

# STUDIO DEI MUONI NEGLI SCIAMI ATMOSFERICI ESTESI E LORO CARATTERIZZAZIONE

## ESERCITAZIONE



M. P. Panetta, S. Pisano

Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi"

# Simulare i Raggi Cosmici Secondari

---

- Le simulazioni dei raggi cosmici del **Progetto EEE** sono realizzate con le risorse di calcolo presenti al **CNAF** di Bologna.
- Sono realizzate con il programma **CORSIKA**, attentamente configurato per usare i modelli di iterazione tra particelle più attuali (ad esempio tenendo conto dei dati misurati a LHC).



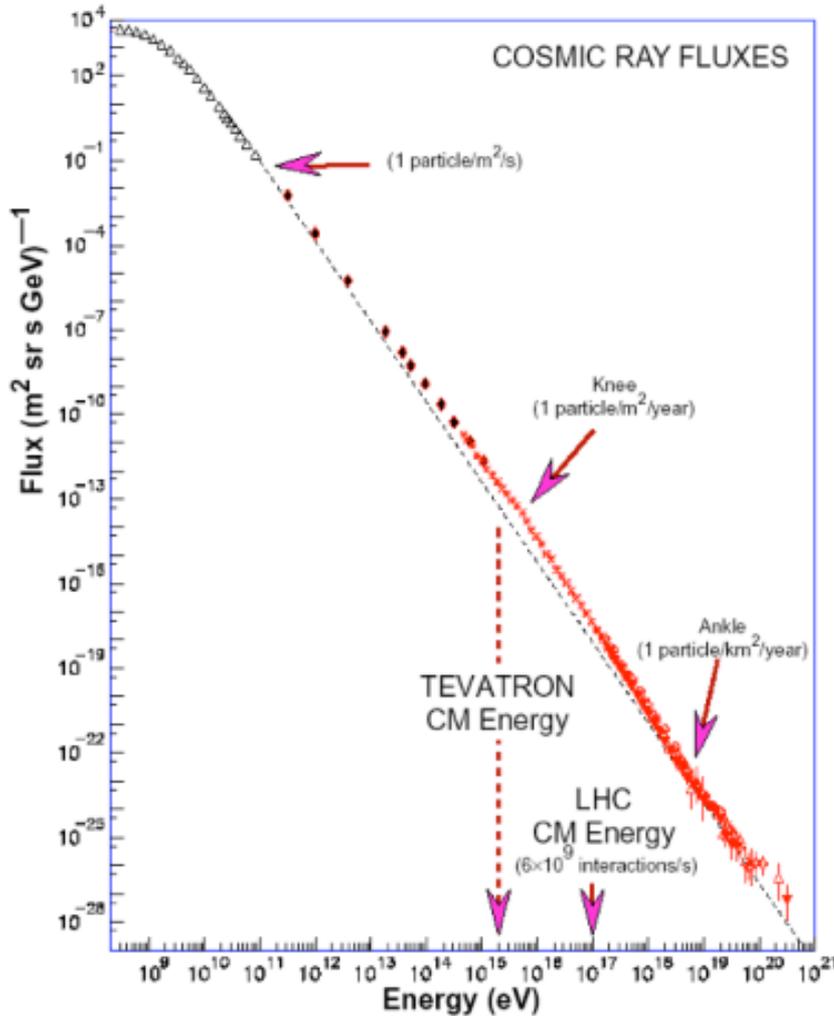
# Simulare i Raggi Cosmici Secondari

Si deve tenere in conto:

- Come è fatta l'atmosfera
- Come varia il campo magnetico terrestre
- Altezza del terreno a cui arrivano
- Tipo di particella del primario
- Energia del primario
- Angolo di incidenza con l'atmosfera
- Molti altri dettagli



# Simulare i Raggi Cosmici Secondari



In particolare attenzione a:

- Energia del primario
- Tipo di particella
- Inclinazione del primario

Il primo sciame simulato  
mostratovi:

Protone

Energia =  $10^{19}$  eV

$\theta = 45^\circ$



# Studiare i Muoni in un EAS

## SOFTWARE

Google sheet (spraedsheet)

Pagina *Indico*

- 2 Cartelle: ogni cartella contiene 6 sciame simulati con Corsika; per una cartella il primario è un protone, per l'altra un nucleo di Ferro.
- Ogni cartella contiene 6 file: 6 sciame generati con 3 differenti angoli di arrivo  $\theta$  campionati a 2 altitudini [0 m *s.l.m.* e 1000 m *s.l.m.*]
- In ogni file sono descritti tutti i muoni generati nello sciame.

### COSA FARE:

Ogni gruppo:

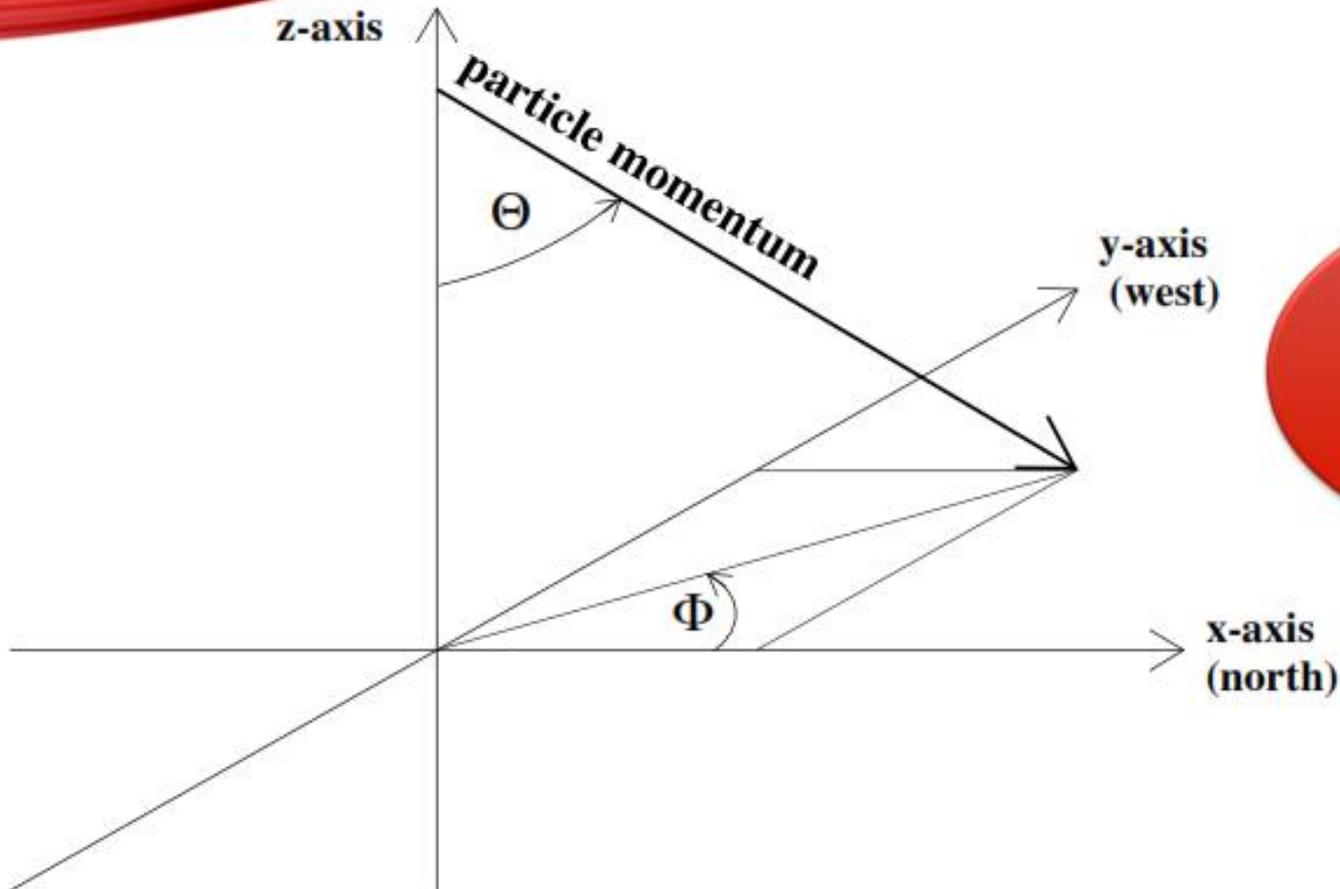
- Sceglie un primario (ogni scuola del gruppo studia 1 sciame alle 2 altitudini).

Primario : Energia =  $10^{14}$  eV     $\vartheta = ?$     altezza  $h = ?$

- Determina l'angolo di arrivo del **PRIMARIO** che ha generato lo sciame di muoni
- Determina quale sia lo sciame campionato a  $h = 1000$  m e ad  $h = 0$  m
- Seglie lo sciame più vicino all'altezza sul livello del mare della sua città, e ne studia **la Distribuzione laterale e temporale**. (Può bastare un EAS per gruppo)

Ogni gruppo prepara un'unica relazione in cui discute e confronta i risultati.

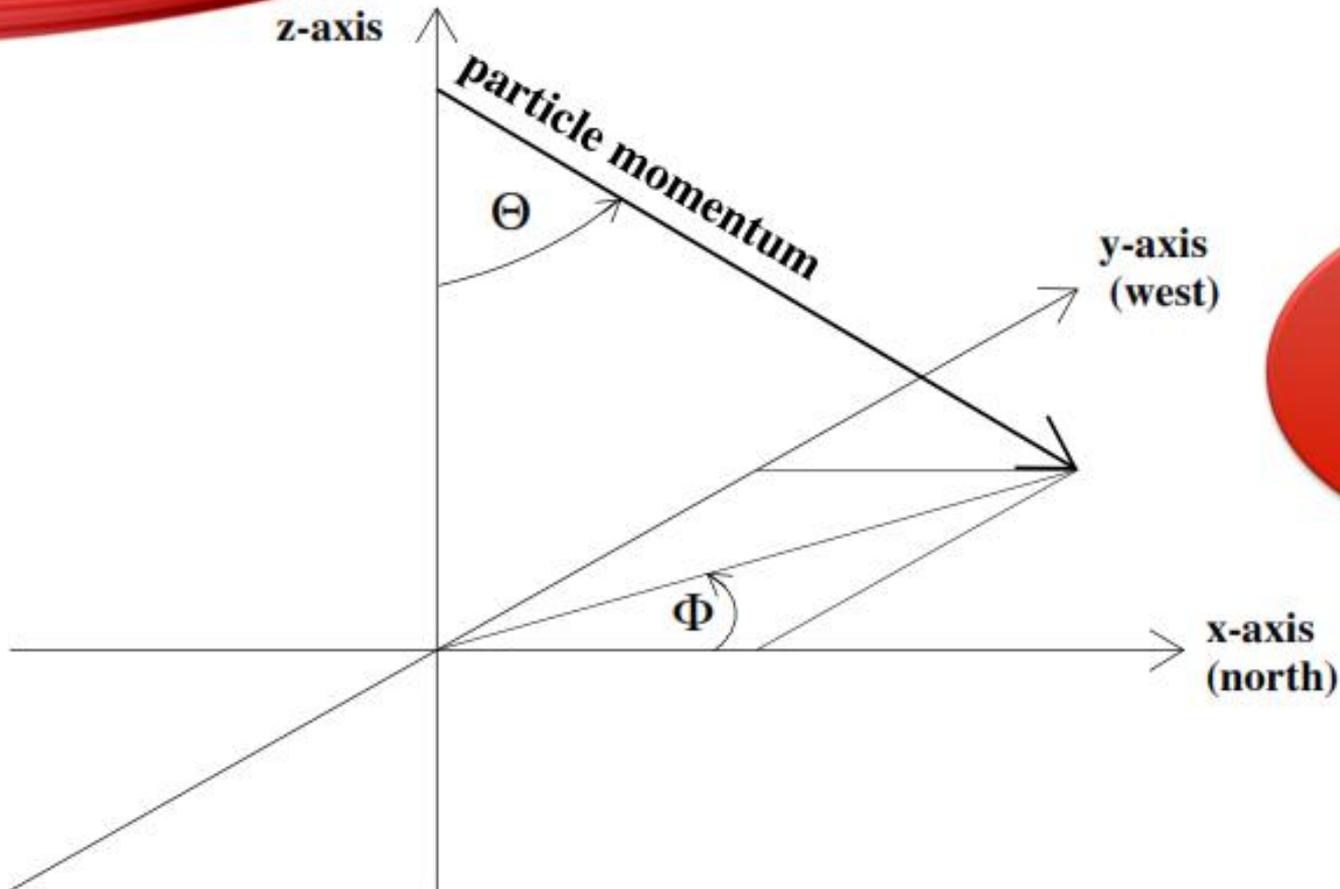
# 1. Studiare i Muoni in un EAS: *Stimare $\theta$*



