



# Radiografia Muonica

(come vediamo i raggi cosmici e cosa ci permettono di vedere...)

Nicola D'Ambrosio  
([nicola.dambrosio@lngs.infn.it](mailto:nicola.dambrosio@lngs.infn.it))

# Programma

- ▶ Breve accenno ai Raggi Cosmici ed ai Muoni ...e loro importanza per la....  
....Radiografia Muonica
- ▶ Rivelatori di muoni
- ▶ Applicazioni pratiche

# Partiamo dalla radiografia con i raggi X

I raggi X sono di solito usati per guardare all'interno del corpo umano e di oggetti di piccole dimensioni.

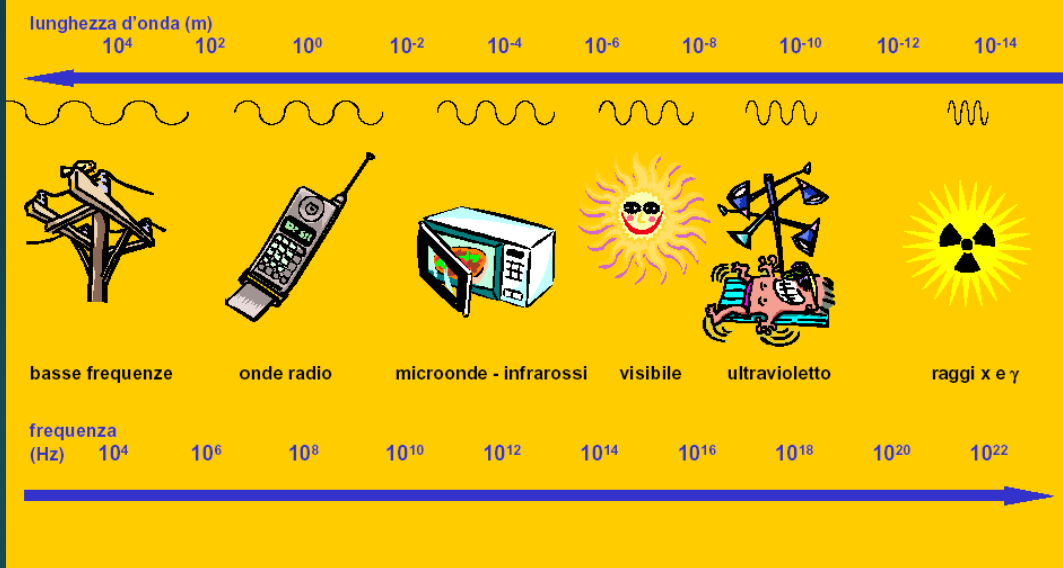
I raggi X furono scoperti nel 1875 e studiati da Rontegen a partire dal 1895.



# Raggi X

...fotoni

## RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE



Riescono ad attraversare la materia....

Quanta?

Dipende dall'energia e dalla densità del materiale da attraversare

densità = massa/volume

acqua 1g/cm<sup>3</sup>

cemento 2,4 g/ cm<sup>3</sup>

granito 2,7 g/ cm<sup>3</sup>

piombo 11,2 g/ cm<sup>3</sup>

oro 19,3 g/ cm<sup>3</sup>

aria 1,3 x10<sup>-3</sup> g/ cm<sup>3</sup>

Limite pratico massimo = 1 metro cemento

1 cm piombo = 4,6 cm cemento = 11 cm acqua = 86 m aria

E se volessimo vedere all'interno di oggetti più grandi del corpo umano e oltre il limite di un metro, come ad esempio un vulcano?

Dovremmo cercare una radiazione o particella con l'energia necessaria ad attraversare qualche chilometro di materia.

Ciò che cerchiamo proviene dallo spazio profondo. I raggi cosmici primari sono originati da eventi astronomici estremi e consistono di particelle cariche che viaggiano nello spazio e ...verso la terra.

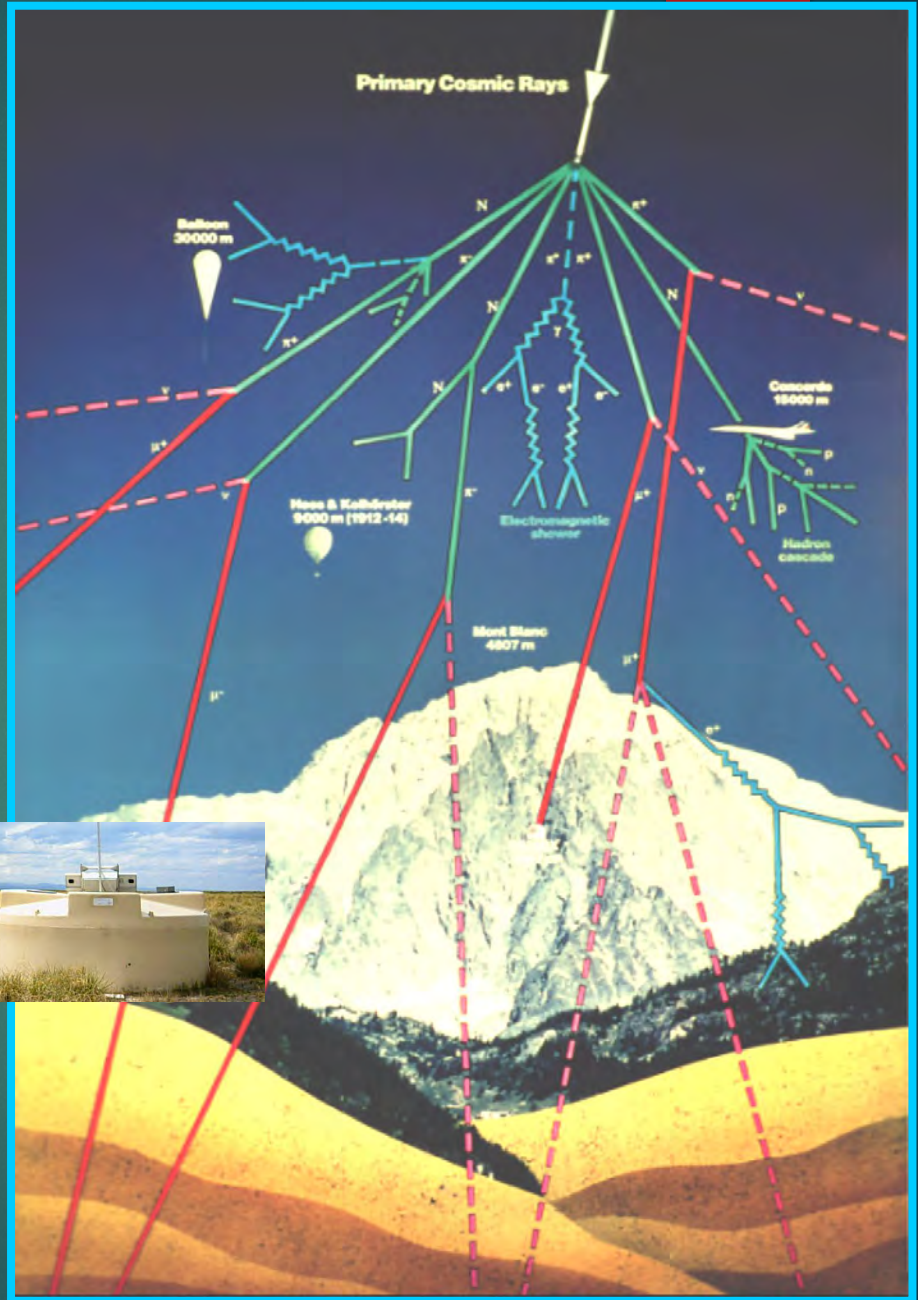
# I RAGGI COSMICI

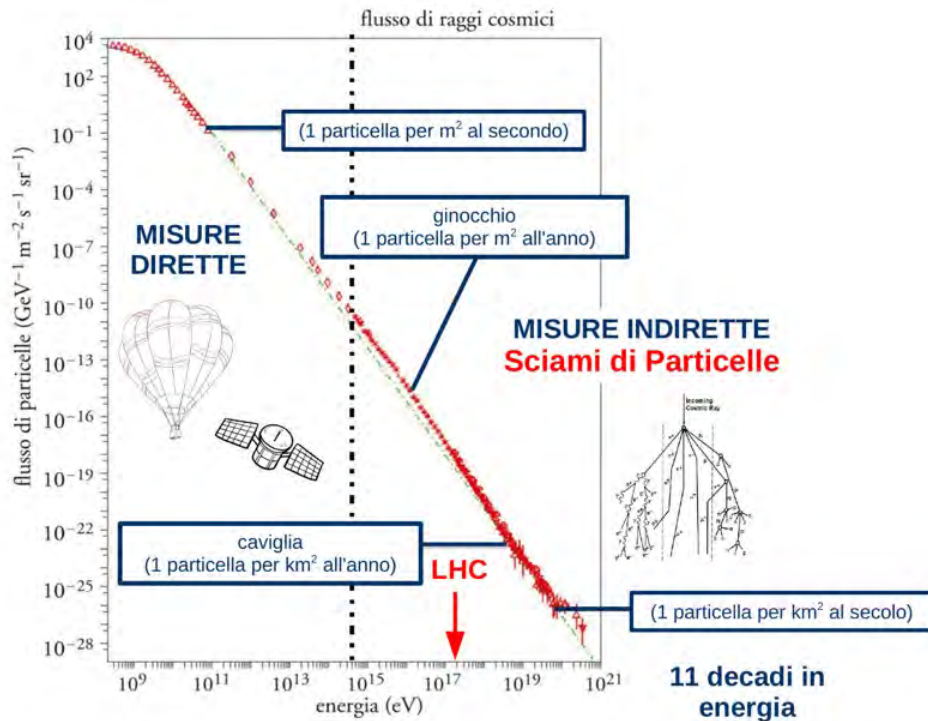
... una pioggia incessante di particelle elementari scaturisce, a ridosso della stratosfera, dalle collisioni tra i raggi cosmici primari e gli atomi lì presenti.

Diversi studi sono in Corso per determinare l'origine dei raggi cosmici

Sono principalmente protoni (nuclei atomici) ad alta energia

Si studiano sulla terra e nello spazio

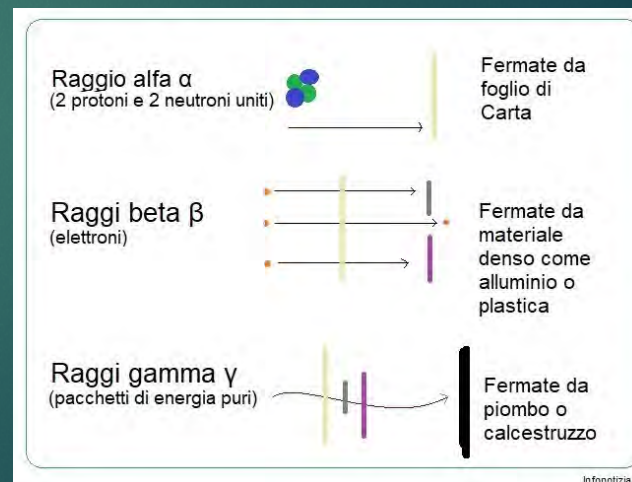
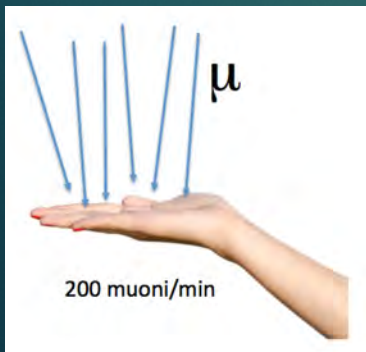




32 decenni in intensità

11 decenni in energia

A livello del mare arrivano soprattutto muoni ( $\mu$ ), particelle altamente penetranti



# I MUONI

I Muoni sono delle particelle elementari come gli elettroni, stessa carica (negativa) ma hanno una massa maggiore di circa 200 volte, e possono penetrare a fondo nella materia.

