Vulcani, piramidi e sottosuolo: i muoni cosmici ci permettono di svelare i loro segreti

Giulio Saracino

Università degli studi di Napoli Federico II

e

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Frascati , Laboratori Nazionali INFN

30 gennaio 2018

Organizzazione della presentazione

due parti

I) introduzione ai principi

II) applicazioni:

archeologia, indagini del sottosuolo, vulcani

La radiografia muonica: principi

Radiografia a raggi X

sorgente

raggi x

oggetto da investigare

valigia

Rivelatore di raggi X

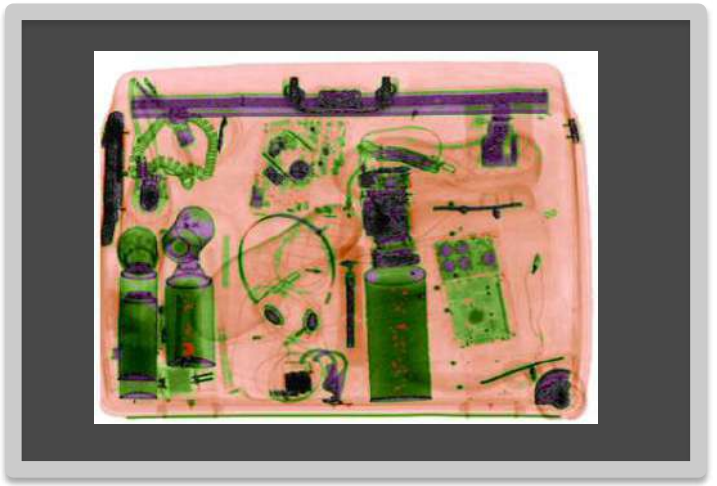


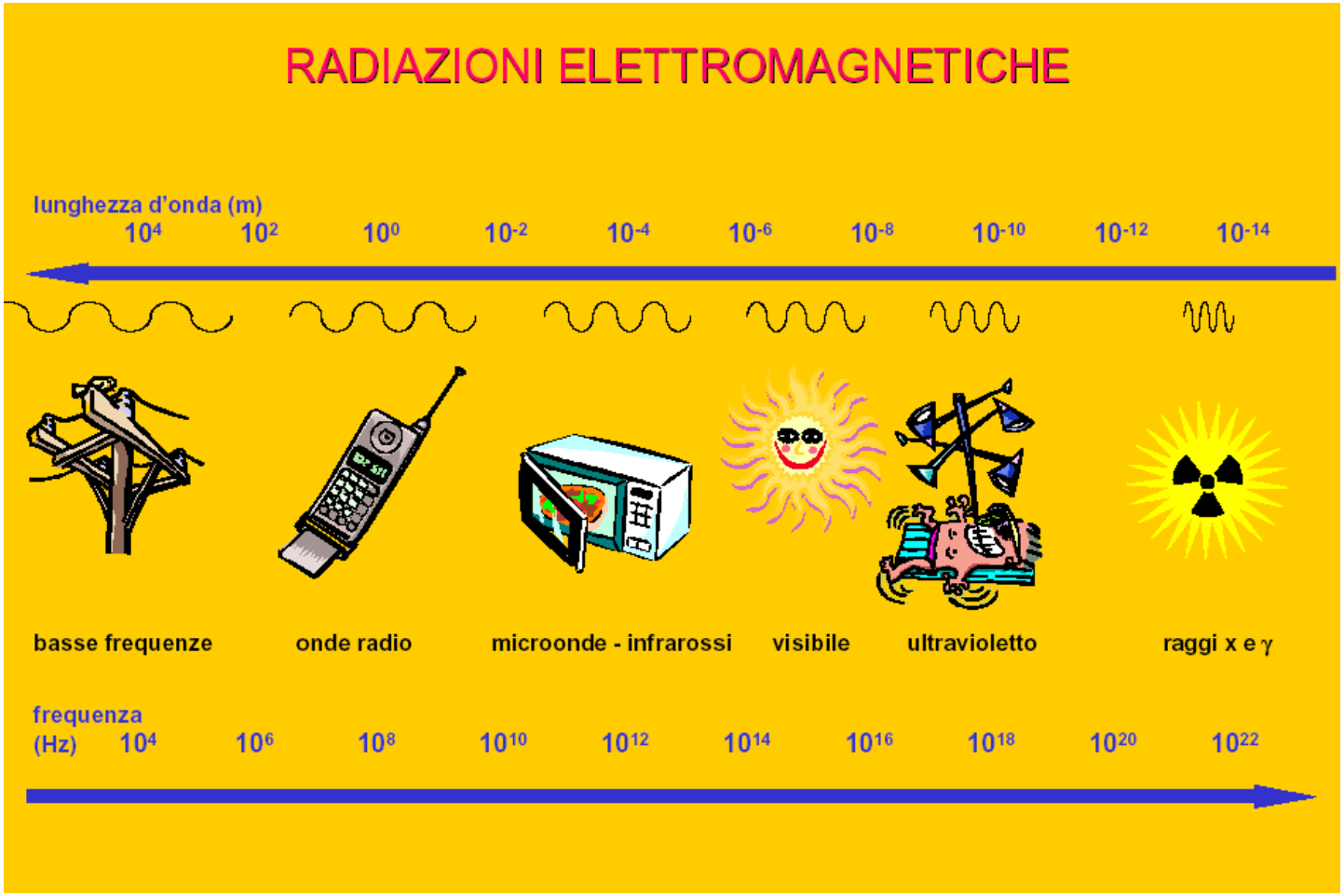
immagine del contenuto

Cosa sono i raggi X

fotoni

quanti della radiazione elettromagnetica con elevata energia

(alcune miglia di volte più grande della luce visibile)



Perché funziona la radiografia a raggi X

Riescono ad attraversare la materia.

quanta ?

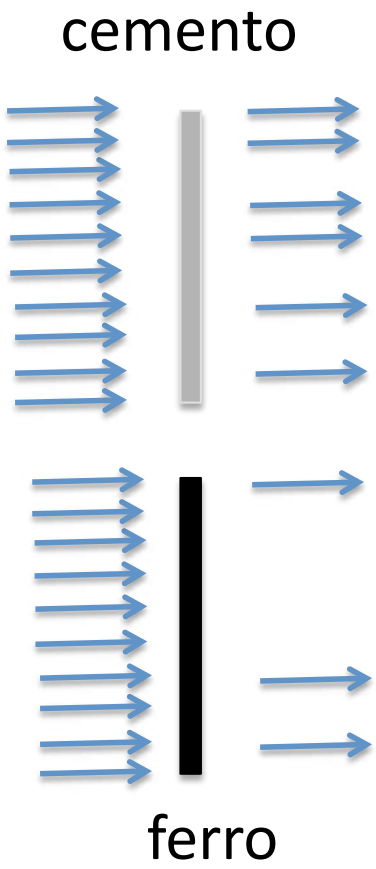
dipende dall'energia e dalla densità del materiale da attraversare:

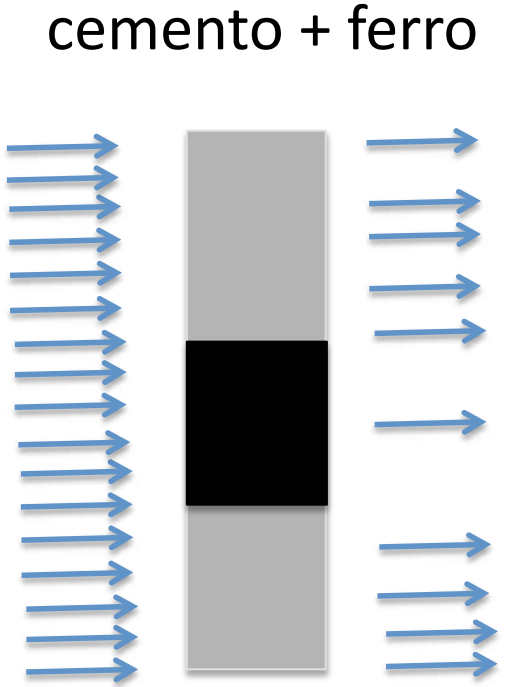
densità = massa/volume

acqua 1g/cm^3
cemento 2,4 g/ cm^3
piombo 11,2 g/ cm^3
aria 1,3 x10^{-3} g/ cm^3

1 cm piombo = 4,5 cm calcestruzzo = 11 cm acqua = 86 m aria

Perché funziona la radiografia a Raggi X





Limite pratico massimo raggiungibile: 1 m cemento

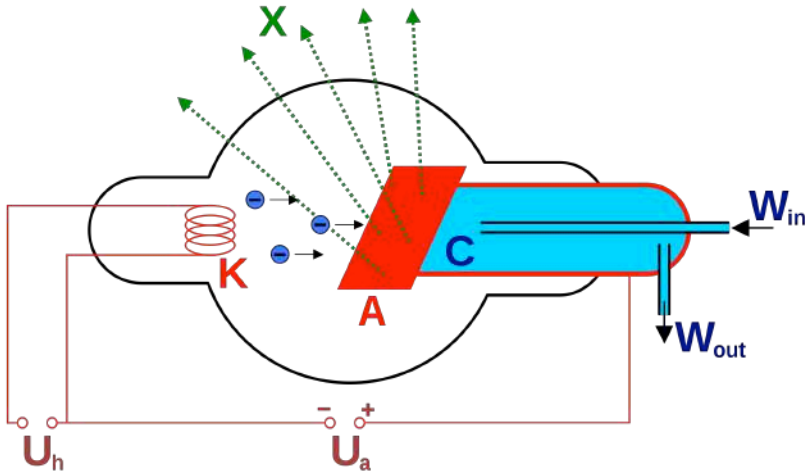
Radiografia a raggi X: gli strumenti

Rivelatore:
lastra fotografica

Sorgente:
materiale radioattivo

Rivelatore:
sistema digitale

Sorgente:
Tubo a raggi X



Come funziona una radiografia con i muoni

Il principio è simile:

muoni al posto dei raggi X

rivelatori di muoni

Le proprietà del muone

Particella elementare (priva di struttura interna)
Carica elettrica uguale a quella dell'elettrone
massa circa 200 volte quella dell'elettrone
instabile: decade (in media) in 2.2 milionesimi di secondo(2,2 μs)

INTERAZIONI:
elettromagnetica: SI -> consente di rivelarli
debole: SI-> decadimento
forte: NO: capacità di penetrazione della materia
gravitazionale: SI : non rilevante in questo discorso.

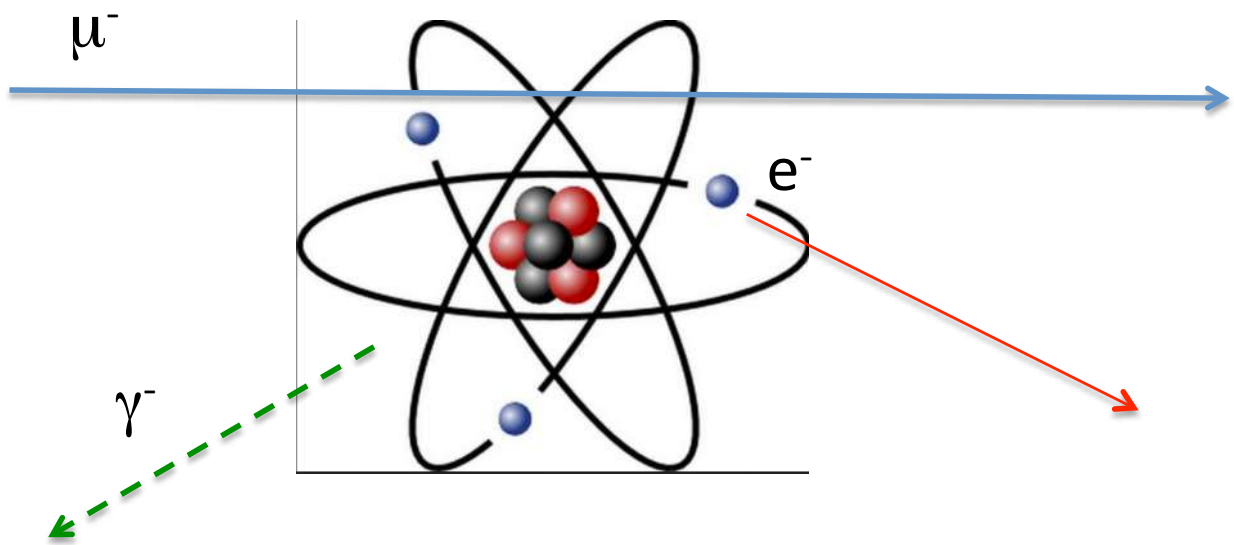
MUONI ENERGETICI

possono attraversare centinaia di m di roccia

Le interazioni e.m. dei muoni nella materia

elettroni atomici:

ionizzano ed eccitano gli atomi, producendo elettroni e fotoni che utilizziamo per rivelare il muone
(camere a gas e scintillatori)

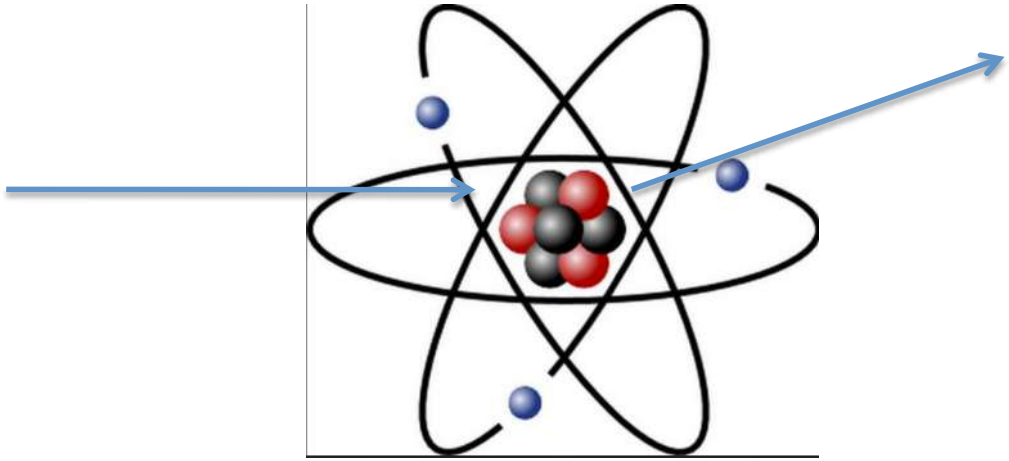


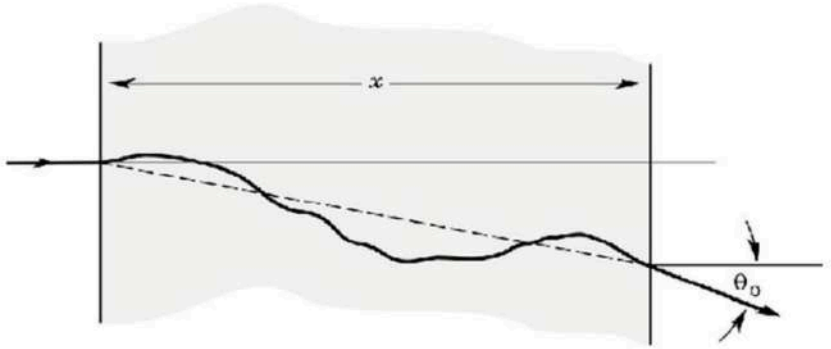
Le interazioni e.m. dei muoni nella materia

nuclei atomici:

fanno deviare la traiettoria con perdita di energia trascurabile.
A volte un problema, a volte un vantaggio

(radiografia muonica per scattering multiplo)





Origine dei muoni

decadimento di altre particelle di massa maggiore (pioni o i kaoni)

pioni e kaoni possono avere origine dalla:

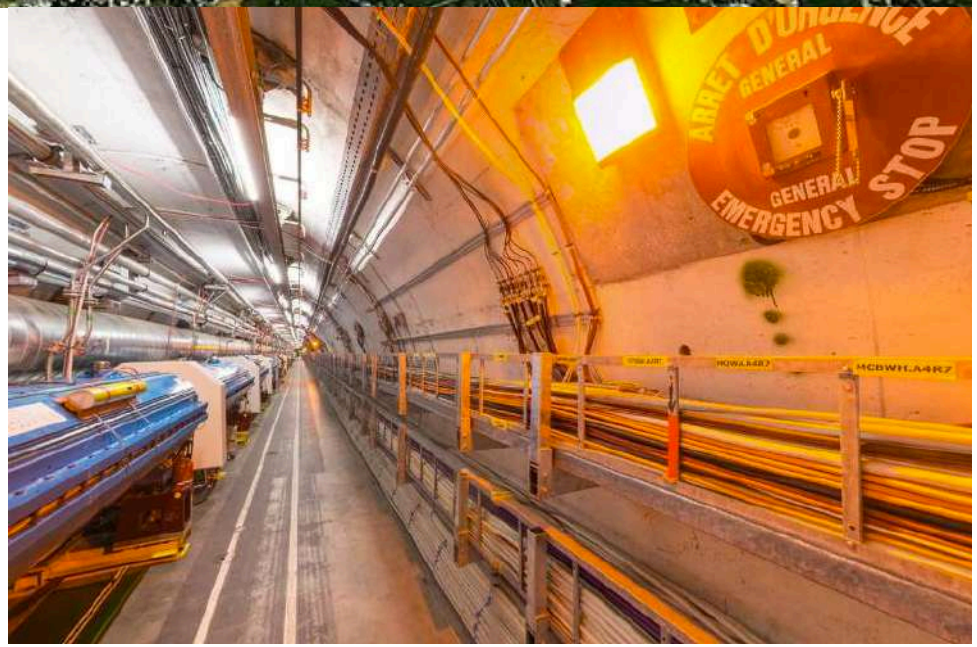
"radiazione cosmica" ovvero protoni di alta energia che entrano nell'atmosfera terrestre

Acceleratori di particelle
(Large Hadron Collider LHC)

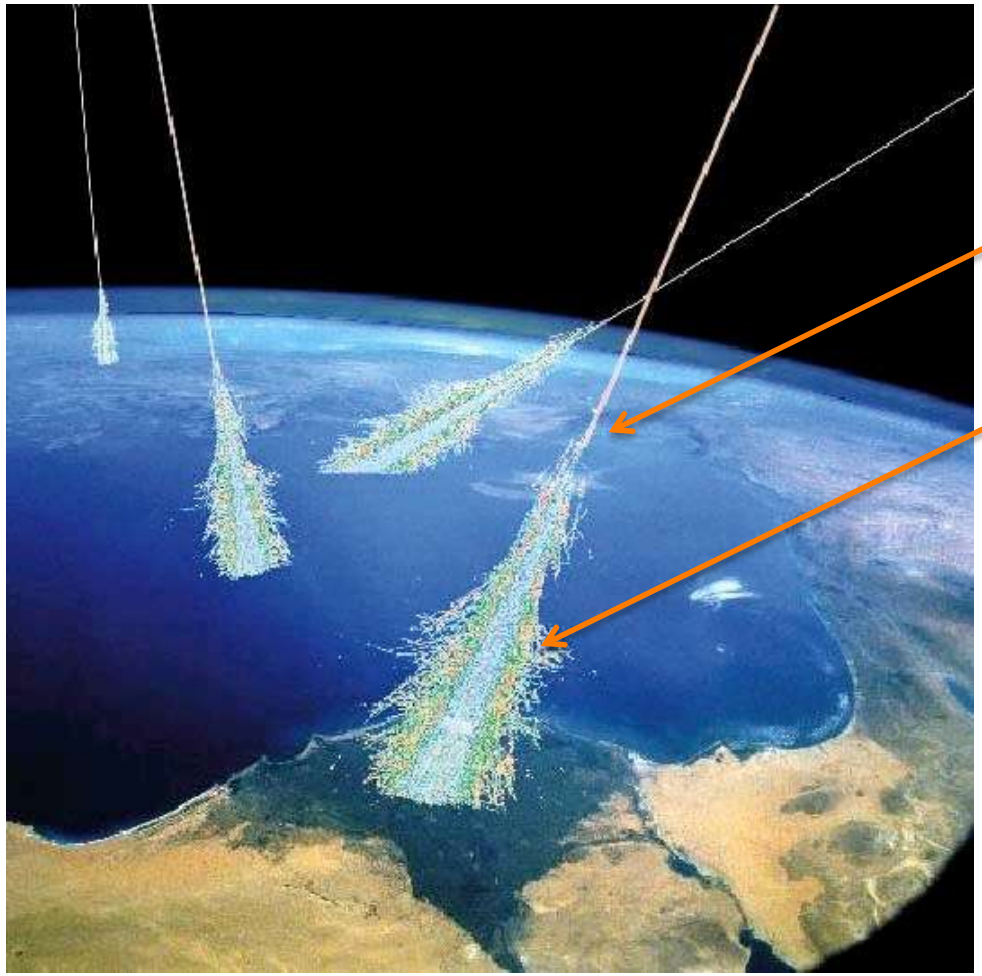
QUESTE SONO LE NOSTE FONTI

LHC al CERN

30 km di circonferenza
-> poco pratico....



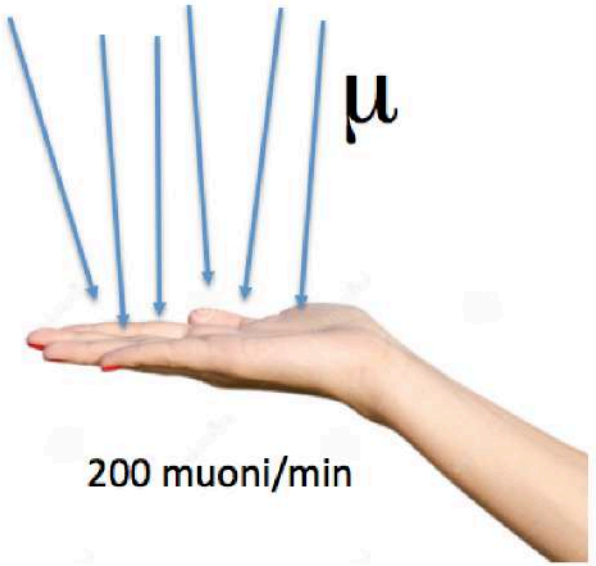
Muoni cosmici



protone

Sciame:

K, π, μ, γ, e^- ...



protoni di altissima energia interagiscono con i nuclei dell'atmosfera producendo altre particelle (sciame). Al livello del mare i muoni rappresentano la maggioranza.
Su di una mano in posizione orizzontale passano ogni minuto circa 200 muoni.

