La sombra de la Luna y el límite $\bar{p}/p$ en torno a 1 Tev,observados por L3+C.

P. Ladrón de Guevara.

(En representación de la colaboración L3)

CIEMAT. 30-Mayo-2003

Sumario

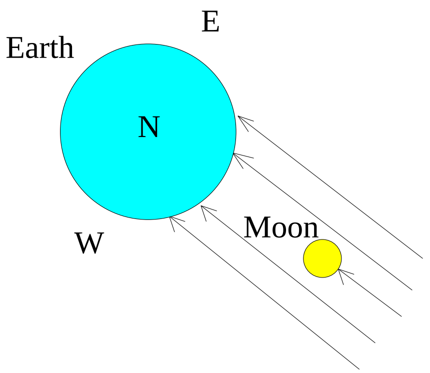
- La sombra de la Luna (y del Sol).
- Efectos del campo geomagnético.
- La resolución angular.
- Observaciones de la sombra de la luna.
- Medida indirecta de $\bar{p}/p$.
- Recopilación de las medidas $\bar{p}/p$.
- El experimento L3+C.
- Aceptancia para observar la Luna.
- Selección de los datos.
- Sucesos disponibles en 1999 y 2000.
- Rango de energía primaria.
- Estimación del deficit en una dimensión.
- El sistema de referencia de deflexión.

- Sombra de la luna en el sistema local.
- Sombra de la luna en el sistema H-V.
- Análisis completo de la sombra de la luna.
- Resultados.
- Proyección sobre los ejes H,V.
- Bibliografía.

La sombra de la Luna (y del Sol)

La Luna y el Sol bloquean el paso de los rayos cósmicos (C.R.)(G.W. Clark,PR 108,2,450 (1957)

$\rightarrow$ deficit de C.R. observados desde la Tierra en la dirección de esos planetas.



- Extensión del deficit $\rightarrow$ resolución angular del experimento.
- Centro del deficit $\rightarrow$ offset en la posición esperada.

El campo geomagnético.

El campo magnético terrestre ($\approx 0.5G$ cerca de la superficie) puede describirse como :

- Un modelo dipolar.
- Como el gradiente de un potencial escalar.

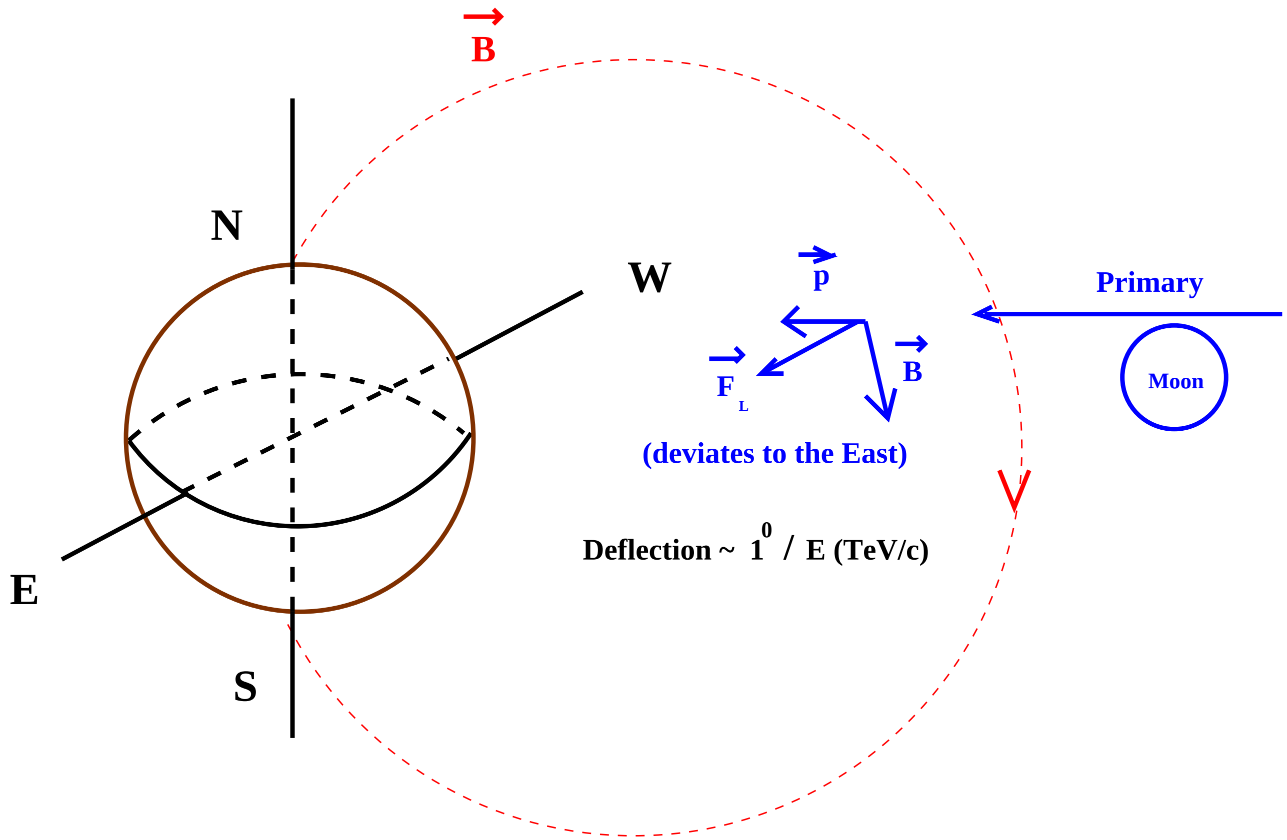
Este último puede desarrollarse en armónicos esféricos. El International Reference Field Model (IGRF) proporciona los coeficientes de la expansión, basados en medidas directas del campo. Los primeros términos pueden identificarse con el campo producido por un dipolo situado en el centro de la Tierra.

Hay diferencias entre los dos modelos del orden de $\approx 10\%$ en intensidad (para la posición geográfica de L3+C).

$\rightarrow$ IGRF utilizado en el análisis de L3+C.

