

Ombra del Sole e della Luna in MACRO

*Rassegna, esperienze e
risultati dell'analisi dei dati
dell'esperimento sotterraneo
MACRO*

Nicola Giglietto

Politecnico di Bari e INFN-Bari

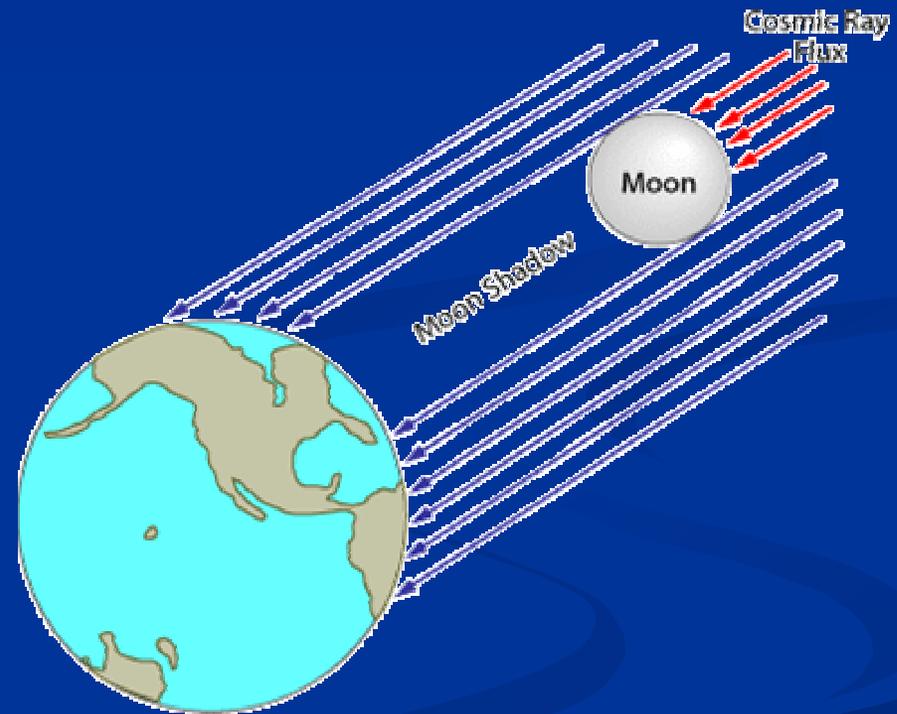
Motivazioni e utilità di questa ricerca

- L'idea risale al **1957** ed è dovuta a Clark(*) che prevede l'esistenza dell'effetto
- Più tardi lo sviluppo di telescopi per raggi cosmici ne rivalutò l'utilità dell'effetto come tool di **calibrazione** dei rivelatori
- In seguito si pensò ad utilizzare il segnale prodotto dal Sole o dalla Luna per ricerche di **materia/antimateria**

(*) G.W: CLARK, Phys.Rev. 108 (1957) 450.

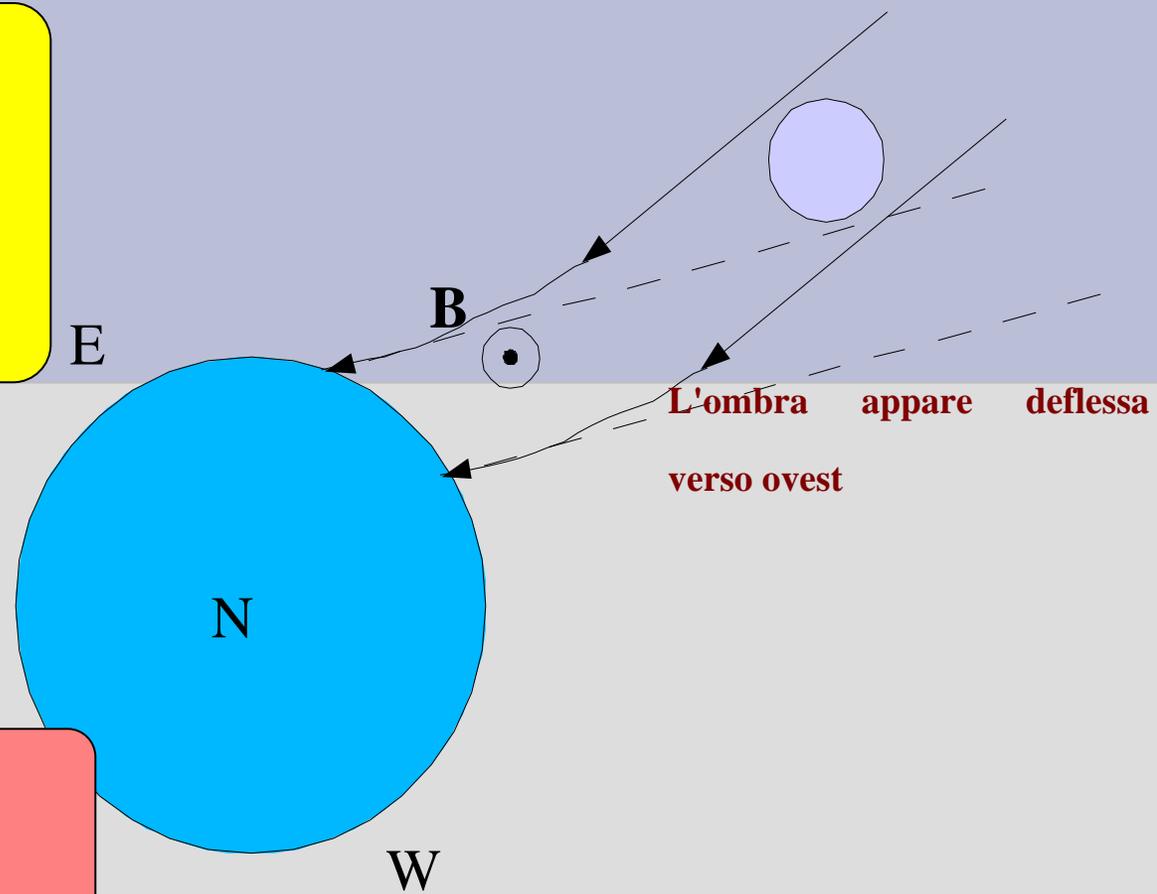
Effetto Ombra Luna

- Il passaggio dell'astro produce un'attenuazione del flusso dei raggi cosmici rivelabile da uno strumento di risoluzione angolare di 1° o meglio



Verifica del puntamento:
l'ombra è spostata ad ovest

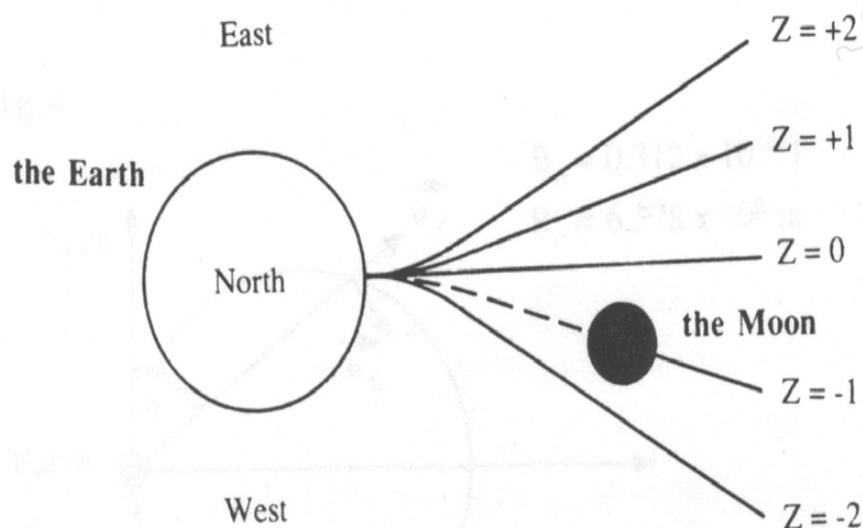
$$\Delta\theta = \frac{1.5^\circ}{E_p (TeV)}$$



Misura della risoluzione
angolare dell'apparato
(diametro Luna 0.5°)

Misura della composizione dei primari tramite l'ombra

Fig.2



Sketch of ≈ 3 TeV trajectories for a few Z values. Deflections are drawn in proportion to the size of the moon image.

