

---

# METODOLOGIE SPERIMENTALI IN FISICA E ASTROFISICA DELLE PARTICELLE

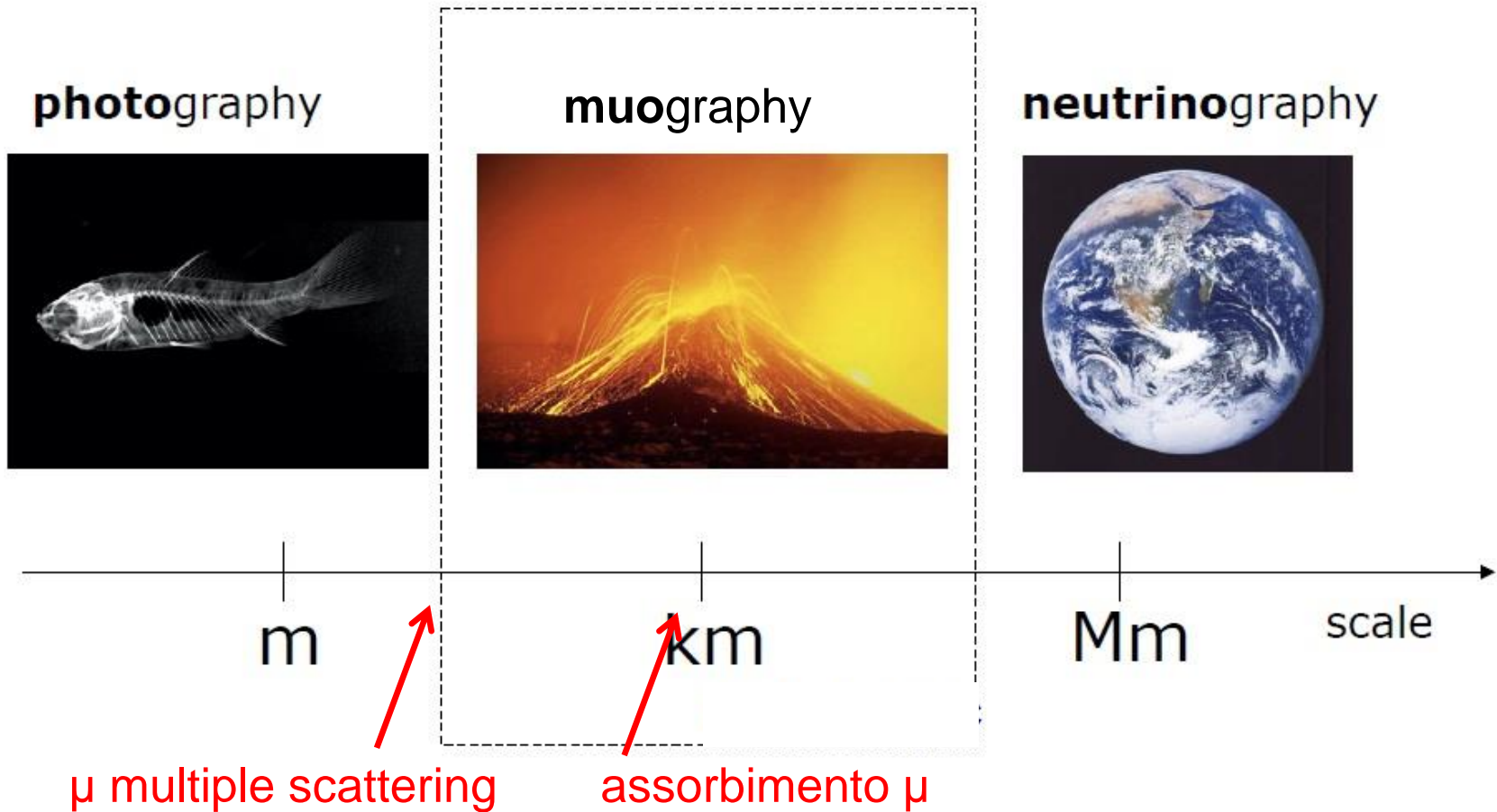
---

F.-L. Navarra

Marzo 2017

1a parte B

# Radiografia con particelle



# Due tipi di misure con muoni cosmici

1. **Misure di assorbimento/trasmissione dei  $\mu$  cosmici**, come si fa coi raggi X, se  $E_\mu$  è appropriata e se gli spessori sono grandi
  - In questo caso la diffusione/scattering\_multiplo è un problema → ad es. per ridurlo si può indurire lo spettro circondando il rivelatore con blocchi di Fe, oppure misurare e/o limitare  $E_\mu$
  - Questa misura è possibile anche con neutrini, se l'assorbitore è sufficientemente grande ( $\approx R_T$ ) e l'energia elevata ( $> 10$  TeV)
2. **Misura delle traiettorie dei  $\mu$  entranti ed uscenti dal materiale, scattering\_multiplo**, ricostruzione del punto di intersezione – l'angolo di scattering aumenta con  $Z$  e con lo spessore – se  $E_\mu$  è appropriata e se gli spessori sono relativamente piccoli

# Storia – applicazioni dell'assorbimento di $\mu$

- E. P. George, Misura dello spessore di materiale/roccia sopra un tunnel, 1955
- L.W. Alvarez, Piramidi di Giza, 1970
- S. Minato, Portale (enorme) di un tempio in Giappone, 1988
- K. Nagamine, H. Tanaka et al., Radiografie di vulcani, 1995 →
- G. Giannini et al., Radiog. della Grotta Gigante, Ts 1997
- H. Tanaka, Radiografie di strutture di cemento rinforzato (MC), 2008
- W.B. Gilboy et al., R. di impianti industriali, 2007
- A. Menchaca-Rocha et al., R. di piramidi azteche, 2004 →
- R.F. Schwitters et al., R. di piramidi Maya, 2006 →
- P. Strolin et al., R. di vulcani, Vesuvio, Stromboli (MU-RAY, INFN), 2008-2012 → diventato MURAY2 2013 →



## Storia/2

- C. Carloganu et al., Puy de Dome, 2010 →
- D. Carbone et al.,  $\mu$  radiography at Mt Etna, 2010
- D. Bryman et al.,  $\mu$  geotomography at the Myra Falls mine in Canada, Advanced Applied Physics Solutions, AAPS, 2011-12
- CRM Geotomography Technologies, Vancouver, BC  
<http://www.crmgtm.com> (continuazione del precedente)
- N. Lesparre, D. Gibert, O. Coutant et al.,  $\mu$  Radiography of La Soufrière of Guadeloupe, 2011 →
- K. Borodzin et al.,  $\mu$  Radiography of the Damaged Cores of the Fukushima Reactors (mix di assorbimento e, principalm., scattering), 2012 →
- D.F. Mahon et al., Interrogating nuclear waste storage silos using CR  $\mu$ s, (mix di assorbimento e scattering), 2014 →

# Attività recente

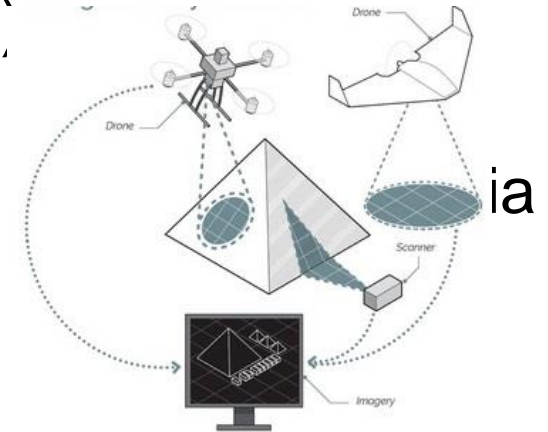
- ~15 articoli su Geosci. Instrum. Method. Data Syst. → 2016
- Ad es. una intera sessione a GeoSciences, Vienna, Apr. 2011 (European Geosciences Union (EGU) General Assembly)
  - Paris-Lyon-Rennes-Grenoble, Muon tomography and Volcanic Risks in the Lesser Antilles, 2010 →
  - Paris-Lyon-St Ursanne, Muon tomography: study of the geological layers above the Mont Terri (Jura) underground rock laboratory, 2009 → (per individuare un deposito di scorie r.)
  - Catania-Paris-Lyon, Geophysical imaging using CR muons: the Etna volcano, 2010 →
  - L'Aquila-Nagasaki-Tokyo-Napoli, Imaging the lava dome structure with CR muons at Unzen, Dic 2010 →
  - ...
- Muon and Neutrino Radiography Conf.: MNR12, 13, 14 Tokyo

# Special issue of GI (Geoscientific Instrum.) – alcuni articoli inclusi fra i 15 sopracitati

- Muon radiography for exploration of Mars geology, S. Kedar et al., Geosci. Instrum. Method. Data Syst., 2, 157-164, 2013
- A novel technique to detect special nuclear material using cosmic rays (Resistive plate chambers for tomography and radiography), C. Thomay et al., Geosci. Instrum. Method. Data Syst., 1, 235-238, 2012
- CCC (Close Cathode Chamber) - based muon telescope for examination of natural caves, L. Oláh et al., Geosci. Instrum. Method. Data Syst., 1, 229-234, 2012
- ...

# Ancora più recente

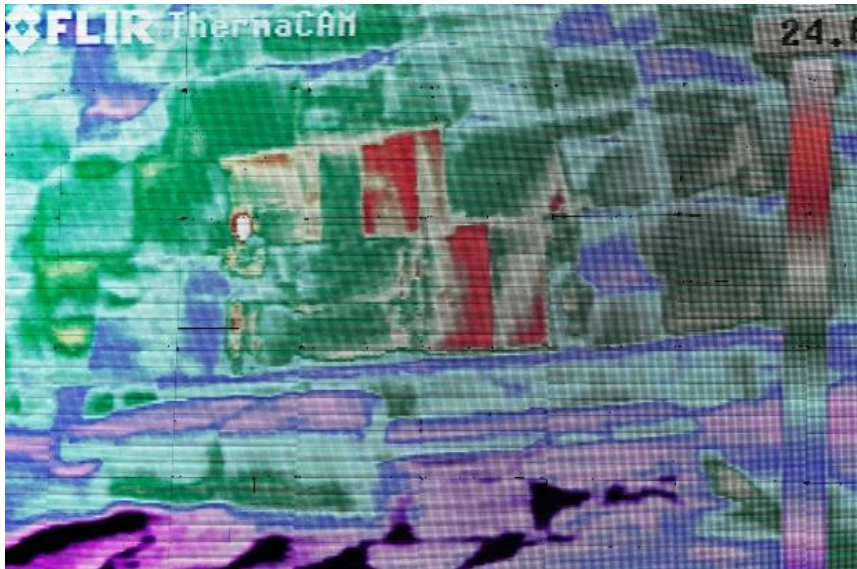
- Reattore Dai-ichi di Fukushima, diversi progetti (LANL, citato sopra, Toshiba) 2014 → (vedi più avanti)
- Nuovi progetti per le piramidi egiziane (Univ. Cairo, Laval, Nagoya),  $\mu$ , IR, 2016 →
- Il ghiacciaio dell'Eiger (Bern, geologia e Bern, HighEnPhys) fine 2015 →



il geologo Fritz Schlunegger e le emulsioni nucl. nel tunnel della ferrovia della Jungfrau che passa sotto il ghiacciaio

# L'anomalia termografica della piramide di Khufu

differenze di temperatura registrate nell'IR, dovute presumibilmente a cavità nascoste (sacche di aria coperte dalle pietre)



questa anomalia riapre il problema di possibili camere nascoste, che sembrava chiuso dall'esperimento di Alvarez del 1970 (discusso più avanti): in effetti l'apparato di A. non era sensibile a  $\mu$  inclinati di più di  $40^\circ$  rispetto alla vert.

## Bibliografia (solo alcuni esperimenti non discussi in particolare nel seguito)

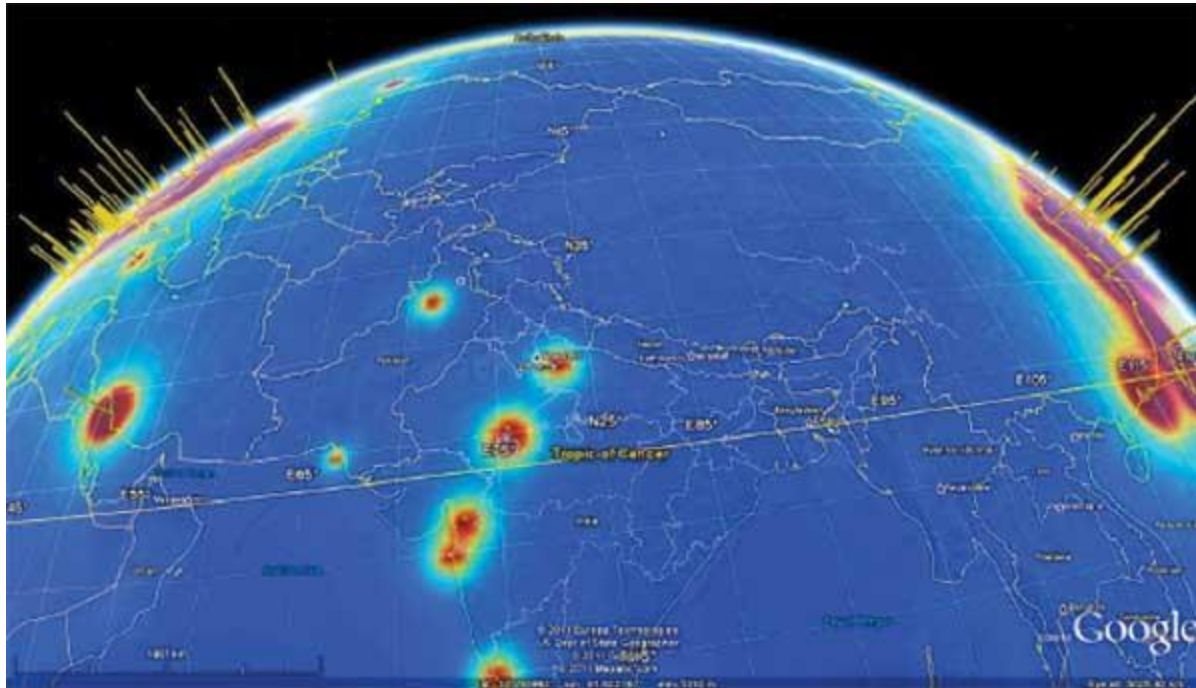
- S. Minato, Feasibility of Cosmic-Ray Radiography: A Case Study of a Temple Gate as a Testpiece, *Materials Evaluation* **46** (1988) 1468-1470
- E. Caffau, F. Coren and G. Giannini, Underground cosmic-ray measurement for morphological reconstruction of the “Grotta Gigante” natural cave, *Nucl. Instr. Meth.* **A385** (1997) 480; erratum *NIM* **A389** (1997) 524
- M. Menichelli et al., A scintillating fibres tracker detector for archaeological applications, *Nucl. Instr. Meth.* **A572** (2007) 262



# Storia – applicazioni dell'assorbimento di $\nu$

- A. Placci e E. Zavattini, Radiografia della terra, proposta, 1973 (fascio di  $\nu$  da FNAL o dal SPS del CERN)
- ...
- International Workshop on High Energy Earth Science: Muon and Neutrino Radiography – Tokyo, Japan, June 26-27 2008 (e.g. constraints on the Earth's dynamics sampling density anomalies with Neutrino Radiography using IceCube; IceCube, Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos, Science 342 (2013) 1242856)
- MNR12, MNR13 e MNR14, già citate
- $\lambda_{\text{int}} \sim R_T$  a 25 TeV, la terra diventa opaca ai  $\nu$

# WATCHMAN – uso applicato di antineutrini (da reattore)



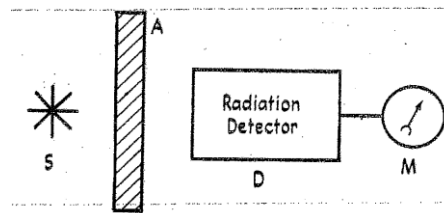
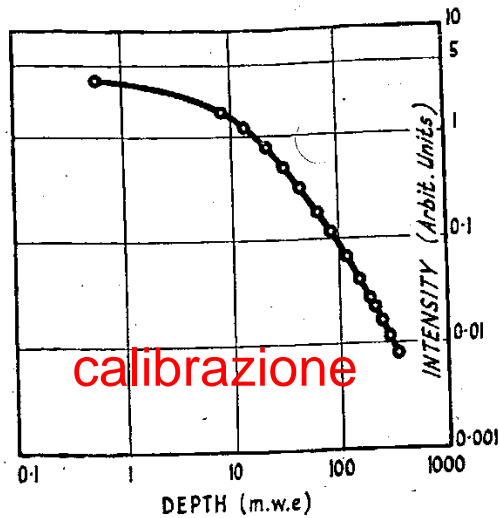
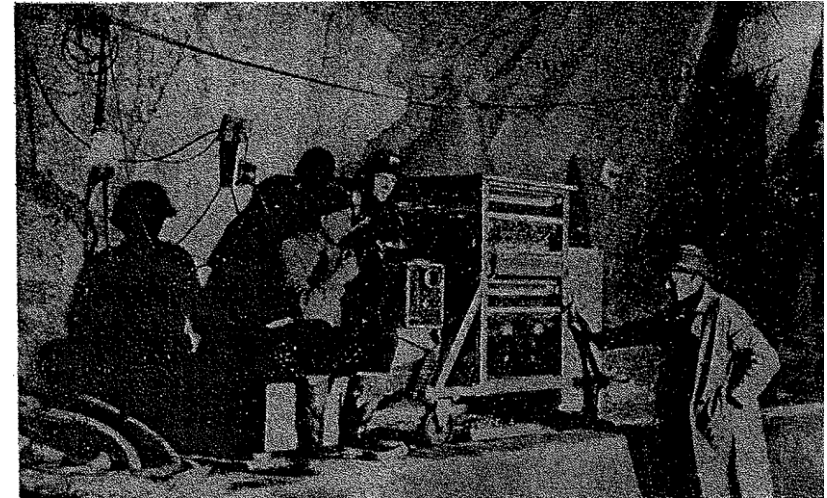
Emissione globale di antineutrini da reattore



- 
- Misure di spessori di materiali (tipicamente rocce) mediante l'assorbimento dei  $\mu$  cosmici

# Misura dello s. di roccia sopra un tunnel nel New South Wales(\*)

- Guthega-Munyang tunnel (Snowy Mountains, NSW, Australia)
- profilo del terreno molto vario, difficile da misurare
- misura per confronto fra le intensità dei  $\mu$  cosmici all'ingresso del tunnel (all'aperto) e dentro al tunnel



- telescopio di 100 contatori Geiger (+ 4" Pb)
- $R = 0.0128 \rightarrow 163 \pm 8 \text{ m.w.e.} = 16.3 \pm 0.8 \text{ kg/cm}^2$
- un foraggio particolare nella stessa zona dà per es. uno spessore di  $17.5 \pm 0.6 \text{ kg/cm}^2$ , consistente

(\*) E.P. George, Commonwealth Engineer, July 1 (1955) p. 455

# Altre misure di spessore di montagne/roccia

- Measurements on the cosmic radiation intensity in the Mont Blanc tunnel, fra 40 e 4100 mwe  
C. Castagnoli et al., *Il Nuovo Cimento* **35** (1965) 969
- Montagne nell'Utah, fra 2000 e 8000 mwe  
H.E. Bergeson et al., *Phys. Rev. Lett.* **19** (1967) 1487; **21** (1968) 1182
- Kolar Gold Fields (\*), miniera vicino a Bangalore, India, profonda fino a 3200 m  
C.V. Archar et al., *Proc. Phys. Soc. (London)* **86** (1965) 1305
- ....



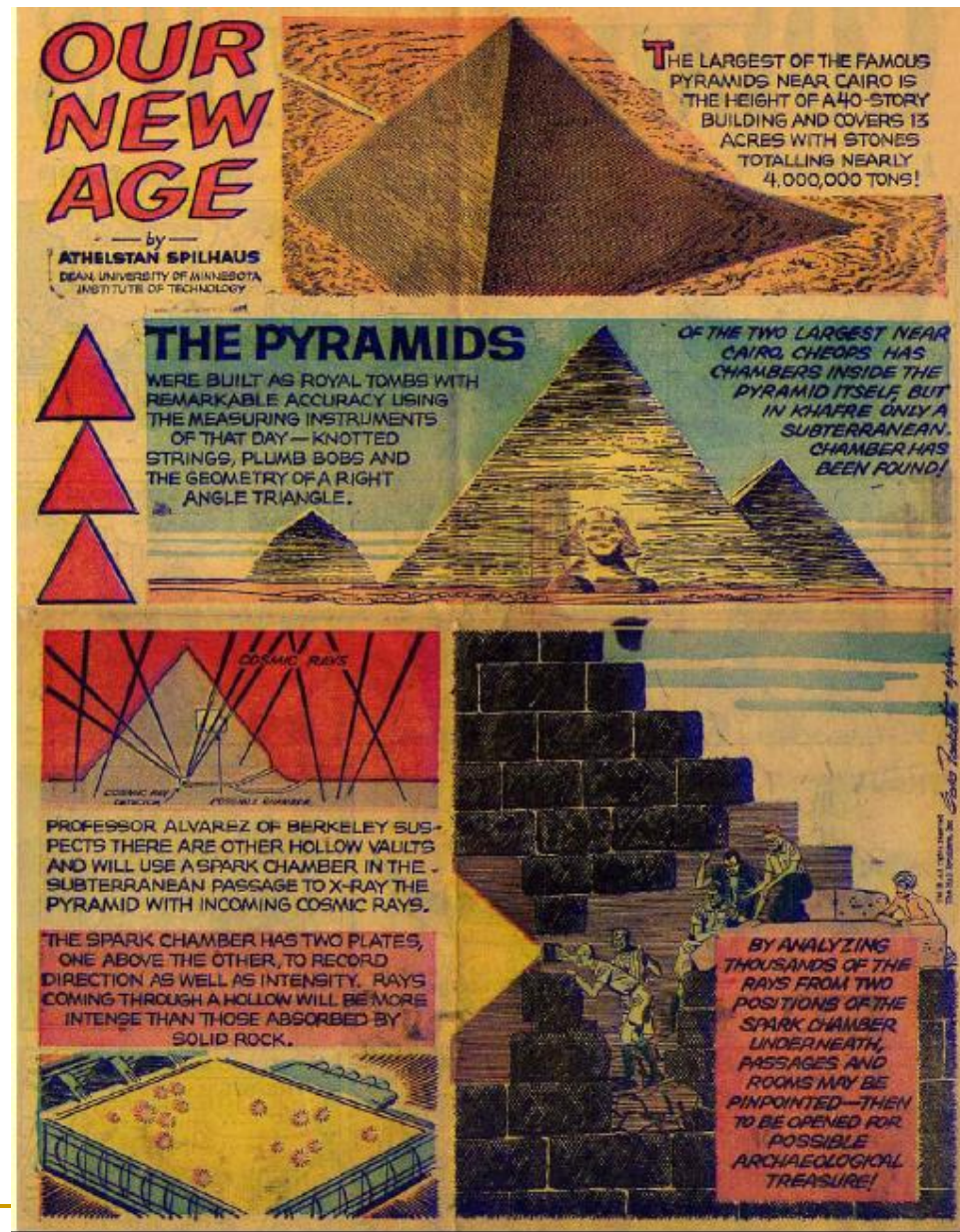
(\*) nel 1965 vi è stata rivelata la prima interazione sotterranea di neutrini



# Alvarez et al.

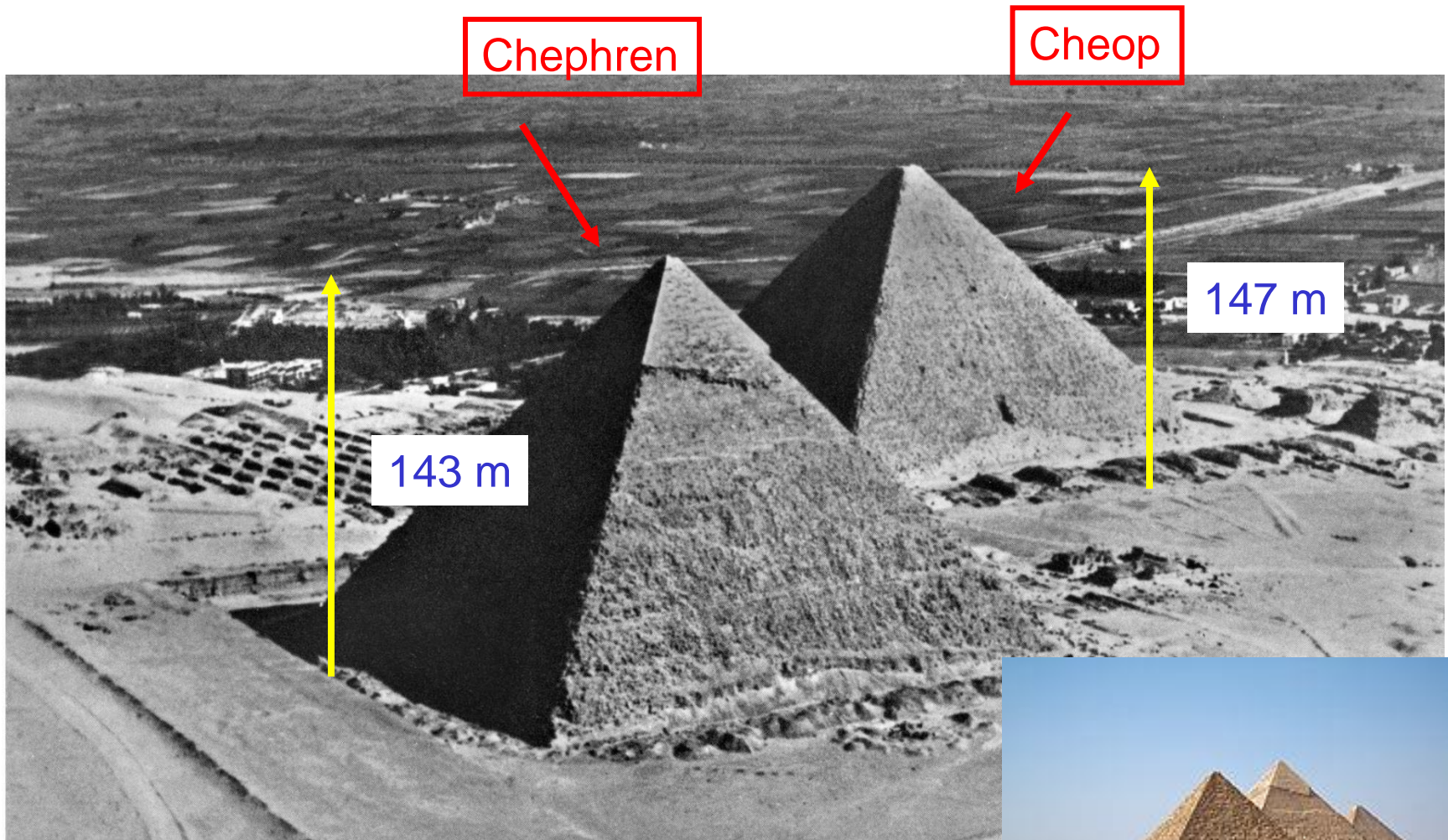
- Luis Alvarez(\*) used muon tomography in 1960's to study the 2nd Pyramid of Chephren
- Spark chambers surrounded by Fe blocks were used to track muons from Belzoni Chamber
- System worked well—could see structures of caps
- Main discovery: *No other chambers exist*  
(it could look like the story with the Higgs, at least until 5 years ago, now it looks more like SUSY or Dark Matter)

(\*) L.W. Alvarez, *et al*, *Search for Hidden Chambers in the Pyramids Using Cosmic Rays*, *Science* **167** (1970) 832-839





# Gizah, le due grandi piramidi



# L'apparato di Alvarez et al.

(sx) apparato e racks nella Belzoni Chamber (dx) particolari (scintillatori per il trigger, PM, camere a fili magnetostrittive per il tracciamento, Fe)

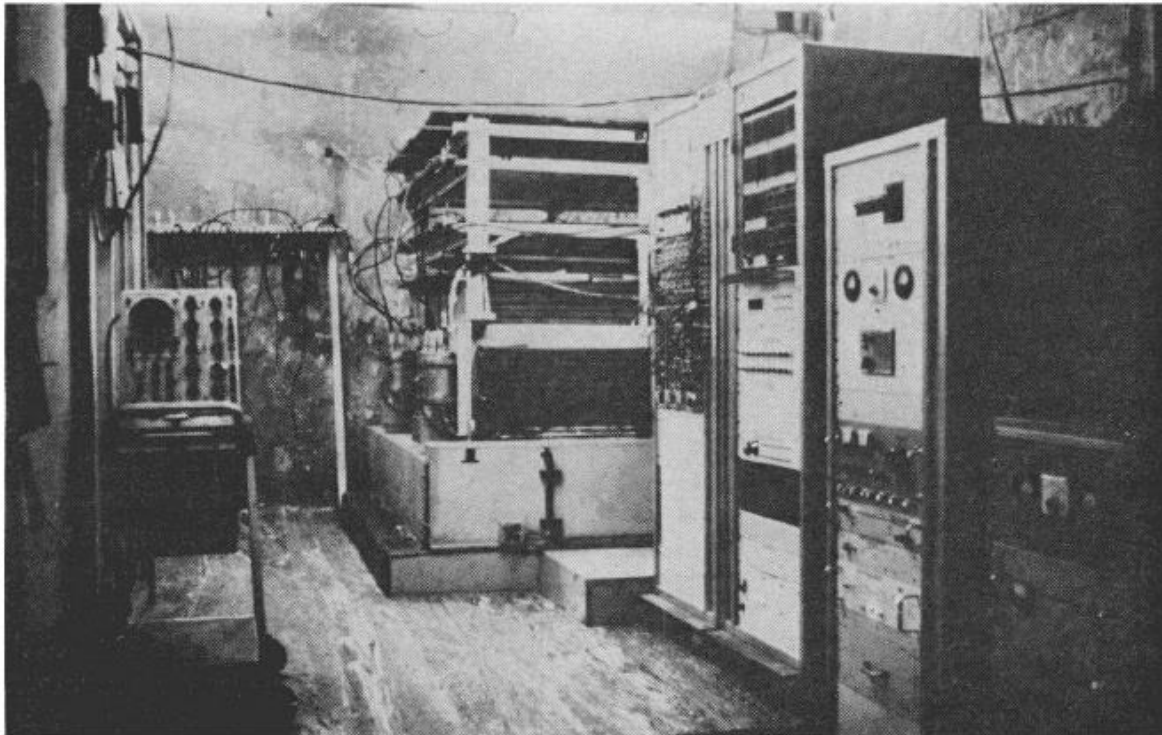
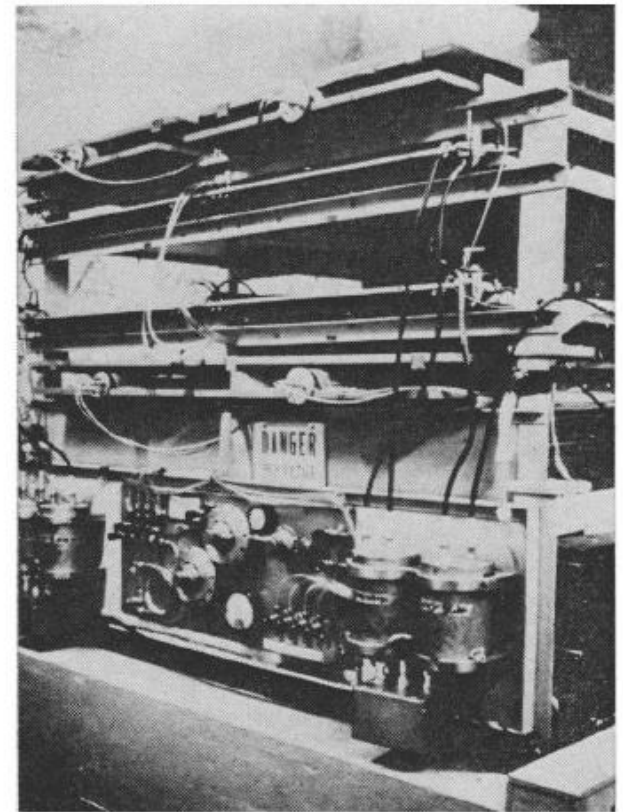


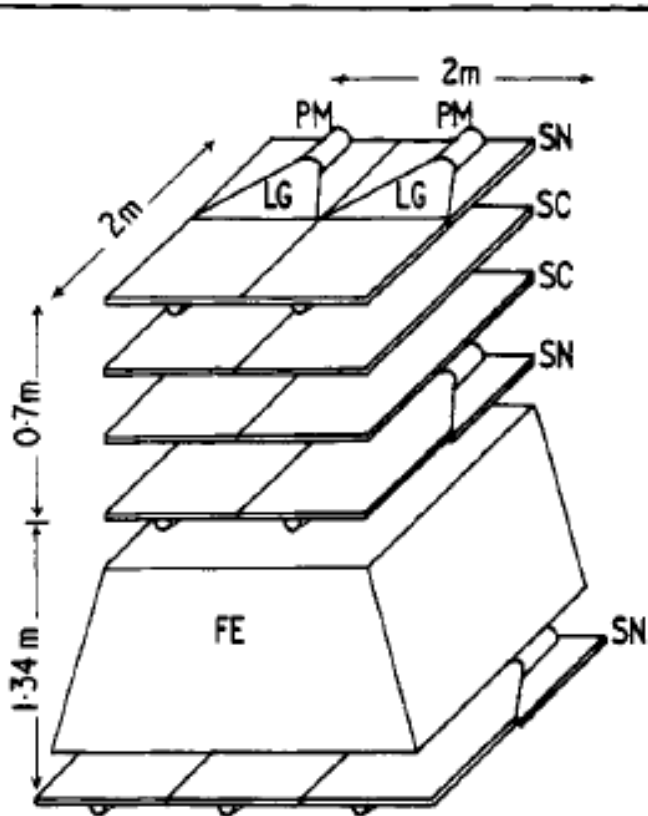
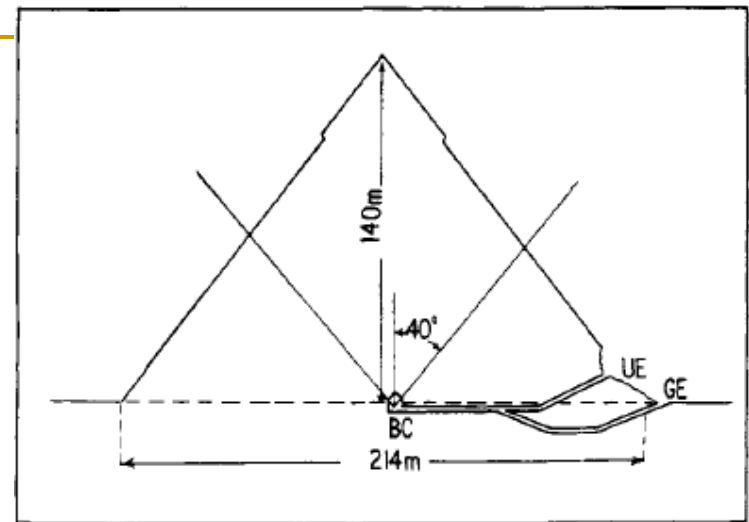
Fig. 6 (left). The equipment in place in the Belzoni Chamber under the pyramid.  
Fig. 7 (right). The detection apparatus containing the spark chambers.





# Piramide di Chephren

Alvarez, El Bedewi ...1969

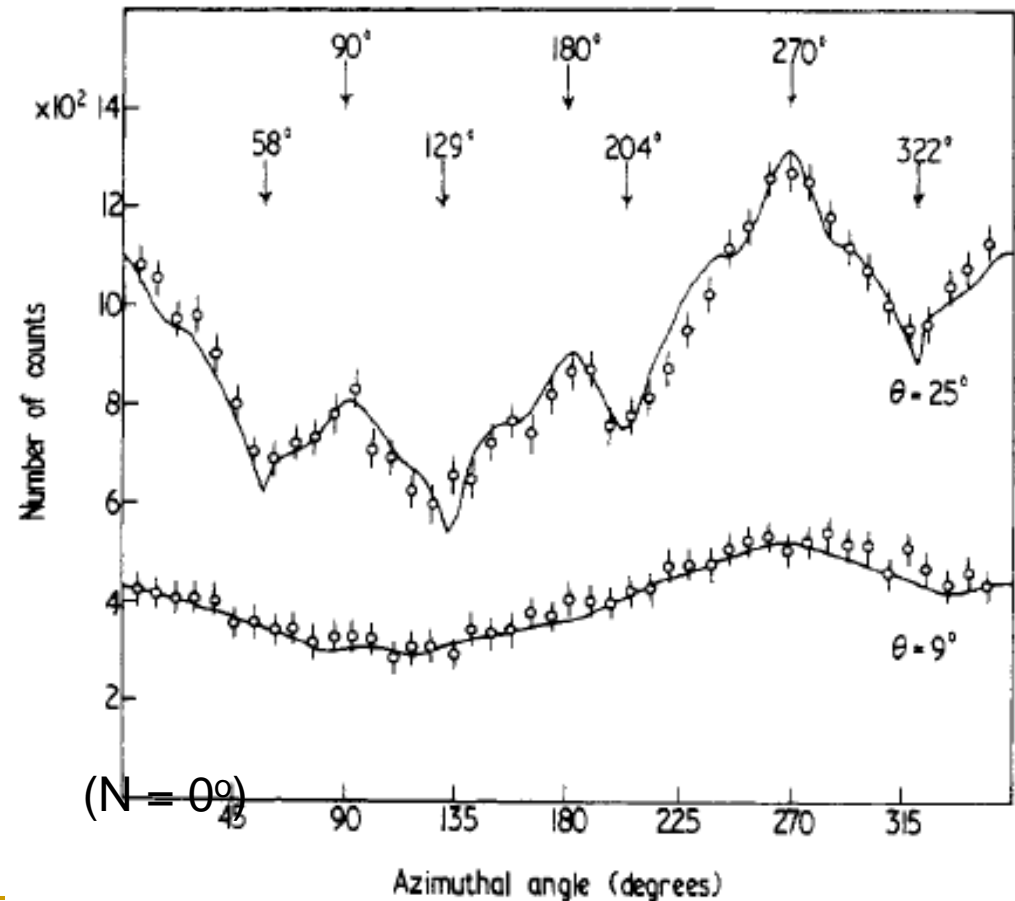


- 14 scint. plast. (SN) 0.9x0.9 m<sup>2</sup>: trigger
- 4 camere a scintilla a fili a lettura digitale magnetostriativa (SC) 0.9x1.8 m<sup>2</sup> ; su due piani distanti 0.3 m; buona risoluzione spaziale →  $\Delta\theta \sim 0.2^\circ$  (3.5 mrad): si sfrutta l'onda acustica prodotta dalla scintilla, 500 m/s; rivel. piuttosto lento, t. memoria 1  $\mu$ s, tempo morto 1 ms; ha bisogno di trigger
- Fe spesso 1.2 m,  $E_\mu > 1.4$  GeV
- cavi lunghi 500 m, analisi su IBM-1130 Ein Shams Univ., CDC-6600 LBL

# Piramide di Chephren/2

- 4 mesi, 2 M mu
- $E_{\mu} = 50-70$  GeV
- 80-110 m roccia
- $\theta$  fra  $0^{\circ}$  e  $40^{\circ}$ ,  
 $\varphi$  fra  $0^{\circ}$  e  $360^{\circ}$
- ottimo accordo fra dati e valori calcolati (in assenza di camere nascoste) – minimi = spigoli della piramide tenendo conto della posizione del rivelatore
- localizzazione del rivelatore  $\approx 1$  m

posizione del rivelatore spostata, 5m N, 13.5 m E, rispetto al centro: max non uguali, pos min  $\neq$  mult  $\pi/4$





# Alvarez et al., analisi dei dati

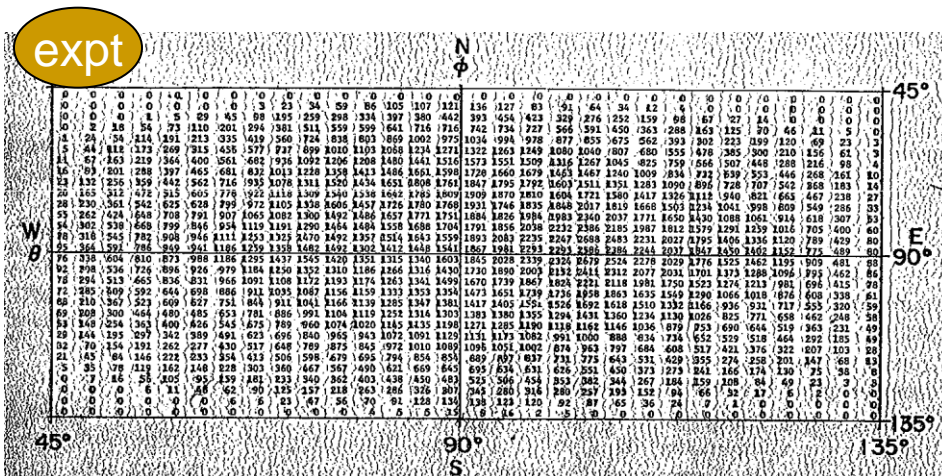


Fig. 8. An array containing the numbers of events (uncorrected) observed during several months of operation in each 3- by 3-degree bin.

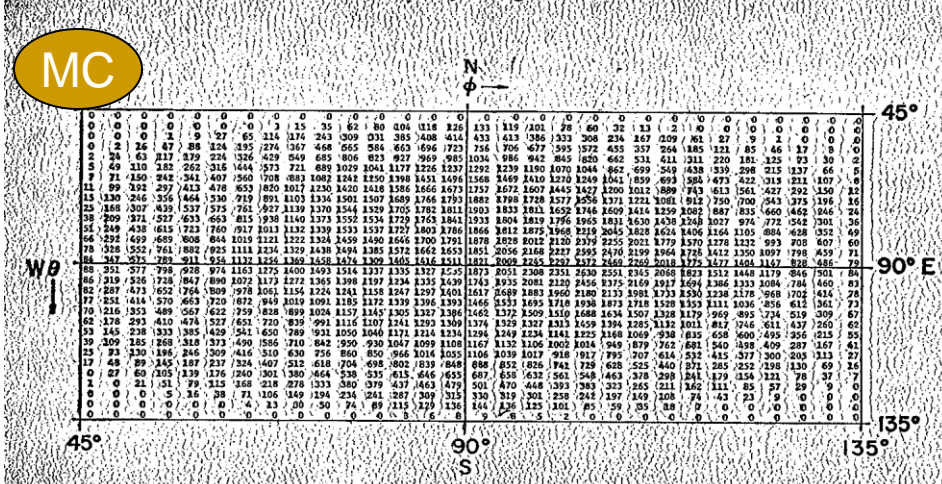


Fig. 9. An array containing the predicted number of events in each 3- by 3-degree bin for the best fit to the data.

→ nessuna camera

- si considerano solo bin con  $N_{th} > 30$  (Monte Carlo), fit complessivo con  $\chi^2$ , risultati espressi in n.o di st.dev.
- all'inizio c'è un eccesso di valori -vi al centro, in corrispondenza del cappello di calcare

risultati, in  $\sigma$ , più 'camera nascosta'

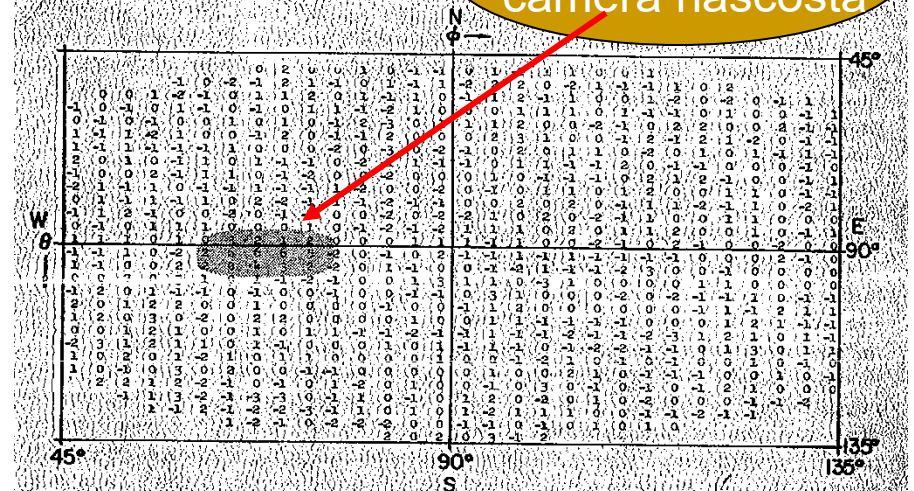
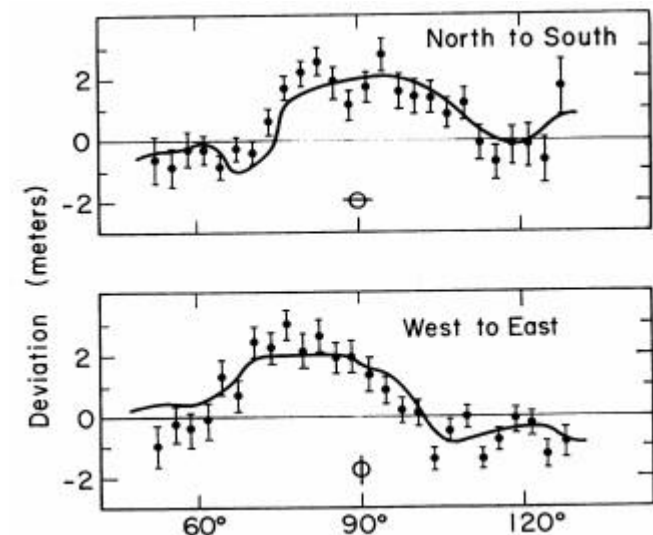


Fig. 11. The display of Fig. 10 as it would have appeared had there been a "King's Chamber" in the pyramid 40 meters above the apparatus. The group of numbers larger than 3 at the center-left (shaded area) indicates the chamber's position.

## Analisi dei dati/2

- ci sono 750 punti utili, il  $\chi^2$  atteso è circa 750, quello dei fit iniziali era circa 3000 ed è sceso a circa 1400 una volta usata la fotogrammetria della UAR (stereographically determined contours of the pyramid) – incluso il cappello
- se le deviazioni sono puramente statistiche ci si aspetta che 87% dei bin abbiano +1,-1,0; 12% +-2; 1% +-3. C'è una possibilità su tre di trovare un bin con +-4, una su 200 di trovare +-5 ed una su  $3 \times 10^4$  di trovare +-6: nessun bin mostra +-4 che è la minima evidenza di un effetto
- è stato possibile osservare il cappello in calcare in cima alla piramide di Chephren attraverso più di 100 m di roccia (i cappelli delle altre piramidi sono stati rimossi nel Medio Evo) – differenza rispetto ad una piramide 'liscia', curve dalle foto aeree





# Progetti per studiare piramidi in America Latina/Messico/Belize

- Piramide del sole pre-azteca a Teotihuacán, il luogo dove gli uomini divengono dei, vicino a Città del Messico – A. Menchaca-Rocha et al./Univ. of Mexico: risultati preliminari a ICRC11 e 13
- Piramidi Maya a La Milpa nel Belize – R. Schwitters et al./Univ. of Texas: qualche seminario sui progressi, installazione nel 2013, primi risultati disponibili



# I siti



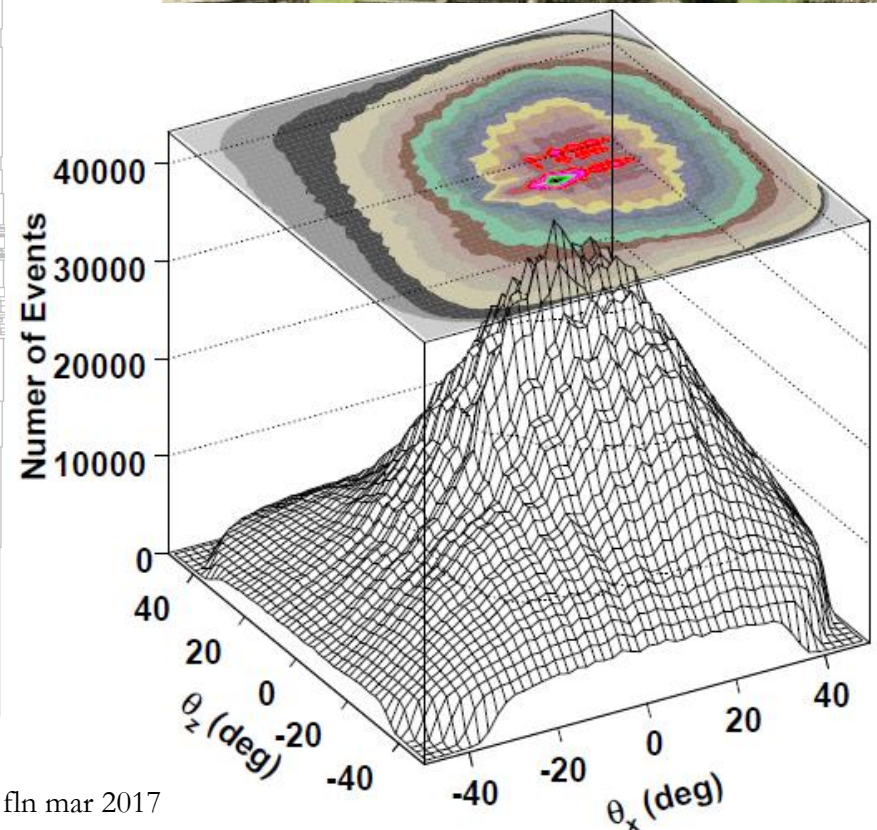
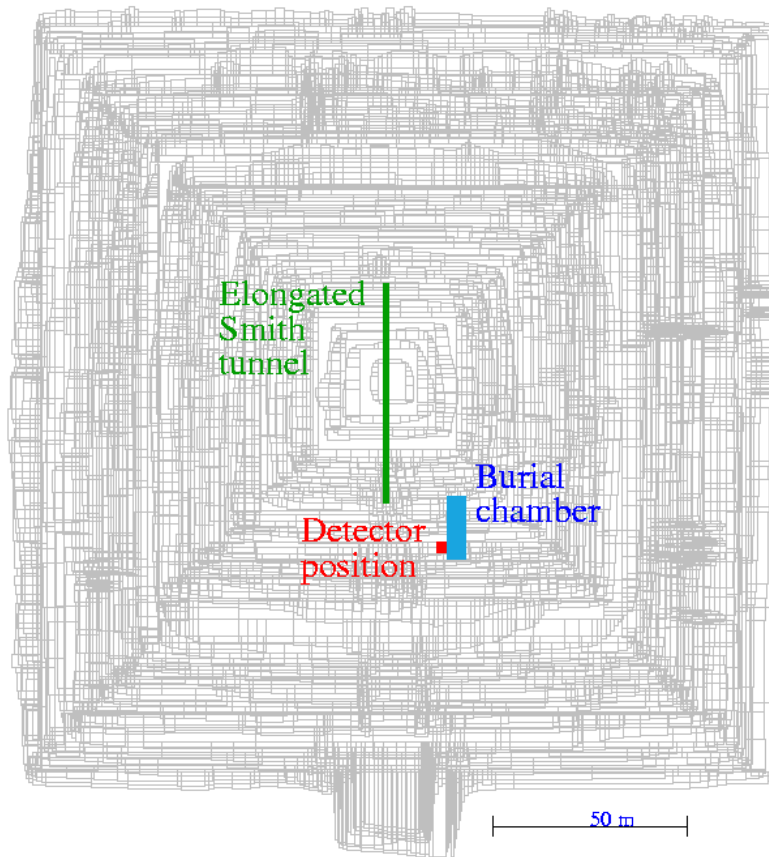


# La piramide del sole a Teotihuacán (A. Menchaca-Rocha et al.)

- Rivelatore dentro la piramide (a dx una simulazione della struttura: retroproiezione delle tracce su un piano orizz., (v. ATLAS/CMS, parte 1A p. 74-79))



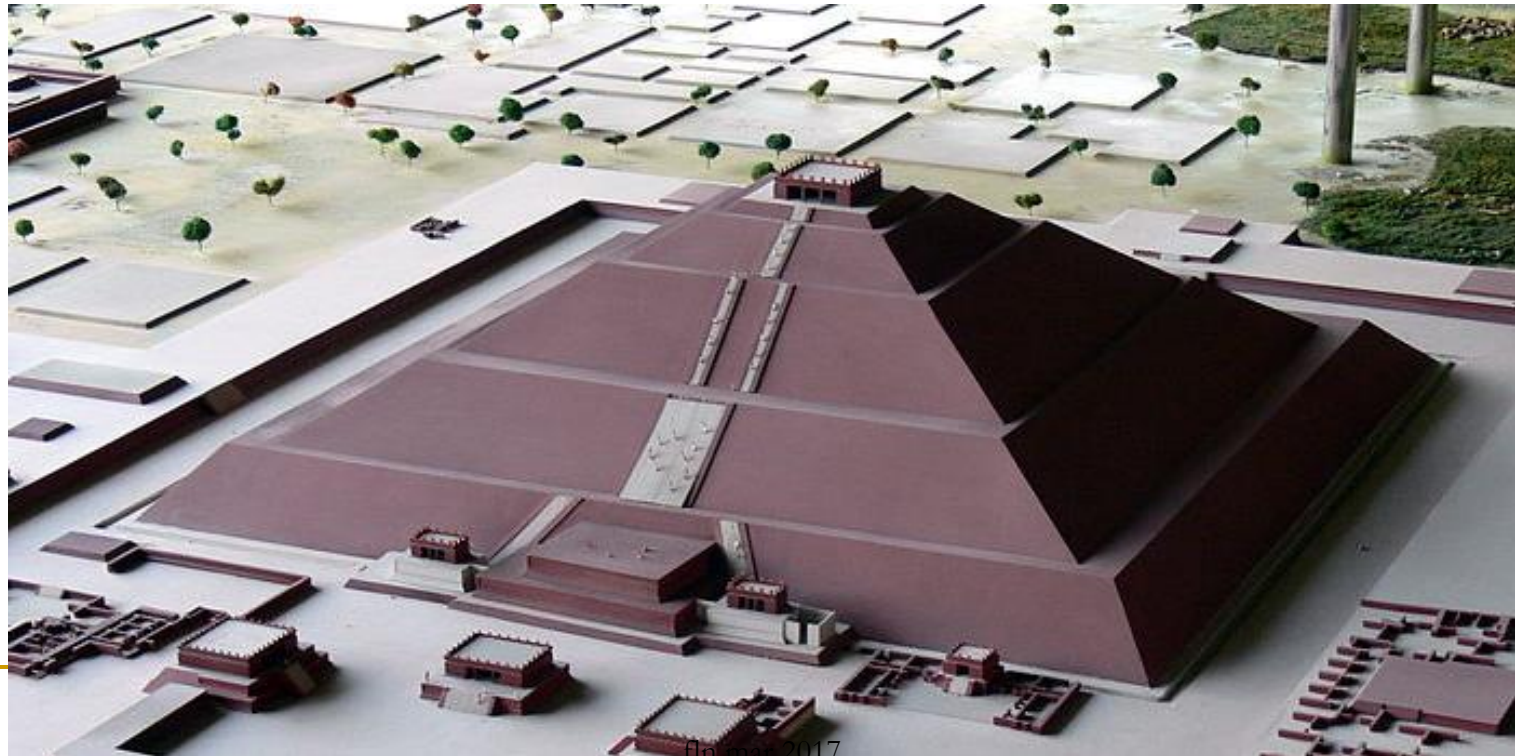
una



# Caratteristiche di Teotihuacán

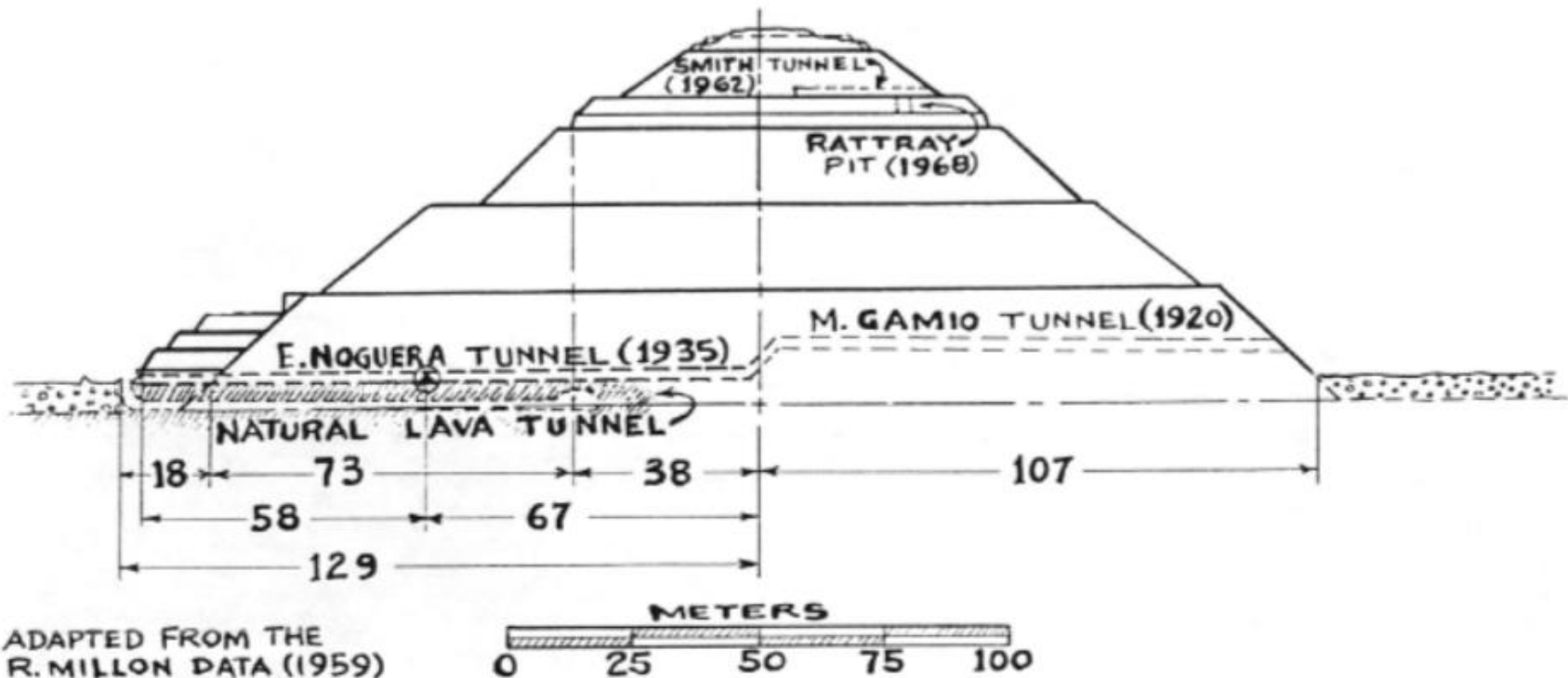
Differenze importanti rispetto alla piramide di Chephren:

- più tozza, circa la stessa superficie di base, ma alta la metà
- una serie di balconate esterne su 5 livelli con spaziature non regolari
- nella parte frontale ci sono un corpo extrapiramidale e scale esterne
- c'è un complesso sistema di tunnel scavati in momenti diversi della costruzione



# Caratteristiche di Teotihuacán/2

- Tunnel pre-ispanico (pre-esistente), 8 m sotto la piramide
- Tunnel (scavato ~100 anni fa) situato lungo il 1o livello della piramide (avanti-dietro)
- Tunnel di Smith (scavato 50 anni fa nel 5o livello ) va dal dietro al centro della struttura



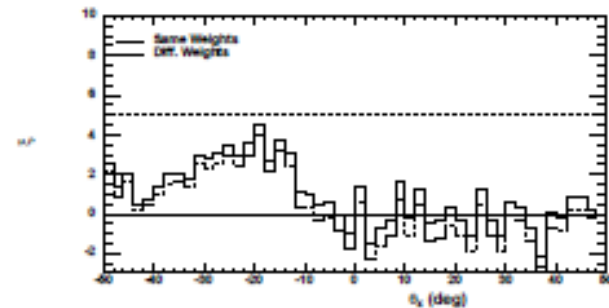
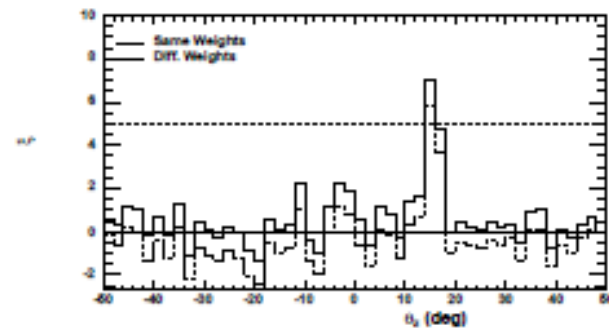
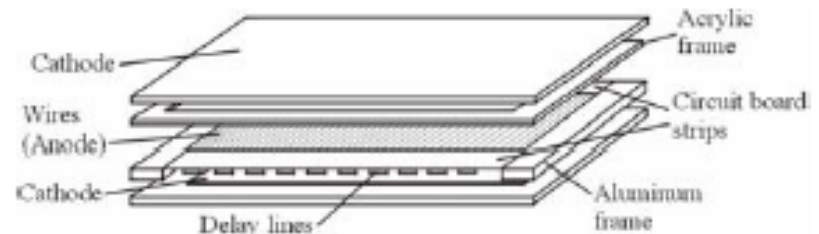
ADAPTED FROM THE  
R. MILLON DATA (1959)  
AND THE TEOTIHUACAN  
MAP, 1973, Vol. 2.

