L_{90} es la densidad de fotones a 90 m del eje de la cascada y α_i y β_i son parámetros que dependen del ángulo cenital de la cascada y de la naturaleza del primario, aunque $\beta_i \sim 1$. El error en la determinación de la energía del primario puede ser grande en el caso del centelleador; depende del ángulo cenital, la naturaleza del primario y sobre todo de su energía, por ejemplo disminuye del 40 al 25% cuando la energía aumenta de 20 a 500 TeV en el caso de un fotón en incidencia vertical [25]. En cambio con AIROBICC se consigue un error menor debido a que la densidad de luz a 90 m del *core* depende menos de las fluctuaciones en el desarrollo de la cascada que N_e. Así su error típico en la determinación de la energía de un fotón de 20 TeV es un 15% y de 500 TeV es un 8%, no dependiendo prácticamente de su ángulo de incidencia. Para protones no se consigue un error inferior al 20% debido a sus mayores fluctuaciones en el desarrollo de la cascada [25]. Para conseguir la determinación de la energía de la partícula primaria con estos errores relativamente bajos es obvio que necesitamos conocer su naturaleza, para lo cual ha de usarse algún método de discriminación como los comentados en la Sección 3.2.

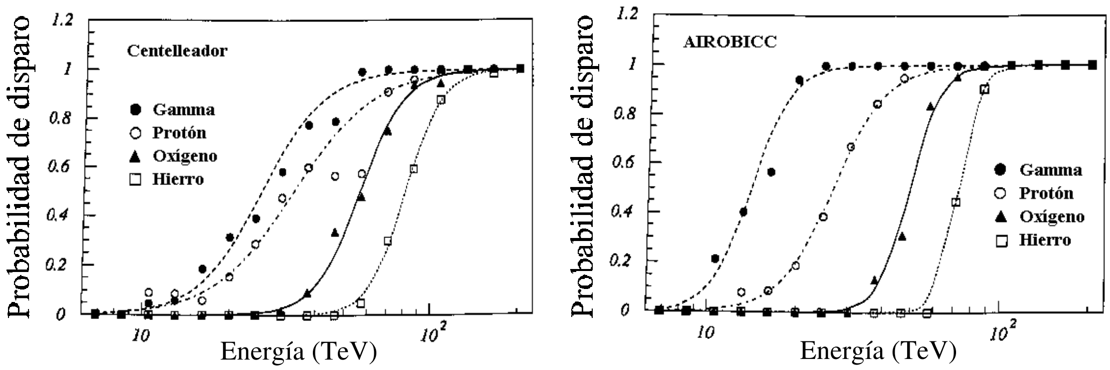

Figura 5.6: Probabilidad de disparo del centelleador y AIROBICC en función de la energía para diferentes primarios. Las curvas han sido obtenidas con la simulación de la respuesta de los detectores a cascadas generadas por el Monte Carlo con un ángulo cenital de 10º. Figura tomada de [25].

Un concepto importante en este tipo de experimentos es el umbral de energía, esto es, la mínima energía que debe tener un rayo cósmico para disparar los detectores. En la práctica esta energía no está bien definida ya que realmente cada tipo de partícula de cierta energía tiene una determinada probabilidad de disparar los detectores. Es decir, la probabilidad de ser detectada aumenta con la energía de forma continua y no a modo de función escalón que es lo que sugiere el término umbral de energía. Hay varias maneras de definir la energía umbral, una es tomar el valor que tiene una probabilidad del 50% de producir un disparo, y otra es tomar aquella energía en la que debería estar el salto de una probabilidad de disparo en forma de función escalón para reproducir la tasa de detección de sucesos observada. La primera se calcula mediante simulaciones de Monte Carlo del desarrollo de las cascadas y del comportamiento del detector [25] y la segunda mediante datos experimentales disponiendo del espectro y composición química de los rayos cósmicos, que es bien conocido hasta unos 100 TeV [32]. En la práctica los dos valores son parecidos, especialmente en el caso de AIROBICC, ya que la probabilidad de disparo tiene una subida rápida. El buen acuerdo entre los dos resultados muestra la fiabilidad de las simulaciones de Monte Carlo, necesarias para estimar la respuesta del detector a los fotones, ya que esta componente no puede ser estudiada experimentalmente debido a la sobreabundancia de los hadrones. En la Figura 5.6 aparece la probabilidad de disparo, según el Monte Carlo, del centelleador y de AIROBICC en función de la energía para varios primarios en incidencia vertical. Los valores de la energía en los que se alcanza un 50% de probabilidad de disparo están listados en la Tabla 5.1. En ella puede apreciarse que el umbral de energía de AIROBICC es más bajo que el del centelleador, especialmente para fotones, donde la diferencia es casi de un 50%. Esto y la resolución angular son las dos grandes ventajas que AIROBICC presenta sobre los detectores de centelleadores, aunque como ya se comentó, su defecto está en la necesidad de restringir su operación a noches despejadas y sin la Luna, mientras que el centelleador puede operar las 24 horas del día.

