

INTRODUCCIÓN

A través de los siglos, la astronomía ha enfrentado retos que ha logrado resolver a veces de manera aparentemente completa y en ocasiones de manera parcial. En realidad, los logros de la ciencia son engañosos. Durante varios siglos se creyó que las leyes de Newton describían perfectamente el movimiento de los planetas alrededor del Sol, hasta que a principios del siglo XX quedó claro que eran sólo una aproximación espléndida y que una descripción más exacta requería de la relatividad general. La ciencia parece ser una búsqueda sin final de un conocimiento que es cada vez más exacto, pero nunca perfecto.

Con esto en mente, podemos preguntarnos cuáles son los grandes retos que enfrenta la astronomía contemporánea. Como es de esperarse, son muchos, pero se escogerán dos por un par de razones: en primer lugar, se trata de temas que son investigados por un buen número de astrónomos, lo cual apoya su importancia. ¿A qué nos referimos con un buen número de astrónomos? En el mundo hay alrededor de 15 000 astrónomos profesionales. Estimo que los temas que trataremos atrapan cada uno la atención de alrededor de un millar de astrónomos. En segundo lugar, estos temas van de lo muy pequeño (astronómicamente hablando) a lo muy grande. Así, enmarcan todas las escalas físicas que interesan a los astrónomos.

¿Cuáles son estos dos temas? El primero es la búsqueda, en estrellas fuera de nuestro sistema solar, de planetas similares a la Tierra, que incluso podrían ser habitables o estar ya habitados por alguna forma de vida. El segundo tema es el estudio de los llamados componentes oscuros del universo, la materia oscura

* Centro de Radioastronomía y Astrofísica, UNAM, campus Morelia.

y la energía oscura, que dominan el movimiento de las cosas en las grandes escalas de las galaxias y del mismo universo como un todo.

LA BÚSQUEDA DE PLANETAS TERRESTRES

Nuestro sistema solar está formado por el Sol, ocho planetas y un gran número de cuerpos menores (planetas enanos, satélites naturales, asteroides, cometas, etc.). Hasta donde sabemos, sólo la Tierra contiene vida. Marte ha sido estudiado por varios robots y no parece tener vida. Entonces, existen razones tanto astronómicas como biológicas para plantearse la pregunta de si existen planetas similares a la Tierra alrededor de las estrellas que vemos en el firmamento. Hasta hace un par de décadas había sido imposible realizar esta búsqueda. Los planetas son cuerpos insignificantes comparados con las estrellas y es muy difícil establecer su presencia. Aun el más grande de los planetas del sistema solar, Júpiter, pesa aproximadamente sólo una milésima de lo que pesa el Sol y su diámetro es 10 veces más pequeño. Así como Júpiter es insignificante respecto al Sol, la Tierra es insignificante respecto a Júpiter, puesto que pesa 300 veces menos y su diámetro es una décima parte del de Júpiter. Más aún, los planetas son cuerpos oscuros, sin luz propia, que sólo brillan porque reflejan la luz del Sol. En contraste, las estrellas son cuerpos que producen grandes cantidades de luz y que pueden verse, incluso a simple vista, a través de las distancias interestelares.

La identificación de cuerpos externos al sistema solar que pudieran considerarse planetas se hizo por primera vez en 1992, cuando se detectó un sistema de dos planetas alrededor del pulsar clasificado como PSR 1257+12. El problema es que los púlsares son estrellas muertas que se formaron de la explosión de lo que fue una estrella mucho más grande que el Sol, y nadie esperaba hallar planetas en un ambiente tan hostil. Desde entonces, se han encontrado planetas alrededor de un púlsar (el caso de PSR B1620-26). Estos resultados no recibieron gran atención, y no fue sino hasta 1995 cuando los astrónomos suizos Michel Mayor y Didier Queloz anunciaron la detección de un exoplaneta que orbitaba la estrella 51 Pegasi, una estrella parecida al Sol. Los planetas son ex-

tremadamente difíciles de ser detectados directamente y la técnica que usaron Mayor y Queloz fue estudiar el movimiento de la estrella con respecto a nosotros. A esta técnica se le conoce como de la velocidad radial (la componente de la velocidad de la estrella con respecto a la línea de visión hacia ella). Debido a la presencia del planeta, la estrella presenta un pequeño cabeceo, que es posible detectar con telescopios y detectores lo suficientemente sensitivos.

