

# La radiografia muonica

dallo studio dei vulcani alle applicazioni in campo industriale ed archeologico

**Giulio Saracino**

**Università di Napoli *Federico II*  
e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare**

**107° CONGRESSO NAZIONALE della SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA**

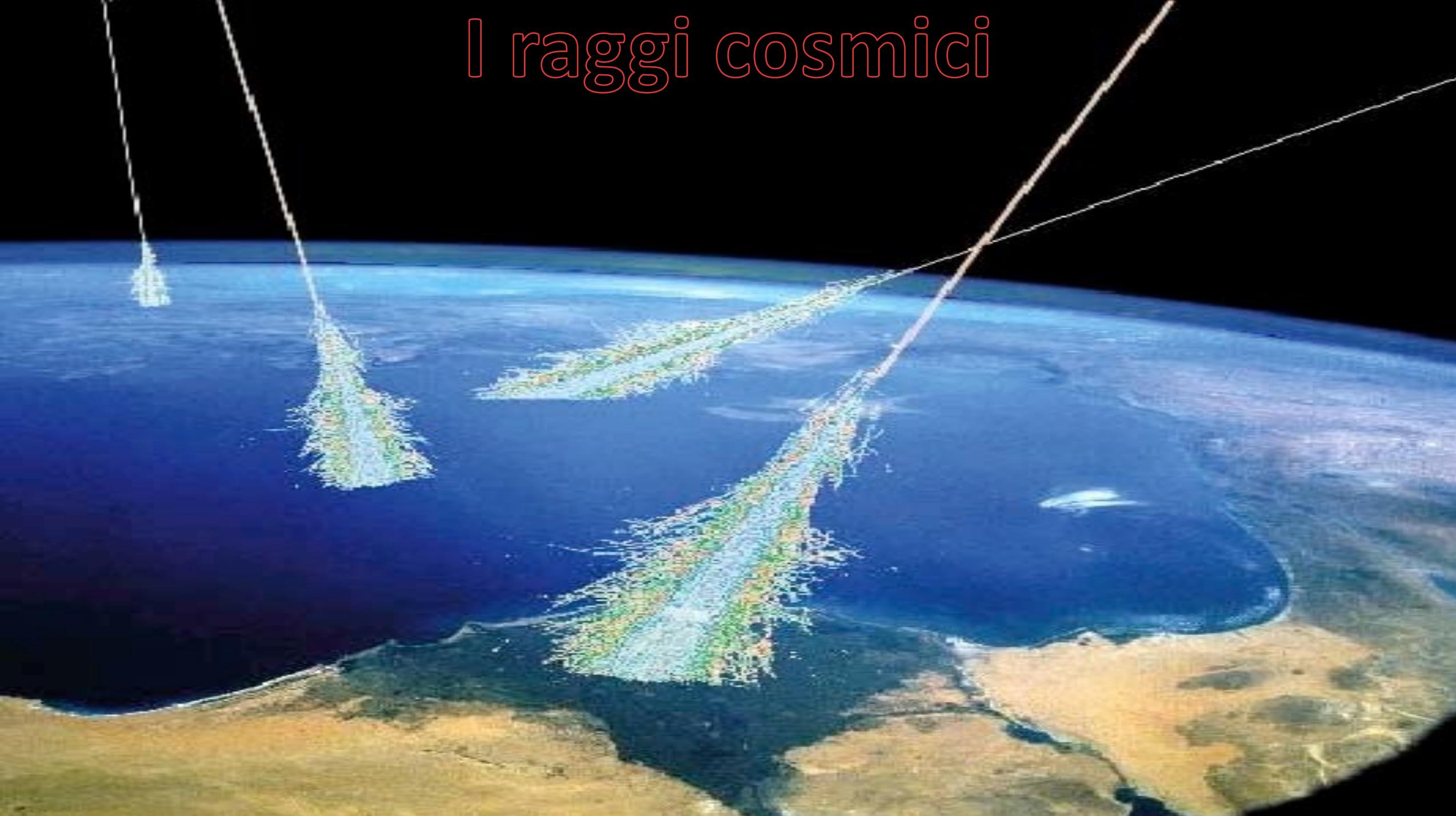
**Sezione 6: Fisica applicata, acceleratori e beni culturali**

**15 settembre 2021**

# Sommario

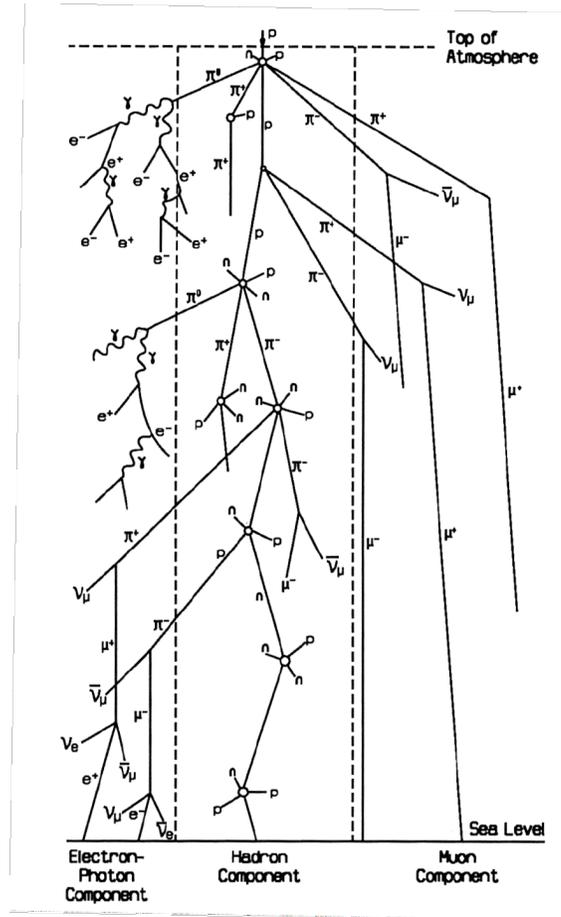
- I raggi cosmici e tipi di radiografia muonica
- Tecnologie utilizzate e ambiti di applicazione
- Esempi

# I raggi cosmici



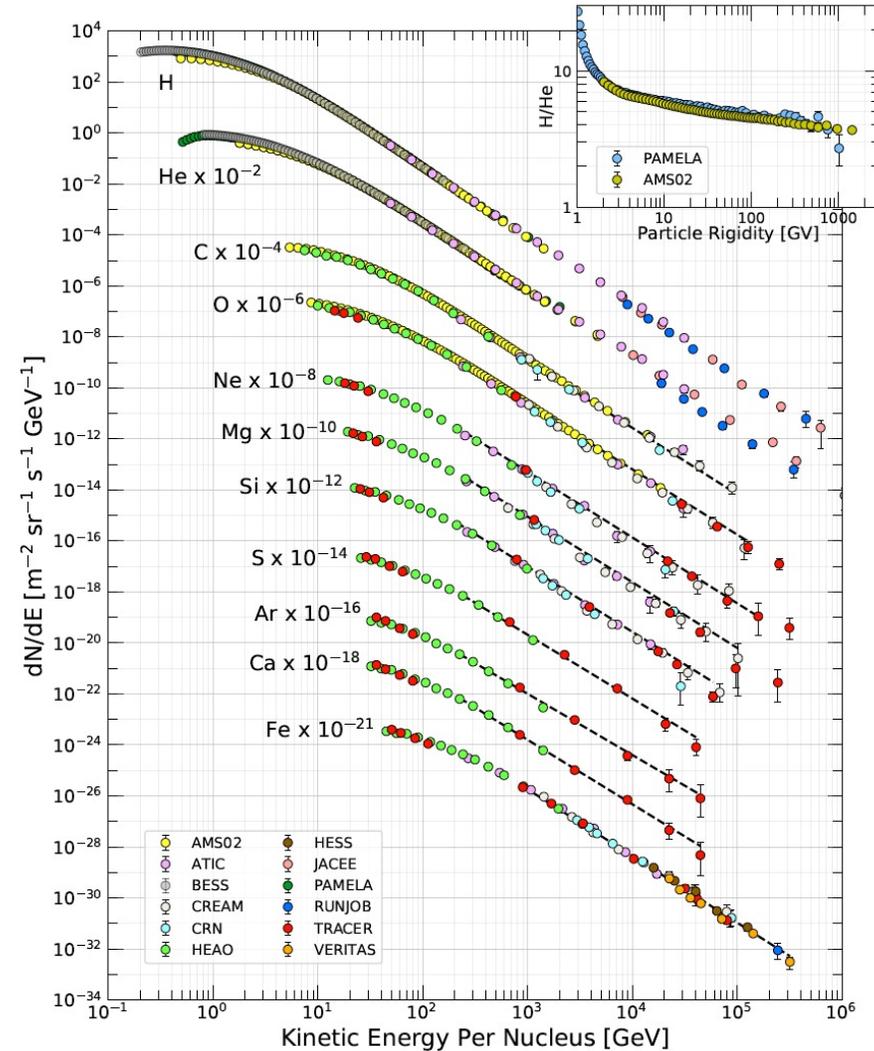
# Raggi cosmici primari e sulla superficie terrestre

- 1912: Hess scoperta di una componente extraterrestre nella radioattività ambientale
- Radiazione cosmica primaria: protoni (90%, nucleo di elio (9%) altri nuclei )
- Interazioni con l'atmosfera Terrestre: sciame adronici  $\rightarrow$  produzione di altre particelle :  $\pi$ ,  $K$ ,  $\rightarrow \mu$ ,  $e$ ,  $\gamma$ ,  $\nu$ , ..
- Decadimenti delle particelle instabili  $\rightarrow$  al livello del mare  $\mu$  e  $\nu$  sono predominanti



# Raggi cosmici primari e sulla superficie terrestre

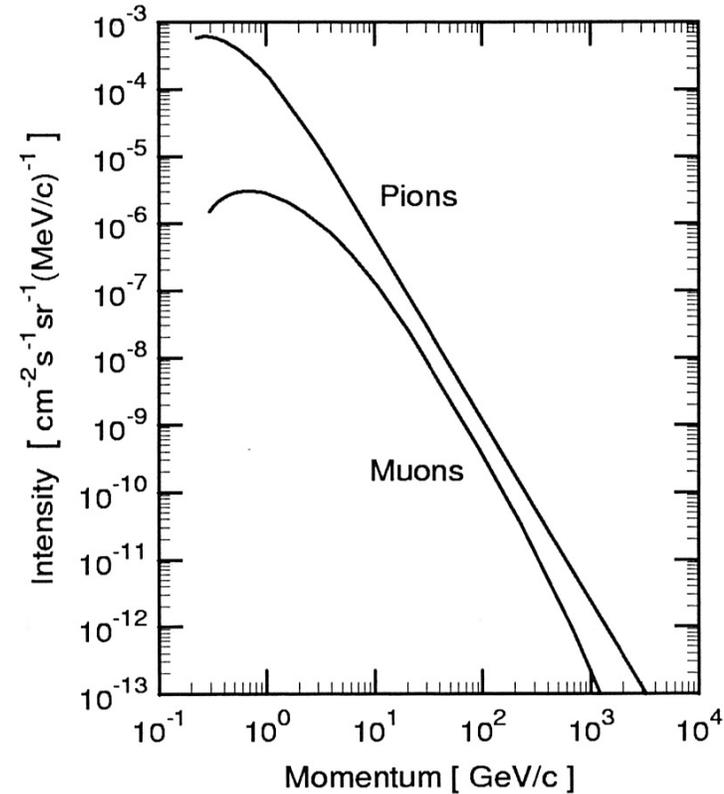
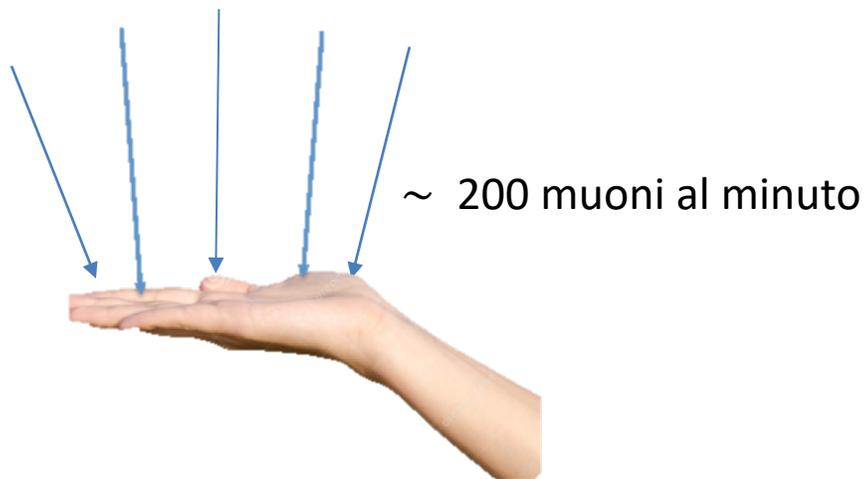
Energia dei primari : può raggiungere i milioni di GeV



# Raggi cosmici primari e sulla superficie terrestre

I muoni:

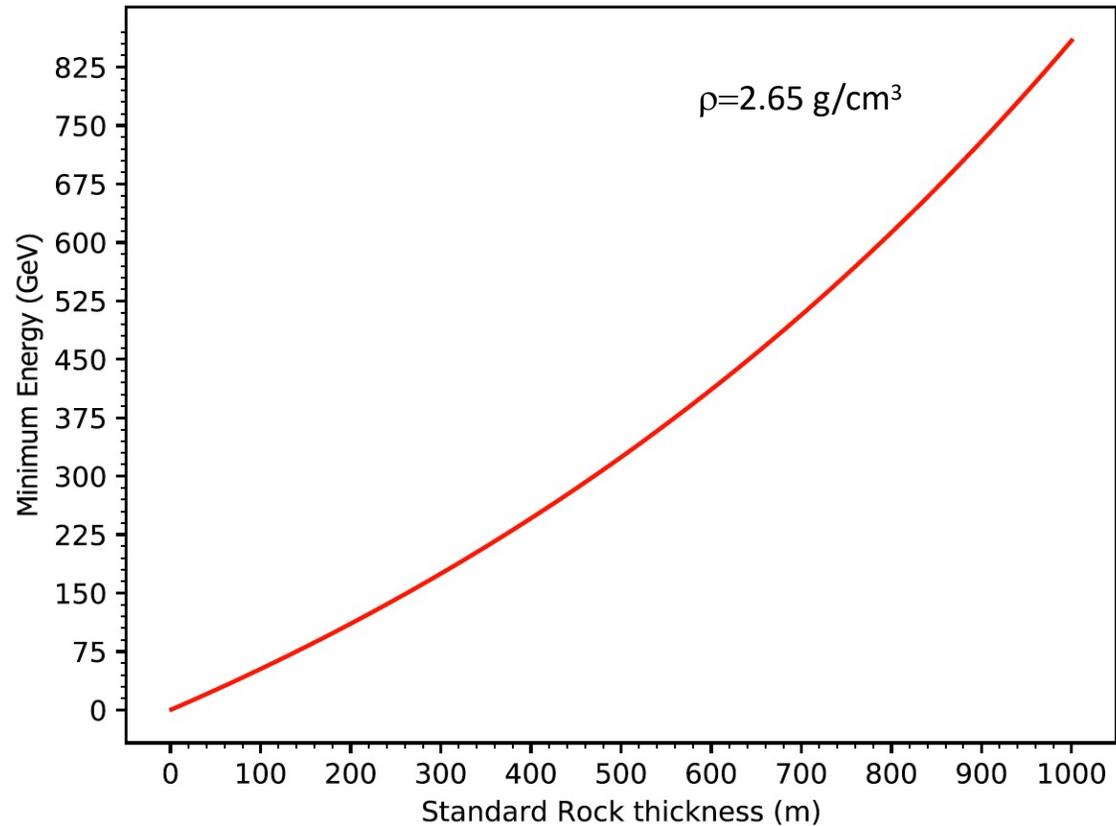
- Carica elettrica =  $\pm 1 q_e$
- Massa = 105 MeV (  $\sim 200$  volte elettrone)
- Vita media =  $2,2 \mu\text{s}$   $\rightarrow L \sim 15 \text{ km}$  @E= 4 GeV
- $\langle E \rangle = 4 \text{ GeV}$