Tabla 5.1: Energía (TeV) con el 50% de probabilidad de disparo del centelleador y de AIROBICC para varios primarios y dos intervalos de incidencia.

	Ángulo cenital < 20º		20º < ángulo cenital < 35º	
Primario	**Centelleador**	**AIROBICC**	**Centelleador**	**AIROBICC**
γ	26	14	40	22
Protón	34	27	44	36
Oxígeno	57	49	70	63
Hierro	82	72	113	96

6. Búsqueda de GRBs

La corta duración de los GRBs y su escaso flujo a la energía de operación de AIROBICC hacen dudar sobre la viabilidad de una detección positiva, especialmente si la absorción por el fondo infrarrojo intergaláctico entra en juego. Se puede estimar qué es lo que esperamos que AIROBICC detecte en condiciones óptimas de operación extrapolando el espectro de los GRBs tomado a bajas energías. En concreto podemos fijarnos en el GRB más intenso y de mayor dureza espectral registrado hasta ahora, como estimación del que nos proporciona las mejores condiciones de observación. Se trata del GRB 930131 que fue detectado por BATSE y Ulysses y observado también por COMPTEL y EGRET, lo que permitió disponer de una rápida y precisa localización. Se realizó una campaña de búsqueda de contrapartidas en radio, infrarrojo, óptico, ultravioleta y rayos X en las horas y días siguientes pero resultó negativa [35]. EGRET detectó 16 fotones por encima de 30 MeV en 25 s cuando esperaba recibir 0.04 de fondo. Dos de estos fotones tenían una energía aproximada de 1 GeV. El espectro ajustado con los 16 fotones viene dado por $\mathrm{d}N/\mathrm{d}E = (7.4 \pm 1.8)\cdot 10^{-6}\ (E/147\ \mathrm{MeV})^{-2.03\ \pm\ 0.36}\ \mathrm{cm}^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}\ \mathrm{MeV}^{-1}$ [10]. El número de fotones que esperaríamos detectar con AIROBICC si el GRB fuera observado cerca del cenit (lamentablemente este GRB no pudo ser observado por AIROBICC al estar por debajo del horizonte), extrapolando su espectro, viene dado por:

$$N = \int_0^{25\mathrm{s}} \mathrm{d}t \iint_{\mathrm{AIROBICC}} \mathrm{d}A \int_{16\mathrm{TeV}}^{\infty} \mathrm{d}E \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}E} \approx 55 \text{ fotones}$$

Este número hay que corregirlo por el tiempo muerto del detector (f_t = 15%, ver Sección 6.1), la fracción de sucesos que se espera recoger dentro del intervalo de búsqueda (β = 75%, ver Sección 6.2) y la eficiencia de reconstrucción (f_r = 60%, ver Sección 6.1), lo que nos deja con unos 21 fotones observados en 25 segundos mientras que se espera 0.1 rayos cósmicos de fondo. Esto supondría una detección positiva fuera de toda duda. Como se ha mencionado antes, este resultado es lo esperado en condiciones óptimas, no obstante es posible que la extrapolación no sea válida si en la fuente el mecanismo de emisión sufre un corte para energías mayores que el GeV o el TeV. Los datos a mayor energía de los que se dispone en la actualidad, suministrados por EGRET, no muestran tal corte al menos hasta los 30 GeV. La detección de un GRB en el rango del TeV sin mostrar la absorción esperada por el fondo infrarrojo intergaláctico supondría un resultado muy importante porque situaría a las fuentes de los GRBs en nuestra Galaxia.