- La deflessione è proporzionale a Z
- L'analisi dell'ombra osservata si può utilizzare per stimare la **composizione** o la presenza di **antimateria**
- Si può applicare se la deflessione è sufficientemente grande (**almeno 0.5°**)

Calibrazione dello strumento

- L'effetto produce un segnale che si può analizzare
- L'osservazione è la convoluzione del segnale con la funzione che descrive la risoluzione dell'apparato (**Point Spread Function o PSF**), funzione di tutti i possibili parametri strumentali (**energia, inclinazione** ecc.) e si aggiunge al **background** (specifico del rivelatore)

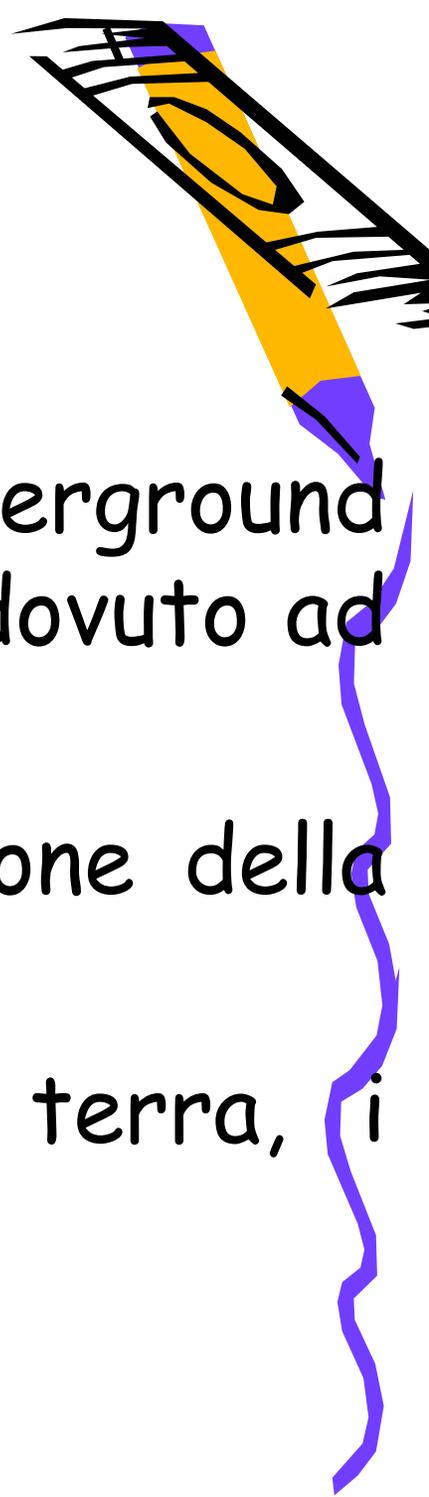
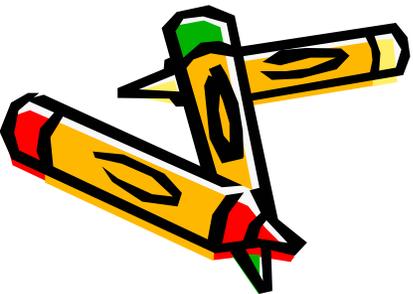
Calibrazione-2

- Poichè la sorgente è nota si può utilizzare come candela standard utile per comprendere la risposta del rivelatore
 - Assumendo noto il background l'osservazione permette di confrontare il modello simulato di rivelatore con quanto ricavato dai dati
 - E il **background??**
-

Background

Le osservazioni a Terra e underground presentano un fondo ineliminabile dovuto ad un insieme di effetti:

- **Strumentale** es. errata ricostruzione della direzione
- **Fisica:** per le osservazioni γ a terra, i cosmici carichi, luce diffusa ecc.

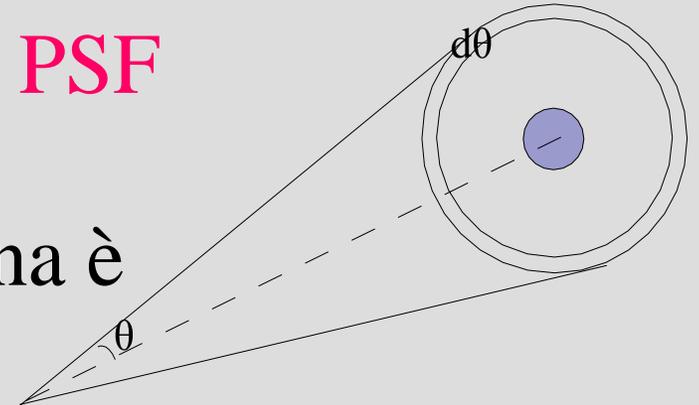


Ombra della Luna – l'analisi

I- analisi 1D

- Nel caso di rivelatore ideale con **PSF** gaussiana la densità di eventi guardando in direzione della Luna è

$$\frac{d^2 N}{d \theta^2} = K \left(1 - \frac{\theta^2}{2 \sigma^2} e^{-\frac{\theta^2}{2 \sigma^2}} \right)$$



- Per cui la più semplice analisi (1D) consiste in un fit della distribuzione della densità eventi in funzione della distanza angolare dal centro della Luna

Limiti dell'analisi 1D

- il segnale è debole per cui la **sensibilità** del risultato con un fit non è elevata
- non è detto che la **PSF** sia esattamente di forma **gaussiana**
- il segnale cercato potrebbe anche essere spostato dal centro della Luna (calcolato) sia per un offset dell'apparato sia per deflessione dovuta al campo geomagnetico

