

*Bóveda Celeste Sureña y
Enigmas Cósmicos:*

*Dos Cortas Pláticas
sobre
Astrofísica*

Dr. Edmund Bertschinger
Jefe de Departamento de Física,
Instituto Tecnológico de Massachussets,
Cambridge, Mass. EEUU¹

¹ Texto original: Two Short Lectures on Astrophysics, Edmund Bertschinger, 2007 en Reporte Anual del Departamento de Física del Instituto Tecnológico de Massachussets (I.T.M ó sus siglas en inglés M.I.T.), Número 20, p. 37. Traducido por Dr. José Antonio García Barreto, Investigador Titular B, Instituto de Astronomía, UNAM, Cd. De México, Mayo de 2008.

Visitas a las maravillas naturales y arqueológicas de Atacama en el viaje con ex alumnos del Instituto Tecnológico de Massachussets (I.T.M.) fueron intercaladas con mis Pláticas sobre Astrofísica, las cuales fueron amenizadas con los sabores de pisco. Soy un astrofísico teórico; la mayoría de mis investigaciones científicas en el Instituto para Astrofísica e Investigación Espacial Kavli del I.T.M. se han enfocado en tratar de entender de qué está formado el 96% del universo y cómo es que se comporta. Los átomos y sus partículas constituyentes sólo representan el 4% del universo presente.

MATERIA OSCURA

Materia oscura es el nombre, hasta cierto punto poco descriptivo, dado al material difuso que provee la mayoría de la masa en galaxias y que juega un papel importante en la formación de galaxias. Su existencia – deducida de la ausencia de masa suficiente en estrellas visibles y gas para mantener a las galaxias en sus órbitas observadas –

fue propuesta por primera vez en la década de los años 1930. La predicción exitosa de nueva materia a partir de su fuerza de gravedad (invisible) tenía algo de historia: en la década de 1840, el octavo planeta, Neptuno, fue deducido y después fue localizado a partir de las irregularidades encontradas en la órbita de Urano.

Las irregularidades en las órbitas galácticas producidas por materia oscura son mucho más dramáticas que las perturbaciones menores en el sistema solar. Nuestra galaxia, el grupo local de galaxias y todos los grupos y cúmulos de galaxias se separarían unas de otras completamente – de hecho, nunca se hubieran podido crear y mantener juntas después de la gran explosión – sin la existencia de mucha más masa (que produce fuerza gravitacional) de la que es observable. Al contrario de Neptuno, sin embargo, la materia oscura cósmica no ha sido aún detectada por ningún experimento excepto por los efectos de su fuerza de gravedad. A pesar de eso, un gran número de argumentos indirectos sugieren en forma concluyente que la materia oscura no puede estar hecha de átomos ó de partículas elementales conocidas. La explicación más sencilla para la materia oscura es una nueva partícula elemental generalmente conocida como “partícula masiva que interactúa muy levemente” ó PMIL (el término original en inglés es weakly interacting massive particle ó WIMP). PMIL están siendo buscados a través de las colisiones infrecuentes con átomos en los

laboratorios en Tierra, incluyendo los de la Prof. del ITM Enectali Figueroa-Feliciano y Peter Fisher y la recipiente del nombramiento Pappalardo Jocelyn Monroe.

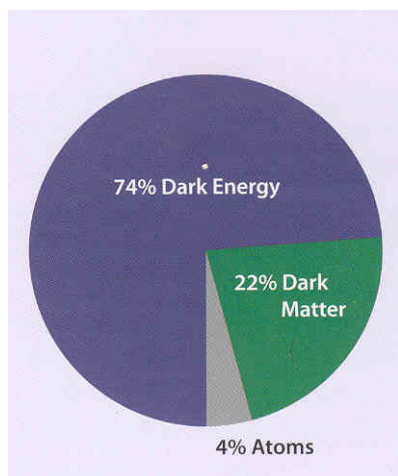


Figura 1. 74% es Energía Oscura, 22% es materia oscura y sólo 4% es de materia bariónica (protones, electrones, neutrones, núcleos de átomos, átomos y moléculas)

Las propiedades de galaxias como nuestra Vía Láctea nos proporcionan importante pistas ó ideas acerca de la naturaleza de la materia oscura ya que las galaxias se forman a través de la contracción debido a la fuerza gravitacional a partir de la energía generada y en expansión desde la gran explosión y la mayoría de la masa (que ejerce fuerza gravitacional) es oscura. (Energía oscura, como veremos, es muy diferente y juega un papel mucho menor, si es el caso, en la formación de galaxias.) A pesar de la complejidad de la formación de galaxias y su evolución, las propiedades observacionales de las galaxias indican varias conclusiones firmes acerca de materia oscura. En particular, las partículas de materia

oscura deben ser tan pequeñas (medidas a través de su sección recta² en colisiones elásticas e inelásticas) a tal grado que casi no chocan con ninguna otra partícula.

