

Francesco Riggi

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Catania
& Centro Fermi

**La tomografia muonica:
strumento di indagine
dell'ambiente intorno a noi**

7[^] Conferenza dei Progetti del Centro Fermi
Erice, 30 Maggio 2017

La radiazione cosmica: intorno a noi da miliardi di anni

I raggi cosmici primari sono particelle cariche (soprattutto protoni) di altissima energia.

Arrivano ininterrottamente sulla Terra da miliardi di anni..



Ciò che osserviamo sulla Terra - in particolare i muoni - è il risultato di processi fisici iniziati nell'alta atmosfera da una singola particella di alta energia

I raggi cosmici e la vita quotidiana

La componente secondaria della radiazione cosmica - i muoni - capace di raggiungere la Terra, ci fornisce molte informazioni sul nostro ambiente e ci offre molte opportunità di studiare vari aspetti della vita quotidiana:

- I cosmici e la formazione delle nuvole
- L'influenza dei cosmici sull'elettronica di largo consumo
- I raggi cosmici e gli organismi viventi
- Come sondare l'interno dei vulcani con i cosmici?
- Come cercare l'Uranio di contrabbando nei container?
- Come verificare la stabilità degli edifici?
- ... e tanti altri ancora...

I muoni come sonde per studiare l'interno delle strutture

Possono i muoni cosmici costituire delle sonde per esplorare l'interno di grandi (o piccole) strutture?

Diverse possibilità:

- **(A) Assorbimento:** Una parte dei muoni può essere assorbita nel materiale solido attraversato, fornendo una radiografia dell'interno
- **(B) Scattering:** Ogni muone può essere diffuso dagli atomi del materiale, specie da quelli ad alto Z, fornendo una radiografia dei centri di diffusione
- **(C) Reazioni secondarie:** Una parte dei muoni può dar luogo a particelle/gamma secondari nel materiale, fornendo una ulteriore possibilità radiografica



(A) e (B) esplorate negli ultimi anni, (C) ancora allo studio

I primi tentativi di tomografia muonica

Uno dei primi esempi: l'esplorazione di una piramide egizia alla ricerca di camere nascoste (Alvarez, '60s)



Luis Alvarez, Premio Nobel 1968

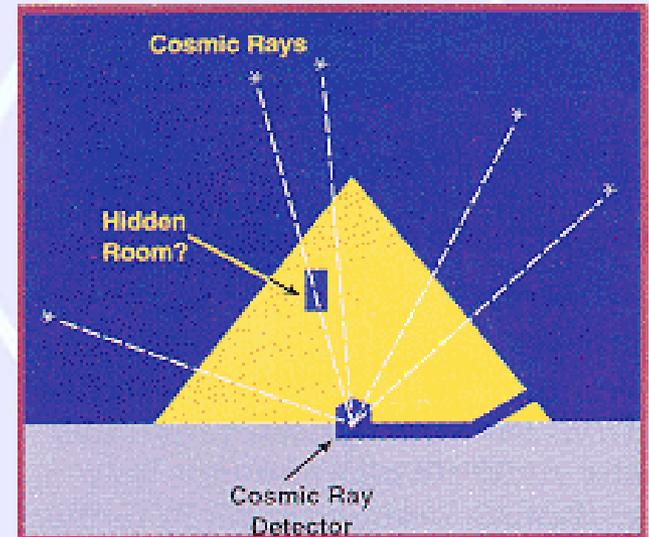


Figure 5 - Schematic of the Alvarez cosmic ray technique used to search for possible hidden chambers in the Pyramid of Kephren. It can be applied to locate voids in very thick sections such as highway bridges.

Tecnica basata sull'assorbimento dei muoni da parte del materiale solido

Alvarez, L.W. et al., Search for Hidden Chambers in the Pyramids, *Science*, 167, 832- 839, 1970.

I primi tentativi di tomografia muonica

Ma forse ancora prima...

1955: E.P.George usa dei rivelatori per muoni per esplorare un tunnel sotterraneo in Australia

(George, E. P.: Cosmic Rays Measure Overburden of Tunnel, Commonwealth Engineer, 455-457, 1955)

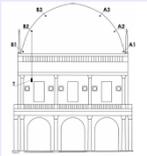
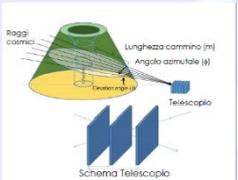
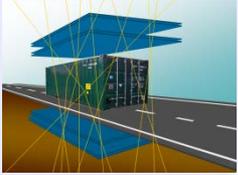
Anni '40: Alcune misure condotte nella metropolitana di Londra

Perché la tomografia muonica

- Muoni cosmici: radiazioni altamente penetranti (più dei raggi X)
- Radiazione “naturale” (nessun livello di radiazione addizionale)
- Flusso dei muoni relativamente elevato: $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$
- Interazione dei muoni ben conosciuta
- Scattering dei muoni fortemente dipendente dal numero atomico Z

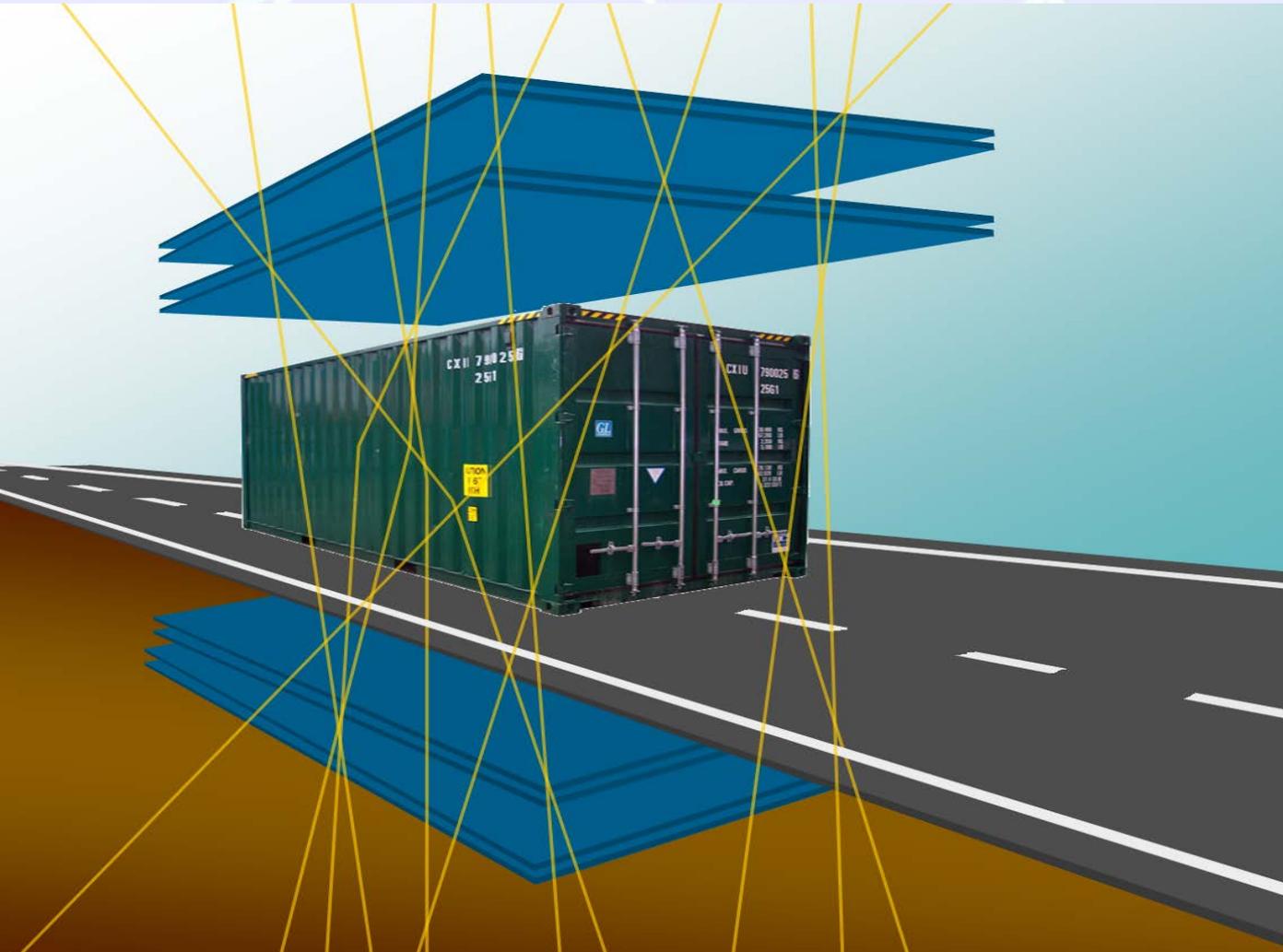
Esplorare l'ambiente con i muoni

- Ispezione dei container alla ricerca di materiale fissile di contrabbando
- Esplorazione di monti e vulcani per studiarne la struttura interna
- Monitoraggio delle scorie radioattive (barre esaurite dai reattori)
- Ispezione dei rottami metallici per le fonderie alla ricerca di sorgenti radioattive orfane
- Controllo della stabilità degli edifici e delle grandi strutture
- E infine... la prospezione geologica di altri Pianeti



Come ispezionare l'interno di un container

I muoni cosmici sono stati proposti come sonde per ispezionare l'interno di un container alla ricerca di materiale radioattivo di contrabbando



Tecnica basata
sullo diffusione dei
muoni dai materiali
ad alto Z

Come ispezionare l'interno di un container

Container: impiegati da oltre 50 anni come mezzo per il trasporto delle merci mediante navi o camion

Traffico annuale stimato: 200 Milioni di container

Dati 2012



Port	Country	Traffic [1000 TEU]
Shanghai	China	32530
Busan	South Korea	17040
Dubai	UAE	13300
Rotterdam	Netherlands	11866
Hamburg	Germany	8860
Los Angeles	USA	8078
Valencia	Spain	4474
Tokyo	Japan	4235
Gioia Tauro	Italy	3050
Vancouver	Canada	2713

Problemi di sicurezza richiederebbero l'ispezione veloce di tutti i container (attualmente solo 1%)

Tecniche tradizionali (raggi X, ...) non adatte all'ispezione

Perché la tomografia muonica

Particolarmente utile per rivelare la presenza di Uranio, Plutonio (o il Piombo di schermaggio)

La diffusione dei muoni dipende fortemente dal numero atomico Z del materiale attraversato

$$\theta_0 = \frac{13.6\text{MeV}}{\beta cp} \cdot z \sqrt{\left(\frac{x}{X_0}\right)} \cdot \left[1 + 0.038 \ln\left(\frac{x}{X_0}\right)\right]$$