Attenzione  
al sistema di  
riferimento !!

## Come misurare l'angolo $\vartheta$

# 1. Studiare i Muoni in un EAS: *Stimare $\theta$*



Attenzione  
al sistema di  
riferimento !!

## Calcolare la direzione del primario

Ogni particella simulata ha direzione in coordinate locali, individuate dall'angolo di zenit e dall'angolo di azimut [  $\theta$  ,  $\varphi$  ] (simili alle coordinate orizzontali, altezza ed azimut).

# 1. Stimare $\theta$

## Struttura dei file di dati

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	13467,22	-28425,45	0,67	-0,15	1,03	59329,41	100000,00				
2	34799,75	41608,98	0,48	0,10	0,70	59791,70	100000,00				
3	-23070,60	2393,20	2,81	0,02	5,80	58668,65	100000,00				
4	67147,49	-82929,23	0,21	-0,07	0,23	60836,26	100000,00				
5	70674,19	-30980,66	0,54	-0,09	0,67	60484,86	100000,00				
6	-6466,33	887,39	4,54	0,07	8,30	58924,32	100000,00				
7	40320,95	-27201,51	0,94	-0,15	1,21	59840,41	100000,00				
8	23341,98	-20744,27	0,40	-0,04	0,59	59522,33	100000,00				
9	37173,75	17298,60	1,50	0,14	2,07	59725,27	100000,00				
10	52456,07	23645,21	1,10	0,11	1,39	60050,57	100000,00				
11	-2124,08	5077,29	0,34	0,01	0,56	59061,50	100000,00				
12	18093,24	583,44	5,17	0,02	8,09	59344,86	100000,00				
13	10816,37	10187,78	3,00	0,19	4,86	59221,67	100000,00				
14	64998,23	6699,65	0,41	0,02	0,50	60356,12	100000,00				
15	2929,78	8638,60	2,49	0,14	4,24	59085,18	100000,00				
16	-3922,78	-7079,44	6,48	-0,38	11,55	58967,74	100000,00				
17	6992,05	-1787,14	1,75	-0,04	2,74	59153,32	100000,00				
18	3102,21	26455,37	0,10	0,04	0,17	59414,87	100000,00				
19	3850,30	-3617,25	0,70	-0,02	1,19	59109,63	100000,00				
20	457,69	-8747,02	4,48	-0,38	7,70	59043,23	100000,00				
21	798,03	-3783,51	0,68	-0,02	1,10	59065,43	100000,00				
22	-14682,89	16367,14	0,14	0,04	0,21	58995,68	100000,00				

$x$  (cm)     $y$  (cm)     $P_x$  (GeV)     $P_y$  (GeV)     $P_z$  (GeV)     $t_\mu$  (ns)     $E_{pr}$  (GeV)