Consecuencias del campo geomagnético

$$\Delta\phi\ (\text{mrad}) = 0.3\ \frac{Z}{p(\text{TeV/c})} \left\| \int \vec{B} \wedge \vec{dl} \right\|$$

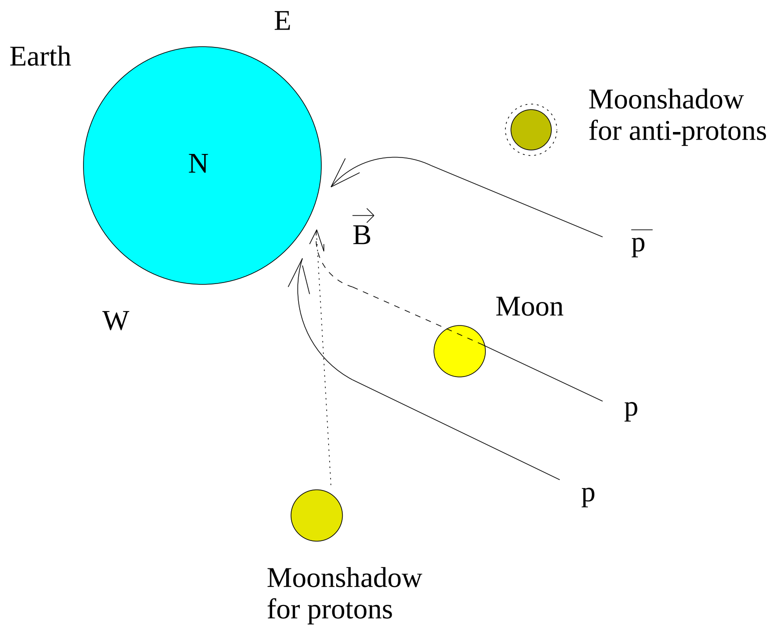


Las partículas positivas se desvían hacia el Este.

$\rightarrow$ El deficit se presenta al Oeste de la posición esperada.

$\rightarrow$Si existe ,la antimateria en los CR inducirá un deficit simétrico.

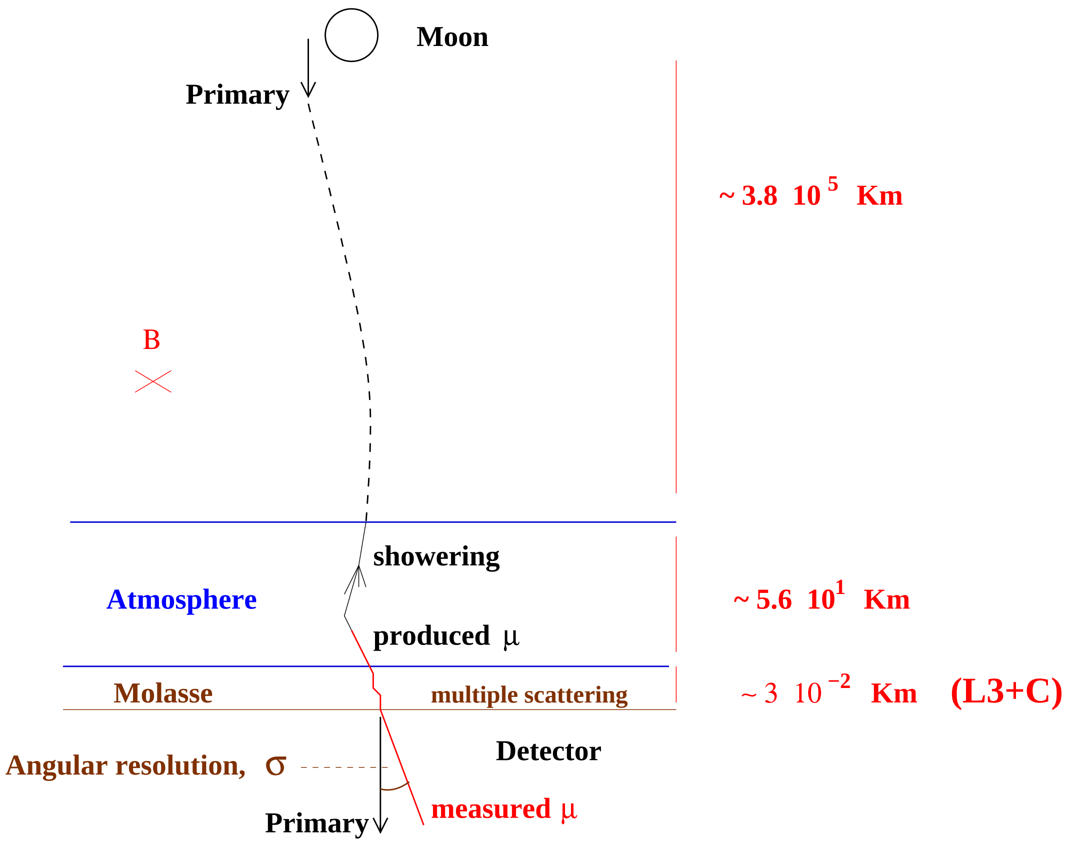
Deflexión $\simeq 1^{O}$/ E(TeV/c)



Tierra-Luna = espectrómetro de iones. (ARTEMIS, Urban et al.,Nucl.Phys. B14 (1990) 223)

Base para una medida indirecta de $\bar{p}/p$.

La resolución angular.



σ_{Total}

- $\sigma_{\text{effective}}$
  - **Primary** **deviates because geomagnetic field**
  - **μ is produced with an angle respect the primary**
  - **μ multiple scattering (atmosphere + rock+device)**
- **device systematics**

Observaciones del deficit (sombra).

Requerimientos:

- Trayectorias $\approx$ rectas
  $\rightarrow$ Primarios de alta energía ($>$ TeV.)

  $\rightarrow$ Umbral alto por extensión.(grandes EAS)
  (CYGNUS[1],CASA[2],MILAGRO[3])

  $\rightarrow$ Umbral alto por profundidad.(detectores subterráneos de μ's)
  (SOUDAN[4-5],MACRO[6-7])
- Alta estadística.
- Buena resolución angular. (señal/fondo $\approx 1/\sigma^2$)

Las técnicas basadas en detección en superficie usando Imaging Atmospheric Cerenkov Techniques (IACT) (ARTEMIS) fracasan para ver la sombra de la luna, debido al estrecho rango de frecuencias que permite la luz lunar.

Payoff:
Unico medio absoluto de determinar σ y el offset direccional sistemático. (pointing error) ...salvo el uso de di-muones para obtener σ (L3+C[8])

Moon shadow observations.

Coll.	type	run (year)	Threshold (TeV)	Resol. (deg.)	Signif. (sigma)
CYGNUS	EAS	86−90	100	0.8	4.9
CASA	EAS	90−91	100	0.77	4.7
TIBET I	EAS	90−93	8	0.85	8.9
MACRO	MU	89−99	15	0.55	6.5
SOUDAN	MU	89−98	19	0.3	5.0
MILAGRITO	CAS	97−98	~1	< 1.	10.0
L3+C	MU	99−2000	0.5 − 1.	0.21	10.4

Medida indirecta de $\bar{p}/p$.

Requerimientos adicionales.

