

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE FISICA



MACHO'S Y WIMP'S
MODELO DE TRABAJO PROFESIONAL
SOBRE MATERIA OSCURA

MACHO'S Y WIMP'S
MODELO DE TRABAJO PROFESIONAL
SOBRE MATERIA OSCURA

MODELO DE TRABAJO PROFESIONAL
PRESENTADO PARA
OPTAR AL GRADO ACADÉMICO
DE LICENCIADO
JULIO EDGAR ACISCLO JAVIER GALLEGOS ALVARADO

GUATEMALA, 1994



**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE FISICA**

**MACHO'S Y WIMP'S
MODELO DE TRABAJO PROFESIONAL
SOBRE MATERIA OSCURA**

JULIO EDGAR ACISCLO JAVIER GALLEGOS ALVARADO

**MODELO DE TRABAJO PROFESIONAL
PRESENTADO PARA
OPTAR AL GRADO ACADEMICO
DE LICENCIADO
EN FISICA**

GUATEMALA, 1994

Fecha de Aprobación: Noviembre de 1994

Vo. Bo. Asesor:

Adrián Licht
Lic. Adrián Licht Licht

TRIBUNAL

Vo.Bo. Adrián Licht
Lic. Adrián Licht

Vo.Bo. Victor Marcelino Cortez Pineda
Lic. Victor Cortez

Vo.Bo. Eduardo Alvarez
Lic. Eduardo Alvarez M.S.

Fecha de Aprobación: Noviembre de 1994

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo profesional es una realidad, gracias a la ayuda de personas que muy cercanas a la evolución del trabajo aportaron su esfuerzo.

De manera especial deseo agradecer toda su ayuda y apoyo a mi mejor amiga Rosibel Poma, solamente ella tuvo la paciencia de buscar entre cientos de revistas, los artículos para la presente investigación, al licenciado Adrián Licht Licht, por guiarne a lo largo del trabajo e indicarme la estructura del mismo.

Deseo agradecer al Profesor Scott Tremaine, director del Instituto Canadiense de Astrofísica Teórica de la Universidad de Toronto y al Profesor Michael S. Turner, investigador en NASA/Fermilab Astrophysics Center, Fermi National Accelerator Laboratory, quienes gentilmente contestaron mis cartas con claras explicaciones.

De manera más especial agradezco al programa de Becas para el Estudio Superior de la Agencia para el Desarrollo Internacional (AID/IVG) por su apoyo durante toda mi carrera y en la elaboración de este trabajo, especialmente a Ana Lucía y Francisca.

Y a la Universidad del Valle de Guatemala, por motivarme, en su manera especial, a realizar este trabajo.

**Al Padre, al Hijo y al Espíritu Santo,
las tres personas que más admiro.
A María Auxiliadora y a San Juan Bosco,
mis guías.
A mis Padres y mi Hermano,
mi apoyo, a su manera.
A Ella,
el Sol o la Luna.**

Guatemala, 1994

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS

I. INTRODUCCION.....	1
II. DESCRIPCION BASICA DE LA MATERIA OSCURA.....	4
A. Materia oscura	4

El presente trabajo profesional es una realidad, gracias a la ayuda de personas que muy cercanas a la evolución del trabajo aportaron su esfuerzo.

De manera especial deseo agradecer toda su ayuda y apoyo a mi mejor amiga: Rosibel Porta, solamente ella tuvo la paciencia de buscar entre cientos de revistas, los artículos para la presente investigación; al licenciado Adrián Licht Licht, por guiarme a lo largo del trabajo e indicarme la estructura del mismo.

Deseo agradecer al Profesor Scott Tremaine, director del Instituto Canadiense de Astrofísica Teórica de la Universidad de Toronto y al Profesor Michael S. Turner, investigador en NASA/Fermilab Astrophysics Center, Fermi National Accelerator Laboratory, quienes gentilmente contestaron mis cartas con sabias explicaciones.

De manera muy especial agradezco al programa de Becas para el Estudio Superior de la Agencia para el Desarrollo Internacional (AID/UVG), por su apoyo durante toda mi carrera y en la elaboración de este trabajo, especialmente a Ana Lucía y Francisco.

Y a la Universidad del Valle de Guatemala, por motivarme, en su manera especial, a realizar este trabajo.

3. Modelo materia oscura fría (WDM).....	30
--	----

V. LIMITE SUPERIOR EN LA MASA DEL NEUTRINO	31
--	----

VI. EXISTE MATERIA OSCURA?.....	33
---------------------------------	----

Guatemala, 1994 /SIONES	J. Gallegos. 36
-------------------------------	----------------------

VIII. BIBLIOGRAFIA	38
--------------------------	----

CONTENIDO

L INTRODUCCION

I. INTRODUCCION.....	1
II. DESCRIPCION BASICA DE LA MATERIA OSCURA.....	4
A Materia oscura.....	4
B Naturaleza de la materia oscura	9
C Partículas elementales no-bariónicas.....	11
D Materia oscura bariónica	13
III. EVIDENCIA SOBRE LA EXISTENCIA DE	16
MATERIA OSCURA.....	16
A Efectos gravitacionales	16
B Efectos dinámicos de la materia oscura.....	17
IV. ASPECTOS COSMOLOGICOS DE LA	22
MATERIA OSCURA.....	22
A Efectos sobre el parámetro de densidad W	22
B Cosmología basada en materia oscura.....	24
1. Modelo materia oscura fría (CDM)	24
2. Modelo materia oscura mixta (MDM)	28
3. Modelo materia oscura tibia (WDM).....	30
V. LIMITE SUPERIOR EN LA MASA DEL NEUTRINO.....	31
VI. EXISTE MATERIA OSCURA?.....	33
VII. CONCLUSIONES.....	36
VIII. BIBLIOGRAFIA.....	38

I. INTRODUCCION

Casi toda la información que se obtiene del universo es por radiación electromagnética, en la forma de fotones visibles provenientes de estrellas, fotones de rayos X emitidos por plasma caliente, fotones de la transición hiperfina de 21 cm en el hidrógeno, fotones de microondas de la radiación cósmica de fondo y otras formas.

La información que el hombre tiene del universo ha aumentado, desde una estrecha banda del espectro electromagnético, hasta casi captar todo el espectro. Pero no se puede dudar que la visión humana sigue siendo corta, comparada con el vasto universo, ya que la misma capacidad del hombre lo limita a no conocer el universo como es y ni siquiera poder estar seguro de que está hecho y que partículas elementales lo componen.

Por lo anterior, el concepto de *Materia Oscura* nace de forma natural en la mente del hombre. La incapacidad de ver más allá de los límites actuales, de ninguna forma puede implicar que ya no hay algo más; el hombre comprende que existe una gran cantidad de información a la cual no tiene acceso, ya sea porque no tiene la capacidad necesaria para detectar su radiación electromagnética, por ser ésta muy débil; o porque no conoce la forma de detectar esa información, porque ni siquiera sabe qué puede ser esa información.

La evidencia en el universo aumenta la sospecha de la existencia de materia oscura. La velocidad de rotación de las estrellas casi constante a partir de un radio R_0 en las galaxias, supone la presencia de un halo galáctico, suficientemente masivo para que gravitacionalmente mantenga

a las estrellas de la galaxia rotando de esa forma. Este debe ser un halo de materia oscura no bariónica, formada por nuevas partículas elementales constituyentes del universo, ya que no se puede detectar radiación electromagnética proveniente de más allá del gas galáctico. Ese comportamiento en la velocidad de rotación de las estrellas en las galaxias, implica que la materia oscura puede llegar a constituir, en sus formas no bariónica y bariónica, hasta un 90% del total de la masa del universo. El aumento periódico de la brillantez en las estrellas de fondo, hacen suponer que la Vía Láctea posee ese halo, pero que también puede estar formado por materia oscura bariónica, cuya radiación es muy débil por ser tan poco masiva.

En el aspecto teórico, el universo mantiene la gran duda sobre su topología y destino; el hombre sólo puede suponer y analizar parámetros de densidad energética (energía cinética sobre energía potencial gravitatoria), elaborando teorías y casos sobre la cantidad de masa necesaria para que el universo sea cerrado y colapse en su expansión, o dicha expansión sea indefinida de razón creciente o constante y el universo sea abierto. En este aspecto también la presencia de materia oscura no bariónica hace posible alcanzar el valor necesario para cerrar el universo, determinándose la masa de las partículas elementales que conforman este tipo de materia oscura (neutrinos). La misma cosmología estandar se acopla a la presencia de materia oscura bariónica y no bariónica en el universo, y así satisfaga la predicción de abundancia de elementos hecha por la teoría del Big Bang y la teoría inflacionaria.

