

Perfil de materia oscura de grupos y cúmulos de galaxias: una aplicación del efecto lente gravitacional galaxia-galaxia

L. CASTAÑEDA* & D. CÁCERES**

Resumen. La cosmología se encuentra en una de sus más importantes épocas de desarrollo; los avances teóricos y, más aún, el crecimiento de pruebas cosmológicas de alta precisión (satélites como WMAP y Planck) han impulsado y seguirán impulsando en la cosmología un período de avance sin precedentes en la historia de la física. El paradigma actual del llamado (Λ CDM) es soportado hasta la fecha, no sin problemas, por la teoría general de la relatividad. Sin embargo, dos componentes exóticas son dominantes del modelo cosmológico actual: la materia y la energía oscuras. Nosotros presentamos una de las pruebas más directas y con menos restricciones al estudio de parámetros fundamentales cosmológicos (Ω_m , Ω_λ , σ_8) y estudiamos el uso de la esquila cosmológica en el estudio de la función de correlación de dos puntos. Se discute brevemente el problema del sesgo entre materia luminosa y materia oscura.

Abstract. Cosmology is in one of its most important periods of development. Theoretical progress, and even more, growth in high-precision cosmological tests (satellites as WMAP and Planck) have given and will continue giving cosmology a period of unprecedented progress in the history of physics. The current paradigm of the so-called (Λ CDM) is supported so far, not without problems, by the general theory of relativity. However, two exotic components are dominant in current cosmological model: the dark matter and energy. We present one of the most direct and with fewer restrictions evidence on the study of fundamental cosmological parameters (Ω_m , Ω_λ , σ_8) and analyze the use of shear in the cosmological study of the correlation function of two points. It is also briefly discussed the problem of bias among luminous matter and dark matter.

Palabras y frases claves: lentes gravitacionales, materia oscura, cosmología, espectro de potencias.

Keywords: lentes gravitacionales, dark matter profiles, cosmology, power-spectrum.

PACS: 95.30.Sf, 95.36.+x, 98.62.Py.

* Rheinische Friedrich-Wilhelms, Universität Bonn-Alemania, y Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. *e-mail:* leonardo@astro.uni-bonn.de

** Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
e-mail: dlcaceresu@bt.unal.edu.co

1. Introducción

La teoría de las lentes gravitacionales surge con la predicción de la Relatividad General de que los rayos de luz son deflectados por las concentraciones de materia en el Universo. Una de las principales ventajas del uso de la deflexión de la luz por objetos masivos es el hecho de que esa deflexión depende únicamente de la cantidad de materia del objeto, y no de su estado ni de modelos ad hoc sobre el mismo. Otras pruebas, como el uso de emisión de rayos X de plasmas relativistas en potenciales gravitacionales, presentan desventajas, como la de suponer estructuras en equilibrio hidrostático. Otra de las ventajas y los usos de las lentes gravitacionales en cosmología es el estudio de la geometría global del universo, debido a que las características principales de los sistemas de lentes gravitacionales dependen fuertemente de las distancias de los objetos involucrados en el fenómeno, es decir, del observador, de la lente y la fuente que sufre deflexión [1], [2]. Para el fenómeno de lente gravitacional entran en juego tanto propiedades del objeto deflector, como la geometría por donde se propaga la luz. Una manera de cuantificar los efectos es mediante la definición de la densidad superficial de masa κ , la cual involucra tanto la masa del objeto como su eficiencia en el modelo cosmológico utilizado [2]:

$$\kappa(x) = \frac{\Sigma(x)}{\Sigma_c}, \quad (1)$$

donde Σ es la proyección a lo largo de la línea de visión del perfil de densidad de masa de la lente, y Σ_c es un factor netamente geométrico de origen cosmológico que definiremos posteriormete. El punto central es que no sólo la eficiencia de una estructura en producir el fenómeno de lente gravitacional en el universo depende de sus propiedades intrínsecas (masa principalmente), sino también de su ubicación cosmológica. Uno de los primeros observables que se pueden definir para la lente gravitacional es el ángulo de desviación, calculado por el propio Einstein poco tiempo después de formulada su teoría de gravitación relativista, el cual para una masa puntual es dado por

$$\vec{\alpha} = \frac{4GM}{c^2 b}, \quad (2)$$

donde M es la masa de la lente y b el parámetro de impacto medido a la posición y en el plano de la lente. La ecuación (2) está calculada en el límite de campo débil¹, y se puede generalizar a objetos extendidos. Por conveniencia se define el potencial [2] como

$$\psi(x) = \frac{1}{\pi} \int d^2 x' \kappa(\vec{x}') \ln |\vec{x} - \vec{x}'|, \quad (3)$$

