la cantidad total de materia en el Universo queda determinada por

$$\Omega_{Tot} = \Omega_{lum} + \Omega_{DM} + \Omega_{DE}. \quad (3)$$

donde los parámetros de densidad se relacionan de la siguiente manera:

- Ω_{lum} : Materia ordinaria (radiación, bariones, neutrinos, etc.).
- Ω_{DM} : Materia oscura.
- Ω_{DE} : Energía oscura.

Observaciones de los globos aerostáticos MAXIMA [13] y BOOMERANG [14] y recientemente del satélite WMAP [15], indican que $\Omega = 1 \pm 0.005$. Tal resultado nos indica que nuestro Universo es prácticamente plano.

Además, evidencias experimentales muestran que $\Omega_{DE} \approx 0.73$. Por otro lado, resultados después de cinco años de observación del WMAP [15] concluyen que la materia luminosa contribuye a la densidad total como $\Omega_{lum} \approx 0.04$, mientras que la materia oscura $\Omega_{DM} \approx 0.24$. Este resultado proporciona una clara evidencia de la gran cantidad de materia oscura necesaria en el Universo, aproximadamente seis veces más abundante que la materia ordinaria [11].

4. Materia oscura a grandes escalas

Según la teoría de la relatividad general de Einstein las masas deforman el espacio-tiempo a su alrededor, entonces cualquier cosa que pase cerca de un objeto masivo desviará su trayectoria, incluyendo la de los fotones. Una consecuencia de esto son las llamadas *lentes gravitacionales*, las cuales son el efecto de desviar apreciablemente la trayectoria de la luz procedente de las galaxias situadas detrás de los cúmulos al pasar cerca de éstas, como lo hace una lente. El uso de estas lentes es el método más fiable que confirma nuestras predicciones. En este efecto los cúmulos de galaxias actúan como lentes que distorsionan la luz emitida por cuasares y galaxias de fondo (Fig. 2).

Dependiendo de la distancia entre la fuente de luz, la Tierra y el objeto deflector de la luz (situado entre ambos), así como la alineación entre los tres cuerpos y la propia naturaleza del deflector (su masa, luminosidad, etc.) se logran obtener resultados diversos. Pueden producirse dos o más imágenes del objeto distante emisor de luz, también puede presentarse una amplificación aparente de la intensidad de

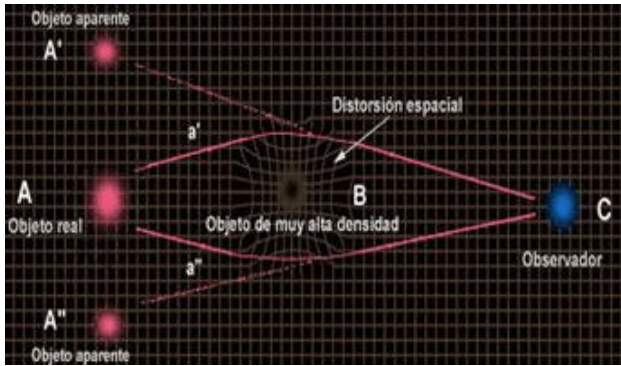


FIGURA 2. Lente gravitacional. Un objeto de gran densidad produce la curvatura del espacio a su alrededor, provocando que la luz se desvíe. Este efecto permite la detección de materia oscura revelada por las imágenes múltiples de la fuente de luz lejana [9].

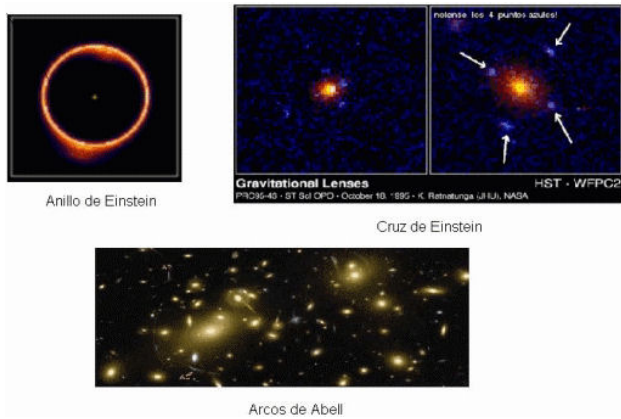


FIGURA 3. Algunos ejemplos de lentes gravitacionales. El “anillo de Einstein” se forma cuando la fuente, el deflector y el observador están perfectamente alineados (figura superior izquierda). Las otras dos figuras muestran lentes con diferentes características.

éste. En el caso de un alineamiento preciso pueden producirse los denominados “anillos de Einstein” o arcos luminosos, si el objeto deflector no es del todo puntual (ver Fig. 3).