Una vez que quedó claro que la técnica de medir la velocidad radial de la estrella permitía inferir la existencia de planetas, así como determinar la masa y distancia de éstos a su estrella, se desarrolló una cacería de exoplanetas desde distintos observatorios en el mundo. Esta cacería fue muy exitosa, y para principios de la primera década del siglo XXI ya se conocían varios cientos de exoplanetas. El problema es que estos exoplanetas eran predominantemente cuerpos parecidos a Júpiter y además muy cercanos a su estrella, por lo que se les bautizó como "Júpiteres calientes". ¿Qué estaba ocurriendo? ¿Sería que en el Universo no existían o casi no existían planetas como la Tierra? No era éste el caso, sino que estábamos ante un ejemplo de lo que se conoce como "sesgo observacional". Los movimientos de la estrella son mayores y por lo tanto más fáciles de detectar conforme el planeta es más grande y más cercano a ésta. Para aclarar lo anterior, digamos que este sesgo sería equivalente a un pescador que tira al mar una red con agujeros de 10 centímetros y acaba concluyendo que no hay peces más chicos que 10 centímetros.

Los planetas tipo Júpiter son enormes esferas de gas (mayoritariamente hidrógeno y helio) que no tienen superficie sólida; en consecuencia, no podrían sostener la vida, como ocurre en la Tierra, que tiene superficie sólida.

Era entonces necesario buscar otra técnica que favoreciera, o al menos permitiera, la detección de pequeños planetas como la Tierra. Esta técnica resultó ser la del tránsito del planeta frente a la cara de la estrella. Si la órbita del planeta está en la orientación adecuada, cada vez que complete una vuelta pasará enfrente de la estrella y disminuirá por una pequeña fracción el brillo de ésta. Los planetas son mucho más pequeños que las estrellas y estos tránsitos no pueden producir un eclipse total, sino sólo una pequeña disminución del brillo estelar. Es importante aclarar que todo esto se ve desde la Tierra como un punto de luz

que disminuye repetitivamente, con cada paso del planeta. No podemos distinguir al planeta de la estrella. Para explorar las posibilidades de esta técnica, la NASA puso en órbita en el año 2009 al satélite Kepler. Esta misión ha sido todo un éxito. Para 2013 lleva descubiertos más de un centenar de exoplanetas, entre ellos algunos de los mejores candidatos a planetas parecidos a la Tierra. Un ejemplo muy reciente es la estrella llamada Kepler 62, a la cual se le han detectado cinco planetas, todos con dimensiones similares a la Tierra (con radios que van de 0.54 a 1.95 del de la Tierra). Pero, de forma más interesante aún, los dos planetas más externos (conocidos como Kepler 62e y Kepler 62f) están en lo que se conoce como la zona habitable de su estrella. ¿Qué es la zona habitable?

La vida como la conocemos requiere de agua líquida. A la presión de una atmósfera terrestre, el agua está líquida entre los 0°C y los 100°C. Por debajo de ese intervalo se hace hielo y por encima vapor de agua. Entonces, un primer criterio para que un planeta sea considerado habitable es que su temperatura esté en este intervalo. Si un planeta está demasiado cerca de su estrella, estará demasiado caliente, mientras que si está demasiado lejos, estará demasiado frío. Como diríamos en México: "Ni tanto que queme al santo, ni tan poco que no lo alumbré". Este criterio de temperatura define una banda alrededor de la estrella que se conoce como la zona habitable. En el caso del Sol, la zona habitable abarca Venus, la Tierra y Marte.

El agua líquida actúa como un medio solvente en el que los compuestos orgánicos pueden mezclarse entre sí y ser transportados a las células. Nuestros cuerpos usan el agua líquida para eliminar las toxinas, regular la temperatura del cuerpo y ayudar al metabolismo.

Con el descubrimiento de muchos ejemplos de exoplanetas con tamaños similares al de la Tierra (lo cual implica que tienen superficie sólida), ubicados dentro de la zona habitable de su estrella (lo cual sugiere que podría haber agua líquida), el siguiente reto es estudiar la composición química de las atmósferas de esos exoplanetas, si es que las tienen. El estar en la zona habitable no garantiza nada. Además de la Tierra, Venus y Marte están en la zona habitable del Sol, pero ninguno de estos dos planetas tiene agua líquida. La evolución en el tiempo de un planeta lo puede llevar a perder su atmósfera (como el caso de

Marte) o bien a desarrollar una atmósfera con un efecto invernadero tan fuerte que el agua sólo podría existir como vapor (como en Venus).