Hanno origine da decadimento di altre particelle di massa maggiore (pioni e kaoni)

Queste particelle possono essere create con acceleratori di particelle (es. CERN) oppure dai Raggi Cosmici .

Non hanno carica nucleare e «vedono» quasi solo i nuclei degli atomi. I nuclei occupano una piccolissima frazione del volume dell'atomo:

il muone che attraversa l'atomo subisce una piccolissima deviazione (.oltre ad una piccola perdita di energia)

Le deviazioni si sommano fino a produrne una con un angolo misurabile



# ... I MUONI

Sono delle particelle «instabili» e decadono in 2,2 micro secondi che a quasi la velocità della luce da un percorso di circa 600 metri  
probabilità di raggiungere la superficie terrestre  $\sim 10^{-7}$

Allora come fanno a raggiungere la superficie terrestre ?

Qui entra in gioco la relatività ristretta -> a velocità prossime a quella della luce per il muone in movimento il tempo rallenta e questo gli permette di percorrere diversi chilometri  
probabilità di raggiungere la superficie terrestre  $\sim 0,60$

I muoni cosmici si possono trattare come i raggi X nella radiografia abituale

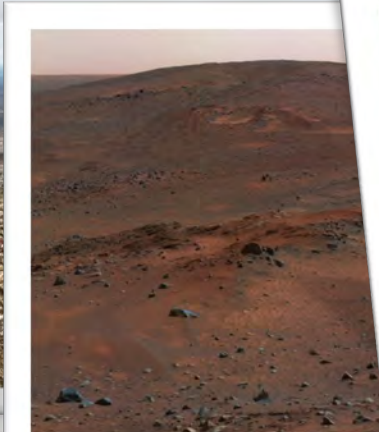
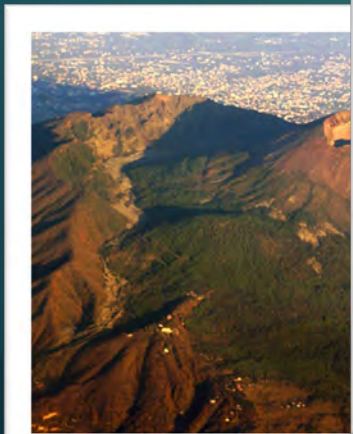
La radiografia Muonica (**Muografia**) è basata sulla misura dell'assorbimento dei Muoni nella materia.

**Trasferimento Tecnologico**

# Perché la Muografia???

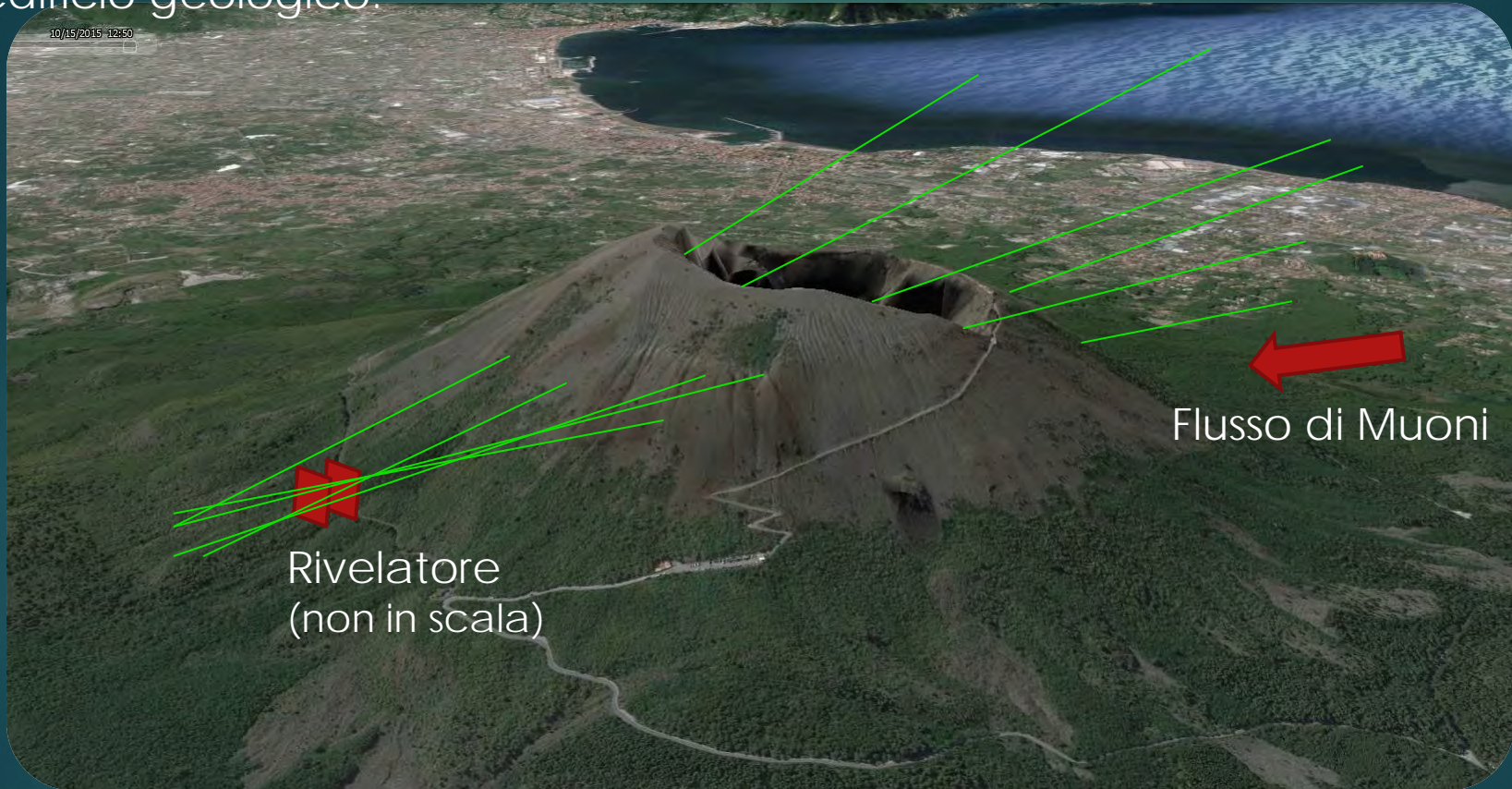
La radiografia Muonica è recentemente diventata sempre più interessante per via delle possibili applicazioni:

- Tomografia di edifici geologici (...Vulcani)
- Prospezioni geologiche non distruttive (ricercar di cavità, archeologia)
- Protezione ambientale contro il traffico di rifiuti radioattivi e la ricerca di discariche abusive
- Misura dell'ammontare di scorie radioattive negli impianti di stoccaggio



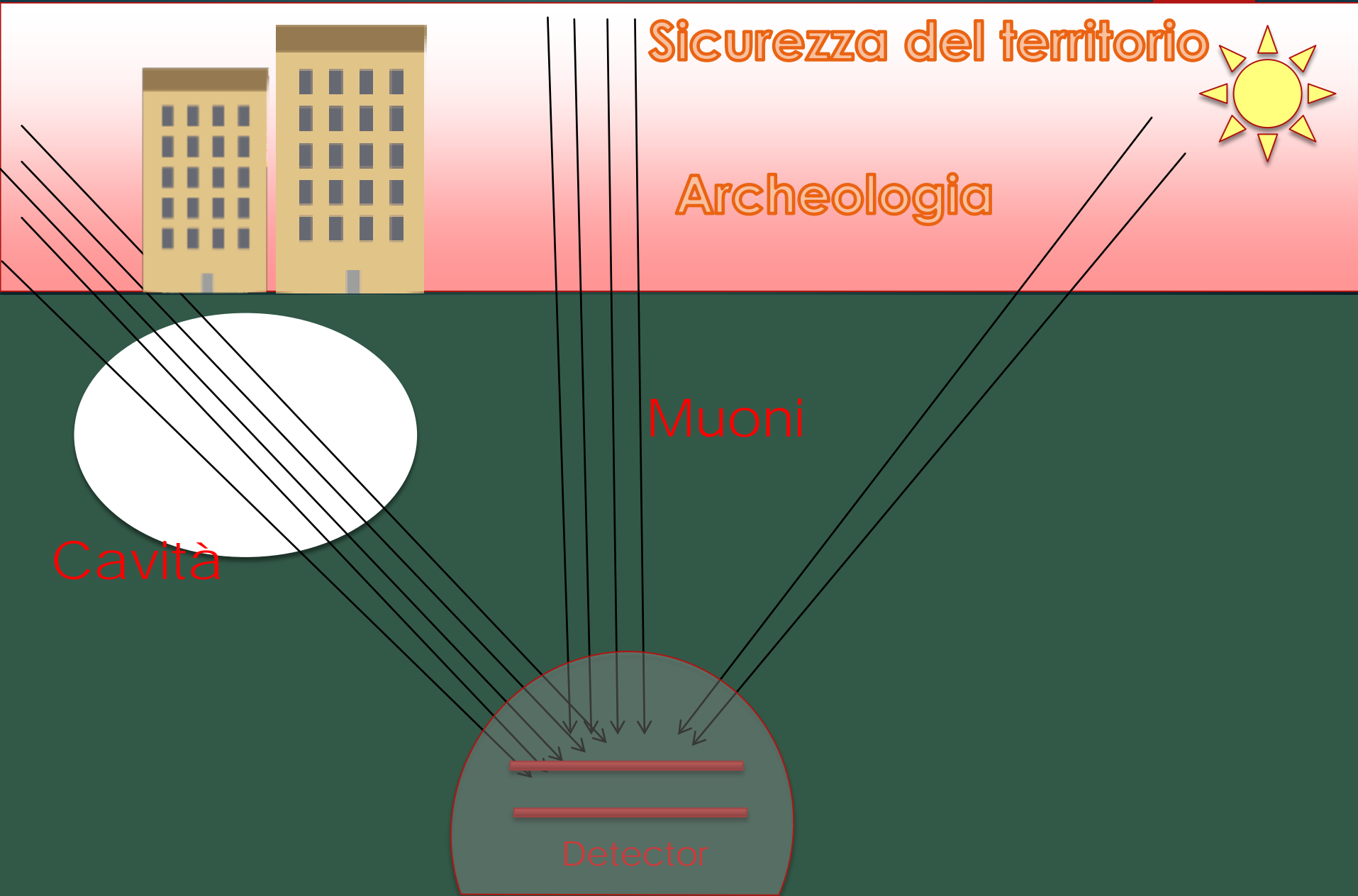
# I Principi della Radiografia Muonica

Un rivelatore piazzato sulle pendici di un vulcano può tracciare la direzione di provenienza dei Muoni e contare quanti hanno attraversato l'edificio geologico.



Misurando il fattore di attenuazione del flusso di Muoni, si può calcolare la densità media della roccia attraversata dalle particelle.

