

EVIDENCIAS Y NATURALEZA DE LA MATERIA OSCURA

EVIDENCE AND NATURE OF THE DARK MATTER

Fredy Ochoa

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

(Recibido: 03/2019. Aceptado: 06/2019)

Resumen

Existen sólidas evidencias observacionales y teóricas de que la cantidad de materia visible en el universo solo forma una pequeña parte de su masa. La mayor parte del universo está constituido principalmente por un sector oscuro de naturaleza aún desconocida. En éste artículo se realiza una descripción de las evidencias gravitacionales de la existencia de la materia oscura, posibles explicaciones de su naturaleza y su conexión con la física de partículas.

Palabras clave: Materia oscura, astropartículas.

Abstract

The astrophysical evidence of non luminous matter shows us that the ordinary visible matter is just a small portion of all the mass in the universe. Our universe is mostly composed by an unknown dark sector. This paper discusses some gravitational effects of the dark matter, possible theoretical explanation about its physical nature, and connections with particle physics.

Keywords: Dark matter, particle astrophysics.

Introducción

A través de las observaciones astronómicas y estimativos teóricos actuales, hoy en día hay fuertes evidencias de que la materia visible en forma de estrellas, gas y rocas forma apenas el 4% de nuestro universo. La mayor parte sigue siendo desconocido, lo que bien podría llevar el nombre del sector oscuro. A pesar del misterio que aún esconde éste sector, las evidencias observacionales han permitido identificar dos tipos de comportamientos diferentes asociados a los efectos gravitacionales en nuestro universo: la materia oscura, correspondiente al 26% de la composición del universo, y la energía oscura que completa el 70% restante. El primero de estos se relaciona principalmente con anomalías locales en el movimiento de objetos o estructuras visibles en ciertas regiones del universo. El segundo se da a nivel global y se manifiesta en una aparente expansión acelerada de nuestro universo, la cual actúa opuesta a la gravedad ordinaria de los objetos masivos, parecido a un efecto antigravitatorio. En particular, conocer el origen de la materia oscura ha llevado a importantes avances teóricos y experimentales que han generado nuevas tecnologías de detección con el fin de encontrar su composición y responder a la pregunta: ¿de qué está hecha la materia oscura? El propósito central de éste artículo es presentar de manera divulgativa algunas evidencias de la existencia de la materia oscura en nuestro universo, las hipótesis teóricas de su composición y origen, y las ideas básicas del método experimental más directo para identificar su naturaleza, la cual se soporta en procesos asociados a la física de partículas.

Evidencias de la materia oscura

Cuando se habla de la *materia visible*, literalmente se entiende como objetos capaces de emitir luz por sí mismos. En la actualidad, el concepto de materia visible es más amplio, la cual también incluye algunos objetos opacos. Fundamentalmente, se cataloga como materia visible a todo cuerpo que microscópicamente esté constituido por protones y neutrones, genéricamente conocidos como bariones, y que son capaces de absorber y/o emitir radiación electromagnética. Por ejemplo, relacionando la luminosidad de las

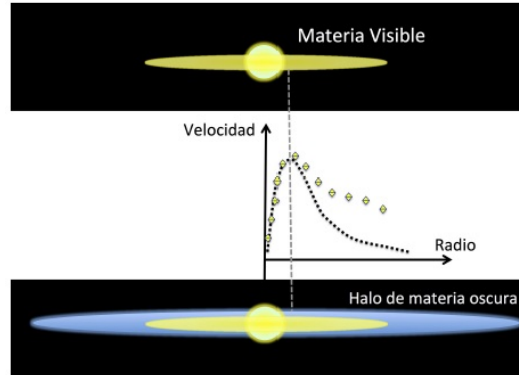


FIGURA 1. *Curva de rotación en una galaxia. La curva a trazos describe la velocidad calculada asumiendo que la masa es solamente de la materia visible. Los romboides discretos imitan datos experimentales, que sugiere la existencia de un halo de materia oscura.*