*Ovest* →

*Nord* →

$\mu s = 10^3 ns$

*Energia del Primario che ha generato lo sciame*

# 1. Stimare $\theta$

## Struttura dei file di dati

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	13467,22	-28425,45	0,67	-0,15	1,03	59329,41	100000,00				
2	34799,75	41608,98	0,48	0,10	0,70	59791,70	100000,00				
3	-23070,60	2393,20	2,81	0,02	5,80	58668,65	100000,00				
4	67147,49	-82929,23	0,21	-0,07	0,23	60836,26	100000,00				
5	70674,19	-30980,66	0,54	-0,09	0,67	60484,86	100000,00				
6	-6466,33	887,39	4,54	0,07	8,30	58924,32	100000,00				
7	40320,95	-27201,51	0,94	-0,15	1,21	59840,41	100000,00				
8	23341,98	-20744,27	0,40	-0,04	0,59	59522,33	100000,00				
9	37173,75	17298,60	1,50	0,14	2,07	59725,27	100000,00				
10	52456,07	23645,21	1,10	0,11	1,39	60050,57	100000,00				
11	-2124,08	5077,29	0,34	0,01	0,56	59061,50	100000,00				
12	18093,24	583,44	5,17	0,02	8,09	59344,86	100000,00				
13	10816,37	10187,78	3,00	0,19	4,86	59221,67	100000,00				
14	64998,23	6699,65	0,41	0,02	0,50	60356,12	100000,00				
15	2929,78	8638,60	2,49	0,14	4,24	59085,18	100000,00				
16	-3922,78	-7079,44	6,48	-0,38	11,55	58967,74	100000,00				
17	6992,05	-1787,14	1,75	-0,04	2,74	59153,32	100000,00				
18	3102,21	26455,37	0,10	0,04	0,17	59414,87	100000,00				
19	3850,30	-3617,25	0,70	-0,02	1,19	59109,63	100000,00				
20	457,69	-8747,02	4,48	-0,38	7,70	59043,23	100000,00				
21	798,03	-3783,51	0,68	-0,02	1,10	59065,43	100000,00				
22	-14682,89	16367,14	0,14	0,04	0,21	58995,68	100000,00				

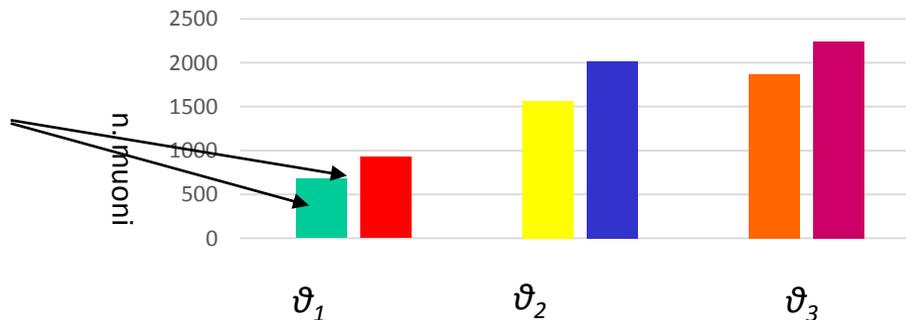
$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

E per semplificare i calcoli, si sceglie di farli un sistema di riferimento, molto comodo in cui si pone

$x$  (cm)     $y$  (cm)     $P_x$  (GeV)     $P_y$  (GeV)     $P_z$  (GeV)     $t_\mu$  (ns)     $E_{pr}$  (GeV)     $c = 1$

Grafico: n. partecle negli sciami

Num. Muoni alle differenti altezze e differenti angoli



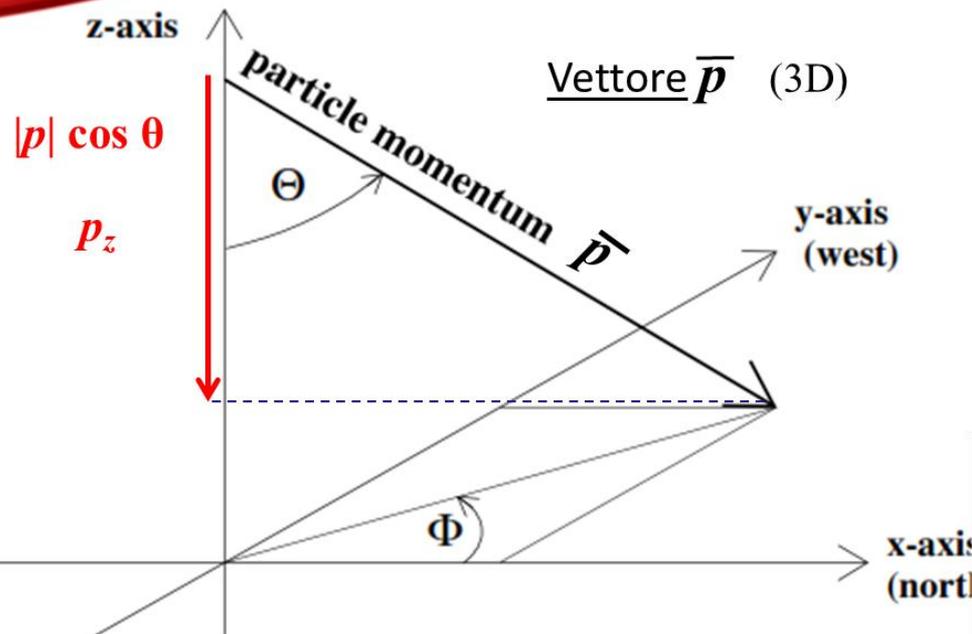
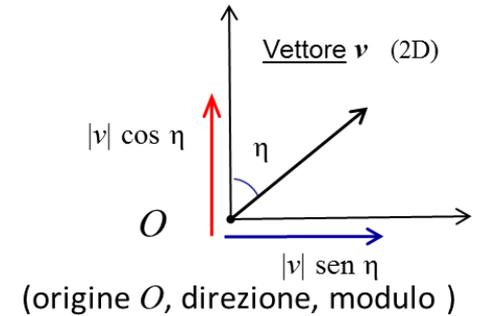
# Calcolare la direzione del primario

I muoni hanno direzione quasi parallela alla direzione del raggio cosmico primario, entro fluttuazioni statistiche di pochi gradi. Possiamo quindi approssimare la direzione di arrivo del primario alla media della direzione di arrivo dei muoni.

Come calcolare **la direzione di arrivo** del muone?

Abbiamo le 3 componenti della quantità di moto  $p_x, p_y, p_z$

Calcoliamo il **valor medio** della direzione di  $p_z$



$$p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}$$

$$p_x = \dots \quad p_y = \dots$$

$$p_z = |p| \cos \theta \quad e_{pz} = \frac{p_z}{|p|} = \cos \theta$$

$$\theta \text{ (rad.)} = \arccos(e_{pz})$$

Attenzione: gli angoli sono calcolati in Radianti!!