Radiografia muonica

Sorgente: muoni cosmici

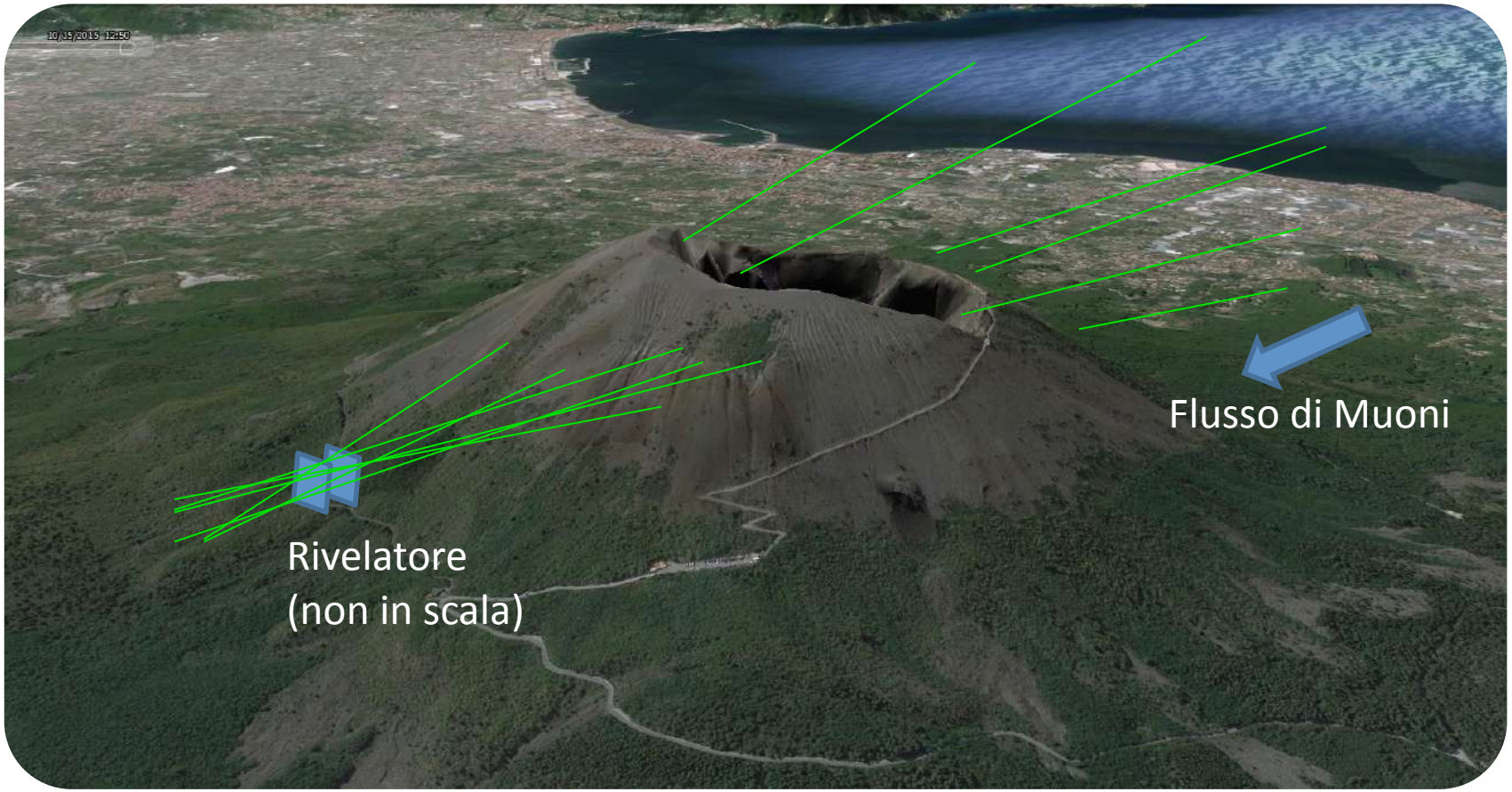
Apparato di misura: rivelatore di muoni

Oggetto da investigare:

Vulcani (struttura del condotto)
Sottosuolo (ricerca di cavità, archeologia)
Miniere (giacimenti)
Edifici (piramidi, altiforni)

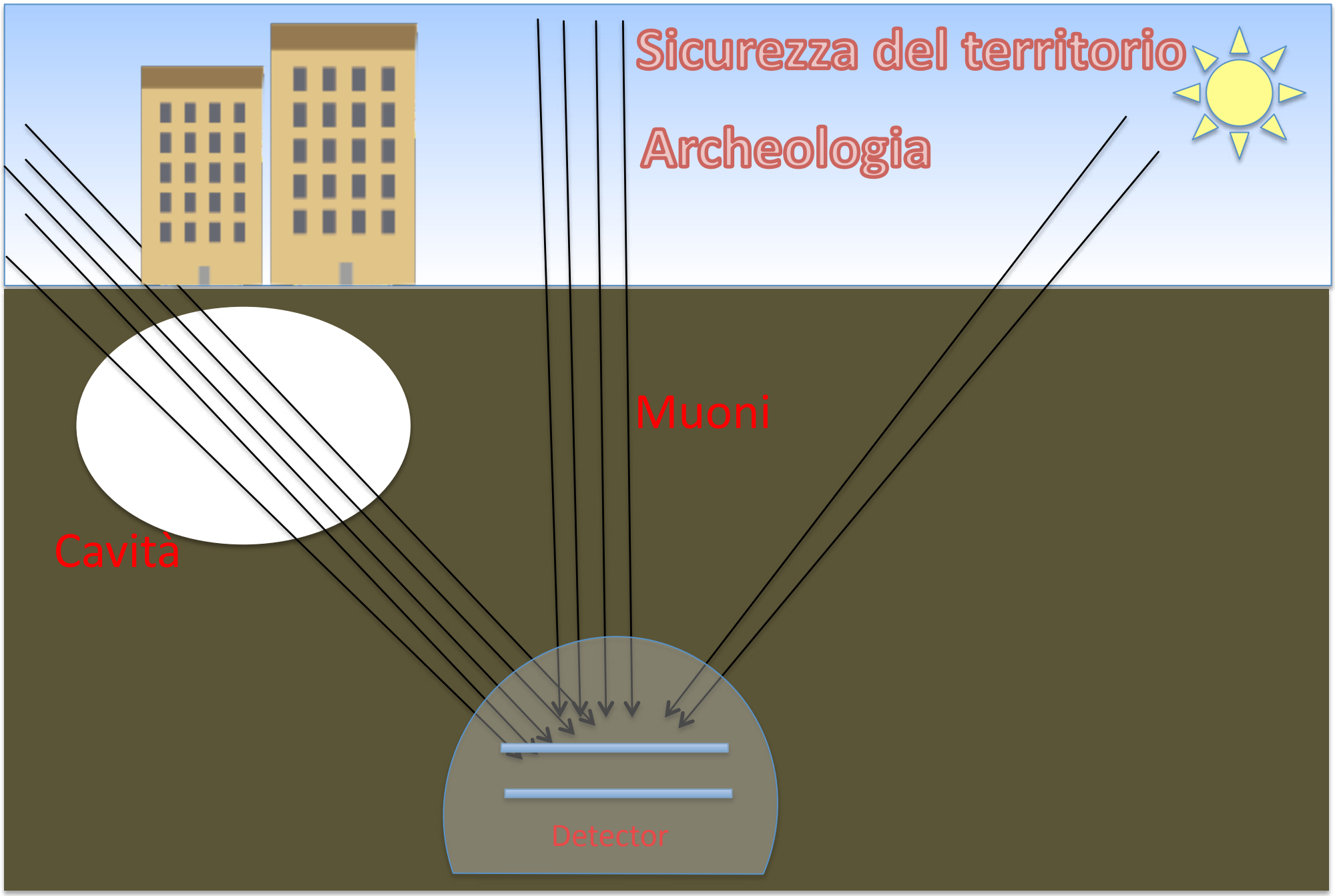
Radiografia muonica

Vulcani



muoni quasi orizzontali

Radiografia muonica per l'indagine del sottosuolo



Tracciatore di muoni

Permette di rilevare la direzione del muone:

A differenza dei raggi X la sorgente di muoni non è collimata:

bisogna ricostruirne la direzione di provenienza

Possibili tecnologie

Rivelatori elettronici: (tempo reale)

- rivelatori plastici
- rivelatori a gas
- rivelatori a luce Cherenkov

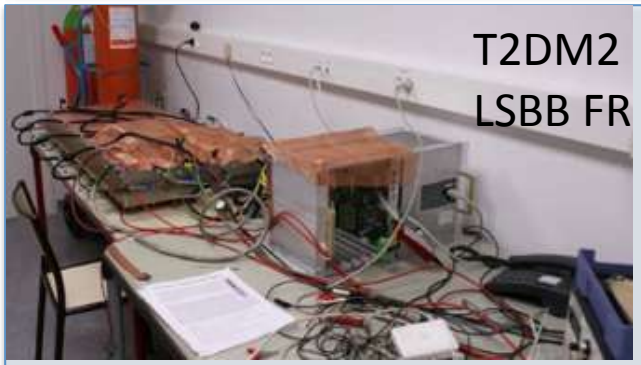
Emulsioni nucleari (Emulsion Cloud Chamber)
("pellicole fotografiche")

Tecniche di radiografia muonica

MU-RAY - INFN

TANAKA -ERI

DIAPHANE IN2P3



T2DM2
LSBB FR

OPERA
INFN,
NAGOYA

TOMUVOL - IN2P3

ASTRI-INAF

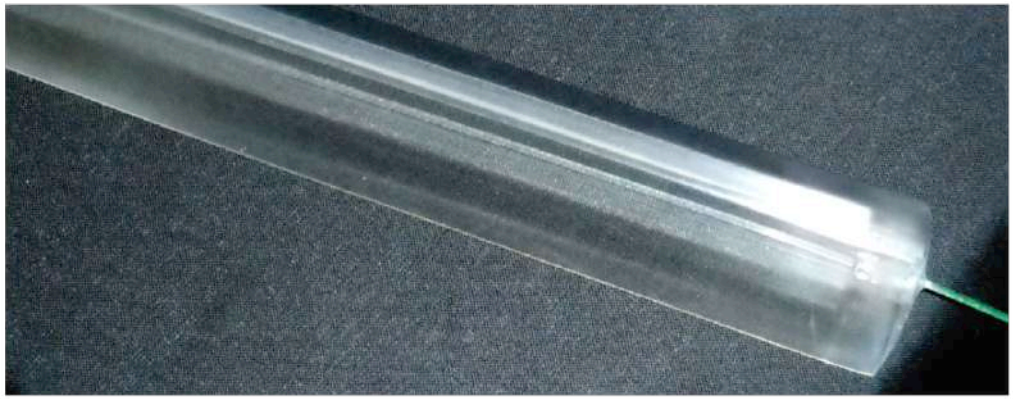
Scintillatore + fibra ottica

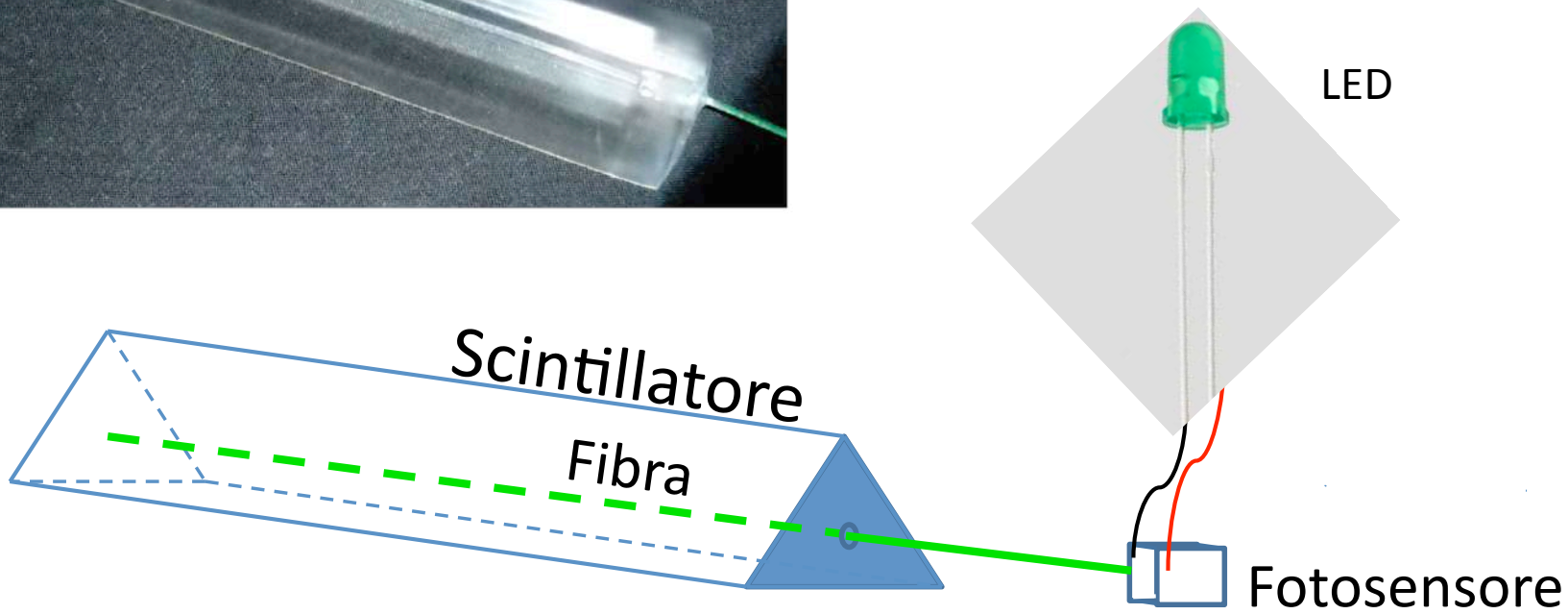
Scintillatore: emette luce quando interagisce con una particella carica in movimento

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

Fotosensore: converte il segnale luminoso in un segnale elettrico

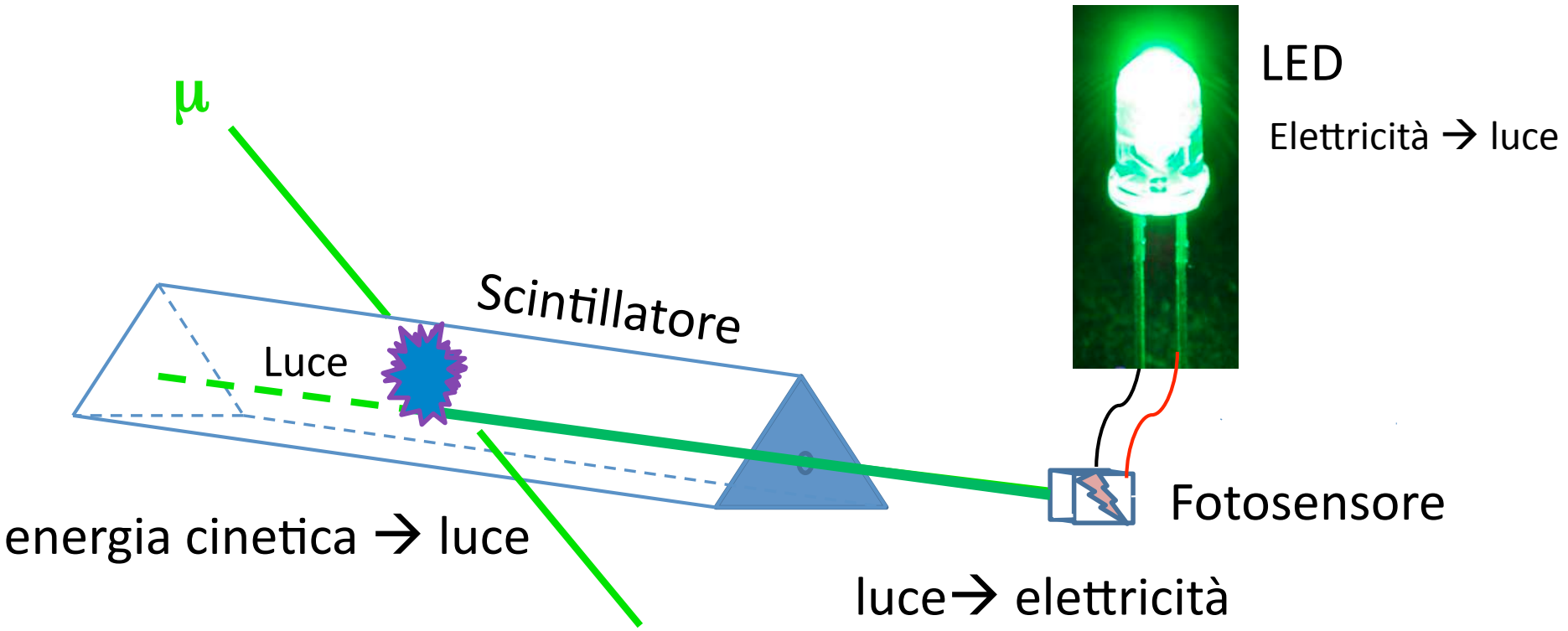
LED: converte un segnale elettrico in un segnale luminoso (ma di intensità maggiore)



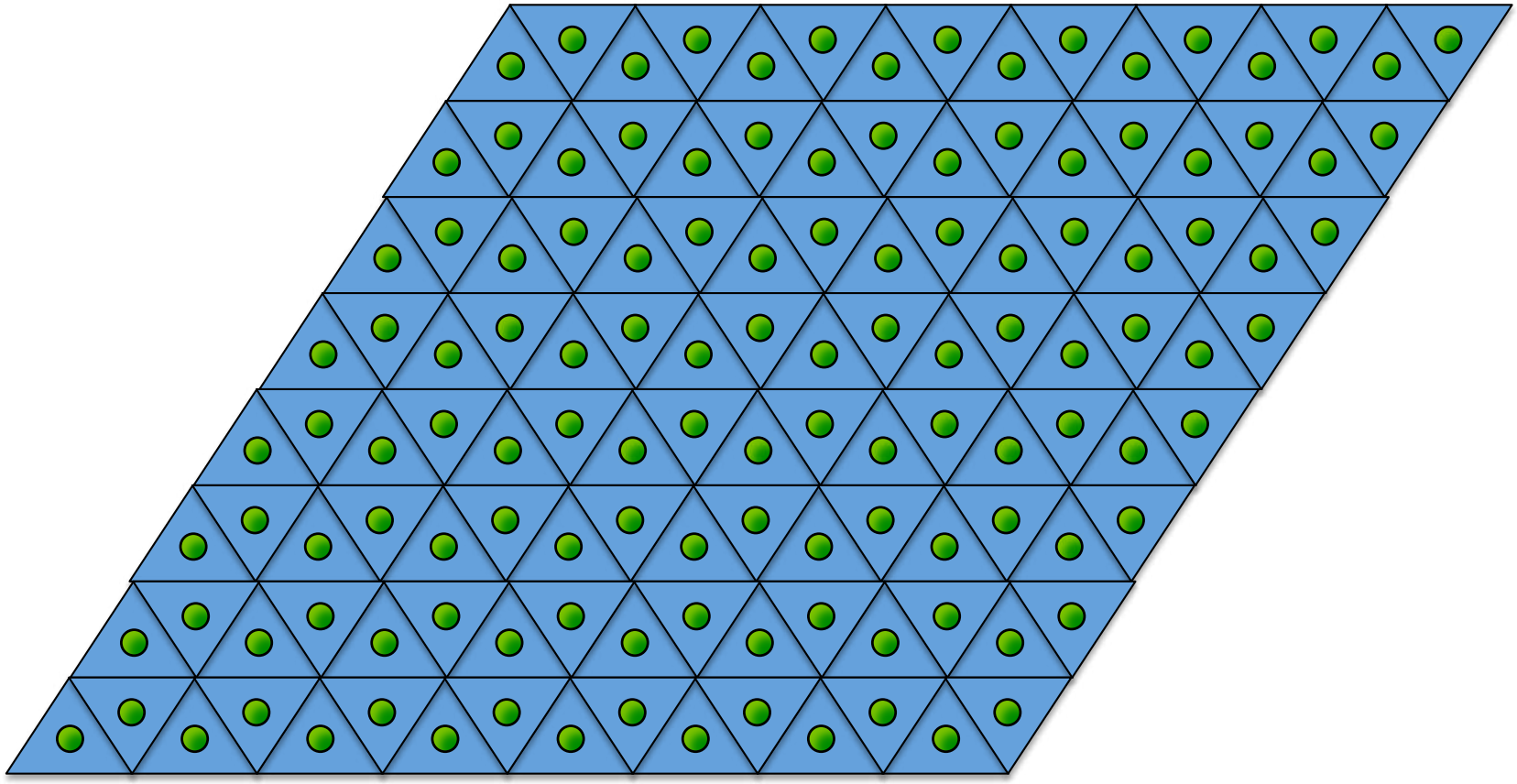


Trasduzione dei segnali (trasformazione)