# Raggi cosmici primari e sulla superficie terrestre

- Massa elevate + energia + vita media -> **alta penetrabilità nella materia**
- Carica elettrica -> facilmente rivelabili
- Disponibili h24 a costo zero
- Nessun problema di radioprotezione

Svantaggio: flusso costante e statistica limitata



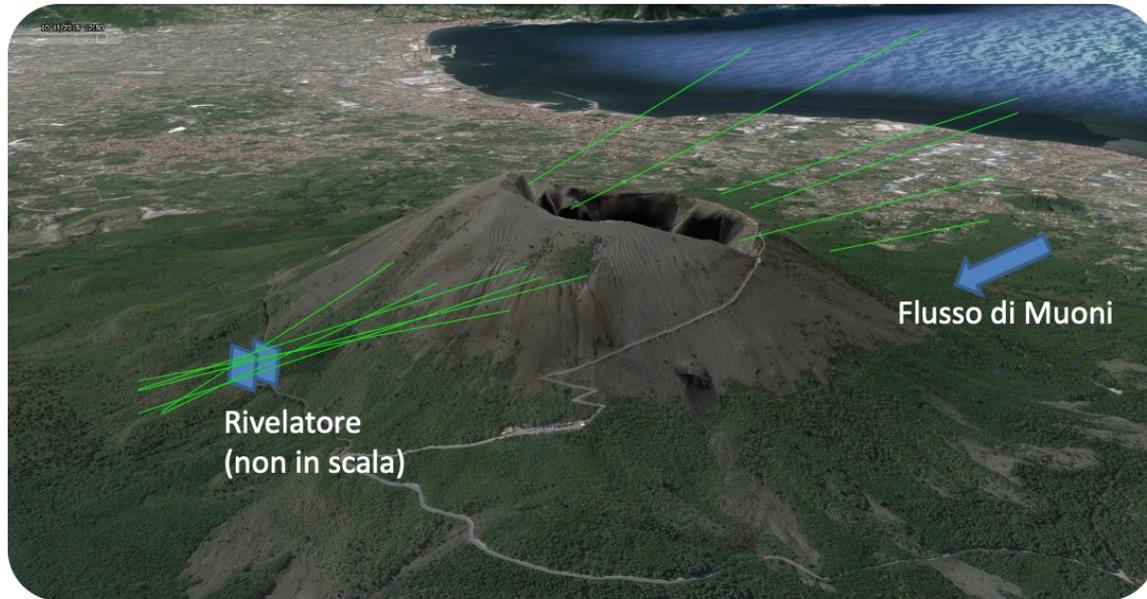
# Tipi di radiografia muonica

Fenomeno fisico:

Perdita di energia, dipende da  $\rho$

Metodo di misura: Assorbimento:

flusso misurato a valle / flusso atteso



Un unico tracciatore a valle

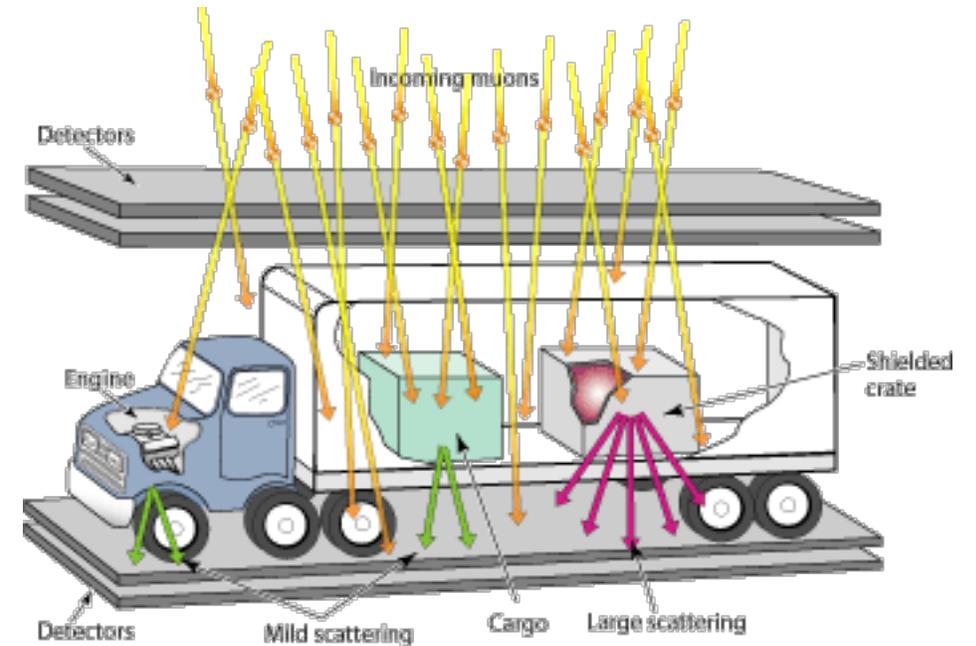
La differenza tra flusso atteso e flusso misurato dipende dalla "opacità media" cioè dalla densità media per lo spessore di roccia.

Fenomeno fisico:

Scattering Coulombiano multiplo: dipende da  $\rho$  e da  $Z$

Metodo di misura: angolo di scattering:

Si misura la direzione di ingresso e di uscita del muone



Due tracciatori : uno in ingresso , l'altro in uscita

# Tecnologie per il rivelamento dei muoni

Caratteristica rivelatore	Scattering	Assorbimento
Superficie singolo piano	$\approx 1 \text{ m}^2 \times 2$	$\approx 1 \text{ m}^2$
Risoluzione spaziale	$\approx 1 \text{ mm}$	$\approx 1 \text{ mm}$
Volume da investigare	$\approx 100 \text{ m}^3$	$\gg 100 \text{ m}^3$
Oggetto da risolvere	$\approx 10 \text{ cm}$	$\approx 1 \text{ m}$
3D	si	possibile
Tempi di acquisizione	$\approx 1 \text{ min}$	$\approx 1 \text{ day}$

# Tecnologie per il rivelamento dei muoni

Scintillatori plastici  
(PMT o SiPM)



MU-RAY - INFN

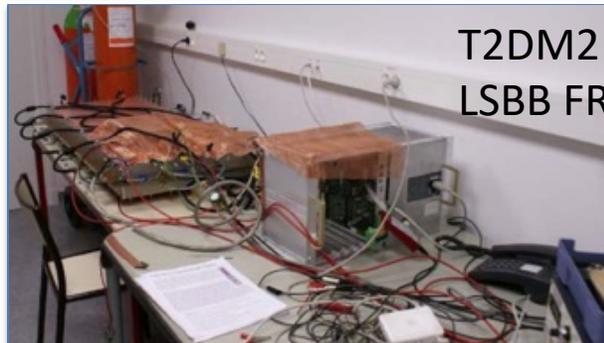


TANAKA - ERI



DIAPHANE IN2P3

Rivelatori a gas  
RPC, wire chamber,  
micromegas



T2DM2  
LSBB FR



← TOMUVOL - IN2P3

Emulsioni nucleari  
RICH in aria



G. Saracino  
La radiografia Muonica  
107° Congresso Nazionale SIF

← OPERA  
INFN,  
NAGOYA



ASTRI-INAFA

# Applicazioni

## SCATTERING:

- Materiale radioattivo
  - Container: contrabbando e sorgenti orfane
  - Caratterizzazione di bidoni
  - Ispezione di cestelli di barre esaurite
  - Controllo di reattori nucleari
- Monitoraggio di altiforni ( densità interna)
- Applicazioni industriali
  - Studio del cemento armato
- Applicazioni mediche ( radiografia torace)

## ASSORBIMENTO:

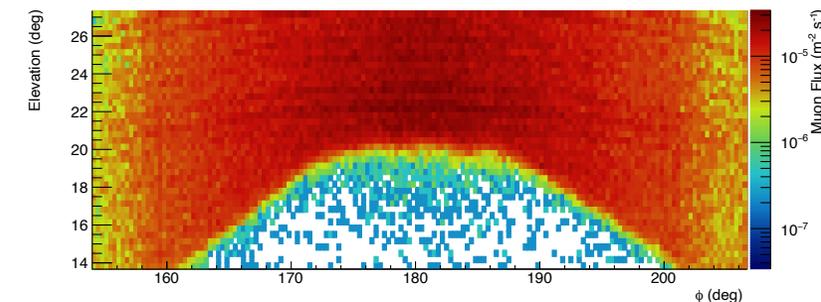
- Prospezioni geofisiche
  - Vulcani
  - Cavità-discontinuità ( sicurezza e archeologia)
  - Miniere
  - Bradisismo subaqueo
- Monitoraggio di altiforni ( densità interna e spessore residuo)
- Applicazioni industriali ( tubature, dighe)
- Monitoraggio della stabilità degli edifici
- Monitoraggio ambientale
  - Spessore ghiacciai alpini
  - Dinamica della temperatura della stratosfera

# Spin-off

Company	Founded	Country	Main application	Tecnolgy
<i>Decision Sciences</i>	2001	USA	Cargo scanning, nuclear fuel cask monitoring	MS
<i>Lingacom</i>	2012	Israel	Cargo scanning, ground survey	MS,TR
CRM GeoTomography now <i>Ideon Technologies Inc.</i>	2013	Canada	Mining exploration -> oil and gas, infrastructure, national security	TR
Muon System	2015	Spain	Industrial application, cargo scanning	MS,TR
Lynkeos Technology	2016	UK	Nuclear safety and security	MS
Muon Solutions	2016	Finland	Mining exploration	TR

# Studio dei vulcani:

- In Italia
  - Vesuvio
  - Stromboli
  - Etna
- Giappone
  - Satsuma-Iwojima
- Francia
  - La Soufrière, Guadalupa
  - Puy De Dome



M. D'Errico et al.: Radiografia Muonica applicata ai vulcani: Studio della parte sommitale del Vesuvio nell'esperimento MURAVES.