Afortunadamente, es posible conocer muchas cosas de la atmósfera de un exoplaneta observándolo remotamente, desde la Tierra. A la inversa, el estudio de la luz de nuestra Tierra desde el espacio, en particular de lo que se conoce como la radiación infrarroja, nos permite afirmar que hay en nuestra atmósfera moléculas de vapor de agua, oxígeno gaseoso, ozono y metano, las cuales están vinculadas a la vida. Por ejemplo, el metano desaparecería si se extinguiera la vida, puesto que es producido principalmente por la digestión de los mamíferos terrestres.

Se ha planteado la construcción de satélites astronómicos que pudieran estudiar la atmósfera de los exoplanetas seleccionados a partir de las observaciones ahora disponibles. El problema es que se trata de un proyecto sumamente costoso, en el rango de los 5 000 millones de dólares, y con la crisis económica actual, no ha sido posible encontrar el apoyo para su realización. Pero la experiencia nos demuestra que estas crisis son periódicas y que en un clima económico más propicio será factible financiar el proyecto, posiblemente por un consorcio de naciones.

EL LADO OSCURO DEL UNIVERSO

Lo primero que hay que aclarar al hablar de este tema es que la materia oscura y la energía oscura son cosas diferentes, pero que tienen en común que lo que sean, no lo podemos ver directamente y sólo sentimos su efecto en el movimiento de las galaxias y del universo como un todo.

Las galaxias de morfología espiral, como la nuestra, rotan alrededor de su centro. Cuando uno estudia esta rotación encuentra que es demasiado rápida y que si la galaxia solamente tuviera la masa que le vemos en estrellas y nebulosas, la fuerza centrífuga de la rotación le ganaría a la fuerza atractiva de la gravedad y la galaxia se dispersaría en el espacio. Pero esto no sucede, y la explicación es que además de la materia ordinaria que vemos en estrellas y nebulosas existe

una materia oscura que no emite, absorbe o refleja la luz (o cualquier otra forma de radiación electromagnética), pero que sí deja sentir su fuerza de gravedad y mantiene estable a las galaxias. El candidato más viable para explicar la materia oscura es un tipo de partícula que existe en enormes cantidades, pero que simplemente no podemos ver o detectar, pero que está ahí.

Afortunadamente, hay teorías razonables que predicen la existencia de partículas con las características necesarias para explicar la materia oscura. Como interactúan muy débilmente con la materia ordinaria se les conoce como partículas masivas débilmente interactuantes o WIMPs (siglas en inglés de *weakly interacting massive particles*). El problema es que a pesar de un gran número de experimentos que buscan detectarlas, esto no se ha logrado. Una pequeña fracción de astrónomos piensa que lo que está mal es la ley de la gravedad de Newton. Esta ley nos dice que la fuerza de gravedad decae como la distancia al cuadrado. Estos astrónomos disidentes piensan que a grandes distancias la fuerza de la gravedad decae más lentamente que lo que nos dice la ley de Newton.

Pero si la materia oscura es difícil de entender, ante la energía oscura estamos, literalmente, a oscuras.

Para 1929, el astrónomo estadounidense Edwin Hubble había acumulado observaciones de 24 galaxias que le permitieron cambiar la concepción del universo. Encontró un sorprendente resultado: la mayoría de las galaxias que él estudió se alejaban de la nuestra a una velocidad proporcional a su distancia, lo que se conoce como la ley de Hubble. Esta ley cinemática del universo local se interpreta como evidencia de una expansión uniforme del espacio: todas las galaxias se alejan las unas de las otras.

El descubrimiento de Hubble impulsó la teoría cosmológica basada en la relatividad general desarrollada por Albert Einstein años antes, y según la cual el universo no puede ser estacionario, tiene o bien que expandirse o bien que contraerse. Al estar expandiéndose actualmente el espacio, significa que en el pasado las distancias eran más y más pequeñas. La descripción de las condiciones físicas de la materia y radiación en épocas remotas, donde todo era más denso y caliente, dio lugar a la llamada teoría de la gran explosión, la teoría que mejor describe nuestro universo. En el contexto de la teoría de la gran

explosión, hay múltiples posibilidades de expansión e incluso, luego de llegar a un máximo, podría haber contracción. Si en el universo hubiese sólo radiación y materia (tanto la ordinaria, como la oscura que aparentemente es cerca de seis veces más abundante), entonces la expansión tendría que frenarse por la acción atractiva de la gravedad que producen estos componentes. Ése es el comportamiento que se esperaba confirmar con las observaciones.

