



La Radiografia Muonica come strumento di *Imaging*

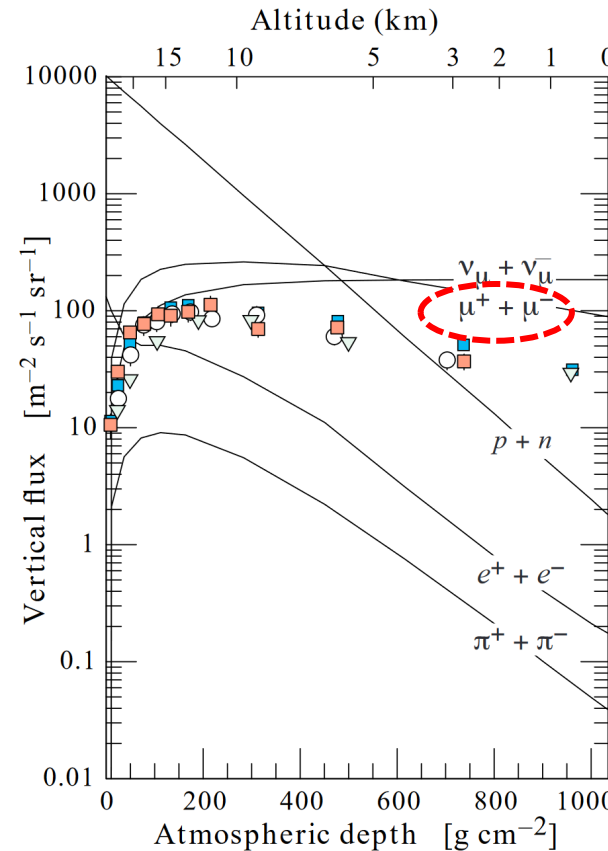
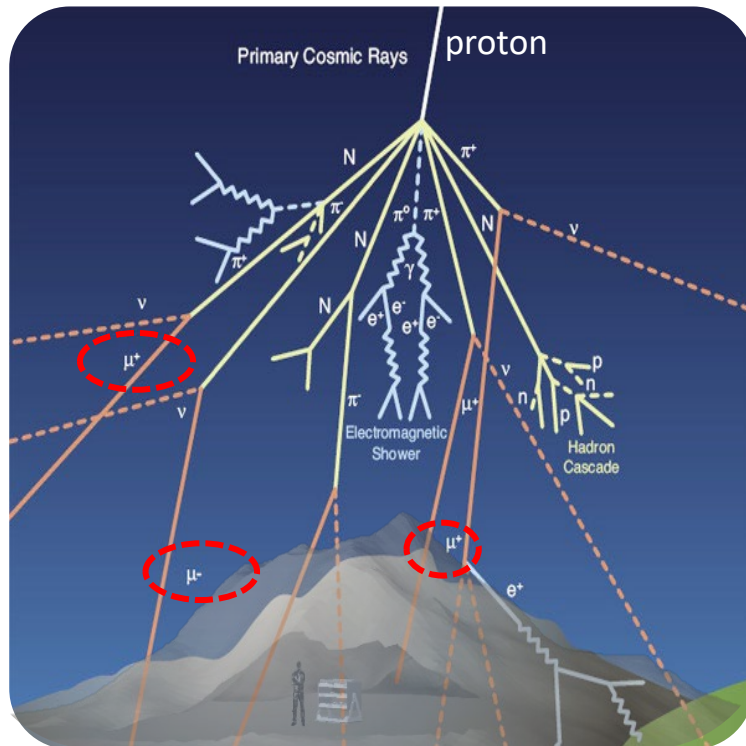
Discover Cosmic Particles

**INTERNATIONAL
COSMIC DAY**

November 26 | 2024

Diletta Borselli
UNIFI e INFN Firenze

I raggi cosmici primari provenienti dall'universo incidono sulla nostra atmosfera producendo uno «sciame» di particelle



I muoni μ sono i raggi cosmici secondari carichi più abbondanti al livello del suolo.

Al suolo arrivano circa $100 \mu\text{oni s}^{-1} \text{m}^{-2}$

I muoni hanno una vita media τ di $\sim 2.2 \mu\text{s}$ (2 milionesimi di secondo) ed una massa $m_\mu \cong 200 m_e$ e la loro volta decadono in elettroni e positroni.

La «lunga» vita media permette, ad una buona percentuale di μ , di raggiungere il suolo

I muoni sono le particelle cariche più penetranti in materia, possono attraversare km di roccia → Usati per fare le «**muografie**»

Introduzione:

La tecnica della radiografia muonica

La **radiografia muonica (o muografia)** è una tecnica di **imaging** che permette di creare immagini bidimensionali o tridimensionali della densità interna dell'oggetto in esame (detto **target**) attraverso **misure di assorbimento di muoni cosmici**. I rivelatori utilizzati sono **tracciatori** (tracker) di particelle cariche.

