

MODELO DE MATERIA OSCURA POR VACÍO CUÁNTICO

Author Manuel Abarca Hernández
@mabarcaher1

Diciembre de 2014

ABSTRAT

Title: Dark Matter Model by Quantum Vacuum

The idea of the model is quite simple:

The physical vacuum is a quantum system with a minimum energy when it is in his ground state. When the space has a gravitational field the space state increase his energy levels and the mass of the space begin to increase as well. The mass of the space would be the dark matter (D.M.).

Model refers to the same conception about 'vacuum' as the Quantum Electrodynamics (QED), which consider the space full of virtual electrons and virtual positrons.

Therefore it is easy to think that there is virtual particles which feel the gravitational forces named virtual gravitons. It is logical to think that the gravitational field excites the vacuum states in a way that "the vacuum would be heavier, the more intense gravitational field". The hypothesis of this DM model is that virtual gravitons are Dark Matter.

The paper is organised in five parts:

The first one studies the spin speed star on galaxies and it is got the density

formula for DM. $\rho(r)_{DM\ HALO} = \frac{K_G}{4\pi r^2}$

The second one explains the model theoretically in a simple way because in my opinion the ultimate theory of DM will be explain by the Quantum Gravity, which there is not exist yet.

In the third one it is got the formula, which connects DM density function with

intensity of gravitational field. $\rho(r)_{DM\ HALO} \approx \frac{|E(r)|^2}{4\pi G^2 K_G}$

The fourth one explains the coherence between the DM model and experimental evidences known about DM especially DM in Bullet Cluster and other clusters.

The fifth one proposes six experimental tests to check the model with astronomical measures.

The purpose this paper is to introduce the model. To show a new origin of DM and try to convince the reader that it is worth to check the model with experimental evidences.

1. INTRODUCCIÓN

La idea del modelo es muy sencilla:

El vacío físico es un sistema cuántico con energía y masa mínima en su estado fundamental, es decir en ausencia de campo gravitatorio. Cuando el espacio es atravesado por un campo gravitatorio, es excitado a niveles de energía superiores comenzando a aumentar su masa, la cual depende de la intensidad de dicho campo. La masa del espacio sería la M.O.

El modelo se refiere a la misma concepción del vacío de la Electrodinámica Cuántica (EDC). Como debe saber el lector que tenga algunas nociones sobre EDC, esta teoría considera que el espacio está repleto de los positrones virtuales o electrones virtuales.

Similarmente, de acuerdo a la Cromodinámica Cuántica el espacio está lleno de partículas virtuales llamadas gluones. Es fácil hacer la extrapolación al campo gravitatorio de forma que los gravitones virtuales serían las partículas virtuales creadas por este campo.

Este artículo postula que la Materia Oscura (M.O.) son los gravitones virtuales creados en el espacio cuando está sometido a un campo gravitatorio, de modo que el espacio sería más masivo cuanto más intenso fuera el campo gravitatorio que lo atraviesa. Podría decirse que el modelo está basado en una concepción del espacio propia de la gravedad cuántica. Como es sabido la teoría de la gravitación cuántica aún no está completada a pesar de los esfuerzos de los más brillantes físicos durante los últimos decenios.

En este trabajo, absolutamente original, el autor partiendo de una idea muy general de gravitones virtuales trata de mostrar como esas partículas que son generadas por el propio campo gravitatorio pueden explicar con coherencia las extrañas propiedades que las observaciones experimentales han constatado posee la M.O.

El artículo está organizado en cinco partes:

En la primera se estudia la curva de rotación de las estrellas y se obtiene la fórmula para la densidad de masa total en el disco y para el halo la densidad de M.O. $\rho(r)_{MO\ HALO} = \frac{K}{4\pi r^2}$

En la segunda parte se explica el modelo teórico de una forma heurística y simple ya que habrá de ser la Teoría de la Gravitación Cuántica la que explique toda la física de la MO.

En la tercera parte se deduce la fórmula que expresa la relación local que existe entre la densidad de masa de un determinado punto con la intensidad del campo gravitatorio en dicho

punto, la fórmula es $\rho(r)_{MO\ HALO} \approx \frac{|E(r)|^2}{4\pi G^2 K}$

En la cuarta parte se explica la coherencia de la teoría con todas las evidencias experimentales que el autor conoce, especialmente las extrañas propiedades que la MO exhibe en el cúmulo Bala y en general en los cúmulos.

En la quinta parte se proponen seis pruebas experimentales que servirían para contrastar la validez del modelo teórico.

Si todos los resultados de dichas pruebas experimentales coincidieran con las previsiones del modelo, creo que habría motivo suficiente para considerar a este modelo teórico un serio candidato para explicar la naturaleza de la Materia Oscura.

2. CURVA DE VELOCIDADES DE ROTACIÓN DE LAS ESTRELLAS EN UNA GALAXIA

Inicialmente fijamos la atención en la curva de velocidades de rotación de las estrellas en torno al centro galáctico. En el Anexo puede verse una gráfica con varias docenas de curvas de rotación de estrellas en sus galaxias respectivas. Partiendo de esas curvas de rotación se puede aceptar el modelo simplificado de la figura de abajo.

En este modelo se observan dos regiones claramente delimitadas: Núcleo y Disco.

Núcleo

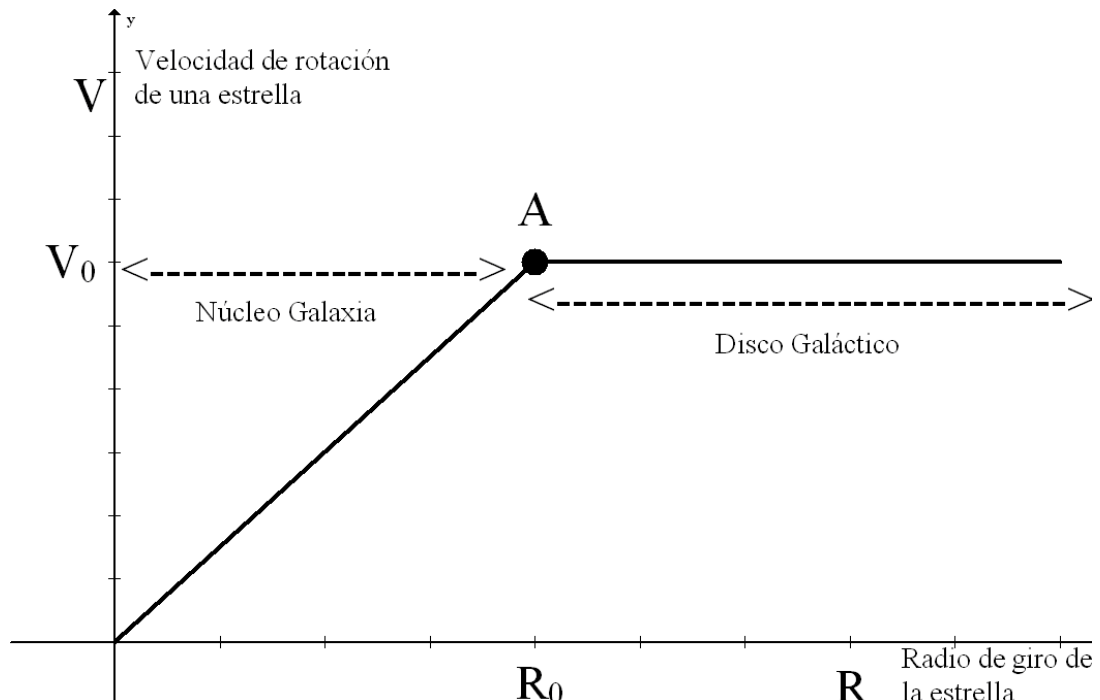
En general está establecido experimentalmente que el núcleo de una galaxia tiene una distribución de masa ordinaria con relativa simetría esférica y una densidad de masa visible constante y mucho mayor que en el disco galáctico. Además, la velocidad angular de las estrellas en el núcleo es aproximadamente constante.

Disco Galáctico

En el disco galáctico la velocidad de rotación de sus estrellas es sensiblemente constante e inexplicablemente elevada si consideramos solo la materia visible.