Ⓐ STONEMWORK FOUND IN  
NOGUERA TUNNEL (1959)



# Teotihuacán/rivelatore dell'Univ. del Mexico

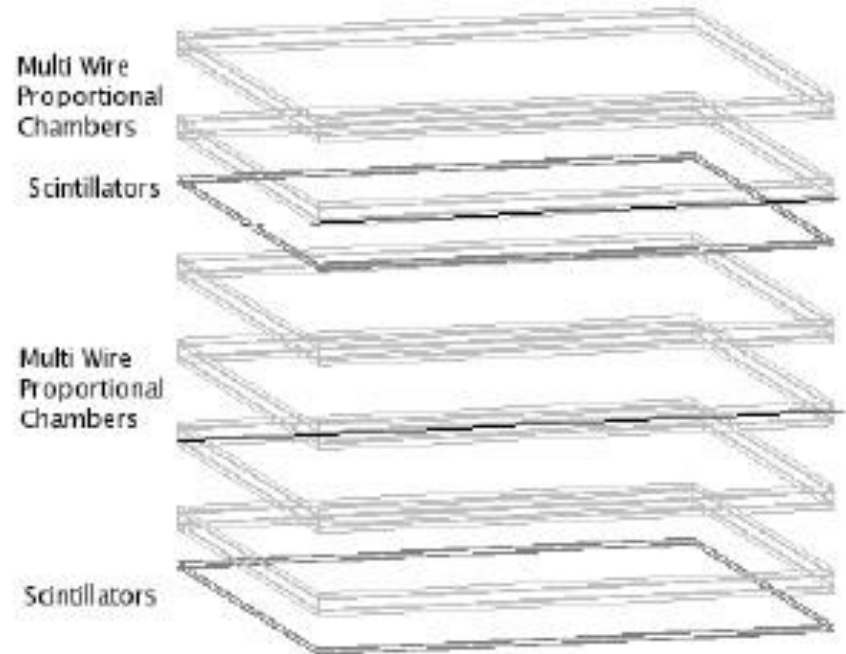
- la situazione è molto simile a quella della misura di Alvarez et al., si usa il tunnel 8 m sotto la base della piramide che finisce ~vicino all'asse di simmetria, per posizionare il rivelatore (a 34 m W, 10 m S dall'asse)
- il rivelatore consiste di MWPC da 1x1 m<sup>2</sup> (6 piani) per tracciare i  $\mu$  (dettagli in alto a dx) e di scintillatori plastici (2 piani) per il trigger
- rivelatore+struttura simulati con GEANT4, risoluzione proiettata  $\sigma_R \sim 0.02 L$  (L spessore traversato, max 80m)
- cavità simulata (in basso a dx) 60x3x2 m<sup>3</sup> con  $5 \times 10^7 \mu$ /simul., 0°-50°,  $\xi$  è la sensibilità, rapporto segnale-rumore =  $\Delta N / \sigma \Delta N$
- inizio presa dati 2010-11



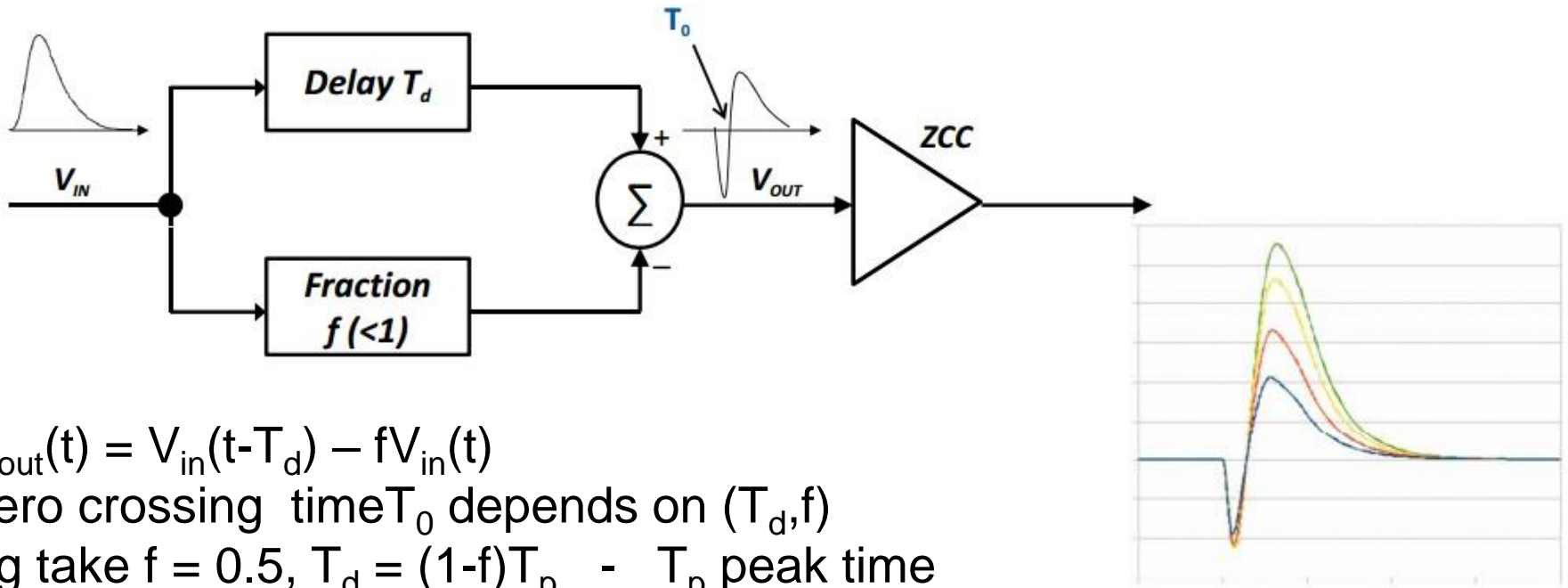


# Rivelatore dell'Univ. of Mexico/2

- 4 piani di scintillatori plastici (2+2) per il trigger, 1x1 m<sup>2</sup>, letti da barrette di WLS 1m x 1cm x 1cm (eff. > 95%)
- 6 piani di MWPC, 200 fili, a 5 mm di distanza, in tungsteno dorato, 25  $\mu$  di diametro; anodi letti con linee di ritardo lunghe 800 ns; 5 GSample/s waveform digitizers usati come Constant Fraction Discriminators ( $t_{\text{rise}}$  variabile da 10 a 50 ns); l'intervallo di tempo di 4 ns corrispondente a 5 mm permette di separare i fili, risoluzione in  $t \sim 0.7 \div 1.2$  ns
- $E_{\mu} \geq 200$  MeV (cin.),  $p = 320$  MeV/c
- trigger rate =  $(2.7 \pm 0.05)$  Hz (MC: 2.62 Hz)



# Constant fraction discriminator or Zero crossing



$$V_{out}(t) = V_{in}(t-T_d) - fV_{in}(t)$$

zero crossing time  $T_0$  depends on  $(T_d, f)$

eg take  $f = 0.5$ ,  $T_d = (1-f)T_p$  -  $T_p$  peak time

(always the same,  $t_{rise}$  instead depends strongly on the pulse height, resulting in a large time jitter if passing through a fixed threshold discriminator) the  $-ve$  pulse is max at  $T_p$  and there is max cancellation with the delayed  $+ve$  pulse at  $T_0 = T_p$ , if then  $T_d = 0.5T_p \rightarrow V_{out} = 0$  (see with triangular pulses for simplicity) the time jitter is greatly reduced wrt fixed threshold discrim.: eg 0.01-1 V input,  $T_p = 75$  ns,  $\Delta T_0 = 0.14$  ns (max-min)

# UM, risultati preliminari

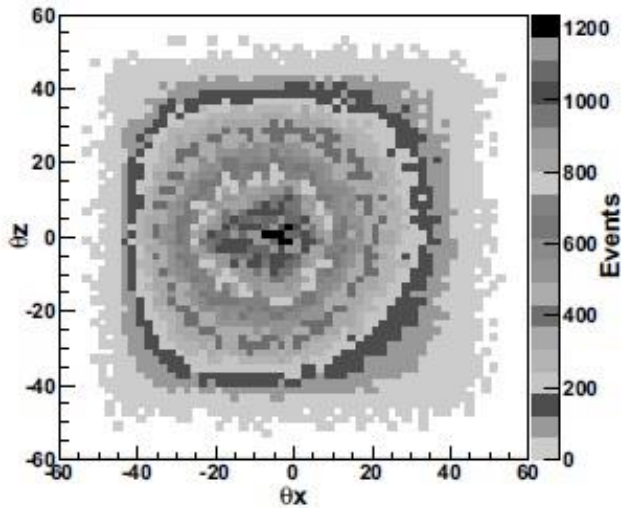


Figure 4: 2D-plot of projection angles from Monte Carlo Simulation.

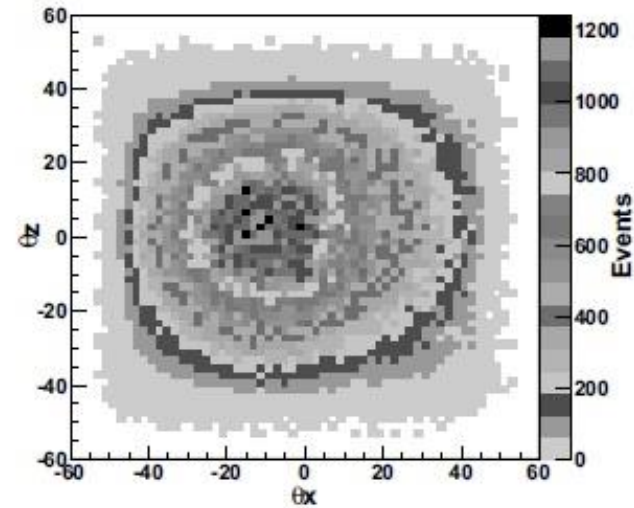


Figure 5: Experimental projection angles 2D-plot.

- le discrepanze dati-MC possono essere dovute sia alla simulazione (il rivelatore non è al centro della piramide, mentre la foto dell'esterno è centrata), sia agli errori nella stima dell'efficienza di rivelazione vs E e posizione (per mancanza di un acceleratore adatto in Messico
- problemi tecnici: network, rete elettrica, composizione/qualità del gas premiscelato (90% Ar, 10% CO<sub>2</sub>): efficienza MWPC ridotta del 50%

# UM, risultati preliminari/2

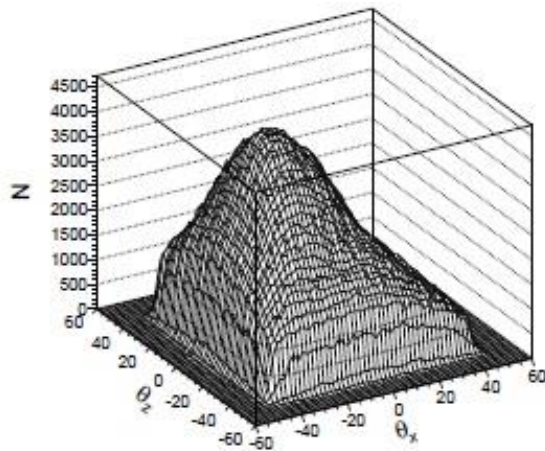


Fig. 3: Angular distribution of simulated events corrected by the detector acceptance in the detector cave. The distribution is normalized to the one in Fig. 5.

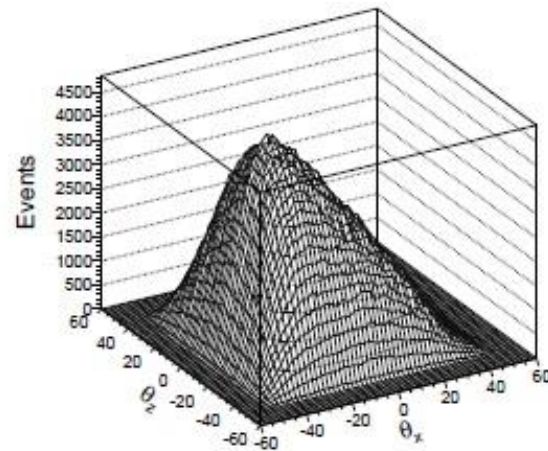


Fig. 5: Angular distribution of detected events, see the text.

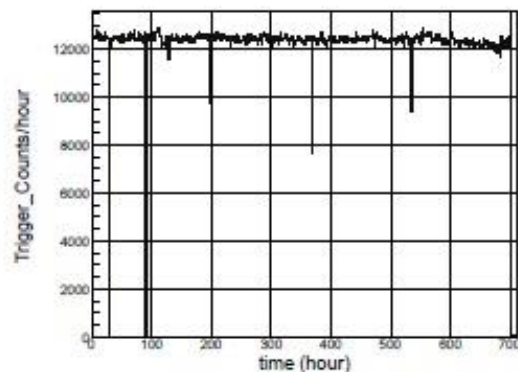


Fig. 4: Trigger count rate for a one-month time period. The vertical lines in the plot are due to the interruptions in data collection time.

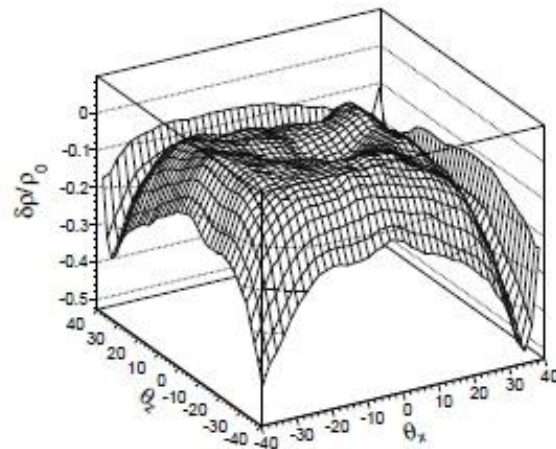


Fig. 6: Preliminary data of relative density distribution inside the pyramid volume.

dati presentati  
a ICRC13 (Int.  
Cosmic Ray  
Conf. 2013)

due anni di  
presa dati

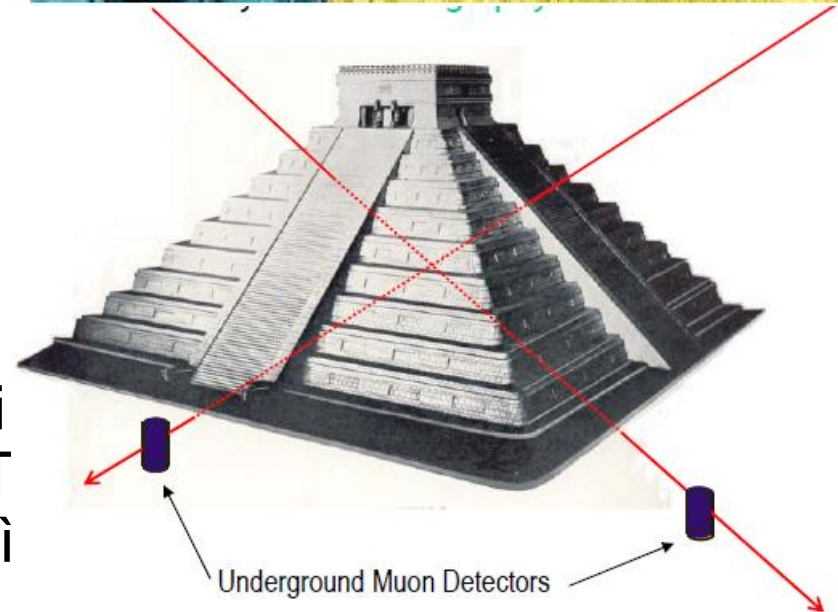
buona  
stabilità su  
un mese

problemi di  
efficienza ai  
bordi del  
campo di vista

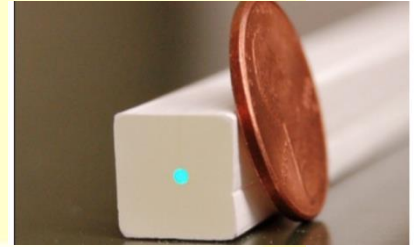


# Applicazione dei metodi di HEP alle piramidi dei Maya

- Qual'è la struttura interna? (questa volta non vi sono tunnel di accesso) → rivelatori 'esterni'
- Radiografia o tomografia: si può misurare la distribuzione spaziale del materiale all'interno della piramide usando i  $\mu$  cosmici con uno o più rivelatori sotterranei (interrati vicino alla struttura)
- Univ. of Texas et al. – inizio presa dati 2013, 2015 – i primi risultati si sono fatti molto aspettare, in ogni caso le riunioni del gruppo "Maya Muons" dell'UT erano programmate tutti i venerdì alle 15 fino al 2016 ...!



# Rivelatore dell'UT (prototipo)



## ➤ Cylindrical structure **prot. (final det.)**

- 1.5 m diameter **0.55 m**
- 4.5 m long **1.5 m**
- **1 t weight** **0.1 t**

## ➤ Muon tracking

- 3 stereo layers

## (MINOS) - WLS-scintillator technology

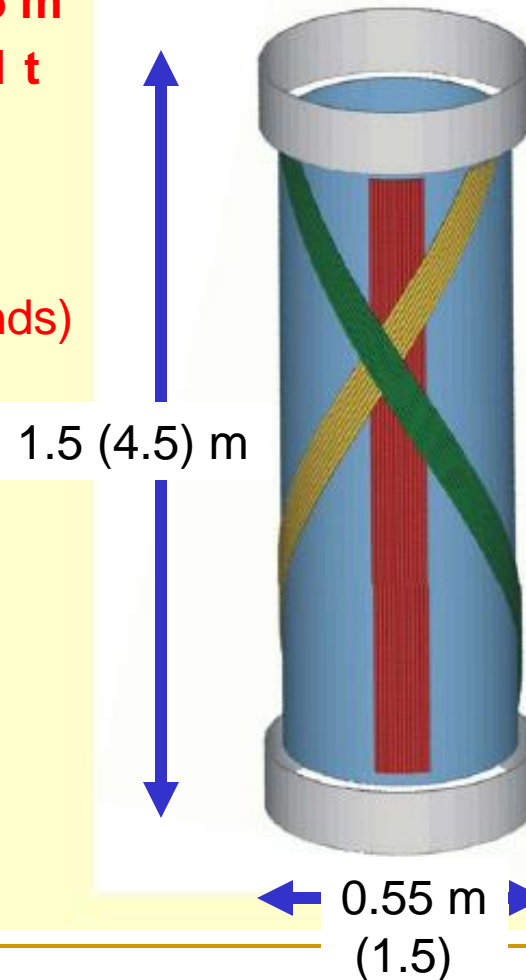
- PMT readout **(read at both ends)**
- overall **efficiency ~50%**

## ➤ Threshold energy selection

- Use inner volume as a Cherenkov radiator
- PMT readout

## ➤ Other systems

- Electronics
- Mechanical
- Power/communications



strisce /  
barrette di  
scintillatore  
plastico, 30  
x10 **(10x10)**  
mm<sup>2</sup>, lette  
da fibre WLS  
al centro  
(tecnica  
usata la  
prima volta  
da MINOS  
a Fermilab)

Lunghe strisce di scintillatore estruso, alcuni m, con lettura a fibre WLS (tecnologia sviluppata da MINOS e ripresa da OPERA, MINERVA etc.)

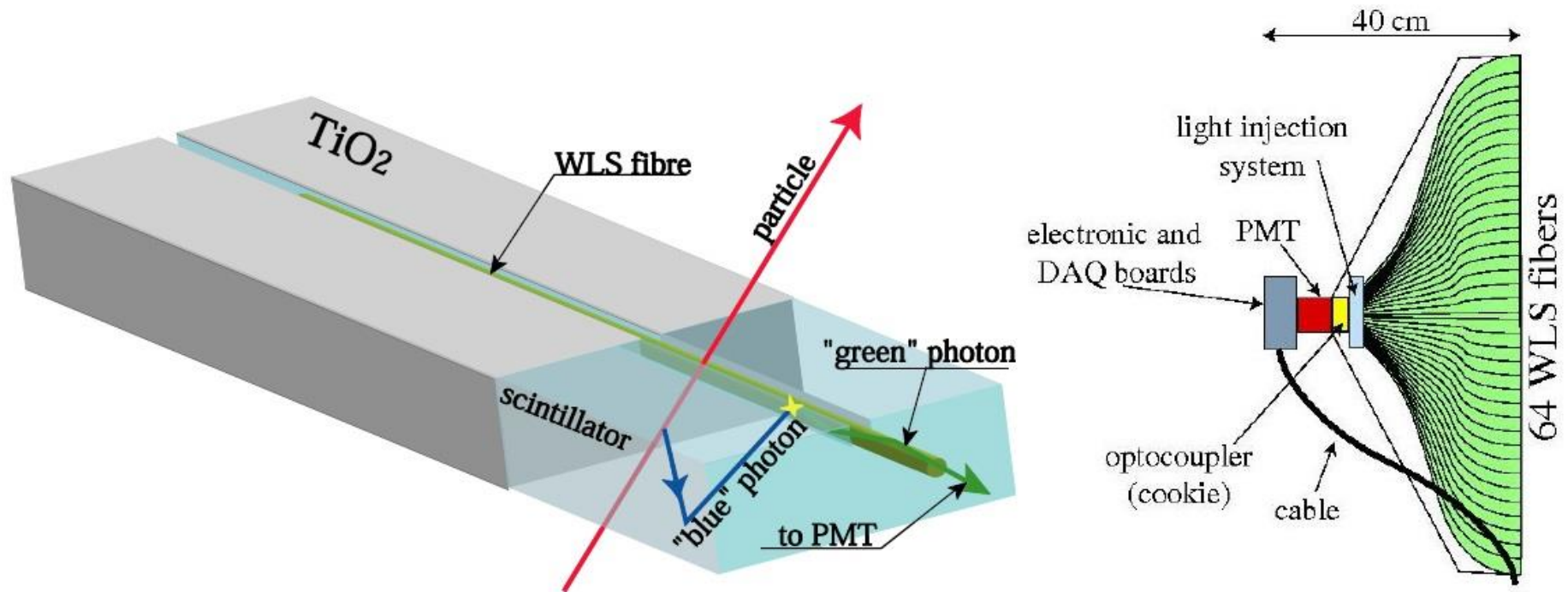
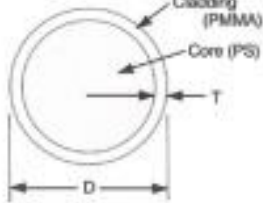
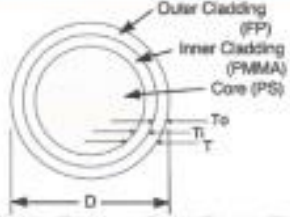
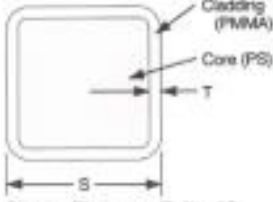


Fig. 15. The plastic scintillator strips (left figure) of the OPERA neutrino experiment and their readout by optical wavelength shifting fibres and multianode PMT (right figure).

Le fibre WaveLengthShifting sono usate anche in FAST, Parte 1 A pag. 21-23, ma in FAST le barrette di scintillatore sono lunghe solo 200 mm, non alcuni m



# Geometria delle fibre WLS (da kuraraypsf.jp)

	Single Cladding	Multi Cladding (M)
Round Fiber (R)	 <p>Cladding Thickness : <math>T=3\%</math> of <math>D</math>            Numerical Aperture : <math>NA=0.55</math>            Trapping Efficiency : 3.1%</p>	 <p>Cladding Thickness : <math>T=3\%</math> (<math>T_1+3\%</math> (<math>T_2</math>)-6% of <math>D</math>)            Numerical Aperture : <math>NA=0.72</math>            Trapping Efficiency : 5.4%</p>
Square Fiber (SQ)	 <p>Cladding Thickness : <math>T=2\%</math> of <math>S</math>            Numerical Aperture : <math>NA=0.55</math>            Trapping Efficiency : 4.2%</p>	

non-S PS core: no oriented PS chains, optically isotropic & very transp.  
 S PS core: molecular orientation along drawing direction, stronger against breaking (due to bending) but less transparent

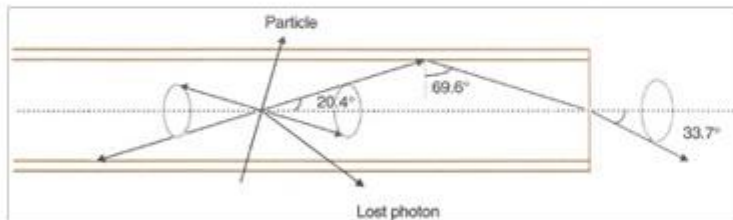
PS polystyrene  $n_D = 1.59$   
 PMMA polymethylmethacrylate  $n_D = 1.49$   
 FP flourinated polymer  $n_D = 1.42$

(non mostrato a lezione)

## Cladding and Transmission mechanism

### Single Cladding

Single cladding is standard type of cladding.

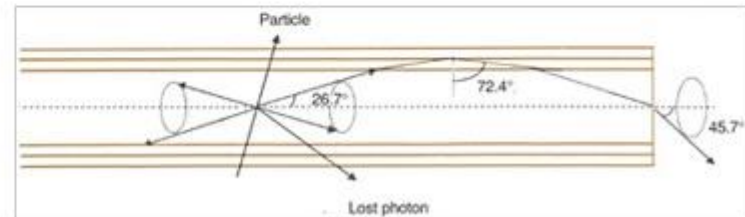


### Multi Cladding

Multi cladding fiber(M) 50% has higher light yield than single cladding fiber because of large trapping efficiency.

Clear-PS fiber of this cladding has extremely higher NA than conventional PMMA or PS fiber, and very useful as light guide fiber.

Multicladding fiber has long attenuation length equal to single cladding fiber.





# Tipi di fibre WLS (da kuraraypsf.jp)

(non mostrato a lezione)

## Formulations <sup>1)</sup>

Description	Emission			Absorption Peak[nm]	Att.Leng. <sup>2)</sup> [m]	Characteristics
	Color	Spectra	Peak[nm]			
Y-7(100)	green	See the following figure	490	439	>2.8	Blue to Green Shifter
Y-8(100)	green		511	455	>3.0	Blue to Green Shifter
Y-11(200)	green		476	430	>3.5	Blue to Green Shifter (K-27 formulation) Long Attenuation Length and High Light Yield
B-2(200)	blue		437	375	>3.5	UV to Blue shifter
B-3(200)	blue		450	351	>4.0	UV to Blue shifter
O-2(100)	orange		550	535	>1.5	Green to orange shifter
R-3(100)	red		610	577	>2.0	Green to red shifter

1) Test fibers are Non-S type, 1mmΦ.

2) Measured by using bialkali PMT and blue LED(445nm).

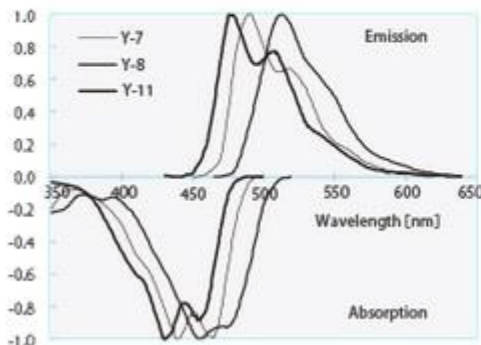
Otherwise than descriptions mentioned above, various WLS fibers are available.

←  
Y-11(200) is used quite often, transparent, high light yield

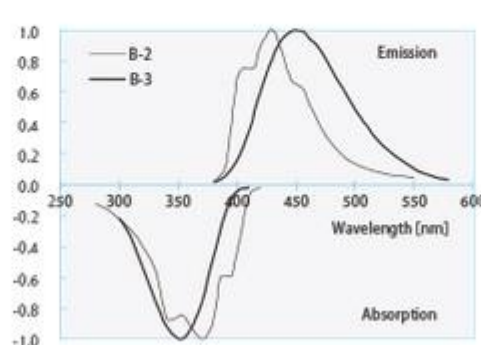
(200) concentration of the dye in ppm [the dye produces the wavelength shifting]

## Absorption and Emission Spectra

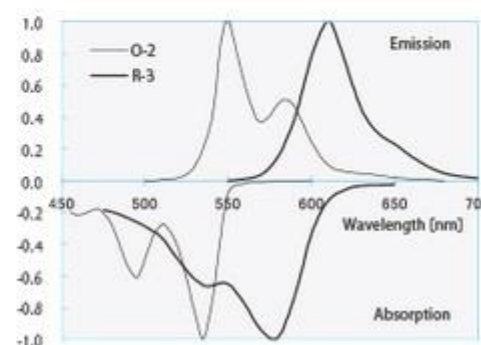
- Y-7, Y-8, Y-11



- B-2, B-3



- O-2, R-3



# Costruzione del prototipo



Completed frame during lay-up of scintillator strips



Aircraft construction techniques to reduce weight



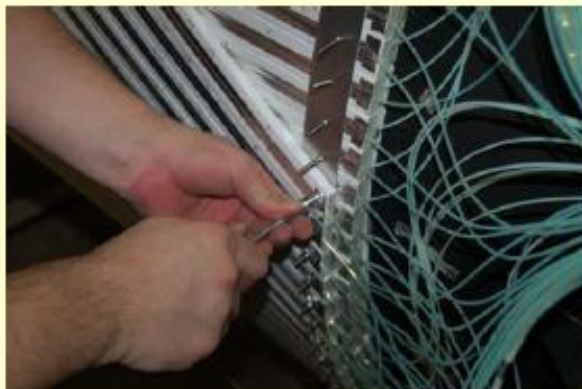
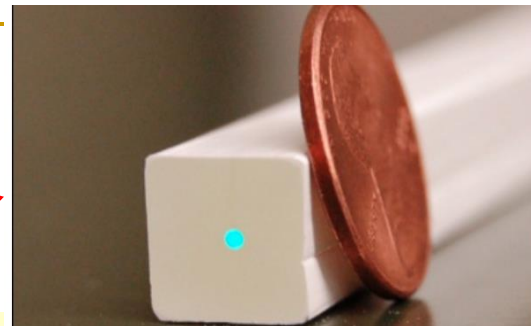
PMTs and electronics will be mounted in end-rings



# Il sistema di tracciamento

prototipo

rivelatore  
finale



“MINOS” scintillatore

30 mm wide

10 mm thick

WLS fiber readout

2 helical layers

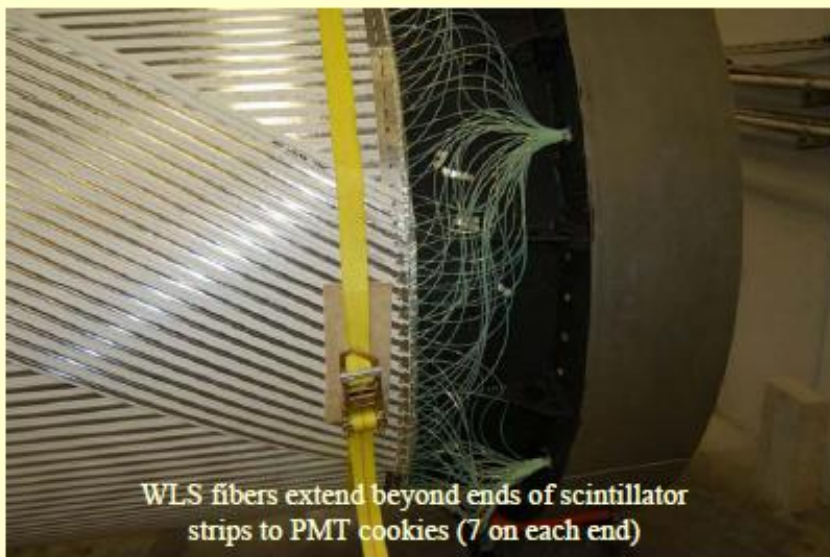
1 axial layer (center)

441 total strips

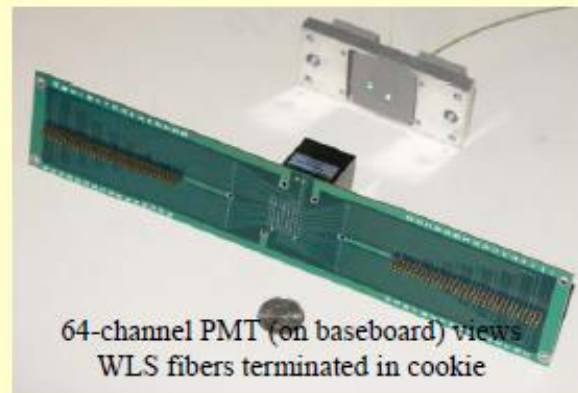


Unfinished WLS fibers protruding  
through PMT cookies on frame

10x10  
mm<sup>2</sup>



WLS fibers extend beyond ends of scintillator  
strips to PMT cookies (7 on each end)



64-channel PMT (on baseboard) views  
WLS fibers terminated in cookie

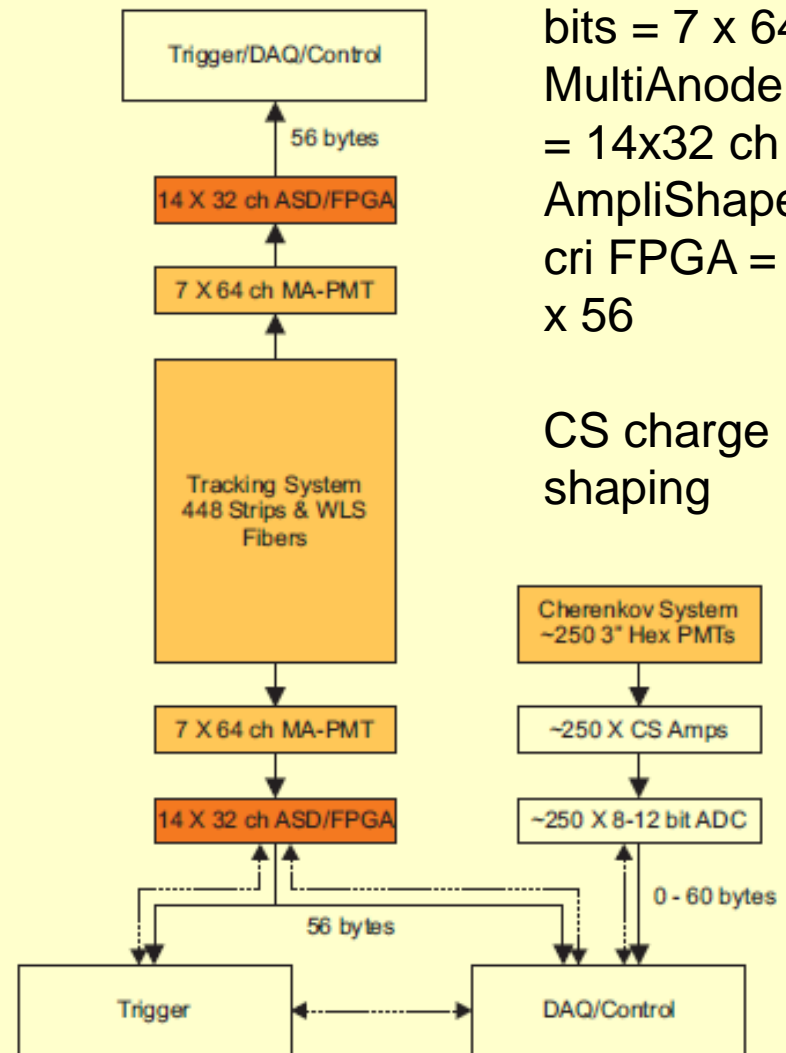
# Installazione delle strisce





# Elettronica (le fibre sono lette ai due estremi)

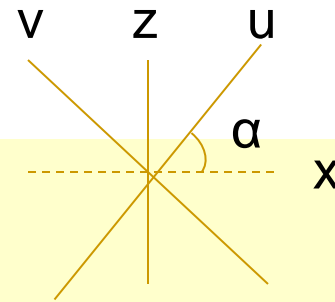
- Data from detector
  - Tracking: 2X448 “hit” bits
  - Cherenkov: Analog out
- Trigger
  - Based on tracking information only
  - Programmable logic
- DAQ
  - All tracking bits
  - Cherenkov hits *above* pedestal
- Control
  - Trigger/DAQ control
  - Monitor all detector systems



441 strips; 448 bits = 7 x 64 MultiAnodePMT = 14x32 ch AmpliShaperDiscr FPGA = 8 bit x 56

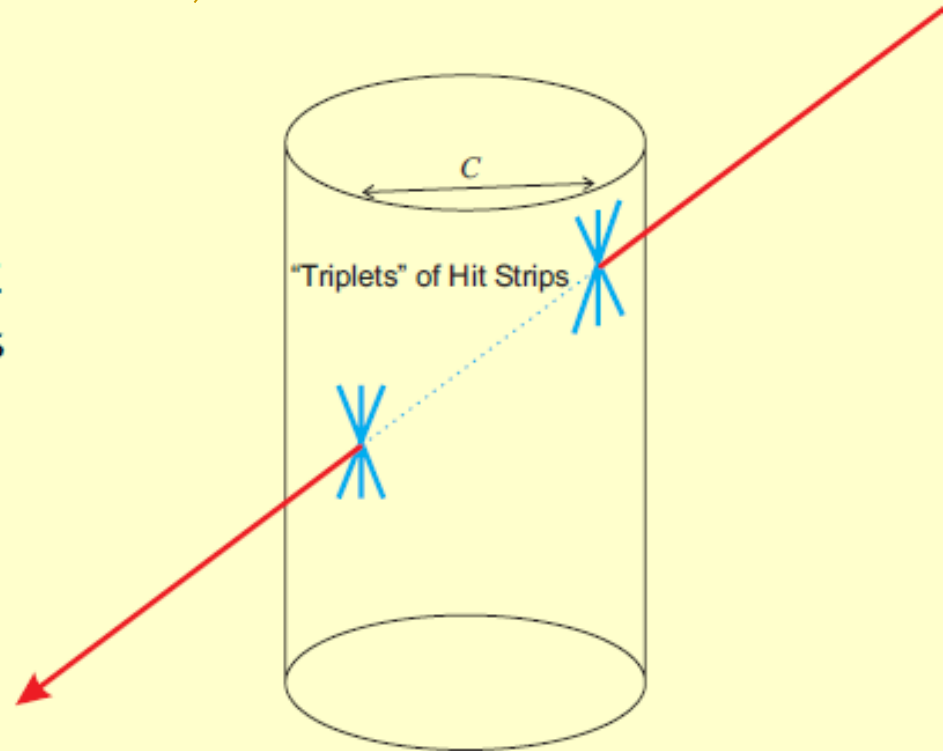
CS charge shaping

# Trigger (prototipo)

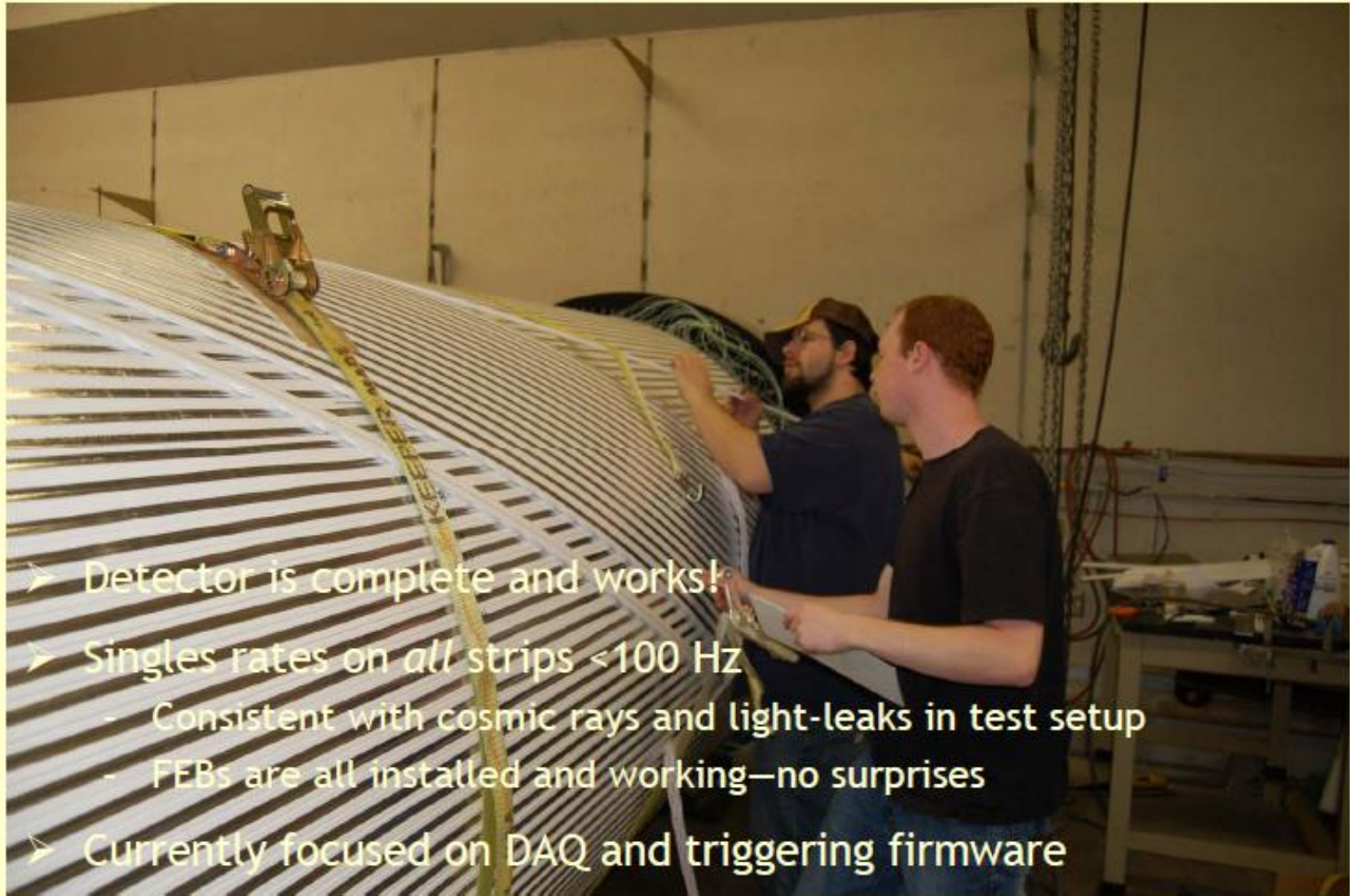


$$z = (u+v)\sin\alpha$$
$$x' = (u-v)\cos\alpha$$
$$\phi' = [(u-v)/r]\cos\alpha$$
$$\phi = x/r$$

- Use only tracking information
- Require:
  - $\geq 2$  Hit “Triplets”
  - Chord  $c > c_{\min}$
  - Direction ?
- Flexible definition of Triplet
  - Coincidence gate: 25–50 ns
  - Number/pattern of hits to balance:
    - Noise - singles rates
    - Inefficiencies
- Typical rates:
  - True events  $\sim 100$  Hz
  - CR singles:
    - $\sim 4$  KHz full detector
    - $\sim 25$  Hz per strip

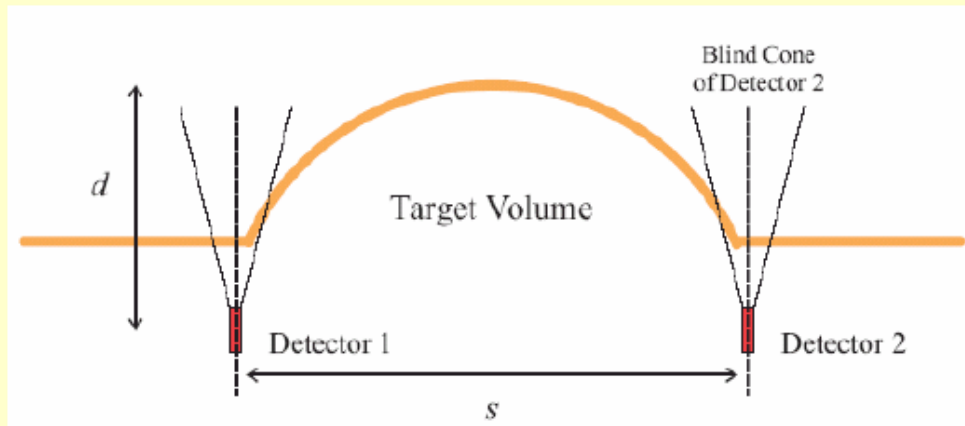
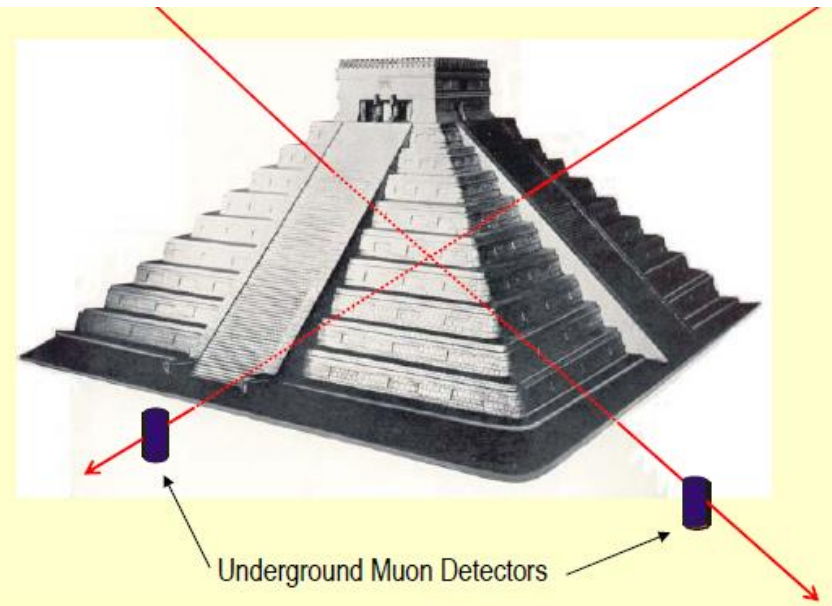


# Un prototipo completo



- Detector is complete and works!
- Singles rates on *all* strips <100 Hz
  - Consistent with cosmic rays and light-leaks in test setup
  - FEBs are all installed and working—no surprises
- Currently focused on DAQ and triggering firmware

# Rivelatori/ posizionamento

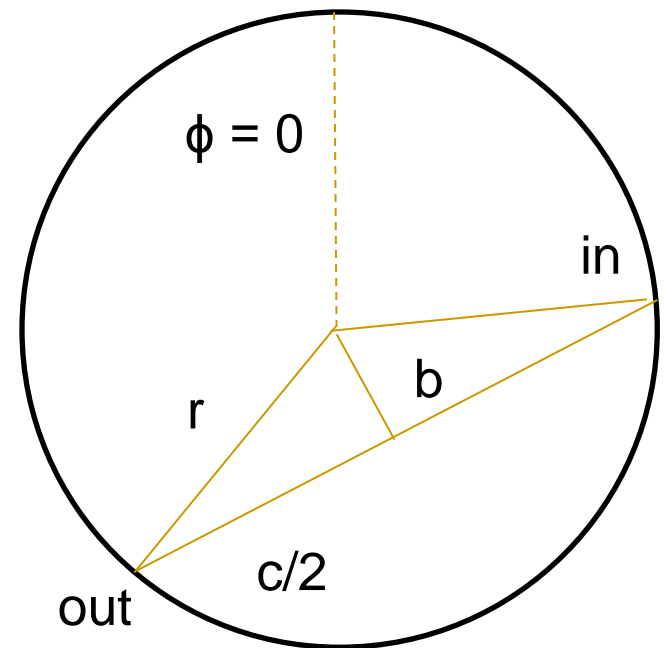


- Use 2 or more detectors
  - Compensates for “blind cone” inherent in cylindrical detectors
  - Improved stereo sampling of target volume
  - Symmetry of cylindrical detectors good for measuring “average” image
- Minimizes excavation



# Selezione, variabili

- Selezione: in = tripletto con z più grande, out l'altro.  
Finestra di tempo: 25-50 ns, cioè non si sfrutta il tempo di volo del  $\mu$  (5 ns per il prototipo, ma solo 1.8 ns per il rivelatore finale)
  - ci sono 55360 tripletti validi
  - $\rightarrow \sim 10^9$  possibili tracce
  - $\rightarrow$  pesi per le tracce
- Parametro d'impatto col segno  
 $b = r \cos[(\phi_{in} - \phi_{out})/2]$
- Corda  $c = 2r \sqrt{1 - (b/r)^2}$
- $\phi_{track} = (\phi_{in} + \phi_{out})/2 - \pi/2$
- $\theta_{track} = \text{tg}^{-1}[c/(z_{in} - z_{out})]$



# Interazioni dei $\mu$ nella piramide

- Energy loss: predominately by ionization

$$\frac{dE}{dx} \approx 2.3 \text{ MeV/gm/cm}^2 \approx 0.6 \text{ GeV/m in rock}$$

per  
E ~ 24 GeV  
(\*\*)

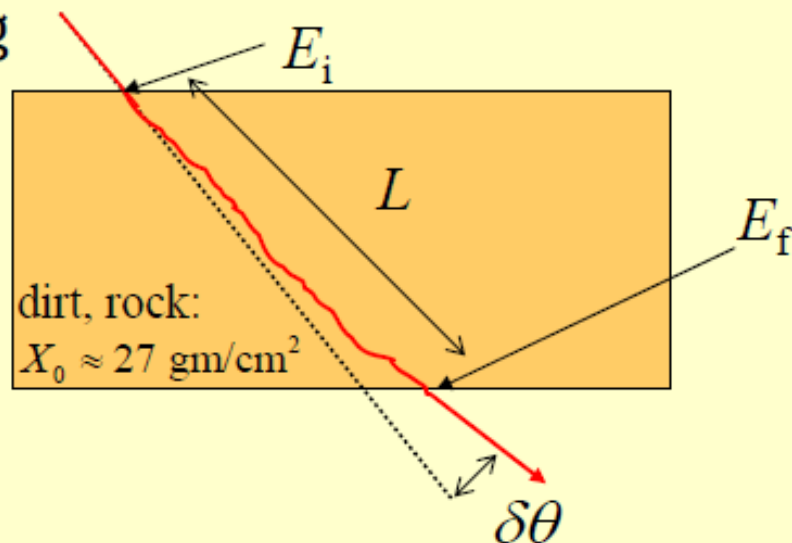
- Multiple-Coulomb Scattering

$$\delta\theta \approx \frac{13.6 \text{ MeV}}{\sqrt{E_i E_f}} \sqrt{\frac{L}{X_0}} \quad (*)$$

L è  
grande

$$E_i - E_f \approx L \frac{dE}{dx}$$

10 cm



(\*) parametrizzazione di Lynch&Dahl, 1991, trascurando un termine corrett.

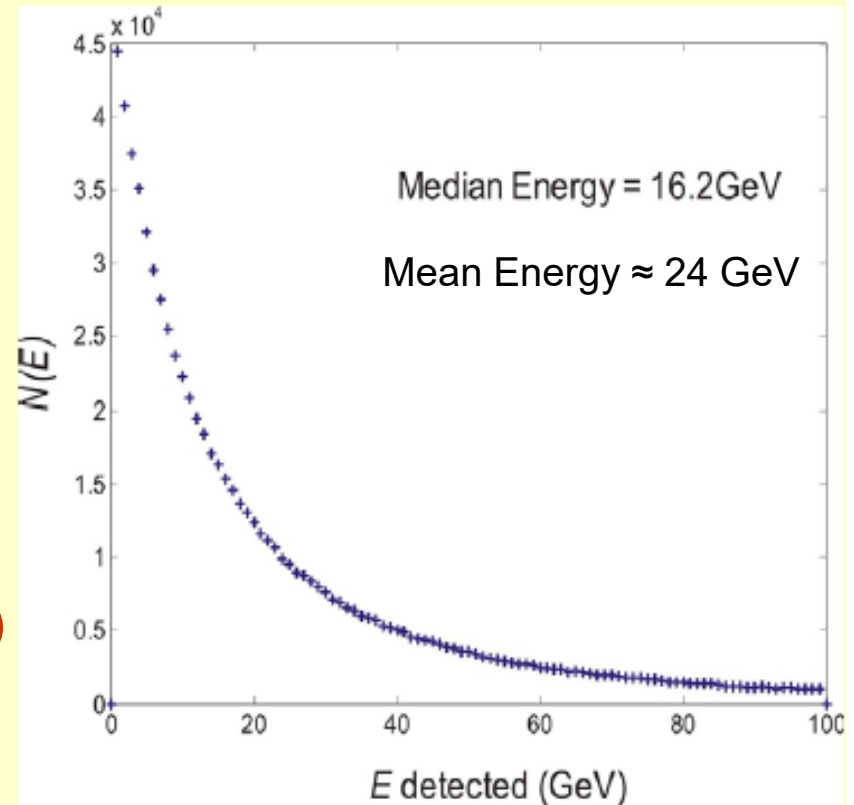
(\*\*) per es. con  $a(E)$ ,  $b(E)$  di Gaisser&Stanev, parte 1 A, p. 56<sup>46</sup>

# I $\mu$ nel rivelatore/m.s.

- Typical detected energy spectrum shown:
- Coulomb scattering large for tracks near end of range; nearly *independent* of scattering material and initial muon energy

$$\delta\theta \approx \frac{0.055}{\sqrt{E_f(\text{GeV})}} \text{ for } E_f \ll E_i \quad (*)$$

- May need to “harden” the spectrum to reduce blurring (Alvarez used iron absorber)

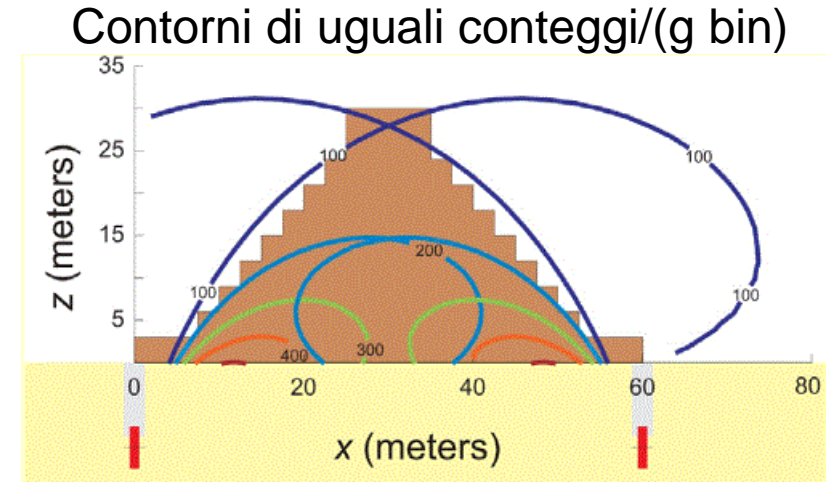


per  $E_f \ll E_i$ ,  $L = (E_i - E_f)/(dE/dx)$ , sostituendo i parametri per la roccia si ha (\*)

# Conteggi, tempi di esposizione

## ■ Caso estremo

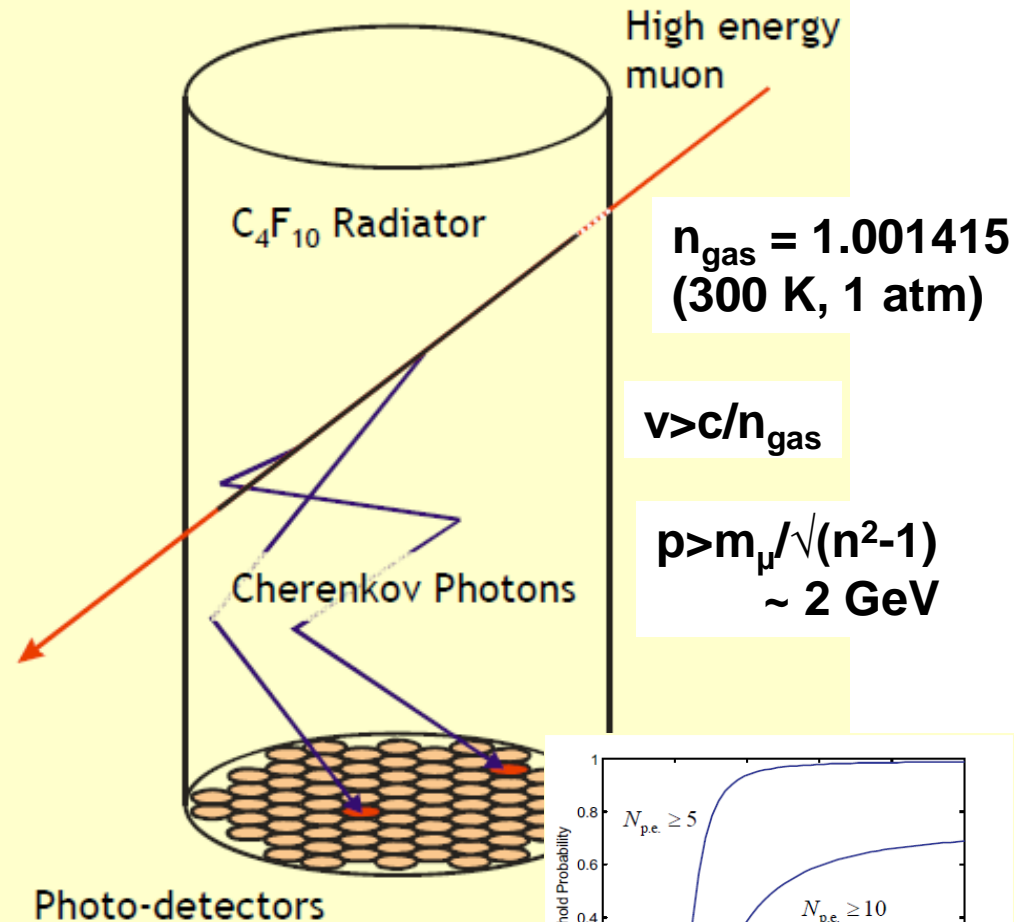
- spessore attraversato  $\approx 50$  m
  - $1 \text{ m}^3$  vuoto a 50 m dal riv. ( $\Delta E \sim 0.6 \text{ GeV}$ , flusso  $\sim 6\%$  maggiore)
  - $\Delta\Omega = (1/50)^2$
  - Area attiva  $3 \text{ m}^2$  (prototipo; rivelatore finale  $\sim 0.5 \text{ m}^2$ )
  - 100 eventi/giorno per bin di  $\Delta\Omega$  e per rivelatore
  - scan a  $1\sigma$  richiede 10 gg (contrasto  $\sim 1.5 \times 1/50$ ) – 1000 ev, 3% di errore
  - scan a  $3\sigma$  richiede 3 mesi - 9000 ev,  $\sim 1\%$
- con un secondo rivelatore le stime migliorano più di un fattore 2: il vuoto può essere più vicino



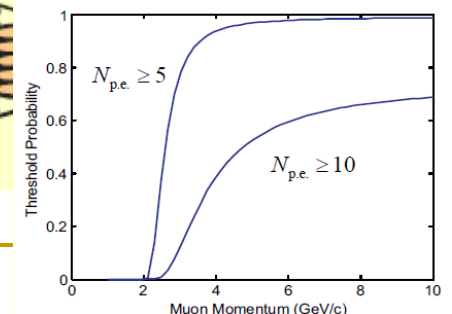


# Possibile discriminazione dei $\mu$ di bassa E (hardware $\rightarrow$ software): il Cherenkov (a soglia)

- Fill central cylindrical volume of detector with Cherenkov radiator gas:  $C_4F_{10}$ 
  - Muon threshold  $\sim 2$  GeV
  - $\beta = 1$  p.e. yield:  $\sim 35$ /meter of radiator
  - $C_4F_{10}$  is a freon used for fire suppression
- Make inner surface of cylinder optically reflecting
- Place array of photon detectors on *bottom* of cylinder

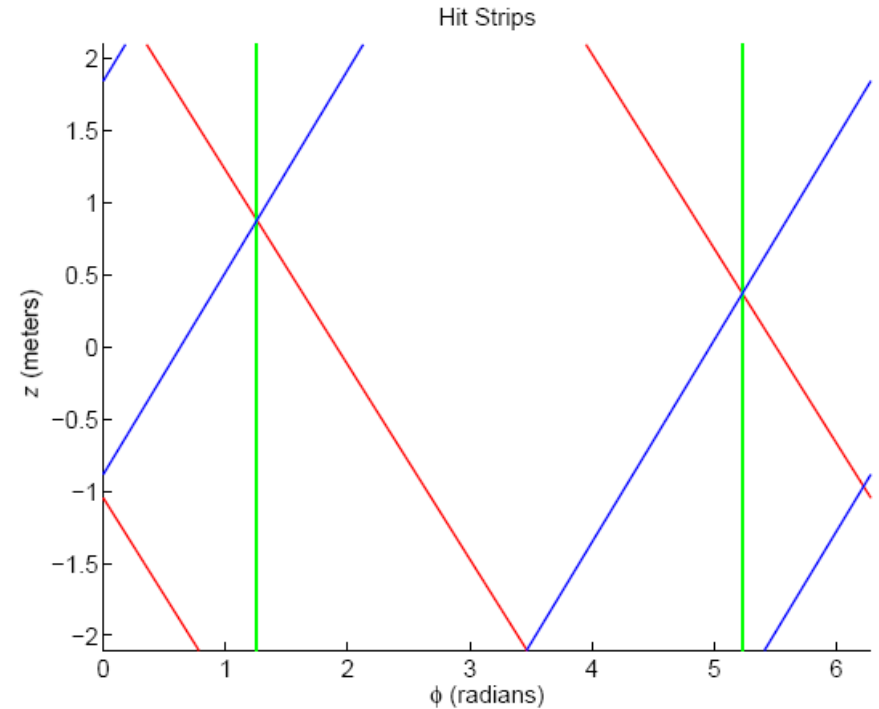
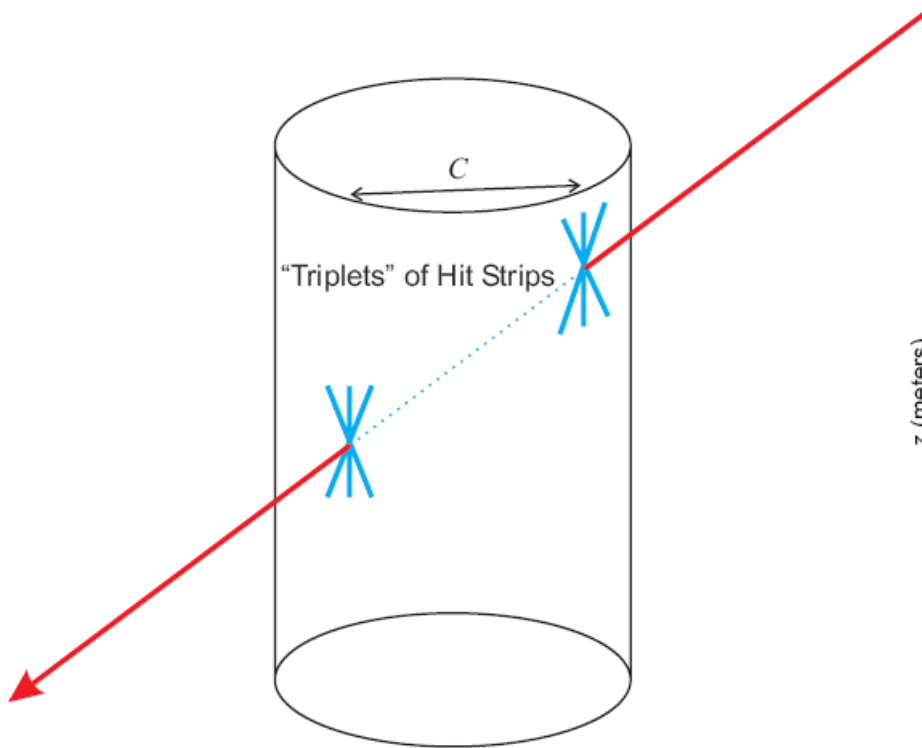


- la soglia può essere richiesta e/o variata durante l'analisi



# Ricostruzione

- i colori diversi indicano i diversi strati di strisce di scintillatore
- i tempi (stretti) non sono usati



Il software offline è in grado di rigettare abbastanza facilmente gli eventi spuri. Si costruiscono look-up tables per gli indirizzi delle strisce partendo dai tre strati che si sovrappongono e si ordina la qualità della sovrapposizione secondo un parametro di  $\chi^2$ . Una traccia è così formata connettendo le coordinate del tripletto d'ingresso con quelle di quello di uscita, ambedue col più basso valore del valore del  $\chi^2$  → possibilità di processare online!!

