

Nella nota che segue ho riassunto tutto quanto ho imparato in tre anni di simulazione ed analisi sulle potenzialita' di un apparato a torri come quello che era stato fino a qualche tempo fa considerato standard.

Pur nelle limitazioni e con gli errori presenti negli strumenti di simulazione e piu' volte citati, credo che le indicazioni principali siano comunque valide:

**un apparato siffatto puo' produrre dati corretti ed in quantita' sufficiente (nel senso che le aree efficaci finali sono le massime che si possono aspettare dati i vincoli costruttivi) per fare neutrinoastronomia.**

Il problema delle energie "basse", inferiori cioe' a qualche diecina di TeV, non puo' essere affrontato con apparati di tale dimensione in limiti di spesa concepibili, mentre strutture fortemente disomogenee creerebbero, secondo me, solo complicazioni sterili.

## ESPOSIZIONE ED ANALISI CRITICA DEL MIO LAVORO DI SIMULAZIONE

V. Valente – settembre 2003

### Struttura dell'apparato

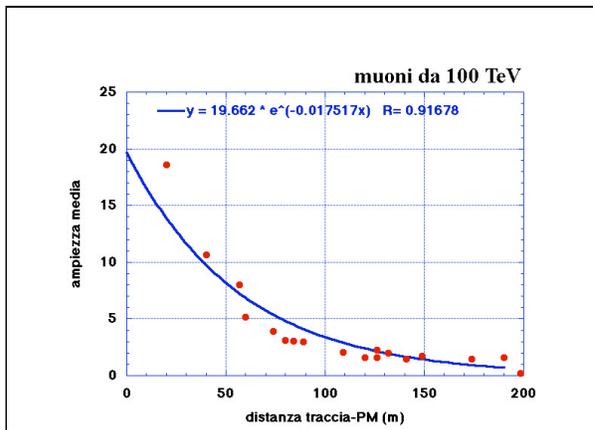
Avendo assunta, in un apparato del volume nominale di  $1 \text{ km}^3$ , come vincolante la limitazione del numero di PM, fissato a meno di 5000, una struttura non omogenea dell'apparato mi sembra obbligata in base ai seguenti motivi:

- un reticolo omogeneo porterebbe ad 1 PM ogni  $2 \times 10^5 \text{ m}^3$ , troppo dispersi per una accettabile efficienza di acquisizione ed analisi;
- in una struttura non omogenea anche in presenza di una sensibile frequenza di segnali casuali di fondo,  $^{40}\text{K}$ , e' possibile costruire criteri di trigger che indichino l'esistenza locale di un candidato elemento di traccia;
- sempre localmente e' possibile costruire stringenti criteri di coerenza spazio-temporali che permettano la reiezione di un considerevole numero di segnali di fondo prima della ricostruzione geometrica di una candidata traccia, per altro impossibile se il numero dei segnali di fondo e' preponderante rispetto ai segnali di traccia.

Per motivi di ovvia simmetria, e sempre in ossequio alla richiesta di minimizzare il numero di PM, l'apparato si presume omogeneo nella sua struttura discreta.

Viene pertanto assunta una struttura di apparato composta di elementi verticali, torri, tutti uguali ed equispaziati.

La distanza fra gli elementi verticali, passo delle torri, viene aprioristicamente fissata a 200 m in base alla richiesta che una traccia che passi fra due torri vicine abbia sempre una buona probabilita' di essere vista da almeno una delle due. Il valore citato dipende, ovviamente, dalle caratteristiche di trasparenza dell'acqua.



**Figura 1** – Ampiezza media dei segnali nei PM di un piano in funzione della distanza di questo dalla traccia. Le distanze sono mediate sulle posizioni dei singoli PM e non tengono conto delle orientazioni della sbarra che li sorregge.