Densità eventi intorno la Luna

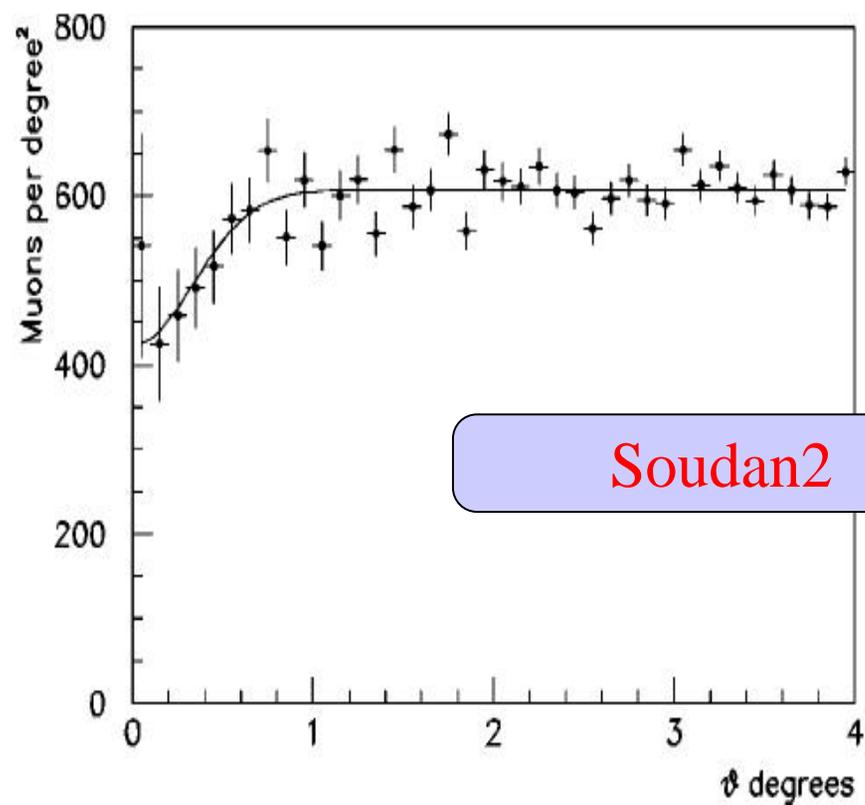
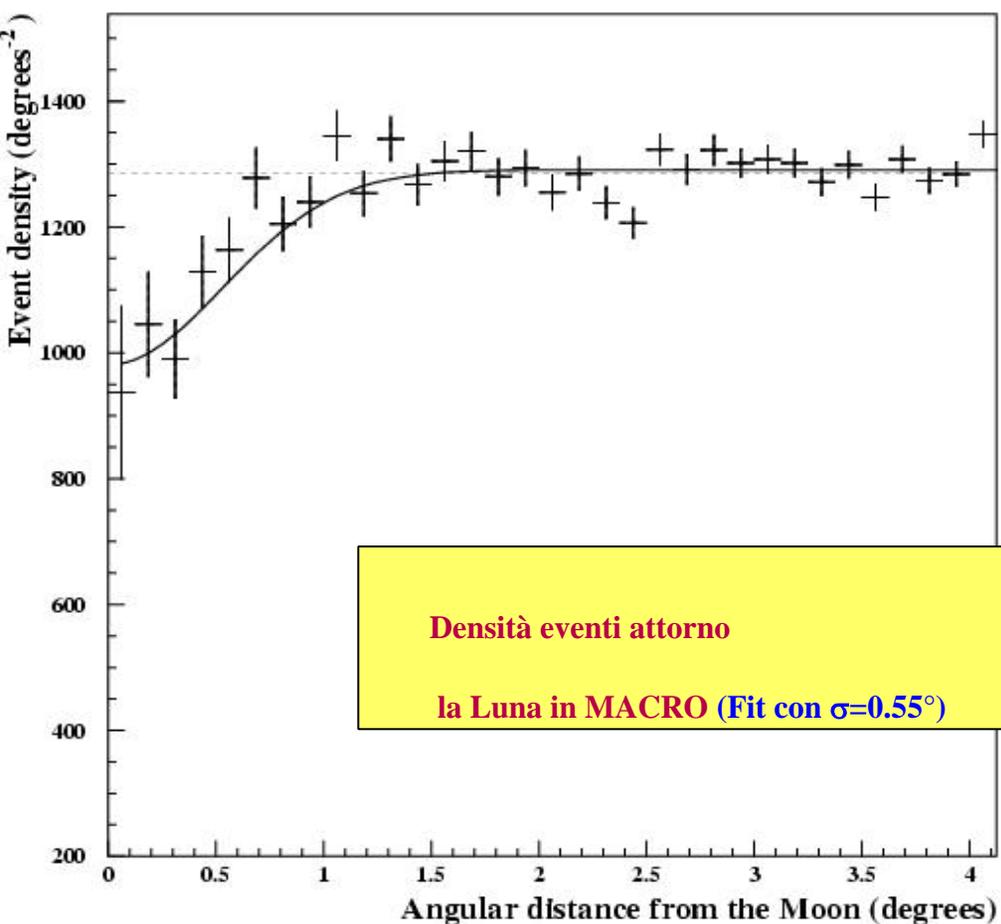


FIG. 2. The angular density of muons, $(1/\pi)dN_\mu/d\theta^2$, versus θ , the angular distance between the muon direction and the nominal position of the center of the Moon.

Analisi 1-d e valutazione bck (binned methods)

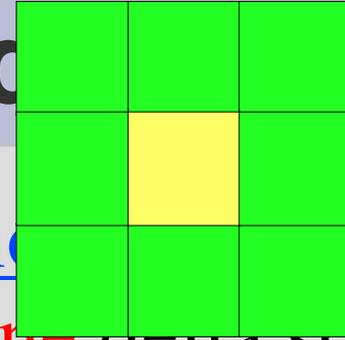
- Anche l'analisi semplice comporta una stima del numero di eventi di background
- $N_b = \int \epsilon R(\theta, \Phi, t) d \cos \theta d \Phi dt$ con $R(\theta, \Phi, t)$ la **rate** del background, in generale funzione di tanti parametri
- Inoltre la dipendenza **temporale** in genere si può fattorizzare come **$R(\theta, \phi) = E(\theta, \phi) R(t)$**
- Bisogna scegliere le dimensioni dei bin a priori

Scelta ottimale del bin

- Si può ottimizzare la scelta delle dimensioni angolari delle celle con cui suddividiamo il cielo
- La scelta viene fatta ottimizzando il **S/N** o meglio la **significatività del segnale** rappresentata dalla funzione* $\frac{S}{\sqrt{B}}$
- Nel caso di PSF gaussiana (2d) la massimizzazione comporta un raggio angolare di **1.58 σ** (72% degli eventi)
- In generale si ottimizza a Monte Carlo

* Oppure la funzione statistica più appropriata per testare la significatività di un segnale (Li-Ma)

Metodi di valutazione del background



- Il metodo più comune è la scansione: gli eventi aventi la **stessa declinazione** della sorgente e **differente RA** sono utilizzati per la stima del bck
 - Vantaggi:** facile ad usarsi
 - Svantaggi:** sensibilità alle variazioni di rate nel tempo
 - Rimedi:** tagli nei dati
- Monitoraggio della regione attorno la sorgente: si utilizzano tutti i bin attorno la sorgente:
 - Vantaggi:** meno sensibile alle variazioni di rate nel tempo
 - Svantaggi:** errori sistematici dovuti alla presenza di parte del segnale non entrato nel bin centrale
 - Rimedi:** correzioni a MC dell'esposizione

Valutazione del background 2

- Una migliore stima del background si ottiene con il metodo della mappa del background: si utilizza la distribuzione della rate degli eventi sull'intero cielo e la distribuzione degli eventi nello spazio
- Il background è stimato da una **simulazione** che associa la direzione di ogni evento con il tempo di un altro evento ottenendo un nuovo evento in **(RA, δ)**: gli eventi che entrano nella regione della sorgente costituiscono la stima del background atteso.

Vantaggi:

- si tiene conto della effettiva **Rate vs tempo** e del tempo vivo dell'apparato
- Si può aumentare l'incertezza statistica sugli eventi del background

Svantaggi: se si utilizzano gli eventi della sorgente il background sarà sovrastimato \Rightarrow **sottostima del segnale trovato**

Background 3

- Il precedente metodo assume **a priori** l'**isotropia** della distribuzione del **background** (vero per le particelle cariche) e che la presenza di eventuali sorgenti sia **trascurabile**
- **Due esempi:**
 - **MACRO⁽¹⁾** l'estrazione random è fatta run per run (in modo da tenere conto dei tempi morti tra run) per ogni evento vero se ne simulano **25** ottenuti accoppiando 25 direzioni con 25 tempi tra quelli registrati nel run (mediamente 1300 eventi per run)
 - **CYGNUS⁽²⁾**: si associa il tempo dell'evento con **10** direzioni estratte dall'istogramma 2d delle direzioni o viceversa (1 direzione con 10 differenti tempi)

(1) S.P.Ahlen et al., *Astrophys. J.* 412 (1993), 301 e M.Ambrosio et al. *Astrop.Phys.* 18 (2003) 615.