estrellas con su masa, es posible estimar la cantidad de masa en una galaxia y la forma en que se distribuye en el espacio. Combinando estas observaciones con las predicciones de la ley inversa al cuadrado de la gravitación universal de Newton, es posible estimar la velocidad a la cual rotan las estrellas alrededor del centro galáctico [1]. La figura 1 describe una galaxia típica, similar a la vía láctea, compuesta por un centro masivo con muchas estrellas, y luego reduciendo su número progresivamente hasta desaparecer. Los cálculos teóricos de la velocidad de estrellas con diferentes radios de rotación, predicen una curva, conocida comúnmente como curva de rotación, que inicialmente aumenta proporcional al radio, pero luego decae rápidamente con la distancia, como muestra la curva a trazos en la figura. Sin embargo, las observaciones, si bien se ajustan correctamente en la región del núcleo galáctico, más allá muestran que la velocidad de rotación no decae tan rápidamente, llegando incluso a mantenerse invariante hasta distancias más allá del núcleo [2], como describen cualitativamente los romboides en la figura. La forma más simple de entender éste comportamiento es planteando la existencia de una mayor cantidad de masa en la galaxia en forma de materia oscura [3], que se extiende incluso más allá de la frontera visible de ésta, formando un halo que cubre y rodea a la galaxia, dándole a las estrellas el impulso gravitacional necesario.

La anomalía en el movimiento de estrellas y objetos al interior de las galaxias, también se ha observado en el movimiento de grupos de galaxias, conocidas comúnmente como cúmulos galácticos. Estimando la masa contenida en las galaxias, incluyendo la de su halo de materia oscura, se pueden realizar cálculos numéricos de la velocidad de cada galaxia en un cúmulo debido a la fuerza gravitacional entre ellas. Sin embargo, estos cálculos resultan en valores de velocidad muy bajos en comparación a los datos astronómicos observados, lo que sugiere también la presencia de grandes cantidades de materia oscura en regiones intergalácticas [4]. Así, la materia oscura, al igual que en el caso de los halos galácticos, suministra a los cuerpos un impulso gravitacional adicional en una cantidad que permiten ajustar los datos de velocidad observados.

A nivel global se puede estimar la cantidad total de materia oscura comparando las predicciones cosmológicas del pasado de nuestro universo y su forma como lo vemos actualmente. Aunque no es posible tener datos directos del universo temprano, se puede reconstruir una imagen de sus primeras etapas a partir de las observaciones disponibles de la *radiación cósmica de fondo* (o CMB por sus siglas en inglés) [5]. Dicha radiación corresponde a fotones en la frecuencia de las microondas provenientes de las regiones más lejanas del universo. Teniendo en cuenta que los fotones viajan a una velocidad finita (la velocidad de la luz en el vacío), los fotones de objetos distantes que llegan hoy a la Tierra debieron partir de sus fuentes en un tiempo anterior. Entre más lejos esté el objeto, más tiempo le tomará sus fotones llegar a la Tierra, y por lo tanto, observamos más hacia el pasado de ese objeto. De acuerdo a las predicciones teóricas, se estima que el universo temprano era denso y opaco debido a que la materia absorbía los fotones, y no los dejaba viajar lo suficiente. Pero a medida que el universo se enfriaba y expandía, la materia y la radiación se separaron, permitiendo que los fotones pudieran viajar libremente por el espacio. Esos fotones son los que actualmente observamos desde la Tierra como radiación cósmica de fondo, tal como se ilustra esquemáticamente en la figura 2. Los datos del CMB sugieren que, si la materia visible actual del universo fuera toda la materia disponible a lo largo de la historia del universo, no

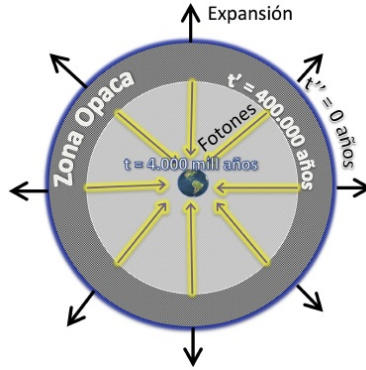


FIGURA 2. Origen de la radiación cósmica de fondo. Los fotones más lejanos del universo que llegan hoy a la Tierra se emitieron en el pasado, cuando justo la radiación se separó de la materia.