II. DESCRIPCIÓN BÁSICA DE LA MATERIA OSCURA

Aunque cada día se den pasos hacia el descubrimiento de la constitución del universo, en el presente se debe admitir la idea de que el hombre no conoce de qué está hecha la mayoría del universo. Una visión positiva pretende hacer cambiar la idea de una cosmología bariocéntrica y abrir nuevos campos en la búsqueda de la verdad del universo.

Por tanto la existencia de la materia en el universo que no puede ser detectada, es un hecho. Este tipo de materia es la llamada Materia Oscura, cualquier tipo de materia que no sea observable, utilizando el significado amplio de la palabra (detección en cualquier longitud de onda electromagnética), cae bajo esta caracterización de oscura. Una definición alternativa de materia oscura, puede ser la diferencia entre la masa de un sistema astronómico, medida por su campo gravitacional, y la masa adjudicada a la materia luminosa, esa diferencia en masa se adjudica entonces a la materia oscura.

La presencia de esta materia oscura debe buscarse a grandes escalas, donde la evidencia indica que la mayor parte de la materia en galaxias es oscura. La materia visible para radiación por ondas cortas - de luz visible - oscura, que pueden ser más grandes en masa y tamaño hasta en un factor de 30 que la parte visible. La existencia de la materia oscura puede ser inferida únicamente por los efectos gravitacionales que produce en la luz proveniente de las estrellas visibles.

Un ejemplo de la existencia de materia oscura es la incapacidad de detectar las emisiones electromagnéticas de estrellas degeneradas. Dichas estrellas se encuentran en equilibrio térmico, pues la energía de la

II. DESCRIPCION BASICA DE LA MATERIA OSCURA

A MATERIA OSCURA

En el universo, toda la información que podemos obtener proviene de radiación electromagnética. Pero sería descabellado pensar en que toda materia en el universo emita radiación electromagnética detectable. Por tanto la existencia de la materia en el universo que no puede ser detectada, es un hecho. Este tipo de materia es la llamada Materia Oscura, cualquier tipo de materia que no sea observable, utilizando el significado amplio de la palabra (detección en cualquier longitud de onda electromagnética), cae bajo esta caracterización de oscura. Una definición alterna de materia oscura, puede ser la diferencia entre la masa de un sistema astronómico, medida por su campo gravitacional, y la masa adjudicada a la materia lumínica; esa diferencia en masa se adjudica entonces a la materia oscura.

La presencia de esta materia oscura debe buscarse a grandes escalas, donde la evidencia indica que la mayor parte de la materia en galaxias es oscura. la materia visible está rodeada por halos extensos de materia oscura, que pueden ser más grandes en masa y tamaño hasta en un factor de 30 que la parte visible. La existencia de la materia oscura puede ser inferida únicamente por los efectos gravitacionales que produce en la luz proveniente de las estrellas visibles.

Un ejemplo de la existencia de materia oscura es la incapacidad de detectar las emisiones electromagnéticas de estrellas degeneradas. Dichas estrellas se encuentran en equilibrio térmico, pues la energía de la

fusión de hidrógeno está balanceada por la pérdida en radiación térmica. Si esta fusión no ocurre, debido a la deficiencia en masa para producir la presión necesaria, entonces sus electrones se degeneran antes de calentarse lo suficiente para la fusión. Las estrellas que no logran fusión, llamadas "enanas café", tienen poca luminosidad producida por contracción gravitacional, la cual es mucho menor que la producida por la quema de hidrógeno. La masa crítica o masa de transición entre estrellas de fusión y enanas café es de $M=0.08M_{\odot}$ ($1 M_{\odot} = 1$ masa solar). La luminosidad de estas estrellas es tan baja que no se pueden detectar, aunque se aglomerasen en gran cantidad.

El problema aparece cuando se piensa en un nuevo tipo de materia, una que no sea oscura por la incapacidad de ser percibida, sino que sea un tipo de materia que no irradie en el espectro electromagnético. Pero toda la materia que fue producida según el modelo cosmológico Big Bang, debe emitir radiación electromagnética, y se le conoce como materia bariónica. Por tanto si se espera que exista un tipo de materia no-bariónica, esta debe tener propiedades y comportamientos distintos; en pocas palabras, su composición implica la existencia de nuevas partículas elementales que conformen este tipo de materia oscura.

Se han nominado algunas partículas para ser la constitución elemental de la materia oscura. Estas partículas deben cumplir con no emitir radiación electromagnética y poseer masa suficiente que pueda explicar parte de los efectos y diferencias en el campo gravitacional de un sistema astronómico, comparado con la masa de la parte visible.

importante en la distribución estelar debido a que la formación de estrellas probablemente

Aunque no existe evidencia de la existencia de materia oscura bariónica o no-bariónica, en las cercanías del sistema solar, este parece ser el lugar lógico para iniciar la búsqueda, ya que se tienen datos estadísticos sobre las estrellas a su alrededor.

Se crea una vecindad centrada en el Sol, que sea lo suficientemente grande para proporcionar análisis estadístico; en esta vecindad las propiedades de distribución estelares son constantes, según la homogeneidad e isotropismo del universo.

La estrella más cercana al Sol se encuentra a 1.3 pc (1 pc = 1 parsec = 3.086×10^{13} km). Se toma entonces una esfera heliocéntrica de radio 10 pc, dividiéndola en una esfera interna de radio 5 pc; se tendrán dos volúmenes. Para la esfera interior $V_p = 523.6 \text{ pc}^3$ y para la esfera exterior $V_g = 4188.8 \text{ pc}^3 - 523.6 \text{ pc}^3 = 3665.2 \text{ pc}^3$.

Según el catálogo estelar, 61 estrellas de las 300 conocidas se encuentran en la esfera pequeña y 239 más allá de los 5 pc y dentro de la esfera grande. Las densidades estelares son entonces $\rho_p = 0.12$ estrellas / pc^3 y $\rho_g = 0.065$ estrellas / pc^3 . Debido a que en distancias tan pequeñas, la densidad debe ser constante, la parte exterior debe estar incompleta, lo que hace pensar que existen estrellas difusas que aún deben ser detectadas y cierta masa oscura es proporcionada por estas estrellas.

Para estimar la densidad numérica de enanas café, es posible extrapolar la densidad numérica de las estrellas brillantes. Una suposición posible, es que la masa de transición no juega un papel importante en la distribución estelar, debido a que la formación de estrellas probablemente

no involucra física nuclear y la masa sí. Se asumirá que la razón de formación de estrellas con masa por arriba y debajo de la masa crítica son similares.

Sea $L(M)$ la luminosidad de una estrella de masa M ; además, sea $\Phi(L)dL$ la densidad numérica de estrellas en el rango $[L, L+dL]$. La densidad numérica de estrellas con masa en el rango $[M, M+dM]$, $n(M)dM$ estará dada por

$$n(M) = \Phi(L(M)) \frac{\partial L(M)}{\partial M} \quad (1)$$

Cuando M tienda a ser la masa crítica, la razón $\frac{\partial L(M)}{\partial M}$ crece y la incertidumbre en el cálculo anterior de $n(M)$ es grande; además, la medición de $\Phi(L(M))$ se dificulta cuando la luminosidad disminuye. Los resultados de este análisis determinan que por debajo de la masa crítica M_c , $n(M)$ es constante; lo que sugiere que las enanas café contribuyen con una cantidad insignificante de masa en la vecindad solar. Esta conclusión es aceptada debido a que, aunque exista un posible crecimiento en $n(M)$ a medida que M disminuye por debajo de M_c , no hay evidencia que dicho crecimiento en efecto exista.

Un método dinámico para calcular la densidad total de masa en esta región, consiste en aproximar el disco galáctico como un corte circular infinito. Todas las estrellas de la vecindad solar pertenecen al disco galáctico, el cual tiene un radio de 10 kpc pero un espesor de unos cientos de parsecs.

El potencial gravitatorio del corte a una distancia z perpendicular a su plano medio, está dado por $U(z)$. Si se asume simetría en el corte y una

distribución estacionaria (no existe dependencia de x , y o t), entonces la ecuación de Boltzman sin colisiones, se satisface con la función de estado-fase estelar a lo largo de una trayectoria, de tal manera que:

$$v \cdot \frac{df}{dz} - \frac{dU(z)}{dz} \cdot \frac{df}{dv} = 0 \quad (2)$$

multiplicando la ecuación por v e integrando respecto de la velocidad:

$$\int v^2 \cdot \frac{df}{dz} dv = \int v \frac{dU(z)}{dz} \cdot \frac{df}{dv} dv \quad (3)$$

al integrar por partes, se obtiene:

$$\frac{d}{dz} v_z \sigma^2 = - \frac{dU}{dz} v_z \quad (4)$$

donde $v_z = \int f(z, v) dv$ y $\sigma^2 = \frac{1}{v_z} \int v^2 f(z, v) dv$, teniéndose a σ^2 , como la velocidad media cuadrada en z .

