

# Descubrimiento de la radiación no térmica

## El espectro electromagnético: un fantasma que se dejó ver

El ser humano comenzó a explorar los astros que veía brillar en el cielo mucho antes de definir claramente en forma teórica lo que la luz es. En el siglo XIX, gracias a James C. Maxwell y su desarrollo de la teoría de la electrodinámica, se pudieron vincular fenómenos físicos que hasta ese momento se consideraban independientes: la electricidad, el magnetismo y los fenómenos luminosos. Se comprendió entonces que la luz es una onda electromagnética que se propaga en el vacío con una velocidad de aproximadamente 300.000 km/s.



Figura 1: James C. Maxwell (1831-1879) desarrolló la teoría de la electrodinámica y dejó como legado uno de los más importantes descubrimientos de la física: la luz es una onda electromagnética.

Crédito: [http://www.memo.fr/en/article.aspx?ID=PER\\_CON\\_084](http://www.memo.fr/en/article.aspx?ID=PER_CON_084)

Además de poder ser interpretada como una onda, la luz posee la particularidad de ser identificada de una manera adicional: se la puede estudiar también como un conjunto de partículas llamadas fotones (individualmente, fotón). Tanto en el caso de ser interpretada como onda o en el caso de ser tenida en cuenta como fotones, se caracteriza a la luz por una longitud de onda determinada o equivalentemente frecuencia o energía.

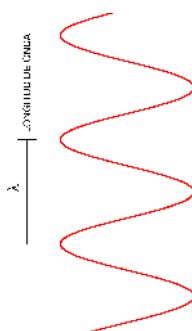


Figura 2: Onda caracterizada por su longitud de onda.

Crédito: C. S. Peri.

La relación entre la energía y frecuencia de los fotones fue presentada por primera vez por Max Planck. Este físico alemán fue quien planteó que los fotones (o también llamados cuantos) de radiación poseen una energía  $E$  que está caracterizada por tomar ciertos valores específicos. Con esta idea, introdujo la constante de Planck  $h$ . Los fotones pueden tener solamente valores de energía  $E$  múltiplos de esta constante  $h$ .

Este planteo y otros importantes avances de la física constituyeron el desarrollo, durante el siglo XX, de lo que se conoce como Mecánica Cuántica.

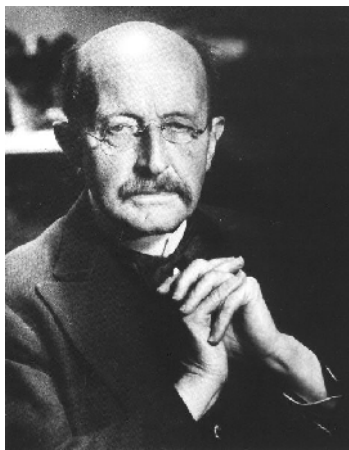


Figura 3: Max Planck (1858-1947) ganó el premio Nobel en 1918 (oficialmente entregado en 1919) en reconocimiento a los avances realizados en Física gracias al descubrimiento de la cuantización de la energía de los fotones.

Crédito: <http://freethoughtalmanac.com/?p=2011>

El descubrimiento realizado por M. Planck es que la energía de los fotones es directamente proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional a la longitud de onda. Las siguientes expresiones representan las relaciones entre energía, frecuencia y longitud de onda de los fotones, es decir, de la luz o radiación electromagnética.

$c = \lambda \nu$	$E$ : Energía
	$\lambda$ : Longitud de onda
$E = h \nu$	$\nu$ : Frecuencia
	$c$ : Velocidad de la luz
$E = h \frac{c}{\lambda}$	$h$ : Constante de Planck

Figura 4: EXPRESIONES ENERGIA, FRECUENCIA, LONG. DE ONDA.

Crédito: C. S. Peri.

Con los avances en el estudio de la luz y el desarrollo de la física sobre el tema, se pudo comprender y estudiar de manera completa lo que se conoce como espectro electromagnético. El espectro abarca todos los valores posibles de energía que la radiación electromagnética o luz puede

tener. En la Figura 5 se puede observar que las longitudes de onda que abarca el espectro electromagnético se comparan con objetos conocidos. Además se muestra que en ciertos casos la radiación proveniente del espacio no atraviesa la atmósfera. Se puede ver que el intervalo de luz que el ser humano puede ver es en verdad una porción muy pequeña del total.

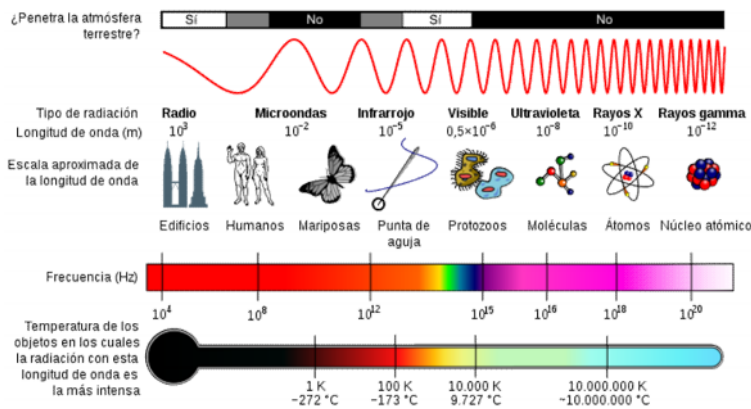


Figura 5: Gráfico del espectro electromagnético. Se muestra si la radiación penetra o no la atmósfera; las longitudes de onda, frecuencias y temperaturas, y los tamaños de objetos conocidos relacionados a escala con la longitud de onda de cada rango.

Crédito: [http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_electromagnético](http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagnético)

Algunos ejemplos cotidianos de cuerpos que emiten radiación electromagnética son: los microondas, las antenas de televisión satelital (ondas de radio), las antenas proveedoras de telefonía celular (ondas de radio), emisores de rayos X que sirven para tomar radiografías, e incluso los humanos al igual que muchos animales emitimos ondas de bajas energías dada la temperatura que poseemos.