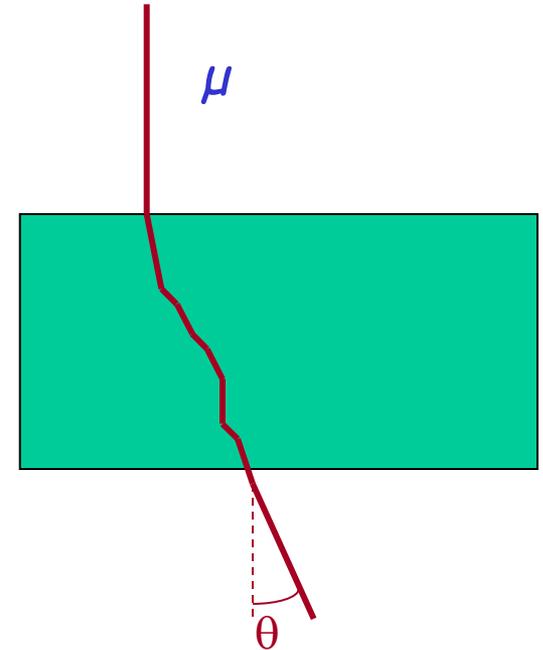
$\beta c \rightarrow$ Velocity

$p \rightarrow$ Momentum

$z \rightarrow$ Charge Number

$x \rightarrow$ Width of Medium

$X_0 \rightarrow$ Radiation Length



Un Progetto a Catania

Diversi Progetti in corso nel mondo..
e anche in Italia

A Catania realizzato un prototipo in
scala reale



Un Progetto PON in collaborazione
Università-INAF-STMicroelectronics-
MIWT-InSirio

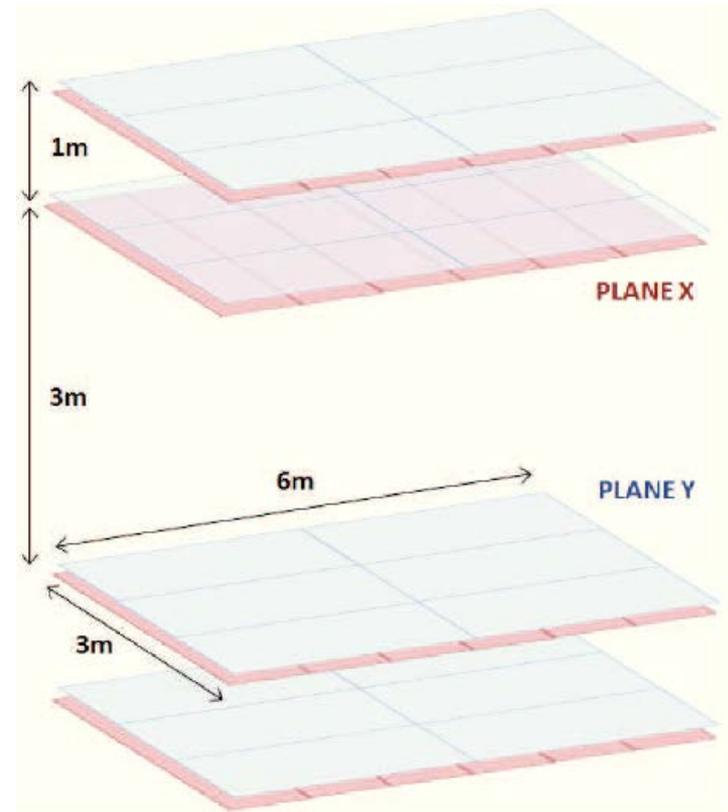


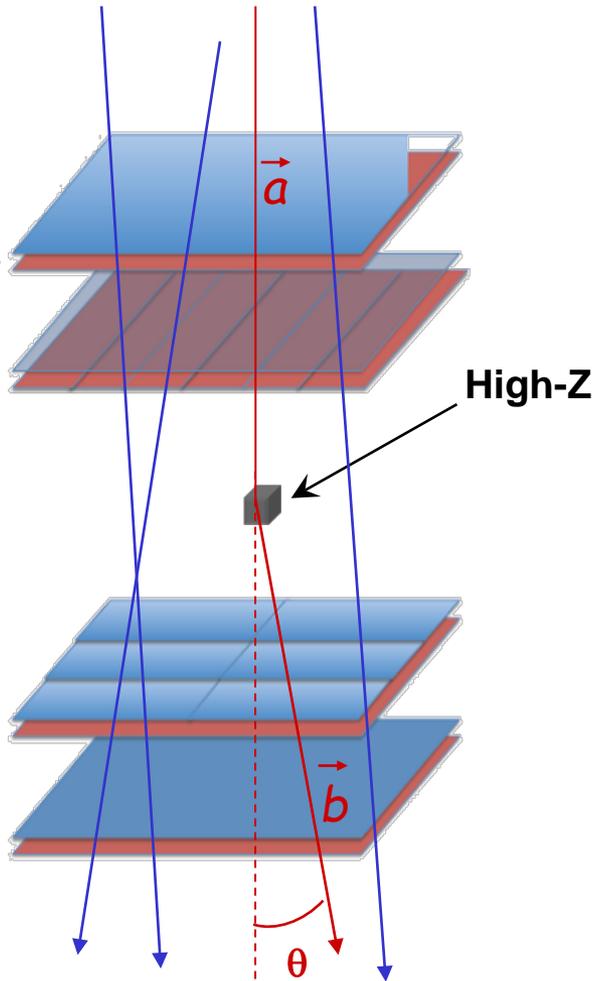
Un Progetto a Catania

- Struttura basata su 8 piani di rivelazione (4 piani X-Y), segmentati in 48 moduli (1 m x 3 m)
- Ogni modulo segmentato in 100 strips di scintillatore con lettura tramite fibre ottiche WLS e fotosensori al silicio

Il Progetto in numeri

30 km di fibre ottiche
15 km di strip scintillanti
9600 fotosensori
8 x 18 m² Area sensibile
130 m³ Volume complessivo
0.1° Risoluzione angolare
100 milioni di muoni al giorno
colpiscono la superficie del rivelatore





Performance del sistema:

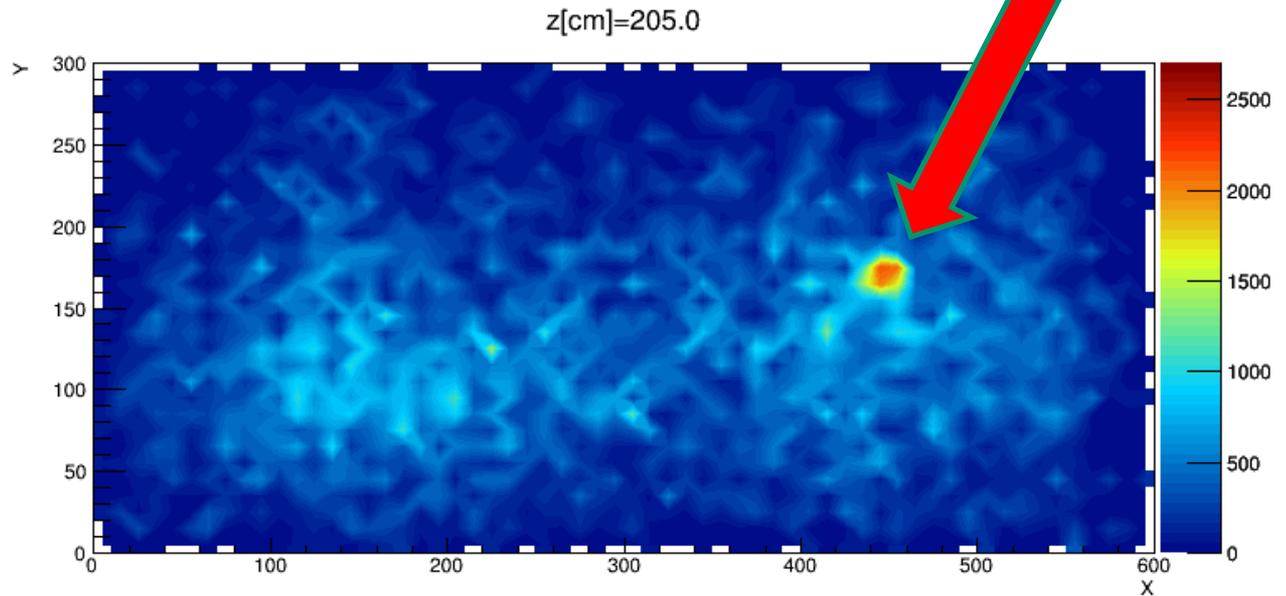
- Area sensibile/volume
- Risoluzione spaziale e angolare
- Tempo di scansione necessario
- Sensibilità & Efficienza per oggetti alto Z
- Sensibilità ai falsi positivi
- Capacità di discriminazione in Z

Prime ricostruzione di immagini tomografiche



Blocco di Pb da 4 dm³ posizionato all'interno

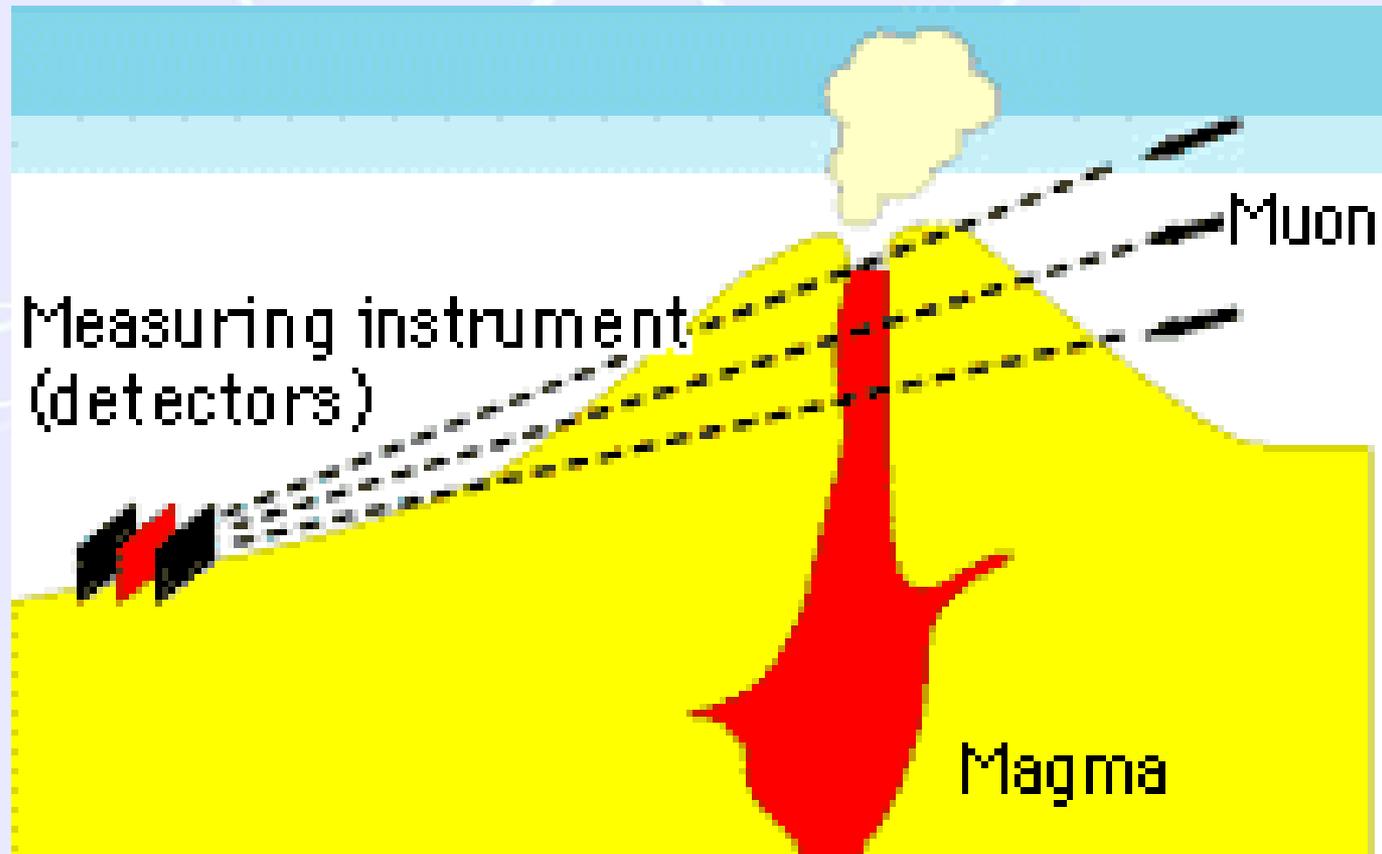
Prime immagini tomografiche già ottenute