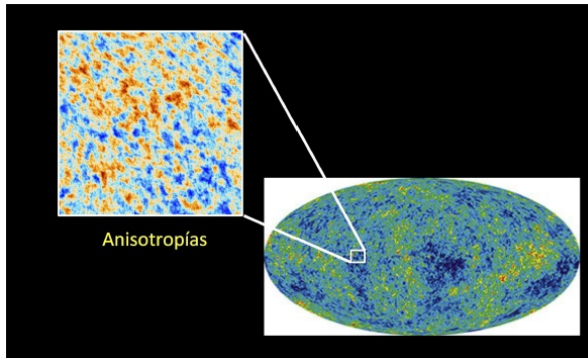


FIGURA 3. Mapa de la radiación cósmica de fondo publicado por la colaboración Planck [6]. Globalmente, la radiación se distribuye por igual alrededor de nuestro punto de observación. Localmente, se observan anisotropías

habría suficiente masa que produjera las fuerzas gravitacionales necesarias para causar los colapsos de materia que dieron origen a las estructuras discretas observadas hoy en día, como galaxias, estrellas, planetas, etc. Nuestro universo sería entonces como una especie de sopa de materia que llenaría el espacio de forma continua y uniforme. Por el contrario, el mapa CMB muestra que el universo temprano, ya a la edad aproximada de 400.000 años, mostraba una distribución de materia y radiación esparcida de forma uniforme globalmente, pero localmente con regiones más vacías que otras, conocidas como anisotropías. La figura 3 es una imagen de radiación de microondas del universo capturada por el satélite Planck [6],

donde las regiones más calientes (en naranja) muestran zonas con más acumulación de masa, y las más frías (en azul), con menos densidad de materia. Esas pequeñas anisotropías son debidas al efecto de la interacción gravitacional, y solo pueden ser explicadas si el contenido de materia fuera mucho mayor a la materia visible. De estos datos se estima que el universo debe tener una composición de materia oscura en una porción del 26 %.

Candidatos de materia oscura

Los primeros intentos para explicar el origen de la materia oscura, fueron la de asociarla a pequeños objetos opacos difíciles de detectar directamente por los telescopios, como planetas, estrellas enanas, agujeros negros y rocas. Sin embargo, existen técnicas que permiten estimar la cantidad de tales objetos, ya sea por efectos gravitacionales en sistemas binarios, o desviación de la luz de objetos luminosos ubicados detrás de objetos no luminosos, que produce un efecto análogo al de una lente óptica, como se ilustra en la figura 4 (efecto de lente gravitacional) [7]. Estas estimaciones, incluso considerando escenarios optimistas, están lejos de alcanzar el 26 % esperado para la materia oscura [8]. Si bien, estos objetos astrofísicos ayudan a corregir los cálculos de la cinemática en galaxias y estrellas, no es suficiente para explicar los datos observacionales, lo que sugiere que la composición principal de la materia oscura debe ser de otra naturaleza.

La propuesta más prometedora es que la materia oscura, a diferencia de la materia ordinaria, no tiene formaciones sólidas ni densas de estructuras, sino que es una distribución extensa mas o menos uniforme de partículas diferentes a los protones, neutrones y electrones [9]. Aunque todavía no hay una evidencia directa que demuestre la verdadera composición de la materia oscura, indirectamente se sabe que debe exhibir algunas propiedades específicas. Algunas de estas propiedades son:

1. No deben decaer ni transformarse en materia ordinaria, o si lo hacen, su tiempo de decaimiento debe ser igual o mayor a la edad del universo.

