

La expansión del universo se acelera

Gisela Hertling P.

(Basado en un artículo aparecido en Investigación y Ciencia de marzo de 1999)

En la cultura occidental, el conocimiento de como funciona el universo ha ido avanzando a tirones en los últimos 2000 años. Ptolomeo desarrolló su modelo geocéntrico en el siglo II d. C. Recién a fines de la década de 1540, después del descubrimiento de América, Nicolás Copérnico dio el siguiente paso al proponer un modelo heliocéntrico con órbitas planetarias circulares. En 1609 Johannes Kepler descubrió que las órbitas de los planetas en torno al Sol son elípticas. Cerca del final del mismo siglo, en 1678, Isaac Newton señaló que la fuerza gravitacional es la que mantiene a los planetas en sus órbitas. Bastante tiempo después, a principios del siglo XX, se descubrió que el Sol es una estrella más de la Vía Láctea, una de la infinidad de galaxias que pueblan el universo. En 1916 Albert Einstein dio una mejor explicación de por qué los planetas giran en torno al Sol en la Teoría General de la Relatividad creyendo él, como todos los científicos hasta entonces, que el universo no se alteraba en forma ni tamaño. En 1929 Edwin Hubble demostró que el universo se expande y que aumenta el espacio entre las galaxias en un descubrimiento tan difícil de aceptar después de la convicción ancestral de que el universo es inalterable, que hasta la década de 1980 aún había astrónomos que buscaban demostrar lo contrario. Y en 1998 se llegó a la conclusión de que esa expansión se acelera, en un descubrimiento tan sorprendente como el anterior.

Este último descubrimiento comenzó a gestarse hace unos 12 años, cuando un grupo de astrónomos de todo el mundo dirigidos por Saul Perlmutter de Berkeley, EE. UU., decidió buscar supernovas en galaxias distantes para utilizarlas como una segunda medida de distancia, complementaria al corrimiento al rojo (ver Recuadro 1). Tiempo después, en 1995, otro grupo, liderado por Brian Schmidt de Australia, comenzó a hacer los mismos estudios. En éste participan Mario Hamuy, Licenciado en Física de la Universidad de Chile, que actualmente está terminando un doctorado en la Universidad de Arizona, EE. UU., y Alejandro Clocchiatti, argentino, astrónomo de la Pontificia Universidad Católica. Aunque cada equipo trabajó por su cuenta, ambos aplicaron los mismos métodos, por lo que no sorprendió que sus conclusiones coincidieran.

Recuadro 1: Corrimiento al rojo

Aunque suele asociársele con el efecto Doppler, que afecta a las ondas sonoras, el corrimiento al rojo cosmológico (que se simboliza por la letra z) debe entenderse, con mayor rigor, como el resultado de la expansión del universo. Ésta alarga la longitud de onda de la luz que viaja entre las galaxias, la enrojece. Las emisiones procedentes de objetos remotos, al haber viajado durante más tiempo, experimentan un corrimiento al rojo mayor que la radiación de las fuentes próximas. Cuando un telescopio recibe luz de una supernova, se recoge una radiación que lleva viajando miles de millones de años, lo que significa que se ha trasladado a longitudes de onda cada vez mayores, de hecho, esta luz nace como emisión ultravioleta y se capta en el rango óptico o infrarrojo. Se puede medir el corrimiento hacia el rojo de cada supernova a partir de la luz analizada y descompuesta en sus colores, o sea, desde su espectro de luz.

El corrimiento hacia el rojo adquiere pleno sentido en la cosmología de Einstein. En el marco de la teoría general de la relatividad, el corrimiento constituye una medida del factor de escala - o tamaño- del universo en el momento en que se emitió la luz frente al alcanzado en el momento actual. Cuanto mayor es el corrimiento hacia el rojo, más ha cambiado el factor de escala desde el momento de la emisión de la luz y más tiempo ha transcurrido

La decisión de recurrir a las supernovas es bastante reciente: se tomó tras años de estudio por teóricos y especialistas observacionales. Se buscaba un objeto cuyas propiedades de luminosidad fueran universales, es decir, independientes del tiempo y de la región del espacio donde se producen, homogéneas: con poca dispersión en su brillo intrínseco o con propiedades de brillo intrínseco que obedezcan a una ley o relación bien conocida, y observables hasta muy altos corrimientos al rojo, esto es, a grandes distancias, para lo cual debía ser un tipo de objeto muy brillante.

Las supernovas son estrellas que, al explotar, emiten la luz de miles de estrellas juntas. Esto hace que sean visibles, con telescopios, a grandes distancias, pero tienen la desventaja de mostrar una amplia variación en sus propiedades de luminosidad, por lo cual es difícil encontrar la manera de utilizarlas como un indicador para medir la distancia a las galaxias que las albergan.