L'esplorazione dei vulcani con i cosmici

Negli ultimi anni molti tentativi di esplorare strutture geologiche mediante l'assorbimento dei muoni:

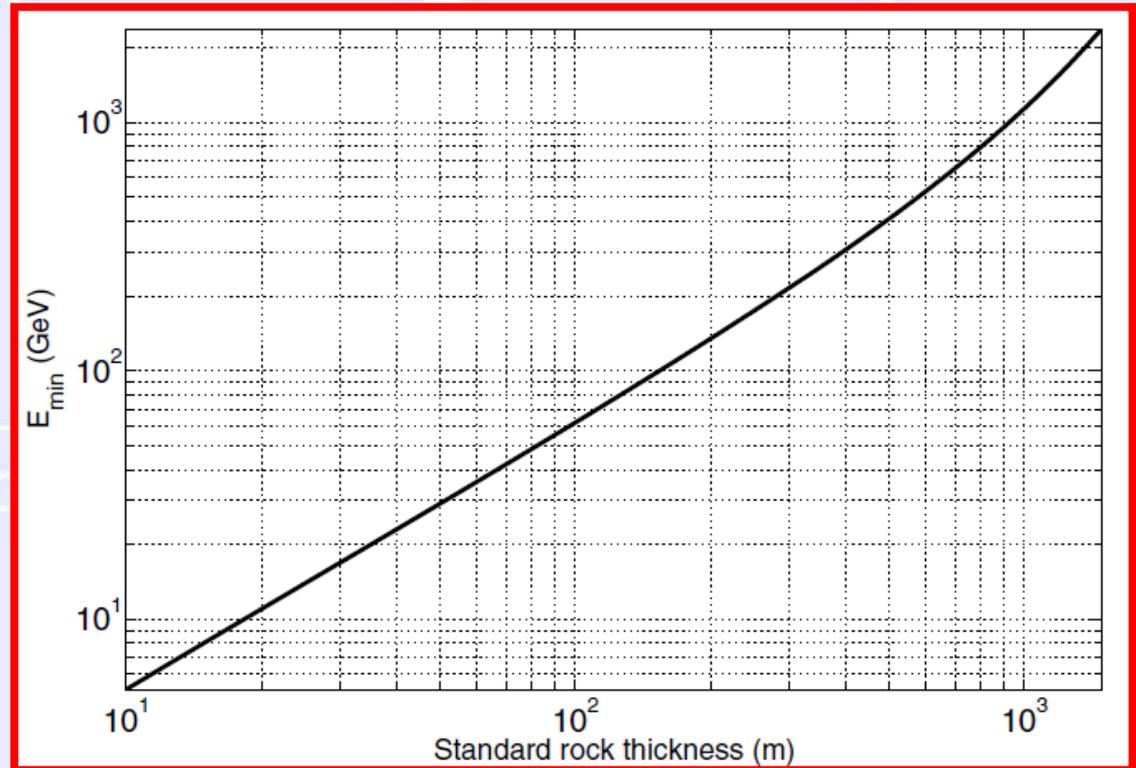
- Assorbimento dei muoni da parte dei vulcani (radiografie)
- Prospezioni geologiche delle caverne..



L'esplorazione dei vulcani con i cosmici

I muoni più energetici possono percorrere anche km di roccia prima di essere fermati

Distanza percorsa
nella roccia dai muoni
cosmici



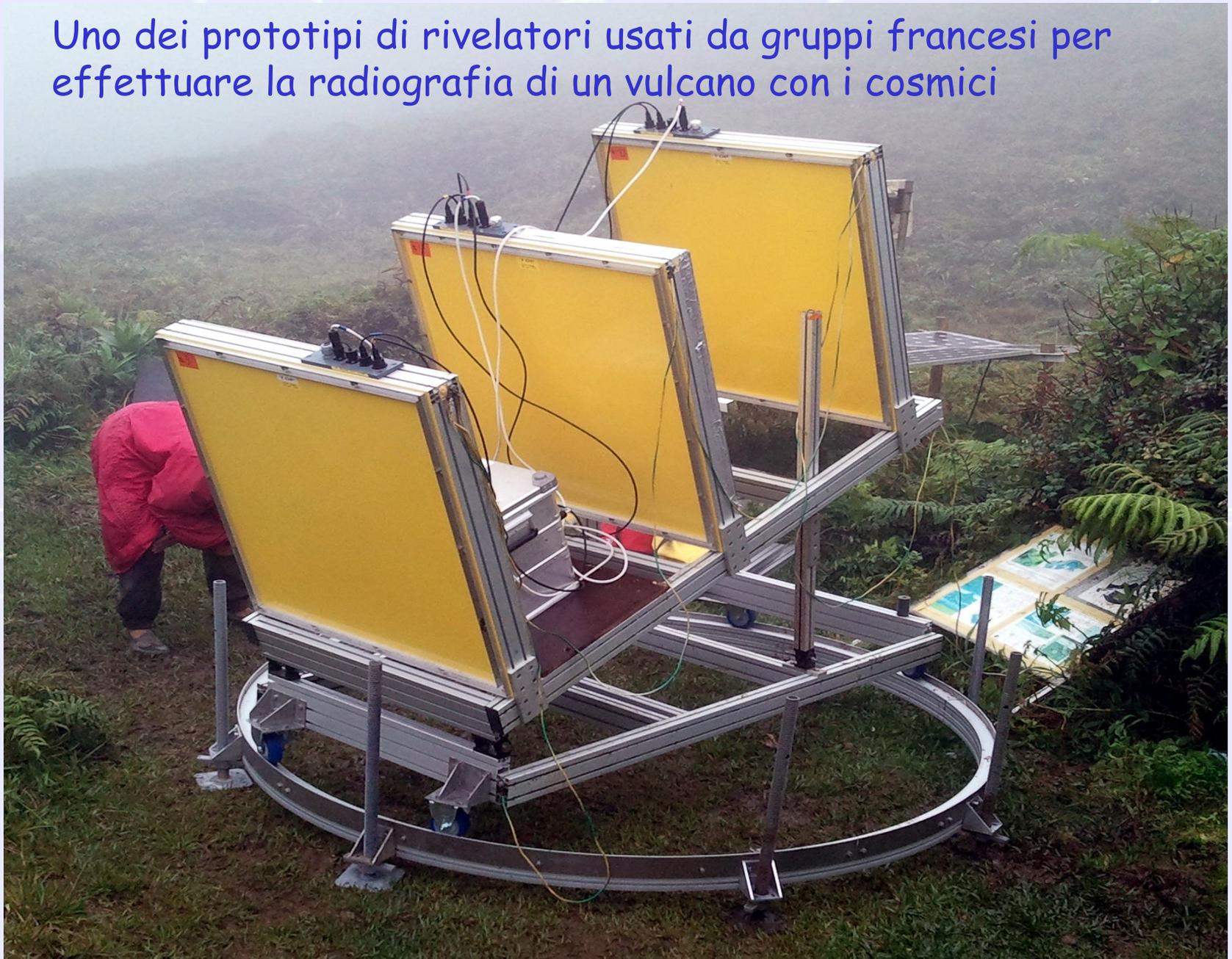
L'esplorazione dei vulcani con i cosmici

Diversi gruppi nel mondo hanno costruito e usato dei rivelatori a questo scopo:

- Gruppo Diaphane (Lyon + altre Istituzioni)
- Gruppo in Giappone (Nagamine e collaboratori)
- Gruppo MU-RAY (INFN Napoli)
- Gruppo DFA+INFN+ INGV (Catania)
- ...

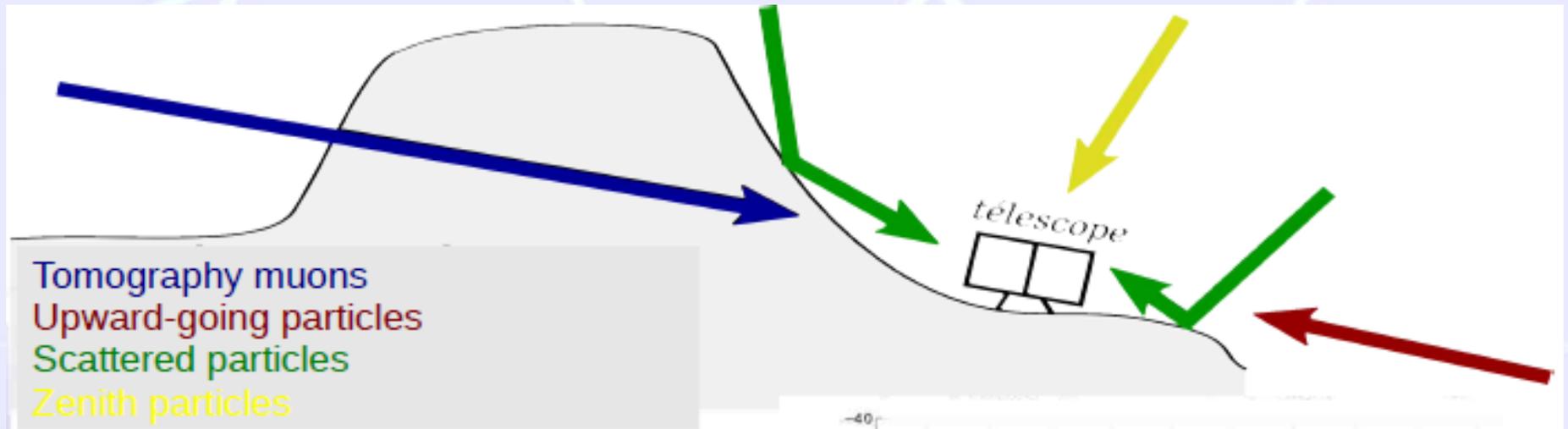
L'esplorazione dei vulcani con i cosmici