La distanza fra i PM di una torre e la loro localizzazione deve tener conto della seguente circostanza:

la definizione di un trigger locale, consistente in una predefinita coincidenza temporale fra due o piu' segnali di PM, deve avere il minor tempo risolutivo possibile per limitare i trigger costruiti dalle casuali; tale tempo risolutivo viene determinato dalla distanza dei PM che formano il trigger.

Sulla base di quanto su detto, l'apparato che ho estensivamente simulato e testato e' formato da 64 torri con distanze reciproche di 200 m e ciascuna torre porta 64 PM posti, a 4 a 4, alle estremita' di sbarre lunghe 20 m e con distanze verticali di 40 m.

Nessun tentativo e' stato da me fatto di variare la disposizione dei PM sulla sbarra o la loro orientazione, ma ritengo che tali variazioni non cambino sostanzialmente le conclusioni che esporro'.

### Simulazione e suoi limiti

Il programma di simulazione usato e' il classico OPNEMO che, prescindendo da ulteriori errori non ancora trovati, ha i seguenti limiti:

simula solo tracce di muoni generate all'esterno del volume dell'apparato;

la trattazione della luce emessa dagli sciame generati dal muone e' non completamente corretta e non testata;

la luce emessa non ha la corretta velocita' di propagazione e non subisce scattering nel suo percorso;

la descrizione della risposta del PM non e' sufficientemente dettagliata.

Nonostante le limitazioni citate, ritengo che la loro influenza sulle conclusioni che verranno riportate possano essere per il momento ritenute di seconda approssimazione.

### Considerazioni generali sull'analisi

L'introduzione dei segnali di fondo in un evento-traccia generato avviene nel seguente modo:

- in un intervallo di tempo pari alla lunghezza temporale della traccia aumentato da entrambe le parti di un tempo pari alla lunghezza dell'apparato vengono collocati random segnali casuali in numero compatibile con la frequenza del fondo;
- vengono in tal modo creati anche casi in cui in un PM sono presenti sia un segnale di traccia che un segnale di fondo; nella presente fase di analisi i segnali di fondo sono identificabili;
- correlazioni temporali fra i segnali di fondo, dovute sia ad eventuali coincidenze reali da  $^{40}\text{K}$ , sia da bioluminescenza, non sono per ora considerate.

La soglia di rivelazione, per tutti i segnali, e' posta a 0.25 fotoelettroni.

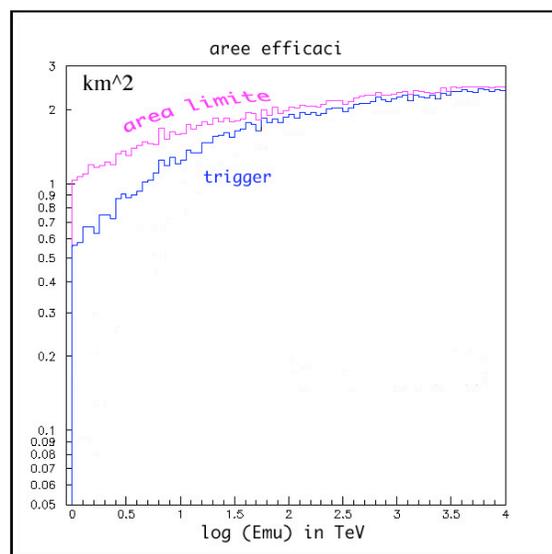
### Definizione del trigger e costruzione dell'evento

Come trigger, cioe' condizione indicativa della presenza di segnali di traccia in una torre, dopo vari tentativi, viene definita una precisa correlazione spazio-temporale fra i segnali di 3 o 4 PM situati in due piani contigui; la presenza cioe' di una candidata traccia nel flusso continuo di segnali proveniente da una torre e' segnalata dal realizzarsi della correlazione fissata.

E' evidente che una traccia puo' produrre piu' trigger nella stessa torre e/o in torri diverse: ciascun trigger viene considerato indipendente e seme di una traccia, solo in fase di event-building le varie parti della stessa traccia vengono messe assieme.

