

Condensados de Bose-Einstein en el Universo

Tonatiuh Matos Chassin**

I. ANTECEDENTES.

Los condensados de Bose-Einstein (BEC) fueron predichos por Bose y Einstein en 1925 como el resultado de la condensación de bosones, partículas de espín entero, que al enfriarse tienden a irse a su estado base. Los condensados de Bose, entonces, son sistemas de partículas de espín entero, en los cuales la inmensa mayoría de ellas están en este estado. Los BEC quedaron como algo exótico, pues para formarlos se necesitaba que los bosones que lo forman estuvieran muy cerca del cero absoluto y para esto se necesita tecnología especial. Por eso los BEC no fueron vistos sino hasta 1995, cuando por primera vez en un laboratorio del MIT, Anderson, Matthews, Wiederman y Cornell (ver Science 1995) lograron condensar y formar un BEC y desde entonces se han hecho cientos de experimentos y se han escrito miles de artículos sobre ellos. Estos autores lograron condensar átomos de Rubidio a una temperatura de algunos *mK*, logrando formar un sistema en donde casi todos los átomos de Rubidio se encuentran en su estado base, es decir, formando un BEC.

Pero ¿porqué son importantes los BEC's en astrofísica? La razón es la siguiente. Todas las teorías de unificación existentes proponen campos escalares (bosones) como partículas fundamentales, que son parte medular de las teorías. Este hecho implica que estos campos escalares puedan condensarse y formar objetos astrofísicos, es decir, BEC's en el universo. Si estos condensados se forman, se colapsan por su fuerza gravitacional, forman objetos llamados oscilatonos, si son campos escalares reales (la mayoría de las veces) o forman estrellas de bosones, si son campos escalares complejos. En este proyecto nos proponemos estudiar el colapso gravitacional de los campos escalares, los cuales al colapsar forman BEC's. Hasta ahora solo se ha estudiado este fenómeno suponiendo que el colapso tiene simetría esférica. Sin embargo esto impide el estudio de problemas más complicados, como el colapso de un campo escalar rotando, o el colapso de dos o tres objetos al mismo tiempo, o el choque de estos objetos. Es por eso que un estudio más completo requiere quitar la simetría esférica. En el grupo de investigadores involucrados en este análisis, los cuales son mis colaboradores y estudiantes, se encuentran físicos relativistas, numéricos, teóricos y astrónomos, ya que se pretende estudiar los BEC's no solo desde el punto de vista teórico, utilizando métodos numéricos y súper computo (computo en paralelo), sino desde el punto de vista observacional, para dar un criterio de la existencia o no existencia de dichos objetos, al menos en estos momentos. La investigación de los oscilatonos se inició desde hace ya algunos años en el Cinvestav, principalmente mis estudiantes de doctorado que ahora son investigadores de

universidades mexicanas. Este proyecto es la continuación de esta investigación que hasta el momento ha tenido mucho éxito. Desde que se inicio esta investigación, mis estudiantes, colaboradores y yo hemos publicado cerca de 40 artículos en revistas internacionales (ver por ejemplo algunos de estos artículos en la pagina <http://www.fis.cinvestav.mx/~tmatos/> y en los vínculos de ahí), mas una docena de publicaciones en memorias de congresos. De esta investigación o temas relacionados con ella se han doctorado ya 6 estudiantes, estos son:

1. Ulises Nucamendi. Tesis Doctoral: "Campos Escalares y el Problema de la Materia Oscura en Galaxias Espirales". Fecha de graduación: 18 de Junio de 1999. **Premio Arturo Rosenblueth a la mejor tesis doctoral 1999**. Asesor: Tonatiuh Matos.
2. Hugo Villegas Brena. Tesis Doctoral: "Posibles Señales Astrofísicas de los Campos Escalares". Fecha de graduación: 22 de Julio de 1999. Asesor: Tonatiuh Matos.
3. Maribel Ríos. Tesis Doctoral: "Mapeos Armónicos en Teorías de Einstein-Maxwell-Dilaton". Fecha de graduación: 27 de Noviembre del 2000. **Primer Estudiante de Doctorado en la historia de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo**. Asesor: Tonatiuh Matos.
4. Francisco Siddhartha Guzmán. Tesis Doctoral: "Acerca del Espacio-Tiempo de una Galaxia de Disco". Fecha de graduación: 29 de Noviembre del 2000. Asesor: Tonatiuh Matos.
5. Luis Arturo Ureña. Tesis Doctoral: "La hipótesis de la Materia Oscura Escalar". Fecha de graduación: 7 de Diciembre de 2001. **Premio Weizmann de la Academia Mexicana de Ciencias a la mejor tesis doctoral 2001. Premio Nacional de la Juventud 2005**. Asesor: Tonatiuh Matos.
6. Rubén Sánchez Sánchez. "Mapeos Armónicos para la Teoria Axion-Dilaton". Fecha de graduación: 12 Marzo de 2004. Asesor: Tonatiuh Matos.

4 estudiantes de nuestro grupo han hecho posdoctorado en temas de cosmología y relatividad numérica, siempre financiados a partir del segundo año de estancia por las universidades anfitrionas:

1. Ulises Nucamendi. 2 años de Posdoctorado en la Universidad de Sussex, Inglaterra, con el Prof. Ed Copeland, en cosmología. Actualmente profesor del Instituto de Física y Matemáticas de la Universidad Michoacana
2. Hugo Villegas Brena: 3 años de Posdoctorado en la Universidad de British Columbia, Canadá, con el Prof. Matt Choptuik, en relatividad numérica. Actualmente profesor del Instituto Tecnológico de Monterrey, en cd. de México

3. Francisco Siddhartha Guzmán: 2 años de Posdoctorado en el Albert Einstein Institut de la Max-Planck Gesellschaft, en Golm, Alemania y 1 año mas en la Universidad de Louisiana, EU con el Prof. Ed Seidel, en relatividad numérica. Actualmente profesor del Instituto de Física y Matemáticas de la Universidad Michoacana
4. Luís Arturo Ureña: 1 año de Posdoctorado en la Universidad de Sussex, Inglaterra, con el Prof. Andrew Liddle, en cosmología. Actualmente profesor del Instituto de Física de la Universidad de Guanajuato.

En este momento 2 estudiantes de doctorado, tres de maestría y varios de licenciatura trabajaran en temas alrededor de este problema. El estudio de los oscilatonos fue principalmente inspirado en la materia oscura. Sin embargo, los oscilatonos son interesantes por si mismo, ya que son objetos predichos por la teoría general de la relatividad, son soluciones de la teoría de Einstein cuando la fuente de materia es un campo escalar real. Cuando el campo escalar colapsa, este aumenta su densidad en el centro de colapso debido a la fuerza gravitacional de su materia, pero el colapso es detenido debido a la existencia de presiones intrínsecas, características de los campos escalares. Al final se logra un equilibrio muy estable, en donde la fuerza gravitacional favorece el colapso, pero es detenido por las presiones naturales del campo. El estudio de los oscilatonos es de gran interés en varias áreas de la física y de la matemática. Son interesantes desde el punto de vista matemático, porque son soluciones estables de las ecuaciones de Einstein que no son singulares ni tienen horizontes. Son soluciones dinámicas, pero hasta ahora solo se han estudiado los oscilatonos con simetría esférica. En este proyecto nos proponemos estudiar los oscilatonos no necesariamente con simetría esférica y en dos y tres dimensiones.

Desde el punto de vista físico, los oscilatonos son también de mucho interés. La razón es simple, desde hace algunos años se sabe que la materia oscura y la energía oscura son los verdaderos componentes del universo. Son los responsables de su formación y evolución. Sin estos dos tipos de materia es prácticamente imposible explicar la formación de estructura del universo y no se pueden explicar las observaciones de las supernovas del tipo Ia. Uno de los candidatos más fuertes para ser la energía oscura es un campo escalar real. Estos campos evolucionan y forman estructura a muy grandes escalas, es decir, pueden formar oscilatonos. Por otro lado, un candidato a ser la materia oscura del universo también son campos escalares, pero con otro potencial. Estos son oscilatonos del tamaño de un halo de galaxia que pueden ser los responsables de la estructura del universo que observamos. Y finalmente, los inflatones, también son campos escalares reales que probablemente son los responsables de un periodo inflacionario del universo en su etapa temprana. Sin estos inflatones no es posible resolver el problema del

horizonte del universo, ni explicar porque no vemos defectos topológicos por todos lados, ni como se formaron las semillas de las fluctuaciones primordiales del universo. Así que, los campos escalares son de suma importancia para el esclarecimiento de las nuevas observaciones del universo.