Este método para medir el potencial gravitacional proporciona resultados que muestran que la razón de densidad total a densidad de objetos conocidos (estrellas y gas) es de 2.6 ± 1.5 , por tanto este análisis también concluye que no existe gran cantidad de materia oscura en la vecindad solar; aunque no se descarta la existencia de una densidad similar a la de los objetos conocidos.

A pesar de lo anterior, el supuesto halo alrededor de las galaxias, incluyendo a la Vía Láctea, puede estar compuesto de enanas cafés o "Júpiter's", es decir, estrellas no muy masivas (menos que $0.08M_{\odot}$) que

no alcanzan a producir fusión, como se muestra en la sección de clasificación de materia oscura más adelante.

B NATURALEZA DE LA MATERIA OSCURA

Una fuerte restricción en la densidad total de bariones proviene de la abundancia de elementos livianos. En la cosmología estandar de Friedmann-Robertson-Walker (FRW), $^2\text{H}, ^3\text{He}, ^4\text{He}, ^7\text{Li}$, se formaron en los primeros 1×10^3 segundos después del Big Bang, cuando la temperatura excedía los 5×10^8 K.

Las predicciones sobre abundancia del modelo estandar dependen de un solo parámetro, que es la densidad media de bariones, $\bar{\rho}_B$. La densidad observada es consistente con las predicciones del modelo estandar si y solamente si el parámetro de densidad $\Omega_B = \bar{\rho}_B / \rho_c$, donde ρ_c es la densidad crítica con un valor de 1.06×10^{29} gr/cm³; satisface los siguientes límites:

$$0.02 \leq \Omega_B (H_0/75 \text{ km}/(\text{segMpc}))^2 \leq 0.03 \quad (5)$$

Si Ω_B es mayor que 0.03, entonces la producción de ^2H sería muy pequeña. Por abajo de 0.02 la producción de $^2\text{H} + ^3\text{He}$ (el último resulta de la combustión del primero) sería demasiado grande. Variaciones en cualquier dirección tienden a producir demasiado Li.

La principal incertidumbre en Ω_B proviene del valor de H_0 . Pero, aun si H_0 es tan pequeña como 50 Km/(segMpc), las restricciones sobre Ω_B

indican que debe ser un poco inferior a 0.07 que es un valor muy pequeño para explicar los valores de Ω encontrados usando la luminosidad del Grupo Coma ($\Omega=0.25$), o los valores proporcionados al medir las fluctuaciones en las densidades y velocidades peculiares ($0.75 < \Omega < 1.15$) o el valor requerido por el modelo inflacionario ($\Omega=1$). Así, que la mayoría de la masa en el universo debe ser no-bariónica.

Una posibilidad es que la materia oscura no-bariónica, consista de partículas elementales de interacción débil, masivas y estables, conocidas como WIMP's (Weakly Interacting, Massive-stable Particles), formadas en el universo joven, caliente y denso.

Existen varios candidatos incluyendo: neutrinos masivos, neutralinos y axiones.

Dada la misma restricción sobre Ω_B , también se deduce que aunque H_0 sea tan grande como 100 km/(segMpc), Ω_B debe ser mayor que 0.01. Por tanto la razón media masa-luz del material bariónico, como se verá más adelante, excede el valor $12 \mathcal{V}_{\odot}$ ($1 \mathcal{V}_{\odot}$ = luminosidad solar) que es mayor que el valor típico de las galaxias de disco. Entonces debe existir una cantidad significativa de materia oscura bariónica en la forma de enanas cafés, o como objetos compactos (enanas blancas, estrellas de neutrones o agujeros negros); que pueden constituir el halo alrededor de las galaxias de disco. Estos objetos son conocidos como MACHO'S (Massive Compact Halo Objects) y conforman la parte bariónica de la materia oscura.

Entonces, entre MACHO's y WIMP's, la materia oscura es un concepto que abarca una gran cantidad de sistemas astronómicos y cuya

existencia pareciera no poder ser negada. Materia oscura existe, pero las restricciones deben ser colocadas en las características de las nuevas partículas elementales no-bariónicas y en la localización de los objetos compactos bariónicos no visibles.

C PARTICULAS ELEMENTALES NO-BARIÓNICAS

La materia no vista pero dinámicamente indicada, es explicada por la hipótesis de partículas no bariónicas, presentada por los argumentos de la nucleosíntesis; siendo los más reconocidos entre estas partículas, los neutrinos masivos.

Los modelos sobre la formación de la estructura galáctica utilizando neutrinos cumplen adecuadamente con la estructura vista actualmente, pero sus resultados indican una formación tardía de las galaxias. La teoría que utiliza a los neutrinos se llama teoría A y sostiene que el colapso gravitacional en un universo neutrino-dominado es anisotrópico y de esta forma lleva a la formación de galaxias, debido a la fragmentación de las estructuras de neutrinos.

Los gravitinos y fotinos son también candidatos para la masa faltante. Estos poseen una densidad numérica menor que los neutrinos y tienen masas mayores y se agrupan en sistemas más pequeños; estas características son atractivas, ya que las observaciones indican que existe masa escondida en galaxias enanas.

Los axiones, son bosones creados en frío, que a pesar de su poca masa, podrían dominar las galaxias y el universo, debido a su gran densidad numérica.

En un universo dominado por gravitinos, fotinos y axiones (AGP), las galaxias se habrían formado mucho antes que el presente, lo que soluciona el problema encontrado en el universo dominado por neutrinos.

Ambas teorías (AGP y A) son similares en definir la estructura del universo y concuerdan en la posición coherente de partículas. Aunque la estructura AGP es un poco más fragmentada que la estructura de la teoría A.

Las principales restricciones sobre la teoría A ocurre en los halos galácticos, los cuales imponen condiciones sobre los límites de la masa de los neutrinos; y aunque la masa cumpliera con esas condiciones, las fluctuaciones de los bariones en halos de neutrinos son inevitables. Los halos formados por axiones, no poseen los problemas en sus masas, y pasan sin afectar a los bariones; pero constituyen el halo masivo, gracias a su gran densidad numérica.

D MATERIA OSCURA BARIÓNICA

Observaciones sobre la órbita de estrellas y galaxias satélites cercanas, muestran que el disco visible de la Vía Láctea se encuentra rodeado de un halo oscuro extenso, quizá diez veces más masivo que las estrellas visibles y que no emite radiación electromagnética detectable.

Una hipótesis sugiere que el halo se encuentra formado por "Júpiters" o estrellas enanas cafés, las cuales son incapaces de producir la temperatura de combustión nuclear y que se mantienen en órbita por la presión de sus electrones degenerados, más que efectos gravitatorios, o podrían estar formado por restos de objetos masivos apagados, es decir, formados por MACHO's; que son opuestos al tipo de partículas elementales de la materia oscura, llamados WIMP's (neutrinos, gravitinos, fotinos o axiones).

El halo que rodea a la Vía Láctea, produce un efecto sobre el fondo del universo, el cual hace aparecer a algunas estrellas fuera de nuestra galaxia, más brillantes y que luego, gradualmente, reducen su luminosidad por períodos regulares de tiempo. La presencia de los MACHO's alrededor de la galaxia no produce una distorsión en la imagen, ya que el ángulo de refracción es pequeño; pero como otros lentes, los microlentes gravitacionales producen un cambio en la brillantez de las estrellas del fondo, el efecto ocurre cuando un MACHO pasa por la línea de luz de una estrella fuera de la Vía Láctea.

El fenómeno es igual en diferentes frecuencias lo que descarta la posibilidad de variaciones intrínsecas estelares. La duración de los eventos permite una aproximación de la masa del microlente, la cual se encuentra entre 0.03 y $0.3 M_{\odot}$; pero estos estimados son inciertos debido a los detalles ignorados sobre la velocidad relativa perpendicular a la trayectoria de la luz y la posición de la lente.