Questo accorgimento permette di trattare separatamente l'una dall'altra le tracce eventualmente presenti in un evento multiplo.

**Figura 2** – Area efficace di trigger.

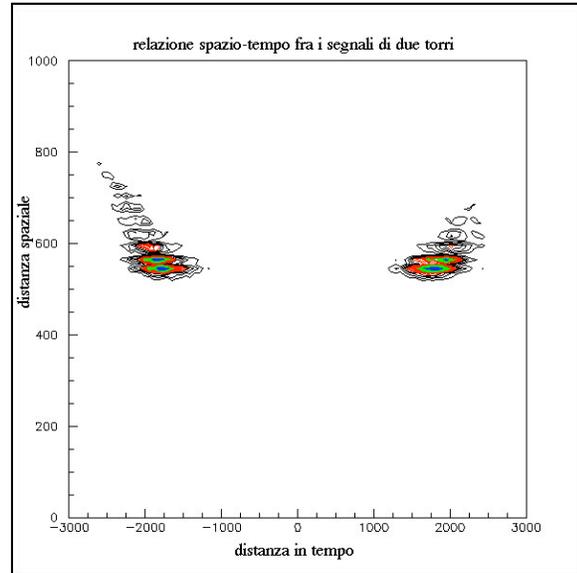


L'efficienza del trigger per una traccia vera e' riportata in Figura 2; come area limite si intende la massima area ottenibile se si richiede che la traccia produca almeno 5 segnali in tutto l'apparato: essa dipende solo dalla struttura dell'apparato, dalla soglia di rivelazione e dalla trasparenza dell'acqua.

Il calcolo delle aree in figura e' stato ovviamente eseguito senza l'introduzione del fondo; l'introduzione del fondo nel file di tracce produce un modesto aumento dei trigger ma l'effettiva frequenza di trigger casuali va misurata applicando il criterio ad un file di soli segnali di fondo sufficientemente ampio. La situazione per cui nel flusso di dati dall'apparato i segnali di vera traccia sono una minima percentuale e' quella realisticamente attendibile.

Il collezionamento di tutti i segnali teoricamente appartenenti alla traccia che ha prodotto il trigger avviene, nella fase di event-building, aprendo delle finestre temporali nelle altre torri, diverse da quella del trigger, il cui posizionamento dipende solo dalla distanza da quella del trigger e la cui larghezza e' uguale per tutte.

Nella Figura 3 e' mostrata come esempio la correlazione spazio-tempo fra i tutti i segnali di traccia in una torre distante 540 metri da quella in cui si verifica il trigger ed il tempo del trigger. I due raggruppamenti separati riflettono i due possibili versi di percorrenza della traccia.



**Figura 3** – Relazione spazio tempo fra i segnali di traccia in una torre definita ed il tempo del trigger.

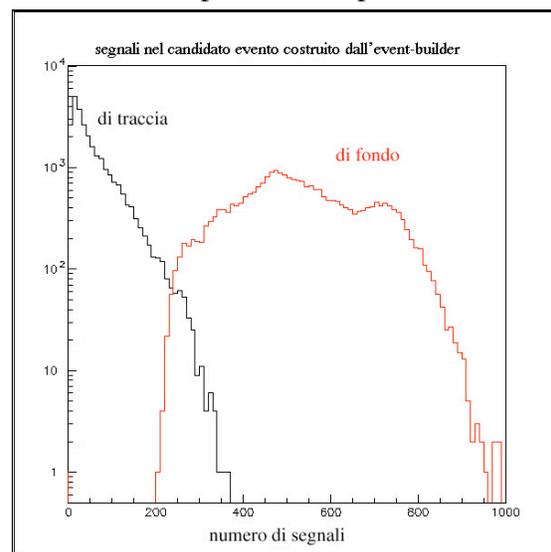
Tutto il procedimento di identificazione di un trigger in una torre e di event-building puo' di principio essere eseguito dall'elettronica di front-end in tempo reale. Dopo di cio' viene trascritto il candidato evento.