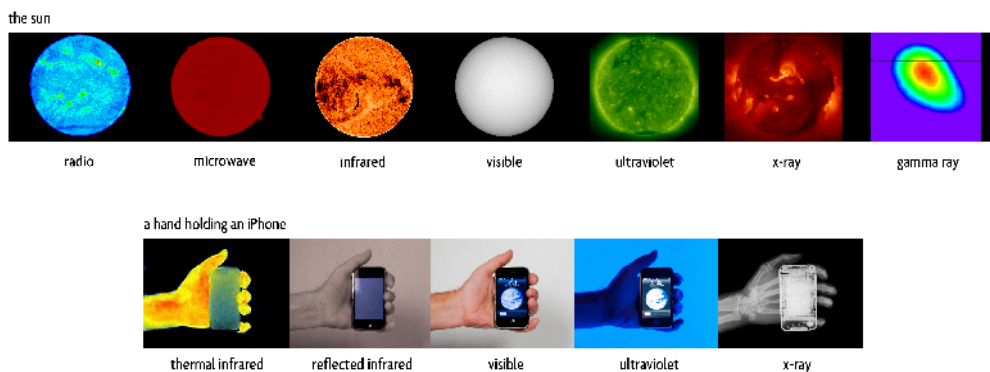


Figura 6: En la parte superior se muestra el Sol en diferentes longitudes de onda, desde la parte menos energética del espectro electromagnético (izquierda) hasta la más energética (derecha). En la parte inferior se puede apreciar lo mismo pero para el caso de una mano sosteniendo un teléfono celular. En ambos casos se pone en evidencia el hecho de que según en qué longitud de onda se observe un objeto mostrará diferentes imágenes.

Crédito: <http://www.flickr.com/photos/ideum/4052592541/>

Ahora bien, ¿cómo se genera la luz, es decir, la radiación electromagnética, en la naturaleza? O equivalentemente, ¿cómo se genera un fotón, o muchos fotones? Existen una gran cantidad de procesos físicos que producen fotones de diferentes energías. Estos procesos se dan en muchos objetos tanto en el cielo como en la Tierra.

Los astrónomos y físicos estudian, entre otras cosas, la radiación que llega de diferentes

sistemas astrofísicos del Universo. A través de estos estudios se deduce cuál es el tipo de objeto (o fuente) que origina la radiación y los procesos que la generan. La astronomía y la física están fuertemente vinculadas. De hecho, muchas teorías físicas fueron corroboradas gracias a observaciones astronómicas, ya que algunas condiciones que no se pueden reproducir en un laboratorio en la Tierra sí se dan más allá de la atmósfera.

### **¿Se observaba sin telescopios?**

Las observaciones astronómicas se realizan desde hace miles de años. Antiguamente, se confeccionaban registros a simple vista sin utilizar ningún tipo de detector más que el ojo humano. Ésto limitaba las observaciones al rango visual al no existir ningún otro tipo de detector en otras longitudes de onda.



Figura 7: Una persona observando el cielo.

Crédito: Google images.

Existieron una serie de instrumentos que permitieron observar el cielo con más precisión, pero el mayor avance se dió en el siglo XVII con la creación del telescopio óptico. Si bien existían instrumentos similares al telescopio que se utilizaban con otras finalidades, Galileo Galilei fue quien adaptó la idea con el objetivo de poder ser aprovechado por la astronomía. Este deslumbrante científico, condenado por la Iglesia, realizó una gran cantidad de observaciones de objetos del Sistema Solar y obtuvo resultados asombrosos dada la época.

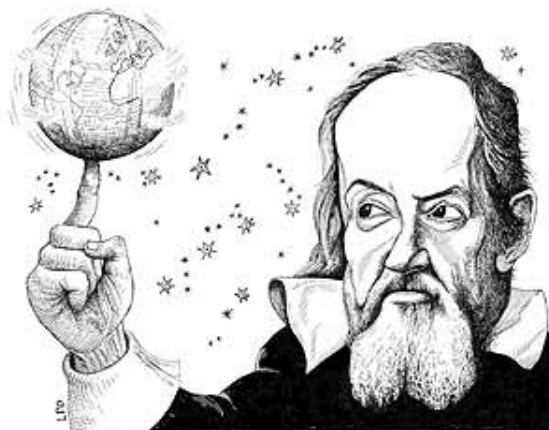


Figura 8: Dibujo de Galileo Galilei (1564-1642), revolucionó la astronomía observacional gracias a ser el pionero pionero en la utilización del telescopio.

Crédito: <http://www.likeacheese.com.ar/eppur-si-muove>

La función más básica y elemental de un telescopio es la de aumentar los objetos celestes y de esa manera aparentan estar más cerca de lo que en realidad se encuentran. El telescopio colecta los fotones que los objetos luminosos emiten y luego estos fotones pasan por un tubo que contiene un juego de lentes. Las lentes forman la imagen aumentada en un punto que se conoce como foco. Otra manera de construir telescopios en el rango óptico es utilizando espejos. Los telescopios que utilizan espejos para recojer la radiación emitida por objeto celestes funcionan de forma similar a los telescopios que utilizan lentes.

Con estos instrumentos se pudieron ver fuentes de radiación hasta ese momento desconocidas. A medida que transcurrió el tiempo, se crearon técnicas que permitieron registrar las observaciones; por ejemplo, la astronomía fotográfica. Se tomaban imágenes en placas fotográficas que se podían archivar y luego estudiar las veces que fuese necesario, y de manera objetiva. En la actualidad, el registro de datos se realiza en forma digital y se archiva directamente en computadoras.

Si bien la invención del telescopio óptico sofisticó de manera considerable las observaciones y sucesivos estudios, el relevamiento de información seguía realizándose en el rango visual, con un pequeño rango en infrarrojo y ultravioleta. La investigación de la astrofísica en el rango óptico del espectro electromagnético fue hasta el siglo XIX la más estudiada y conocida. Existían una gran cantidad de trabajos que reunían vasta información sobre diferentes sistemas astrofísicos y modelos físicos asociados a su estructura, origen, evolución y radiación. No se contaba con datos astronómicos de radiación en otras longitudes de onda del espectro electromagnético, bien porque la luz no atravesaba la atmósfera, o bien porque no existían instrumentos que captaran ondas en otros rangos de energía diferentes al visual.

Durante el siglo XX la astronomía comenzó a abrirse paso a través de todo el espectro electromagnético, sobre todo luego de la Segunda Guerra Mundial. El avance de la astronomía y de muchas áreas de la ciencia va de la mano con el avance tecnológico. Actualmente se realizan observaciones en casi todas las longitudes de onda y cada rango de energía en el cual se observa presenta diferentes desafíos, tanto teóricos como prácticos, que deben ser profundamente estudiados para poder obtener la mejor y mayor cantidad de información posible.