Una nube de partículas de materia oscura podrían pasar fácilmente a través de la tierra, del sol, u otra nube de materia oscura. Nubes de gas atómico en colisión, por otro lado, se calientan por choques y se enfrían por el proceso de emisión de radiación. Con la fuerza de gravedad el resultado de la pérdida de calor a través de fotones es el de comprimir a mayores densidades, concentrando átomos en objetos densos – estrellas y planetas – mientras que la materia oscura permanece difusa. La densidad promedio de materia oscura en el universo hoy es aproximadamente 2 miligramos en un volumen igual al de la Tierra. El valor local en nuestra galaxia es aproximadamente un millón de veces mayor pero más vacío que el espacio interplanetario.

La mera existencia de galaxias implica que las nubes de partículas de materia oscura que dieran lugar a la formación de galaxias debieron estar muy frías porque de otra manera los movimientos térmicos de las partículas hubiera dispersado las nubes antes de que las galaxias se hubieran podido formar. Este hallazgo condujo a la exclusión de los neutrinos como materia oscura en la década de los 1980: los neutrinos que se originaron de la gran explosión son demasiado “calientes” para permitir la formación de galaxias si fueran la materia oscura. El

² Nota del traductor: sección recta en éste contexto significa el área que presenta un objeto cuando interactúa con otro, por ejemplo en un juego de billar la sección recta de una pelota interactuando en colisión elástica con otra es simplemente el área que “vé” la otra pelota es decir el área del círculo con radio r ó πr^2 .

candidato mas popular hoy para la materia oscura es una hipotética partícula elemental fría denominada neutralino (WIMP)³. En forma similar al neutrino, el neutralino raramente colisiona con cualquier otra partícula. Sin embargo, el neutralino, si existe, debe ser mucho más masivo que el neutrino, y por lo tanto su temperatura disminuye más rápidamente con la expansión cósmica. Si el neutralino pesase cien veces más que el protón (por decir un posible valor), entonces la materia oscura en el espacio intergaláctico hoy se prediciría tener una temperatura de 20 pico kelvin, más de veinte veces más frío que las temperaturas alcanzadas en los condensados Bose-Einstein creadas por el Profesor del Instituto Tecnológico de Massachussets, Wolfgang Ketterle.

³ Nota del traductor: WIMP son las siglas en inglés de Weak Interacting Massive Particle, que en Español sería Partícula Masiva que Interactúa Débilmente con otras.