En todas las galaxias en las que se ha medido su masa y su curva de rotación se puede afirmar que existe un gran defecto de masa. En general en las galaxias se ha estimado el 90% de materia oscura frente a un 10% de materia visible.

Modelo de curva de velocidades de rotación de estrellas entorno al centro de la galaxia.



En general en este artículo, R representa el radio de giro de una estrella entorno al centro galáctico, y M representa la masa encerrada por la esfera de radio R . En todo el artículo se especificará el tipo de masa a la que nos referimos: masa total, ordinaria u oscura.

DENSIDAD DE MATERIA EN EL NÚCLEO, EN EL DISCO Y EN EL HALO

Núcleo Galáctico

Dado que en esta región $\omega = Cte$, de la tercera ley de Kepler expresada como

$$\omega^2 = \frac{GM}{R^3} = \frac{4\pi\rho G}{3} = Cte. \quad \text{se deduce que en esta región, existe una densidad de masa}$$

constante.

Experimentalmente se ha determinado que en esta zona la masa visible tiene una alta simetría esférica y una densidad aproximadamente constante. En consecuencia, en esta región la velocidad angular constante se puede explicar razonablemente bien con las cantidades observadas de masa visible.

En general en todo el artículo vamos a hablar indistintamente de masa visible o masa ordinaria, la cual técnicamente es conocida como masa bariónica. Rigurosamente no debemos identificar masa visible con masa ordinaria ya que en el espacio interestelar existen nubes de gases fríos que no son visibles, pero en este artículo no es necesario tal nivel de precisión.

Disco Galáctico

En esta región es donde se aprecia un gran defecto de masa ya que la velocidad de rotación es muy alta, de 200 km/s a 300 km/s. en proporción a la masa visible existente.

Obtenemos ahora la función densidad de masa que explica la curva de rotación en esta zona.

Dado que en esta región $v = Cte$, del Teorema del Virial expresado como $v^2 = \frac{GM}{R} = Cte$.

se deduce que la masa encerrada por la órbita de la estrella, es directamente proporcional al radio de giro de la estrella.

Del punto A de la gráfica se deduce que $\frac{M_0}{R_0} = \frac{M}{R} = K_{GALAXIA} = \frac{V_0^2}{G} = Cte$ Donde M_0

representa la masa total encerrada por el núcleo cuyo radio es R_0 , V_0 es la velocidad de giro de las estrellas en la zona del disco galáctico y K_G es la constante asociada a una galaxia.

Poniendo como ejemplo la Vía Láctea, y considerando que el Sol tiene una velocidad de traslación de 220 km/s resulta un valor para $K_{VIA LACTEA} = 7,25 \cdot 10^{20} \text{ Kg/m}$.

Teniendo en cuenta $M = K \cdot R \rightarrow dM = K_{GALAXIA} dr$ llegamos a la conclusión de que la

$$M = \rho \cdot V \rightarrow dM = \rho 4\pi r^2 dr$$

densidad de masa total $\rho(r)_{MASA-TOTAL} = \frac{K_{GALAXIA}}{4\pi r^2}$

Donde $\rho(r)$ es la función densidad de masa total (ordinaria + oscura).

Halo Galáctico

El halo es una extensa región de la galaxia que empieza en la frontera del disco y termina en las regiones intermedias entre galaxias.

Por ejemplo experimentalmente se ha determinado que el radio de la Vía Láctea, hasta la frontera del Disco es de unos 50 000 años-luz, mientras que el radio del halo es de 1 millón de años-luz, que es el punto medio hacia la galaxia de Andrómeda.

En el halo apenas hay estrellas o gas y la cantidad de M.O. es mucho mayor que la de materia ordinaria, por lo tanto es una aproximación aceptable considerar que la densidad de

M.O. es $\rho(r)_{M.O. HALO} \approx \frac{K_{GALAXIA}}{4\pi r^2}$. Por integración se obtiene que $Masa_{M.O. HALO} \approx K_G \cdot (R_{HALO} - R_{DISCO})$ donde R_{HALO} es el radio del halo y R_{DISCO} es el radio del disco.

Igualmente se tiene la función $Masa_{M.O. HALO}(r) \approx K_G \cdot (r - R_{DISCO})$. Donde r es variable y pertenece a la región del halo.

En el epígrafe 8.2 desarrollaremos un razonamiento que nos conducirá a concluir que en realidad $K_G \cdot (R_{HALO} - R_{DISCO})$ es una cota superior para la materia oscura del halo y por tanto $K_G \cdot R_{HALO}$ es una cota superior para la masa total de una galaxia. En el epígrafe 9.2 pondremos una prueba experimental basada en esta predicción del modelo.

3. MODELO DE MATERIA OSCURA POR VACÍO CUÁNTICO

Como es sabido, la Electrodinámica Cuántica (EDC) considera el espacio como un lugar repleto de partículas virtuales sensibles a la fuerza electro-débil. Según esta teoría, las partículas virtuales son aquellas que existen durante un breve lapso de tiempo dado por la desigualdad $\Delta E \cdot \Delta t \leq \frac{\hbar}{2}$. Podríamos decir que estas partículas violan el principio de

conservación de la energía en el breve lapso de tiempo que establece la anterior desigualdad.

La teoría de la Cromodinámica Cuántica aumenta la familia de partículas virtuales a aquellas que son sensibles a las fuerzas entre quarks, los gluones. Es lógico pensar que el espacio debe albergar también partículas virtuales sensibles a las fuerzas gravitatorias, a las cuales podríamos llamarlas gravitones virtuales.

Por otra parte, también parece lógico que el campo gravitatorio excite los estados del vacío de manera que “el vacío sea más masivo cuanto más intenso sea el campo gravitatorio al que está sometido”. Así pues, el modelo de M.O. que proponemos, podría justificar cualitativamente

la función $\rho(r)_{MASA-TOTAL} = \frac{K_{GALAXIA}}{4\pi r^2}$ de la densidad de masa total (ordinaria y oscura) de la

región del Disco galáctico y $\rho(r)_{M.O.} \approx \frac{K_{GALAXIA}}{4\pi r^2}$ en la región del halo.

Para explicar esta interacción entre la gravedad y el vacío vamos a exponer el modelo electrón físico y electrón desnudo establecido por la Electrodinámica Cuántica (EDC).

La distinción entre electrón físico y electrón desnudo se pudo constatar cuando se dispuso de aceleradores de partículas con la suficiente energía para penetrar en el electrón físico. Es decir, cuando los electrones de altísima energía se colisionan contra los electrones sufren una dispersión que no puede explicarse con un potencial tipo Coulombiano porque cuando el electrón penetra en el interior del electrón físico, la carga neta que “nota” el electrón proyectil es mayor que la de un electrón físico. Sin embargo, electrón físico es casi puntual porque los positrones virtuales apantallan al electrón desnudo, en un espacio muy pequeño de forma que la fuerza eléctrica torna Coulombiana a una pequeñísima distancia entorno del electrón desnudo.

Hay dos diferencias fundamentales entre la fuerza eléctrica y la gravitatoria.

- La intensidad de la fuerza gravitatoria es mucho menor que la fuerza eléctrica, recordemos que la constante de gravitación es casi veinte órdenes de magnitud inferior a la constante eléctrica.
- El apantallamiento del electrón desnudo se efectúa en un espacio pequeñísimo entorno al electrón desnudo gracias a que los positrones virtuales son de signo contrario y disminuyen rápidamente la carga total del electrón físico. Debido a que la carga del positrón virtual es de signo contrario a la del electrón, la carga neta del electrón físico es menor que la del electrón desnudo.

Por el contrario, la fuerza gravitatoria es siempre atractiva y por lo tanto los gravitones virtuales son también atractivos y por eso la masa total (masa ordinaria + masa oscura) va aumentando a medida que consideramos un volumen de espacio cada vez mayor entorno a la materia ordinaria.

Llegados a este punto, podríamos pensar que este mecanismo de generación de masa es inestable ya que la masa es proporcional al radio de la esfera de espacio considerada.