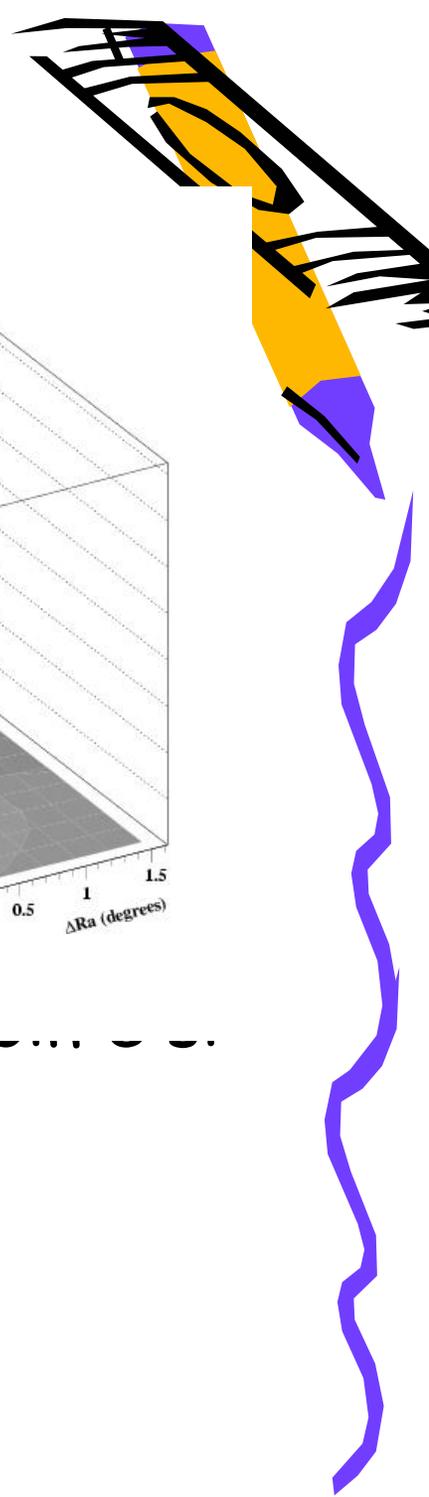
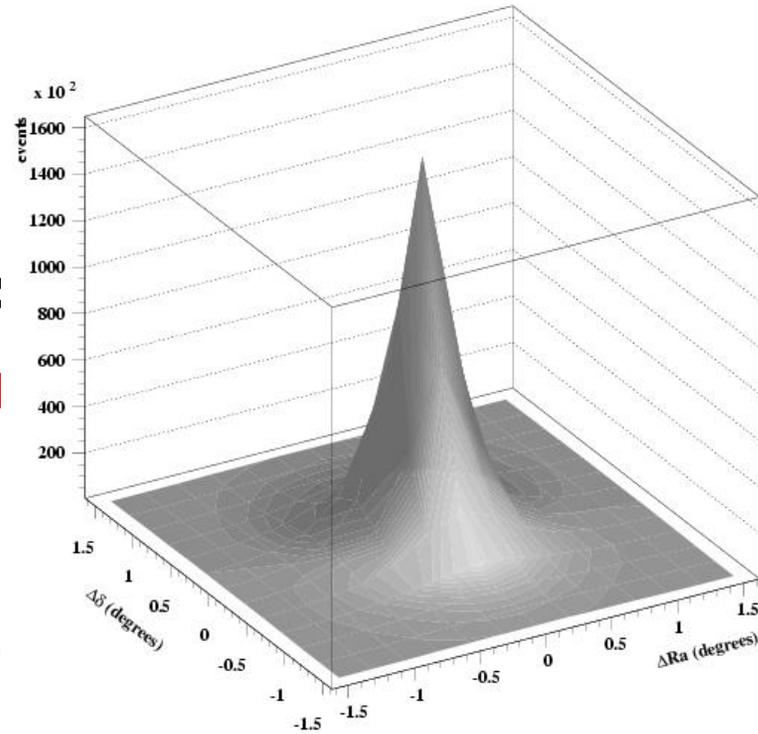
(2) D.E.Alexandreas et al., *NIM A* 328 (1993),570-577.

Analisi likelihood (unbinned methods)

- I metodi di massima verosimiglianza (**maximum likelihood**) sono i più indicati per avere una mappa **2d**. L'analisi binnata comporta che sia gli eventi vicino al **centro** della sorgente che al **bordo** bin sono trattati allo stesso modo. Nei metodi non binnati si utilizza la **probabilità** di trovare del segnale in funzione della distanza angolare dal centro della sorgente. Si considera **nota la posizione** e **sconosciuta l'intensità** del segnale.
-

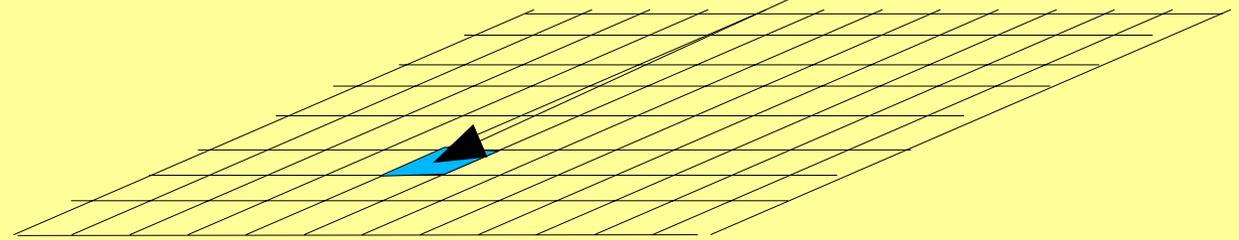
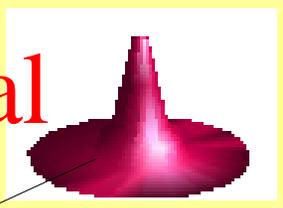
Analisi likelihood di MACR

- La **PSF** di **MACRO** non è ga indipendentemente tramite di
- La **Luna non è un oggetto p** Monte Carlo tenendo conto di
- Si costruisce un istogramma background (mappa bck) attor
- **Si assume** un ipotetica s...
massimizza a MC il χ^2



Li

Trial signal



Background map

Il χ^2 per l'oss
mappa è

N_i sono i conte

N_i^s il numero d
partendo dalla map
secondo la **PSF**, e a
determinato dalla r

$$\lambda = \chi^2(\mathbf{x}_s, \mathbf{y}_s, I_s)$$

del risultato in ogni cella della mappa

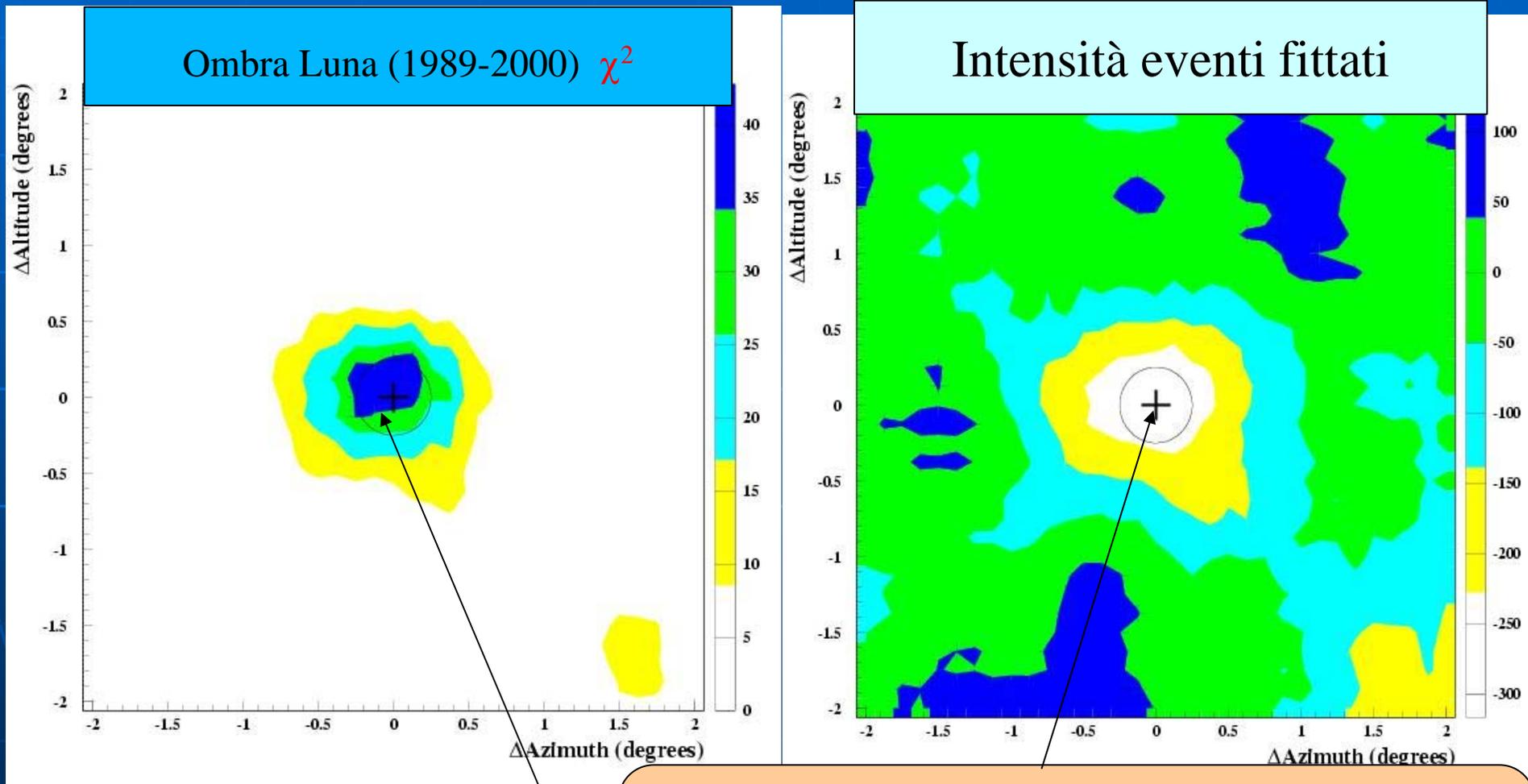
Il **test è ripetuto** verificando l'ipotesi di una **sorgente** al centro di ogni bin della mappa. Si ottiene una mappa di χ^2 con parametro l'intensità I_s trovata

