# Diseño y optimización de un detector RICH para AMS

Carlos J. Delgado

Septiembre 2001

# Índice

- El experimento AMS.
- Descripción del detector de AMS.
- Descripción del subdetector RICH.
- Simulación y reconstrucción de la señal del RICH.
- Optimización de parámetros.
- Conclusiones.

# El experimento AMS

- AMS pretende llevar a cabo un estudio de gran precisión y con una gran estadística de los rayos cósmicos primarios.

- Los resultados obtenidos tendrán gran relevancia en
  - *Búsqueda de antimateria*
  - *Compresión de los mecanismos de propagación en la galaxia.*
  - *Búsqueda de materia oscura*

- Para ello se situará un espectrómetro mágnetico en la estación espacial internacional por un periodo no inferior a tres años.

# Rayos cósmicos primarios

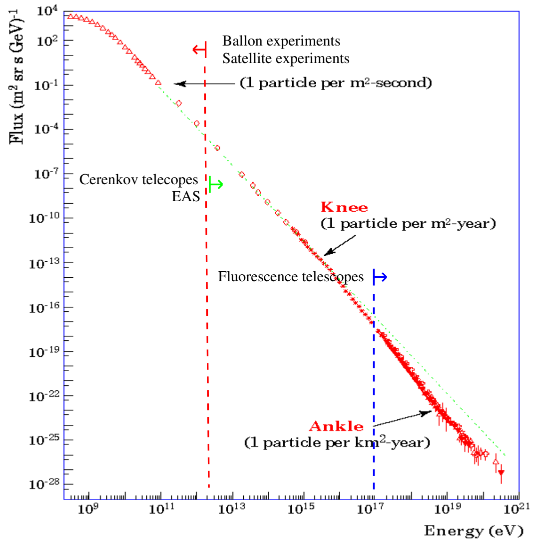
- **Definicion:** Flujo constante e isótropo de partículas de alta energía de procedencia extrasolar.

- Su espectro cubre un amplio rango de energías y carece de estructura.

- El flujo se comporta como $\sim E^{-\lambda}$, $\lambda = 2.7$ hasta $\simeq 100\frac{TeV}{A}$ para cualquier especie.

**Composicion**

| Grupo de partículas | Flujo total[a] |
|---|---|
| Protones | 1300±100 |
| $^3$He,$^4$He | $94 \pm 4$ |
| Li,Be,B | 2±0.3 |
| C,N,O,F | 6.7±0.3 |
| Núcleos pesados($9 < Z < 20$) | 2.0±0.3 |
| Núcleos muy pesados ($Z > 19$) | 0.5±0.2 |




[a] $m^{-2}s^{-2}sr^{-1}$

El experimento AMS

- **Origen:** Hasta $E \simeq 10^{14} eV$ es consistente con explosiones de supernovas:
  - El contenido en núcleos pesados es similar al predicho para supernova.
  - El proceso de aceleración debido a ondas de choque de supernovas da lugar a un espectro de la forma $\sim E^{-2.2}$.
  - La energía cinética debida a este proceso $\simeq 10^{42} erg/s$ es similar a la necesaria para mantener el flujo total de rayos cósmicos primarios $\simeq 10^{41} erg/s$.

- Posee algunas caracteríticas que permanecen sin una explicación satisfactoria
  - Se han detectados protones con energía por encima del límite GZK[a], impuesto por la interacción con la radiación de fondo.

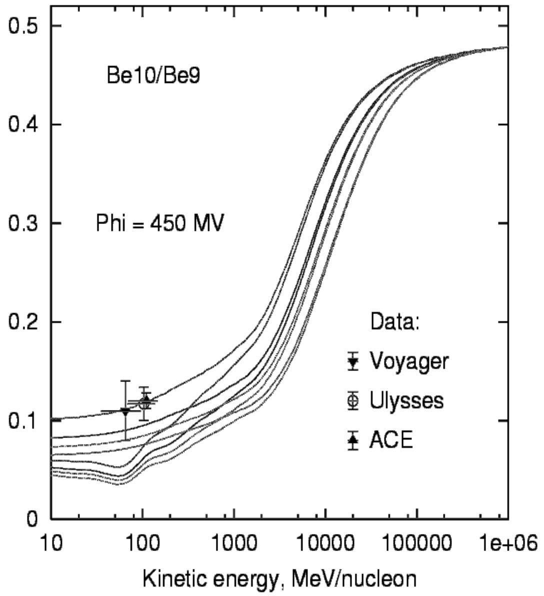
$$p + \gamma_{2.7K} \rightarrow \Lambda^{+} \rightarrow \begin{cases} n + \pi^{+} \\ p + \pi^{0} \end{cases} \quad camino\, libre\, medio = 6Mpc \tag{1}$$

  - El índice espectral $\lambda$ cambia de $2.7$ a $3.2$ en la región de energía entre $10^{15}$ y $10^{18}$ eV, conocida como la región entre la rodilla (Knee) y el tobillo(Ankle).

[a] Greisen-Zatsepin-Kuz'min

- Un conocimiento preciso de este espectro permite tener acceso a importante información sobre el origen y transporte de los rayos cósmicos.
  - Los espectros de C y B conjuntamente, permiten conocer la cantidad de materia atravesada.
  - Los espectros de $^{10}Be$ y $^{9}Be$ permiten conocer el tiempo de confinamiento en la galaxia.

Lo cual permitiría seleccionar y ajustar diversos modelos de propagación.




- Es necesario poder realizar separación isotópica en un amplio rango de energías.
- La necesidad de tener una gran estadística limita el rango de energía cubierto hasta $\simeq 10^{14} eV$.

## Búsqueda de antimateria

- Varios modelos de bariogenesis predicen la producción de antimateria de origen primordial, que podría detectarse en dos formas
  - Antihelio primordial.
  - Antinúcleos con $Z>2$ si se han llegado a formar antiestrellas.

- La existencia de regiones extensas de antimateria está excluida por COBE hasta 10Mpc.

- El horizonte actual es de $\sim$10Gpc $\rightarrow$ COBE no excluye regiones extensas cuyos productos podrían ser detectados[a], sin embargo
  - No existe evidencia de la existencia de componente de antimateria con $Z>1$ en los rayos cósmicos.
  - La pobre estadística no permite decidir si la ausencia es real ya que la producción secundaria está varios ordenes por debajo de los límites obtenidos a la fracción de antimateria/materia.

[a] hep-ph/9605280 para un resumen

# Búsqueda de materia oscura no bariónica

Velocidad de rotación en galaxias vs radio

+

búsqueda de MACHOs[a]

$\Downarrow$

80%-50% de la masa del Halo debe ser no bariónica

[a]Massive AstrohysiCal Halo Objects

Nucleosintesis del Big Bang

+

Masa dinámica de clusters de galaxias

$\Downarrow$

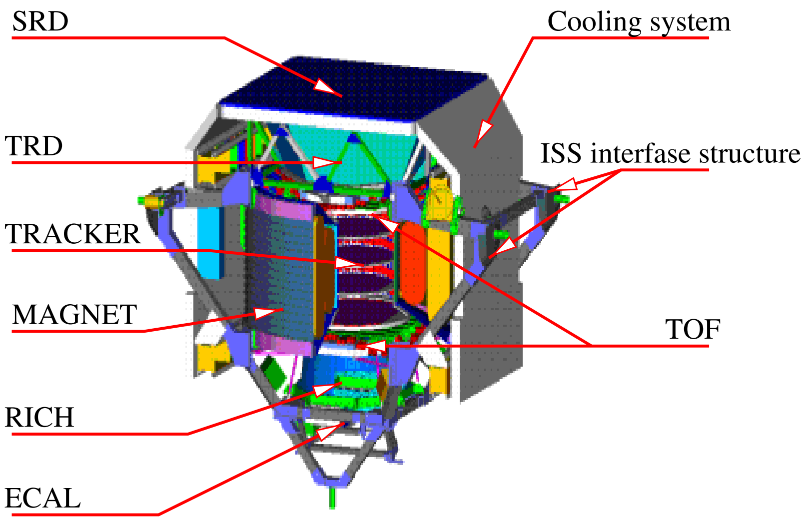
90% de materia oscura debe ser no bariónica

**Posibilidad de WIMPs**

- Si existe, el neutralino($\chi$) es un buen candidato:
  - Partícula supersimétrica de menos masa masa en la mayoria de los modelos.
  - Estable debido a la conservación de la paridad R (= $(-1)^{3B+L+2S}$).
  - Partículas de Majorana. Aniquilación via $\chi\chi \rightarrow XX$.
- La interacción de estas partículas podrian dar lugar a deformaciones en el espectro de $e^+$, $e^-$, $p$ y $\bar{D}$.