En este trabajo no sólo se buscarán los GRBs observados por los detectores situados en el espacio, sino que se explorará el cielo en busca de GRBs que pudieran haber pasado desapercibidos. Este procedimiento se justifica en que los detectores en el espacio no cubren todo el cielo en todo momento y en que es posible que una importante fracción de GRBs, aquellos de espectro más duro y por tanto de mayores posibilidades de detección para AIROBICC, no sean observados porque los experimentos que vigilan todo el cielo no son sensibles en el rango del MeV ni más arriba [36].

6.1 La muestra de datos

La muestra de datos empleada en este trabajo fue tomada durante el primer año de funcionamiento de AIROBICC, de Marzo de 1992 a Marzo de 1993 y fue utilizada en 1994 para la búsqueda de fuentes puntuales de emisión constante, como la Nebulosa del Cangrejo y el núcleo galáctico activo Markarian 421 [32]. Consiste en unos 40 millones de sucesos tomados en unas 800 horas de observación, lo que corresponde aproximadamente a un 60% del tiempo de oscuridad en el observatorio y a un 10% del tiempo total. El estado del experimento durante esa temporada era un poco diferente al descrito en la Sección 4. Sólo existía el telescopio Cherenkov prototipo y la matriz de torres Geiger estaba en construcción. La toma de datos estaba basada en CAMAC y AIROBICC tenía unas fuentes de alimentación de los fotomultiplicadores peores que las actuales. La tasa de recolección de sucesos era de unos 15 Hz, teniéndose un tiempo muerto de 10 ms por suceso (f_t = 15%) más 14 segundos por calibración, las cuales tenían lugar cada 10 minutos. La resolución temporal diferencial conseguida con el reloj de rubidio era 0.1 μs y la absoluta ± 1 s.

Puesto que en este trabajo se buscan fuentes esporádicas de emisión, de tan sólo algunos minutos de duración como máximo, se ha procurado conservar el mayor número de sucesos posible para incrementar la estadística. Por tanto no se ha exigido mayor corte de calidad que el de tener éxito en la reconstrucción de la dirección del primario. Después de esta selección quedan unos 25 millones de sucesos (60% de la muestra inicial, f_r). A pesar de que el disparo de AIROBICC está determinado por la activación de 6 casetas, se ha rehusado reconstruir sucesos con tan pocas casetas para mejorar la calidad de la muestra e incrementar la velocidad de análisis, y así se situó en 7 el mínimo de casetas necesarias para reconstruir el suceso. Esto eleva un poco el umbral de energía pero mejora sensiblemente la resolución angular. Ésta se estima con los datos de la Sección 5.2 en 0º.6, mientras que el umbral de energía (50% probabilidad de disparo) queda en $E_{\mathrm{th}\,\gamma}$ = 16 TeV ($E_{\mathrm{th\,had}}$ = 29 TeV) para fotones (protones) cuando el ángulo cenital $\theta < 20^\circ$ y 25 TeV (37 TeV) para fotones (protones) con $20^\circ < \theta < 35^\circ$.