Por esto, los equipos de investigadores debieron, como primer paso, estudiar qué tipo de supernovas tenían alguna característica constante que pudiera servir de medida estándar.

Estas resultaron ser las supernovas de tipo Ia (ver Recuadro 2), cuyas propiedades de brillo intrínseco se pudieron determinar con gran precisión, independientemente de su entorno.

Aunque varían ligeramente en brillo, estas supernovas siguen un patrón en el que las explosiones mayores y más brillantes duran más que las débiles. Por lo tanto, si se conoce su duración, se pueden corregir las diferencias de luminosidad y deducir su brillo intrínseco con gran precisión. Durante los diez últimos años, el estudio de supernovas de tipo Ia con los detectores modernos ha convertido a tales destellos de luz en los indicadores estándar mejor conocidos de los astrónomos. Son una especie de ampolletas gigantes para las que con sólo leer la etiqueta se conoce la potencia que entregan.

La frecuencia con que aparece una supernova de tipo Ia en una galaxia típica se estima en torno a una vez cada 300 años. Por lo tanto, si se observan constantemente algunos miles de galaxias se puede descubrir casi cada mes, una supernova de este tipo (ver Recuadro 3).

Figura 1 (gentileza de Alejandro Clocchiatti): Galaxia espiral IC 438 con la supernova 1997B (indicada con la flecha). Se trata de una galaxia cercana, está a 127 millones de años-luz, por lo que la luz de la supernova se ha “enrojecido” desde el ultravioleta hasta el azul. Cuando esta radiación comenzó su viaje, el universo tenía el 99% del tamaño actual.

Ambos equipos de investigadores desarrolló su propio programa. Sin embargo, los dos sacan partido de un mismo avance fundamental: el uso de grandes detectores electrónicos de luz en telescopios gigantes. Esta combinación produce imágenes digitales de objetos débiles sobre una superficie considerable de cielo. Así sucede, por ejemplo, con la Cámara de Gran Rendimiento. Cuando se coloca en el foco del Telescopio Blanco, de cuatro metros, del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, con una sola exposición se cubre casi tanta extensión como la Luna llena y se obtiene una imagen de unas cinco mil galaxias en diez minutos.

Dado que se debe hacer un seguimiento inmediato de las supernovas en otros telescopios, estas imágenes se analizan en cuanto se obtienen. Los programas computacionales registran la posición de los objetos e intentan identificar supernovas. Pero las búsquedas automatizadas son imperfectas, por eso hay que revisar las imágenes de forma visual para comprobar si una supuesta supernova lo es realmente.

Luego, los astrónomos se centran en los mejores candidatos de supernova. Los observan con instrumentos ópticos aún más precisos para resolver si los objetos descubiertos son o no supernovas de tipo Ia, calibrar con exactitud su brillo intrínseco y determinar su corrimiento al rojo.

Recuadro 2: Supernovas Ia

A grandes rasgos, una supernova de tipo Ia es el estallido final producido cuando una estrella enana blanca se transforma en una bomba termonuclear natural. Pese a la espectacularidad de la transformación final, el comienzo de la vida del progenitor de la supernova es el de una estrella de baja masa ordinaria: una bola estable de gas cuyas capas externas se mantienen en equilibrio hidrostático por el calor de las incesantes reacciones nucleares que se desarrollan en su interior y convierten hidrógeno en helio, carbono, oxígeno, neón y otros elementos. Cuando una de estas estrellas muere, las cenizas nucleares se mezclan, comprimidas por la gravedad, hasta alcanzar el tamaño de la Tierra y una densidad de un millón de veces mayor que la típica de la materia ordinaria, dando origen a una enana blanca.

Éstas, en su mayoría, se enfrían hasta extinguirse. Pero si se halla en órbita cerca de otra estrella, puede succionar materia de su compañera y adquirir una densidad creciente, hasta que se produce una ignición termonuclear descontrolada. El cataclismo nuclear destroza completamente la estrella enana, lanzando material a unos 10.000 kilómetros por segundo. El brillo de esta bola de fuego en expansión demora unas tres semanas en alcanzar su máximo, para declinar en meses.

Mientras tanto, otros miembros de ambos grupos, que trabajan con telescopios de Australia, Chile y EE.UU., siguen la evolución de las supernovas para determinar el momento en que alcanzan el máximo de brillo y su lento decaimiento. La campaña de observación de una supernova dura meses. Muchas veces el análisis final tiene que esperar un año o más, hasta que desaparezca la luz de la estrella que ha estallado y se pueda obtener una buena imagen de su galaxia huésped. Esta sirve para sustraer, de las imágenes de la supernova, el brillo constante de la galaxia.