#### Segnali di fondo e loro riduzione

Il candidato evento trascritto dall'event-builder contiene, oltre ai veri segnali di traccia, se questa e' presente, anche una preponderante quantita' di segnali casuali, Figura 4.

**Figura 4** – Distribuzione dei numeri di segnali di traccia e di fondo presenti nel candidato evento. Le tracce analizzate hanno energia variabile fra 10 e 1000 TeV.

E' evidente che nessun criterio di ricostruzione geometrica applicato a questo stadio puo' portare a risultati.

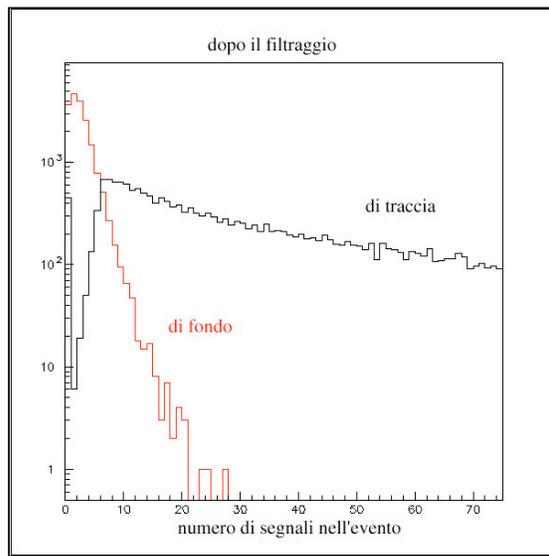


Ho costruito un criterio di filtraggio locale che riduca il numero di segnali casuali. Esso funziona così:

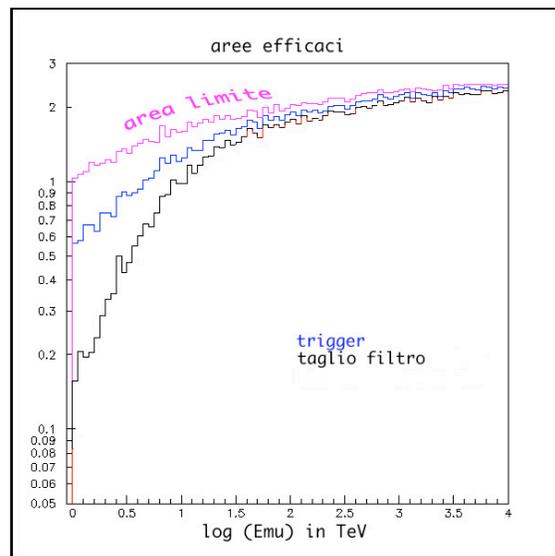
- ad ogni segnale di una torre attribuisce un fattore di qualità dipendente dalla sua corretta correlazione spazio-temporale con gli altri segnali contenuti in un volume di torre opportuno; il criterio di correlazione è ovviamente meno stringente di quello utilizzato nella definizione di trigger;
- vengono conservati nell'analisi solo i segnali con fattore di merito superiore ad una certa soglia;
- il volume di applicazione del criterio ed il valore di soglia di merito sono stati ottimizzati sull'intero campione di eventi.

Deve essere evidente che l'applicazione del filtraggio descritto produce anche una minima riduzione dei segnali genuini di traccia, sia che, richiedendo segnali "clusterizzati" in ogni torre, aumenta il numero minimo di segnali di traccia necessari per proseguire l'analisi riducendo le aree efficaci.

L'effetto del filtraggio è sintetizzato nelle Figure 5 e 6.

