

## **Capítulo 1: Introducción**

### **1.1 Motivación**

La investigación astrofísica de altas energías es un terreno nuevo, poco explorado y todavía con muchas incógnitas. Los objetos celestes de altas energías generan radiación gamma. Se conoce bien la forma en que los rayos gamma se producen, existe el decaimiento radioactivo, la aniquilación de pares, el efecto Compton inverso y las colisiones partícula – núcleo. Pero no se sabe mucho del entorno astrofísico en que éstos se crean, en particular como es que las partículas obtienen la energía necesaria para formar un rayo gamma.

El satélite de la NASA, Compton Gamma Ray Observatory fue diseñado específicamente para detectar fuentes de rayos gamma en el universo. A lo largo de los nueve años que estuvo en órbita recolectó datos de toda la esfera celeste y proporcionó información para estudiar a los fenómenos de altas energías. Se espera que GLAST, un nuevo satélite de la NASA mucho más efectivo, aumente considerablemente las bases de datos y ayude a crear nuevas teorías.

Los rayos gamma proporcionan medios para estudiar algunos de los eventos más impactantes del universo, como supernovas y agujeros negros. Contar con métodos para detectarlos y analizarlos es importante para ampliar nuestros conocimientos del universo.

## 1.2 Objetivo

El objetivo principal de la Tesis es desarrollar un programa que realice un análisis de Máxima Similitud con los datos del *Energetic Gamma Ray Experiment Telescope* (EGRET), uno de los cuatro instrumentos a bordo del *Compton Gamma Ray Observatory*, con el fin de detectar fuentes de rayos gamma. EGRET detectaba rayos gamma con energías que iban de los 20 MeV a los 100 GeV.

Para comprobar su funcionamiento el programa deberá reproducir los resultados del *Third EGRET Catalog*, el catálogo de fuentes de rayos gamma detectadas con EGRET. En éste se encuentran 265 fuentes de rayos gamma, que comprenden núcleos activos de galaxias, pulsares y fuentes no identificadas.

El programa también deberá realizar el análisis con una resolución angular de hasta  $(0.1^\circ)^2$  y crear mapas de la región analizada; los resultados del Third EGRET Catalog y los mapas en la base de datos pública del CGRO tienen una resolución de  $(0.5^\circ)^2$ . Además será capaz de analizar tanto fuentes puntuales como fuentes extendidas de rayos gamma. Se utilizará *Matlab 6.0* en una PC con procesador de 1.2 GHz y 240 MB de RAM para desarrollar el programa y realizar los cálculos.

### 1.3 Rayos Gamma

Los rayos gamma son fotones de altas energías, conforman la parte más energética y de menor longitud de onda del espectro electromagnético. En la tabla 1.1 se muestran las longitudes de onda, frecuencias y energías de las principales ondas que componen el espectro electromagnético.

<b>Región</b>	<b>Longitud de onda [cm]</b>	<b>Frecuencia [Hz]</b>	<b>Energía [eV]</b>
Radio	$> 1$	$< 3 \times 10^{10}$	$< 10^{-4}$
Microondas	$1 - 0.01$	$3 \times 10^{10} - 3 \times 10^{12}$	$10^{-4} - 0.01$
Infrarrojo	$0.01 - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	$0.01 - 2$
Visible	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{12} - 7.5 \times 10^{14}$	$2 - 3$
Ultravioleta	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{12} - 4 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
Rayos X	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Rayos Gamma	$< 10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

Tabla 1.1: Espectro electromagnético

Es difícil separar a los rayos X de altas energías y a los rayos gamma ya que físicamente son iguales; sólo se diferencian por la forma en que fueron creados, mientras que los rayos gamma se originan en las transiciones nucleares, los rayos X pueden producirse en procesos térmicos y no térmicos, como la radiación sincrotrón.

Como ya se mencionó, la aniquilación de pares electrón – positrón es una forma de creación de rayos gamma. Cuando la aniquilación sucede se forman dos rayos gamma con energías  $E_1 + E_2 = \gamma_1 m_e c^2 + \gamma_2 m_e c^2$  y  $\gamma_i \geq 1$ , así que la energía mínima que un rayo gamma puede tener es  $E = m_e c^2$ .

$$E_\gamma = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg } (3 \times 10^8 \text{ m / s})^2 = 511 \text{ keV}$$

### Astronomía de Rayos Gamma

Antes de que fueran detectados, se creía que varios procesos en el universo deberían crear fotones de altas energías. Aunque algunas fuentes de fotones de muy altas energías (~ TeV) pueden ser detectadas desde la Tierra, la mayoría de los rayos gamma son absorbidos por la atmósfera. Por lo que se han tenido que crear instrumentos que trabajen a bordo de satélites, como el Compton Gamma Ray Observatory, para detectarlos.