Uno dei prototipi di rivelatori usati da gruppi francesi per effettuare la radiografia di un vulcano con i cosmici



L'esplorazione dei vulcani con i cosmici

Misure delicate, con molte sorgenti di disturbo

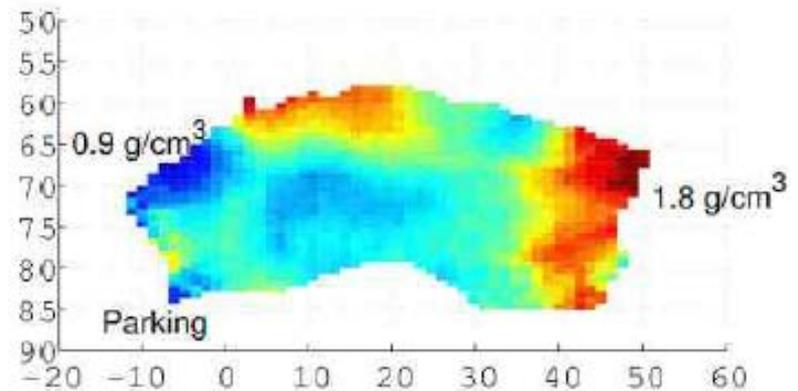
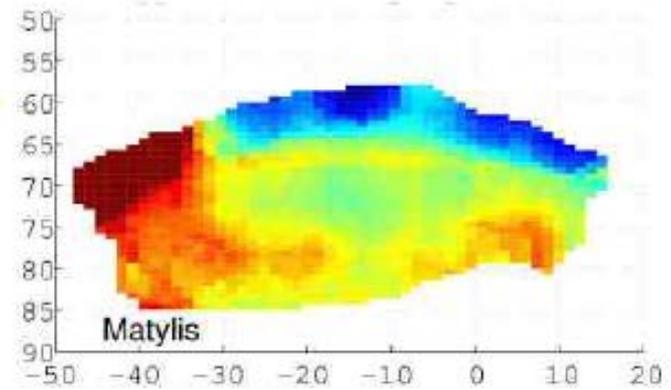
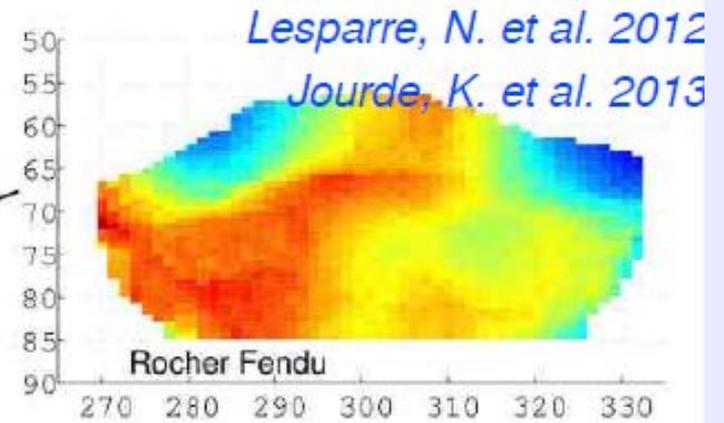
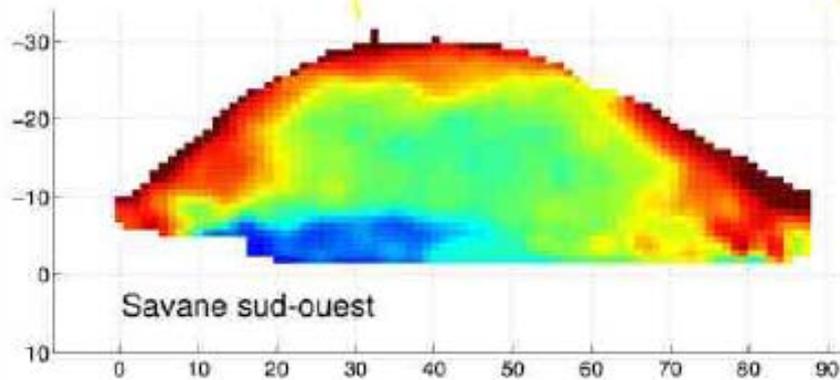


La sfida degli ambienti ostili

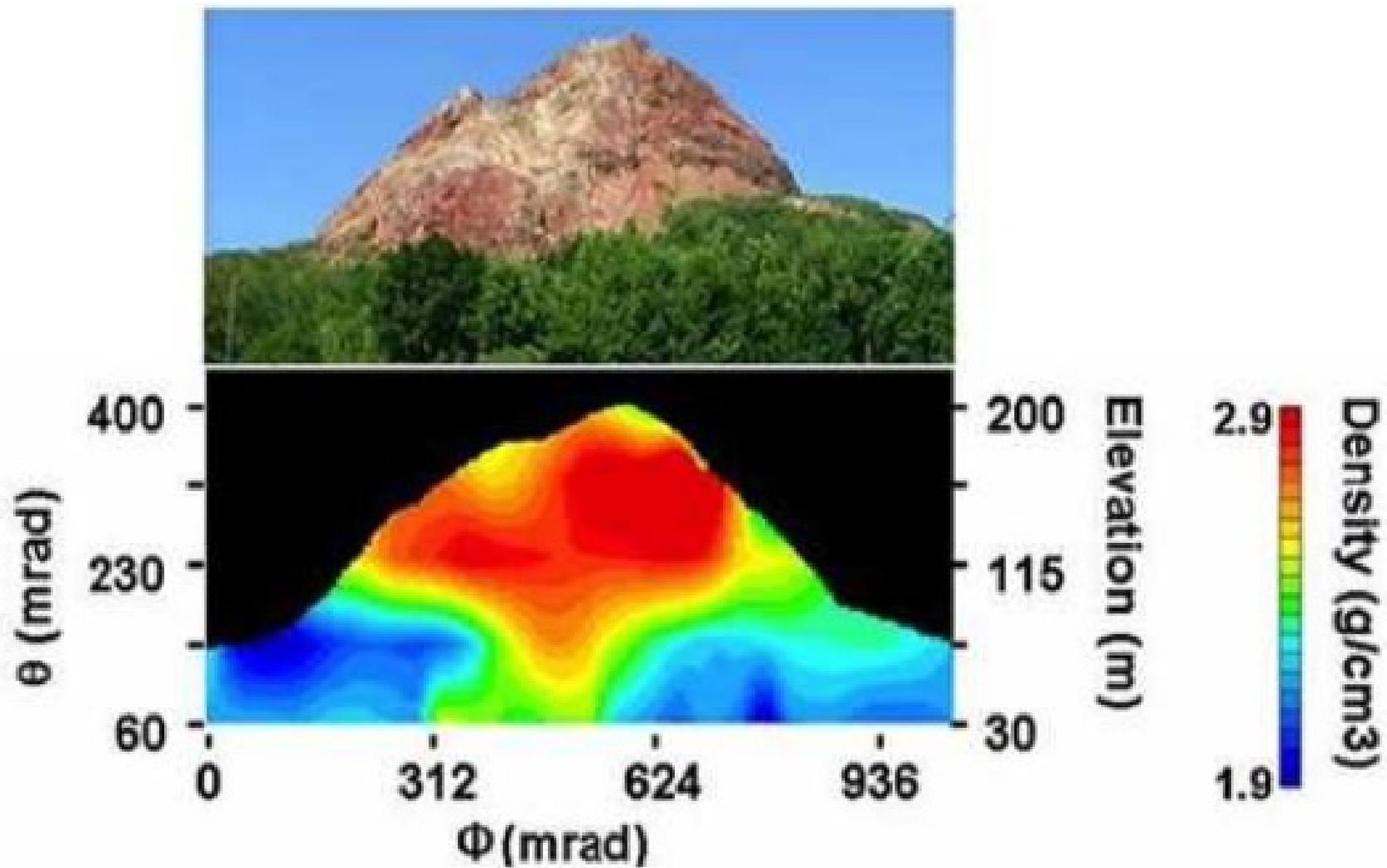


L'esplorazione dei vulcani con i cosmici

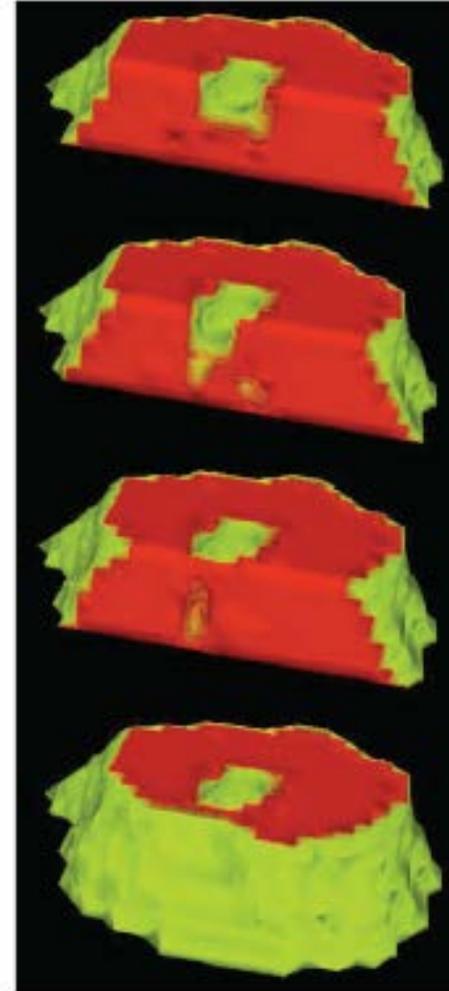
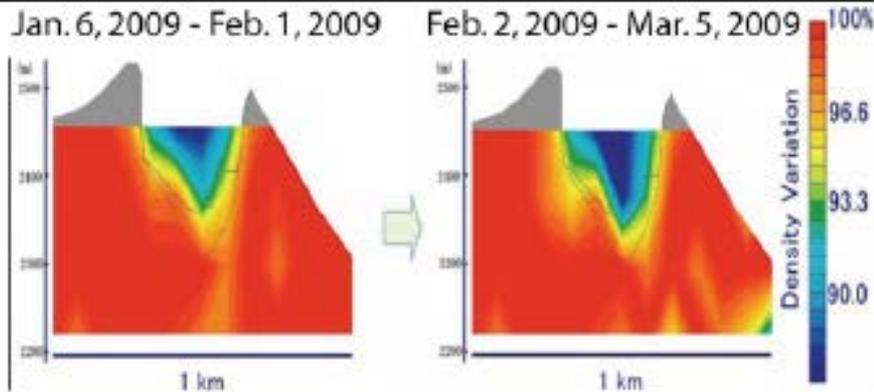
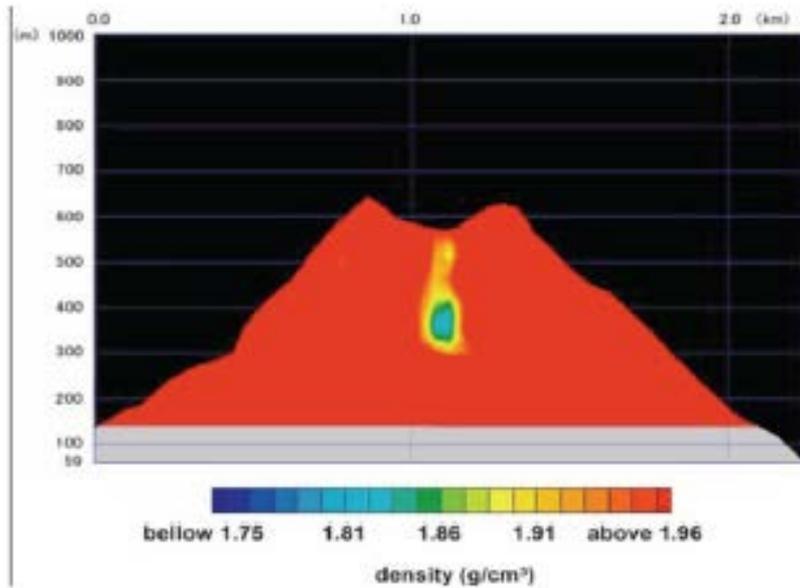
The Soufrière muography : structural imaging