Análisis en lentes gravitacionales favorecen el valor de [12]

$$\Omega_{DM} \approx 0.2 - 0.3. \tag{4}$$

Por otro lado, estudios sobre las anisotropías de la radiación cósmica de fondo (CMB) permiten analizar con un grado de enorme precisión la proporción de materia oscura, materia bariónica y energía oscura que existe en nuestro Universo [15]. El 15 de septiembre de 2006 un grupo de astrónomos estadounidenses mediante el satélite Chandra de rayos X detectaron en la colisión de dos grandes cúmulos de galaxias, la enigmática materia oscura que permea el Universo [16]. Los datos publicados en el 2006 son consistentes con un Universo donde la materia bariónica sería el 4 % de la masa total y la materia oscura el 23 %.

5. ¿De qué está hecha la materia oscura?

Con el paso de los años se han extendido las observaciones del Cosmos y son cada vez más precisas las que muestran la existencia de la materia oscura. Ésta no solo se agrupa con la materia estelar formando halos galácticos, sino que también existe como densidad de fondo en el Universo entero. Además, el problema no sólo es explicar las curvas de rotación, sino también es descifrar la naturaleza de este tipo de materia. La búsqueda de esta solución proporciona una importante relación entre los físicos de partículas y los cosmólogos, esto se debe a que partículas elementales son los principales candidatos viables a materia oscura en el Universo. Estas partículas son necesarias para explicar la formación de estructura.

Hasta ahora lo único que sabemos acerca de la materia oscura es que interactúa con su entorno sólo gravitacionalmente (prácticamente no colisiona con otras partículas, no absorbe ni emite luz). En lo que sigue vamos a revisar algunos de los posibles candidatos a materia oscura.

5.1. Materia oscura fría

En la actualidad los cosmólogos favorecen un modelo en el cual las partículas de materia oscura son de larga vida, frías y no colisionan, llamado modelo de “materia oscura fría”. “Larga vida” significa que el tiempo de vida debe ser comparable con la edad presente del Universo, alrededor de 14 billones de años. “Fría” se refiere a las partículas que son no relativistas en el momento en que éstas dejan de interactuar con el resto de la materia y por tanto al inicio de la época de materia dominante, de tal forma que ellas pueden agruparse gravitacionalmente. Mientras que “sin colisión” se refiere a que la sección transversal de interacción entre partículas (materia oscura y materia ordinaria) es muy pequeña, tanto que puede ser despreciable para densidades encontradas en halos de materia oscura. Las partículas están sujetas gravitacionalmente a otras y viajan sin impedimentos en órbitas de halos con un amplio espectro de excentricidades.

La idea de la formación de estructura que hoy se tiene es que las galaxias se agruparon primero a escalas menores que el horizonte de Hubble. Como éste era mucho más pequeño en la época temprana del universo comparado con el de hoy en día, los primeros objetos que se formaron (grupos o halos de materia oscura) eran mucho menores que la Vía Láctea y mucho menos masivos, tal vez del tamaño de la órbita de la Tierra. Conforme el Universo se expandió y el horizonte de Hubble creció, varios de los primeros halos surgieron y formaron estructuras a gran escala. El resultado de este proceso es la jerarquía de estructura alcanzando hasta varios órdenes de magnitud en volumen y masa. Este modelo de materia oscura fría ha sido favorecido por varias razones:

- Primero, simulaciones numéricas en la formación de estructura con materia oscura fría y sin colisión están de acuerdo con la mayoría de las observaciones en la estructura del Universo.

- Segundo, para una subclase especial de partículas conocidas como WIMP, existe una explicación natural de porqué cumplen con el requisito de abundancia.
- Una tercera razón es que existen candidatos con intereses específicos en los modelos de física fundamental.

5.2. WIMP

Los WIMP son candidatos a materia oscura fría. Estas partículas sólo interactúan gravitacionalmente con la materia bariónica. Son una variedad de partículas predichas por las teorías de unificación, la mayoría de las mismas inestables, a excepción de algunas como el neutralino. Éstas se encontraban en equilibrio térmico en las primeras trillonesimas partes de segundo después del big-bang, cuando la densidad y la temperatura era muy elevada, después abandonaron el equilibrio con una concentración que simplemente se predice por su sección transversal de aniquilación.