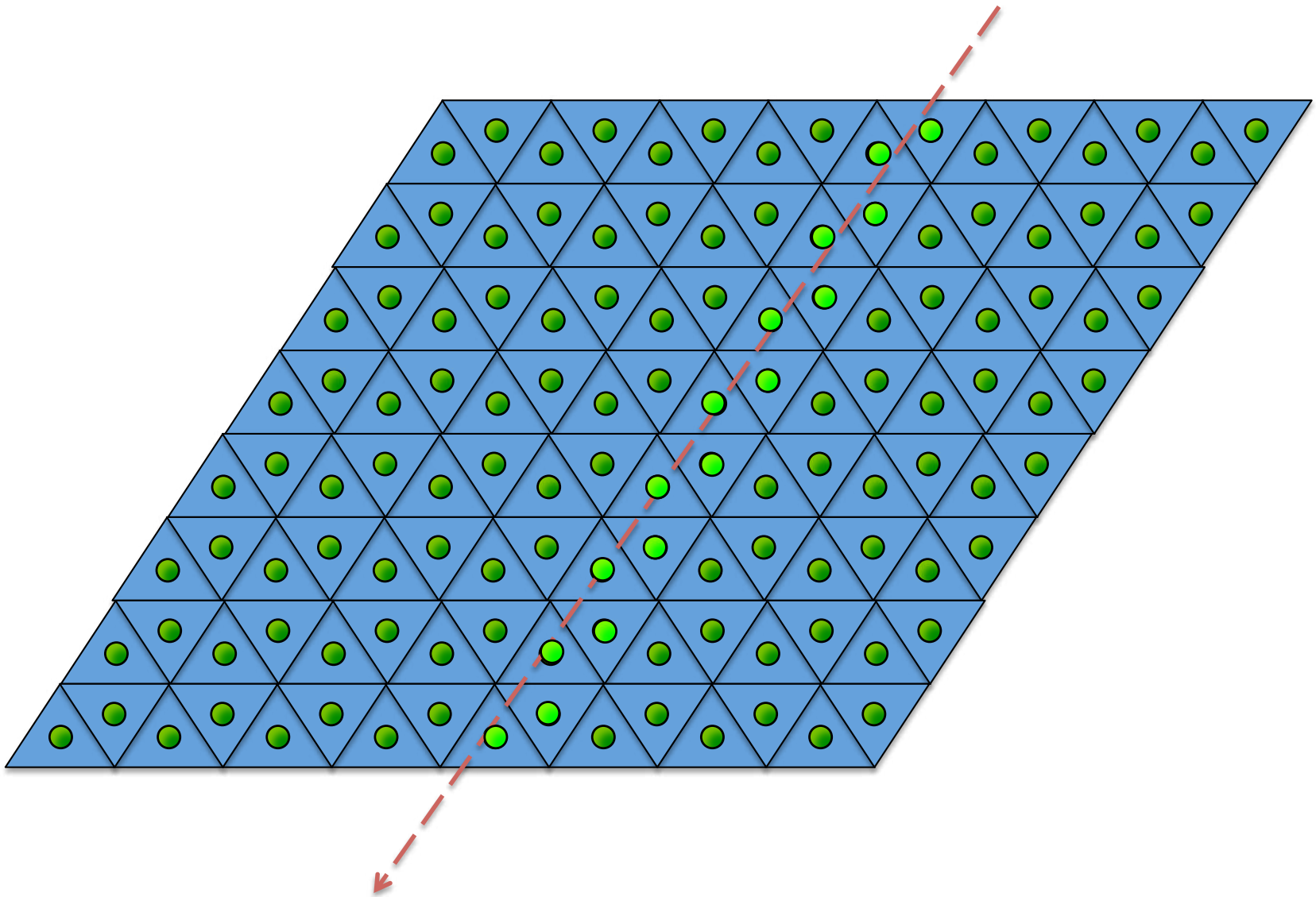
Energia cinetica -> luce -> elettricità -> luce



Un esempio di tracciatore



Un esempio di tracciatore



Rivelatore alla stazione metropolitana di Toledo (30 m profondità) muoni in tempo reale

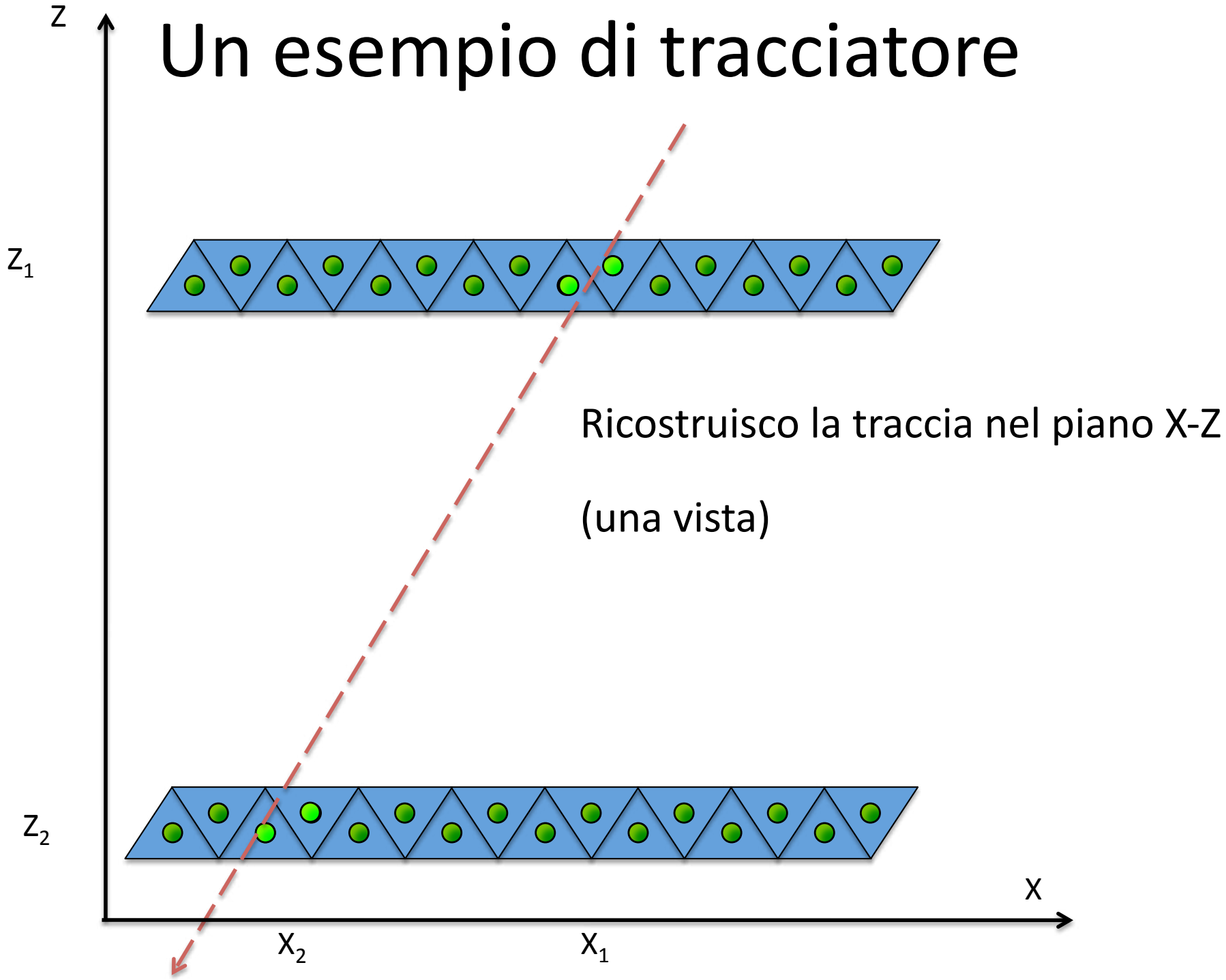
Tracciatore elettronico

Anche se affascinante il rivelatore a LED non è pratico per le misure di radiografia muonica

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

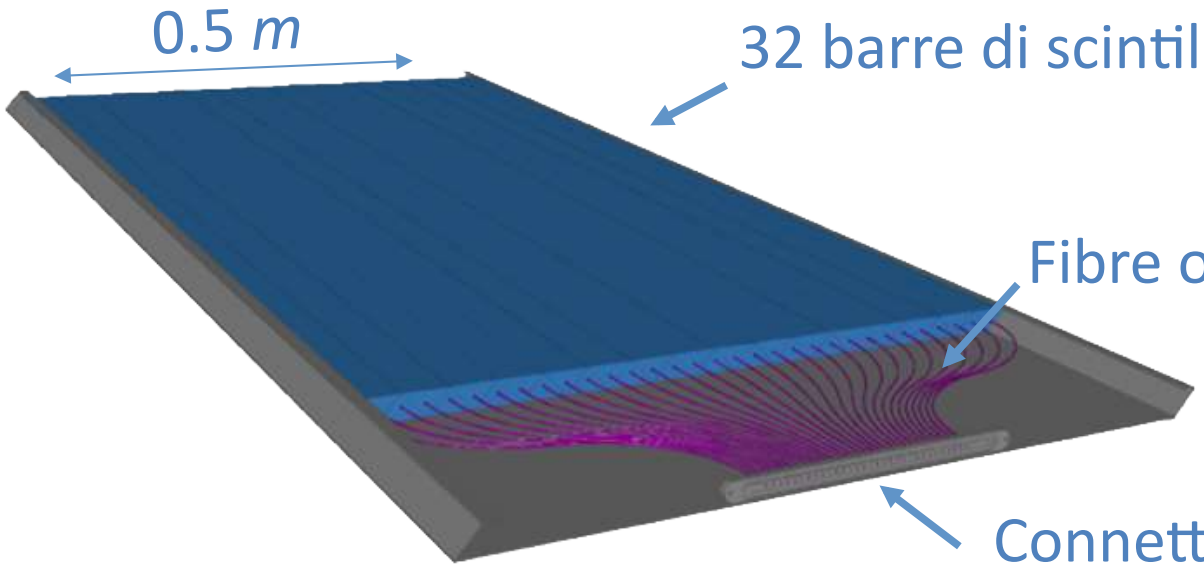
Un esempio di tracciatore



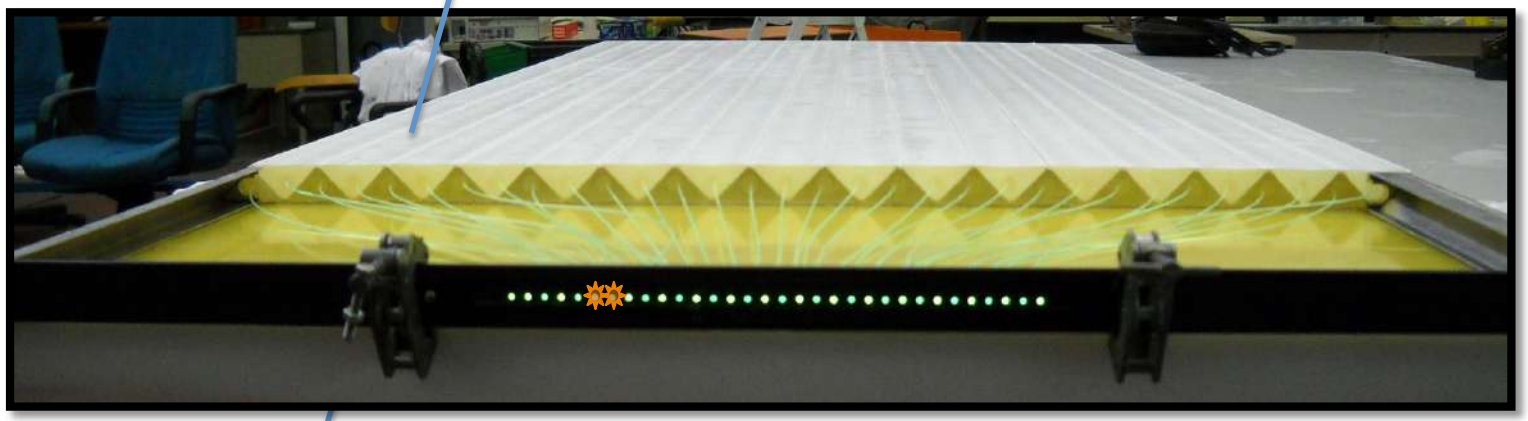
Ricostruisco la traccia nel piano X-Z

(una vista)

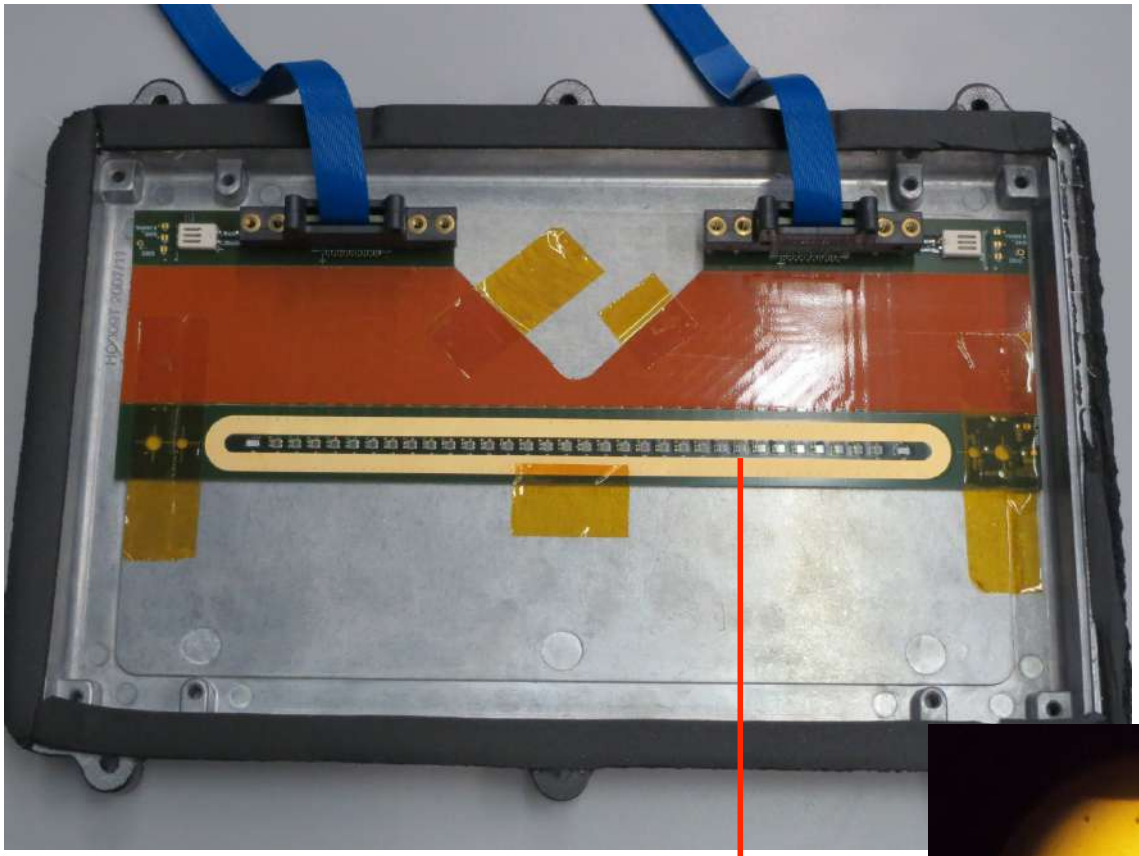
Il Modulo Base MU-RAY

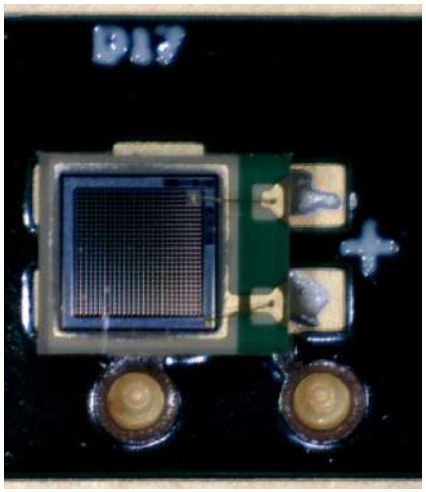


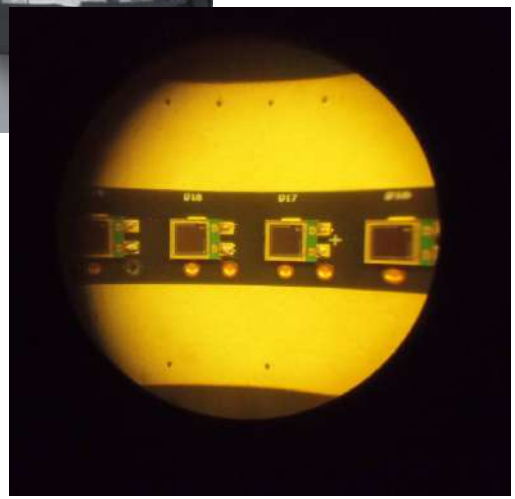
Modulo del rivelatore MU_RAY (INFN)



I sensori di luce: fotomoltiplicatori al Silicio

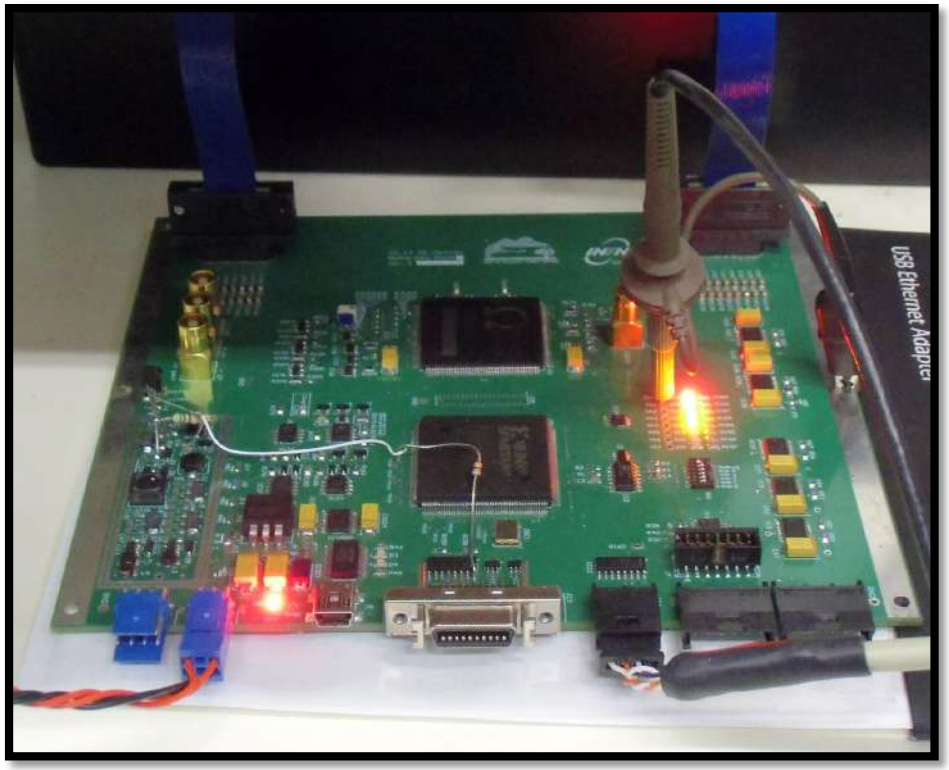


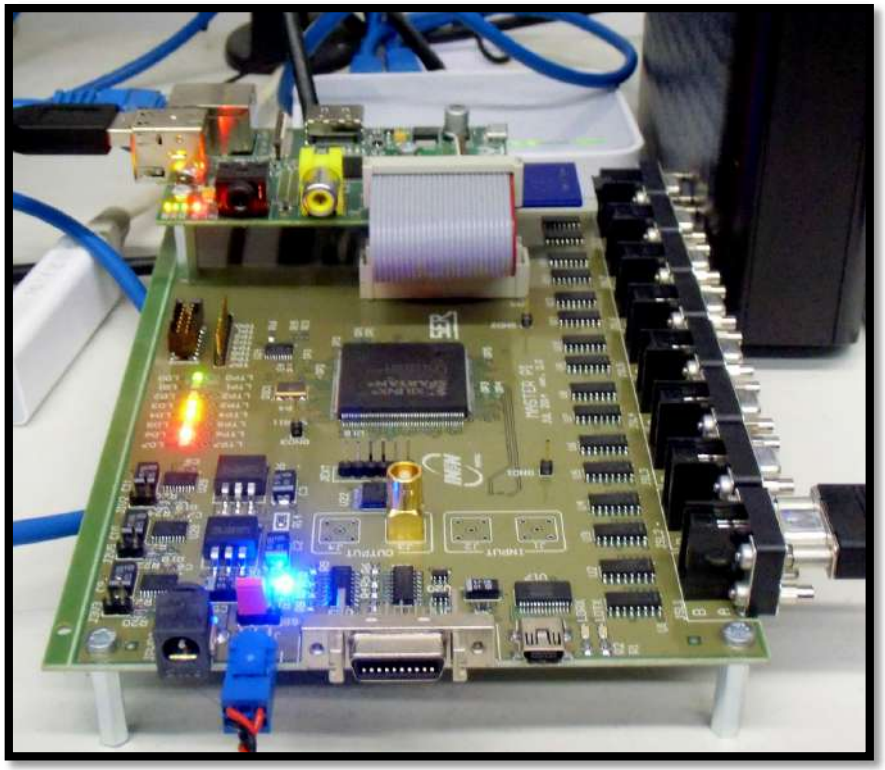




L'elettronica di acquisizione

I segnali elettrici invece di essere convertiti in segnali luminosi (LED) sono digitalizzati e memorizzati su di un computer, quindi le tracce vengono ricostruite.