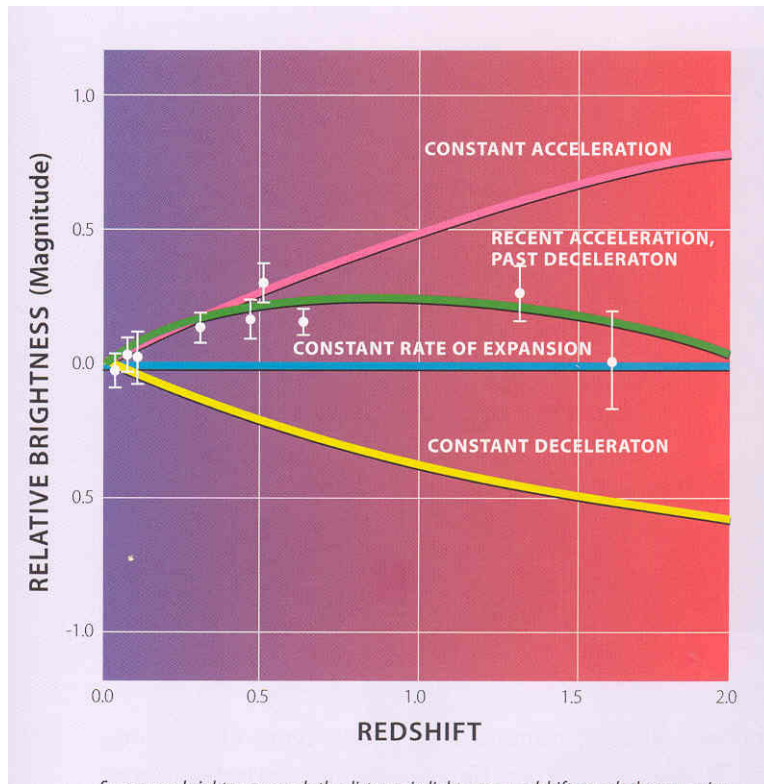


Figura 2. Corrimiento al rojo en el eje horizontal y brillo superficial de supernovas tipo Ia; las diferentes curvas muestran diferentes modelos del universo.

Mis propios estudios de materia oscura están encaminados hacia un entendimiento teórico completo de la dinámica iniciada con el universo temprano y yendo hacia delante en el tiempo hasta que las galaxias se forman. En forma interesante, las preguntas más difíciles implican la física más simple: Las Leyes de Newton y la ley de gravedad proporcional al inverso del cuadrado de la distancia. Un gas autogravitante de partículas de materia oscura desarrolla turbulencia debido a las interacciones no lineales de estructuras de dimensiones muy diferentes. Esta turbulencia es más complicada que la estela que

hace un aeroplano ó un bote porque, a diferencia de un fluido ordinario, la materia oscura es un fluido donde sus partículas no colisionan entre sí.

La mayoría de los estudios de investigación en el campo de formación de galaxias utilizan simulaciones numéricas, mientras que mis estudios enfatizan la parte complementaria de técnicas analíticas resolviendo ecuaciones diferenciales. Un resultado es la predicción de que la materia oscura debe exhibir superficies de muy alta densidad, denominadas cóusticas, las cuales son una analogía de las líneas brillantes de luz vistas en el fondo de una piscina. Estas cóusticas – así como las pequeñas nubes de materia oscura que se predice que van anexándose a las galaxias—tendrían muy poco efecto en la estructura de las galaxias pero afectarían las búsquedas experimentales de partículas de materia oscura ó los productos de su aniquilación. De forma inversa, la detección de materia oscura podrá, algún día, probar nuestros modelos de turbulencia sin colisiones.

ENERGÍA OSCURA

Cuatro por ciento de nuestro universo son átomos, los cuales hacen todo lo que somos y podemos ver; veintidós por ciento es materia oscura. El 74% restante es energía oscura. Energía oscura es el nombre dado a los intentos de explicar un extraordinario

descubrimiento anunciado en 1998 por dos equipos de astrónomos. En vez de que todo se esté desacelerando debido a la fuerza de atracción gravitacional de todo sobre todo lo demás, la expansión del universo se está acelerando. Es como si uno fuera a lanzar una pelota hacia arriba en el aire y la fuerza de gravedad, en vez de jalarla de regreso a la tierra, la empujara aún más rápido y más lejos en el espacio. Aparentemente, si uno pudiera llevar una pelota a una distancia de unos cuantos cientos de millones de años luz, ¡esto es exactamente lo que sucedería!

En términos estadísticos la evidencia más fuerte para la existencia de energía oscura proviene de las mediciones de la expansión cósmica inferida de las explosiones de supernovas observadas en el universo visible. Mediciones de distancia y corrimientos al rojo (la cantidad por la cual el universo se ha expandido desde que la luz fue emitida) pueden ser combinadas para dar la historia de la expansión del universo y por lo tanto medir si la expansión se está acelerando ó desacelerando. Las supernovas denominadas Tipo Ia proveen la señal estándar con la cuál se mide la distancia indirectamente: una estrella enana blanca de carbono y oxígeno – lo que queda, fría y muerta, de lo que fue una estrella con un poco más masa que nuestro sol – lentamente le roba masa a una estrella a su alrededor hasta que la enana blanca excede la máxima masa para ser estable, que descubrió Chandrasekhar en la década de los 1930, dando lugar a una gigantesca explosión de

supernova que emite un flash de luz similar en dimensiones para todas las supernovas del Tipo Ia. Combinando la emisión calibrada óptica de estas explosiones con su brillo observado aquí en la Tierra, los astrónomos pueden inferir la distancia. Años de intenso escrutinio han fortalecido aún más las conclusiones hechas hace una década: las supernovas del Tipo Ia nos dicen que algo está causando que el universo se acelere. Casi todo lo que “conocemos” acerca de este algo es el nombre que los cosmólogos le han dado: energía oscura.