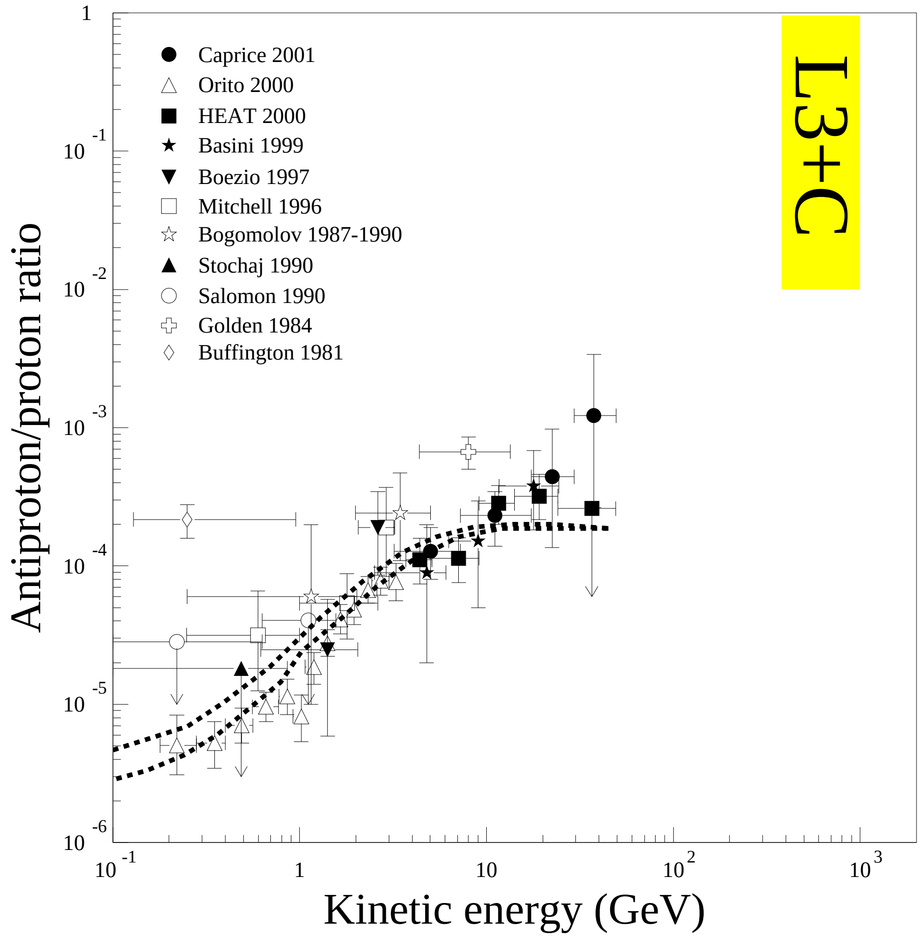
- Observar el desplazamiento geomagnético con buena definición de la sombra.

  $\rightarrow$ Energías primarias medias($\approx$ 1-100 Tev)
  $\rightarrow$ resolución angular$< 0.5^0$ (apertura del Sol o la Luna)

  Interés:

- Sólo existen medidas directas hasta $\approx$40 GeV (globos,CAPRICE,HEAT o satélites,AMS)
- El dominio accesible a L3+C es en el rango del TeV.
- La aparición de antimateria a partir de 100 GeV sería indicio de nueva física.(Primordial black hole (PBH) evaporation,Dark matter neutralino annihilation, antiproton fron extragalactic sources...)

Recopilación de las medidas $\bar{p}/p$.

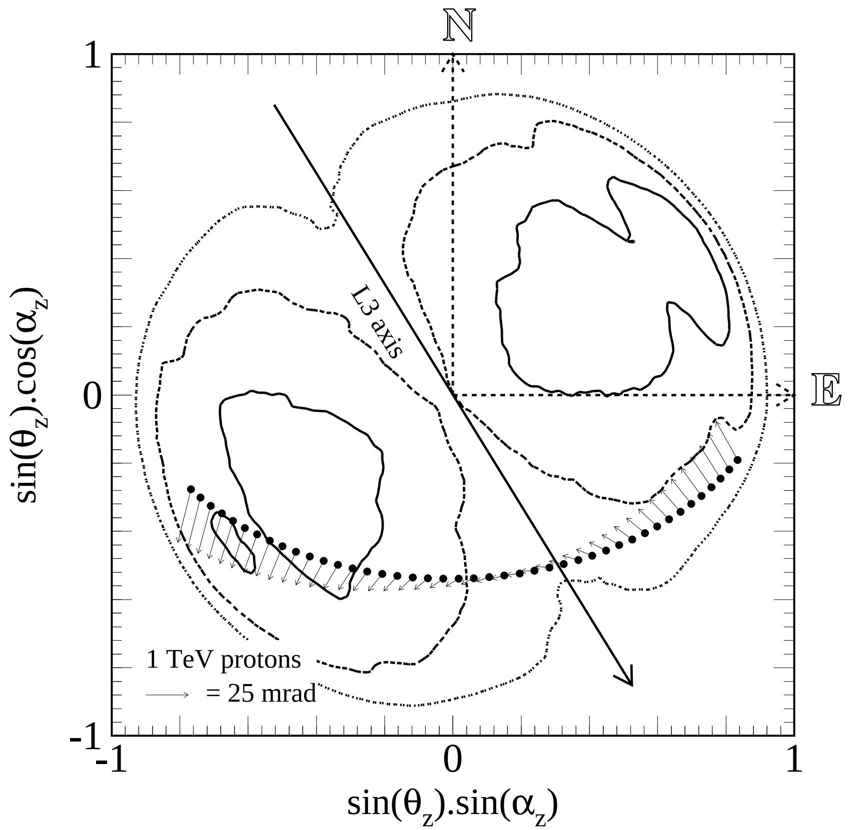


L3+C.

En lo que toca al presente trabajo...

- Utiliza el espectrómetro de muones de L3,en el campo magnético de 0.5 Tesla
- Un sistema de t^0 para las cámaras de muones. (200 m^2 de centelleadores sobre el imán)
- Trigger y DAQ independientes de L3.($\approx$450 Hz)
- Medida GPS de tiempos.(resolución del μsec)
- Base de datos propia.
- Situado a $6.02^0 E, 46.25^0 N$, 450 m. a.s.l.
- Bajo 30 m. de roca (7200 gr/cm^2) que elimina las componentes hadrónica y EM. (umbral de detección de muones: 18 GeV)
- Resolución en momento: 2.6% a 100 GeV.
- Resolución angular : $<$ 5 mrad por encima de 100 GeV
- $1.2 \times 10^{10} \mu$ triggers en 312 días de tiempo de vida.

Aceptancia para observar la Luna.



Reconstrucción MC de un paso de la luna sobre L3. Los vectores indican dirección y amplitud de la deflexión correspondiente a un protón primario de 1 TeV.