¹Lo cual significa que $\phi/c^2 \ll 1$.

denominado *potencial de Shapiro*, y sujeto a la ligadura

$$\nabla^2\psi = 2\kappa, \quad (4)$$

de tal forma que el ángulo de deflexión viene dado por

$$\vec{\alpha} = \nabla\psi. \quad (5)$$

Mientras κ es responsable por el enfocamiento isotrópico de los haces de geodésicas, las fuerzas de marea, estudiadas mediante la cantidad²

$$\gamma_{1,2} = \left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2\psi}{\partial x_2^2}, \frac{\partial^2\psi}{\partial x_1\partial x_2} \right), \quad (6)$$

son las responsables del cambio de forma de las imágenes. El factor que normaliza la distribución de materia viene dado por

$$\Sigma_c = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_s}{D_l D_{ls}}, \quad (7)$$

y depende de la combinación de las distancias diametrales angulares (D), las cuales son a su vez funciones de los parámetros cosmológicos, por lo cual este factor permite estudiar la geometría del Universo. Con estas definiciones básicas es posible estudiar un amplio número de situaciones de interés astrofísico, como son la formación de múltiples imágenes de un mismo objeto, la magnificación de un haz de geodésicas causadas por el campo gravitacional de la lente y el retardo temporal entre las imágenes; sin embargo, estas situaciones corresponde al régimen denominado de lensamiento fuerte, y no son el tema para el presente escrito.

Las principales consideraciones que se tienen en la construcción de los modelos cosmológicos son las de homogeneidad e isotropía, las cuales establecen que todos los puntos y las direcciones espaciales son estadísticamente equivalentes. Dichas hipótesis se han probado en escalas de 100 Mpc para el caso de la homogeneidad y la medición de temperatura de la radiación cósmica de fondo (CMBR) para la isotropía; sin embargo, a escalas menores el universo aparece lleno de heterogeneidades (galaxias, cúmulos y grupos de galaxias, estrellas, ...) lo cual dista mucho de ser homogéneo. Las más recientes teorías de formación y evolución de estructura en el universo en el contexto cosmológico tratan cada una de estas estructuras como perturbaciones en el potencial gravitacional que crecieron de fluctuaciones cuánticas en el origen del universo, descritas con un muy alto grado

²Las coordenadas x son tomadas en el plano de la lente.

de precisión mediante una distribución gaussiana y que han crecido y se han amplificado por inestabilidad gravitacional en un universo en expansión. Para el objetivo de las lentes gravitacionales, cada estructura en el universo general posee un potencial análogo a (3), sin embargo, la teoría de formación de estructura es una teoría estadística por naturaleza, lo cual convierte el fenómeno de propagación de luz por el universo con sus estructuras en una teoría que se debe estudiar con herramientas estadísticas también. Una de las debilidades que tiene el lensamiento es que lo que observamos y recogemos como materia de estudio es una señal integrada de la propagación de la luz, es decir, tenemos una información bidimensional del problema. Esto está siendo aliviado en parte por mejores observaciones y por el conocimiento de las distribución de estructuras en el marco cosmológico, con el desarrollo de nuevas técnicas y la determinación precisa de los corrimientos hacia el rojo de las fuentes. Ahora se están desarrollando técnicas como el lensamiento tridimensional (conocido como tomografía). Cuando la luz viaja por las estructuras en el Universo, cada estructura produce una desviación dada por (5). En general, dicha desviación es débil, en el sentido de que no se producen múltiples imágenes, pero el haz de geodésicas cambia su forma. Las deformaciones del haz son causadas por las fuerzas de marea, las cuales son variaciones de segundo orden en el potencial de la lente (6); cuando se toman en cuenta todas las estructuras por donde la luz ha viajado, a esta cantidad se la conoce como la *esquila cósmica*. Como se anotó anteriormente, este efecto es muy pequeño y es sólo posible estudiarlo estadísticamente. El efecto del *lensamiento "hematómico"* se estudia por medio de los cambios en las propiedades de las imágenes de los objetos que sufren la deflexión. Para realizar esta tarea se deben caracterizar las formas y las distribuciones de luz de las galaxias. Una manera de hacerlo es definiendo los momentos de las intensidades de luz, lo cual es análogo al tensor de momentos de inercia de un cuerpo bidimensional, cambiando la densidad de materia por la distribución de luz. Una cantidad muy utilizada en la literatura es la elipticidad, definida como