$M$  valor medio delle direzioni  $\theta_i$  di arrivo dei muoni nello sciame

$n$  = num. muoni

$$M = \frac{\theta_1 + \theta_1 + \dots + \theta_n}{n}$$

# Calcolare la direzione del primario

## Un passo in più!?

Per ottenere un valore più preciso, si può considerare che maggiore è l'energia del muone, più è probabile che esso sia collineare al primario.

Potremmo quindi fare in modo che i muoni con energia maggiore diano un contributo maggiore alla stima della direzione di arrivo  $\theta$  di ogni muone.

$n$  = num. muoni

$$M = \frac{\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n}{n}$$



Questo procedimento si chiama media pesata (qualcuno la chiama «media ponderata») Poiché ad ogni valore si dà un peso " $w$ " differente.

Tutti contribuiscono  
i più collineari di più

EQUO & GIUSTO

$$M_w = \frac{\theta_1 w_1 + \theta_2 w_2 + \dots + \theta_n w_n}{(w_1 + \dots + w_n)}$$



Come peso scelgo l'Energia di ciascun muone.

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

Per semplificare i calcoli, si sceglie di farli in un sistema di riferimento, molto comodo in cui si pone  $\mathbf{c} = \mathbf{1}$  e quindi  $E = \sqrt{m^2 + p^2}$

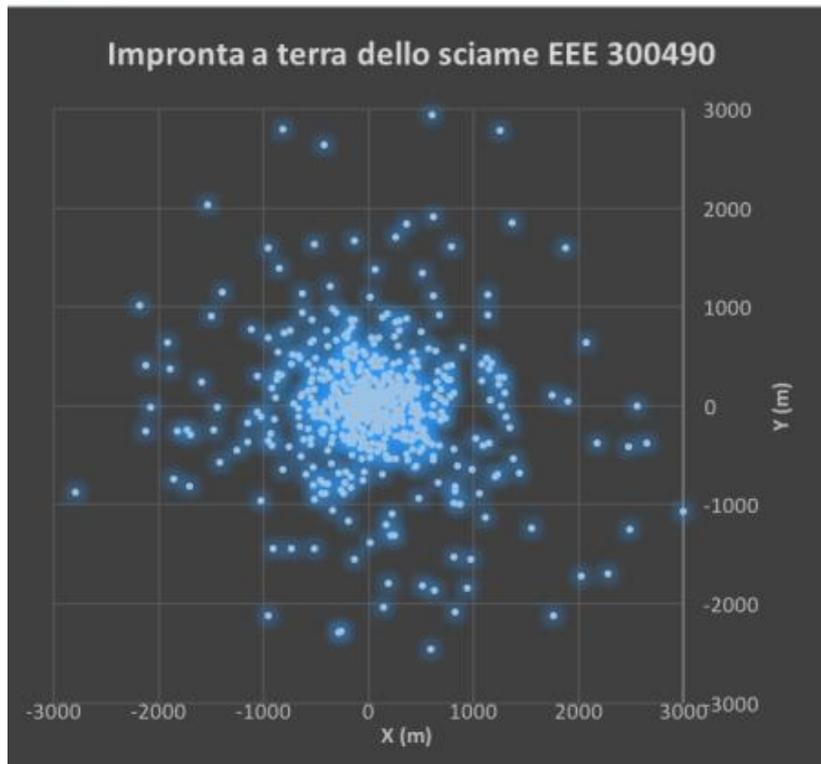
$$(m_\mu = 106 \text{ MeV}/c^2)$$

Varia, stimandolo nei due modi, l'angolo di arrivo  $\theta$  ??

## 2. Studiare i Muoni in un EAS: *Distribuzione Laterale*

Sviluppo laterale dello Sciame intorno alla direzione di arrivo del primario:  
Determinare la «Distribuzione Laterale» dello sciame di muoni

### IMPRONTA DEI MUONI A TERRA



1. Convertire le coordinate dei muoni X e Y in metri (CORSIKA usa i cm!!)
2. Fare il grafico dell'impronta a terra dei muoni

Le grandezze X e Y sono distanze dal centro della Distribuzione

## 2. Distribuzione Laterale

### Struttura dei file di dati

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	13467,22	-28425,45	0,67	-0,15	1,03	59329,41	100000,00				
2	34799,75	41608,98	0,48	0,10	0,70	59791,70	100000,00				
3	-23070,60	2393,20	2,81	0,02	5,80	58668,65	100000,00				
4	67147,49	-82929,23	0,21	-0,07	0,23	60836,26	100000,00				
5	70674,19	-30980,66	0,54	-0,09	0,67	60484,86	100000,00				
6	-6466,33	887,39	4,54	0,07	8,30	58924,32	100000,00				
7	40320,95	-27201,51	0,94	-0,15	1,21	59840,41	100000,00				
8	23341,98	-20744,27	0,40	-0,04	0,59	59522,33	100000,00				
9	37173,75	17298,60	1,50	0,14	2,07	59725,27	100000,00				
10	52456,07	23645,21	1,10	0,11	1,39	60050,57	100000,00				
11	-2124,08	5077,29	0,34	0,01	0,56	59061,50	100000,00				
12	18093,24	583,44	5,17	0,02	8,09	59344,86	100000,00				
13	10816,37	10187,78	3,00	0,19	4,86	59221,67	100000,00				
14	64998,23	6699,65	0,41	0,02	0,50	60356,12	100000,00				
15	2929,78	8638,60	2,49	0,14	4,24	59085,18	100000,00				
16	-3922,78	-7079,44	6,48	-0,38	11,55	58967,74	100000,00				
17	6992,05	-1787,14	1,75	-0,04	2,74	59153,32	100000,00				
18	3102,21	26455,37	0,10	0,04	0,17	59414,87	100000,00				
19	3850,30	-3617,25	0,70	-0,02	1,19	59109,63	100000,00				
20	457,69	-8747,02	4,48	-0,38	7,70	59043,23	100000,00				
21	798,03	-3783,51	0,68	-0,02	1,10	59065,43	100000,00				
22	-14682,89	16367,14	0,14	0,04	0,21	58995,68	100000,00				