El proceso es el siguiente: cuando la temperatura T del Universo era mayor a la masa de los WIMP, el número de densidad de éstos era aproximadamente igual al de los fotones $n_{WIMP} \propto T^3$, los WIMP se aniquilaban con sus propias antipartículas, formándose partículas más ligeras y viceversa. Cuando la temperatura disminuyó por debajo de la masa m de los WIMP, y su número de densidad decayó exponencialmente como $n_{WIMP} \propto e^{-m/T}$, sólo una pequeña fracción de partículas ligeras tuvieron la suficiente energía cinética para crear WIMP. Como consecuencia de esto, la rapidez de aniquilación de WIMP decayó por debajo de la velocidad de expansión del Universo, hasta llegar a un punto en el cual éstas no se podían aniquilar y por tanto su densidad se mantuvo constante. Siguiendo estos argumentos, la densidad de los WIMP se puede calcular con el siguiente resultado:

$$\Omega_{WIMP} \cong \frac{7 \times 10^{-27} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}}{\langle \sigma_{an} v \rangle}, \quad (5)$$

donde σ_{an} es la sección transversal total de aniquilación de un par de WIMP en el modelo estándar, v es la velocidad relativa entre dos WIMP, y el numerador se obtiene usando el valor de la temperatura de la radiación cósmica de fondo, la constante de Newton, etc. Como era de esperarse, la densidad de WIMP disminuye conforme aumenta la sección transversal de aniquilación.

Ahora podemos entender porque los WIMP son buenos candidatos a materia oscura. Si una nueva partícula con interacciones débiles existe en la naturaleza, su sección transversal será $\sigma \approx \alpha^2/m_{\text{débil}}^2$, donde $\alpha \cong O(10^{-2})$ es la constante de acoplamiento débil y $m_{\text{débil}} \cong O(100\text{GeV})$ es del orden de la masa de W , la cual está asociada al grupo $SU(2)$ del modelo estándar. Así, uno puede obtener $\sigma \sim 10^{-9}\text{GeV}^{-2}$, y en temperaturas muy bajas v es muy cercana a la velocidad de la luz y por tanto $\langle \sigma_{an} v \rangle \cong 10^{-26}\text{cm}^3\text{s}^{-1}$. Si las partículas interactúan a través de fuerzas débiles, para la sección transversal de la fuerza débil, el valor esperado de la densidad de masa hoy en día se encuentra en el rango que abarca de 20-30 % del

total de densidad de energía del universo, como lo observado actualmente.

El mejor candidato a materia oscura perteneciente a la clase de WIMP es el **neutralino**, una partícula que surge en los modelos con supersimetría, un aspecto fundamental de las teorías de supergravedad que requieren un (aún no observado) bosón para cada fermión conocido y un fermión para cada bosón conocido. Si la supersimetría existiese hoy, las parejas tendrían la misma masa. Pero, debido a que presuntamente la supersimetría se rompe espontáneamente a altas temperaturas en el universo temprano, hoy las masas son distintas. También, muchas de las partículas super simétricas son inestables y decaen muy rápido después del rompimiento de simetría. Sin embargo, para el neutralino (con masa del orden de 100 GeV) su simetría impide que decaiga. En los modelos más simples, estas partículas son eléctricamente neutras e interactúan débilmente, lo que lo hace un candidato ideal para materia oscura.

Si la materia oscura consiste de neutralinos, grandes y sensibles detectores podrían detectar su paso a través de las vecindades de nuestro Sistema Solar, y en particular en nuestro planeta Tierra. En la actualidad existe una serie de experimentos para detectar esta partícula, como los experimentos Dama, Antares, Amanda, etc. y a mediados del 2008 el LHC entrará en funcionamiento y deberá detectar estas partículas. Un resultado semejante se da con otras partículas predichas por el modelo mínimo supersimétrico como el gravitino, axino, etc.

De cualquier forma, en los días venideros entrará en funcionamiento el acelerador de partículas LHC, del cual deberán salir varios resultados importantes. Si queremos que estas partículas supersimétricas sobrevivan como materia oscura, primero debe confirmarse la existencia de la supersimetría. Segundo, deberan aparecer las partículas candidatas con las masas y constante de interacción adecuadas y, finalmente, deberá comprobarse su densidad en el Cosmos, lo cual ya se está llevando a cabo en varios laboratorios en el mundo [21].

5.3. Candidatos extras

5.3.1. Modificaciones a la teoría newtoniana (MOND)

¿Que ocurre realmente, “materia oscura o física oscura”? En 1983, el físico israelita Mordehai Milgrom [17], propone que la teoría newtoniana de la gravedad debe modificarse para aceleraciones pequeñas ($a_0 \approx 1.2 \pm 0.1 \times 10^{-10} \text{m/s}^2$), y que la física de Newton es sólo una buena aproximación para aceleraciones mucho mayores que a_0 . El contexto de esta teoría se basa esencialmente en lo siguiente: “Una estrella que se encuentra a gran distancia del centro de una galaxia está inmersa en un campo gravitacional débil, así su masa inercial es menor a su masa gravitacional y por tanto es más fácil acelerarla para mantenerla en órbita”. Esta modificación conduce a que la segunda ley de Newton tiene que ser replanteada para pequeñas aceleraciones de la siguiente manera:

$$\vec{F} = m \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right)\vec{a}. \quad (6)$$

Con $\mu(x)$ una función que cumple con ciertas propiedades descritas a continuación.