Algunas de las fuentes de rayos gamma en el universo son estrellas de neutrones, pulsares, agujeros negros, flujos de gas con velocidades cercanas a la de la luz y eventos de gran violencia, como las explosiones de supernovas. El cielo en rayos gamma es muy diferente al que podemos observar a simple vista, ya que está en constante cambio. El estudio del cosmos a altas energías da la posibilidad de probar nuevas teorías y realizar experimentos que no se podrían hacer en condiciones normales.

No es posible detectar rayos gamma en si, lo que se hace es analizar la interacción de estos con la materia para deducir las propiedades del rayo gamma. Existen tres formas en que un rayo gamma interactúa con la materia [12]:

- a) Efecto fotoeléctrico: el rayo gamma transfiere toda su energía a un electrón, expulsándolo del átomo.
- b) Dispersión de Compton: el rayo gamma transfiere energía a un electrón, el resto de la energía produce otro fotón con dirección diferente a la del rayo gamma original.
- c) Producción de pares: mediante la interacción con el campo coulombiano del núcleo el rayo gamma produce un par electrón – positrón; el par se puede aniquilar y producir dos rayos gamma o interactuar con otros núcleos y producir una cascada de electrones y fotones.

Un detector de rayos gamma cuenta generalmente con un material centelleante, como cristales de yoduro de sodio o germanato de bismuto, que interactúa con el fotón mediante la dispersión de Compton o la producción de pares y un medidor que calcula la energía y dirección de las partículas resultantes para inferir la dirección y energía originales del rayo gamma.

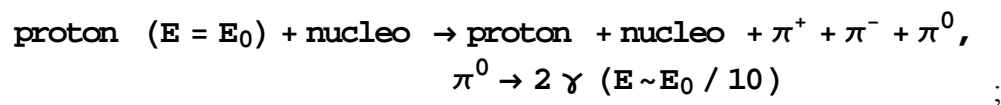
### Origen de los Rayos Gamma en el universo

Al ser radiación de altas energías, los rayos gamma sólo pueden ser creados por la interacción de partículas con energías aún mayores. En el medio interestelar, a estas últimas

partículas que generalmente son núcleos de átomos y en menor proporción electrones, se les llama rayos cósmicos.

Una de las ventajas que ofrecen los rayos gamma para detectar objetos en el universo es que apuntan a la dirección en que fueron originados, no como los rayos cósmicos, que son desviados en los campos magnéticos.

Los rayos gamma pueden producirse cuando un rayo cósmico choca con una partícula del medio interestelar: un protón acelerado que choca con un núcleo produce varias partículas entre ellas un pión, que decae en dos rayos gamma:



un electrón acelerado también puede producir un rayo gamma, mediante la dispersión inversa de Compton el electrón transfiere su energía a un fotón del medio convirtiéndolo en un rayo gamma:



De esta forma si se tiene un protón con una energía mayor a 200 MeV o un electrón con un factor de Lorentz cercano a 4500, es decir un electrón relativista, se obtiene un rayo gamma detectable por EGRET. El flujo de rayos gamma de una fuente depende de la densidad de rayos cósmicos que produce y la densidad del medio interestelar en el que se encuentra.

## 1.4 Compton Gamma Ray Observatory

El Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) fue el primer satélite en realizar una búsqueda detallada de fuentes de rayos gamma en todo el cielo. Fue lanzado el 5 de Abril de 1991 y permaneció en órbita hasta el 4 de Junio del 2000. Entre sus objetivos se encontraban explosiones de supernovas, quasares y explosiones de rayos gamma, cuyo origen era desconocido.