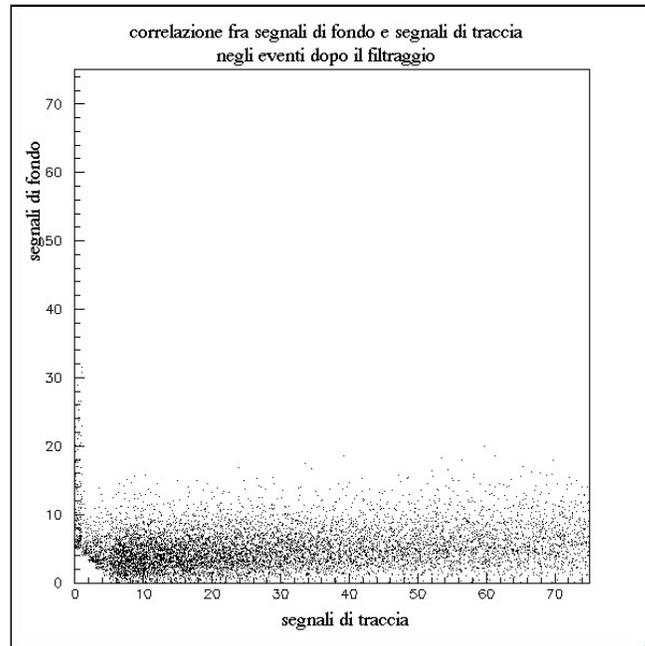


**Figura 5** – Effetto del filtraggio: si confronti con la Figura 4. Gli eventi con zero segnali di traccia sono quelli in cui il trigger è stato costruito dai segnali di fondo.



**Figura 6** – Effetto del filtraggio sull'area efficace: sotto i 10 TeV la riduzione è sensibile.

Dalla successiva Figura 7, nella quale è riportata la relazione fra segnali di fondo e segnali di traccia in ogni evento, si ricava che per evitare che anche dopo il filtraggio il fondo sia numericamente superiore alla traccia bisogna tagliare gli eventi con un numero totale di segnali inferiore ad un valore prefissato. L'area efficace viene quindi ulteriormente ridotta alle energie minori.



**Figura 7** – Correlazione fra segnali di fondo e segnali di traccia in eventi filtrati.

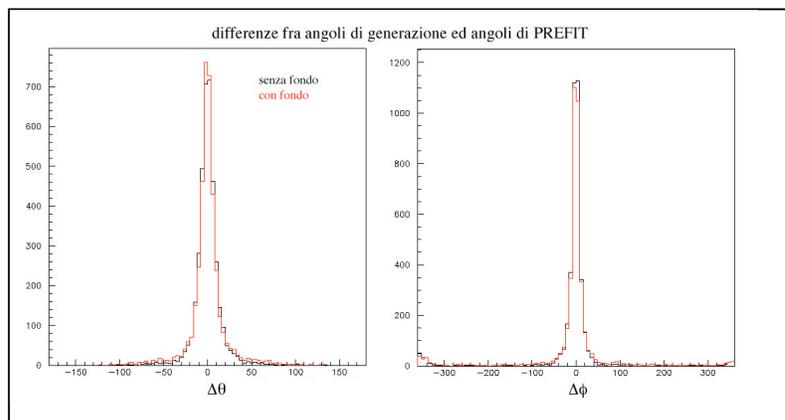
A questo punto abbiamo costruito un insieme di candidati eventi nei quali e' quasi certa la presenza di una traccia ed il numero di segnali spuri non dovrebbe inficiare il prosieguo dell'analisi.

#### Ricostruzione della traccia nello spazio

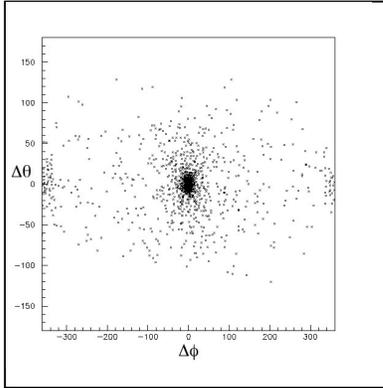
La ricostruzione spaziale della traccia verra' effettuata con una procedura di minimizzazione a partire dai valori angolari desunti da un prefit. Le dimensioni dell'apparato e la sua struttura discreta offrono un metodo rapido di effettuazione del prefit nel caso in cui la traccia interessa almeno due torri.