Durante décadas, muchos astrónomos dedicaron sus esfuerzos a estudiar la historia en el tiempo de la expansión del universo. El lector se preguntará si los astrónomos tenemos una máquina del tiempo. No, pero al estudiar objetos muy lejanos estamos estudiando el pasado porque la luz que de ellos nos llega salió de dichos cuerpos hace mucho tiempo, miles de millones de años en los casos más remotos. El reto lo asumieron en la década de los noventa dos grupos internacionales de astrónomos en el que jugaron un papel importante los observatorios de Cerro Calán y Cerro Tololo, Chile, así como los chilenos Mario Hamuy y José Maza, entre otros. Existe un tipo de explosiones estelares, llamadas supernovas de tipo Ia (SN Ia), que pueden verse a grandes distancias durante días y semanas posteriores a la explosión. Estas explosiones se espera sean similares en su luminosidad intrínseca, ya que provienen de superar la masa crítica de una estrella enana (1.4 masas solares) al acretar materia de una estrella compañera.

Lo que seguía era cazar supernovas del tipo correcto que estuvieran muy alejadas. Estas explosiones no son tan comunes. Por ejemplo, en galaxias como la nuestra se estima que pueden ocurrir alrededor de dos cada mil años. Entonces, para descubrir algunas supernovas en un año, hay que monitorear con buena precisión fotométrica decenas de miles de galaxias alejadas. Esta tarea la emprendieron en la década de los noventa de manera entusiasta las dos grandes colaboraciones internacionales mencionadas arriba, una encabezada por Saul Perlmutter y otra por Brian Schmidt y Adam Riess, los tres nacidos en Estados Unidos, aunque Schmidt realizó la mayor parte de su carrera profesional en Australia. Estos tres científicos compartirían el Premio Nobel de Física de 2011. En los artículos en los que planteaban cómo realizarían sus respectivos proyectos, ambos grupos hablaban de determinar la desaceleración de universo.

Nadie hablaba de la posibilidad de que la expansión del universo estuviera acelerándose. La naturaleza les guardaba una enorme sorpresa.

Ambos grupos publicaron sus primeros resultados en 1998 y 1999 usando aún pocas supernovas cosmológicas. Aunque todavía con mucha incertidumbre, sus datos indicaban que el universo no se está desacelerando (esto es, expandiéndose cada vez más lentamente), sino acelerando. Esta expansión acelerada implica que la densidad de materia-energía del universo está dominada por un medio repulsivo. Esto motivó un gran interés en las comunidades tanto de la astronomía como de la física.

Resultados de diferentes áreas sumados a los diferentes sondeos cosmológicos han convergido hacia un modelo cosmológico con geometría plana que de estarse frenando pasó a acelerarse en su expansión y que al día de hoy tiene densidades de materia-energía correspondientes a aproximadamente 5% en materia ordinaria, 21% en materia oscura y 74% en energía oscura. Contra lo que se creía anteriormente, la materia ordinaria es sólo una fracción pequeña del contenido de materia-energía del universo. Por otro lado, hay que decir que 5% que nos constituye a los seres humanos y a todo lo que vemos, es el porcentaje interesante porque es el que es capaz de formar estructuras como estrellas, planetas y humanos. La materia oscura y la energía oscura están distribuidas de manera más difusa. Pero en las grandes escalas son las que dominan el movimiento de las cosas.

Se ha presentado un gran número de propuestas para explicar la energía oscura (que siguen aumentando aceleradamente, como el universo), y para discriminar entre ellas se requiere de una nueva generación de sondeos observacionales que puedan determinar con mejor exactitud la expansión del universo a través del tiempo. Con el descubrimiento de la energía oscura, los astrónomos han abierto una caja de Pandora en la cosmología, astronomía y física de partículas. Les toca posiblemente ahora cerrarla. Por ello, varios de los grandes proyectos astronómicos más ambiciosos y costosos de los siguientes años están enfocados a medir con precisión la historia de la expansión del universo, así como los diversos parámetros cosmológicos.