A pesar de sus nombres, energía oscura y materia oscura tienen, creemos, sólo dos cosas en común. Primero, la única evidencia de su existencia proviene en la época actual de sus efectos gravitacionales. Segundo, la evidencia de la existencia de ambas es tan fuerte e involucra tal telaraña de diferentes mediciones que la hipótesis más simple consistente con los datos es que ambas sustancias oscuras existen. De las dos, energía oscura es la más difícil de estudiar porque parece jugar no jugar ningún papel en la formación de galaxias, y tampoco se concentra en las galaxias. Algo causa que galaxias distantes se separen una de otra mientras que galaxias cercanas se atraen. La energía oscura se comporta como un virus que ha tomado la maquinaria celular del espacio forzándolo a crecer sin límite.

¿En qué sentido puede uno denominar energía oscura una sustancia? La energía oscura podría ser una sustancia gravitatoria aún y cuando sea repulsiva en vez de ser una fuerza atractiva.

Paradójicamente, el espacio vacío por sí mismo – un vacío – podría ser la respuesta al rompecabezas de la energía oscura. De acuerdo a la mecánica cuántica, el vacío es un ambiente activo lleno de partículas “virtuales” y antipartículas que se materializan y viven brevemente en tiempo prestado del Principio de Incertidumbre de Heisenberg antes de desaparecer otra vez. Mientras que no es precisamente una sustancia que uno pueda tener en sus manos, este mar de partículas virtuales fluctuantes causa una fuerza de gravedad. (La luz también causa una fuerza de gravedad y también es imposible tenerla entre las manos.) En la década de los 1960 se llegó a la conclusión de que las fluctuaciones cuánticas del vacío corresponden a una sustancia con energía positiva y presión negativa, y que la presión negativa causa una fuerza de gravedad repulsiva de acuerdo a la teoría general de gravedad. El efecto es el mismo como el término de fuerza de gravedad repulsiva introducido por Einstein en 1917 cuando se dio cuenta de que sus ecuaciones de campo no permitirían que el universo estuviese en estado estático en la presencia de materia ordinaria como él había pensado que era. La constante cosmológica de Einstein era, por definición, lo sólo lo suficientemente fuerte como para contrarrestar la atracción gravitacional mutua de la materia. La energía oscura hoy es muchas veces más fuerte. El así conocido error más grande de Einstein – la constante cosmológica—podría ser válida si tan sólo fuese un poco más intensa ó fuerte.

Desafortunadamente las estimaciones teóricas de la energía del vacío muestran que a menos que una cancelación extraordinaria ocurra, la energía oscura debería ser 123 ordenes de magnitud mayor, es decir, 10^{123} veces más fuerte de lo observado. Este “problema de la constante cosmológica” aún continúa como un gran reto para los físicos.

En vez de energía del vacío, la energía oscura podría ser una forma exótica de masa-energía denominada un campo escalar que rueda lentamente. Esta idea tiene tracción: el mismo mecanismo fue invocado por el Profesor Alan Guth para llevar a cabo una fase de expansión acelerada en las épocas más tempranas del universo. Su modelo de universo inflacionario soluciona muchas de las incógnitas de la teoría de la gran explosión, especialmente aquellas relacionadas con la uniformidad de estructuras a gran escala del universo visible y las pequeñas fluctuaciones que dieron origen a las galaxias. Sin embargo, parece bizarro que el universo iniciase otra fase de inflación por la época en la que se formó en sol. Esta época es muy tardía en el universo según los estándares de física de partículas elementales.

Una tercera posibilidad es que la energía oscura no sea una substancia, pero en cambio se origine de las modificaciones de la teoría de Einstein de relatividad general. Esta posibilidad es muy sutil porque las mediciones de la energía oscura hechas a la fecha suponen que la teoría de relatividad general es exacta. He estado estudiando diferentes maneras de probar teorías alternas modificadas de gravedad que añaden

un parámetro libre a la relatividad general. Este procedimiento es similar a lo que se ha hecho para probar relatividad general en el sistema solar. Combinando varios métodos de luz así como movimientos de galaxias, debería ser posible determinar si la energía oscura es una sustancia ó gravedad modificada. Entendiendo energía oscura es una gran meta de investigación en cosmología para la siguiente década – ¡si no es que para el siguiente siglo!