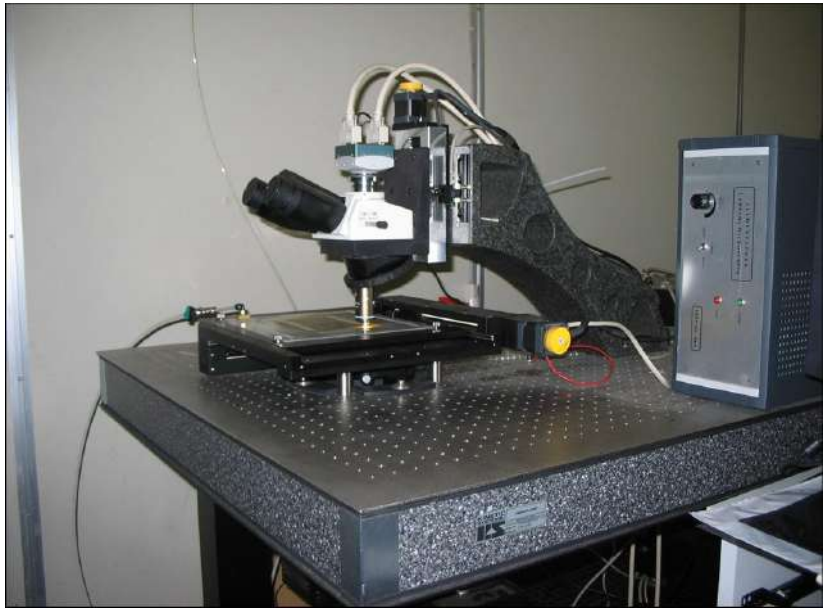


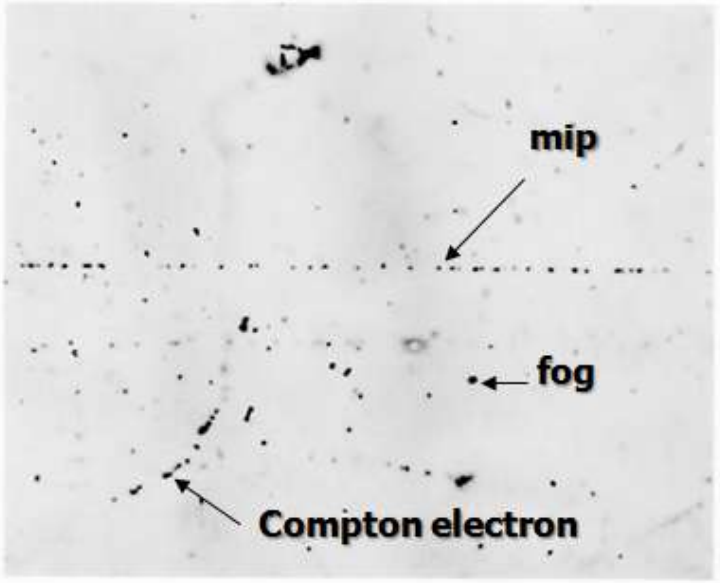
Elettronica a bassissimi consumi energetici per poter essere usata anche in mancanza di una rte elettrica (<50 W per 384 canali)

Un esempio di tracciatore a scintillatori plastici: MU-RAY

Tecnica alternativa: emulsione nucleare

Simile alle pellicole fotografiche
Esposte per un periodo, sono quindi "sviluppate"





Radiografia muonica per deflessione multipla (scattering)

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

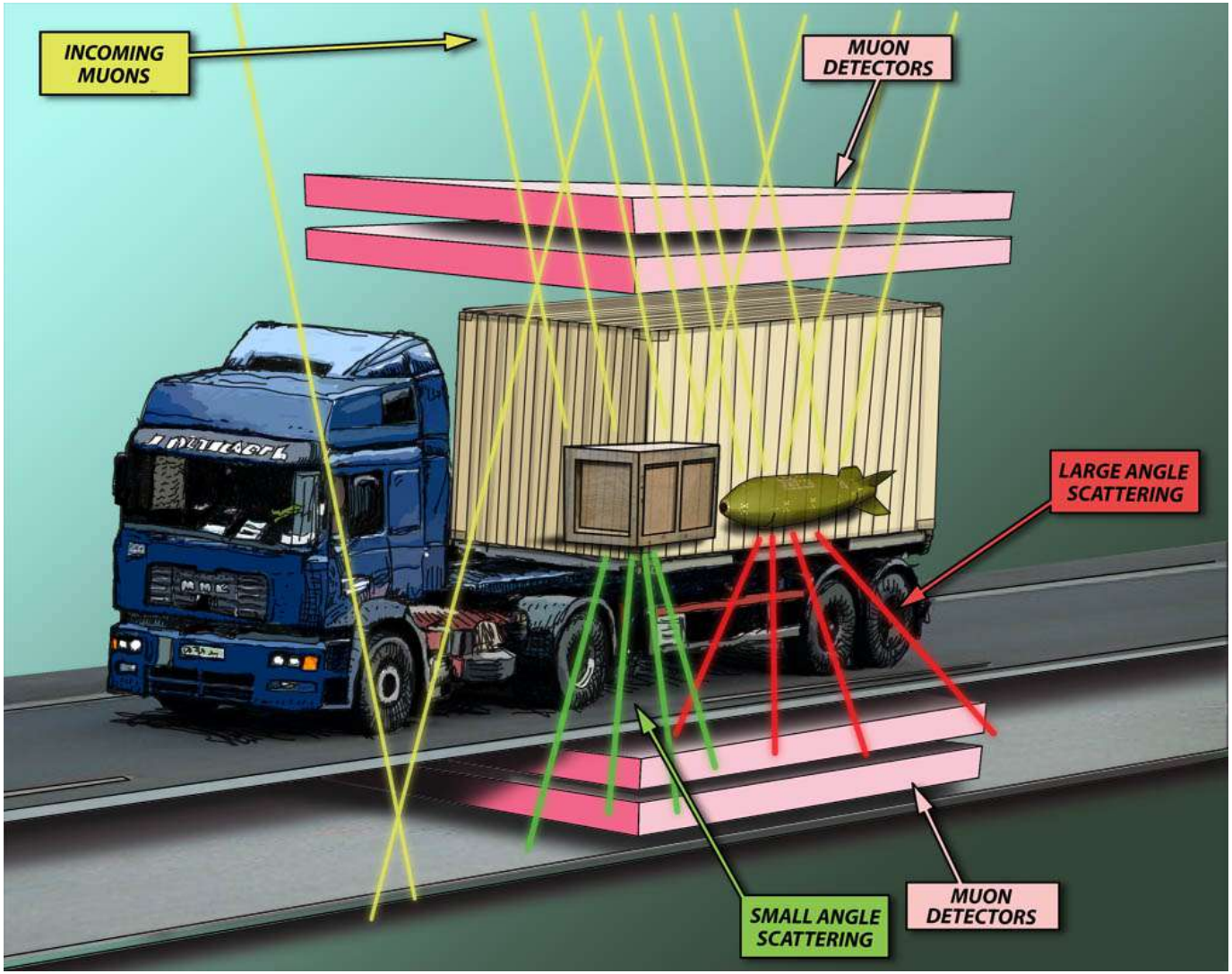
Necessita di due rivelatori che misurano la direzione del muone prima e dopo aver penetrato l'oggetto che si vuole misurare

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

Tecnica proposta da un gruppo di Los Alamos per il controllo di materiali ad alto Z

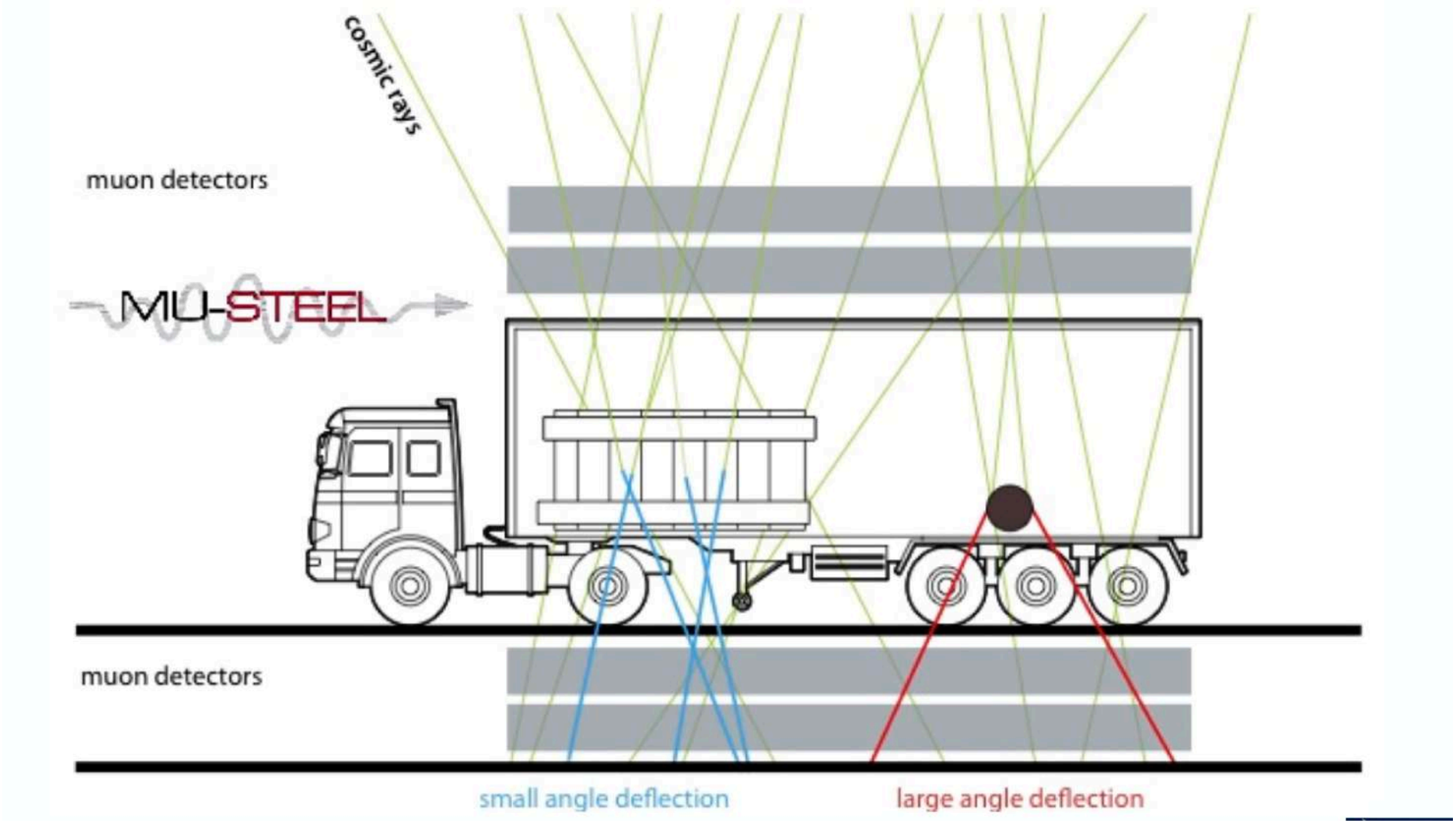
(contrabbando di materiale fissile)

Contrabbando di armi nucleari



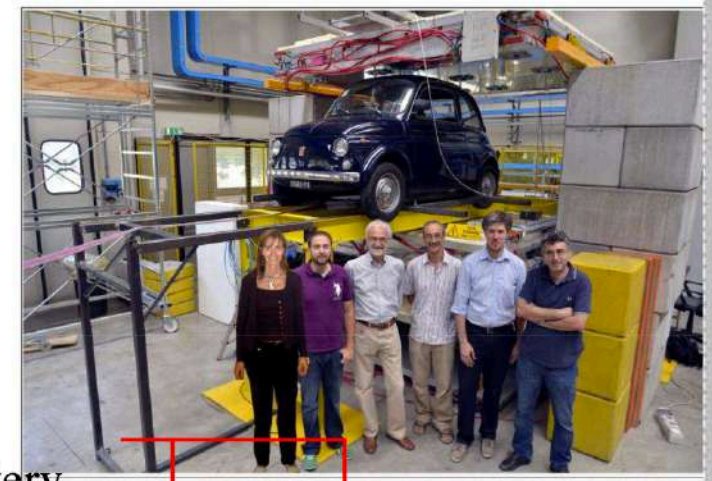
Progetto mu-steel (INFN)

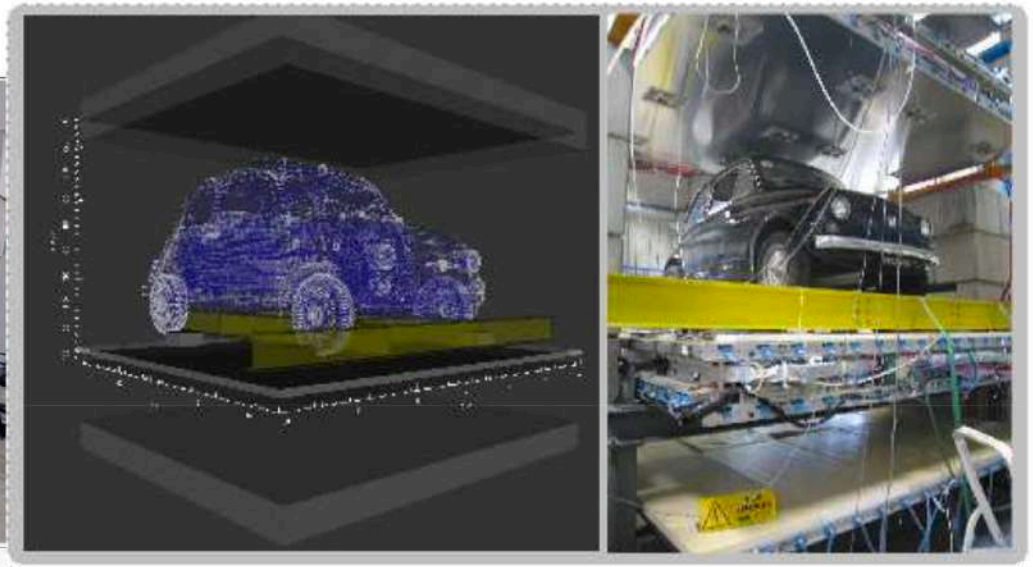
RICERCA SORGENTI RADIOATTIVE ORFANE NEL RICLICLO DEL FERRO



Progetto mu-steel

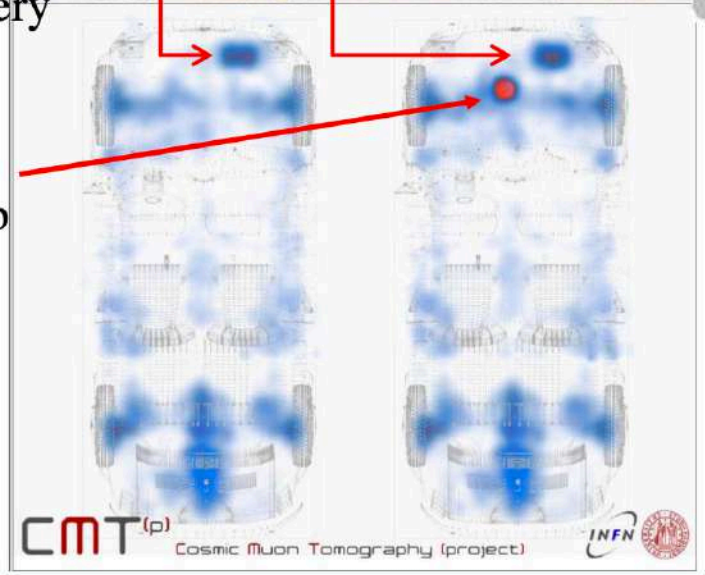
A tomographic image of an original FIAT "500"!

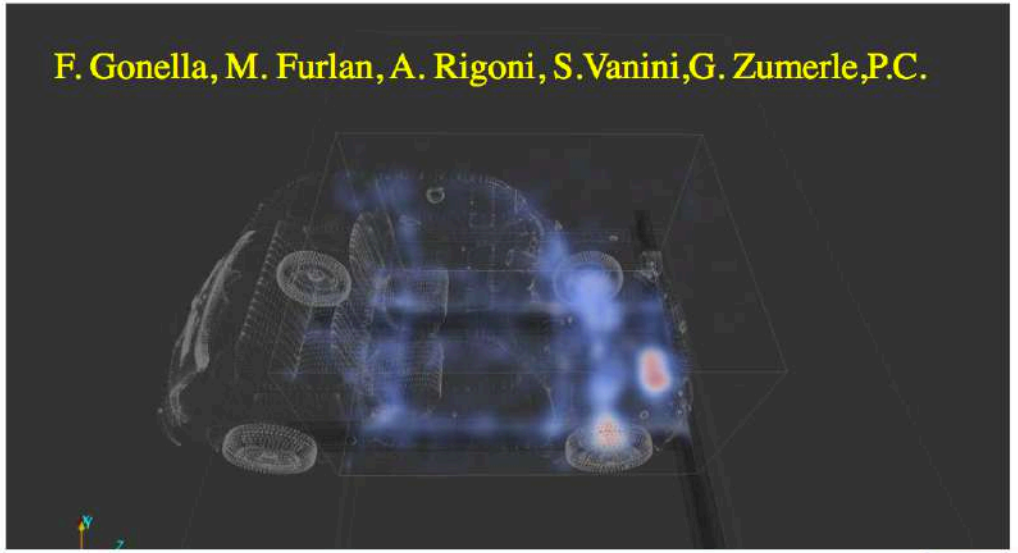




Battery

11 Pb





II PARTE

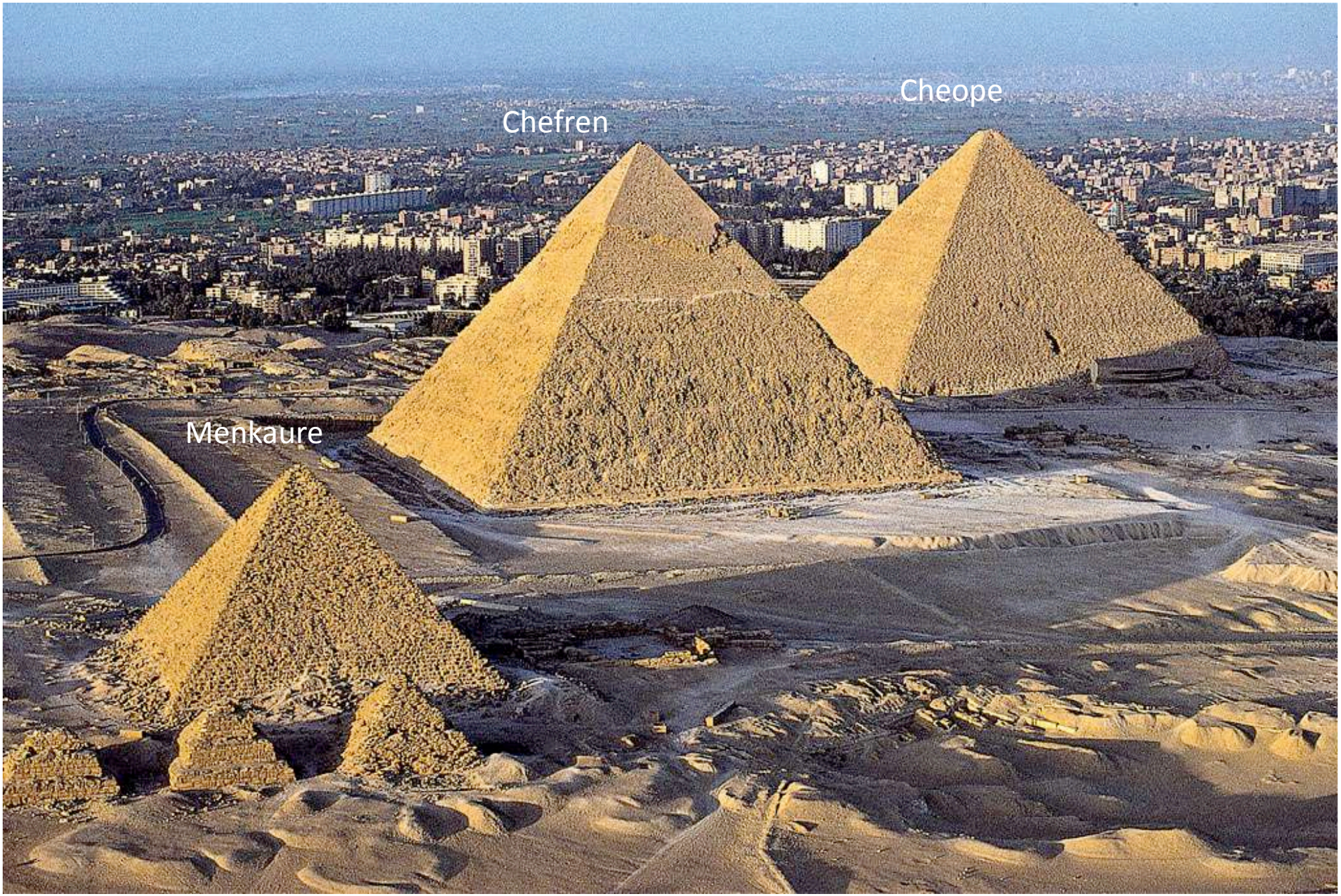
Applicazioni della radiografia muonica

Archeologia

Indagine del sottosuolo

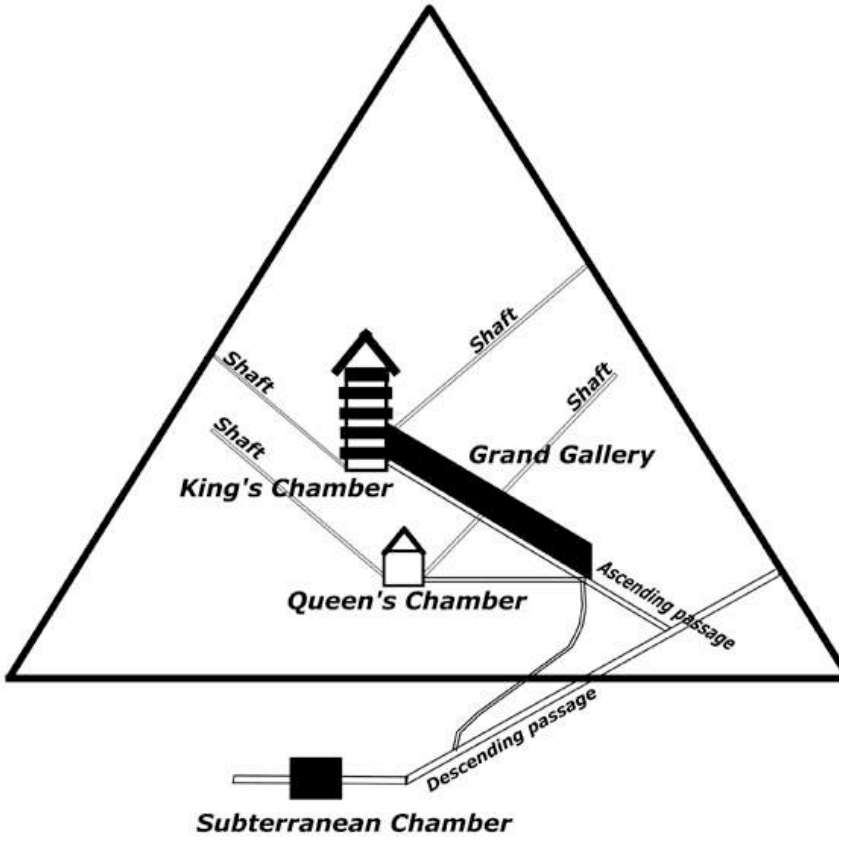
Studio dei vulcani

STUDIO DELLE PIRAMIDI

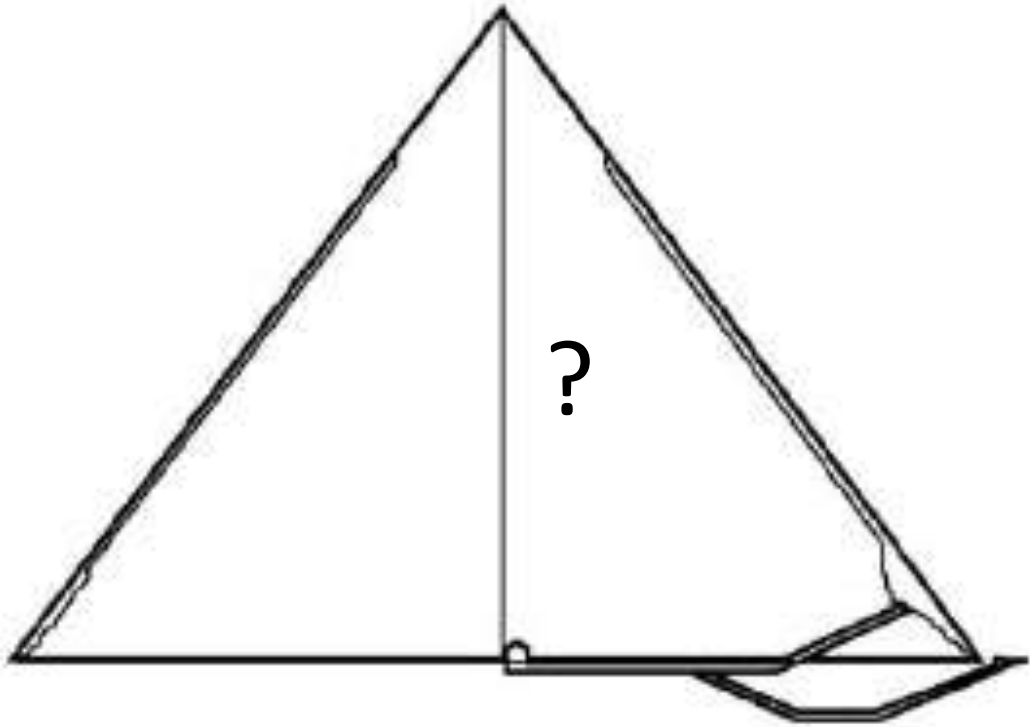


Complesso delle piramidi di Giza

Le due piramidi sono esternamente molto simili.
Non altrettanto lo sono all'interno.
Forse c'è una camera non ancora scoperta?