### **La radiación térmica, ¿quema?**

Describiremos lo que se conoce como radiación de cuerpo negro, o radiación térmica.

Un sistema de partículas, por ejemplo átomos que componen un gas, se encuentra en equilibrio termodinámico si todas sus partículas están aproximadamente a la misma temperatura. Si un sistema se encuentra en ese estado, se lo puede identificar con una temperatura característica y además genera (o emite) un tipo de radiación conocida como la de “cuerpo negro”. Este cuerpo negro emite fotones que pueden tener diferentes valores de energía y, para cada valor de energía, existe una cantidad diferente de fotones correspondientes. La emisión (o radiación) de cuerpo negro puede ser representada en forma gráfica con una función que depende de la frecuencia, para una temperatura fija. A continuación podemos ver una figura donde se grafica la curva para diferentes temperaturas. La curva se suele conocer como “planckiana” gracias a su descubridor M. Planck.

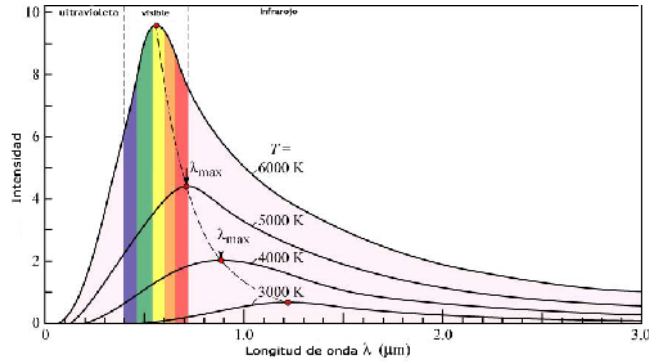


Figura 9: Gráfico de distintas curvas que representan la radiación de cuerpo negro, para sistemas en equilibrio termodinámico a diferentes temperaturas. La longitud de onda se encuentra en el eje horizontal (en  $\text{nm}=10^{-13}$ ), y para cada valor de ella existe un valor dado de intensidad para la radiación resultante, o equivalentemente, una dada cantidad de fotones. Se puede realizar un gráfico equivalente pero con la frecuencia o energía en el eje horizontal, gracias a las relaciones que existen entre ellas y hemos expuesto anteriormente.

Crédito: <http://www.jpereira.net/gestion-de-color/calibracion-del-monitor-tft-correccion-gamma-luminancia>

¿Cómo se interpreta este gráfico? Supongamos que existe un sistema con una temperatura dada, fija. Si conocemos esa temperatura obtenemos la curva correspondiente. Luego, uno puede preguntarse cuál es la cantidad de fotones de una dada energía (o frecuencia, o longitud de onda). Pues bien, se busca esa frecuencia en el eje horizontal y se halla el valor buscado en el eje vertical. Este valor se puede estimar gráficamente o, si se busca mayor precisión, puede calcularse analíticamente.

¿Cómo se trabaja en la práctica? Se observa una fuente de radiación en una o varias frecuencias y se mide la cantidad de fotones en cada una de esas frecuencias. De esta manera se obtienen puntos en un gráfico como el que mostramos anteriormente. Luego, se estudia cuál es la mejor “planckiana” que aproxima esos puntos (se halla la temperatura correspondiente). En la Figura 10 podemos ver el caso del Sol. La línea irregular negra representa los datos medidos, y la línea verde es la curva de cuerpo negro que mejor se le aproxima, es la que tiene una temperatura de alrededor de 5777 grados Kelvin.

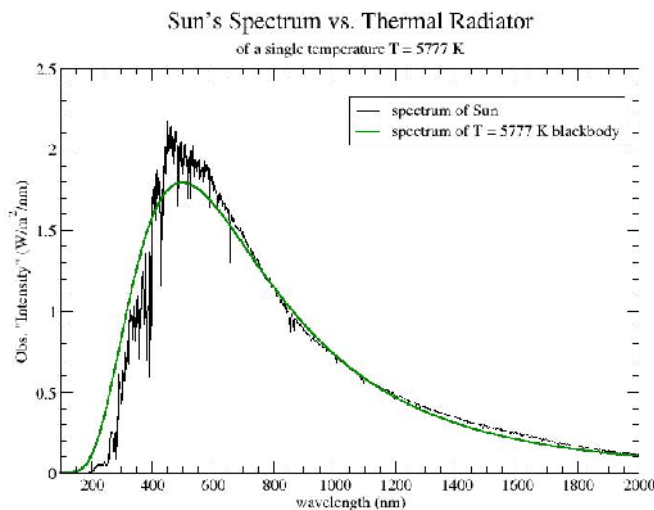


Figura 10: La emisión real del Sol se halla graficado en línea negra, y el espectro de un cuerpo negro a aproximadamente 5800 grados Kelvin se halla representado en color verde.

Crédito: [http://homepages.wmich.edu/~korista/sun-images/solar\\_specbb.jpg](http://homepages.wmich.edu/~korista/sun-images/solar_specbb.jpg)

Este tipo de radiación no es la única que existe, pero era la que mayormente se observaba durante la exploración del rango visual del espectro electromagnético. La mayoría de las fuentes que se observaban eran estrellas, sus atmósferas, y conjuntos de estrellas. Quedaban ocultas muchísimas fuentes de radiación que en la actualidad se observan y estudian. Otro ingrediente que influía en la ocultación de muchos objetos es el material interestelar. Este material no forma las estrellas sino que por el contrario está entre ellas, y en algunos casos, está concentrado en zonas más densas. Así es que una gran parte de la radiación se ocultaba detrás de este material e impedía revelar una gran cantidad de fuentes.

A continuación veremos cómo la radioastronomía tuvo influencia en el descubrimiento de otro tipo de fuentes y radiación.

### **Una reseña histórica de la radioastronomía**

Las ondas de radio, de menor energía que las visuales, fueron predichas por medio de estudios teóricos mucho tiempo antes de ser detectadas. A diferencia del rango visual, se utilizan antenas para detectar este tipo de ondas, y los datos se recolectan en forma digital desde un principio de la radioastronomía. La gran ventaja que presentan las ondas de radio es que permiten ver a través del medio interestelar, complementando así en gran parte a las fuentes visibles sólo en el rango óptico.