λ è distribuita come una distribuzione di χ^2_1

Parametri stimabili con la misura

- Si possono testare (una volta verificata la posizione della sorgente) altri parametri allo scopo di verificare la sensibilità del metodo
- **Raggio della Luna** (per verifica, in media è 0.26°)
- **Risoluzione dell'apparato** (per stimarla)
- **Intensità dell'ombra** (da confrontare con quella attesa)

Ombra della Luna MACRO



L'intensità 316 ± 40 fittata corrisponde
agli eventi geometricamente mancanti attesi

Significatività equivalente 6.5σ

Effetti?

L'osservazione "diurna" comporta l'attraversamento
Del campo geomagnetico modificato dal vento solare

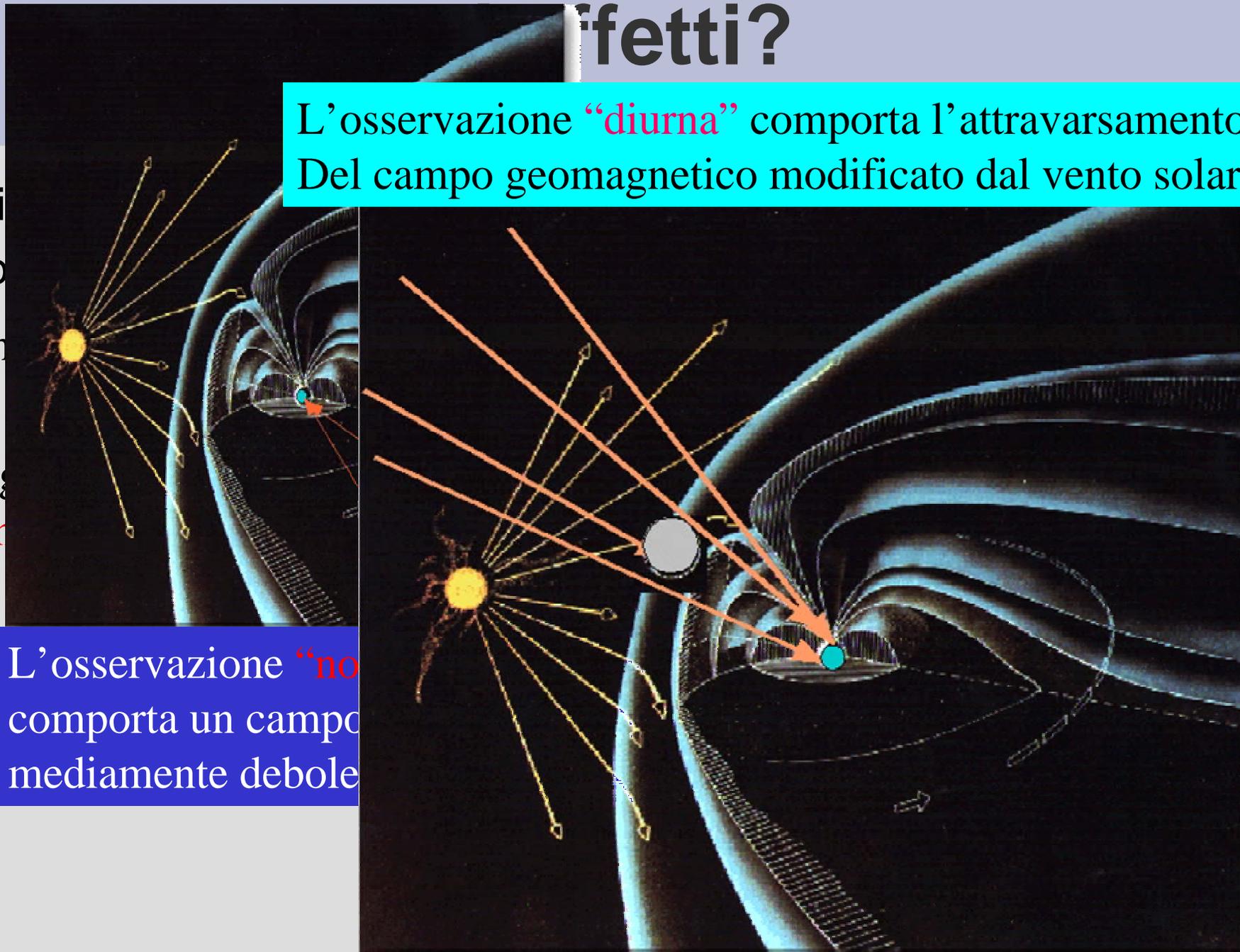