# ...indagine del sottosuolo



# Rivelatore: tracciatore di muoni

- Permette di rilevare la direzione del muone
- La sorgente di muoni non è collimata -> bisogna ricostruire la direzione

## Possibili tecnologie

- Rivelatori elettronici (tempo reale)
- Emulsioni fotografiche (*Emulsioni Nucleari*)  
Elevata risoluzione ...non in tempo reale

# Rivelatori di muoni....



MU-RAY - INFN



TANAKA -ERI



DIAPHANE  
IN2P3



← INFN – LNGS (Italia)  
Università di NAGOYA  
(Giappone)

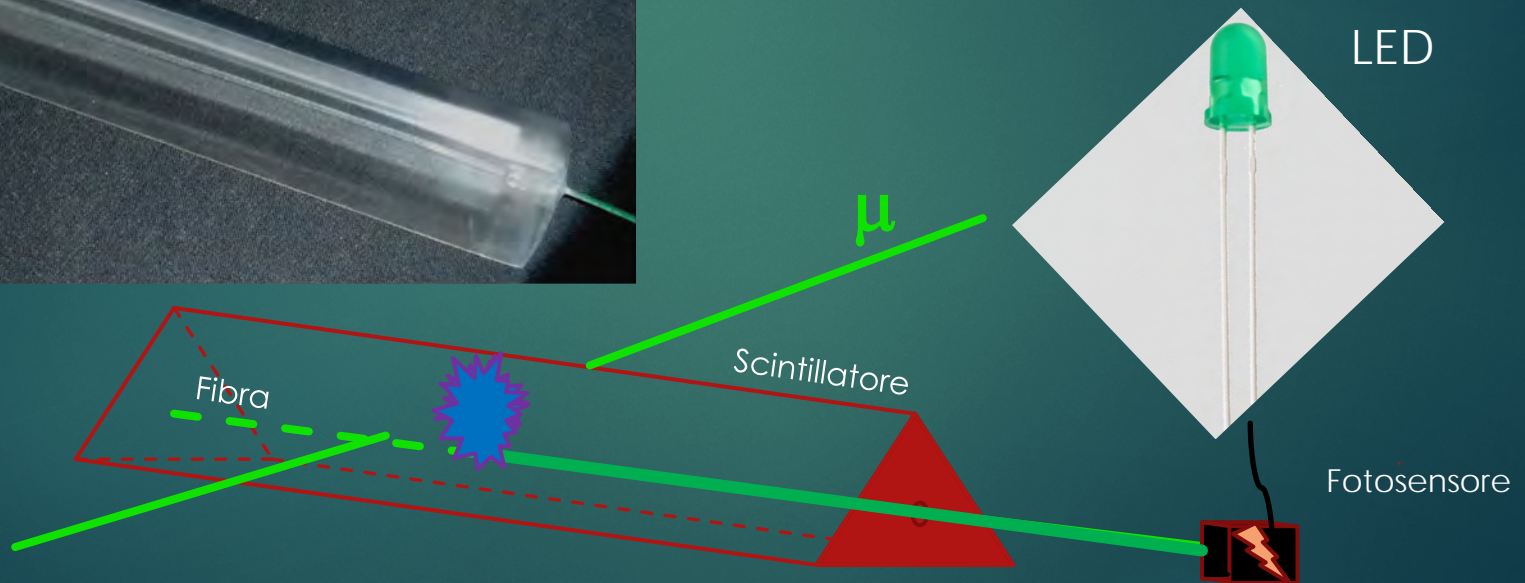
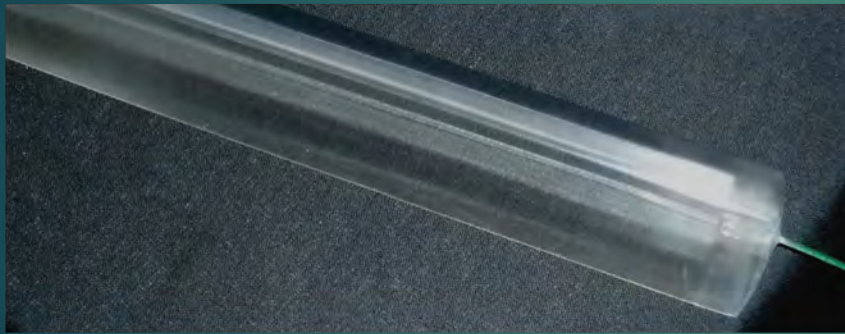
# Tracciare i Muoni mediante la rivelazione di luce Scintillatore + fibra ottica

Scintillatore: emette luce quando interagisce con una particella carica in movimento

Fibra: permette di raccogliere e trasportare la luce a distanza anche su percorsi curvi

Fotosensore: converte il segnale luminoso in un segnale elettrico

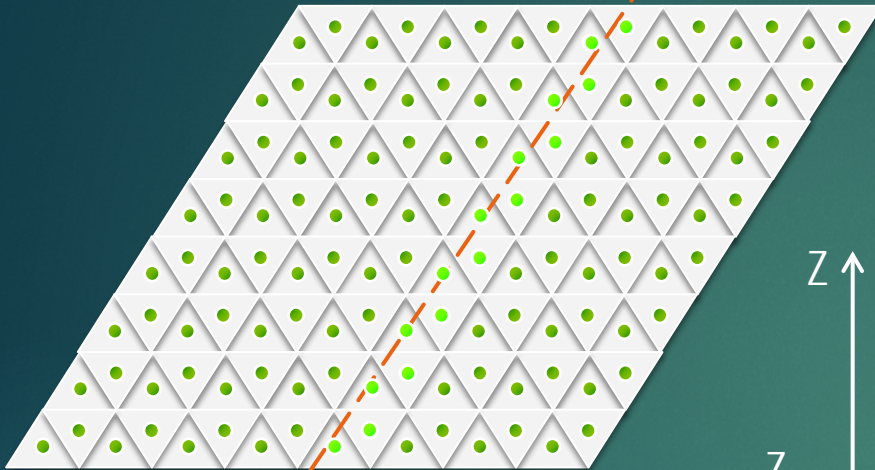
LED: converte un segnale elettrico in un segnale luminoso ( ma di intensità maggiore)



Energia cinetica -> luce -> elettricità -> luce

# Tracciatore di muoni : *elettronico*

Più scintillatori e più fibre ottiche



Le informazioni sul passaggio delle particelle devono essere registrate con un computer per procedere ad una analisi statistica su di un campione di molte tracce

Inoltre non sono necessari tutti i piani di scintillatori, ne bastano in realtà due (per vista) per ricostruire la retta

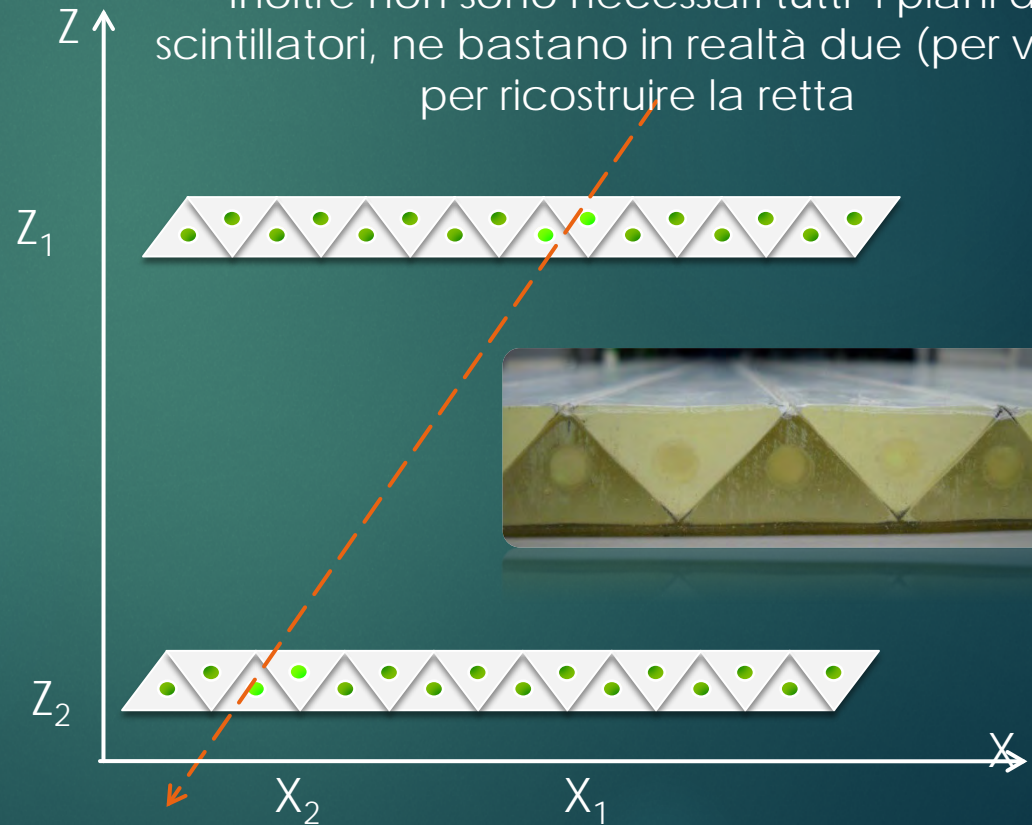


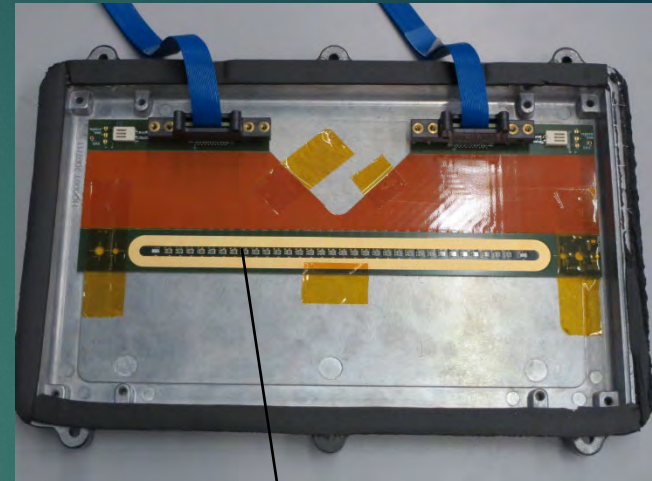
Foto di un modulo base di MURAY



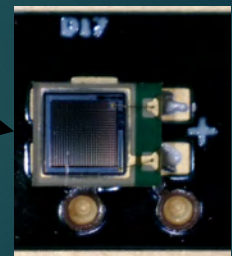
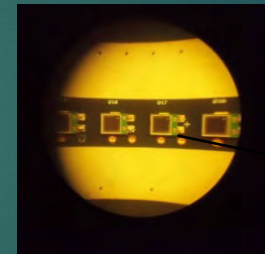
# Tracciatore di muoni : *elettronico*



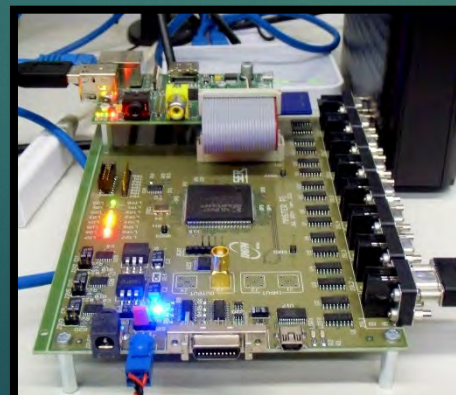
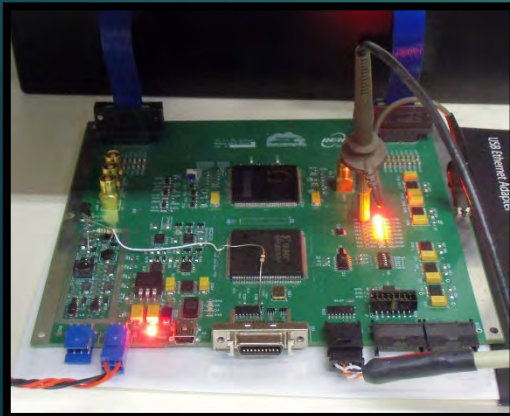
Tracciatore MURAY a scintillatori



Sensori di luce



Elettronica di acquisizione e controllo



Segnale in tempo reale  
Buona risoluzione spaziale ~ 3 mm

# Tracciare i Muoni con le lastre fotografiche (*Emulsioni Nucleari*)

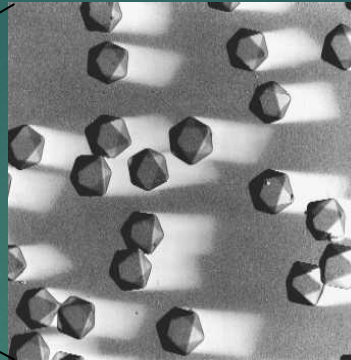
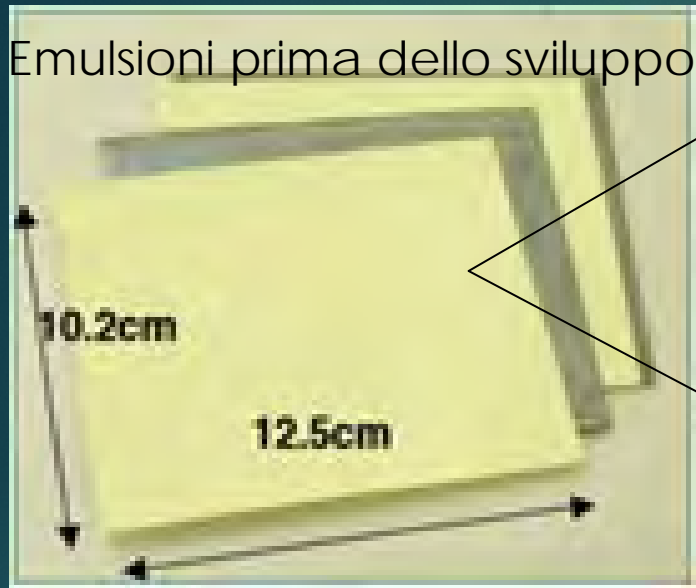
Sono in pratica delle pellicole fotografiche realizzate per *fotografare* le tracce di particelle cariche