Ho calcolato i parametri di una retta semplicemente unendo il baricentro spaziale del trigger con quello del cluster di segnali nella torre piu' distante da esso. La definizione di cluster e' analoga, ma non identica, a quella utilizzata nel filtraggio del fondo.

I risultati raggiunti sono riportati nelle Figure 8.



**Figura 8a,8b** – Precisione del prefit. Le energie analizzate sono fra 10 e 1000 TeV.



**Figura 8c** – Relazione fra le precisioni in  $\Delta\theta$  e  $\Delta\phi$  del prefit.

Naturalmente la necessita' di avere almeno due torri causa una perdita di eventi, anche se di piccola entita', soprattutto alle energie minori e vicino alla verticale. In tali casi e' necessario pensare qualche altro algoritmo.

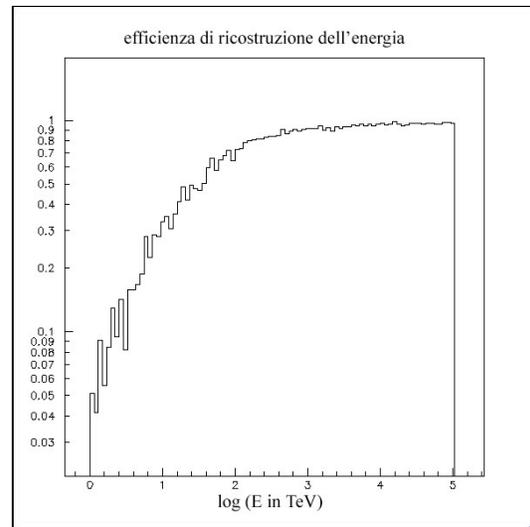
Inoltre, se l'evento interessa solo due torri contigue, cioe' alla distanza minima, la precisione del prefit e' scadente; anche questi casi sono una piccola percentuale del totale.

#### Ricostruzione dell'energia della traccia

La grande variabilita' delle ampiezze di segnale e del numero di segnali dovute alla variabilita' della distanza traccia-PM, conseguenza inevitabile della struttura dispersa dell'apparato, non consente di ricostruire l'energia depositata da questa utilizzando in maniera diretta la carica totale o la carica media. Per un uso corretto di tali variabili e' indispensabile ricostruire prima la posizione della traccia nello spazio.

Ciononostante e' possibile avere una prima stima dell'energia usando ad esempio come indicatore la percentuale di segnali superiori ad un certo valore. Il criterio si applica, ovviamente, dopo aver filtrato i segnali di fondo. Anche questo procedimento necessita di un taglio sul tipo di eventi e la sua efficienza, relativa al totale degli eventi che superano il filtraggio e' riportata in Figura 9.

**Figura 9** – Efficienza del metodo di ricostruzione dell'energia rispetto agli eventi filtrati.



La differenza fra energia ricostruita ed energia vera della traccia e' mostrata in Figura 10: le energie del campione vanno da 10 a 10000 TeV. La asimmetria a destra della distribuzione deriva dalla sopravvalutazione delle energie minori.

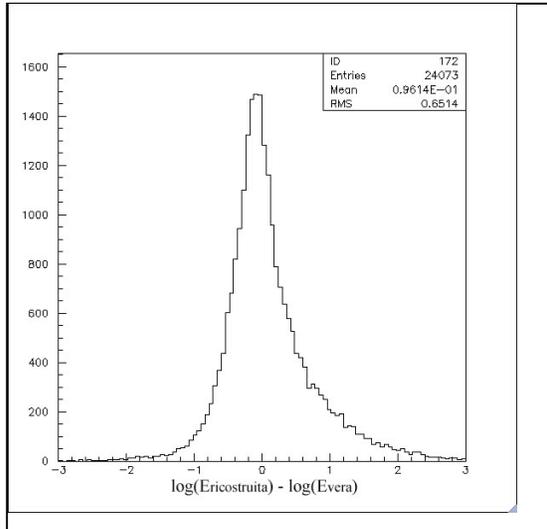
La linearita' della ricostruzione e riportata in Figura 11: le due serie di dati si riferiscono a due metodi leggermente diversi.