# Risoluzione (prototipo)

## ➤ Measurement errors

- Determined by strip width and stereo angle
- $\sigma < 1\text{m}$  in both planes

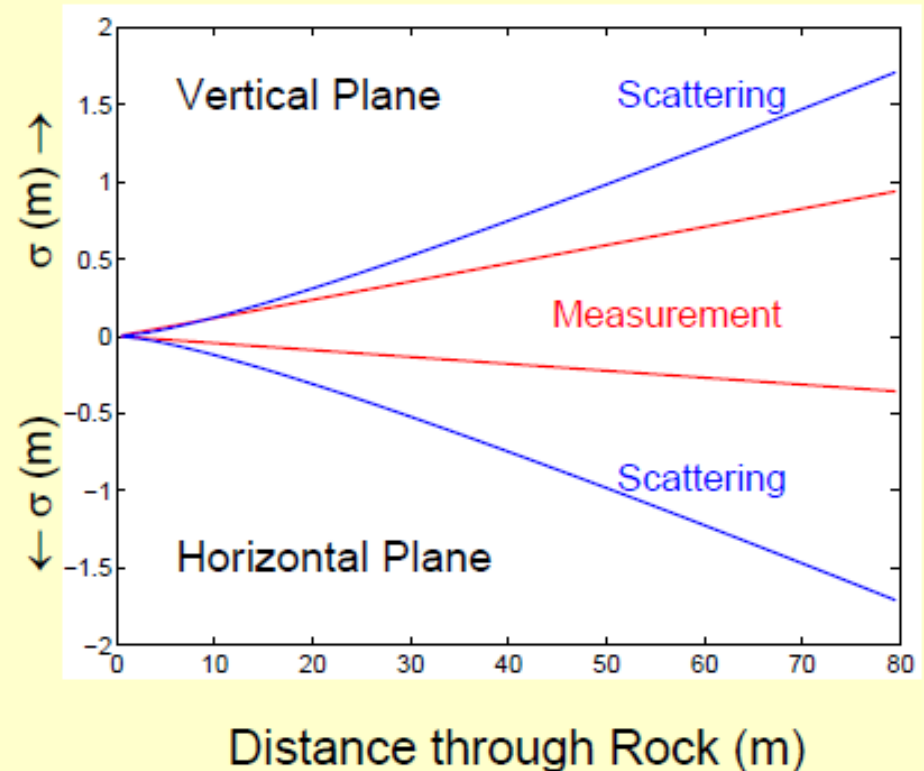
## ➤ Multiple-scattering

- Will dominate tracking errors for  $R > 40\text{ m}$
- Higher Cherenkov threshold can mitigate
- GEANT simulations

$$\begin{aligned} \langle \sigma_\phi \rangle &= 5 \text{ mrad} \\ \langle \sigma_{\cot\theta} \rangle &= 0.013 \\ \langle \sigma_b \rangle &= 3.5 \text{ mm} \\ \langle \sigma_z \rangle &= 8.9 \text{ mm} \end{aligned}$$

↔ 3.8 mm

$\Theta = 60^\circ$  (es. di angolo della traccia)



Rivelatore finale:  $\approx$  stesse risoluzioni, strisce di 10 mm

Errore sul punto di ingresso del  $\mu$

Cylindrical Projection  
Top DAQ

cylproject3d\_yx

Entries 1.688191e+07

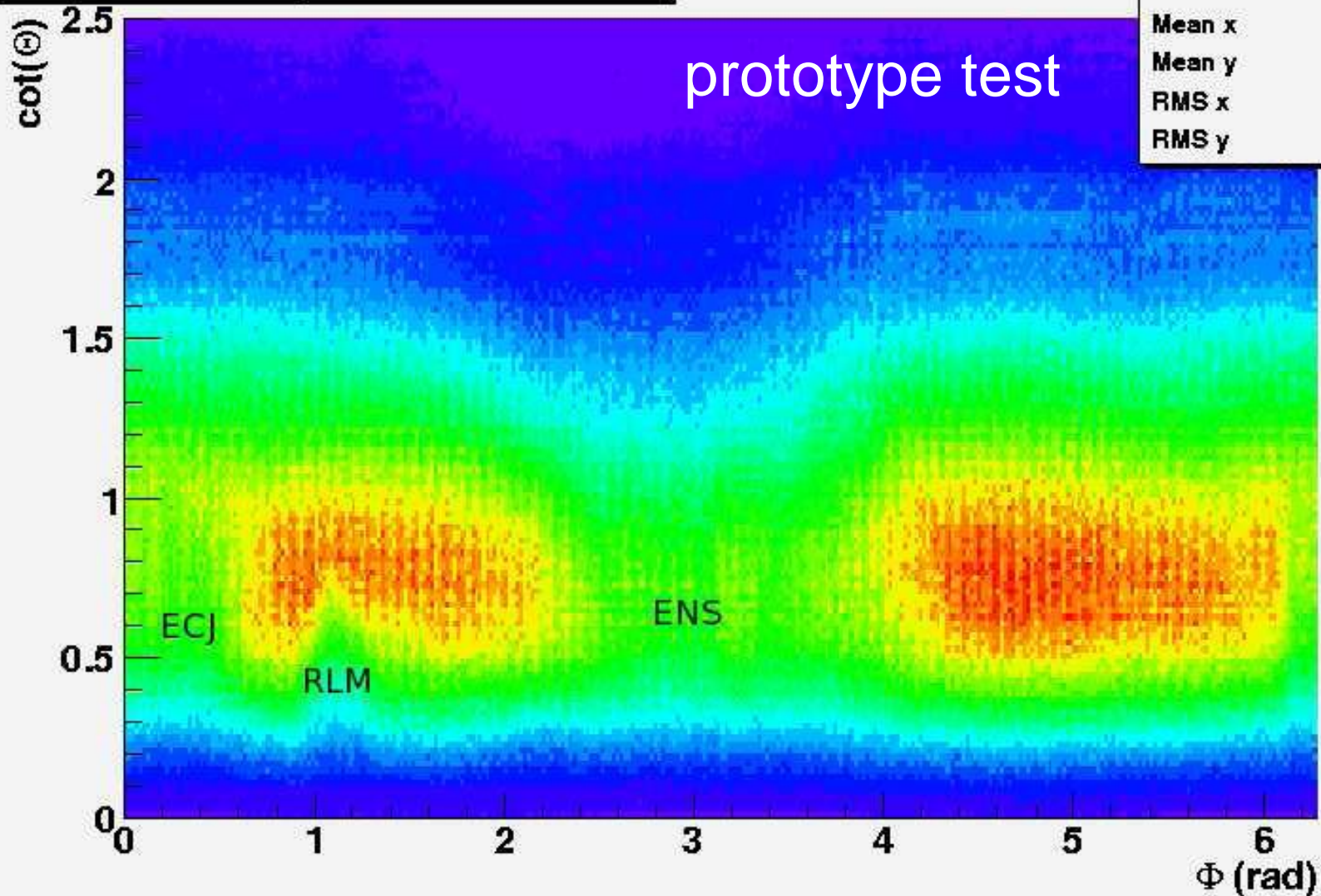
Mean x 3.22

Mean y 0.9728

RMS x 1.866

RMS y 0.4946

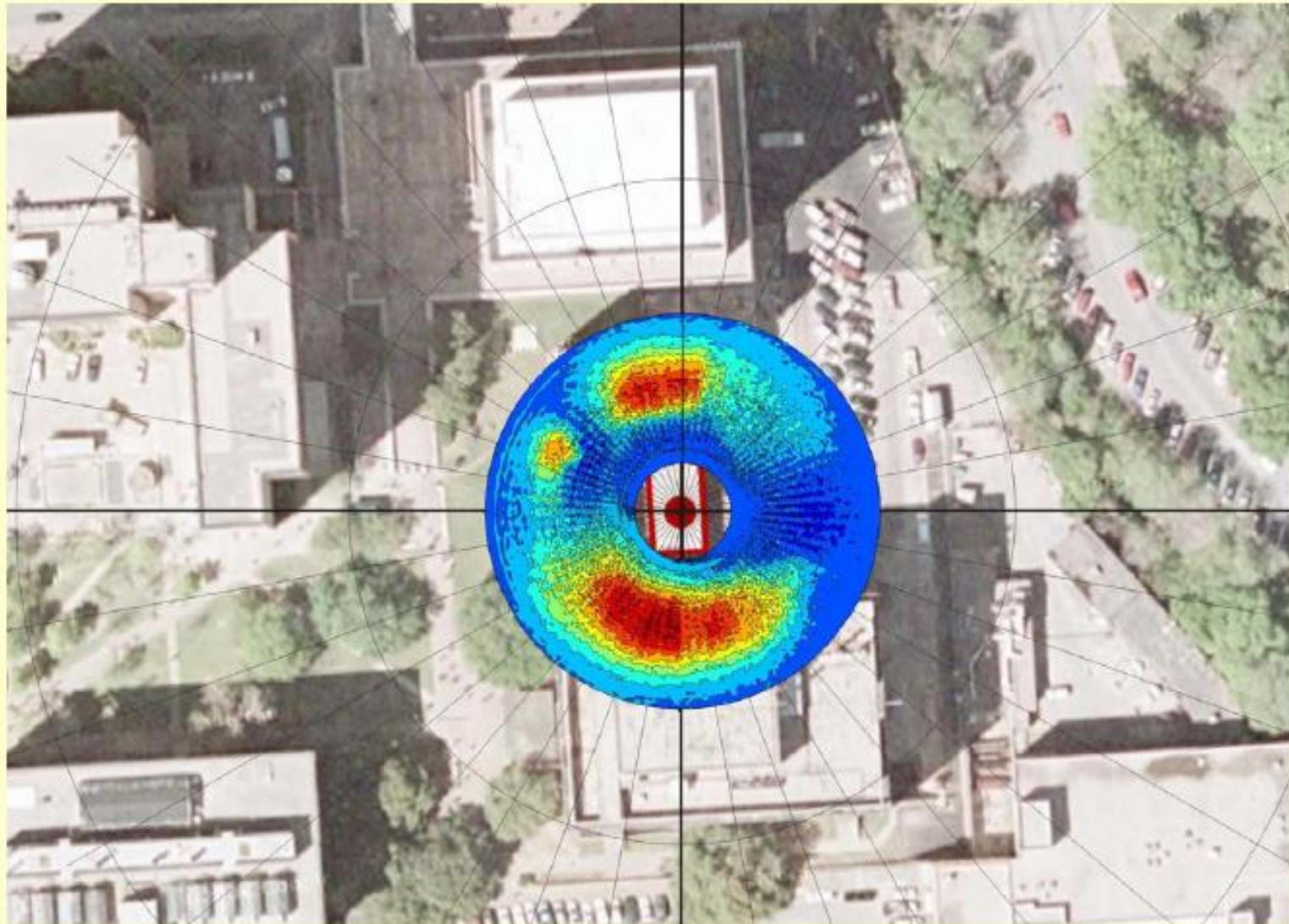
prototype test



**ECJ, RLM, ENS** – edifici del campus nelle vicinanze del rivelatore/prototipo



# Net Muon "Deficit" in $\theta$ versus $\phi$



# Il rivelatore (finale)

- Rugged cylindrical construction:
  - 1.5 m long by 0.55 m diameter
  - Weight: ~ 130 kg
- 448  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  scintillator strips (Fermilab)
- All electronics internal
  - Track processing done onboard
  - 2 External connections: 48 VDC, ethernet



Maggiore efficienza rispetto  
al prototipo: strisce più corte

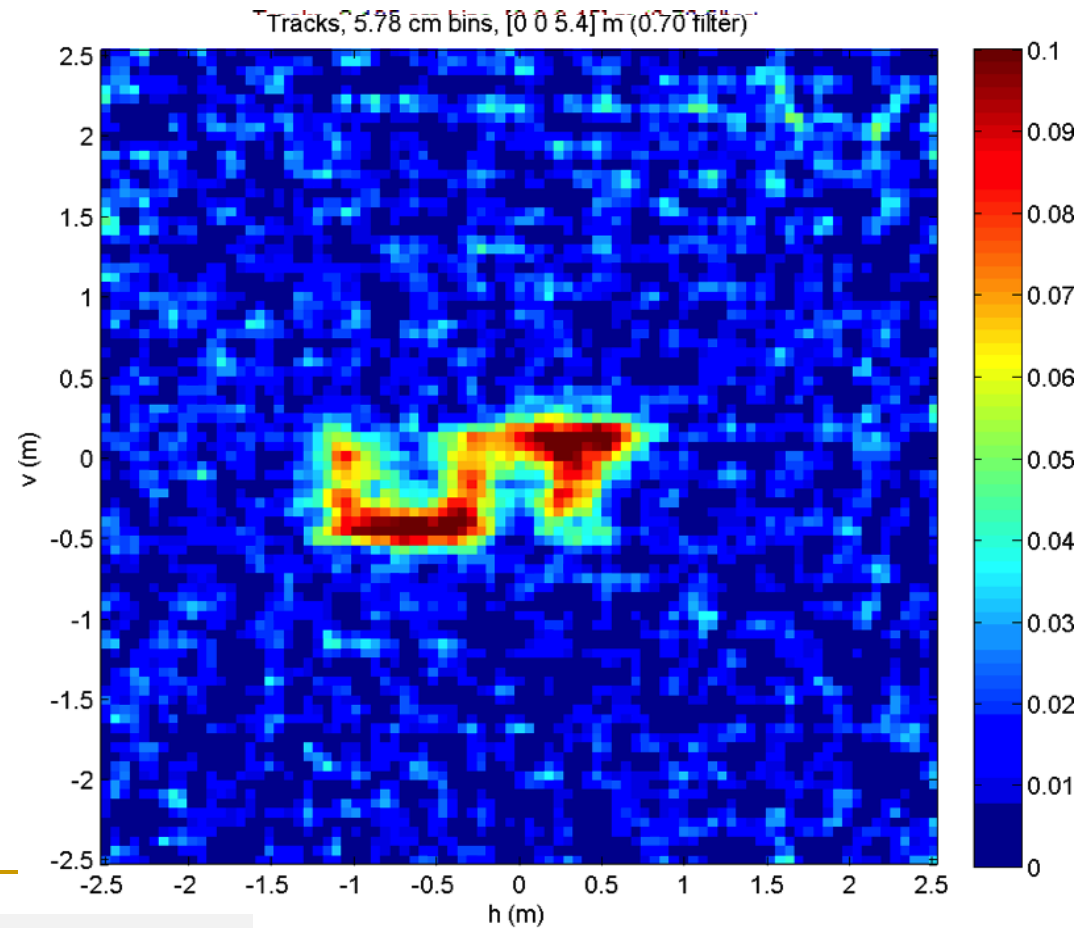
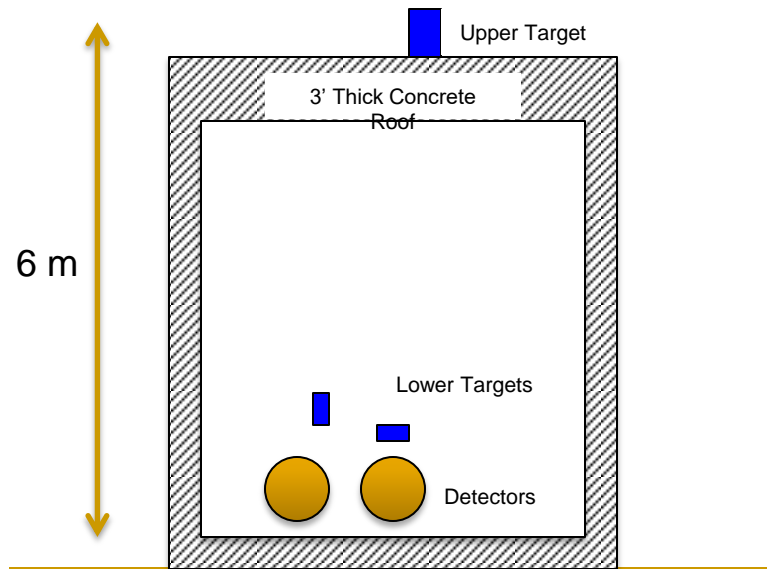
# Imaging

- Sfruttando l'assorbimento (più tracce attraversano le regioni dove ci sono vuoti, meno tracce dove ci sono pieni), i  $\mu$  permettono di costruire piani di immagini 2D della densità del materiale posto in posizioni diverse sopra i rivelatori – basta riproiettare le tracce misurate su una serie di piani (vedi ad es. parte 1 A pag. 75, 79)
- Si combinano le informazioni di 2 rivelatori per essere sensibili a diverse posizioni nello spazio

- I  $\mu$  permettono di costruire piani di immagini 2D della densità del materiale posto in posizioni diverse sopra i rivelatori.
- Si combinano le informazioni di 2 riv. per essere sensibili a diverse posizioni nello spazio
- Si costruisce una “pila” di immagini 2D sopra i rivelatori

## Imaging

(basta un click per passare attraverso la pila di immagini (impossibile nel pdf !!))

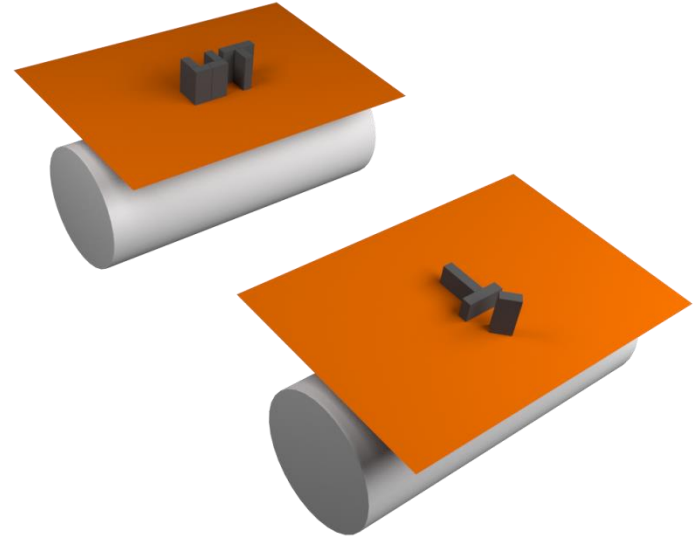


Si sfrutta l'assorbimento: v. parte 1 A p. 75, 79



# Imaging/2

- Che cosa si vede nell'animazione? (\*)
- Materiale sotto: mattoni di Pb 2"x4"x8" piazzati subito sopra i rivelatori
- Materiale sopra: blocchi di cemento caricati con Pb 6"x6"x12": sigla Univ. Texas (visti attraverso un tetto di cemento spesso 3' (90 cm))



(\*) impossibile nel pdf !!

# I run nel Belize

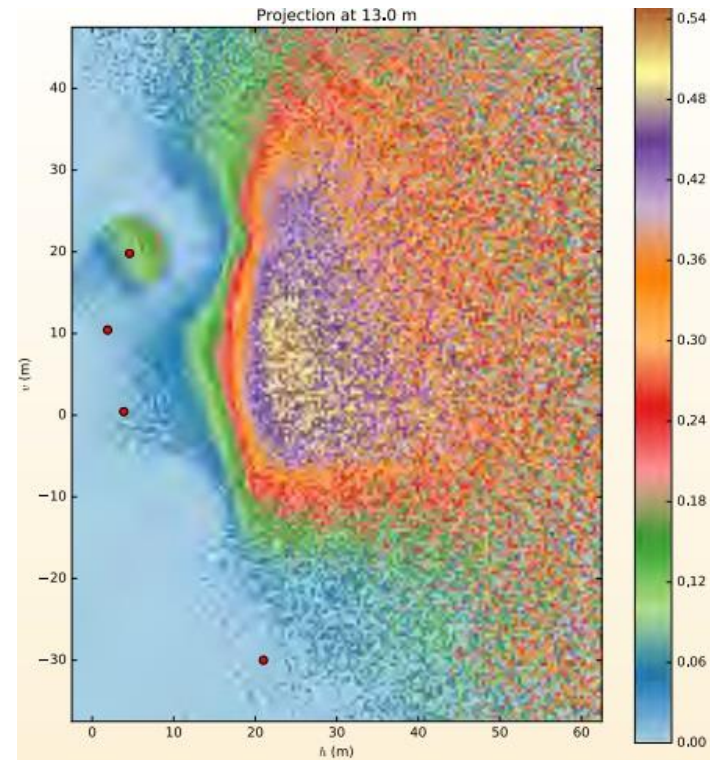


Run time per position

Det	Loc	Run (days)
3	A	5.49
4	B	4.12
3	C	61.5
4	D	85.2
3	C'	35.0
4	D'	38.7

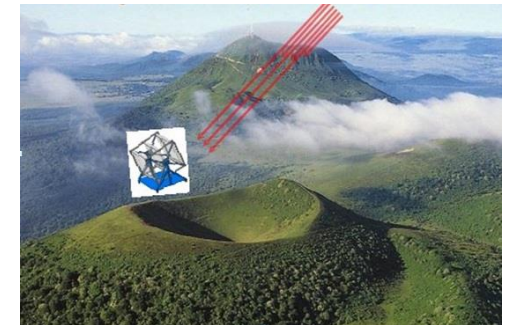
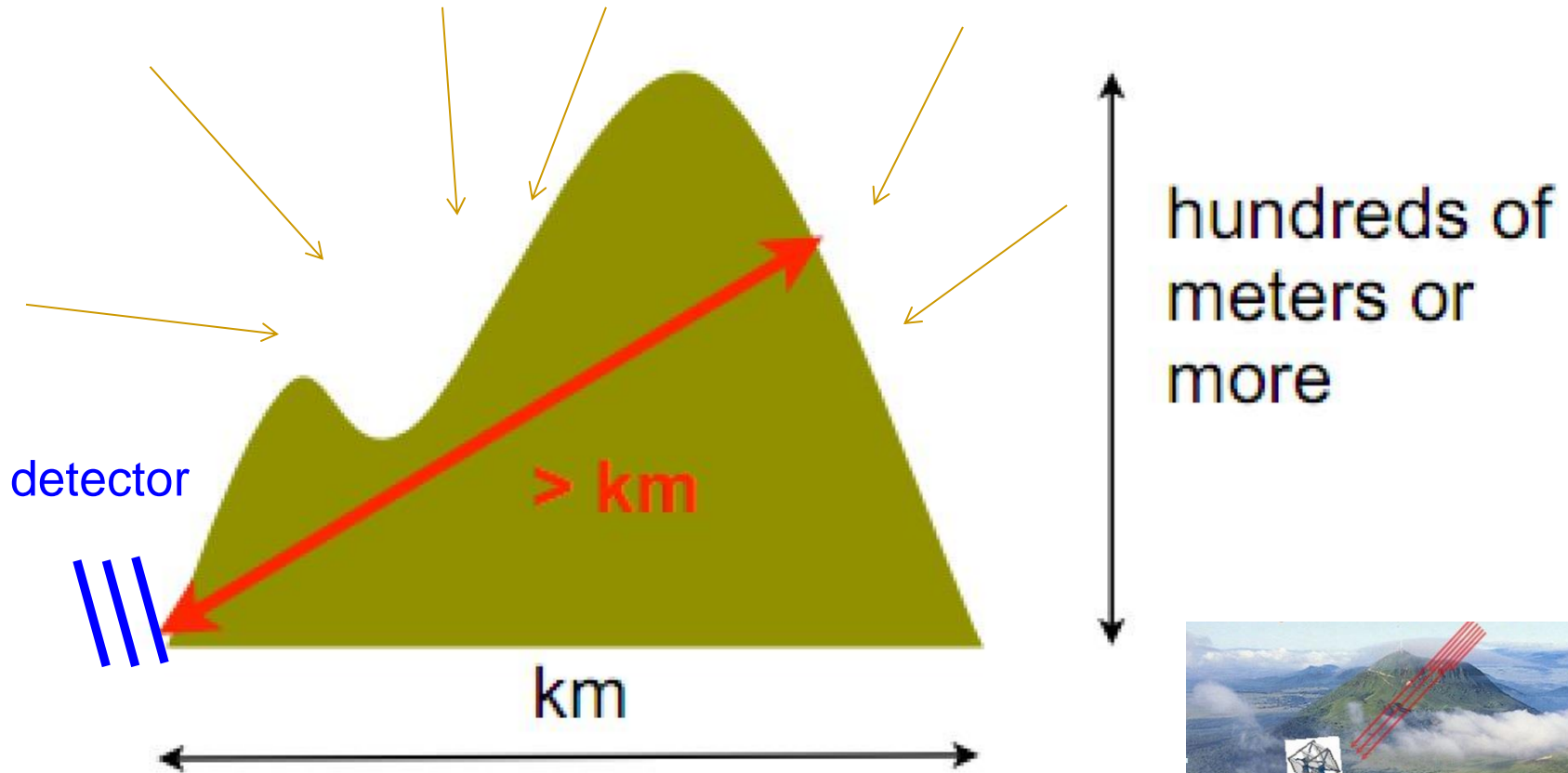
Total collected run time

Year	Det 3 (days)	Det 4 (days)
2013	5.49	4.12
2014	25.0	26.0
2015	95.2	84.9



- two detectors running since 2013
- problems with small power system
- new solar system in 2014
- mid 2015 power issues solved

# Uso dell'assorbimento dei $\mu$ per lo studio di strutture geofisiche





# Un vulcano (fra tanti) in Giappone, una storia di eruzioni

- The eruptions of Mount Asama (2568 m, 145 km north-west of Tokyo) mark the span of Japan's recorded history, including: **2009 (2 Feb.), 2008, 2004, 2003, 1995, 1990, 1983, 1982, 1973, 1965, 1961, 1958-59, 1953-55, 1952, 1952, 1950-51, 1949, 1947, 1946, 1944-45, 1938-42, 1935-37, 1934, 1934, 1933, 1931-32, 1930, 1929, 1929, 1921, 1919, 1918?, 1917, 1916, 1915, 1907, 1907, 1906, 1905?, 1904, 190, 9, 1899, 1894, 1889, 1879, 1878, 803, 1783, 1779?, 1777, 1776, 1769, 32, 1731, 1729, 1729, 1728, 1723, 19, 1718, 1717, 1711, 1710, 1708, 1661, 1661, 1660, 1659, 1658, 1657, 51, 1650?, 1649, 1648, 1648, 1647, 1645, 1644, 1609, 1605, 1604, 1600, 1598, 1597, 1596, 1596, 1595?, 1591, 1590, 1532, 1528, 1527, 1518, 1427?, 1281, 1108, 887, 685**



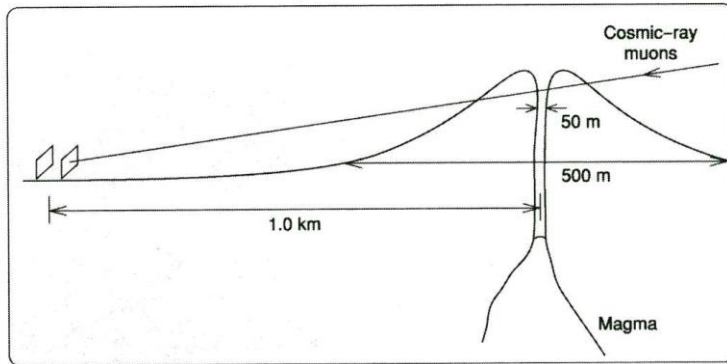


# $\mu$ cosmici e strutture a scala geofisica

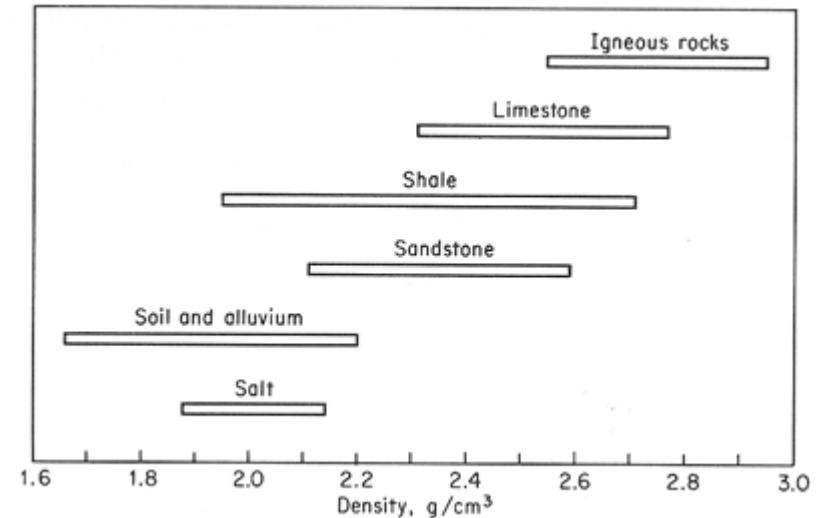
- Muoni quasi orizzontali: spettro di  $E$  più duro di quello verticale (montagne  $\rightarrow$  rivelatori  $\sim$  verticali)
- Rate a cielo aperto:  $\sim 10 \mu/(\text{m}^2 \text{ sr s})$  a  $70^\circ$ ,  $\sim 10^{-1}$  a  $90^\circ$
- Rate decresce vs spessore attraversato,  $E > E_c$ : per 500 m di roccia,  $E_c > 0.42 \text{ TeV}$ , il flusso è  $3 \cdot 10^{-2} \mu/(\text{m}^2 \text{ sr s})$  per  $\theta > 70^\circ$
- Si misura il rate cfr con cielo aperto
- Tempi di misura tipici:  $80 \text{ k}\mu/(\text{m}^2 \text{ sr})$  in un mese ( $E_c > 0.42 \text{ TeV}$ )

# Obiettivi delle misure su vulcani

Densità di  
varie rocce



Schema di vulcano  
e rivelatore

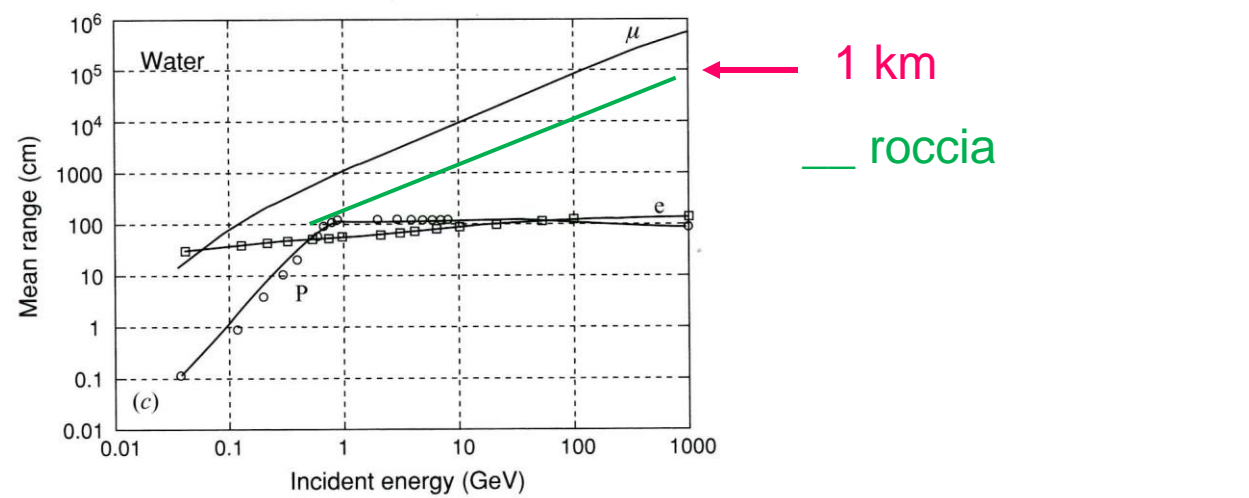
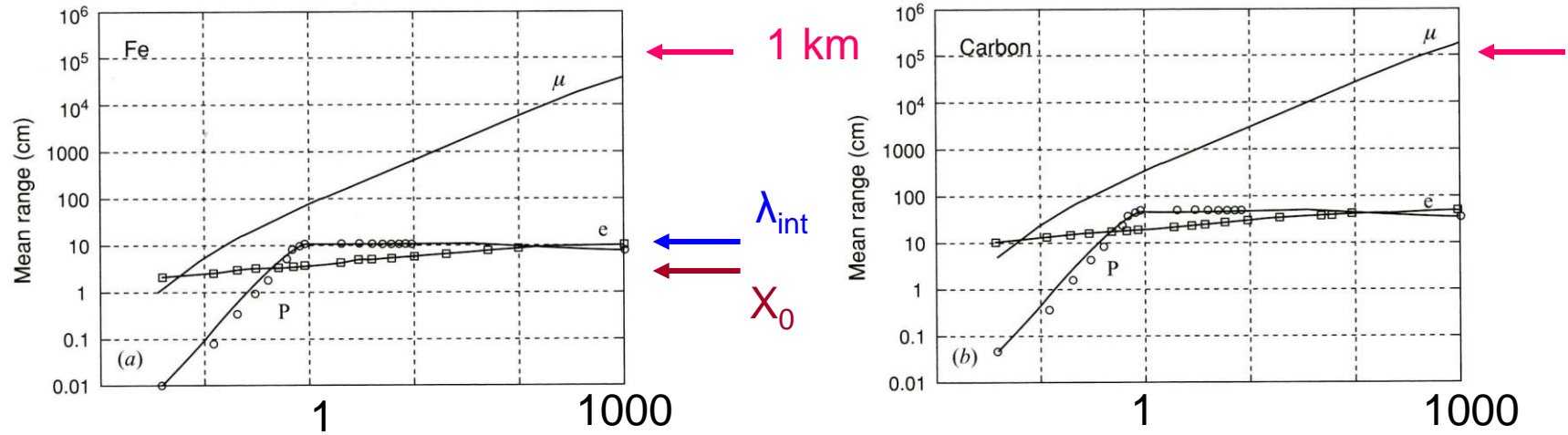


- Immagini statiche, o su tempi lunghi, per verificare gli effetti di passate eruzioni e misurare strati di diversa densità
- Monitoraggio di possibili cambiamenti a tempi più brevi eg risalita del magma

# Penetrazione dei muoni attraverso grossi spessori

- Condizioni necessarie per usare mu quasi-orizzontali come sonda
  - dipendenza angolare e dall'energia
  - range nella roccia ( $\rho = 2.5-2.65 \text{ g/cm}^3$ )  
 $dE/dX = [1.888 + 0.077 \ln(E/m) + 3.9E] \times 10^{-6} \text{ TeVcm}^2/\text{g}$   
( $E = 1 \text{ TeV}$ )  $X = 2.5 \times 10^3 [\ln(1.56E(\text{TeV})) + 1] \text{ hg/cm}^2$
  - intensità attraverso una roccia di spessore  $X \rightarrow$  relazione unica fra  $X$  e intensità dei mu penetranti  $N_\mu(E_c(X), \theta)$ ; noto  $X$  si trova  $E_c$  e  $N_\mu(E_c, \theta)$ ; viceversa la misura di  $N_\mu(\theta)$  determina unicamente  $X$

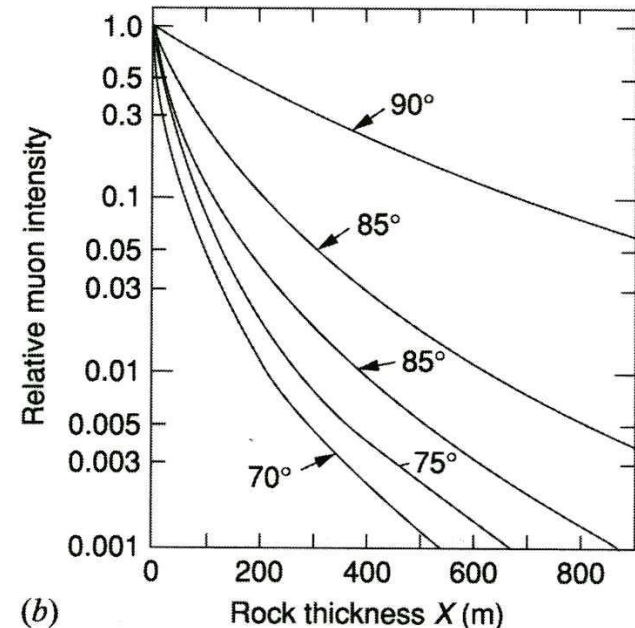
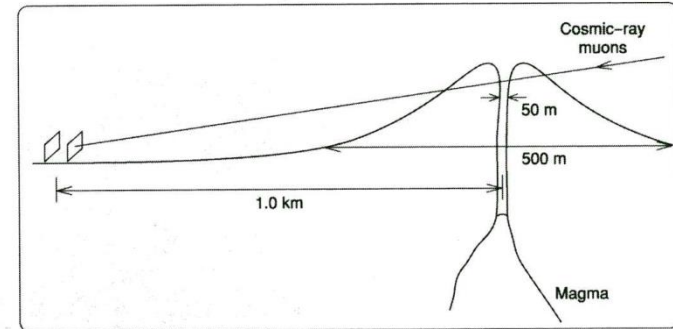
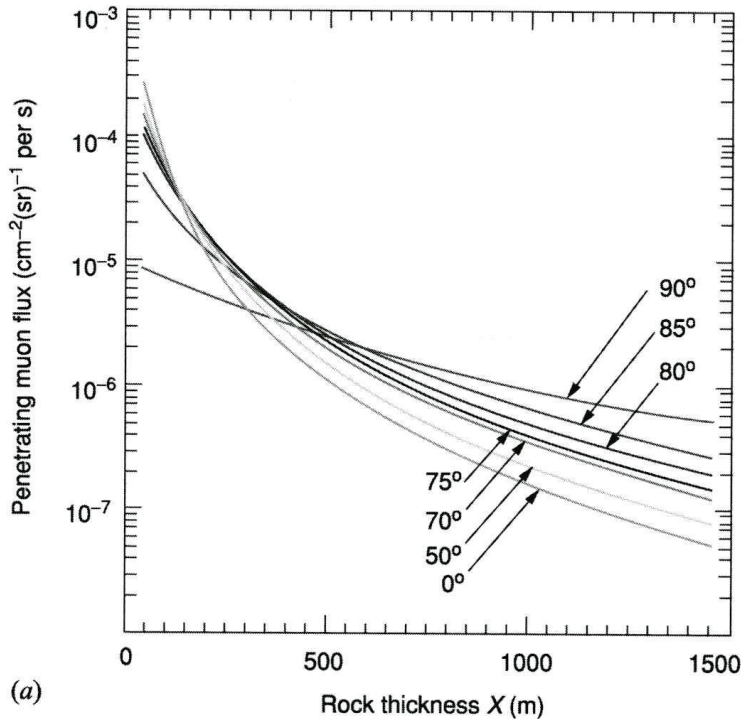
# Range medio di mu in vari materiali (confrontato col comportamento di p ed e)



spessore di materiale  
che attenua il 50%  
delle particelle incidenti  
p ed e sciamano (p  
sopra 1 GeV), in Fe  
 $\lambda_{int} \sim 10$  cm,  $X_0 \sim 2$  cm



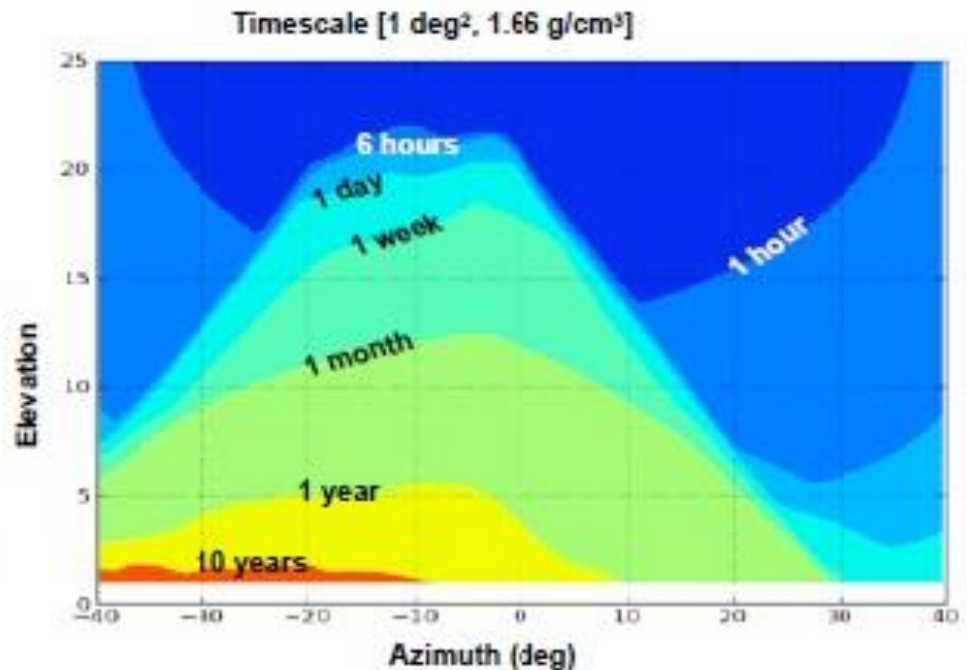
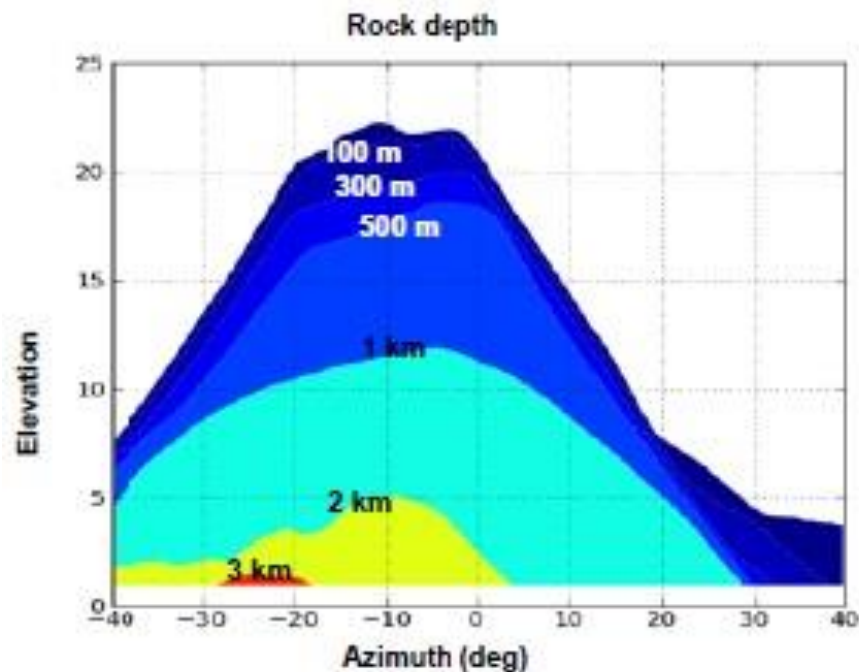
# Flusso integrato dei $\mu$ cosmici vs $\theta$



- es: montagna circolare di diametro 500 m, cavità di 50 m (variazione di 10% in  $X$ ),  $\theta = 90^\circ$ ,  $E_c$  passa da 0.416 a 0.364 TeV e  $N_\mu$  passa da  $1.61 \times 10^{-6}$  a  $1.87 \times 10^{-6}$  ( $\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) ossia cambia del 16%

# Tipici tempi di misura in funzione dello spessore di roccia

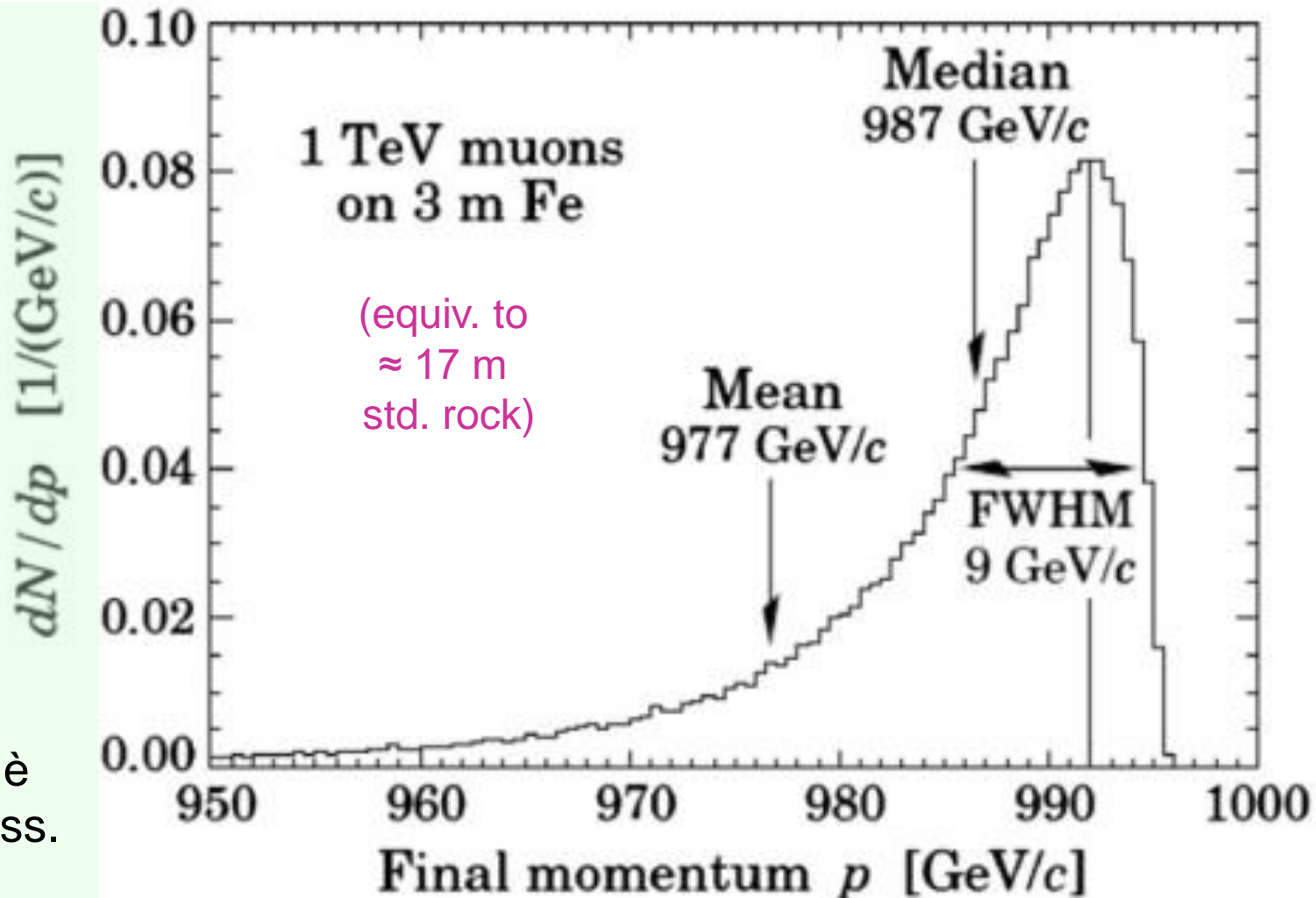
NB La densità delle rocce varia fortemente in funzione della composizione. Qui si assume  $1.66 \text{ g/cm}^3$  (corrisponde ~ a suolo/depositi alluvionali, v. pag. 62); si trovano valori fino a 2.9-3 per le rocce ignee; la d. della roccia 'standard' è 2.65.



Computation for a uniform target with  $\rho=1.66 \text{ g/cm}^3$  and a  $0.67 \text{ m}^2$  ideal detector

# Simulazione di $\mu$ ad alta energia (perdite 'catastrofiche' per spessori relativamente piccoli)

Ad alta E e «piccoli» spessori le perdite per radiaz. sono importanti → grosse perdite in singoli processi, perdita di en. asimmetrica con lunghe code. L'effetto è ridotto per spess. più grandi.



# Multiple scattering e range straggling

- m.s.: calcoli di MC usando la teoria di Molière danno per  $\theta > 70^\circ$  una dispersione angolare sotto i 5 mrad (= 5 m/1 km) per una montagna spessa 500 m
- straggling: è importante per mu di alta E per via del bremsstrahlung, tenendo conto dello spettro di E, l'incertezza sullo spessore attraversato può essere comunque mantenuta sotto l'1% per un attraversamento di 500 m



# Prime radiografie di vulcani

Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction

K. Nagamine <sup>a,b,\*</sup>, M. Iwasaki <sup>a</sup>, K. Shimomura <sup>a</sup>, K. Ishida <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Meson Science Laboratory, Faculty of Science, University of Tokyo (UT-MSL), Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

<sup>b</sup> Muon Science Laboratory, The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama, Japan

Received 4 July 1994; revised form received 12 September 1994

## Abstract

One potential use of cosmic-ray muons arriving nearly horizontally along the earth is a probe of the inner-structure of a gigantic geophysical substance, such as a volcanic mountain. A simple detection system comprising a plastic scintillator **nodoscope** which is expandable to a larger scale was developed. The first successful measurement of the inner-structure of Mt. Tsukuba is described. The future perspective of the application of the present method towards the prediction of volcanic eruption is discussed.

NIM A356 (1995) 585

Mt. Tsukuba, 877m



High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan

Hiroyuki K.M. Tanaka <sup>a,b,c,\*</sup>, Toshiyuki Nakano <sup>d</sup>, Satoru Takahashi <sup>d</sup>, Jyunya Yoshida <sup>d</sup>, Minoru Takeo <sup>a</sup>, Jun Oikawa <sup>a</sup>, Takao Ohminato <sup>a</sup>, Yosuke Aoki <sup>a</sup>, Etsuro Koyama <sup>a</sup>, Hiroshi Tsuji <sup>a</sup>, Kimio Niwa <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Earthquake Research Institute (ERI), University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo 113-0032, Japan

<sup>b</sup> Atomic Physics Laboratory, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

<sup>c</sup> Physics Department, University of California, Riverside, CA 92521, USA

<sup>d</sup> Physics Department, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa, Nagoya, Aichi 464-8602, Japan

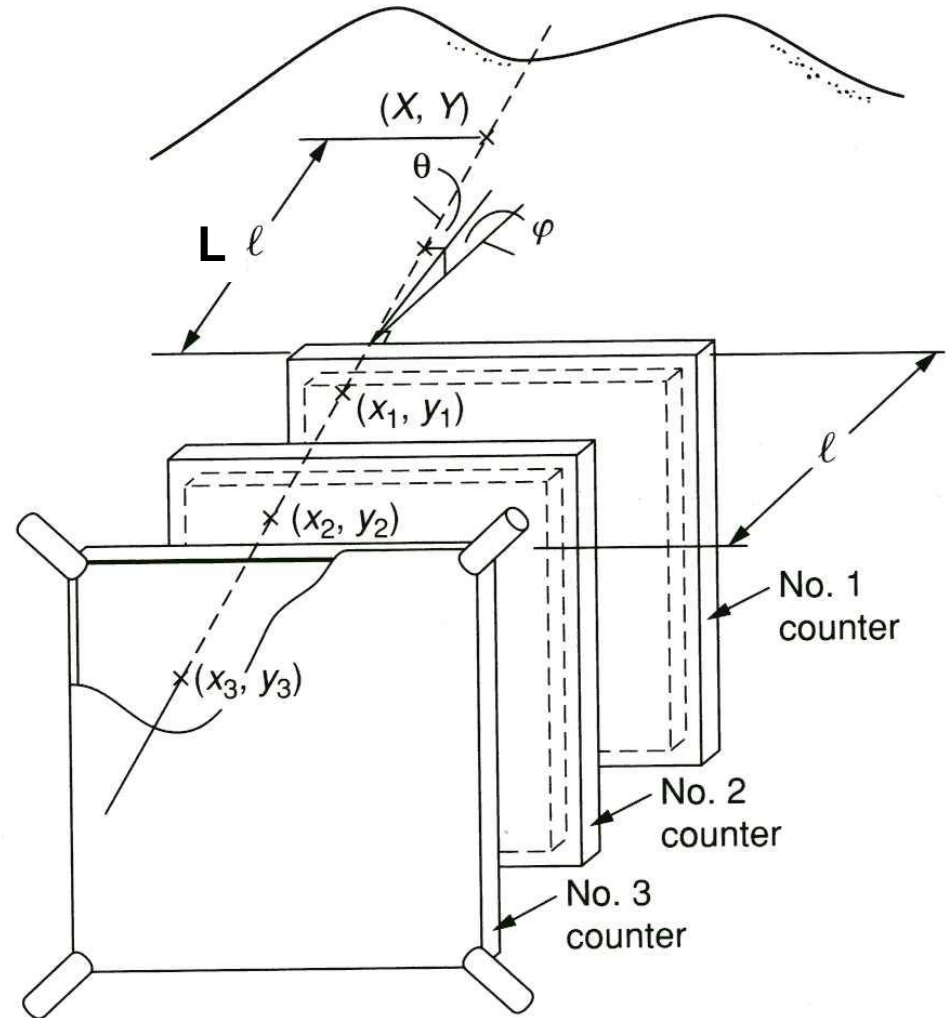
risultati pubblicati in:

**Earth and Planetary  
Science Letters**

**263 (2007) 104-113**

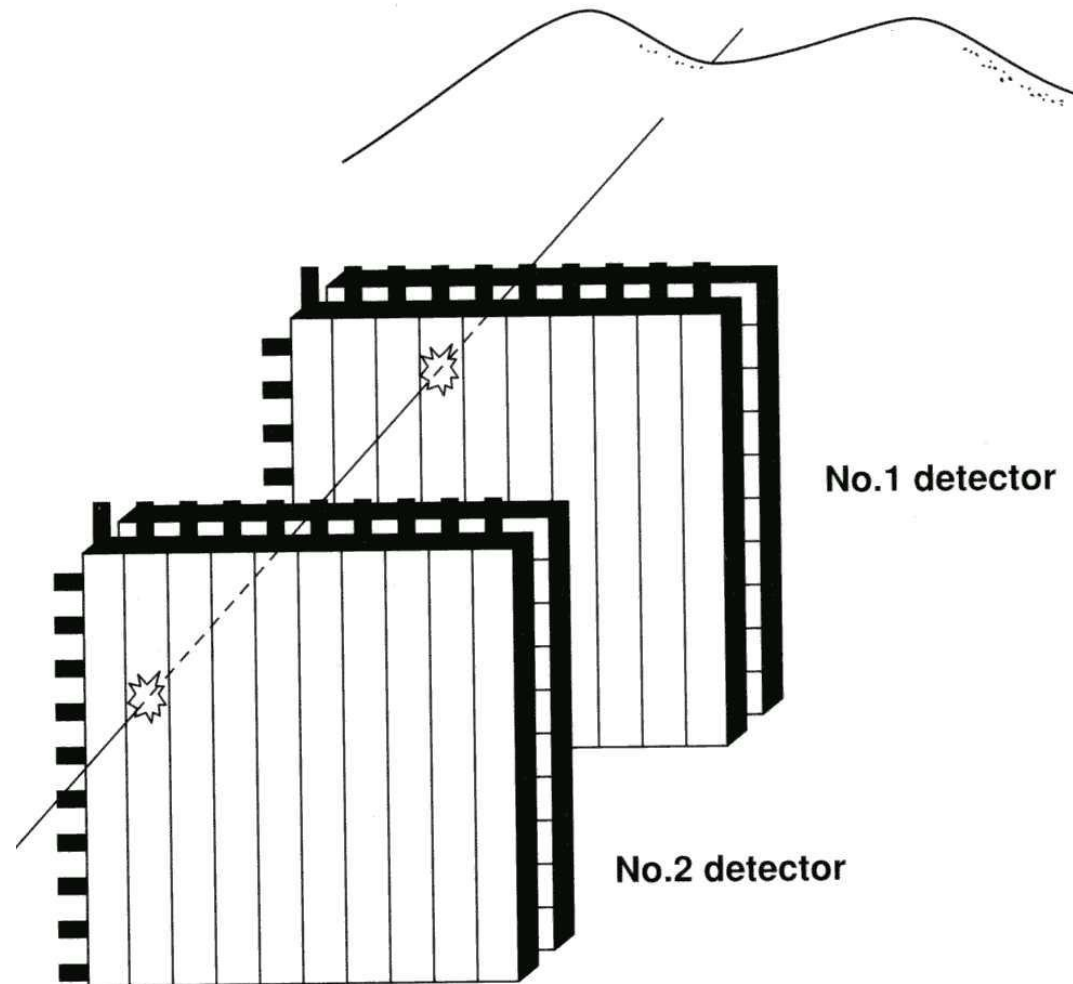
# Mt. Tsukuba (K. Nagamine et al.)

- Nucl. Instrum. Meth. A356 (1995) 585
- scintillatori plastici  $1.27 \times 1.27$  m<sup>2</sup> spessi 3 cm
- punto d'impatto determinato dalle differenze del tempo di arrivo della luce nei PM,  $\Delta x = \Delta y = 2.5$  cm ( $\Delta t \sim 0.13$  ns) - coincidenze dei 4 PM e poi dei 3 scint. – rate 0.12 (0.05) s<sup>-1</sup> con  $l = 1.5$  (2.5) m
- $\Delta X = (L/l)\Delta x = 33$  m  
 $\Delta Y = (L/l)\Delta y$  idem
- $l = 1.5$  m  $\rightarrow$  differ. t = 10 ns  $\rightarrow$  discriminazione F/B
- $\Delta\theta = \Delta\Phi = 17$  mrad
- 2 piastre di Fe spesse 5 cm per eliminare e soffocare da  $\mu$  che producono cascate e.m.