Sezione 4 – Geofisica e fisica dell'ambiente

# Alcuni esempi nel campo della fisica applicata

# Studio delle piramidi



Complesso delle piramidi di Giza

Chefren

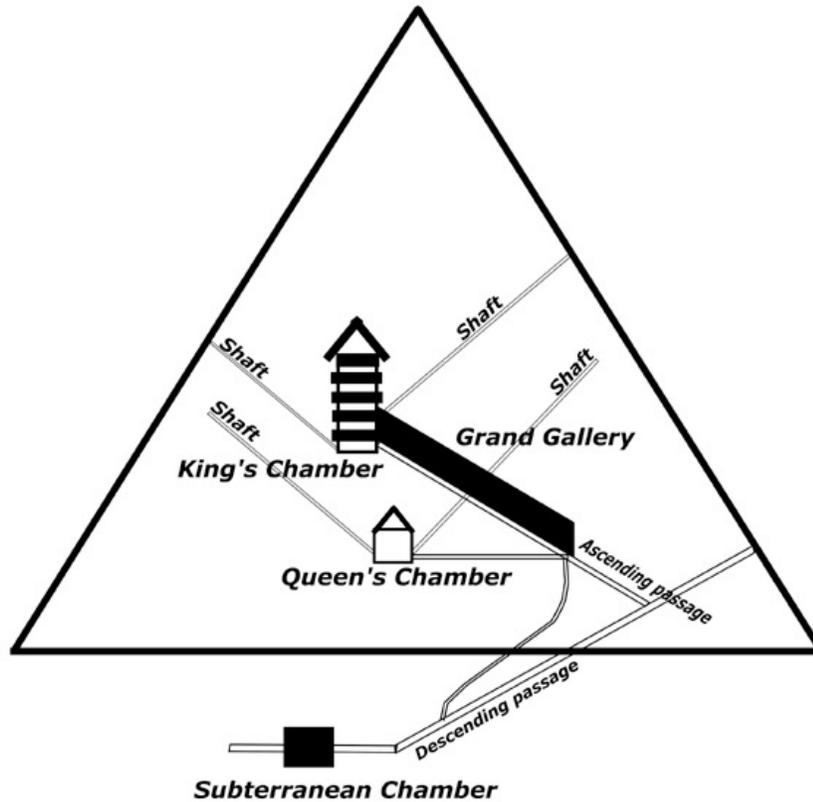
Cheopse

Menkaure

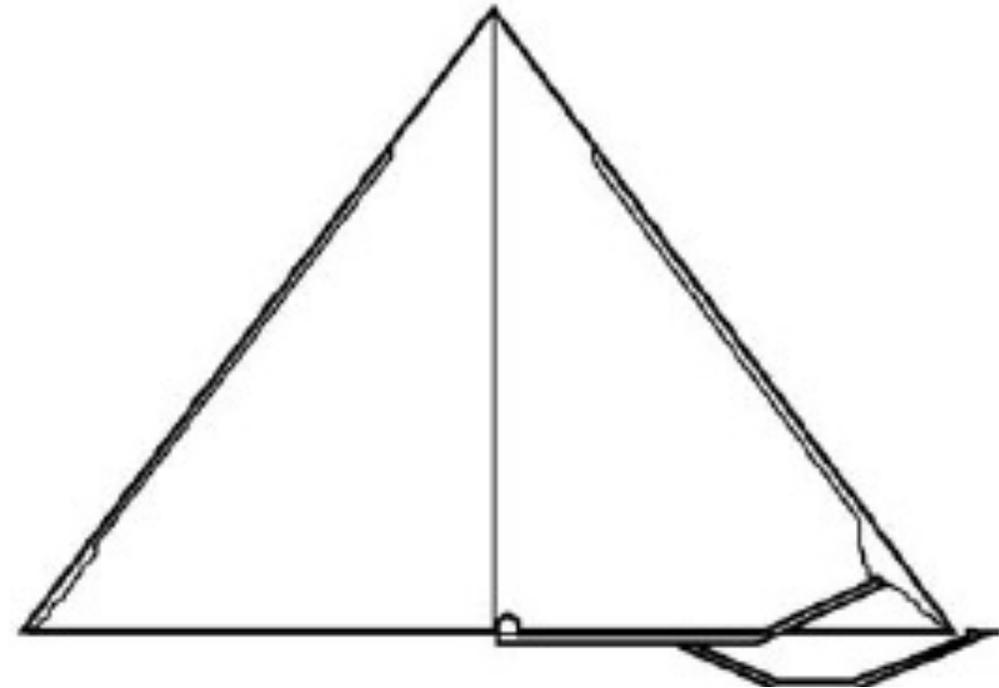
Alvares

Scan Pyramids

# Le due grandi piramidi a confronto: esternamente molto simili. Non altrettanto lo sono all'interno.



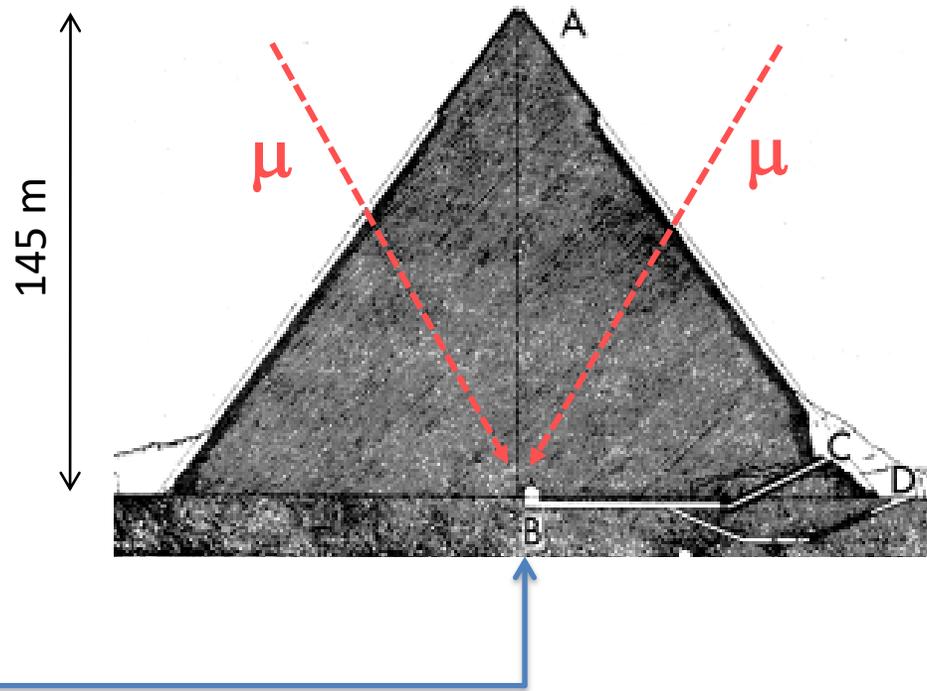
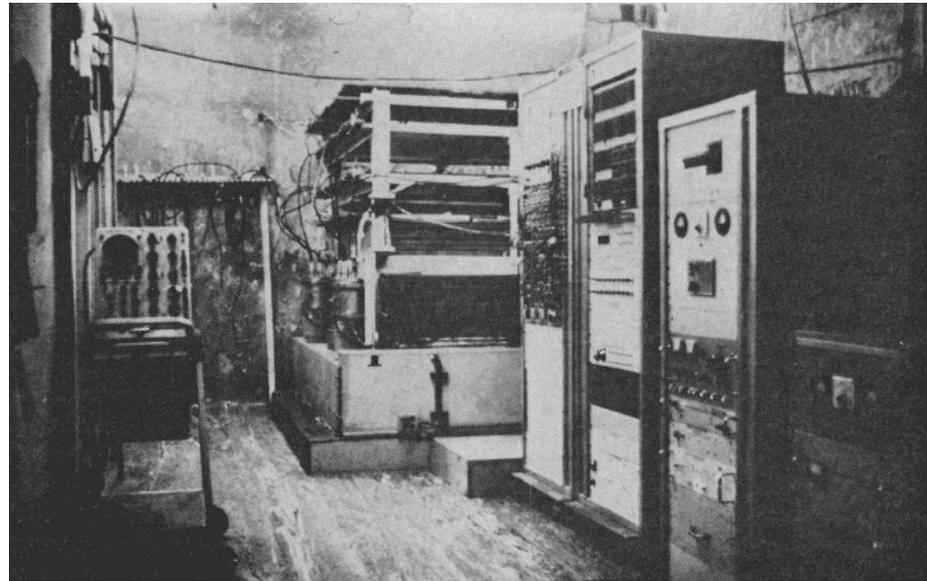
Piramide di Cheope



Piramide di Chefren

# 1969-70: Alvares

Installò un rivelatore nella stanza di Belzoni, alla base della piramide.

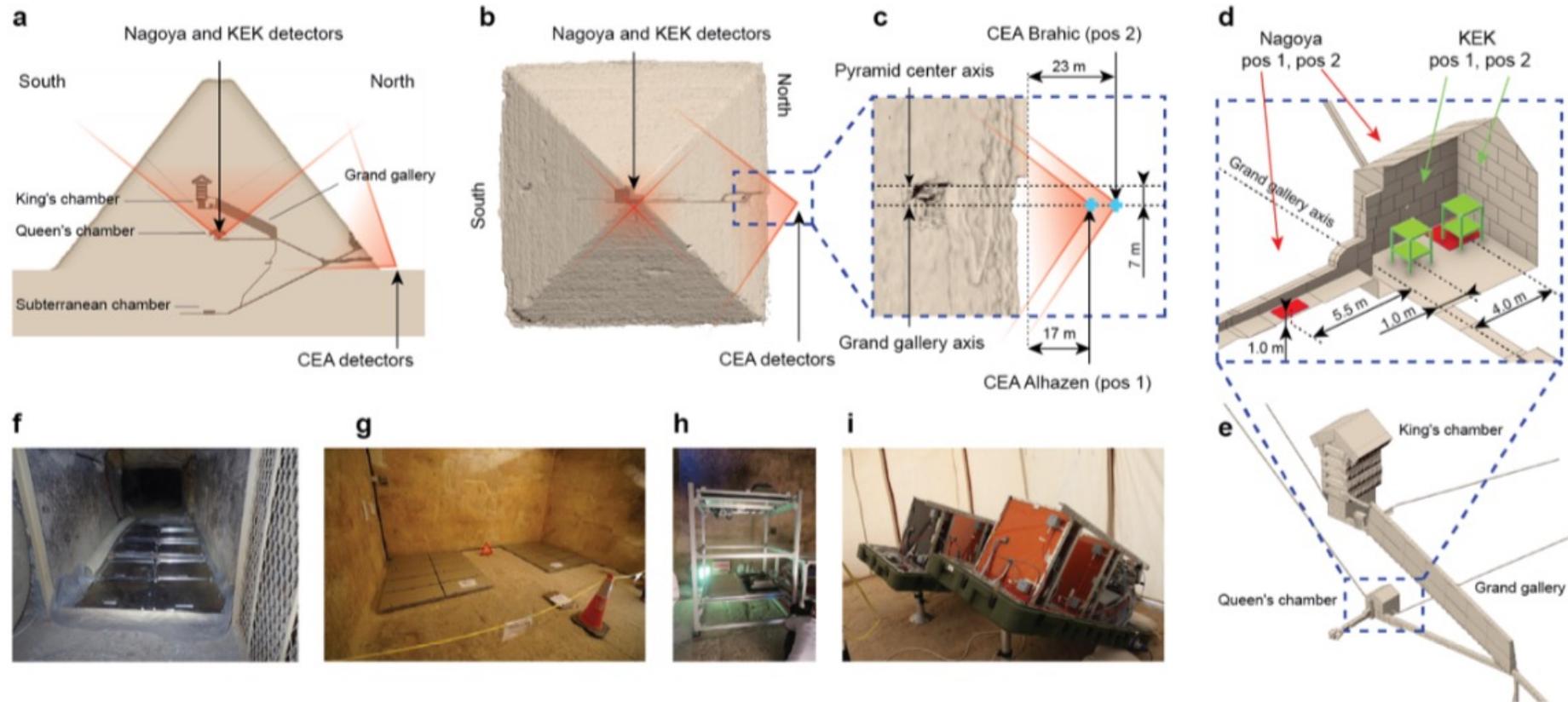


# Progetto SCAN Pyramids

# The scan pyramids big-void discover 2016

## Piramide di Khufu (Cheope)

Tre differenti tecnologie utilizzate: emulsioni nucleari, scintillatori e rivelatori a gas



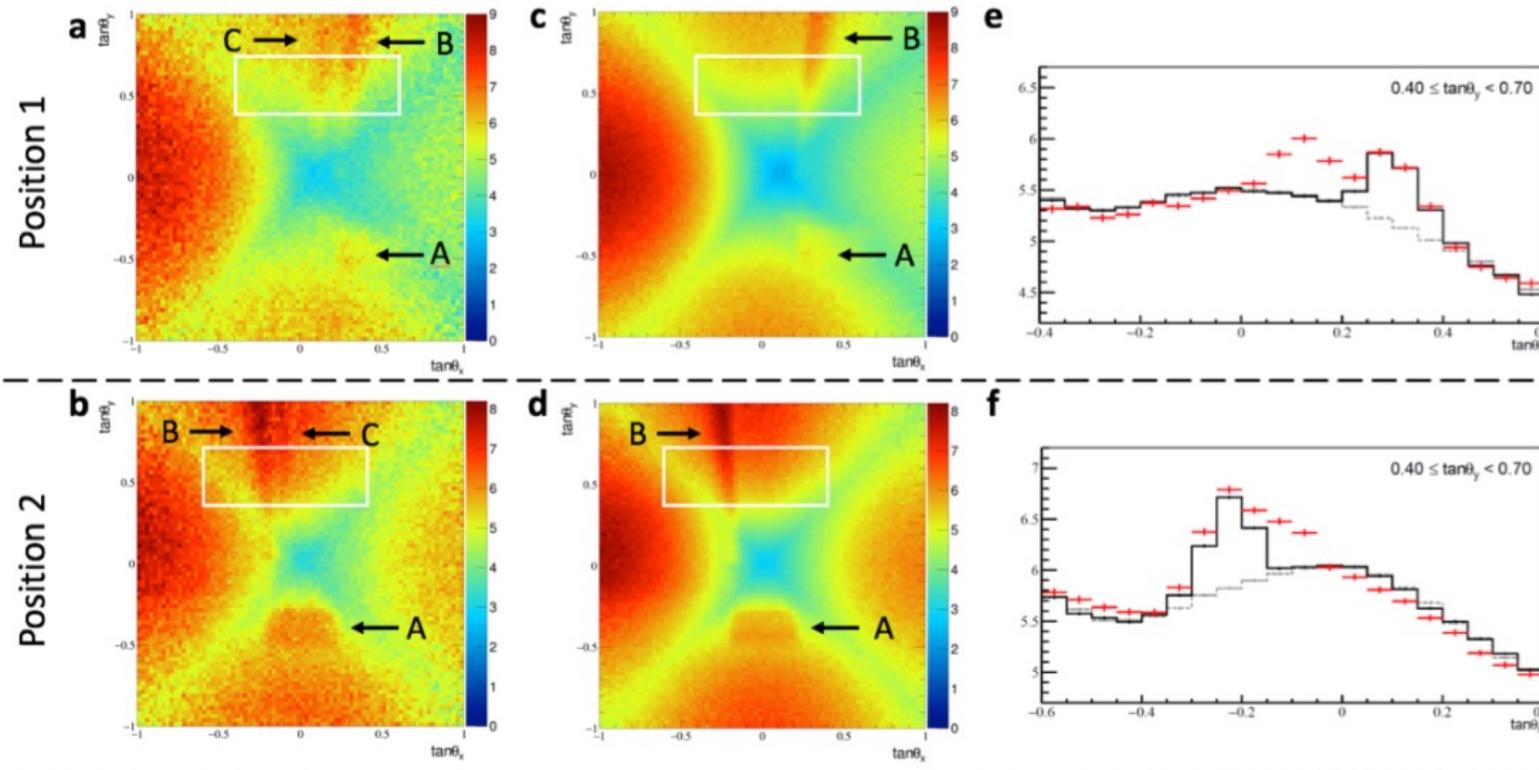
# The scan pyramids big-void discover 2016

Chiaro segnale della presenza di una cavità ( emulsioni)

Dati

Simulazione

In rosso i dati



K. Morishima et al.  
NATURE VOL 552  
21/28 DECEMBER 2017  
doi:10.1038/nature24647

Volumi noti: B galleria grande A camera del re. C segnale del vuoto inaspettato

Nel 2017 rivelatori ad emulsioni nucleari, hanno confermato l'esistenza del vuoto, raffinando la precedente misura.

Flusso di  
muoni

# Studio di cavità nel sottosuolo

Neapolis

Mt Echia: antica città di Parthenope VIII B.C.



# Mt. Echia

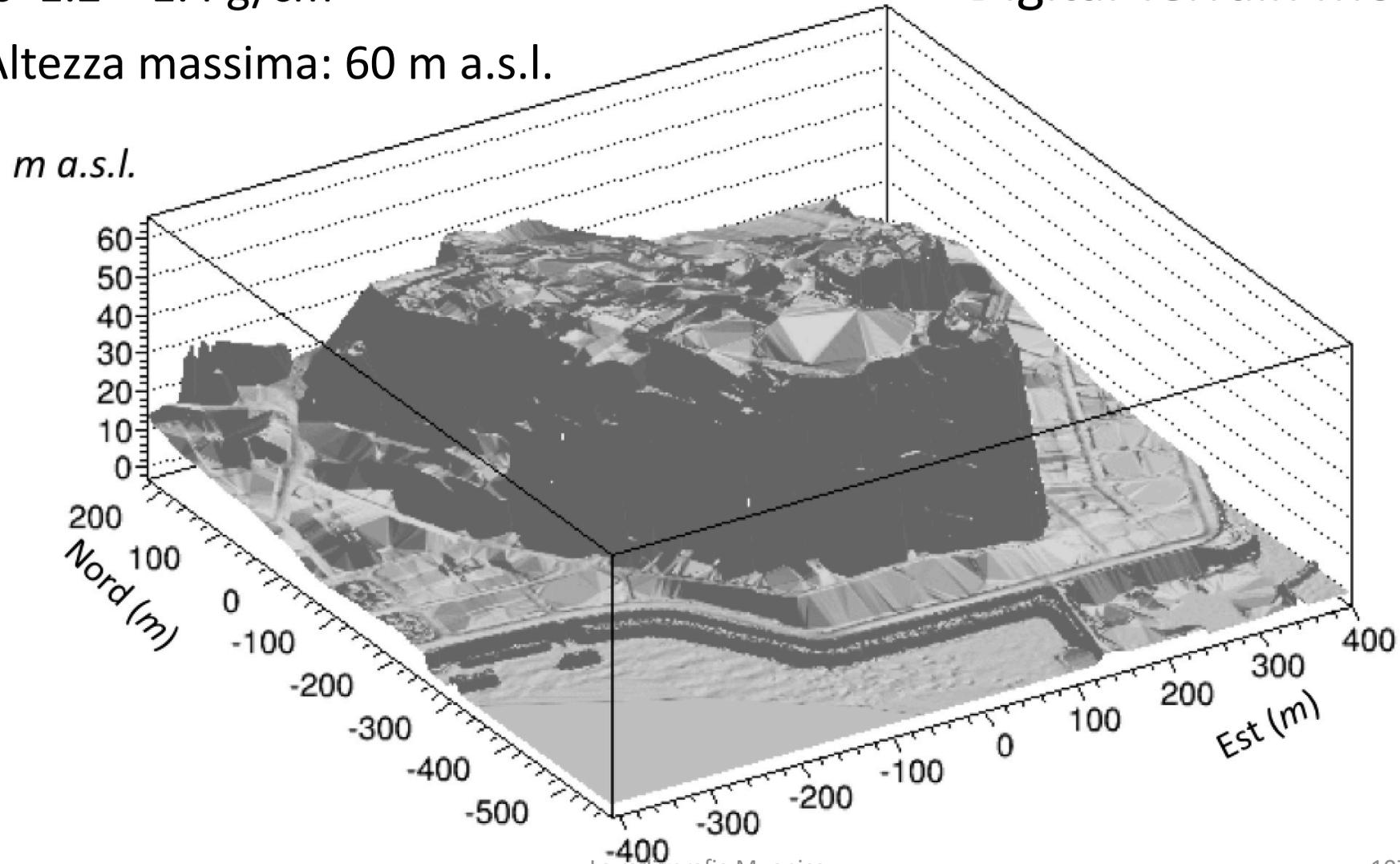
bulk: tufo giallo napoletano

$\rho$  1.2 ÷ 1.4 g/cm<sup>3</sup>

Altezza massima: 60 m a.s.l.