Usate sin dall'inizio del secolo scorso negli ultimi decenni sono tornate ad essere Usate in modo massiccio grazie allo sviluppo di sistemi completamente automatici ad alta velocità per la loro analisi (Esp. OPERA)

## Rispetto ai rivelatori elettronici:

- Non danno un segnale in tempo reale (serve svilupparle)
- Hanno una più elevata risoluzione spaziale 0,0003 mm
- Non necessitano di corrente per funzionare

# ...lastre fotografiche come tracciatori



Cristalli di bromuro d'argento (~ 0,3 micron)



Emulsione 50 / micron

supporto 300 micron  
non sensibile

Emulsione 50 micron



Microscopio automatizzato per l'analisi delle emulsioni (LNGS)

# ...lastre fotografiche come tracciatori

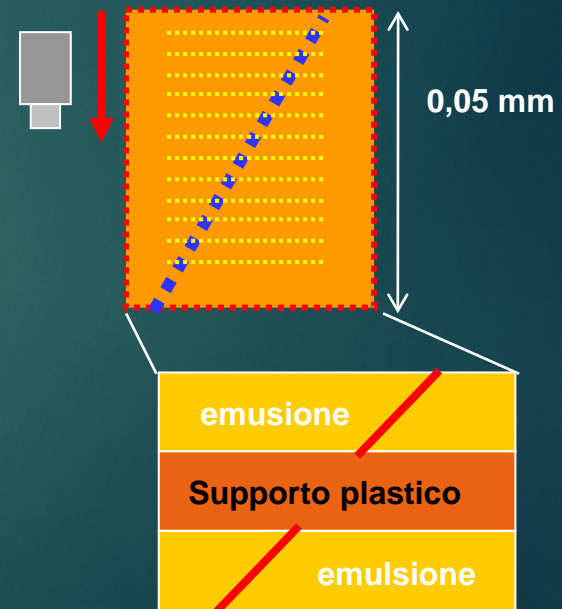


Cosa si vede al microscopio



200  $\mu\text{m}$  (0,2 mm)

Sequenza animata  
20 immagini in  
50 micron di emulsione



# Applicazioni della Radiografia Muonica

Studio dei Vulcani

# Misure sullo Stromboli

Lo Stromboli è uno dei vulcani più conosciuti e attivi al mondo

Conoscerne la struttura interna è molto importante per capire i meccanismi interni

La radiografia muonica può essere una tecnica indipendente per indagare la struttura interna del cono e rivelare la posizione e l'estensione dei condotti che alimentano le continue esplosioni



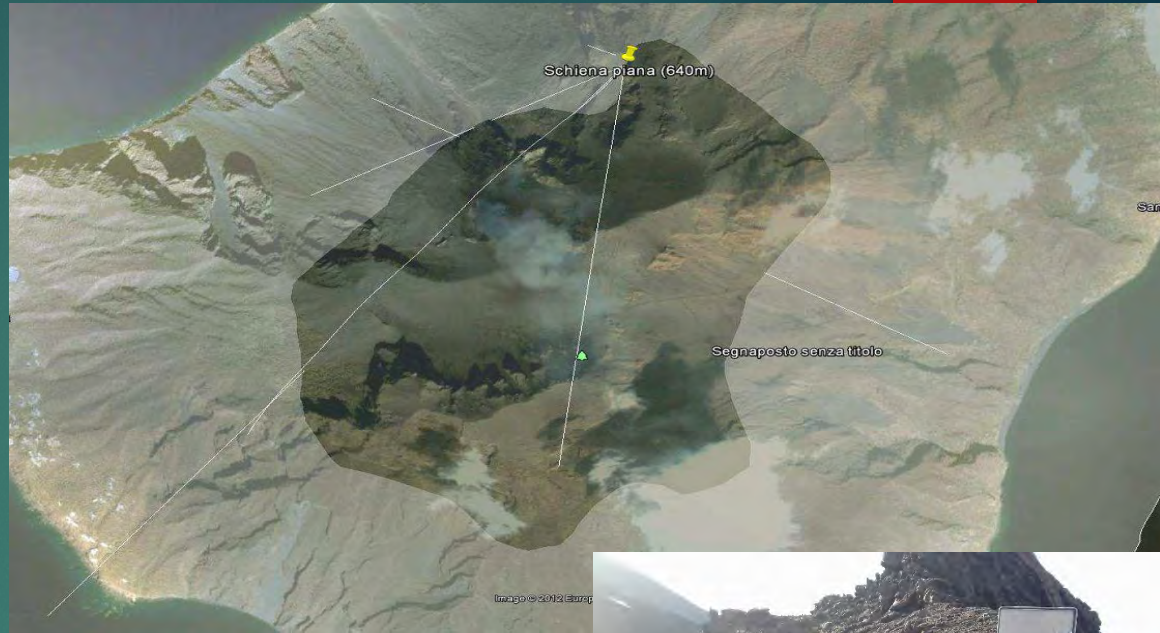
Si è utilizzato un rivelatore con emulsioni fotografiche

- Ottima risoluzione
- Tracciatore compatto
- «funzionamento» senza necessità di energia elettrica



# ..tracciatore di muoni con emulsioni fotografiche

Vista del vulcano Stromboli dalla posizione del rivelatore



Modulo con emulsioni fotografiche



Rivelatore installato



Luogo di installazione non facilmente raggiungibile

...non pilotato da noi



...primo sopralluogo..  
anche la neve



...trasporto piccole attrezzature

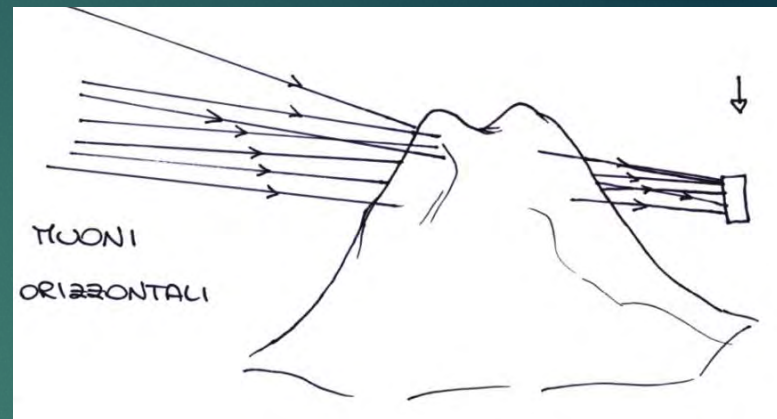
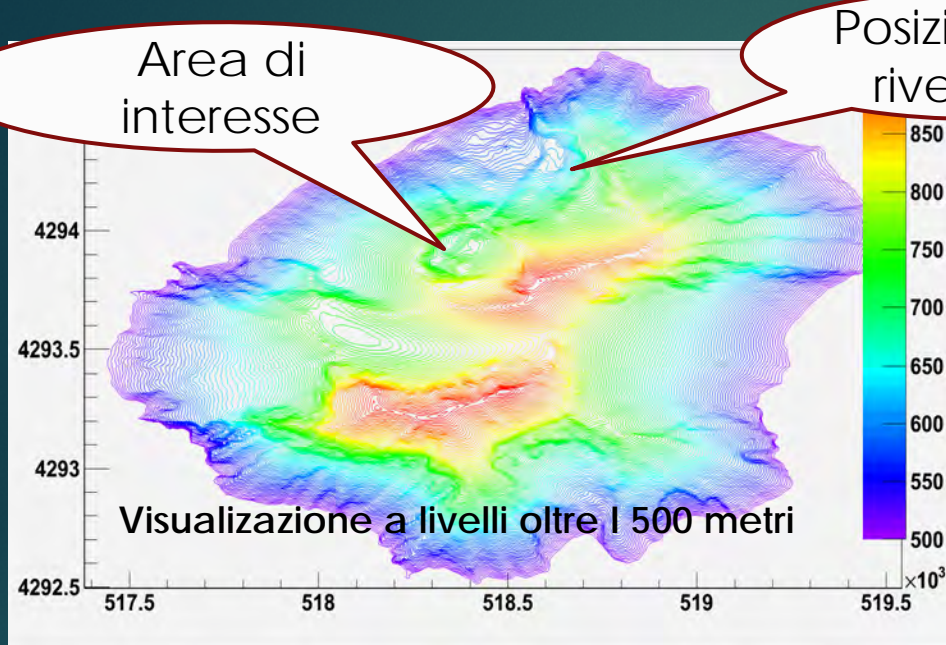


...luogo di installazione

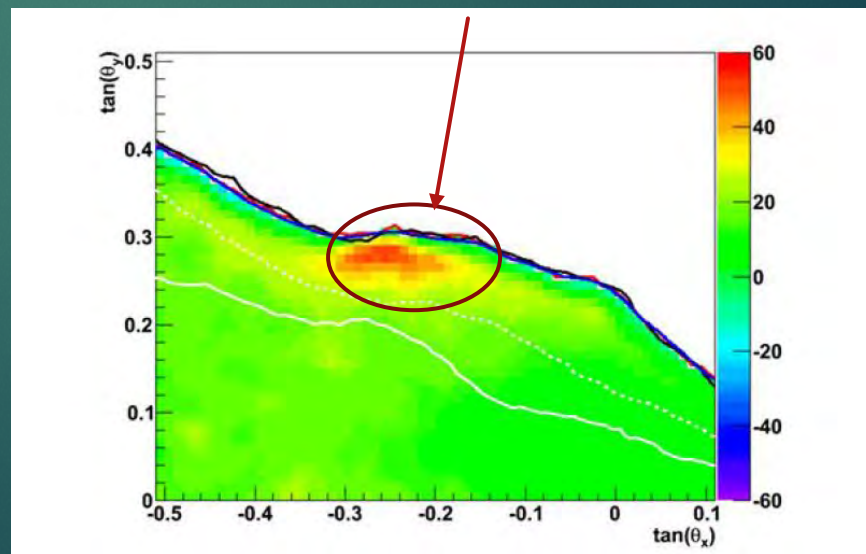
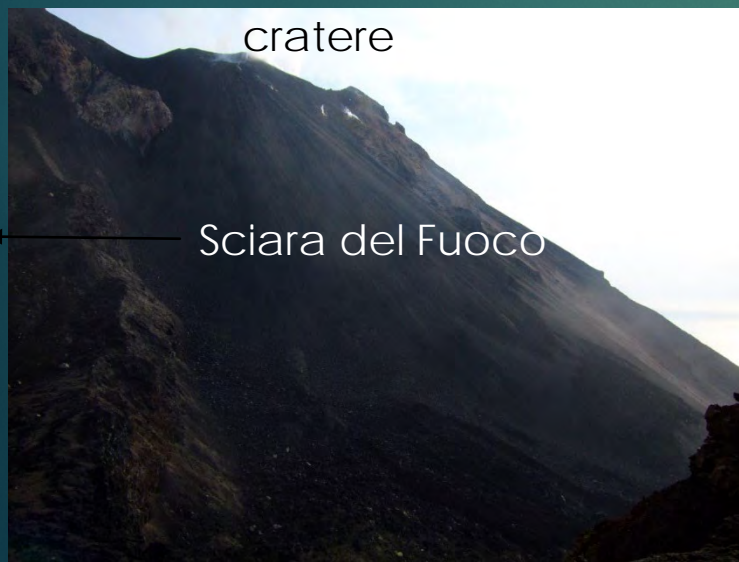




