

ARTÍCULO

RELATIVIDAD NUMÉRICA EN MÉXICO

Tonatiuh Matos

Profesor CINVESTAV 3D, en el Departamento de Física del CINVESTAV-IPN.

Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel III.

Resumen

Hoy en día, gracias al avance de la tecnología, existen en México, y en otros países, grupos de astrónomos y físicos dedicados a descifrar problemas de cosmología, astrofísica y relatividad numérica. Mediante el uso de modernos y sofisticados aparatos se llevan actualmente varios estudios que arrojarán resultados novedosos.

Palabras clave:

Relatividad numérica, gravitación, materia oscura,

Introducción

Hace 100 años, un grupo de científicos, entre los que destacó Albert Einstein, llevó a cabo una serie de observaciones y especulaciones teóricas que, tiempo después, condujeron a la formulación de las dos grandes teorías del siglo XX: la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad. Éstas surgieron básicamente de dos fuentes: un problema de tipo teórico y una diferencia de las observaciones con la teoría electromagnética. El primero consistía en una discrepancia entre la forma de entender los observadores por la mecánica de Newton y la teoría electromagnética y el segundo en el hecho de no poder aclarar la radiación de un cuerpo negro utilizando la mecánica estadística y la teoría electromagnética de Maxwell. Estos dos desacuerdos condujeron a la humanidad a un salto cualitativo en ciencia y tecnología. El resultado final: la Teoría General de la Relatividad de Einstein y el modelo estándar de S.L. Glashow, A. Salam y S. Weinberg. En otras palabras, el modelo estándar surgió al estudiar el mundo microscópico y sus consecuencias. Pero a finales del siglo pasado, una serie de estudios recientes han llevado a nuevos descubrimientos, tan sorprendentes como los que se hicieron hace un siglo y que ahora provienen de la observación del mundo macroscópico: el universo.

A finales de los años 70 y principio de los 80, un grupo de astrónomos, dirigidos por una mujer llamada Vera Rubin, observó una anomalía en el movimiento de las estrellas que giran alrededor de las galaxias. La anomalía consistía en que éstas rotaban demasiado rápido, de tal forma que la materia "visible" en la galaxia no tenía suficiente fuerza gravitacional como para compensar la fuerza centrífuga, debido al desplazamiento de las estrellas. Vera Rubin postuló entonces la existencia de algo alrededor de la galaxia que llamó materia oscura, es decir, algún tipo de substancia que aumenta la fuerza gravitacional y compensa la centrífuga de las estrellas. Lo sorprendente es que esta materia oscura tenía que ser alrededor del 90% de la materia de las galaxias, lo que indicaba que la materia luminosa sólo representaba 10% de la materia total [1] (por ejemplo). Esto significa que, de hecho, las galaxias y por tanto el universo, están hechas de esta materia oscura. En un principio se pensó que esta substancia no era más que algún tipo de polvo, o tal vez planetas gigantes que no iluminaban, --como si hubiera Júpiteres por todos lados--, o quizás un número enorme de hoyos negros, etcétera. (http://www.caosyciencia.com/visual/fla.php?id_fl=206)

A lo largo de estos 30 años se han ido descartando una por una todas estas hipótesis, quedando así, uno de los misterios más grandes de la ciencia en nuestros días: ¿de qué están hechas las galaxias? Lo único que se sabe es que la materia oscura es la responsable de la apariencia del universo, de las galaxias, de los cúmulos de galaxias, etcétera. Sin ella es imposible entender cómo se formaron los sistemas estelares en estas galaxias y por tanto no se

