incertidumbres típicas están entre 0º.1 y 2º para la dirección y 20 - 40% para la energía. El principal problema de estas técnicas es averiguar la naturaleza del rayo cósmico primario, pues en primera aproximación los productos de una cascada a nivel del suelo no dependen de la partícula que la inició, sino sólo de su energía. Puesto que la componente dominante de la radiación cósmica llega completamente isótropa, sin ningún tipo de discriminación la búsqueda de fuentes de radiación γ es como buscar estrellas en el cielo durante el día, y por supuesto sería imposible cualquier estudio de composición química de los rayos cósmicos. Para resolver este inconveniente se lleva trabajando en las diferencias de las cascadas iniciadas por distintos primarios prácticamente desde el descubrimiento de las mismas y todavía continúa. Los primeros estudios eran de tipo teórico, con aproximaciones analíticas, pero el grado de complejidad del problema obligó a usar técnicas de Monte Carlo simulando el desarrollo de las cascadas en la atmósfera con ordenadores. Los conocimientos actuales basan la diferenciación de las cascadas en tres aspectos:

1. La edad de la cascada: La energía en una cascada puramente electromagnética es atenuada según penetra en la atmósfera terrestre mucho más rápidamente que en una cascada iniciada por un núcleo. Esto es debido al mayor poder de penetración (mayor recorrido libre medio) de los hadrones, que llevan la energía a mayores profundidades donde siguen alimentando la cascada electromagnética mediante los procesos explicados anteriormente. En consecuencia las cascadas iniciadas por un γ (o un $e^{\pm}$) parecen más viejas (mayor parámetro de la edad *s*), esto es, distribución lateral de los $e^{\pm}$ más plana que las iniciadas por un núcleo y por tanto es posible lograr cierta discriminación. No obstante las simulaciones de Monte Carlo muestran que para energías por encima del PeV el valor medio de *s* no difiere substancialmente entre unos y otros tipos de cascadas [4].

2. El contenidos de muones: El pequeño valor de la sección eficaz de fotoproducción de hadrones (ver más arriba) hace que los muones sean partículas raras en una cascada puramente electromagnética, mientras que representan cerca del 10% del total en una cascada hadrónica. Así el número de muones en una cascada iniciada por un γ (o un $e^{\pm}$) es un factor 10 - 30 menor que en una iniciada por un núcleo [4][14]. En consecuencia algunos experimentos utilizan el contenido muónico de las cascadas como veto para eliminar parte del fondo isótropo de núcleos. Las investigaciones realizadas sobre la multiplicidad de los muones en las interacciones hadrónicas muestran que es posible llevar a cabo estudios de composición química mediante el análisis de esta componente. Por ejemplo, el número de muones en una cascada iniciada por un núcleo de hierro es el doble que en una generada por un protón de la misma energía [3]. No obstante el número de muones producidos también depende (linealmente en primera aproximación) de la energía del primario, por lo que un protón de mayor energía podría imitar el contenido de muones de la cascada iniciada por el núcleo de hierro. Para solucionar parcialmente este problema se hace uso de la medida del número de $e^{\pm}$, que aporta información adicional sobre la energía de la partícula primaria [21]. El principal problema de las técnicas que se basan en el estudio de la componente muónica es el bajo número de muones detectados, ya que son muy poco numerosos, lo que produce grandes errores por fluctuaciones en las medidas. Por ejemplo el experimento CASA-MIA, que es con mucho el que tiene mayor superficie detectora de muones (2550 m^2), registra una media de 10 muones por cascada de energía ~ 100 TeV [14].

3. La luz Cherenkov: Las técnicas basadas en el estudio de esta componente, en concreto las de formación de imágenes de luz Cherenkov, son las únicas hasta ahora que han conseguido un éxito indiscutible en la discriminación entre cascadas electromagnéticas y hadrónicas (ver [3][4][14][15]). La diferencia básica entre uno y otro tipo está ilustrada en la Figura 3.11, en ella se aprecia que las cascadas electromagnéticas son más compactas y uniformes que las hadrónicas, principalmente debido al mayor momento transverso de los hadrones. Esta diferencia se manifiesta en varios aspectos de aplicación experimental:

- Distribución lateral: Es más plana (más extensa) y uniforme en las cascadas electromagnéticas que en las hadrónicas.
- Distribución angular: Las imágenes formadas por los telescopios de luz Cherenkov son más estrechas y uniformes para cascadas iniciadas por un γ.
- Duración: La anchura del impulso de luz es menor en las cascadas electromagnéticas.
- Color: El cociente entre la fracción de luz en el rango ultravioleta y en el visible es menor para las cascadas producidas por un γ porque al desarrollarse más arriba en la atmósfera su componente UV sufre mayor absorción.