Appaiono evidenti due fatti:

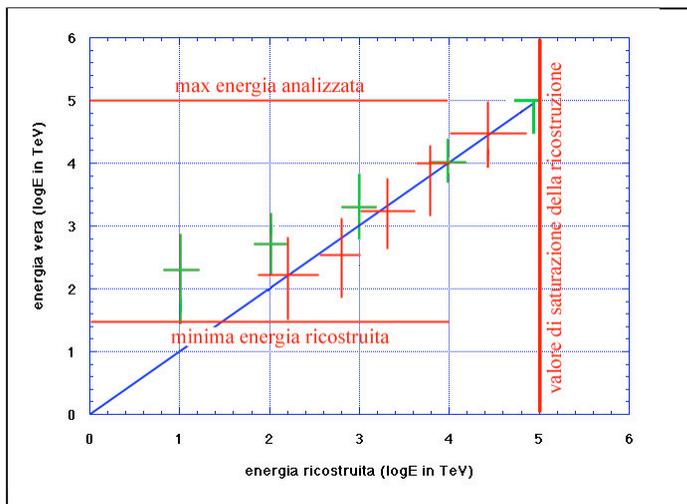
- non viene ricostruito nessuna energia inferiore a circa 30 TeV, in quanto i segnali

- superiori al valore fissato non sono sufficienti;
- il metodo satura quando tutti i segnali sono superiori al valore fissato; con i parametri utilizzati questo avviene a 10000 TeV.

Variazioni dei parametri di ricostruzione sono pertanto necessari nelle zone estreme di energia ricostruita.

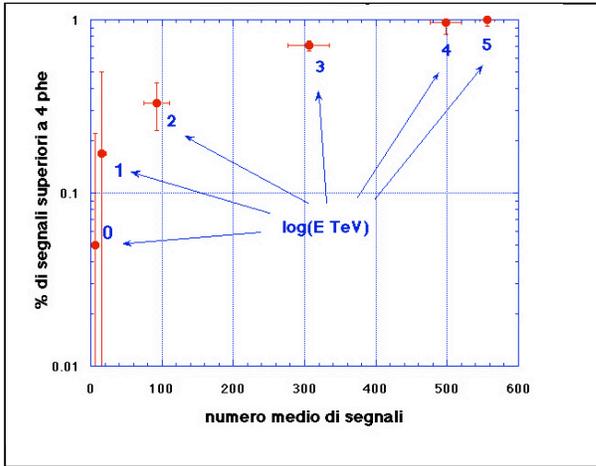


**Figura 10** – Distribuzione della differenza fra  $E_{ricostruita}$  ed  $E_{vera}$ . Sono inclusi tutti gli eventi ricostruibili secondo l'efficienza riportata in Figura 9.



**Figura 11** – Relazione fra  $E_{ric}$  ed  $E_{vera}$ . Gli errori in  $x$  rappresentano le larghezze dei bin in  $E_{ric}$ , quelli in  $y$  i rms delle distribuzioni, in ciascun bin, di  $E_{vera}$ . E' anche indicato se tali distribuzioni sono asimmetriche ed in quale verso.