A bordo del CGRO se encontraban cuatro instrumentos que trabajaban en diferentes rangos de energía y se especializaban en diferentes tipos de observaciones. El *Burst and Transient Source Experiment* (BATSE) investigó fenómenos de corta duración, como explosiones de supernovas. El *Oriented Scintillation Spectrometer Experiment* (OSSE) estudió a los rayos gamma de bajas energías. El *Imaging Compton Telescope* (COMPTEL) generaba imágenes de la radiación gamma de medianas energías. Y el *Energetic Gamma Ray Experiment Telescope* (EGRET) detectaba a los fotones de más altas energías [6].

BATSE, OSSE y COMPTEL contaban con detectores de yoduro de sodio, cuando el fotón entra al yoduro de sodio se excitan las moléculas y producen un pulso de luz visible, que es grabado electrónicamente con tubos foto multiplicadores sensibles a la luz. EGRET contaba con un método diferente, del que se hablara en la siguiente sección.

BATSE estaba formado por ocho detectores, colocados en las esquinas del satélite, que observaban la parte del cielo que no cubría la Tierra y trabajaban en el rango de 0.02 –

0.6 MeV. Localizaba las llamadas explosiones de rayos gamma, que son fuentes transitorias muy brillantes, y explosiones de otras fuentes.

OSSE contaba con cuatro detectores con colimadores de tungsteno que les permitían observar una pequeña parte del cielo, trabajaba entre los 0.05 y 10 MeV. Cada detector podía apuntar a una región diferente, por lo que se podía enfocar la fuente de rayos gamma y las regiones cercanas, de esta forma se puede calcular la contaminación de fondo. OSSE observó el espectro de líneas nucleares en las llamaradas solares, el decaimiento radioactivo de núcleos en los remanentes de supernova y la aniquilación materia – antimateria en el centro galáctico.

COMPTEL contaba con un detector de dos niveles, sobre la capa de yoduro de sodio había un líquido centelleante donde el rayo gamma sufría dispersión de Compton y luego era absorbido por el yoduro de sodio, en ambos niveles se registraba la energía y de ahí se infería la dirección original del fotón; no contaba con resolución en el ángulo azimutal, por lo que reconstruía imágenes superponiendo anillos que correspondían a cada fotón. Trabajaba entre 1 MeV y 30 MeV.

El CGRO amplió y mejoró significativamente nuestros conocimientos sobre varios objetos y fenómenos celestes, entre ellos los núcleos de galaxias activas, supernovas, explosiones solares, pulsares, radiación extragaláctica y nuestra propia galaxia.

Uno de los fenómenos que más expectativas causó fueron las explosiones de rayos gamma (GRB, gamma ray burst), estos fueron descubiertos con satélites anteriores, pero no



se pudo deducir mucho sobre su origen. Los GRB's son fenómenos de corta duración pero gran luminosidad, que pueden llegar a opacar a todas las demás fuentes de rayos gamma y no dejan rastro alguno sobre su origen. Las mediciones de BATSE han ayudado a entender su naturaleza, por ejemplo se descubrió que los GRB's se distribuyen isotrópicamente, por lo que su origen debe ser extragaláctico, pueden tener energías mayores a las de una supernova y los hay cortos, duran unas centésimas de segundo, y largos, de alrededor de mil segundos.



Figura 1.1: Foto del CGRO en órbita, los dos objetos redondos corresponden a los instrumentos EGRET y COMPTEL

## 1.5 EGRET

EGRET era el instrumento encargado de detectar los rayos gamma más energéticos. Realizó observaciones en todo el cielo para rayos gamma entre las energías 20 MeV y

100000 MeV. En la figura 1.2 se muestra la bóveda celeste vista en rayos gamma. Entre sus objetivos se encontraban GRB's, pulsares, núcleos activos de galaxias y fuentes de rayos cósmicos; muchas de las fuentes que detectó aún no han sido identificadas.

EGRET es parecido, pero más grande, a los telescopios de los años 70: SAS 2 y COS B. El detector de rayos gamma de EGRET consistía de un *convertidor*: donde los rayos gamma formaban electrones; un *rastreador*: donde se obtenía la dirección del fotón; y un *calorímetro*, que medía la energía del rayo gamma; EGRET también contaba con un domo que registraba la entrada de partículas cargadas, rayos cósmicos, y anulaba dichos eventos.