# Stromboli : risultati ottenuti



Zona a bassa densità  
Corrispondente ad una struttura  
Di collasso formata dopo l'eruzione del 2007



# SCIENTIFIC REPORTS

OPEN

## First muography of Stromboli volcano

Valeri Tioukov<sup>1</sup>, Andrey Alexandrov<sup>1</sup>, Cristiano Bozza<sup>1,2</sup>, Lucia Consiglio<sup>1</sup>, Nicola D'Ambrosio<sup>3</sup>, Giovanni De Lellis<sup>1,4</sup>, Chiara De Sio<sup>1,2</sup>, Flora Giudicepietro<sup>5</sup>, Giovanni Macedonio<sup>5</sup>, Seigo Miyamoto<sup>6</sup>, Ryuichi Nishiyama<sup>6</sup>, Massimo Orazi<sup>5</sup>, Rosario Peluso<sup>5</sup>, Andrey Sheshukov<sup>7</sup>, Chiara Sirignano<sup>8</sup>, Simona Maria Stellacci<sup>1,2</sup>, Paolo Strolin<sup>1</sup> & Hiroyuki K. M. Tanaka<sup>6</sup>

Received: 18 July 2018

Accepted: 2 April 2019

Published online: 30 April 2019

Muography consists in observing the differential absorption of muons – elementary particles produced through cosmic-ray interactions in the Earth atmosphere – going through the volcano and can attain a spatial resolution of tens of meters. We present here the first experiment of nuclear emulsion muography at the Stromboli volcano. Muons have been recorded during a period of five months by a detector of 0.96 m<sup>2</sup> area. The emulsion films were prepared at the Gran Sasso underground laboratory and were analyzed at Napoli, Salerno and Tokyo scanning laboratories. Our results highlight a significant low-density zone at the summit of the volcano with density contrast of 30–40% with respect to bedrock. The structural setting of this part of the volcanic edifice controls the eruptive dynamics and the stability of the "Sciara del Fuoco" slope, which is affected by recurrent tsunamigenic landslides. Periodical imaging of the summit of the Stromboli volcano such as that provided by muography can become a useful method for studying the evolution of the internal structure of the volcanic edifice.

I primi risultati molto promettenti fanno ben sperare e ci spingono a continuare le misure

Analoghi studi sia con rivelatori elettronici che con emulsioni fotografiche sono stati fatti e sono in corso per il Vesuvio, in Giappone, Francia, ....

# Applicazioni della Radiografia Muonica

Indagini nel sottosuolo

# Il tunnel borbonico

Nel 1853 Ferdinando II di Borbone lo fa realizzare, per scopi militari.

Diventa quindi rifugio antiaereo, deposito giudiziario etc. etc.

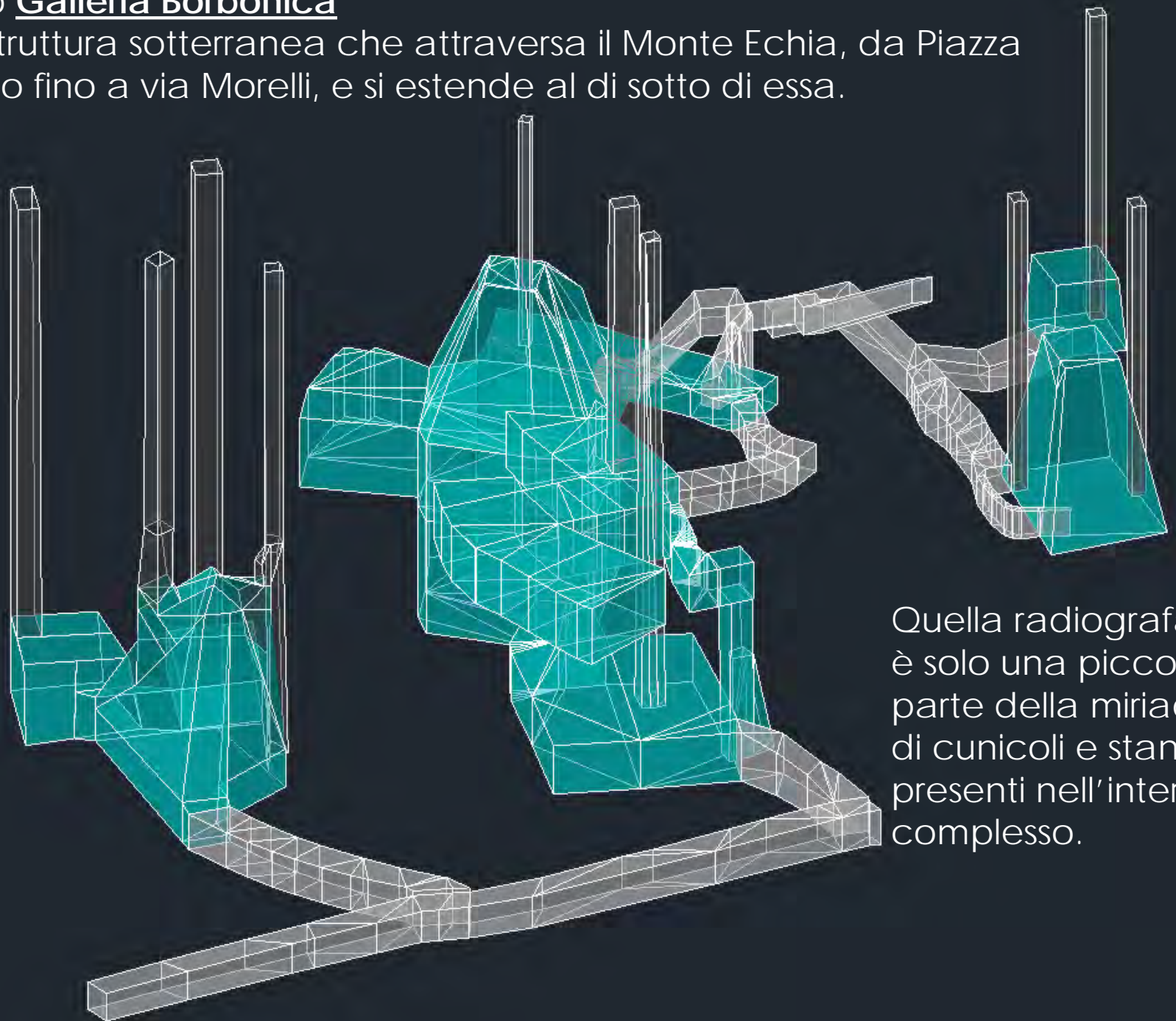
Restaurato di recente (dal 2005) e inserito nel percorso archeologico  
sotterraneo.

E' una struttura sotterranea che attraversa il Monte Echia, da Piazza Plebiscito  
fino a via Morelli, e si estende al di sotto di essa.



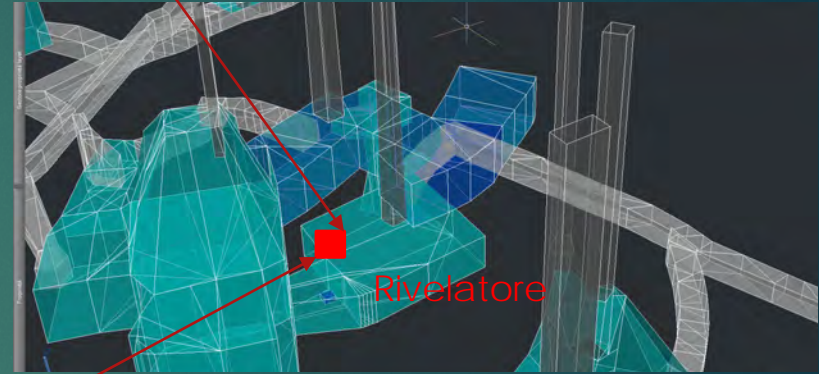
## Tunnel o Galleria Borbonica

E' una struttura sotterranea che attraversa il Monte Echia, da Piazza Plebiscito fino a via Morelli, e si estende al di sotto di essa.



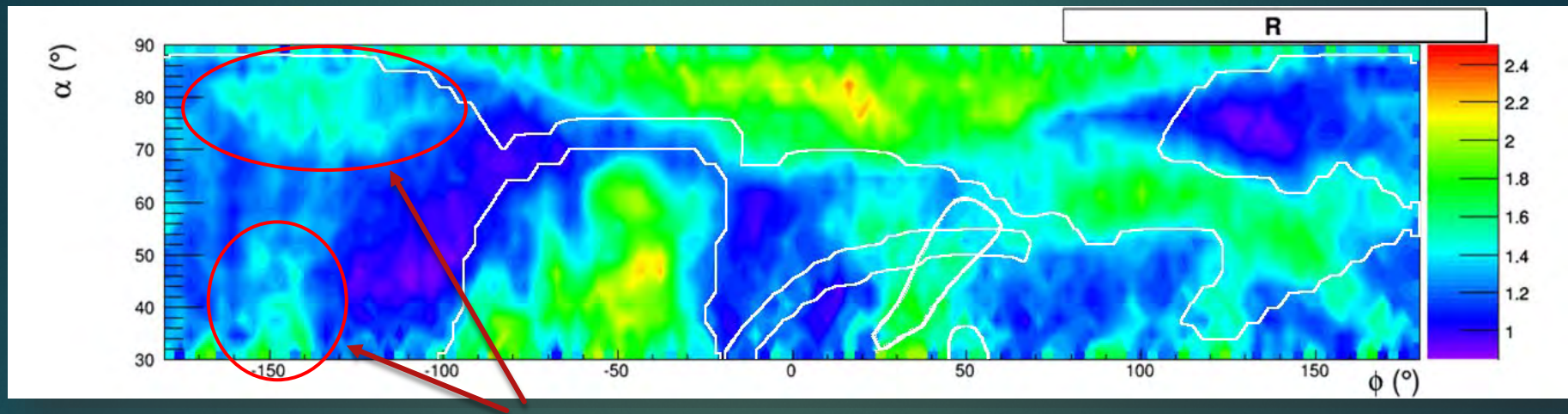
Quella radiografata è solo una piccola parte della miriade di cunicoli e stanze presenti nell'intero complesso.