Las ondas de radio son emitidas y recibidas en la mayoría de los dispositivos de telecomunicaciones que utilizamos diariamente. Ésto es así desde principios del siglo XX. En 1931, K. G. Jansky trabajaba en los laboratorios Bell de comunicaciones cuando se le encargó determinar los niveles de radiointerferencia en la longitud de onda de 14,6 metros. Jansky detectó por primera vez ondas de radio provenientes del espacio exterior y lo hizo en un contexto alejado de la astrofísica.

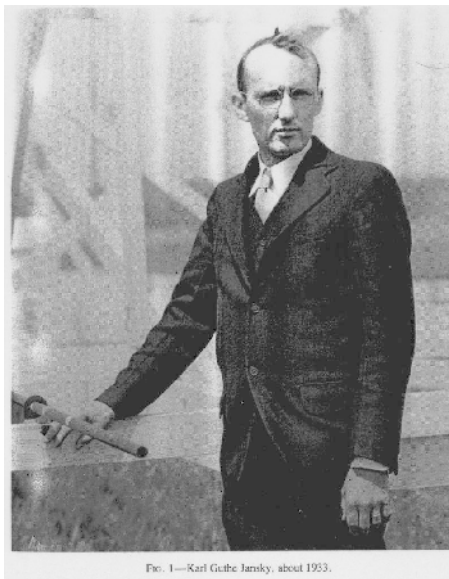


FIG. 1.—Karl Guthe Jansky, about 1933.

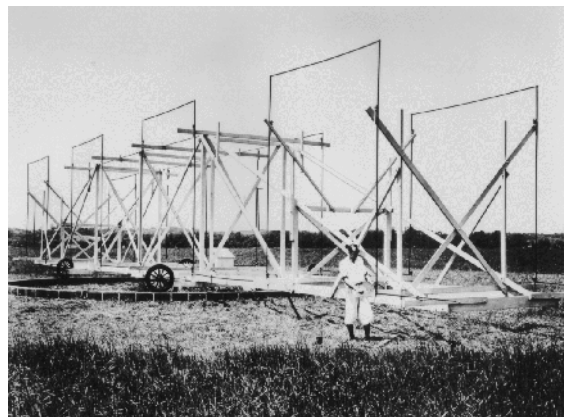


Figura 11: Karl Guthe Jansky (1905 – 1950), físico e ingeniero estadounidense. Fue el primero en detectar ondas de radio provenientes del cielo, en el año 1931. Realizó las mediciones en el contexto de las telecomunicaciones, trabajando para los laboratorios Bell, totalmente alejado de la astronomía. En la foto de la derecha se muestra la antena con la que trabajaba.

En la misma década, unos años más tarde, G. Reber construyó una radioantena en su patio con la cual observó el cielo. Realizó mediciones a frecuencias más bajas (del orden de cm) que Jansky, las cuales finalizó en 1937. En 1940 sus resultados fueron publicados en la revista científica *The Astrophysical Journal*. Otro artículo de Reber donde se mostraban mapas de todo el cielo en radio fue publicado en 1944 por la misma revista.

A pesar de las duras condiciones que atravesaban los científicos en ese momento debido a la Segunda Guerra Mundial, astrónomos alemanes como J. Oort y H. van de Hulst pudieron realizar más investigaciones en radio. Inspirados por los grandes descubrimientos de Jansky y Reber descubrieron líneas espectrales (un tipo especial de radiación) en la banda de radio. Pudieron vincular este descubrimiento al movimiento del material presente en la Galaxia. Paralelamente en la Unión Soviética (Shklovsky, 1949) también se estudiaban líneas espectrales. Se publicaron trabajos aún más innovadores que los realizados hasta el momento.

Se realizaban además, en ese momento, observaciones del Sol en radio. Reber fue el primero en publicar datos del Sol en 1944, pero fue en 1942 en los laboratorios Bell que ... Southworth detectó radiación térmica proveniente del Sol, lo cual fue publicado luego de la guerra en 1945. Al mismo tiempo ... Hey en Inglaterra develaba que ciertas fuentes de radiación que se creía eran 'el enemigo', eran en verdad manchas solares. Al igual que el trabajo de Reber, esta investigación no fue publicada hasta 1945. Hey declaró que la emisión no parecía tener origen térmico.

Luego de la Segunda Guerra Mundial la radioastronomía comenzó a desarrollarse abiertamente y en forma vigorosa en la comunidad científica.

### **¡Eureka! ¿Radiación no térmica?!**

Luego de estos trabajos, dos grupos comenzaron a estudiar de cerca al Sol, en Sydney y Cambridge. En esos tiempos se desarrolló lo que se conoce como radiointerferometría: se utilizaba más de una antena para poder ganar detalle en las observaciones. Se comenzaron a observar fuentes extragalácticas (fuera de la Vía Láctea, la galaxia que nos aloja), y cada vez más lejanas. Una vez más, parecían detectarse fuentes que no se podían explicar por medio de la radiación térmica o de cuerpo negro. Por ejemplo, entre las fuentes que se observaron, las más brillantes resultaron ser un remanente de supernova llamado Cassiopeia A, y una galaxia llamada Cygnus A. Un remanente de supernova es una estrella de mucha masa, muy evolucionada, que explota violentamente; y, una galaxia, es un conjunto de millones de estrellas.

Todo esto sembró dudas sobre la radiación que se conocía hasta el momento. Se había detectado un tipo de emisión que no era térmica pero no se comprendía del todo qué era.

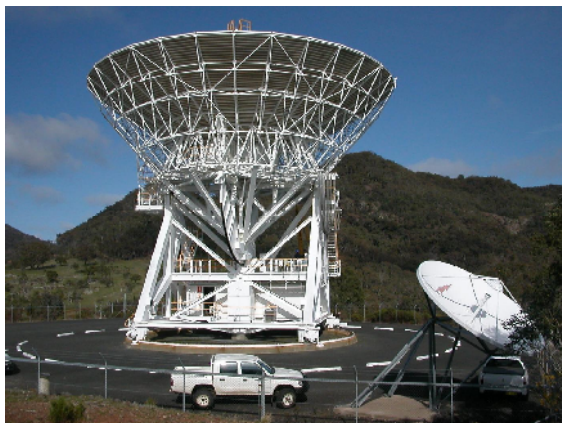




Figura 12: A la izquierda una foto de un radiotelescopio compuesto por una sola antena (MOPRA), que se suele llamar de 'disco simple'. A la derecha imagen de un radiointerferómetro (ATCA), compuesto por más de una antena. Ambos pertenecen al conjunto de observatorios australianos llamado ATNF (Australia Telescope National Facility).