Aun cuando fuera posible eliminar el 100% de las cascadas hadrónicas, todavía existe un fondo irreducible que limitaría la sensibilidad de la astronomía γ con base en la superficie terrestre. Se trata de la componente difusa de rayos γ y de los $e^{\pm}$ de la radiación cósmica, cuyos flujos isótropos suponen una fracción entre 10^{-2} y 10^{-3} de la componente hadrónica. Para minimizar su efecto sólo puede recurrirse a una mejora de la resolución angular de los detectores, para lo cual las técnicas basadas en la luz Cherenkov son las más idóneas.

4. El experimento HEGRA

El experimento HEGRA (***H****igh* ***E****nergy* ***G****amma* ***R****ay* ***A****stronomy* - astronomía de rayos gamma de alta energía) es llevado a cabo por una colaboración internacional que incluye las siguientes instituciones:

- Universidad Complutense de Madrid, España.
- Instituto de Física de Yerevan, Armenia.
- Instituto Max Planck de Física de Munich, Alemania.
- Instituto Max Planck de Física Nuclear de Heidelberg, Alemania.
- Universidad de Hamburgo, Alemania.
- Universidad de Kiel, Alemania.
- Universidad de Wuppertal, Alemania.

Su objetivo es el estudio de la radiación cósmica a través de las cascadas atmosféricas extensas y sus implicaciones físicas (interacción de partículas de alta energía) y astrofísicas (origen y composición de la radiación cósmica). Para ello dispone de un complejo de variados detectores (ver Figura 4.1) abarcando un área de 200 x 200 m^2 en el Observatorio Astrofísico del Roque de los Muchachos (28º.8 N, 17º.9 W, 2240 m sobre el nivel del mar[10]), La Palma, Islas Canarias, donde también se encuentran las instalaciones de astronomía óptica convencional e infraestructura gestionada por el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). El experimento comenzó en 1986 como una extensión y mejora del que llevado a cabo en la Universidad de Kiel produjo resultados positivos respecto a la fuente Cygnus X-3 en 1983 [116]. Con el paso del tiempo más instituciones fueron uniéndose al experimento y éste fue ampliado y mejorado considerablemente, estando aún en expansión. En la fecha de escritura de este trabajo el experimento HEGRA cuenta con los siguientes tipos de detectores:

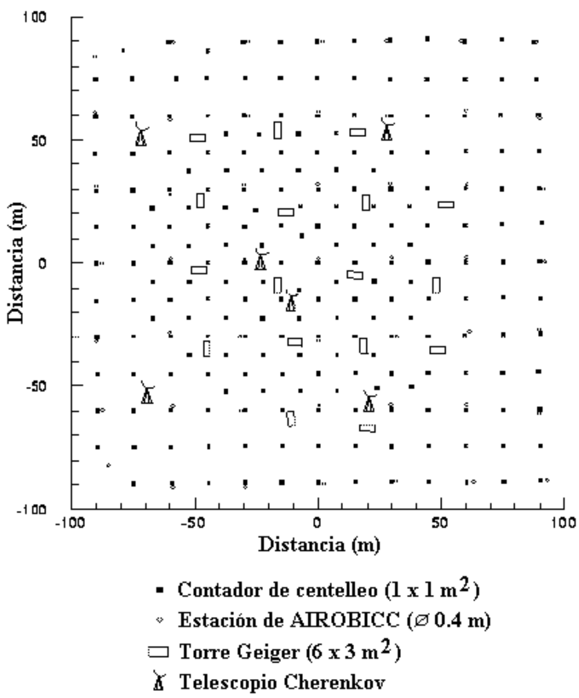

Figura 4.1: Mapa con la situación de los distintos componentes de HEGRA. Las nuevas extensiones de la matriz de centelleadores y de AIROBICC no están incluidas.

[10] Equivalente a una profundidad atmosférica $X = 790$ g/cm^2 (~ 21 longitudes de radiación).