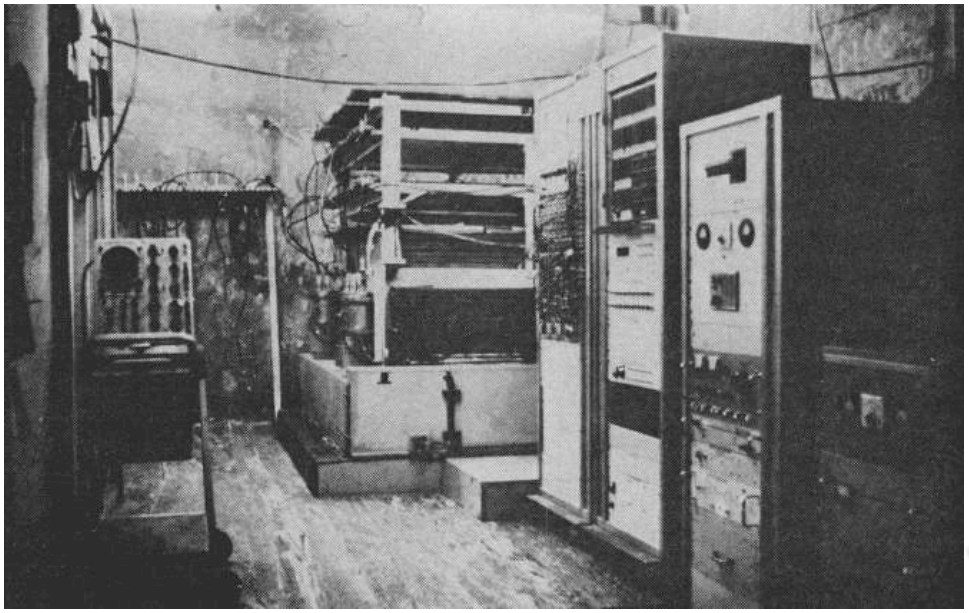
Piramide di Cheope

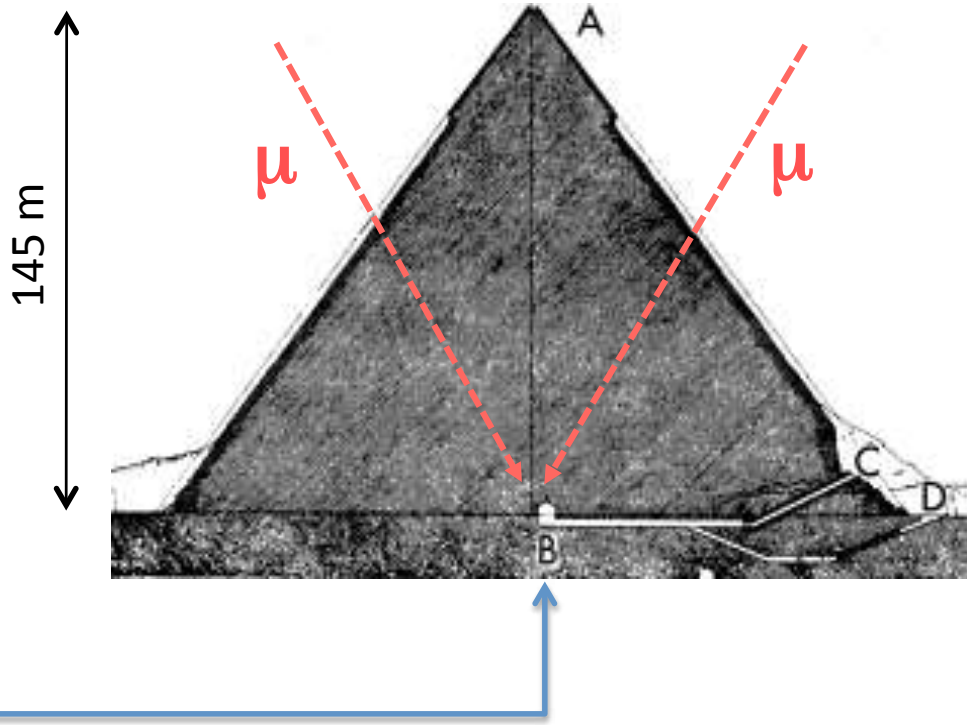


Piramide di Chefren

L'esperimento di Luis Alvarez (1967-1970)

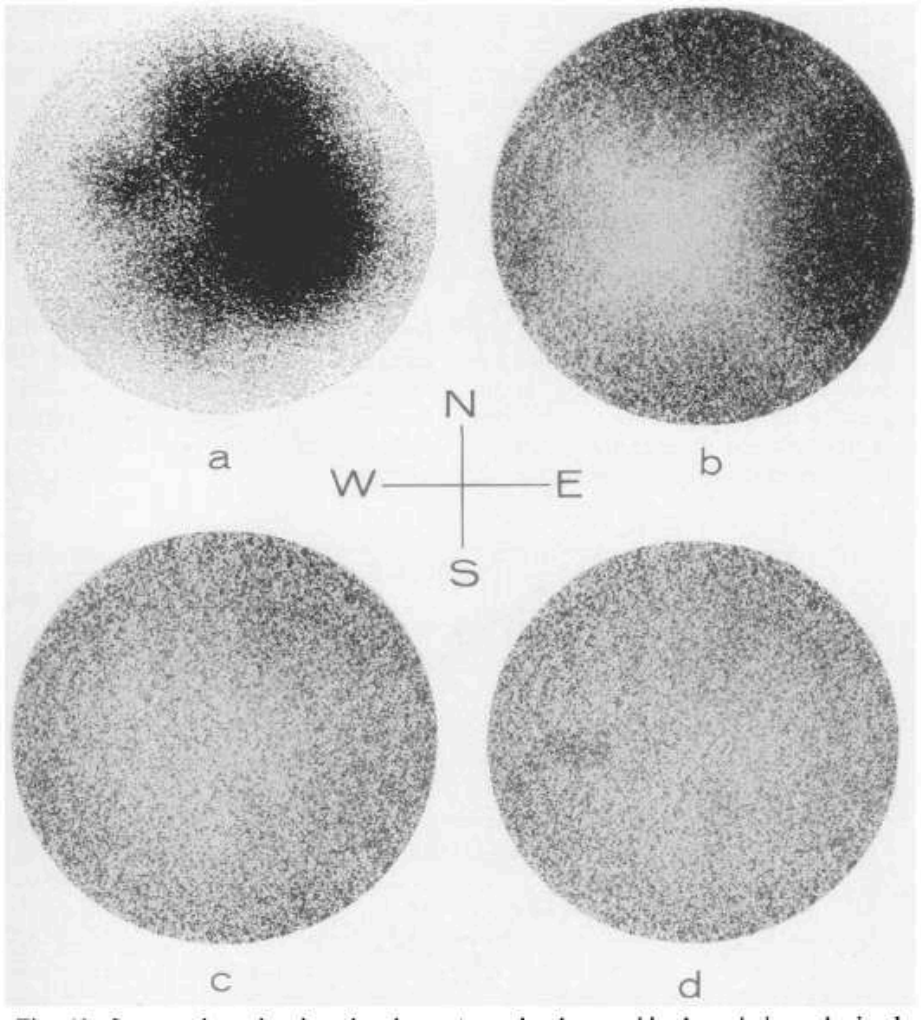
Installò un rivelatore nella stanza di Belzoni, alla base della piramide





I dati sperimentali

Dati "grezzi"



correzione accettanza rivelatore

Correzione geometria piramide

Simulazione di una camera

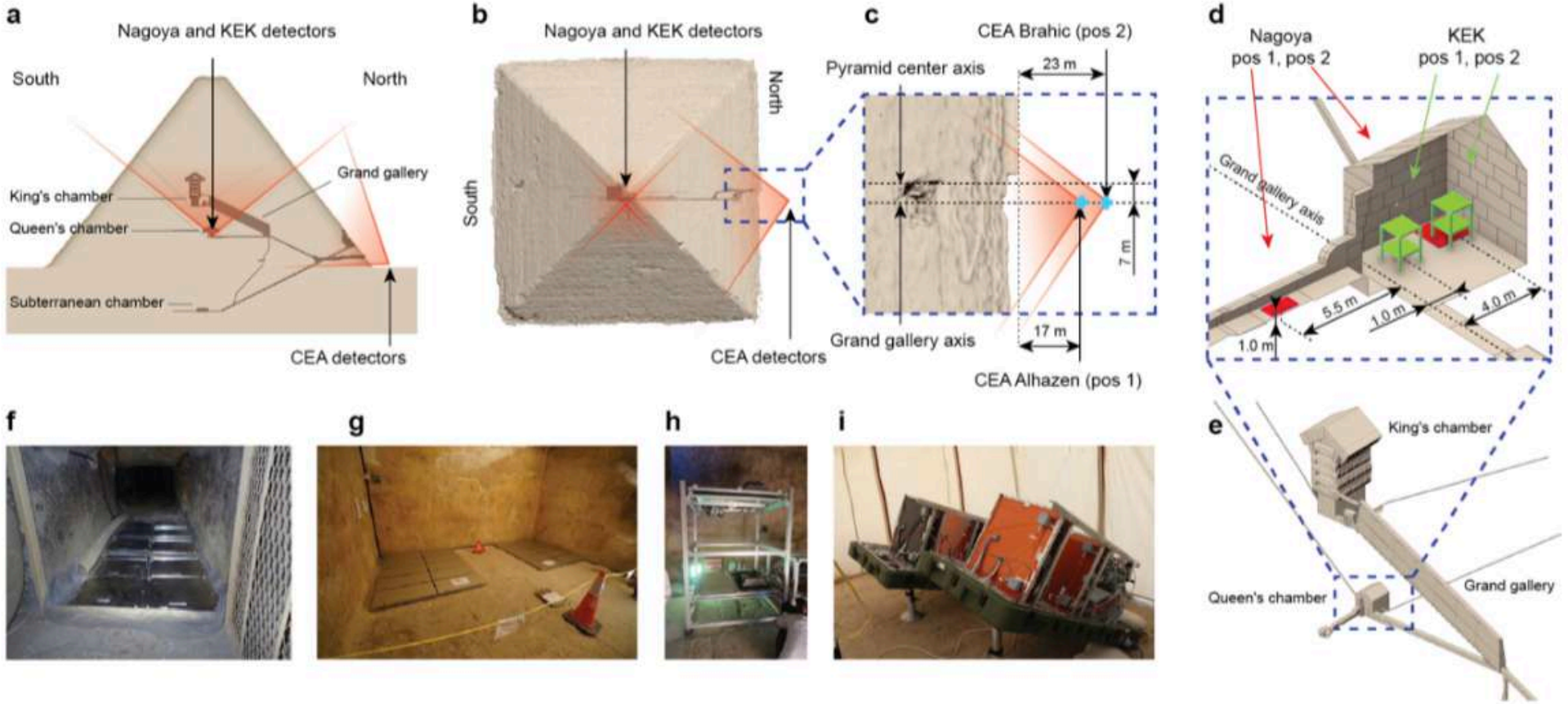
Nessuna evidenza di una camera, almeno nel volume esplorato (solo il 19% dell'intero volume)

Il progetto Pyramid SCAN (Egitto-Giappone)

Studio di diverse piramidi Bente, Red, Chefren sia con la Termografia infrarossa che con i muoni
maggiori informazioni: http://www.scanpyramids.org

Piramide di Khufu (Cheope)

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



Piramide di Khufu (Cheope)

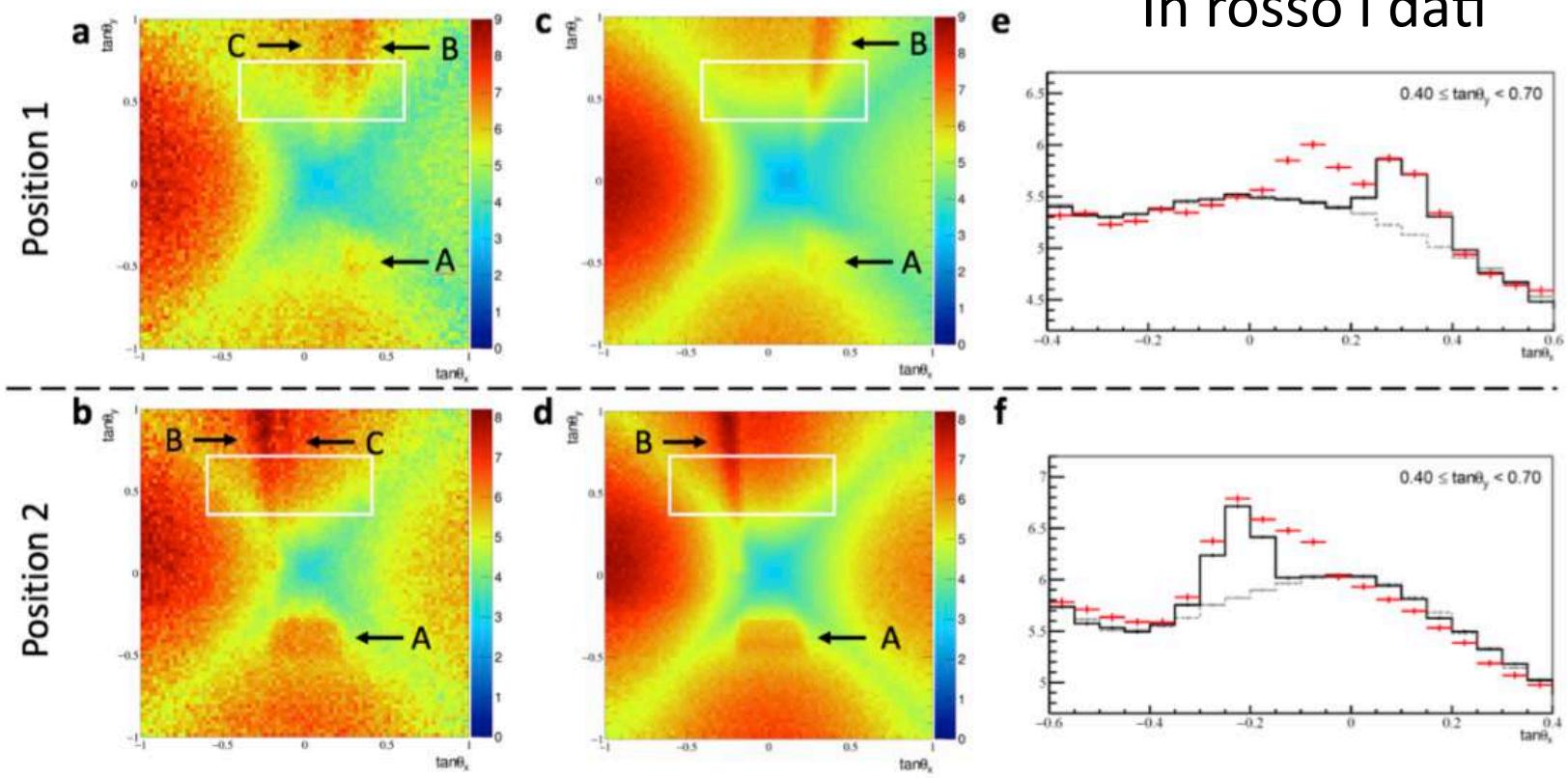
Chiaro segnale della presenza di una cavità (emulsioni)

Flusso di muoni

Dati

Simulazione

Box bianco
In rosso i dati



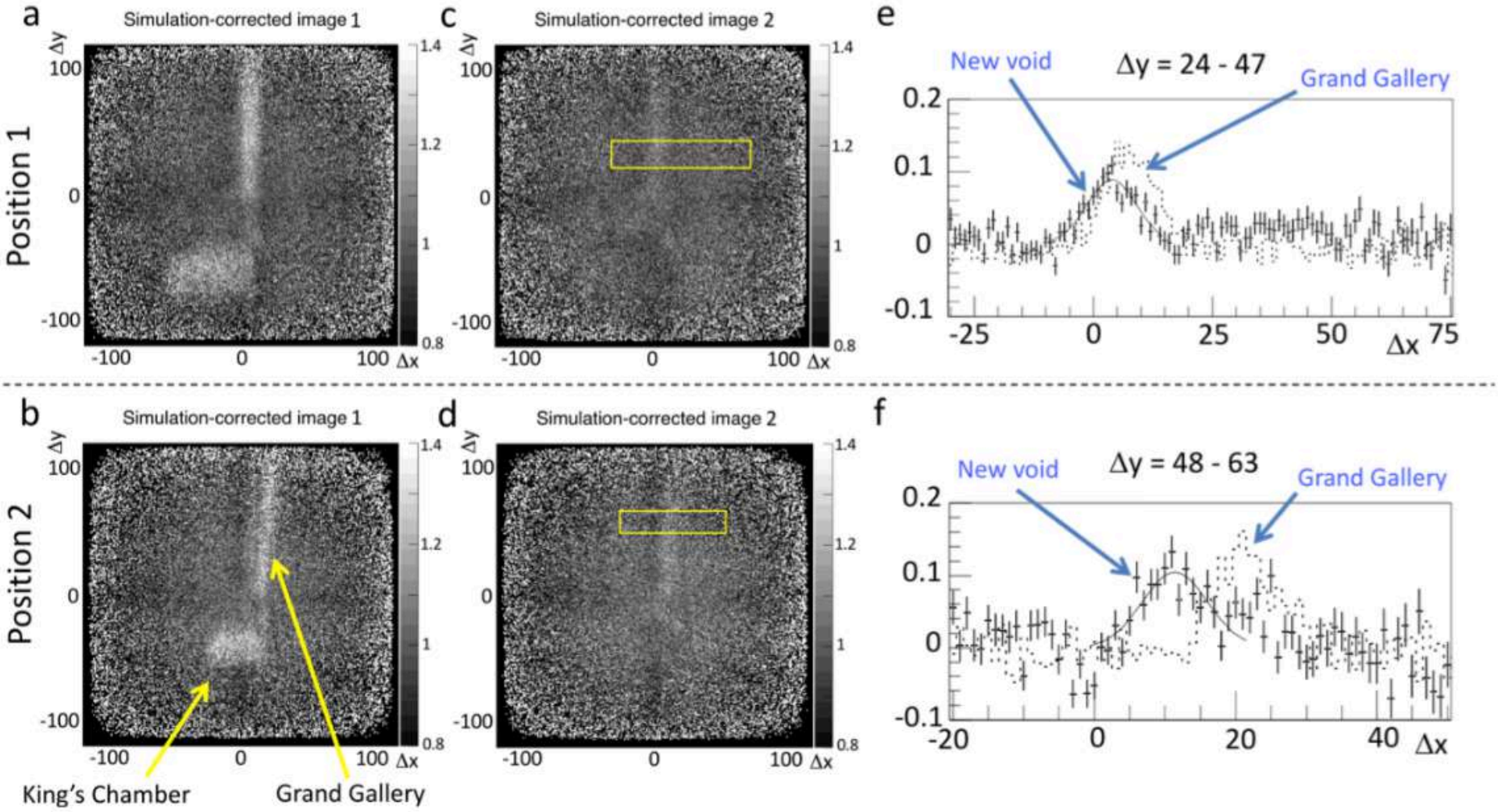
Volumi noti: B galleria grande A camera del re.
C segnale del vuoto inaspettato

Piramide di Khufu (Cheope)

(scintillatori)

no sottrazione ambienti noti

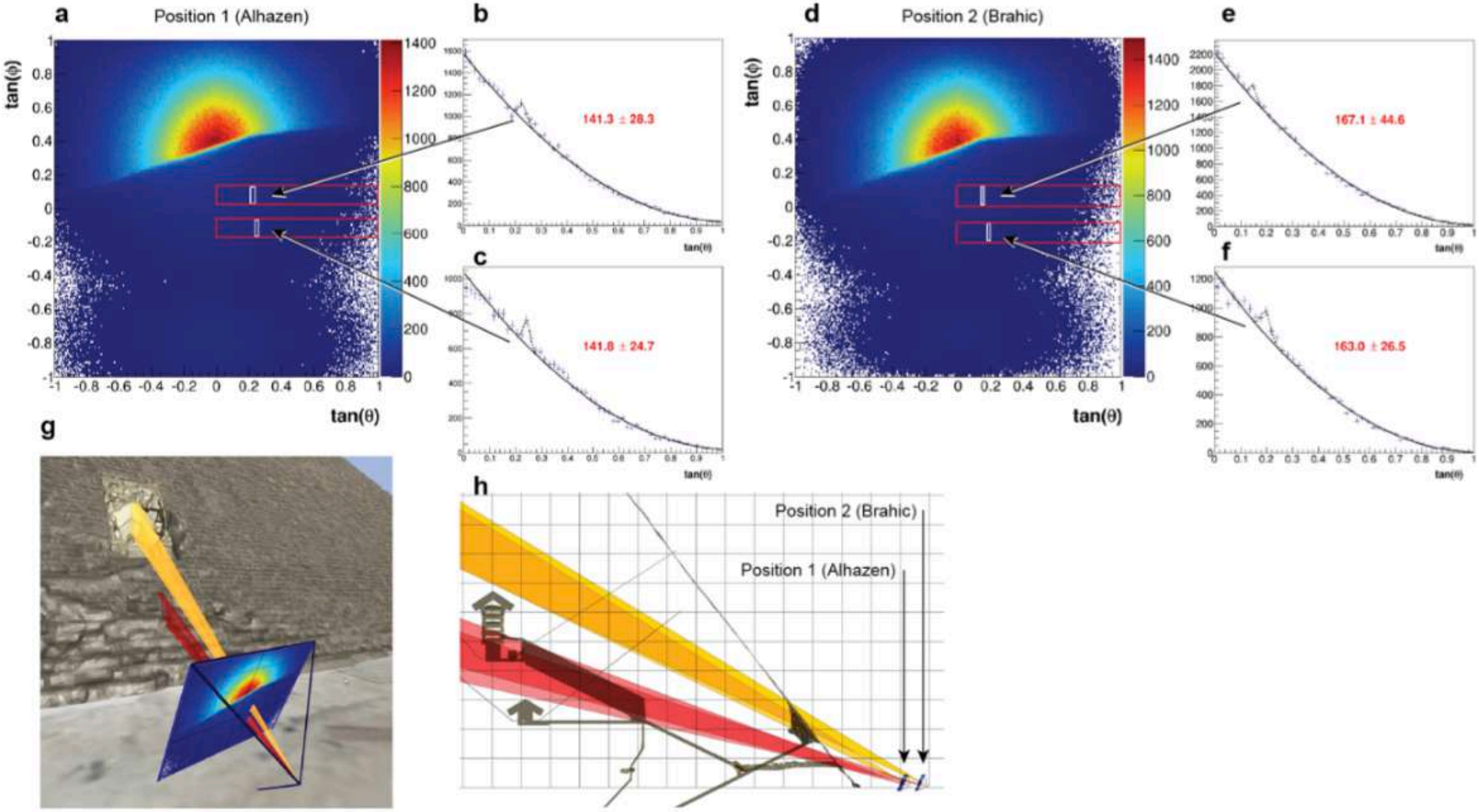
CON sottrazione ambienti noti



Piramide di Khufu (Cheope)

Chiaro segnale della presenza di una cavità (rivelatori a gas, esterni)

Flusso di muoni



Non solo Egitto: la piramide del sole (Teotihuacan Messico)

Università Autonoma del Messico

Non solo Egitto:La Milpa in Belize,

Università del Texas

Applicazioni della radiografia muonica

Archeologia

Indagine del sottosuolo

Studio dei vulcani

Mt Echia come un laboratorio

L'antica citta di Partenope (VIII B.C.)