# Descripción del detector

- **Curvatura de la trayectoria**
  · Imán superconductor
- **Dirección de la particula**
  · Contador de tiempo de vuelo (TOF).
- **Rigidez** $(R = p/Z)$
  · Camara de trazas (TRACKER).
- **Velocidad** $\beta$
  · TOF para baja energía
  · RICH para alta energía.
- **Carga**
  · Depositos de energía en el TOF y TRACKER
  · Conteo de fotones en el RICH
- **Identificación de partícula**
  · TRD+ECAL




**Aceptancia:** $\sim 0.5\ m^2\ sr$

El experimento AMS

## Imán superconductor

Provee de poder de análisis al TRACKER.

- **Campo central:** Dipolar de 0.86T en la dirección X.
- **Refrigeracion:** Helio líquido a (1.8K)
- **Campo residual:** Inferior a 15.5mT a 230cm del centro.

## $\mathcal{T}$ime $\mathcal{O}$f $\mathcal{F}$light

4 planos con 14 centelleadores cada uno, en direcciones alternadas.

- Fast trigger.
- Medida de $\beta$ con una resolución de un $3\%$.
- Medida de la posición con $\Delta x \sim 2$ cm.

## $\mathcal{S}$ynchrotron $\mathcal{R}$adiation$\mathcal{D}$etector

Plano de $2 \times 3m^2$ cubierto de cristales centelleadores de $25 \times 25 \times 2mm^3$ para detectar la radiación sincrotrón emitida por el primario en el campo geomagnético.

- Provee con una medida del signo de la carga.

## $\mathcal{T}$ransition $\mathcal{R}$adiation$\mathcal{D}$etector

20 capas de vidrio y plástico separadas por tubos de deriva con una ganancia de $\sim 10^4$.

- Separación e/h hasta 100GeV.
- 5 puntos de tracking.

## TRACKER

8 planos de tiras de microdetectores de silicio situados en el interior del imán superconductor

- Medida de la rigidez.($1 \sim 10^3$ GV)
- Medida de la carga.

$\sigma_y \simeq 10\mu m$ (bending plane)
$\sigma_x \simeq 30\mu m$ (non-bending plane)
$\frac{\Delta R}{R} \simeq 2\%$ para protones de 10GV Poder de análisis: $BL^2 \simeq 0.86TM^2$

Capacidad de alineamiento on-line.

## ℰlectromagnetic 𝒞ALalorimeter

$16.5X_0$[a] en 10 capas, cada una con 10 planos de centelleadores y paneles de plomo.

- separación e/h.
- Medida de $\gamma$ de alta energía con buena resolución angular.
- Medida de otras partículas neutras.

$\frac{\Delta E}{E} \simeq 2\%$ para 30GeV

[a] longitudes de radiación

# El detector RICH de AMS

- Objetivo:
  - Proveer de una medida de $\beta$ con alta resolución para realizar la identificación química e isotópica de los núcleos que atraviesen AMS.
- Requisitos:
  - Máxima aceptancia y eficiencia de reconstrucción.
  - Paradigma: separación isotópica $^{9}Be/^{10}Be$ a $3\sigma$ para una energía cinética por nucleón de $\simeq 10GeV$.

$$\frac{\Delta m}{m} \simeq \frac{\Delta p}{p} \oplus \gamma^2 \frac{\Delta\beta}{\beta} \tag{2}$$

- TRACKER: $\frac{\Delta p}{p} \simeq 2\% \Rightarrow$ $\boxed{\frac{\Delta\beta}{\beta} \simeq 0.025\,\%\ \textbf{para}\ Be}$

- Fundamentos del detector:

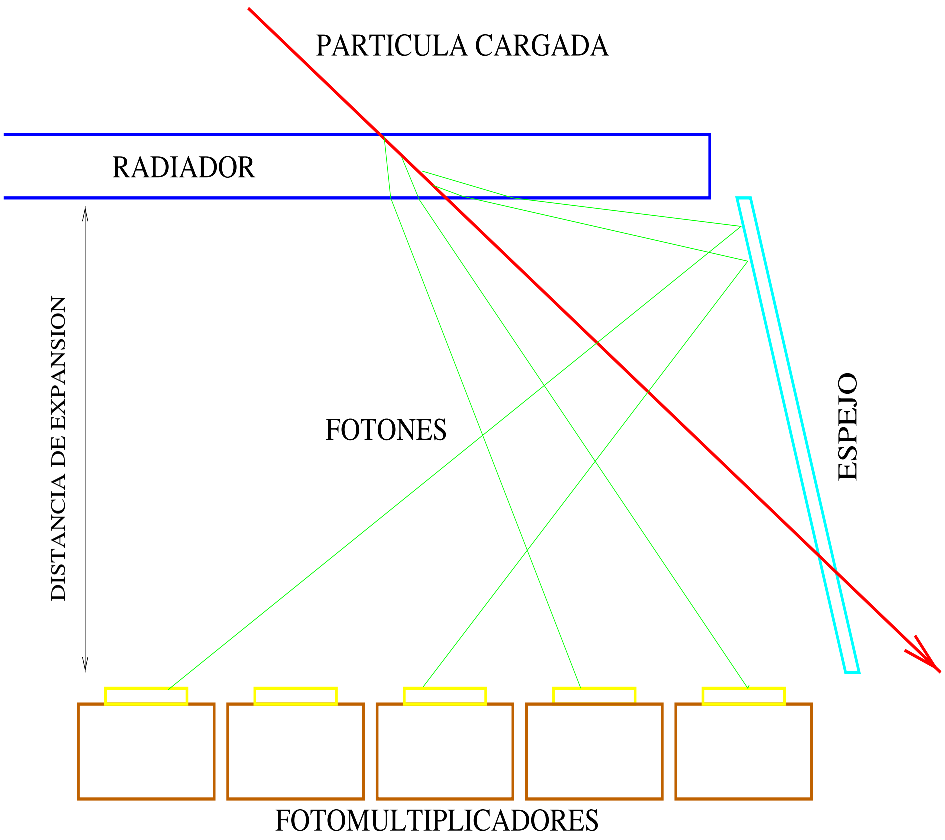
Radiación Čerenkov: fotones emitidos en un medio de índice de refracción $n$ al paso de una partícula de carga z con velocidad superior a $\beta = \frac{c}{n}$.

Propiedades

- Emitida en un ángulo $\theta_c = \cos^{-1} \frac{1}{n\beta}$ respecto la dirección de propagación de la partícula.
- El número de fotones emitidos cumple $\frac{d<N>}{dl} \sim z^2 \sin^2 \theta_c$.

- Una medida del ángulo de los fotones emitidos es una medida directa de la velocidad de la partícula.

- Conocido $\theta_c$, se puede determinar la carga de la partícula mediante el conteo de fotones emitidos.




- Radiador: Medio dielectrico donde se produce la emisión de fotones Čerenkov.
- Espacio de expansión: permite que las dimensiones del cono de luz aumenten.
- Espejo: aumenta la aceptancia de fotones del detector.
- Matriz de PMTs[a]: detecta los fotones permitiendo reconstruir la geometría del cono.