puede explicar la existencia del Sol y su sistema de planetas. Pero el misterio no acaba allí. A fines del siglo pasado, dos grupos de astrónomos independientes, uno dirigido por Saul Perlmutter y otro por Brian Schmidt, utilizando el Telescopio Espacial Hubble de la NASA (por ejemplo, pueden ver la propia página de la NASA para esto: http://hubblesite.org/hubble_discoveries/dark_energy/), observaron una serie de explosiones de supernovas a distancias enormes. Se trataba de explosiones que datan de hace 5 mil millones de años, es decir, del tiempo en que se estaba formando nuestro sistema solar. Estas supernovas (estrellas cuyo combustible se acaba y que colapsan en un suspiro final), se encuentran tan alejadas de nosotros que su luz está llegando después de haber viajado 5 mil millones de años. Se les puede ver porque sus explosiones son tan poderosas que su luz ilumina casi tanto como lo haría la de una galaxia entera. Al observar este fenómeno, los astrónomos pudieron calcular la razón de expansión del universo en esa época, hace 5 mil millones de años. El resultado fue sorprendente y ha dejado a la comunidad científica atónita. Hace 5 mil millones de años el universo se expandía más lentamente que ahora. Lo cual es un desastre para el entendimiento que se tiene del universo. Imaginar que éste se expande, significaría que la fuerza de gravedad de una galaxia que contenga alrededor de 100 mil millones de estrellas como el Sol, estará siendo sobrepasada debido al movimiento que las aleja. Esta fue la razón de que se supone que el universo se inició con una gran explosión. Sin embargo, los cosmólogos pensaban que, después de la gran explosión, el universo tenía que mostrar un fenómeno de desaceleración debido a la fuerza gravitacional atractiva. Pero no, el universo no sólo se expande, sino que lo hace aceleradamente, cada vez más rápido, en contra de la fuerza de gravedad. Este hecho únicamente se puede explicar si existe otro tipo de materia en el universo que sea anti-gravitacional, es decir, gravitacionalmente repulsiva o un tipo de materia con una ecuación de estado que de presión negativa. A este tipo de materia exótica, desconocida y nueva es a lo que los astrónomos han dado por llamar energía oscura.

En el año 2003, los resultados del satélite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, <http://map.gsfc.nasa.gov/>) confirmaron la existencia de materia oscura y de energía oscura, dando con gran exactitud los porcentajes de éstas en el universo. El resultado fue que 23% del universo es materia oscura, 73% es energía oscura y sólo 4% es materia conocida, ésa que se predice en el modelo estándar. La gran sorpresa de fin de siglo es que no se sabe de qué esta hecha el 96% de la materia del universo.

(<http://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html>)

Problemas actuales de la gravitación

Es de remarcar el hecho de que permanece la misma situación de hace 100 años; se tiene una anomalía teórica como la que llevó a la formulación de la teoría especial: la teoría de la gravitación y la mecánica cuántica son incompatibles. Y se tiene además una anomalía experimental, como la que originó la formulación de la mecánica cuántica: no se sabe de qué esta hecho el 96% del universo, la llamada materia y energía oscuras. Mucha gente piensa que una extensión trivial del modelo estándar podría resolver el problema de la materia oscura, por ejemplo, si se agregará una simetría más al modelo, llamada supersimetría. Para la existencia de la energía oscura el camino es más oscuro. La mejor opción que sería regresar a la vieja idea desechada por Einstein de la existencia de una constante cosmológica. Pero esta hipótesis ha mostrado también muchos problemas, por lo que se cree que no es la respuesta final, sobre todo porque el origen de esta constante no está nada claro. De cualquier forma, mucha otra gente piensa que ésto no será suficiente, pues tanto la materia oscura como la energía oscura son dos tipos de materia cuya naturaleza es totalmente nueva. Para algunos, la solución a este enigma puede estar en dar ideas tan nuevas y revolucionarias como las ideas que cambiaron al mundo hace 100 años. Ya el hecho de pensar así puede ser sumamente estimulante ya que se vive una revolución científica, de ésas que se dan sólo un par de veces en la historia de la humanidad.