Considerando un objeto de prueba de masa m constante, si este objeto en particular se encuentra situado a una distancia r de un objeto de masa M se tiene:

$$a = \frac{MG}{r^2}, \quad a \gg a_0,$$

$$\frac{a^2}{a_0} \approx \frac{MG}{r^2}, \quad a \ll a_0.$$

Además, si a_N es la expresión para la aceleración newtoniana

$$a \approx a_N, \quad a \gg a_0;$$

$$a \approx \sqrt{a_N a_0}, \quad a \ll a_0. \quad (7)$$

Interpolando las dos relaciones anteriores se obtiene la siguiente relación heurística:

$$\mu\left(\frac{a}{a_0}\right)a \approx a_N,$$

$$\mu(x) \approx 1, \quad \text{si } x \gg 1; \quad \mu(x) \approx x, \quad \text{si } x \ll 1$$

↑ Límite newtoniano

↑ Límite de MOND.

Un caso representativo de gran interés para su estudio está dado cuando $\mu(x) = x(1 + x^2)^{-1/2}$. Considerando la relación (7) y usando que la aceleración para una órbita circular $a = v^2/r$ se consigue que

$$v = \sqrt[4]{GMa_0} \quad (8)$$

Lo cual indica que la velocidad orbital para una estrella alejada del núcleo galáctico es constante e independiente de r , de esta manera se explicaría la planicidad observada en las curvas de rotación. Asombrosamente, tal modificación le permite explicar muchos de los datos observados sin recurrir (en la mayoría de los casos) a postular materia oscura no-bariónica, e incluso explica el origen de varias cantidades astrofísicas (de la dinámica galáctica) obtenidas empíricamente dentro de un marco teórico unificado. Su rango de aplicabilidad y éxito es muy amplio: desde las galaxias enanas esferoidales hasta supercúmulos galácticos.

Sin embargo, MOND no es una teoría basada en principios fundamentales, ya que no se deduce de ninguna teoría conocida, sino que es una propuesta fenomenológica que busca sus bases en nuevas teorías, en nueva física.

Uno de los problemas serios con que se enfrenta MOND, es su profunda incompatibilidad con la teoría general de la relatividad (TGR). Uno de los principios medulares de esta teoría es el llamado “principio de equivalencia fuerte”, el cual enuncia que la masa inercial y la masa gravitacional de un objeto son exactamente iguales. Una vez descrito este

principio se llega a la teoría de Einstein casi sin esfuerzo. Sin embargo, como se enunció anteriormente, MOND no satisface este principio, en su lugar, satisface el principio de equivalencia débil. Éste nos dice que dichas masas sólo son proporcionales. Existe un intento por hacer compatible la TGR y MOND elaborado por Beckenstein [18]. Sin embargo, para hacer dicha compatibilidad él necesita postular un lagrangiano efectivo extremadamente complicado e introduce campos escalares, que finalmente postulan también la existencia de otro tipo de materia. Como veremos más adelante, los campos escalares pueden servir como materia oscura utilizando un lagrangiano mucho más simple.

Además, en noviembre del 2002, datos del satélite Chandra, proporcionaron la evidencia que se interpreta como desfavorable a MOND y favorable para la hipótesis de la existencia de materia oscura: la “forma y orientación” de una nube de gas caliente que rodea a una galaxia estudiada por el satélite no puede explicarse de otra forma que no sea la existencia de materia oscura fría, esto es, posee velocidades lentas y por tanto es no relativista [19]. Sin embargo, los defensores de MOND argumentaban que los datos también parecen poner a la materia oscura fría en problemas. Finalmente las observaciones en el Bullet Cluster, que es el choque de dos cúmulos de galaxias con la presencia de gas a altas temperaturas fotografiado por el satélite Chandra (Fig. 4) y los dos cúmulos fuera del centro de masa del gas, son una evidencia contundente de la existencia de la materia oscura [16]. Todas estas