Figura 2 (gentileza de Alejandro Clocchiatti): Supernova 1999fv (indicada por la flecha). Es la supernova más lejana confirmada. Su galaxia huésped (tan débil que no se percibe) está a 9500 millones de años-luz. Esto hace que su luz haya “enrojecido” desde el ultravioleta al infrarrojo, rango en el que está tomada la imagen. Esta explosión se produjo cuando el universo tenía un tercio del tamaño actual.

Los dos equipos han estudiado ya ejemplos de supernova en alto corrimiento al rojo, que estallaron hace entre 4000 y 7000 millones de años. Tenía entonces el universo entre la mitad y dos tercios de su edad actual. Durante esos estudios, ambos grupos recibieron la

misma gran sorpresa: las supernovas son más débiles de lo esperado. La discrepancia es leve: en promedio, las supernovas remotas aparecen un 25 por ciento más débiles de lo esperado. Pero basta esa cifra para cuestionar las teorías cosmológicas más arraigadas.

Antes de extraer ninguna conclusión radical, los astrónomos de ambos equipos han buscado explicaciones más simples que justifiquen la relativa debilidad de las supernovas remotas como la presencia de polvo cósmico, una lente gravitatoria, o distintas composiciones químicas de las estrellas.

Puesto que ninguno de estos efectos triviales explica las observaciones, nos inclinamos, con otros muchos, a pensar que la debilidad del brillo de las supernovas remotas se debe a la estructura del cosmos.

En primer lugar, el espacio podría tener una curvatura negativa. En ese caso, la enorme esfera de radiación arrojada por una supernova muy antigua tendría una extensión mayor que la que dispondría en un espacio geoméricamente plano, haciendo que la fuente apareciera extrañamente debilitada. Esta posibilidad se ha descartado casi totalmente, ya que hay muchas pruebas (algunas muy recientes) de que el universo es geoméricamente plano.

Una segunda explicación, y la más aceptada, atribuye la debilidad de las supernovas remotas a que éstas se hallarían más alejadas que lo que sus corrimientos al rojo sugieren. Con otras palabras, las supernovas situadas a estas enormes distancias mostrarían menos corrimiento al rojo que lo que cabría atribuirles. Para justificar ese menor corrimiento hacia el rojo, los cosmólogos postulan que la expansión del universo procedió con mayor lentitud en el pasado que lo que se supone, con un consiguiente menor desplazamiento global del universo y de la luz que viaja en su seno.

Desde que la mayor parte de la comunidad científica aceptó como cierto el descubrimiento de Hubble, siempre se había supuesto que la expansión del universo se iba frenando con el paso del tiempo debido a la fuerza atractiva de la gravedad. Por esto, su aceleramiento va en contra de todo pronóstico y ha impactado fuertemente a los astrónomos y cosmólogos. Pero también introduce otro hecho que desconcierta a los físicos, ya que para que se produzca, el universo debe estar lleno de alguna forma de materia o de energía desconocida cuya gravedad, en vez de atraer, repele. Es decir, este descubrimiento entraña un cambio radical en la comprensión del cosmos.

Recuadro 3: Cómo encontrar supernovas

Para encontrar supernovas distantes, basta tomar imágenes de la misma parte del firmamento con unas pocas semanas de diferencia y buscar, en los cambios operados, explosiones de estrellas. Los detectores digitales cuentan el número de fotones en cada elemento de imagen en forma precisa. Por lo tanto, sólo queda sustraer la primera imagen de la segunda y comprobar las diferencias significativas entre las dos. Dado que se examinan miles de galaxias en cada par de imágenes, es seguro que la búsqueda entre una gran cantidad de parejas de imágenes terminará arrojando muchas supernovas

Los Aceleradores de Partículas en Chile

José Roberto Morales

Facultad de Ciencias Universidad de Chile

Al término de la segunda guerra mundial, la física nuclear emergió como una disciplina de gran interés científico y estratégico. Consecuentemente muchos países generaron programas de investigación en el tema, tanto en aspectos básicos como aplicados.

El Acelerador de Cockcroft-Walton

En Chile, gracias a la gestión del rector de la Universidad de Chile, don Juan Gómez Millas, se adquirió un acelerador de partículas tipo Cockcroft-Walton de energía máxima 800 keV, fabricado por la firma holandesa Philips. Ese acelerador se instaló en el subterráneo del edificio del Departamento de Física de la Escuela de Ingeniería alrededor de 1955. Junto con la máquina vinieron técnicos y físicos holandeses uno de los cuales, el Dr. Van Loef quedó en Universidad de Chile por varios años participando en investigación y docencia. La instalación del acelerador despertó vocaciones científicas en numerosos jóvenes estudiantes y profesionales. Varios de ellos fueron a realizar estudios de postgrado en universidades de Europa y de EE.UU. gracias al impulso dado por el rector Gomez Millas para la formación de científicos.