• Una matriz 13 x 13 de 167 detectores de centelleo con una separación media de 15 metros más 76 centelleadores adicionales en la zona central para incrementar la densidad de detectores (separación media de 10 metros). La Figura 4.2a muestra el esquema de un detector de centelleo. Cada uno de ellos está compuesto de un plástico centelleador de 0.9 m^2 de superficie y unos 4 cm de espesor, que es visto medio metro por debajo por dos fotomultiplicadores. Uno rápido de 12.5 cm de diámetro utilizado en las medidas de tiempo y densidad de partículas y otro de 7.5 cm de diámetro usado en las medidas de densidad cuando el primero se satura (lo que ocurre cuando más de cinco partículas energéticas atraviesan simultáneamente el centelleador, esto es, 5 MIP[11]), disponiendo así de mayor rango dinámico. En algunos de los detectores (principalmente los de la submatriz central) sólo se tiene el primer fotomultiplicador, obteniéndose la señal de menor ganancia del último dinodo. El conjunto está cubierto por una estructura metálica que lo aísla de la luz exterior y lo protege de malas condiciones meteorológicas, mientras que su interior está recubierto por un pintura reflectora y difusora para incrementar la ganancia. Por encima del plástico centelleador existe una capa de 4.8 mm de plomo (0.9 longitudes de radiación) cuyo objeto es convertir los fotones γ de la cascada en pares e^+ - e^- que dejan una cantidad apreciable de energía en el centelleador. De esta forma se aumenta la densidad de partículas, lográndose una bajada de la energía umbral de las cascadas y una espectacular mejora de la resolución angular, entre un 30 y un 60%, debido no sólo al mayor número de partículas, sino también a que la capa de plomo absorbe los $e^\pm$ de menos energía que son los que han sufrido mayor *scattering* de Coulomb, mientras que permite la detección de los γ que mantienen un frente mejor definido. Los detectores están conectados con el contenedor central de la electrónica mediante cables de 150 m que sirven la alimentación eléctrica y recogen las señales. Algunos centímetros por encima del fotomultiplicador rápido se sitúa un LED (***L**ight **E**mitting **D**iode* - diodo emisor de luz) cuyo propósito es participar en la calibración del retraso relativo de unos detectores con otros, debido a diferentes longitudes y constantes dieléctricas de los cables. Información adicional sobre la matriz de centelleadores puede ser encontrada en [21][24][25].

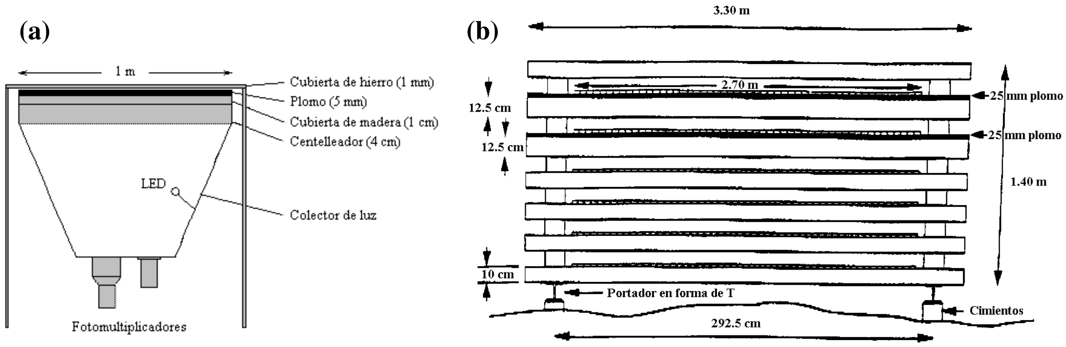

Figura 4.2: **(a)** Esquema de una caseta de centelleador. **(b)** Esquema de una torre Geiger.

• Una matriz 4 x 5 de 17 torres Geiger con una separación media de 30 metros situada en la zona central de la matriz de centelleadores. La Figura 4.2b muestra el esquema de una torre Geiger. Se compone de 6 capas en cada una de las cuales hay 160 tubos Geiger de aluminio de 6 m de largo y una sección de 1.5 x 1.5 cm^2. El conjunto tiene una superficie activa de 18 m^2 y está soportado por una estructura de cemento ligero (0.8 g/cm^3 de densidad) de 10 cm (0.3 longitudes de radiación) entre cada capa. Después de las dos primeras capas hay 2.5 cm de plomo (4.5 longitudes de radiación) cuyo propósito es eliminar la componente menos energética de la cascada para que no alcance las capas más profundas. El objetivo de las torres Geiger es doble, por un lado miden la densidad de partículas en sus dos primeras capas proporcionando una información similar a la de la matriz de centelleadores y por

[11] Se denomina MIP (***M**inimum **I**onizing **P**article* - partícula de mínima ionización) a aquella partícula cuya energía es igual o mayor a la de mínima pérdida de energía en un medio. La importancia de este concepto radica en que la energía depositada por estas partículas en un medio (por unidad de espesor atravesado) es prácticamente constante según la fórmula de Bethe - Bloch, lo cual permite hacer comparaciones y calibraciones de una manera sencilla. Prácticamente todas las partículas de una cascada atmosférica que llegan al suelo son MIPs y por tanto dejan aproximadamente la misma cantidad de energía en los plásticos centelleadores, de forma que se puede establecer una relación directa entre la intensidad del impulso de un fotomultiplicador y la densidad de partículas.