Radiografia



Immagine prodotta dall'assorbimento dei raggi X particelle all'interno del target

- ✓ Serve una sorgente di raggi X
- ✓ Applicazione a piccole strutture
- ✓ È una tecnica non invasiva
- ✓ Tempi di acquisizione: qualche minuto

Muografia

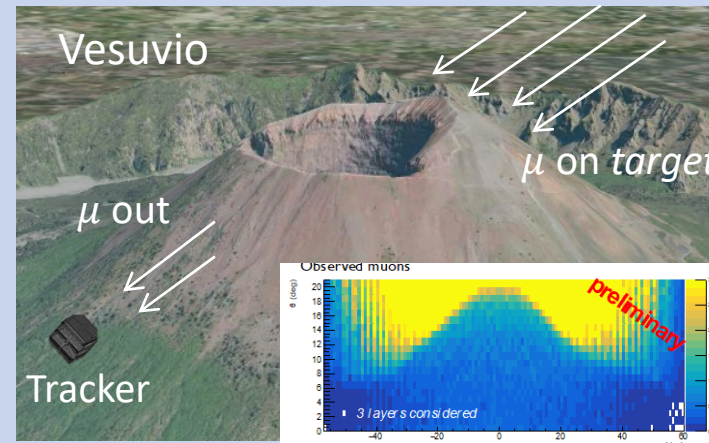
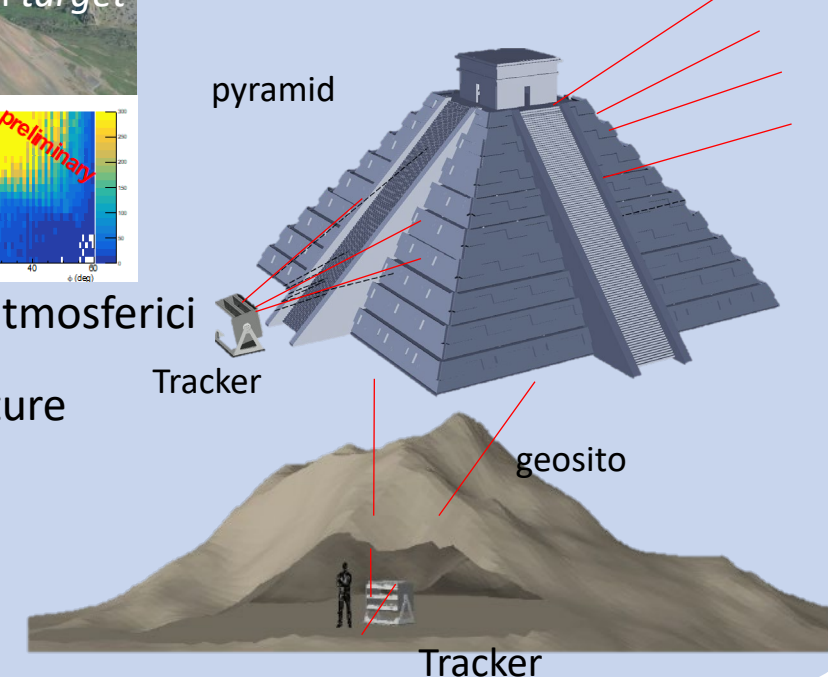
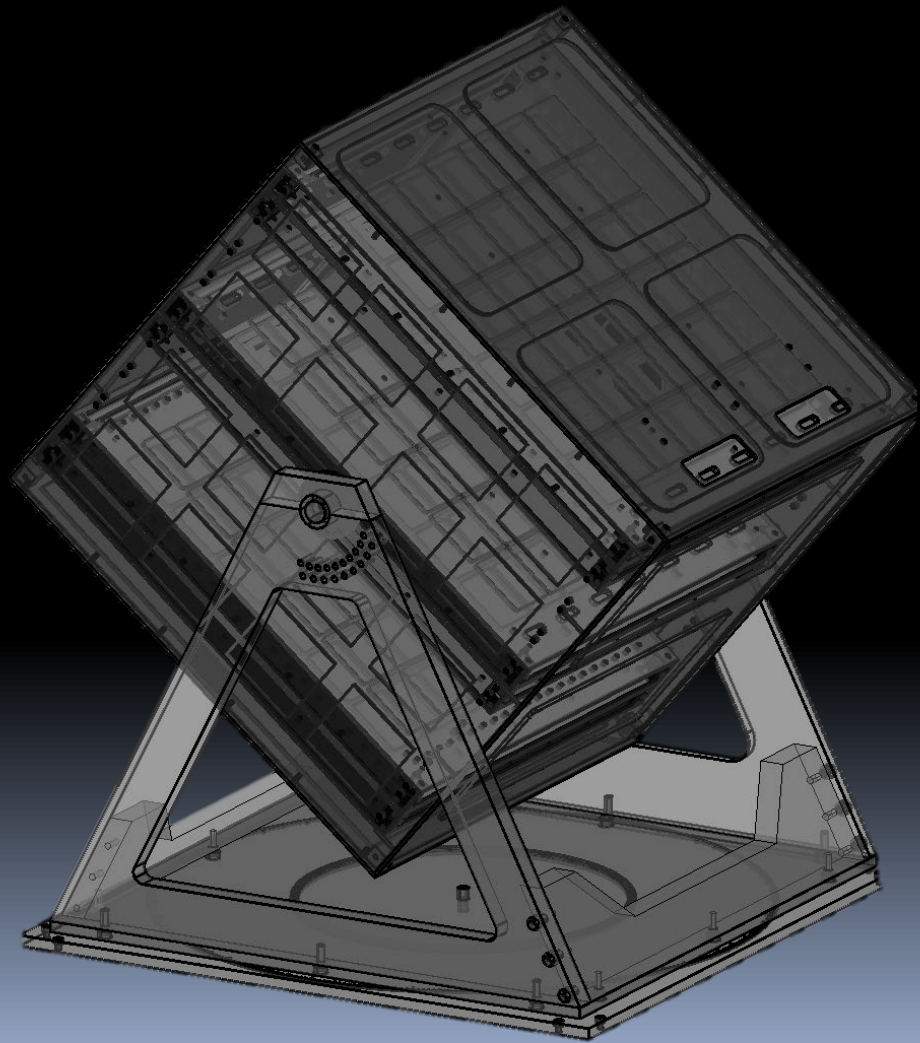