[a] Fotomultiplicadores

- Conocidos los parametros de la trayectoria de la partícula se cumple

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} \simeq \frac{\Delta n}{n}\frac{1}{\sqrt{N_\gamma}} \qquad \textit{Dispersion cromatica}$$

$$\oplus \frac{\sqrt{n^2\beta^2-1}}{n\beta L_{opt}}\frac{\Delta x}{\sqrt{N_\gamma}} \qquad \textit{Granularidad } 1^{er} \textit{ orden}$$

$$\oplus \sqrt{n^2\beta^2-1}\frac{\Delta H}{\sqrt{N_\gamma}} \qquad \textit{Tamaño del radiador}$$

$$\oplus \left(\frac{1}{2n^3\beta^3}\frac{\Delta x^2}{L_{opt}^2}\right) \qquad \textit{Granularidad } 2^{o} \textit{ orden}$$

Donde

- $L_{opt}$: Camino óptico medio de los fotones emitidos.
  Debería ser el mayor posible.
- n: Indice de refracción de radiador.
  Debería tener la menor dispersión cromática posible.
- $\Delta x$: Tamaño del pixel. Debería ser el menor posible.
- $\Delta H$: Anchura del radiador.

- Además hay que maximizar el número de fotones detectado($N_\gamma$) lo que implica ajustar simultaneamente $n$ y $\Delta H$.

# Radiador

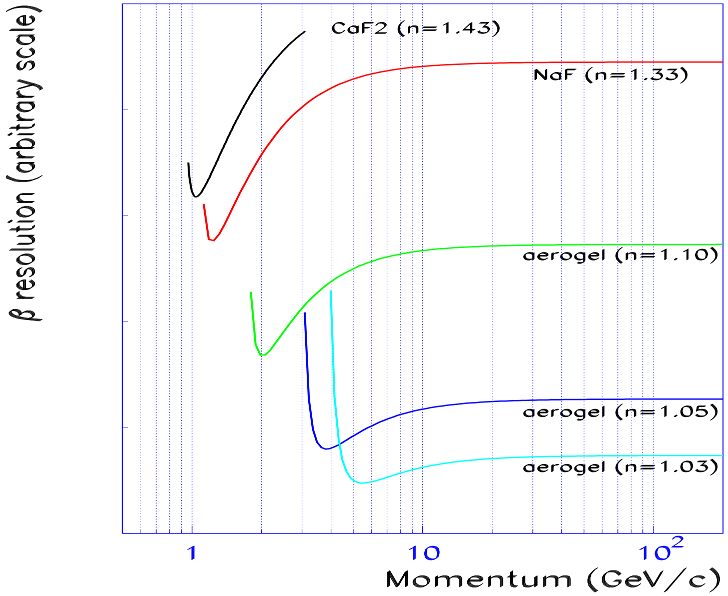
- Umbral de producción de fotones y reflexión interna → rango de medida

$$\beta_{min} = \frac{1}{n} \qquad \beta_{max} = \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}} \tag{3}$$

- Operación en el espacio → uso de radiadores solidos.

## Candidatos

- **Aerogel**
  - n=1.03, 1.05
  - Presenta dispersión Rayleigh
  - Dispersión cromática: $\sim 0.1\%$
- **NaF**
  - n=1.33
  - Dispersión cromática: $\sim 1\%$




Resolución relativa a priori

# Fotomultiplicadores

## Requisitos

- Buena resolución espacial
- Sensibilidad a un solo fotón en una región amplia del espectro
- Buena eficiencia cuántica
- Buena respuesta en campos magnéticos de $\sim 100G$

## Elección

- Hamamatsu R7600-00-M16 con blindaje magnético de VACOFLUX 50
  - Photocatodo: $17.5 \times 17.5mm^2$ en 16 pixeles
  - Tamaño: $30 \times 30 \times 30mm^3$ insertado en blindaje de $31 \times 31 \times 80mm^3$.


Zona muerta

+

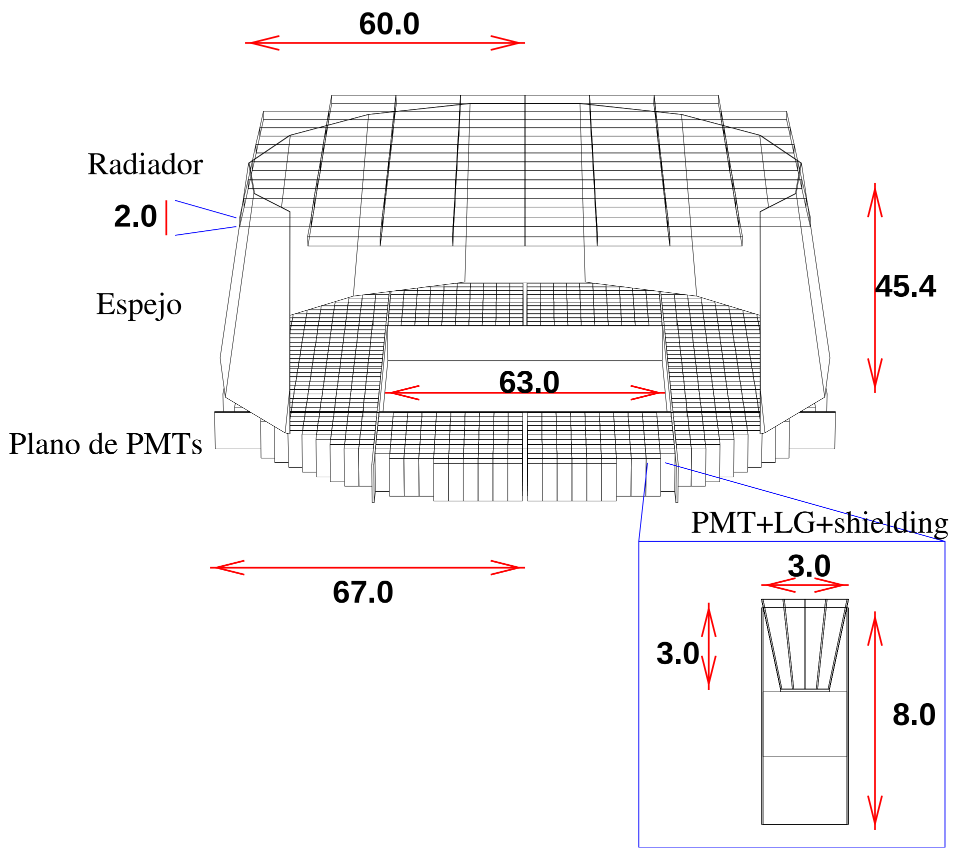
blindaje magnético

$\Downarrow$

**Necesidad de usar guias de luz**

RICH

# Dimensiones de referencia




## Parámetros a optimizar

- Indice de refracción y espesor del radiador
- Radio superior del espejo
- Diseño de las guias de luz
  - Altura
  - Tipos: huecas o solidas

# Software de AMS/RICH

- **Se ha realiza una simulación MC del detector AMS/RICH usando el paquete *GEANT v3.21***
  - Propagación e interacción de la partícula acorde al codigo de GEANT
  - Partícula primaria generada dentro de la aceptancia geométria de AMS
  - Codigo GEANT de simulación de fotones Čerenkov modificado para aumentar rendimiento
  - Simulación de la respuestas de los fotomultiplicadores acorde a las medidas
  - Se ha añadido la dispersión Rayleigh en aerogeles
- **La presencia del resto de subdetectores de AMS no ha sido simulada. Esta posee dos efectos**
  - Secundarios atravesando las guias de luz y el fotomultiplicador
  - Secundarios atravesando el radiador
- **Se ha estimado que estos dos efectos incrementan el número medio de fotones detectados por suceso en** $\sim 1$
- **Permite modificar los parámetros geométricos de interes sin necesidad de compilar nuevamente el código**

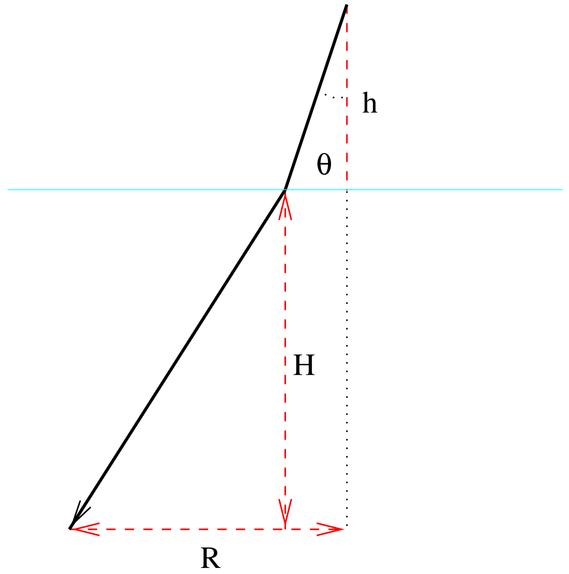
# Reconstrucción

- La optimización de los parámetros del detector requiere del diseño del algoritmo de reconstrucción de $\beta$.
- Requerimientos:
  - Alta velocidad de ejecución.
  - Capacidad de reconstrucción en presencia de ruido.
  - Capacidad de reconstrucción con un número pequeño de fotones detectados.
- Información a priori:
  - Dirección y punto de entrada de la partícula en el radiador.
  - Posición de detección de los fotones.
- El algoritmo pasa por dos etapas:
  - Para cada fotón detectado[a], asignación de valores plausibles de $\beta$.
  - Determinación del valor más probable de $\beta$.