Crédito: <http://www.mdahlem.net/astro/obs/radio/mopra.php> y <http://www.flickr.com/photos/angelrls/375809875/in/set-72157594510409158>

En líneas generales, aparecían dos tipos de fuentes: un grupo de fuentes donde la emisión (o radiación) de fotones crecía con la frecuencia y otro grupo donde decrecía. Las del primer tipo, es decir, las fuentes que incrementan su emisión con la frecuencia, podían ser identificadas con fuentes conocidas en el rango visual; por ejemplo, la Luna. A estas fuentes que ya habían sido estudiadas en el rango visual, se las podía ajustar en muy buena aproximación al modelo de cuerpo negro y por ende se las llamó 'térmicas'. Al resto de las fuentes se las llamó 'no térmicas'.

Para poder comprender en mayor profundidad los procesos físicos que daban origen a los fotones en radioondas, se comenzaron a vincular diferentes teorías y modelos físicos ya desarrollados. Luego de algunos años de controversia y dudas, se llegó a la conclusión de que los procesos físicos que generan la mayoría de la emisión en radio están vinculados a electrones (1) libres interactuando con algún otro componente. Existen dos tipos de procesos que dominan la emisión que se observa en el rango de radio: Bremsstrahlung (o emisión libre-libre) y sincrotrón (al principio conocida como Bremsstrahlung magnético).

(1) nota al pie: es una de las partículas elementales que forma parte de los átomos. Se caracteriza por tener carga negativa.

Al estudiar un electrón acelerado (y luego varios), en interacción con iones (2) se pudo comprender que el proceso conocido como Bremsstrahlung explica la radiación a bajas energías en el rango de radio. Ahora bien, no se podía entender del todo cuál era el origen de la radiación de más alta energía en radio, la no térmica. El proceso conocido como sincrotrón es el que explica este tipo de fotones de mayor energía. En este caso, los electrones poseen velocidades mucho mayores que en el caso anterior e interactúan con campos magnéticos pero no con iones. Las velocidades que los electrones poseen son cercanas a la velocidad de la luz. Es importante remarcar que ninguna partícula puede poseer una velocidad mayor a la de la luz, lo cual se desprende de la Teoría de la Relatividad desarrollada por Albert Einstein. Es así que si una partícula posee una velocidad cercana a la de la luz, podemos decir que ¡es muy veloz!

En conclusión, se pudo asociar el proceso Bremsstrahlung a la emisión térmica, y el sincrotrón a la no térmica, en el rango de radioondas.

(2) nota al pie: es una partícula que posee carga positiva.

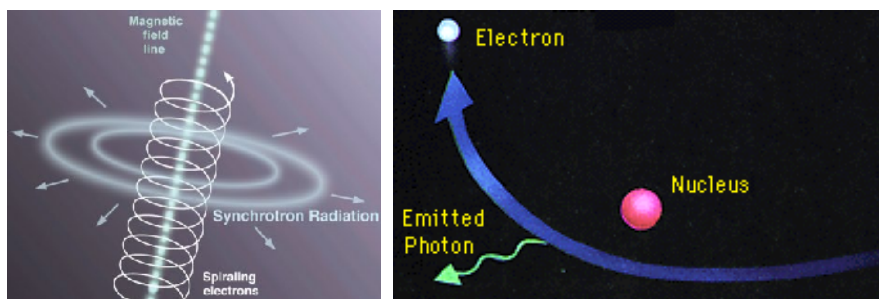


Figura 13: Izquierda: esquema ilustrativo del proceso sincrotrón. La línea punteada representa el campo magnético y la hélice la trayectoria de los electrones. Las flechas externas indican que se han producido fotones, es decir, radiación. Derecha: esquema del procesos Bremsstrahlung. El núcleo pertenece a algún átomo de materia y el electrón libre pasa cerca del átomo con cierta velocidad y es así como se producen fotones.

Crédito: .....

Hacia el año 1954, la radioastronomía constituía una nueva y consolidada rama de la astrofísica. Se planeaban grandes proyectos y ambiciosos instrumentos, se observaban gran cantidad de fuentes y así comenzaba la copiosa exploración de una porción del espectro electromagnético hasta ese momento apenas conocida.

### **Flamantes descubrimientos que sembraron nuevos interrogantes**

Si bien la radiación sincrotrón permitió explicar la existencia de los fotones más energéticos en el rango de radio, existían fuentes que poseían energías aún más altas, superando las dadas en radio y óptico.

La radiación térmica explica la generación de fotones en un sistema en equilibrio termodinámico que se puede caracterizar por una dada temperatura. Pero, ¿que valores de temperatura podemos encontrar en el Universo que conocemos?, y además, ¿cuál es el valor máximo que puede tener un fotón generado por un sistema de tipo cuerpo negro en el Universo?

Tomemos un ejemplo concreto. Supongamos que observamos un fotón que posee una energía muy alta, con lo cual entra en el rango de altas energías, llamado también gamma. Si a este fotón lo interpretamos como de origen térmico, por medio de la ley de Planck llegamos a la conclusión de que debe provenir de un sistema cuya temperatura en equilibrio debe rondar los  $10^{13}$  grados Kelvin, o sea, 10.000.000.000.000 de grados. Este valor no es típico de objetos astrofísicos en equilibrio termodinámico y esa temperatura se daría solamente durante breves lapsos de tiempo, por ejemplo durante el Big Bang.

¿Cómo se explicaban entonces estos fotones de altas energías? No podían ser explicados por la radiación térmica, ni por la no térmica, a pesar de ser la respuesta a otros problemas.



Otra pregunta que había surgido era cómo se aceleraban partículas hasta velocidades relativistas, dado que son las velocidades más grandes que las partículas que componen la materia pueden tener. Por ejemplo, la radiación generada en el proceso sincrotrón se produce en la interacción de electrones relativistas con campos magnéticos. Pero, ¿cómo llegan los electrones a tener esas velocidades?, ¿qué los acelera?

Estos interrogantes hicieron que la astrofísica de altas energías pudiese comenzar a ser explorada mediante el estudio de objetos que emiten radioondas. Ésto generó un avance considerable en relación a fuentes observables que podían ser origen de muchos fotones de altas energías.