Para explicar mejor las motivaciones físicas, es necesario hacer un poco de historia. En la actualidad existe gran evidencia de la existencia de la materia oscura. La presencia de materia oscura fue señalada por primera vez por el astrónomo holandés Jan Oort en 1932, quien observó los desplazamientos de las estrellas cercanas con respecto al plano de la Vía Láctea y encontró un déficit de masa si consideraba que la galaxia era estable. Los resultados revelaron que tenía que existir el doble de la masa que se podía inferir al contar estrellas y nebulosas. Un año después, el suizo Fritz Zwicky examinó la dinámica interna del cúmulo de galaxias de Coma Berenices, y llegó también a la conclusión de que las galaxias observadas sólo daban cuenta del diez por ciento de la masa requerida para mantenerlas unidas gravitacionalmente. Estas observaciones llevaron a Zwicky a postular la existencia de grandes cantidades de masa faltante. Dicha teoría no recibió demasiada atención en su época. Sin embargo, en 1970, observaciones espectroscópicas y mediante ondas de radio realizadas por la astrónoma estadounidense Vera Rubin, permitieron conocer la velocidad de rotación de cientos de galaxias espirales, notando, en muchos de los casos, que la materia de una galaxia continúa incrementándose hacia el borde de su disco visible formado por estrellas, gas y polvo, siendo que en este tipo de galaxias la materia disminuye conforme uno se aleja de su centro, la única forma de explicar aquellas curvas de rotación, era la de suponer que estas galaxias contienen algún tipo de materia no luminosa, que debido a sus efectos gravitacionales, causaban dicha planicidad. En 1973, los estadounidenses James Peebles y Jeremiah Ostriker presentaron la primera argumentación teórica para la presencia de materia oscura en las galaxias espirales. Según su teoría, éstas se hallarían rodeadas de halos de materia que no podemos observar en forma directa. De acuerdo a las observaciones de Rubin y otras realizadas posteriormente, en algunos casos la materia oscura detectada en ciertas galaxias es hasta 200 veces mayor que la visible.

Aunque la teoría es muy plausible, todavía quedaba por determinar la naturaleza de estos "halos" de materia oscura. Algunos astrónomos creyeron que la materia oscura estaba compuesta por electrones, protones y neutrones (bariones). Es decir, materia común y corriente, pero en formas que aún no han podido ser detectadas. Estos podían ser hoyos negros, estrellas de neutrones, enanas blancas frías, planetas grandes e incluso asteroides. A estos objetos se les llamo MACHOS (Massive Compact Halo Object), esta hipótesis fue muy analizada desde principios de los años 80. Se hicieron

estudios sobre halos masivos de diferentes características, pero llegaron a la conclusión de que esta hipótesis no funcionaba, los halos no estaban hechos de materia barionica. Uno de los métodos usados para este análisis fue una variación de las lentes gravitacionales: la microlenticulación. Se enfocaron telescopios en un punto luminoso suficientemente alejado y se espero que pasaran objetos masivos entre los dos puntos, la relatividad predice que la luz se curva debido a la interferencia de un cuerpo masivo, entonces el objeto curvara la luz del punto luminoso y así el objeto puede ser detectado. Después de muchos experimentos tales como los proyectos MACHO, EROS, OGLE, DUO, MOA y otros, estos detectaron eventos de este tipo, pero no los suficientes como para demostrar que los MACHOS pueden contribuir significativamente como materia oscura. Estas observaciones descartaron a los bariones como un contribuyente sustancial a la materia oscura. Esto implica que la materia oscura tiene que ser de una naturaleza desconocida, algo exótico. La materia oscura, entonces, es una partícula que interacciona muy poco, o casi nada con la materia barionica, pero que sus efectos gravitacionales pueden explicar la materia faltante y la distribución de velocidades observadas.