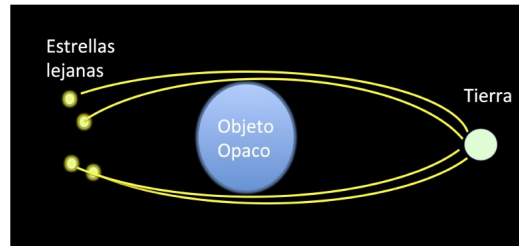


FIGURA 4. *Efecto de la lente gravitacional. Un objeto masivo opaco puede desviar los rayos de luz de estrellas lejanas.*

2. Debe exhibir poca o nula interacción electromagnética. De lo contrario, sería visible.
3. Para reproducir el efecto gravitacional que produce la materia oscura, su composición microscópica debe ser masiva.

Existen objetos que pueden cumplir con las condiciones anteriores, como agujeros negros primordiales, partículas exóticas como los llamados axiones, partículas neutras como los neutrinos, etc. Actualmente, el candidato más prometedor, es un tipo de partícula elemental pesada en comparación con las partículas conocidas, eléctricamente neutra y que puede interactuar con la materia ordinaria a través de la conocida interacción nuclear débil. En el área de partículas elementales, este tipo de objetos se conocen con el nombre genérico de *partículas masivas debilmente interactuantes* (WIMPs por sus siglas en inglés) [10]. La posibilidad de que la materia oscura sea la manifestación de objetos microscópicos debilmente interactuantes, ha llevado al desarrollo de una gran cantidad de hipótesis teóricas y experimentos con el fin de detectarla por métodos diferentes a la gravedad.

DetECCIÓN DIRECTA DE WIMPs

La hipótesis de que la materia oscura sea un tipo de partícula elemental, abre la oportunidad de que ésta, después de todo, no sea tan oscura. Teóricamente, es posible que, aparte de la fuerza de gravedad, éstas partículas puedan interactuar con partículas de materia ordinaria a través de otras fuerzas, y sufrir procesos

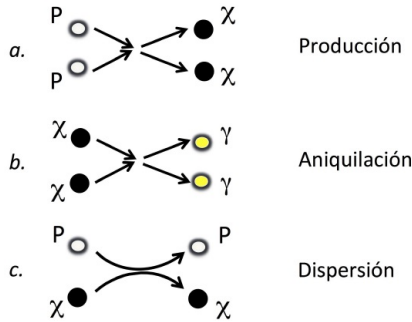


FIGURA 5. Posibles procesos de interacción de la materia oscura. En a, dos protones (P) colisionan y produce un par de partículas de materia oscura (χ). En b, dos partículas de materia oscura se aniquilan mutuamente, produciendo dos fotones (γ) muy energéticos. En c, una partícula de materia oscura colisiona un protón y lo dispersa.

microscópicos parecidos a los observados por la materia visible, como ilustra la figura 5. Primero, en los aceleradores de partículas como el gran colisionador hadrónico en el CERN ¹, donde se producen colisiones frontales de protones a altas energías, es posible producir otros tipos de partículas. Ésto es posible ya que, de acuerdo a la relación de masa y energía de Einstein, $E = mc^2$, la materia es una forma de energía, y por lo tanto se puede transformar energía cinética o potencial en materia. Si la materia oscura está asociada a una partícula WIMP, cabe la posibilidad de ser creada por colisiones entre protones, como se ilustra en la parte a de la figura 5. Segundo, es posible que la materia oscura interactúe consigo misma. Existen modelos teóricos que predicen que si las partículas de materia oscura tienen la suficiente energía, éstas pueden aniquilarse mutuamente, dejando un rastro de radiación en forma de rayos gama, esto es, en forma de fotones muy energéticos, como muestra la parte b de la figura 5, y que pueden ser observados en detectores calibrados a tales energías. Detectores destinados a ese tipo de observación se han fabricado y puesto en orbita alrededor de la tierra, como es el caso del satélite FermiLAT, el cual ha hecho observaciones de emisiones de rayos gama en estructuras