Diventa Palepoli (città antica) quando Neapolis (città nuova) viene fondata (VI B.C)

Dimostratore delle potenzialità nel campo della ricerca di cavità nel sottosuolo

INFN Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

stress

TECNO IN GEOSOLUTIONS

GALLERIA BORBONICA

METROPOLIS

UNIONE EUROPEA

PON Ricerca e Competitività 2007/2013

Piano di Azione Coesione

Ministero dell'Istruzione dell'Università e della Ricerca

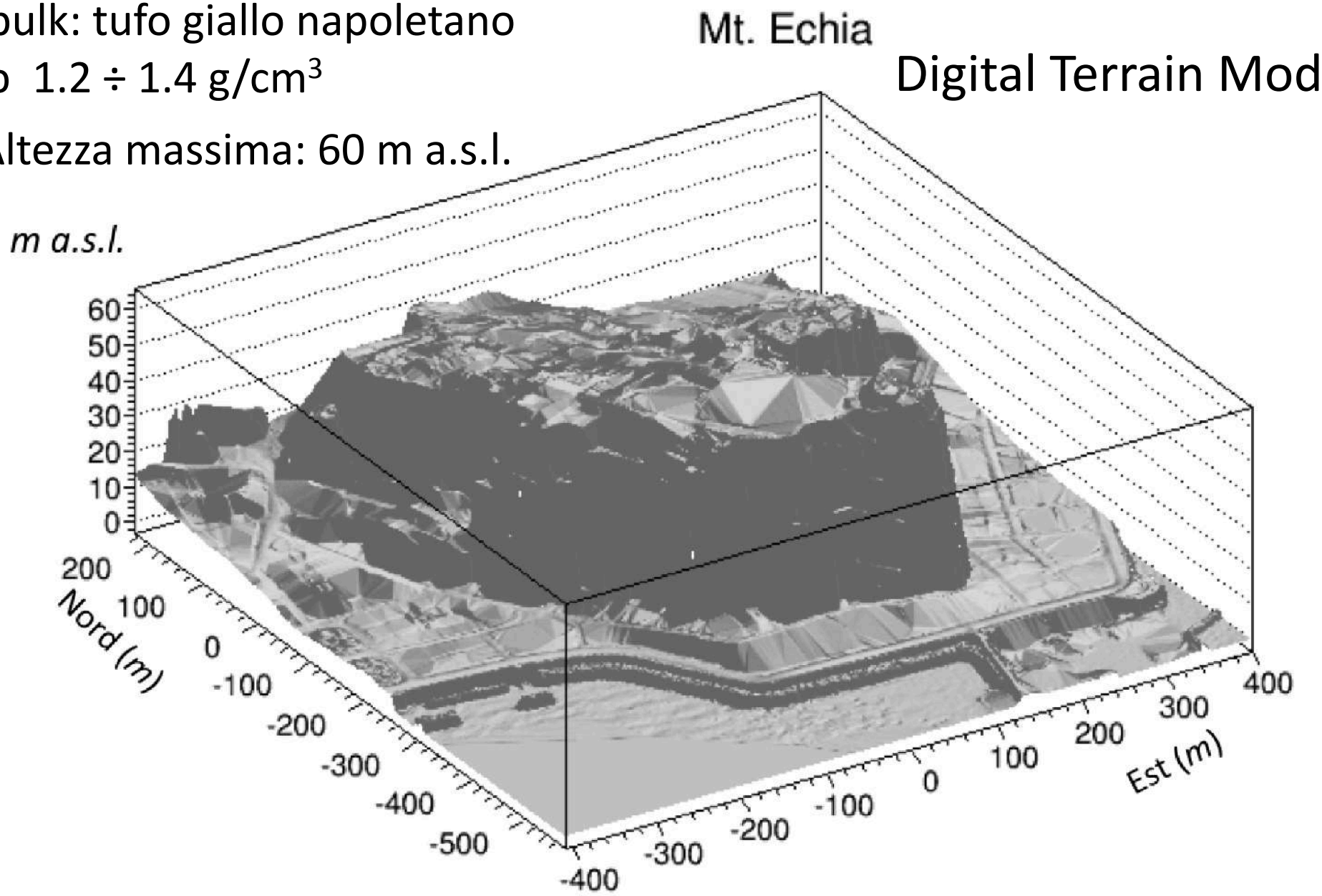
Il Ministro per la Coesione Territoriale

Mt Echia

bulk: tufo giallo napoletano

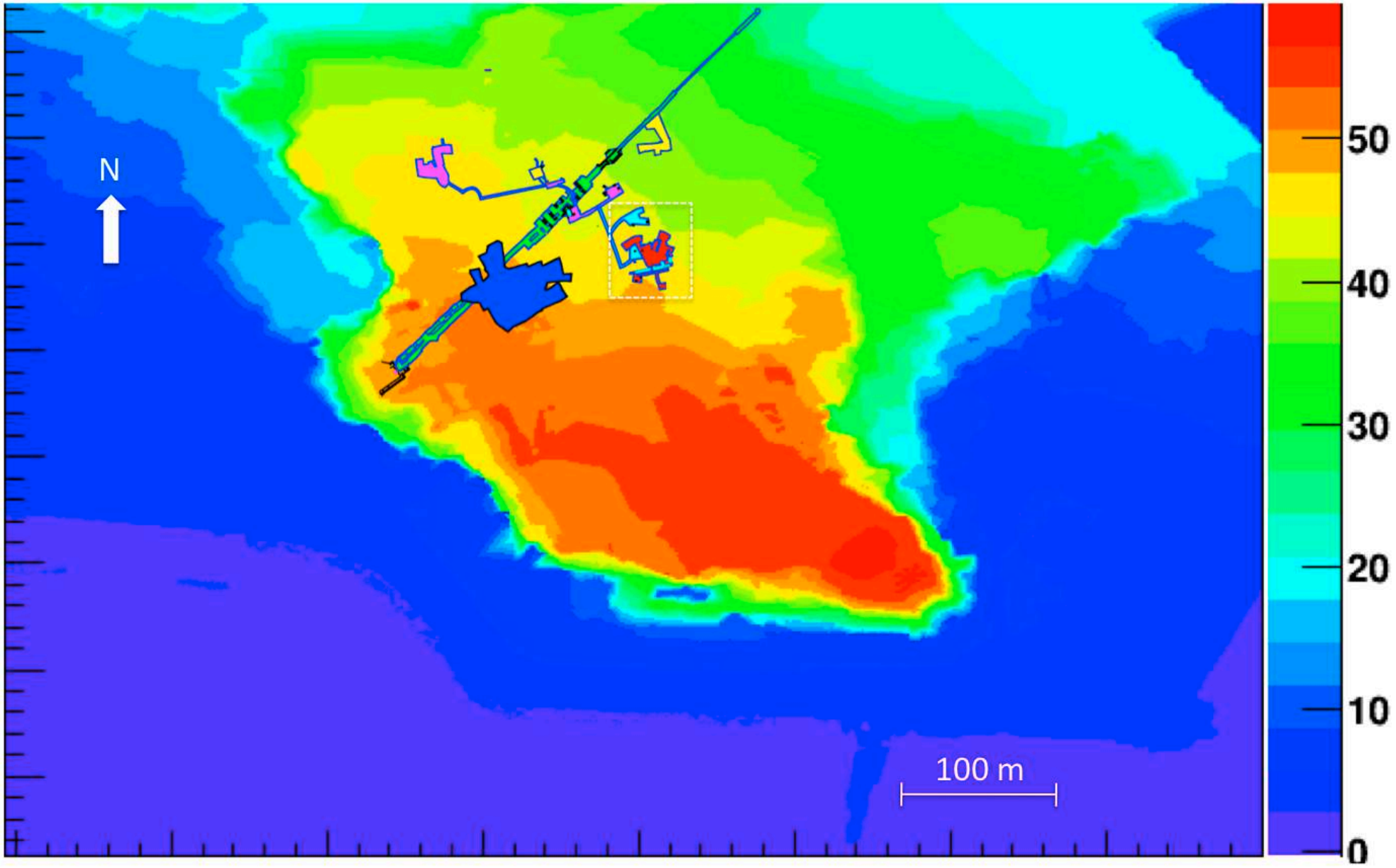
ρ 1.2 ÷ 1.4 g/cm^3

Altezza massima: 60 m a.s.l.



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….

Il tunnel borbonico

Il sito di osservazione

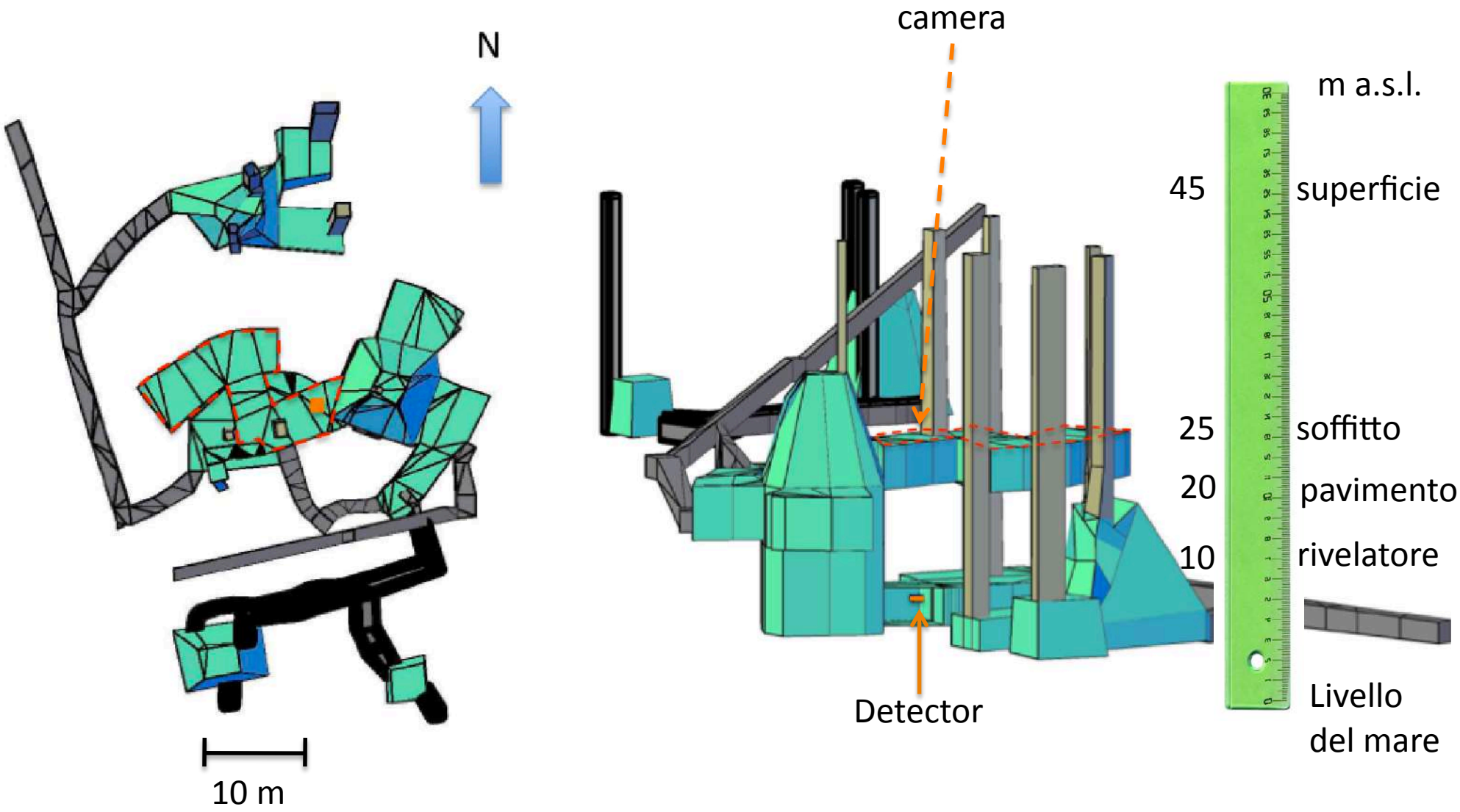
12 m sul livello del mare

35 m di profondità

Cisterna del Palazzo di Serra di Cassano

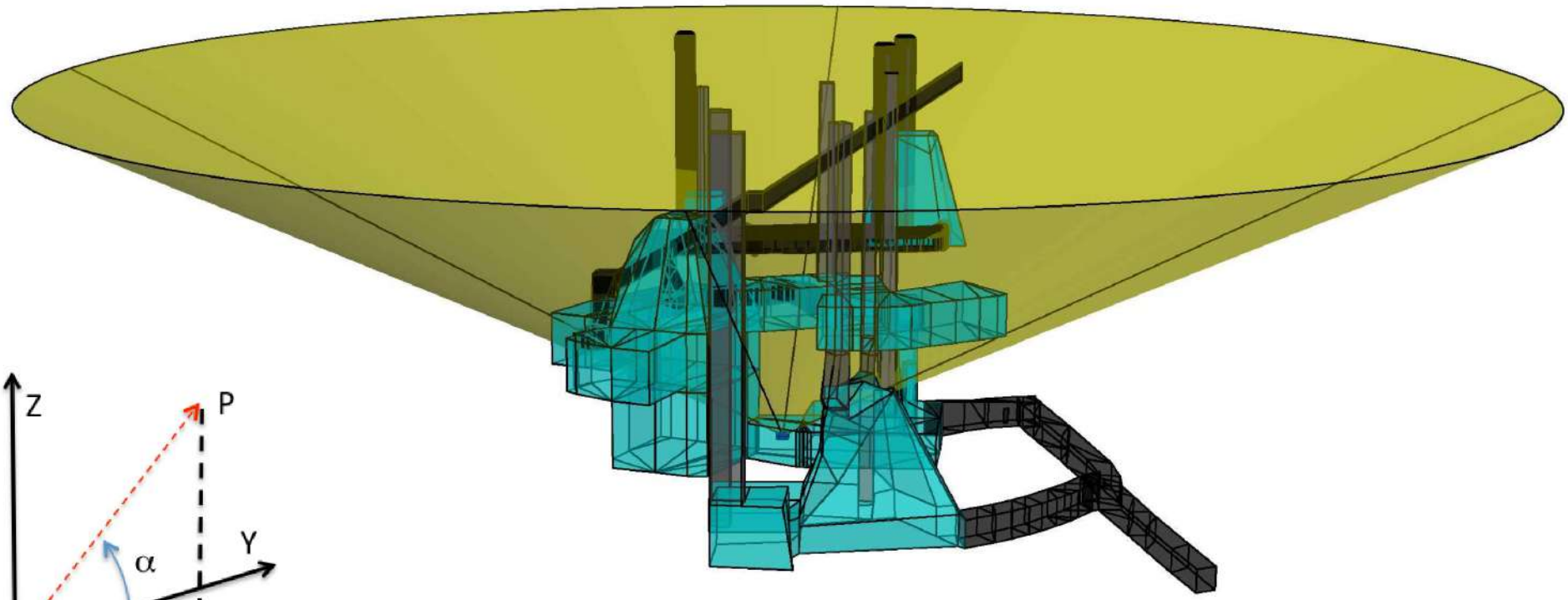
Test

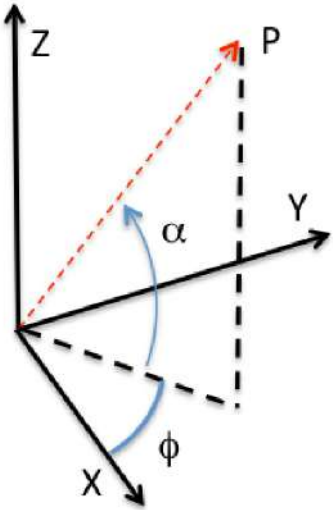
"Trovare" una camera vuota posta sopra il rivelatore



Molte altre strutture vuote in accettanza

Accettanza del rivelatore: cono di 63° semiapertura





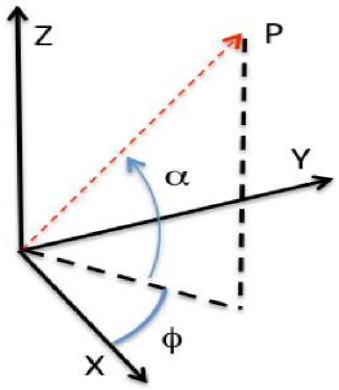
Lo stimatore R

$$R(\rho, \alpha, \phi) = \frac{T^m(\alpha, \phi)}{T(\rho, \alpha, \phi)}$$

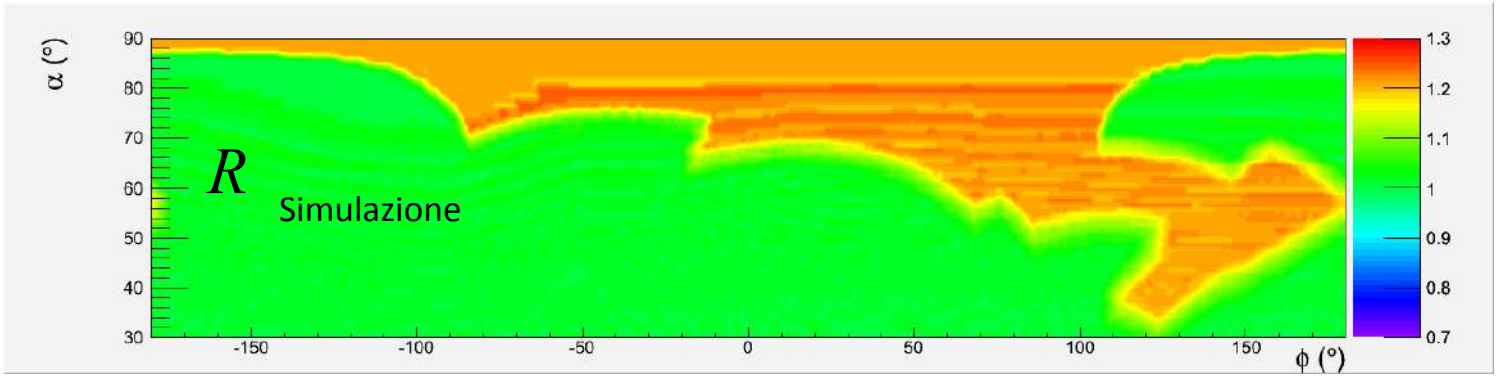
Trasmissione di muoni misurata divisa trasmissione attesa