•La mi
tempo

•Il cam

•I rag
inter

•Effett

L'osservazione "no
comporta un campo
mediamente debole

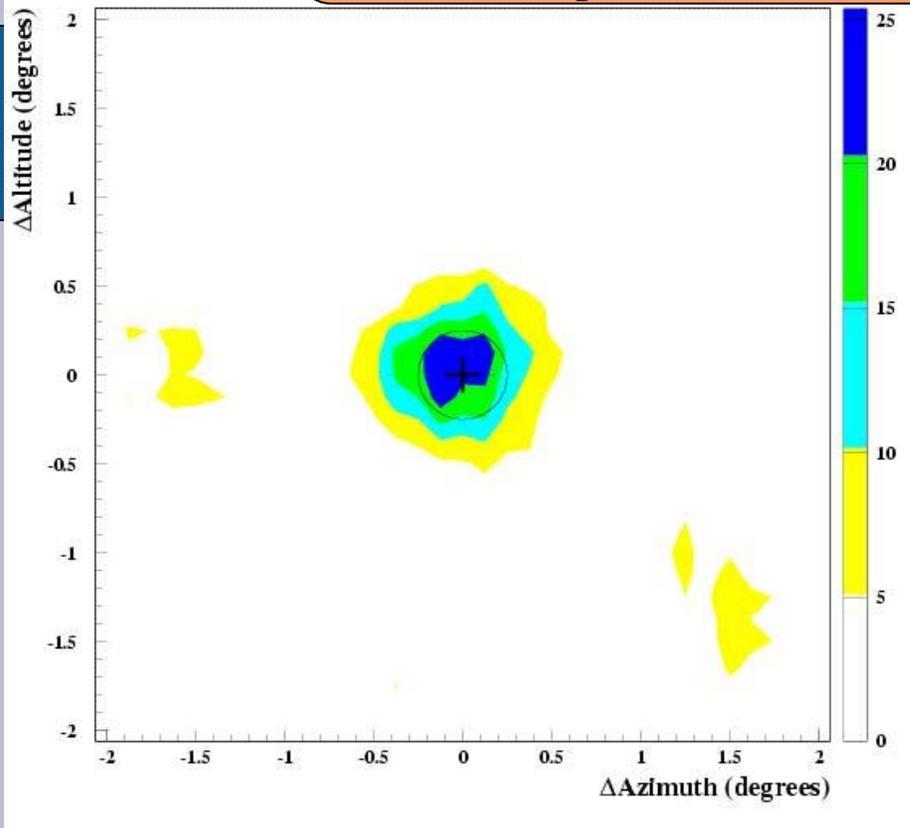


Effetto **Giorno/Notte** MACRO

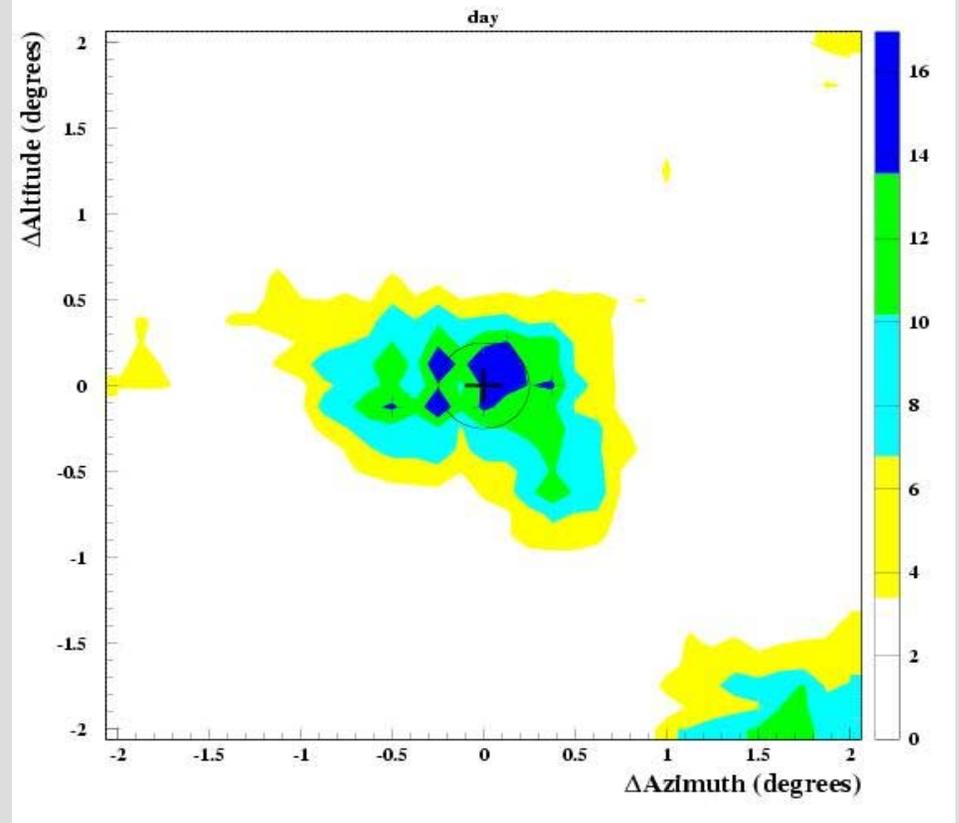
Si definiscono gli eventi “**notte**” distanti almeno **90°** dal Sole

Si definiscono “**giorno**” gli eventi entro **90°** dal Sole

Il campione di eventi è circa uguale



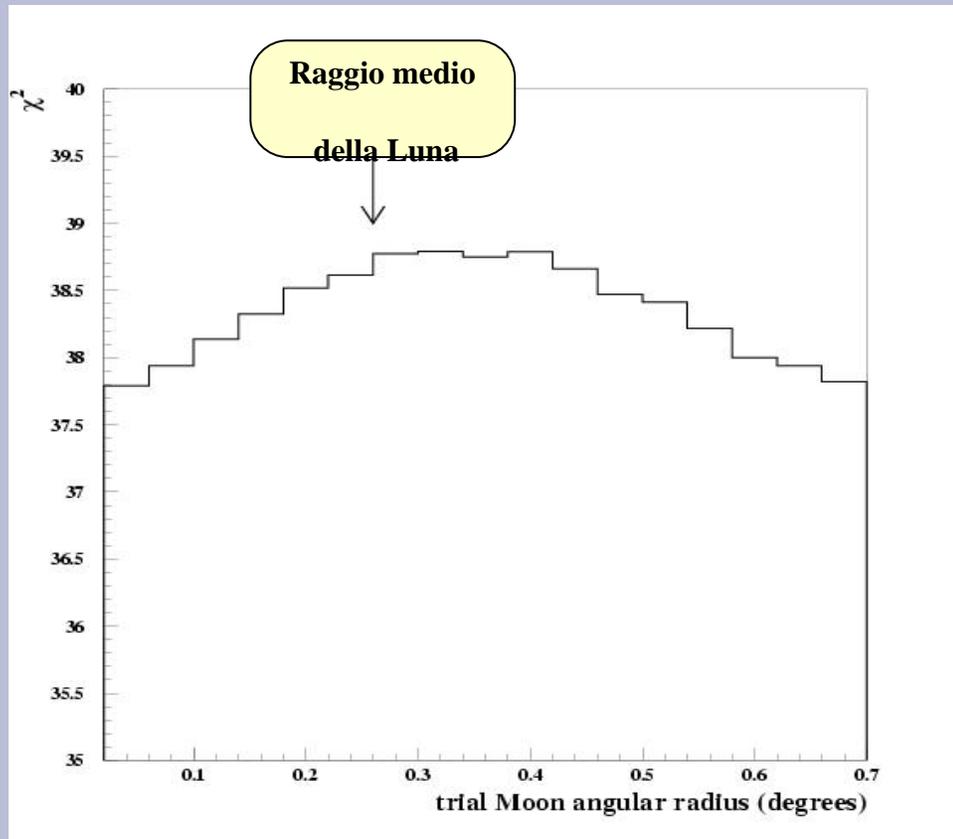
Eventi “**notte**”



Eventi “**giorno**”

Conclusione: gli eventi “**notte**” incontrano un campo magnetico **più debole**, gli eventi “**giorno**” trovano un campo magnetico **più variabile nel tempo** (la misura è su 10 anni)