Por ahora me limitaré a dos breves apuntes para solucionar esta incómoda divergencia.

- En el epígrafe 8 se explicará un poco más la solución basándose en el concepto de halo, por ahora diremos solamente que la influencia en el alcance de la capacidad de generación de MO de una galaxia, está limitada por sus galaxias vecinas, digamos que en el espacio intergaláctico, el campo gravitatorio de una galaxia es contrarrestado por el campo gravitatorio de sus galaxias vecinas.
- El espacio localmente es Euclídeo, pero globalmente no lo es. Puede que a escala de galaxia o incluso a escala de cúmulo de galaxias pueda ser aproximadamente válido, pero a mayores escalas es totalmente incorrecto aplicar el modelo Euclídeo al espacio.

Si consideramos que el volumen de una esfera es proporcional al cubo de su radio es fácil comprender la enorme diferencia entre la cantidad de MO que puede haber en una esfera del tamaño del Sistema Solar frente a la cantidad que puede contener una esfera del tamaño de una galaxia.

Así pues, con este modelo de M.O. es muy fácil justificar que la fuerza gravitatoria está regida por la masa ordinaria a escala de Sistema Solar, y sin embargo a escala de galaxia hay que contabilizar la MO para poder explicar las curvas de rotación estelares ya que a esta escala la MO es mucho más abundante que la materia ordinaria.

4. ASIMETRÍA ENTRE MATERIA OSCURA Y MATERIA ORDINARIA

Un aspecto bastante llamativo de este modelo es el hecho de que la materia oscura es generada por la materia ordinaria. Es decir la materia oscura no puede existir independientemente de la materia ordinaria.

Hasta donde yo sé, por ahora no se ha descubierto una región con solo materia oscura, lo cual es bastante sorprendente, máxime teniendo en cuenta que la MO es el 90 % del total de materia estimada en el Universo. Este modelo explicaría esta situación de forma natural y sencilla.

Otro hecho experimental bastante difícil de explicar con otros modelos de materia oscura es la constante de proporcionalidad que parece existir en todas las galaxias (independientemente de la masa ordinaria que tengan) entre su masa ordinaria y su masa oscura. Sabido es que la proporción estimada es 90 % M.O. y 10 % masa ordinaria. Aunque podrían proponerse razones de isotropía para justificar esa proporción en todas las galaxias, yo veo más plausible que sea debido a que existe un mecanismo físico que relaciona ambas clases de materia.

Es muy difícil de aceptar que la isotropía del Universo, solo con la ley de la gravedad haya generado una proporción constante de masas oscura y ordinaria en las galaxias sabiendo además que las masas de las galaxias difieren en varios órdenes de magnitud, desde las más pequeñas hasta las más grandes.

Para tratar de explicar el papel asimétrico que existe en mi modelo entre la MO y la Materia ordinaria he pensado otra vez en los conceptos electrón desnudo y electrón físico, vamos a ello.

Para empezar, diremos que la EDC le da existencia real al mar de partículas virtuales, ya que a partir de ellas es como se crean las partículas reales, previo pago de la energía que Einstein calculó. Dicho con otras palabras, no es cierto que la energía pueda transformarse en materia según la ecuación $E=mc^2$, sino que esa energía es la que es necesaria para convertir una partícula virtual en una partícula real. Por tanto, hay que concluir que las partículas virtuales son entidades físicas “reales” en el sentido de que son necesarias para generar las partículas bariónicas.

Pasamos a explicar como la existencia de la MO depende de la masa ordinaria en el modelo que proponemos, para ello nos basamos en el modelo del electrón físico y el electrón desnudo de la EDC.

El electrón desnudo provoca un gran desequilibrio en la neutralidad del mar de partículas virtuales en su proximidad más inmediata ya que se rodea de una nube de positrones virtuales. De modo que la carga del electrón desnudo es mayor que la del electrón físico. Pero la cuestión clave es que el electrón desnudo crea entorno a sí mismo una carga de positrones virtuales, es decir el electrón desnudo le da existencia real a esos positrones virtuales en tanto en cuanto ellos son los que determinan la carga final del electrón físico.

Resumiendo: En el espacio vacío, el mar de positrones y electrones virtuales no se manifiesta eléctricamente. Sin embargo entorno a un electrón los positrones virtuales se manifiestan eléctricamente apantallando al electrón desnudo.

Usando estas ideas para el modelo de MO cabe destacar dos aspectos:

- En el entorno de una estrella, o una galaxia, el campo gravitatorio de la masa ordinaria es el que produce la creación de MO ya que dicho campo excita las partículas virtuales, del mismo modo que el electrón desnudo excita los positrones virtuales que le rodean.
- En un gran vacío de galaxias, el campo gravitatorio es muy débil lo cual conduce a que la MO esté en valores mínimos y el gradiente de densidad de materia oscura sea cero. Así pues según este modelo, no es posible la existencia de una concentración de MO ni la existencia de un campo gravitatorio central generado exclusivamente por MO.

Dada la naturaleza del efecto lente gravitatoria, sabemos que este efecto podría detectar un campo gravitatorio central, a escala de galaxia o cúmulo de galaxias, de materia oscura pura. En el epígrafe 9 plantaremos una prueba experimental para chequear el modelo basándonos en la propiedad de la MO que acabamos de explicar.

Según este modelo ¿En qué sentido la MO es real? En el mismo en el que los positrones virtuales son reales, ya que son éstos los que disminuyen la carga del electrón desnudo para producir la carga neta del electrón físico.

Así pues podemos decir que la MO es real porque es la responsable del 90% del campo gravitatorio de una galaxia, aunque según el modelo son simples partículas virtuales.

Así pues la materia ordinaria crea la MO en el espacio que le rodea, a pesar de que ésta última es el 90% de la masa global de la galaxia.

Como vemos este modelo explica de forma muy natural y sencilla la imposibilidad de que exista MO sin la presencia de materia ordinaria, e igualmente justifica la proporción entre MO y masa ordinaria ya que establece un mecanismo físico que genera la MO a partir de la masa ordinaria.

La explicación definitiva de la M.O. de una galaxia y de la curva de rotación de sus estrellas sólo será posible cuando dispongamos de una teoría completa de gravedad cuántica que desgraciadamente aún no existe.

5. RELACIÓN ENTRE LA FUNCIÓN DENSIDAD DE MASA Y LA INTENSIDAD DE CAMPO GRAVITATORIO

Como hemos visto en epígrafes anteriores la función densidad para la masa total en el disco galáctico viene dada por

$$\rho(r)_{MASA-TOTAL} = \frac{K_{GALAXIA}}{4\pi r^2}$$

Dado que en el halo la materia ordinaria se encuentra en una proporción insignificante se puede considerar que la fórmula

$$\rho(r)_{M.O. HALO} = \frac{K_{GALAXIA}}{4\pi r^2}$$
 es muy buena aproximación.

5.1 INTENSIDAD DE CAMPO GRAVITATORIO

Para una distribución de masa con simetría esférica, la intensidad de campo gravitatorio según se establece en el teorema de Gauss viene dada por la expresión $\vec{E} = \frac{GM}{r^2} \hat{r}$ donde M es la masa total que encierra la esfera de radio r. Como es sabido, la dirección del campo es radial. En adelante sólo consideraremos el módulo de la intensidad de campo $E(r) = \frac{GM}{r^2}$

En una galaxia, la simetría esférica para su distribución de masa se puede considerar una aproximación aceptable, así pues vamos a usar la expresión anterior para calcular la intensidad de campo en un punto del disco o del halo galáctico.

Como anteriormente hemos justificado, en el disco y en el halo, la masa total encerrada por una esfera de radio r es $M_{Total}(r) = K_G \cdot r$ que sustituida en la expresión de la intensidad de campo nos da $E(r) = \frac{GK_G}{r}$

5.2 EXPRESIÓN DE LA DENSIDAD DE MASA EN UN PUNTO EN FUNCIÓN DE LA INTENSIDAD DE CAMPO GRAVITACIONAL

Usando la expresión que acabamos de obtener para la intensidad de campo $E(r) = \frac{GK_G}{r}$ y

sustituyendo r en la fórmula de la densidad de masa resulta $\rho(r)_{M_{Tot}} = \frac{E^2}{4\pi G^2 K_G}$. Gracias a

esta expresión queda exactamente establecida la dependencia de la densidad de masa con la intensidad de campo en cualquier punto del disco o del halo galáctico.