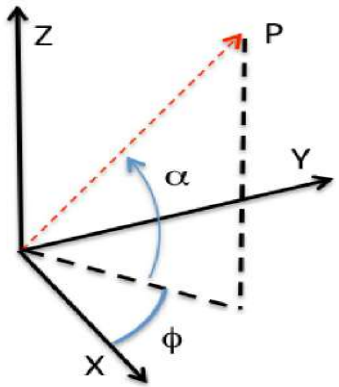
$R \cong 1$ in assenza di cavità

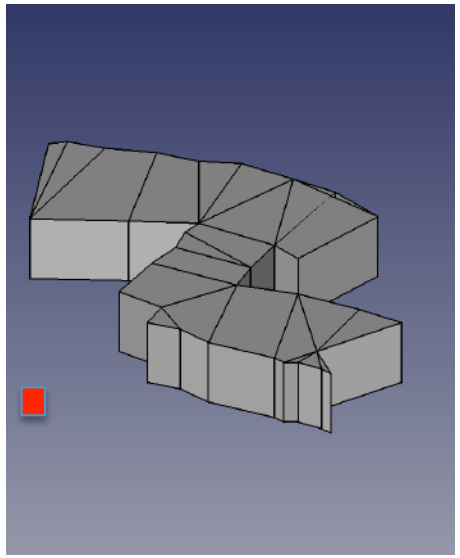
$R > 1$ in presenza di cavità



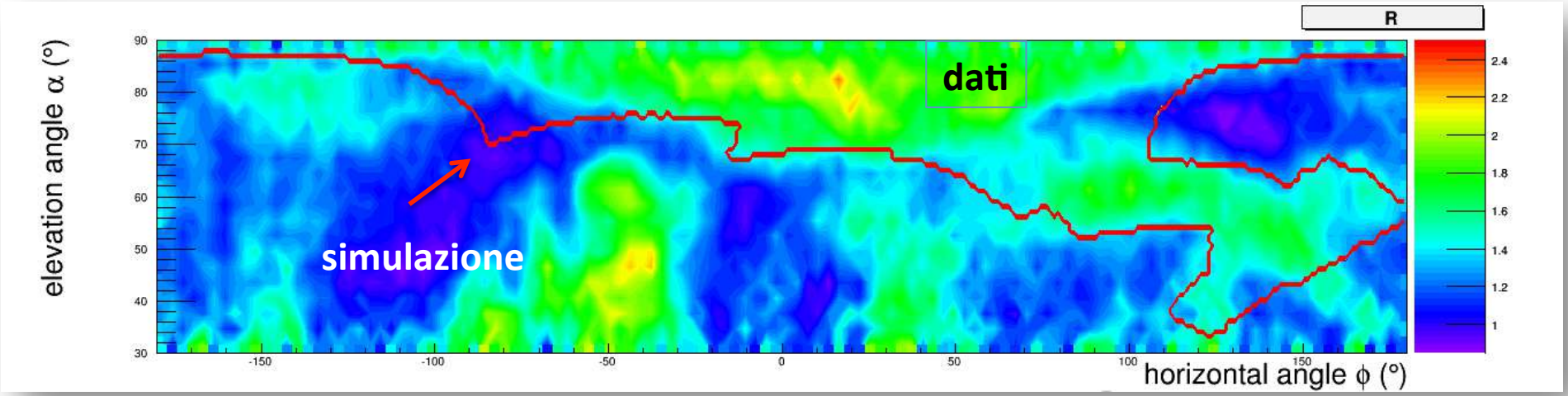
Segnale atteso per la sola camera di test

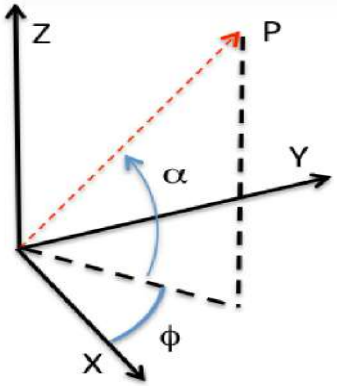


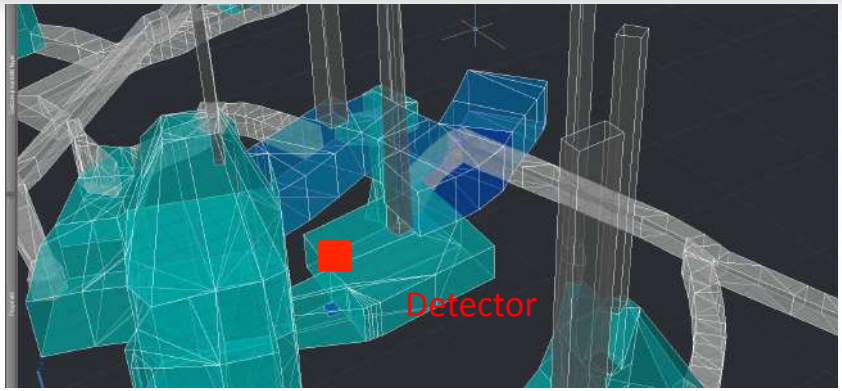




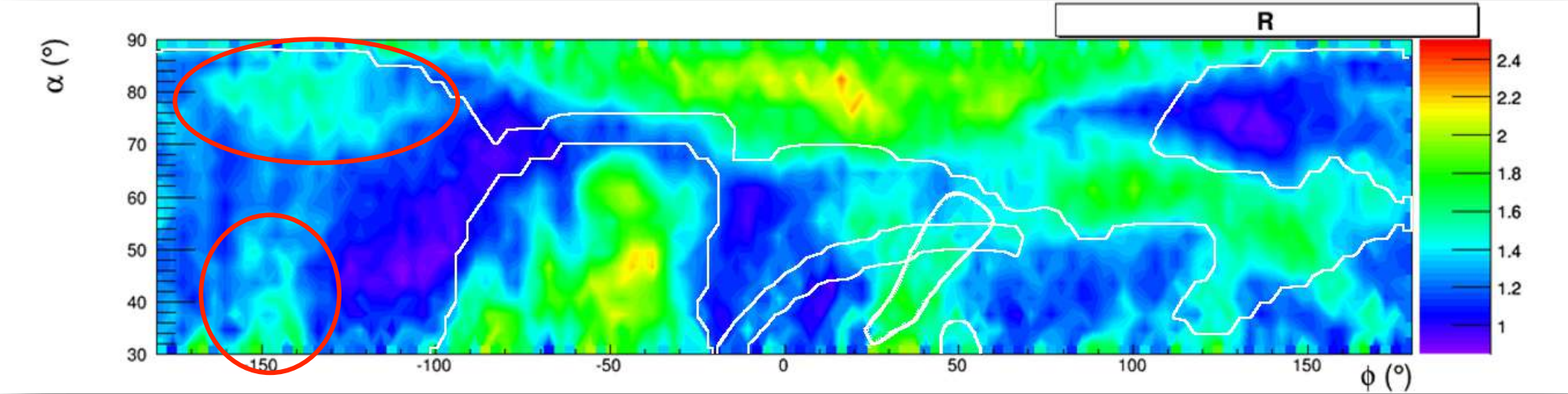
Confronto dati e simulazione





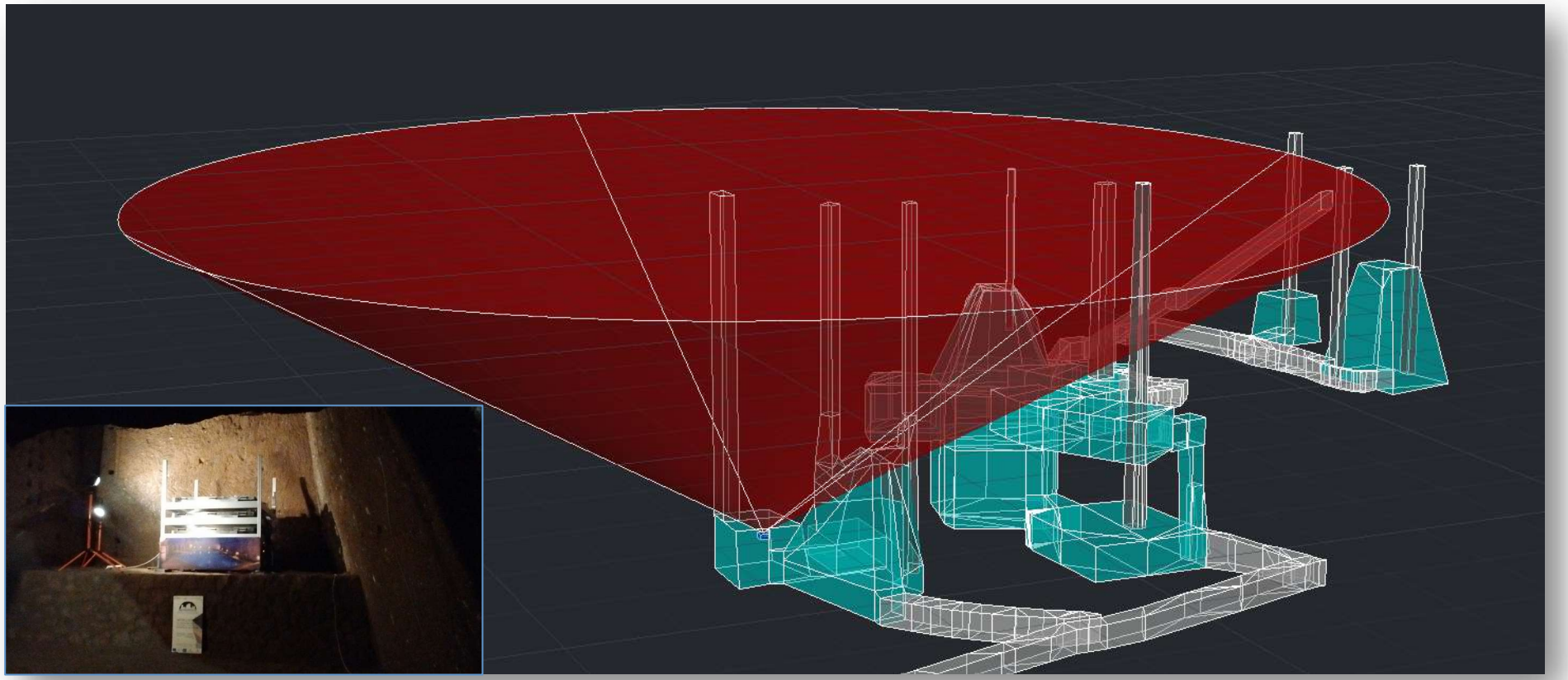


Confronto dati e risultati attesi



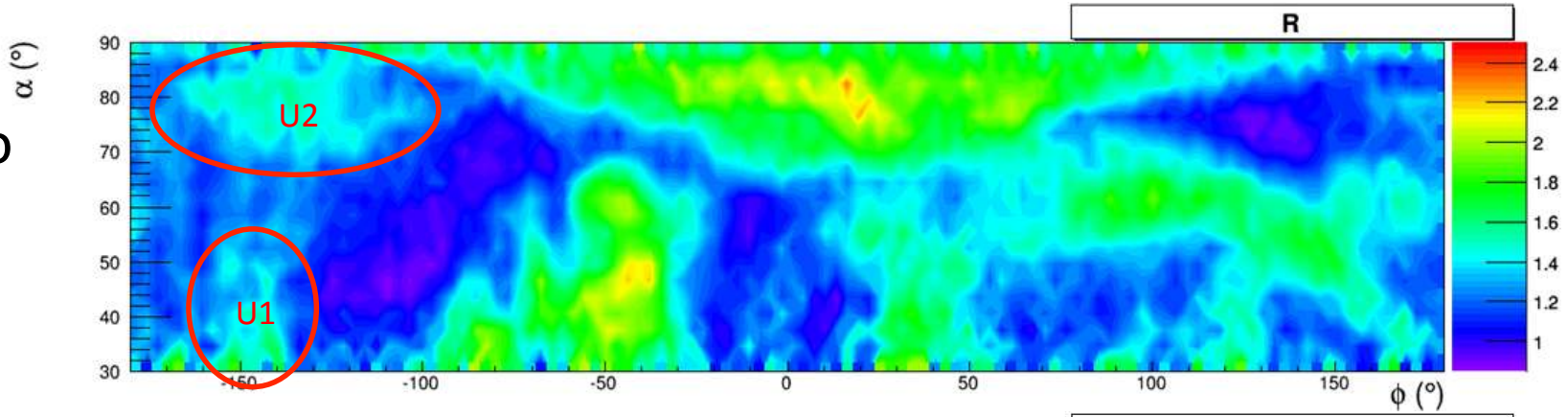
Due segnali non corrispondono a strutture note

Un secondo sito di osservazione

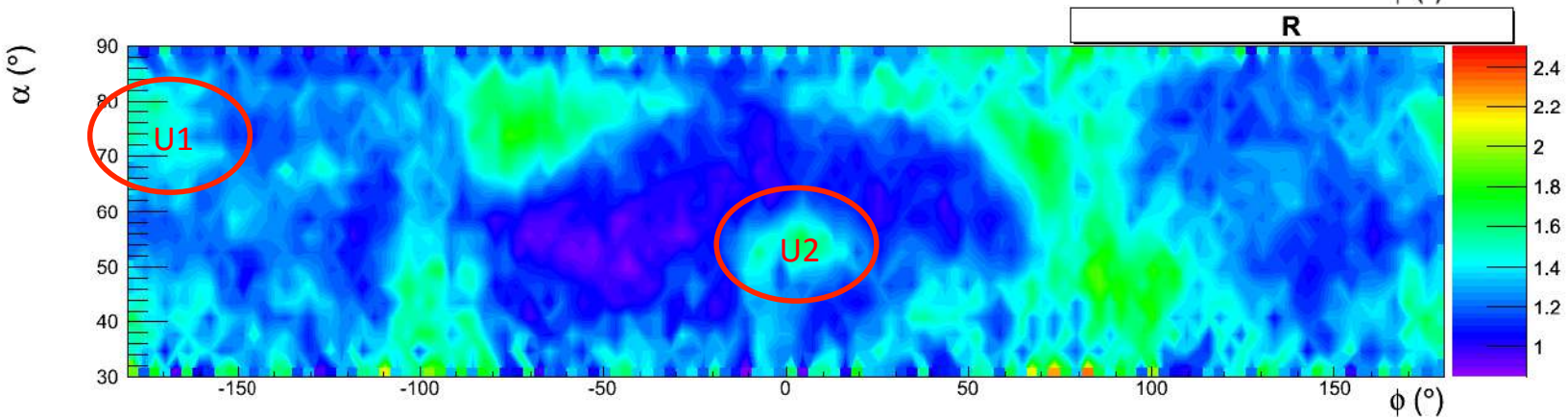


Le due radiografie a confronto

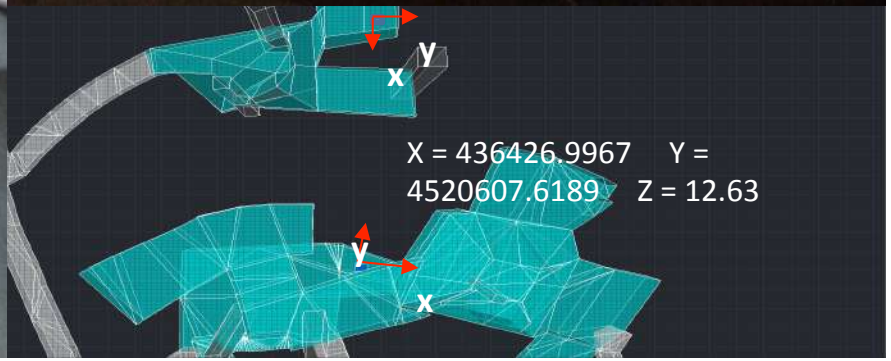
Primo sito



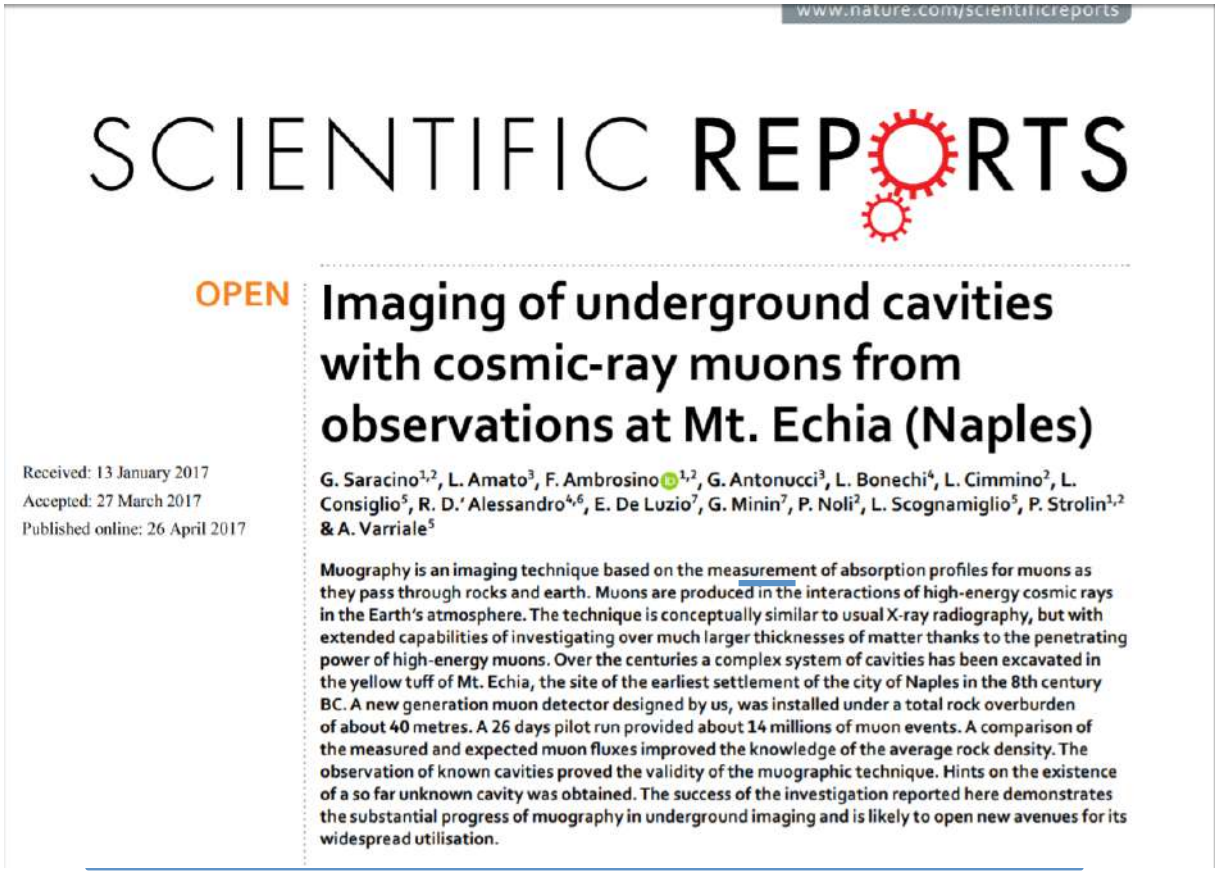
Secondo sito



Still measuring Mt Echia



Per saperne di più



www.nature.com/scientificreports

SCIENTIFIC REPORTS

OPEN

Imaging of underground cavities with cosmic-ray muons from observations at Mt. Echia (Naples)

Received: 13 January 2017
Accepted: 27 March 2017
Published online: 26 April 2017

G. Saracino[1,2], L. Amato[3], F. Ambrosino[1,2], G. Antonucci[3], L. Bonechi[4], L. Cimmino[2], L. Consiglio[5], R. D.' Alessandro[4,6], E. De Luzio[7], G. Minin[7], P. Noli[2], L. Scognamiglio[5], P. Strolin[1,2] & A. Varriale[5]

Muography is an imaging technique based on the measurement of absorption profiles for muons as they pass through rocks and earth. Muons are produced in the interactions of high-energy cosmic rays in the Earth's atmosphere. The technique is conceptually similar to usual X-ray radiography, but with extended capabilities of investigating over much larger thicknesses of matter thanks to the penetrating power of high-energy muons. Over the centuries a complex system of cavities has been excavated in the yellow tuff of Mt. Echia, the site of the earliest settlement of the city of Naples in the 8th century BC. A new generation muon detector designed by us, was installed under a total rock overburden of about 40 metres. A 26 days pilot run provided about 14 millions of muon events. A comparison of the measured and expected muon fluxes improved the knowledge of the average rock density. The observation of known cavities proved the validity of the muographic technique. Hints on the existence of a so far unknown cavity was obtained. The success of the investigation reported here demonstrates the substantial progress of muography in underground imaging and is likely to open new avenues for its widespread utilisation.

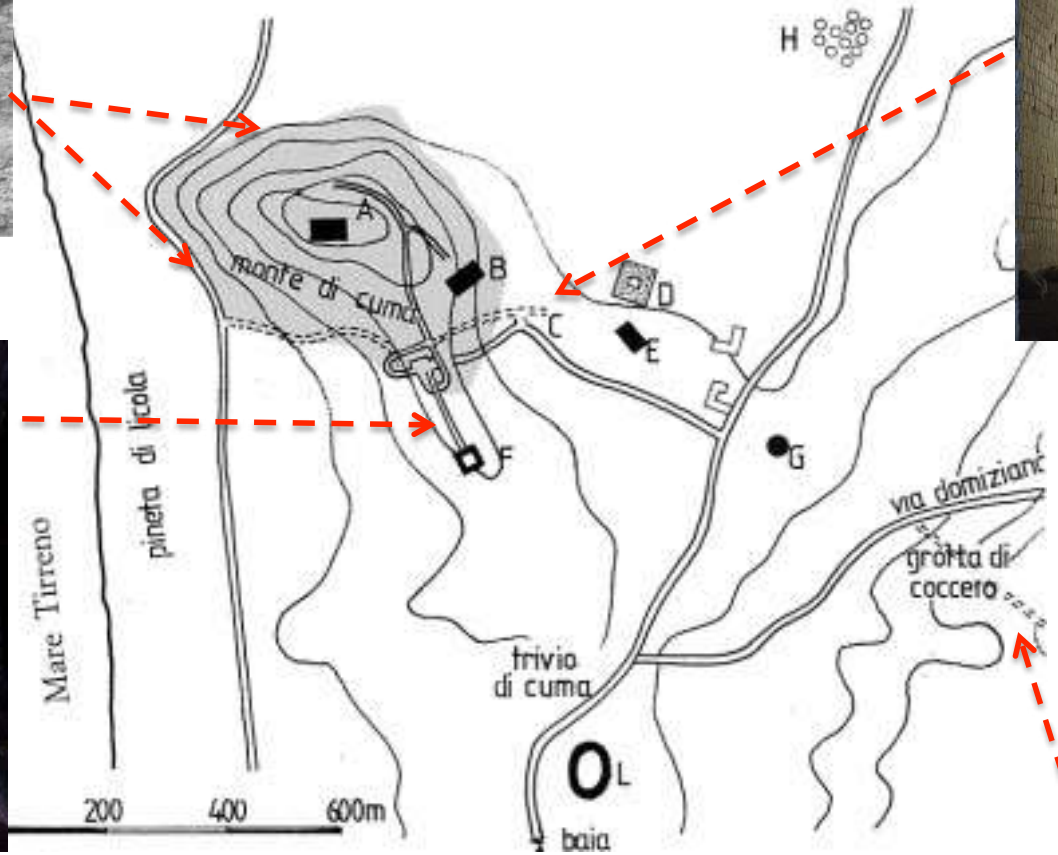
OPEN ACCESS

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

Bunker II guerra mondiale

Grotta della Sibilla pre-romana



Cripta Romana 37 B.C.

Tunnel di Cocceio 37 B.C.