Ho fatto anche un tentativo di studio di indicatori di energia su un campione di tracce sulle quali ho potuto correggere i segnali per l'effetto distanza traccia-PM. Tale campione e' molto parziale in quanto, non disponendo della procedura di ricostruzione spaziale, ho usato solo tracce di geometria definita. Come appare nella Figura 12, sembra abbastanza facile separare le tracce in zone di energia usando come indicatori la percentuale di segnali alti ed il numero totale di segnali. Anche questo metodo comincia a funzionare nell'intorno di 100 TeV ma potrebbe evitare la saturazione superiore. E' interessante osservare che tracce di energia bassa, anche se attraversano tutto l'apparato nella stessa geometria delle altre, producono un numero molto inferiore di segnali.



**Figura 12** – *Correlazione fra percentuale di segnali grandi e numero di hit. I segnali sono corretti per la distanza traccia-PM.*

## CONCLUSIONE

Mi sono convinto, e credo di aver in buona parte dimostrato, che

1. un apparato del volume dell'ordine di  $1 \text{ km}^3$  se vincolato dalla necessita' di limitare il numero di PM deve avere una struttura discreta, ovvero a torri nella nomenclatura corrente
2. la torre deve avere una struttura adatta a costruire un trigger locale di traccia in grado di non essere saturato da trigger casuali generati dal fondo statistico presente
3. un trigger basato su configurazione spazio-temporale definita in una zona ristretta della torre e' possibile con elevata efficienza sulle tracce e poco contaminato da casuali, almeno nel limite di 50-60 kHz di frequenza di segnali casuali che e' stato simulato, anche utilizzando una soglia di ampiezza di segnale a livello del fotoelettrone
4. dal punto di vista hardware un trigger di tale tipo appare realizzabile in tempo reale nell'elettronica di front-end e porta alla costruzione di un "evento" in cui e' presente per intero una candidata traccia; lo schema ipotizzato costruisce un evento, nel senso precisato prima, per ogni traccia presente in un evento multiplo reale purché essa realizzi un trigger
5. nell'evento costruito in acquisizione e' possibile applicare un criterio di reiezione locale del fondo che elimini la quasi totalita' dei segnali non appartenenti alla traccia, nei limiti di frequenza citati, e non porti a sensibili perdite di segnali di traccia
6. dopo la pulizia e' possibile realizzare un prefit con buona efficienza e con accettabile precisione se la traccia interessa almeno due torri; e' prevedibile che la successiva accurata ricostruzione avra' una eccellente risoluzione
7. anche un semplice algoritmo basato sulla lunghezza di traccia e sul numero di segnali permette una approssimativa classificazione delle tracce in base alla loro energia; l'uso dei parametri geometrici ricostruiti e delle singole distanze traccia-PM dovrebbe portare ad una accettabile risoluzione anche nella ricostruzione degli spettri in energia; la perdita di efficienza del metodo alle energie inferiori a 10 TeV potrebbe essere sensibile

Nell'apparato analizzato, o in altri con la stessa filosofia costruttiva, la **catena completa** di analisi

**TRIGGER → ACQUISIZIONE → EVENT BUILDER → REIEZIONE  
FONDO → RICOSTRUZIONE GEOMETRICA → RICOSTRUZIONE  
ENERGIA**

porta ad elevate aree efficaci (finali) per tracce utilizzabili in indagini di fisica se di energia maggiore a circa 10 TeV.

**Ogni ulteriore indagine deve partire da strumenti di simulazione corretti e perfezionati, vedasi p.e. la nota 1, ed inglobare la completa generazione di muoni da neutrini; questo e' viepiu' vero se si intende studiare altri schemi di apparato.**

### NOTE

1- la simulazione usata ha trattato solo tracce di muoni, non e' sufficientemente corretta nella descrizione dello sviluppo degli sciami, nell'uso della velocita' della luce e non include il suo scattering

4- non penso ragionevole trasportare a terra tutti i segnali prodotti dai rivelatori dell'apparato e procedere ivi alla ricerca del trigger ed alla costruzione dei candidati eventi

5- qui risulta evidente la necessita' della struttura a torri

6- data l'enorme variabilita' delle distanze traccia-PM non e' possibile utilizzare in questa fase il parametro ampiezza del segnale