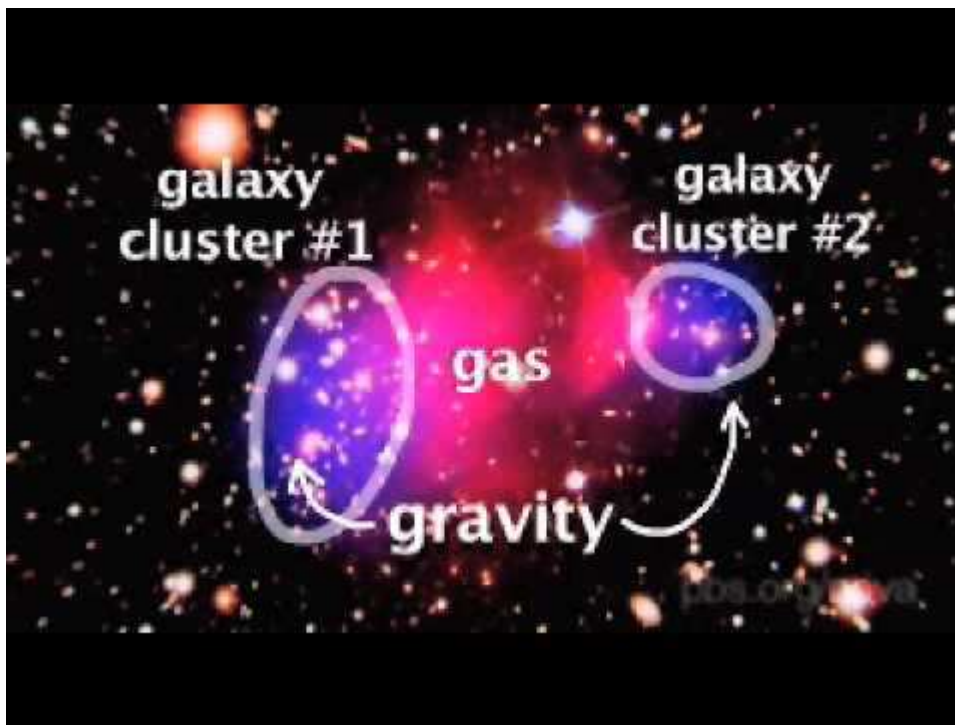
En particular dado que en el halo tenemos la fórmula $\rho(r)_{M.O.HALO} = \frac{K_G}{4\pi r^2}$ reescribimos la

fórmula de la densidad de MO así. $\rho(r)_{MO HALO} = \frac{E^2(r)}{4\pi G^2 K_G}$.

De esta fórmula cabe destacar que establece una relación entre dos funciones asociadas a un mismo punto del espacio, es decir se pone de manifiesto una relación local entre las funciones densidad de masa e intensidad de campo gravitatorio. Mientras que la expresión

$\rho(r)_{MASA-TOTAL} = \frac{K_{GALAXIA}}{4\pi r^2}$ establece que la densidad de masa en un punto del disco es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de dicho punto al centro galáctico.

6. EL MODELO EXPLICA LOS EXTRAÑOS FENÓMENOS QUE LA MATERIA OSCURA PRESENTA EN EL CÚMULO BALA



El cúmulo Bala está formado por dos cúmulos de galaxias, aunque estrictamente hablando el cúmulo Bala es el cúmulo más pequeño (2) cuya nube de gas tiene forma cónica. Estos cúmulos colisionaron hace 150 millones de años. Las estrellas no colisionaron, simplemente desviaron sus trayectorias. Sin embargo el gas si interactuó y como resultado el gas se calentó a unos 70 millones de grados y emite Rayos X. En la actualidad estos cúmulos se alejan a 10 millones de Km/h, aunque las nubes de gas han quedado más ligadas gravitatoriamente. Se constata que no hay evidencias acerca de la colisión de la MO.

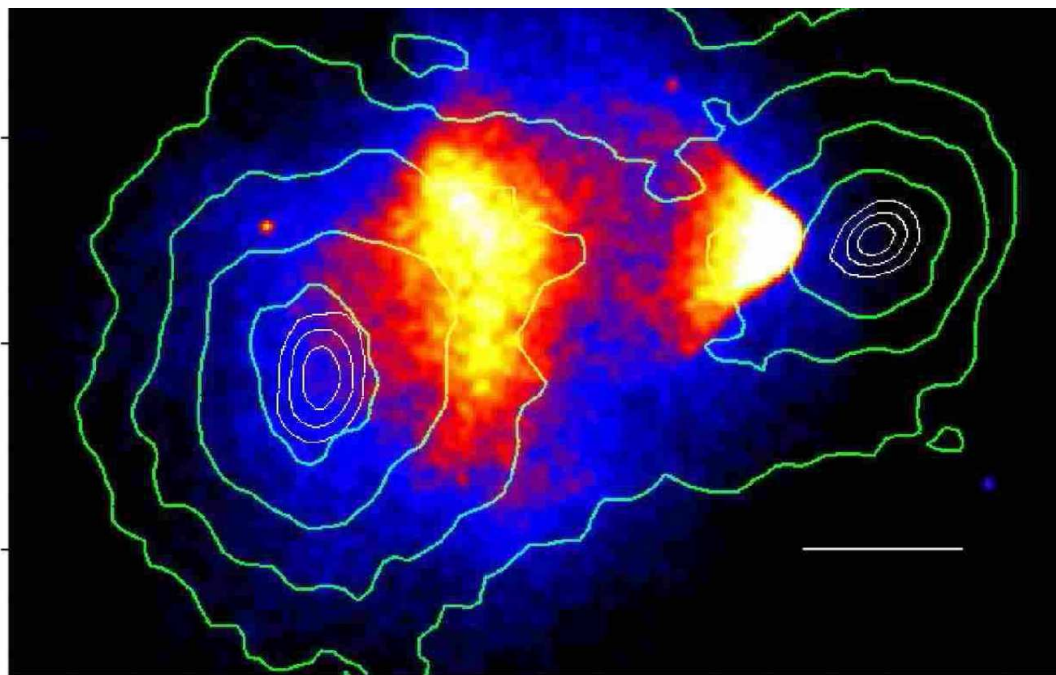
Ha sido estimado que el gas (en rojo) es dos veces más masivo que la masa de las estrellas de los cúmulos (en azul). Sin embargo mediante lentes gravitacionales se ha constatado que los cúmulos son mucho más masivos que la nube de gas.

Esta prueba experimental fue hace unos años la prueba definitiva para aceptar la existencia de la MO y descartar totalmente la teoría MOND (Modified Newton Dynamic).

La anterior información fue descubierta hace algunos años pero ahora me gustaría reflexionar sobre dos extraños fenómenos asociados a la MO del cúmulo Bala.