Estos objetos deben poseer masas inferiores a $0.08 M_{\odot}$, de lo contrario, podrían ser detectados con facilidad. Por otro lado, los

estimados de los rangos de la masa para los nominados a MACHO's son muy bajos para que fueran estrellas de neutrones o agujeros negros, al menos, según los mecanismos de formación de estos últimos. Por tanto, la interpretación más posible es que el halo esté constituido por enanos degenerados (enanas cafés) mantenidos en contra de la gravedad por la presión degenerada de electrones fríos.

Para mantener la predicción sobre la abundancia de bariones que hace la teoría del Big Bang, el parámetro de densidad de bariones Ω_B debe ser cercano a $0.015 (H_0 / 100 \text{ km sec}^{-1} \text{Mpc}^{-1})^2$. Pero las estrellas visibles del universo contribuyen con tan sólo $\Omega_{\text{estrellas}} \cong 0.003 h^{-2}$ ($h^{-1} = H_0 / 100 \text{ km sec}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$), así que la mayoría de bariones debe ser oscura. Extrapolando la razón masa-luz de la Vía Láctea, los halos podrían tener una densidad media de $0.017 h^{-2}$ y satisfacer las necesidades del Big Bang.

La presencia de estos MACHO's cambiaría la función inicial de masa en el pasado aumentando su pendiente, ya que la formación de estrellas, como ocurre ahora en galaxias de disco, no encierra tanto material en tan pequeños espacios rodeados de enanas cafés.

Las teorías A y AGP no predicen la posible existencia de MACHO's en los halos, sino que sostiene que éstos están constituidos por partículas elementales de materia oscura (WIMP's).

Si la teoría de la nucleosíntesis del Big Bang es correcta, los bariones sólo proporcionarían un parámetro de densidad de $0.015 h^{-2}$, lo que no proporciona la materia oscura necesaria ($\Omega > 0.1$) en dinámica de galaxias a escalas mayores. Esto es lo que permite la existencia de los dos tipos de

materia oscura: MACHO's (materia oscura bariónica), adecuada a escalas pequeñas; y WIMP's (materia oscura no-bariónica) para escalas mayores, proporcionando la suficiente masa para un universo plano.

El hecho de que la línea de mundo del fotón se ve afectada por la presencia de disturbios gravitacionales en las cercanías, provee una fuente de indicios sobre la existencia de la materia oscura en el universo y cuya presencia afecte la luz proveniente de las estrellas y galaxias del fondo. El efecto de deflexión de la luz por la materia es conocido como Enfoque Gravitacional. La primera medición del efecto de enfoque gravitacional por un cuerpo celeste, fue hecho por Arthur Eddington, en su expedición eclipse solar en 1919, confirmando la predicción de la teoría general de la relatividad.

Cuando un fotón pasa cerca de un objeto suficientemente masivo, ya sea visible o invisible, la curvatura gravitacional de su trayectoria hace aparecer a la fuente del fotón en una posición alterada. El ángulo de la curvatura provocada por el objeto es el doble del radio del Schwarzschild (radio Gravitacional $r=2M$) del objeto masivo dividido por el parámetro de impacto (momento angular/momento lineal). De esta forma, un objeto masivo distorsionará la imagen de objetos del fondo, trabajando como una lente. Una ventaja del enfoque gravitacional es que no es necesario asumir que un sistema galáctico se encuentra en un estado propio equilibrado, ya que el paso del fotón por el sistema es mucho más pequeño que el tiempo de órbita del sistema.

El sistema de enfoque gravitacional presenta dos posibilidades en el estudio de la materia oscura: primero, por los efectos gravitacionales que

III. EVIDENCIA SOBRE LA EXISTENCIA DE MATERIA OSCURA A EFECTOS GRAVITACIONALES

El hecho de que la línea de mundo del fotón se ve afectada por la presencia de disturbios gravitacionales en las cercanías, provee una fuente de indicios sobre la existencia de la materia oscura en el universo y cuya presencia afecte la luz proveniente de las estrellas y galaxias del fondo. El efecto de deflexión de la luz por la materia es conocido como Enfoque Gravitacional. La primera medición del efecto de enfoque gravitacional por un cuerpo celeste, fue hecho por Arthur Eddington, en su expedición eclipse solar en 1919, confirmando la predicción de la teoría general de la relatividad.

Cuando un fotón pasa cerca de un objeto suficientemente masivo, ya sea visible o invisible, la curvatura gravitacional de su trayectoria hace aparecer a la fuente del fotón en una posición alterada. El ángulo de la curvatura provocada por el objeto es el doble del radio del Schwarzschild (radio Gravitacional $r=2M$) del objeto masivo dividido por el parámetro de impacto (momento angular/momento lineal). De esta forma, un objeto masivo distorsionará la imagen de objetos del fondo, trabajando como una lente. Una ventaja del enfoque gravitacional es que no es necesario asumir que un sistema galáctico se encuentra en un estado propio equilibrado, ya que el paso del fotón por el sistema es mucho más pequeño que el tiempo de órbita del sistema.

El sistema de enfoque gravitacional presenta dos posibilidades en el estudio de la materia oscura: primero, por los efectos gravitacionales que

se pueden detectar por corrimientos al rojo en galaxias de fondo, localizando la materia oscura en el frente, es decir, se construye un mapa de materia oscura; luego, se conoce la masa de la lente de materia oscura, si se conoce la distribución de la materia. La primera parte es un resultado natural de las aplicaciones del sistema de lente gravitacional. Para el segundo, se necesita conocer el centro de la lente; una vez conocido este centro, se asume una simetría circular con una parametrización radial en la distribución de la masa. Con este efecto gravitacional sobre corrimientos de galaxias, se obtiene una prueba consistente y útil de la materia oscura en el universo.

B EFECTOS DINAMICOS DE LA MATERIA OSCURA

(donde H_0 , es la constante de Hubble). Más precisamente, La velocidad de rotación v_c de las estrellas en círculos de radio R alrededor de los centros galácticos, se puede determinar por el corrimiento Doppler de las líneas espectrales de la luz estelar. Al buscar materia oscura en una galaxia, se compara la aceleración centrípeta ($\frac{v_c^2}{R}$) con la aceleración gravitacional debida a la masa lumínica.

Si se toma la razón masa-luz del disco galáctico, tan grande como se pueda; aun con esta suposición exagerada, la velocidad dicha es menor en un factor de 3 que la velocidad observada. Esto indica que el campo gravitacional calculado para el disco, asumiendo que no existe materia oscura, es muy pequeño para producir la rotación observada

Esto lleva a concluir que debe existir materia oscura en las galaxias para proporcionar el resto de la masa. La materia oscura debe estar a un radio mayor que aquel para las estrellas; de esta forma se mantiene el hecho observacional de que la velocidad de rotación es más o menos constante a partir del segundo tercio de la galaxia. Si la materia oscura se encontrara dentro de la galaxia, es decir, a radios menores o iguales que aquellos de las estrellas, el movimiento sería kepleriano, es decir, la velocidad de rotación sería proporcional al recíproco de la raíz cuadrada de R ($v_c(R) \propto 1/\sqrt{R}$).

Los anteriores resultados pueden poner un límite inferior a la razón masa-luz Υ , el cual depende de la distancia d a la galaxia, la cual es determinada por su velocidad radial y la relación $v = H_0 d$.

(donde H_0 , es la constante de Hubble). Más precisamente,

$$v = H_0 d + v_p \quad (6)$$

donde v_p es la velocidad particular de la galaxia tomada como 500 km/seg.

Las formas obtenidas para las curvas de rotación (v_c vs. R), sugieren que la materia oscura se distribuya en halos alrededor de las estrellas visibles.

Se puede tomar una distribución esférica para la densidad $\rho(R)$ de los halos de materia oscura, la cual se puede ajustar variando el radio del cuerpo R_c y la densidad central ρ_0 .

Para el grupo Coma (Coma Cluster), se tiene que la masa dentro de un radio $R=1.3$ Mpc es de $5 \times 10^{14} M_\odot$. Obteniéndose un Υ para el grupo

Coma de $\Upsilon = 360 \Upsilon_{\odot}$, que es mucho mayor que lo esperado de $10 \Upsilon_{\odot}$, a partir de las observaciones de la luz oscura

$$\rho(R) = \frac{\rho_0}{1 + R^2/R_c^2} \quad (7)$$

Aun con la contribución del gas intergaláctico, la masa oscura en el grupo debe ser al menos un 80% de la masa total. La masa oscura en un

La masa dentro de un radio R es proporcional a este radio, pero se debe alcanzar un radio máximo, si no la masa sería infinita. Por métodos cinemáticos en galaxias satélites, se ha determinado que este radio máximo es de 100 kpc.