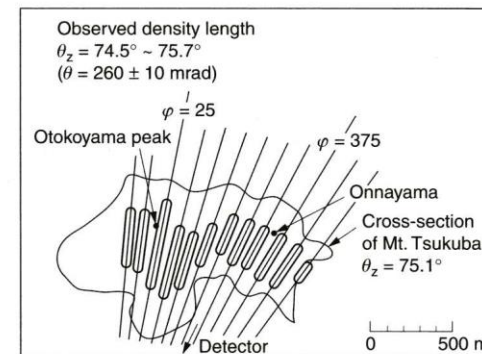
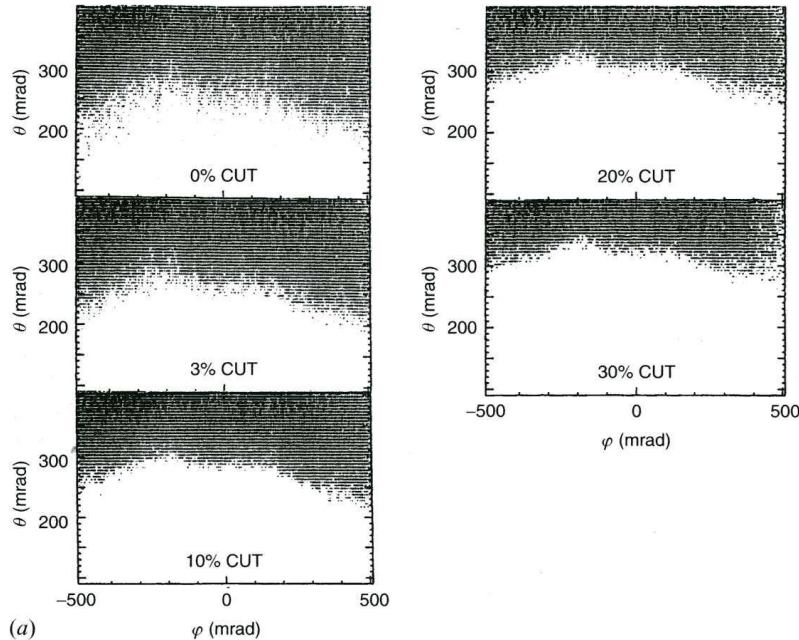


# Mt. Asama (H.K.M. Tanaka et al.)

- 2 sistemi (2 m<sup>2</sup>) di scintillatori plastici segmentati (10x100x3 cm<sup>3</sup>),  
L = 2.75 km, l = 1.5 m;
- sistema digitale, più stabile nel tempo di uno analogico
- $\Delta X = \Delta Y = 105$  m  
 $\Delta\theta = 39$  mrad
- in aggiunta a rigettare molteplicità > 1, piani di scintillatori intervallati da piastre di 5 cm di Fe per eliminare la componente soffice dei RC (E tipiche di e<sup>±</sup>,  $\gamma$  da 0.1 a 2 GeV)



# Mt. Tsukuba

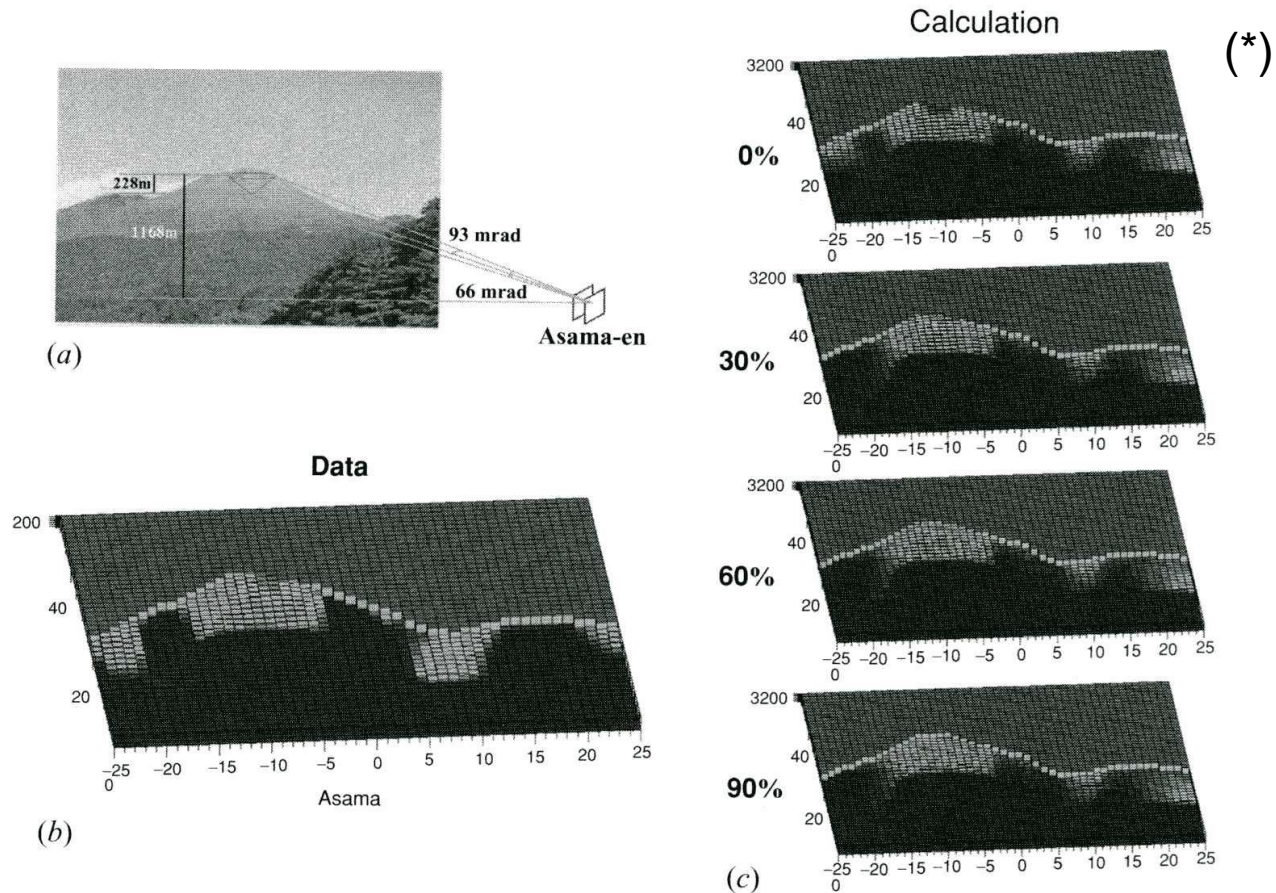


- 33 giorni, rivelatore analogico, a 2 km di distanza, distanza fra gli scintillatori  $l = 1.5$  m, discriminando sul valore più basso del rate (per ciascun punto dell'istogramma) – si vedono i due picchi (Otokoyama e Onnayama) a circa 750 m di distanza



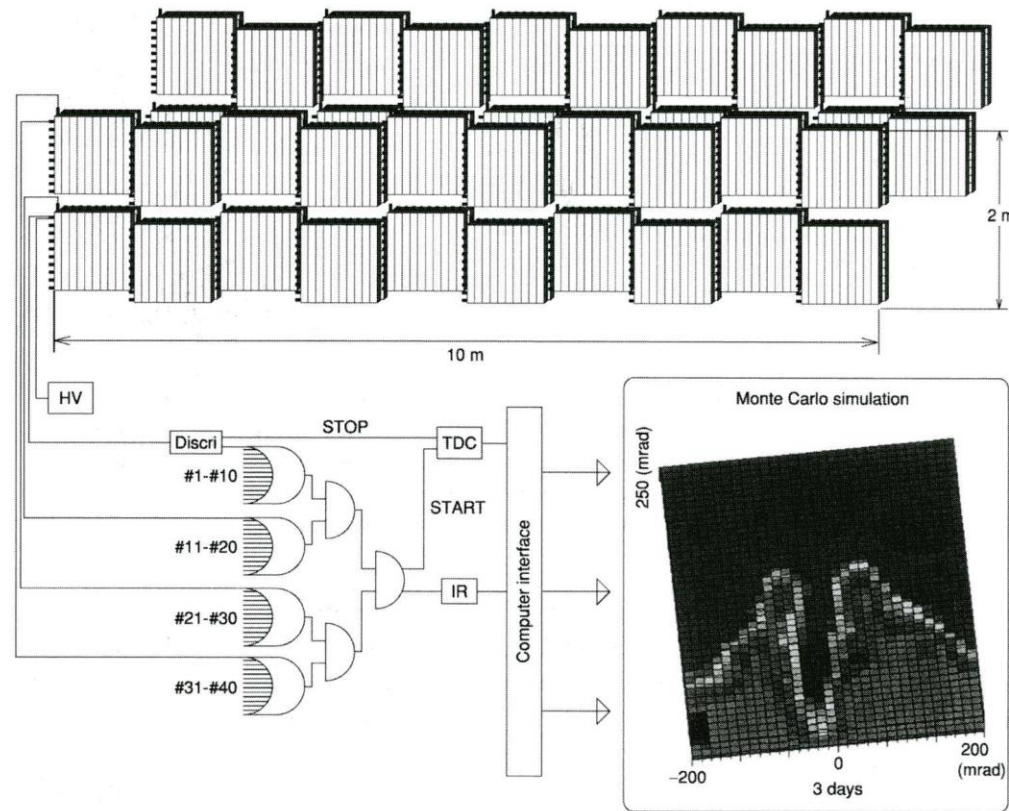
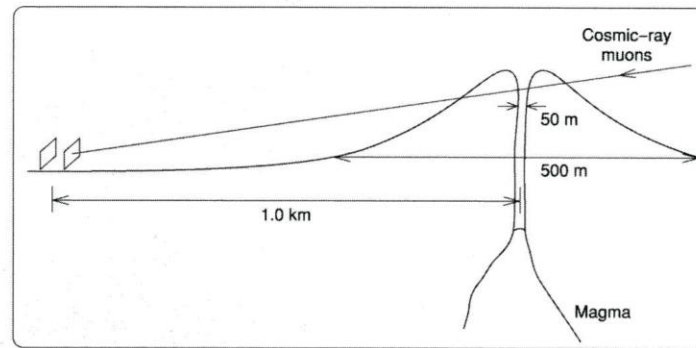
# Mt. Asama

- contatori segmentati, 90 giorni, 2.75 km

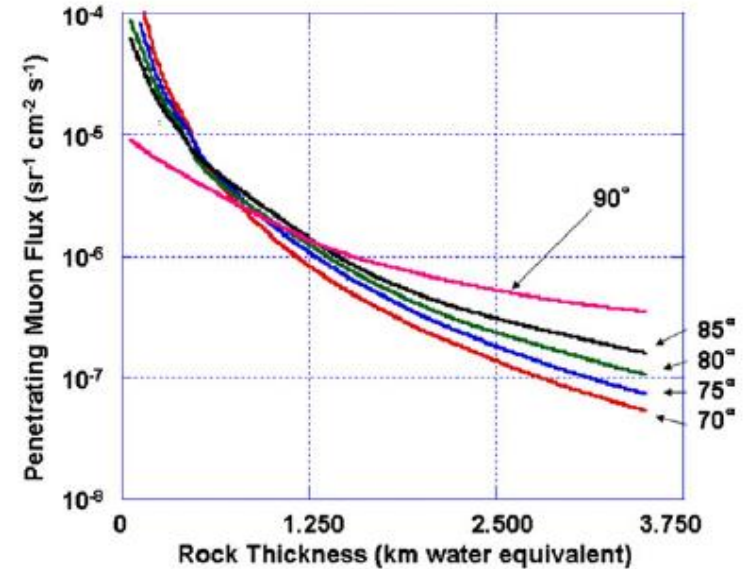
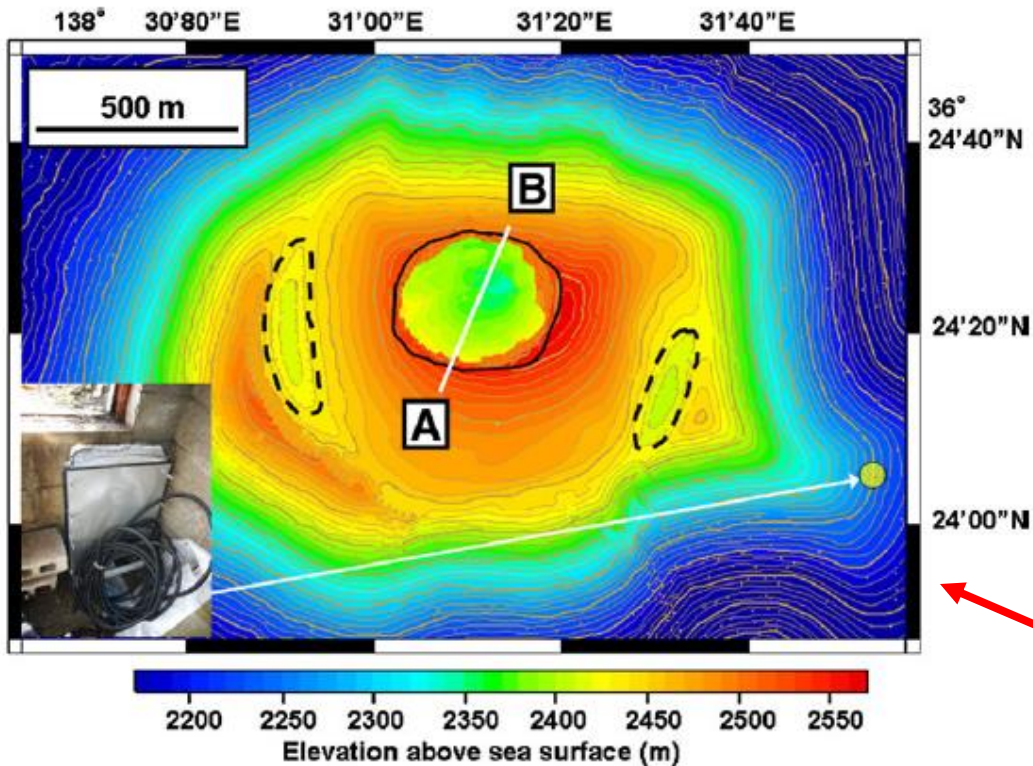


(\*) calcolo in funzione della % di magma nel cratere, vs dati  $\rightarrow < 30\%$

Un «possibile» rivelatore,  
 20 m<sup>2</sup>, per la predizione  
 di eruzioni (ancora  
 non costruito!) e  
 simulazione MC (3 gg)



# Rivelatore con emulsioni



mappa del Mt. Asama con vecchi crateri parzialmente ricoperti - - - o nuovi ----- e posizione del rivelatore

- emulsion cloud chamber, passivo (niente HV, LV): sandwich di piastre di Fe e fogli di emulsioni nucleari, superficie  $4000 \text{ cm}^2$  (40 cm length  $\times$  50 cm width  $\times$  10 cm thickness  $\times$  2 sets) – ottima risoluzione spaziale,  $\approx 1 \mu\text{m}$ , e angolare, da 2 a qualche mrad – nessuna informazione in t - la misura delle emulsioni è ormai automatica (e veloce)



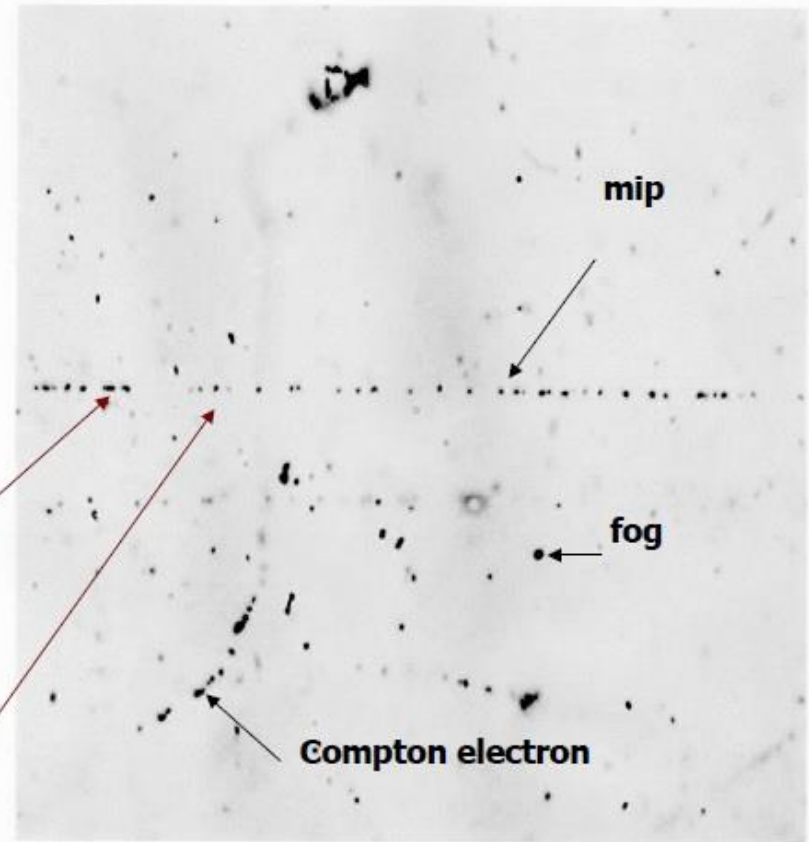
# Emulsioni nucleari (digressione)

Made of AgBr crystals poured  
in an organic gelatine.

Passage of charged particles  
can be recorded with accuracy  
better than 1micrometer

charged particles crossing emulsions  
ionize AgBr crystals. *Fixing* and  
*development* turn ionization points  
into black grains

A track is defined as a sequence of  
aligned black grains

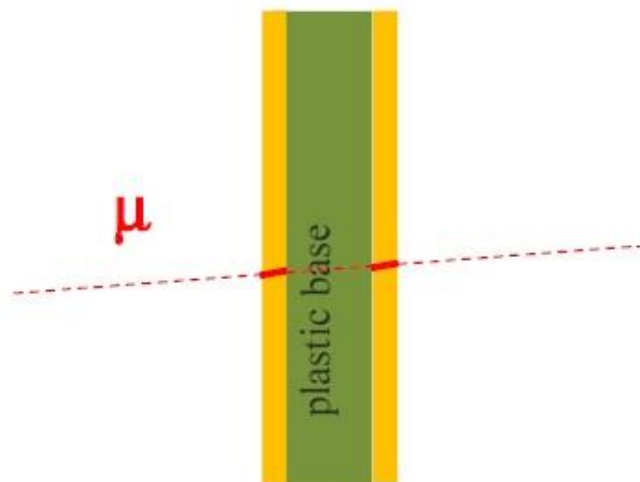


About 35grains/100microns  
on OPERA-like emulsions

(optimized for detection of m.i.p. particles)



# Film di emulsioni come rivelatori di tracce



**emulsion film**

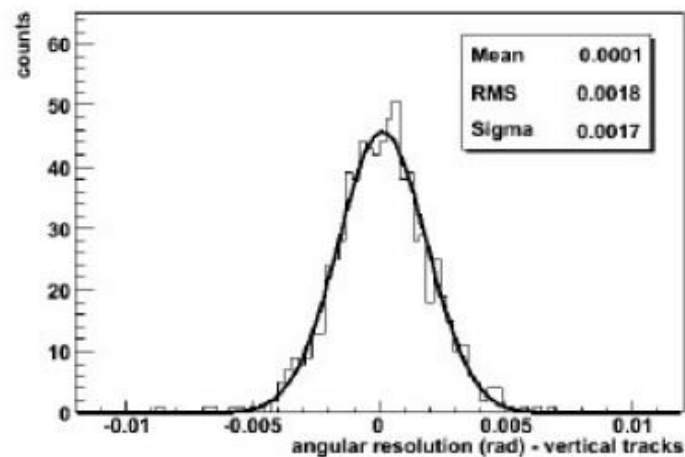
**300  $\mu\text{m}$**

(thickness of each  
emulsion layer: 45 $\mu$ )

Micrometric position resolution

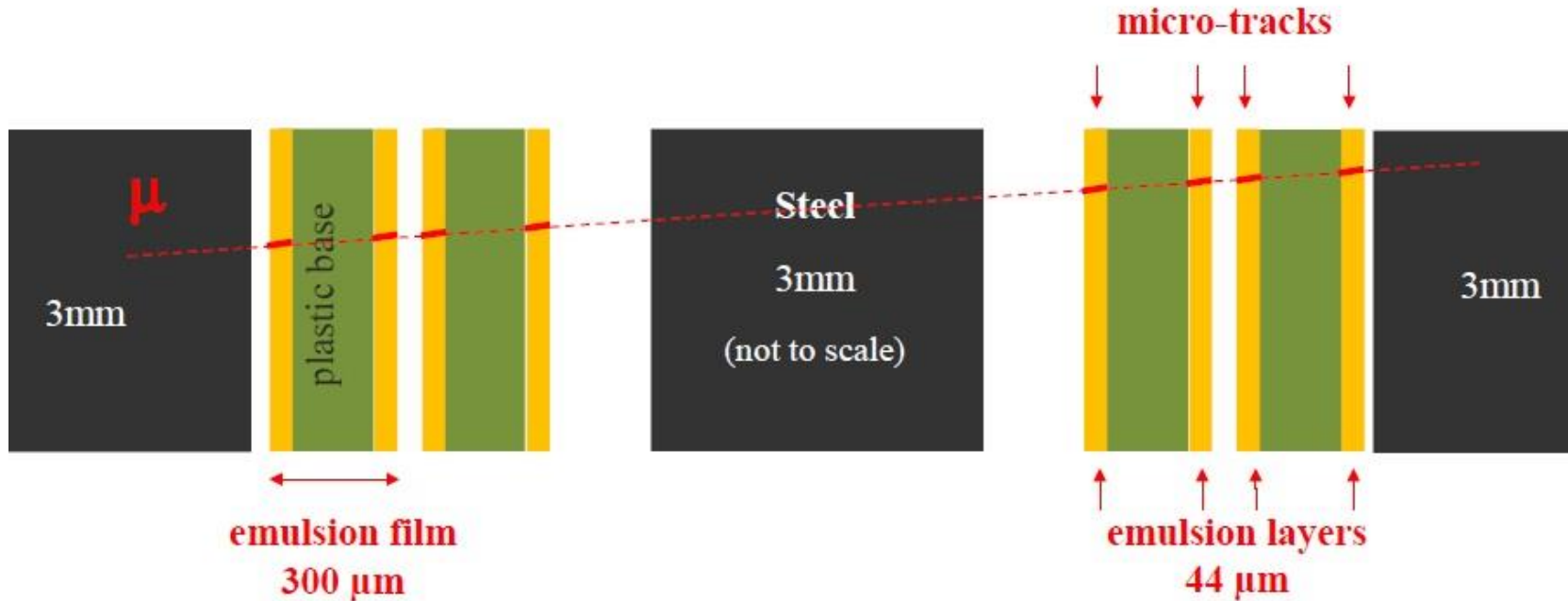
Films exposed orthogonal  
to the beam

Angular resolution:  
from  $\cong 2$  to a few mrad  
depending on track angle



Track angular resolution (mrad)

# Un telescopio di emulsioni nucleari



4 emulsion films / 8 emulsion layers / 8 micro-tracks

→ Few mrad resolution

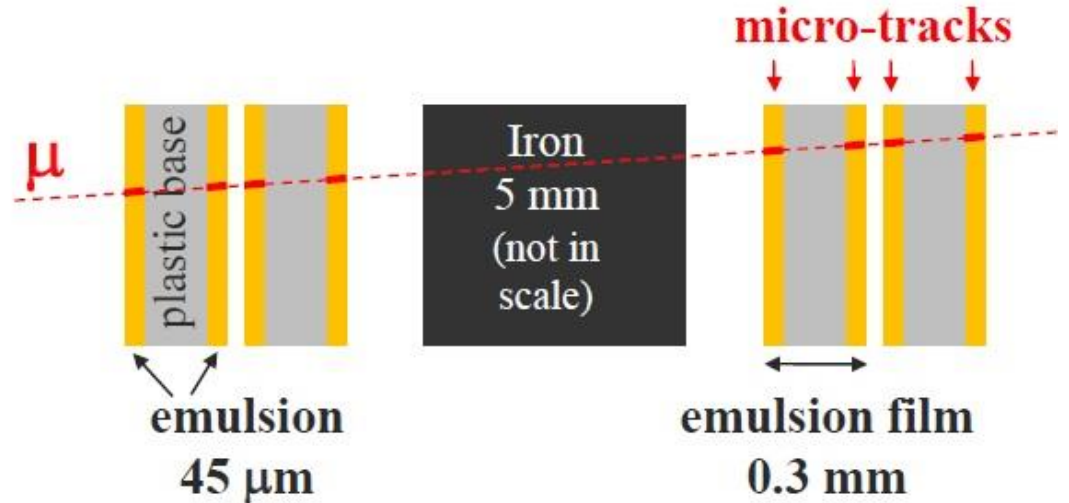
→ Redundant tracking for background rejection

→ Low momentum particle rejection by multiple scattering analysis

# I telescopi di emulsioni per i muoni

## Longitudinal structure

4 emulsion films  
1 iron plate  
Very compact  
Precise and redundant tracking  
(1 micro-track / em. film)



- telescopio da 0.4 m<sup>2</sup> usato al Mt Asama (2007)
- un telescopio ha muografato la cupola di lava di Usu (2008) – v. più avanti
- telescopio da 0.85 m<sup>2</sup> alla cupola di lava del Mt Unzen (2010-11)
- telescopio da 0.96 m<sup>2</sup> a Stromboli nell'inverno 2011-12 (risultati preliminari presentati nel 2014) – v. più avanti
- 2012 Mt Teide a Tenerife

# Problemi nell'analisi dei film di emulsioni

## Detector surface issue:

Detection surface limited by scanning power:  
present limits:  $\cong 0.02 \text{ m}^2/\text{day}/\text{microscope}$  (ESS system) (\*)

New generation microscope (10 times faster) under development

## Timing issue:

Emulsion integrate ionizing radiation *anytime* from production to development, *no timing information* available:

- dedicated analysis to *separate “transportation background”* from exposure signal
- need for *shielding* from radioactive background to *keep emulsion films “clean”*

(\*) European Scanning System, in Japan  $\approx 0.075 \text{ m}^2/\text{day}/\text{microscope}$



# Scanning automatico ad alta velocità delle emulsioni

NB Gli scanner disponibili sono stati usati in priorità per misure di fisica, eg Opera, solo una frazione era disponibile per la muografia.

Due tipi di sistemi di scanning:

**EU: ESS (European Scanning System)**



- Scanning speed/system: 20cm<sup>2</sup>/h
- Customized commercial optics and mechanics
- Asynchronous DAQ software

**Japan: SUTS (Super Ultra Track Selector)**



- Scanning speed/system: 75cm<sup>2</sup>/h
- High speed CCD camera (3 kHz), Piezo-controlled objective lens
- FPGA Hard-coded algorithms

# Problemi nell'analisi dei film di emulsioni/2

## Temperature issue:

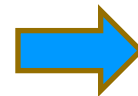
Ionizing radiation creates a *latent image* in emulsion films, fixed and developed by chemical treatment.

Latent image rapidly fades away before development at temperature above  $\cong 20^\circ$



e.g.

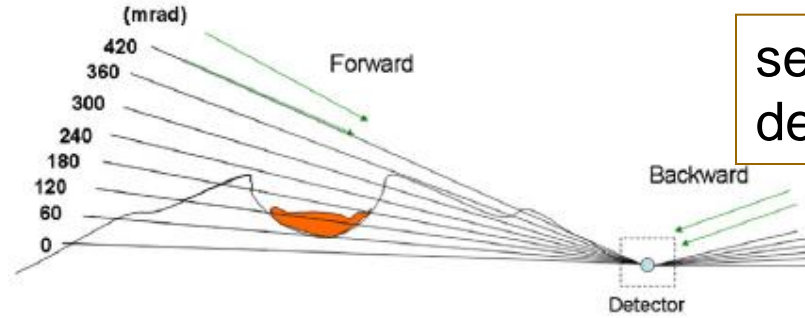
Thermic insulation at Stromboli site.



Emulsion exposure done  
in autumn-winter

# Risultati della muografia del Mt Asama con emulsioni

sezione trasversa del Mt Asama

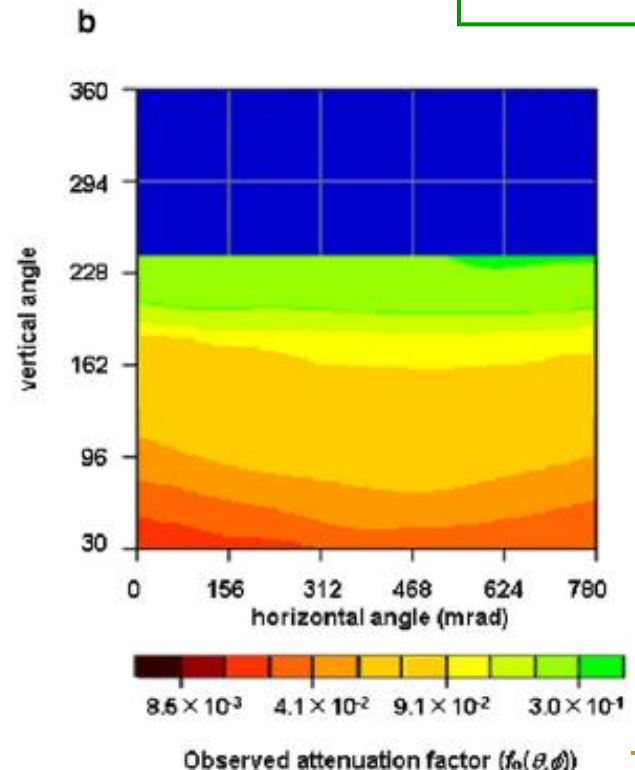
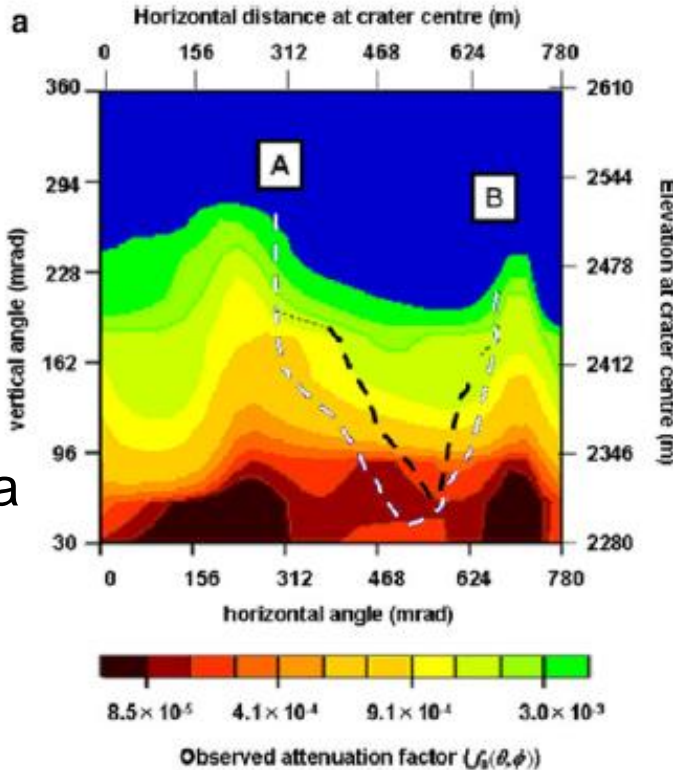


forward

backward

L'attenuazione dipende da:

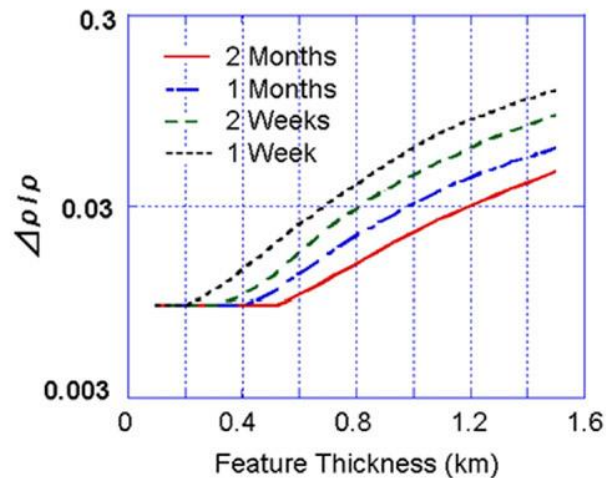
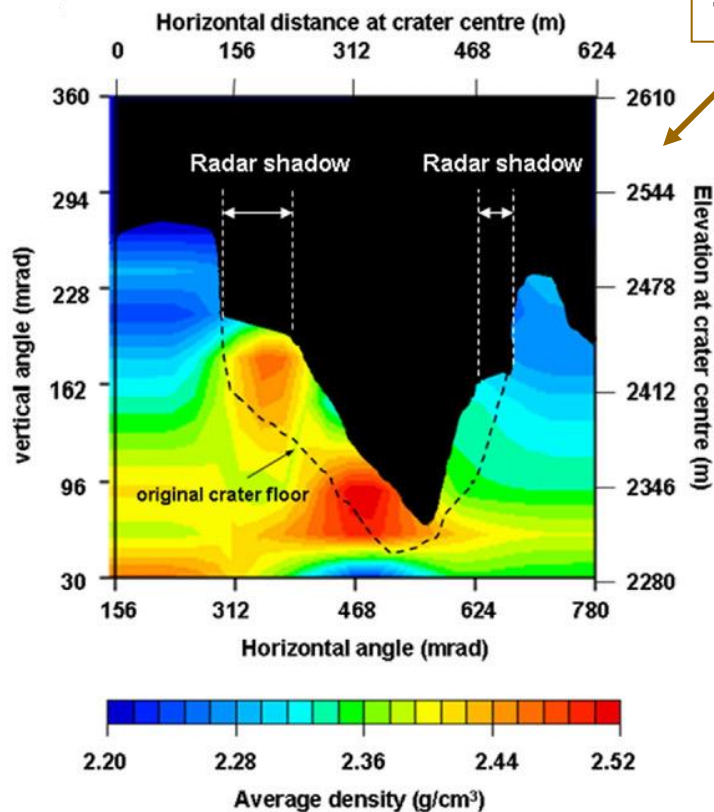
- lunghezza attraversata
- densità media lungo il percorso





# Mt. Asama con varie risoluzioni

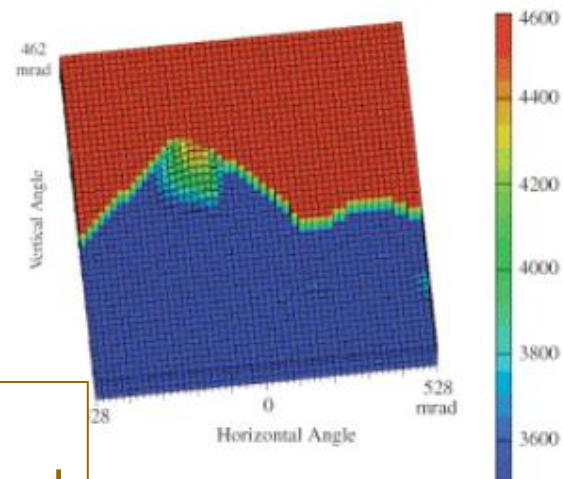
$\langle \rho \rangle$  ricostruita



emulsioni, risoluzione  $\ll 10$  mrad

(effetti del  $m_s < 5$  mrad)

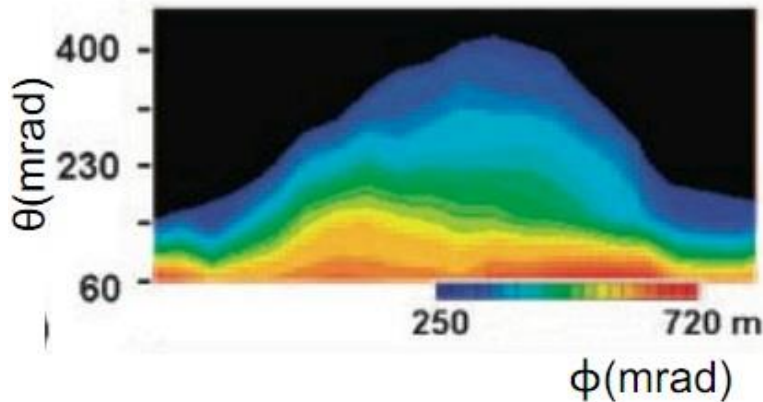
scintillatori,  
risoluzione = 39 mrad



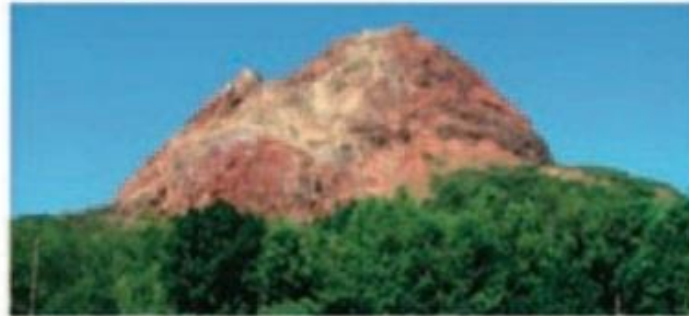


# Radiografia di una cupola vulcanica di lava (Usu) – Tanaka et al., con una emulsion cloud chamber

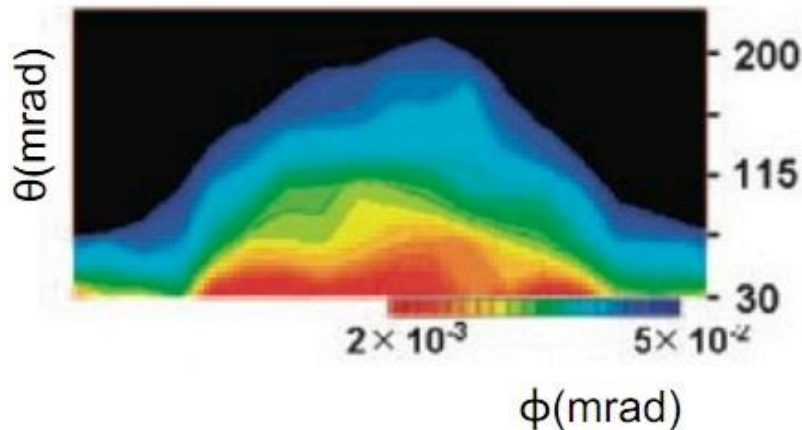
rock range



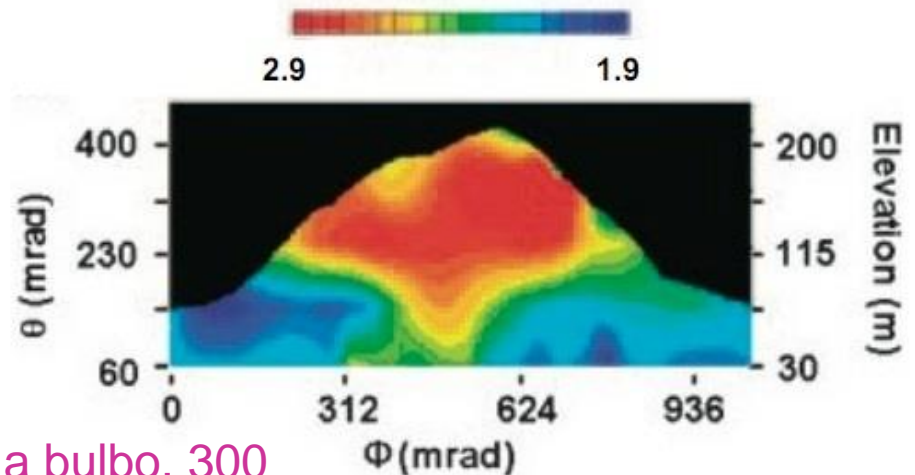
Tanaka et al, Proc Jpn Acad, Ser B 84 (2008)



Muon intensity



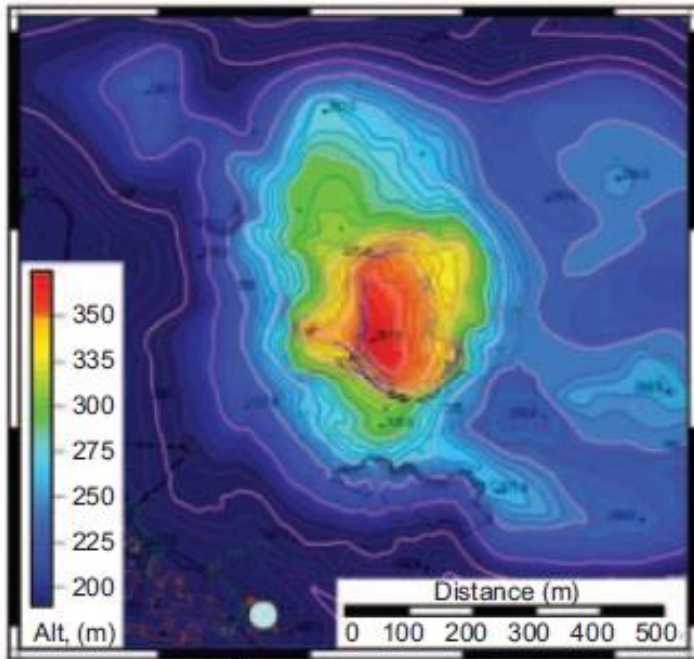
Density (g/cm<sup>3</sup>)



la cupola di lava è del 1944, ha forma a bulbo, 300 m diam.; risoluz. migliore della tomografia sismica

# USU – il posizionamento del rivelatore

Am. J. Science 308 (2008) 843

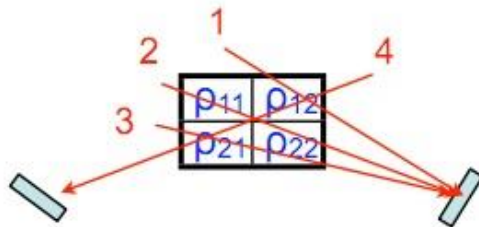


Muon Detector

Lo scopo della misura è quello di studiare una struttura vulcanica, tipo fungo con un gambo che misura  $(100 \pm 15)$  m in alto e  $(50 \pm 15)$  m in alto, completamente diversa rispetto al monte Asama, già misurato con emulsioni.

Dopo questa verifica della tecnica, il passo successivo sarà l'uso di rivelatori posizionati in punti diversi, simultaneamente o in sequenza, per realizzare immagini tomografiche.

# Tomografia computerizzata per vulcani



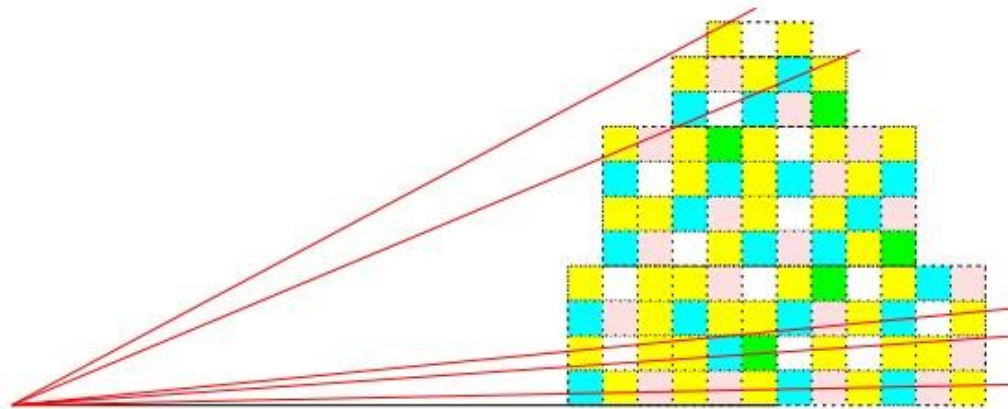
$$\rho_1 = 0^* \rho_{11} + 1^* \rho_{12} + 0^* \rho_{21} + 0^* \rho_{22}$$

$$\rho_2 = 1^* \rho_{11} + 0^* \rho_{12} + 0^* \rho_{21} + 1^* \rho_{22}$$

$$\rho_3 = 0^* \rho_{11} + 0^* \rho_{12} + 1^* \rho_{21} + 1^* \rho_{22}$$

$$\rho_4 = 0^* \rho_{11} + 1^* \rho_{12} + 1^* \rho_{21} + 0^* \rho_{22}$$

Mt. Asama ~ 1000 voxel (100x100x100 m<sup>3</sup> ciascuno)



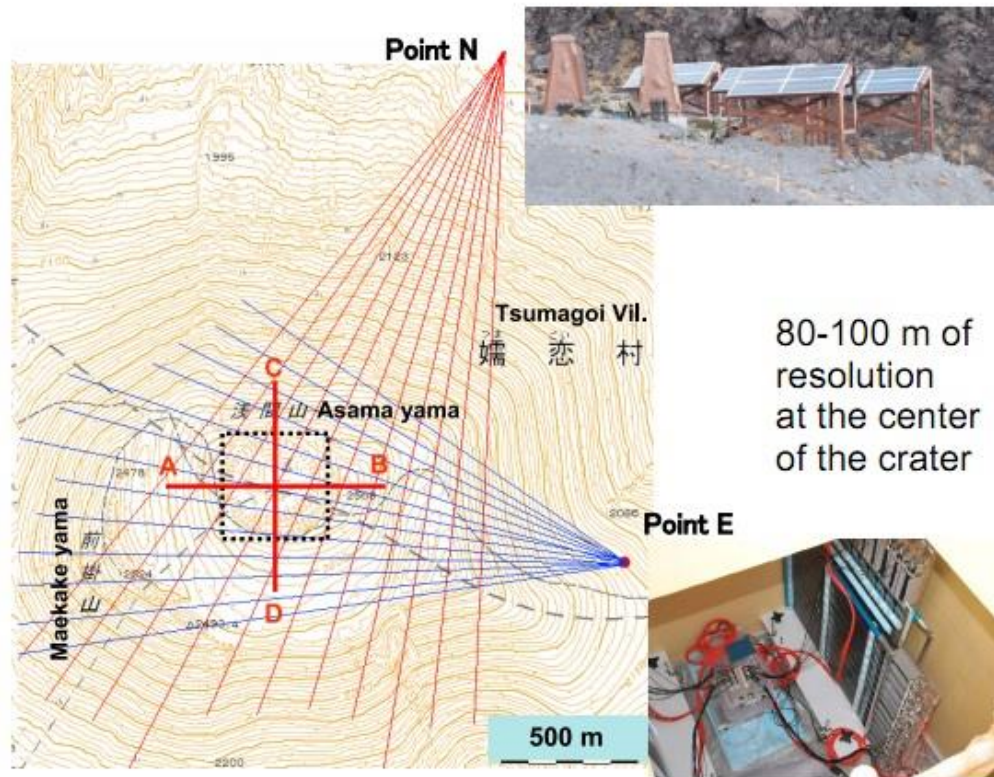


# Un primo tentativo di tomografia

## Three-dimensional computational axial tomography scan of a volcano with cosmic ray muon radiography

Hiroyuki K. M. Tanaka,<sup>1</sup> Hideaki Taira,<sup>2</sup> Tomihisa Uchida,<sup>3</sup> Manobu Tanaka,<sup>3</sup> Minoru Takeo,<sup>1</sup> Takao Ohminato,<sup>1</sup> Yosuke Aoki,<sup>1</sup> Ryuichi Nishitama,<sup>1</sup> Daigo Shoji,<sup>1</sup> and Hiroshi Tsuiji<sup>1</sup>

JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 115, B12332, doi:10.1029/2010JB007677, 2010



80-100 m of resolution at the center of the crater

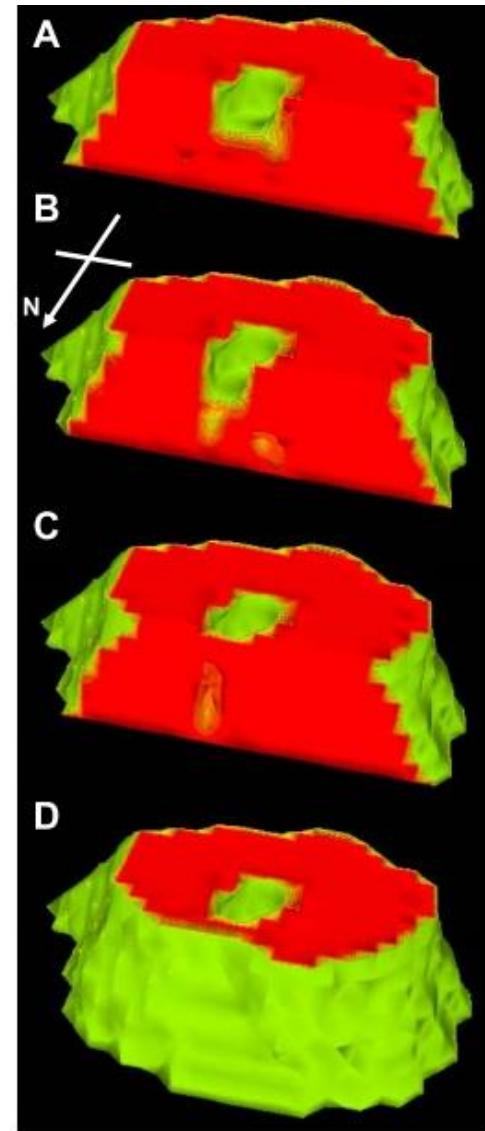


Figure 2. Map of Asama volcano showing the location of the Mu-CAT system. The dotted box show the area where the value of  $W_m$  is reduced. Red lines show the location of the density distribution as shown in Figure 4.



# Radiografia muonica di vulcani in Italia (e nel mondo)

- Stromboli, con il Vesuvio come progetto pilota (MURAY 2009-2014, divenuto successivamente MURAVES) – utilizza odoscopi di scint. plastico
- Etna, sempre odoscopi di scint. plastico
- cenno ad altri tipi di rivelatori di  $\mu$  (RPC, Micromegas, RICH)

# L'obiettivo del progetto MURAY/MURAVES: lo Stromboli

- altezza 930 m slm, cratere a ~750 m slm dove ha luogo l'attività vulcanica ordinaria
- attività «stromboliana»
  - condotto essenzialmente aperto
  - eruzioni intermittenti dovute all'aumento della pressione del gas
  - rara e modesta attività effusiva
- attività esplosiva e tremore vulcanico originano ~200 m sotto il cratere

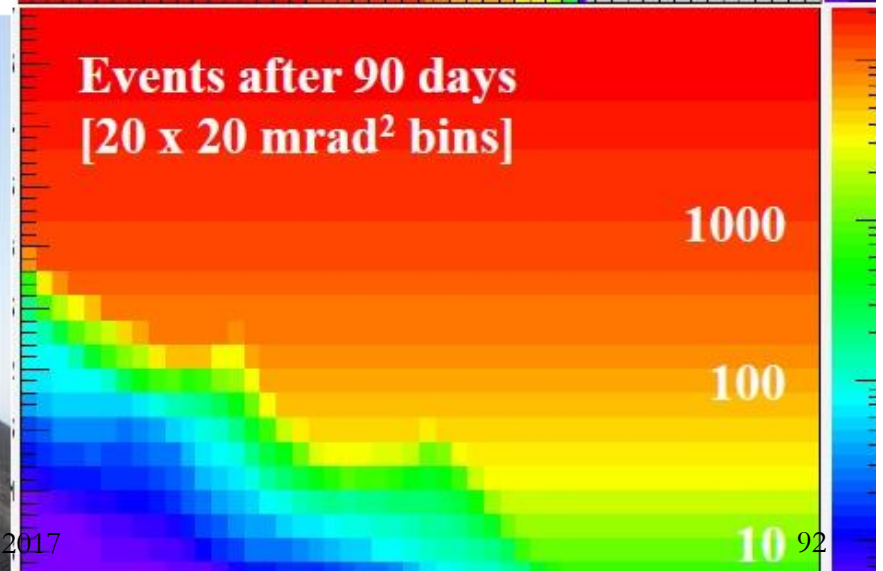
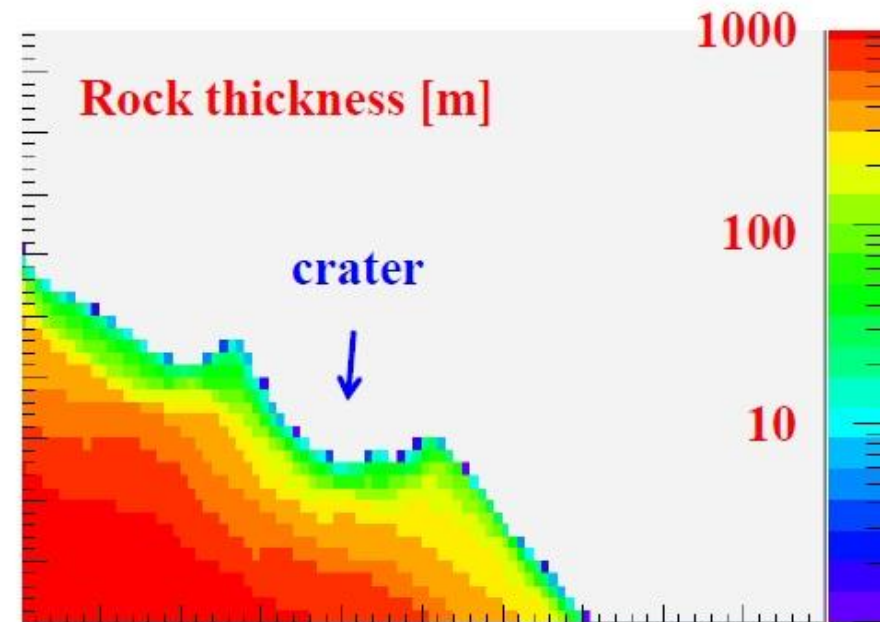
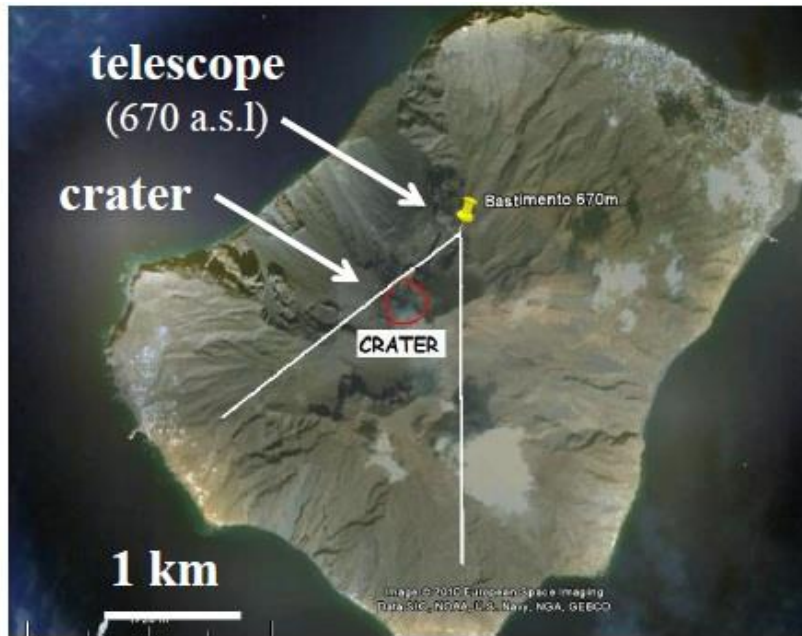


## Stromboli/2

- interesse scientifico della radiografia muonica di S.
  - condotto aperto
  - S. ben studiato con altre tecniche
  - combinare l'informazione fra tecniche diverse
- grande spessore di roccia
  - problema simile a quello del Vesuvio
  - ambiente molto più ostile del V. (ad es. non c'è una capanna INGV(\*) attrezzata)
  - il telescopio di scint. di MURAY potrà essere installato in futuro
- parte terminale del condotto (cratere)
  - studiata in via preliminare con un telescopio di emulsioni (inverno 2011-12, stessa collab. Italia-Giappone della misura della cupola di Unzen)



# Expectations at Stromboli (emulsions' telescope)

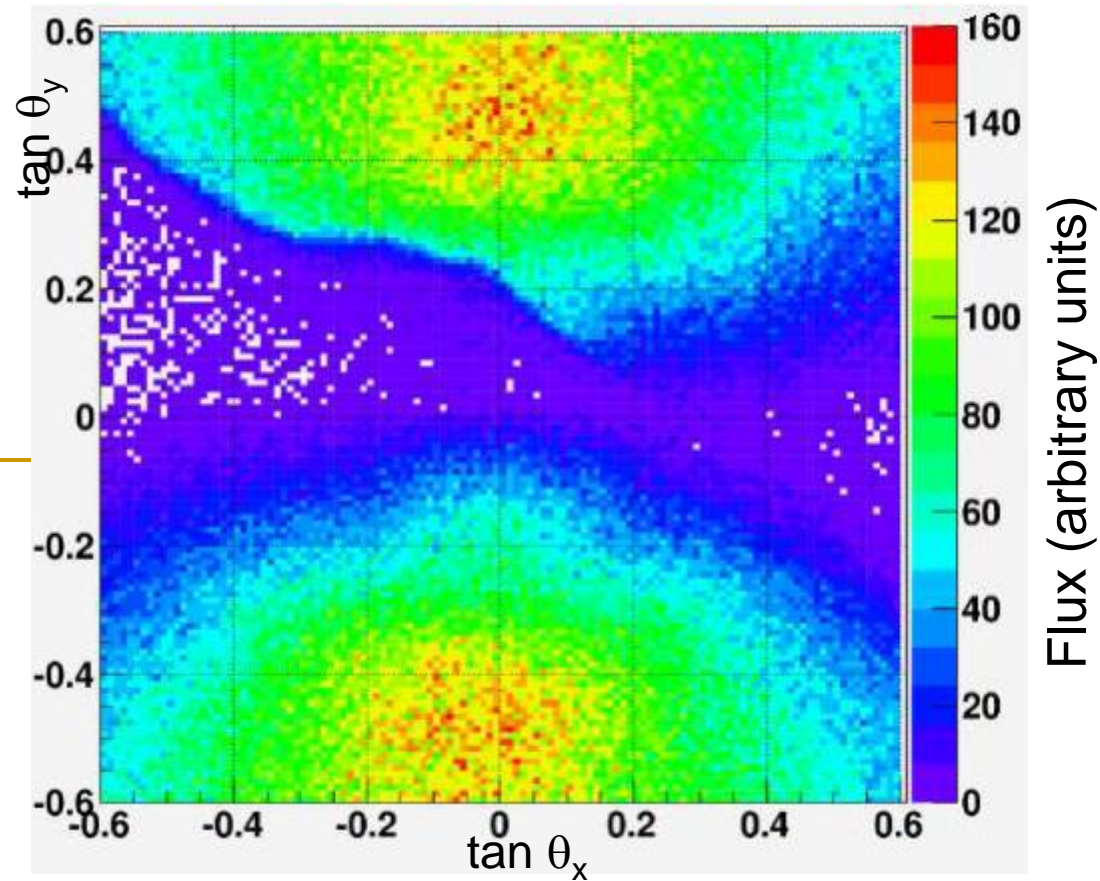




## Muon detectors made of nuclear emulsions

Stack tracks at Stromboli (3 out of 4 films) – preliminary results

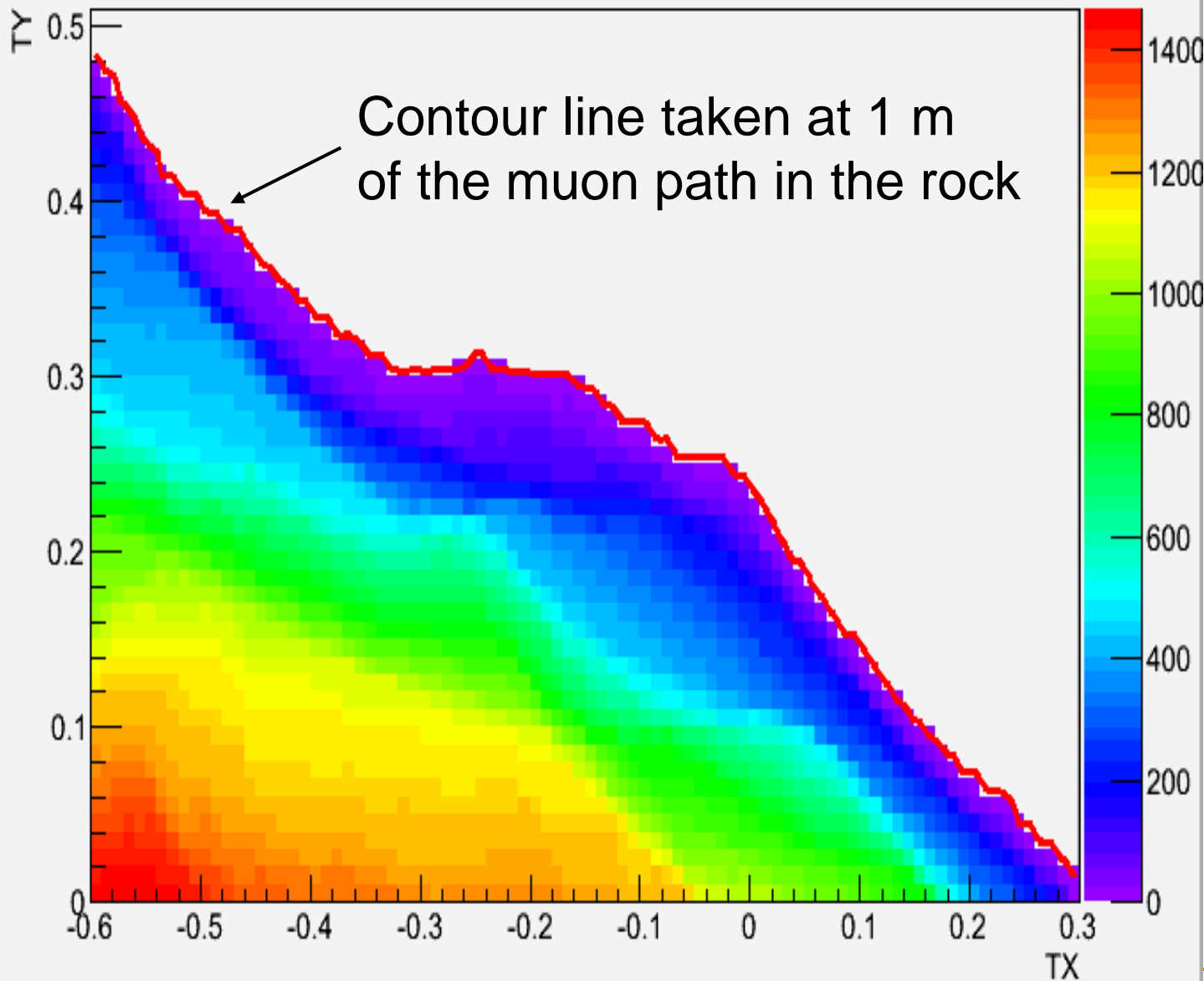
Volcano profile and track counts from emulsion (Stromboli)



# Rock thickness

From DEM and detector position

h <sub>mc</sub> thickness
Entries 7381



Rock thickness on the path of muons travelling to the detector

DigitalElevation Map (DEM) +MC viewer are used.

Detector is positioned on the DEM using the coordinates taken from high precision GPS measurements

# Il Vesuvio e la piana sottostante ad alta densità di abitanti





(back to Vesuvius)

Marigliano

Nola

Cognoli di S Anastasia  
(1086)

Punta del Nasone  
(1132)

Cognoli di Ottaviano  
(1112)

## Mt. Somma and its caldera

Canalone  
dell'Arena

Valle del Gigante  
(885)

Sommità  
del cono  
(1281)

Valle  
dell'Inferno  
(830)

Atrio del Cavallo  
(831)

Stazione Superiore  
(1158)

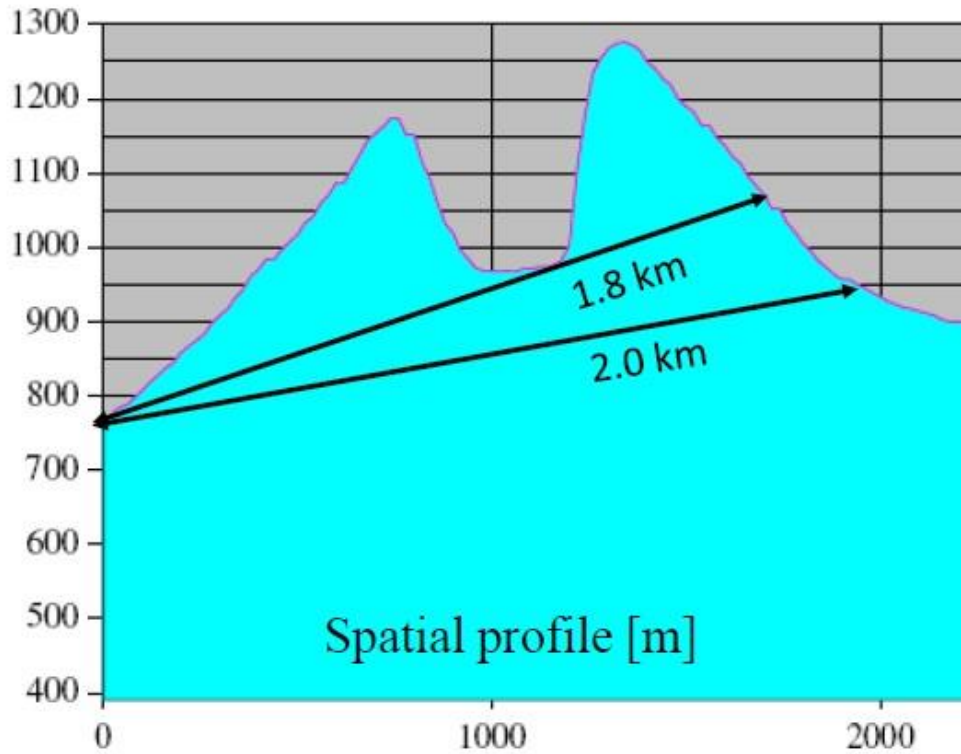
Fondo del Cono  
(951)

La Capannuccia  
(1170)

## “Gran Cono” of Mt. Vesuvius with its 300 m deep caldera



# Il problema del Vesuvio



**~ 2 km rock from a telescope at 750 m a.s.l.**

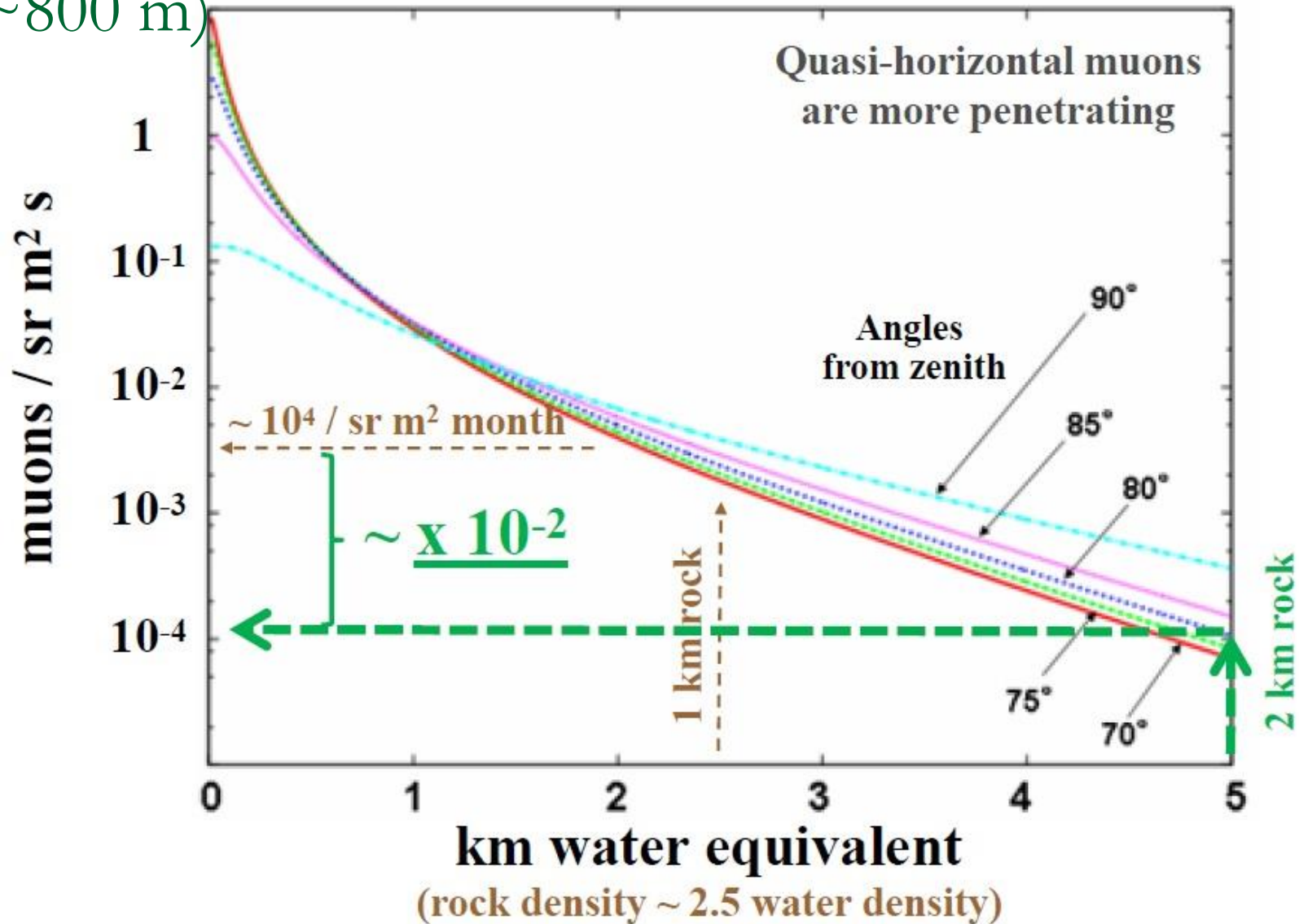


**need to Improve sensitivity**

**with respect to previous radiographies (< 1 km rock)**

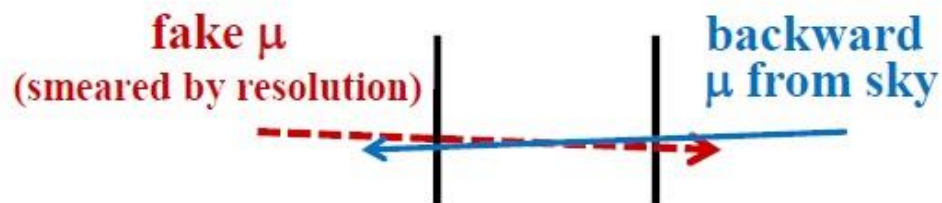
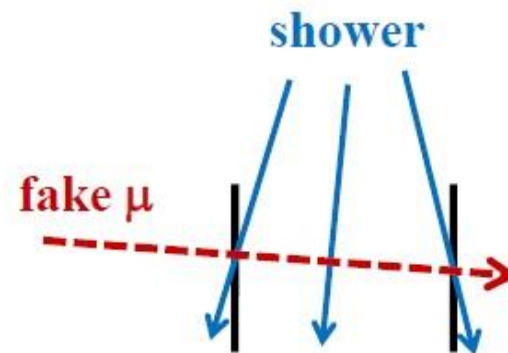
quota di una delle stazioni  
INGV che monitorano il V.