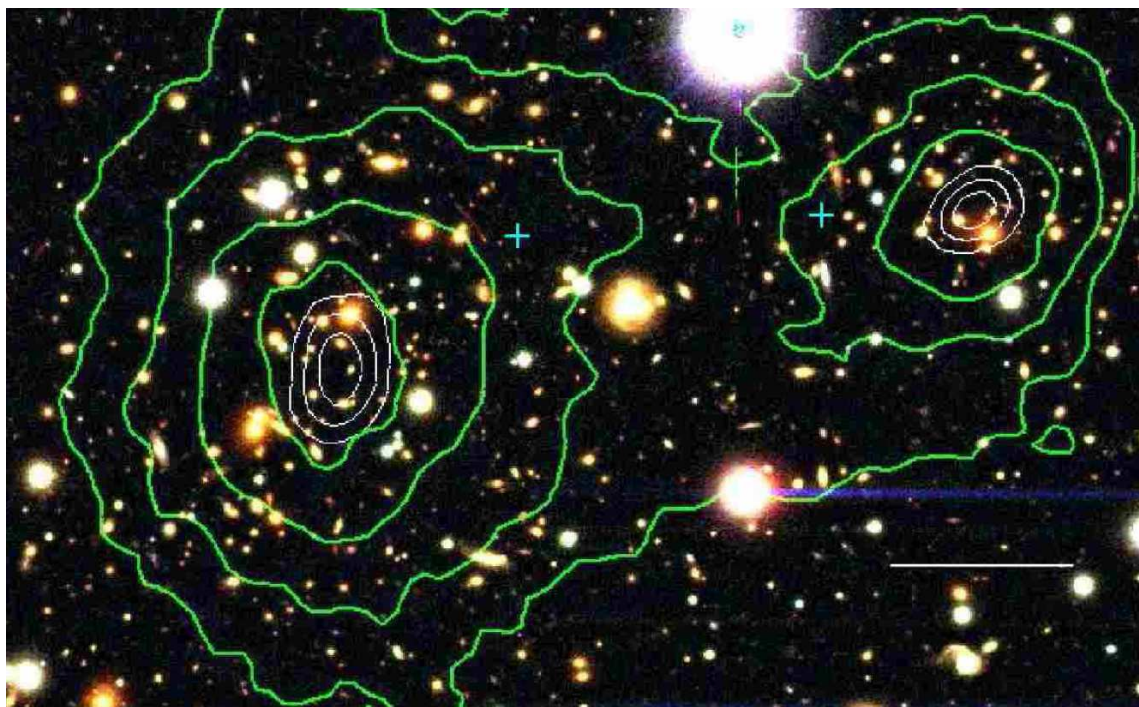
- La MO, que está distribuida por el espacio de forma parecida a las nubes de gas, no ha colisionado, prueba de ello es que la mayor parte de la masa conserva la simetría esférica.
- La MO permanece mayoritariamente ligada a los dos cúmulos de galaxias aunque una fracción está distribuida en la zona de las nubes de gas.

Como puede verse en el gráfico la nube en blanco, amarillo, rojo y azul representa las diferentes frecuencias de emisión en Rayos X consecuencia de los casi cien millones de grados a los que se encuentra la nube de gas como resultado de la colisión.



6^h58^m42^s 36^s 30^s 24^s 18^s 12^s

El cúmulo Bala es un par de cúmulos que colisionaron (Clowe et al. 2006).



5^h58^m42^s 36^s 30^s 24^s 18^s 12^s

El cúmulo Bala está dominado por material que no ha colisionado (Clowe et al. 2006).

Las curvas del gráfico representan la concentración de materia, que como puede verse tiene una alta simetría esférica y están concentradas sobre los centros de los dos cúmulos.

Estas curvas han sido elaboradas mediante técnicas de lentes gravitacionales que como es sabido permiten calcular la masa total (ordinaria y oscura). Esta alta simetría esférica demuestra que al igual que las estrellas, la MO de ambos cúmulos tampoco ha interactuado en la colisión.

Recapitulando:

- La MO no ha colisionado.
- La MO permanece ligada principalmente a los cúmulos de galaxias, aunque una fracción está distribuida juntamente con la nube de gas.

6.1 EL MODELO DE M.O. EXPLICA LAS EXTRAÑAS PROPIEDADES DE LA M.O. EN EL CÚMULO BALA

Hasta aquí hemos expuesto las evidencias experimentales del cúmulo Bala, ahora vamos a tratar de explicar con el modelo por vacío cuántico estas extrañas propiedades de la MO en el cúmulo Bala.

Según el modelo, la MO no puede existir independientemente de la materia ordinaria, por eso permanece ligada principalmente al campo gravitatorio de los cúmulos. Por razonamientos análogos a los hechos para una galaxia se puede obtener la fórmula

$$\rho(r)_{MO\ CUMULO} \approx \frac{E^2(r)}{4\pi G^2 K_{CUMULO}}$$

En el epígrafe 8.4 se justifica un poco más la validez de la misma fórmula para cúmulos y para galaxias.

Por tanto el carácter de campo conservativo del campo gravitatorio puede asociarse al campo de densidad de MO.

De esta forma el modelo explica fácilmente:

- *La no existencia de interacción de la MO en un choque tan formidable como el de dos cúmulos, que sin embargo ha sido capaz de calentar las masas de gas a casi cien millones de grados.*
- *La permanencia de la estructura de una relativa simetría esférica de la masa total en torno a los dos cúmulos.*

Llegados a este punto es necesario hacer una importante observación:

Al principio del epígrafe informamos que la masa ordinaria de la nube de gas se estima que es el doble de la masa visible de las estrellas de los cúmulos. Por lo tanto podríamos pensar que esta masa ordinaria tendría que generar una masa oscura mayor incluso que la creada por las estrellas en los dos cúmulos. En el siguiente epígrafe veremos como el modelo explica este hecho de una forma coherente con los resultados experimentales.

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

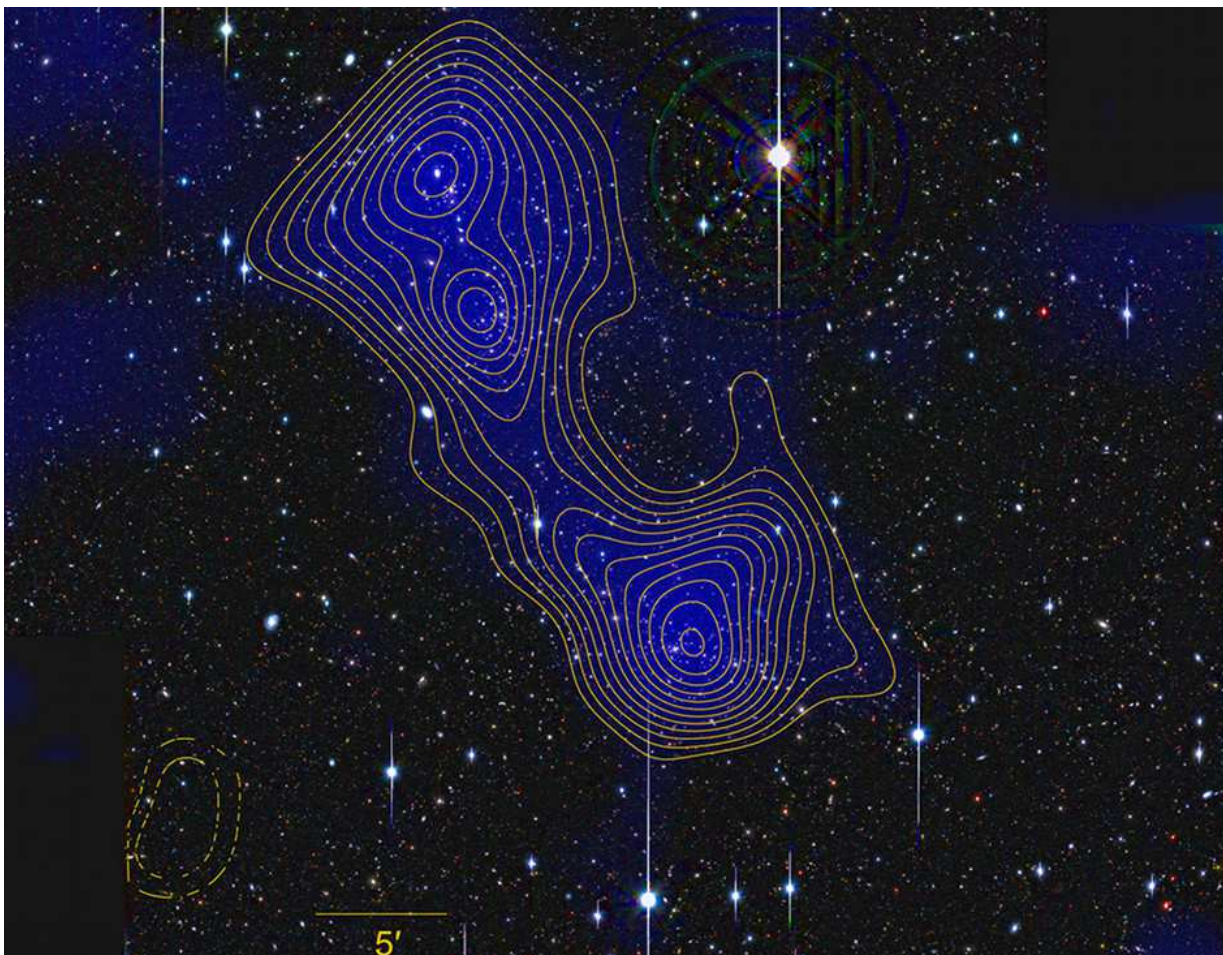
Los notables gráficos que plasman un espectacular trabajo experimental sobre el cúmulo Bala han sido extraídos del artículo:

Schneider, Peter (2012). Dark matter in clusters and large- scale structure.
Published in XXIV Canary Islands winter school of astrophysics.