[a] Hit

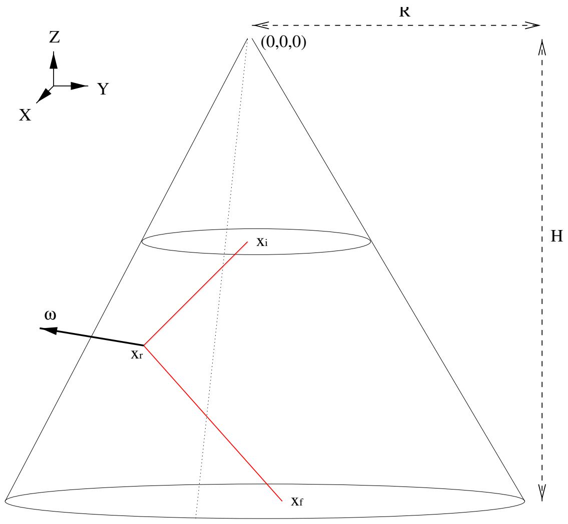
# $\beta$s plausibles para cada hit

## Fotón sin reflexión




- Solución numérica de una ecuación de cuarto grado.

## Fotón reflejado




- Solución numérica de una ecuación de cuarto grado en el límite $n - 1 \rightarrow 0$.
- Aproximación de las soluciones con refracción hasta orden $n - 1$ mediante un desarrollo en series de Taylor.

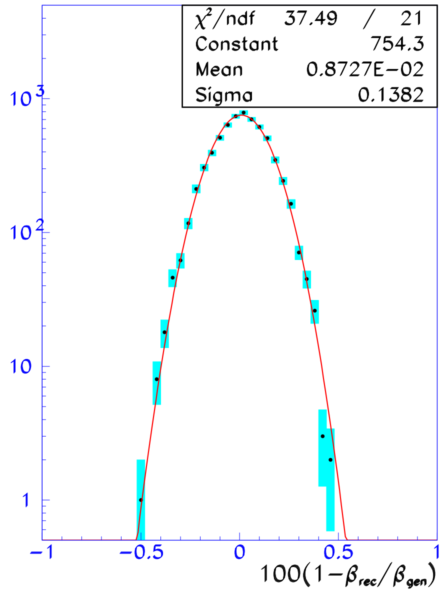
**Hasta tres valores de $\beta$ plausibles por cada hit**

Software

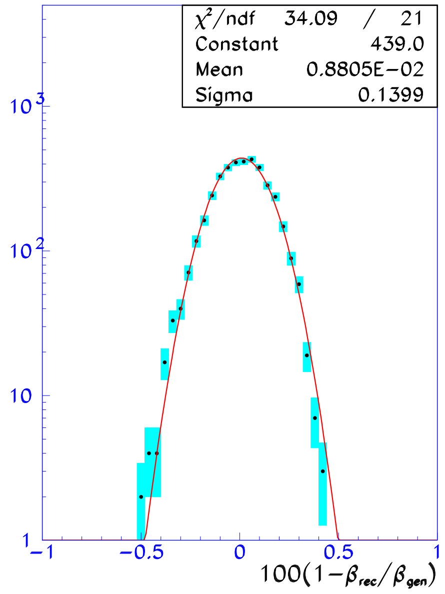
## Estimación de $\beta$ del suceso.

- A priori los valores de $\beta$ correctamente medidos para cada hit se distribuyen como

$$P(\beta_{hit}) \sim \exp\left( - \frac{1}{2} \frac{(\beta_{hit} - \beta real)^2}{\sigma^2(\beta_{real})} \right) \tag{4}$$




Fotones sin reflexión



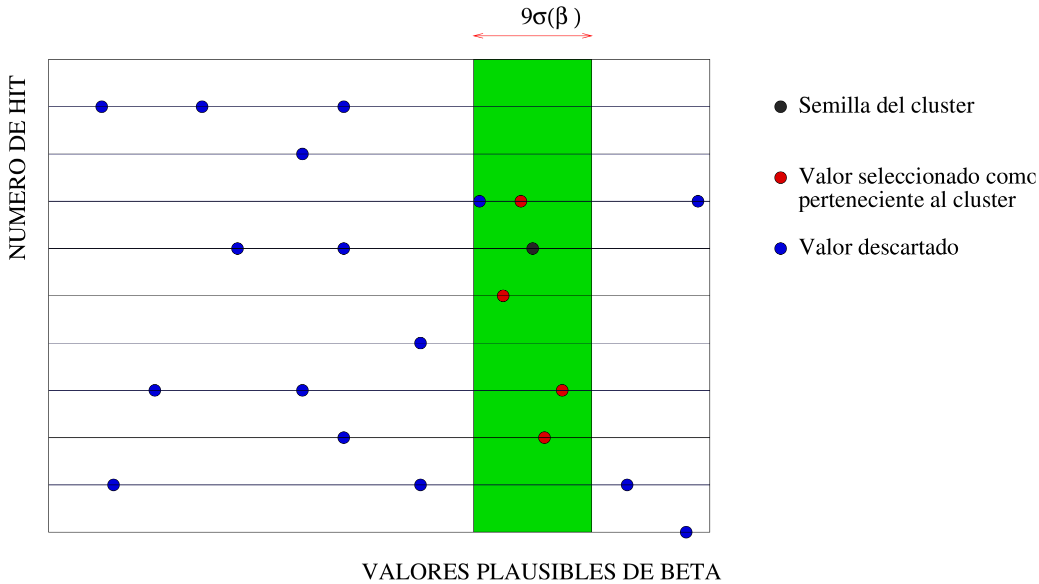

Fotones con una reflexión

- **Estimación de $\beta$ $\Rightarrow$ Busqueda de cluster entre las $\beta$ plausibles para cada hit**

Software

## Algoritmo de búsqueda de clusters

- Construye todos los clusters posibles
  - Uno por cada de los valores plausibles de $\beta$ obtenidos para cada hit.
  - Tamaño del cluster: $\pm 3\sigma(\beta_{clus})$ del centro del cluster, obtenido mediante parametrización.
  - Cada hit contribuye a un cluster dado a lo sumo una vez.