L'esplorazione dei vulcani con i cosmici



L'esplorazione dei vulcani con i cosmici



H.Tanaka et al., *Geophys. Res.Letter* 36(2009)L17302

Un Progetto a Catania per lo studio dell'Etna

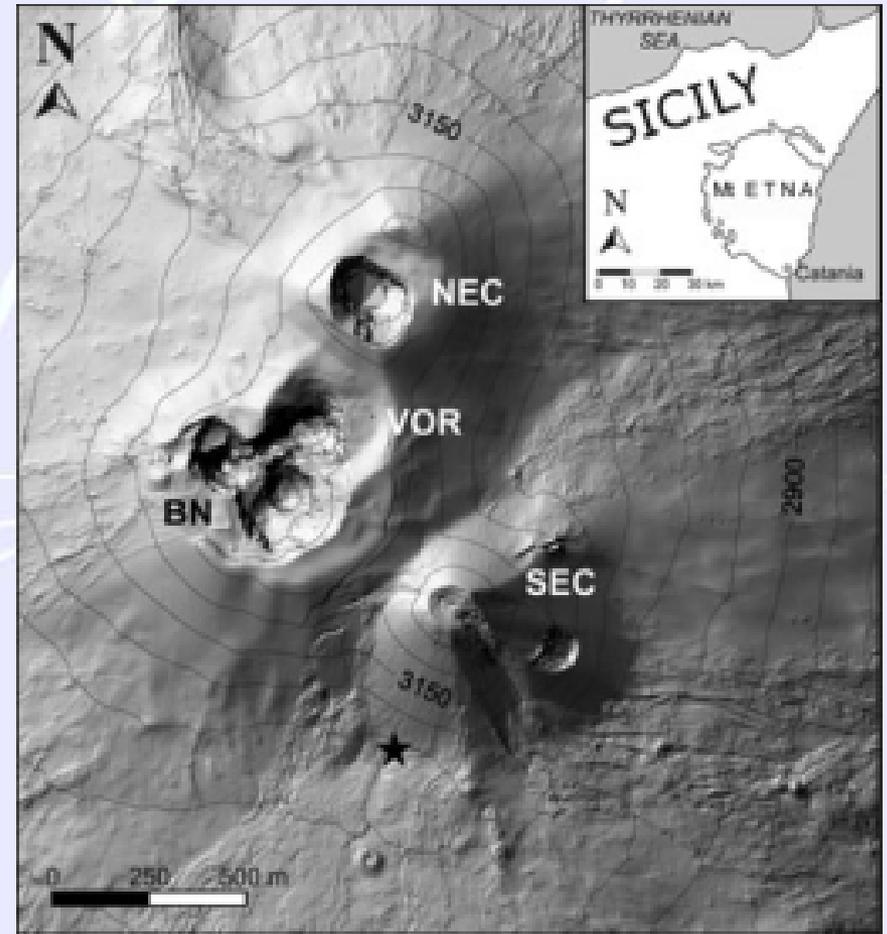
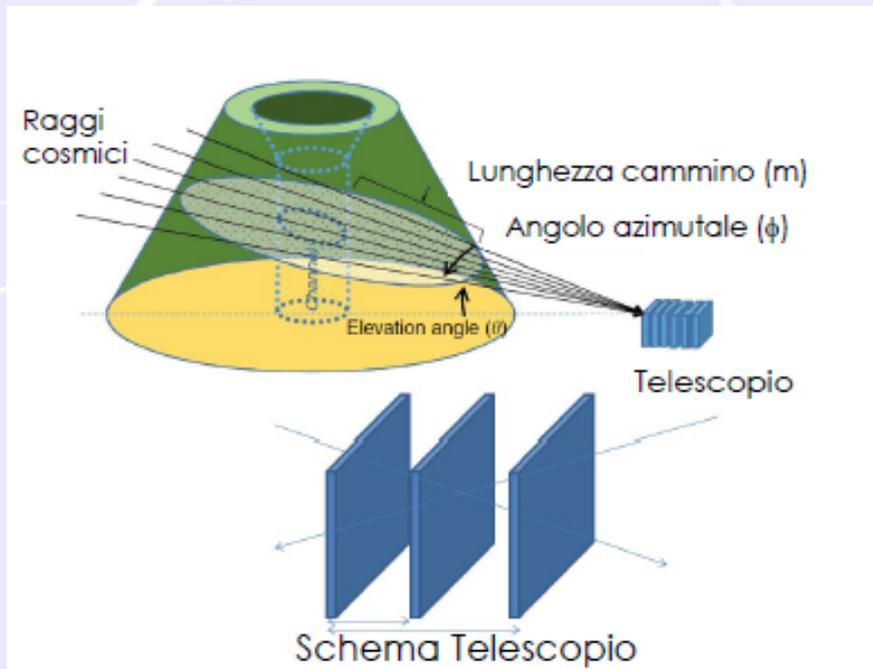
Un telescopio con 3 piani da 1 x 1 m già costruito e operativo nel territorio etneo



Un Progetto a Catania per lo studio dell'Etna

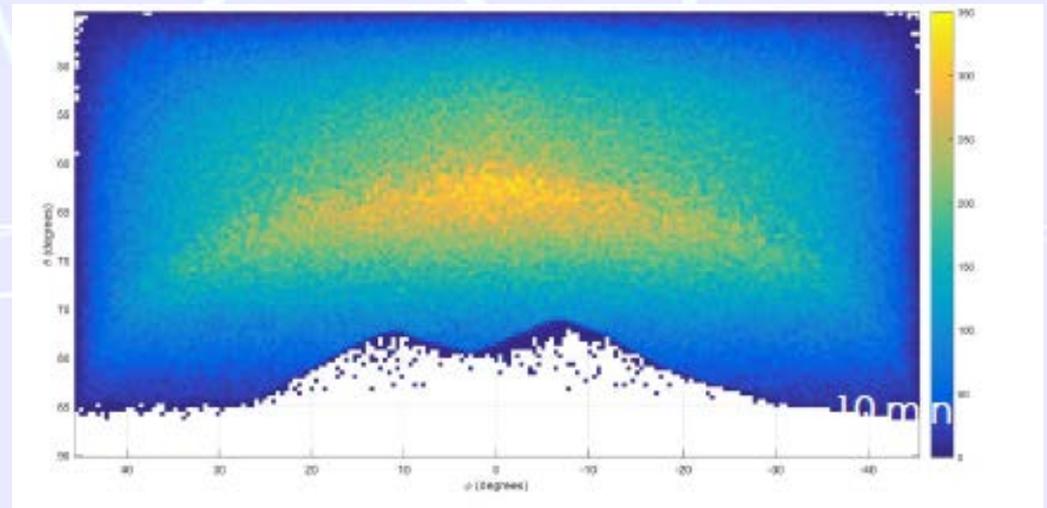
Scopo finale: studio dei crateri sommitali dell'Etna (circa 3400 m) mediante più telescopi operanti ad angolazioni differenti

Ricostruzione in 3D



Un Progetto a Catania per lo studio dell'Etna

Prime misure in condizioni «non estreme» effettuate a quota 900 m (Monti Rossi) da Gennaio a Maggio 2017



Prime immagini tomografiche

Come ispezionare le barre esaurite dai reattori

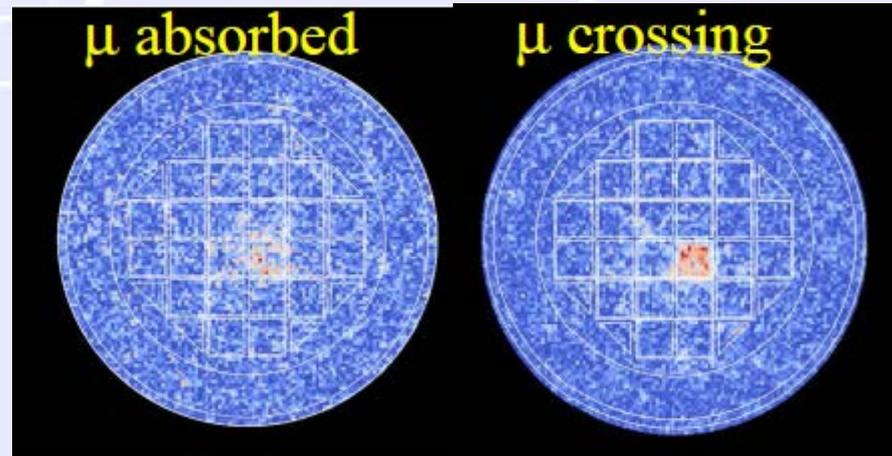
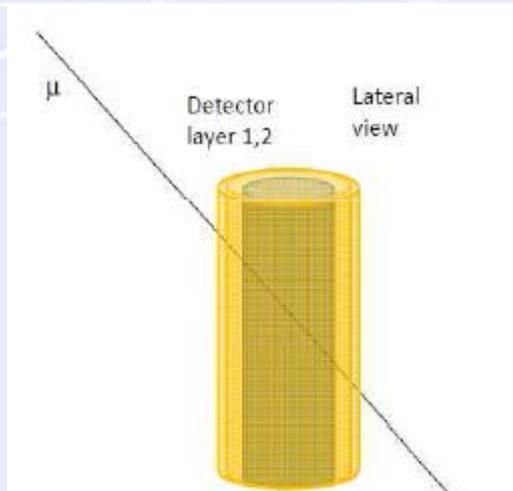
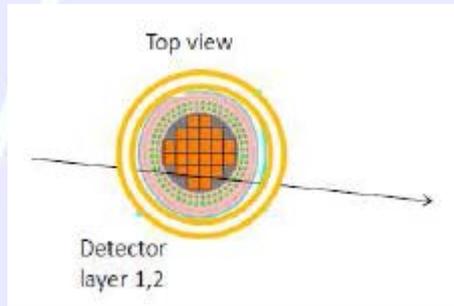
Le barre di Uranio «esaurito» dai reattori nucleari, dapprima immerse in acqua e poi in contenitori asciutti



Come verificarne
l'integrità e il contenuto?