7. FILAMENTOS DE MATERIA OSCURA QUE CONECTAN CÚMULOS

Como planteábamos arriba, podríamos pensar que una nube de gas más masiva que las masas estelares galácticas debería generar más MO que las propias estrellas. La respuesta es negativa debido a que la densidad de la nube de gas es cuatrillones de veces inferior a la densidad de las estrellas, y por tanto generan un campo gravitatorio muy débil en la extensa región que delimita la nube de gas que existe entre dos o más cúmulos. Dicho con otras palabras, la materia oscura que crea la materia ordinaria de las nubes de gas entre cúmulos es despreciable frente a la materia oscura que generan las galaxias de los cúmulos. Tengamos en cuenta que de acuerdo a la fórmula de la densidad de MO, ésta es proporcional al cuadrado del campo gravitatorio, por tanto si el campo gravitatorio es muy débil la densidad de MO lo será más aún.

No obstante dicha masa de gas genera MO que forma los filamentos de MO inter cumular. En la figura de abajo puede verse representado un filamento de materia oscura que une dos cúmulos.



El cúmulo doble A222/A223 (Dietrich et al. 2012)

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

El notable gráfico que traduce un espectacular trabajo experimental sobre el cúmulo doble A222/A223 ha sido extraído del artículo:

Schneider, Peter (2012). Dark matter in clusters and large- scale structure.
Published in XXIV Canary Islands winter school of astrophysics.

8. DENSIDAD DE MATERIA OSCURA EN FUNCIÓN DE $|\vec{E}|$

En anteriores epígrafes se ha obtenido $\rho(r)_{MO\ HALO} \approx \frac{|\vec{E}(r)|^2}{4\pi G^2 K_G}$ Es una fórmula muy simple,

pero que ha conseguido expresar la dependencia funcional de la densidad de materia oscura con la intensidad de campo gravitatorio. Vamos a mostrar como el carácter vectorial del campo gravitatorio tiene consecuencias para la función densidad de materia oscura.

En particular vamos a mostrar como el carácter aditivo de la intensidad de campo total podría explicar algunas extrañas propiedades de la materia oscura.

Más concretamente en las regiones frontera entre varias fuentes de campos gravitatorios es donde más importancia cobra el carácter vectorial ya que en dichas regiones no hay un campo gravitatorio central que domina imponiendo una simetría esférica al campo y por tanto a la distribución de la densidad de materia oscura, como por ejemplo ocurre en el disco galáctico o en el halo próximo al disco.

8.1 HALO GALÁCTICO

- La materia oscura tiene simetría esférica

La primera consecuencia de la dependencia de la densidad de MO del campo E $\rho(\vec{E}(r))$ es el concepto de halo.

Según el modelo, el halo sería la región entorno a la galaxia donde el campo de una galaxia domina sobre el campo gravitatorio de las galaxias vecinas y sobre el campo de las nubes de gas intergalácticas.

Por ejemplo en el punto medio entre dos galaxias vecinas de similares características, el campo gravitatorio de ambas se cancela, por tanto ese punto medio sería la frontera de los halos respectivos.

Para este modelo de MO es inmediato explicar la esfericidad del halo galáctico ya que si el campo gravitatorio tiene simetría esférica, la densidad de MO también la tendrá.

- El halo de materia oscura es mucho mayor que la galaxia.

En la Vía Láctea, ha sido constatado experimentalmente que su halo tiene un millón de años-luz y que la masa total (oscura y ordinaria) de la Vía Láctea es de 10^{12} masas Solares. Además se ha comprobado que para un radio por debajo de ese límite la masa total (ordinaria y oscura) encerrada por una esfera de radio R es proporcional al radio, es decir $M = Cte \cdot R$. Véase este dato en el libro , (Jeremiah Ostriker & Simon Mitton, 2013, El corazón de las tinieblas. Materia y Energía oscuras. Página 203).

Como es sabido el radio de nuestra galaxia es 50000 años-luz y por tanto el halo es 20 veces mayor.

También es de sobra conocido que Andrómeda, nuestra galaxia vecina gemela, dista unos dos millones de años luz. Así pues es a un millón de años-luz donde se situaría la frontera donde los campos gravitatorios de ambas galaxias tendrían intensidad similar, por lo que la idea de

asignar al halo la región donde domina el campo gravitatorio propio encaja perfectamente con los datos experimentales de nuestra galaxia.

8.2 MASA TOTAL EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA AL CENTRO GALÁCTICO

Por integración de la densidad de masa $\rho(r)_{MASA-TOTAL} = \frac{K_G}{4\pi r^2}$ se llega a que la masa total encerrada por una esfera de radio R viene dada por $M_{TOTAL}(R) = K_G \cdot R$. La cuestión que plantea esta fórmula es, ¿hasta dónde se extiende el radio?

De acuerdo con la idea de halo a la que nos conduce la teoría, la respuesta sería que el radio se extiende en todo el halo, pero para ser más precisos diríamos que esa fórmula sería más exacta en el disco y en el halo próximo al disco ya que es en esas regiones donde el campo gravitatorio propio domina sobre los campos galácticos vecinos.

Si atendemos a la idea de que en la región del halo lejano la influencia de las galaxias vecinas no es despreciable tendríamos que $\rho(r)_{MO-HALO LEJANO} < \frac{K_G}{4\pi r^2}$ y $\rho(r)_{MO FRONTERA-HALO} \approx 0$

por lo tanto en esta región la masa total ya no es proporcional a la distancia sino que es inferior $M_{TOTAL}(R) < K_G \cdot R$ donde R sería variable en la región del halo lejano.

Así pues $M_{TOTAL}(R) = K_G \cdot R$ es una fórmula válida en el disco y aproximadamente válida en halo próximo. Mientras que $M_{TOTAL}(R) = K_G \cdot f(R) < K_G \cdot R$, donde R varía en el halo lejano y f(R) expresa una determinada dependencia funcional que habría que determinar con una teoría más precisa.

Como corolario de estos razonamientos, el modelo establece que $K_G \cdot R_{HALO}$ sería una cota superior para la masa total de una galaxia, tal como adelantamos al final del epígrafe 2.

$$K_G \cdot R_{HALO} > \text{Masa Total GALAXIA}$$

COTA SUPERIOR PARA LA MASA TOTAL DE LA VÍA LÁCTEA

$$\begin{aligned} \text{Masa Sol} &\approx 2 \cdot 10^{30} \text{ Kg} & \text{Velocidad orbital Sol} &\approx 220 \text{ km/s} \\ K_{VL} &\approx V_{SOL}^2 / G \rightarrow K_{VIA LACTEA} &\approx 7,25 \cdot 10^{20} \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

Radio estimado del Halo

Según el modelo, el halo sería la región donde domina el campo gravitatorio de la galaxia. Teniendo en cuenta que Andrómeda está a unos 2 millones de años luz, 1 millón años-luz $\approx 10^{22}$ m es una estimación perfecta para el radio del halo.