$$e_1 = \frac{Q_{11} - Q_{22}}{Q_{11} + Q_{22}}, \quad e_2 = \frac{Q_{12}}{Q_{11} + Q_{22}}, \quad (8)$$

donde los Q son los momentos cuadrupolares de la distribución de luz. Las fuerzas de marea actúan sobre las elipticidades y cambian su distribución. Uno de los puntos fundamentales es que las galaxias no son en realidad elípticas en su forma; sin embargo, con la definición de los momentos de luz se pueden estudiar las variaciones de forma de las mismas. Los efectos del campo gravitacional son esencialmente dos: el enfocamiento de los haces de luz -y por lo tanto cambio de brillo de las imágenes- y el cambio en la

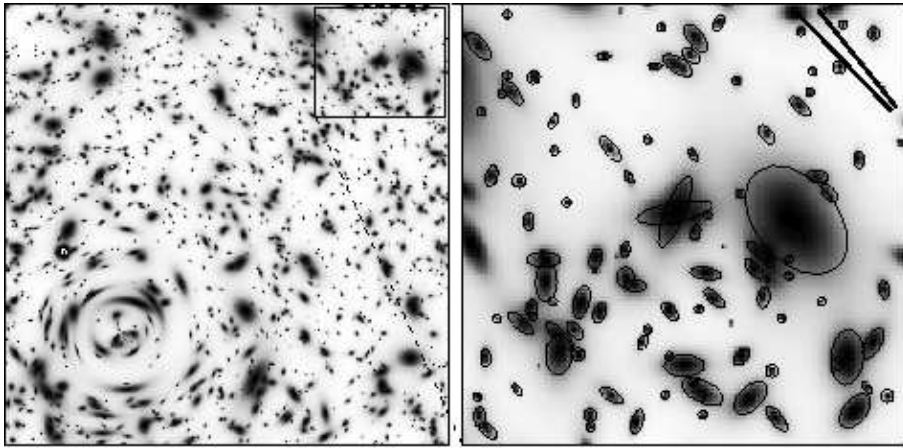


Figura 1. panel izquierdo: Una galaxia es colocada aleatoriamente en el campo de objetos produciendo una deformación y alineamiento tangencial de las imágenes de fondo. Derecha: Una ampliación del campo a una distancia considerable de la galaxia lente (Mellier 1999)[3]. Obsérvese como aún la lente produce distorsiones y correlaciones en las imágenes.

forma de las mismas; este último es una medida de la esquila producida por las fuerzas de marea. En la Figura 1 se puede notar el efecto de la lente sobre las elipticidades de las galaxias. Un campo que en principio tiene una distribución aleatoria tiende a alinearse tangencialmente con el centro de la lente: en el límite de lensamiento débil, y suponiendo un campo aleatorio de elipticidades, la elipticidad medida es

$$\epsilon \approx \epsilon^s + \gamma, \tag{9}$$

donde γ es la esquila y ϵ^s es la elipticidad intrínseca. Las distribuciones de elipticidades están relacionadas mediante la relación

$$p(\epsilon) = p^s(\epsilon - \gamma). \tag{10}$$

Al no conocer la forma de ϵ^s , la cual puede estar contaminada por procesos de formación de las galaxias, llamados alineamientos intrínsecos, se hace la suposición de que $\langle \epsilon^s \rangle = 0$, donde $\langle \cdot \rangle$ significa un promedio sobre el campo de elipticidades y se supone que no hay ninguna correlación entre ellas, esto en el caso de que se calcule el promedio sobre todo el Universo. Esta hipótesis funciona muy bien en las situaciones de interés, además de que ofrece un escenario para probar modelos de formación de estructura. El efecto de lensamiento débil ha sido estudiado ampliamente en la literatura desde hace más de dos décadas; sin embargo, solo fue en 1996 cuando la primera detección de lensamiento débil

por galaxias se logró sistemáticamente y sin lugar a dudas, resultados discutidos en el trabajo pionero de Brainerd et al. [4]. Para ello se estudia la distribución de el ángulo de posicionamiento ϕ para una muestra de galaxias como lentes. El resultado esperado de la distribución es [4]