Los centros de grupos de galaxias son las estructuras más grandes en equilibrio en el universo. La densidad fase-espacio $f(x,v,t)$ de los grupos de galaxias sigue la ecuación sin colisiones de Boltzman (Eq. 2). De un análisis para una simetría esférica, estática y una distribución de velocidad isotrópica, se tiene:

Por ejemplo, si la aceleración gravitacional se modificara de la ecuación newtoniana:

$$\frac{d}{dz} v_z \sigma^2 = -\frac{dU}{dz} v_z \quad (3)$$

donde se identifican $v_z = \int f(z,v) dv$ y $\sigma^2 = \frac{1}{v_z} \int v^2 f(z,v) dv$ teniendo a σ^2 como la velocidad media cuadrada en z. De cálculos observacionales se obtienen estos valores y se puede estimar la masa $M(R)$ a partir de:

$$G M(R)/R^2 = dU/dR \quad (8)$$

Para el grupo Coma (Coma Cluster), se tiene que la masa dentro de un radio $R=1.3 \text{ Mpc}$ es de $5 \times 10^{14} M_{\odot}$. Obteniéndose un Υ para el grupo

Coma de $\Upsilon = 300 \Upsilon_{\odot}$, que es mucho mayor que lo esperado de $10 \Upsilon_{\odot}$, a partir de las observaciones de la luz emitida.

Aun con la contribución del gas intergaláctico, la masa oscura en el grupo debe ser al menos un 80% de la masa total. La masa oscura en un grupo galáctico no se puede adjudicar totalmente a los halos, ya que los grupos se verían desmembrados por fuertes corrientes gravitacionales. Entonces, la materia oscura debe formar un gran cuerpo donde las galaxias del grupo se desplazan, es decir, el halo galáctico y la parte lumínica se encuentran en un gran cuerpo oscuro que los mantiene estables y por el cual se mueven.

Es posible que la aparente evidencia dinámica de la materia oscura provenga de la incapacidad de las leyes convencionales de dinámica y gravedad.

Por ejemplo, si la aceleración gravitacional se modificara de la ecuación newtoniana:

$$a = \frac{GM}{R^2} \quad (9)$$

a una nueva ecuación donde se introdujera una distancia fundamental R_0 :

$$a = \frac{GM}{R^2} + \frac{GM}{RR_0} \quad (10)$$

entonces la velocidad alrededor de M a distancias mucho mayores que R_0 , sería:

$$v_0 = \sqrt{\frac{GM}{R_0}} \quad (11)$$

lo que concuerda con la pendiente casi cero en la curva de velocidad de las galaxias. Pero, como Υ es constante cuando no existe materia oscura, entonces esta velocidad es proporcional a la raíz cuadrada de la luminosidad total de la galaxia, lo que contradice el comportamiento observado de $v_o \propto L^{1/4}$. Se podría construir otro tipo de aceleraciones, pero sería una conjetura y no refutaría la posibilidad de la existencia de materia oscura en la galaxia.

Una medida de la importancia de la materia oscura en la cosmología FRW es el parámetro de densidad Ω , definido como la razón de la densidad media del universo respecto de la densidad crítica

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c} \quad (13)$$

donde $\rho_c = 3 H_0^2 / 8\pi G = 1.05 \times 10^{-26} \text{ g/cm}^3$

El parámetro de densidad Ω es un índice de la energía cinética de la expansión de Hubble respecto del campo de fuerza de la atracción gravitatoria.

Un universo en expansión con $\Omega < 1$, seguirá en expansión por siempre mientras, con $\Omega > 1$, el universo eventualmente llegará a un colapso. Estas afirmaciones asumen una constante cosmológica nula.

La geometría del universo depende de Ω . Si $\Omega > 1$, el universo es cerrado y la geometría es esférica, de otro modo, si $\Omega < 1$, el universo es abierto y la geometría es hiperbólica.

IV. ASPECTOS COSMOLOGICOS DE LA MATERIA OSCURA

A EFECTOS SOBRE EL PARAMETRO DE DENSIDAD Ω

Según la cosmología estándar FRW (Friedmann-Robertson-Walker), a escalas suficientemente grandes, el universo es homogéneo e isotrópico. Las estrellas, galaxias y grupos, son irregularidades a pequeñas escalas, por tanto debe existir un radio r^* , dentro del cual la densidad media sea constante en cualquier cubo de arista r^* . Un valor apropiado para r^* es de 50 Mpc, o tan sólo 1% del tamaño del universo visible ($c/H_0 = 4000$ Mpc).

Una medida de la importancia de la materia oscura en la cosmología FRW es el parámetro de densidad Ω , definido como la razón de la densidad media del universo, respecto de la densidad crítica

$$\Omega = \frac{\bar{\rho}}{\rho_c} \quad (12)$$

donde $\rho_c = 3 H_0^2/8\pi G = 1.06 \times 10^{-29} \text{ gr/cm}^3$.

El parámetro de densidad Ω es la razón de la energía cinética de la expansión de Hubble respecto del valor absoluto de la energía potencial gravitatoria.

Un universo en expansión con $\Omega < 1$, seguirá en expansión por siempre; mientras, con $\Omega > 1$, el universo eventualmente llegará a un colapso. Estas afirmaciones asumen una constante cosmológica nula.

La geometría del universo también se define a partir de Ω . Si $\Omega > 1$, el universo es cerrado y la geometría es esférica; de otro modo, si $\Omega < 1$, el universo es abierto y la geometría es hiperboloidal.

La hipótesis inflacionaria sugiere, junto a la cosmología FRW, que $\Omega=1$. La edad de un universo FRW está dada por

$$t_0 = f(\Omega)/H_0 \quad (13)$$

donde $f(\Omega=0) = 1$ y $f(\Omega=1) = 2/3$. La edad de las estrellas más antiguas es de $t^* = 15 \pm 3$ miles de millones de años. Entonces, para mantener la consistencia de que $t^* < t_0$; y si $\Omega=1$, H_0 debe ser menor que $45 \pm 9 \text{ km seg}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$, mucho menor que el valor utilizado de 75 y cercano al límite inferior determinado para el rango de H_0 (este argumento no es tan fuerte sin una alternativa para FRW y mejores mediciones para H_0).

Debido a que la geometría del universo depende de Ω , la densidad media $\bar{\rho}$ puede determinarse de medidas geométricas, como la dependencia que tiene la brillantez con la distancia de las galaxias. Pero los efectos de la evolución galáctica sobre la brillantez opacan los efectos de la distancia. Un método más prometedor es la restricción sobre la geometría por medio de lentes gravitacionales.

La densidad media es el producto de la densidad lumínica media por la razón media masa - luz (Υ); por tanto, Ω puede ser determinado por medio de la razón de las razones de masa-luz:

$$\Omega = \bar{\Upsilon} / \Upsilon_c \quad (14)$$

donde $\Upsilon_c = 1200 \Upsilon_{\odot}$. Tomando $\bar{\Upsilon}$ media, similar a la del Grupo Coma, $\Upsilon = 300 \Upsilon_{\odot}$, se tendría un valor de $\Omega=0.25$; lo que permitiría que el universo fuera abierto.

Tomando la restricción de la ecuación 5 sobre la Ω_B , si ésta tiene un valor de 0.01, la γ_B estará dada por

$$\gamma_B = \Omega_B * 1200 \gamma_{\odot} \quad (15)$$

lo que presenta el valor antes mencionado de $12 \gamma_{\odot}$ para la razón masa-luz bariónica.

B COSMOLOGIA BASADA EN MATERIA OSCURA

1. MODELO MATERIA OSCURA FRIA (CDM)

El modelo conocido como CDM, es una teoría de construcción elegante que une muchos aspectos de la estructura actual del universo con procesos físicos que tuvieron lugar cuando el universo tenía tan sólo 10^{-35} segundos de edad. La cantidad y naturaleza del material que llena el universo, y las propiedades de la densidad de fluctuaciones iniciales de las cuales las galaxias y grupos se desarrollaron, según el CDM, está representada en su mayoría por materia invisible, únicamente detectable por sus efectos gravitacionales sobre estrellas y galaxias. La cantidad de la materia no se encuentra bien definida por las observaciones, pero podría ser suficiente hasta para parar la expansión cósmica. Esta materia podría estar constituida por materia bariónica, como ya se discutió; pero el modelo CDM sugiere la existencia de materia no-bariónica; en la cual se basa él mismo, además de un tiempo simple de fluctuaciones iniciales por las cuales muchos aspectos de la formación estructural pueden ser calculados. En este modelo, se espera que todos los aspectos de escala grande en el universo reflejen mucho de las primeras fases de evolución.