Come ispezionare le barre esaurite dai reattori

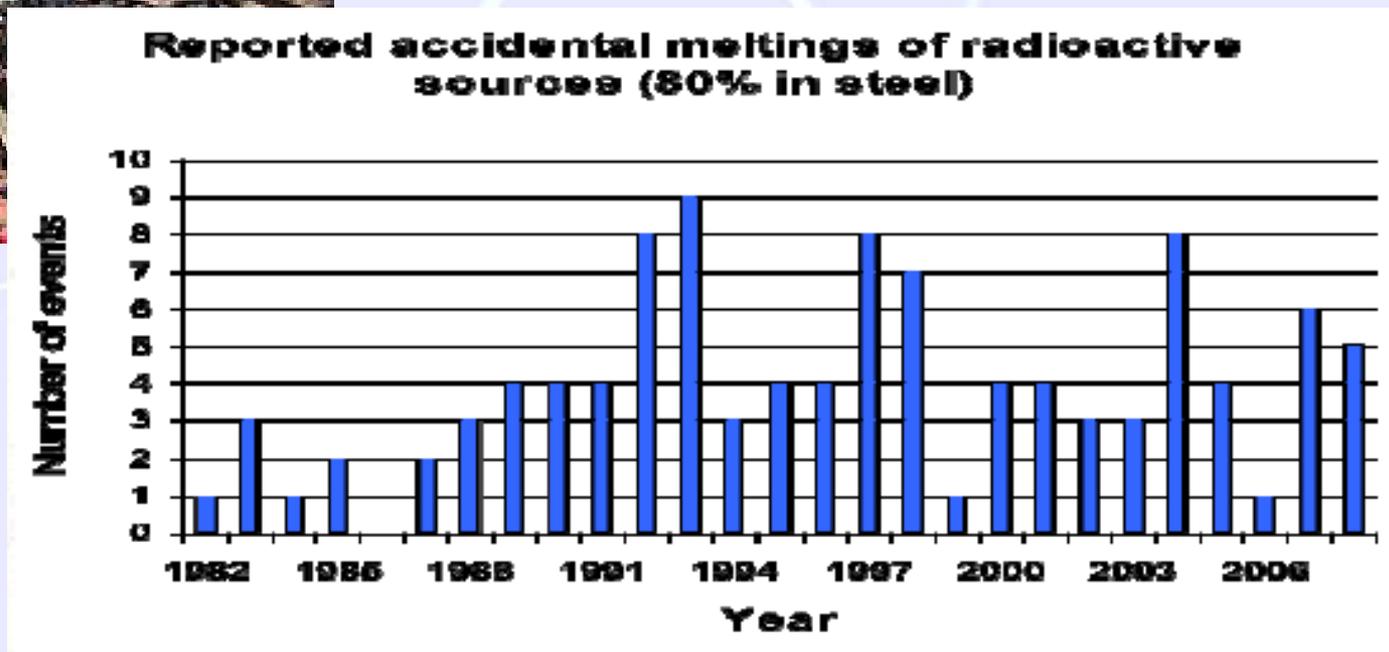
I muoni cosmici ancora una volta forniscono una sonda conveniente per ispezionare questi contenitori, con rivelatori piazzati intorno



Risultati dal gruppo INFN di Padova

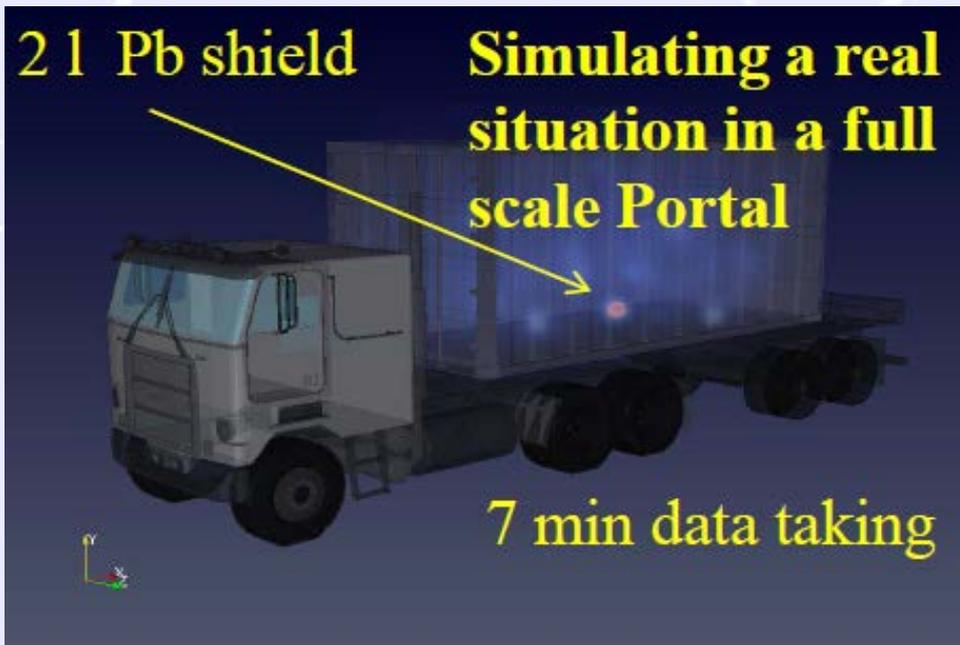
Il problema delle sorgenti «orfane» nelle acciaierie

I rifiuti metallici destinati alle acciaierie per la fusione possono contenere materiale radioattivo «disperso», con conseguente contaminazione della linea di produzione.



Il problema delle sorgenti «orfane» nelle acciaierie

Diversi progetti, tra cui un Progetto italiano (MU-STEEL), hanno cercato di monitorare i mezzi di trasporto dei rifiuti metallici mediante i muoni cosmici per evidenziare la presenza di sorgenti



Ancora altre applicazioni: la stabilità di edifici e grandi strutture

Idea base:

Monitorare la stabilità e l'allineamento di grandi strutture meccaniche o civili (edifici, ponti, tunnel,...) mediante tracciamento dei muoni cosmici

Cosa serve:

- a) Un rivelatore di tracciamento dei muoni con buona risoluzione angolare, indipendente dalla struttura
- b) Diversi piccoli rivelatori di muoni localizzati lungo la struttura e solidali con essa

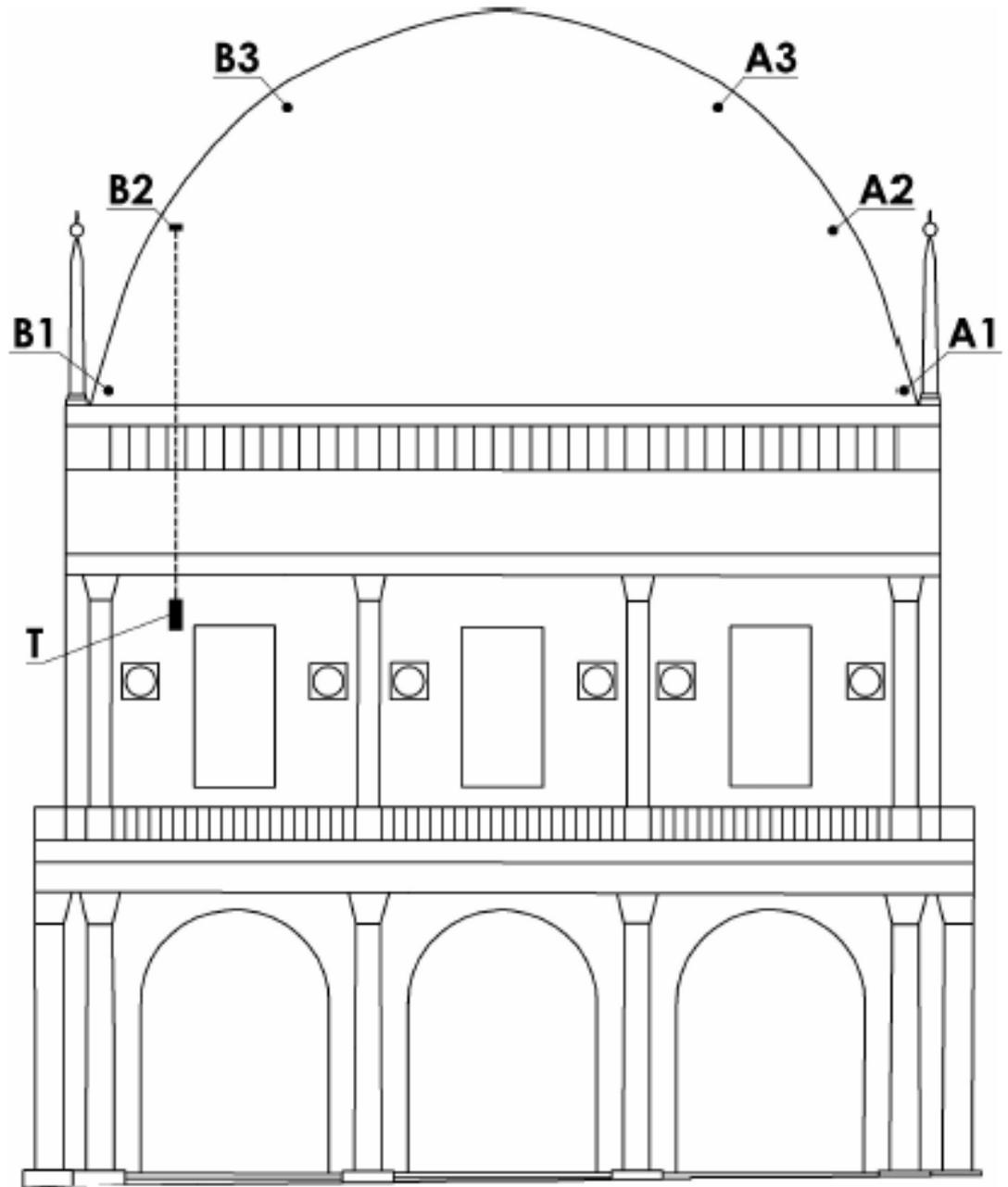
La distribuzione degli angoli delle tracce rivelate in coincidenza è sensibile anche a spostamenti sub-millimetrici della struttura

Tempi richiesti: molto lunghi (~ settimane)

Ancora altre applicazioni: la stabilità di edifici e grandi strutture

Un esempio: Palazzo della Loggia (Brescia):