Cien años después se sabe un poco más del universo. Gracias a los curiosos de la ciencia, la humanidad ha cambiado mucho. Aunque Los políticos no lo alcancen a comprender, se está dando una revolución científico tecnológica, una transformación de la sociedad tan profunda como la revolución industrial del siglo XVIII y todo por saciar una curiosidad muy simple: ¿por qué el cosmos es como es? Sólo nos queda preguntar ahora, ¿qué dirán las generaciones de pensadores en 100 años? Seguro en 100 años alguien estará haciendo un artículo de divulgación como éste para platicar lo que paso en la física de principios del siglo XXI.

En México existen varios grupos de astrónomos y físicos que intentan atacar el problema de la materia oscura de una manera global, es decir, desde el punto de vista de las teorías fundamentales hasta el punto de vista de partículas elementales, la gravitación y la astrofísica. El estudio de la materia oscura ha sido llevado a cabo utilizando las teorías clásicas, como la teoría de Newton. Sin embargo, la teoría de Newton sólo es aplicable si se cumplen 3 límites: 1) velocidades pequeñas comparadas con la velocidad de la luz; 2) fuerzas gravitacionales pequeñas, como la del Sol; y 3) densidades pequeñas comparadas con las presiones, es decir, dada la ecuación de estado, por ejemplo $p=W\rho$, para la densidad de la materia ρ , la presión correspondiente debe ser muy pequeña. Sin duda las primeras dos condiciones se cumplen en el caso de la materia oscura. Pero es muy prematuro saber si la tercera se cumple o no. De hecho, una de las hipótesis que nosotros hemos estudiado, definitivamente no cumple con la tercera condición. Es por eso que hemos decidido estudiar la materia oscura con una herramienta (teoría) superior a la de Newton: la relatividad general.

Uno de los problemas más difíciles de superar para estudiar fenómenos con la ayuda de la relatividad general es el de la complejidad de sus ecuaciones de campo, por tanto, la complejidad de obtener soluciones de las ecuaciones de Einstein. Sin embargo, como en cualquier teoría, las soluciones de las ecuaciones de campo son la clave para obtener información que pueda ser confrontada con los experimentos y las observaciones del cosmos. Debido a su carácter no lineal y su complejidad, este tema de investigación ha requerido de mucho esfuerzo de parte de mucha gente. La información más importante de las ecuaciones de Einstein está en su régimen de gravitación fuerte, que coincide con el sistema en donde las ecuaciones son más complicadas.

Hasta hace una década, la única manera confiable de obtener información en este régimen de las ecuaciones, era a través de muy sofisticados métodos matemáticos, en donde, por cierto, los grupos de investigación mexicanos tuvieron un relativo éxito internacional. Sin embargo, estos métodos se concentran en problemas con mucha simetría y prácticamente todos los problemas realistas que se podían resolver ya se agotaron.

Supercómputo y gravitación en México

Por otro lado, desde hace unas dos décadas se han desarrollado métodos numéricos que resuelven las ecuaciones de Einstein. De nuevo, debido a su complejidad, se requerían de máquinas muy sofisticadas y caras para poder obtener un relativo éxito en la solución de tan complejo problema, por lo que los métodos analíticos seguían siendo la alternativa real para la mayoría de los investigadores interesados en este tema. Sin embargo, el clima cambió radicalmente con el avance de la tecnología computacional. Hoy, se pueden hacer complejos cálculos numéricos con una PC casera. Desde hace algunos años, un grupo de investigadores del CINVESTAV y de la UNAM nos dimos cuenta de este radical cambio y decidimos actuar en esta dirección, modificando nuestra línea de trabajo. Afortunadamente existen grupos de trabajo en EU y en la UE que han estado dispuestos a ayudarnos, más aun porque en estos grupos trabajan mexicanos. Fue así como en 1999, el Dr. Darío Núñez del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM y el Dr. Tonatiuh Matos del CINVESTAV, decidieron organizar una escuela introductoria de Relatividad Numérica. Con ayuda del Dr. Pablo Laguna, un mexicano que trabajaba en el grupo de relatividad numérica de la universidad de Penn State, el congreso Numerical Analysis with applications in Theoretical Physics, se llevó a cabo en el CINVESTAV, del 2 al 13 de Agosto de 1999 y reunió a más de 40 participantes internacionales, entre ellos, a los relativistas numéricos más destacados del mundo, como Ed Seidel, Matt Choptiuk, Jorge Pullin, Miguel Alcubierre, etc.