6.2 Método de búsqueda

En este trabajo se ha seguido un método de búsqueda clásico [37] (con algunas modificaciones), en el que el campo de visión de AIROBICC es explorado a lo largo del tiempo buscando zonas del cielo en las que el número de partículas recibidas supere de manera significativa el número esperado debido al fondo isótropo de rayos cósmicos. La búsqueda se realiza moviendo en el campo de visión una ventana angular (ventana de señal o ventana ON) donde se cuenta el número de partículas que caen dentro (N_{ON}) durante un intervalo de tiempo fijo. Para la estimación del fondo se ha elegido el método del anillo [32][38], en el cual se toma un anillo concéntrico a la ventana ON (al cual denominaremos ventana de fondo o ventana OFF) y se cuenta el número de sucesos que entran en él (N_{OFF}) durante el mismo tiempo que en la ventana ON. Así el número de sucesos esperados dentro de la ventana ON es $\langle n_{\mathrm{ON}} \rangle = N_{\mathrm{OFF}} \cdot \alpha$ con $\alpha = \Omega_{\mathrm{ON}}/\Omega_{\mathrm{OFF}}$, donde Ω_i es el ángulo sólido de la ventana i.

El intervalo de tiempo durante el que se cuentan los sucesos que entran en las ventanas ON y OFF se ha tomado fijo, pero la búsqueda ha sido llevada a cabo con tres valores diferentes: 10 segundos, 1 minuto y 4 minutos. Los dos primeros valores han sido elegidos de forma que abarquen el rango de las duraciones de los GRBs donde se produce el máximo principal de su distribución (ver Sección 2.1). El máximo secundario que se encuentra en torno a 0.2 s no es susceptible de ser estudiado con AIROBICC debido al tiempo muerto y a la incapacidad de reunir una estadística suficiente en tan corto intervalo de tiempo. El mayor de los intervalos elegidos, 4 minutos, se ha tomado basado en las observaciones de EGRET en las que la emisión de alta energía a menudo tiene una mayor duración, típicamente > 100 s [2].

La ventana ON ha sido escogida de forma que optimice la sensibilidad de la búsqueda, es decir, maximizando la relación señal - ruido, ya que cuanto mayor sea la ventana ON recogemos más fotones de señal, pero también se introducen más fotones de fondo. Así pues la ventana óptima está determinada por un círculo de radio dado por $r_{\mathrm{opt}} = [1.58 + 0.7 \cdot \exp(-0.88\ N^{0.36})] \cdot \sigma_{63\%}/2^{1/2}$ [38], donde N es aproximadamente el número esperado de fotones en caso de detección de un GRB. Este número ya fue calculado anteriormente para un caso óptimo, tomando la mitad como valor más realista y la resolución angular señalada en la sección anterior, obtenemos que el radio óptimo es 0º.7. Este radio contendrá aproximadamente el 75% (factor de recolección $\beta = 0.75$) de todos los fotones emitidos por una fuente puntual.

El radio interior del anillo que define la ventana OFF se toma cercano a la ventana ON para estimar el fondo en una zona próxima a la de señal y reducir así un posible error sistemático. Sin embargo no puede ser demasiado cercano porque recibiría sucesos de la hipotética fuente en la ventana de señal, lo que llevaría a una sobrestimación sistemática del fondo. Teniendo en cuenta ambas consideraciones se ha elegido un valor de 1º.5, que es suficientemente próximo mientras que recibe menos del 0.1% de los fotones de una hipotética fuente puntual situada en el centro. El valor del radio externo de la ventana OFF surge de un compromiso entre la necesidad de obtener el mayor número posible de sucesos de fondo (para minimizar las fluctuaciones estadísticas) y evitar al mismo tiempo el error sistemático que introduce la variación no lineal del flujo de rayos cósmicos con el ángulo cenital. Estas consideraciones dependen del intervalo de tiempo en el que se tomen los sucesos, ya que cuanto mayor sea éste, el error estadístico será menor pero el sistemático será mayor; por tanto la ventana de tiempo más crítica es la de 4 minutos. Mediante la comparación del valor real y el estimado de N_{ON}, obtenido para muchas ventanas aleatorias de diferentes tamaños y de 4 minutos de duración, se encontró que un radio externo de 10º es óptimo. Este valor produce un error sistemático inferior al 5% (ver Figura 6.1), mientras que el error estadístico en la ventana de fondo es un 5% en el mejor de los casos (fluctuación *poissoniana*) y en la de señal no es inferior al 30%. La disminución del radio no reduce significativamente el error sistemático, pero su aumento sí produce un fuerte incremento del error. También se encontró que el error sistemático tiende a sobrestimar el valor del fondo, lo que supone un efecto conservador.