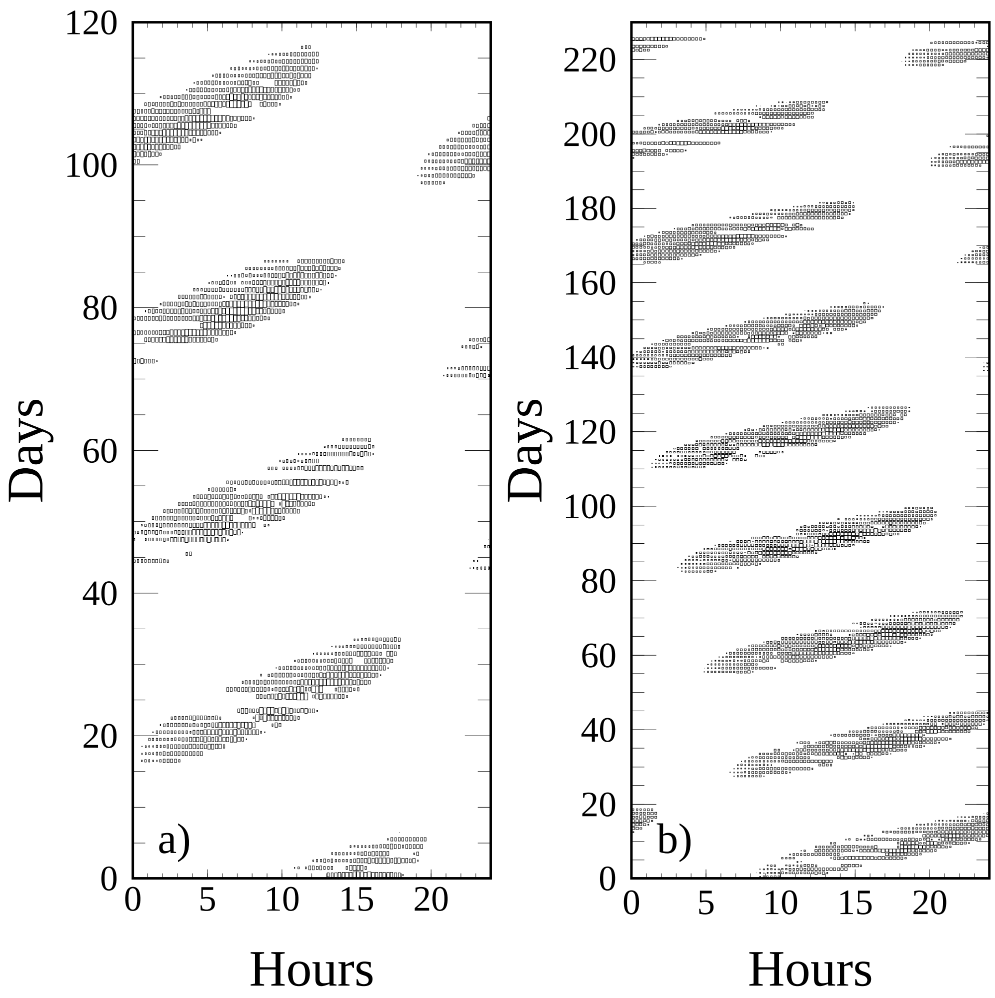
Los datos.

- Para cada suceso se reconstruye la posición de la Luna. (SLALIB) (Calculada con error $< 0.01^0$) y de ella se deduce el ángulo espacial θ con cada muon reconstruído.
- Al menos tripletes.
- Triggers con un solo μ reconstruído.
- $\theta < 5^0$.
- $p_\mu > 50 GeV$.
- Zenit de la Luna $< 60^0$.
- $735.10.^3$ sucesos seleccionados.(1999+2000)
- Dos muestras seleccionadas:

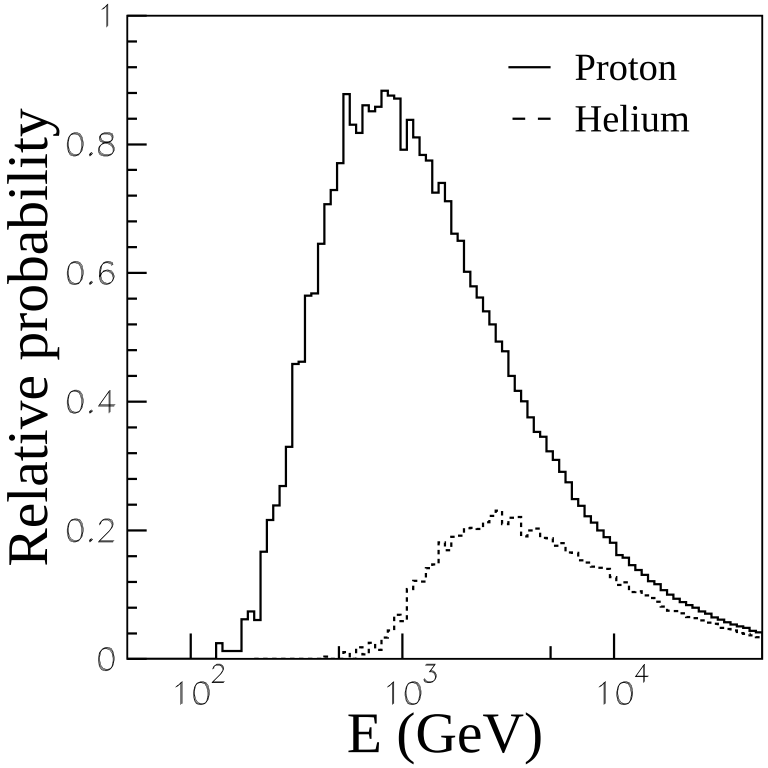
  \- (HE: $p_\mu >$ 100 GeV)

  \- (LE: 65 $< p_\mu <$ 100 GeV)
- Debido a la acceptancia en zenit local, sólo se accede a datos en periodos de tiempo (ciclos) que corresponden a zenits entre $25^0 - 60^0$

Sucesos disponibles en 1999 y 2000.



Rango de energía primaria.