$x$  (cm)     $y$  (cm)     $P_x$  (GeV)     $P_y$  (GeV)     $P_z$  (GeV)     $t_\mu$  (ns)     $E_{pr}$  (GeV)

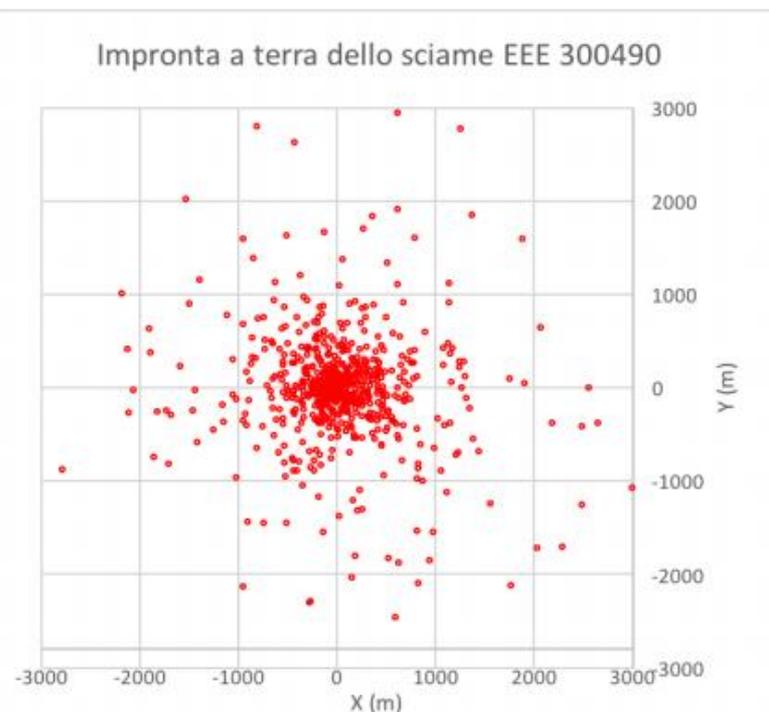
Ovest → Nord →

$\mu s = 10^3 ns$

Energia del Primario che ha generato lo sciame

## 2. Distribuzione Laterale

### I PASSAGGI NECESSARI



1. Scegliere lo sciame più vicino all'altezza sul livello del mare della propria città
2. Preparare l'immagine della città (potete usare Google Earth, Google Maps o qualsiasi cosa purchè sia in scala)
3. Rendere trasparente lo sfondo dell'impronta a terra dello sciame
4. Importare l'immagine della città, raggruppare e salvare (*attenzione all'orientamento e alla scala!*)

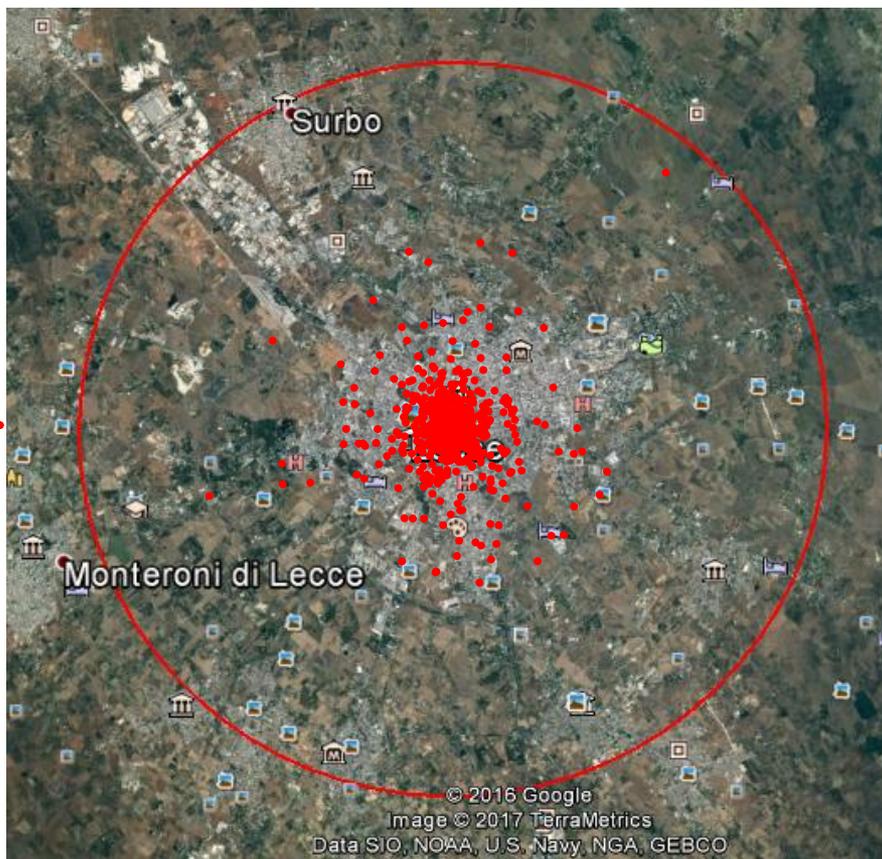
### Domanda :

A che distanza, in una città, posizionereste *dei Telescopi del Progetto EEE* per osservare uno Sciame Atmosferico Esteso come quello simulato ?