# ..tracciatore di muoni elettronico: Progetto MURAY

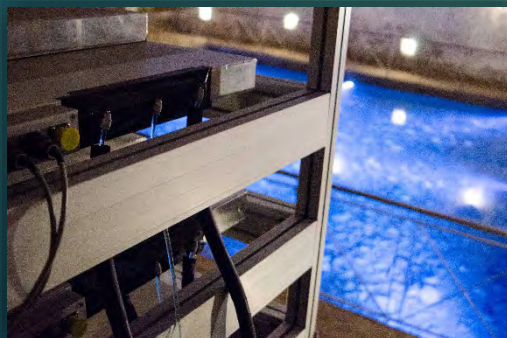


Cisterna del Palazzo di Serra di Cassano

# Confronto tra i dati e i risultati attesi



Due segnali non corrispondono a strutture note



# Applicazioni della Radiografia Muonica



Bunker del monte Soratte



# Misure nel bunker del monte Soratte con il CRC (Cosmic Ray Cube – LNGS)

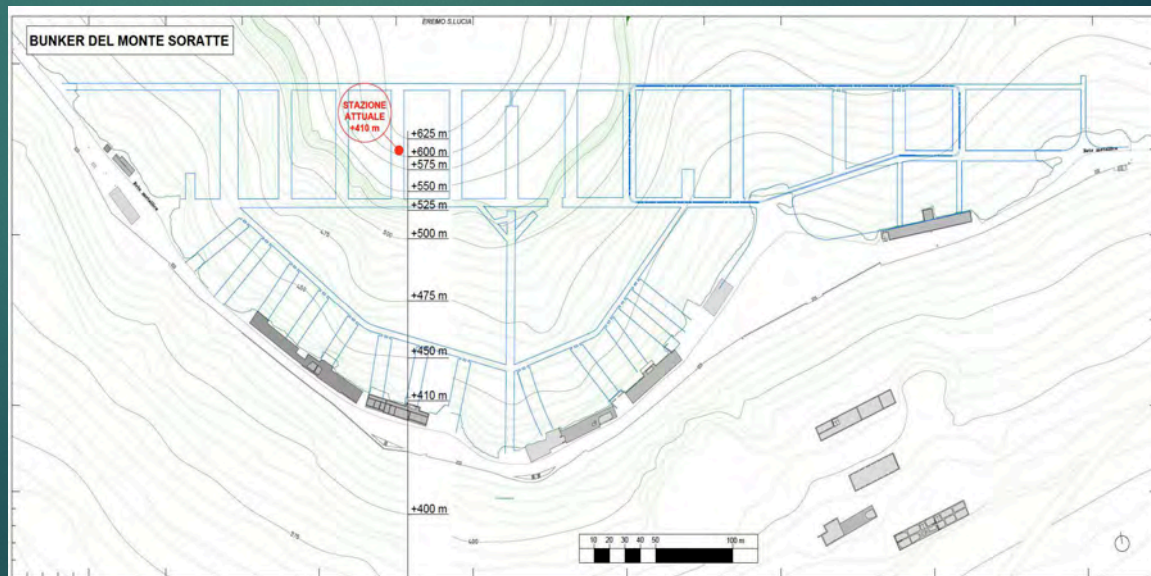


Bundesarchiv, Bild 1011-305-0087-28  
Foto: Lütjge | 1943

Costruzione avviata nel 1937 come rifugio antiaereo. Nel 1943 utilizzato dai tedeschi come sede del «comando supremo del sud»

- Nel 1967, durante gli anni della guerra fredda, rifugio anti-atomico, lavori non terminati.
- L'area da alcuni anni è stata recuperata ed è un museo storico diffuso

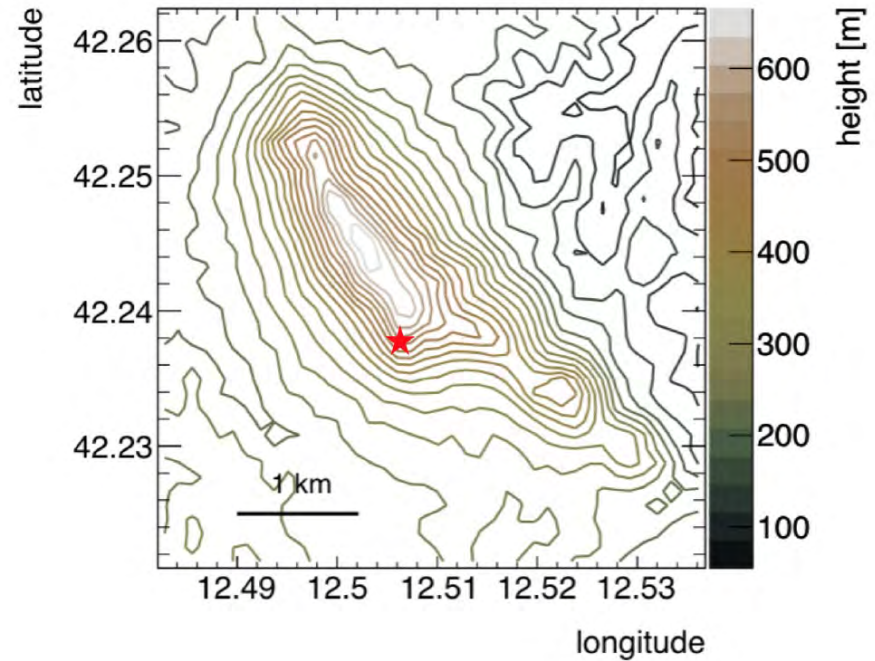
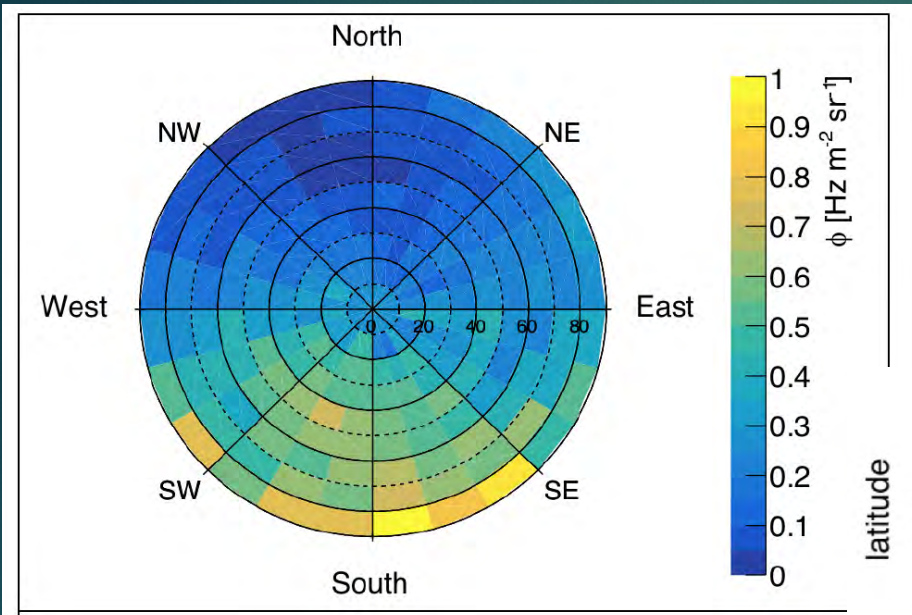
Misure realizzate per una prima stima del flusso di muoni in previsione di un possibile utilizzo come sito per un esperimento



# Misure nel bunker del monte Soratte con il CRC (Cosmic Ray Cube – LNGS)



# Misure nel bunker del monte Soratte con il CRC (Cosmic Ray Cube – LNGS)



# Indagini presso il sito archeologico di Cuma



Prima colonia greca in Italia ( VIII secolo A.C.)

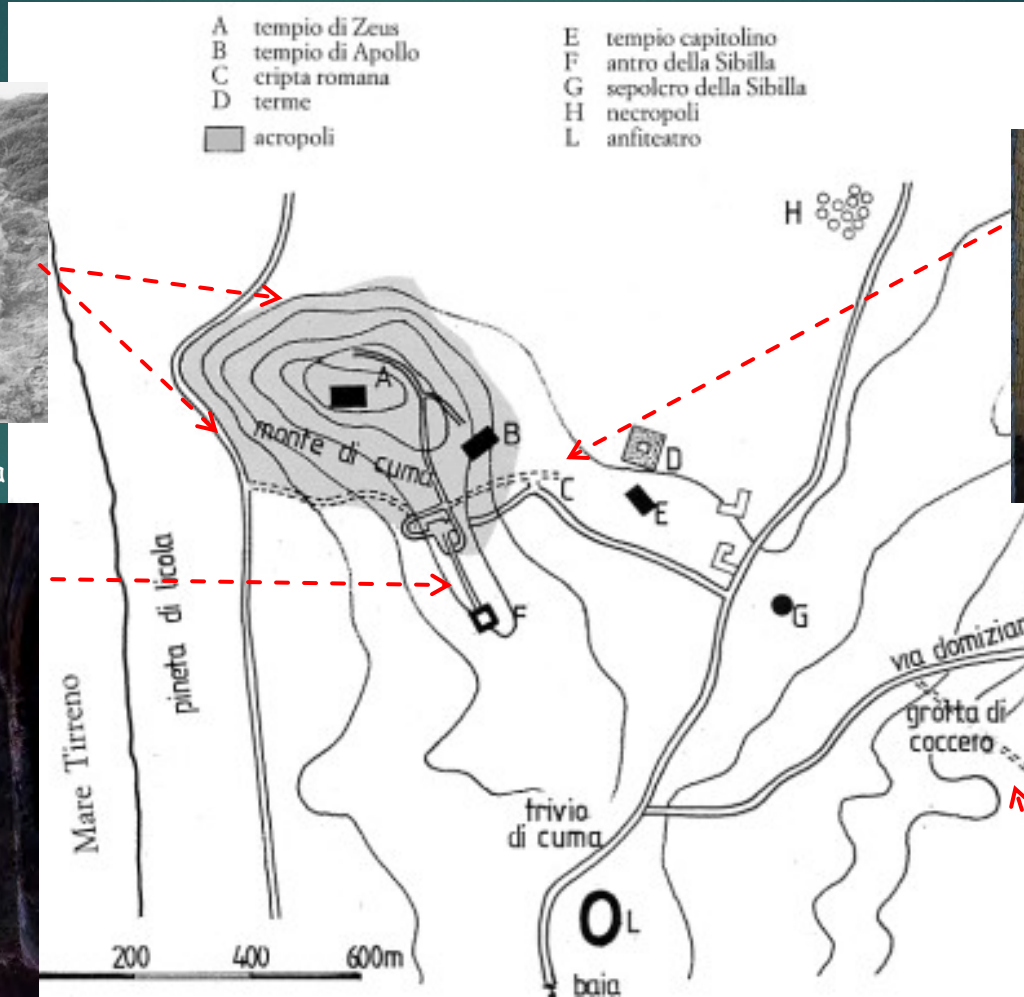
Collina di tufo di 80 m s.l.m

Ricca di cavità, naturali ed artificiali

Strategica militarmente

# Sito archeologico di Cuma

Bunker II guerra mondiale



Cripta Romana 37 B.C.



Grotta della Sibilla pre-romana



Tunnel di Cocceio 37 B.C.



# Applicazioni della Radiografia Muonica

Archeologia

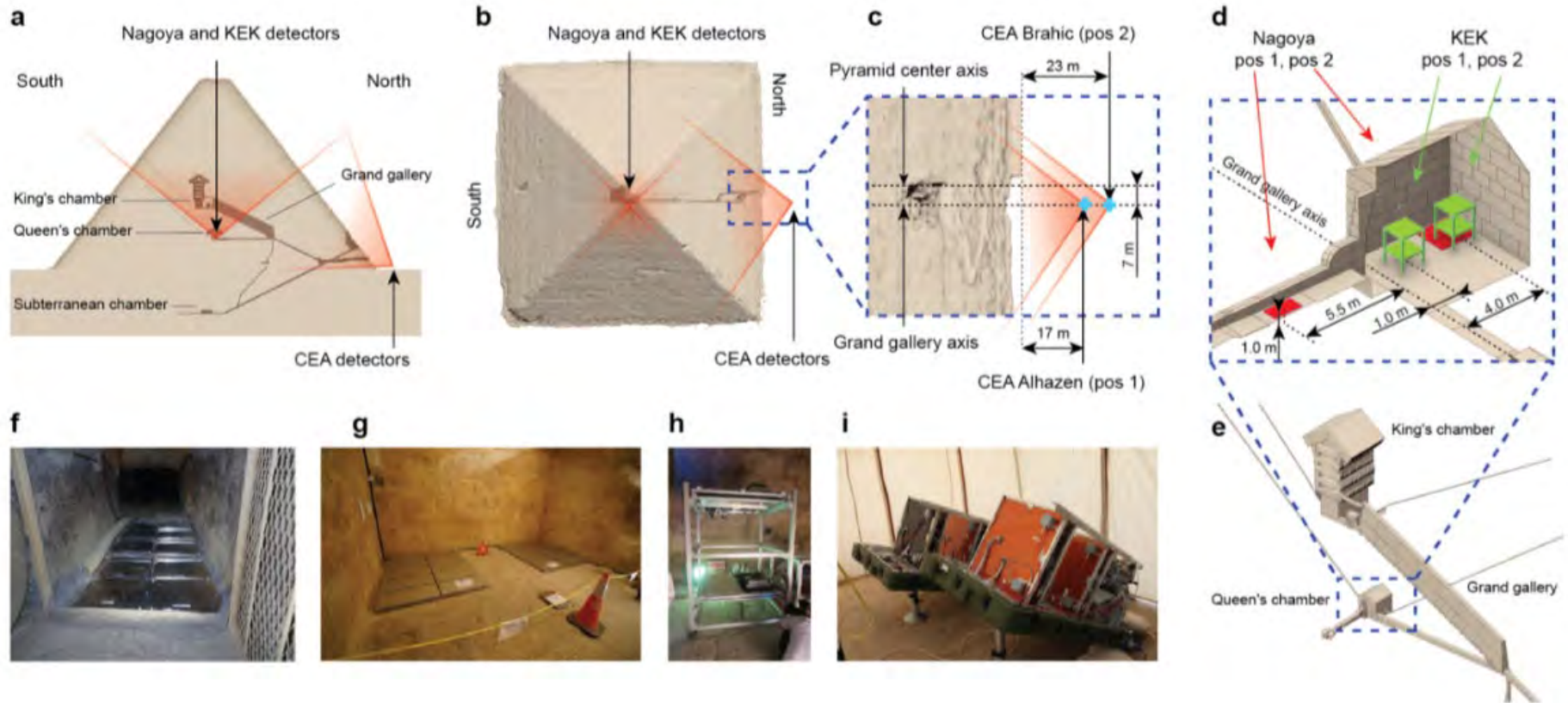
# Studio delle Piramidi: rivelatore elettronico e con emulsioni fotografiche