Éste fue el inicio del grupo de relatividad numérica en México. Poco después, y a recomendación de estos expertos, se armó el primer clusters de 16 computadoras con este propósito. Lo más complicado de trabajar con un cluster de computadoras es la paralelización del software utilizado. Afortunadamente, existe ya un software que esta paralelizado y que puede ser adaptado para los problemas que se quieren resolver. Este software, llamado Cactus (<http://cactuscode.org/>), es gratis y se puede bajar de la red, el problema es aprender a usarlo con eficiencia. Afortunadamente, el Dr.

Miguel Alcubierre, mexicano, trabajaba en esos días en el desarrollo de Cactus con el grupo de relatividad numérica del Albert Einstein Institut, de la sociedad Max-Planck de Alemania, en Golm, cerca de Postdam. El Dr. Alcubierre fue invitado por el Dr. Darío Núñez y el Dr. Tonatiuh Matos a incorporarse al grupo mexicano de relatividad numérica en formación y aceptó incorporarse al ICN-UNAM en el año 2001. Gracias a esto, nuestro grupo ha podido competir internacionalmente en este campo.

Sin embargo, el análisis numérico no es suficiente, también se requiere de la interpretación de los resultados y del planteamiento adecuado de los problemas. Para este propósito, se requiere de expertos en termodinámica, fluidos, relatividad, partículas elementales, etcétera. Desde el año 2000, estos grupos mexicanos han iniciado con mucho éxito, un trabajo sistemático en la resolución de problemas de cosmología, astrofísica y relatividad numérica y su interpretación.

Por otro lado, alrededor de los problemas de la materia oscura existe una gran variedad de problemas que también se atacan y que involucran nuevos horizontes como son:

1. Choques de Hoyos Negros.
2. Pulsares.
3. Materia Oscura Escalar.
4. Relatividad Numérica Teórica.
5. Lentes Gravitacionales.
6. Mecánica Estadística de Sistemas Gravitacionales.
7. Hidrodinámica Relativista.
8. Ecuaciones Geodésicas y Relatividad Numérica.
9. Ondas Gravitacionales.
10. Oscilatonos.

Cada uno de estos subproyectos está íntimamente relacionado con los otros y el proyecto total toca todos estos temas, sin olvidar que cada subproyecto tiene una fuerte componente que trabaja en forma individual. Vale la pena aquí detenerse para estudiar al menos uno de los subproyectos listado anteriormente. Los temas más relacionados con supercómputo son sin duda el primero y el último. Se hablará más específicamente del último, por ser el menos conocido.

Oscilatonos

El estudio de objetos autogravitantes hechos con campos escalares, genéricamente llamadas estrellas escalares, tiene ya una larga tradición. Aun cuando la motivación primaria en esta línea de investigación fue entender la formación de objetos bosónicos en un espacio-tiempo curvo de acuerdo a las ecuaciones de la Relatividad General (RG), se han convertido actualmente en los modelos de juguete preferidos en el campo de la así llamada Relatividad Numérica (RN).

La razón de esto es la forma simple que toman las ecuaciones de la RG cuando se considera este tipo de objetos. Esto hace posible, por un lado, el análisis de las propiedades intrínsecas de las ecuaciones de la RG, tales como las condiciones de frontera; y por otro lado, el estudio de los métodos numéricos más apropiados, estables y precisos para resolver y evolucionar las ecuaciones de la RG.

Sin embargo, hay otras razones más para el estudio de las estrellas escalares que van más allá del interés meramente numérico o de RG. Como se ha mostrado en publicaciones recientes[1], los campos escalares son candidatos fuertes para ser la materia oscura del universo. La evidencia observacional a nivel cosmológico es lo suficientemente consistente y fuerte para mostrar que 96% de la materia total actual del universo es de naturaleza desconocida; o más precisamente, su composición no es descrita por el conocimiento físico que poseemos hasta ahora.