### **Astronomía de altas energías, una historia en paralelo**

Aunque la radioastronomía tuvo gran influencia en el avance de la astrofísica relativista (o de altas energías), ésta tuvo en sus principios un desarrollo independiente. La astronomía de altas energías es la que estudia los fotones más energéticos del espectro electromagnético (gamma) y los procesos físicos y objetos que los generan.

En el año 1900, Villard asoció los rayos gamma con un tipo de radiación que no se veía afectada por campos magnéticos. Luego de 14 años se pudo dilucidar cuál era la longitud de onda de esa radiación: Rutherford y Andrade pudieron medir su valor por medio de experimentos en el laboratorio. Millikan fue el que sugirió por primera vez que los rayos gamma se podían identificar con los rayos cósmicos, que es otro tipo de radiación que en ese momento no se comprendía del todo. Esta idea fue luego descartada.

En el año 1949 se descubrió una partícula llamada pión neutro, y en el año 1952 Hayakawa

predijo que la interacción de rayos cósmicos con el medio interestelar debería producir piones neutros y luego éstos generar rayos gamma. En el mismo año, Hutchinson estimó la emisión de fotones gamma esperada que produciría el material de la galaxia por medio del proceso Bremsstrahlung. Fue entonces que resurgió el interés por la posible existencia de fuentes de fotones gamma galácticas. El trabajo definitivo en este sentido fue el realizado por Morrison en 1958, donde calculaba la emisión gamma esperada de una cierta cantidad de sistemas astrofísicos. A pesar de que existían esperanzas, la tecnología desarrollada no era suficiente. A diferencia de la astronomía gamma, la astronomía de rayos X (fotones menos energéticos que los gamma) pudo comenzar su desarrollo en los '60.

¿Cuáles eran los problemas para detectar fotones gamma? Recordemos de la Figura 5 donde se expone el espectro electromagnético, que los fotones gamma son generados a nivel atómico, es decir, los procesos físicos que los producen están relacionados a interacciones entre partículas (elementales o compuestas, pero de cualquier manera, en dimensiones muy pequeñas). Así es que las longitudes de onda de estos fotones son del orden de los átomos o aún menores. Pero, ¿estos fotones atraviesan la atmósfera? No. Peor aún, ¡pueden interactuar con ella!

Los fotones gamma no sólo pueden interactuar con las partículas de la atmósfera, sino que también pueden hacerlo con el material de los detectores desarrollados con el fin de registrarlos. De esta manera, los fotones gamma que provienen de fuentes en el cielo pueden producir fotones gamma nuevos, entonces... ¿cómo se hace para detectarlos?

Pero hay más problemas aún. La existencia de los rayos cósmicos (partículas que provienen del cielo, aún hoy día muy estudiadas) provoca algo similar a lo que producen los rayos gamma: interacciones con el material de la atmósfera o de los detectores. Pero, ¿otra vez lo mismo? ¿más fotones gamma nuevos? Así es.

La separación de estas contribuciones secundarias respecto de las objetos celestes que producen rayos gamma fue y es uno de los grandes desafíos de la astrofísica de altas energías.

Remontémonos a los '50 o '60, ¿cómo se hizo? La detección de estos escapadizos fotones hizo necesaria la utilización de satélites que superaran la altura de la atmósfera o alguna otra manera de detectarlos. Mientras se avanzaba en este sentido y la tecnología continuaba su desarrollo, se seguían desarrollando modelos y trabajos sobre la astronomía gamma.

En los '50 se realizaban detecciones desde globos, pero las contribuciones atmosféricas predominaban en las observaciones y ocultaban las fuentes cósmicas de rayos gamma. En 1965 un detector a bordo del satélite Explorer 11 detectó fotones gamma del cielo por primera vez comprobando que los de la atmósfera los superaban en un factor 10. La segunda gran detección se realizó en 1967 y la mayor parte de la emisión provenía del centro de la Vía Láctea.

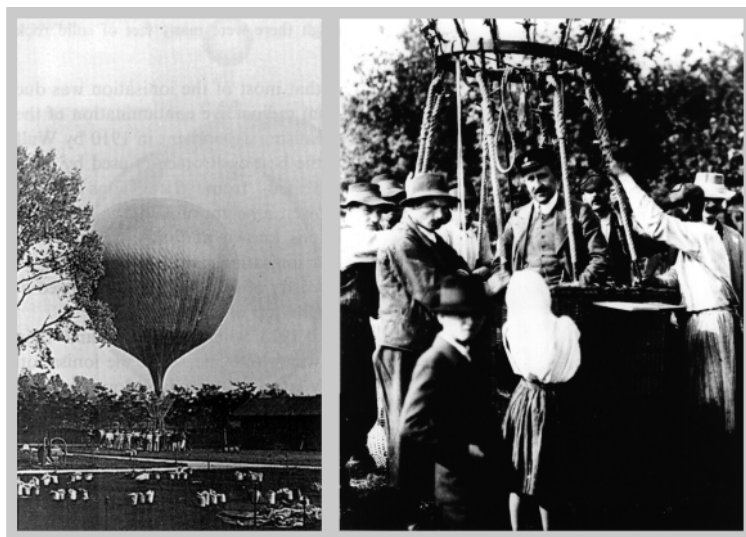


Figura 14: Victor Hess (1883-1964), a bordo de unos de los globos desde los cuales realizaba mediciones. Ganó el premio Nobel en 1936 por las contribuciones realizadas en el área de radiación cósmica. Investigó una gran variedad de temas, pero siempre orientado a la astrofísica de altas energías.

Crédito: .....

En los '70 un conjunto de satélites militares llamados Vela monitoreaban **'explosiones'** de rayos gamma y fue así como de forma casual se descubrió un tipo de fuente astrofísica eruptiva de rayos gamma. Actualmente se conocen estas fuentes como gamma-ray burst (GRB), y son ampliamente estudiadas.

Al mismo tiempo se crearon las 'cámaras de chispas', detectores que se utilizaban a bordo de satélites también. Este tipo de detectores significaron un paso hacia adelante en la astronomía de rayos gamma. No entraremos en detalle sobre el diseño y funcionamiento, sólo diremos que poseen gases como argón o neón los cuales al recibir un fotón gamma producen nuevas partículas. Luego, esas partículas son estudiadas y así de manera indirecta se analizan los fotones que arribaron inicialmente.