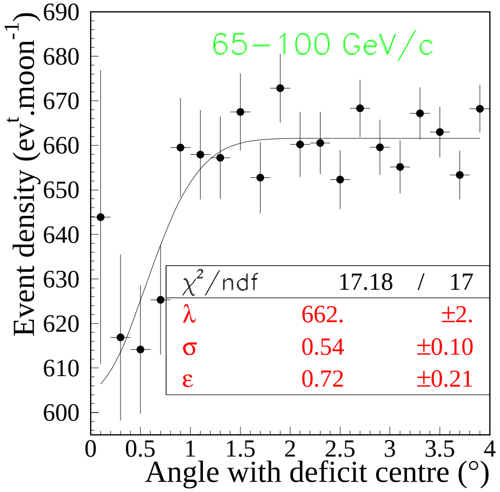


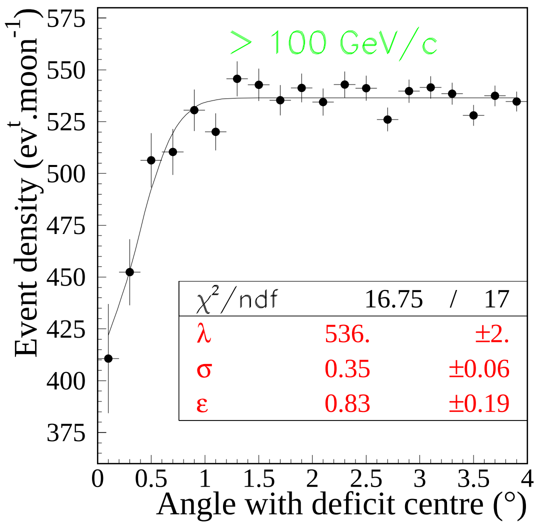
La figura muestra los espectros primarios de proton y He asociados a un muon detectado con $p_\mu = 100$ GeV,calculados mediante CORSIKA y el MC de simulación del detector. El máximo de energía primaria es $\approx$ 1 Tev para protones y $\approx$ 4 TeV para He.

Estimación del deficit en una dimensión.

Calculamos la densidad de sucesos en torno a la posición esperada de la luna, (4^0) para las muestras LE,HE por separado.
Una parametrización basada en un comportamiento gaussiano de la dispersión en torno a la Luna permite ajustar la resolución angular, en este caso, σ el ruido de fondo y el déficit.

$$f(\theta) = \lambda \cdot (1 - \epsilon \frac{R^2_{Moon}}{2\sigma^2} \cdot e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}}) \tag{1}$$

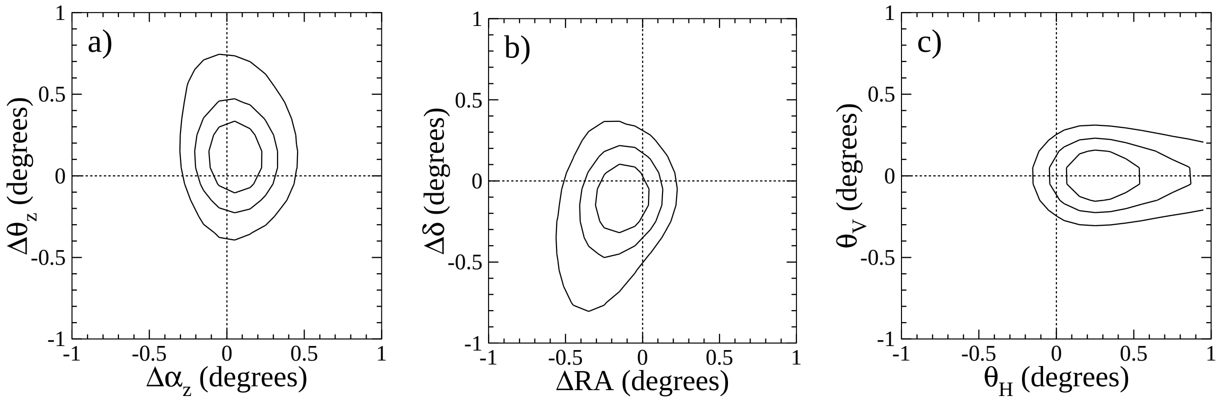




- El sistema de referencia es el local y σ incluye el efecto geomagnético.

El sistema de referencia de deflexión.

- Ejes paralelo (H) y normal (V) a la deflexión.
- Coordenadas dadas por θ_H and θ_V
- A lo largo de V, la dispersión se debe a la resolución angular.
- A lo largo de H, la dispersión se debe a la resolución angular + el efecto geomagnético. $\longrightarrow$La señal se optimiza en la dirección de H



Simulación de la sombra de la luna para p_μ >100 GeV:

- (a) En el sistema local.
- (b) En el sistema celeste.
- (c) En el sistema de deflexión.

Sombra de la luna en el sistema local.

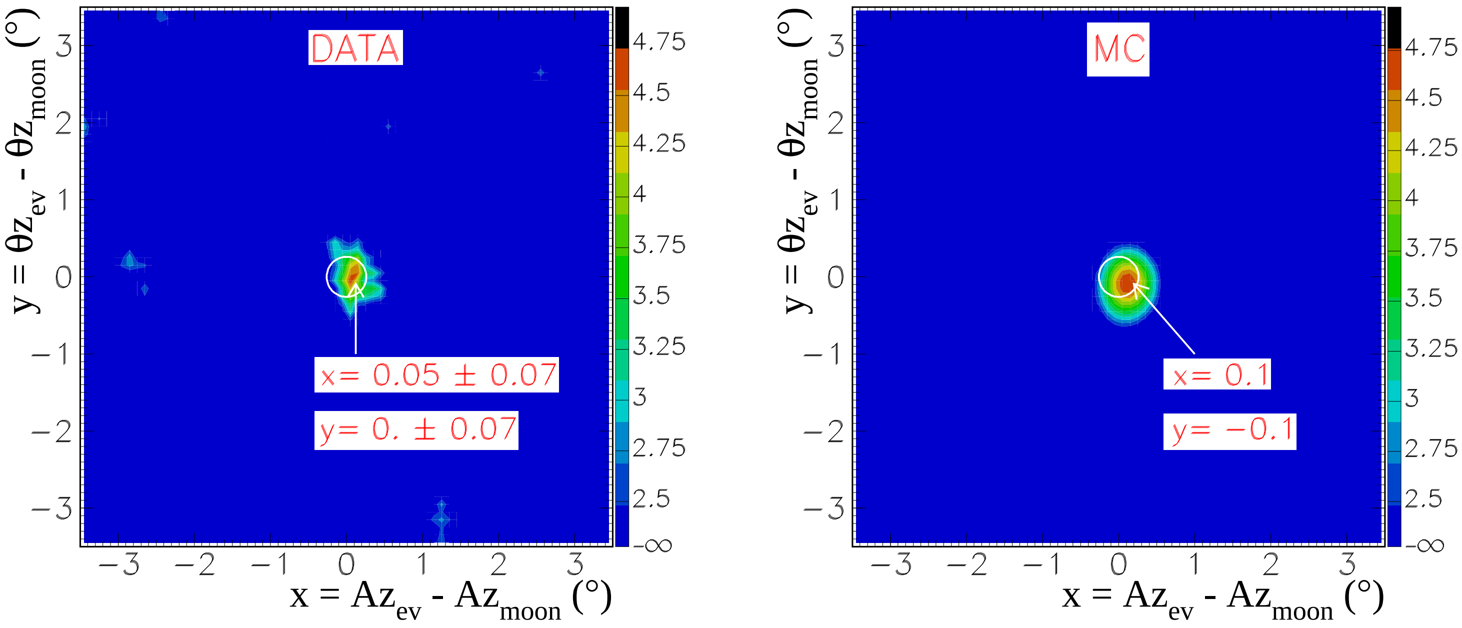
$| p_\mu | > 100$ GeV/c

Ruido de fondo: Camino de la luna fuera de tiempo.