otra parte pueden reconstruir las trazas dejadas por partículas muy energéticas, de las cuales las más interesantes son los muones puesto que no sufren *scattering*, por lo que conservan mejor la dirección de la partícula que inició la cascada. Las trazas que se obtienen están proyectadas sobre la dirección transversal a los tubos Geiger, por tanto para disponer de la información completa de la dirección de la cascada las torres están orientadas alternativamente en direcciones perpendiculares (ver Figura 4.1), de este modo con la reconstrucción de varias trazas puede obtenerse la dirección de la cascada con una precisión de 1º. La reconstrucción de una traza tiene lugar cuando se observan señales en al menos 4 de las 6 capas y éstas se ajustan a una línea recta. La identificación de la partícula que dejó la traza se realiza mediante una red neuronal a la que se le proporciona la información de la señales cercanas a la traza. Con este método se alcanza una eficiencia de un 80% en la identificación de los muones. Las torres Geiger pueden funcionar de manera independiente al resto de los detectores de HEGRA midiendo constantemente el flujo de muones o bien operar en un modo esclavo en el cual sólo toman datos cuando reciben la señal dada por alguno de los otros detectores; éste es el modo habitual de operación. Información adicional sobre las torres Geiger puede ser encontrada en [26][27].

• El detector AIROBICC, consistente en una matriz 7 x 7 de 49 fotomultiplicadores, con una separación media de 30 metros, que están expuestos al cielo nocturno y muestrean el frente de luz Cherenkov asociado a las cascadas atmosféricas extensas. Este detector es explicado con mayor detalle en la próxima sección ya que es el que proporciona los datos usados en este trabajo.

• Un grupo de 6 telescopios Cherenkov de los cuales 3 todavía están en fase de instalación. El primero de ellos (prototipo) está situado en el centro de las instalaciones de HEGRA, tiene un espejo primario múltiple (18 espejos de 61 cm de diámetro) con un diámetro de 3 m, un área colectora equivalente a 5 m^2 y una distancia focal de 5 m. En su foco primario hay una cámara de 127 fotomultiplicadores (*pixels*), cuyo campo de visión es 3º. El telescopio tiene una montura ecuatorial y la precisión del seguimiento es ± 0º.05. Su umbral de energía es ~ 2 TeV y registra cascadas con una tasa de 0.5 Hz. Su modo de operación es independiente del resto de los instrumentos de HEGRA, pero sus detecciones producen el inicio o disparo del registro de los datos de las demás componentes de HEGRA. Los 5 telescopios restantes se diseñaron iguales entre sí pero con diferencias con respecto al primero: su espejo primario consta de 30 espejos, tienen un diámetro de 4 m y un área efectiva de 8.5 m^2. Su montura es acimutal y su campo de visión es de 4º. Su umbral de energía es ~ 1 TeV y su ritmo de detección es de 3 Hz. Cuatro de estos telescopios están instalados en las esquinas de un cuadrado de ~ 100 m de lado y el quinto está en su centro, junto al prototipo (ver Figura 4.1). El telescopio nuevo del centro tiene una cámara de alta resolución de 271 *pixels* en lugar de la de 127 y está previsto que a principios de 1997 los otros cuatro telescopios nuevos dispongan de una cámara igual. El objetivo de esta red de telescopios es observar simultáneamente las mismas cascadas, lo que permitirá bajar el umbral de energía hasta unos 500 GeV y tener un registro estereoscópico de las mismas, con lo que se puede hacer una separación γ/hadrón del primario mucho más eficiente que la actual. Información adicional sobre los telescopios Cherenkov de HEGRA puede ser encontrada en [15][28].

Este conjunto de detectores permite la observación de las tres componentes más significativas de las cascadas atmosféricas extensas en un rango de energías que abarca desde 500 GeV hasta 10 PeV y hace de HEGRA uno de los experimentos más importantes en su campo.

4.1 El detector AIROBICC

El detector AIROBICC (***AIR**-shower **O**bservation **B**y angle **I**ntegrating **C**herenkov **C**ounters* - observación de cascadas atmosféricas con contadores Cherenkov integradores de ángulo) entró en operación en 1992 y como se comentó en la sección anterior consiste en una matriz de 7 x 7 estaciones separadas unos 30 m que se extienden en la misma zona que la matriz de centelleadores ($A \approx 33000$ m^2). En la actualidad está siendo ampliado con otra fila y otra columna para formar una matriz 8 x 8. También se está instalando una submatriz 4 x 4 en la zona central para incrementar la densidad de detectores.