

Corrimiento al Rojo Gravitacional

Prueba de Relatividad General a Grandes Escalas

Omar E. Velasco Castillo
Facultad de Ciencias, UNAM

Grupo 8330, Semestre 2016-I — Cosmología Observacional



Resumen

Uno de los fenómenos más extendidamente estudiados y considerados en la Cosmología Observacional es el corrimiento al rojo. En particular, el corrimiento al rojo gravitacional es la tendencia de la luz proveniente de los cúmulos de galaxias (*galaxy clusters* en inglés) a correrse hacia el rojo en su espectro electromagnético que llega a la Tierra, debido a los pozos de potencial gravitacional que traspasa a la hora de desplazarse hasta nosotros. Se sabe que este corrimiento es proporcional a estas diferencias del potencial gravitacional entre una y otra región dentro de los cúmulos, y es más observado sobretodo en aglomeraciones más densas de estrellas; por lo cual está considerado como fenómeno de gran escala en cosmología. En años recientes (Wojtak, 2011) (Croft, 2013), se ha mostrado cómo la fenomenología del corrimiento al rojo gravitacional va de la mano con lo propuesto por la teoría de la Relatividad General de Einstein, ya con un siglo de antigüedad, y su vertiente contemporánea más exitosa dentro de la cosmología: el modelo Λ CDM. Teorías modificadas de la gravedad como $f(R)$ y *MOND-TeVeS* se han prestado a comparaciones en los últimos años. Se describe pues aquí un poco de los resultados de estos análisis comparativos recientes, para corrimientos al rojo gravitacionales de cúmulos de galaxias.

Introducción

De todas las observables en cosmología, los cúmulos lejanos de galaxias presentan notoriedad en cuanto a estructuras a gran escala (*LSS, Large Scale Structure* en inglés) en el Universo. La luz que proviene de ellos llega a la Tierra y presenta corrimiento al rojo z debido a tres contribuciones, señaladas en la ecuación (1). Las contribuciones sumadas a dicho corrimiento se enlistan respectivamente como: el debido a la expansión del tejido cósmico del Universo descrito por la ley de Hubble, el debido al efecto Doppler de las velocidades peculiares y la aleatoriedad de los movimientos de las galaxias en los cúmulos, y finalmente el corrimiento al rojo gravitacional.

$$cz = H(z)r + v_{pec} + cz_{gr} \quad (1)$$

El corrimiento al rojo gravitacional z_{gr} , basado en datos de archivo, es menor en comparación al corrimiento Doppler v_{pec} hasta por dos órdenes de magnitud, para masas $\sim 10M_{\odot}$ (Wojtak, 2014). Sin embargo, su carácter ligado a los pozos de potencial gravitacional (2) logra convertirlo en un fenómeno que pone a prueba las teorías para la gravedad dentro de la cosmología.

$$z_{gr} = \frac{\Delta\lambda'}{\lambda} \approx \frac{\Delta\Phi}{c^2} \quad (2)$$

El modelo estándar en cosmología, conocido como el modelo Λ CDM, asume la existencia de lo que es conocida como *materia oscura fría* y *energía oscura*. A lo largo de los años, se ha logrado ver que es de la luz que proviene y que pasa a través de los cúmulos de galaxias lejanas de donde se ha podido poner a prueba la Relatividad General. Efectos como el lentillaje gravitacional y (como se verá a continuación) corrimiento al rojo gravitacional son ejemplos concisos de ello. Asimismo, de él se ha podido encontrar más evidencia de que la materia oscura; materia no bariónica que no interactúa con nosotros pero que tiene gran presencia y consecuencias gravitacionales.

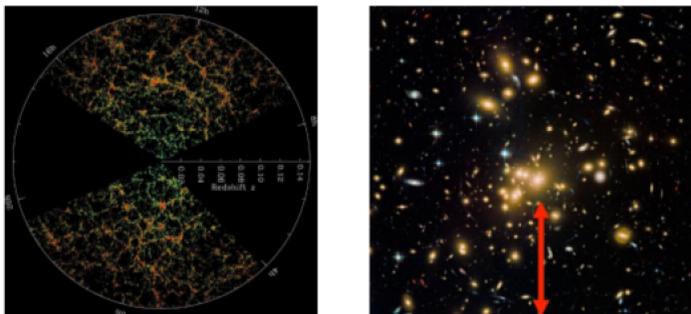


Figura 1: De un censo de galaxias se elige un cúmulo en particular a estudiar. La contribución al corrimiento al rojo gravitacional, teórica, sería de ~ 10 -50 km/s. Comparándolo con valores para otras observable, tiene un valor mayor y así mayor significancia de medir.

Modelo Λ CDM

De todos los modelos para el Universo, el modelo Λ CDM (*Lambda Cold Dark Matter*) representa el modelo de concordancia del Big Bang que explica las observaciones cósmicas de la radiación del CMB (fondo de microondas), así como la estructura a gran escala del Universo y las observaciones realizadas de supernovas con mayor éxito comparativo de los datos reales; arrojando luz sobre la explicación de la aceleración de la expansión del Universo. Es el modelo conocido que está más de acuerdo con todas las observables que implican estos rubros.

No obstante, es un modelo que sigue poniéndose a prueba en cosmología debido a la naturaleza aún incierta de materia y energía oscura, aunado al hecho de las discrepancias que arroja para estudios sobre galaxias individuales.

Gravedad Modificada

Dentro de las teorías que modifican a la gravedad - teorías que buscan expandir los preceptos propuestos por la relatividad general, se cuentan la teoría $f(R)$ y las llamadas teorías *MOND* (siglas en inglés para Dinámica Newtoniana Modificada).