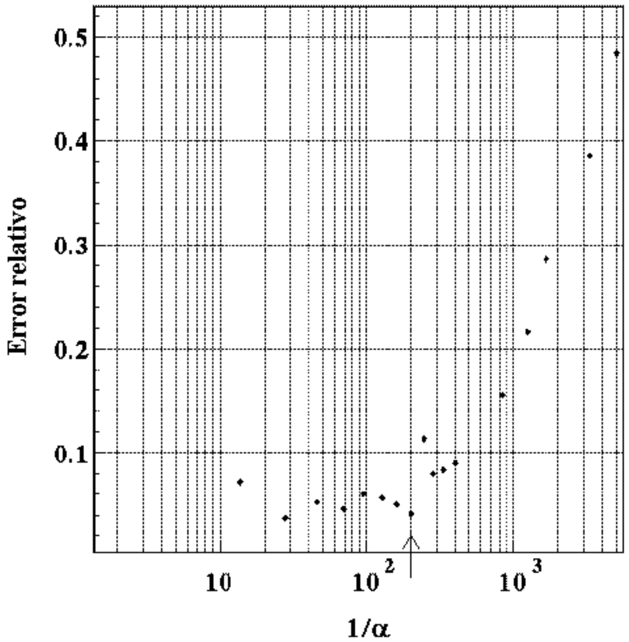

Figura 6.1: Error sistemático en la estimación del fondo (debido a su variación no lineal en la ventana OFF) en función del cociente de los ángulos sólidos de las zonas OFF y ON. La ventana ON es un círculo de 0°7 de radio y la OFF es un anillo de 1°5 de radio interno y radio externo variable. Los puntos representan el error promediado sobre varios cientos de ventanas aleatorias de 4 minutos de duración. La flecha señala el valor escogido para este trabajo, que corresponde a un radio externo de 10º para la ventana OFF, con el que se consigue un error inferior al 5%.

La estrategia de la búsqueda consiste en suponer que cada suceso de la muestra pertenece a un GRB en la mitad de su emisión, por tanto las ventanas ON y OFF se toman centradas en la posición del suceso y el intervalo de tiempo también se centra en el momento de llegada del suceso. De esta forma tenemos un par de ventanas ON y OFF (de 10 s, 1 min y 4 min de duración) por cada suceso de la muestra. En otras palabras, se observa la densidad de sucesos en los alrededores (de espacio y de tiempo) de cada rayo cósmico recibido por AIROBICC para ver si viene acompañado de otros en un número mayor de lo esperado según el fondo. Este tipo de búsqueda tiene la ventaja de hacer un seguimiento automático del cielo sin necesidad de preocuparse de adónde está mirando el detector y que realiza una búsqueda exhaustiva sin posibilidad de perder una hipotética señal de las características buscadas, esto es, puntual y de corta duración (de segundos a minutos). Las desventajas son que el tiempo de proceso de la muestra crece cuadráticamente con la longitud del intervalo temporal de búsqueda, lo que limita el mayor intervalo a algunos minutos (4 en nuestro caso) y que no todos los pares de ventanas ON - OFF son independientes entre sí, lo que dificulta el estudio de la probabilidad de las fluctuaciones estadísticas así como de la significancia de una posible señal.

Para resolver el problema de la determinación de la probabilidad real de las concentraciones encontradas en la muestra de datos, se repite la búsqueda sobre una muestra de sucesos ficticios, obtenidos con un proceso de Monte Carlo, que no contiene ninguna señal y por tanto todas las concentraciones de sucesos son puramente aleatorias. La muestra generada al azar es 10 veces más numerosa que la real, lo que permite determinar con poco error la probabilidad de las fluctuaciones