Entonces el mayor porcentaje de la materia oscura es de naturaleza no bariónica y no interactúa fuertemente con la materia normal. Ha habido muchos candidatos a materia no barionica: neutrinos, axiones, monopolos, cuerdas cósmicas, racimos de quarks, una fauna de partículas exóticas denominadas WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles, o partículas masivas de interacción débil) y la materia oscura escalar. Sin embargo, a excepción de los neutrinos, todas las demás partículas elementales existen solamente en el campo teórico, ya que hasta el momento su existencia no ha sido detectada. Durante algún tiempo el neutrino fue el candidato con más posibilidades. Muchas de sus propiedades son conocidas y ahora sabemos que tienen masa, este importante aspecto ya ha sido confirmado experimentalmente. Sin embargo, incluso teniendo esta propiedad imprescindible, una materia dominada por neutrinos estaría en contradicción con la distribución de las estructuras observadas en el universo a gran escala, por lo que los neutrinos quedan descartados como candidatos a ser la mayor parte de la materia oscura. Es por eso que ya solo quedan los candidatos exóticos, materia que no ha sido vista o detectada. En la actualidad solo los axiones, los WIMPs y los campos escalares han quedado como candidatos viables. (Existen otras hipótesis, como la modificación de las leyes Newtonianas, pero estas contradicen principios elementales de la física, como violar relaciones de escala, etc. y aunque son muy populares en cierto sectores de científicos, nosotros no las podemos considerar como viables y no las discutiremos aquí).

Los axiones y los WIMPs tienen una forma similar de formar galaxias. Ambos se comportan como materia oscura fría. Esta

hipótesis ha tenido un gran éxito a escalas cosmológicas, sus predicciones han sido impresionantes: como el espectro de la radiación de fondo del universo o el espectro de masa del universo. Ambas predicciones son muy remarcables y todo modelo debería al menos repetir las. Sin embargo, a escalas galácticas el modelo de materia oscura fría parece tener algunos problemas. Dos de estos problemas son la formación en exceso de subestructura (exceso de formación de galaxias satélites en clusters de galaxias) o centros galácticos demasiado densos. Mas concretamente, las simulaciones numéricas, incluso las de alta resolución, muestran que la materia oscura fría colapsa formando estructuras de todo tamaño, no parece haber una limitante para el tamaño de las estructuras que se forman en el universo formado con materia oscura fría. Sin embargo, las observaciones mas recientes parecen mostrar que no hay estructuras de materia oscura tan pequeñas y las mas pequeñas que se observan son 10 o mas veces menores en cantidad que las predichas por la materia oscura fría. Así mismo, estas simulaciones muestran que la materia oscura fría colapsa en el centro de las galaxias, formando centros galácticos más densos de lo que las observaciones parecen mostrar. A ambos problemas se les ha podido dar la vuelta con argumentos razonables, pero ni los argumentos ni las observaciones son contundentes. Por lo que en estos momentos estos dos problemas están en amplia discusión. Además existen más objeciones a la hipótesis de materia oscura fría, como son la formación tardía de galaxias y de metalicidad. Estas -últimas objeciones son basadas en observaciones del universo de muy alta profundidad. Resumiendo, el modelo de materia oscura fría tiene un nivel predictivo y bases observacionales muy sólidas a escalas arriba de la escalar galáctica, pero pareciera tener algunos problemas a escalas menores, a escalas galácticas.

Esta es la razón por la que existen candidatos, como los campos escalares, que podrían resolver estos problemas. A pesar de que estas dos observaciones siguen aun en discusión, la hipótesis de la materia oscura escalar resuelve ambas de manera muy elegante. En una serie de publicaciones al respecto, hemos demostrado que los campos escalares al colapsar tiene un corte natural en el espectro de potencias de masa. Esto implica que los campos escalares no forman estructura a todas las escalas, tienen una preferencia que se puede fijar usando uno de los dos parámetros libres del modelo y que puede ajustarse naturalmente al numero promedio de galaxias satélites observadas en los clusters galácticos. Así mismo, hemos demostrado que la materia oscura escalar tiene un espectro de densidad plano en el centro, justo como se observa, y hemos ajustado prácticamente todas las galaxias enanas y de bajo brillo superficial observadas hasta el momento (algo que la materia oscura fría no puede hacer), así como hemos demostrado que las galaxias medianas y grandes se ajustan también muy bien con esta hipótesis. Es por eso que vale la pena estudiar la hipótesis de la materia oscura escalar, es decir, la