Se substrae el fondo $\longrightarrow$ Sombra.

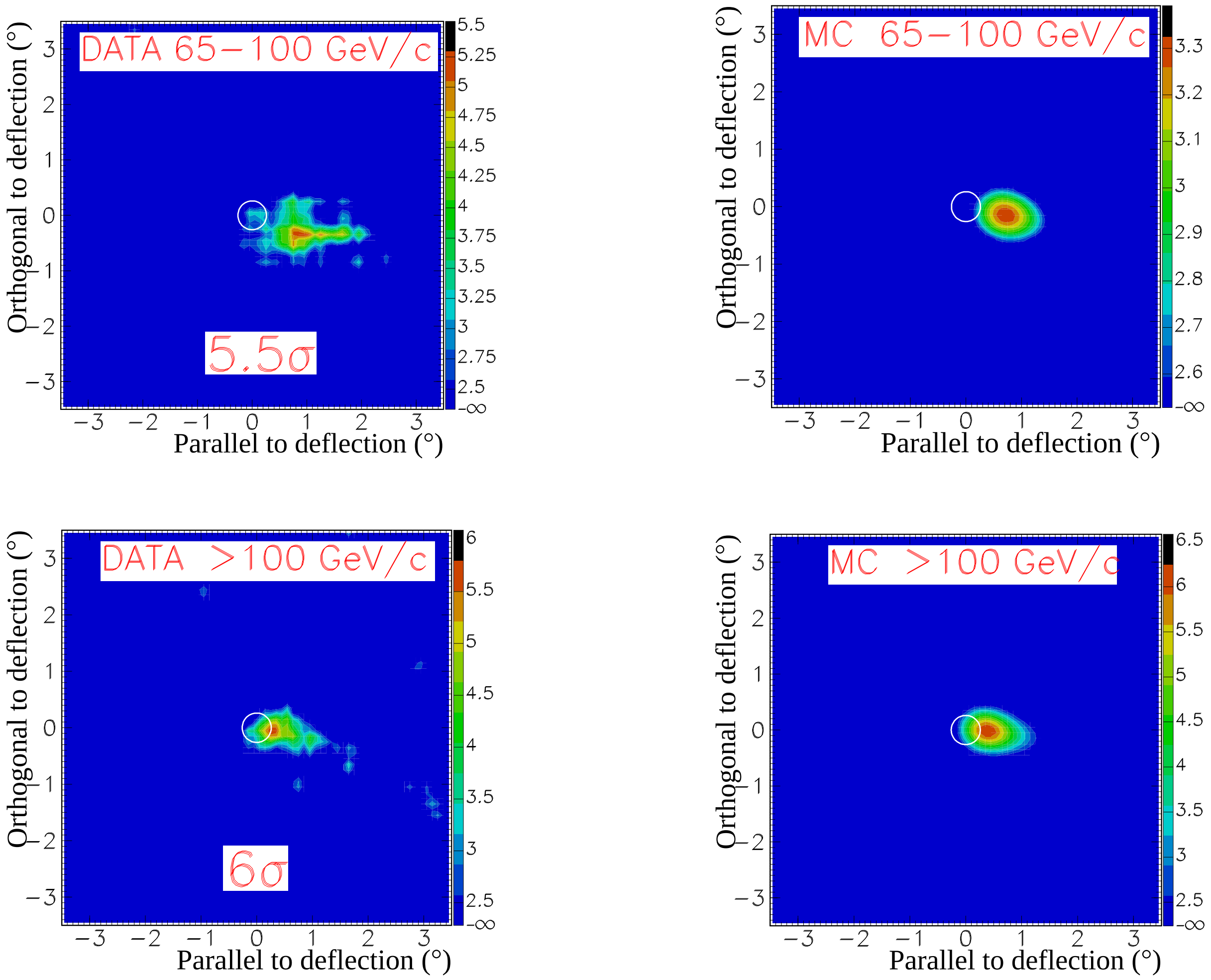
Se suaviza: distribución uniforme.

Resultado: diferencia de la distribución normal en s.d.



Comparación Data-Mc :offset $\simeq 0.1^o$

Sombra de la luna en el sistema H-V.



Análisis completo de la sombra de la luna.

Nos situamos en el sistema de referencia H-V (de deflexión). Disponemos de la distribución experimental de densidad de sucesos en θ_H and θ_V.

Nos proponemos ajustarla por una función empírica justificada por el estudio previo M.C.

Los parámetros que se introducen son:

- El ruido de fondo en torno a la posición aparente de la luna.(3 parámetros)
- El déficit.(1)
- La resolución angular efectiva σ ,desacoplada del efecto geomagnético por la elección del sistema de referencia).(1)
- El offset direccional.(2)
- La relación: r $= \bar{p}/(p + He)$.(1)

Hipótesis de trabajo son:

- La composición de los primarios en torno al Tev., 75% de protones, 25% de He + otros componentes pesados.
- Un índice espectral de 2.8, similar para materia y antimateria.
- Representación funcional análoga para p y $\bar{p}$.

La densidad se representa por la función:

$$
\begin{aligned}
\mathbf{g}(\mathbf{x},\mathbf{y}) \quad &= \underbrace{u_x x + u_y y + u_z}_{plane} - \tfrac{N_{miss}}{(1+r)}[0.75\, \underbrace{f_1(x-x_0, y-y_0, \sigma)}_{p\ deficit} + \\
&0.25\, \underbrace{f_2(x-x_0, y-y_0, \sigma)}_{He\ deficit} + r\, \underbrace{f_1(x_0-x, y_0-y, \sigma)}_{\bar{p}\ deficit}]
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

Las funciones f_1, f_2.

f se parametriza como producto de dos funciones,desacoplando las componentes H y V:

$$f(x,y) = f_H(x).f_V(y) \tag{3}$$

- $f_V(y)$ se describe como la proyección sobre V de la convolución bi-dimensional de un disco (la Luna) con una distribución gausiana , correspondiente a la resolución angular efectiva para el rango de momentos considerado (LE o HE).

$$f_V(y) = \int_{-R_{Moon}}^{+R_{Moon}} \frac{2}{\pi R_{Moon}^2} \sqrt{R_{Moon}^2 - u^2}.\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-u)^2}{2\sigma^2}} du \tag{4}$$

- $f_H(x)$ se ha aproximado por:

$$f_H(x) = (1-c).L_1(x, a_1, b_1) + c.L_2(x, a_2, b_2) \tag{5}$$

- donde 1,2 se refieren, respectivamente, al p, He y L es una función del tipo Landau.