Immagine prodotta dall'assorbimento dei muoni particelle all'interno del target

- ✓ Sorgente «gratis» i muoni atmosferici
- ✓ Applicazione a grandi strutture
- ✓ È una tecnica non invasiva
- ✓ Tempi di acquisizione: qualche mese





Rivelatori per misure di radiografia muonica

La tecnica della radiografia muonica:

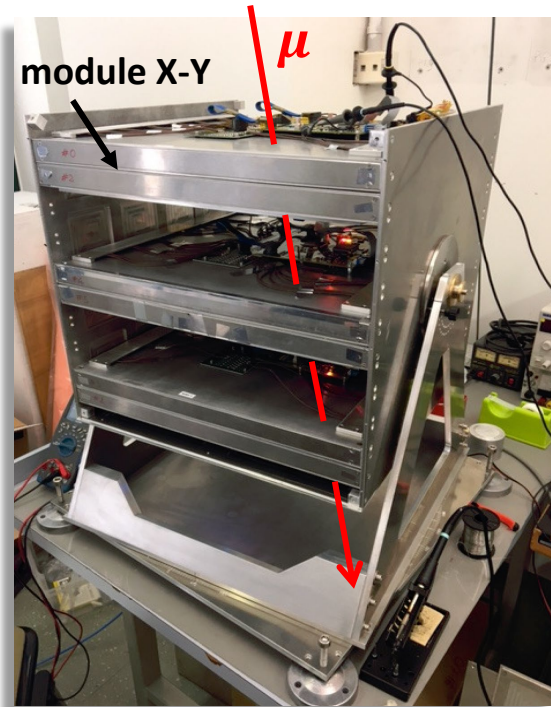
Rivelatori: tracciatori di particelle

I rivelatori utilizzati per le applicazioni di radiografia muonica sono dei tracciatori (tracker).

I tracciatori sono dei rivelatori costituiti da materiali sensibili al passaggio di particelle cariche e permettono di ricostruire la traiettoria della particella che ha attraversato il rivelatore e ottenere così la direzione di provenienza.

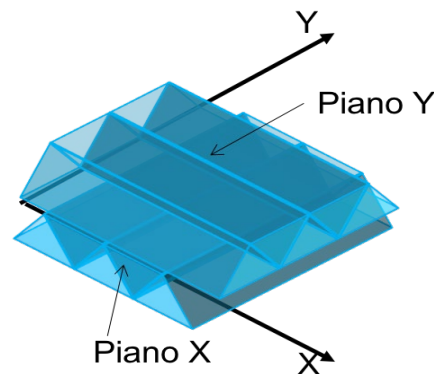
MIMA

(**M**uon Imaging for **M**ining and **A**rchaeology)

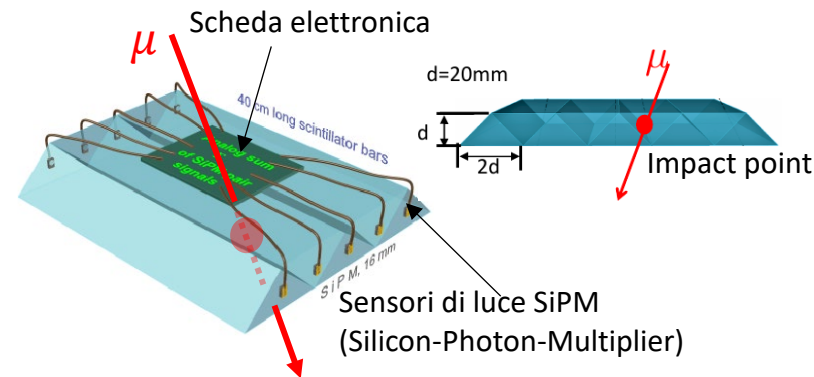


Ogni modulo tracciante XY è costituito da un piano X e un piano Y e permette di ottenere il punto XY d'impatto della particella.

Modulo XY

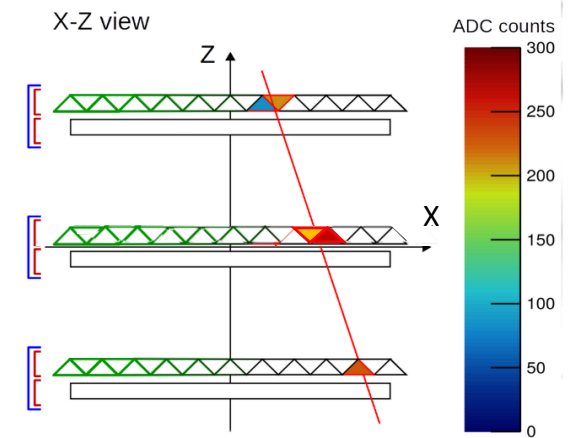


Singolo piano tracciante



Materiale: Scintillatore plastico a sezione triangolare, dimensione singola barra (4x2x40) cm. Numero barre per piano: 21.