hipótesis de que las galaxias son oscilaciones. La materia oscura escalar tiene las mismas predicciones que la materia oscura fría a escala cosmológica, pero tiene estas ventajas muy remarcables a escala galáctica. Para ver más de los resultados de la hipótesis de la materia oscura escalar, incluso con todo detalle, se pueden ver algunas publicaciones al respecto en <http://pelusa.fis.cinvestav.mx/Publicaciones/SFDM.htm>.

Por otro lado, la energía oscura también puede ser modelada como un campo escalar, llamado quintessence. A fines de los años 90 dos grupos independientes, uno dirigido por Saul Perlmutter, en California y otro por Brian Schmidt en Australia, observaban supernovas del tipo Ia, debido a que se conoce con mucha precisión la intensidad de la luz que emiten y con esto, se puede calcular su distancia. Conociendo estos dos parámetros se puede comprobar la ley de Hubble, $d = H_0 z$. El resultado fue que entre más lejos se encontraba una galaxia, la velocidad de expansión era menor, contrariamente a lo que se debería esperar, esto quiere decir que el universo se expande cada vez más rápido. La necesidad para explicar esta expansión hizo que se considerara un nuevo tipo de materia, la energía oscura.

Ambos descubrimientos, la materia y la energía oscura son ahora la base de nuestros modelos del universo. Vamos a explicar esto. Desde hace algunos años, y con la ayuda de telescopios terrestres y orbitales, astrónomos y astrofísicos han observado las regiones más distantes del Universo. Hasta el momento más de cien mil galaxias, con distancias superiores a los 500 millones de años luz, han sido examinadas. Esto ha permitido construir mapas tridimensionales que representan la organización a gran escala del Universo, y los resultados muestran que las galaxias no están distribuidas uniformemente, sino que forman cúmulos y supercúmulos; a su vez, estos forman gigantescas estructuras alargadas, similares a filamentos. Claramente la materia oscura es la mayor fuente de energía gravitacional que hay en el universo y la responsable en mayor parte de esta formación de estructuras en el universo. Se han intentado obtener modelos confiables para la formación de galaxias y cúmulos galácticos, la materia oscura no bariónica ha sido clasificada como HDM, Hot Dark Matter (materia oscura caliente), si las partículas elementales de la que esta hecha se separo de la interacción del resto de la materia siendo partículas relativistas o CDM, Cold Dark Matter (materia oscura fría) si no eran relativistas.

No mucho después del Big Bang, y antes del período de formación de las galaxias, la materia comenzó a agruparse bajo los efectos de la gravedad. Si la materia oscura no bariónica fuera caliente, es decir, estuviera formada por partículas muy livianas, como por ejemplo neutrinos moviéndose a velocidades relativistas,

estos se hubieran trasladado rápidamente a grandes distancias, creando estructuras a gran escala como los gigantescos filamentos. En cambio, si estuviera formada por partículas mucho más pesadas y moviéndose a velocidades notablemente inferiores, como las WIMPs, las estructuras se habrían formado a una escala mucho menor, es decir, del tamaño de galaxias. Ambas por si solas no pueden explicar la formación de los dos tipos de estructuras, si la materia oscura es caliente, no forma estructuras pequeñas, pero si es fría no puede formar suficiente grandes estructuras. Pero lo sorprendente es que si se hace una combinación adecuada de ambas si puede llegar a formar un universo cercano a como se conoce actualmente. Parecía un gran avance, pero algo salio mal, La materia oscura tibia solo permite la formación de galaxias hasta muy tarde en la evolución del universo, siendo que se han observado galaxias bien formadas hace ya muchísimo tiempo, la conclusión es que la materia oscura debía ser solo fría. Hubo que tomar otro camino que consistió en retomar la idea de que el universo se estaba expandiendo cada vez más rápido y suponer la existencia de materia antigravitacional llamada energía oscura, que se encargara de la expansión, lo cual ajusta muy bien los datos observacionales. En estos momentos el modelo más popular es el llamado Lambda Cold Dark Matter, que consiste en un modelo CDM más una constante cosmológica, un término que equilibra la fuerza de atracción de la gravedad, que toma la forma de una fuerza gravitatoria repulsiva y que anteriormente había sido añadida como una simple constante a las ecuaciones de Einstein para lograr un universo estático.