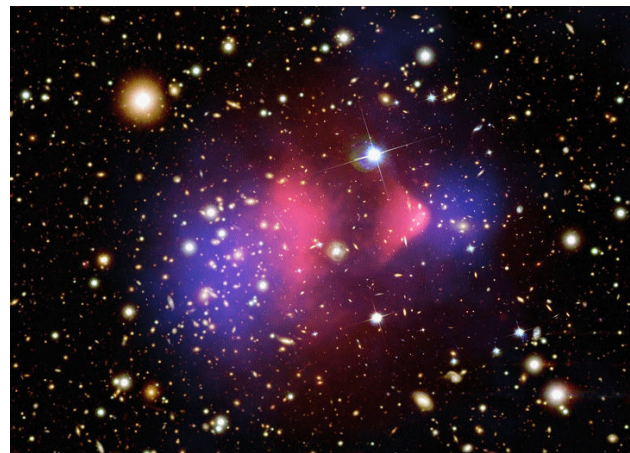


FIGURA 4. En esta fotografía tomada por el telescopio espacial Hubble se observan tres diferentes partes. La primera está en rojo y corresponde al gas fotografiado por el satélite Chandra en la región de rayos X. Por tanto se trata de gas a muy alta temperatura, calentado por el choque de los dos cúmulos de galaxias, cuya materia oscura, se representa en azul. Los cúmulos, cuyas estrellas están en blanco, se separan uno del otro a más de 1500 km/s, lo que da una clara evidencia del choque. La parte en azul se obtiene usando el método de lente gravitacional y representa la materia oscura de los cúmulos. Obsérvese cómo este tipo de materia no fue afectada por el choque, debido a su baja interacción; en cambio el gas caliente se encuentra fuera del centro de masa de los cúmulos. Esto es una evidencia de que la materia oscura está compuesta de algo diferente de lo que está hecho el gas y las estrellas.

observaciones parecen poner a MOND en serios problemas como hipótesis viable.

5.3.2. Campos escalares

Todas las teorías y modelos de unificación que se conocen necesitan la existencia de campos escalares fundamentales para su consistencia. Todas ellas, además de éstos, requieren un mecanismo para eliminarlos, pues éstos aparentemente no se ven en la naturaleza. Ejemplos de estos campos escalares son los siguientes: el modelo estándar de Weinberg-Glashow y Salam tiene asociado la partícula de Higgs, responsable de la ruptura espontánea del grupo $SU(2) \times U(1)$ a una escala de aproximadamente 100 GeV, necesaria para reproducir correctamente las interacciones electromagnéticas y débiles a bajas energías. El inflatón, probablemente el responsable de un periodo inflacionario del Universo en su etapa temprana. Sin estos inflatones no es posible resolver el problema del horizonte del Universo, ni explicar por qué no vemos defectos topológicos, ni como se formaron las semillas de las fluctuaciones primordiales del Universo. El dilatón, propuesto por todos los modelos y teorías modernas de unificación de partículas e interacciones descubiertas en el Universo, como supercuerdas, Kaluza-Klein, etc.; o el radión, que aparece en las teorías de branas, etc. Sin embargo, hasta la fecha tales campos aún no han sido detectados por algún experimento.

De igual manera, para resolver las discrepancias en cuanto a materia oscura, se propuso la idea de que los campos escalares sean candidatos para ser la materia oscura del Universo, en particular un campo escalar real denominado “oscilátón” [20]. La idea básica es que los campos escalares ultraligeros se condensan a bajas temperaturas formando condensados de Bose-Einstein, los cuales se comportan como la materia oscura fría a escalas cosmológicas, pero se comportan diferente a escalas galácticas. Esta hipótesis se conoce como condensados de Bose-Einstein como materia oscura.

Este campo escalar ha sido propuesto como un candidato viable, debido a que presenta el buen comportamiento del modelo de materia oscura fría (CDM) a grandes escalas y podrían ser los responsables de la formación de estructura observada en el Universo a escalas galácticas. El modelo de campo escalar presenta algunas ventajas sobre CDM. Por ejemplo, este campo puede explicar la escasez observada en las galaxias enanas debido a que presenta un corte abrupto en el espectro de potencias de masa. También, su autointeracción puede, en principio, explicar la suavidad de los perfiles de densidad en el núcleo de las galaxias.

Actualmente esta hipótesis de investigación se encuentra estudiando las condiciones que deben imponerse a las partículas de campo escalar para que al colapsarse formen estructuras de tamaños galácticos, y de esta manera reproducir apropiadamente las funciones de distribución de materia oscura. Para esto se requiere el uso fuerte de recursos computacionales y de conocimiento avanzado en métodos numéricos.