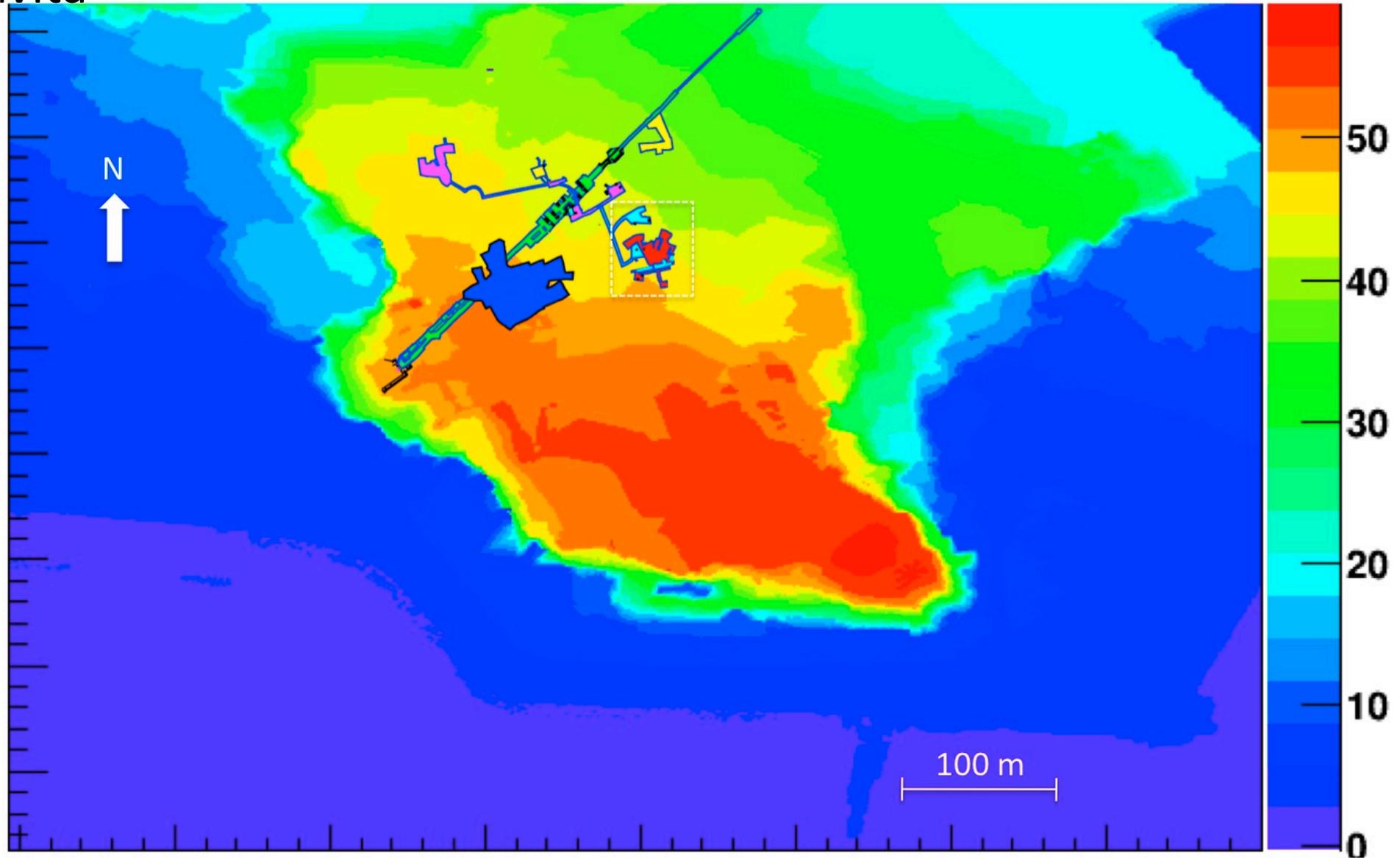
Mt. Echia

Digital Terrain Model



# Mt. Echia

Ricco di cavità



# Il tunnel borbonico

Nel 1853 Ferdinando II di Borbone lo fa realizzare, per scopi militari. Diventa quindi rifugio antiaereo, deposito giudiziario etc. etc.

Restaurato di recente (dal 2005) e inserito nel percorso archeologico sotterraneo.

Un gran numero di strutture sotterranee sono state scoperte.

L'esplorazione continua...



Credits: G. Minin  
Associazione Borbonica  
Sotterranea.

# Il sito di osservazione



12 m sul livello del mare

35 m di profondità

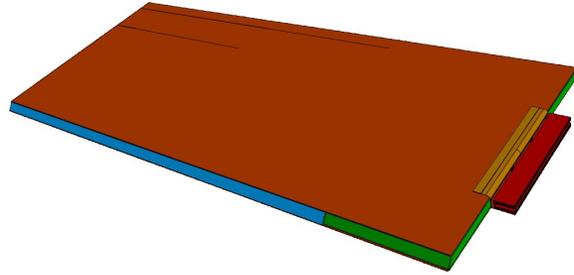
Cisterna del Palazzo di Serra di Cassano



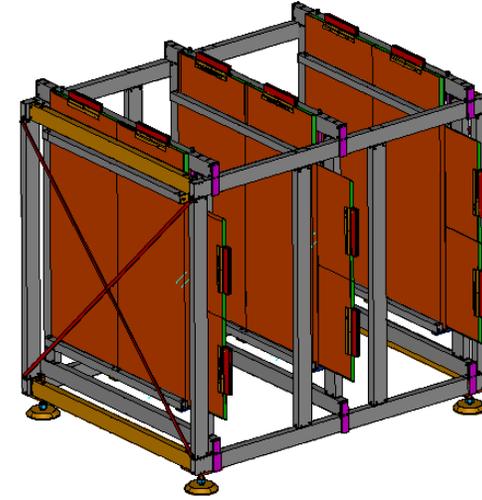
# Il rivelatore MU-RAY

INFN sezione di Napoli e Firenze, UNINA, UNIFI  
INGV-Osservatorio Vesuviano

12 x

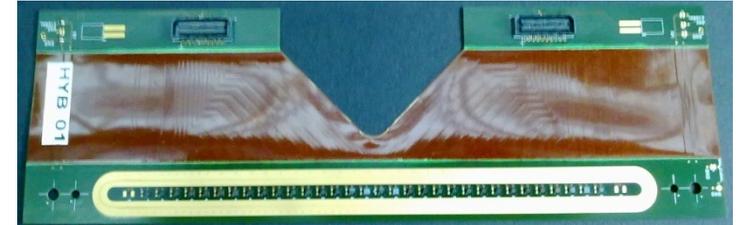
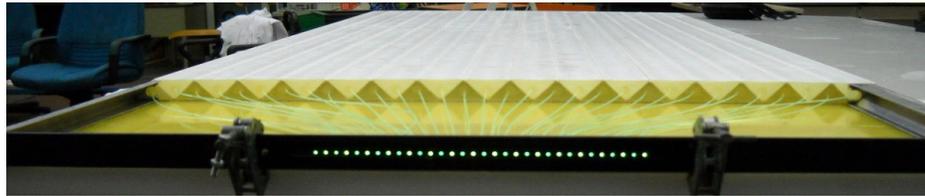
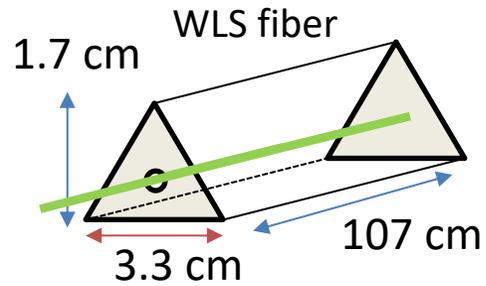


=



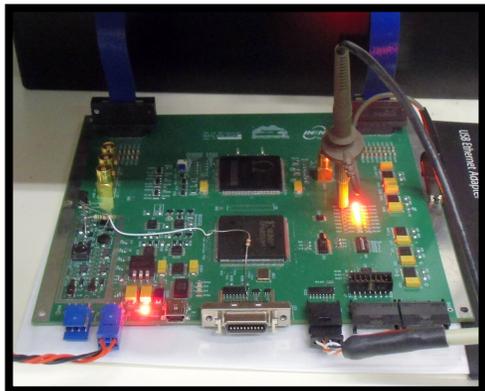
Tracciatore  
3 piani X-Y 1mq

Singolo modulo 1m x 0,5 m 20 kg

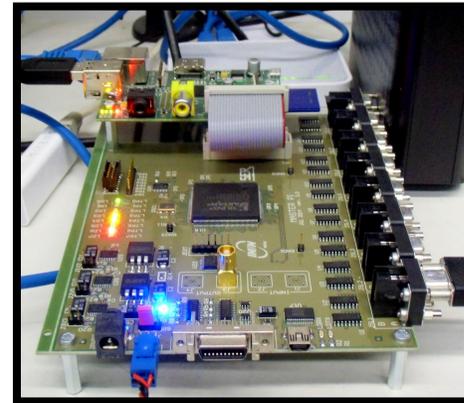


32 Scintillatori plastici + WLS 2-3 mm risoluzione

PCB 32 SiPM termostatabili (FBK)



Elettronica front end  
ASIC EASIROC (OMEGA)  
FPGA  
HV on board  
32 Ch  
2W consumo