Monitoraggio della stabilità della volta



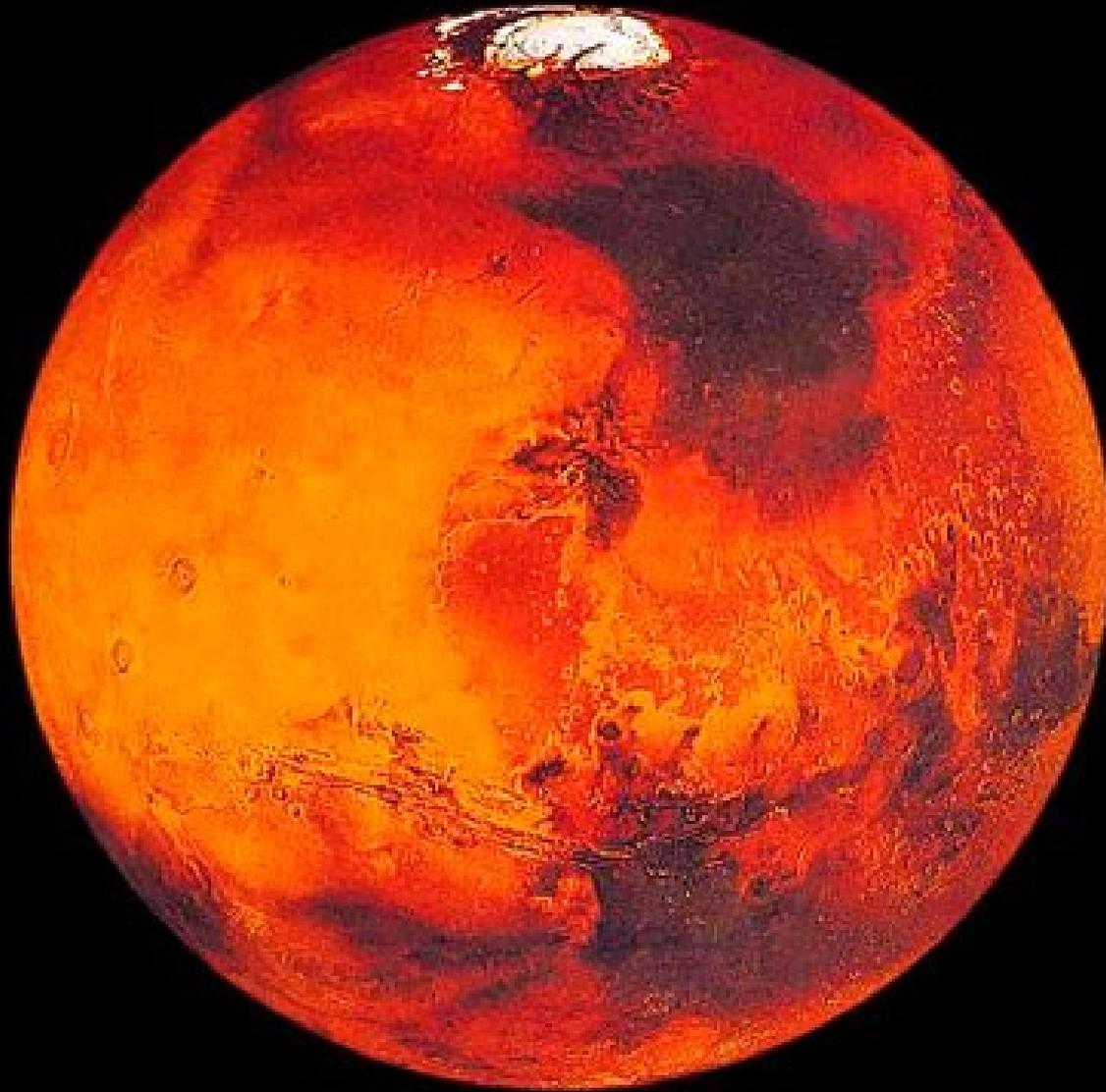
A. Zenoni et al.,
Collab. Brescia, Pavia,
Padova

Ancora altre applicazioni: la stabilità di edifici e grandi strutture

Vantaggi rispetto al monitoraggio mediante tecniche tradizionali (fili metallici, laser,...)

- **Possibilità di operare anche se le parti non sono otticamente visibili**
- **Flessibilità di installazione**
- **Assenza di parti meccaniche in movimento**
- **Nessuna (o minima) invasività nei confronti della struttura**
- **Possibilità di monitoraggio globale di varie parti della struttura**

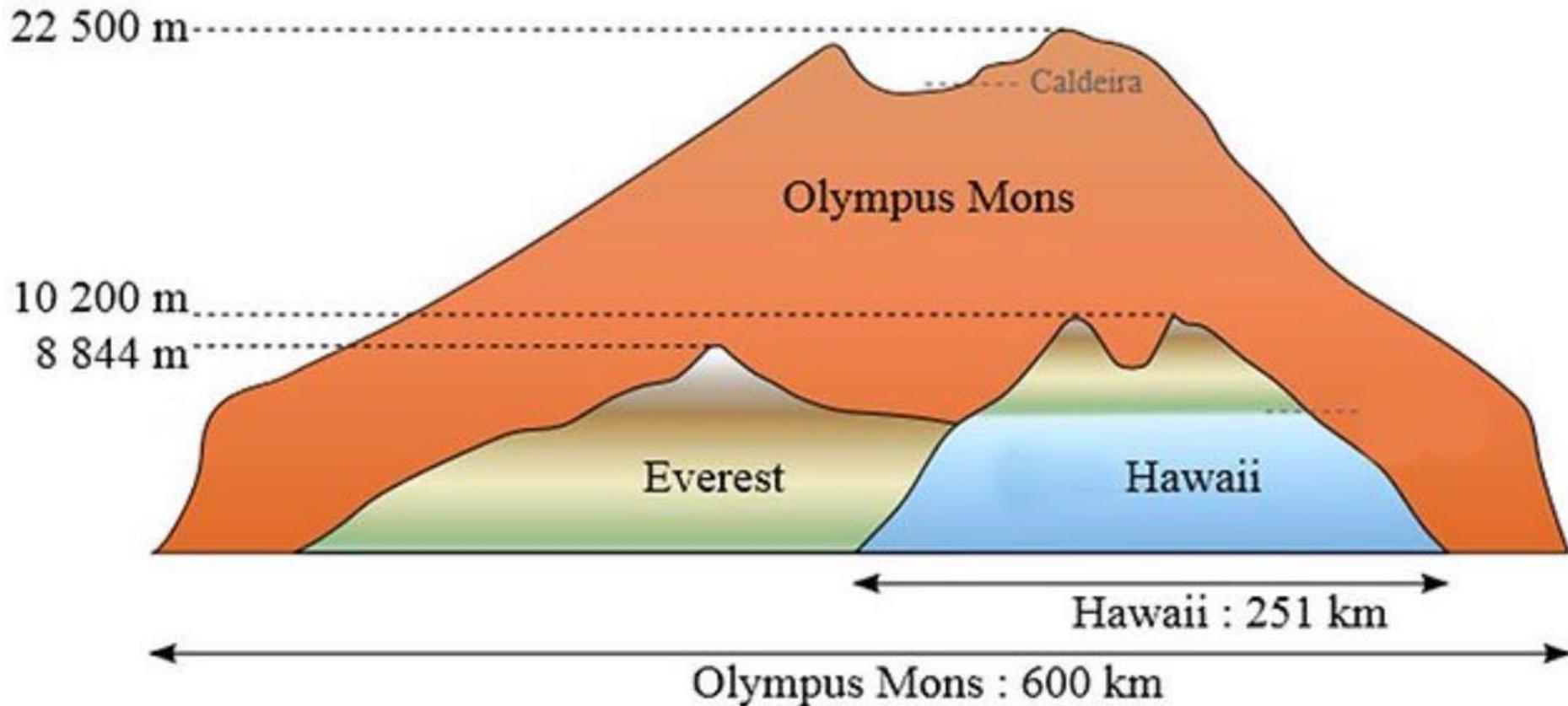
L'esplorazione della geologia di Marte



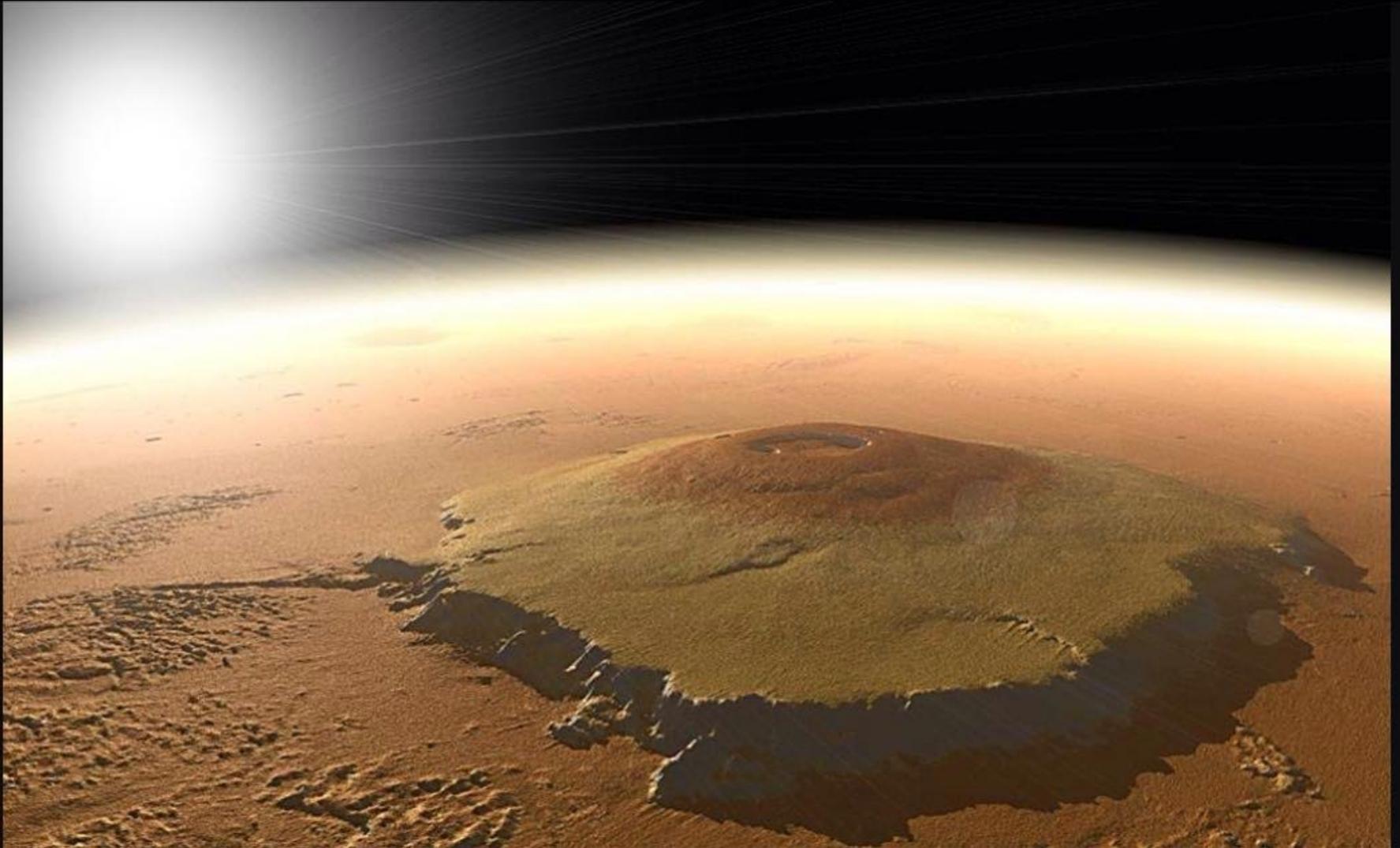
Un'ipotesi studiata da alcuni gruppi: l'utilizzo dei muoni per studiare la geologia del Pianeta Rosso

L'esplorazione della geologia di Marte

The solar system's largest known volcano, Olympus Mons, compared to Mount Everest and the Hawaii sea mount.