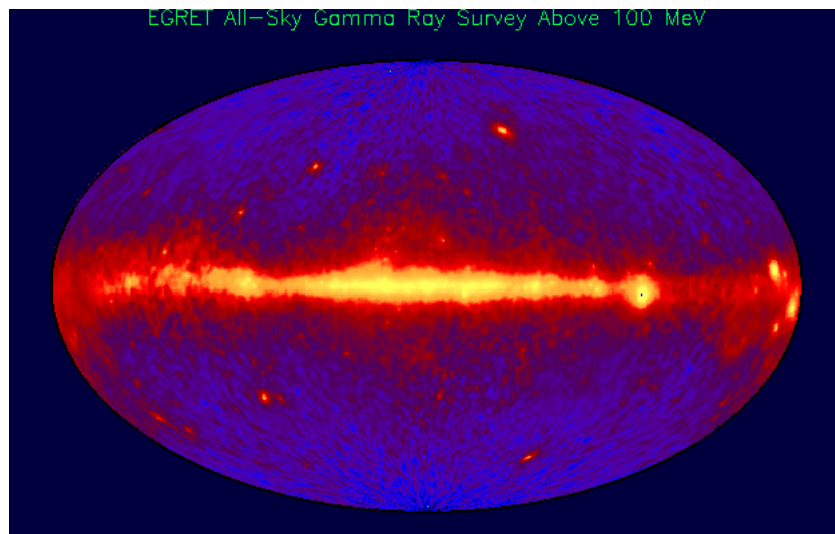


Figura 1.2: Mapeo de EGRET de todo el cielo para energías mayores a 100 MeV [10]

El convertidor y el rastreador estaban formados por varias capas delgadas electrificadas en forma de rejillas, conocidas como cámara de chispa, y el calorímetro era

un contador de NaI(Tl) llamado *Total Absorption Shower Counter* (TASC) colocado debajo de la cámara. En la figura 1.3 se muestra un esquema de EGRET.

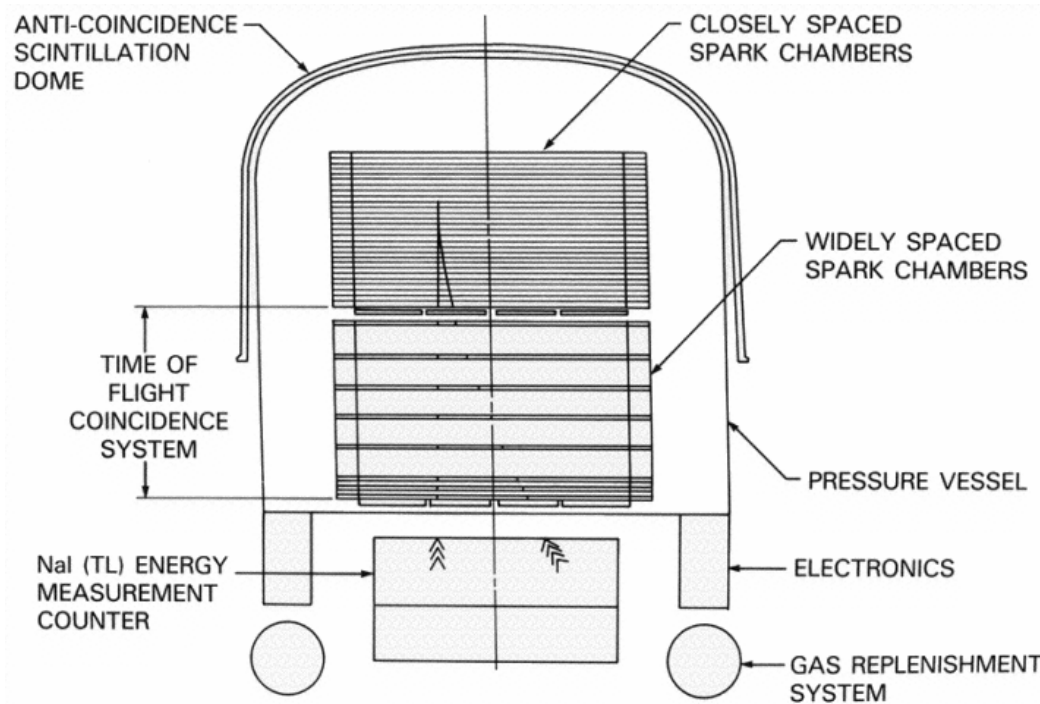
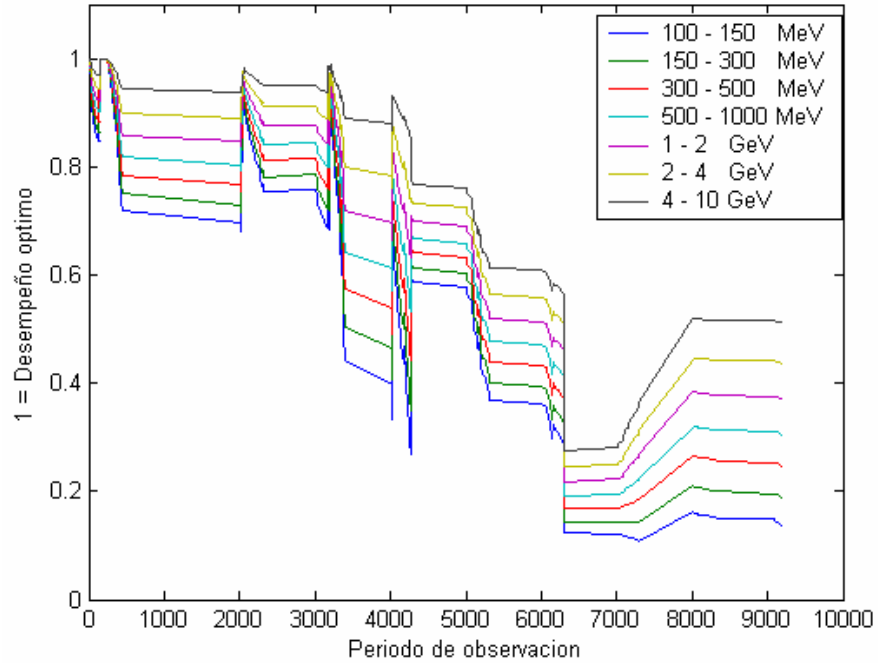