Con el acelerador se hicieron trabajos en reacciones nucleares usando los haces de protones y partículas alfas. También se desarrolló la línea de investigación con neutrones de 14 MeV usando el haz de deuterones y blancos de tritio. Los resultados de los trabajos se publicaron en revistas de circulación internacional. El último trabajo se terminó en 1965 y se publicó en 1966. En esos trabajos participaron J. Rapaport, Van Loef, L. González, A. Trier, P. Martens, J. Zamudio, J. Romero, J. R. Morales y otros.

Como el acelerador Cockcroft-Walton sólo podía generar haces de partículas cargadas de bajas energías, las posibilidades de realizar trabajos de investigación en esa línea eran prácticamente nulas. Eso indujo al grupo encabezado por Jacobo Rapaport a preparar un proyecto para adquirir un acelerador Van de Graaff de 7 MeV. Pese a haber conseguido un precio favorable y un crédito a muy largo plazo, el proyecto fue finalmente rechazado en 1965, aduciendo que esos recursos podrían ser mejor invertidos en obras sociales. Como consecuencia de esa decisión, Rapaport emigró a EE.UU. y varios jóvenes buscaron otros temas de especialización.

En la actualidad una parte de la estructura del acelerador Crockett-Walton decora el hall del edificio del Departamento de Física de la Escuela de Ingeniería.

El Acelerador Ciclotrón

Por esa misma época, se estableció el Programa Alianza para el Progreso impulsada por el presidente de los EE.UU. John Kennedy, que vinculaba a un estado norteamericano con un país latinoamericano. Chile se vinculó con el estado de California y eso llevó a generar numerosos contactos y convenios entre instituciones afines. Así, se estableció un convenio de colaboración entre la Universidad de Chile y la Universidad de California. En el transcurso de una visita de autoridades universitarias chilenas a los campus de la Universidad de California, éstas se impusieron que había un acelerador ciclotrón disponible en el campus de la ciudad universitaria de Davis, a 60 millas de Berkeley. El acelerador fue ofrecido a la U. de Chile la que decidió aceptar la donación. El programa académico U. de Chile-U. de California, contaba con el financiamiento de Ford Foundation, la que financió el traslado del acelerador a Chile, parte de su instalación y compras de equipos adicionales. El físico Jorge Zamudio y dos técnicos viajaron a Davis a familiarizarse con el ciclotrón y participar en la preparación de su transporte a Chile.

Ese ciclotrón había sido construido en los talleres de la U. de California con un diseño innovador en cuanto a funcionar con frecuencia constante y con un campo magnético variable radialmente, a fin de compensar el incremento relativista de la masa de los iones. Podía acelerar iones de hidrógeno, deuterio y helio en un rango de energía entre 2 y 5 MeV en protones y deuterones y hasta 10 MeV en alfas. Si bien su diseño era avanzado, la ingeniería de mantención era precaria. Los sistemas de radiofrecuencia, alto vacío y otros provenían de equipos ya muy usados. La forma en que fue armado hacía imposible acceder al interior del campo magnético para su mantención o reparación. Estos aspectos se hicieron importantes a lo largo del tiempo.

Como no había espacio disponible en la Escuela de Ingeniería para su instalación, se hicieron gestiones ante el gobierno, el que cedió a la U. de Chile un terreno en la ex-Chacra Santa Julia en Nuñoa, sitio que ahora se denomina campus Juan Gomez Millas.

El ciclotrón llegó a Chile en Septiembre de 1966. El galpón en que se instaló fue la primera construcción del campus y en su entorno se fueron construyendo edificios de un piso para física, matemáticas y posteriormente construcciones provisorias de madera para biología y química, las que se mantienen en uso hasta la actualidad. También se instalaron talleres de mecánica y de electrónica. El 6 de Junio de 1967 fue inaugurado por el presidente de la República don Eduardo Frei Montalva. En 1969 se obtuvieron los primeros haces de

protones y alfas. Los primeros trabajos consistieron en mediciones de secciones eficaces elásticas de partículas alfa en carbón a ángulos de retroceso cercanos a 180 grados, efecto Glory, y determinación de estados isoméricos. Con el haz de deuterones se inició la obtención de neutrones de energías en torno de 20 MeV para ser usados en el estudio de reacciones nucleares. Hacia 1973 en el laboratorio había un grupo de alrededor de quince investigadores, de los cuales siete eran extranjeros y cuatro tesis.