Otro candidato interesante es el **axión**, partícula con espín cero, carga cero y muy ligera, asociada al rompimiento espontáneo de simetría del grupo $U(1)$ de Peccei-Quinn. Los axiones que se produjeron en el Big-Bang nunca estuvieron en equilibrio térmico (éstos inmediatamente forman condensados de Bose que permean el Universo), por lo tanto son siempre no-relativistas (materia oscura fría). A pesar de que los axiones son partículas sin masa a niveles clásicos, pueden obtener una pequeña masa por efectos no perturbativos. La masa del axión m_a y su acoplamiento con la materia g_a son proporcionales a $1/f_a$, donde f_a es la constante de decaimiento que está relacionada con el rompimiento de simetría. En particular, el acoplamiento de un axión con dos fermiones de masa m_f está dado por $g_a \sim m_f/f_a$, así mismo $m_a \sim \Lambda_{QCD}^2/f_a$:

$$m_a \sim 10^{-5} \text{eV} \times \frac{10^{12} \text{GeV}}{f_a}. \quad (9)$$

La supernova SN1987 impuso el límite $f_a \geq 10^9 \text{GeV}$. Por otro lado, oscilaciones coherentes del axión alrededor del mínimo de su potencial pueden dar una importante contribución a la densidad de energía del Universo, la condición $\Omega \approx 1$ impone un límite inferior a la masa del axión implicando $f_a < 10^{12} \text{GeV}$. De la combinación de ambas constricciones se obtiene

$$10^9 \text{GeV} \leq f_a \leq 10^{12} \text{GeV}. \quad (10)$$

El límite inferior implica una constante de acoplamiento muy pequeña entre el axión y la materia ordinaria y por tanto un largo tiempo de vida media, varios órdenes mayor a la edad del Universo. El límite superior implica que $m_a \sim 10^{-5} \text{eV}$ si los axiones son un componente significativo de materia oscura.

5.3.3. Dimensiones extras

Entre las ideas más emocionantes que han surgido en la comunidad de físicos teóricos se encuentra la propuesta de modelos cosmológicos basados en la idea de las dimensiones extras, en los cuales se postula que nuestro Universo está inmerso en un sub-espacio de (3+1)-dimensiones, el cual a su vez está inmerso en un espacio de mayor dimensión. Se propone que la explicación al enigma astronómico de la materia oscura es postular la existencia de dimensiones adicionales, así esta materia misteriosa no es visible, pero su presencia en las galaxias se detecta gracias a efectos gravitacionales ejercidos en las estrellas visibles.

6. Inconsistencias en los fundamentos

El modelo estándar, combinado con la idea de materia oscura fría, puede ser puesto a prueba a diferentes escalas físicas. Las escalas mayores (miles de Mpc) son vistas en su radiación cósmica de fondo, las medidas en la distribución de energía y materia son hechas cuando su distribución era ligeramente uniforme y no había estructura. Después vienen las

mediciones de estructura a gran escala vistas en la distribución de una gama de galaxias desde varios miles de Mpc hasta varios Mpc. En estas escalas, las observaciones y la teoría son consistentes inspirando gran confianza en un panorama general.

Sin embargo, en escalas menores, desde un Mpc hasta escalas de galaxias (kpc) y más abajo, aún existe confusión: o los resultados de las pruebas son inciertos o indican un desacuerdo con lo esperado por la teoría.

Debería haber más incertidumbre en objetos más pequeños que son relativamente más cercanos, debido a que:

- En escalas grandes la gravedad gobierna, por tanto el entendimiento de nuestras predicciones involucra sólo cómputo muy simple basado en las leyes de la gravedad de Newton y Einstein. Mientras que en pequeñas escalas, las complejas interacciones hidrodinámicas de materia densa y caliente deben ser incluidas.
- Segundo, las fluctuaciones en grandes escalas son muy pequeñas y existen métodos de cómputo correctos para tales cantidades, pero en escalas de galaxias, las interacciones físicas de la materia ordinaria y la radiación son demasiado complejas. Se requiere de simulaciones altamente elaboradas en súper cómputo.

Estas aparentes contradicciones comenzaron hace varios años y no ha surgido ningún consenso de si esto representa un problema real. Desde el punto de vista teórico, simulaciones numéricas basadas en CDM predicen:

1. Una sobreproducción en sub-estructuras galácticas (galaxias pequeñas, irregulares, enanas esferoidales) que giran alrededor de unidades mayores, lo cual no se observa en el Universo; también predice la existencia de cúmulos de estrellas en regiones del espacio intergaláctico, lo cual tampoco se observa.
 - a) El número de halos esperados varía violentamente como el inverso de la masa, así varios sistemas de enanas, similares a nuestra compañera la Nube de Magallanes, deberían encontrarse más alejados.
 - b) El efecto de lentes en pequeños halos, debe ser evidente en la distribución de brillo de múltiples imágenes de una galaxia dada, pero la evidencia actual es inconclusa.
 - c) En los halos pequeños que giran en los alrededores de la Vía Láctea y otros sistemas, debería abultarse el ancho de los discos delgados en las galaxias normales por más de lo observado.
2. Los perfiles de densidad de los halos de materia oscura deberían exhibir un “pico” en el núcleo, en el cual la densidad aumenta abruptamente conforme la distancia decrece al centro, en contraste con las regiones centrales de varios sistemas observados.