$$p(\varphi) = \frac{2}{\pi} \left(1 - \langle \gamma_t \rangle \cos 2\varphi \left\langle \frac{1}{\epsilon^s} \right\rangle \right), \quad (11)$$

donde γ_t es la esquila tangencial, y los paréntesis en forma de cuña indican promedio sobre la muestra de lentes. En este caso, como no se considera todo el universo, $\langle \epsilon^s \rangle \neq 0$. A esta rama de investigación se la conoce como lensamiento galaxia-galaxia. El promedio de la esquila tangencial está dado en términos de observables de la lente y del modelo cosmológico, dado como

$$\Delta\Sigma \equiv \Sigma(\leq R) - \bar{\Sigma}(R) = \langle \gamma_t \rangle \Sigma_c, \quad (12)$$

donde R es la distancia en proyección sobre el plano de la lente y $\bar{\Sigma}(R)$ es el perfil de densidad calculado sobre la frontera de la curva donde la esquila se promedia. El resultado (12) es uno de los más importantes y de mayor uso en el estudio de perfiles de densidad y funciones de correlación. El estudio y detección de halos oscuros en galaxias aisladas se hace principalmete por medio de (12), y hoy en día está extendido a grupos de gran amplitud de galaxias³. Dado que nuestras teorías solo nos permiten estudiar estadísticamente el universo, es posible mediante el uso de la esquila hacer un estudio de la función de correlación materia-galaxia definida como

$$\xi_{mg}(r) \equiv \langle \delta_m(\vec{x}) \delta_g(\vec{x} + \vec{r}) \rangle, \quad (13)$$

donde δ_m and δ_g se refieren a los campos de materia y galaxias respectivamente. La transformada de Fourier de esta cantidad es el espectro de potencias de la correlación. Mediante (12) se puede tener un perfil tridimensional de las estructuras. En principio, (12) se puede invertir y obtener la densidad de materia tridimensional mediante la fórmula

$$\Delta\rho(r) = \Omega_m \rho_c \xi_{gm} = \frac{1}{\pi} \int_r^\infty dR \frac{\Delta\Sigma'(R) + 2\Delta\Sigma(R)/R}{\sqrt{R^2 - r^2}}, \quad (14)$$

con ρ_c la densidad crítica del universo. Haciendo uso de (12), midiendo la esquila tangencial se recobra la función de correlación (14). Un aspecto importante de (12) es que la densidad hallada es la densidad total, es decir, la suma de la oscura mas la bariónica; por

³Uno de los autores (L.C.) está involucrado en el proyecto de grupos de galaxias y lensamiento débil en el presente para el caso de grupos amplios de galaxias.

lo tanto, el lensamiento débil es una prueba directa de la cosmología y de los perfiles de densidad. Uno de los principales resultados obtenidos mediante esta técnica de lensamiento es el estudio de la relación entre el campo de materia oscura y la luminosa, conocido como el *sesgo galáctico*, denotado en la literatura como b . A partir de las funciones de correlación de la esquila se ha establecido que las propiedades de acumulación de los dos componentes son completamente diferentes; esto ofrece una prueba fundamental a las teorías de formación de galaxias. Esperamos que haya sido una motivación suficiente para ahondar en uno de los usos actuales de la relatividad general.

Referencias

- [1] C.S. KOCHANÉK, P. SCHNEIDER, J. WAMBSGANN, *Gravitational Lensing, Strong, Weak and Micro. Introduction to Gravitational Lensing and Cosmology*, Springer Verlag, 1 edition, (June 21, 2006).
- [2] P. SCHNEIDER, J. EHLERS, E. FALCO, *Gravitational Lenses*, Springer-Verlag: Heidelberg, 2nd printing, 1999 (SEF).
- [3] P. SCHNEIDER, *Weak Gravitational Lensing*, astro-ph/0509252.
- [4] T.G. BRAINERD, R.D. BLANDFORD, I. SMAIL, “Weak Gravitational Lensing by Galaxies”, *Astrophysical Journal*, **466**, 623 (1996).

L. CASTAÑEDA
Rheinische Friedrich-Wilhelms,
Universität Bonn-Alemania y
Observatorio Astronómico Nacional,
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
e-mail: leonardo@astro.uni-bonn.de

D. CÁCERES
Observatorio Astronómico Nacional,
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
e-mail: dlcaceresu@bt.unal.edu.co