COTA SUPERIOR PARA LA MASA TOTAL DE LA VÍA LÁCTEA

$$M_{TOTAL VIA LACTEA} < K_{V-L} \cdot R_{HALO} = 7,25 \cdot 10^{42} \text{ Kg} = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ Soles.}$$

CONCLUSIÓN

Este valor de cota superior para la masa total de la Vía Láctea es perfecto, ya que actualmente las estimaciones experimentales para la Vía Láctea son:

$$\text{Masa visible } 2 \cdot 10^{11} \text{ Soles} \quad \text{y Masa Oscura } 2 \cdot 10^{12} \text{ Soles}$$

No podemos dejar de mencionar aquí como con una teoría tan sencilla hemos encontrado una cota superior muy razonable para la masa total de nuestra galaxia. Este hecho sin duda es un factor que sugiere que la teoría es correcta para explicar la Materia Oscura.

8.3 VELOCIDAD DE ROTACIÓN ESTELAR EN LA ZONA DEL HALO

En el gráfico del anexo están mostradas las curvas de rotación estelar de muchas galaxias. Es destacable el hecho de que en todas, excepto una de ellas, las curvas son sensiblemente planas en la zona del halo, aunque tienen una ligera inclinación descendente.

Esta evidencia experimental puede ser explicada con el modelo porque como se ha explicado anteriormente $\rho(r)_{MO\ HALO-LEJANO} < \frac{K_G}{4\pi r^2}$ a causa de la influencia del campo gravitatorio de las

galaxias vecinas. Por tanto si la densidad en el halo lejano va decreciendo desde $\frac{K_G}{4\pi r^2}$ hasta cero en la frontera del halo, la velocidad de rotación no puede mantenerse constante sino que tiene que decrecer un poco.

8.4 HALO DE UN CÚMULO

La misma idea de halo de una galaxia podría extenderse a un cúmulo. Así pues el halo de un cúmulo sería la región inter cúmulos donde la gravedad del cúmulo domina sobre el campo de los cúmulos vecinos.

Es sabido que los cúmulos interactúan gravitatoriamente entre sí formando super-cúmulos. Actualmente la Astrofísica considera a los super-cúmulos como las mayores estructuras del Universo cuyas partes interactúan entre sí gravitatoriamente. Recientemente se han publicado resultados sobre nuestro súper cúmulo local al que los astrofísicos responsables de su estudio lo han bautizado con el nombre de Laniakea.

Según el modelo, las galaxias no solo generarían MO dentro del cúmulo sino también en su halo, ya que los cúmulos interactúan gravitatoriamente con otros cúmulos.

Se plantea la siguiente cuestión, ¿Cuál sería la región del halo de un cúmulo?

Siguiendo las mismas razones que en el caso de galaxias, la región del halo sería la zona del espacio donde el campo gravitatorio del cúmulo domina sobre el campo de los cúmulos vecinos.

Así pues una aproximación al radio del halo de un cúmulo sería la distancia media entre cúmulos ya que como hemos indicado al comienzo del epígrafe los cúmulos son partes de los super-cúmulos que interactúan gravitacionalmente. Aunque probablemente a esta escala no se pueda hablar tan a la ligera de simetría esférica en la distribución de cúmulos, de cúmulos Virializados o incluso del propio espacio Euclídeo. En suma a esta escala se hace más necesaria la Teoría General de la Gravitación.

De cualquier forma, si experimentalmente se ha comprobado que los super-cúmulos son estructuras en las que sus elementos, los cúmulos, interactúan gravitatoriamente, la lógica del modelo nos lleva al concepto de halo de un cúmulo como la región donde el campo propio domina sobre el resto de los campos de los cúmulos vecinos.

8.4.1 HIPÓTESIS DEL TEOREMA DEL VIRIAL EN CÚMULOS DE GALAXIAS

Es una evidencia experimental que en los cúmulos, la hipótesis del Teorema del Virial es aceptable y que la simetría esférica es una buena aproximación para la distribución espacial de las galaxias.

Mediante el teorema del Virial, si se elige una galaxia periférica del cúmulo y se mide su velocidad V y su radio orbital R , se podría calcular la masa total encerrada por la esfera que define la trayectoria de la galaxia dentro del cúmulo.

La cantidad $M = R \cdot V^2 / G$ sería una buena aproximación de la masa **Masa Total** v -CUMULO. Dicho con otras palabras $M \approx R \cdot V^2 / G$ es aproximadamente la masa total del cúmulo medida con el teorema del Virial, la cual englobaría la materia oscura interior al cúmulo pero no la MO de su halo.

Admitiendo simetría esférica en la distribución de las galaxias dentro del cúmulo, el modelo de M.O. permitiría extrapolar los cálculos del epígrafe 2 para establecer la fórmula de la densidad de MO en el halo del cúmulo. $\rho(r)_{MO-HALO-CUMULO} \approx \frac{K_{CUMULO}}{4\pi r^2}$ donde

$$K_{CUMULO} = \frac{V^2}{G} = Cte$$

Por las mismas razones que hemos visto en el epígrafe 8.2 para galaxias, se puede concluir que $K_{CUMULO} \cdot R_{HALO}$ es una cota superior de la materia total en los cúmulos, incluida la MO de su halo.

8.4.2 EL ENIGMA DE LA MATERIA OSCURA EN CÚMULOS DE GALAXIAS

Existe una segunda técnica para medir la masa total en los cúmulos, basada en las lentes gravitacionales.

El método de lente gravitacional en principio podría medir la masa total del cúmulo y de su halo si se dan las condiciones adecuadas de encontrar una galaxia lejana alineada con el cúmulo “lente” y la Tierra, mientras que el teorema del Virial como ya se ha visto solo mide la masa total que encierra la esfera que define la trayectoria de una galaxia periférica del cúmulo.

En el libro de Battaner, E (1999). Introducción a la Astrofísica. Alianza Editorial. Se cita el extraño resultado acerca de que se han hecho mediciones en cúmulos en los que la MO constituye el 99% de la materia total del cúmulo. Mientras que en general se estima que en las galaxias la MO es el 90%.

Dicho en otras palabras, se ha determinado experimentalmente que la MO de un cúmulo es mayor que la suma de la MO de las galaxias que lo componen.

Esto que no deja de ser una extraña propiedad de la MO, podría explicarse gracias a la MO del halo de los cúmulos. Veamos:

- Usando el teorema del Virial, como arriba hemos explicado, se puede calcular la masa total interna del cúmulo. Por tanto, la masa calculada debe coincidir con la suma de las masas totales de las galaxias que componen el cúmulo.

- Usando la técnica de la lente gravitacional se puede calcular la masa total del cúmulo y de su halo.

Dado que el modelo de M.O. explica de forma natural la existencia del halo de un cúmulo, y que el método de lente gravitacional permite medir la masa del cúmulo y de su halo se deduce que **Masa Total Cúmulo VIRIAL < Masa Total Cúmulo LENTE GRAVITACIONAL**.

Dicho con otras palabras, la medición de la masa de un cúmulo con la técnica del teorema del Virial es menor que la medición de la masa del mismo cúmulo con la técnica de la lente gravitacional, ya que esta mide también la masa oscura del halo del cúmulo.

Si a esta desigualdad añadimos la establecida al principio del epígrafe tenemos la doble desigualdad.

$$\mathbf{Masa\ Total\ Cúmulo\ VIRIAL < Masa\ Total\ Cúmulo\ LENTE\ GRAVITACIONAL < K_{CUMULO} \cdot R_{HALO}}$$

En el epígrafe 9.5 de pruebas experimentales propondremos una prueba para chequear el modelo, basada en medir la masa total de un cúmulo mediante la técnica del Teorema del Virial y la técnica de la lente gravitacional.

8.5 COMPLEJIDAD DE LA DISTRIBUCIÓN DE MO EN LOS CÚMULOS GALÁCTICOS

Está bien establecido experimentalmente que en general en los cúmulos existe más masa en forma de gas intergaláctico que la masa de las estrellas de todas las galaxias del cúmulo.

En el caso del cúmulo Bala, la colisión entre los dos cúmulos extrajo las nubes de gas de ambos cúmulos y además elevó su temperatura a casi cien millones de grados, lo cual produjo Rayos X de altísima energía. En el caso de los cúmulos comunes la masa de las nubes de gas también se puede medir mediante técnicas de radiofrecuencia aunque su emisión no sea tan espectacular como es el caso del gas del cúmulo Bala.