Se supone que el universo proveniente del Big Bang, no poseía escalas características, intrínsecas a él; entonces su radio de curvatura debió de haber sido mucho más grande que su propio tamaño actual, y las amplitudes de las fluctuaciones fueron independientes de la longitud de onda. Esta suposición fue explicada por la idea de una fase inflacionaria en las fases iniciales del Big Bang. Según este argumento, el universo se vio sometido a una etapa de expansión exponencial, durante el cual su tamaño aumentó enormemente. Como un resultado, su curvatura presente es inconmensurablemente pequeña y las fluctuaciones que generaron las galaxias, pudieron ser originadas por fluctuaciones cuánticas. Por lo anterior no se puede suponer una preferencia en la escala, para la producción de galaxias.

Un universo espacialmente plano se obtiene mucho más fácilmente si la densidad media de masa tiene el valor crítico para parar la expansión. El análisis dinámico, de secciones anteriores, muestra una medición de la masa por galaxia, que si fuera extrapolada al universo como un todo, provee no más del 10-20% de la densidad crítica. Además, la teoría estandar de nucleosíntesis de Big Bang explica la abundancia observada de elementos livianos, solamente si la densidad de materia bariónica es menor que el 10% del valor crítico. El argumento en contra de un universo puramente bariónico se encuentra en las fluctuaciones, las cuales se habrían borrado, ya que tendrían una escala galáctica.

En el modelo estandar CDM, se asume un universo en el cual el 5-10% de la densidad crítica lo provee la materia ordinaria, y el resto lo provee el conjunto de partículas frías, débilmente interactivas. Además,

las fluctuaciones se asumen invariantes con la escala, según lo discutido anteriormente. Esta suposición concuerda muy bien con el modelo inflacionario. En la cosmogonía resultante, los primeros objetos en formarse fueron gases y materia oscura, similares en masa a las galaxias enanas. Estos objetos se fueron uniendo por los efectos de la gravedad, para formar nuevos cuerpos, más masivos, formando así las galaxias, y éstas agrupándose en grupos galácticos. La ventaja de este modelo es la estructura jerárquica de formación y la carencia de necesitar fluctuaciones que desarticulen objetos grandes; problema que sufren los modelos bariónicos. Ya que el crecimiento en estructura a gran escala en el universo CDM, se debe sólo a efectos gravitacionales, concuerda con el descubrimiento que el espectro de la radiación de fondo se comporta exactamente como un cuerpo negro. Este descubrimiento coloca serias limitaciones sobre la cantidad de energía que se le pudo inyectar al medio intergaláctico en las épocas primarias y elimina a todos los modelos no gravitacionales. Además las galaxias aparentan moverse hacia grupos galácticos, como se espera en una estructura basada en gravedad.

El agrupamiento gravitacional produce cuerpos CDM con masas desde pequeñas galaxias hasta grupos grandes de galaxias, y se producen en gran abundancia. La parte luminosa de las galaxias se forma cuando el gas irradia su energía, se coloca en el centro de su halo CDM y rota en el proceso.

La anisotropía de escala angular grande de las microondas de fondo cósmico (CMB, i.e., Cosmic Microwave Background) provee una prueba fundamental en el espectro de la fluctuación primordial desde la época de

la inflación. El modelo de universo plano, de vacío dominante, dado por el CDM es una alternativa para considerar, con la cual se podrían ajustar los datos observados en estructuras de gran escala con las restricciones de tiempo. El hecho de que el modelo CDM mantenga un Ω de aproximadamente 0.2, requiere que la constante cosmológica Λ sea no nula; es decir, que el universo dominado por el vacío en este modelo, presente una energía no nula para el nivel de referencia, que es la energía en el vacío. Esto permite analizar el comportamiento de fluctuaciones en el vacío, provocando la creación de partículas y sus correspondientes antipartículas. El hecho de tener una constante cosmológica no nula, se debe a que se desea mantener un universo plano; asumiendo que la constante cosmológica contribuye con la fracción restante para mantener un universo plano, que usa el CDM; esta proporción está dada por $\lambda = \Lambda c^2/3H_0^2$, donde la constante cosmológica está dada por $\Lambda = 3H_0^2(1-\Omega)/c^2$.

Por tanto, para mantener un universo plano, sugerido por las Microondas de Fondo Cósmico (CMB), en un modelo CDM, se debe agregar al parámetro de densidad, el factor de la energía del vacío que es proporcional a la constante cosmológica; manteniendo así $\Omega + \Lambda = 1$, y un universo plano.

Un universo CDM desarrolla una escala característica, aunque sus condiciones iniciales no dependen de la escala. La escala aparece cuando CDM empieza a dominar gravitacionalmente el universo, sobre la presión producida por la radiación de la explosión inicial; dicha escala es $10(\Omega h^2)^{-1}$. El modelo predice que la aglomeración debería ser relativamente débil en escalas mucho mayores que ésta. Por tanto,

reduciendo el valor en la densidad o el valor de la constante de Hubble en un universo CDM, aumenta el grado de agrupamiento en escalas grandes.

Con lo anterior y una constante cosmológica adecuadamente escogida, es posible crear un universo plano CDM que explique las estructuras a grandes escalas, sea compatible con la inflación y con experimentos de microondas de fondo, y que sea suficientemente viejo para poder contener los grupos de estrellas más viejos, aun para razones de crecimiento tan altas como $H_0=80 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

2. MODELO MATERIA OSCURA MIXTA (MDM)

La reciente detección de la anisotropía a gran escala en las microondas de fondo, coincide con las predicciones basadas en un esquema inflacionario en el cual la materia oscura es una mezcla de componentes fríos y calientes.

Una predicción genérica de la inflación es que el Universo contiene una densidad crítica de materia. La nucleosíntesis primordial indica que poco menos del 90% de densidad crítica es no bariónica; pero la inflación no indica qué tipo de materia oscura debe ser. Se asume que la materia oscura puede tomar una de dos formas: materia oscura fría (CDM; partículas frías masivas) o materia oscura caliente (HDM; neutrinos livianos). Los modelos con CDM, proveen una base para la formación de la estructura, que coincide bastante bien con las observaciones. La amplitud de las fluctuaciones de la densidad en CDM deben ser compensadas para que las fluctuaciones en masa fueran menores que las

fluctuaciones en la densidad numérica galáctica; pero el factor de compensación (la magnitud relativa de estructura en las componentes oscuras y visibles) resultó mucho menor que el factor medido recientemente por el satélite COBE (Cosmic Background Explorer). Una teoría unificada de partículas donde se incluyen tanto la materia oscura fría como la caliente, trata de explicar la diferencia en el factor de compensación y mantener la estructura a gran escala de CDM. Esta teoría unificada CPHDM (Cold Plus Hot Dark Matter) toma un 1/4 HDM y 3/4 CDM, para explicar el factor de compensación, obteniéndose valores que son buenos ajustes a la densidad de agrupamiento, correlaciones de agrupamiento, flujo de las galaxias y el espectro infrarrojo. Un modelo CPHDM con proporciones 1/4 HDM y 3/4 CDM; conduce excelentes resultados al explicar la formación de estructuras a grandes escalas; pero le queda por explicar los resultados de los experimentos en anisotropía de microondas de fondo en escalas angulares menores; experimentos, cuyos resultados predice muy eficazmente el CDM. Otros modelos de materia oscura mixta dan porcentajes distintos, 70% para CDM y 30% para HDM; pero los ajustes son similares, al igual que las mejoras al modelo CDM.

El modelo MDM (identificación moderna del CPHDM) parece resolver un problema en estructuras de gran escala, que consiste en la discrepancia entre los estimados de Ω para escalas pequeñas y grandes. Velocidades de campo son reducidas en escalas pequeñas, pero aumentan en escalas grandes. Las velocidades obtenidas en CDM, han sido difíciles

de conciliar con las observaciones; pero el modelo MDM reduce las velocidades y es un buen ajuste para los valores observados.

Esto, junto con el éxito en ajustar otros resultados en grandes escalas (factores de compensación, conglomeración de galaxias, etc), hace de este modelo MDM una alternativa al modelo CDM, afinando las aproximaciones.

3. MODELO MATERIA OSCURA TIBIA (WDM)

Este modelo basa la estructura del universo en la presencia de materia oscura no bariónica, cuya masa sea menor que la del electron (repose, 1eV). Esta reducción en la masa de la materia no bariónica en el modelo CDM, busca conciliar los problemas de velocidades tan altas a grandes escalas, que son predichas por el CDM pero que no coinciden con las observaciones. Estas partículas llevarían a una forma de ver al universo, desde estructuras de gran escala hacia abajo, evitando el sentido jerárquico que posee el CDM; pero conciliaría los problemas con las velocidades altas a gran escala.