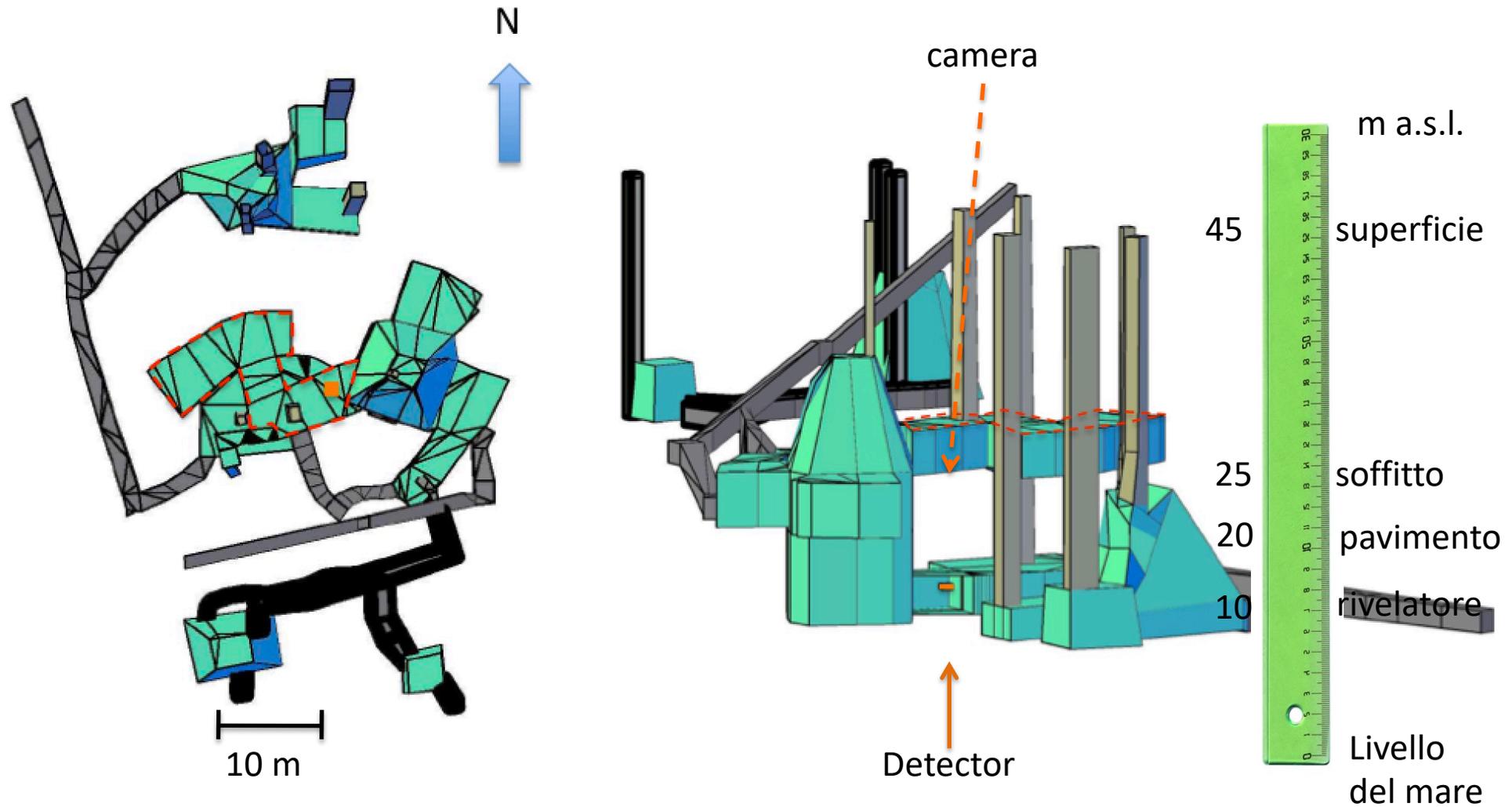


DAQ board  
FPGA +  
Raspberri-Pi  
Sino 32 schede

30W/detector

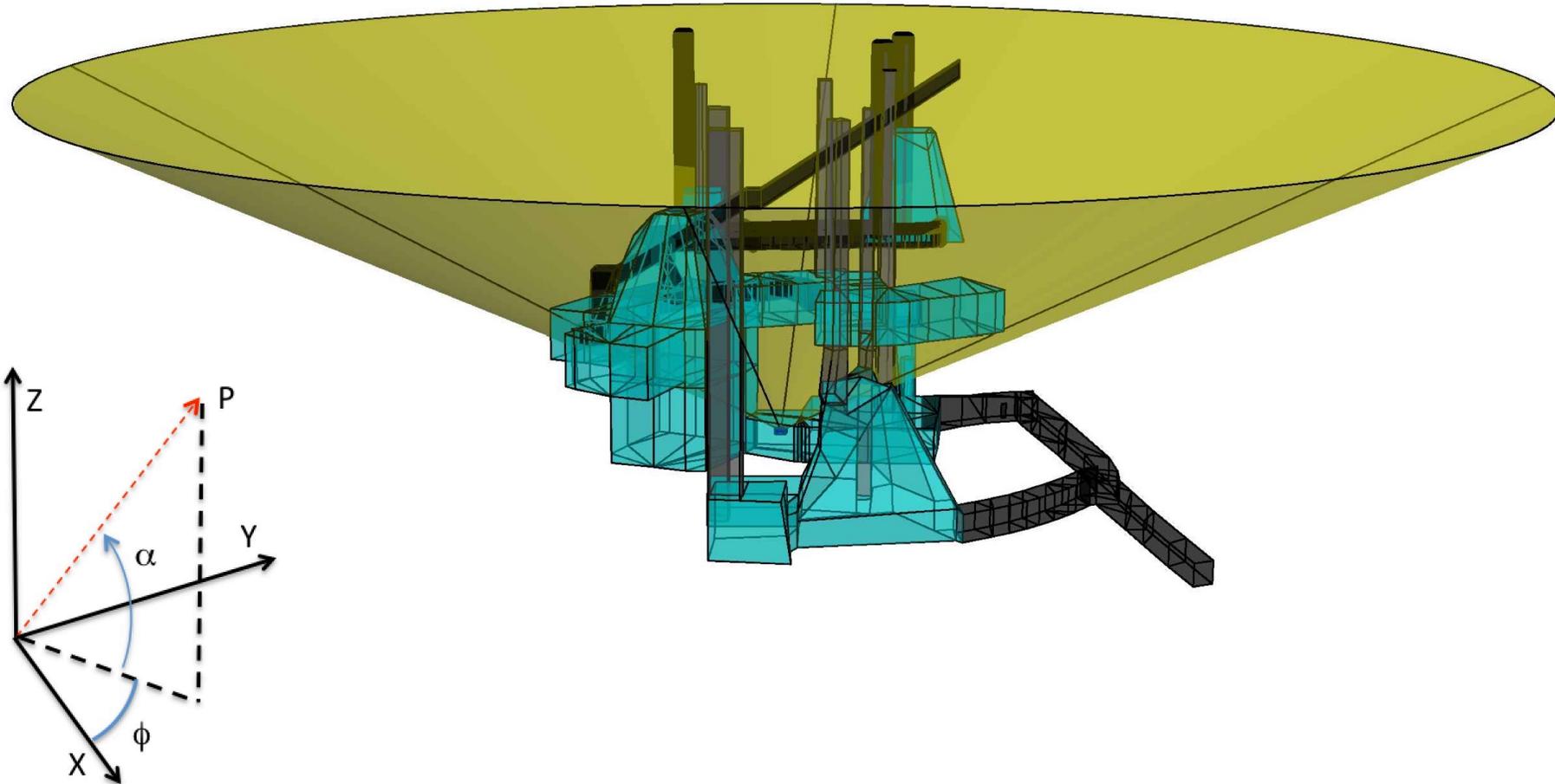
# Il test

“Trovare” una camera vuota posta sopra il rivelatore



# Molte strutture nel cono di ispezione

Accettanza del rivelatore: cono di  $63^\circ$  semiapertura

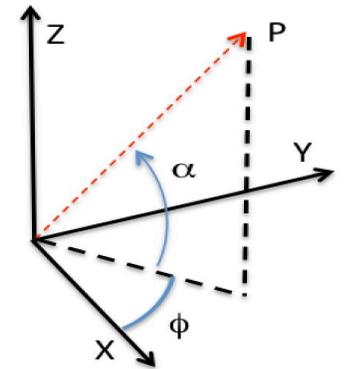
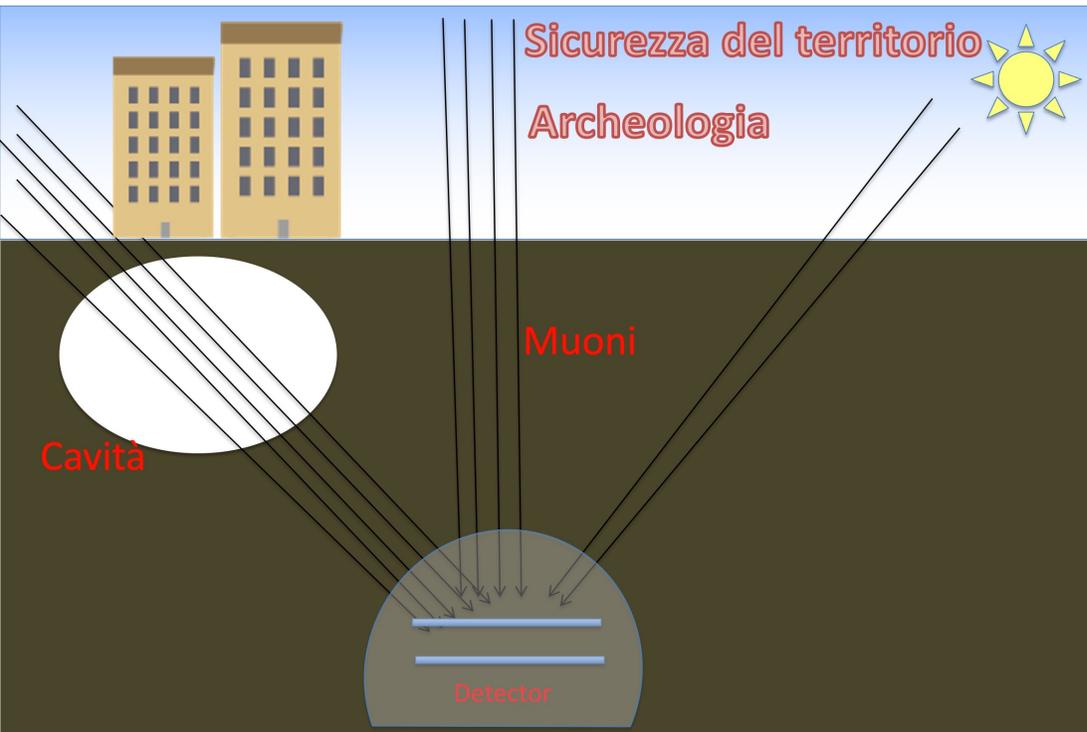


# La trasmissione relativa $R$

$$R(\alpha, \phi) = \frac{T^{mis}}{T^{att}}$$

$$T(\alpha, \phi) = \frac{N^{detc.}}{N^{free\ sky}}$$

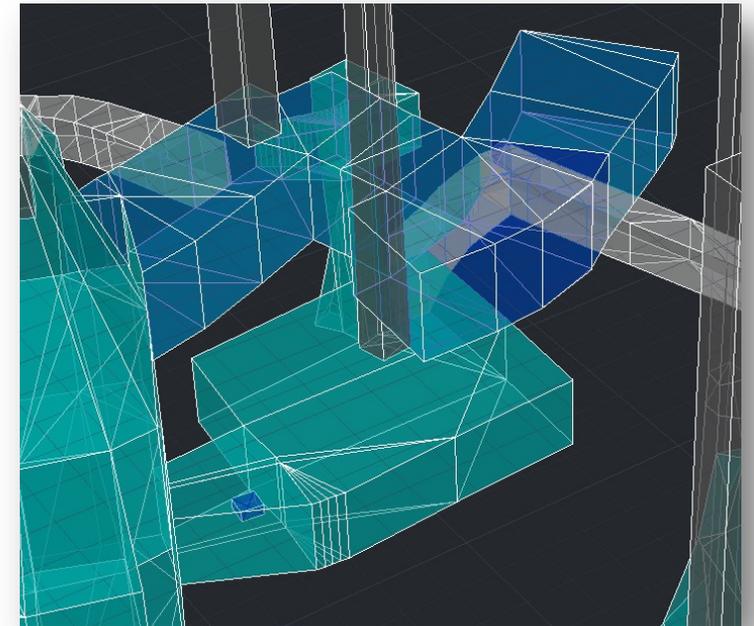
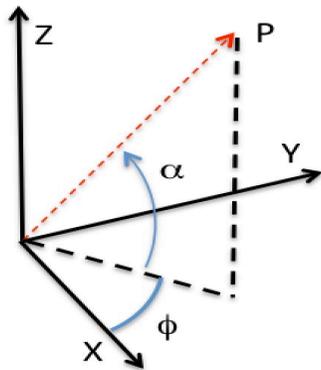
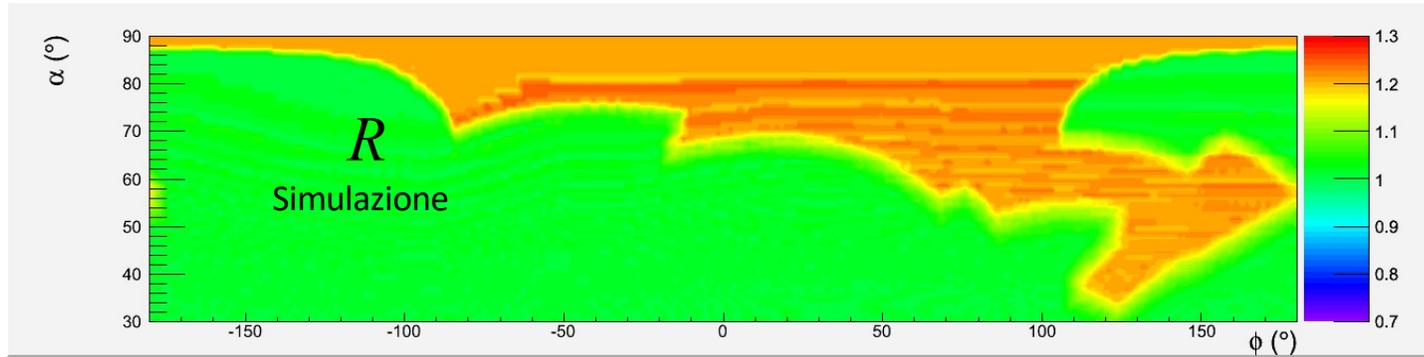
Trasmissione di muoni misurata divisa trasmissione attesa



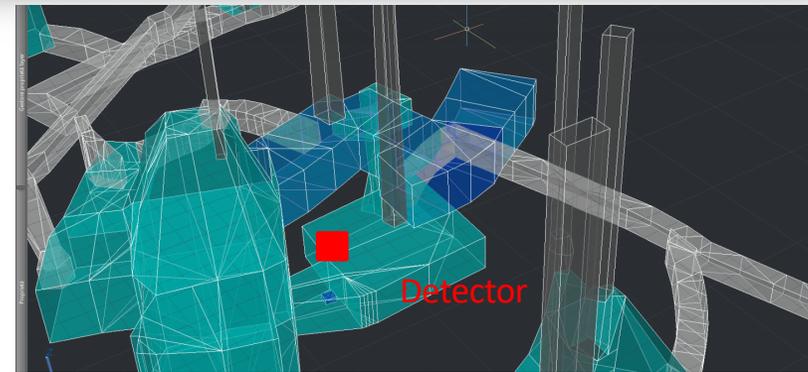
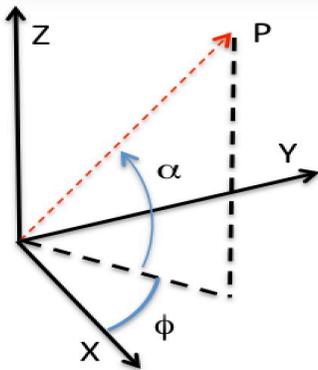
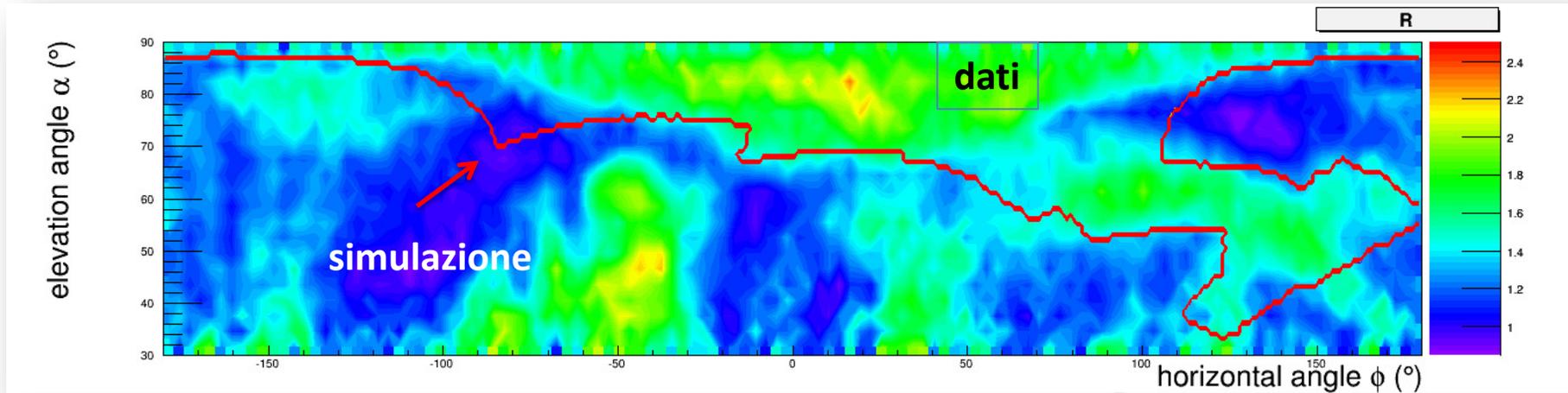
$R \cong 1$  in assenza di cavità

$R > 1$  in presenza di cavità

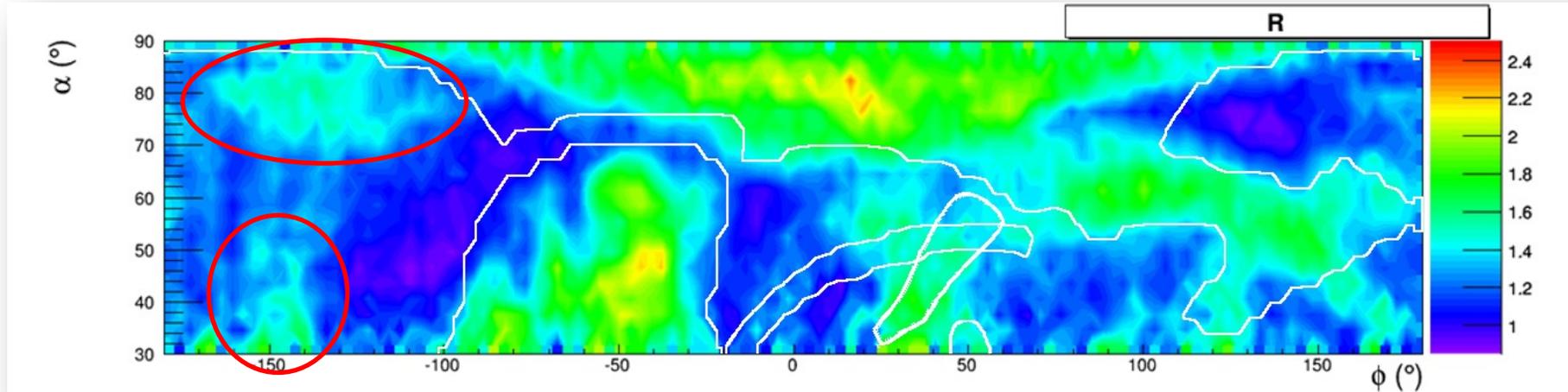
# Segnale atteso per la sola camera di test