- a) Cúmulos de galaxias, como los observados en los estudios de lentes gravitacionales, tienen cúspides menores en los núcleos que los encontrados en modelos computacionales de halos masivos de materia oscura.
- b) Galaxias espirales ordinarias, como la nuestra, tienen mucho menos materia oscura de la esperada en sus partes internas, al igual que algunos sistemas de superficie de bajo brillo.
- c) Galaxias enanas, como nuestras compañeras, Sculptor y Draco, tienen densidades aproximadamente uniformes en sus núcleos, en contraste con el pico en los perfiles de densidad predichos por CDM.
- d) Simulaciones hidrodinámicas producen discos de galaxias demasiado pequeños y con momento angular muy pequeño comparado con las observaciones.
- e) Varias superficies de brillo en galaxias espirales exhiben barras que rotan, las cuales son normalmente estables sólo si la densidad en el núcleo es más pequeña que la predicha.

Considerando el punto 1. La explicación es que los halos tienen un potencial central menor o comparable con la energía de ionización del hidrógeno que no puede mantener el gas foto-ionizado y formar estrellas. Así estos son efectivamente invisibles y no serían contados por los observadores. Una conclusión razonable es que la distribución observada en la fracción de brillo puede deberse a los efectos que producen otros halos pequeños.

El segundo conjunto de objeciones, basadas en el pico de densidad en las partes internas de la materia oscura fría, son observacionalmente un poco más fuertes. Existen definitivamente varios sistemas que no muestran los perfiles abruptos o la elevada concentración de masa en las partes internas del núcleo. Pueden no ser discrepancias al menos para halos de masa pequeña debido a que la materia oscura fría realmente no presenta cúspides en las partes interiores del núcleo para tales sistemas. Simulaciones de materia oscura deberán desarrollarse antes de que se pueda estar seguro acerca de si es un problema serio o no.

Por otro lado, el gran momento angular de los discos galácticos y la preponderancia de las galaxias barradas es difícil de explicar. En general, la evidencia hasta la fecha, indica que hay una discrepancia entre las predicciones de altas densidades y las observaciones en las partes internas de los halos con densidades bajas de materia oscura, en la amplia gama desde cúmulos gigantes de galaxias ($M \geq 10^{15} M_{\odot}$) hasta los más pequeños sistemas de enanas observados ($M < 10^9 M_{\odot}$).

Varias ideas han sido planteadas para resolver las discrepancias aparentes. Puede ser un proceso dinámico que ocurre a través de la interacción entre materia oscura y la materia

bariónica cerca del núcleo, el cual puede reducir las concentraciones centrales de materia oscura. Estas propuestas, aun cuando parezcan ingeniosas, conducen a resultados factibles y los mecanismos físicos a los que recurren tenderían a dispersar el viejo y denso bulto o componente esferoidal en una manera consistente con las observaciones. Una posible explicación es que tal vez no se está midiendo bien la velocidad del gas en el centro de las galaxias debido a que las órbitas de las estrellas y del gas no son circulares. Este criterio sumado a otras fuentes de corrección podrían ser la razón de una seria subestimación de la velocidad de rotación en el centro. Sin embargo, las predicciones teóricas del pico en los perfiles de densidad no son tan certeras como se hubiese supuesto. Otras propuestas como agregar propiedades a las partículas candidatas a ser la materia oscura del Universo son:

- Materia oscura auto-interactuante (SIDM) [22, 23].
- Materia oscura tibia (WDM) [24, 25].
- Materia oscura repulsiva (RDM) [26].
- Materia oscura difusa (FDM) [27].
- Materia oscura auto-aniquilante (SADM) [28].
- Materia oscura que decae (DDM) [29].

7. Conclusiones

La idea de que algún tipo de materia no-luminosa (desconocida) domine la química ordinaria de los elementos, fue abordada primero por Fritz Zwicky hace 72 años, ahora es la sabiduría más común de la estructura del Universo, y ha sido confirmada por varias líneas de evidencia. En escalas galácticas y cosmológicas, ésta se manifiesta sólo a través de interacciones gravitacionales con la materia ordinaria. Sin embargo, a escalas microscópicas, ésta se puede manifestar a través de interacciones débiles y se espera detectarse a bajas energías en los experimentos de física de partículas.

Al tratar de entender la materia oscura y la formación de estructura en la cosmología moderna, así como la física de partículas en los años 60 y 70, surge como resultado un modelo estándar (CDM), el cual ha guiado a un gran progreso en la teoría y en la experimentación/observación.