Los instrumentos más importantes que utilizaron este tipo de tecnología fueron:

- SAS-II funcionó en los '70 y detectó alrededor de 8.000 fotones gamma, una gran cantidad para el momento. No sólo halló emisión hacia la Vía Láctea, sino que observó dos pulsars (nota al pie) que tienen su contraparte en radio, es decir, emiten fotones en radio.
- COS-B funcionó en los '70 y '80 y detectó alrededor de 200.000 fotones gamma. Se publicaron mapas de todo el cielo, y unas 25 fuentes gamma fueron observadas. De estas 25, unas 20 no podían ser identificadas con otras fuentes conocidas en ese momento.
- EGRET se encontraba a bordo del Observatorio de rayos gamma Compton, el cual acarrea más instrumentos. Compton fue el instrumento más pesado jamás lanzado al espacio. Funcionó en los '90 y fue el primero en realizar un relevamiento en gamma completo de todo el cielo. Detectó, oficialmente publicadas, unas 271 fuentes de rayos gamma.



Figura 15: Imagen real del Observatorio Compton, lanzado por NASA. Contenia varios detectores de altas energías que estudiaban diferentes tipos de fotones.

Crédito: .....

El conjunto de instrumentos que viajaban en el observatorio Compton, incluido EGRET, develó una gran variedad de fuentes gamma. Este observatorio significó un espectacular avance en la astronomía gamma a la vez que sembró nuevos interrogantes. Por ejemplo, más de la mitad de las 271 fuentes EGRET publicadas oficialmente en su tercer catálogo de 1999 no han sido identificadas, es decir, no se las ha podido relacionar a sistemas astrofísicos conocidos y detectados por otros instrumentos en otras longitudes de onda.

Actualmente uno de los instrumentos más importantes en funcionamiento es el 'Large Area Telescope' (LAT) que se encuentra a bordo de un satélite de rayos gamma llamado Fermi en honor al físico ganador del premio Nobel que llevaba ese apellido, Enrico Fermi (1901-1954). Originalmente el nombre del telescopio espacial era GLAST (Gamma-Ray Large Area Space Telescope) pero luego fue cambiado. Fue lanzado por la NASA al espacio en el 2008, y pertenece a una colaboración internacional de varios países. El catálogo más actual publicado por la colaboración cuenta con el asombroso número de más de 1800 fuentes de rayos gamma detectadas.

Además de la observación desde satélites se desarrollaron técnicas para poder observar fotones gamma desde la Tierra, lo cual es posible solamente para los fotones más energéticos. Esta subárea de la astronomía de altas energías se conoce como 'VHE astronomy' (very high energy: de muy alta energía). Cuando uno de estos fotones llega a la atmósfera e interactúa con ella, produce nuevas partículas y éstas a su vez generan lo que se conoce como radiación Cherenkov, la cual puede llegar hasta el suelo. Observando esta radiación se puede entonces inferir que un fotón gamma muy energético ha llegado a nosotros desde alguna fuente celeste. Los telescopios Cherenkov cuentan con dispositivos que multiplican la intensidad de la radiación incidente ya que ésta puede ser muy débil.

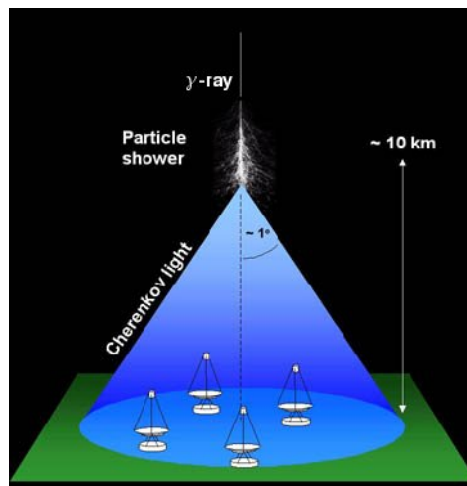


Figura 16: Un esquema de la radiación Cherenkov producida por un rayo gamma que arriba a la Tierra. Se pueden ver las escalas de distancias en las que se producen los procesos físicos involucrados.

Crédito: .....

El primer descubrimiento relevante realizado con un instrumento de este tipo se llevó a cabo en 1989 con el telescopio Whipple, actualmente reemplazado por VERITAS. Además existen HESS, CANGAROO II y MAGIC. Actualmente se encuentran en desarrollo telescopios de tipo Cherenkov aún más sofisticados y que permitirán mejorar las condiciones de observación. Uno de ellos es el CTA (Cherenkov Telescope Array), un arreglo de 100 telescopios, sin precedentes hasta el momento.

La astronomía de rayos gamma, desde los '50 en adelante, no sólo ha superado los problemas

técnicos que la frenaban, sino que ha avanzado un gran trecho en lo que concierne al desarrollo de modelos teóricos y descubrimiento de gran cantidad de fuentes de fotones de altas energías. Existen actualmente extensos catálogos de fuentes gamma, entre las cuales se hallan galaxias de varios tipos, estrellas evolucionadas conocidas como pulsars, candidatos a agujeros negros galácticos, candidatos a agujeros negros supermasivos extragalácticos, remanentes de supernova y estrellas con choque de vientos, entre otros. Se han desarrollado ampliamente muchos temas, pero lo que respecta a procesos que generan radiación (conocidos como radiativos) es lo que nos interesa abordar.

Recordemos que para el caso de objetos que emiten radioondas hemos mencionado *Bremstrahlung* y sincrotrón como los principales procesos físicos que generan fotones en esas longitudes de onda. En el caso de la astronomía de altas energías hemos visto que los fotones son no térmicos, pero, ¿qué procesos los generan? Se los suele conocer como 'procesos radiativos no térmicos' y lejos de ser solamente dos, como los más importantes en el rango de radio, son muchos más.

Todos estos procesos tienen algo en común: partículas relativistas en interacción con alguna componente extra. Esta segunda componente puede ser: campos magnéticos, materia o un campo de fotones. Los diferentes procesos radiativos dependen de distintos parámetros. Por ejemplo, para el proceso sincrotrón, la cantidad de fotones que se genere a diferentes valores de energía depende principalmente del campo magnético. En el caso de algún proceso donde esté involucrado el material interestelar, los fotones resultantes dependerán de la densidad de la materia; así, en cada proceso, tendremos un parámetro determinante (o más de uno) que afectará directamente en la emisión esperada.