Esempio di ricostruzione della traccia di una particella



Cubo di dimensioni (50x50x50) cm³ che poggia su una piattaforma orientabile

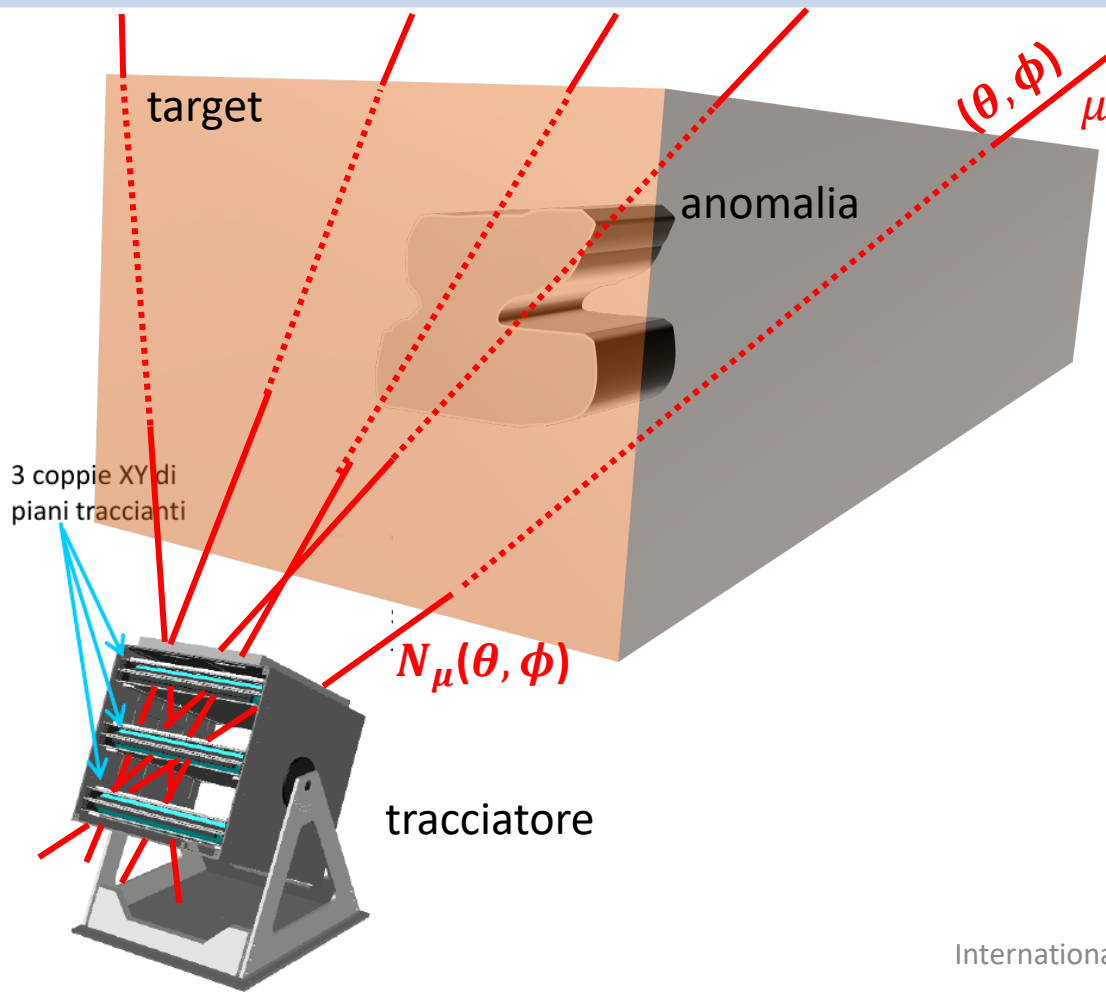
**Metodologia
della tecnica
della radiografia
muonica**



La tecnica della radiografia muonica:

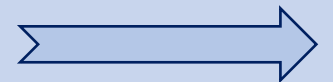
Cosa si misura

Da una misura di radiografia muonica si ottiene il numero di muoni che arriva da ogni direzione osservabile dal rivelatore $N_\mu(\theta, \phi)$ con θ angolo di zenit e ϕ angolo di azimut. Dall'attenuazione del flusso di muoni dovuto al target si possono individuare delle anomalie interne.