## 2. Distribuzione Laterale

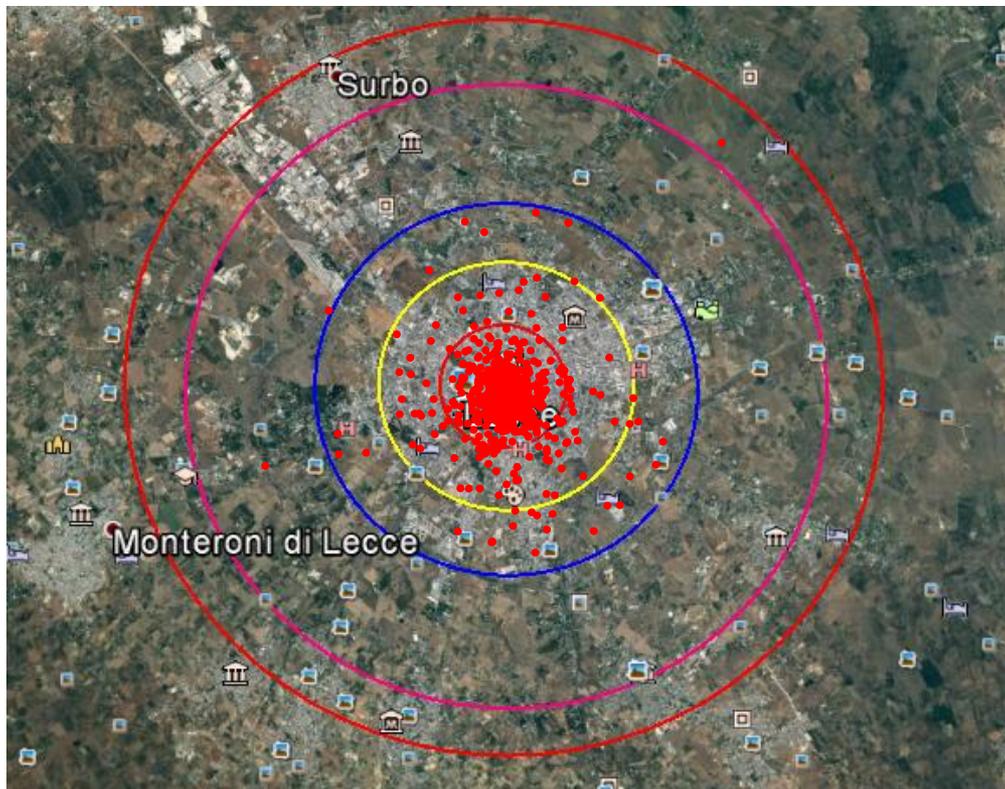
Ho scelto Lecce (50m s.l.m.), ed il mio sciame ha muoni che arrivano dal centro sino al dipartimento di Matematica e Fisica (5km..)

***Pianta della vostra città***



## 2. Distribuzione Laterale

Quante particelle hanno una distanza dal centro dello sciame...



- $< 500$  m ?
- $> 5000$  m ?
- Tra 1000 m e 2000 m ?
- ....

Calcolo:

$R$  = distanza dal centro dello sciame

Creo un istogramma che descriva la Distribuzione Laterale dello sciame

# COME SI PROCEDE

## 1. Conto il numero di muoni in ciascuna zona

- Calcolo  $R = \text{SQRT}(\text{POWER}(X;2) + \text{POWER}(Y;2))$
- Definisco gli intervalli di appartenenza
- Creo un istogramma

Google spreadsheet → Funzione «FREQUENCY»

FREQUENCY ( intervallo valori; intervallo classi in cui li rappresento)