Teoría $f(R)$

Es reintroducida en cosmología como una alternativa a parámetros concebidos previamente para explicar la expansión acelerada y formación de estructura del Universo (tales como energía y materia oscura). Su acción viene dada como:

$$S_{f(R)} = \frac{1}{2\kappa} \int d^4x \sqrt{-g} f(R)$$

donde, a comparación de la acción de Einstein-Hilbert que se tiene clásicamente, ya no aparece un término lineal del escalar de curvatura de Ricci $R = R_{\mu}^{\mu} = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$; sino una función arbitraria f dependiente de éste.

MOND-TeVeS

Teoría de gravedad modificada muy reciente, fue propuesta por Jacob Bekenstein en 2004, divulgada a partir de 2007 en adelante.

Al pertenecer a las teorías MOND, funciona bien a pequeñas escalas de galaxias individuales. Formulada directamente partiendo del principio de mínima acción, respeta leyes de conservación. No funciona bien para LSS.

Su acción se define como:

$$S_{\text{TeVeS}} = \int d^4x (L_g + L_s + L_v)$$

donde L_g es el lagrangiano de la acción de Einstein-Hilbert, L_s un lagrangiano de campo escalar y L_v un lagrangiano de campo vectorial.

Resultados

Wojtak (2014) compara el perfil para las tres teorías de gravedad de arriba para un corrimiento de la luz hacia el azul dado como:

$$\Delta(R) = \int \frac{\Delta_s(R)\Sigma(R)(dN/dM_v)dM_v}{\Sigma(R)(dN/dM_v)dM_v} \quad (3)$$

donde el perfil del corrimiento al rojo gravitacional para un cúmulo galáctico en singular es:

$$\Delta_s(R) = \frac{2}{c\Sigma(R)} \int_R^{\infty} [\Phi(r) - \Phi(0)] \frac{\rho(r)dr}{\sqrt{r^2 - R^2}} \quad (4)$$

Aquí, el potencial gravitacional evaluado en cierto punto se define como Φ , R es la distancia proyectada al centro del cúmulo galáctico, $\rho(r)$, $\Sigma(R)$ los perfiles de densidad en 3D y 2D respectivamente para las galaxias, M_v es la masa del virial y dN/dM_v la distribución de la masa de los cúmulos. Tomando datos del censo *Sloan Digital Sky Survey*, haciendo simulaciones apoyados por cadenas de Márkov y el método de Montecarlo, para un gran número de cúmulos; se obtienen aproximaciones cuasi-gaussianas que muestran las velocidades peculiares de las galaxias para ciertas regiones de los cúmulos y se obtiene esta gráfica:

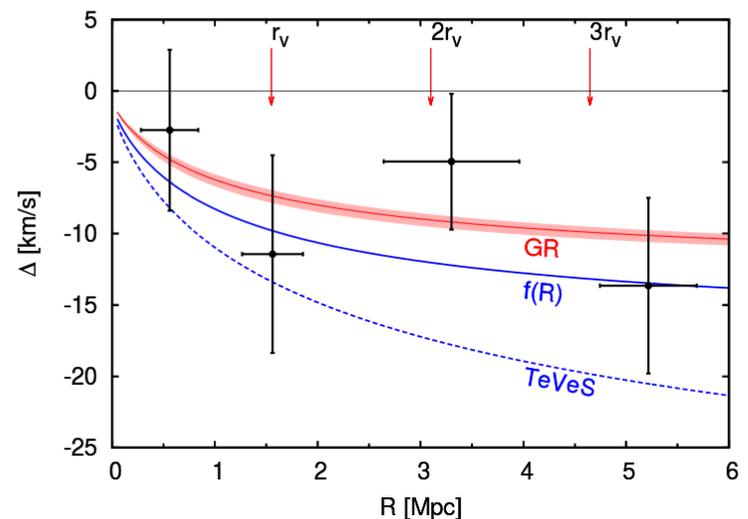


Figura 2: Perfil del corrimiento hacia el azul en las fronteras de los cúmulos galácticos en función de la distancia al centro del cúmulo R . Se grafica para Relatividad General (GR) en rojo y para las teorías de gravedad modificada en azul (de corrido $f(R)$, punteado TeVeS). TeVeS es la que se aleja más de los resultados apuntados por la GR.

Conclusiones

- Los artículos de investigación más recientes realzan el modelo Λ CDM como el óptimo para las grandes escalas del Universo, si bien no se ha detectado en los laboratorios indicios maleables de energía ni materia oscura.
- Los grados de libertad que otorga las teorías de gravedad $f(R)$ puede lograr que las observables se apeguen a la experimentación con los parámetros adecuados. Sin embargo, no eximen la posibilidad de remover Λ CDM como teoría válida.
- Las teorías de gravedad modificada como TeVeS embonan bien para escalas pequeñas (subgalácticas) y aunque conservan energía, pareciera que les hace falta esa presencia de energía y materia no visible de la energía de vacío de fondo del Universo para ser más consistentes.

Referencias

- Croft, Rupert A. C. "Gravitational redshifts from large-scale structure." *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 434 (2013) 3008-3017.
- Wojtak, R., Hansen, S. & Hjorth J. "Gravitational redshift of galaxies in clusters as predicted by general relativity", 2011, *Nature*, 477, 567 (W11).
- Light from galaxy clusters confirm theory of relativity DARK News, 2011. Sitio web oficial del Dark Cosmology Centre de la Universidad de Copenhague, Dinamarca (2011). Recuperado de: www.livescience.com/16270-general-relativity-gravitational-redshift-galaxies.html