- Selecciona el cluster más probable
  - Asignación de un peso a cada cluster:

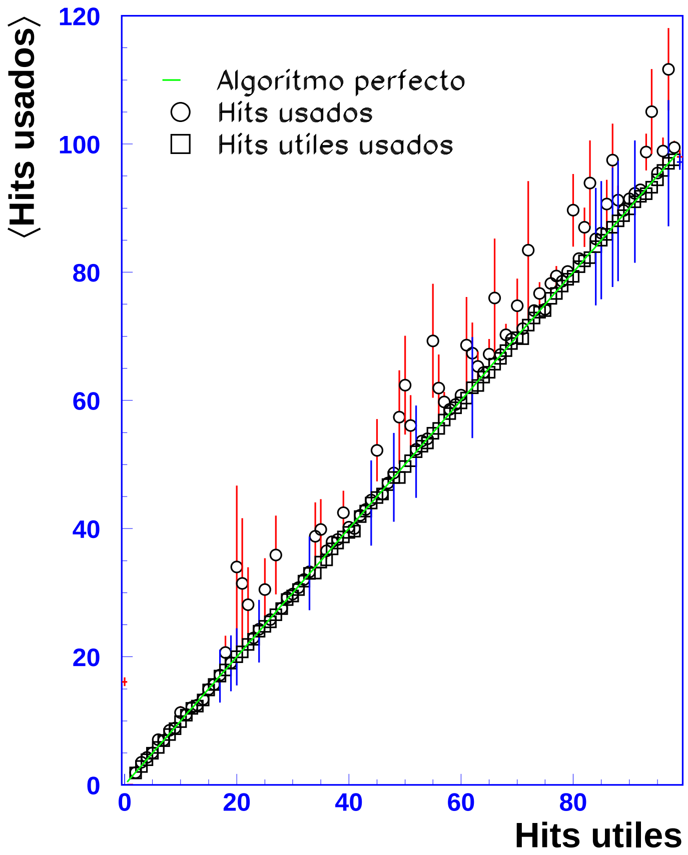
$$\omega = \sum_{i \in cluster} \frac{1}{\sigma(\beta_{clus})} \exp\left( - \frac{1}{2} \frac{(\beta_i - \beta_{clus})^i}{\sigma^2(\beta_{clus})} \right) \tag{5}$$

- Calcula el valor de $<\beta>$ asociado al cluster de mayor peso

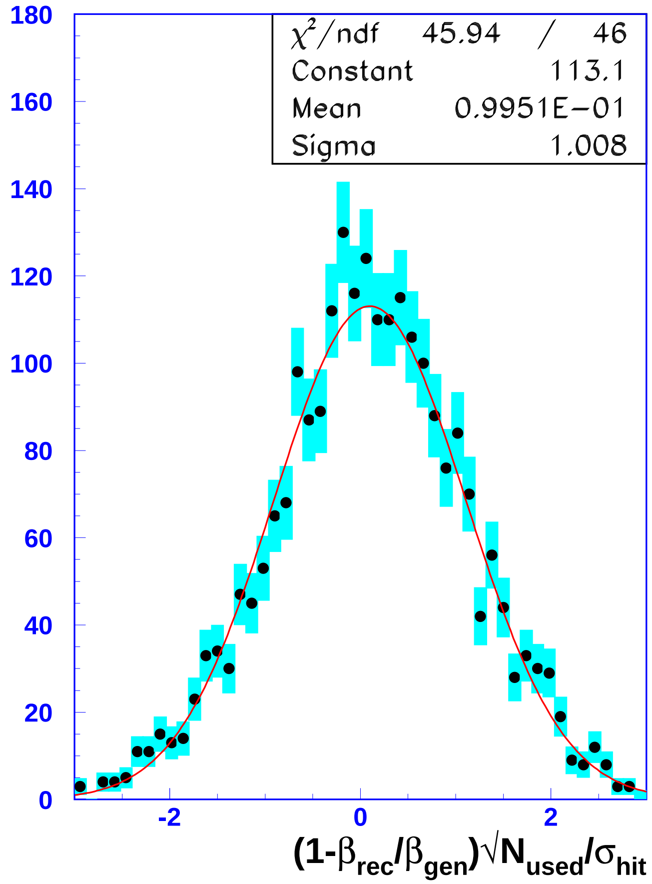
Software

# Evaluación de la reconstrucción

*Separación señal/fondo*



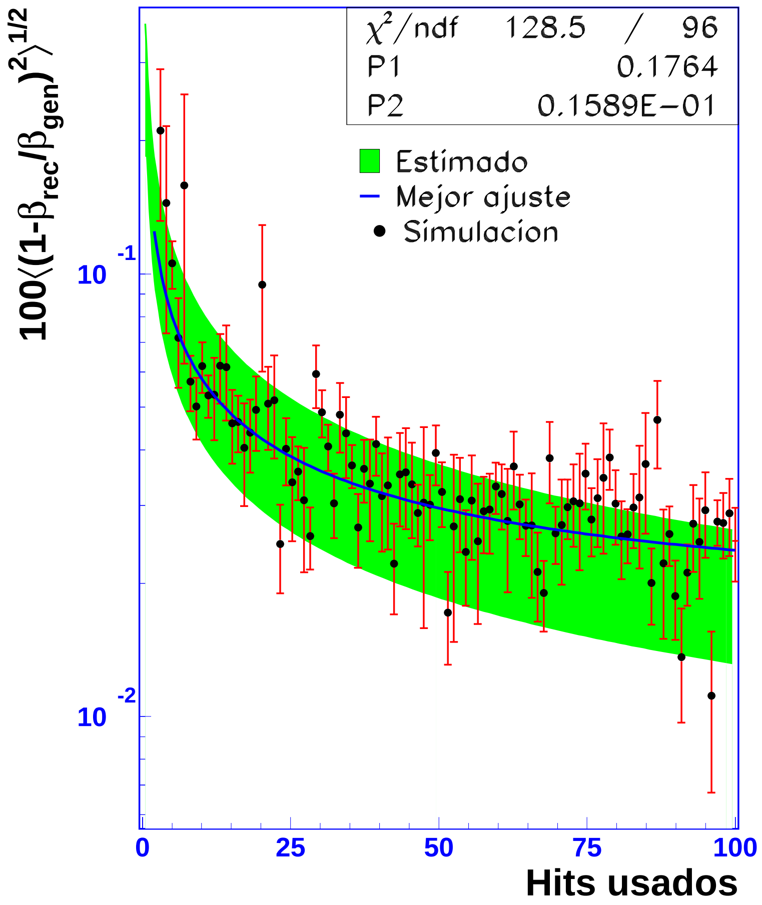

*Extracción de información.*



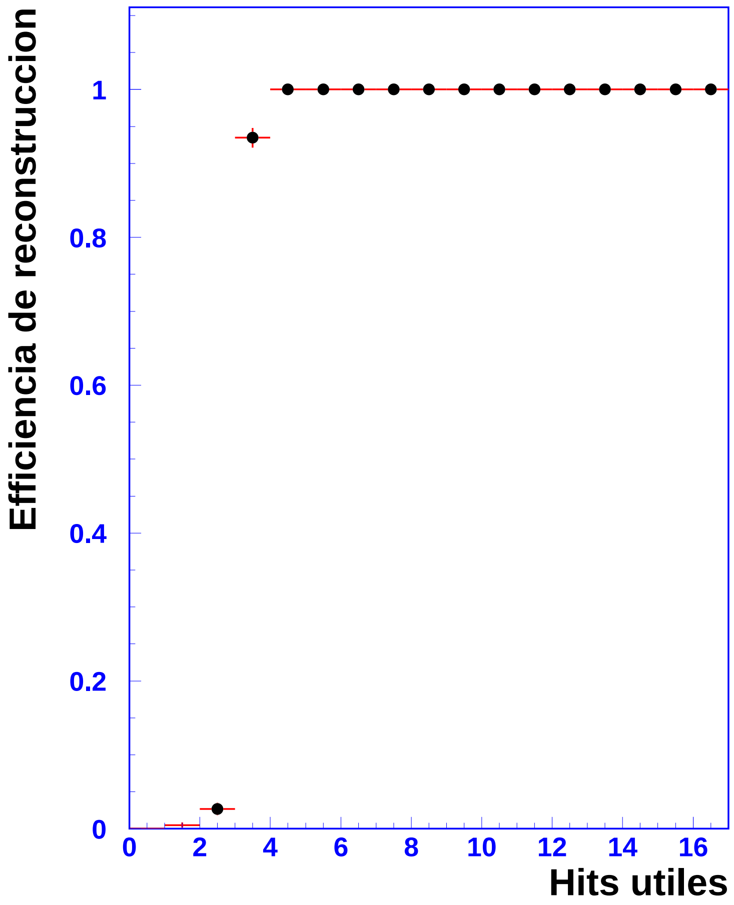

El algoritmo tan solo usa los hits debidos a la señal (hits útiles), descartando los de fondo.