# Confronto dati e risultati attesi



# Confronto dati e risultati attesi



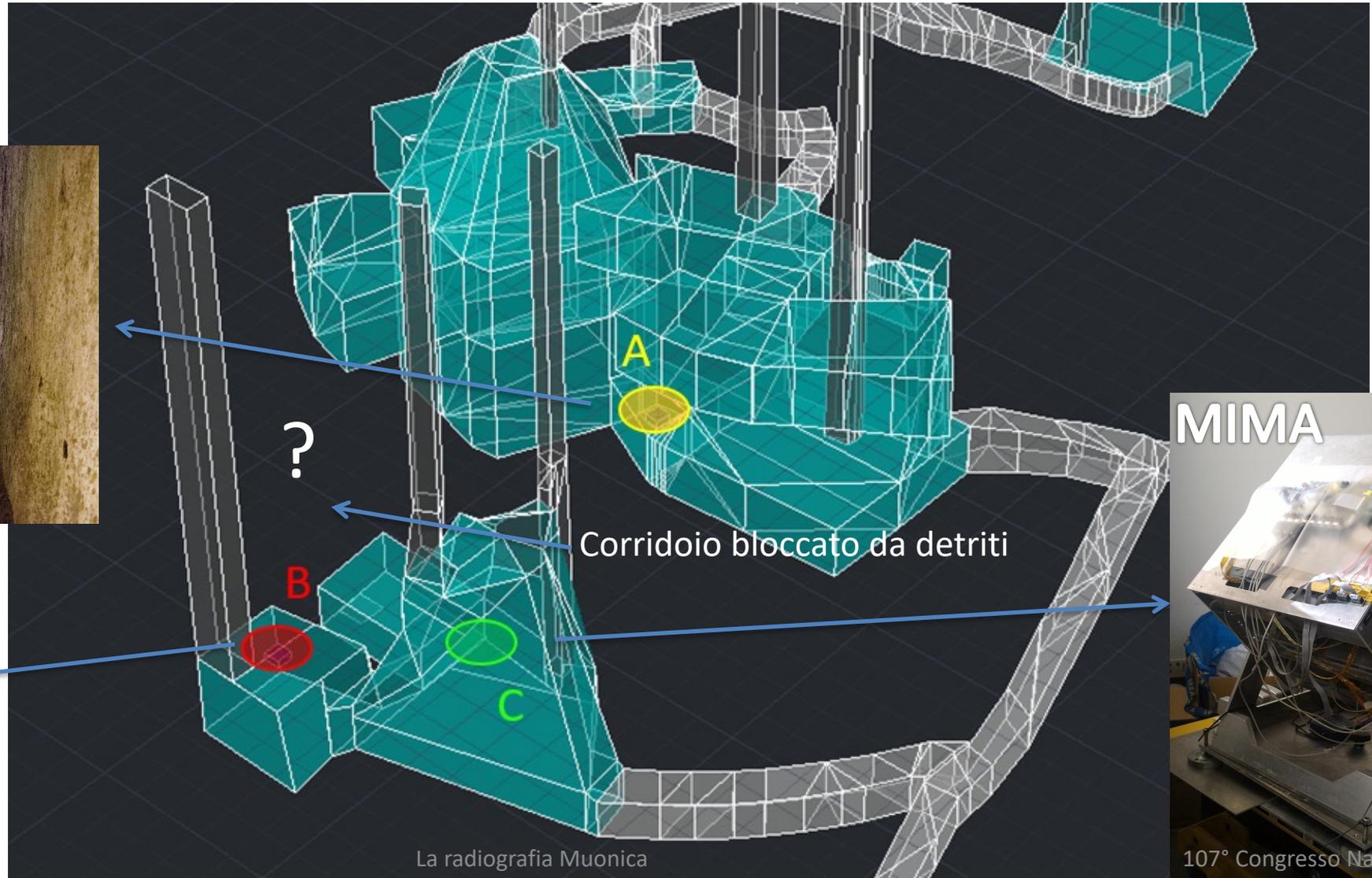
Due segnali non corrispondono a strutture note

# Tre misure con due rivelatori differenti

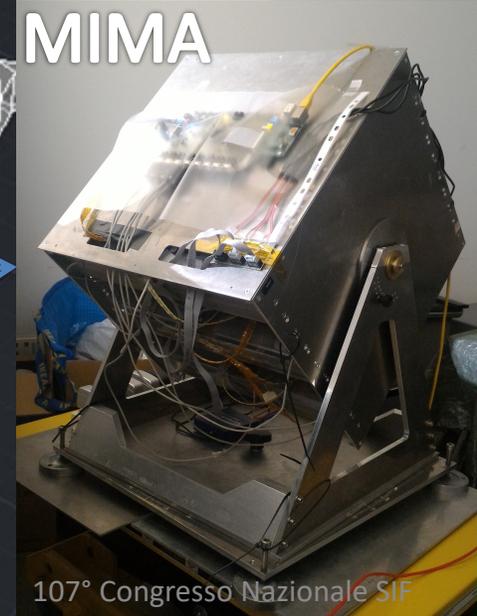
MURAY



G. Saracino



La radiografia Muonica

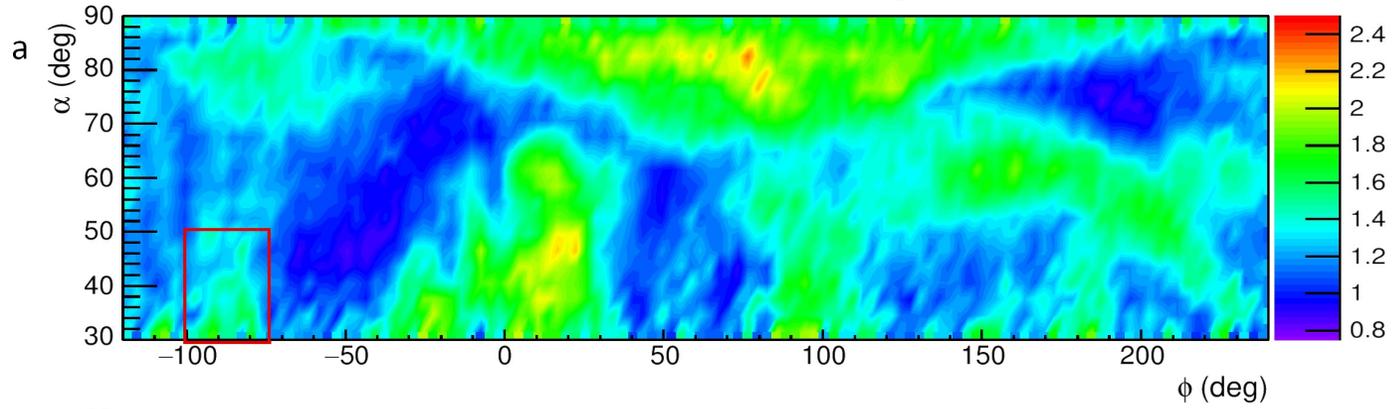


MIMA

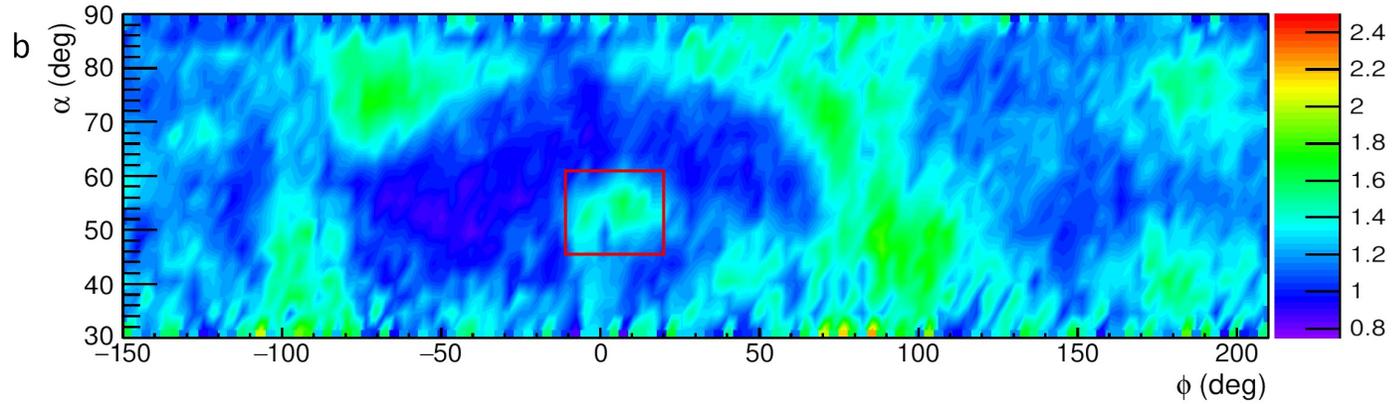
107° Congresso Nazionale SIF

# Tre segnali

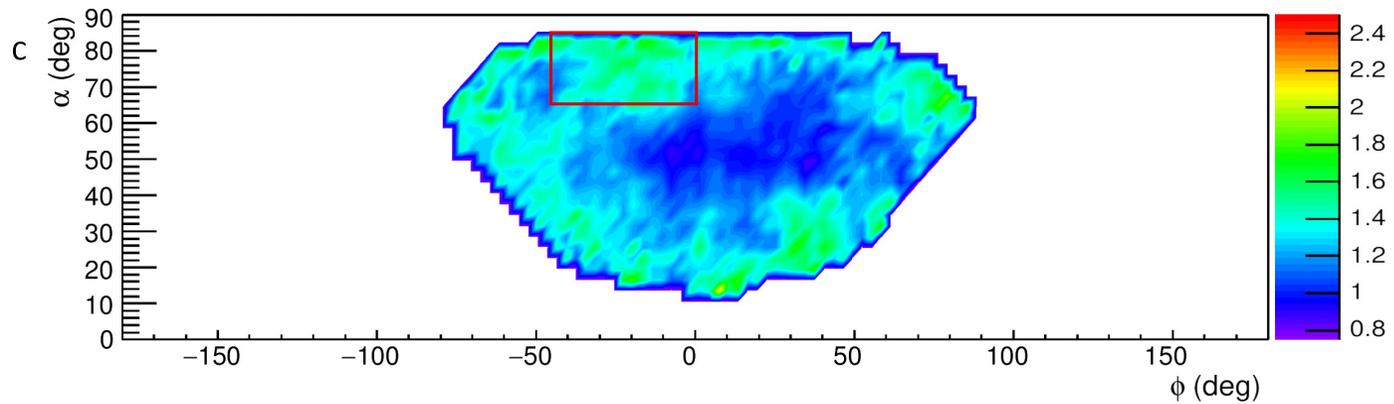
**A**



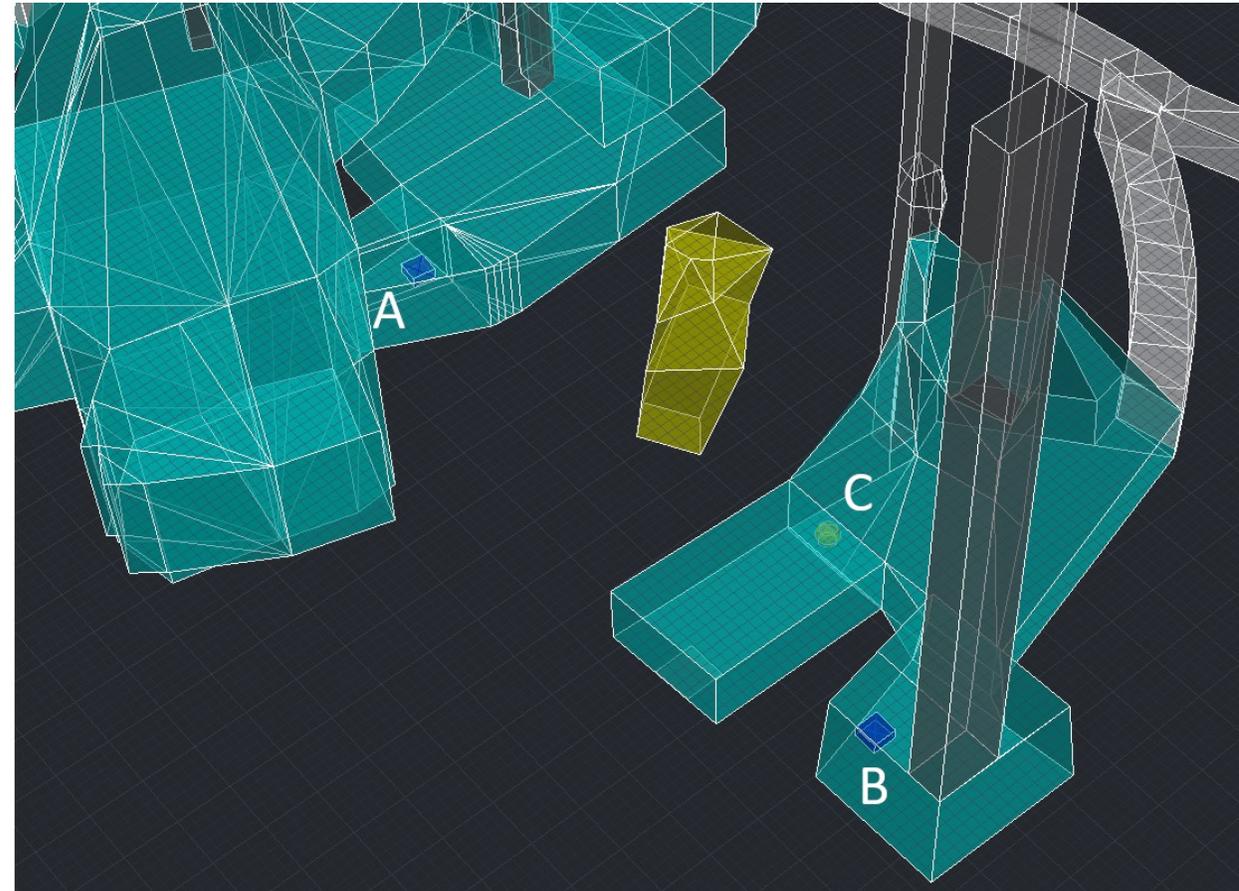
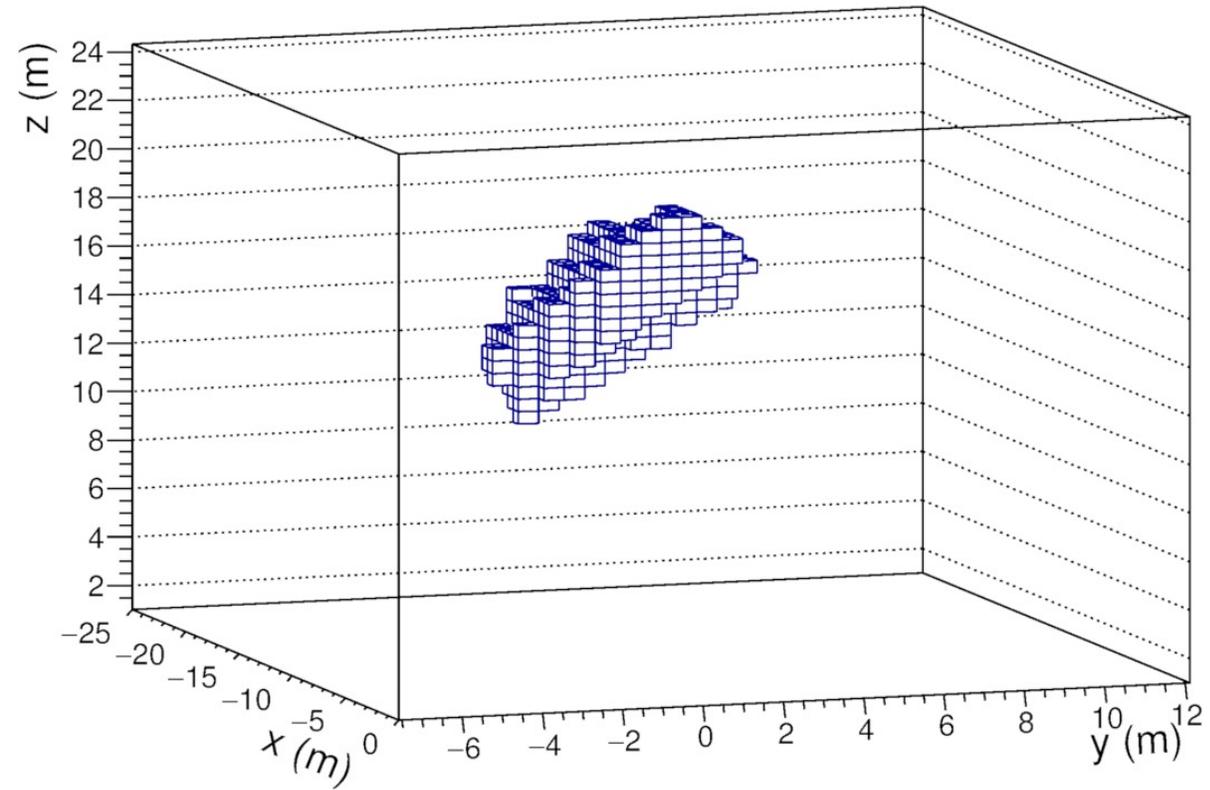
**B**