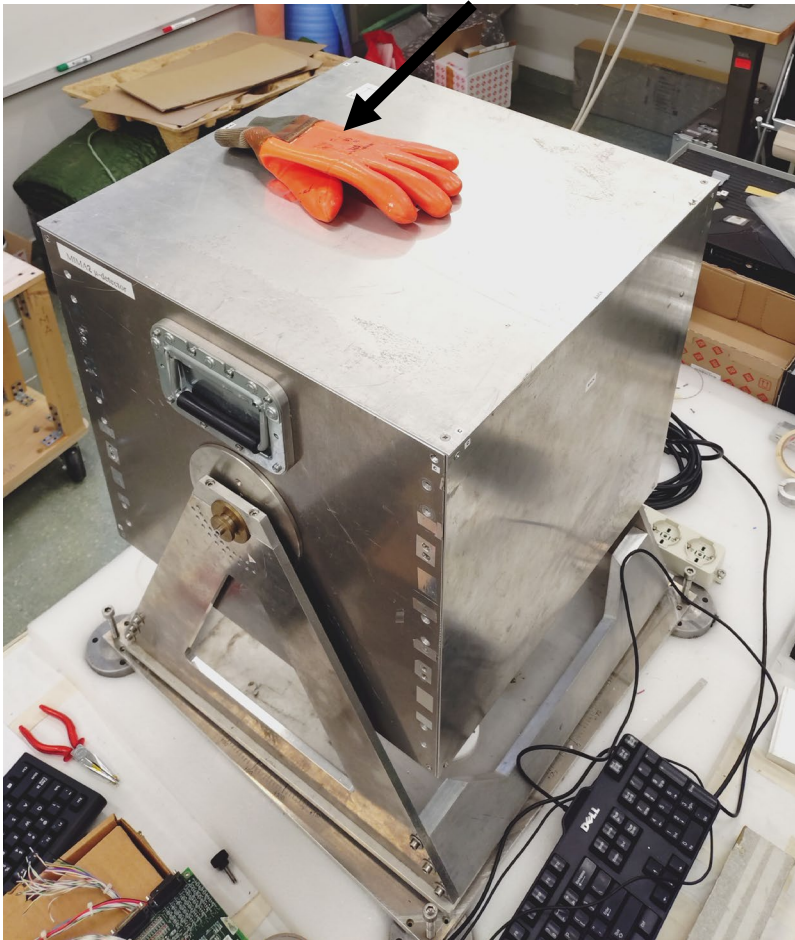
- ✓ Il rivelatore va puntato verso il target e deve trovarsi il più possibile sotto di esso per avere un flusso di muoni il più possibile verticale (angolo per il quale il flusso è massimo)
- ✓ $N_\mu(\theta, \phi)$ dipende dal target (forma e densità) ma anche dal flusso di raggi cosmici a terra e dal rivelatore attraverso la sua efficienza e accettazione.

Per avere $N_\mu(\theta, \phi)$ dipendente solo dal target e poter così ben individuare e localizzare le possibili anomalie interne sono necessarie misure e simulazioni.

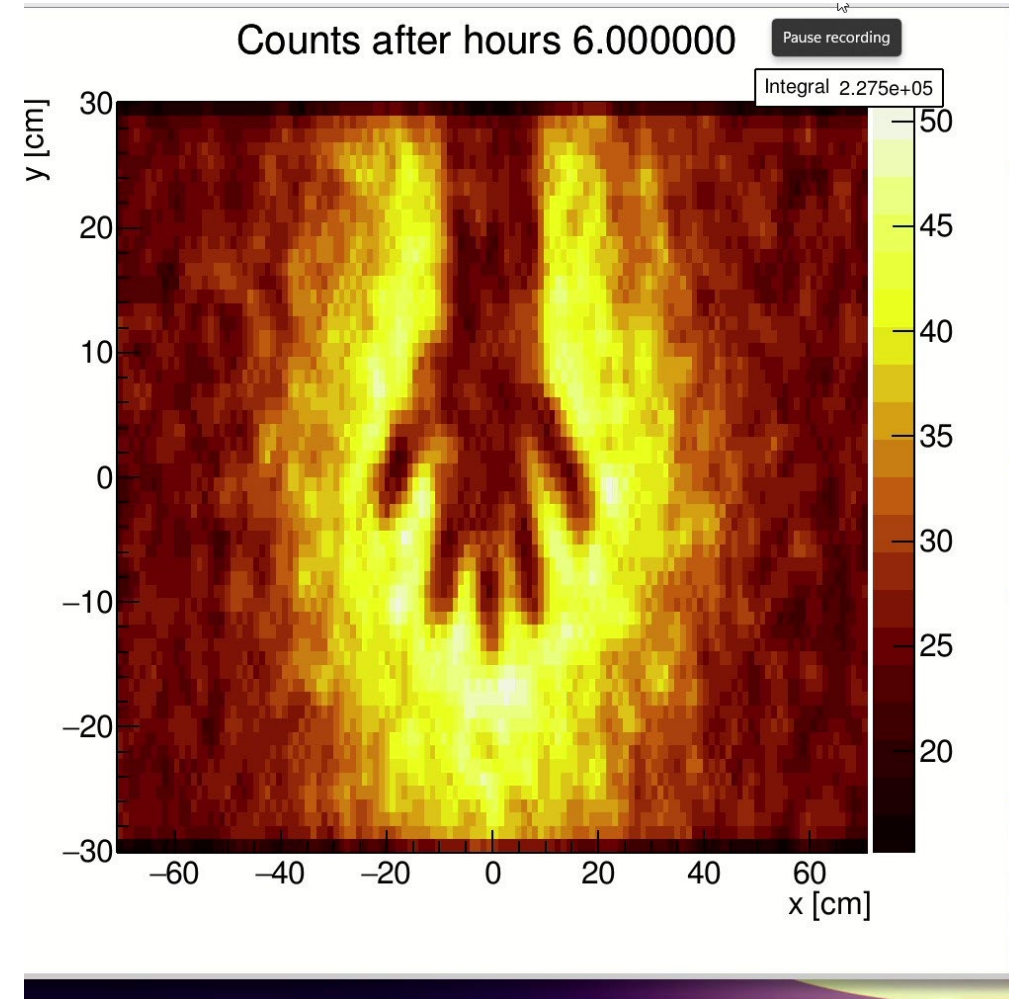


La tecnica della radiografia muonica: Esempio di misura di conteggi di muoni

Supponiamo di avere un **guanto di Ferro** sopra il rivelatore e di essere a misurare all'aperto