En los años 90 y en los inicios de este siglo se llevaron a cabo detalladas investigaciones analíticas y numéricas para justificar esta hipótesis. Julio Navarro, Carlos Frenk así como Simon White han mostrado numéricamente que las agrupaciones a grandes escalas en el universo dominados por materia oscura fría en un 25%, mas la constante cosmologica en un 70% combina muy bien con mucha de las características observadas actualmente a grandes escalas. Al igual, desde un punto de vista teórico esta combinación ha tenido gran éxito cuando se la compara con los censos de galaxias y cúmulos de galaxias que se tienen.

El conteo actual de los componentes del universo esta como sigue:

- Estrellas brillantes: 0.5%
- Bariones: $4 \pm 1\%$
- Materia oscura no barionica: $23 \pm 1\%$
- Neutrinos: de 0.1% hasta 0.5%
- Energía oscura: $73 \pm 1\%$

Puesto que la totalidad de la materia visible resulta sólo una pequeña fracción de la masa total del Universo, conocer con cierta exactitud la cantidad de materia oscura existente nos ayudará a determinar el futuro evolutivo del mismo. Los cosmólogos se refieren a la masa total del Universo en términos de un parámetro denominado Omega; si no hay suficiente materia oscura como para “amarrar” gravitacionalmente al Universo (es decir, si el valor de Omega resulta menor que 1), este podría continuar expandiéndose infinitamente. En cambio, si existiera la suficiente masa (es decir, si el valor de Omega resulta mayor que 1), el Universo podría finalmente frenar su expansión, detenerla y comenzar a contraerse, para eventualmente colapsar. Un universo justo en el límite para estar infinitamente en expansión, implicaría un valor de Omega igual a 1.

Las estrellas solo cuentan para aproximadamente el 0.5% del contenido total de universo, en general, la mayor parte del universo es ópticamente oscuro. Pero gracias a la coincidencia de los resultados observacionales con los teóricos, aunado a un gran avance en la mejoría de los instrumentos astronómicos y a la física computacional se tiene la esperanza de despejar estas dudas pronto. Nuestra hipótesis de materia oscura escalar ha tomado importancia y ha mostrado ser compatible, hasta ahora, con todas las observaciones astronómicas, incluso aquellas en donde el modelo de LCDM parece tener problemas.

Resumiendo, vemos que los resultados que se han obtenido en los últimos años han sido impresionantes: la materia y la energía oscuras dominan la evolución y formación del universo. La materia oscura es un tipo de materia de naturaleza desconocida que interacciona muy débilmente con la materia común y que es la responsable de la estructura a gran escala del universo, la energía oscura, la otra forma de materia desconocida que produce una presión negativa, resultando en una fuerza gravitacional repulsiva, responsable de la expansión acelerada del universo. La materia que conocemos solo representa cerca del 4% del contenido total de materia en el universo. El resto de la materia es desconocido. A pesar del gran avance tanto tecnológico como científico, no se ha podido observar directamente estos tipos de materias y más aun, descifrar la naturaleza de estas.

Bibliografía

M.H. Anderson, M.R. Matthews, C.E. Wiederman and E.A. Cornell
Observations of Bose-Einstein condensates in a dilute atomic vapor.
Science, 1995.

Matos, Tonatiuh. De que esta hecho el universo? , FCE (La ciencia para todos, num. 204), 2005.

Turner, M. S. 2002, astro-ph/0207297

Primack, J. R. 2003, astro-ph/03312549
Tegmark, M. 2002, astro-ph/0207199
Fukugita, M. 2003, astro-ph/0312517