L'esplorazione della geologia di Marte



Il gigante delle montagne nel Sistema Solare, il Monte Olimpo su Marte

L'atmosfera marziana e il suo influsso sui cosmici

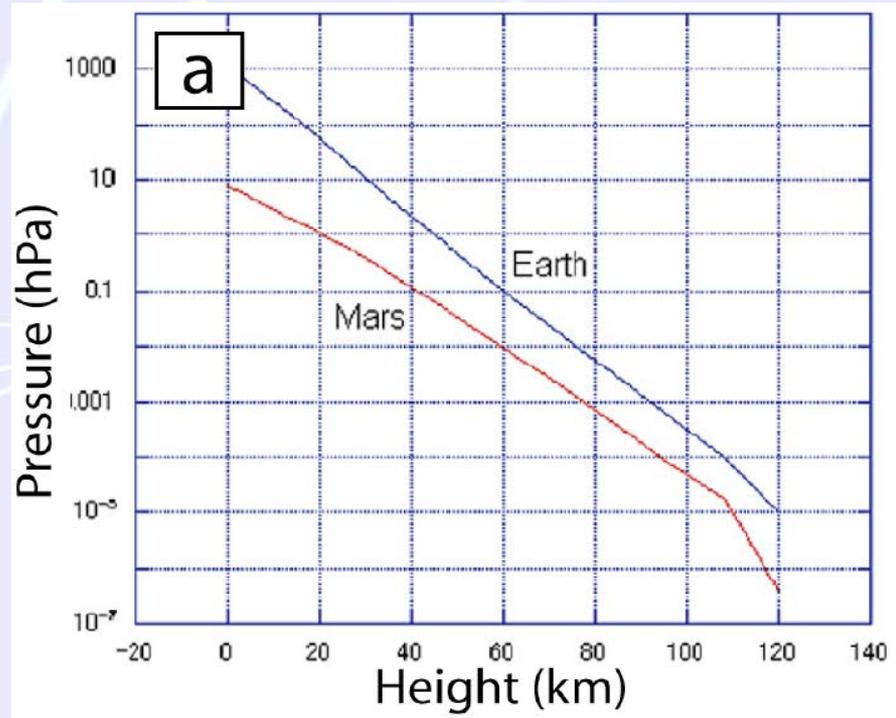
Differenze rispetto alla Terra:

- Diversa composizione e pressione dell'atmosfera marziana
- Pressione circa 1/100 di quella terrestre
- Differente sviluppo dello sciami

- Nell'atmosfera terrestre il massimo dello sciami si ha a 15 km di altezza, in quella marziana invece molte delle particelle primarie raggiungono il suolo

- Conseguenza: minor flusso dei cosmici verticali rispetto alla Terra, ma maggiore (x2) flusso di muoni orizzontali, adatti per la tomografia geologica.

- Tuttavia: contaminazione dei protoni primari che raggiungono la superficie

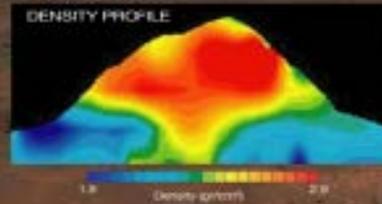


S.Kedar et al., *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 2, 157-164, 2013

Scenari esplorativi su Marte

Ipotesi di progetto
per tomografia
muonica durante
future esplorazioni
su Marte

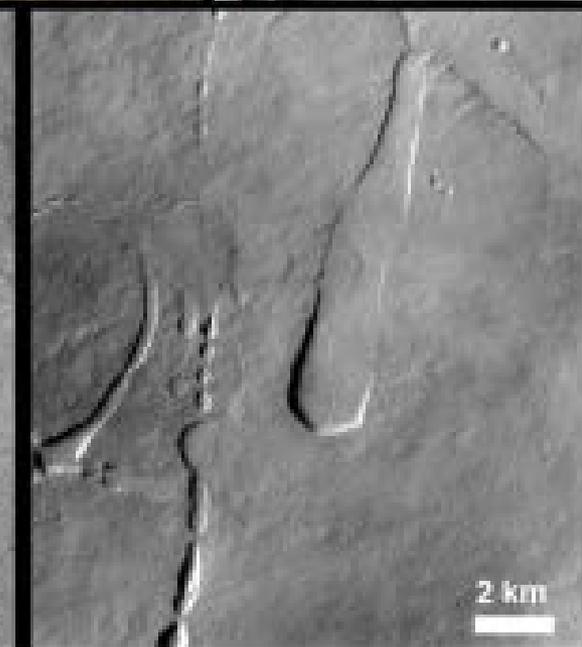
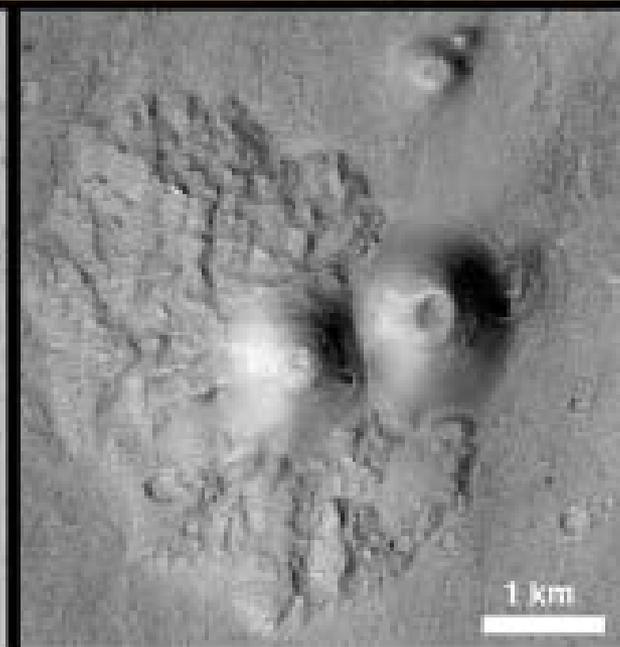
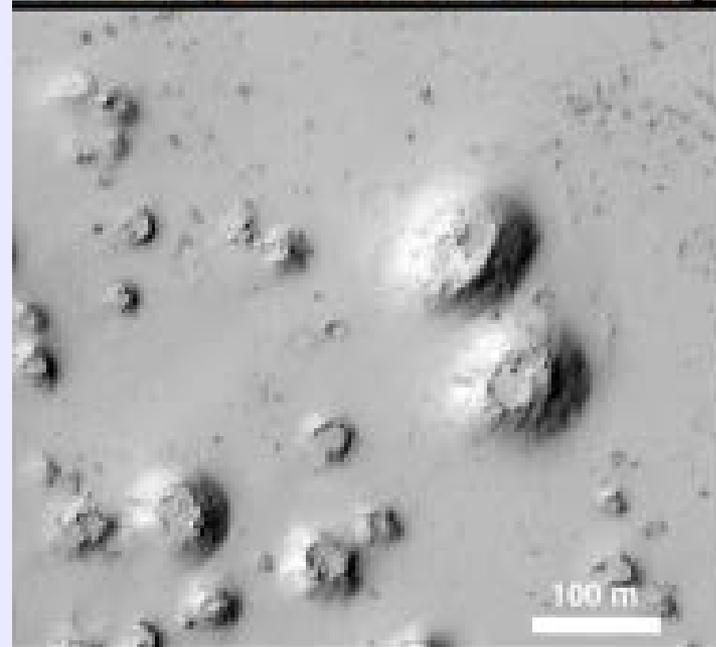
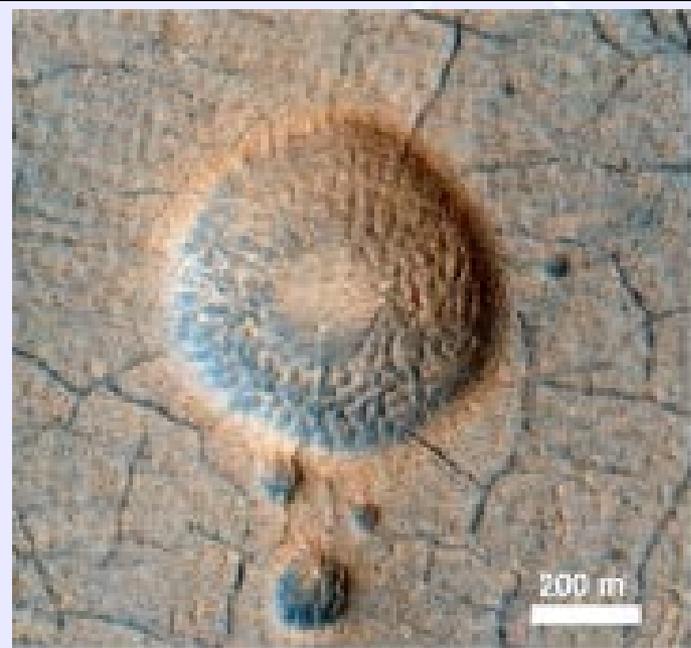
A



Passive, low-power, instrument images
the interior of geological objects
with minimal impact on primary mission
using naturally occurring cosmic rays as source

Passive, low power, detector carries on its
science mission under all conditions
(Rover in transit, nighttime, Martian winter)

Possibili obiettivi di esplorazione su Marte



Sfide tecnologiche di questi progetti

Riduzione della massa da trasportare verso Marte

Riduzione del consumo di potenza elettrica

Problemi meccanici durante le fasi di ingresso, discesa e atterraggio sul suolo marziano

Montaggio dei piani di rivelazione in configurazione telescopica on-site

Posizionamento del rivelatore su un sito adatto (in genere altitudine elevata)

Sfide climatiche ambientali ($T_{\text{media}} = -50^{\circ}\text{C}$, sbalzi di temperatura)

... e tante altre...

Valutazione costi/benefici rispetto ad altre tecniche di prospezione geologica sul pianeta Marte

- **I raggi cosmici: Strumento di comprensione del lontano Universo ma anche dell'ambiente intorno a noi**
- **Una varietà notevole di applicazioni dei muoni cosmici negli ultimi anni, in aree molto diverse**
- **Molte di queste applicazioni rappresentano tuttora delle sfide scientifiche e tecnologiche**
- **Coinvolgimento nelle attività del Progetto EEE: un'occasione formidabile per entrare in rapporto con tutti gli aspetti della radiazione cosmica**