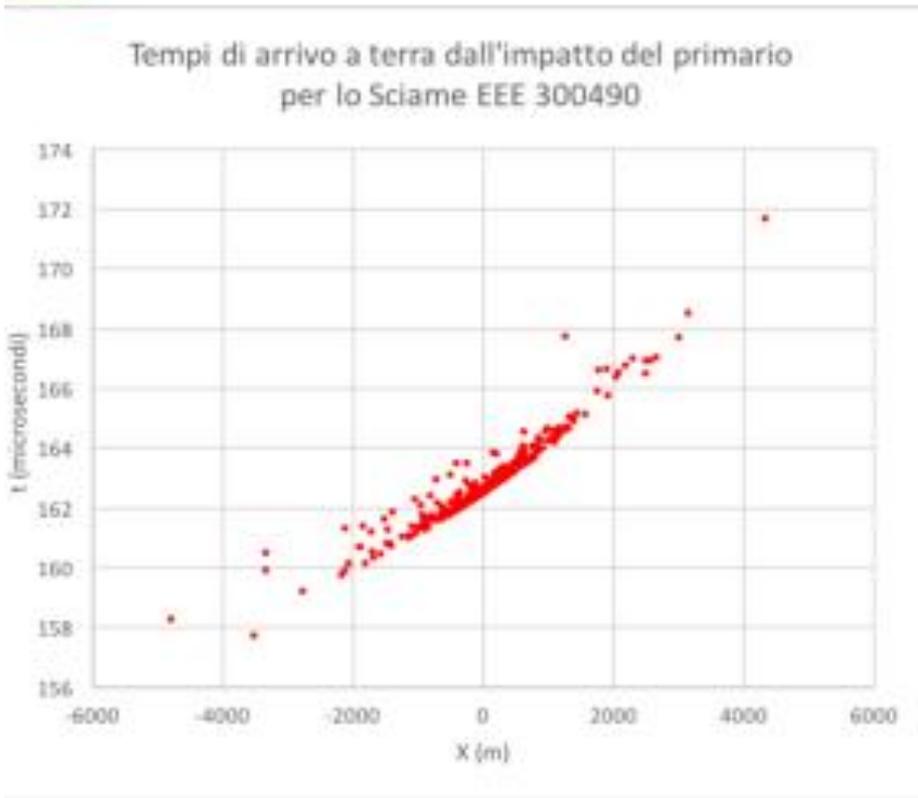


	K	L	M	N	O
1	Raggio (m <sup>2</sup> )	CLASSI	M2	uenze	
2	2208,94672	50	=FREQUENCY(A2:K45;L2:L10)		
3	973,9624316	1000			
4	255,0603575	1500			
5	1477,302662	2000			
6	1631,846492	2500			
7	705,2936011	3000			
8	28,45619755	3500			
9	3071,429633	4000			

### 3. Studiare i Muoni in un EAS: *Distribuzione Temporale*

## I TEMPI DI ARRIVO

- Nei file di dati ci sono i tempi impiegati da ciascun muone per arrivare a terra dal momento del primo impatto del primario.
- I tempi nel file di partenza sono in nanosecondi.



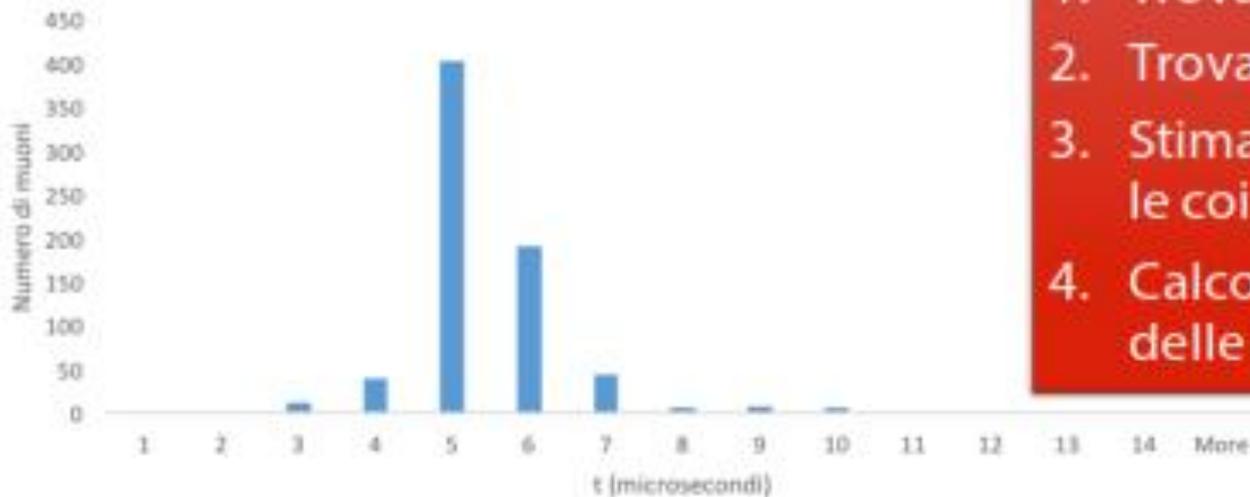
Come si fa:

1. Trasformare i tempi in microsecondi.
2. Fare plot tempo vs coordinate muoni asse X

### 3. Distribuzione Temporale

## DISTRIBUZIONE DEI TEMPI DI ARRIVO

Distribuzione della distanza temporale  
tra un muone e l'altro dello sciame EEE 300490



Come si fa:

1. Trovare il tempo minimo
2. Trovare il tempo massimo
3. Stimare la scala dei tempi per le coincidenze
4. Calcolare la distribuzione delle differenze dei tempi

## Progetto Extreme Energy Events - La Scienza nelle Scuole

# EEE coincidences DQM

Last update: 12:09 Tuesday 04 December 2018

Pair of EEE Telescopes	Last file in DQM	Coincidences: Rate and Error
BOLO-01-BOLO-04	BOLO-01-BOLO-04-2018-11-30.root	111.4 +/- 18.9
CAGL-01-CAGL-02	CAGL-01-CAGL-02-2018-11-30.root	23.4 +/- 13.3
CERN-01-CERN-02	CERN-01-CERN-02-2018-11-07.root	-110.1 +/- 22.9
FRAS-02-FRAS-03	FRAS-02-FRAS-03-2018-11-30.root	14.0 +/- 6.7
GROS-01-GROS-02	GROS-01-GROS-02-2018-11-10.root	-10.3 +/- 4.1
LAQU-01-LAQU-02	LAQU-01-LAQU-02-2018-11-30.root	5.0 +/- 6.6
LODI-01-LODI-02	LODI-01-LODI-02-2018-11-30.root	143.5 +/- 11.6
SALE-01-SALE-02	SALE-01-SALE-02-2018-11-30.root	4.0 +/- 6.4
SAVO-01-SAVO-02	SAVO-01-SAVO-02-2018-11-30.root	2.6 +/- 3.6

*Cercare le coincidenze tra eventi nello stesso sciame visti da Telescopi differenti nella stessa città, richiede Tempo e Potenza di calcolo*

## Domanda :

*Entro **quale intervallo temporale** cerchereste le coincidenze tra muoni in uno Sciame Atmosferico Esteso come quello simulato?*

---

***BUON  
LAVORO***