Software

*Escalado con el número de hits*




*Eficiencia de reconstrucción*




El algoritmo escala como se espera con el número de hits usados

Software

# Optimización

- Criterios de optimización
  - **Separación a $3\sigma$ de $^9Be/^{10}Be$ hasta $\sim$10GeV/A.**
    Teniendo en cuenta el comportamiento del número de fotones con la carga y el comportamiento de la resolución con el número de fotones esta condición se traduce en

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} < 0.1\% \tag{6}$$

    para protones a 10GeV
  - **La eficiencia de reconstrucción, definida como la fracción de sucesos con más de dos hits útiles a $\beta = 1$ ha de ser lo más alta posible.**
- Orden de optimización
  - **Guias de luz.**
    El mejor tipo de guia luz es independiente de el tipo de radiador o la geometriía del resto del detector.
  - **Anchura y material del radiador.**
  - **Inclinación del espejo.**

## Guias de luz.

- Los parámetros libres son

### Altura de las guias.

La altura mínima viene impuesta por el blindaje magnético, siendo de 3cm.

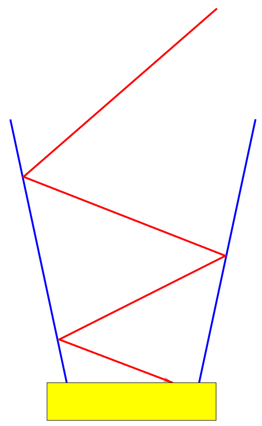
### Tipo de guia:

- **Hueca**

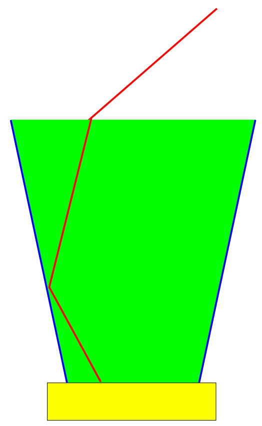
  La transmisión de la luz se lleva a cabo por reflexión convencional sobre una superficie de aluminio depositado sobre un material de soporte. El medio en que se transmite la luz es vacío.

- **Solida**

  El medio en que se transmite la luz posee un índice de refracción alto de manera la transmisión se realiza por reflexión total. El medio ha de poseer una longitud de absorción suficientemente alta para todo el espectro.

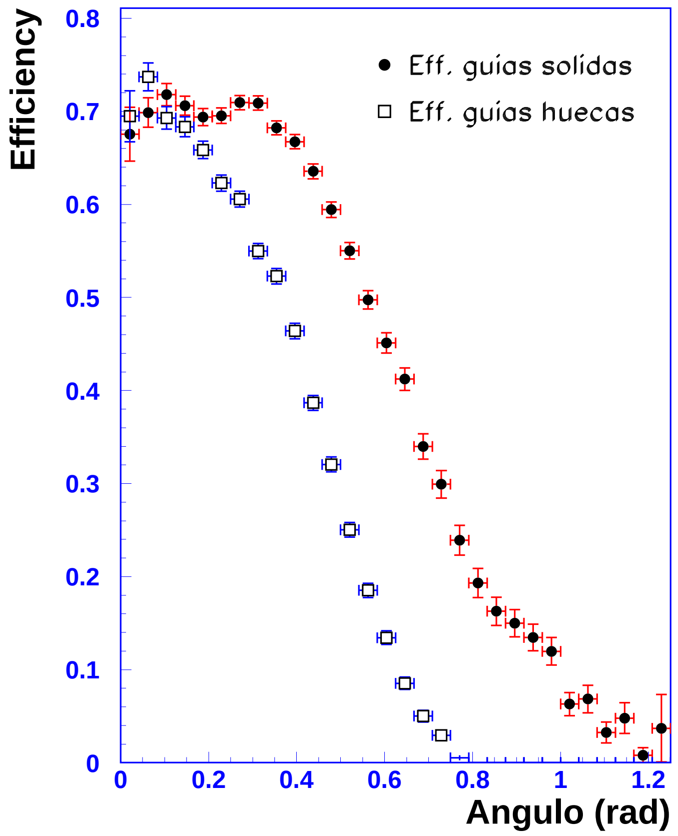


Hueca

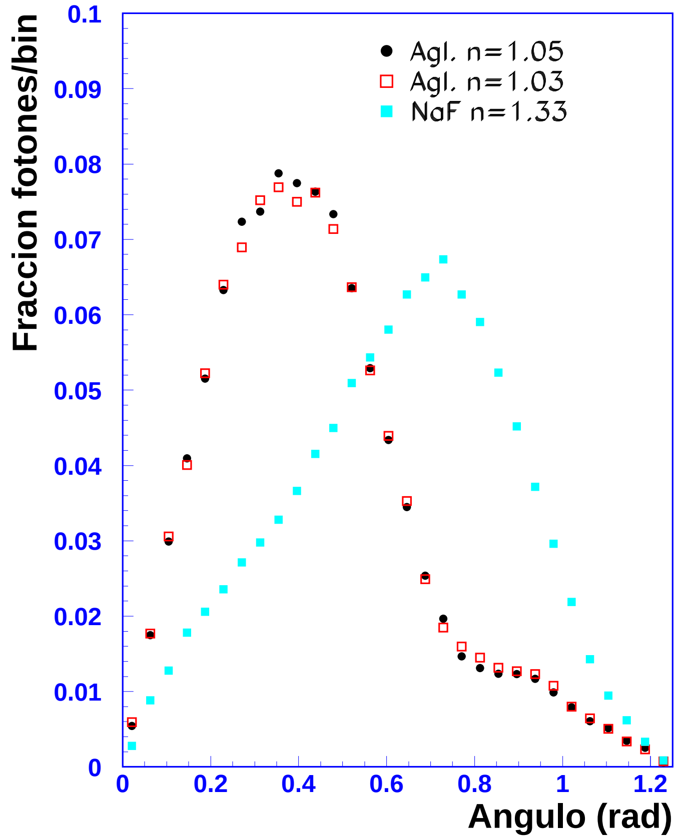


Solida

- Eficiencia diferencial.



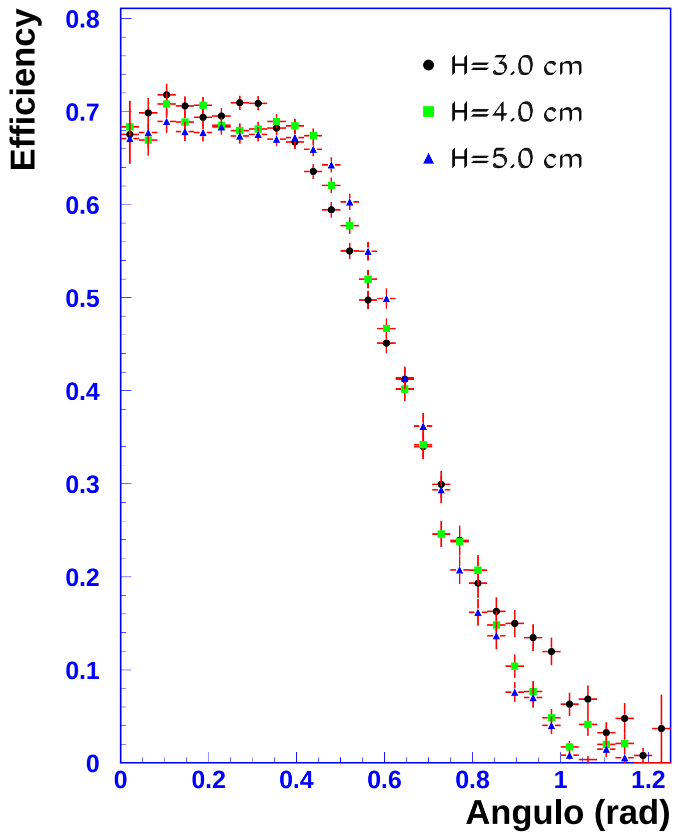

- Distribución angular de fotones.




- Las guias sólidas cubren un rango más amplio y de manera más uniforme que las huecas.
- A 1/2: $\simeq$ 0.48 huecas ; $\simeq$ 0.73 sólidas.

Optimización

•Variación con la altura.