Cosa vede il rivelatore



Imaging Metodologia → Mappe di densità del target

Mappe 2D di densità interna del target

1. Misura Target

$$N_{\mu_{target}}(\theta, \phi)$$



2. Misura Freesky

$$N_{\mu_{freesky}}(\theta, \phi)$$



3. Simulazione nel caso di assenza di anomalie

Target di densità $\bar{\rho}$



Trasmissione di μ misurata

$$T_{misu}(\theta, \phi) = \frac{N_{\mu_{target}}}{N_{\mu_{freesky}}} \cdot \frac{t_{freesky}}{t_{target}}$$

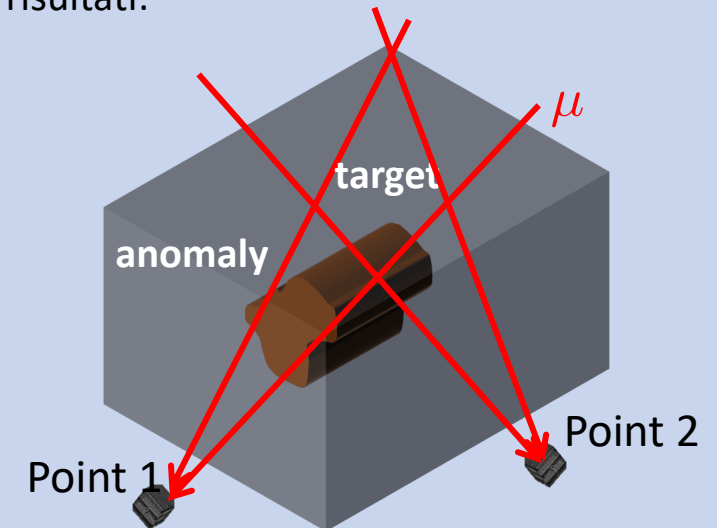
Trasmissione di μ simulata

$$T_{simu}(\theta, \phi, \bar{\rho})$$

Variando $\bar{\rho}(\theta, \phi) : T_{misu}(\theta, \phi) = T_{simu}(\theta, \phi, \bar{\rho}) \rightarrow$ **Mappa 2D di densità $\rho_{target}(\theta, \phi)$**

Mappe 3D di densità interna del target

- Tecnica della triangolazione:
Per una visione **stereoscopica** è possibile installare i rilevatori in più punti e combinare i risultati:



- Tecnica delle retroproiezioni: stima la distanza dall'anomalia utilizzando i dati acquisiti da una singola misura (applicabile solo in alcune condizioni).

A wide river flows through a landscape under a clear blue sky. In the distance, a dam is visible, with water reflecting the sky. The foreground shows a rocky or gravelly bank.

Applicazione in ambito idrogeologico e di sicurezza civile

La radiografia muonica di argini fluviali e dighe

La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito idrogeologico

Ricerca di cavità non mappate (danneggiamento causato dall'attività di fauna locale) finalizzata alla programmazione di interventi mirati di manutenzione



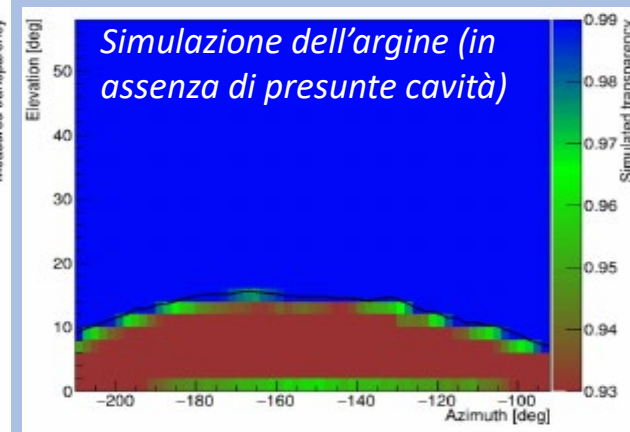
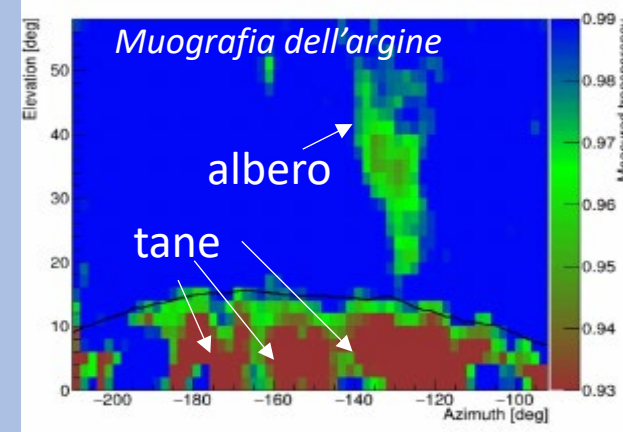
Argine: tana scavata dalla fauna locale



Il puntamento dello strumento è quasi orizzontale (tecnica al limite).