Applicazioni della radiografia muonica

Archeologia

Indagine del sottosuolo

Studio dei vulcani

Studio dei Vulcani

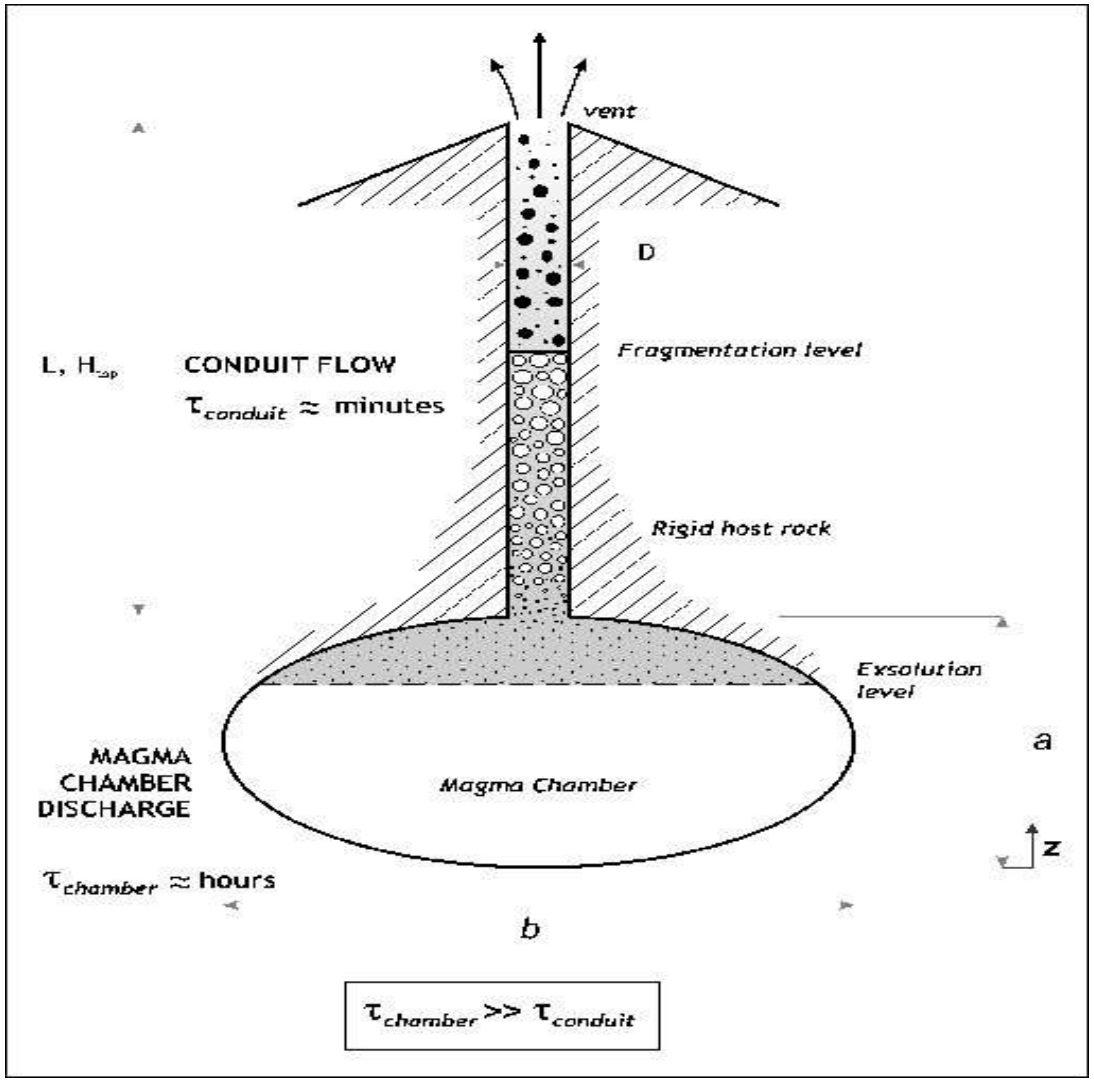
Obiettivo:
ottenere informazioni sulla struttura interna del cono, con una risoluzione spaziale 10-100 m

Possibilità di integrare i dati muografici con quelli ottenuti con tecniche gravimetriche e geo-elettriche.

Frontiera: misurare la risalita del magma lungo il condotto (non applicabile al Vesuvio)

Un semplice modello

Il sistema vulcano può essere approssimato ad un condotto collegato con la camera magmatica. Le dimensioni del condotto sono utili per la comprensione della dinamica dell'eruzione (non per la predizione)



Prime misure in Giappone (H. Tanaka, Erthquake Research Institute)

Entrambe le tecniche (riv. elettronico ed emulsioni) utilizzate

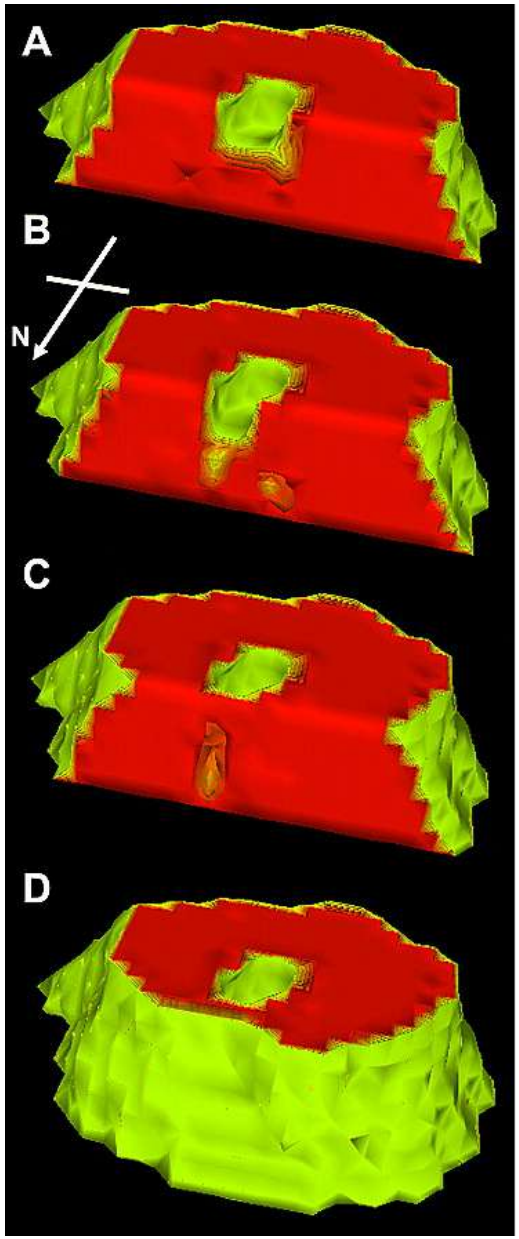
ALTRI PROGETTI

TOMUVOL, DIAPHANE (FRANCIA)

ITALIA:
Vesuvio e Stromboli(INFN e INGV)
ETNA (INAF e INGV)

Risoluzione spaziale

- Con rivelatori posti a 1km dal vulcano si possono avere risoluzioni spaziali di O(10 m).
- L'informazione da più linee di vista può essere combinata per realizzare tomografie.
- I dati possono essere integrati con misure gravimetriche e geoelettriche



Tomografia Mt. Asama (JPN)

H.K.M. Tanaka et al.
Journal of Geophysical Research: Solid Earth
Volume 115, Issue B12, B12332, 30 DEC 2010 DOI: 10.1029/2010JB007677

MURAVES

MUon RAdiography of VESuvius:

Progetto finanziato dal MIUR (PREMIALE 2012)

Collaborazione tra due enti INGV-Osservatorio Vesuviano ed INFN (sezioni di Napoli e Firenze)

collaborazione con l'Ente Parco Nazionale del Vesuvio

Obiettivi:

radiografia muonica della parte superiore del Gran Cono del Vesuvio. Affiancando la muografia del Vesuvio con altre misure convenzionali, come quella gravimetrica e quella geo-elettrica, si cercherà di compiere un ulteriore passo in avanti verso la conoscenza della struttura del vulcano.

NON intende effettuare previsioni su una possibile eruzione

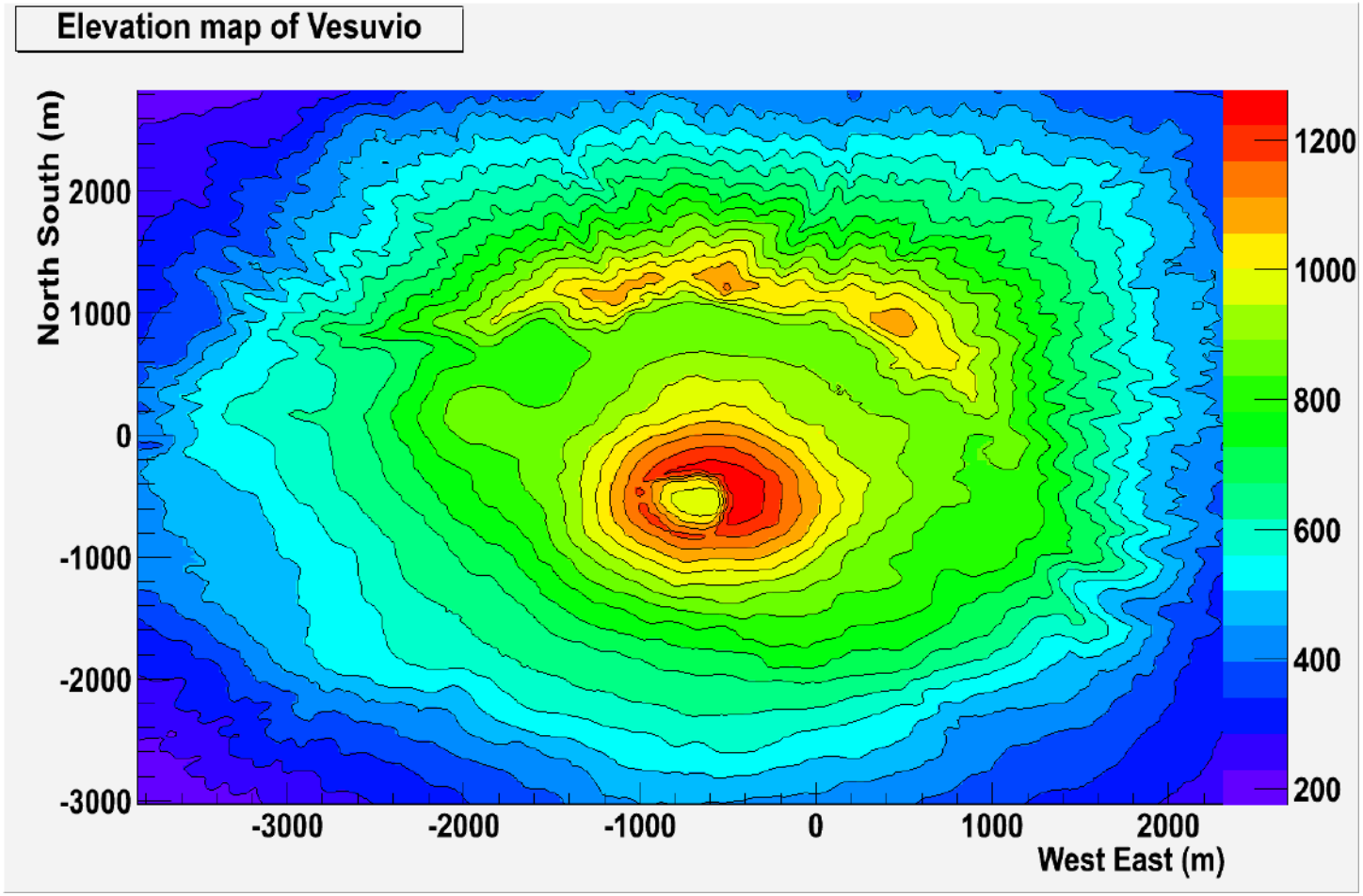
PROGRAMMA

Realizzazione ed installazione di 4 telescopi da 1 mq

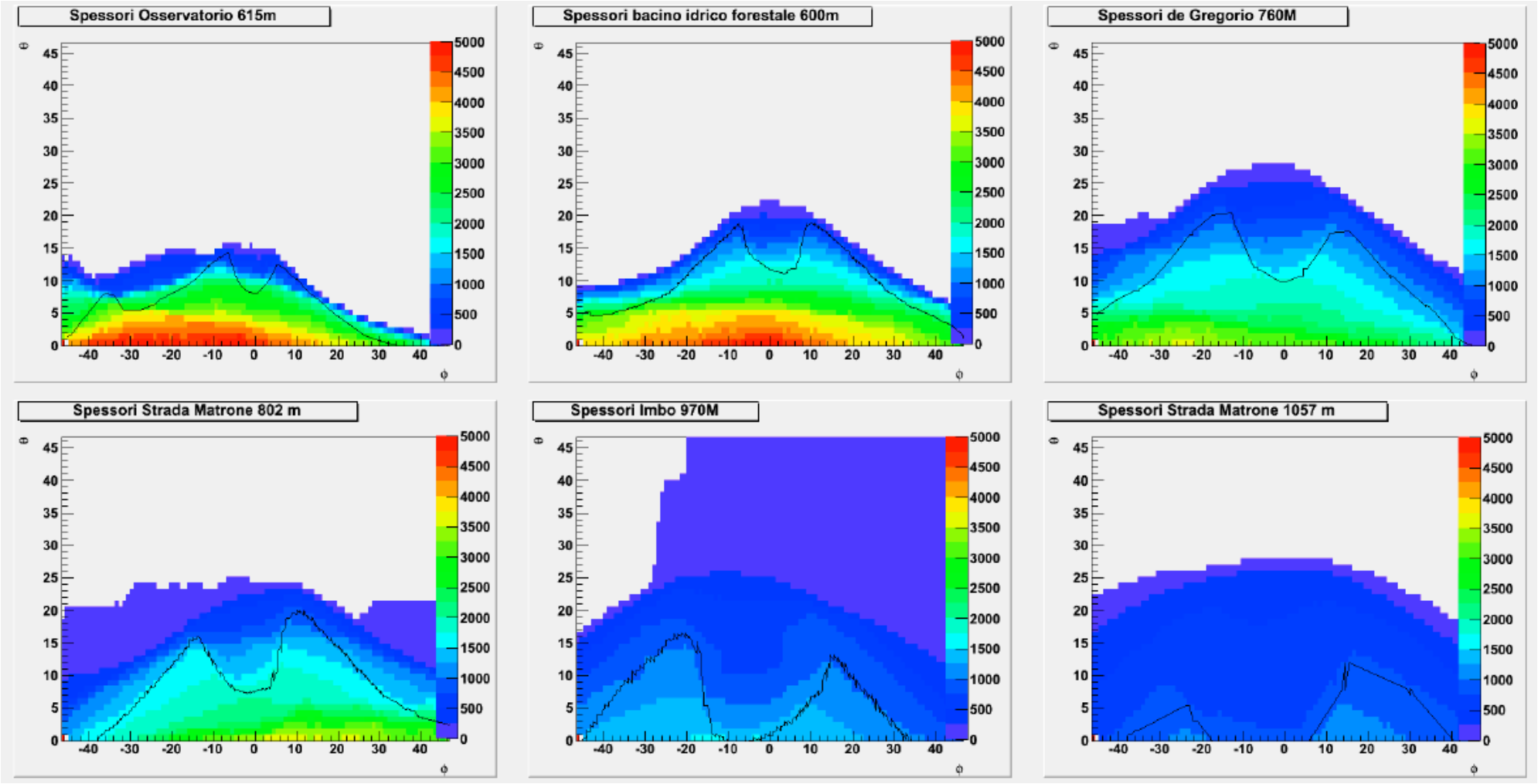
misure gravimetriche

misure geo-elettriche.

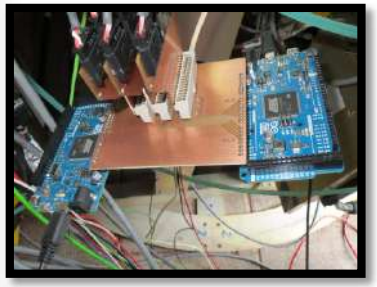
DEM: Digital Elevation Model



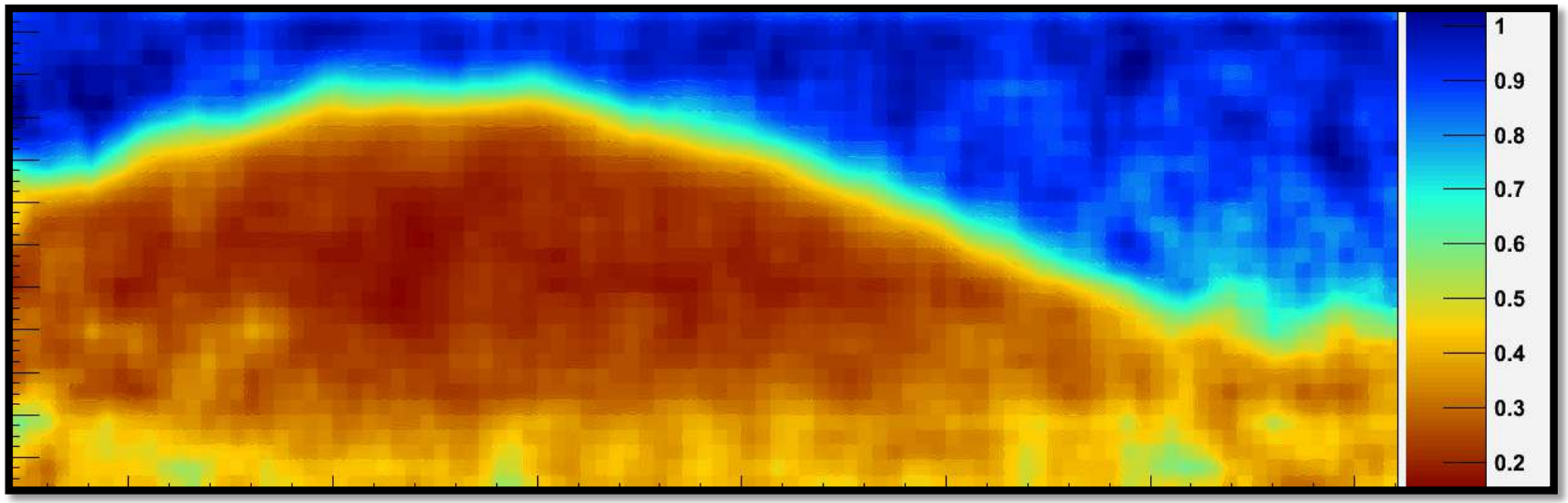
Gli studi di fattibilità:
Spessori di roccia attraversata



Il primo prototipo MU-RAY



Primo run dimostrativo (2013), casina al Belvedere 760 m



Il nuovo telescopio

Nuova meccanica
nuova connettorizzazione
nuove schede di elettronica e di acquisizione
nuovi sensori di fotoni

Conclusioni (1)

Possibili campi di applicazioni

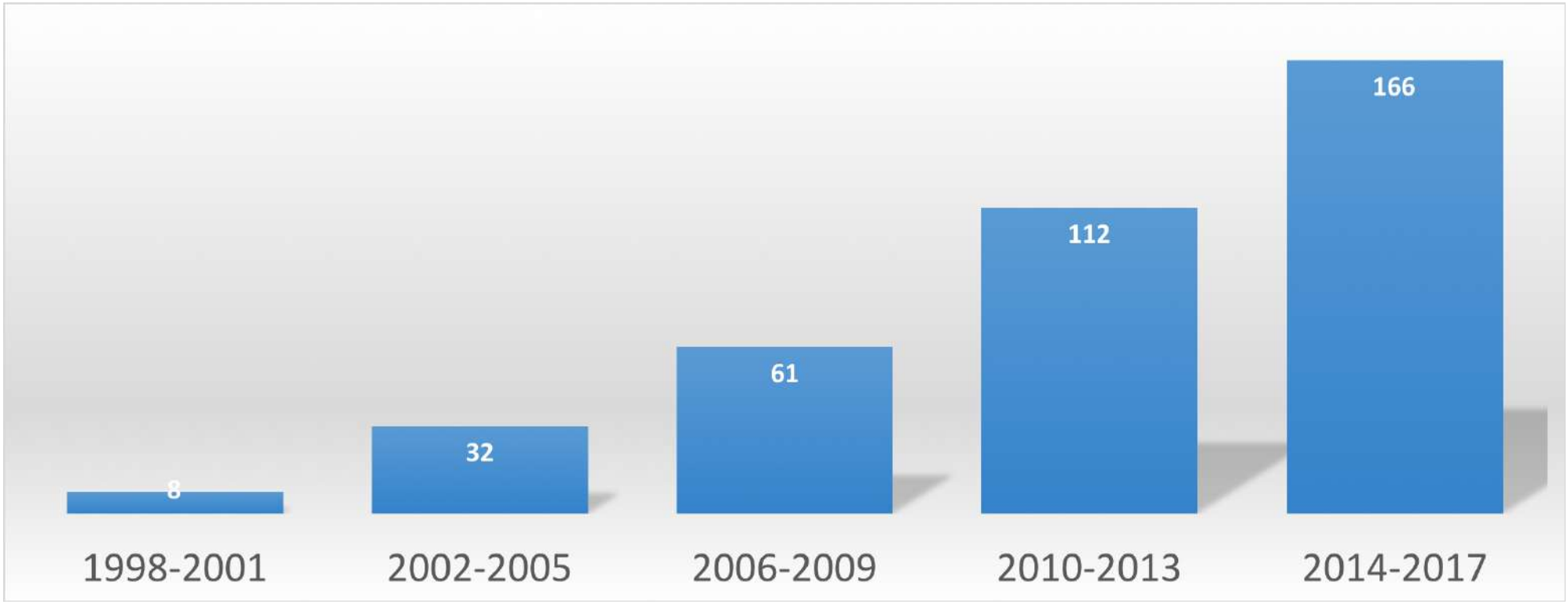
Vulcanologico
Archeologico
Prospezione del sottosuolo
Miniere
Sicurezza del territorio
Indagini di strutture industriali
Individuazione di materiale fissile

Ancora ampi margini di miglioramento sia sul piano tecnologico che metodologico

Conclusioni (1)

La radiografia muonica è una tecnica promettente:

N. di articoli contenenti (muon AND radiography) or (muon AND tomography) nel titolo, raggruppati in periodi di 4 anni
fonte SCOPUS



GRAZIE PER L’ASCOLTO