Perdita di sensibilità (cfr. misure in Giappone, spess.  $\sim 800$  m)



# Recupero di sensibilità

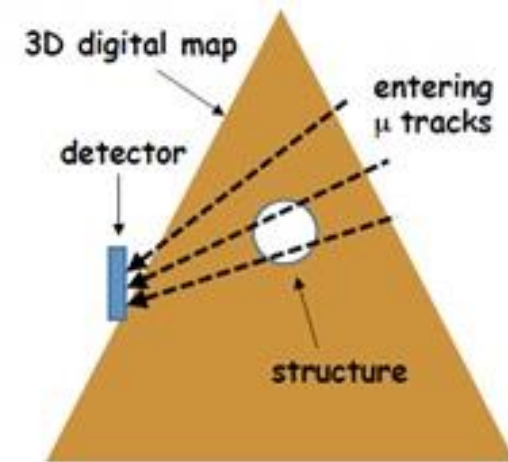
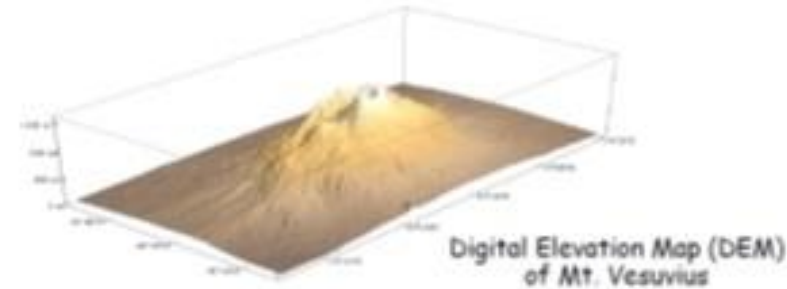
- area rivelatore:  $1 \text{ m}^2 \rightarrow 10 \text{ m}^2$ , difficile da realizzare (costi, spazi etc.)
- presa dati: da ~mese a ~anno (quindi ci si aspetta tempi di esposizione lunghi)
- fondi (sono proporz. più grandi), per combatterli:
  - tracking
  - tof
  - ph, molteplicità



..... ?

# Linee guida di MURAY/MURAVES

- radiografia ad alta risoluzione con accesso a zone profonde
- coll. internazionale, Vesuvio progetto pilota
- sviluppo di un telescopio adattabile ad altri vulcani (Stromboli, ... Antille, ... Giappone) e con capacità di «zoom»
- uso di scintillatori plastici con tecnologie collaudate
- prime misure sul Vesuvio con un telescopio giapponese, area 1 m<sup>2</sup>, bassa accettazione e risoluzione angolare
- full simulation di Vesuvio + rivelatore con GEANT4 usando una DEM





# Telescopio giapponese (dal 2009 prende dati sul Vesuvio a 750 m s.l.m.)

- Two x-y measuring stations
- 1 m<sup>2</sup> area
- 8 cm wide plastic scintillator strips
- Hardware filling of a counter coincidence matrix (no info on single events)
- Hardware multiplicity cut (1 hit/plane) to reject fake muons from showers
- No forward-backward discrimination

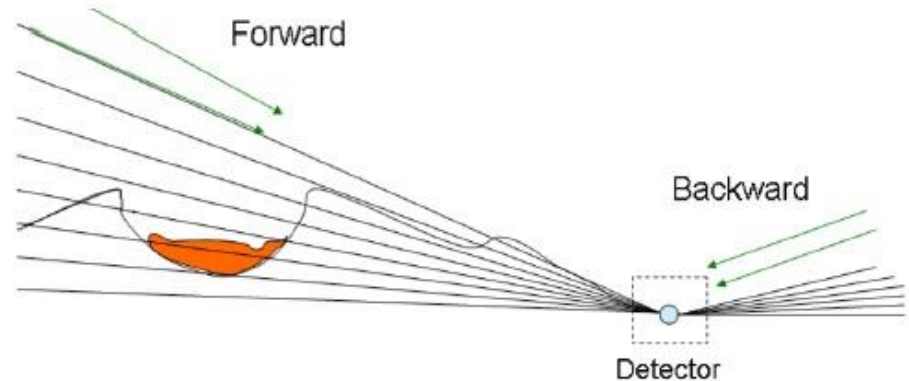


- **Practice with experimental methods** (e.g. muon flux normalization)
- **Support to MU-RAY choices:**
  - tools for background rejection
  - better resolution
- **Infrastructure ready for prototype MU-RAY telescope**

# Metodi per la normalizzazione del flusso

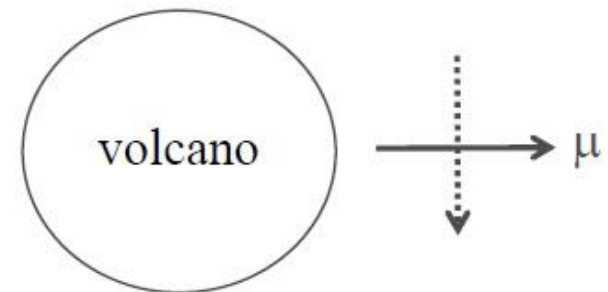
## “Backward” method

- Muons from sky on opposite side
- In parallel with data taking
- Used in previous radiographies

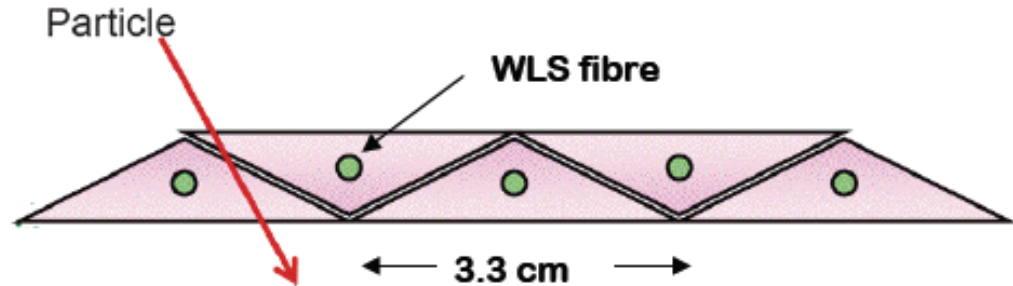
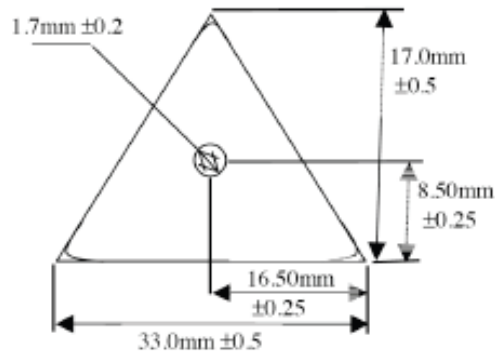


## “90°” method

- Muons from sky at 90°
- Special (short) runs with rotated telescope
- Same angles, same counter coincidences
- Successfully tried at Mt. Vesuvius



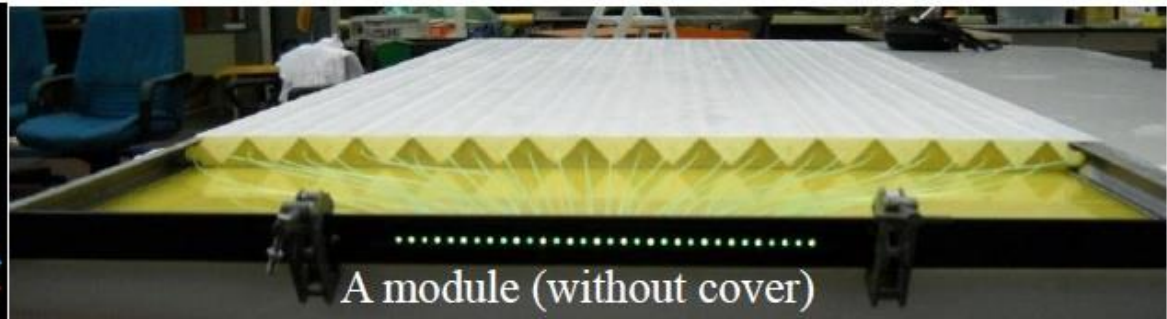
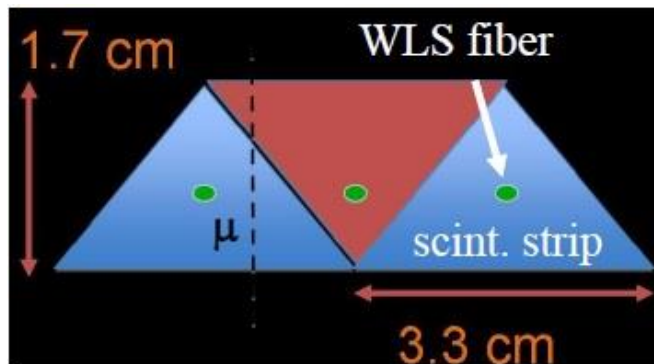
# The MINERvA Inner Detector scintillators



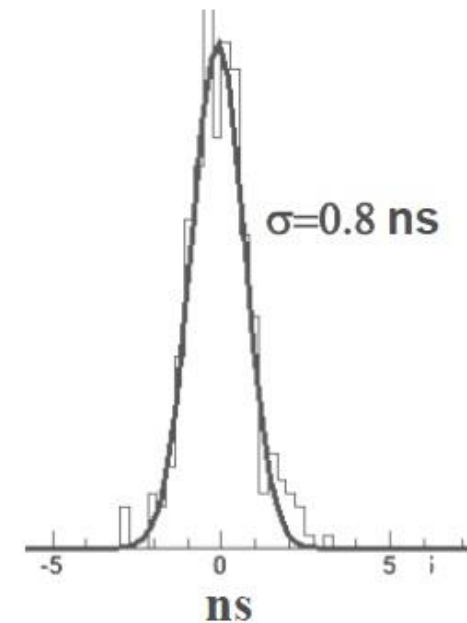
→ lettura con SiPM

- The triangular shape offers advantages:
  - No gaps between strips
  - Continuous position determination by weighted average of the signals from two strips: no pixel effects
  - Good spatial resolution ( $\sim 3$  mm)
    - **10 mrad** angular resolution with "short" lever arm ( $\sim 0.5$  m)
- Wave Length Shifting Fibre in a hole created in extrusion
- Strips with co-extruded coating: easier to assemble

# Scintillatore e fibre WLS



- Strips with triangular section (NICADD-Fermilab)
- $\sim 5$  mm **space resolution**  
by interpolating signals in adjacent strips
- Co-extruded hole for Wave Length Shifting (WLS) optical fibers
- **Fast re-emitting fibers** (Bicron BCF 92)  
for time of flight measurement within  $\sim 1$  ns
- Fibers convey light to an opto-electronic connector
- 32 strips glued together to form a “module”

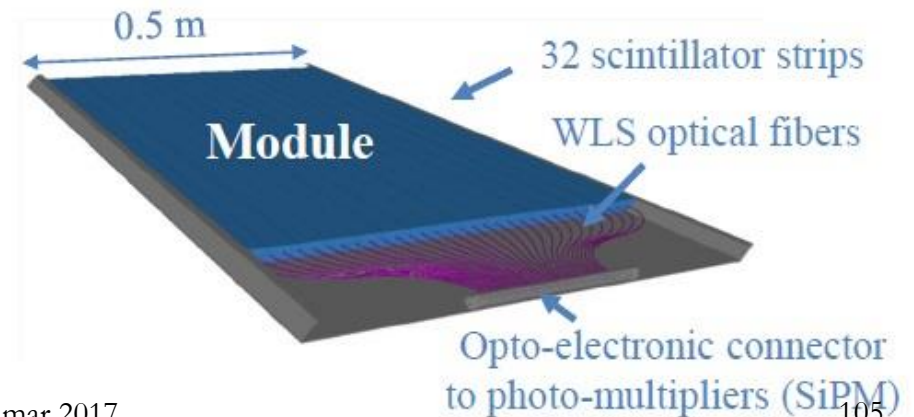
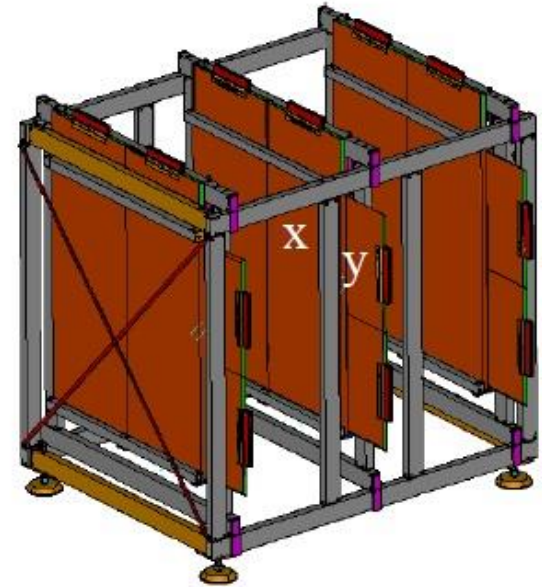


Time resolution

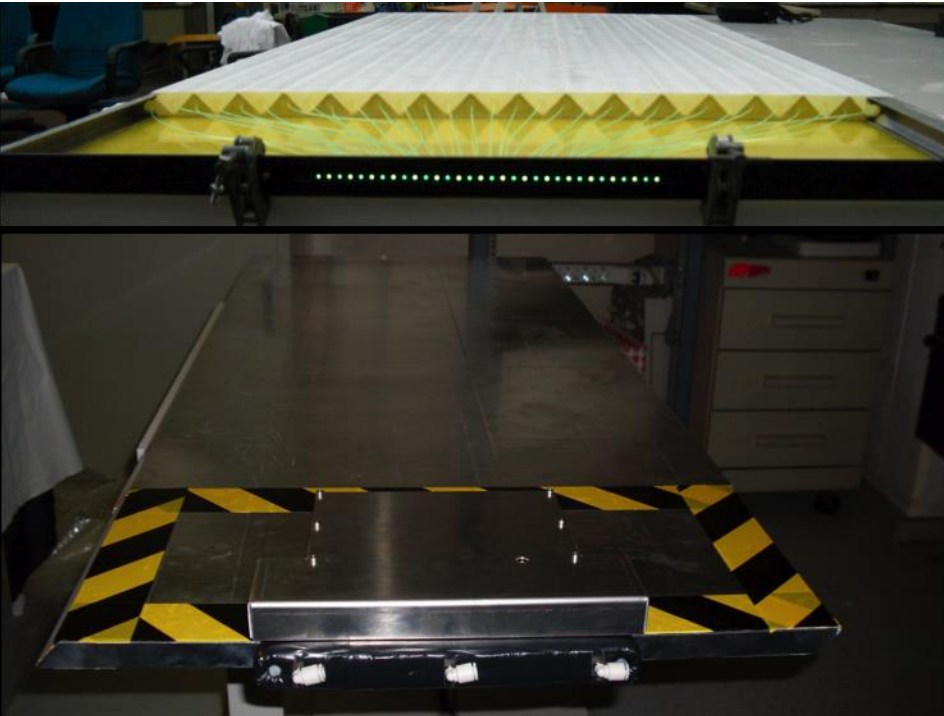


# Il telescopio di MuRay

- Basic technique: strips of plastic scintillators
- **Precise and redundant tracking**
  - 3 x-y measuring stations
  - ~ 5 mm space resolution
  - ~ 10 mrad **angular resolution**
- 1-4 m<sup>2</sup> area for one telescope (1 m<sup>2</sup> for prototype)
- Modular construction
- **Event-by-event information** for offline analysis
  - time of flight  
for muon direction discrimination
  - pulse height  
from each scintillator strip
  - hit multiplicities



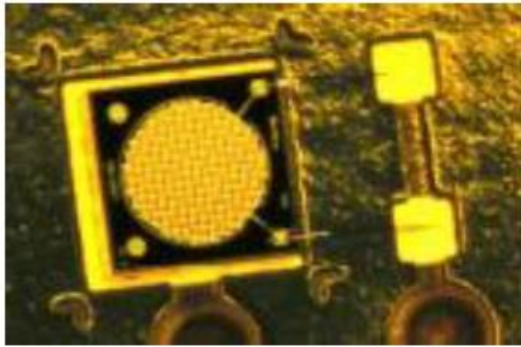
# Il telescopio di MuRay/2



- in basso il modulo chiuso con FE board e scambiatore di calore ad acqua

- 12 moduli che formano 3 piani x-y assemblati nel supporto di Al

# Silicon Photomultipliers (SiPMs)



A naked SiPM wire bonded  
( $\Phi = 1.4$  mm,  $\sim 300$  diodes)

## NEW TECHNOLOGY

### MU-RAY: “naked” SiPMs

by FBK-IRST (Trento, Italy)  
developed in a joint venture with INFN

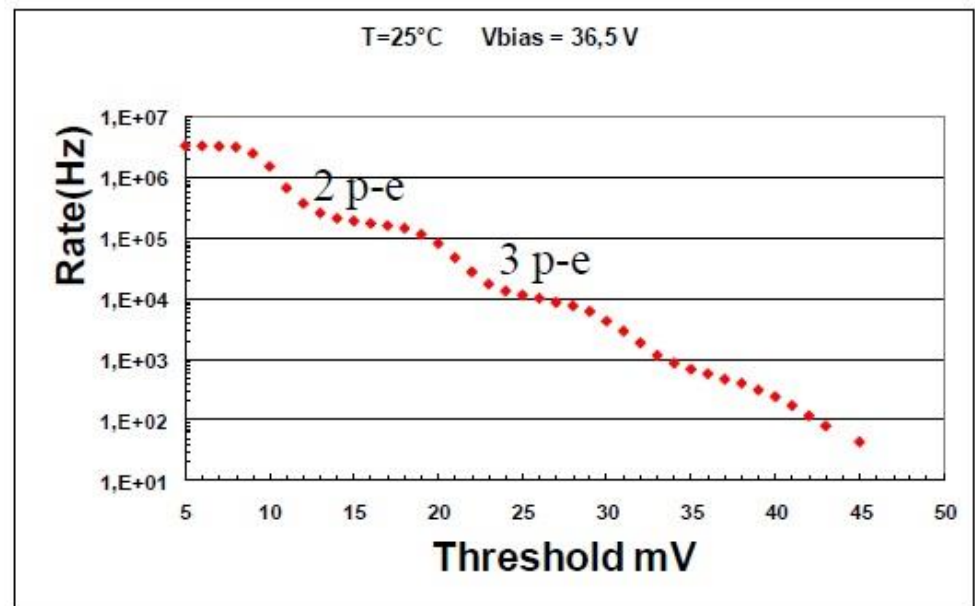
(MPCC ‘nudi’, senza finestra di protezione,  
sono sviluppati da Hamamatsu per MEG,  
v. parte 1 A p. 47)

- **Matrix of diodes in Geiger mode** (inverse polarization)  
**Analog sum of the signals**
  - **amplification**  $\sim 10^6$  (depending on  $V_{\text{bias}}$  and temperature)
  - **proportionality**
  - **photo-electron counting** (useful for gain monitoring and control)
- Photo-detection efficiency = quantum x geometric x Geiger  $\sim 50\%$
- Solid state device: **no HV and very low power consumption** (tens of  $\mu\text{W}$ )
  - applications where electricity supply is not available  
(muon radiography of volcanoes, physics in space, ...)



# Rumore dei SiPM (FBK), 1a versione

- cresce con la temperatura
  - mantenere T costante  $<25^{\circ}\text{C}$
- decresce come  $\sim 10^{-1}/\text{pe}$ 
  - soglia su Npe
  - coincidenze multiple
- (purtroppo quelli della FBK sviluppati per MURAY erano inaspettatamente rumorosi!  
→ Hamamatsu )

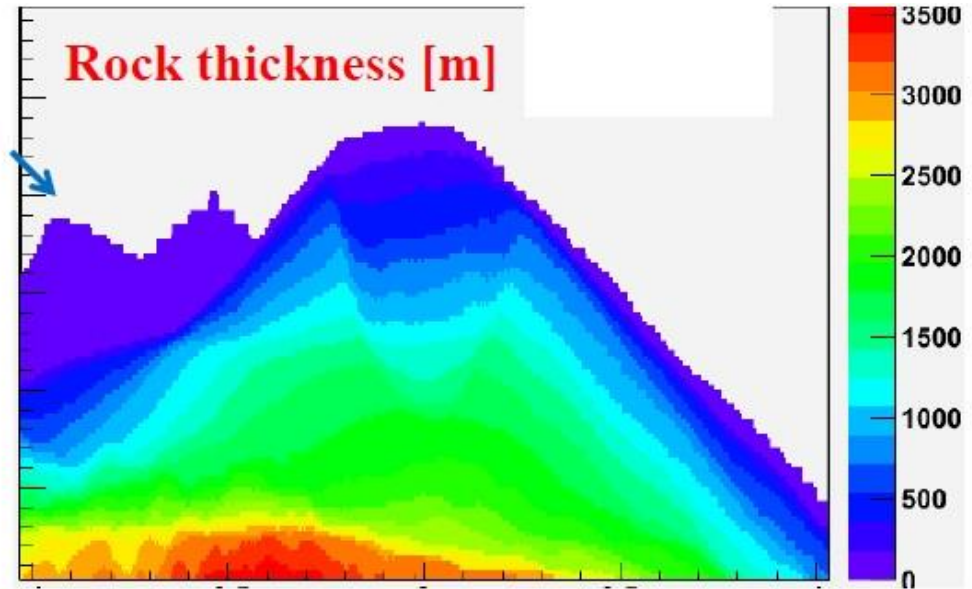


*Dark noise rate (FBK-IRST)*

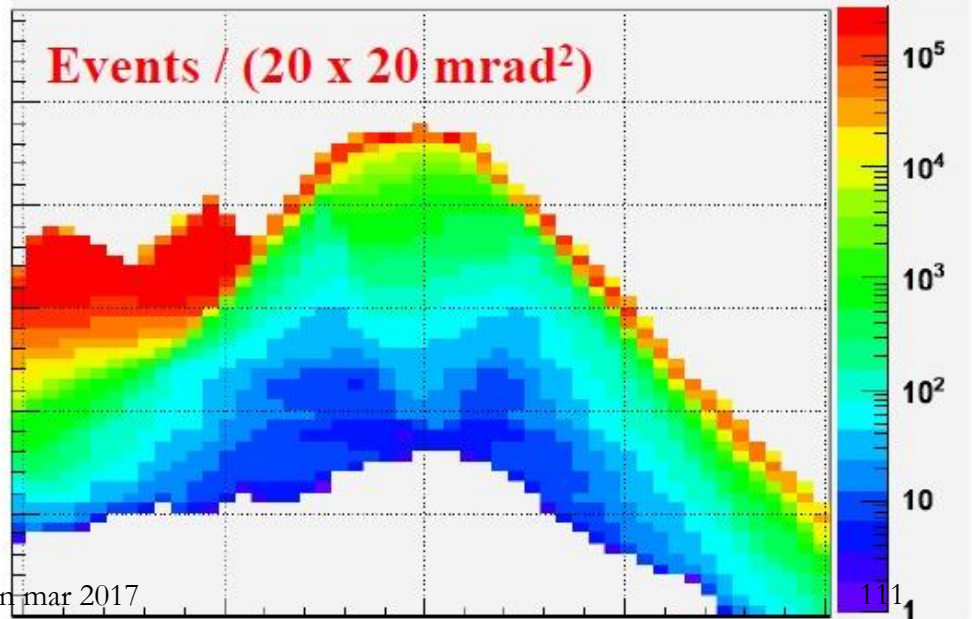


# Simulazione del Vesuvio (prototipo 1 m<sup>2</sup>, 1 anno, senza fondo)

Mt. Somma

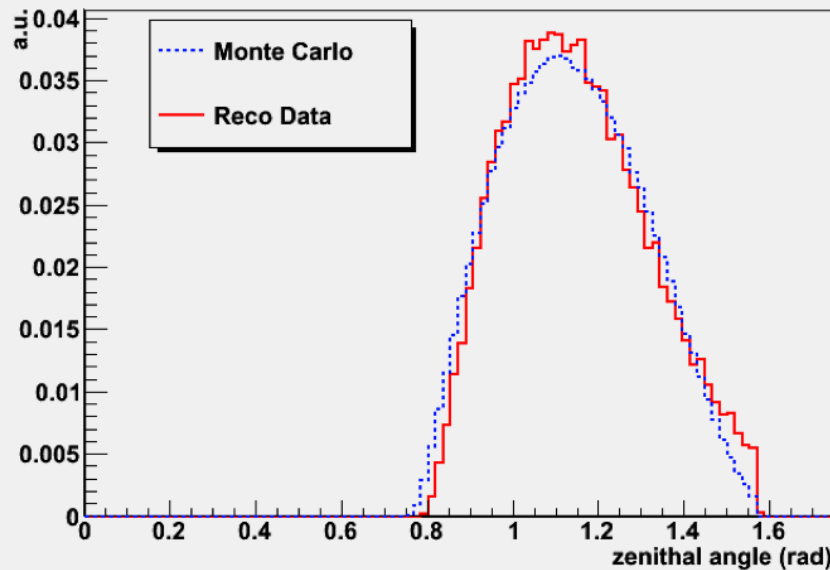


Forthcoming first step in the  
“Mt. Vesuvius challenge”

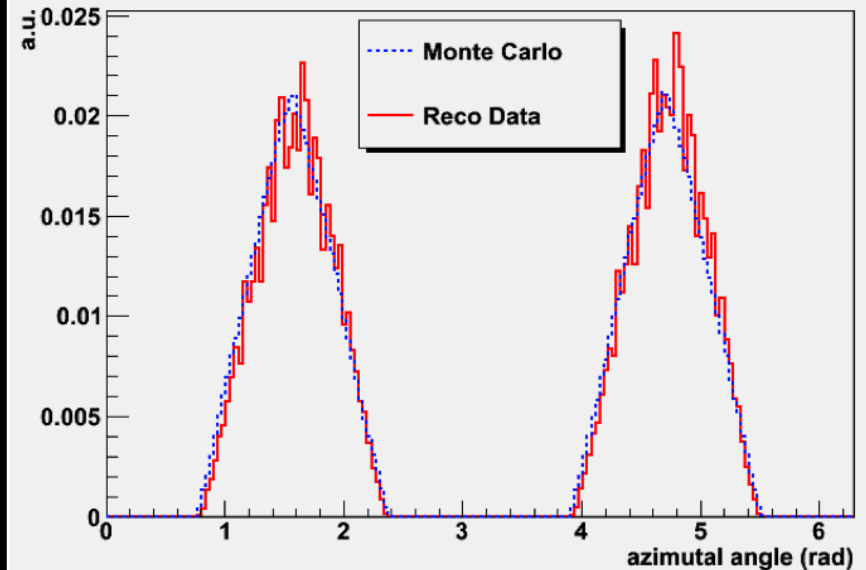


# Dati a cielo aperto vs MC

Comparison Monte Carlo - Reco Data

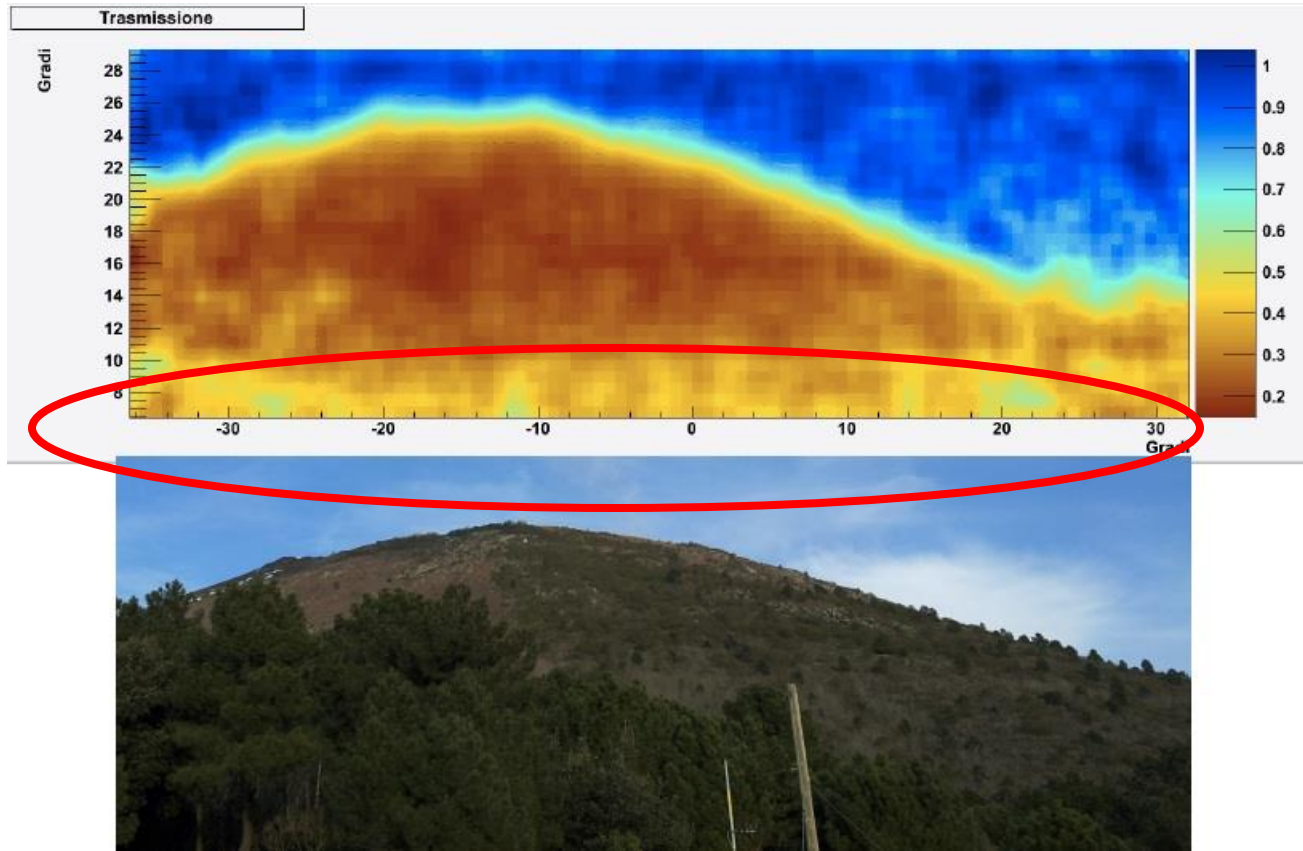


Comparison Monte Carlo - Reco Data



- una settimana di presa dati; buon accordo col MC: un po' di fondo per i  $\mu$  orizzontali ( $>80^\circ$ , 1.4 rad), forse  $\mu$  dal verso sbagliato (la misura del tof non era attiva)

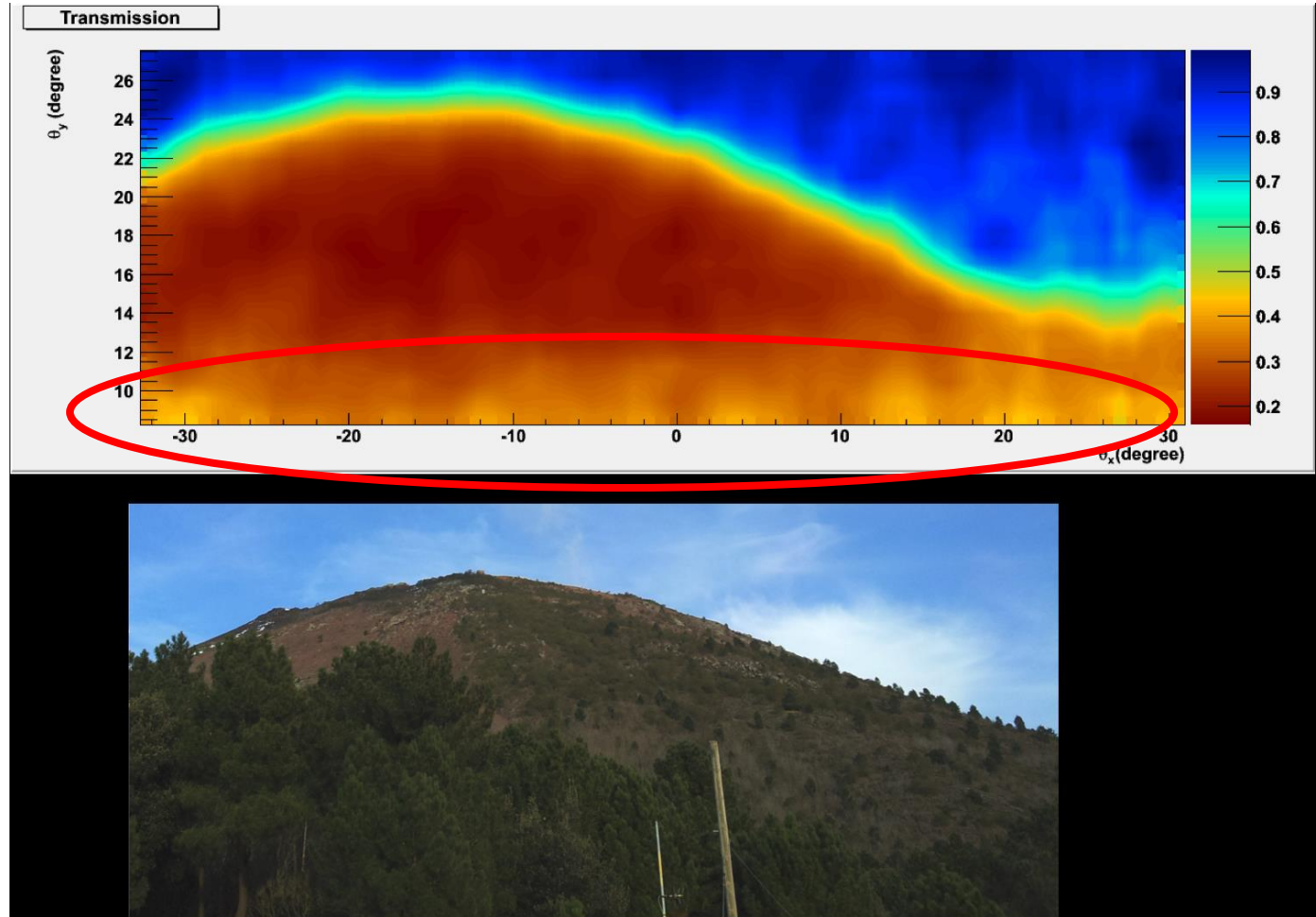
# Primi dati del Vesuvio: una settimana di presa dati (1a versione)



rapporto bin a bin fra i dati puntando al Vesuvio ed a cielo aperto, normalizzati allo stesso periodo di presa dati, si aspetta circa 1 se i due istogrammi coincidono; qualche vuoto di troppo alla base

# Primi dati del Vesuvio: una settimana di presa dati (2a versione)

lab. INGV  
attrezzato, ma  
problemi di  
alimentazione  
per il  
raffreddamento,  
run corti e  
continue  
calibrazioni,  
inefficiente  
continuare più a  
lungo



in basso una foto del Vesuvio scattata dal laboratorio INGV



From: **An experiment of muon radiography at Mt Etna (Italy)**

Geophys J Int. 2013;196(2):633-643. doi:10.1093/gji/ggt403

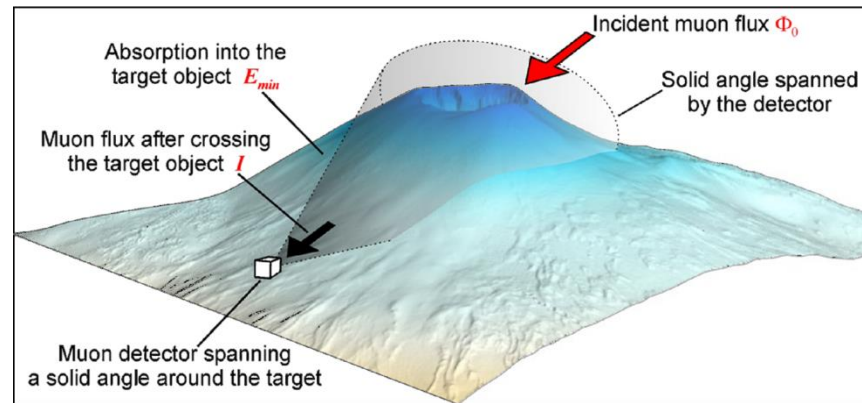
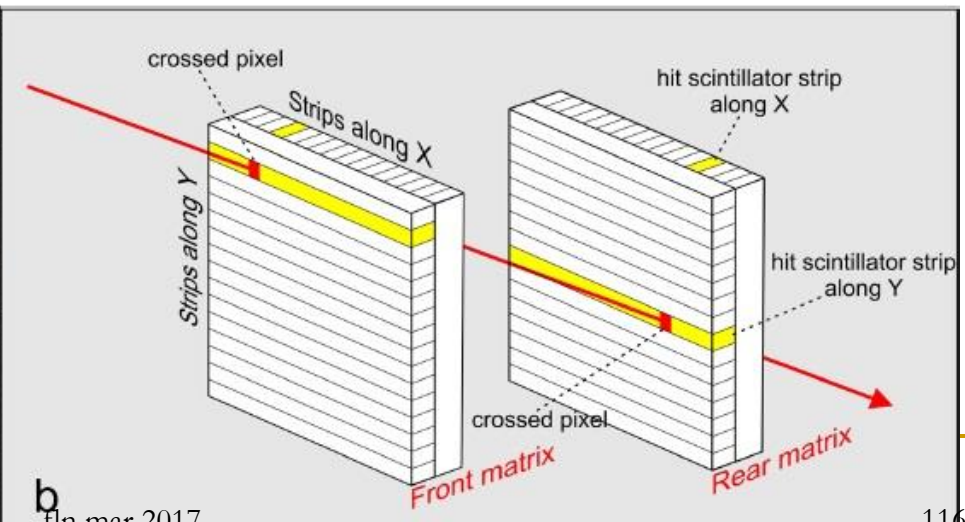
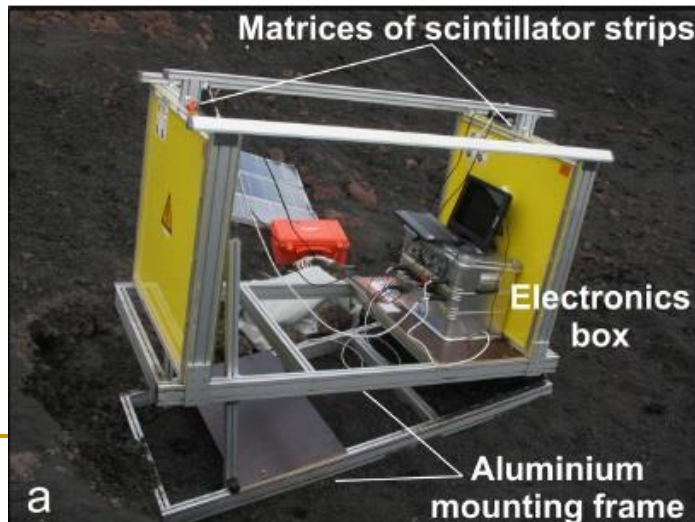
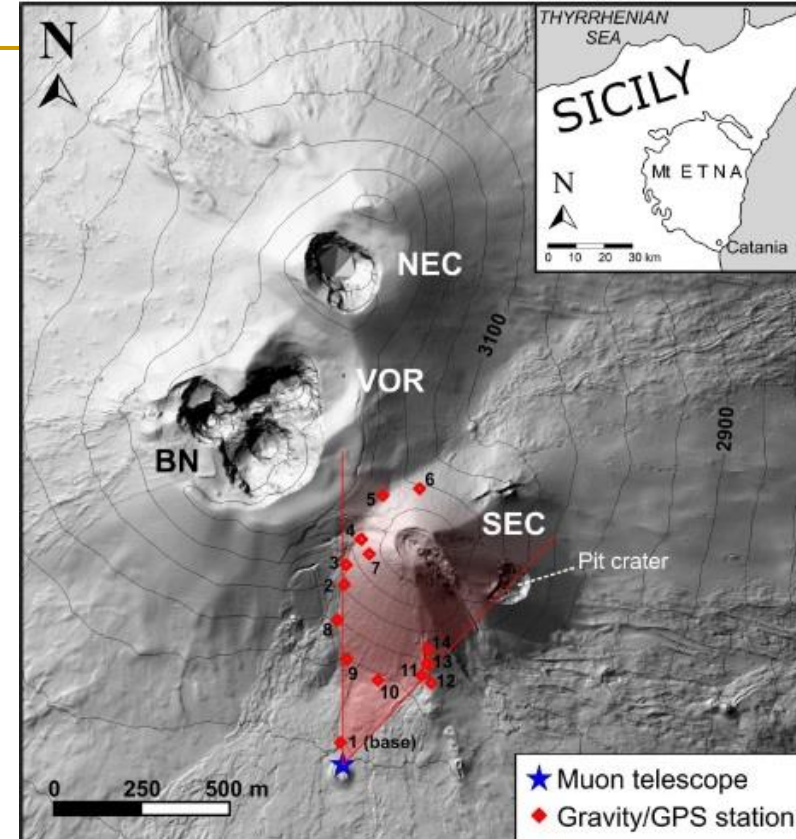


Figure Legend:

Schematic sketch showing the main issues involved in the muon radiography of volcanoes. The differential incident flux,  $\Phi_0$ , within the solid angle spanned by the detector, is reduced by absorption inside the target structure. The telescope allows to measure the integrated flux,  $I$ , along each incident direction, after the target object is crossed.

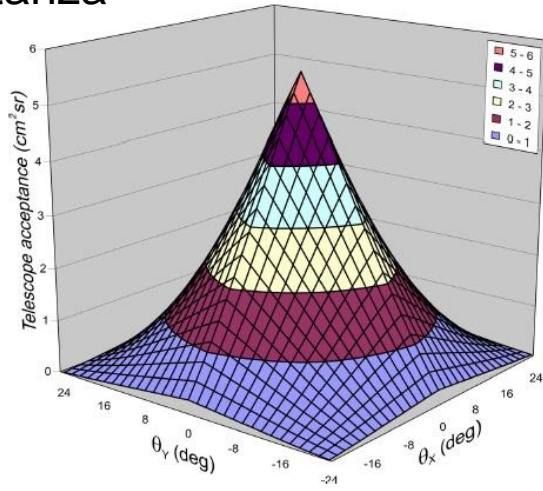
# L'Etna (estate 2010)

- scintillatori plastici (5 cm) 16x16 per piano (256 pixel), lettura con fibre WLS e MAPMT, distanza fra i piani 170 cm, ossia una risoluzione di 20 m a circa 650 m (30 mrad) dal vulcano
- purtroppo le dimensioni del vulcano sono tali che, con i rivelatori attuali, si può vederne solo una piccola parte

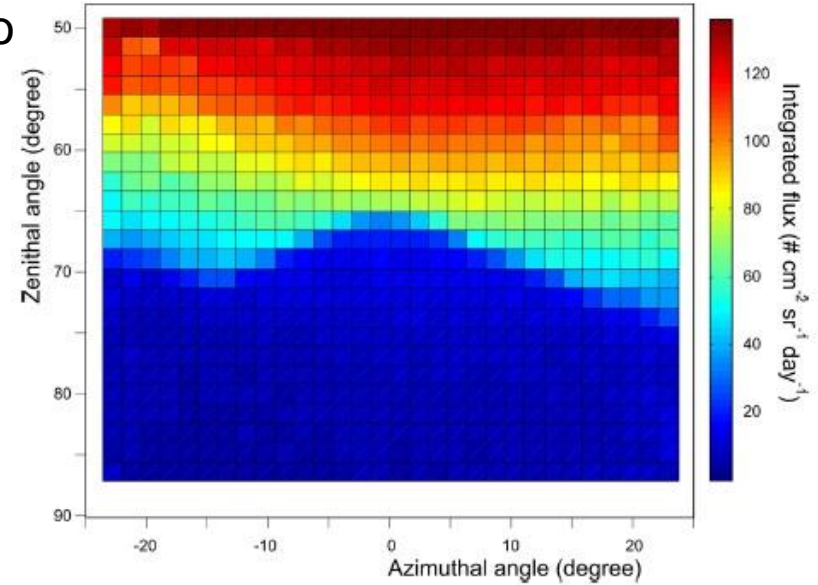


# L'Etna/2

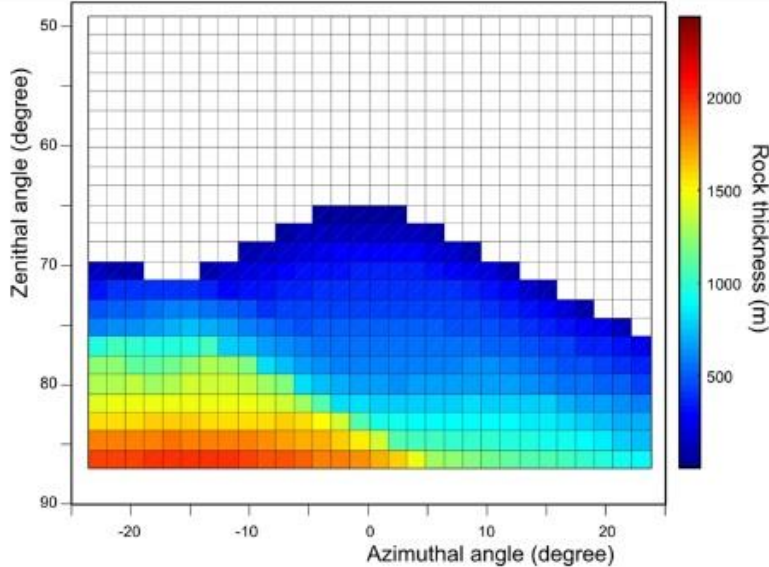
accettanza



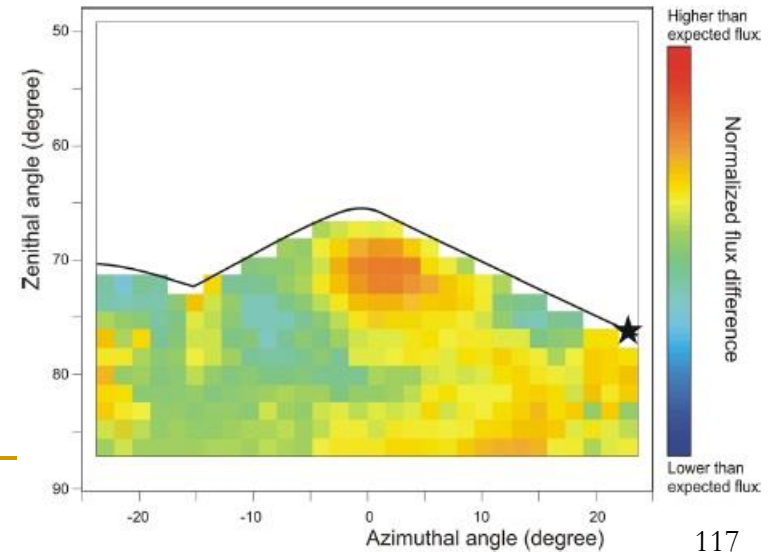
flusso integrato  
su 30 giorni



lo spessore di roccia



flusso normalizzato ad un modello  
omogeneo, \* indica un cratere laterale

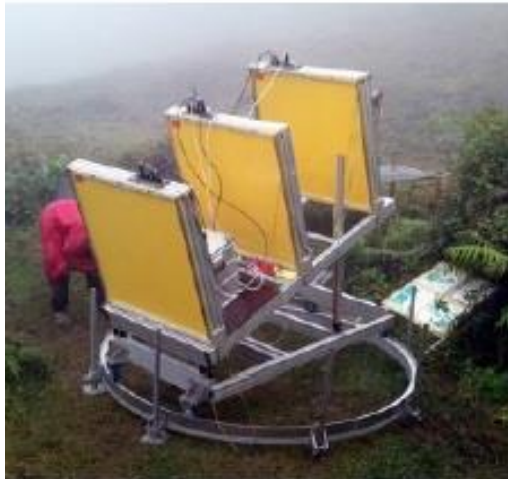




# Vari (altri) tipi di rivelatori

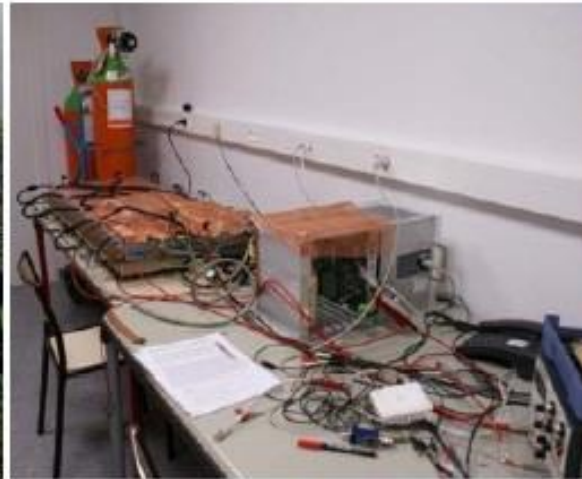
Scintillators

DIAPHANE



Micromegas

T2DM2



GRPCs

TOMUVOL



position res: 35 mm  
angular res(@1m) : 35 mrad  
time resolution : 1 ns  
surface: 0.64 m<sup>2</sup>

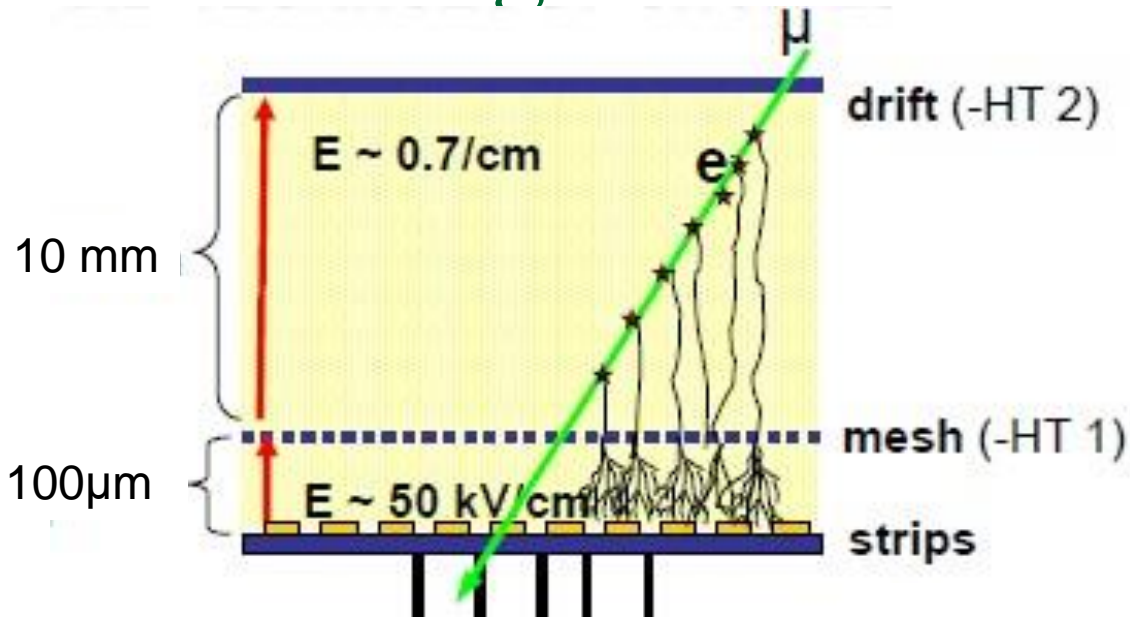
position res: 0.22 mm  
angular res(@10 cm) : 2 mrad  
time resolution : 25 ns

position res: 4 mm  
angular res(@1m) : 4 mrad  
time resolution : 200 ns  
surface: 1 m<sup>2</sup>

- una proposta recente (nov 2015): **RICH** (Ring Imaging Cherenkov Counters) per studiare l'Etna

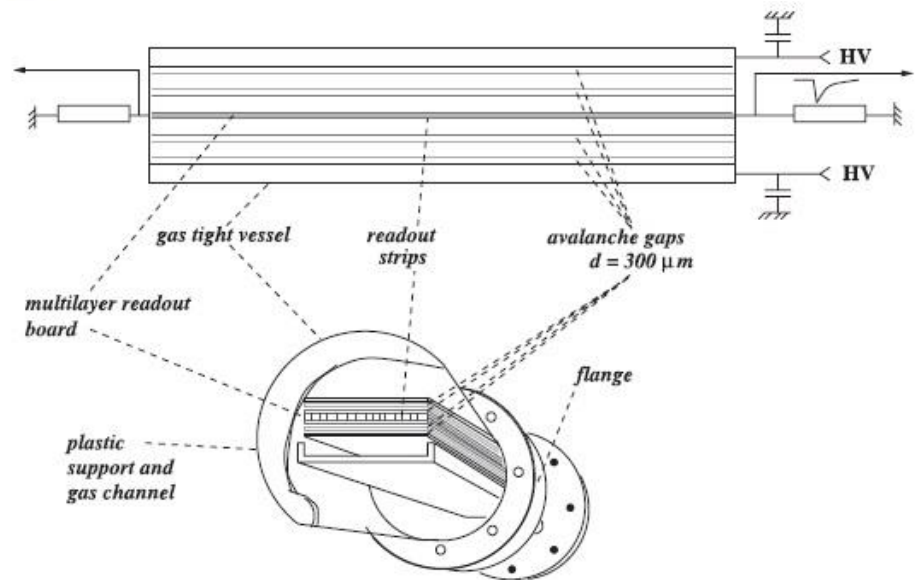


# Micromegas e GRPC

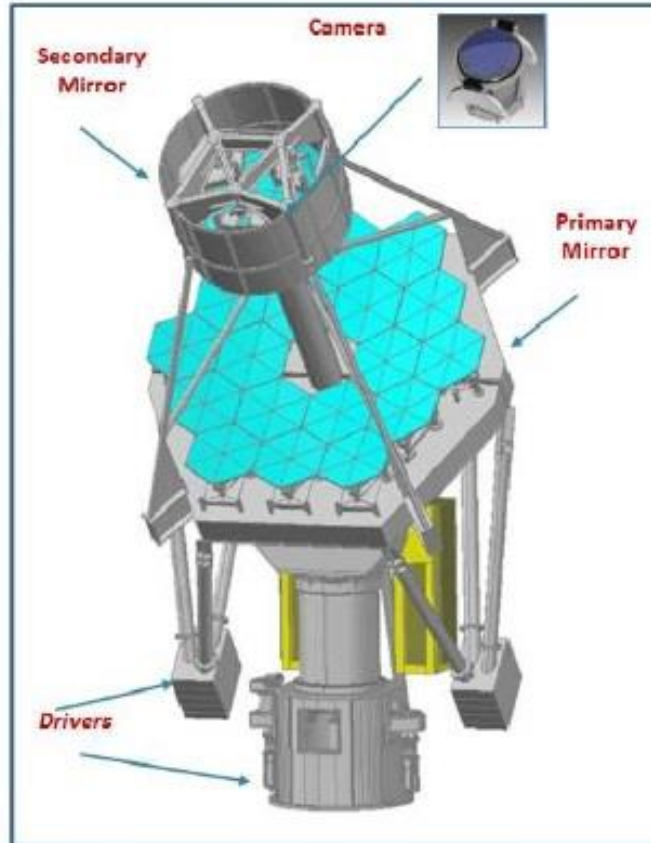
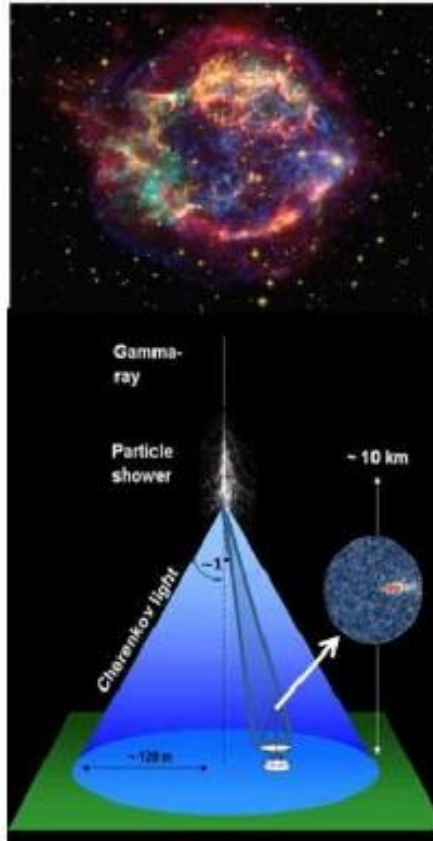


Micromegas  
 HV ~ 1-1.5 kV  
 p = 1 atm  
 Ar, CF<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (88/10/2)

Glass RPC  
 HV ~ 6-7 kV  
 p = 1 atm  
 C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>H<sub>2</sub>; SF<sub>6</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (85/10/5)  
 few 10<sup>13</sup> ohm cm



# ASTRI SST-2M telescope (INAF), fa parte del CTA per E da qualche TeV a $> 100$ TeV



ASTRI è installato sull'Etna, a Serra La Nave, in una posizione ~ adatta (attualmente a 5 km dal picco) a vedere parte del vulcano

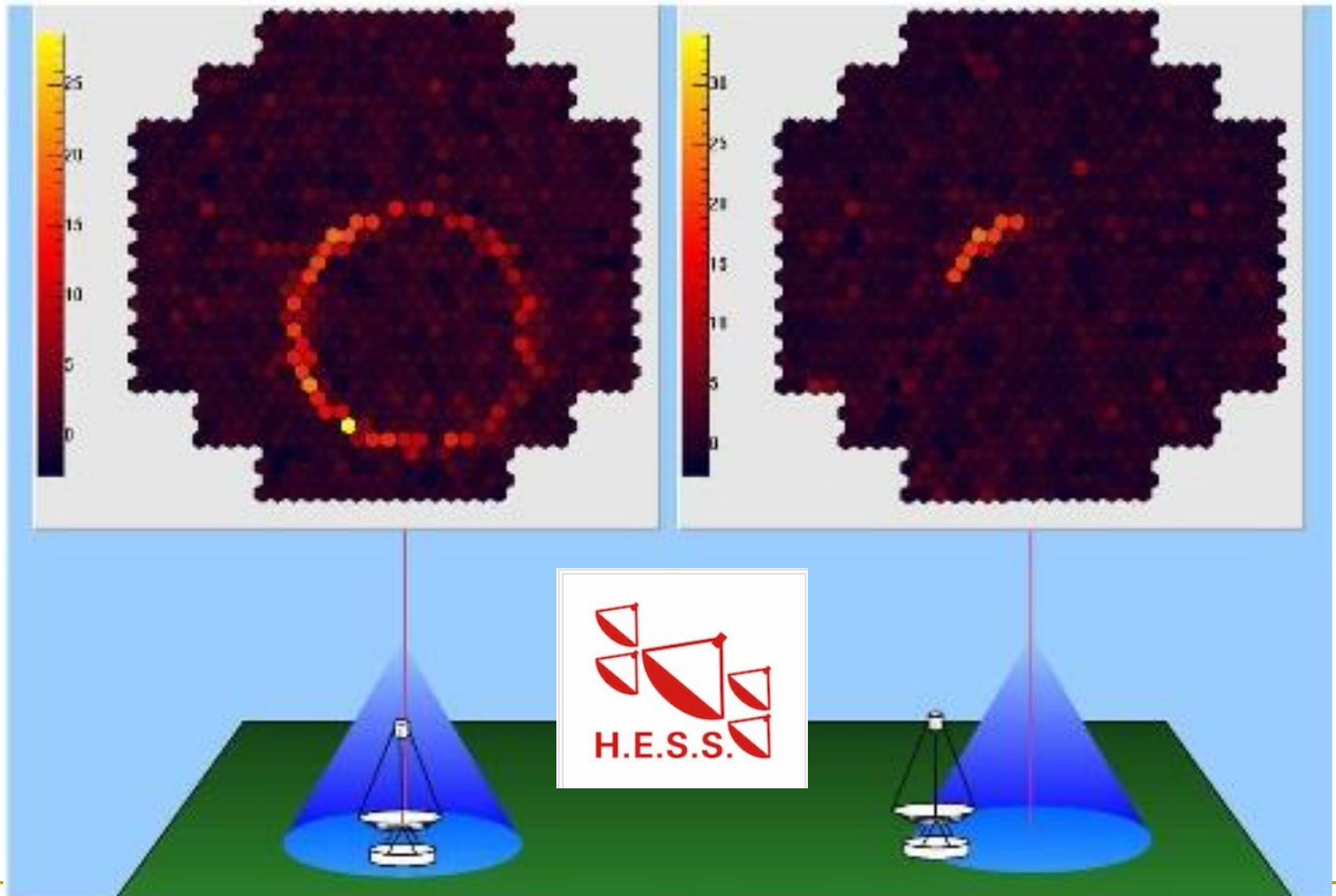
soglia  $Ch \sim 5$  GeV in aria a l.m.,  $\theta_{Ch} \approx 1.3^\circ$  in aria, diametro 4.2 m, risoluzione spaziale 15 m, sensibile agli ultimi 100 m del  $\mu$ , 5000  $\mu$ /notte (che non sono tanti)

CTA – Cherenkov Telescope Array

QG apre a Bologna giugno 2017

1o telescopio LST pre-produzione inizio 2018

# esempio: $\mu$ rings (as seen by H.E.S.S.)



# Bibliografia

- N. Lesparre et al., Geophysical muon imaging: feasibility and limits, *Geophys. J. Int.* (2010) **183**, 1348
- International Workshop on "Muon and Neutrino Radiography 2012"  
<https://indico.in2p3.fr/contributionListDisplay.py?confId=6275>
- International Workshop on "Muon and Neutrino Radiography 2013", <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ht/MNR13/>
- G. Saracino, presentazione alla commissione V dell'INFN, maggio 2013
- F. Ambrosino et al., The MU-RAY project: detector technology and first data from Mt. Vesuvius, 2014 *JINST* **9** C02029



## 2. Diffusione dei $\mu$ e radiografia di piccole strutture

- Per studiare strutture molto piccole l'assorbimento dei muoni cosmici misurato con un singolo rivelatore non è più la tecnica migliore
- In effetti si possono tracciare all'indietro i muoni osservati ed il tracciamento permette di identificare vuoti e pieni anche relativamente piccoli, v pag. 56
- Nel caso sia possibile posizionare un ulteriore rivelatore prima del volume da muografare è possibile utilizzare lo scattering dei muoni nel materiale incognito

## 2. Diffusione dei $\mu$ : applicazioni

- LANL L. Schultz, K. Borozdin et al., Rivelazione di materiali ad alto Z con DC/DT (sicurezza), 2003, 2004 →
- Pd-LNL-Bs-Ge P. Checchia et al., Rivelazione di materiali ad alto Z con le DT di CMS, 2004 →
- Tsinghua Univ., ITEP Protvino, DT di ATLAS
- FloridaInstTechnology M. Holmann et al., Rivelazione di muoni con GEM GasElectronMultipliers, (2006)2007 →
- Altri: US commerciale (Decision Science Int. Corp.), in coll. con LANL, UK, Canada

---

# Bibliografia iniziale essenziale

## ■ LANL

- K. Borozdin, et al., Nature 422 (2003) 277.
- L.J. Schultz et al., Nucl. Instrum. Meth. A 519 (2004) 687–694.
- L.J. Schultz et al., IEEE Trans. on Image Proc. 16 (2007) 1985.