  La función normalizada de Landau:

$$L(x) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(x+e^{-x})} \tag{6}$$

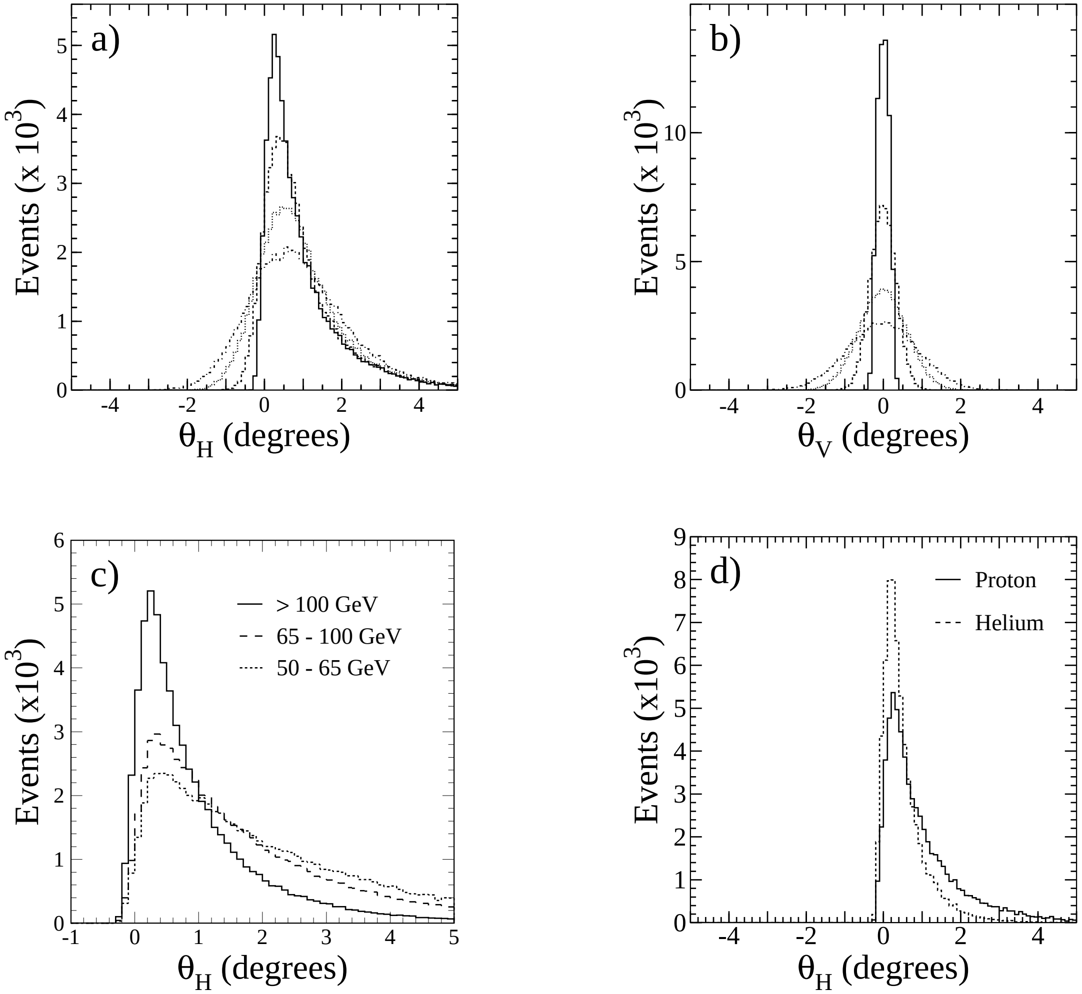
  Se modifica para introducir dos parámetros a y b :

$$L(x, a, b) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(a(x-b)+e^{-a(x-b)})} \tag{7}$$

- $a \longrightarrow$ actúa sobre la anchura.
- $b \longrightarrow$ actúa sobre la posición.

y se verifica la adecuación de este modelo a la forma de la señal, generada por M.C.

Test Monte Carlo



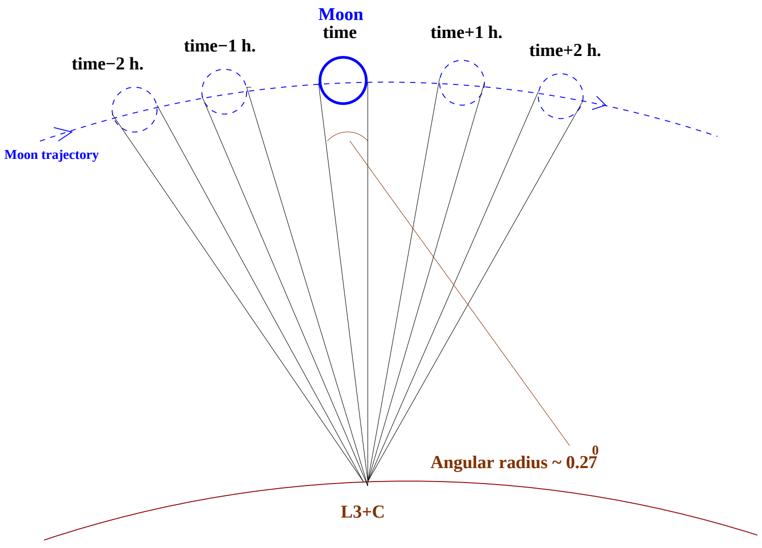
Comparación entre la simulación MC y la parametrización para las proyecciones en θ_H and θ_V para dos valores de la resolución angular.

($p_\mu > 100$ GeV y número total de sucesos normalizados al número de sucesos esperados en los datos.)

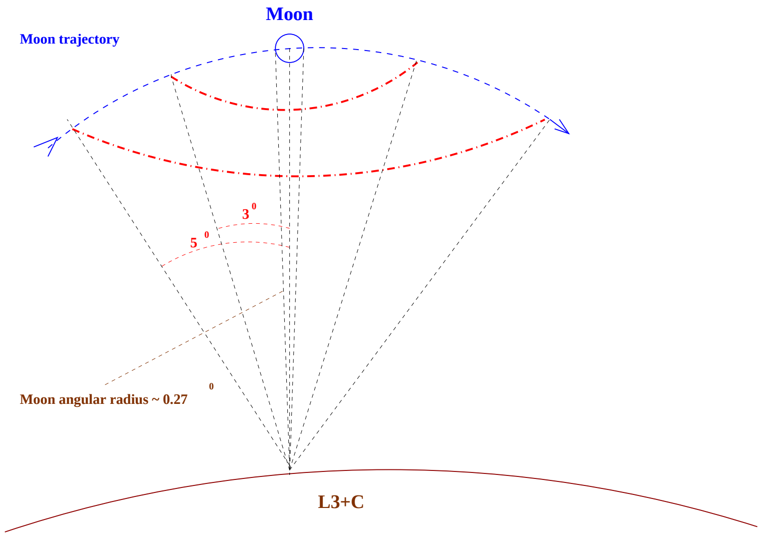
Ajuste de $g(x, y)$

Se ha ajustado por máxima verosimilitud $g(x, y)$ a las densidades experimentales, pero se ha procedido por pasos:

- 1- Se estima el ruido de fondo (dos métodos):



Background estimation (1)



Background estimation (2)

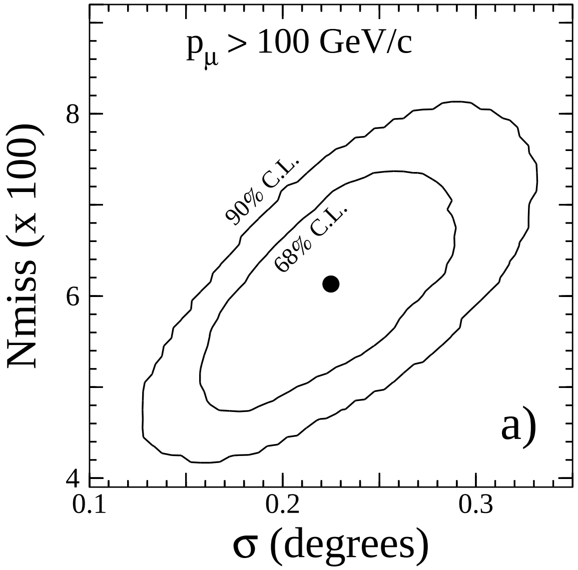
Se comprueba su linearidad. Puede representarse como un plano (3 parámetros)

Ajuste de $g(x,y)$. Paso 2.

- - Se desprecia la contribución de la antimateria.
  ($r = 0. \rightarrow$ 7 parámetros).
- - Se introduce el ruido de fondo y se estima el offset.
  ($< 0.1^0$ en ambos ejes)
- Se deriva el plot de C.L. concerniendo σ y N_{miss}.

N_{miss} se conoce con buena precisión a partir de la medida del flujo y del M.C. del disco lunar.

Se introduce y se obtiene σ



Ajuste de $g(x, y)$. Paso 3.

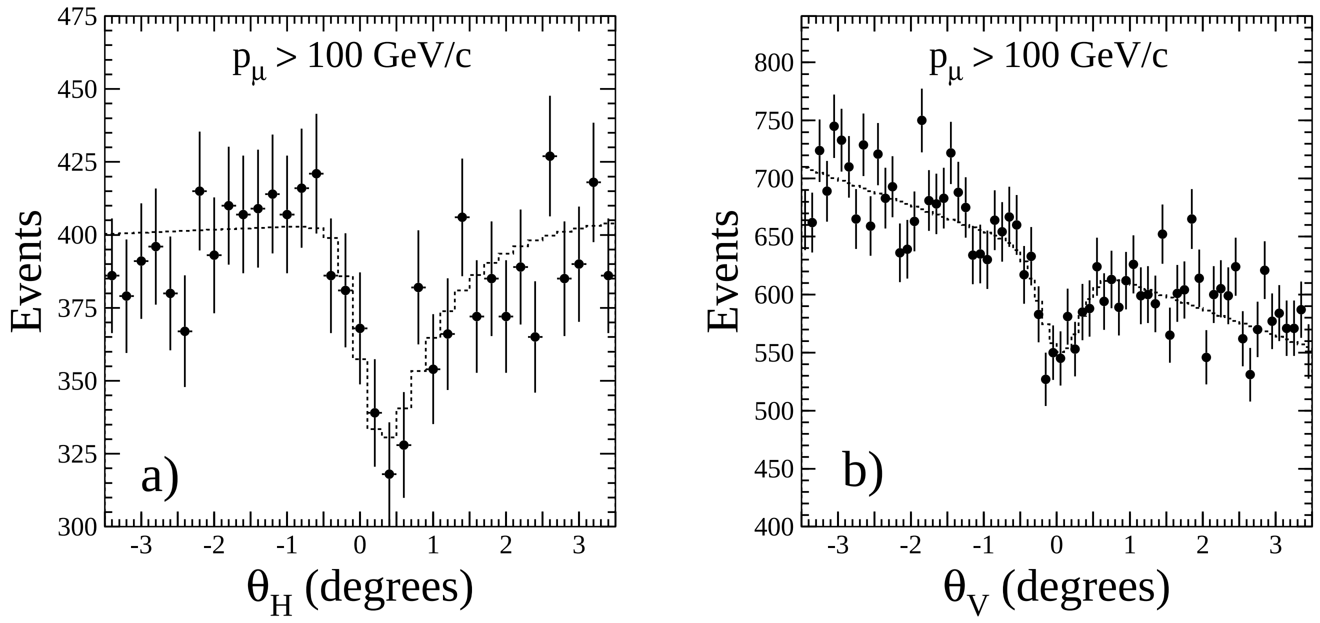
Se busca evidencia de $\bar{p}$.

- N_{miss} se supone repartido entre protón, He y una hipotética componente de $\bar{p}$.
- Se determina r.

Resultados.

- σ (HE) $= 0.21^0 + (0.04)(-0.03)$
- σ (LE) $= 0.28^0 + (0.07)(-0.05)$
- Significación: 10.4 s.d.
- r$=-0.04(+0.04)(-0.08)$
- $\rightarrow$ limite superior $\bar{p}/(p + He)$:0.11 al 90% C.L. (Unified approach method [9])
- $\rightarrow$ limite superior: $\bar{p}/p$ =0.15

Proyección sobre los ejes H,V.



Bibliografía.

- 1 (CYGNUS,E. Alexandreas et al.,Phys. Rev. D,vol 43,Nb 5 1735 (1991))
- 2 (CASA,Phys. Rev. D 49,1171 (1994)
- 3 (MILAGRITO,R. Atkins et al.,NIM in phys. Res. A 449 (2000) 478.)
- 4 (SOUDAN 2,J.H. Cobb et al.,Phys. Rev. D,vol 61,092002,1998)
- 5 (SOUDAN 2,J.H. Cobb et al.,arXiv:hep-ex/905036 v1 20 May 1999)
- 6 (MACRO,M. Ambrosio et al.,Phys. Rev. D,vol 59,012003 (1998))
- 7 (MACRO,M. Ambrosio et al.,arXiv:astro-ph/0302586 v1, 28 Feb 2003)
- 8 (L3+C,O. Adriani et al.,NIM in Phys. Res. A488(2002) 209.
- 9 G.J. Feldman and R. Cousins, Phys. Rev. D vol 57,nb 7,(1998) 57.