Dado que las nubes de gas generan campos gravitatorios mucho más débiles que las estrellas, la generación de MO causada por el gas es muy inferior a la generada por las galaxias, tal y como se explicó en el epígrafe 7.

No obstante esa MO generada por el gas, sería un factor responsable de alterar la simetría esférica de la MO en el cúmulo.

Aunque dada la importancia que tienen las galaxias en la generación de MO, es lógico pensar que la no simetría esférica perfecta de la distribución de galaxias en los cúmulos sea el factor más importante responsable de la no simetría esférica de la MO en los cúmulos de galaxias.

9. PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA CONTRASTAR EL MODELO DE M.O.

La propia teoría del modelo de M.O. por vacío cuántico permite establecer una serie de predicciones de resultados experimentales que podrían ser decisivos para considerar el modelo como un serio candidato para explicar la naturaleza de la M.O.

9.1 GALAXIAS

La primera prueba imprescindible para la validez del modelo consiste en que la MO en diferentes galaxias de similar masa visible y similar estructura sea sensiblemente la misma. Es obvio que si en dos galaxias de masas visibles similares se mide la MO y los resultados son muy distintos, habría que rechazar este modelo.

Es evidente que la técnica de medición de M.O. debe ser la misma en las dos galaxias.

Para minimizar los errores derivados de la medición de magnitudes físicas a tan enormes distancias es lógico comparar galaxias situadas a similares distancias de la Tierra.

9.2 COTA SUPERIOR PARA LA MASA DE UNA GALAXIA

Es sabido que la técnica de la lente gravitacional permite calcular la masa total de una galaxia, incluida la masa oscura de su halo.

Por tanto usando la cota superior para la masa total de una galaxia del epígrafe 8.3, se deduce inmediatamente la siguiente prueba experimental para chequear la validez del modelo.

La masa total de una galaxia medida mediante lente gravitacional es menor que $K_G \cdot R_{HALO}$

Abreviadamente: Masa Total Galaxia $L-G < K_G \cdot R_{HALO}$

9.3 CÚMULOS DE GALAXIAS CON MASA VISIBLE SIMILAR Y ESTRUCTURA SIMILAR EN GALAXIAS Y NUBES DE GAS

Como hemos comentado antes, la MO en un cúmulo de galaxias medido con el efecto de lente gravitatoria o con el teorema del Virial, arroja distintos valores para la cantidad de MO. Por lo tanto para comparar diferentes cúmulos hay que realizar mediciones de MO con la misma técnica en cúmulos cuya estructura de galaxias y de sus nubes de gas sean similares. Es evidente que la validez del modelo exige que con la técnica de lente gravitatoria o a partir del teorema del Virial, debe verificarse que las “Masas Oscuras” obtenidas en dos cúmulos de masas de galaxias y masas de nubes similares deben ser similares.

Es importante también considerar cúmulos de galaxias situados a distancias similares de la Tierra para cancelar los errores derivados de la medición de magnitudes a tan enormes distancias.

9.4 VACÍOS CÓSMICOS

El telescopio Hubble captó el magnífico fenómeno de una lente gravitatoria formada por el Cúmulo de galaxias Abel 2218 situado a unos 2000 millones A-L, que mostraba varias imágenes distorsionadas de una galaxia situada a unos 10000 millones de A-L.

Un cúmulo de galaxias es la mayor de las lentes posibles y el Hubble nos ha brindado la imagen de una galaxia que proviene casi de los límites del Universo observable gracias a una lente con varios millones de años luz de diámetro.

Grandioso experimento y grandioso espectáculo;

Como es sabido, el efecto de lente gravitatoria necesita solamente un campo gravitatorio central.

Vamos a proponer una cuarta prueba para contrastar el modelo de MO, usando precisamente el fenómeno de lente gravitatoria.

Si la MO pudiera existir independientemente de la materia ordinaria, los lugares idóneos para buscarla serían los grandes vacíos de galaxias. Es evidente que el único mecanismo para buscar MO aislada es el de lentes gravitatorias. Si la MO existiera libre de la materia ordinaria, podría formar campos gravitatorios centrales que en las condiciones adecuadas podrían formar imágenes de galaxias alejadas que pueden ser detectadas tal y como hizo el telescopio Hubble gracias al cúmulo de galaxias Abel 2218.

Hasta donde yo sé no se ha descubierto ninguna región con MO pura, a pesar de que cada noche el cielo es escudriñado con docenas de telescopios con las más sofisticadas tecnologías. Puede que en un futuro se encuentre, pero también puede ser que eso no suceda jamás tal y como predice este modelo de MO.

En mi opinión, si la MO pudiera existir en estado puro, ya se habría detectado.

9.5 DESIGUALDADES EN LAS MASAS DE UN CÚMULO DE GALAXIAS

Como se explicó detalladamente en el epígrafe 8.4 se tiene la doble desigualdad para la masa en un cúmulo de galaxias.

Masa Total Cúmulo VIRIAL < Masa Total Cúmulo LENTE GRAVITACIONAL < $K_{CUMULO} \cdot R_{HALO}$

La validez del modelo de M.O. exige que deban cumplirse las anteriores desigualdades en cúmulos de galaxias Virializados y que presenten una distribución de galaxias con simetría esférica.

9.6 CURVAS DE ROTACIÓN EN LA ZONA DEL HALO GALÁCTICO

En el anexo están mostradas varias curvas de rotación galácticas. Todas excepto una, en la zona del halo presentan curvas planas ligeramente descendentes. Este hecho ya fue justificado de acuerdo al modelo en el epígrafe 8.3.

Sin embargo, puede verse que una de las curvas tiene una ligera subida en la región del halo. Merecería un especial estudio dicha galaxia para intentar encontrar el origen de esa subida en la curva de rotación ya que el modelo de MO no podría justificar ese anormal comportamiento.

CONCLUSIÓN

En mi opinión, si alguna de estas pruebas experimentales contradijera los resultados que predice el modelo de materia oscura, eso sería motivo suficiente para desechar el modelo, pero si las seis pruebas apoyaran el modelo creo que habría motivos suficientes para pensar en él como un candidato serio para explicar la auténtica naturaleza de la M.O.

El hecho de la búsqueda infructuosa de partículas responsables de la M.O. durante varios decenios por parte de la comunidad científica internacional, usando la tecnología más sofisticada, podría ser un indicador de que la M.O. es de otra clase.

Además, si tal y como es aceptado actualmente por la comunidad científica, la Energía Oscura es un fenómeno de gravedad cuántica, por razones de simetría podemos sospechar que la MO también puede ser un fenómeno producido por la naturaleza cuántica de la gravedad.

Recordemos que según la Física decimonónica el átomo no podía explicarse porque el electrón debía radiar energía y acabar colapsando con el núcleo. Fue necesario el tratamiento mecano cuántico de la fuerza eléctrica el que pudo explicar el átomo. En mi opinión, será el tratamiento mecano cuántico de la gravitación el que aclare definitivamente el problema de la energía y la materia oscura.

Si las pruebas experimentales confirmaran que la naturaleza de la materia oscura es la que predice el modelo, este hecho sería de gran ayuda para desarrollar una teoría cuántica de la gravitación que fuera coherente con este modelo de materia oscura. Tengamos en cuenta que actualmente hay varias teorías de gravitación cuántica en desarrollo y las dificultades para avanzar en estas teorías son grandes.

BIBLIOGRAFÍA

Jermiah P. Ostriker & Simon Mitton. (2013). *El corazón de las tinieblas. Materia y Energía Oscuras*. Barcelona: Ediciones de Pasado y Presente.

Battaner, Eduardo.(1999). *Introducción a la Astrofísica*. Madrid: Alianza Editorial.

Schneider, Peter (2012). Dark matter in clusters and large- scale structure. Published in XXIV Canary Islands winter school of astrophysics.

ANEXO

CURVAS DE ROTACIÓN DE VARIAS GALAXIAS