Complesso delle piramidi di Giza

# ...Piramide di Cheope

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





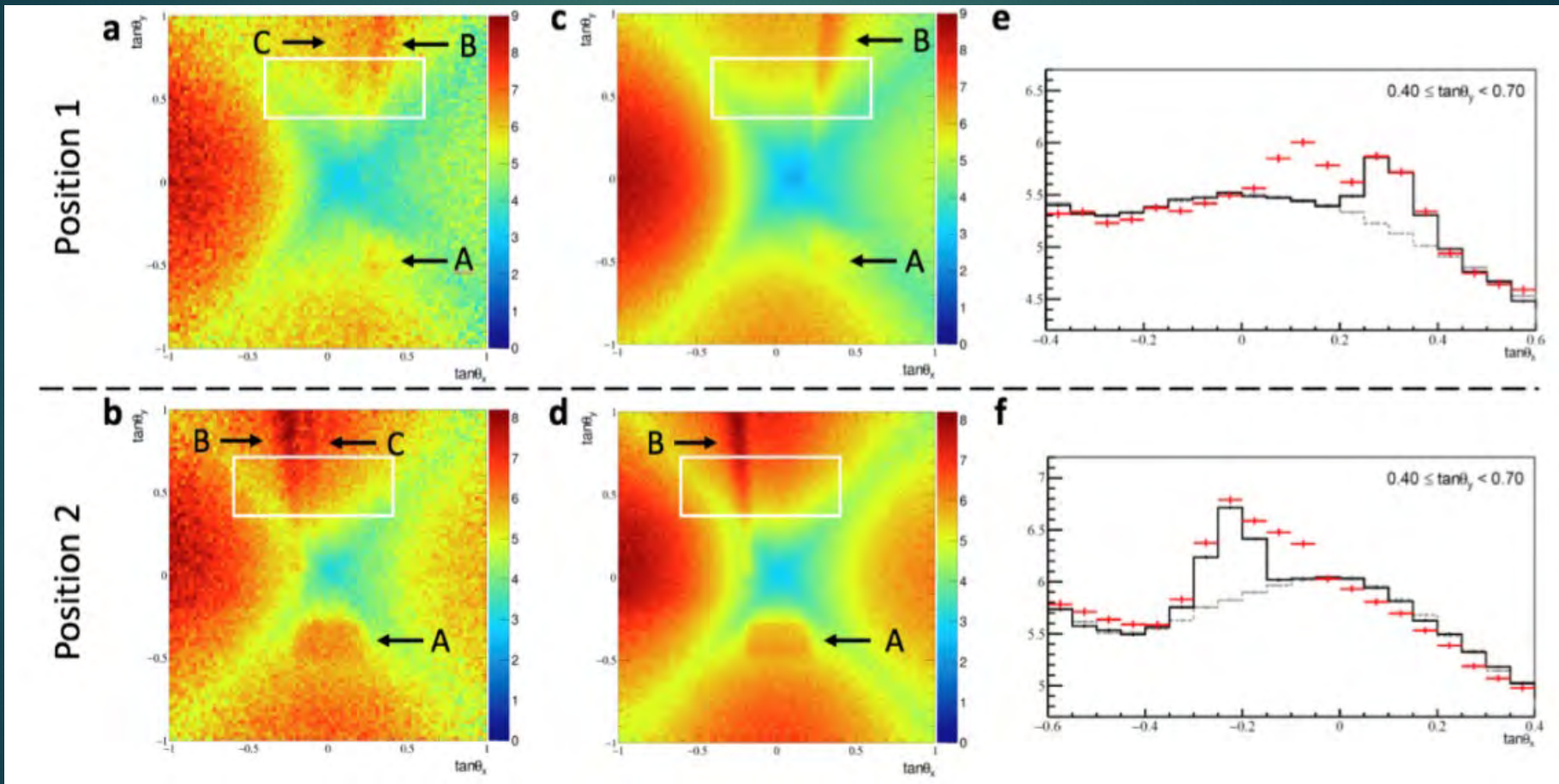
# ...Pirame di Cheope

Chiario segnale della presenza di una cavità ( emulsioni)

Dati

Simulazione

In rosso i dati



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

# Applicazioni della Radiografia Muonica

..altre applicazioni

## ...Radiografia Muonica per deflessione multipla

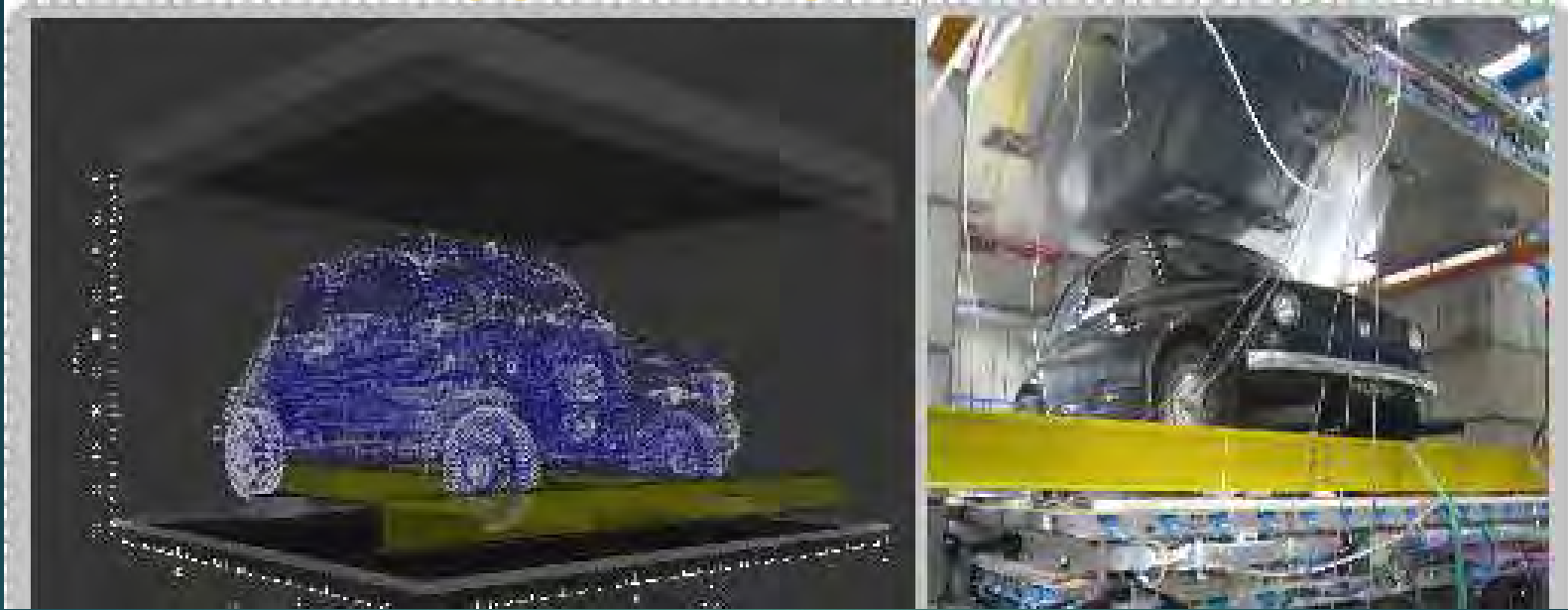
Si basa sulla deviazione che il muone subisce nell'incontrare un oggetto, tanto maggiore quanto maggiore è la densità

Necessita di due rivelatori che misurano la direzione del muone prima e dopo aver penetrato l'oggetto che si vuole misurare

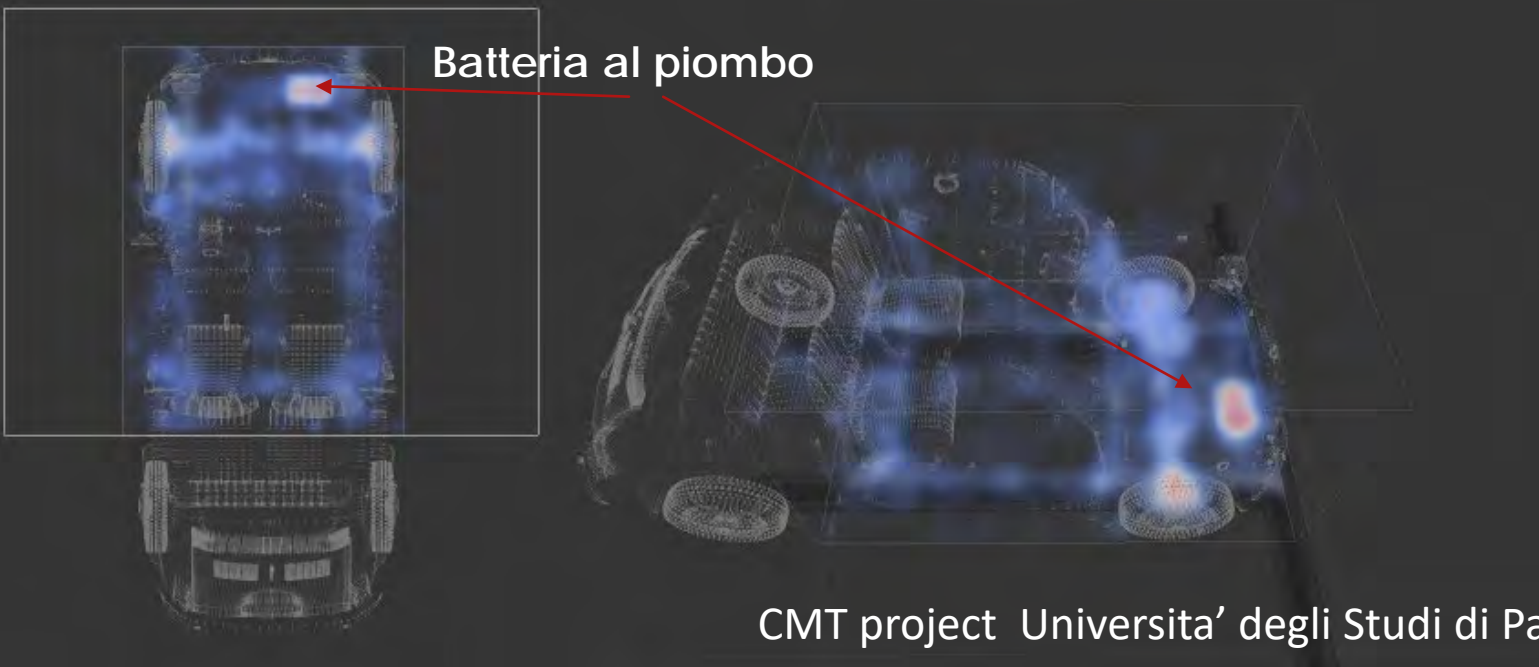
Particolarmente adatto per lo studio di materiale radioattivo all'interno di un volume non eccessivo (container)

(contrabbando di materiale fissile,...)