- Guias seleccionadas: *sólidas*
- Eficiencia total esperada: $\sim 60\%$
- No se observa una mejora sustancial al incrementar la altura.

# Radiador.

- Parámetros a optmizar:
  - Material.

    Determina la dependencia entre el ángulo de emisión de los fotoners y la velocidad de la partícula y el número de fotones emitidos. Tambien determina el tipo de fondo que encontraremos.

  - Espesor.

    Un mayor grosor aumenta el número de fotones detectables, pero empeora la resolución intrinseca del detector.

- Criterios de optimización:
  - Valor de la resolución.

    Esta ha de ser mejor que un 0.1% para protones.

  - Eficiencia de reconstrucción.

    Algoritmo perfecto $\rightarrow$ *Eficiencia de reconstruccion* $\equiv$ *fracción de sucesos con más de dos hits útiles*.
    Para nuestro algoritmo la correspondencia no es exacta, pero se acerca. Consideraremos como objetivo una eficiencia de reconstrucción superior al 80%.

## Aproximación al problema.

- Espacio de parámetros grande $\rightarrow$ necesidad de acotación.
  - El tamaño proyectado del anillo Čerenkov debe ser menor que el tamaño del pixel para no emperorar la resolución.
  - El grosor del radiador debe ser el máximo posible para obtener el mayor número posible de fotones útiles.

Por tanto...

$$\omega \simeq h\sqrt{n^2\beta^2 - 1}$$

h: Altura del radiador.

$\omega$: tamaño del pixel.

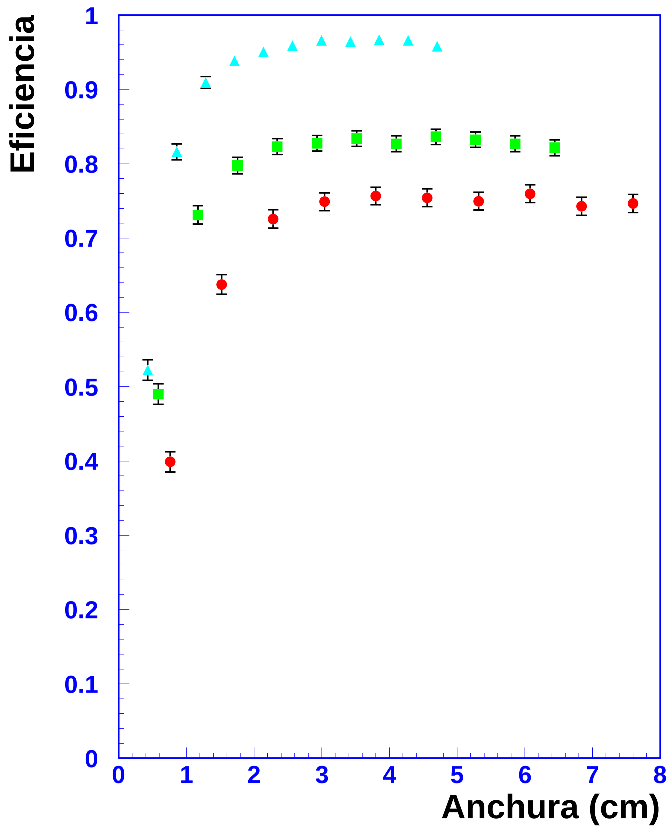
n: índice de refracción.

Tomando $\beta = 1$ se estima que el valor óptimo ha de estar en un entorno de...

| Radiador | h |
|---|---|
| Agl. n=1.03 | $\sim 3.03cm$ |
| Agl. n=1.05 | $\sim 2.34cm$ |
| NaF n=1.33 | $\sim 0.86cm$ |

# Eficiencia.

(Número de sucesos con más de dos hits útiles para Z=1)

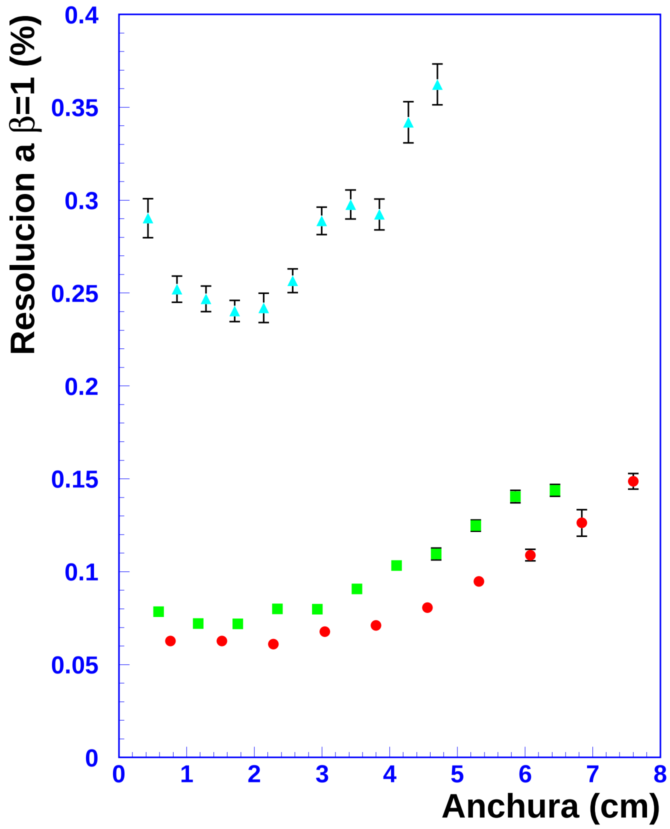



● Agl. n=1.03, ■ Agl. n=1.05, ▲ NaF n=1.33

- Saturación debida al agujero central en el plano de fotomultiplicadores.
- Solo NaF y Agl. n=1.05 dentro de los objetivos.
- El scattering Rayleigh posee un gran peso sobre el número de útiles.

# Resolucion.

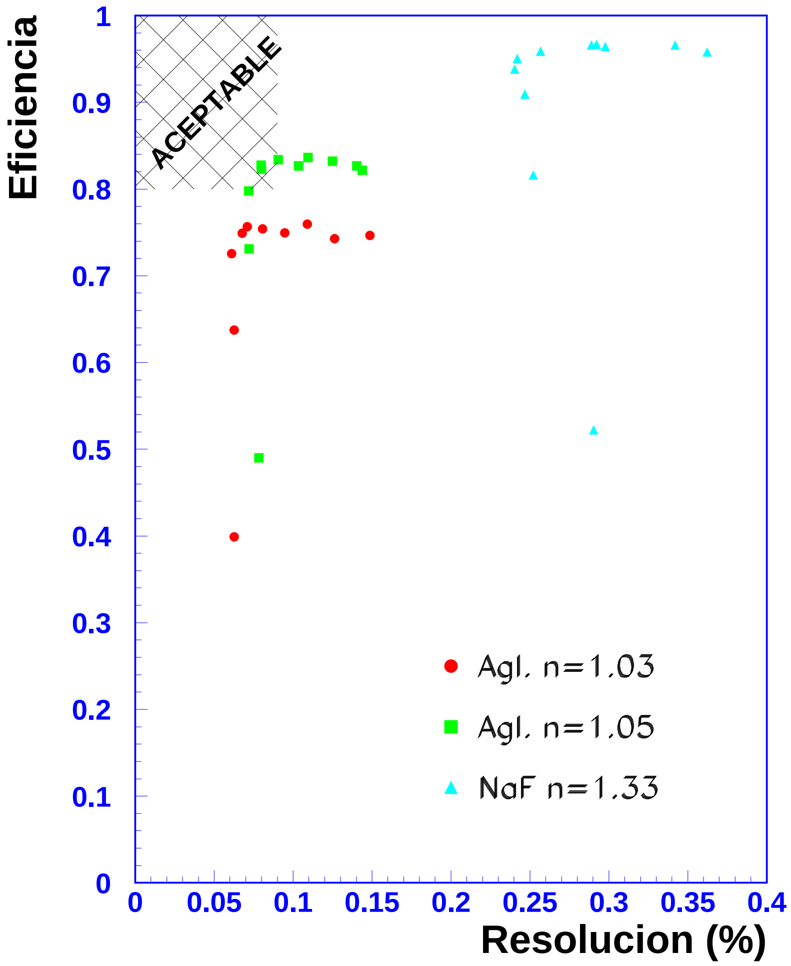
($\beta = 1$, Z=1.)