Sin duda, el problema de la materia oscura cósmica es uno de los principales en la Cosmología moderna, y puesto que pone en evidencia el límite de nuestro conocimiento físico, no es de extrañar que este problema también requiera de investigación en otras muchas áreas para su resolución. En particular, si los campos escalares son candidatos para la materia oscura, es necesario hacer estudiar la posible formación de estrellas escalares bajo situaciones realistas, tal y como se presentan durante la evolución del universo.

Por esta última razón, se ha propuesto iniciar el estudio sistemático de las propiedades de las estrellas escalares hechas de campos escalares reales, que son llamadas oscilaciones (oscillatons). Dejando a un lado la motivación cosmológica mencionada anteriormente¹, el estudio de oscilaciones es un campo completamente nuevo aun cuando los primeros estudios fueron hechos hace más de 10 años [2], [3]. Más aun, los oscilaciones ofrecen características importantes y singulares que bien vale la pena investigar. Algunas de ellas serán descritas a continuación.

Tomando como ejemplo representativo el caso esféricamente simétrico, que es también el caso más simple, podemos acoplar la ecuación de movimiento de un campo escalar, la llamada ecuación de Klein-Gordon (KG), a las ecuaciones de Einstein (E) [4]–[8]. Si se buscan soluciones regulares y asintóticamente planas, el sistema acoplado EKG se convierte en un problema de eigenvalores que puede ser resuelto numéricamente de forma satisfactoria.

A diferencia del caso con campos escalares complejos, que pueden formar objetos estáticos, los oscilaciones deben ser objetos intrínsecamente dependientes del tiempo. Esto dificulta en cierta manera la solución del sistema EKG, ya que también se debe considerar un espacio tiempo curvo explícitamente dependiente del tiempo. Entonces, desde el punto de vista meramente formal, los oscilaciones proveen un modelo sencillo, en donde las ecuaciones de Einstein tienen soluciones no-estacionarias, lo que no ha sido estudiado de forma completa en la literatura actualmente conocida.

Una primera pregunta surge es: ¿son estables los oscilaciones? Típicamente, la estabilidad de un sistema es estudiada a través del análisis de perturbaciones. Sin embargo, este procedimiento no es del todo claro ni parece sencillo en el caso de los oscilaciones, principalmente debido a su dependencia temporal explícita.

Resulta entonces más conveniente investigar la estabilidad de estos objetos evolucionando el sistema EKG. El que esto tenga que ser así, nos lleva a considerar nuevas preguntas. Por ejemplo, ¿qué significado tiene la estabilidad de un objeto que depende explícitamente del tiempo?; si las ecuaciones tienen que ser resueltas completamente, como puedo asegurar que la solución numérica es la correcta, es decir, es la que se obtendría ¿en el caso ideal de encontrarse una solución exacta?.

La estabilidad de los oscilaciones ha sido probada de forma numérica en publicaciones nuestras recientes. Pero, estos resultados deben aún considerarse como parciales, ya que todo ha sido considerando sólo como simetría esférica, lo que significa que los oscilaciones son estables bajo todo tipo de perturbaciones radiales. Una prueba mucho más completa sería resolver el sistema EKG sin simetría alguna, con lo cual se podrían introducir perturbaciones más generales.

Por otro lado, se ha probado que existe un límite de campo débil en el cual el sistema EKG se traduce en el llamado sistema de Schroedinger-Newton (SN). Este último equivale a tener una función de onda de Schroedinger acoplada a su propia gravedad a través de la ecuación de Poisson para su potencial gravitacional. Cabe destacar que aún en el límite de campo débil, los oscilaciones conservan su dependencia explícita del tiempo, lo cual es también de interés debido a que el límite de campo débil no es sólo la aproximación Newtoniana que se esperaría usualmente.