¹Centro europeo para la investigación nuclear, en la frontera de Suiza y Francia

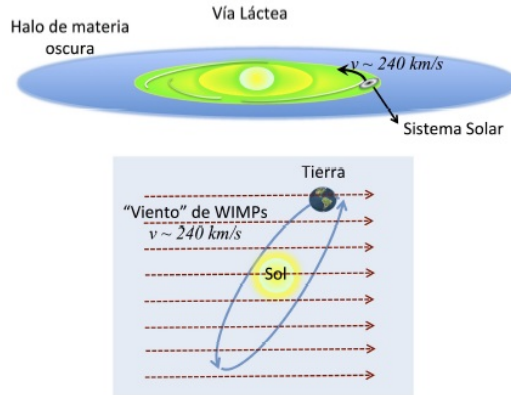


FIGURA 6. *El movimiento relativo del sistema solar a través del halo de materia oscura de la vía láctea a una velocidad de 240 km/s, produce un flujo de materia oscura (compuesto por partículas WIMP) que atraviesa a la Tierra.*

como pulsares, núcleos galácticos, supernovas, etc. Finalmente, el mecanismo de detección más directo ocurre cuando una partícula WIMP colisiona y dispersa alguna partícula de materia ordinaria, como por ejemplo, un protón, como muestra la parte *c* de la figura 5.

En particular, de los tres mecanismos de detección, la búsqueda directa por dispersión ha generado una gran cantidad de análisis teóricos y experimentos alrededor del mundo [11]. Como se ilustra en la figura 6, el sistema solar rota alrededor del centro de la vía láctea a una velocidad próxima a los 240 km/s. Asumiendo que la galaxia está inmersa en un halo de materia oscura, y que ese halo no rota junto con la vía láctea, entonces desde la Tierra se percibe un viento de partículas WIMPs, análogo a abrir la ventana en un auto en movimiento y sentir el aire fluyendo sobre el rostro. Adaptando detectores en la Tierra, eventualmente una partícula del viento de WIMPs colisiona con unos de los núcleos atómicos del detector, dispersándolo y suministrándole una energía que depende de la masa del WIMP. Esa energía absorbida por el núcleo puede ser medida, y de esta manera se podría determinar la masa del WIMP. Aunque los experimentos actuales no han confirmado la detección de partículas del viento de WIMPs, se sigue midiendo y mejorando la sensibilidad de los detectores.

El problema de la densidad reliquia

Otro problema asociado a la hipótesis de la partícula WIMP, es entender cómo éste tipo de partícula podría originar la cantidad de materia oscura actual del universo, comúnmente conocida como la *densidad reliquia*. El problema de la densidad reliquia es un ejemplo de cómo diferentes áreas de la física se unen e integran en un mecanismo coherente y viable que podría explicar el proceso físico que dió origen a la materia oscura. Entender éste proceso incluye observaciones astronómicas, modelos cosmológicos soportados en la relatividad general, principios termodinámicos y cálculos de física de partículas. Los detalles técnicos requieren de un conocimiento profundo de diversos principios físicos que van más allá del propósito de éste artículo. Sin embargo, se puede ilustrar cualitativamente si pensamos que el universo es análogo a un gas compuesto por distintos tipos de partículas que interactúan mutuamente y que simultáneamente se expande, aumentando su volumen. Teniendo en mente esa idea gráfica, a continuación se hace una descripción de la historia de la materia oscura, asumiendo que está compuesta por partículas WIMP.

Se piensa que, inicialmente, aproximadamente hace unos 14.000 millones de años, el universo éra un punto (o quizás, varios puntos) de energía sin volumen y a temperatura infinita (singularidades). Se plantea que ésta(s) semilla(s) primordial(es) desencadenó una erupción violenta, dando origen a una expansión, en la cual el universo ha venido sufriendo una serie de cambios debido al aumento de su volumen y disminución progresiva de la temperatura. Cuando la energía térmica del universo seguía siendo muy alta, mucho mayor a la energía equivalente a la masa de una sola partícula WIMP, éstas partículas se mantenían en equilibrio térmico con la materia ordinaria (visible). Microscópicamente, este equilibrio se obtiene en procesos en la cual un par de WIMPs se aniquilan en partículas ordinarias, parecido al proceso de aniquilación de la figura 5, y simultáneamente, partículas ordinarias se aniquilan produciendo WIMPs, como en el proceso de producción en la misma figura, tal que en promedio, el número de WIMPs se mantiene fijo. Posteriormente, al bajar la temperatura, a energías del orden de la energía equivalente a la masa de un WIMP, el