Argine: misura



I risultati sono in accordo con quelli di una *indagine geoelettrica* eseguita nello stesso periodo.

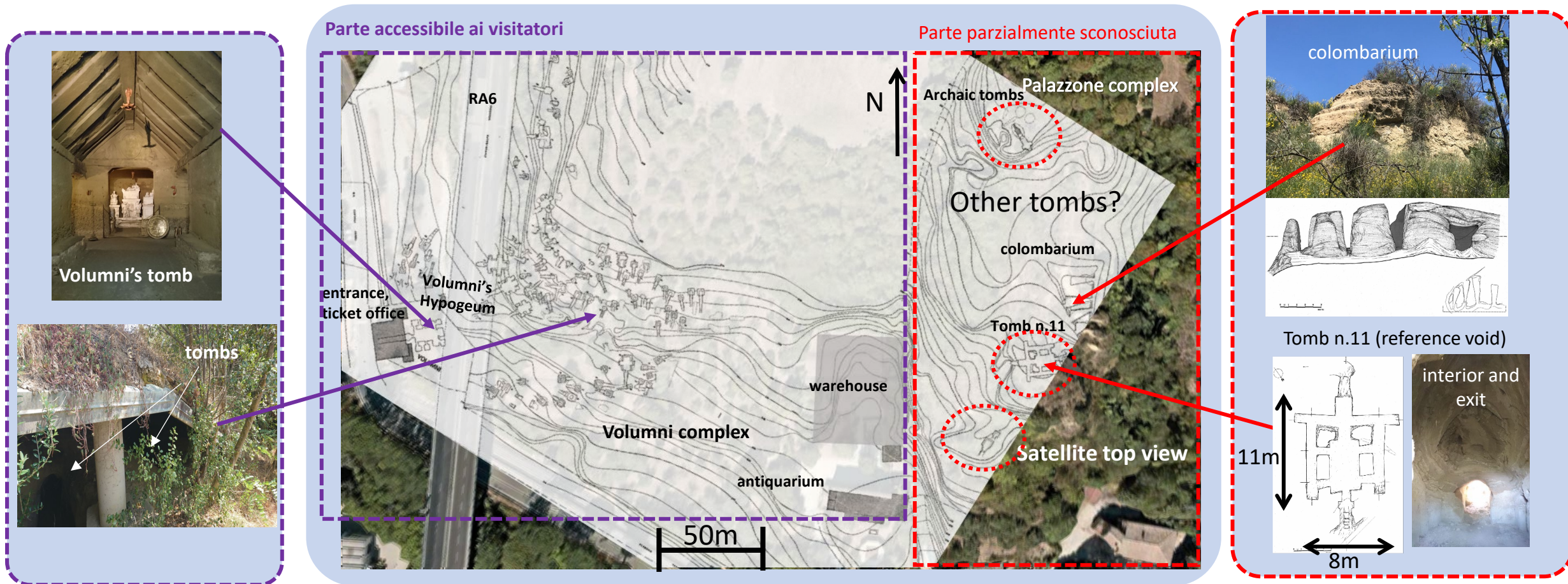


A photograph of a cave interior. The walls are made of rough, textured rock. In the foreground, there is a bright, circular opening, possibly a passage or a large hole, which is illuminated from within, creating a strong contrast with the dimly lit cave. The overall atmosphere is mysterious and ancient.