Stima del raggio angolare della Luna

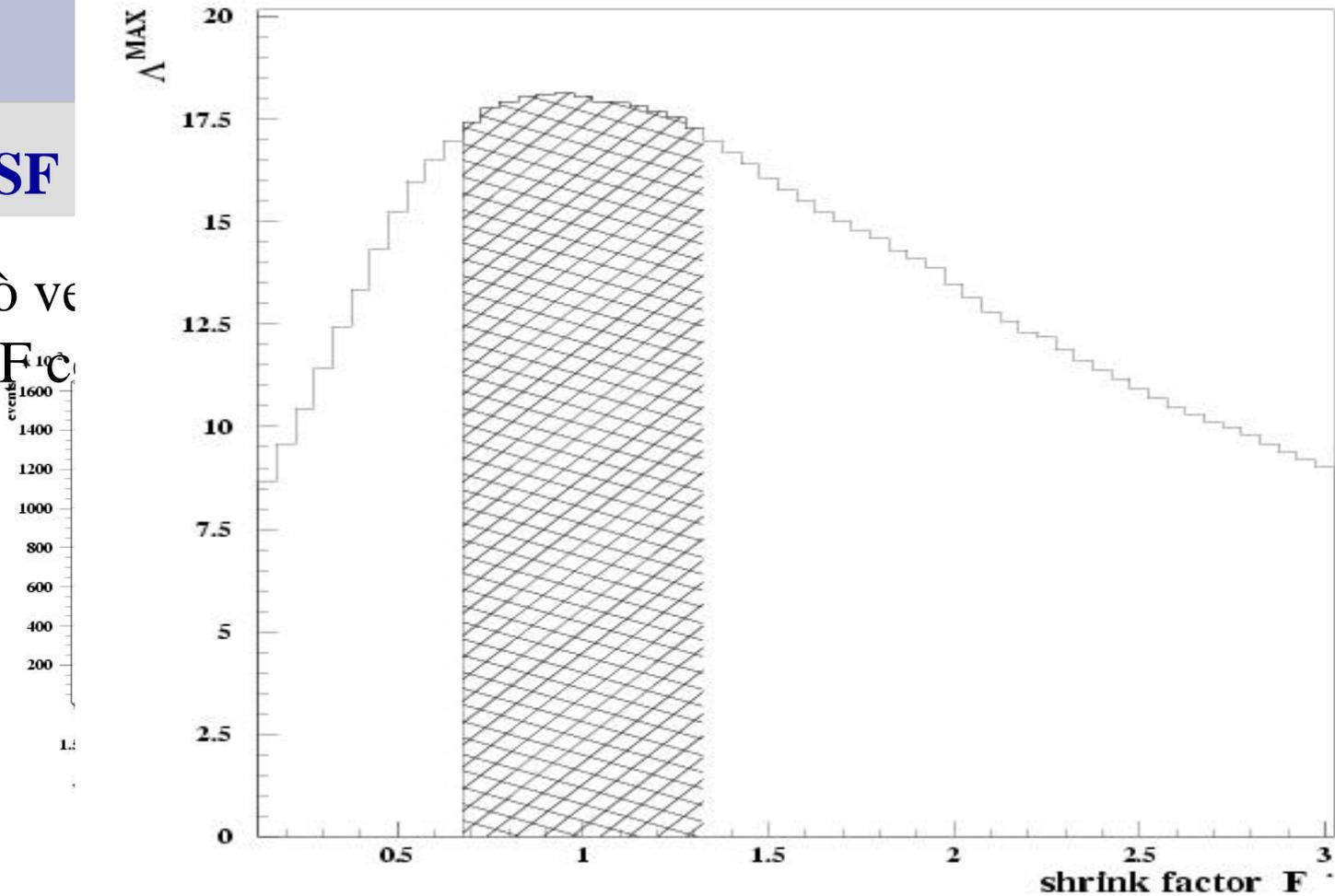


Fissando la posizione dell'ombra della Luna e lasciando come parametro libero le dimensioni del raggio della Luna (la PSF è modificata a MC per tenere conto della dimensione estesa della sorgente) si ha una stima della **sensibilità** dell'osservazione ed una **verifica** della procedura.

È evidente che considerare la Luna come sorgente puntiforme porta ad una **sottostima** della significatività del segnale

La PSF

Si può vedere
scala F_{c10}
(PSF)



La PSF utilizzata è compatibile con il
segnale osservato: la risoluzione angolare
risulta essere (68%) : $0.55^\circ \pm 0.05^\circ$

Risultati dei vari esperimenti

EAS

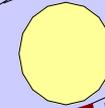
- **Cygnus** experiment (1986-1995) significatività di 5σ [2] l'osservazione ha permesso di stimare a 0.7° la risoluzione angolare
- **EAS-TOP** 3σ sommando l'ombra del Sole e della Luna insieme [3]
- **HEGRA** stima a 0.6° - 0.7° la risoluzione dell'apparato [4]
- **TIBET-AS γ** :ris. Apparato, effetto giorno/notte, ombra Sole con grandi dettagli [6,18]
- **GRAND** evidenza ombra Luna [28]
- **CASA-MIA** stima la risoluzione dell'apparato 0.35° [7]

Underground

- **SOUDAN 2**: 3.5σ ombra Luna[29]
- **MACRO** 6σ Ombra Luna 5s ombra Sole [11,12]
- **L3+C** Materia/antimateria limiti dall'ombra Luna[27]
- **LVD** Ombra Luna[17]

Oml

Eventuale ombra dovuta ad antiprotoni



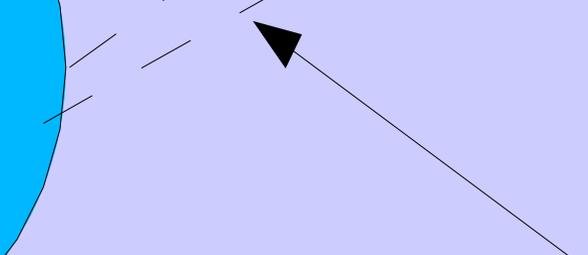
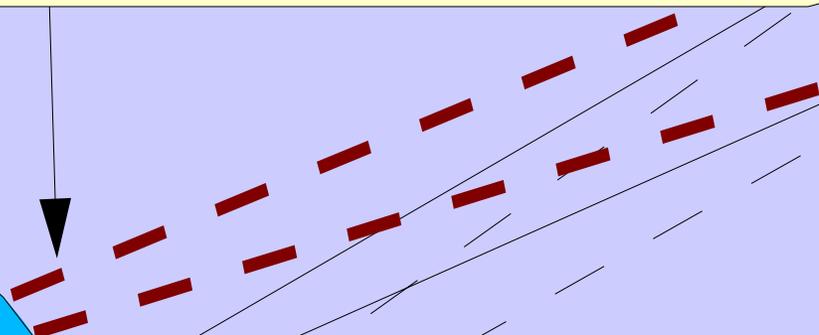
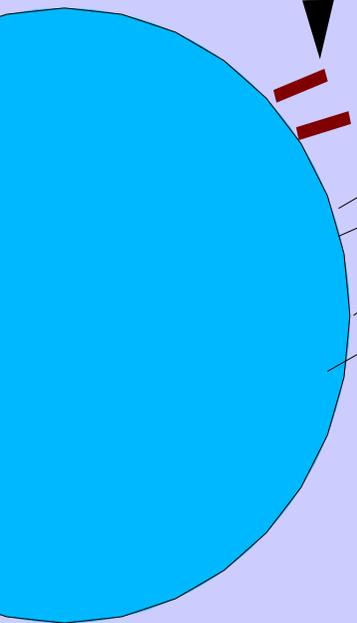
Sole

p

p⁻

L
L
p
d

Spostamento apparente dell'ombra p⁺

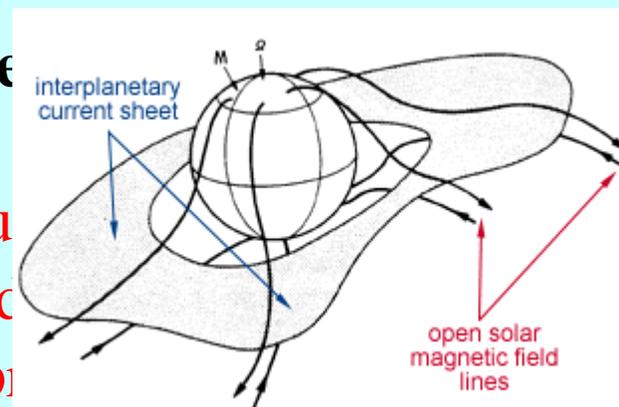


È necessaria una simulazione dedicata contenente una descrizione del campo magnetico interplanetario (IMF) ed il campo dipolare del sole (con asse parallelo all'asse di rotazione del Sole).