proceso que transformaba materia ordinaria en oscura se suprimió en comparación al proceso inverso, dando inicio a una etapa de sobreproducción de materia visible y aniquilación de materia oscura. Si el volumen del universo permaneciera fijo, éste proceso continuaría hasta la desaparición total de la materia oscura, lo cual va en contra de las evidencias astronómicas actuales. La explicación de porqué la materia oscura no se aniquiló completamente, es que existió una etapa del universo a una temperatura dada (conocida como la temperatura de *freeze out*) en la que el volumen del universo creció a una rata tal que las partículas se separaron tanto que redujo casi a cero la probabilidad de que una partícula de WIMP se encontrara y aniquilara con otra. Así, a partir de la época del *freeze out*, la densidad de materia oscura se ha mantenido prácticamente constante hasta el día de hoy, dando origen a la densidad reliquia medida actualmente en nuestro universo.

Así, la hipótesis de que la materia oscura son partículas elementales, es compatible con las cantidades de materia oscura que se estima existe en nuestro universo.

Conclusiones

El llamado problema de la materia oscura se resume en tres preguntas fundamentales: ¿cómo se sabe que existe la materia oscura?, ¿de qué está hecha? y ¿como se puede detectar?. Las evidencias actuales de la existencia de la materia oscura se soportan enteramente por los efectos gravitacionales que ésta produce a gran escala. Pero, debido a la naturaleza universal de la fuerza gravitacional (la fuerza de la gravedad depende exclusivamente del valor de la masa de los objetos, independiente de otras interacciones y propiedades internas del objeto), no es posible deducir su composición microscópica. Sin embargo, la relativa escasez de objetos opacos en el universo sugieren que la materia oscura no son objetos ordinarios formados por los mismos elementos fundamentales que los objetos luminosos: núcleos atómicos (bariones). Dentro de las hipótesis propuestas, una de las ideas más viables es que la materia oscura está formada por materia no bariónica. Se han propuesto como candidatos microscópicos de la materia oscura nuevas partículas elementales

pesadas, que interactúan muy poco con la materia ordinaria y suficientemente estables. Si es así, surge la posibilidad de observar procesos físicos asociados a la materia oscura diferentes a los efectos gravitacionales. Estos efectos se clasifican en tres mecanismos de interacción microscópica: *a.* producción de fotones por aniquilación de dos partículas de materia oscura, *b.* dispersión de protones por colisiones con materia oscura, y *c.* producción de materia oscura por colisiones de protones en aceleradores de partículas.

Aunque al día de hoy no se han reportado suficientes evidencias experimentales de la composición de la materia oscura, se cree que es debido a la poca interacción entre la materia oscura y la materia ordinaria. Por esta razón, los experimentos están mejorando su sensibilidad, y se proyectan nuevos detectores que mejorarán los límites actuales y permitirán confirmar o desechar las hipótesis teóricas actuales.

Referencias

- [1] J. Oort, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **6**, 249 (1932).
- [2] Y. Sofue and V. Rubin, *Annu Rev Astron Astr* **39**, 137 (2001).
- [3] F. Zwicky, *HELV PHYS* **6**, 110 (1993).
- [4] F. D. Kahn and L. Woltjer, *Astrophys. J.* **130**, 705 (1959).
- [5] E. Gawiser and J. Silk, *Phys. Rep.* **333-334**, 245 (2000).
- [6] P. Ade and et al., *Astron. Astrophys.* **571** (2014).
- [7] P. Schneider, J. Ehlers, and E. E. Falco, *Gravitational Lenses* (Springer, 1992).
- [8] B. R. Oppenheimer, N. C. Hambly, A. P. Digby, S. T. Hodgkin, and D. Saumon, *Science* **292**, 698 (2001).
- [9] P. J. E. Peebles, *Astrophys. J.* (1982).
- [10] G. Bertone, D. Hooper, and J. Silk, *PHYS. REP.* **405**, 279 (2005).
- [11] Tanabashi and et al., *Phys. Rev. D* **98**, 030001 (2018).