Este tipo de estudio es muy común actualmente en la astronomía gamma, y una de las aristas más interesantes de las fuentes de altas energías es la presencia de partículas relativistas, que poseen velocidades cercanas a la de la luz. Estas partículas no solamente generan fotones de los más energéticos que existen en el Universo sino que están ligadas a algo más: algo que las aceleró. Estos 'motores' de aceleración son una de las componentes más llamativas que posee esta rama de la astronomía. ¿Qué es lo que acelera estas partículas? Se han desarrollado modelos para poder explicar el origen de las altas velocidades, y en muchos casos las observaciones están casi en completa concordancia con los modelos, pero en muchos otros no está tan claro. Aún queda un gran camino por recorrer.

### **Bajas y altas energías: lejos pero cerca**

La radioastronomía estudia la porción menos energética del espectro electromagnético, y, por otro lado, la astronomía gamma tiene bien merecido su nombre de astronomía de altas energías ya que se ocupa de los fotones de mayor energía del espectro. Pero, concretamente, ¿cómo se relacionan los fotones de bajas y altas energías?

Se utiliza un argumento muy sencillo para vincularlas. Tendremos en cuenta las ideas más básicas dejando de lado algunos detalles para evitar complejidad en el texto. Supongamos que se observa una fuente de emisión en radio y se llega a la conclusión de que su radiación es no térmica. Como hemos visto, el proceso sincrotrón es el que explica este tipo de emisión en radio. Los fotones no térmicos generados se producen en la interacción entre electrones relativistas y un campo magnético. Por lo tanto, podemos decir que si observamos emisión sincrotrón en radio, encontramos una evidencia de la presencia de partículas relativistas, es este caso electrones. Con esta hipótesis, más el conocimiento de los parámetros que necesitamos, y que obtenemos por medio de las observaciones, podemos estimar la emisión esperada que producen los diferentes procesos radiativos no térmicos que producen fotones de altas energías (y en el caso de sincrotrón también de bajas energías).

El Grupo de Astrofísica Relativista y Radioastronomía (GARRA), del cual formo parte, se encarga de estudiar este aspecto de muchas fuentes astrofísicas, entre muchos otros temas (<http://www.iar.unlp.edu.ar/garra/>).

## ¿Conclusiones?

La radiación térmica es la que se conoce como radiación de cuerpo negro (Planck). Es generada por un sistema en equilibrio termodinámico caracterizado por una temperatura dada, y puede generar fotones con energías que llegan sólo hasta el rango de los rayos X.

La radiación no térmica es generada por sistemas fuera del equilibrio termodinámico, y que tienen por lo menos dos componentes: partículas relativistas más algún campo; magnético, de fotones, o materia. Los fotones no térmicos, generados por una gran variedad de procesos, abarcan todo el espectro electromagnético, desde radio hasta gamma.

Las fuentes que emiten fotones de altas energías no sólo pueden explicar los procesos no térmicos y los fotones de mayor energía, sino que también sirven para testear teorías físicas que en otro tipo de fuentes no se podrían testear, así como tampoco en laboratorios terrestres. Estos sistemas poseen condiciones extremas que crean el ambiente necesario para que todo los estudios sean llevados a cabo con éxito.

Las fuentes de rayos gamma, además, poseen aceleradores de partículas de los más eficientes que existen en el Universo, impulsando partículas que alcanzan velocidades cercanas a la de la luz y luego generan fotones de los más energéticos que se hayan observado.

En este texto hemos realizado un mentiroso 'breve' repaso por los inicios de la historia de la astronomía de bajas y altas energías, radio y gamma respectivamente. Además, hemos visto cómo se relacionan estas dos ramas, extremas en lo que respecta a las energías del espectro electromagnético.

Más allá de los conceptos físicos, nuevos para algunos y conocidos para otros, quisiera remarcar el hecho de que la historia de la Astronomía se está desarrollando en este momento, día a día. No nos es necesario viajar en el tiempo 5000 años hacia atrás (si es posible o no, consultarlo con los expertos, por ejemplo, el Dr. G. E. Romero) para poder apreciar grandes avances en la ciencia: se están dando ahora.

En general tendemos al pensamiento de que está todo hecho, de que todo ha sido descubierto, pero la realidad es que estamos lejos de ello. Se puede llegar a esta idea con abordar apenas una pequeña parte de la inmensidad de áreas que abarca la Astronomía. Sin ir más lejos, lo hemos hecho en este artículo. Imaginemos qué pasaría si exploramos otras áreas: los interrogantes se seguirían acumulando en un sin fin de preguntas sin respuestas. Y más aún si nos aventuramos a otras áreas de la ciencia.

El método científico es la respuesta a muchos cuestionamientos, pero a la vez que sacia nuestras dudas nos permite seguir alimentando nuestra curiosidad y búsqueda de nuevas respuestas, que una vez más, generarán nuevos interrogantes. Es una 'historia sin fin'.



Espero hayan disfrutado de la lectura, no haberlos aburrido, y que se haya comprendido el texto.

Cintia S. Peri

## **Bibliografía**

*Tools of Radio Astronomy*, Kristen Rohlfs, 1990. Astronomy and Astrophysics Library, Springer-Verlag.

*An Introduction to Radio Astronomy*, B. F. Burke y F. Graham-Smith, 1997. Cambridge University Press.

*The origin of cosmic rays*, V. L. Ginzburg y S. I. Syrovatskii, 1964. The Macmillan Company (New York, USA) y Pergamon Press Limited (Oxford, England).

*Introducción a la Astrofísica Relativista*, G. E. Romero y J. M. Paredes, 2011. Textos docentes, Universidad de Barcelona.

*Cosmic gamma-ray sources*, K. S. Cheng y G. E. Romero (editores), 2004. Astrophysics and Space Science Library. Kluwer Academic Publishers.

*High Energy Astrophysics*, M. S. Longair, 2011. Cambridge University Press.

*Teraelectronvolt Astronomy*, J. A. Hinton y W. Hoffmann, 2009. Annual Review of Astronomy and Astrophysics.

## **Páginas de Internet oficiales**

Premios Nobel: <http://www.nobelprize.org/>.

Laboratorios Bell: [www.bell-labs.com](http://www.bell-labs.com).

The Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET):  
<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/cossc/egret/>.

The Fermi Large Area Telescope: <http://www-glast.stanford.edu/>.

The Cherenkov Telescope array: <http://www.cta-observatory.org/>.