El sistema de SN resulta más apropiado para el estudio de casos cosmológicos realistas, y en cierto sentido es más sencillo que el sistema completamente relativista. Aun así, el SN representa un reto desde el punto de vista numérico. Por un lado, su estabilidad ha sido probada en el caso esféricamente simétrico, pero aún queda por hacerlo en el caso más general, sin simetría alguna.

¹ Cabe aquí destacar que, dentro de la hipótesis de la materia oscura escalar, serían las observaciones cosmológicas las que jugarían el papel de evidencia empírica con la cual comparar los resultados teóricos de la evolución numérica de los oscilaciones. Aun cuando no se mencione tan claramente en el texto principal, este proyecto si busca poder comparar los resultados teóricos con las observaciones, tal y como debe ser en todo proyecto físico.

Por último y en relación con RN, los osciladores son los sistemas más simples que se puedan construir y sus características especiales ofrecen una buena oportunidad de estudiar métodos numéricos apropiados para evolucionar las ecuaciones de RG bajo condiciones controladas. Aún así, la evolución de estos sistemas sin simetría alguna sigue siendo un problema formidable que requiere del uso fuerte de recursos computacionales y del conocimiento avanzado de métodos numéricos. Cualquier investigación en este sentido arrojarán resultados novedosos que ayudarán en la preparación de estudiantes en RN, una de las áreas cuya influencia dentro de RG y cosmología crece a pasos agigantados.

Comentario final

En la actualidad estos grupos trabajan con un cluster de 32 procesadores duales intel xeon, con 2GB de memoria ram por procesador, o sea 4GB de memoria por nodo instalado en el departamento de física del CINVESTAV, se puede ver su página en <http://pelusa.fis.cinvestav.mx/tmatos/LaSumA/>, (ver figura 1) y además con tiempo de máquina en el cluster KanBalm de la UNAM. También existe un grupo importante de investigadores en el Instituto de Física y Matemáticas de la Universidad Michoacana, el cual ya goza de una popularidad considerable. El grupo de relatividad numérica de México ya tiene una presencia internacional y un futuro sin duda muy prometedor en todos estos temas de investigación.



Figura 1

Referencias

[1], Matos, Tonatiuh. **¿De qué está hecho el Universo?** Serie: La ciencia para todos. Fondo de Cultura Económica, No. 204.

[2], R. Ruffini and S. Bonazzola, *Phys. Rev.* (1996) 187, 1767.

[3], P. Jetzer, *Phys. Rept.* (1992) 220, 163.

[4], Guzmán, F. Siddhartha y Ureña-López, L. Arturo . “Newtonian collapse of scalar field dark matter”. *Physical Review D* 68, 024023 (2003). Preprint astro-ph/0303440.

[5], I Alcubierre, Migue; Becerril, Ricardo; Guzmán, Francisco S.; Matos, Francisco S.; Núñez, Darío y Ureña-López, L. Arturo. “Numerical studies of oscillatons”. *Classical and Quantum Gravity* (2003) 20, 2883.

[6], Ureña-López, L. Arturo; Matos, Tonatiuh y Becerril, Ricardo. “Inside oscillatons”. *Classical and Quantum Gravity* (2002) 19, 6259.

[7], Ureña-López, L. Arturo. “Oscillatons revisited”. *Classical and Quantum Gravity* (2002) 19, 2617.

[8], Miguel Alcubierre, Francisco S. Guzmán, Tonatiuh Matos, Darío Núñez, L. Arturo Ureña-López y Petra Wiederhold. “Galactic collapse of scalar field dark matter”. *Classical and Quantum Gravity* 19, (2002). Preprint gr-qc/0110102.

Nota: Artículo incluido en los “Highlights of 2002 and 2003” seleccionados por el Editorial Board de la revista *Classical and Quantum Gravity*, ver <http://www.iop.org/EJ/journal/-page=extra.2/CQG>.