● Agl. n=1.03, ■ Agl. n=1.05, ▲ NaF n=1.33

- Comportamiento similar al esperado:
  La resolución no cambia apreciablemente hasta que se supera una anchura umbral.
- El NaF n=1.33 no cumple los objetivos debido a su resolución intrínseca para un solo fotón.

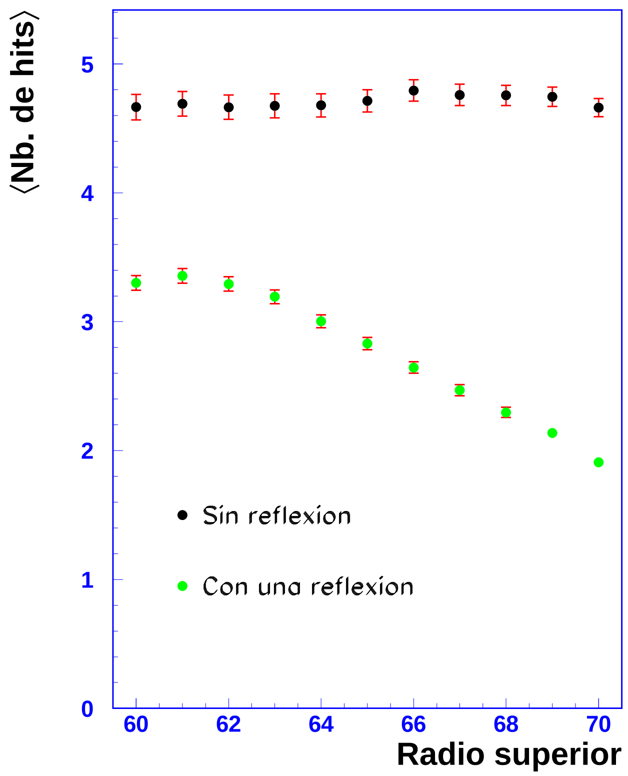
## Resumen.

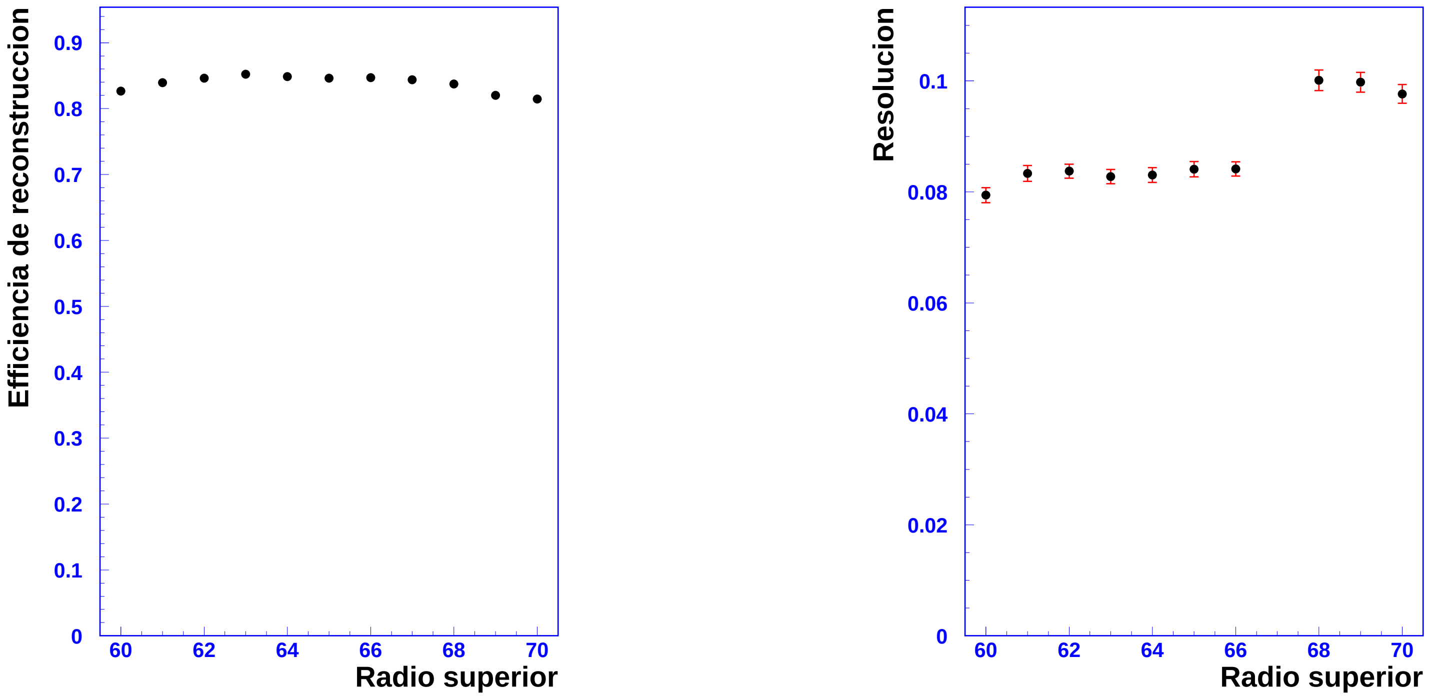



- Cada punto representa un grosor.
- La zona rallada responde a los objetivos.
- Sólo el Agl. n=1.05 está cumple los objetivos ya que:
  - Agl. n=1.03: La poca apertura del cono hace que la probabilidad de caer por completo en el agujero central sea alta, afectando seriamente a la eficiencia.
  - NaF n=1.33: La resolución intrínseca para un sólo fotón.

# Ángulo del espejo.

- Radiador de Agl n=1.05
- Rango de variación determinado por la geometría:
  - El radio en la base ha de ser de 67cm para minimizar el área muerta.
  - El radio superior ha de ser mayor que el del radiador para obtener la máxima aceptancia.
- Cambios en el ángulo del espejo dan lugar a cambios en el número de fotones con una reflexión, pero no afecta al número de fotones que alcanzan los fotomultiplicadores directamente.






- La eficiencia de reconstrucción no se ve afectada de forma importante.

  Debido a que la eficiencia para $\langle N_{utiles} \rangle \gtrsim 5.3$ ya es superior al 80%, que es cercano al número de hits sin reflexión.

- La resolución empeora según el número de hits disminuye, pero éste lo hace lentamente [a].

[a] Para radios superiores a 67cm la reconstrucción de los reflejados no se realiza)

Optimización

# Diseño final

- Radiador.

| Radiador | Eficiencia | Resolución | Grosor |
|---|---|---|---|
| Agl. n=1.03 | 75% | 0.075% | $3 \sim 5\ cm$ |
| **Agl. n=1.05** | 83% | 0.080% | $2 \sim 3.5cm$ |
| NaF n=1.33 | 96% | $> 0.25\%$ | $\simeq 2.5cm$ |

- Guias de luz.

| Tipo de guia | A 1/2 |
|---|---|
| Hueca | 0.48 rad |
| **Solida** | 0.73 rad |

Posición del pico de emisión para agl. n=1.05: $\simeq 0.4$

- Dimensiones del espejo:
  - Altura: 45.4cm (máximo permitido)
  - Radio inferior: 67.0cm (fijado por plano de PMT)
  - Radio superior: $\gtrsim 60.0cm$

- Aceptancia geométrica del radiador $\sim 0.38m^2sr$. (75% de la del tracker)

# Conclusiones

- ★ Hemos escrito un codigo de simulación montecarlo de la respuesta del subdetector RICH y un algoritmo de reconstrucción adecuado a la geometría del problema.
- ★ Se ha establecido la calidad de la reconstrucción.
- ★ Se ha optimizado la geometria y los materiales del RICH con el fin de cubrir un importante vacio experimental en la composición isotópica de los rayos cósmicos.
- ★ Queda por verificar los resultados mediante un prototipo.