## ■ Pd-LNL-Bs-Ge

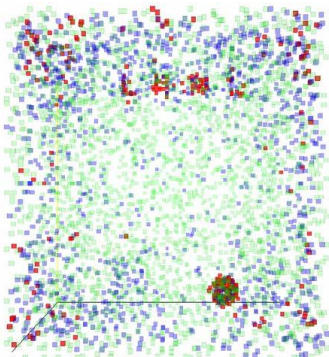
- S. Pesente et al., First results on material identification and imaging with a large-volume muon tomography prototype, Nucl. Instr. Meth. A604 (2009) 738
- <http://muradio.pd.infn.it> e bibliografia citata

# I primi a occuparsi del problema

Original idea from Los Alamos (2003):  
Muon Tomography with Drift Tubes

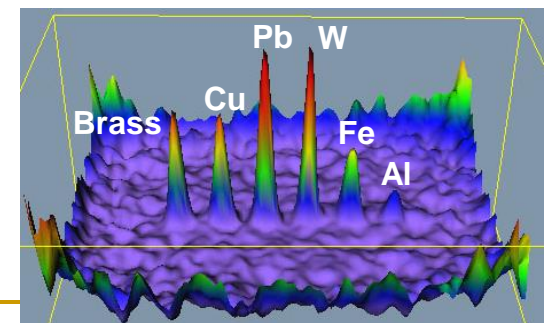


INFN Padova, Pavia & Genova: Muon Tomography  
with spare CMS Muon Barrel Chambers (Drift Tubes)



J.A. Green et al., "Optimizing the Tracking Efficiency for Cosmic Ray Muon Tomography", LA-UR-06-8497, IEEE NSS 2006

E. Conti et al., IPRD08  
Siena, October 2008



Efforts also by Tsinghua U., IHEP Protvino  
— (ATLAS chambers), Decision Science (U.S. commercial) collaborates with LANL



# Qual'è il problema?

may

- Terrorist **smuggle highly enriched uranium (HEU)** or plutonium across borders and destroy a city by detonating a nuclear bomb, or

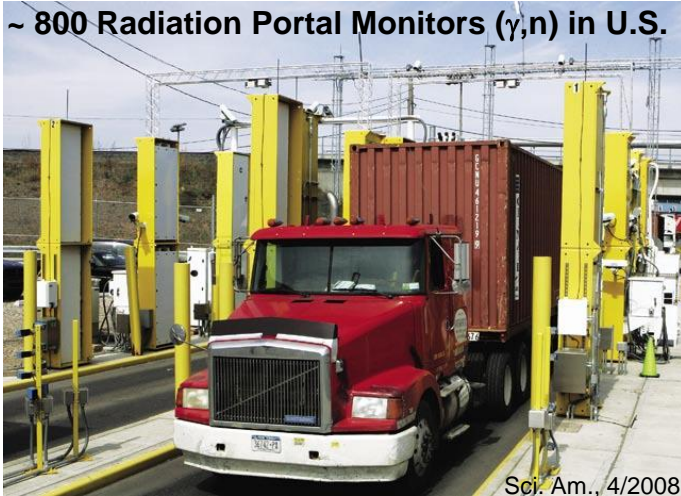
- Terrorists **smuggle highly radioactive material** into a city and disperse it with a conventional explosion (“dirty bomb”) making portions of the city uninhabitable.



T.B. Cochran and M.G. McKinzie, Scientific American, April 2008

# Problema con il contrabbando nucleare

~ 800 Radiation Portal Monitors ( $\gamma, n$ ) in U.S.



Sci. Am., 4/2008

HEU can be **hidden** from conventional radiation monitoring because it is **easy to shield emanating radiation** within regular cargo

HEU > 20%  $^{235}\text{U}$

(SEU < 20% “

LEU 0.9-2% “ )

DU < 0.7% “

- In 2002, reporters managed to smuggle a cylinder of **depleted uranium (DU) shielded in lead** in a suitcase from Vienna to Istanbul via train and in a **cargo container through radiation monitors into NY harbor**. Cargo was even flagged for extra screening, but DU undetected.
- In 2003, took route Jakarta – LA, same result...



6.8 kg DU



HEU

Scientific American, April 2008

**NATIONAL SECURITY**

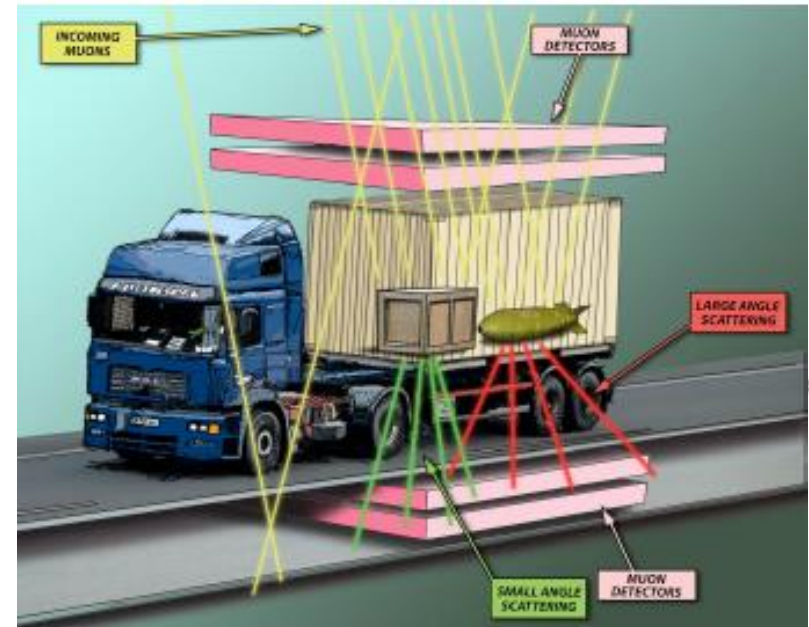
# DETECTING NUCLEAR SMUGGLING

! Radiation monitors at U.S. ports cannot reliably detect highly enriched uranium, which onshore terrorists could assemble into a nuclear bomb !

By Thomas B. Cochran and Matthew G. McKinzie

# Los Alamos Muon Detector Could Thwart Nuclear Smugglers

Existing radiographic methods are inefficient for detecting shielded nuclear materials and present radiation hazards to inspectors and vehicle passengers. Muon radiography uses the natural scattering of muons - produced by the decay of cosmic rays showering down on Earth - as a radiographic probe. In fact, efforts to shield nuclear materials with lead or similar heavy metals make a smuggled object easier to detect with muons.



Std container:  $6.10 \times 2.44 \times 2.59 \text{ m}^3$   
Internal volume  $33.1 \text{ m}^3$ ; max  
weight 30.4 t (empty 2.2 t)

# Vantaggi

- Un vantaggio delle radiografie con  $\mu$  è la loro abilità a discriminare fra materiali usati tipicamente per la schermatura e materiali meno densi. Con un'energia media di 3-4 GeV, gran parte dei  $\mu$  possono penetrare circa 180 cm di Pb (circa 240 cm di Fe).
- 2° vantaggio: i  $\mu$  cosmici arrivano da tutte le direzioni permettendo di ottenere un imaging tomografico in 3D
- I raggi  $\gamma$  sono molto meno penetranti, producono soltanto immagini bidimensionali confuse, che necessitano interpretazioni aggiuntive e richiedono materiali pericolosi come il  $^{60}\text{Co}$ .

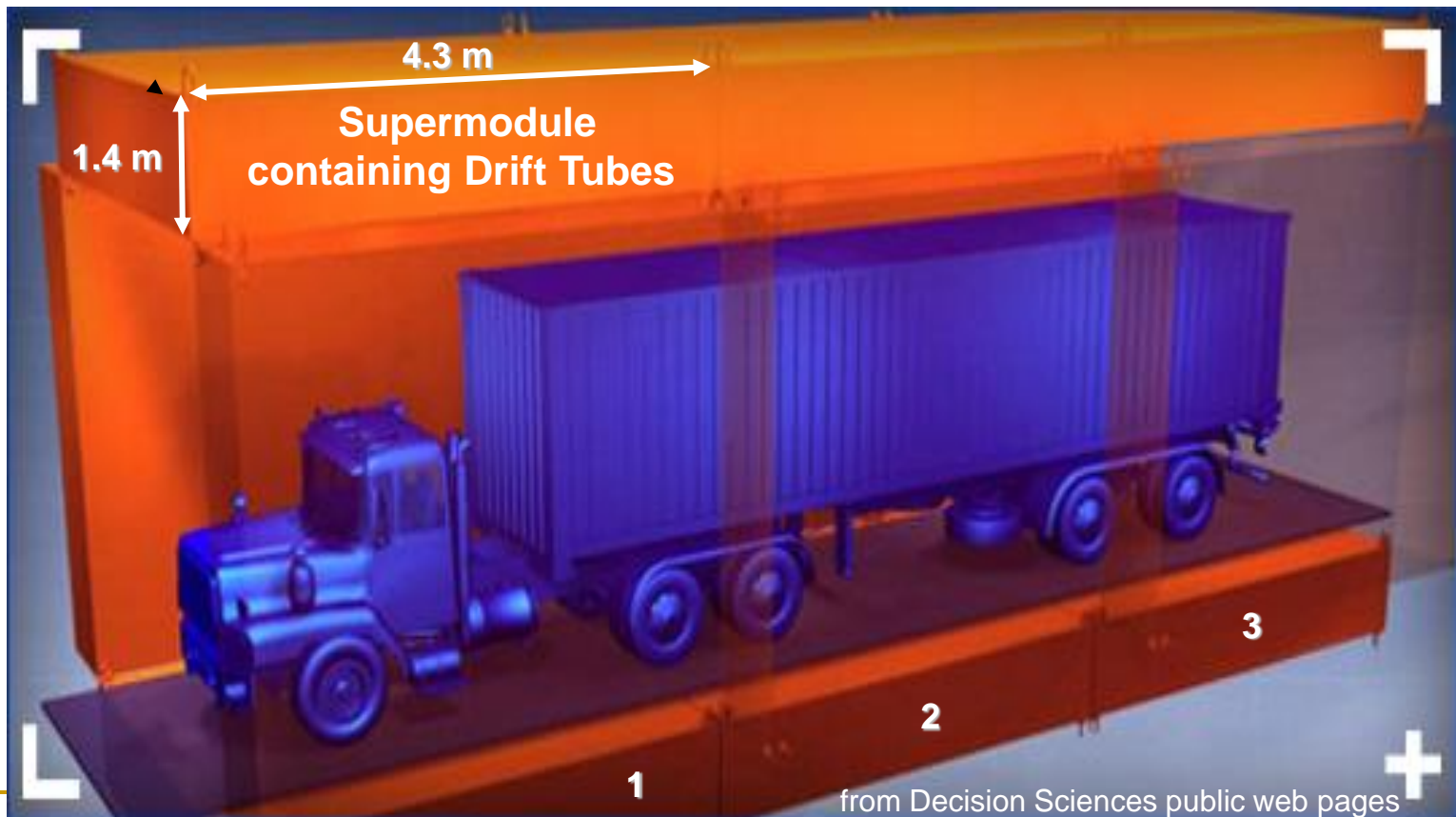


# Svantaggi → vantaggio

- Uno svantaggio dei sistemi di rivelazione tipo quelli in uso negli aeroporti è la necessità che gli operatori interpretino immagini e dati. L'automazione insita nell'algoritmo di Los Alamos (vedi più avanti) rende più semplice il lavoro degli ispettori poiché non converte i dati da circa un milione di coordinate del rivelatore in immagini. Invece, usando tecniche di machine learning, l'algoritmo è allenato con esempi noti finché non può decidere autonomamente se siano presenti una bomba, materiali nucleari o schermatura (con una frazione di falsi positivi e falsi negativi  $< 3\%$ ).
- Un prototipo di rivelatore può radiografare grossi oggetti metallici (eg camion, container) in 60s → 20s [con qualche miglioramento nel software]

# Una possibile realizzazione commerciale

Design by Decision Sciences Corp. in cooperation  
with Los Alamos National Lab

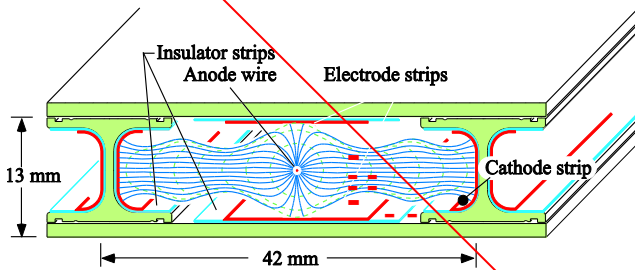


# Una possibile realizzazione su larga scala

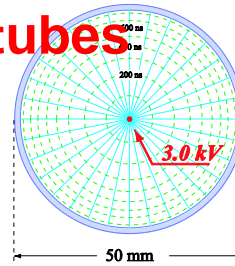


## Possible solutions

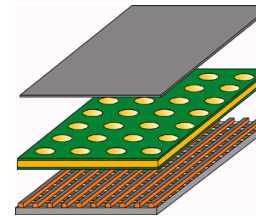
### Drift cell



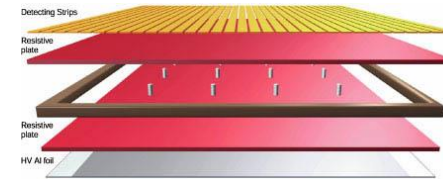
### Drift tubes



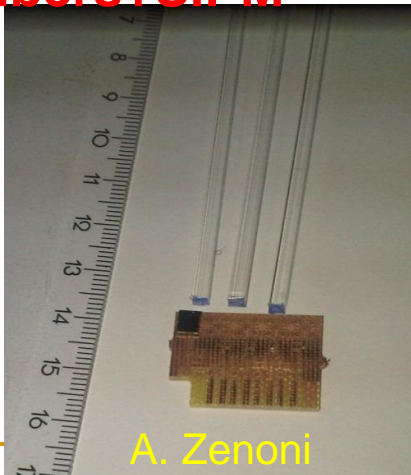
### GEM



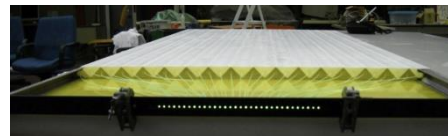
### RPC\*



### Scint. Fibers+SiPM\*



### Scint.+ WLS Fibers+SiPM\*



....and also nuclear emulsions

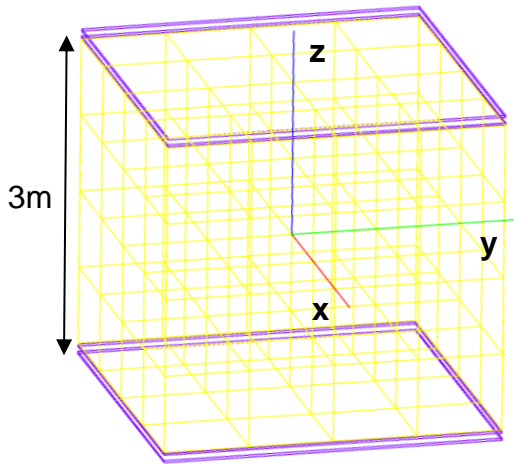
\*Possible precise t measurement:  
For ~ 5 m distance 100 ps time of flight resolution  $\Rightarrow p < 900$  MeV



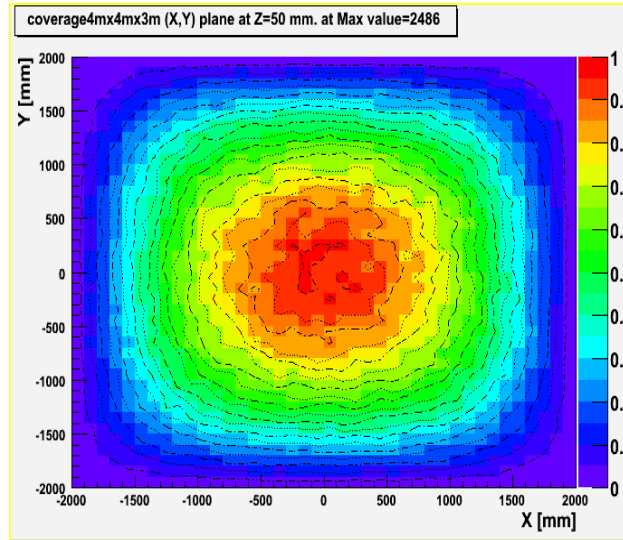
# Possibili geometrie

## MT station type

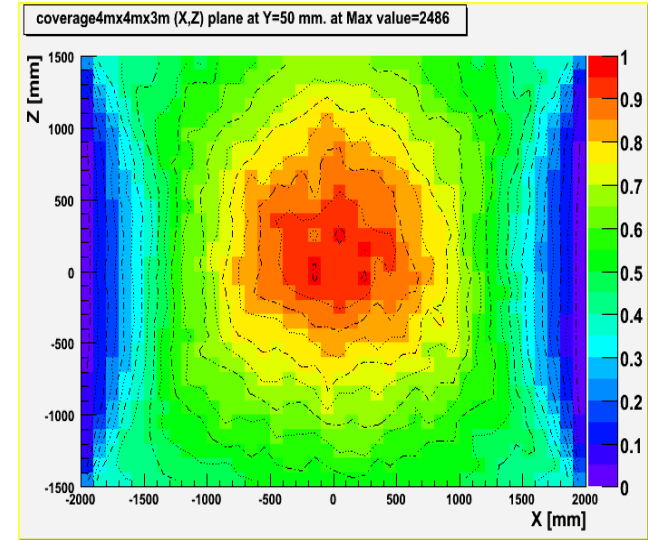
Top & bottom detectors only



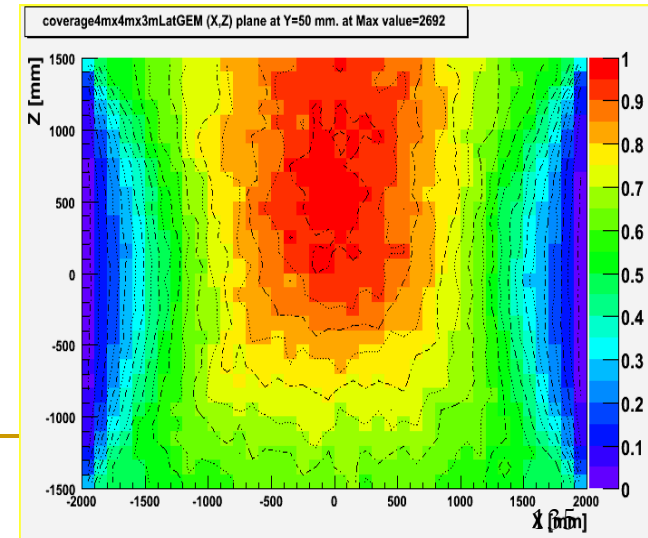
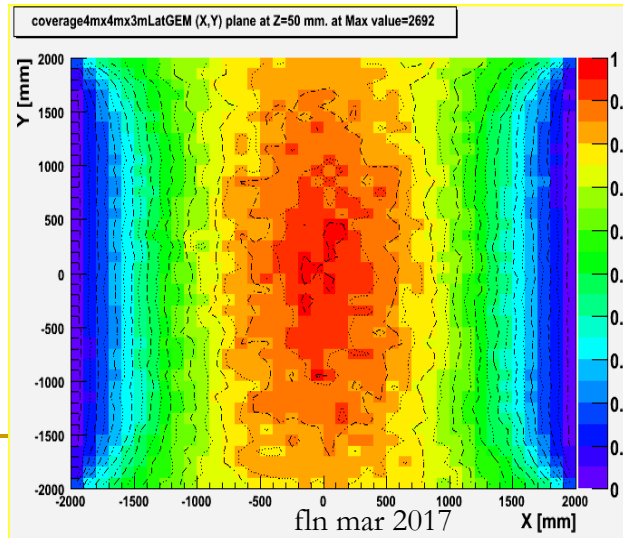
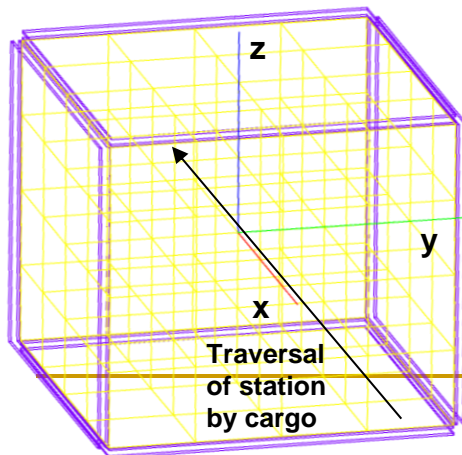
## Top View (x-y plane)



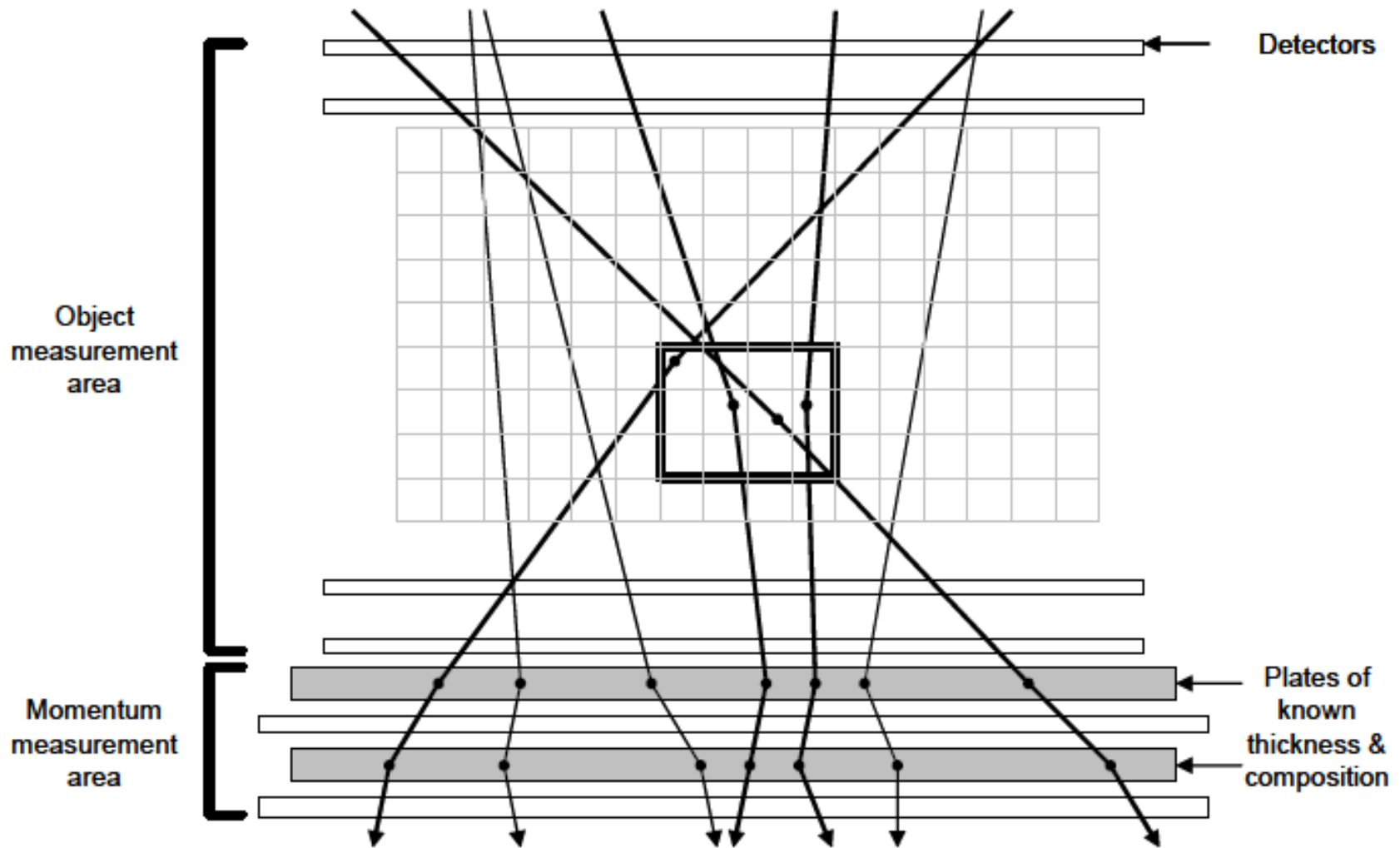
## Side View (x-z plane)



Top, bottom & side detectors



# Schema di principio (LANL, Pd ... etc.)



# Scattering multiplo in uno spessore L

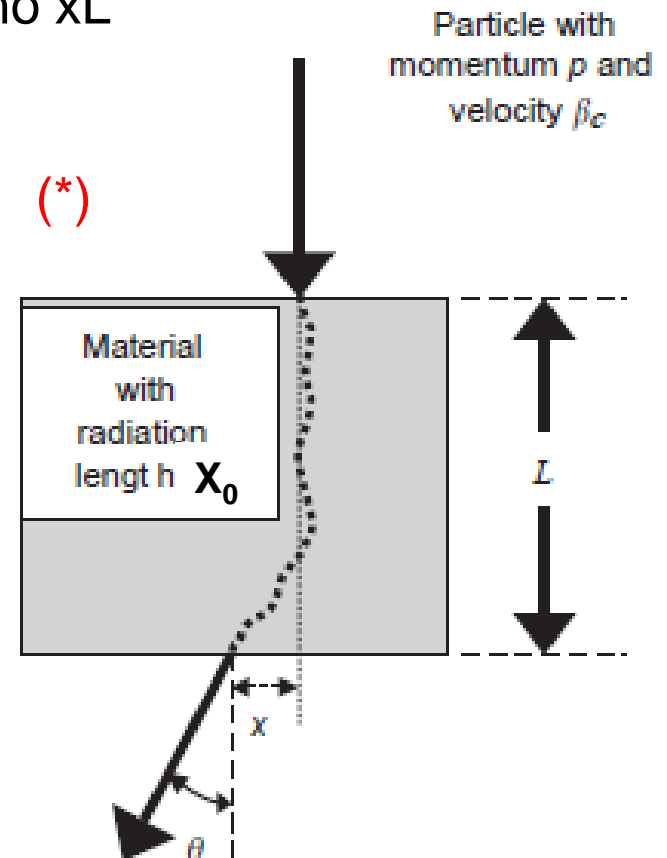
$$\frac{dN}{d\theta} = \frac{1}{\sigma_\theta \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_\theta^2}\right) \quad \text{in un piano } xL$$

$$\sigma_\theta = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} \sqrt{\frac{L}{X_0}} \left[ 1 + 0.038 \ln\left(\frac{L}{X_0}\right) \right] \quad (*)$$

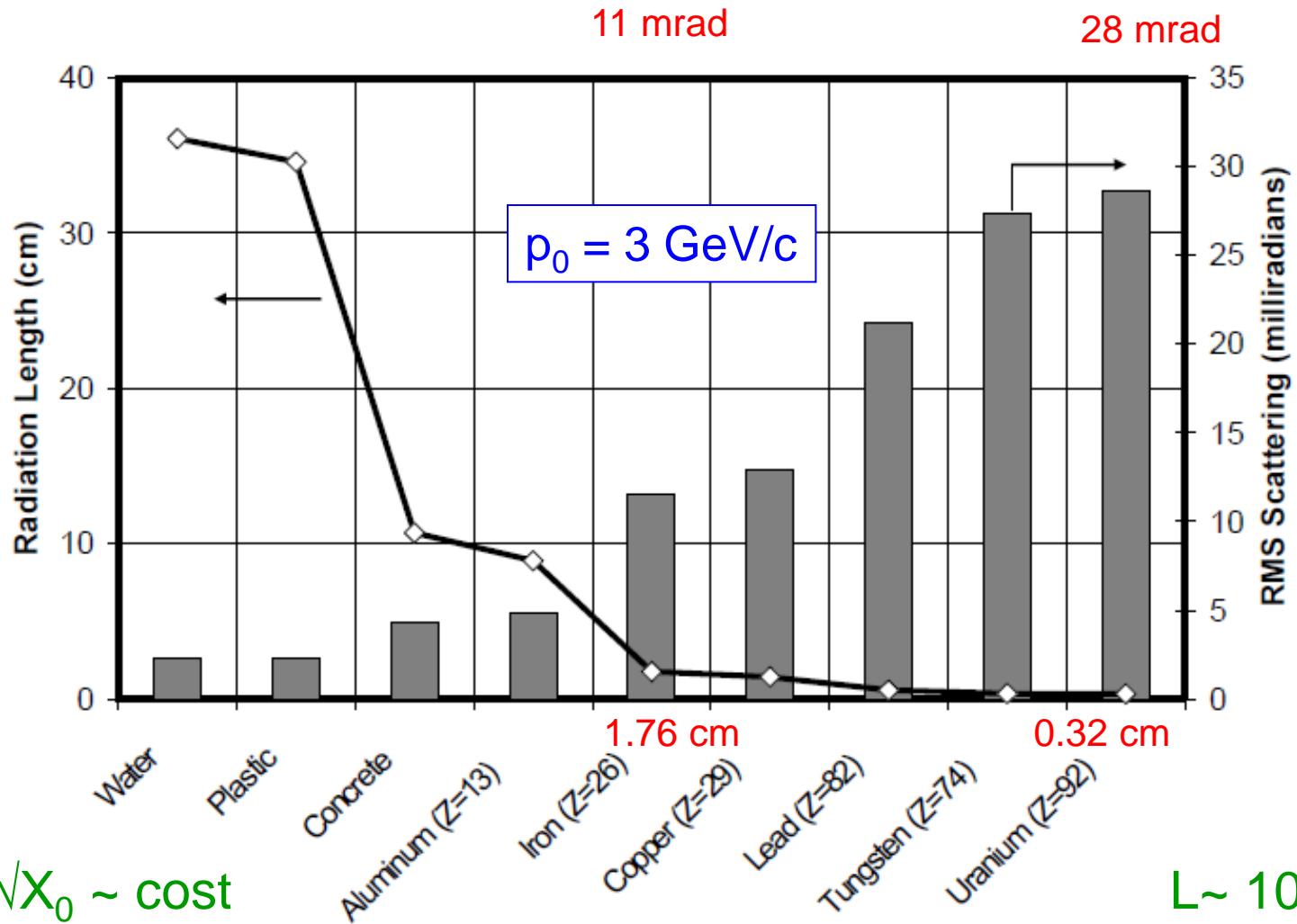
$$\sigma_x = \frac{L}{\sqrt{3}} \sigma_\theta$$

$$\rho_{x\theta} = \sqrt{3} / 2$$

- La distribuzione angolare è  $\approx$  gaussiana (al 98% + lunghe code)
- $X_0$  - lunghezza di radiazione (Z)
- nel piano  $\perp$  a  $xL$ : distribuzione indipendente (y), stessi valori
- per  $\beta=1$ , (\*) parametrizzazione valida entro 11%,  $\forall Z, L \in (0.001, 100)X_0$  (Lynch & Dahl, 1991); diversa da quella di Rossi & Greisen



# Scattering multiplo – diversi materiali



$$\theta_{\text{RMS}} \sqrt{X_0} \sim \text{cost}$$

$L \sim 10 \text{ cm}$



# Identificazione del materiale via $\mu$ scattering

- $\mu$ :  $\beta c = 1$ ; dimentichiamo il  $\ln$

$$\sigma_{\theta} \approx \frac{13.6 \text{ MeV}}{p} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$$

- fissiamo un impulso, eg  $p_0 = 3 \text{ GeV}/c$  ( $\approx$ valore medio dei  $\mu$  cosmici al suolo) ; **def**: scattering quad. medio di  $\mu$  nominali per unità di spessore – **scattering strength**

$$\lambda_{\text{mat}} = \left( \frac{13.6}{p_0} \right)^2 \frac{1}{X_{0,\text{mat}}} (\cong \sigma_{\theta_0,\text{mat}}^2) \quad \text{mrad}^2/\text{cm} \quad \begin{array}{l} \text{Fe} \sim 12 \text{ mrad}^2/\text{cm} \\ \text{U} \sim 65 \quad \quad \quad \text{“} \end{array}$$

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{p_i^2}{p_0^2} \frac{\theta_{xi}^2 + \theta_{yi}^2}{2L_i} \right) \quad \begin{array}{l} N \text{ muoni, due viste, impulso } p_i, \\ \text{spessore attraversato } L_i \end{array}$$

# Errori

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cong \frac{\Delta N}{N} = \sqrt{\frac{1}{N}} \quad \text{eg } 10 \text{ cm}^3; 100 \text{ } \mu\text{/min}; 10\%/\text{min}$$

- tenendo ora conto dell'errore sulla stima di  $p_i$ ,  $\Delta p/p = \varepsilon_p$

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{N(1 + \varepsilon_p^2)} \sum_{i=1}^N \left( \frac{p_i^2}{p_0^2} \frac{\theta_{xi}^2 + \theta_{yi}^2}{2L_i} \right)$$

- lo scattering in uno spessore noto permette 2 (x,y) stime di p: date M(>4) misure si ha

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cong \sqrt{\frac{1}{N}} \sqrt{\frac{M-1}{M-4}}$$

- in effetti (MC): l'incertezza con M=4 è circa doppia rispetto a M=6 → con due spessori,  $\Delta\lambda/\lambda$  diventa  $3.2 \cdot \sqrt{N}/N$

# Identificazione di materiali di Z diverso

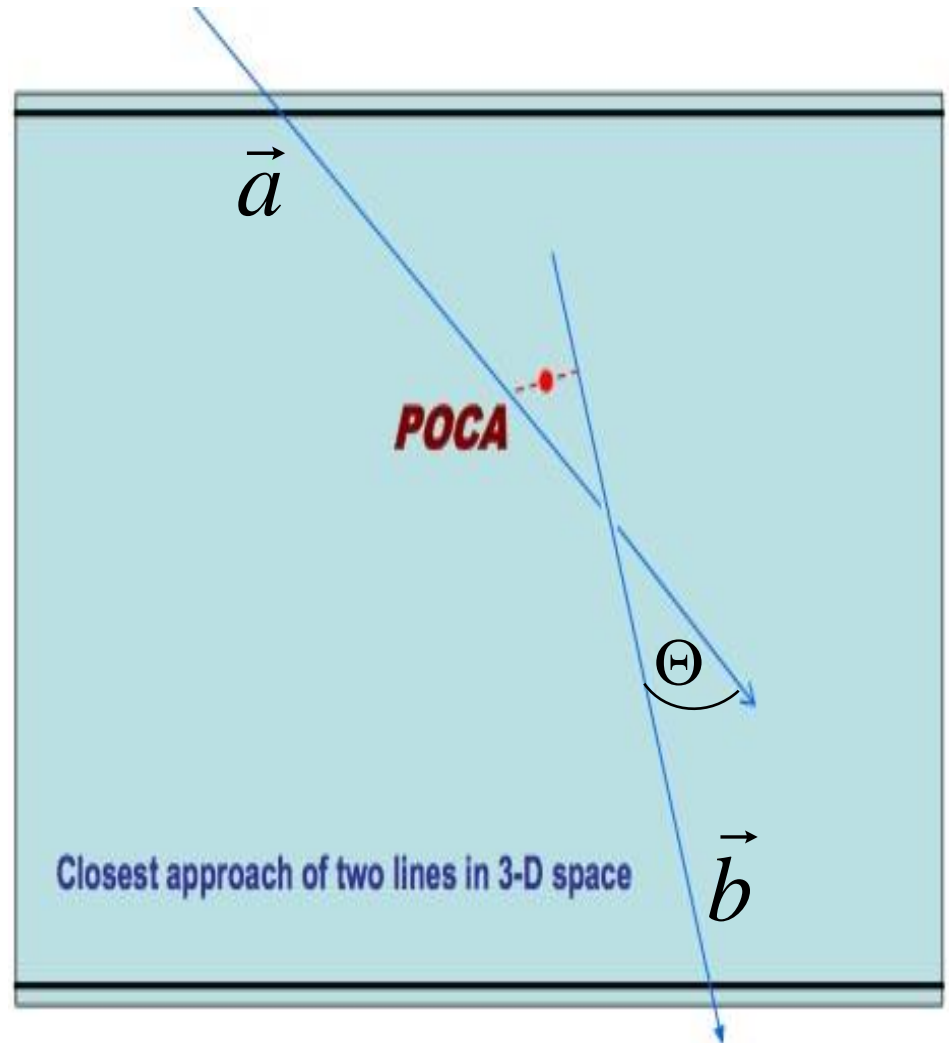
- grosso modo: tre blocchi, 10 cm<sup>3</sup> (cemento, Fe, U);  
100  $\mu$  in 1 min; tre spessori per la misura di  $p$   
( $3\Delta\lambda/\lambda \sim 50\%$ )
- $\lambda_{\text{cemento}} = 1.6 \text{ mrad}^2/\text{cm}$   
intervallo di confidenza con  $3\sigma$  [0.8,2.3]
- $\lambda_{\text{Fe}} = 11.7 \text{ mrad}^2/\text{cm}$   
i.c. [5.9,16.5]
- $\lambda_{\text{U}} = 65 \text{ mrad}^2/\text{cm}$   
i.c. [33,98]
- chiaramente separabili in 1 min

con due spessori: i tempi aumentano: per una separazione min ci vogliono 2 min

# Ricostruzione

- Algoritmo di ricostruzione semplice usando il **Point of Closest Approach** (PoCA) delle tracce incidenti e uscenti in 3-D
- Si assume una **singola diffusione**
- Veloce  $O(N_\mu)$ , memoria  $O(1)$
- Angolo di scattering:

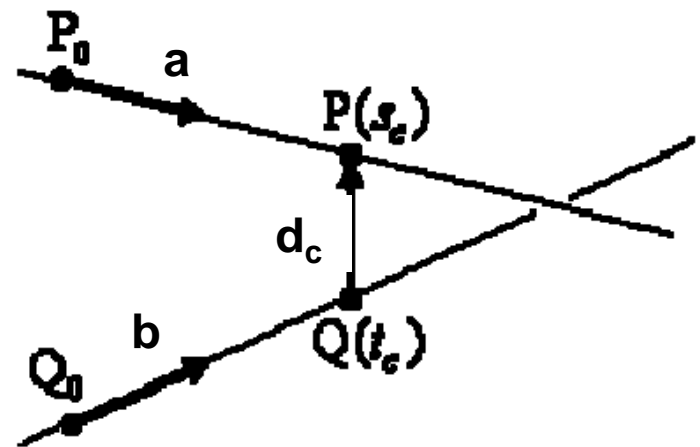
$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} \right)$$



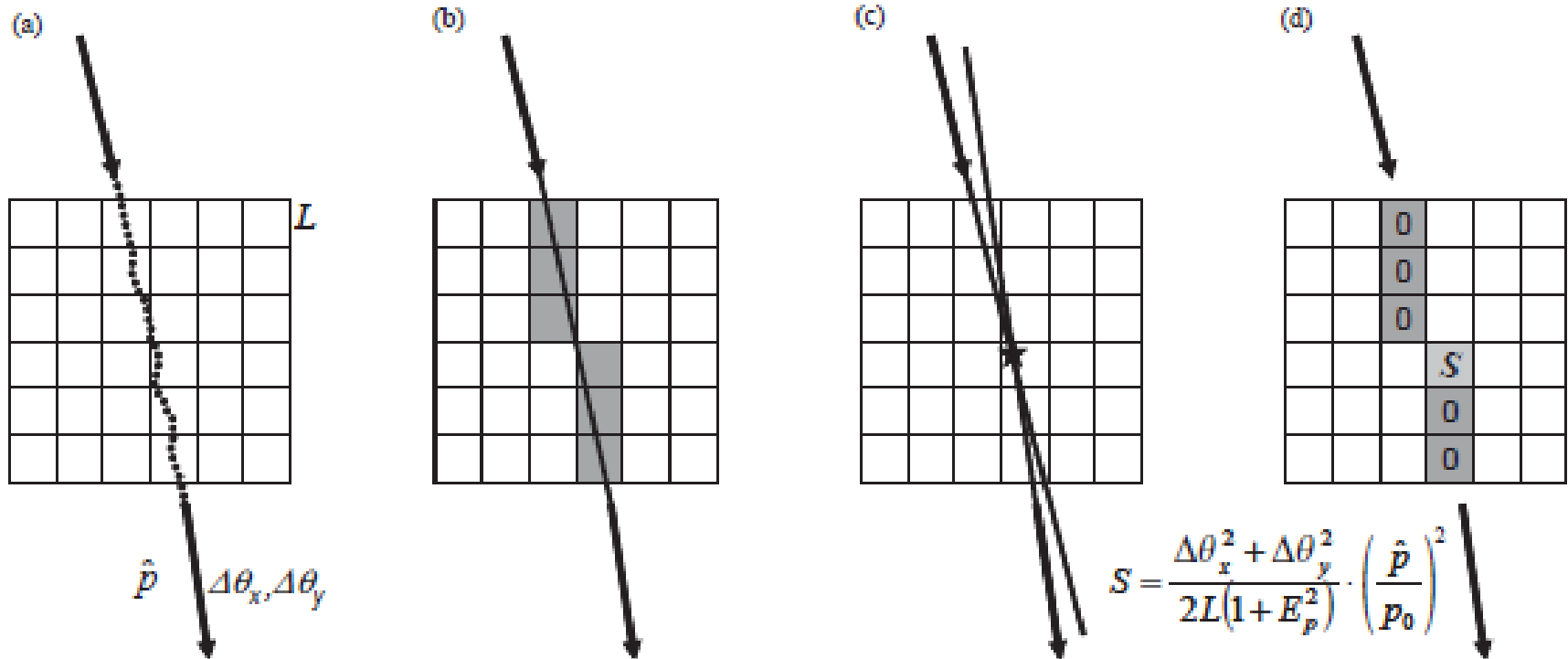


# Minima distanza

- date due linee  $P(s) = P_0 + s(P_1 - P_0) = P_0 + sa$ ,  $Q(t) = Q_0 + t(Q_1 - Q_0) = Q_0 + tb$ , il vettore che unisce due punti è  $\mathbf{d}(s,t) = P(s) - Q(t)$  e la minima distanza si ottiene per  $|\mathbf{d}(s_c, t_c)| = \min$  per cui  $\mathbf{d} \perp \mathbf{a}, \mathbf{b}$  ossia  $\mathbf{d} \cdot \mathbf{a} = 0$  e  $\mathbf{d} \cdot \mathbf{b} = 0$
- si ottengono 2 eq. da cui si ricava [ $\mathbf{a} \cdot \mathbf{a} = A$ ,  $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = X$ ,  $\mathbf{b} \cdot \mathbf{b} = B$ ,  $\mathbf{a} \cdot \mathbf{d}_0 = A_0$ ,  $\mathbf{b} \cdot \mathbf{d}_0 = B_0$ ,  $\mathbf{d}_0 = P_0 - Q_0$ ]
  - $s_c = (B_0X - A_0B) / (AB - XX)$
  - $t_c = (B_0A - A_0X) / (AB - XX)$
- $PoCA = [P(s_c) + Q(t_c)] / 2$



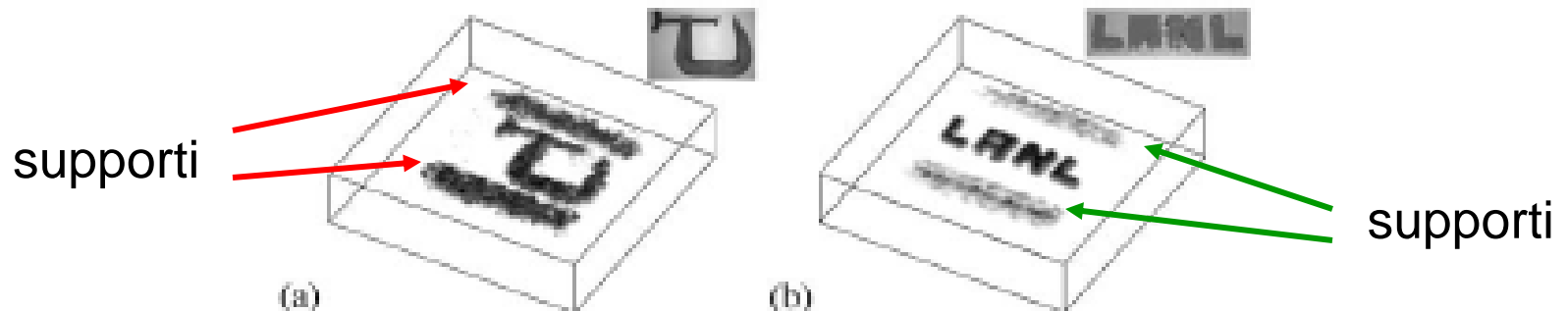
# 3D: Point of Closest Approach (PoCA)



- a) stima di  $p$  (o meno, quindi valore medio)
- b) voxel attraversati (linea retta, scattering  $\sim$  mrad)
- c) PoCA (assumendo un singolo urto)
- d) il segnale ( $\lambda$ ) è attribuito a quell'unico voxel

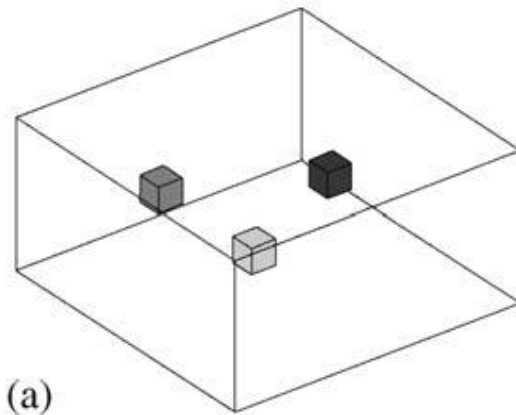
# Prova sperimentale

- muografie ottenute due gruppi di camere a drift, poste sopra e sotto gli oggetti, **a) un morsetto di Fe a C b) la sigla LANL costruita con blocchetti di Pb da 1"**; risoluzioni, 400  $\mu\text{m}$  FWHM, 2 mrad FWHM; angolo solido limitato, p non misurato; 100k  $\mu$ , ossia ~ alcune ore; usando PoCA

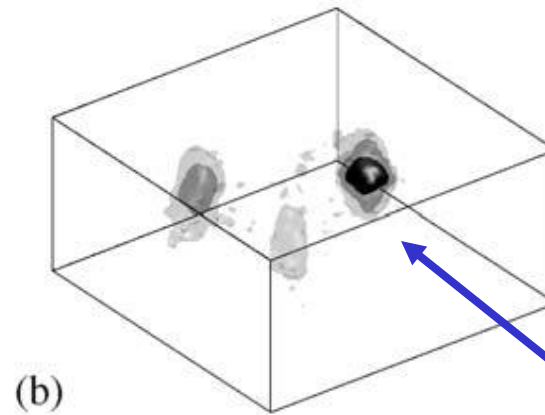


# Simulazione MC (e validazione con tre blocchetti di C, Fe e W)

- tre cubetti 5x5x5 cm<sup>3</sup>, C (basso Z), Fe (medio Z), W (Z grande); rispettivamente definiti come  $0.25 \leq \lambda < 3$ ,  $3 \leq \lambda < 20$ ,  $\lambda \geq 20$ ;  $p$  non misurato, 100k  $\mu$ ; ricostruzione simulata con PoCA: posizioni nello spazio (x,y,z) correttamente rappresentate



lo scenario



la ricostruzione simulata

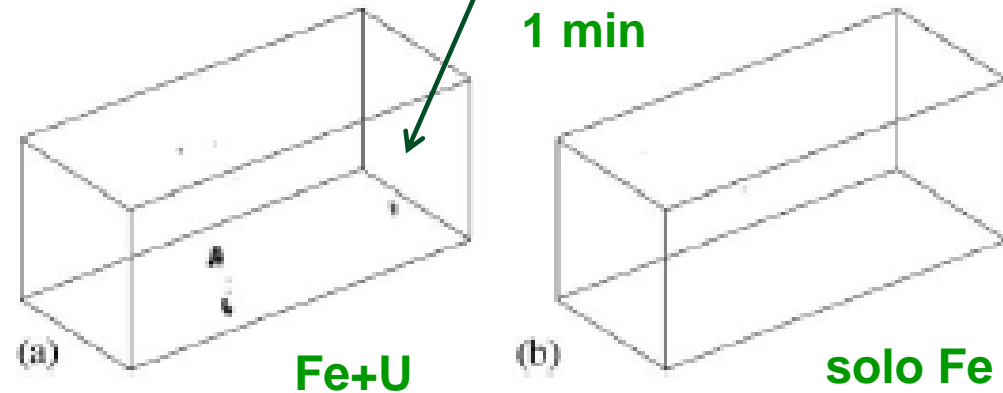
alone:  
artefatti  
dovuti agli  
spigoli



# Algoritmo di identificazione di alto Z e simulazione di un container

- Si eliminano
  - le tracce con  $\theta < \theta_{\text{cut}}$
  - $\text{DistanceCA} > d_{\text{cut}}$
- Si normalizza il segnale ( $\lambda$ ) al numero di  $\mu$  che lo hanno attraversato
- Si evidenziano le regioni con  $\lambda > \lambda_{\text{tresh}}$

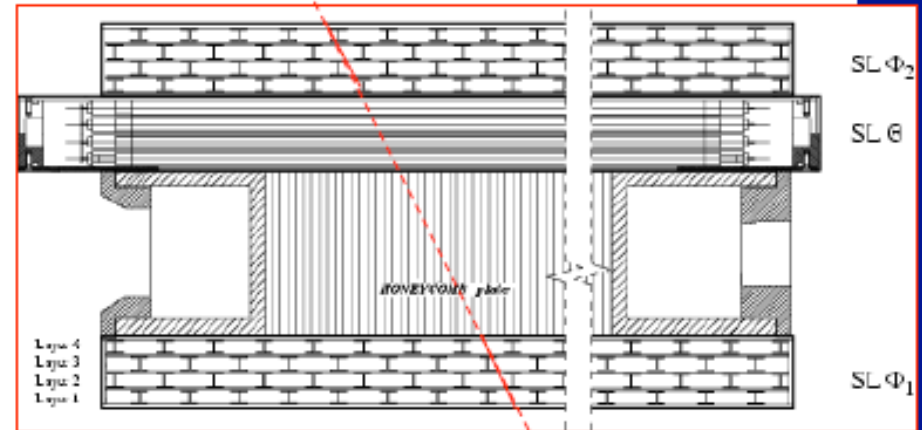
Scena simulata: container di  $6 \times 2.4 \times 2.4 \text{ m}^3$ , pareti di 3 mm Fe, con 12 t di Fe distribuite uniformemente, tre mattoni di U  $9 \times 9 \times 12 \text{ cm}^3$  nascosti nel Fe (a) Fe+U (b) solo Fe, t. misura ~1 min



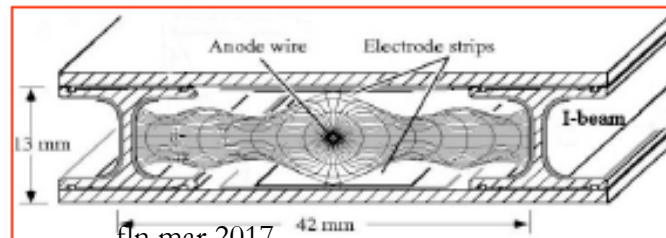
## CMS Muon Barrel Chambers

### ➤ Requirements:

- large area tracking device
  - angular resolution  $\leq 10$  mrad
- CMS muon barrel drift chambers:
- $3\text{m} \times 2.4\text{m} \approx 7\text{ m}^2$  active area
  - position resolution  $\approx 200\text{ }\mu\text{m}$
  - angular resolution (for  $p = 200\div 300\text{ GeV}/c$  muons):
    - $\approx 1$  mrad in PHI view (2 SuperLayers, with lever)
    - $\approx 10$  mrad in THETA view (1 SL, no lever)
  - at low momentum (90% cosmic-ray flux has  $p \leq 10\text{ GeV}/c$ ) resolution is worse because of multiple scattering on the materials of the chamber itself (about 40mm of Al).
  - self-triggered



at  $p_0 = 3\text{ GeV}/c$   
 $\sim 2.5$  mrad  
 $\sim 10$  mrad

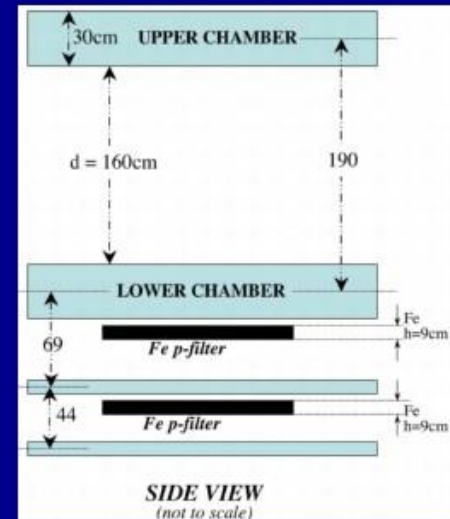


*Drift cell*

## EXPERIMENTAL SETUP

At the INFN National Laboratory of Legnaro (Padova, Italy) an apparatus for the study of muon radiography has been assembled using two spare Muon Chambers Detectors, produced for CMS (CERN experiment at LHC)

- Two Drift Chambers  $2.5 \times 3.0 \text{ m}^2$
- Gap between chambers: 160 cm (vol.  $\approx 11.5 \text{ m}^3$ )
- 2 extra SLs to measure  $p$ ;
- Fe p-filter
- Trigger: upper chamber (events “pointing” from upper to lower chamber)
- Acquisition rate: 350 Hz

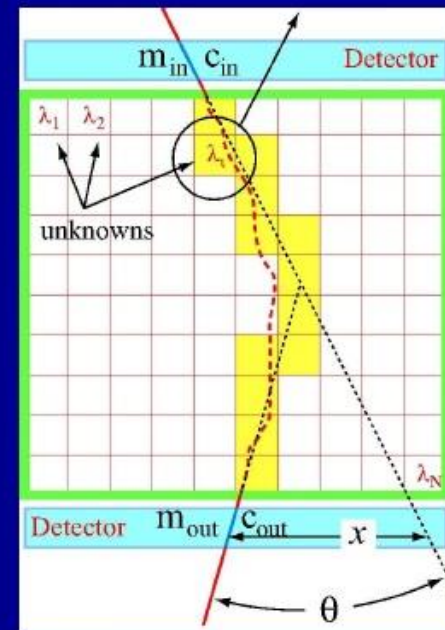
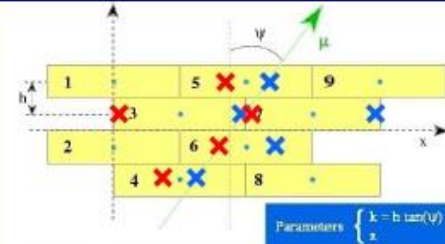




## DATA ANALYSIS

- **Pattern recognition software** identifies hits of the same track (selects the best straight line fits) and solves left right ambiguity inherent to any drift chamber;
- **Track reconstruction algorithm:** track trajectory is computed with a fit algorithm, position and slope of the track is calculated;
- **Event selection:**
  - > Single track in both views;
  - > 6-8 hits in phi SL, 4 hits in theta SL;**=> Good tracks after selections: 65% for each chamber**
- **Image reconstruction:** Rigorous data treatment requires a maximum likelihood approach together with iterative techniques similar to those applied in the advanced processing of medical imaging data (PET, SPECT). The results presented in this contribution are obtained using
  - a 3D projector-backprojector pair (proback) where only angular deviations are modeled.
  - a 3D tomographic reconstruction incorporating the angular deviation and the effects of lateral shift, called "x displacement".

(Ref. L.J. Schultz, IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, VOL. 16, NO. 8, AUGUST 2007)



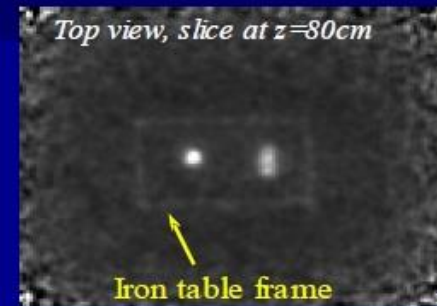
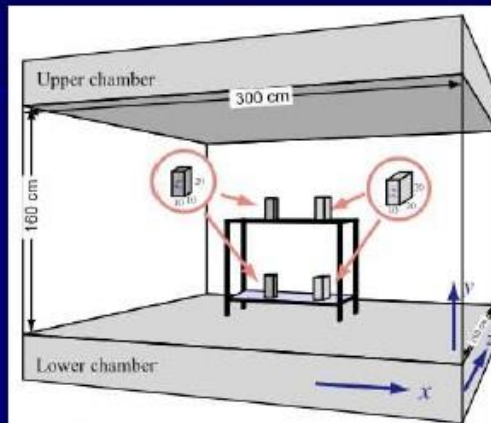


## IMAGING CAPABILITY OF THE SYSTEM

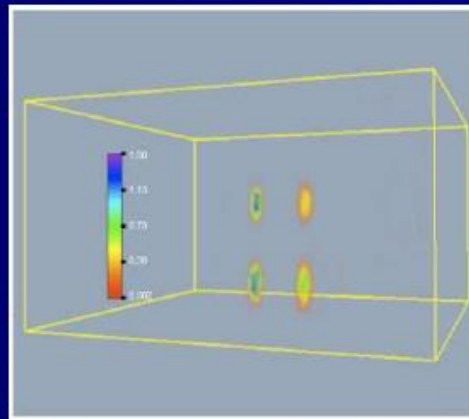
INFN made of Pb blocks



2 Pb bricks (left) + 2 Fe bricks (right) at different height



$T_{\text{acq}} \sim 8$  min with optimized detectors



- Position of the blocks reconstructed correctly
- Reconstructed scattering density for Pb larger than for Fe.
- Poor spatial resolution along the vertical direction (only the scattering angle ( $\Delta\Phi$ ) used!)