Con posterioridad a Septiembre de 1973, la actividad en torno a este acelerador empezó a decaer por la emigración continuada de los miembros del grupo, el que se redujo a un conjunto vacío en Julio de 1975. El acelerador estuvo inactivo hasta 1980 cuando se reanudó la actividad con el retorno del autor de este relato. El acelerador estaba aun en condiciones de operar, pero con severas limitaciones en su capacidad para generar haces de energías altas. Un pequeño grupo se fue formando con alumnos de licenciatura y algunos profesores que se habían incorporado al Departamento de Física en el periodo de la fusión con el Instituto Pedagógico. Las limitaciones técnicas del acelerador sólo permitieron usarlo preferentemente en aplicaciones del método analítico PIXE (Proton Induced X-ray Emission), que no es exigente en intensidad del haz. Esto abrió la posibilidad de desarrollar proyectos aplicados en temas interdisciplinarios. En investigación básica se realizaron mediciones de secciones eficaces totales con neutrones de 20 MeV en varios elementos. Sin embargo, este tipo de experimentos hubo que suspenderlos debido al creciente deterioro del acelerador. Esta situación acrecentó la necesidad de reemplazar al ciclotrón por un acelerador más moderno ante su inevitable cierre.

El Acelerador Van de Graaff

En 1996 el Profesor Jorge Valdés nos informó que Lucent Technology Laboratories de Murray Hill, New Jersey, abría postulaciones para acceder a un acelerador Van de Graaff de 3,7 MeV. Pedimos al Dr. Jacobo Rapaport, Professor en Ohio University, Athens, que visitara el laboratorio en Murray Hill y nos diera un informe sobre la calidad y estado del acelerador. El Informe del Prof. Rapaport fue muy positivo y nos alentó a formalizar la postulación. Al cabo de un tiempo nos avisaron que Lucent Technology Laboratories había decidido en nuestro favor. En Septiembre de 1996 viajaron a Murray Hill el Dr. Claudio Tenreiro y el Dr. Mario Avila quienes tuvieron a su cargo las tareas de desmontar y supervisar el embalaje de los innumerables items del acelerador y equipos anexos. El transporte a Chile se hizo en un barco de la Compañía Naviera Sudamericana sin costo para la Universidad de Chile. El acelerador se instaló en un espacio de alrededor de 200 m² habilitado en el galpón construido en 1966 para el ciclotrón. Gastos diversos originados por la habilitación del espacio, la compra de un sistema para inyectar y almacenar el gas SF₆, más otros equipos e insumos, se financiaron con aportes de la Universidad de Chile y de un proyecto FONDEF de infraestructura. El primer haz se obtuvo en 1997.

Este acelerador cuenta con un imán distribuidor del haz en cuatro líneas independientes y cámaras para channeling, PIXE, RBS, implantación de iones y scattering, lo que abre muchas posibilidades experimentales. Puede generar haces de protones, deutrones, alfas, iones de argón, xenón, y eventualmente cualquier otro elemento en estado gaseoso. Las energías de los haces pueden variar desde 200 keV hasta 3.7 MeV.

En la actualidad, las perspectivas son muy alentadoras. Se han superado problemas inherentes a la puesta en marcha de una instalación tan compleja. Hay proyectos en desarrollo con financiamiento de FONDECYT y de IAEA. Hay interés en el Departamento de Física por incorporar jóvenes investigadores, como es el caso del Dr. Ricardo Yáñez, con gran experiencia en física nuclear experimental. Un mayor número de alumnos está siendo atraído por la física experimental siendo varios los que están interesados en realizar sus trabajos de tesis en este laboratorio. Además, el laboratorio puede ofrecer servicios analíticos con los métodos PIXE, RBS, NRA u otros, que pueden ser requeridos por usuarios externos, o emplearse en trabajos interdisciplinarios de investigación.

Por otra parte, el funcionamiento del laboratorio se ha concebido como una facilidad abierta a toda la comunidad. Esto significa que físicos no pertenecientes a la Universidad de Chile, pueden usar las posibilidades de este acelerador para realizar investigación básica o aplicada, sujetos a las mismas condiciones que los físicos locales.

Como hemos visto, la actividad en torno a la física nuclear experimental se ha mantenido vigente en la Universidad de Chile por casi cincuenta años. Los aceleradores y sus laboratorios anexos han contribuido a la formación de muchos físicos, incluyendo a varios que hoy son destacados físicos teóricos.