L'IMF al minimo del ciclo ha **quattro** segmenti.
 Conclusioni:

- Lo spostamento E-W al minimo è dovuto al campo dipolare del campo solare (nel 1996 la deflessione del campo terrestre e polare è stata deflessa verso W)
- Lo spostamento N-S è dovuto al campo IMF



1990

1997 (Tibet-II)

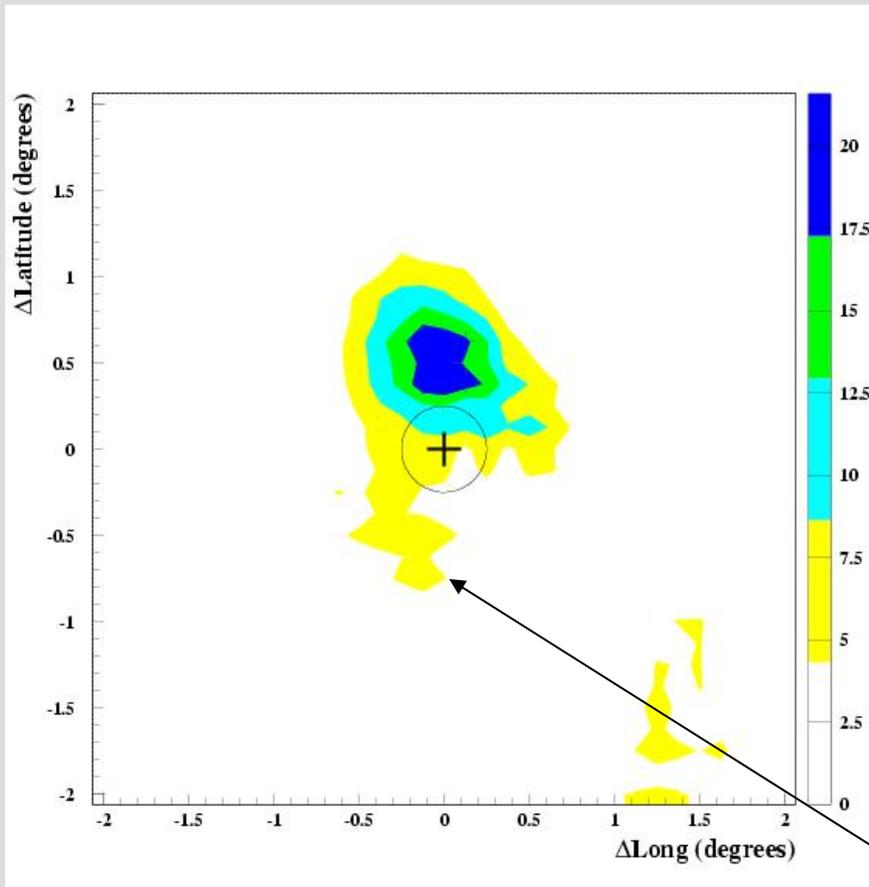
1998 (Tibet-I)

1999 (Tibet-II)

2000 (Tibet-III)

2001 (Tibet-I)

Ombra Sole MACRO



• La significatività è circa 4.5σ , lo spostamento medio è 0.6°N coordinate eliocentriche (l'intensità di eventi schermati è 247 ± 48 eventi)

• La forte deviazione permette una misura di p/p^- (ris. Apparato 0.5°)

• Nessuna attenuazione nella posizione antisimmetrica

• La stima al $90\% \text{C.L.}$ $p-/p < 62\%$ a energie medie di 20 TeV

Posizione dell'antiombra eventuale

Nuovi sviluppi

Tra le più recenti novità l'articolo di R. Atkins et al.⁽¹⁾ mostra come sia possibile cercare segnali di **annichilazioni di neutralini** in direzione del Sole **ma tenendo conto dell'ombra del Sole**. Di fatto si cerca un eccesso di eventi sul segnale dell'ombra del Sole. L'analisi è delicata e richiede un buon MC relativo al campo magnetico solare+IMF

⁽¹⁾ R. Atkins et al., Phys. Rev. D 70, (2004) 083516

Conclusioni

- L'ombra della Luna è un segnale utile alla verifica del **puntamento degli apparati e della risoluzione angolare**
- Fornisce indicazioni sul campo **geomagnetico**
- L'ombra del Sole consente una misura di **p/p-** alle energie del TeV
- Più complessa è l'interazione con il campo magnetico solare e segue il ciclo solare ma misurabile
- Possibilità di fare spettroscopia (teorica) **p,He,Li**
- Ricerca di **wimps**
- Per le osservazioni da satellite: l'ombra della Terra svolge un ruolo analogo

Bibliografia

- (1)**G.W. Clark**, Phys. Rev. 108 (1957) 450 (Idea originale dell'effetto)
- (2)**D.E. Alexandreas** et al., Phys.Rev. D 43 (1991) 1735. (Moon shadow Cygnus Coll)
- (3)**P.L. Ghia** et al., Proceedings 26th Rencontres de Morions (Moon+Sun shadow by EAS-TOP)+Proceedings 22th ICRC-Dublin
- (4)**M.Merck,et al., (HEGRA Coll.), Astrop.Phys.,5 (1996) 379-392 (Moon, Sun)**
- (5)**A.Karle** et al., Proceedings 22th ICRC-Dublin
- (6)**M. Amenomori** et al., Phys. Rev. D 47 (1993) 2675- Tibet As-gamma (Moon)
- (7)**A. Borione** et al., Phys. Rev. D 49 (1994) 1171 (CASA-MIA coll., Moon), +ICRC 1995-Roma eff. giorno/notte
- (8)**F. Samuelson** et al., Proc. 27th ICRC, Hamburg 2001
- (9)**B.Bartoli** et al., Nuovo Cimento 24 C (2001) 669 (CLUE Exp.).
- (10)**J. Parriaud** (L3 Collaboration) Proc. XIV Rencontres de Blois 2002 e
- (11)**M. Ambrosio** et al., Phys.Rev. D 59 (1999) 012003 (MACRO Coll. - Moon)
- (12)**M. Ambrosio** et al.,Astrop. Phys. 20 (2003) 145-156 (MACRO Coll-Moon, Sun)
- (13)**J.H. Cobb** et al., Proc. 26th ICRC, Salt Lake City 1999 (SOUDAN2 Moon) also Phys. Rev. D 61 (2000) 092002
- (14)**Karpov** et al., Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel, Suppl, no. 4, p. 121-126 (2003) (BAKSAN Coll. -Moon)
- (15)**Andreyev, Yu.M.** et al., Cosmic Research, v. 40, Issue 6, p. 559-564 (2002). (Baksan Coll.)
- (16)**M. Aglietta** et al., Proc. 26th ICRC, Salt Lake City 1999 (LVD Coll.)

Bibliografia-2

- (1) **D. Pomerade** et al., *Astrop. Phys.* 14 (2001), 287. (ARTEMIS Coll.)
- (2) **Chantell, M.; Weekes, T. C.; Sarazin, X.; Urban, M.**, *Nature* vol. 367,25 (1994) Antimatter and the Moon
- (3) **Allen, W.H.** Et al., *Phys. Rev. D* 48 (1993) (JANZOS Coll. Moon/Sun)
- (4) **M. Merck** et al., *Astrop. Phys.* 5 (1996) 379. (HEGRA-Moon)
- (5) **Heintze** et al., Measuring the chemical composition of cosmic rays at 10 to the 13th to 15th power eV by utilizing the solar and geomagnetic fields (1989) *Experimental Astronomy* (ISSN 0922-6435), vol. 1, no. 1, 1989, p. 21-34. e Proceedings of the IXXth ICRC, La Jolla, California (1985), **(Luna e/o Sole come spettrometri)**
- (6) **J. Lloyd-Evans**, Proceedings of the IXXth ICRC, La Jolla, California (1985), NASA Conf. Publ., NASA CP-2376 (1985), edited by F. C. Jones, J. Adams, and G. M. Mason. **(Sole come spettrometro)**
- (7) **Urban**, *Nucl. Phys. B (proc. Suppl.)* 14B (1990) 223-236, **(Ombra Luna per ricerca di antimateria)**
- (8) **Linsley** (1985) IXXth ICRC, Moon shadowing in EAS exp.
- (9) **Atkins** et al., (MILAGRO exp) web page and some ref in *R. Atkins Astrophys. J.* 595, 803 (2003)
- (10) **P. Le Coultre (L3+C)**, *Nucl. Phys. B (proc. Suppl)* 122, (2003) 161-169.
- (11) **A. Trzupsek, Poirier and Y. Lu** XXIII ICRC Calgary (1993)
- (12) **Cobb J.H. et al. (SOUDAN2) Phys. Rev. D** 61 (2002) 092002