**C**



# Algoritmo di ricostruzione 3D



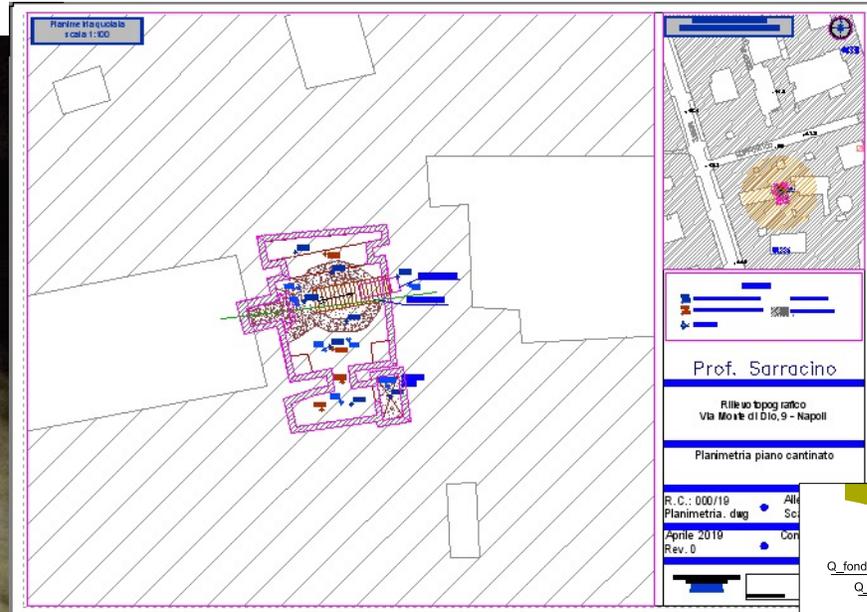
# Algoritmo di ricostruzione 3D

Riportando i punti della cavità in superficie si è localizzata l'area in cui si poteva trovare un ingresso



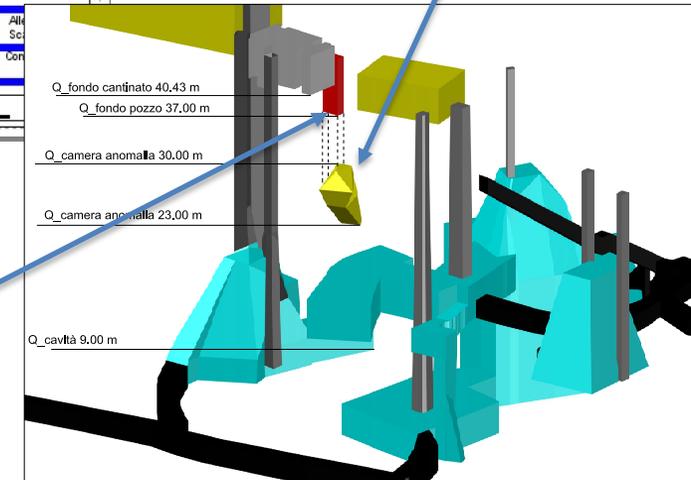
# Sopralluogo

individuata una botola con cantina sottostante ed un pozzo ostruito che potrebbe mettere in comunicazione la camera nascosta con la superficie



Cavità individuata con la muografia

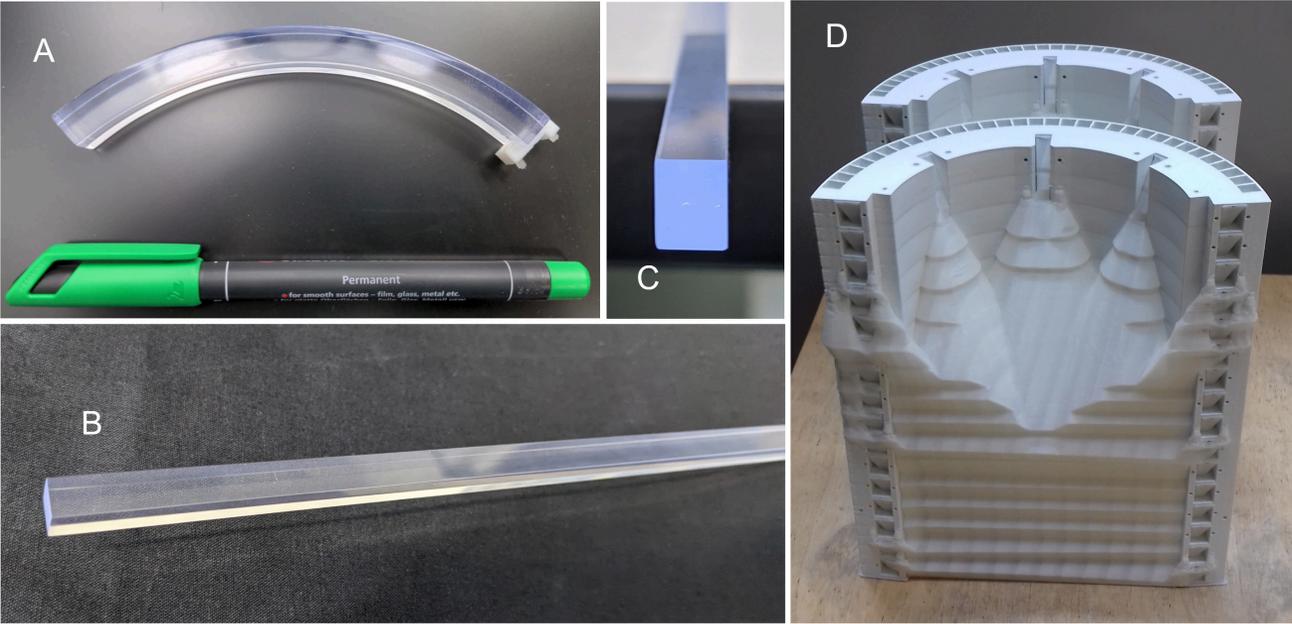
Geo-referenziazione del pozzo dopo il rilievo



Cimmino, L., Baccani, G., Noli, P. *et al.* 3D Muography for the Search of Hidden Cavities. *Sci Rep* 9, 2974 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39682-5>

# Un rivelatore cilindrico per studio da pozzo

# Design of a new cylindrical detector

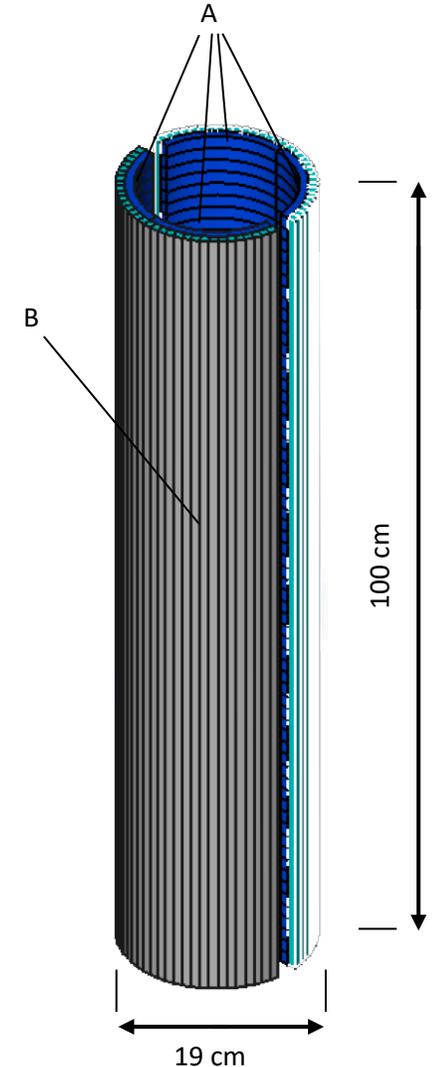


A - arc-shaped scintillator

B - 1 m long plastic scintillator bar

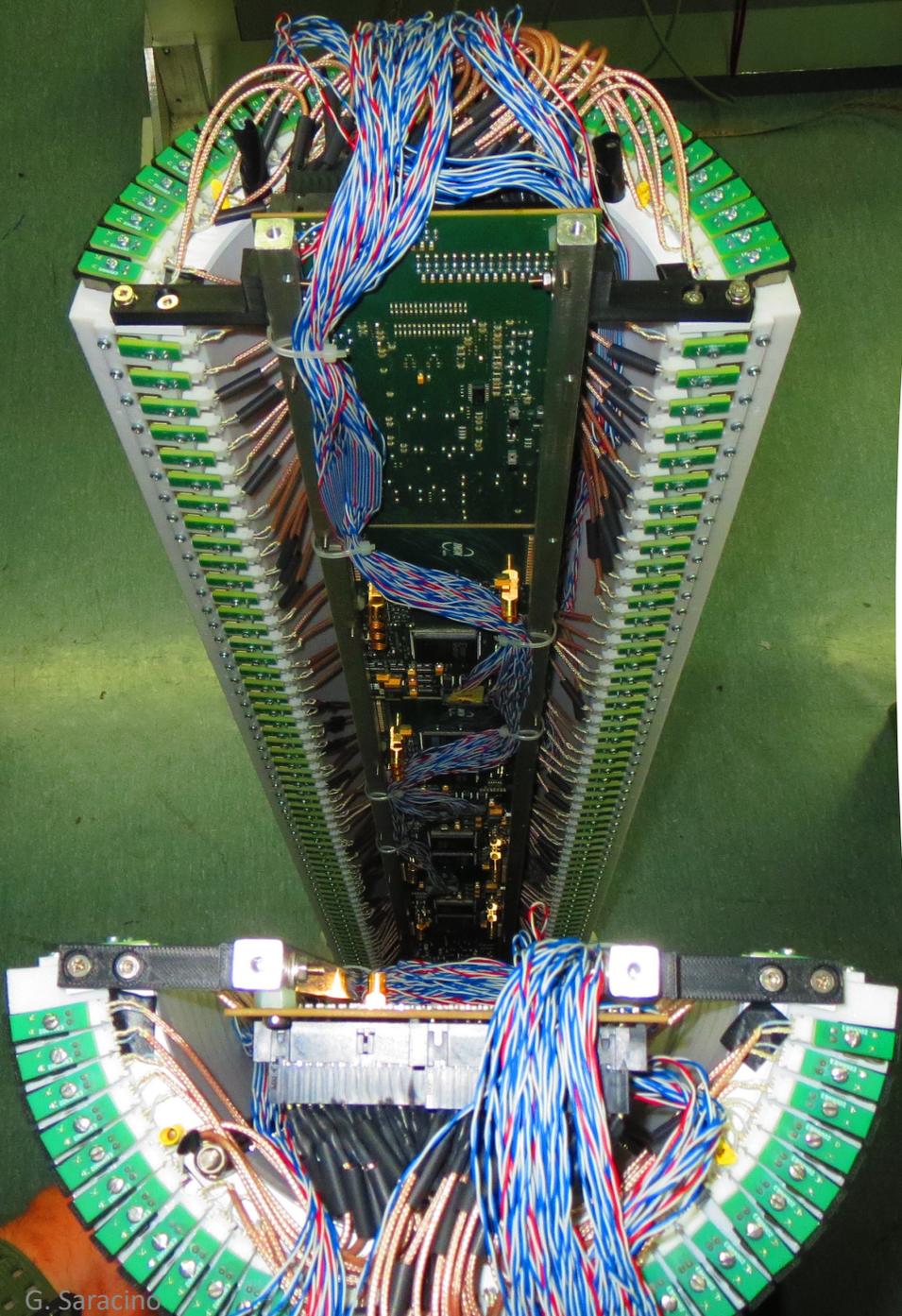
C - magnification of the rectangular section of a bar

D - two printed rack elements in ABS for housing the scintillators before removing the dissolvable support material



- Scintillators are read by Silicon Photomultipliers
- Tiny spacers in the scintillator housing ensures good light transmission
- 1 m long semicylinder obtained by stacking 4 ABS racks
- Electronics housed internally and on the top of the cylinder
- Self-supporting structure inserted in a stainless steel cylindrical shell