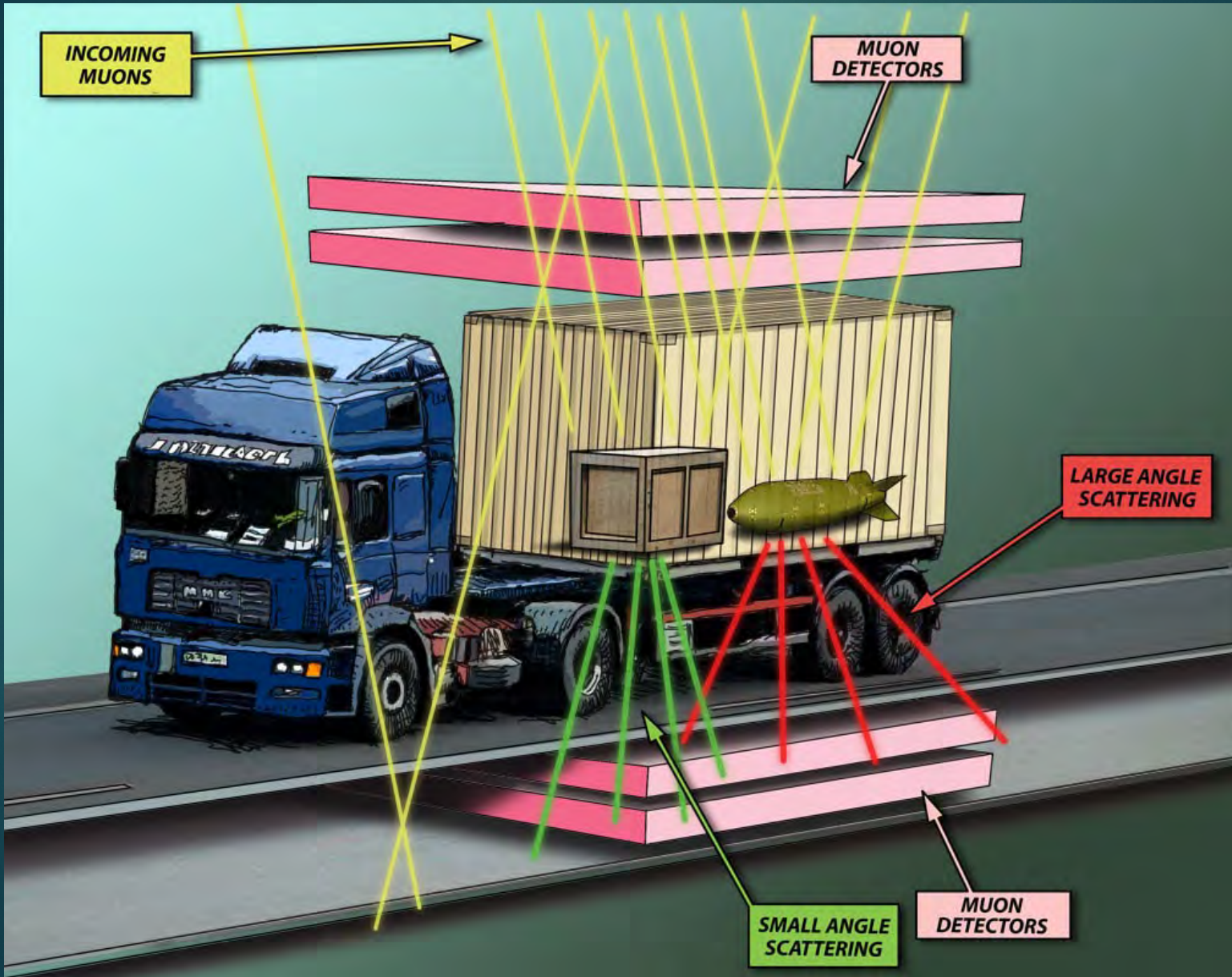
# Esempio con "oggetto" a grandezza naturale

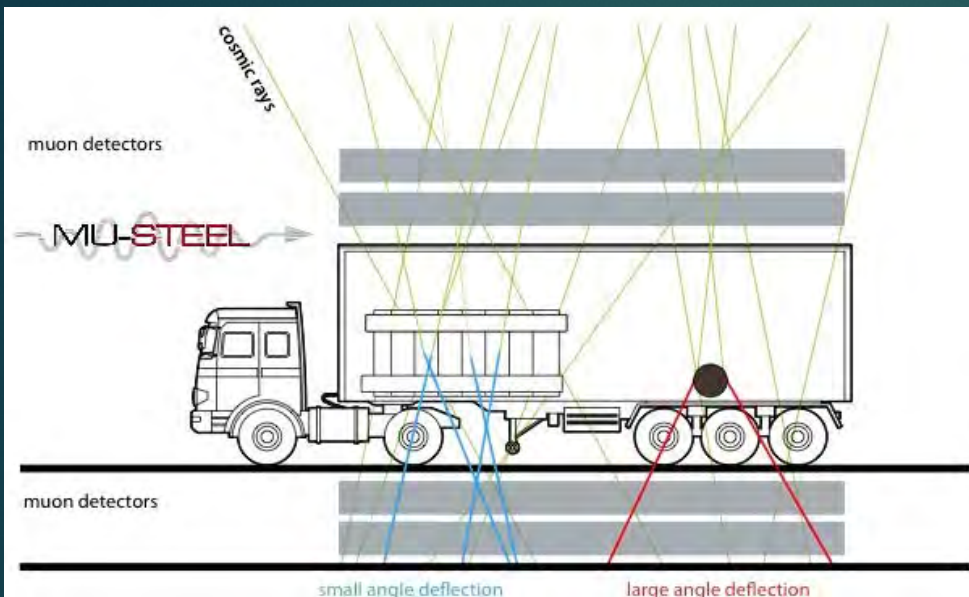


Batteria al piombo



# ..contrabbando di materiale nucleare





Controllo del carico nei trasporti per materiale da fonderia

Ricerca di residui di sorgenti radioattive

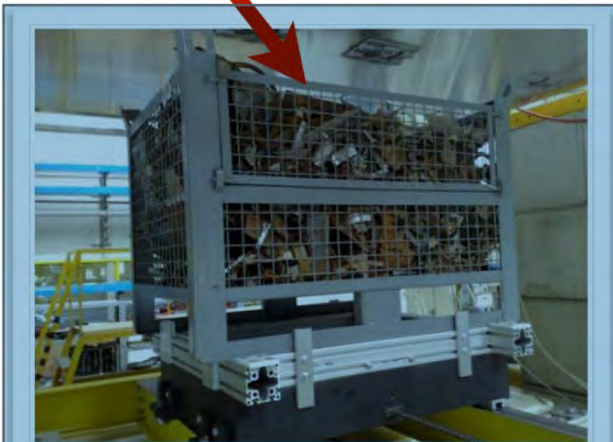
La dispersione dei muoni è elevata su Sostanze radioattive (.uranio, plutonio) ad elevata densità

MU-STEEL

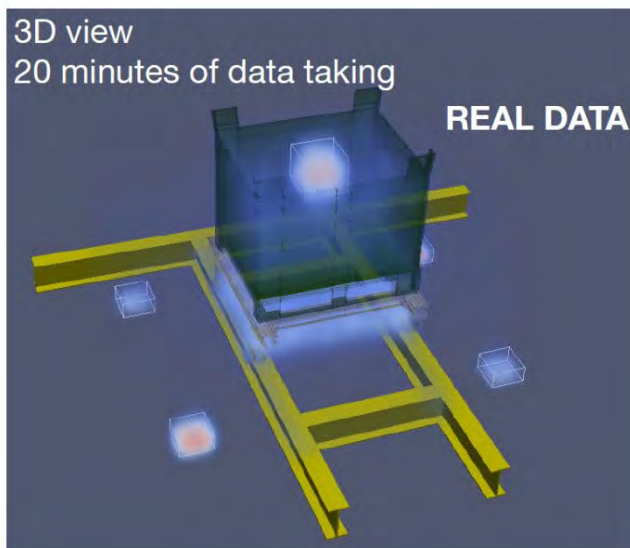


RFCS CT-2010-000033

mid 2010  
end 2012



3D view  
20 minutes of data taking



Great improvements have been obtained in the 3D image tomographic reconstruction software



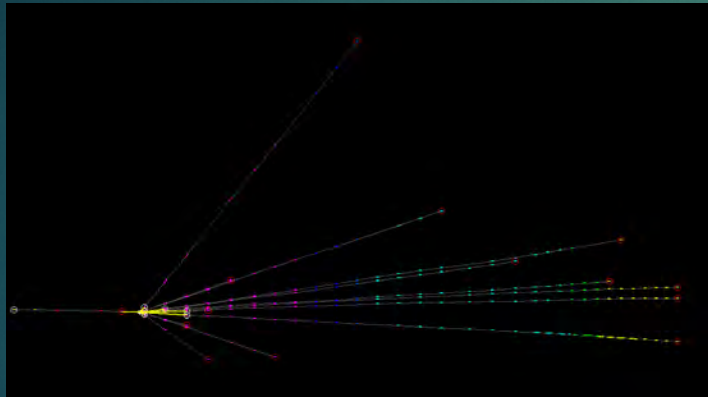
# ...Rivelatori e fisica medica

...lo sviluppo di tecniche per l'analisi e la realizzazione di lastre "fotografiche" (emulsioni) utili alla fisica delle particelle...ha aperto alla possibilità di applicazioni in fisica medica....

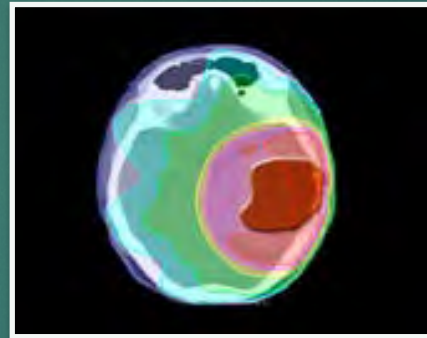
# ...Adroterapia e lastre fotografiche

Studio dei fasci di particelle cariche con l'uso di un «bersaglio» di emulsioni.

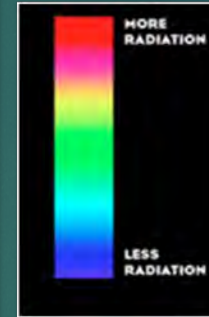
L'efficienza della terapia con fasci di particelle è limitata dalla scarsa conoscenza della frammentazione dei nuclei nei tessuti del corpo -> **le emulsioni hanno la stessa densità del corpo umano e possono essere usate come bersaglio per studiare queste frammentazioni**



Radioterapia  
convenzionale

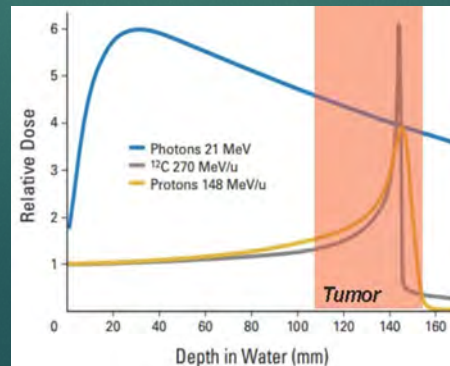


Radioterapia  
con fasci di particelle



..alcuni progetti di ricerca  
sono in corso

(Esp. FOOT FragmentatiOn Of Target)  
... PRIN: LNGS, Napoli, Bari



Di particolare  
interesse anche  
per i viaggi  
spaziali



# Conclusioni

La **Radiografia Muonica** è una tecnica derivata dagli studi sulle particelle elementari e dalle tecniche impegnate per rilevarle

**Trasferimento Tecnologico** dalla fisica delle particelle a diversi altri settori di studio ed indagine

Notevole potenziale in applicazioni pratiche

Grazie per l'attenzione