Results published in NIM A, 604 (2009) 738-746

# Altre tecniche: GEM, scintillatori, RPC

- Al posto delle DriftChambers di LANL e LNL, il gruppo del FloridaInstTech vuole utilizzare grandi Gas Electron Multipliers, con una geometria a priori notevolmente più compatta ed una migliore accettazione in generale ed in particolare alle estremità del volume osservato
- Il gruppo di Catania vuole utilizzare scintillatori plastici (3m x 1cm x 1cm, letti con fibre WLS e SiPM(\*)) per coprire una superficie di 6m x 3m con 8 piani di rivelatori (4 misure x-y): qui i piani devono essere distanziati (1m) quindi il rivelatore è potenzialmente meno compatto delle altre soluzioni

(\*) simile a MURAY/MURAVES

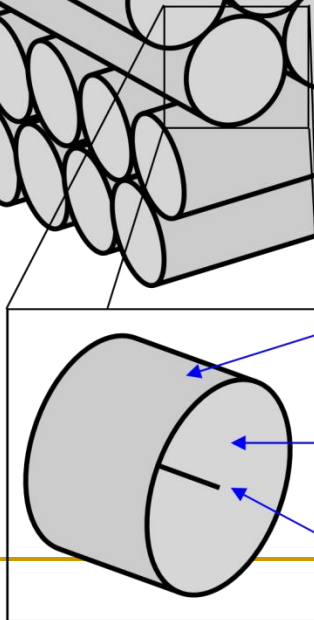
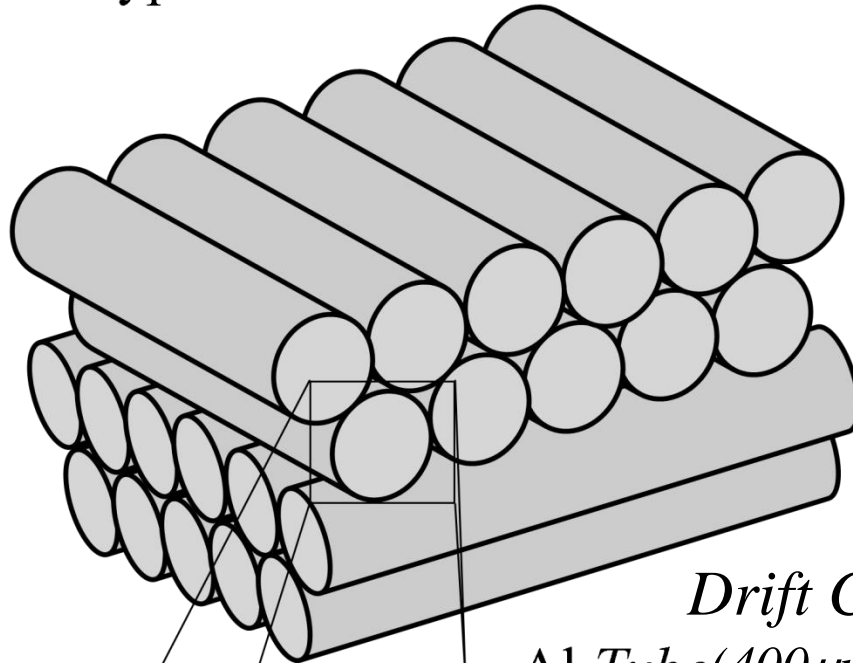
# Confronto fra le geometrie

*Drift Tube Detector*

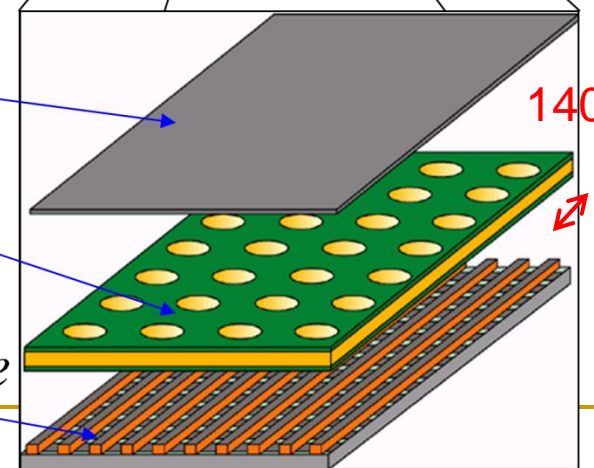
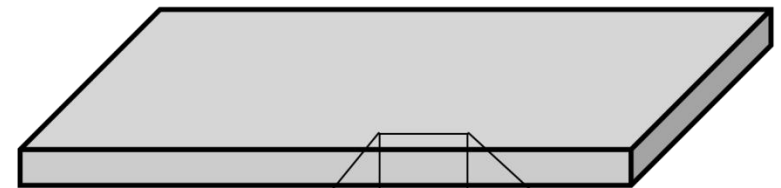
Typical Tube Diameter = 5cm

*GEM Detector*

Typical Thickness = 1cm

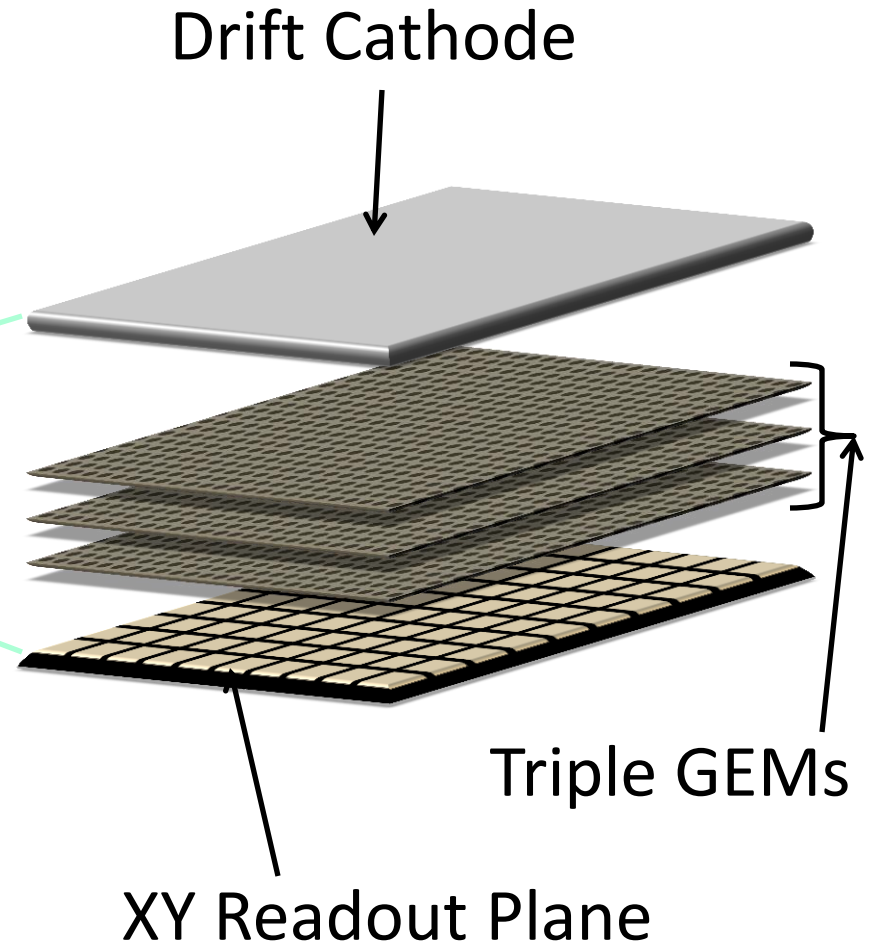
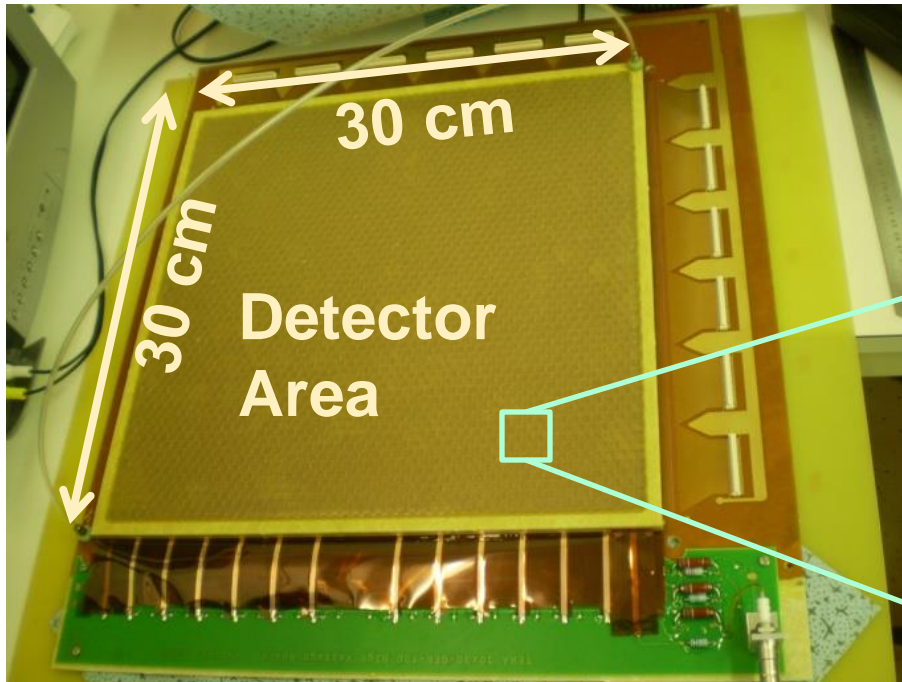


*Drift Cathode*  
*Al Tube (400 μm wall)*  
*3 GEM Foils*  
*Ar / CO<sub>2</sub>*  
*x-y Readout Plane*  
*Readout Wire*



140 μm

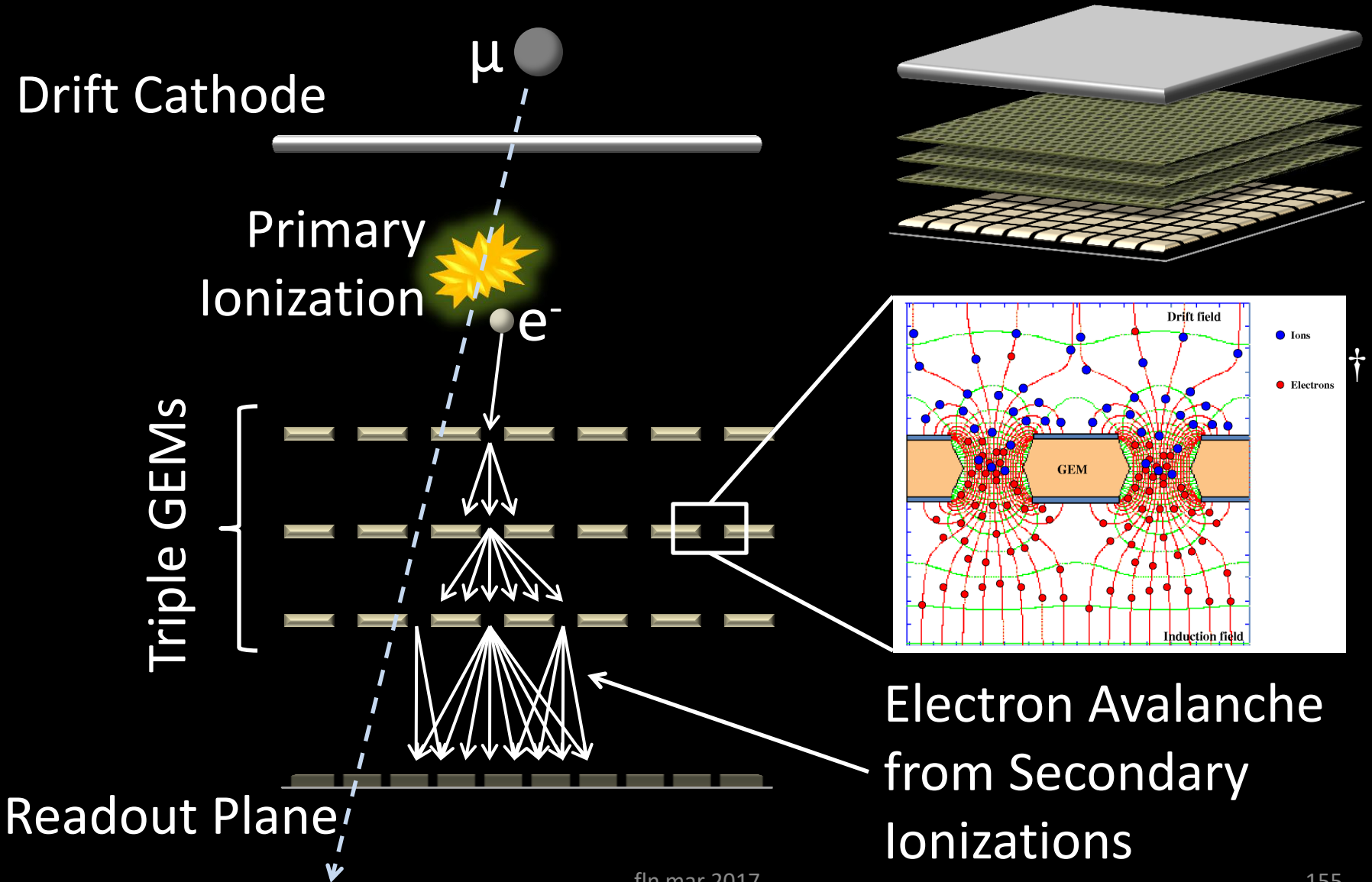
# Micropattern Gas Electron Multiplier (GEM) Detector



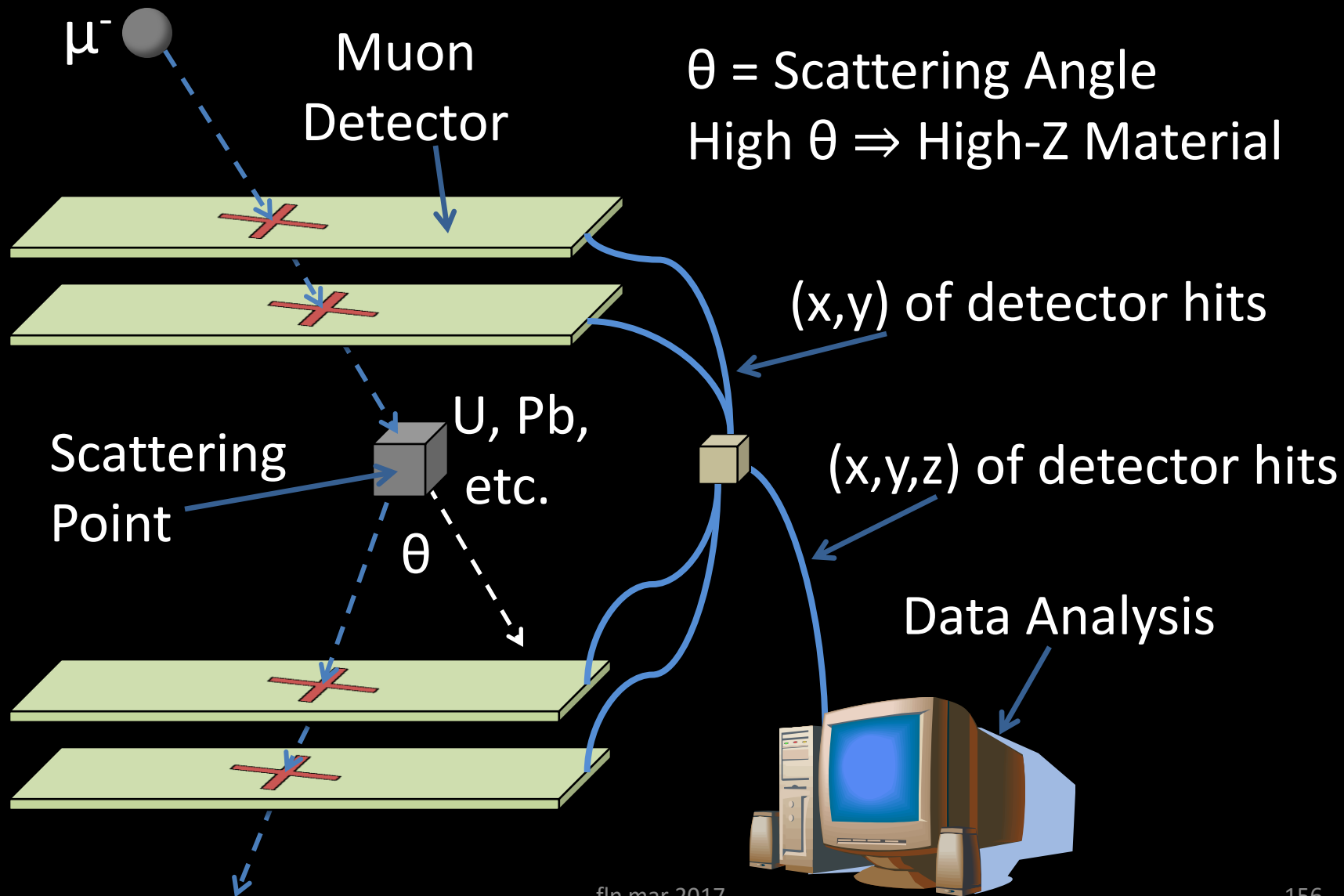
- Cost and space efficient.
- High resolution.



# GEM Detector Operation



# Muon Tomography Concept



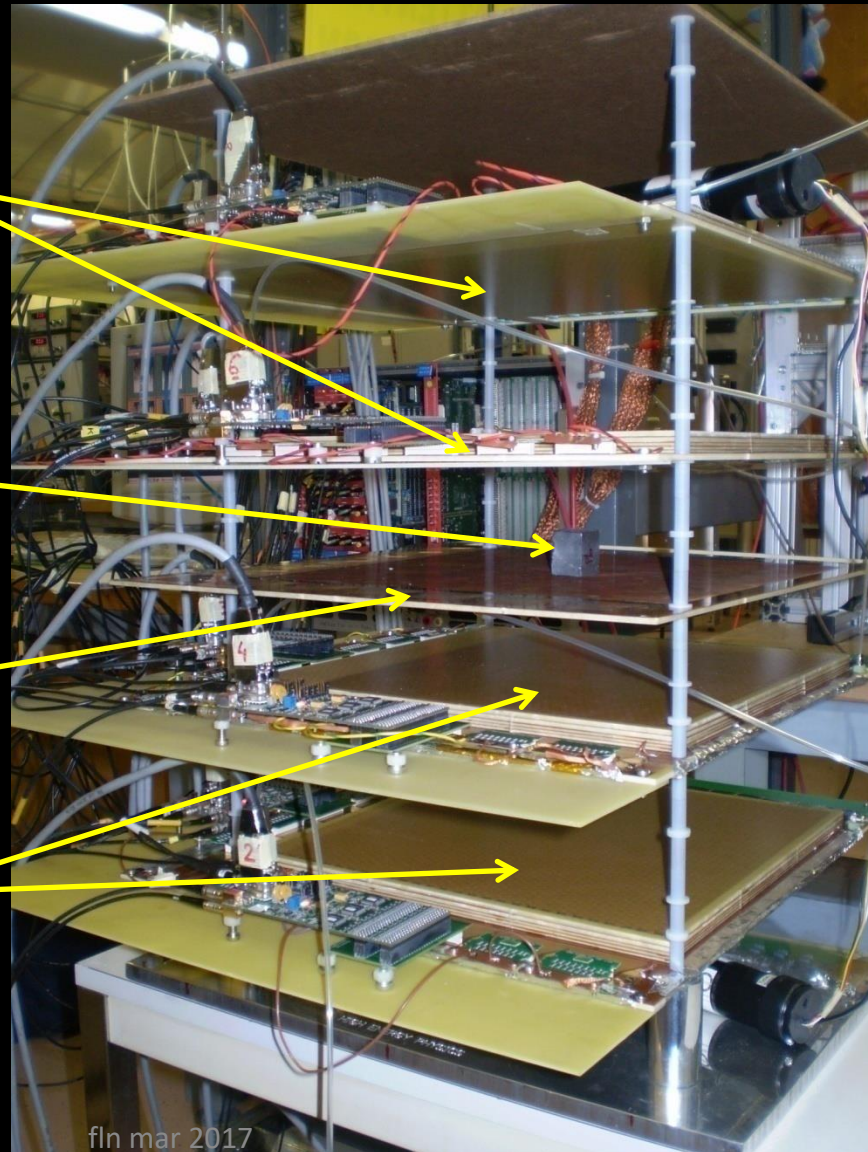
# Prototype Muon Tomography System

30x30 cm<sup>2</sup>  
GEM Detectors  
(Only 5x5 cm<sup>2</sup> Used)

3x3x2 cm<sup>3</sup>  
Pb Block

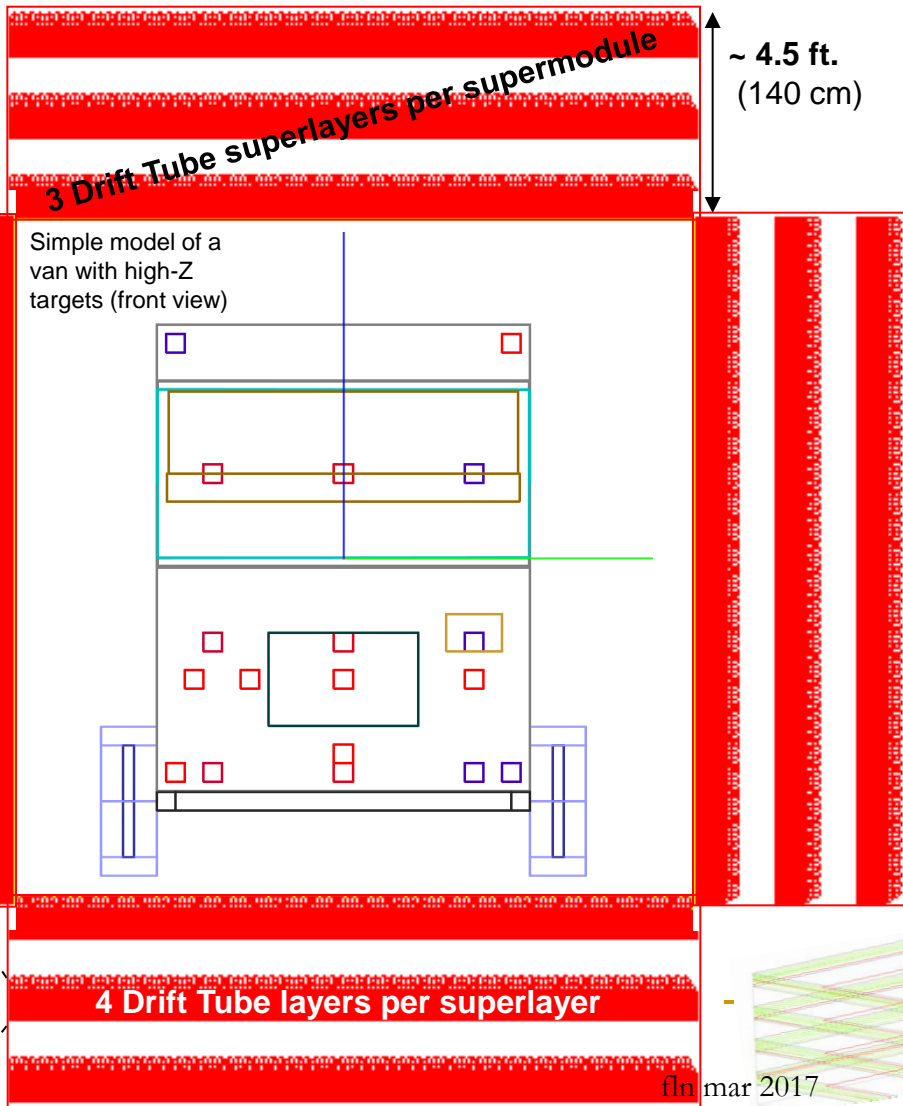
Target Support

GEM Detectors

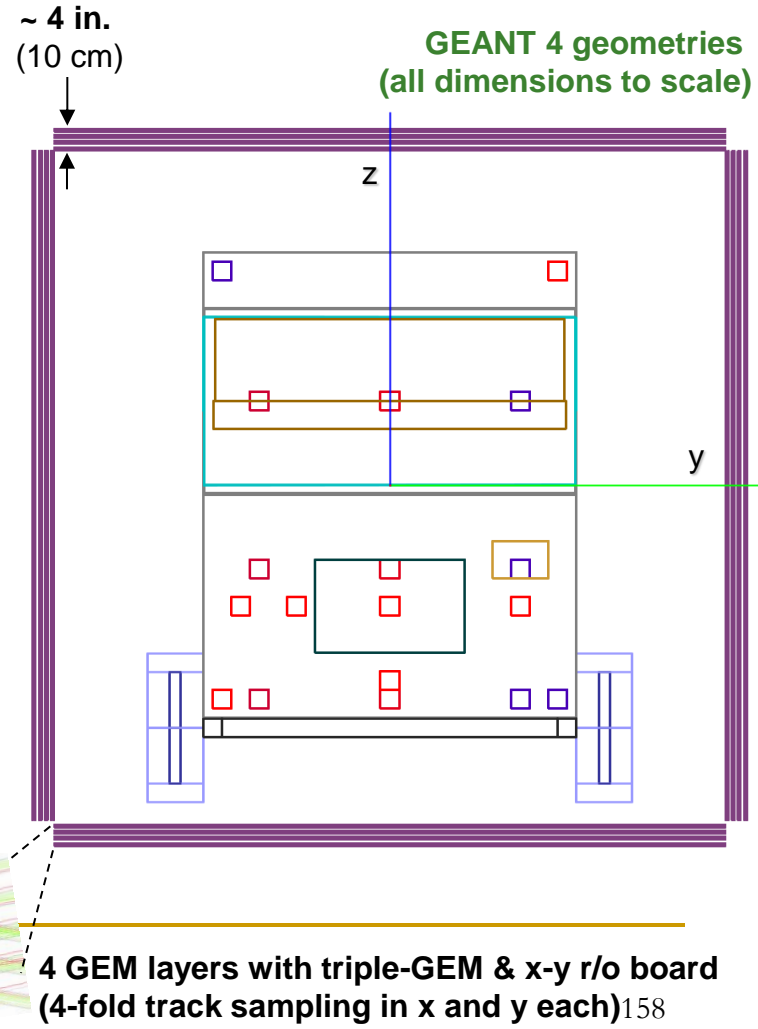


# Geometria delle stazioni di misura

## DS/LANL: Drift Tube Station



## FIT: Compact GEM station (same detector area as DTs)

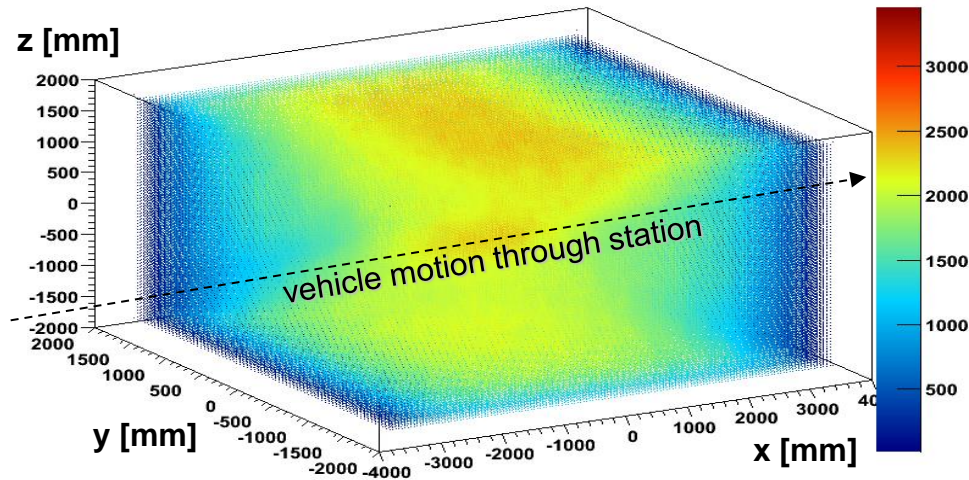




# Confronto delle accettanze

## DT station

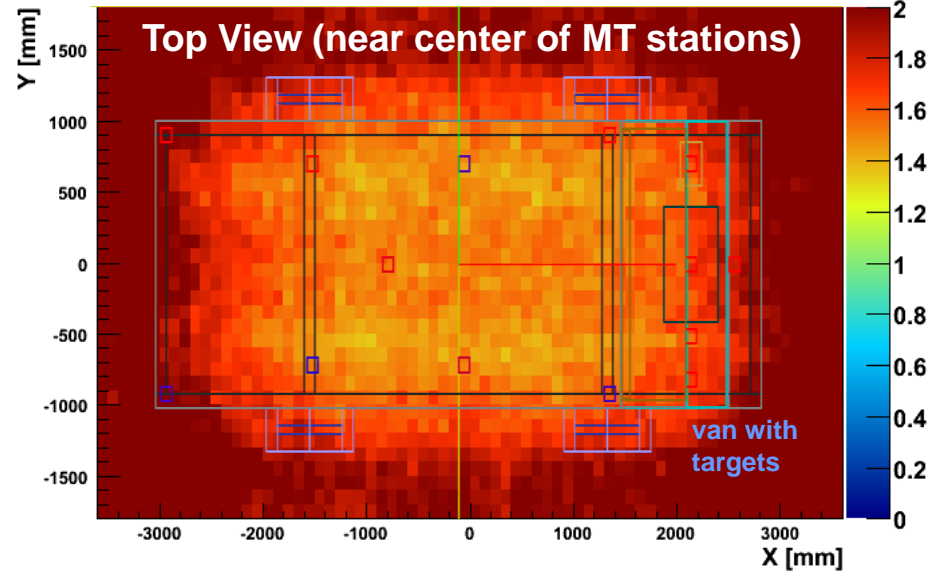
No. muons in 10cm×10cm×10cm voxel in 10min



GEM MT station provides  
50-100% better muon acceptance  
of the interrogated vehicle

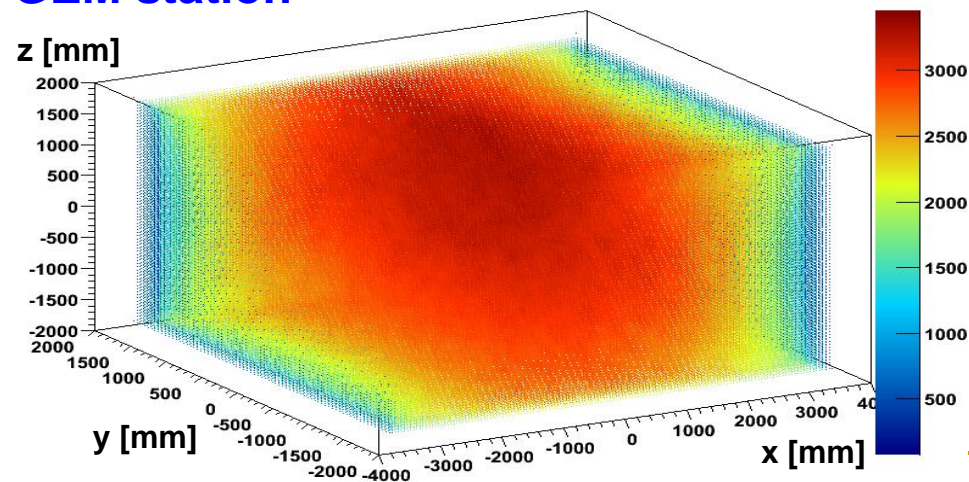
## Acceptance Ratio

$\frac{\text{GEM accept.}}{\text{DT accept.}}$



## GEM station

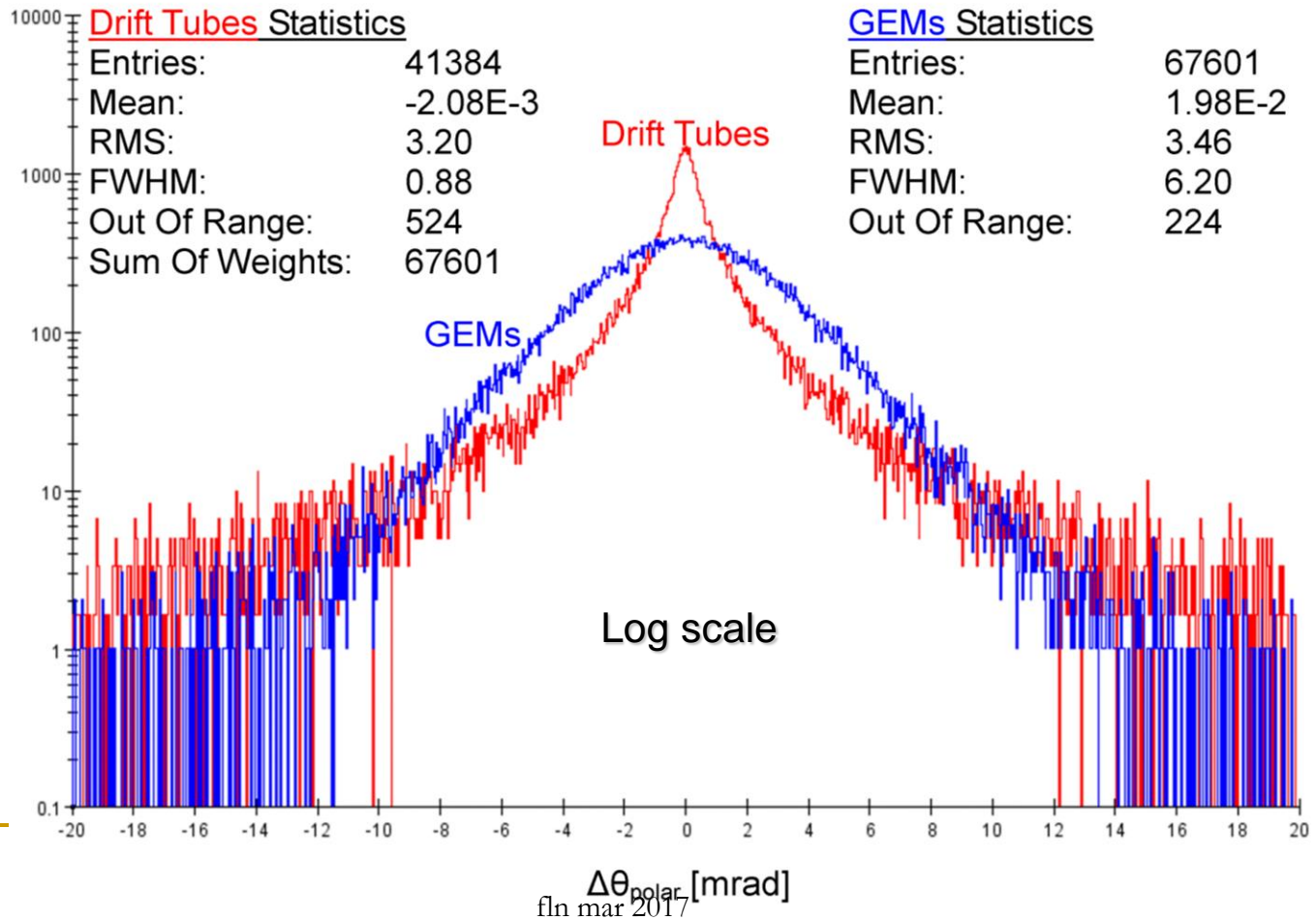
No. muons in 10cm×10cm×10cm voxel in 10min



- Require  $\geq 3$  hits in DT or GEM station to accept muon
- Reduced DT acceptance is mainly due to “holes” in solid angle coverage in the corners of the DT station

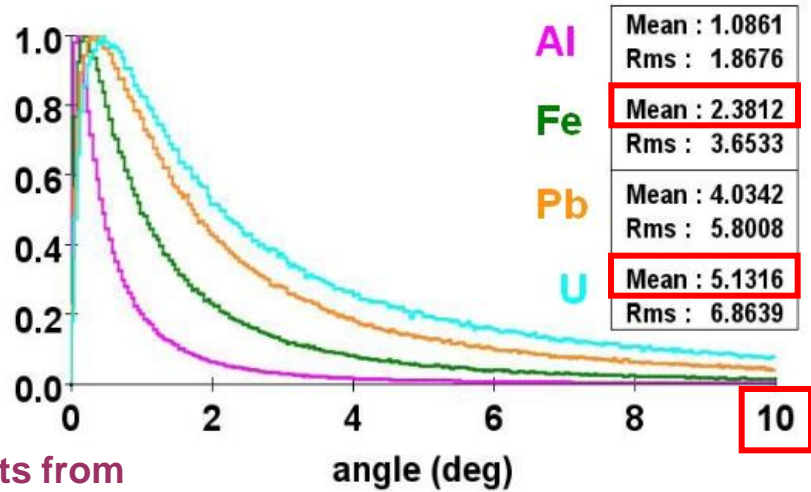
# Confronto fra le risoluzioni

quasi la stessa r.m.s.,  $\text{FWHM}_{\text{DT}} \ll \text{FWHM}_{\text{GEM}}$

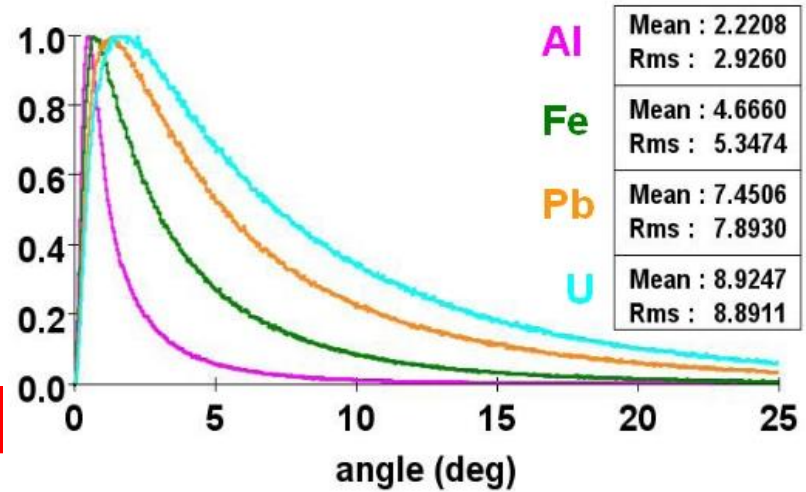


# Distribuzioni dell'angolo di scattering

perfect resolution

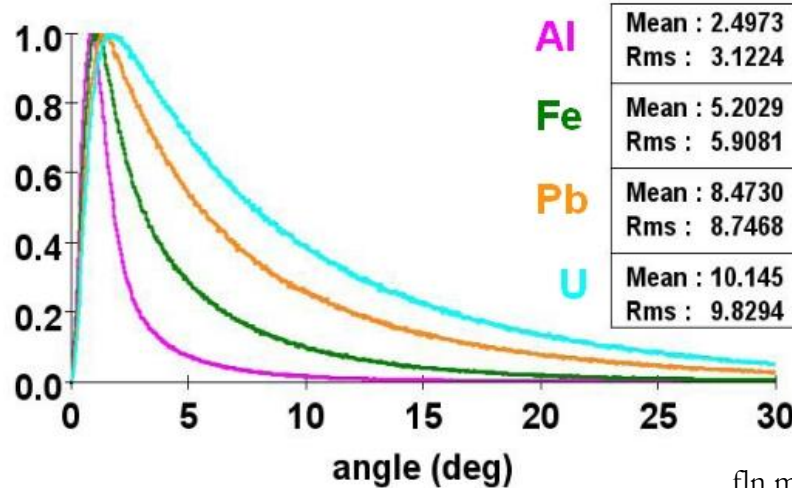


50 micron resolution

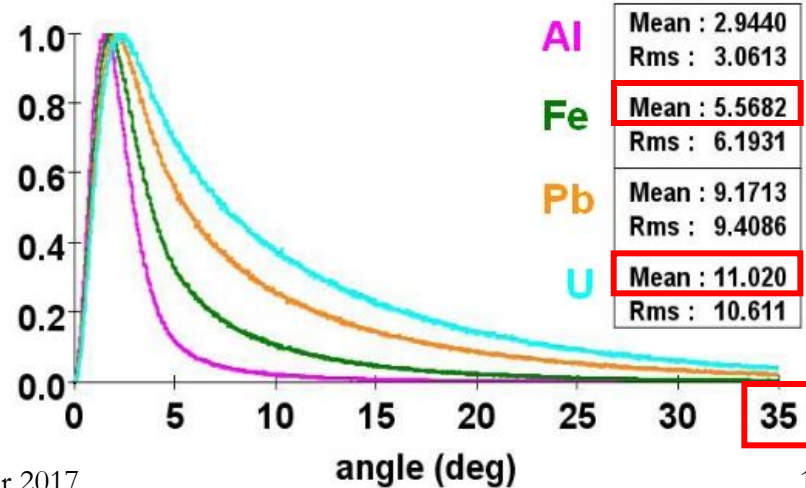


Results from  
high-statistics  
MC samples

100 micron resolution



200 micron resolution

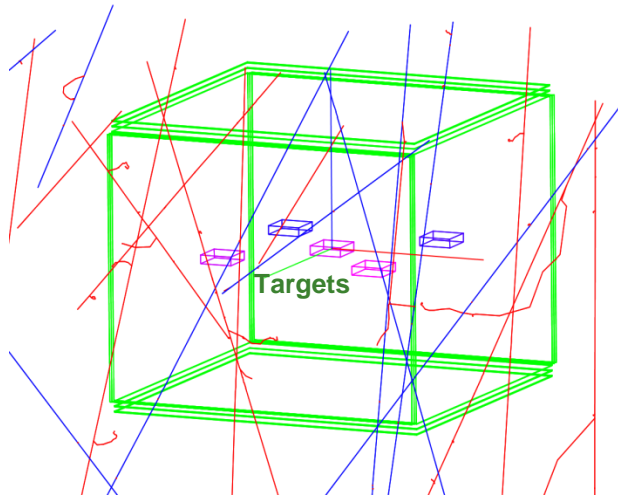




# Statistica semplice per separare Z: angoli medi di scattering

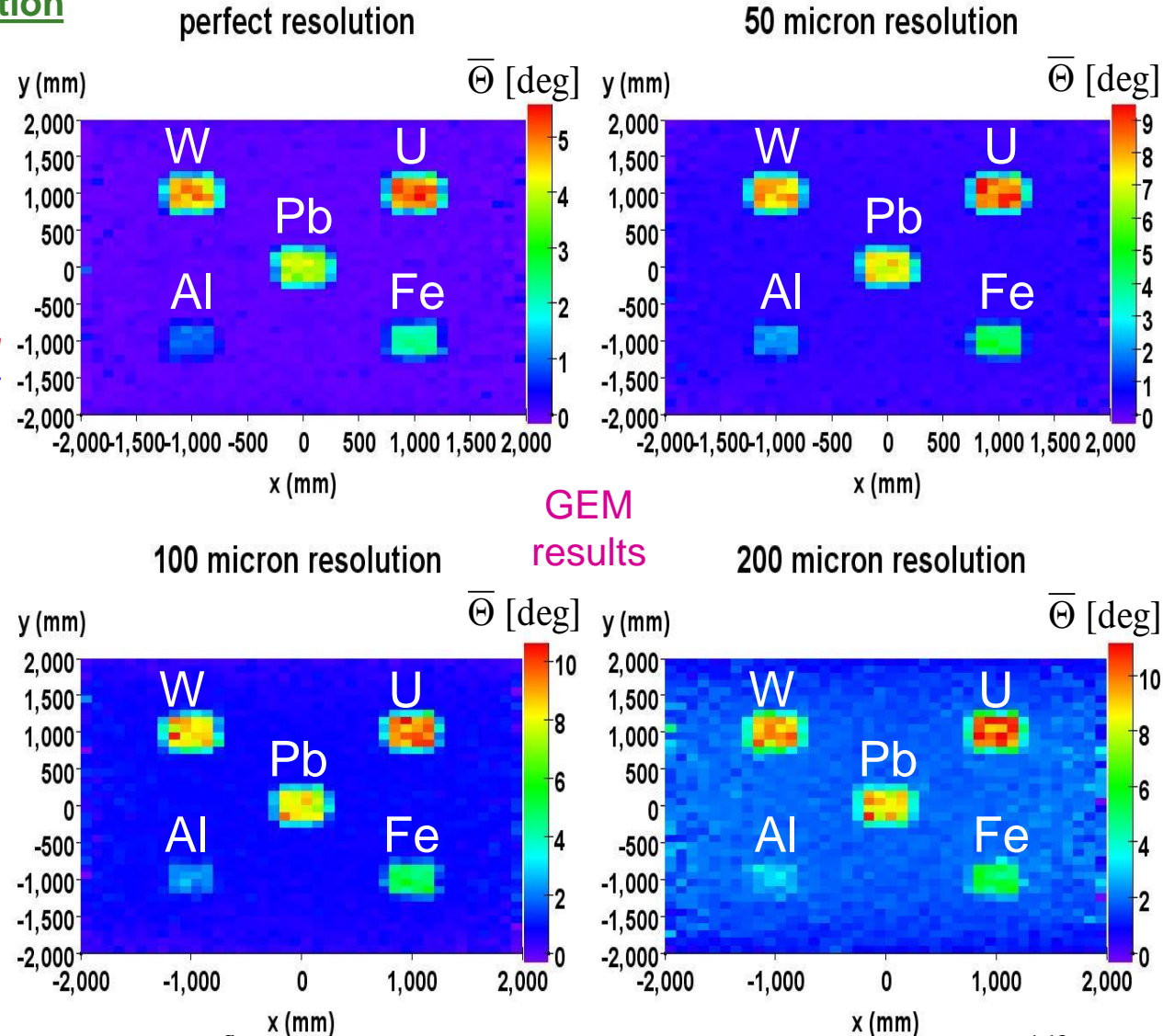
## Simple MC Scenario for GEM station

- Top, bottom & side detectors
- 40cm x 40cm x 10cm targets
- 5 materials (low-Z to high-Z)
- Divide volume into 1-liter voxels
- **10 min exposure**



## Results:

- Scattering angles 20-100 mrad;  
>> angular resolution (few mrad)
- Good Z discrimination
- Targets well imaged
- Detector resolution matters

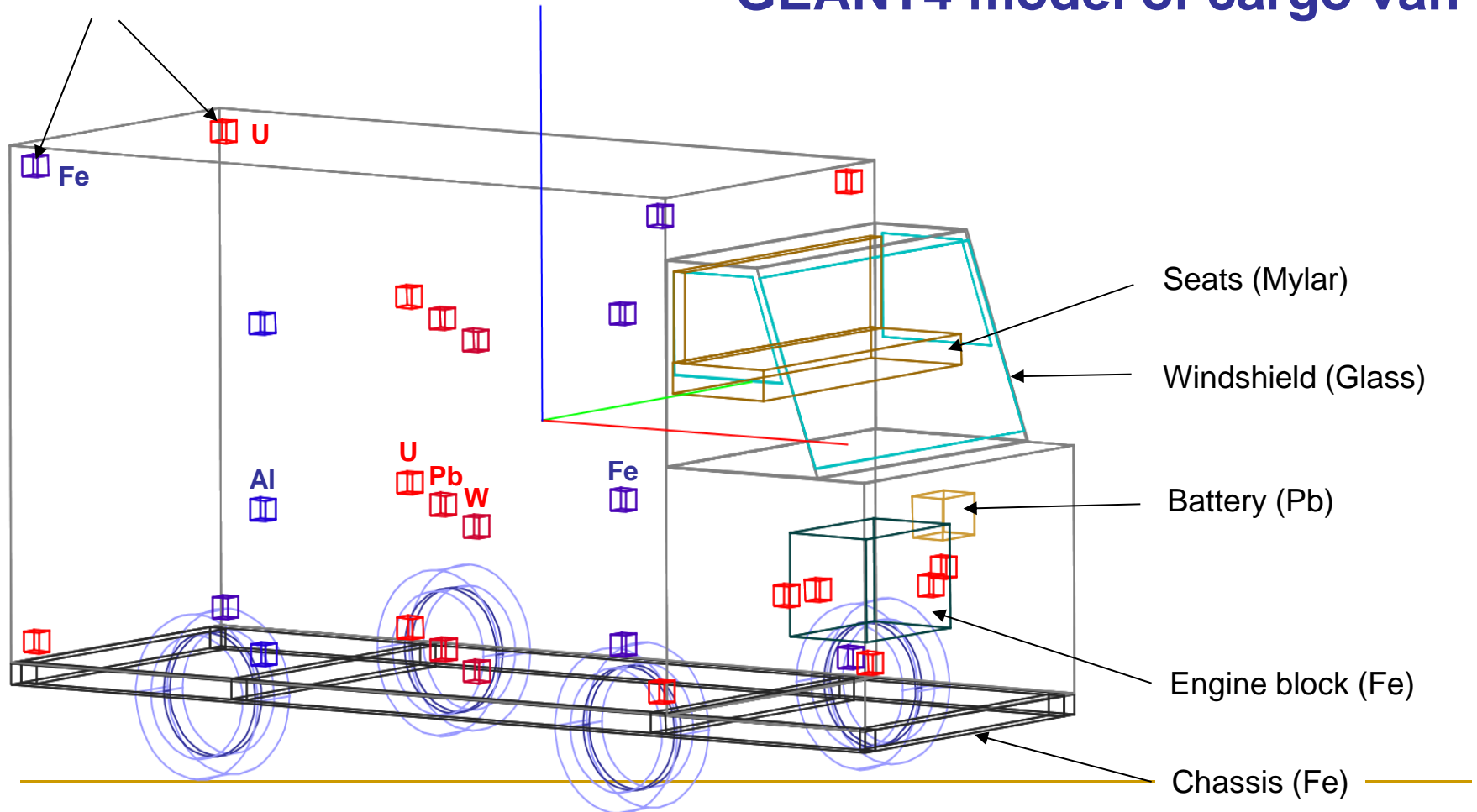




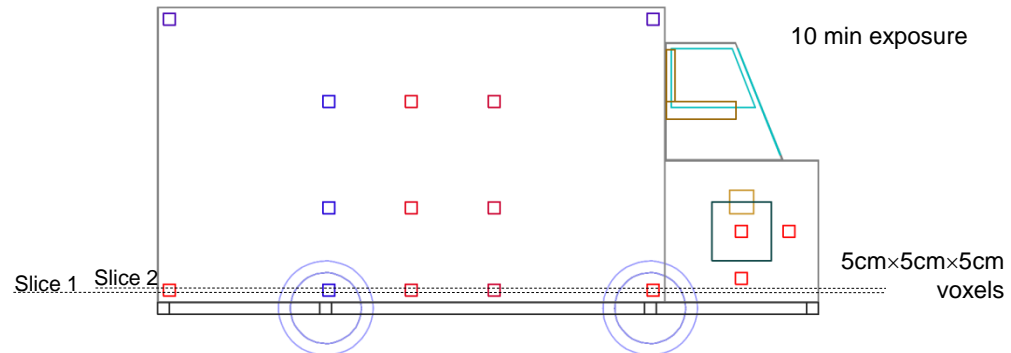
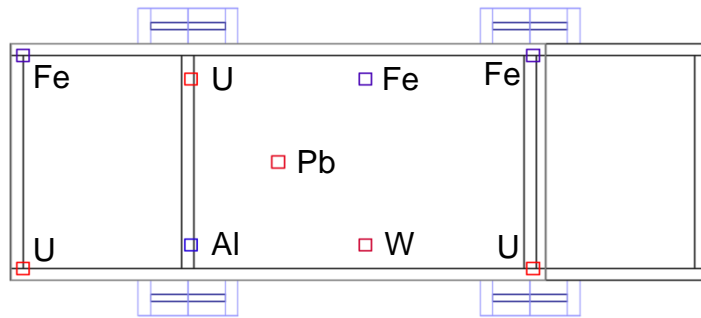
# Scenario avanzato: camion

Target cubes (1 liter)

## GEANT4 model of cargo van

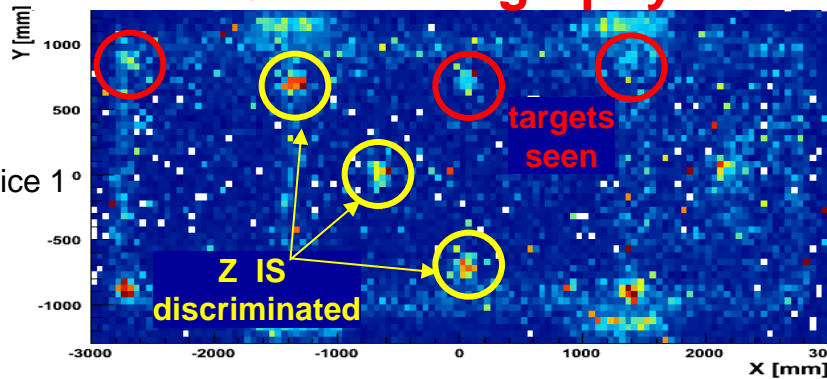


# Rivelazione dei blocchetti



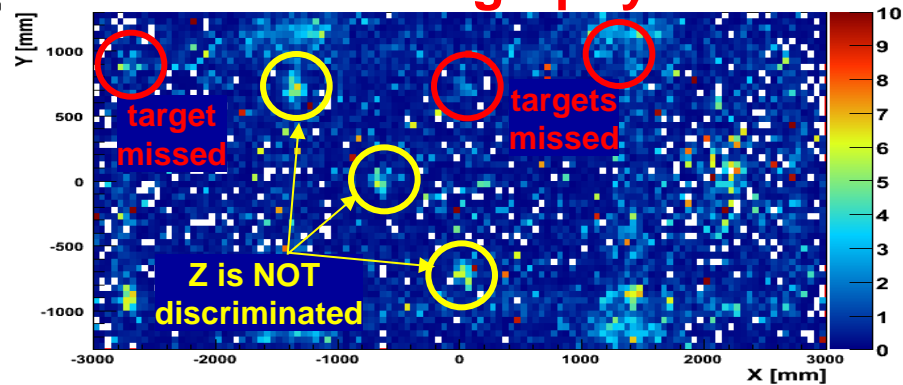
## GEM tomography

$\langle \theta_{\text{scatt}} \rangle [^\circ]$

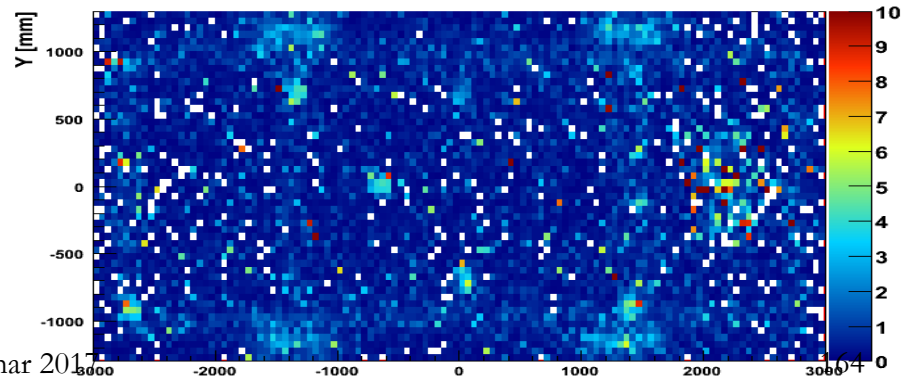
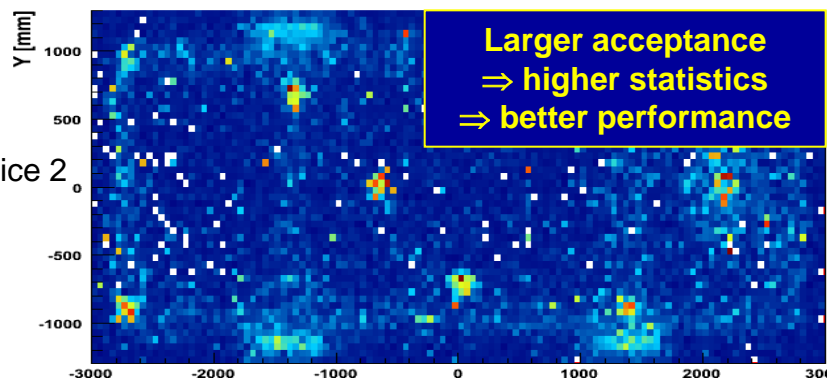


## DT tomography

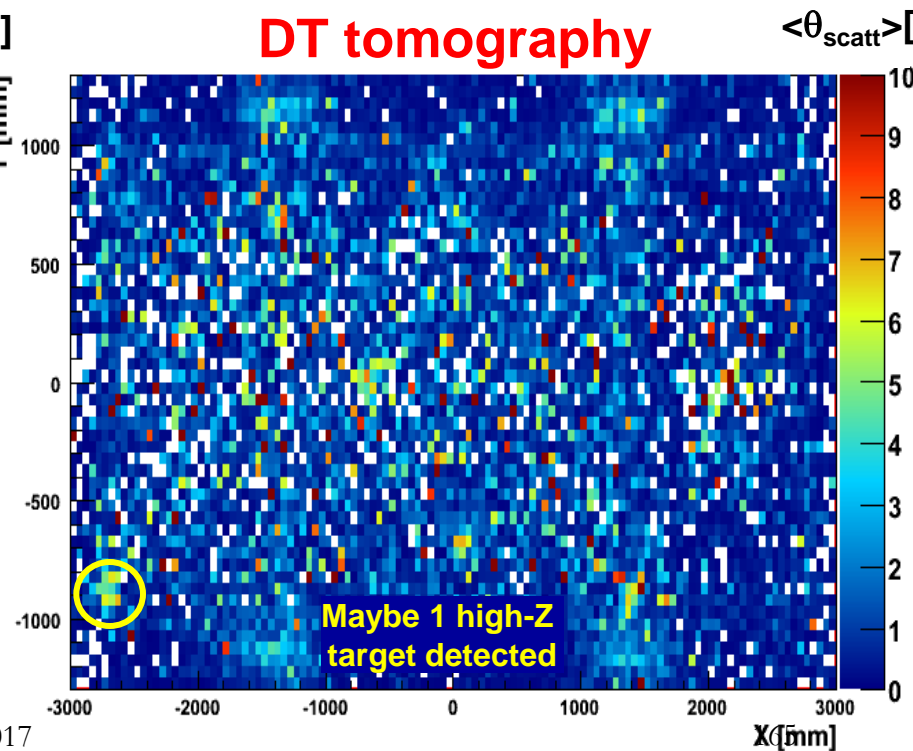
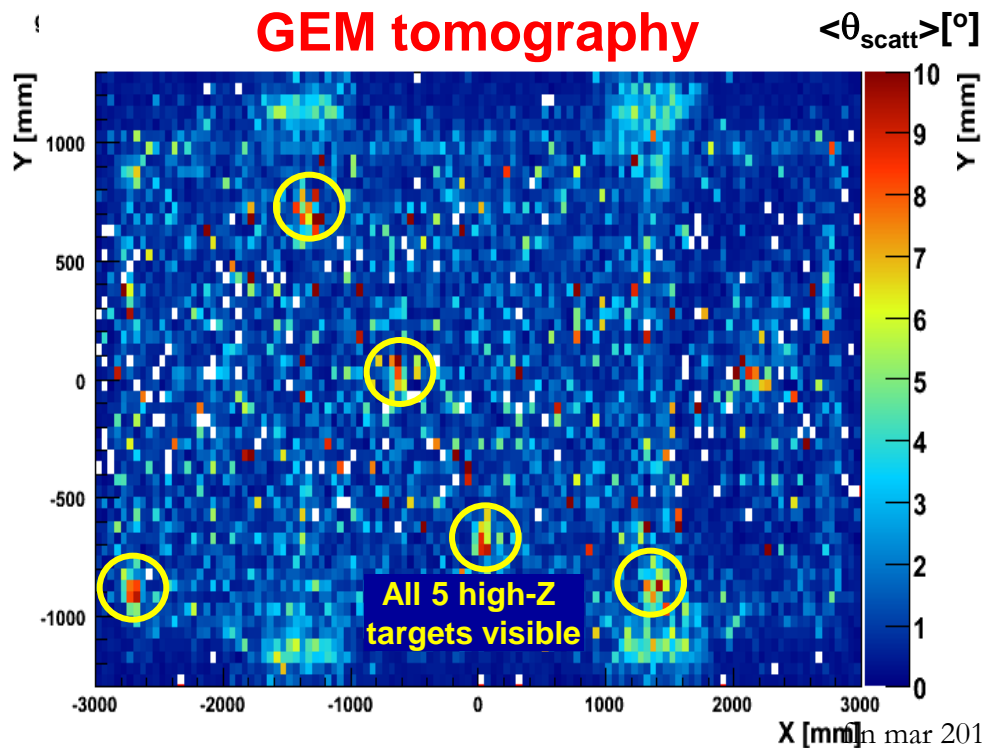
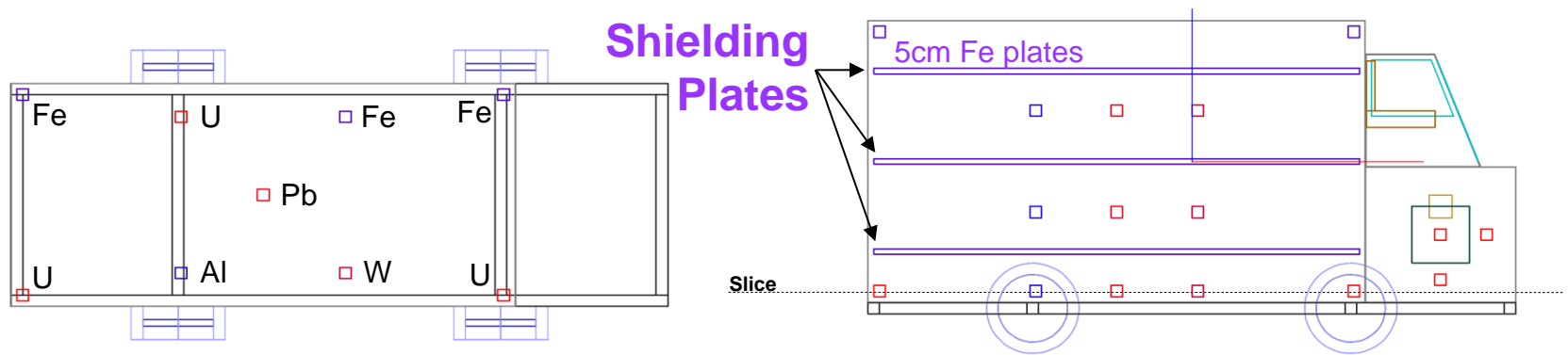
$\langle \theta_{\text{scatt}} \rangle [^\circ]$



Larger acceptance  
 $\Rightarrow$  higher statistics  
 $\Rightarrow$  better performance



# Risultati con schermatura aggiuntiva

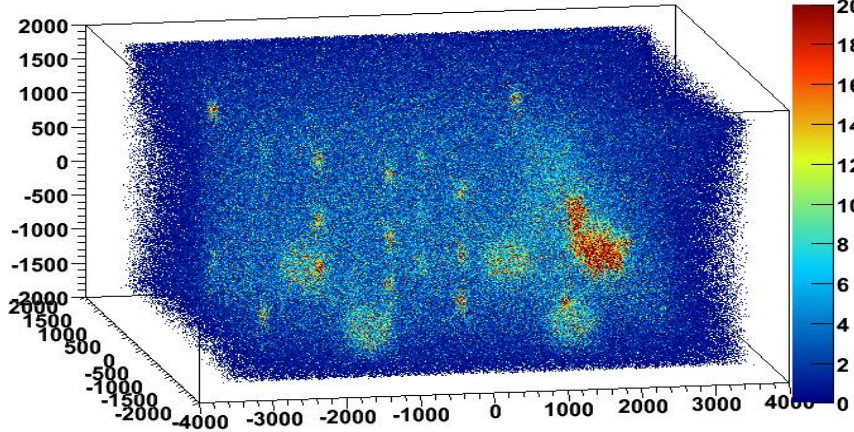


# Ricostruzione in 3D del camion

## Mean Angle (w/o momentum)

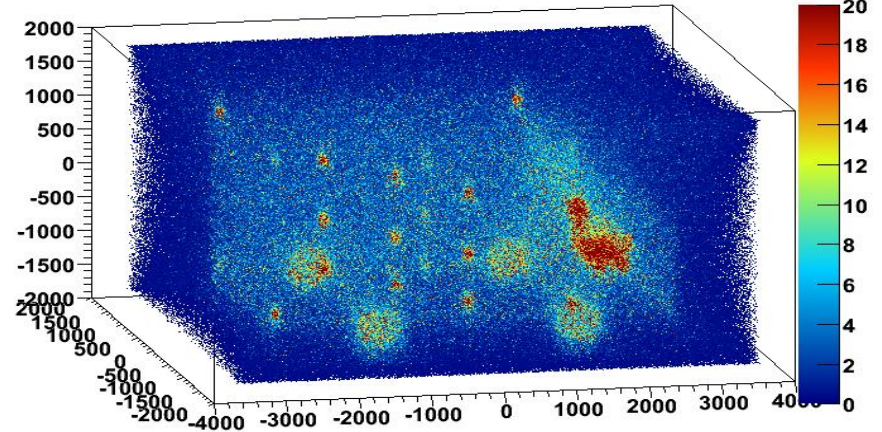
Drift Tubes

zpoça:ypoça:xpoça:vpoça



GEMs

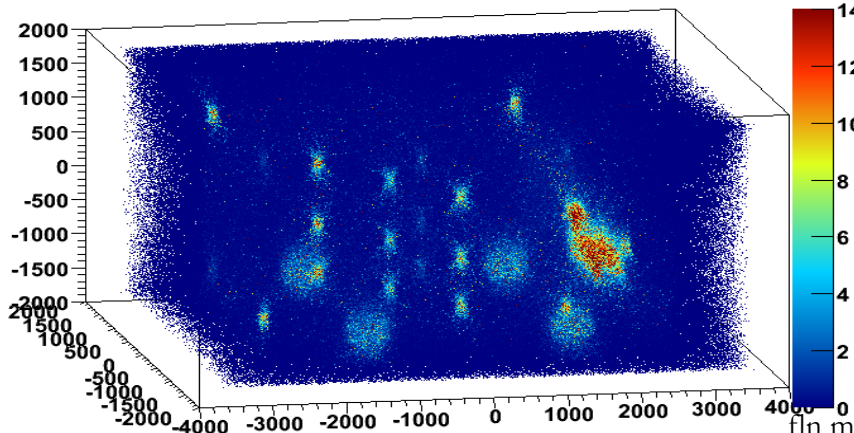
zpoça:ypoça:xpoça:vpoça



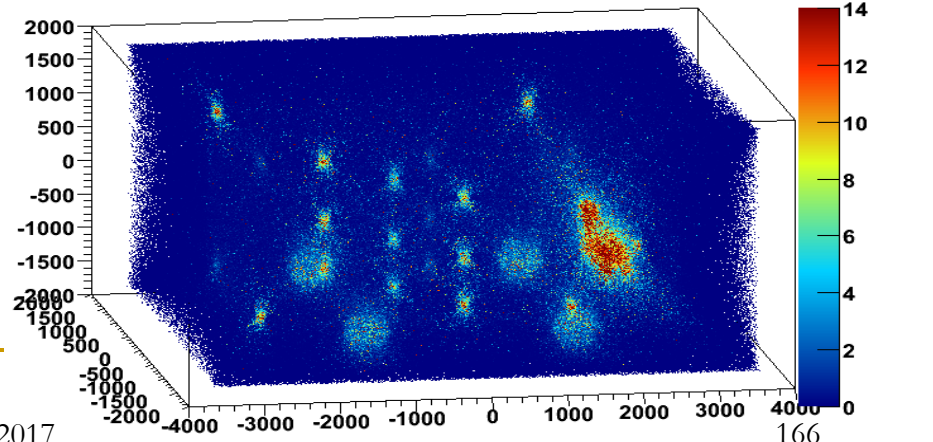
10 min. exposures

## Scattering Density (w/ momentum)

zpoça:ypoça:xpoça:vpoça



zpoça:ypoça:xpoça:vpoça





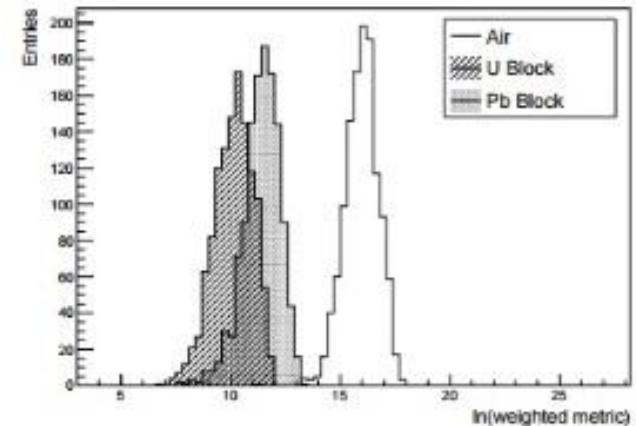
# Riconoscimento (senza immagine): binned clustering algorithm (C. Thomay et al. JINST 8 (2013) P10013)

- 6 piani di RPC [7x4 m<sup>2</sup>, distanti 65 cm,  $\Delta x,y < 500 \mu\text{m}$ ] (3x, 3y) sopra e sotto il volume da indagare(\*)
- ricostruzione in 2 passi, 3x-3y poi 6x-6y con vertice in comune (7-p:  $v_{x,y,z}$ , 4 angoli)
- MC, si assume  $p_{\text{vero}}$ , dopo ricostr. e tagli in  $\chi^2$ , in 1 min 100-150 kevt
- $p_{\text{norm}} = 1 \text{ GeV}/c$  [sotto(sopra)  $\theta$  pesato -(+)]
- $m_{ij} = \|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j\|$  distanza metrica dei vertici in un sottovolume (eg lato 25 cm, supponendo un oggetto 10x10x10 cm<sup>3</sup> da individuare)

(\*) hanno anche un piccolo prototipo 0.5x0.5 m<sup>2</sup>

## bca (cont.)

- $m_{ij}^* = m_{ij} / [(\theta_i p_{r,i})(\theta_j p_{r,j})]$  con  $p_r = p/p_{\text{norm}}$
- scenario con blocchi 10x10x10 cm<sup>3</sup>, 1 min, taglio sull'angolo di scattering, griglia multipla (per contenere sempre il blocco), n tracce = 50(\*), 10 s su PC
- L'algoritmo ritorna la più piccola mediana di tutti i sotto-volumi di tutte le griglie da usare come discriminante (soglia)



### Algorithm(*n* tracks)

For each sub-volume in each grid:

- Sort tracks by descending normalized scatter angle. Consider only the *n* highest-ranked tracks.
- For each combination of considered tracks:

- Calculate  $\bar{R}_v$ .
- Fill histogram with  $\ln(\bar{R}_v)$ .