Figura 1.3: Esquema del instrumento EGRET [4]

Los rayos gamma producían pares electrón – positrón que ionizaban el gas entre las rejillas, la ionización indicaba la trayectoria del rayo gamma, TASC medía la energía del evento recolectando los pares producidos. EGRET fue diseñado para durar dos años, debido a que superó sus expectativas su capacidad de detección se degradaba con el tiempo, por lo que necesitaba ser rellenado de gas cada dos años para que sus mediciones fueran congruentes. En la gráfica 1.1 se muestra como varió el desempeño de EGRET de acuerdo al periodo de observación, se puede observar que a mayores energías hay menor degradación. En la figura 1.4 se muestran las fuentes detectadas con EGRET.



Gráfica 1.1: Desempeño de EGRET de acuerdo al periodo de observación

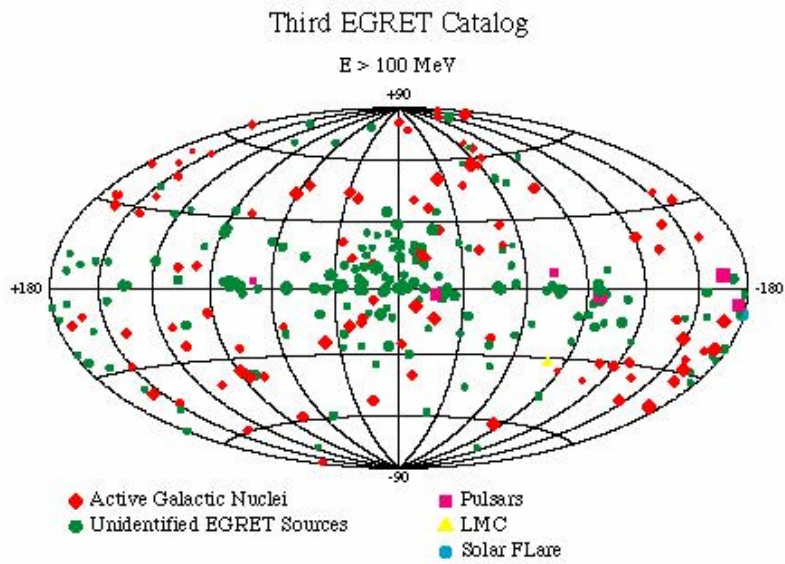


Figura 1.4: Mapa en coordenadas galácticas de las fuentes puntuales de rayos gamma encontradas con EGRET [10]

Como se puede ver en la figura 1.3 muchas de las fuentes detectadas por EGRET todavía no han sido identificadas.