# Assembly of the detector



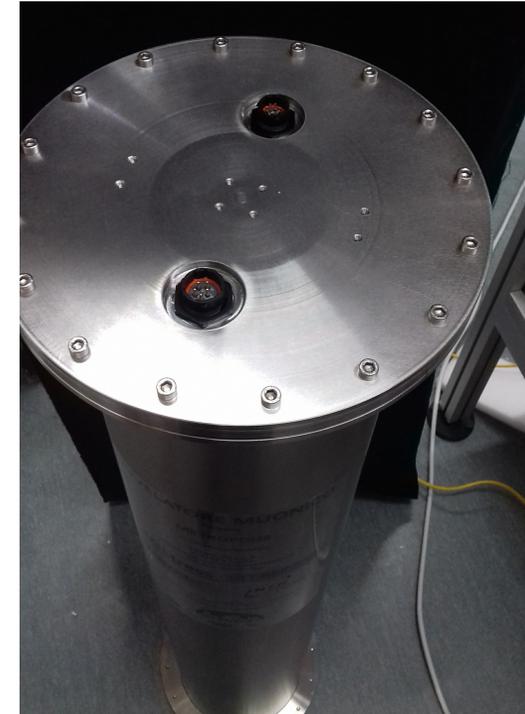
G. Saracino



La radiografia Muonica

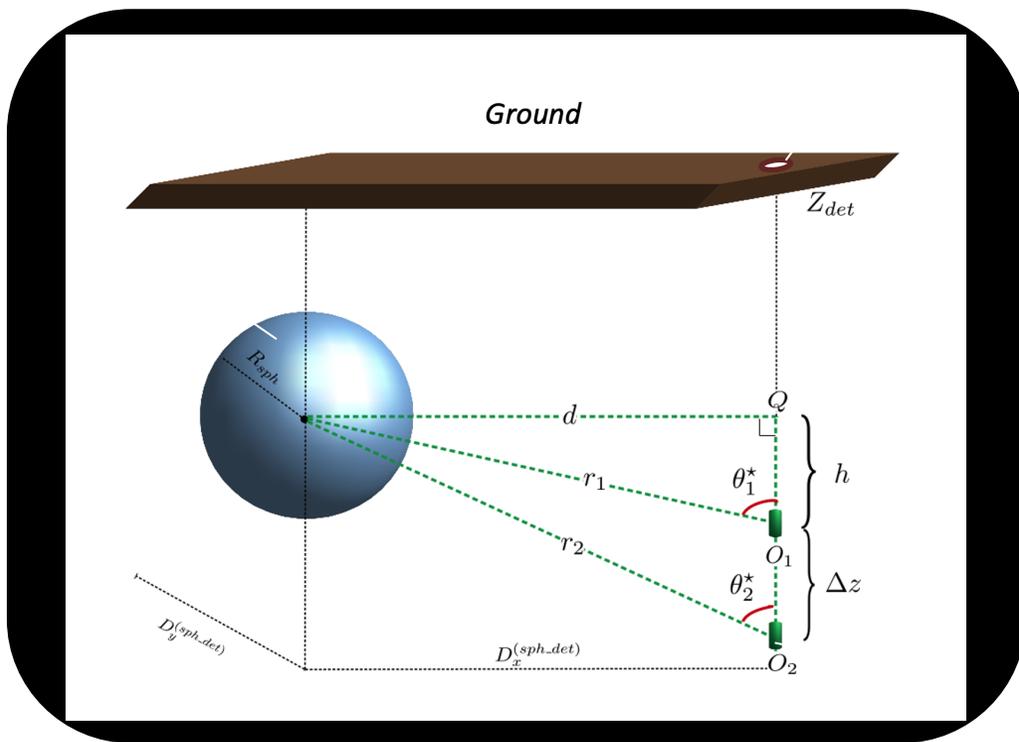
384 SiPm and readout channels)

- The cylinder is finally obtained by fixing the two semicylinders on a steel base which will then close it with the rest of the waterproof stainless steel shell
- Ethernet and power plugs are attached on the top cap

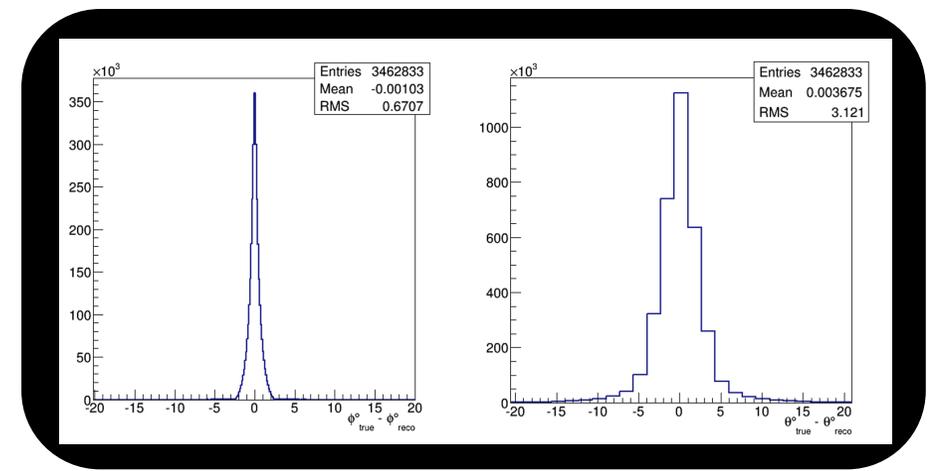
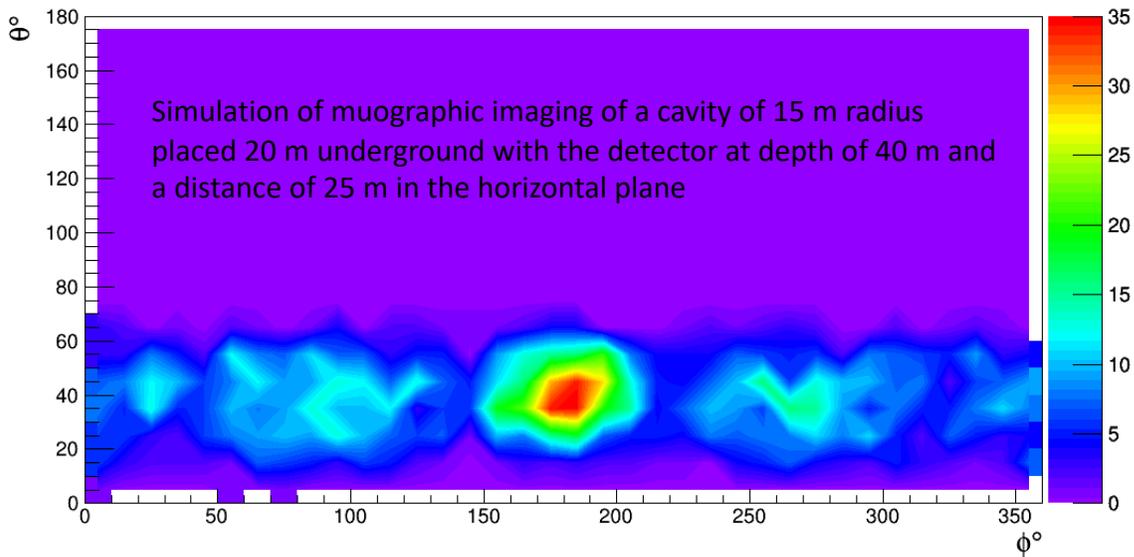


107° Congresso Nazionale SIF

# Expected results



- Algorithms have been developed and tested with synthetic data
- Several simulated measurement campaigns were carried out by changing the position and size of the cavity and positioning the detector.
- An estimate of the position of the cavity can be obtained with the triangulation technique using data acquired from different drilling operations or from the same well at different depths.



- 0.67° expected azimuth resolution
- 3.12° expected zenith angular resolution

# Rivelatore cilindrico: Attualmente in presa dati a Mt Echia



G. Saracino



La radiografia Muonica

Cimmino, L., Ambrosino, F., Anastasio, A. *et al.*

A new cylindrical borehole detector for radiographic imaging with muons.

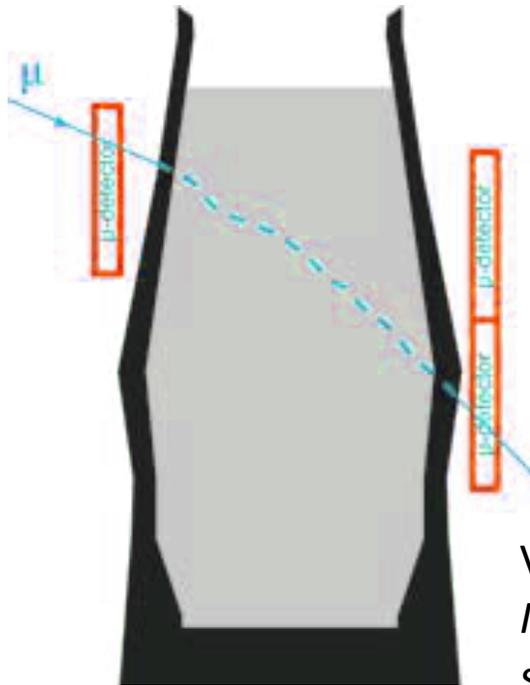
*Sci Rep* **11**, 17425 (2021).

<https://doi.org/10.1038/s41598-021-96247-1>

# Applicazioni Industriali: studio altiforni

Dalla radiografia muonica per scattering a quella per assorbimento

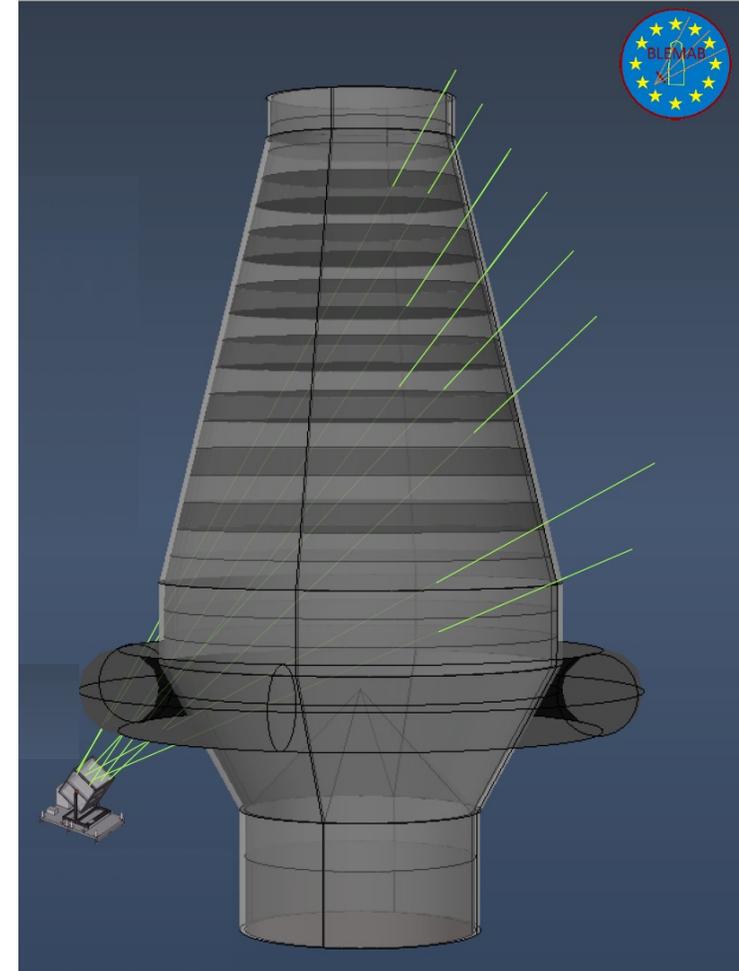
BLEMAB European project –Research Funds for Coal and Steel program (RFCS-2019)



MUSTEEL

Vedi presentazione Diletta Borselli:  
*Il progetto europeo BLEMAB: La radiografia muonica come strumento di maging in ambito industriale.*

Sezione 6



# Altre applicazioni in Italia

Settore archeo-minerario: miniera del Temperino



G. Baccani: Muon Radiography of Ancient Mines: The San Silvestro Archaeo-Mining Park (Campiglia Marittima, Tuscany)

Universe 2019, 5, 34; doi:10.3390/universe5010034

# Altre applicazioni in Italia

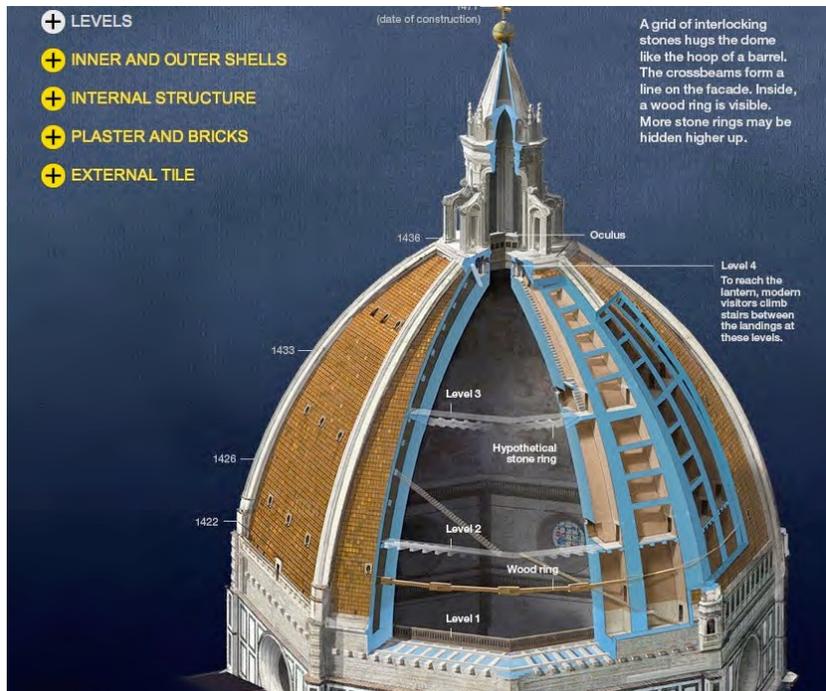
## Dighe



# Altre applicazioni in Italia

## Cupola del Brunelleschi

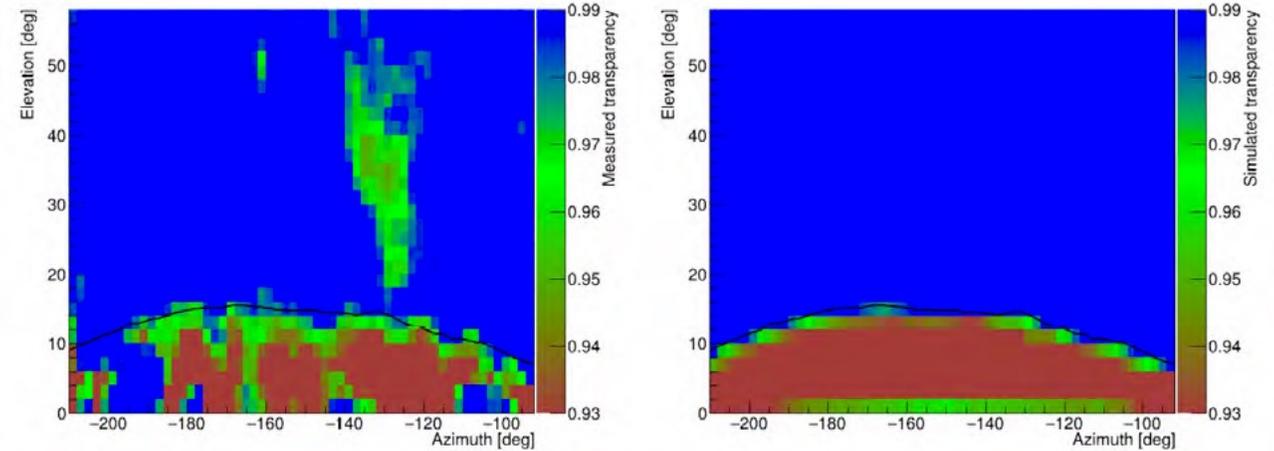
### Studio dello stato di conservazione della struttura



Guardincerri E et al. 2019  
Imaging the dome of Santa Maria del Fiore using cosmic rays.  
Phil. Trans. R. Soc. A 377: 20180136.  
<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2018.0136>

G. Saracino

## Studio dello stato di conservazione di argini fluviali



Bonechi L et al. 2019 Tests of a novel imaging algorithm to localize hidden objects or cavities with muon radiography.  
Phil. Trans. R. Soc. A 377: 20180063.  
<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2018.0063>

La radiografia Muonica

107° Congresso Nazionale SIF

# Conclusioni

- Molte applicazioni possibili, alcune più promettenti di altre
- Molti gruppi attivi nel mondo
- Spin-off attivi in diversi settori
- Margini di sviluppo notevoli, soprattutto sugli algoritmi e l'ingegnerizzazione