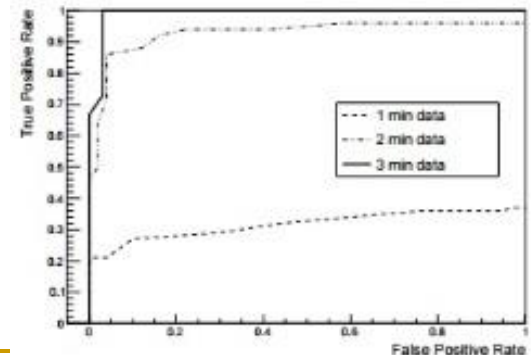
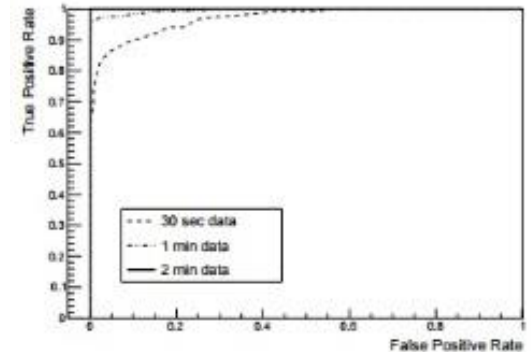
- Calculate median of distribution.
- If median is lowest so far, assign as temporary discriminator.

Output overall lowest median as final discriminator.

(\* ) le migliori *n*, si aspettano 50-70 tracce per voxel

# bca: ROC analysis

- grafici Receiver Operating Characteristics (ROC) sono usati per analizzare la qualità di un classific. – dati un classificatore (Y,N) ed un'istanza (p,n), ci sono 4 possibilità [pY, nY, pN, nN]
- W 9x9x9 cm<sup>3</sup> (dati con un prototipo)
- blocco U in Fe distribuito (simulaz.)
- scenari distribuiti e blocchi piccoli richiedono più tempo (sono più difficili da selezionare)



# PoCA: miglioramento della ricostruzione con p noto

$$\theta_{\text{scattering}} \propto \sim \mathbf{p}^{-1}$$

- Reconstruct **scattering density  $\lambda$**  of material:

$$\lambda = \frac{(\theta_{\text{scattering}})^2}{2L(1 + E_p^2)} \left( \frac{p}{p_0} \right)^2$$

$L$  = path length of muon within target (set to 1, a priori unknown)  
 $E_p$  = momentum error (set to 0 for now)  
 $p$  = momentum of cosmic ray muons  
 $p_0$  = average momentum of cosmic ray muons (3 GeV)

(with p known, one can weight more high momentum tracks)

- Use **average  $\lambda$  value** in  $i^{\text{th}}$  voxel as statistic:

$$\langle \lambda \rangle_i = \frac{\sum_j \lambda_{ij}}{N_i}$$

$\lambda_{ij}$  =  $\lambda$ -value for  $j^{\text{th}}$  muon scattered in  $i^{\text{th}}$  voxel (based on PoCA)  
 $N_i$  = number of muons scattered in  $i^{\text{th}}$  voxel

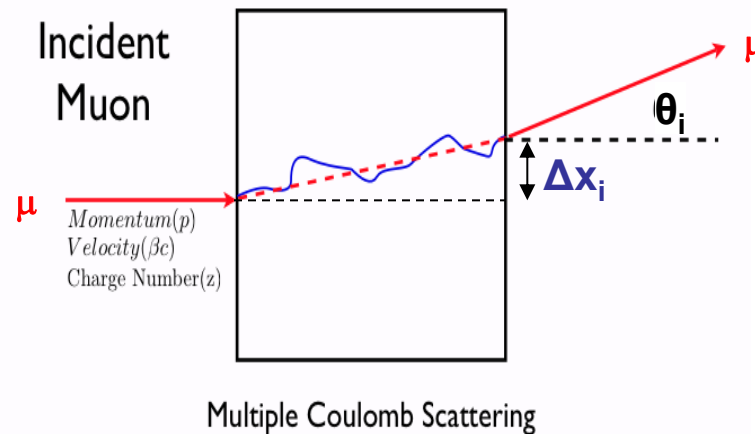
**Caveat:** As currently designed, no detector type (DT, GEM, Scint., RPC) actually provides a momentum measurement; this would require additional instrumentation



# Algoritmo avanzato di ricostruzione

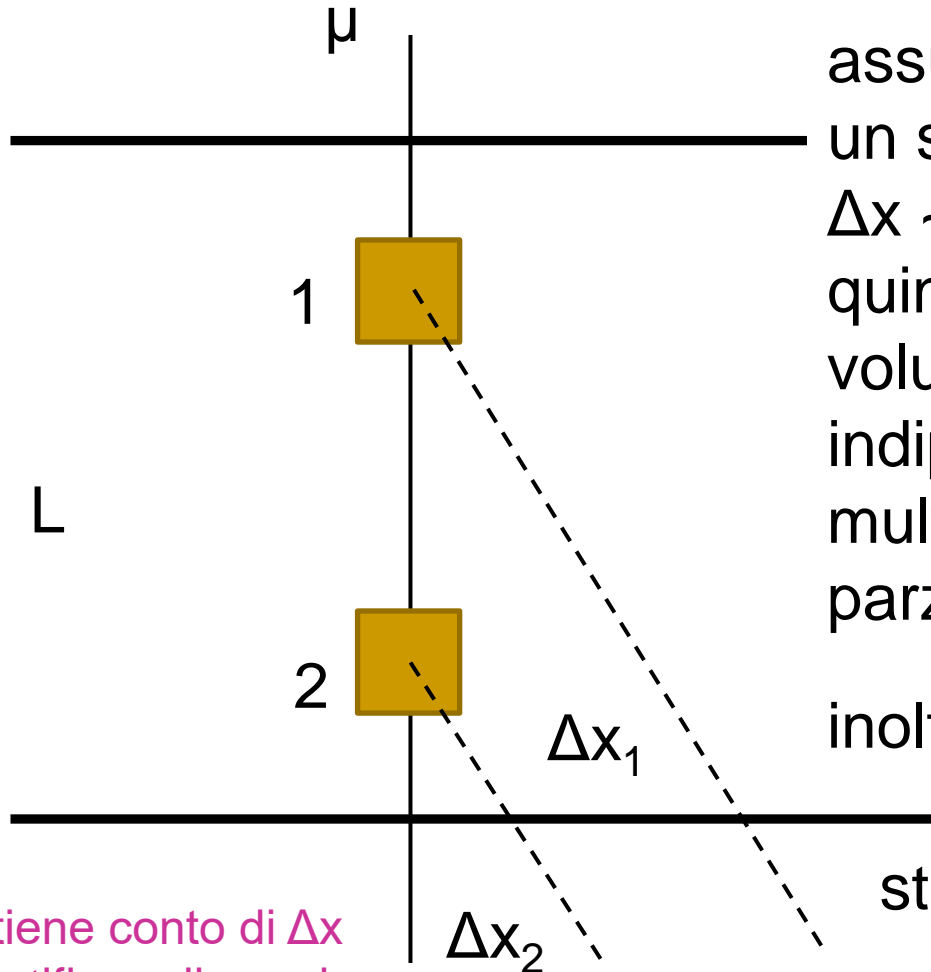
## Maximum Likelihood-EM Method:

- **Input:** Use lateral shift  $\Delta x_i$  in multiple scattering in addition to information from scattering angle  $\theta_i$  for each muon track



- **Procedure:**
  - Maximize log-likelihood for assignment of **scattering densities** to all voxels given all **observed** muon tracks
  - **Analytical derivation leads to iterative formula for incrementally updating  $\lambda_k$  values in each iteration**
- **Output:** Scattering density  $\lambda_i$  for each voxel of the probed volume

# Lo spostamento laterale (molto schematico)



assumendo rozzamente  
un singolo scattering si ha  
 $\Delta x \sim L-z$   
quindi da la profondità nel  
volume (non è del tutto  
indipendente da PoCA, nel  
mult.scatt.  $\theta_{sx}$  e  $\Delta x$  sono  
parz. correlati (0.866))

inoltre c'è  $\Delta y \sim L-z$  (e  $\theta_{sy}$ )

stesso  $\theta_{sx}$

PoCA tiene conto di  $\Delta x$   
per identificare il voxel,  
ma non lo può usare per  
la scattering strength

# Scattering attraverso uno spessore(\*)

Modello fisico usa  $\theta_x$ ,  $\Delta x$  (da adattare ai dati raccolti  $\rightarrow$  Fit)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta &\approx \frac{15}{p} \sqrt{\frac{L}{X_0}} \\ \lambda(X_0) &= \left(\frac{15}{p_0}\right)^2 \frac{1}{X_0} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \sigma_\theta^2 &= \lambda L p_r^2 \\ \sigma_{\Delta x}^2 &= \frac{L^2}{3} \sigma_\theta^2 = \frac{L^3}{3} \lambda p_r^2 \\ \sigma_{\theta \Delta x} &= \frac{L}{2} \sigma_\theta^2 = \frac{L^2}{2} \lambda p_r^2 \end{aligned} \quad p_r = p_0/p$$

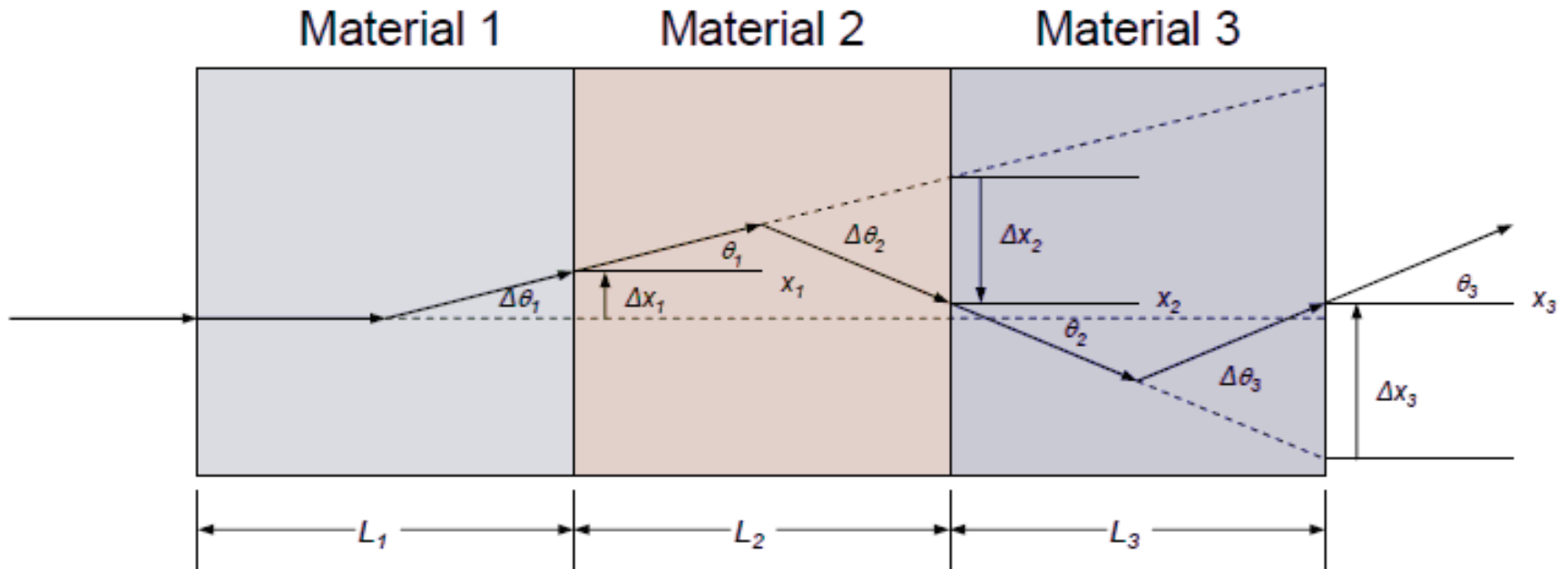
Matrice di covarianza (Gaussiana bidimensionale), il coefficiente di correlazione fra  $\theta$  e  $\Delta x$  è  $\sqrt{3}/2$

$$\Sigma = \lambda \begin{bmatrix} L & \frac{L^2}{2} \\ \frac{L^2}{2} & \frac{L^3}{3} \end{bmatrix} p_r^2 = \lambda A p_r^2$$

Analogamente per  $\theta_y$ ,  $\Delta y$ .  
Le distribuzioni nelle due coordinate spaziali sono identiche e scorrelate

(\*) ometto per sempl. variazioni di L (angolo d'ingresso) ed errori ( $\Sigma = E + \lambda A p_r^2$ ) 3

# Scattering multiplo attraverso strati successivi



assume  $\Delta x_i \ll L_i$

$$x_3 = x_2 + L_3 \cdot \tan(\theta_2) + \Delta x_3 \quad \theta_3 = \theta_2 + \Delta \theta_3$$

$$x_2 = x_1 + L_2 \cdot \tan(\theta_1) + \Delta x_2 \quad \theta_2 = \theta_1 + \Delta \theta_2$$

$$x_1 = \Delta x_1 \quad \theta_1 = \Delta \theta_1$$

$$\theta_3 = \Delta \theta_1 + \Delta \theta_2 + \Delta \theta_3$$

$$x_3 = \Delta x_1 + L_2 \cdot \tan(\theta_1) + \Delta x_2 + L_3 \cdot \tan(\theta_2) + \Delta x_3$$

$$x_3 = \Delta x_1 + L_2 \cdot \tan(\Delta \theta_1) + \Delta x_2 + L_3 \cdot \tan(\Delta \theta_1 + \Delta \theta_2) + \Delta x_3$$

assume small angles

$$x_3 = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta \theta_1(L_2 + L_3) + \Delta \theta_2(L_3)$$

**NB**  $\Delta \theta_j$  e  $\Delta x_j$  non sono osservabili, sono i dati nascosti ( $H_{ij}$ ), usati in seguito nell'algoritmo EM

Nell'es. l'angolo finale è non nullo, mentre lo spostamento è quasi 0, PoCA darebbe un risultato vicino alla fine del 3o strato



# Dopo N strati

$$\Delta\theta = \sum_{j=1}^N \Delta\theta_j$$

$$\Delta x = \sum_{j=1}^N (\Delta x_j + T_j \Delta\theta_j) \quad (*) T_j = \sum_{k=j+1}^N L_k; j < N; T_N = 0$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N L_j \lambda_j & \sum_{j=1}^N \left( \frac{L_j^2}{2} + L_j T_j \right) \lambda_j \\ \sum_{j=1}^N \left( \frac{L_j^2}{2} + L_j T_j \right) \lambda_j & \sum_{j=1}^N \left( \frac{L_j^3}{3} + L_j^2 T_j + L_j T_j^2 \right) \lambda_j \end{bmatrix} p_r^2 = \sum_{j=1}^N \begin{bmatrix} W_{1j} & W_{2j} \\ W_{2j} & W_{3j} \end{bmatrix} \lambda_j p_r^2$$

- la forma rimane la stessa se gli strati diventano pixel, solo che  $j$  è l'indice dei pixel e  $T_j$  sono calcolati secondo la (\*), come somma dei pixel a valle del pixel  $j$ , secondo la traiettoria del  $\mu$ ; inoltre ci sarà un indice per l' $i$ -esimo  $\mu$ , che ho soppresso,  $i = 1, M$
- $L_{(i)j}$  è il percorso 3D di  $\mu_i$  nel pixel  $j$  (=0 se il  $\mu$  non ci passa)

# Likelihood

- si misura  $\theta_{in}$  e  $\theta_{out}$ ,  $x_{in}$  e  $x_{out}$  per ciascun  $\mu$  ( $x_{proj}$  è la proiezione del raggio incidente in uscita)

- $\Delta\theta_i = \theta_{out,i} - \theta_{in,i}$

- $\Delta x_i = (x_{out,i} - x_{proj,i}) / \cos[(\theta_{in} + \theta_{out})/2]$

- vettore dei dati per l'i-esimo  $\mu$

- probabilità di avere  $\mathbf{d}_i$  data  $\Sigma_i$  (ossia i  $\lambda_j$ )

$$\mathbf{d}_i = \begin{bmatrix} \Delta\theta_i \\ \Delta x_i \end{bmatrix}$$

$$P(\mathbf{d}_i | \Sigma_i) = \frac{1}{2\pi |\Sigma_i|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{d}_i^T \Sigma_i^{-1} \mathbf{d}_i\right)$$

$$P(\mathbf{d}, \lambda) = \prod_{i=1, M} P(\mathbf{d}_i | \Sigma_i)$$

- si tratta di trovare una stima per i  $\lambda_j$  che massimizza la likelihood o il suo logaritmo

# Likelihood $\rightarrow$ ME

- La funzione costo,  $\sim -\log(\text{likelihood})$ , da minimizzare è

$$F(\hat{\lambda}) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [\log |\hat{\Sigma}_i| + d_i^T \hat{\Sigma}_i^{-1} d_i]$$

La soluzione non può essere ottenuta in forma chiusa, si possono utilizzare metodi iterativi, e.g. Newton-Raphson, sviluppo in serie di Taylor, ma ci vogliono le derivate prime e seconde.

- Expectation Maximization: si introduce una funzione  $Q(\lambda, \lambda^{(n)})$  che denota l'aspettazione condizionata della log likelihood completa, dei dati sia osservati che nascosti,  $d_i$  e  $H_{ij}$ , fissati i valori dei dati osservati, usando il fit corrente per i parametri.

# EM

- In effetti basta quella dei dati nascosti (i  $d_i$  sono funzione univoca degli  $H_{ij}$ )

$$Q(\lambda; \lambda^{(n)}) = E_{H|d, \lambda^{(n)}} [P(H | \lambda)]$$

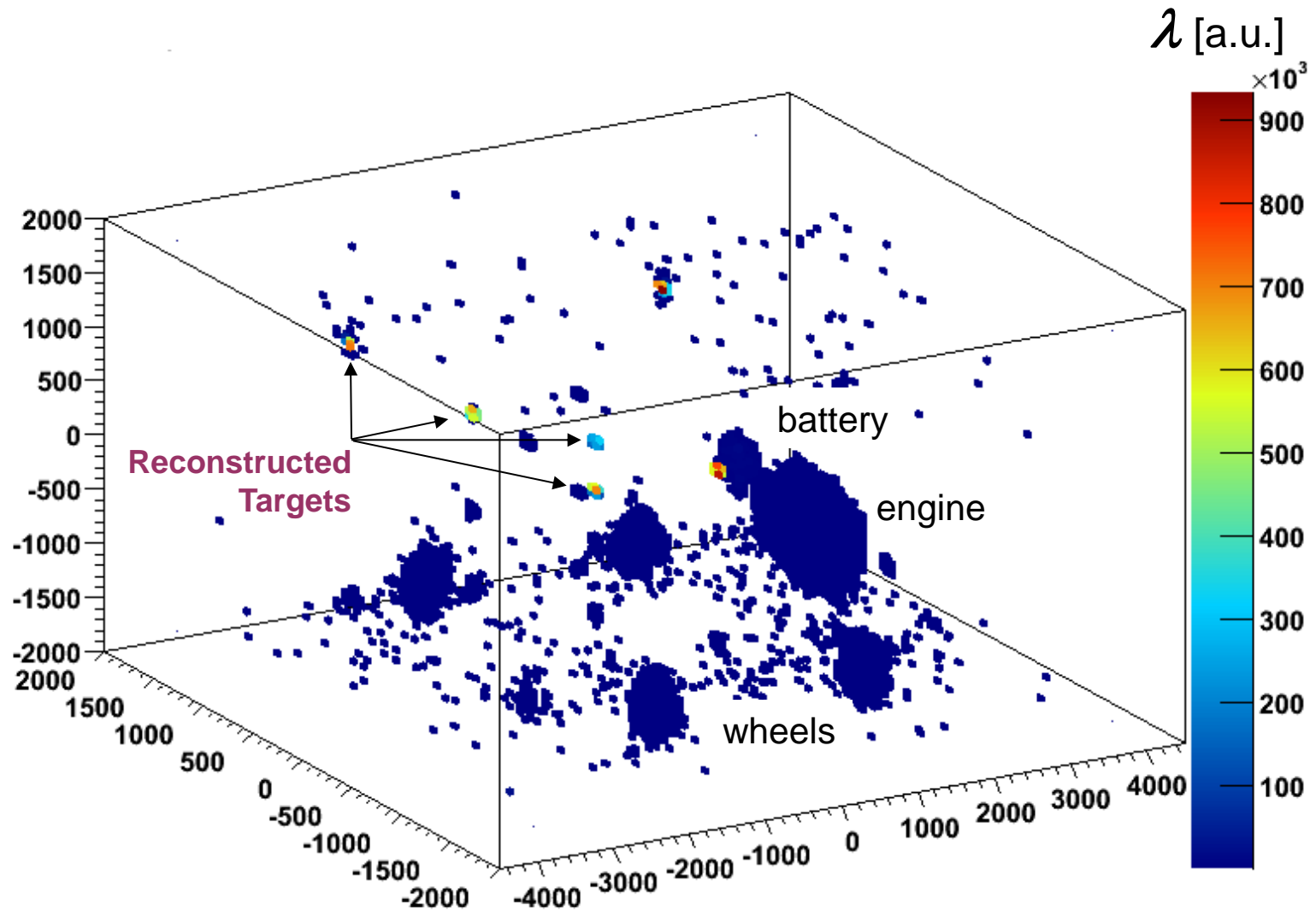
- E-step: stima della distribuzione condizionale dei dati nascosti (il modello statistico è lo stesso del singolo strato)
- M-step: massimizzazione della Q; uguagliando a 0 le derivate rispetto a  $\lambda_j$ , dopo numerosi passaggi, si ottiene una formula iterativa per  $\lambda_j$  (si usa la mediana perché m.s. è gaussiano solo al 98%)

$$\lambda_j^{n+1} = \lambda_j^n + (\lambda_j^n)^2 \text{Mediana} \left( \sum_{i: L_{ij} \neq 0} C_{ij}^n \right)$$

$$C_{ij} = [d_i^T \Sigma_i^{-1} W_{ij} \Sigma_i^{-1} d_i - \text{Traccia}(\Sigma_i^{-1} W_{ij})] p_{r,i}^2$$



# Risultati per il camion con ML-EM



# Ricostruzione statistica con expectation-maximization della maximum likelihood (EM-ML)

per ogni iterazione  
ci vuole circa 1 s  
con un PC standard  
(240k voxel, 90k  $\mu$ )



Fig. 13. Illustration of major objects in a simulated passenger van.

media

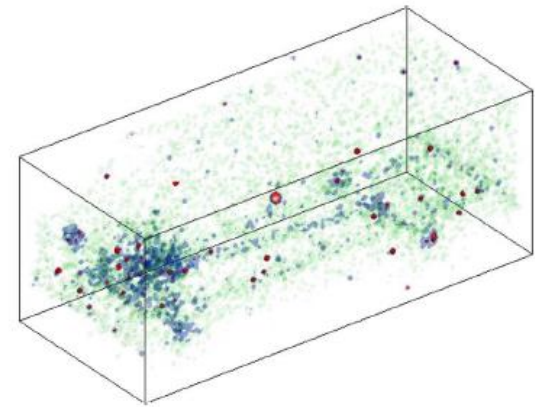


Fig. 14. Reconstruction of 1 min of simulated muon exposure of the passenger van via the *mean* method.

mediana

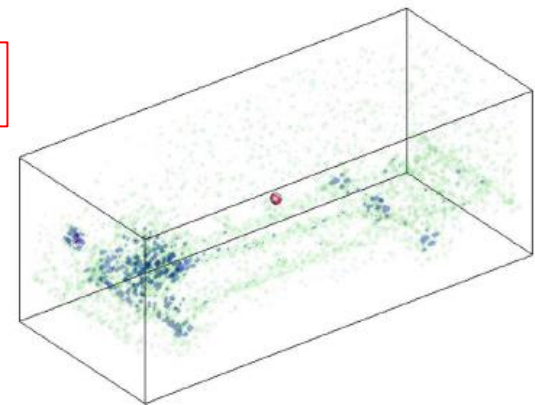


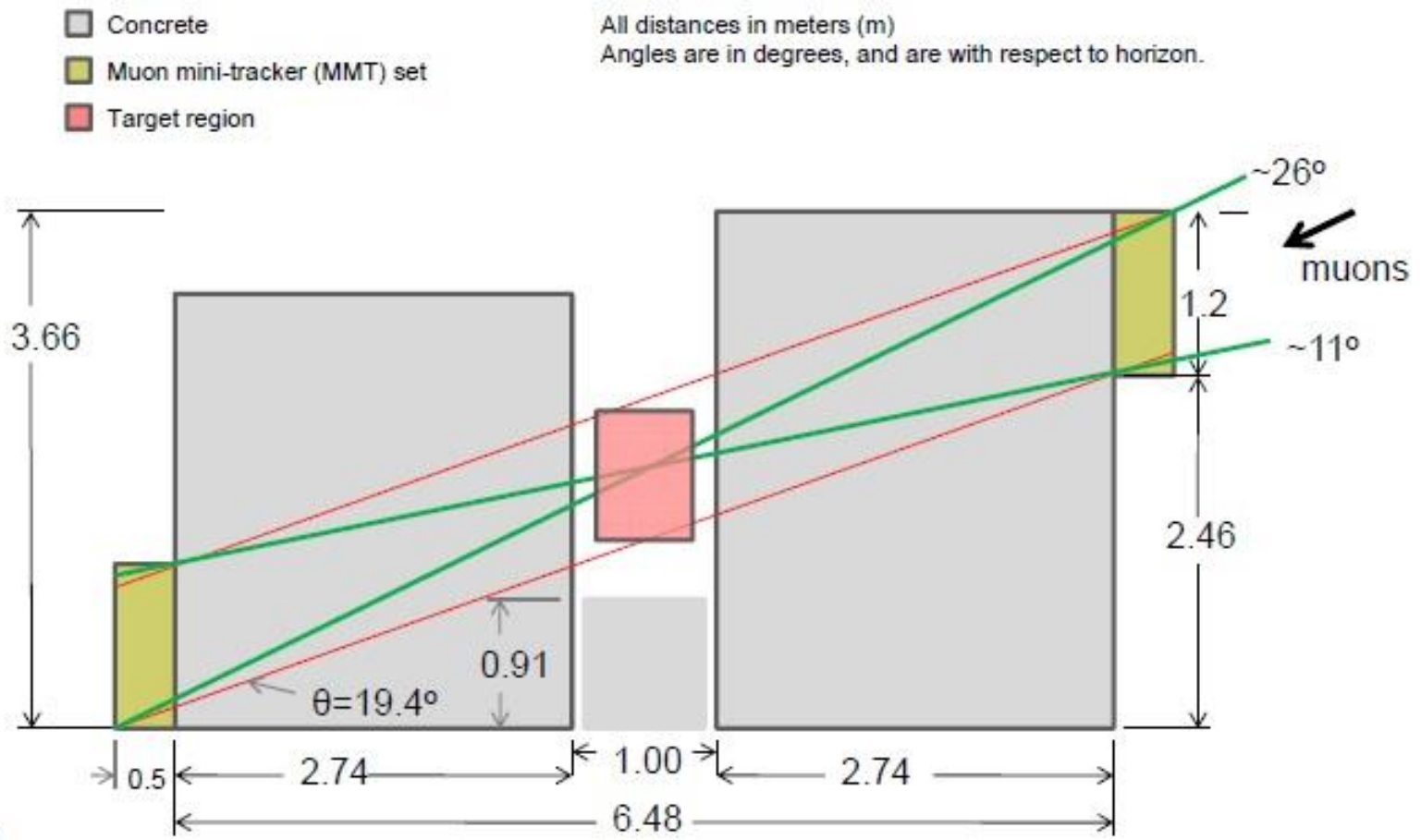
Fig. 15. Reconstruction of the passenger van scene via the *median* method.

## Alcuni sviluppi (Decision Sciences Int. Corp.)

- container scanner passed on 15 April 2015 final milestone at Freeport Container Port in the Bahamas (operating since August 2012)
- contract for 2.1 M\$ awarded from US Defense Dept. for portable electronics scanner(\*)
- contract awarded by Toshiba in August 2014 for a detector to look inside Fukushima Daiichi unit 1 (another muon detector is being built by KEK for unit 2)

(\*) DSIC will create a prototype capable of detecting small amounts of explosive materials in portable electronic devices, such as mobile phones and laptop PCs. The Multi-Mode Passive Detection System (MMPDS) uses muons and electrons to detect shielded and unshielded nuclear and radiological threats, as well as explosives, narcotics, and other materials within electronic devices.

# Imaging di strutture all'interno di spesse pareti di cemento (nocciolo del reattore)

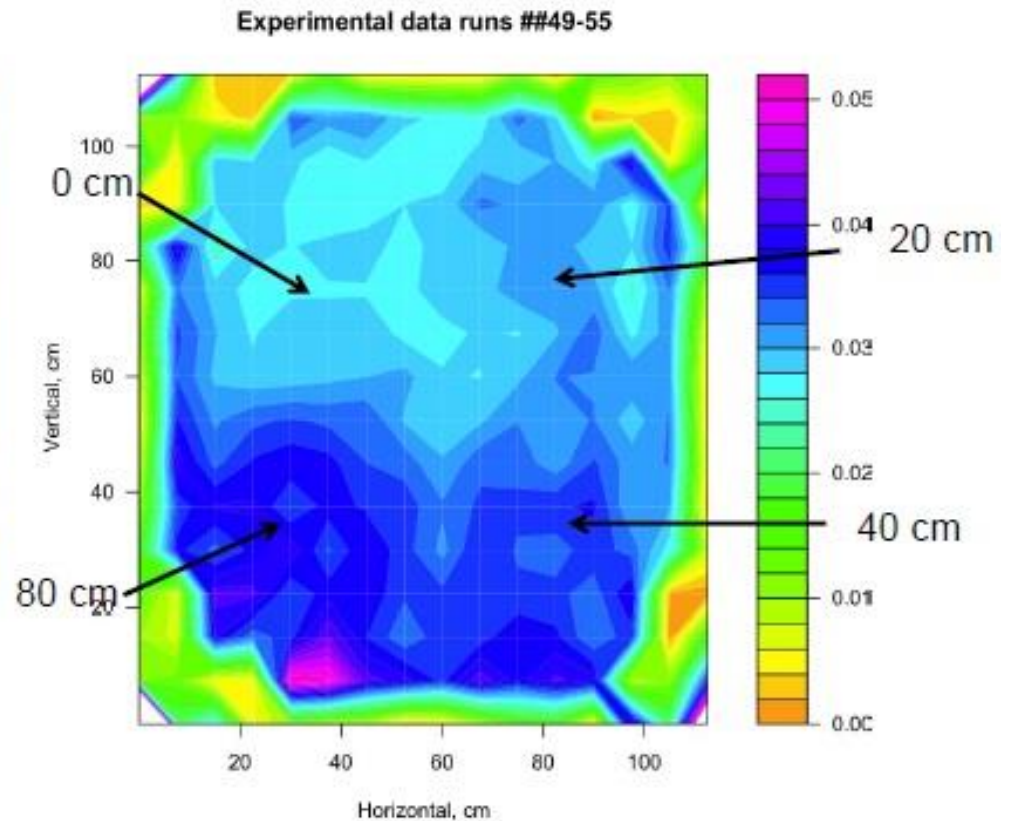




# Imaging .../2 risultati di tests

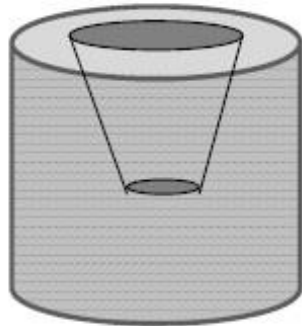
A target of 80-, 40-, and 20-cm of lead (Pb) was imaged.

- 210 hours of data

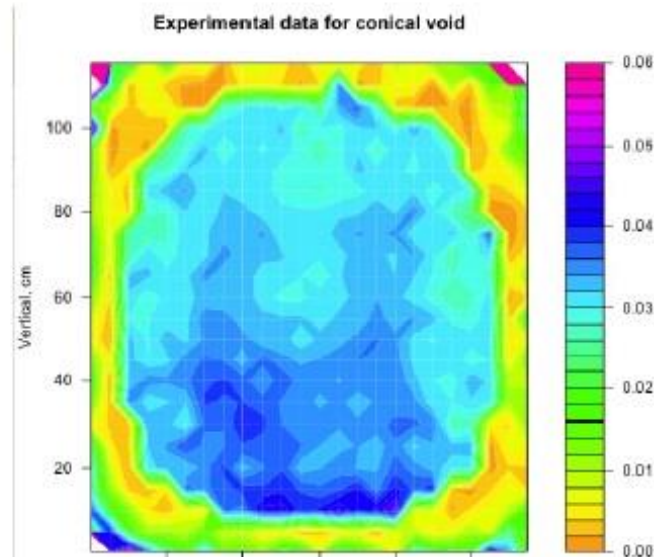


# Imaging .../3 risultati di tests

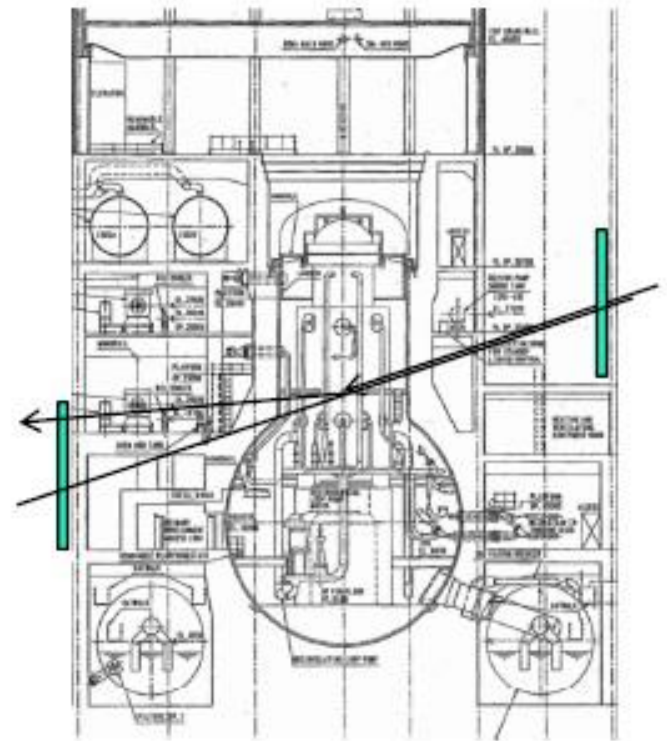
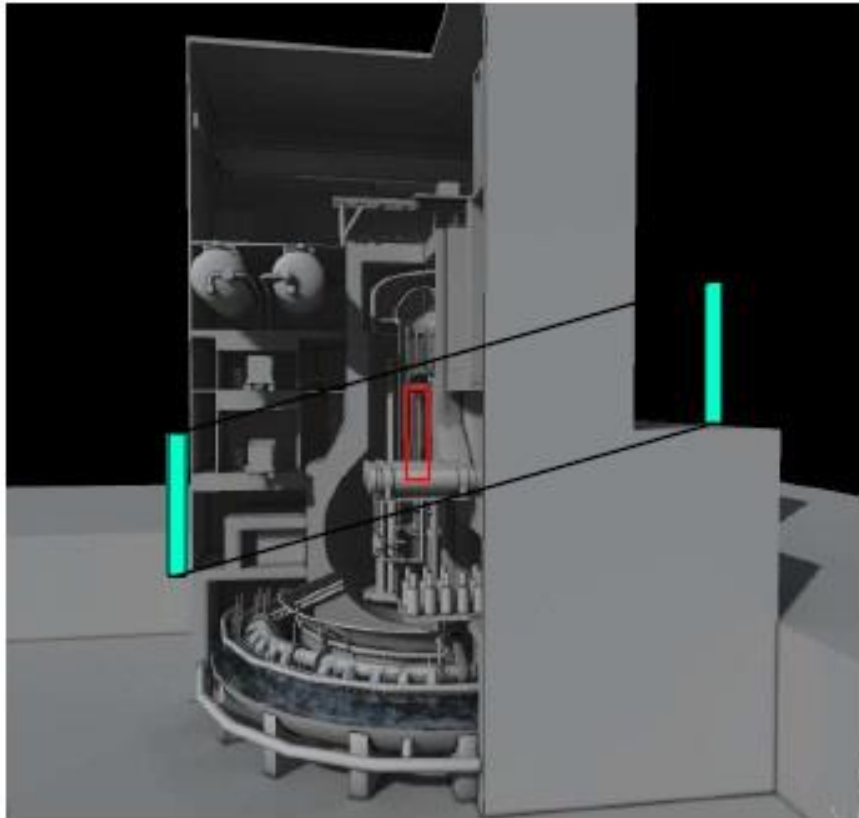
An 80-cm thick Pb target, with “conical void” was imaged.



- 4.5 tons of Pb
- 500 hours data (20 days)



# Imaging .../4 il setup per radiografare il reattore (le distanze sono $\approx 50$ m)



# Imaging .../5 conclusioni

- **Thick targets imaged inside very thick concrete shield**
  - 3 m of concrete – similar to Boiling Water Reactor (BWR)
  - 80-cm of Pb – similar to areal-density thickness of reactor fuel
  - ~ weeks to image each target
- **Scale-up to reactor**
  - Detectors would be on building exterior, ~50 m apart
  - Maintain same solid angle with detectors 5 m x 5 m (commercially available)
  - Measure image of location of fuel
  - Measure amount of fuel remaining in the reactor pressure vessel (RPV)
    - Consistent with known quantity? **Remove intact RPV for disposal**
    - Less than known fuel quantity? **Melt down. Complicated remediation.**



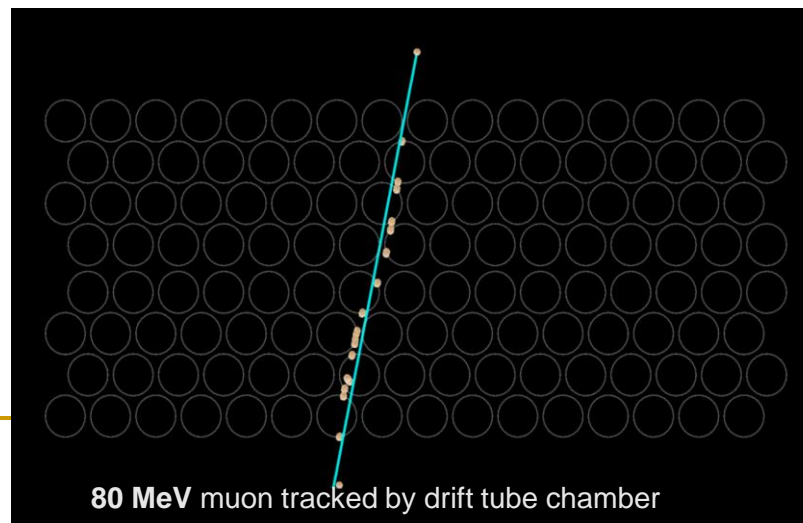
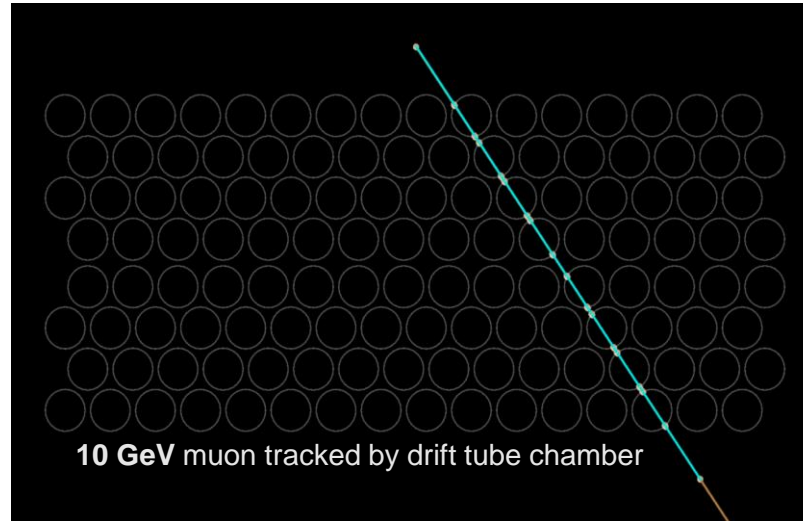
# Installation of the first muon detector at unit 1, Fukushima Dai Ichi (Image – TEPCO)



# Example of rough momentum estimation (courtesy of P. Checchia/Pd)

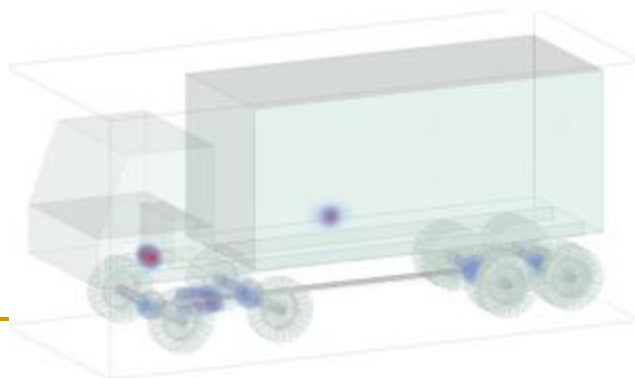
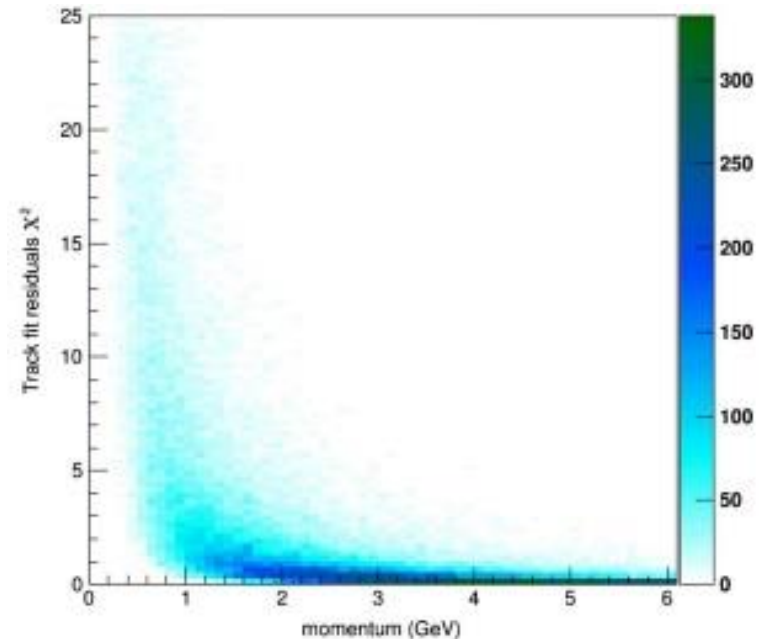
## Momentum Estimation from muon chamber track fit

- Drift tubes:  $\mu$  di en. molto bassa possono essere identificati dalle deviazioni rispetto alla traccia fittata
- Sistemi con scintillatori e SiPM: se la risoluzione temporale è molto buona,  $\mu$  di en. molto bassa possono essere identificati con TOF

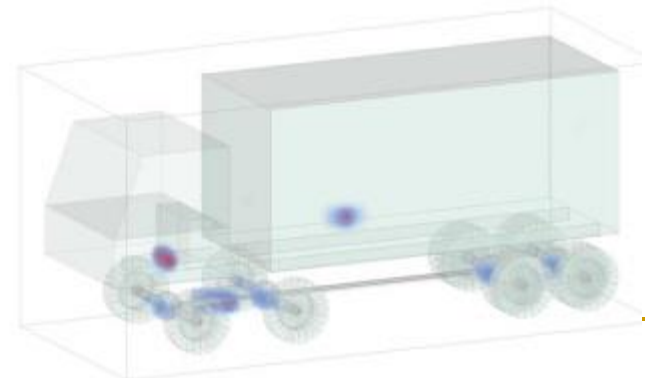


# Stima del momento a partire dal $\chi^2$ del fit della traccia (DT)

- correlazione permette una rozza stima, mediamente
- $\langle \chi^2 \rangle \sim 3.4p^{-2.7}$  quindi si possono dividere i dati in bin di momento ottenendo un miglioramento dell'immagine (in basso (a) momento stimato dal  $\chi^2$  (b) momento vero del MC – ben poca differenza)
- M. Furlan et al., IEEE Trans. NS 61 (2014) 2204



(a)



(b)

# Final remarks (following P. Checchia/Pd at IPRD16)

The use of cosmic muons for applicative purposes gives plenty of possibilities and the field is evolving quickly.

It is an important **technological transfer** from HEP and detector development to the society

From our point of view (HE Physicists) there are several technological, computational and analysis challenges that should increase the interest in participating

Resources should arrive mainly from **alternative funding subjects** w.r.t. “standard” research agencies: this requires an effort to prepare and submit appropriate proposals for projects and to involve potential partners out of research/academic network.

**New Ideas and more collaborators are welcome!**



# Bibliografia/

- 1. Applicazioni dell'assorbimento di  $\mu$  all'indagine di strutture geofisiche
  - K. Nagamine et al., *Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction*, Nucl. Instrum. Meth. **A356** (1995) 585-595
  - H.K.M. Tanaka et al., *High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan*, Earth Planet. Sci. Lett. **263** (2007) 104-113
  - P. Strolin et al., *MUon RAdiographY (MU-RAY) of volcanoes and the "challenge" at Mt. Vesuvius*, (proposta INFN, Ferrara, 2008)  
[http://www.infn.it/csn5/docs/presentazioni/settembre08/muray\\_strolin.pdf](http://www.infn.it/csn5/docs/presentazioni/settembre08/muray_strolin.pdf)

# Bibliografia/

- 2. Applicazioni dello scattering di  $\mu$ 
  - L.J. Schultz et al., *Image reconstruction and material Z discrimination via cosmic ray muon radiography*, Nucl. Instrum. Meth. **A519** (2004) 687-694
  - L.J. Schultz et al., *Cosmic Ray Muon Radiography for Contraband Detection*, <http://www.lanl.gov/physics/pdfs/muon2.pdf>
  - L.J. Scultz et al., *Statistical reconstruction for cosmic ray muon tomography*, IEEE Trans. Image Processing **16** (2007) 1985
  - M. Benettoni et al., *Muon radiography with the CMS Muon Barrel chambers*, 2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record p. 1021-1025
  - M. Benettoni et al., *Radiografia muonica*, [http://www.pd.infn.it/segreterie/segred/trasparenze/2008/Radiografia\\_muonica.ppt](http://www.pd.infn.it/segreterie/segred/trasparenze/2008/Radiografia_muonica.ppt)
  - R.C. Hoch, *Advances in Cosmic Ray Muon Tomography reconstruction Algorithms*, Thesis, Florida Inst. of Techn. (2009)
  - P. La Rocca et al., *Search for hidden high-Z materials inside containers with the Muon Portal Project*, 2014 *JINST* **9** C01056

# References (as listed by P. Checchia/Pd)

## [1] General/Pioneer.

E.P. George, *Commonwealth Engineer* (1955) 455.  
L.W. Alvarez et al., *Science* **167 (1970) 832**.  
K. Nagamine, et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* 356 (1995) 585.  
K.N. Borozdin et al., *Nature* **422 (2003) 277**.  
L.J. Schultz, et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* 519 (2004) 687.  
L.J. Schultz, et al., *IEEE Trans. Image Process.* 16 (2007) 1985.

## [2] Experimental MCS tomography

M. Benettoni et al., DOI: 10.1109/NSSMIC.2007.4437186  
S. Pesente et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* **604 (2009) 738**.  
L. Cuéllar et al., DOI: 10.1109/NSSMIC.2010.5873718  
M. Benettoni et al., 2013 JINST **8 P12007**  
J. Burns et al., 2015 JINST **10 P10041**  
E. Åström et al., 2016 JINST **11 P07010**

## [3] Detectors for Cosmic muon applications

<http://mutomweb.pd.infn.it:5210/>  
<https://www.decisionsciences.com/>  
K. Gnanvo, et al., **arXiv:1011.3231**  
Xiaoguang Yue et al. Published in: Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2012 IEEE  
P. Baesso et al., 2013 JINST **8 P08006**.  
S. Riggi et al., *Journal of Physics: Conf. Series*, 409 (2013), p. 012046  
P. Baesso et al., 2014 JINST **9 C10041**.  
J. Marteau et al., *Measur.Sci.Tech.* **25 (2014) 035101**  
Shitao Xiang et al., DOI: 10.1109/RTC.2014.7097518  
M. Biglietti, Published in **PoS TIPP2014 (2014) 290**  
L. G. Dedenko et al., *Bull.Lebedev Phys.Inst.* **41 (2014) no.8, 235-241**

Xuewu Wang et al., *Nucl.Instrum.Meth.* **A784 (2015) 390-393**  
P.La Rocca et al., *Nucl.Instrum.Meth.* **A787 (2015) 236-239**  
V. Anghel et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* **789 (2015) 12**.  
A.Nishio et al., *Phys.Procedia* **80 (2015) 74-77**  
A. B. Aleksandrov et al., *Phys. Part. Nuclei Lett.* (2015) **12: 713**.  
F. Riggi et al., *EPJ Web Conf.* **117 (2016) 05003**  
Dezső Varga et al., **arXiv:1607.08494**

## 4] Industrial applications

M. Furlan et al., (*ANIMMA*), *Marseille, France*, 23–27 June 2013, doi: 10.1109/ANIMMA.2013.6728043.  
Musteel project, *Research Fund for Coal and Steel* RFSR-CT-2010-00033  
[https://ec.europa.eu/research/industrial\\_technologies/pdf/rfcs/summaries-rfcs\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/rfcs/summaries-rfcs_en.pdf).  
Mublast project, *Research Fund for Coal and Steel* RFSR-CT-2014-00027, 655, available from:  
[https://ec.europa.eu/research/industrial\\_technologies/pdf/rfcs/summaries-rfcs\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/rfcs/summaries-rfcs_en.pdf).  
J.M. Durham et al., *AIP ADVANCES* **5, 067111 (2015)**

## [5] Spent nuclear fuel control

G.Gustafsson UU-NF 05#08 (October 2005) UPPSALA UNIVERSITY NEUTRON PHYSICS REPORT ISSN 1401-6269  
G. Jonkmans et al. **arXiv:1210.1858**  
A.Clarkson et al., *Nucl.Instrum.Meth.* **A746 (2014) 64-73**  
A.Clarkson et al., *Nucl.Instrum.Meth.* **A745 (2014) 138-149**  
A.Clarkson et al., *JINST* **10 (2015) no.03, P03020**  
D. Poulson, et al. **arXiv:1604.08938v1**  
S. Chatzidakis et al., *Nucl.Instrum.Meth.* **A828 (2016) 37-45**  
S. Chatzidakis et al., **arXiv:1606.07567**

# References (continue)

## [6]Geological applications

- H. K. M. Tanaka et al., Earth Planet. Sci. Lett. **306**, 156–162 (2011).  
G. Ambrosi et al., Nucl.Instrum.Meth. **A628 (2011) 120-123**  
J. Marteau et al., Nucl.Instrum.Meth. **A695 (2012) 23-28**  
K. Jourde et al., **arXiv:1307.6758**  
A. Anastasio et al., Nucl.Instrum.Meth. **A732 (2013) 423-426**  
D. Carbone et al., Geophys.J.Int. **196 (2014) 633-643**  
J. Klinger et al., Int. Journal of Greenhouse Gas Control **42 (2015) 644-654**  
J. Marteau et al., **arXiv:1510.05292v1**  
S. Pal et al., **Springer Proc.Phys. 174 (2016) 479-485**  
J. Marteau et al., **PoS PhotoDet2015 (2016) 004**  
K. Jourde et al., **arXiv:1606.03003**

## [7]Archeological applications

- H. Gómez et al., AIP Conf. Proc. **1672, 140004 (2015)**  
H. Gómez et al., J.Phys.Conf.Ser. **718 (2016) no.5, 052016**

## [8] Survey of Nuclear plants

- K.N. Borozdin et al., Phys.Rev.Lett. **109 (2012) 152501**  
John Perry et al., J.Appl.Phys. **113, 184909 (2013)**  
H. Fujii et al., PTEP 2013 **(2013) no.7, 073C01, arXiv:1305.3423**

## [9]Algorithms, feasibility studies, simulations

- K. Gnanvo, et al., DOI: 10.1109/NSSMIC.2008.4774639  
Matthias Ihl : **arXiv:1008.1241**  
V. Anghel et al., DOI: 10.1109/NSSMIC.2011.6154302  
A. B. Aleksandrov et al., Bull.Lebedev Phys.Inst. **39 (2012) 269-276**  
C. Morris et al., **arXiv:1210.6102**  
Baihui Yu et al., DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829783  
A. Zenoni et al., **arXiv:1403.1709v1**  
S.Chen et al., JINST 9 (2014) **no.10, C10022**  
D. Mitra et al., **arXiv:1412.6485**  
K. Jourde et al., Geosci. Instrum. Method. Data Syst. Discuss., **5, 83-116, 2015**  
A. Clarkson et al., JINST 10 (2015) **no.03, P03020**  
M. Bandieramonte et al., J.Phys.Conf.Ser. **608 (2015) no.1, 012046**  
K. Boniface et al., **arXiv:1605.01565**



---

Fine della 1a parte B

- Altezza 930 m s.l.m., attività vulcanica ordinaria a 750 m
- Attività "stromboliana": esplosioni intermittenti dovute ad accumulo di gas, condotto essenzialmente aperto
- Rara e modesta attività effusiva
- Il segnale dovuto all'attività esplosiva e il tremore vulcanico hanno origine a piccola profondità, a circa 200 m al di sotto dell'area craterica.



(\*) recentemente 'cambiato' in MURAVES (MIUR)

**Grande interesse per radiografia**

# Stromboli



- **“Strombolian” activity**
  - essentially open conduit
  - intermittent eruptions due to increase in gas pressure
  - rare effusive activity
  
- **Summit at 926 m a.s.l.**
- **Crater at ~ 750 m a.s.l.**



# L'obiettivo finale (Stromboli)

## ▪ **Scientific interest**

- Open conduit
- Stromboli well studied using other techniques
- Combine information by different techniques

## ▪ **Large rock thickness**

- similar problems as for Mt. Vesuvius
- harsher environment e.g. non c'è una base INGV
- MU-RAY telescope in some future?

## ▪ **Top part of the conduit (crater region)**

### Investigated using nuclear emulsion

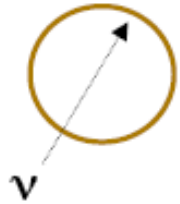
(same Italian-Japanese team as for Unzen lava dome)



# Linee guida del progetto MU-RAY

- Fattibilità dimostrata da osservazioni in Giappone
- Obiettivo di MU-RAY: radiografia ad alta risoluzione in 3D con accesso a zone profonde: (importanti passi in avanti)
- Coll. Internazionale, Vesuvio come progetto pilota
- Sviluppare telescopio adattabile ad altri vulcani (Stromboli, ... Antille ... Giappone ...) e con capacità di "zoom"
- Uso di scintillatori con tecnologie collaudate
- **In parallelo:**
  - Progetto e realizzazione dei (3) telescopi MU-RAY
  - Prime misure sul campo con telescopio giapponese: area  $1\text{m}^2$ , basse accettanza e risoluzione angolari

# Full simulation



Similarity with  
Earth radiography by neutrinos

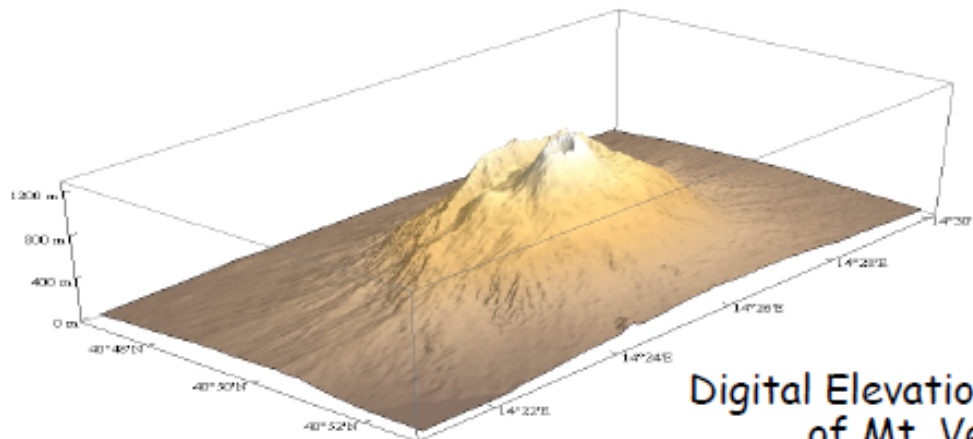
$\nu \leftrightarrow \mu$

Earth  $\leftrightarrow$  volcano



Methods and codes have been developed:  
first applied to Earth radiography (Miele and colleagues)  
now being applied to Mt. Vesuvius

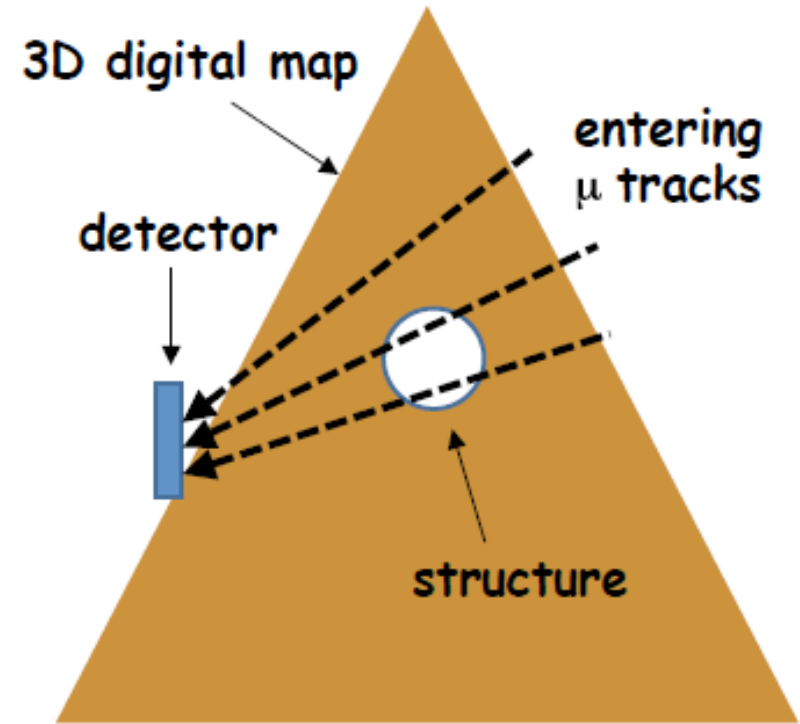
Sul Vesuvio esiste  
un osservatorio  
del INGV



Digital Elevation Map (DEM)  
of Mt. Vesuvius

# Step 1: generate atmospheric muons

- 3D Digital Elevation Map
- Tracks intercepting the detector generated and projected backward
- Along their directions, muons generated according to the known spectrum (from PDG)



**Input to full simulation of  $\mu$  reaching the detector through Vesuvius**

## Step 2: full simulation of $\mu$ reaching the detector through Mt. Vesuvius

- Simulation of the geometry and  $\mu$  tracking done with GEANT4 (Geometry ANd Tracking tool)
- "Experimental apparatus" defined as Vesuvius + detector
- The longitudinal dimension of the apparatus is the length of rock intercepted by the track (from the previous step)
- The experimental apparatus can consist of zones with different densities, allowing to simulate structures inside Vesuvius
- The rock initial density will be taken to be  $2.2 \text{ g/cm}^3$