Sin embargo este modelo aún no está completo, debido a que no se cuenta con alguna teoría que tenga todas las virtudes de CDM y además evite las fallas principalmente en los centros de las galaxias. Para varios propósitos, incluyendo sus distribuciones a grandes escalas, el modelo estándar de CDM es de gran uso, mientras que para pequeñas escalas existen sugerencias que nos ayudan a evitar posibles discrepancias en la teoría.

Existe una variedad de pistas diciéndonos que el mundo no puede ser tan simple como el modelo de CDM. Mientras que el modelo de CDM puede predecir correctamente observaciones hechas desde las escalas cosmológicas mayores bajando bruscamente hasta escalas galácticas y desde universos tempranos hasta la presente época. Acontecen varias indicaciones que en escalas subgalácticas predicen que debería haber más materia oscura que la detectada sólo gravitacionalmente. Simulaciones numéricas advierten que todas las galaxias deberían contener cúspides de densidad de materia oscura en los núcleos, donde la densidad de materia oscura crece repentinamente conforme el radio decrece, y la mayoría de las observaciones no confirman esta predicción.

Se necesitan simulaciones y observaciones más precisas para confirmar si estas aparentes discrepancias son reales. Si es así, entonces existen varias sugerencias interesantes las cuales podrían predecir cúspides menores en el núcleo y, más importante, las predicciones de otras observaciones conducirían a usar las pruebas de panoramas variantes.

El modelo estándar de CDM no es la teoría fundamental, y por tanto la búsqueda de una mejor teoría está en desarrollo. De cualquier forma, el año 2008 será crucial para conocer uno de los grandes misterios de ciencia contemporánea: de que esta hecho 1/4 del Universo y cuál es la naturaleza de la materia oscura.

Agradecimientos

Este trabajo es apoyado en parte por los proyectos CONACyT número 49865-F, 54576-F, 56159-F, y por el proyecto I0101/131/07 C-234/07, a la colaboración del Instituto Avanzado de Cosmología (IAC).

*. Parte de la colaboración del Instituto Avanzado de Cosmología (IAC), <http://www.iac.edu.mx/>

1. J.P. Ostriker, P.J.E. Peebles y A. Yahil, *ApJ Letters* **193** (1974) L1.
2. T. Matos, *Rev. Mex. Fís.* (2003).
3. P.J.E. Peebles, *ApJ* **263** (1982) L1.
4. G.R. Blumenthal, S.M. Faber, J.R. Primack y M.J. Rees, *Nature* **311** (1084) 517.
5. Ernst Opik's, *Astronomische Nachrichten* **323** 574.
6. *Proc Natl Acad Sci U S A* **10** 256. PMID 1085635
7. F. Zwicky, *ApJ* **86** (1933) 217.
8. V.C. Rubin y W.K. Ford, *Astrophys. J* **379** (1970).
9. <http://www.fis.cinvestav.mx/xamador/Artikkelvetenskapen/obscura.htm>
10. A. Liddle, *An Introduction to modern cosmology* (Edit Wiley).
11. M.S. Turner, astro- ph/9901109 (1999).
12. W.L. Freedman, astro- ph/9905222 (1999).

13. Recent Results from the MAXIMA Experiment, astro-ph/0306504v1 24 Jun 2003.
14. P. de Bernardis *et al.*, *Nature* **404** (2000) 955.
15. Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Observations: Implications for Cosmology astro-ph/0603449v2 27 Feb 2007.
16. A Direct Empirical Proof Of The Existence Of Dark Matter, astro-ph/0608407v1 19 Aug 2006.
17. Mordehai Milgrom, astro-ph/0207231 (2002).
18. J.D. Bekenstein, astro-ph/0403694v6 23 Aug 2005.
19. <http://chandra.harvard.edu/index.html>
20. T. Matos, L.A. Ureña-López, astro-ph/0406194 (2004).
21. J. Ellis, *Nature* **448** (2007) 297.
22. D.N. Spergel y P.J. Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 3760.
23. E. Carlson, M.E. Machacek y L.J. Hall, *ApJ* **398** (1992) 43.
24. P. Colin y V. Avila-Reese, astro-ph/0004115.
25. P. Bode y J.P. Ostriker, Neil Turok. Halo Formation in Warm Dark Matter Models astro-ph/0010389 (2001)
26. J. Goodman, astro-ph/0003018 2 Mar 2000.
27. Wayne Hu, Rennan Barkana y Andrei Gruzinov, astro-ph/0003365 (2000).
28. Manoj Kaplinghat, L. Knox y M.S. Turner, astro-ph/0005210 29 Aug 2000.
29. astro-ph/0005206 v2 12 Oct 2000.