Después de esto, la densidad de masa de los neutrinos presentes en el universo está dada por el producto de la masa del neutrino m_ν y la densidad de número de neutrinos n_ν .

Esta densidad de masa no puede sobrepasar la densidad de masa observada en las galaxias, ya que los neutrinos se encuentran presentes en grandes cantidades, $\rho_{max} = 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ de aquí se tiene

$$\rho_{max} = m_\nu n_\nu \quad (16)$$

obteniéndose de aquí el límite superior para la masa del neutrino:

V. LIMITE SUPERIOR EN LA MASA DEL NEUTRINO

Los leptones son partículas acompañadas de neutrinos, los tres conocidos son: el electrón e y neutrino asociado ν_e , el muón y su neutrino ν_μ y el τ -leptón y (presumiblemente) su neutrino ν_τ .

El fondo cosmológico de los neutrinos es muy difícil de detectar, solamente por medio de observaciones indirectas, tales como el límite superior sobre la densidad de masa total en el universo puede dar como resultado la densidad numérica de los neutrinos. Un exceso neto de neutrinos sobre antineutrinos sería, en principio, aun más difícil de detectar. La asimetría de bariones η puede ser explicada adjudicándosela a las condiciones iniciales, las cuales resultan en asimetría real. Otra explicación es postular que el universo empezó tan sólo con materia y no antimateria. Pero una explicación más convincente, consiste en asumir que el universo comenzó con cantidades iguales de materia y antimateria. La Gran Teoría Unificada (GUT) ofrece esta posibilidad, ya que no involucra procesos que no conservan el número bariónico. De la asimetría de bariones (en especial leptones) discutida, la densidad de masa de los neutrinos pesados ρ_ν , está dada por el producto de la masa del neutrino m_ν y la densidad numérica del neutrino n_ν .

Esta densidad de neutrinos no puede sobrepasar la densidad de masa observada en los grupos de galaxias, ya que los neutrinos se encuentran presentes en dichos grupos, por tanto, $\rho_{\max} \approx 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ de aquí se tiene

$$\rho_\nu = m_\nu n_\nu = m_\nu \eta n_\gamma < \rho_{\max} \quad (16)$$

obteniéndose de aquí el límite superior para la masa del neutrino:

VI. EXISTE MATERIA OSCURA?

$$m_\nu < 60 \text{ GeV} \quad (17)$$

lo que hace de los neutrinos unos excelentes candidatos para representar la masa faltante en el universo. No se puede obtener una densidad suficiente con neutrones livianos ($< 50 \text{ eV}$), ya que el principio de exclusión de Pauli lo impide. Por tanto, los adecuados para representar la falta de masa en el universo, son los neutrinos pesados.

Se muestran, que arrojan una tendencia plana (pendiente casi nula) después de cierto radio R_0 , es esta tendencia de las curvas de rotación, la que presenta la evidencia de la existencia de materia extra en la galaxia o la acción de alguna fuerza que no se tomó en cuenta, para poder ser explicada. Al colocar un halo de materia oscura alrededor de la galaxia se evita el comportamiento kepleriano en ella y por el efecto gravitatorio de dicha masa oscura la velocidad de rotación se mantendrá constante y eso explica dicho comportamiento. En este análisis no se toma en consideración fuerzas no gravitacionales que podrían afectar la dinámica del gas galáctico. Estas fuerzas no se toman en cuenta debido al orden de magnitud, el cual es mucho menor que los efectos de la gravitación.

Existe la teoría que los campos magnéticos creados por el propio gas galáctico, que puede ser considerado un conductor casi perfecto por la abundancia de electrones y la capacidad de soportar corrientes, pueden ser los causantes de los cambios en la dinámica del gas a los alrededores del disco galáctico. Para que el campo magnético del disco afecte la dinámica del gas, su magnitud tendría que ser de 1 picrotesla o al menos 0.3 picrotesla, para escalas de 10 a 30 kpc, estos campos magnéticos son muy grandes y su existencia se puede tomar tan reputable como la existencia de

VI. EXISTE MATERIA OSCURA?

La existencia de la materia oscura se encuentra respaldada por dos tipos de evidencia discutida: la evidencia dinámica en escalas grandes y los efectos gravitacionales. La evidencia dinámica se basa en la rotación de las galaxias espirales de disco, como la Vía Láctea. Las gráficas de velocidad de rotación de estrellas dependientes del radio al cual se encuentran, muestran una tendencia plana (pendiente casi nula) después de cierto radio R ; es esta tendencia de las curvas de rotación, la que presenta la necesidad de la existencia de materia extra en la galaxia o la acción de alguna fuerza que no se tomó en cuenta, para poder ser explicada. Al colocar un halo de materia oscura alrededor de la galaxia se evita el comportamiento kepleriano en ella y por el efecto gravitatorio de dicha masa oscura la velocidad de rotación se mantendrá constante y eso explicaría dicho comportamiento. En este análisis no se toma en consideración fuerzas no gravitacionales que podrían afectar la dinámica del gas galáctico. Estas fuerzas no se toman en cuenta debido al orden de magnitud, el cual es mucho menor que los efectos de la gravitación.

Existe la teoría que los campos magnéticos creados por el propio gas galáctico, que puede ser considerado un conductor casi perfecto por la abundancia de electrones y la capacidad de soportar corrientes, pueden ser los causantes de los cambios en la dinámica del gas a los alrededores del disco galáctico. Para que el campo magnético del disco afecte la dinámica del gas, su magnitud tendría que ser de 1 picotesla o al menos 0.8 picotesla; para escalas de 10 a 30 kpc, estos campos magnéticos son muy grandes y su existencia se puede tomar tan reputable como la existencia de

la materia oscura, la cual no sólo explica este efecto dinámico en la rotación de galaxias, sino que explica otros fenómenos como la irregularidad en el parámetro de densidad y la falta aparente de material bariónico; proporcionando la posibilidad de partículas de interacción débil no bariónicas.

Los modelos de materia oscura también tienen grandes defectos al predecir el comportamiento a distintas escalas. Como se presentó, las velocidades de las galaxias a grandes escalas, predichas por el modelo de materia fría oscura sobrepasan en mucho a las velocidades propias observadas para dichas galaxias.

A pesar de los problemas que tengan los modelos de materia oscura, éstos son compatibles con cosmologías ya existentes como FRW y el modelo Lemaître. De hecho, son más que compatibles, presentan una alternativa y soluciones a varios acertijos que la cosmología ha tenido por mucho tiempo. Aunque a primera vista la materia oscura aparezca como la solución a los problemas cosmológicos y cosmogónicos, debe tenerse cuidado; manteniéndose e investigando teorías alternas para explicar los fenómenos del universo. Se presenta un ejemplo muy ilustrativo, de cómo la materia oscura en su definición más general puede o no ser la solución a problemas donde es aparente:

Al observar la trayectoria de Urano se notaban efectos residuales inexplicables en su movimiento, esto llevó en 1846 a la localización de Neptuno. Es decir, en aquel entonces Neptuno era parte de "Materia Oscura" y por sus efectos gravitacionales sobre Urano, fue determinada su existencia. En este caso el razonamiento funcionó. Para Mercurio,

existían observaciones de anomalías en su perihelio, anomalías que también se adjudicaron a un nuevo planeta en la órbita de Mercurio, el planeta llamado "Vulcan"; que por supuesto no existe. Entonces, fue Einstein en 1916, quien explicó esas anomalías en el movimiento de Mercurio, como consecuencia de la teoría de la relatividad y no por la presencia de Materia Oscura.

Como puede verse, el razonamiento de materia oscura, puede o no funcionar para explicar comportamientos del universo y siempre hay que considerar explicaciones alternas.

Contestando la pregunta, la materia oscura sí existe y es un hecho irrefutable. Los factores que se ponen en duda sobre la materia oscura, son: si su composición es bariónica o no bariónica, si los modelos cosmológicos son dependientes de la escala o son una mezcla de varios modelos, o si el hecho de que exista materia oscura sólo depende de la incapacidad de detectarla.

VII. CONCLUSIONES

1. La materia oscura existe. Y se puede dar en dos grandes clasificaciones: materia oscura bariónica, formada por enanas cafés, agujeros negros o júpiteres; y la materia oscura no bariónica, formada por nuevas partículas elementales masivas que no emiten radiación electromagnética.
2. La materia oscura excede a la masa luminica en, virtualmente, todos los sistemas galácticos a gran escala.
3. La masa de la materia oscura contribuye al parámetro de densidad Ω , en tal forma que puede llegarse a un valor de la densidad de masa crítica necesaria para cerrar el universo.
4. El modelo CDM, junto con la constante comológica Λ , puede mantener un universo de geometía plana.
5. La pendiente casi nula en las curvas de rotación de galaxias se debe a la existencia de un halo de materia oscura, que por su efecto gravitacional, contrarresta la tendencia kepleriana del movimiento. Pueden existir, además, fuerzas magnéticas que contribuyan al movimiento del gas en galaxias, pero su efecto tan sólo acompaña al de la materia oscura.

6. El halo que rodea a la Vía Láctea produce un efecto de microlente en las estrellas de fondo, lo que indica la posible existencia de materia oscura bariónica en el halo. *Possible Gravitational Microlensing of a Star in the Large Magellanic Cloud*, Nature 365, pp. 621-3 (1993)
7. La determinación de un límite superior para la masa del neutrino ($m < 60 \text{ GeV}$) hace de los neutrinos pesados los mejores candidatos para constituir la masa faltante debido a la asimetría bariónica (leptones). *Exclusion of Gravitational Microlensing by Dark Matter in the Galactic Halo*, Nature 355, pp. 627-8 (1992)

BATTANER, E., J.L. GARRIDO, M. MEMBRADO & E. FLORIDO, *Magnetic Fields as an Alternative Explanation for the Rotation Curves of Spiral Galaxies*, Nature 360, pp. 652-3 (1992).

BINNEY, J., *Dark Matter versus Magnetism*, Nature 360, pp. 624 (1992).

DAVIS, M., G. EFSTATHIOU, C.S. FRENK & D.M. WHITE, *The Fate of Cold Dark Matter?*, Nature 356, pp. 489-94 (1992).

DAVIS, M., F.T. SUMMERS & D. SCHIEGEL, *Large Scale Structure in a Universe with Mixed Hot and Cold Dark Matter*, Nature 359, pp. 393-6 (1992).

FRIEMAN, J.A. & M. CRADWOHL, *Dark Matter and the Equivalence Principle*, Physical Review Letters 67, pp. 2726-9 (1991).

VIII. BIBLIOGRAFIA

ALCOCK, C., et al., Possible Gravitational Microlensing of a Star in the Large Magellanic Cloud, Nature 365, pp. 621-3 (1993).

AUBOURG, E., et al., Evidence for Gravitational Microlensing by Dark objects in the Galactic Halo, Nature 365, pp. 623-5 (1993).

BATTANER, E., J.L. GARRIDO, M. MEMBRADO & E. FLORIDO, Magnetic Fields as an Alternative Explanation for the Rotation Curves of Spiral Galaxies, Nature 360, pp. 652-3 (1992).

BINNEY, J., Dark Matter versus Magnetism, Nature 360, pp. 624 (1992).

DAVIS, M., G. EFSTATHIOU, C.S. FRENK & D.M. WHITE, The End of Cold Dark Matter?, Nature 356, pp. 489-94 (1992).

DAVIS, M., F.J. SUMMERS & D. SCHIEGEL, Large Scale Structure in a Universe with Mixed Hot and Cold Dark Matter, Nature 359, pp. 393-6 (1992).

FRIEMAN, J.A. & M. GRADWOHL, Dark Matter and the Equivalence Principle, Physical Review Letters 67, pp. 2726-9 (1991).

Matter Physical Review Letters 64, pp. 2744-6 (1990)

GORSKI, K.M., J. SILK & N. VITTORIO, Cold Dark Matter Confronts the Cosmic Microwave Background; Large Angular Scale Anisotropies in $\Omega_0 + \lambda=1$ Models, Physical Review Letters 68, pp. 733-6 (1992).

MPLOTT, A.L. et al. Cluster Analysis of the Nonlinear Evolution of
 GRIEST, K., Calculations of Rates for Direct Detection of Neutralino Dark Matter, Physical Review Letters 61, pp. 666-9 (1988).

GRIEST, K. & M. KAMIONKOWSKI, Unitarity Limits on the Mass and Radius of Dark Matter Particles, Physical Review Letters 64, pp. 615-8 (1990).

HOFFMAN, Y. & S.A. BLUDMAN, Can Unclustered Matter Close the Universe?, Physical Review Letters 52, pp. 2087-9 (1984).

PEEBLES, P.J.E., 1971. PHYSICAL COSMOLOGY, Princeton
 HOGAN, C.J., In Search of the Halo Grail, Nature 365, pp. 602-3 (1993)

KEPHART, T.W. & T.J. WEILER, Luminous Axion Clusters, Physical Review Letters 58, pp. 171-3 (1987). *Schramm, Editors, North-Holland, New York, 1988, p. 105*

IPSER, J. & P. SIKIVIE, Can Galactic Halos Be Made of Axions?, Physical Review Letters 50, pp. 925-7 (1983). *Journal for Galactic Large Scale Structure and Possible Dark Matter Matter, Physical Review*

MADSEN, J., Phase-Space Constraints on Bosonic and Fermionic Dark Matter, Physical Review Letters 64, pp. 2744-6 (1990).

MADSEN, J. & R. EPSTEIN, Improved Astronomical Limits on the Neutrino Mass, Physical Review Letters 54, pp. 2720-2 (1985).

MELOTT, A.L., et. al., Cluster Analysis of the Nonlinear Evolution of Large-Scale Structure in an Axion/Gravitino/Photino-Dominated Universe, Physical Review Letters 51, pp. 935-8 (1983).

MISNER, C.W., K.S. THORNE, J.A. WHEELER, 1971, GRAVITATION, W.H. Freeman and Company, San Francisco, Estados Unidos.

PEACOCK, J., Fresh Light on Dark Ages, Nature 355, pp. 203-4 (1992).

PEEBLES, P.J.E., 1971, PHYSICAL COSMOLOGY, Princeton University Press, New Jersey, Estados Unidos.

PHYSICAL COSMOLOGY, Les Houches 1979, Session XXXII, Roger Balian, Jean Audouze and David N. Schramm, Editors, North-Holland, New York, Estados Unidos.

PRESS, W.H. & B.S. RYDEN, Single Mechanism for Generating Large-Scale Structure and Providing Dark Missing Matter, Physical Review Letters 64, pp. 1084-7 (1990).

SCHAEFER, R.K. & Q. SHAFI, Evidence for some Hot Dark Matter?, Nature 359, pp. 199-200 (1992).

SCHECK, F., 1983, LEPTONS, HADRONS AND NUCLEI, North-Holland Physics Publishing, New York, Estados Unidos.

SCIAMA, D.W., Precision Estimate of Cosmological and Particle Parameters in the Decaying-Dark-Matter Hypothesis, Physical Review Letters 65, pp 2839-41 (1990).

SREDNICKI, M. & J. SILK, Cosmic-Ray Antiprotons as a Probe of a Photino-Dominated Universe, Physical Review Letters 53, pp. 624-7 (1984).

SREDNICKI, M. & S. THEISEN, Cosmic Quarkonium: A Probe of Dark Matter, Physical Review Letters 56, pp. 263-5 (1986).

STECKER, F.W. & Q. SHAFI, Axions and the Evolution of Structure in the Universe, Physical Review Letters 50, pp. 938-31 (1983).

STECKER, F.W. & Q. SHAFI, Implications of a Class of Grand-Unified Theories for Large-Scale Structure in the Universe, Physical Review Letters 53, pp. 1292-5 (1984).

STUBBS, C.W., Experimental Limits on Any Long Range Nongravitational Interactions between Dark Matter and Ordinary Matter, Physical Review Letters 70, pp. 119-22 (1993).

TAYLOR, A.N. & M. ROWAN-ROBINSON, The Spectrum of Cosmological Density Fluctuations and Nature of Dark Matter, Nature 359, pp. 396-9 (1992).

TREMAINE, S., The Dynamical Evidence For Dark Matter, Physics Today, February 1992, pp. 38-36

TURNER, M.S. & L.M. WIDROW, Homogeneous Cosmological Models and New Inflation, Physical Review Letters 57, pp. 2247-40 (1986).

TURNER, M.S. & F. WILCZEK, Inflationary Axion Cosmology, Physical Review Letters 66, pp. 5-8 (1991).

TYSON, A., Mapping Dark Matter with Gravitational Lenses, Physics Today, June 1992, pp. 24-32.