Applicazione in ambito archeologico
La radiografia muonica di siti archeologici

La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito archeologico

Necropoli del Palazzone Perugia con circa 200 tombe note



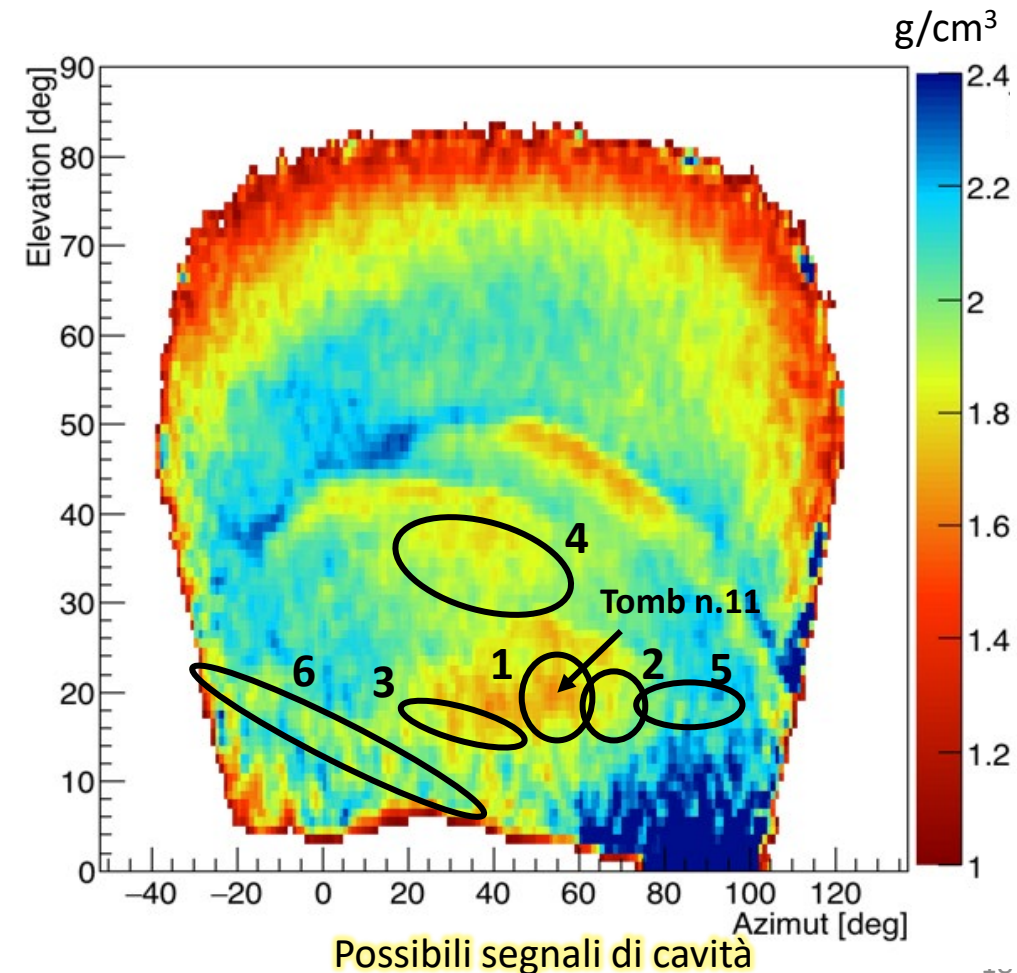
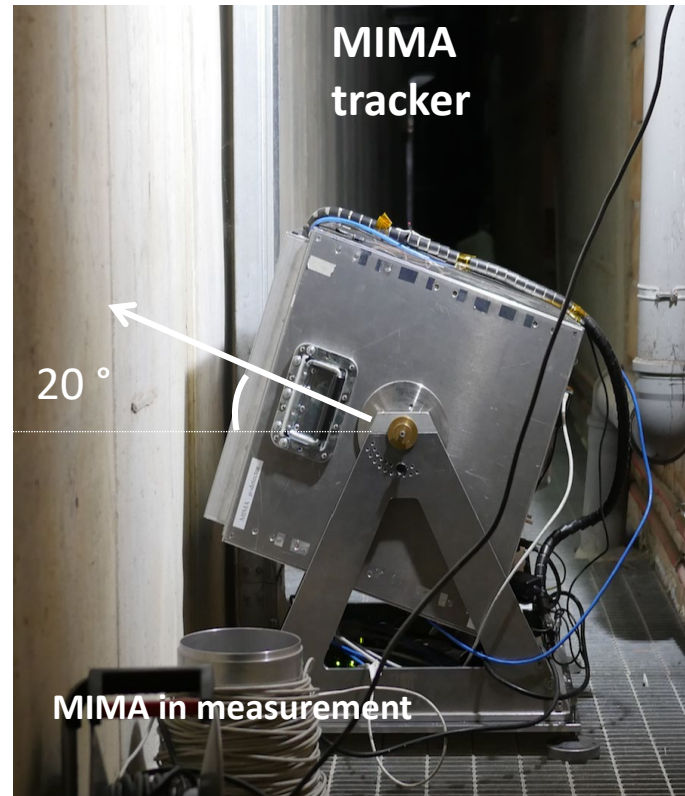
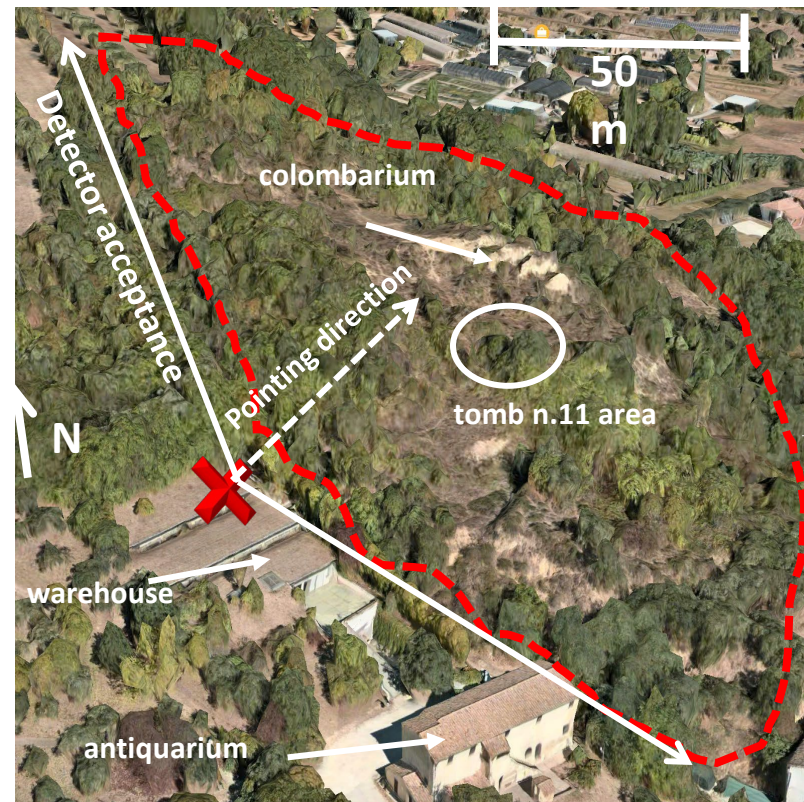
Area d'interesse per misure muografiche

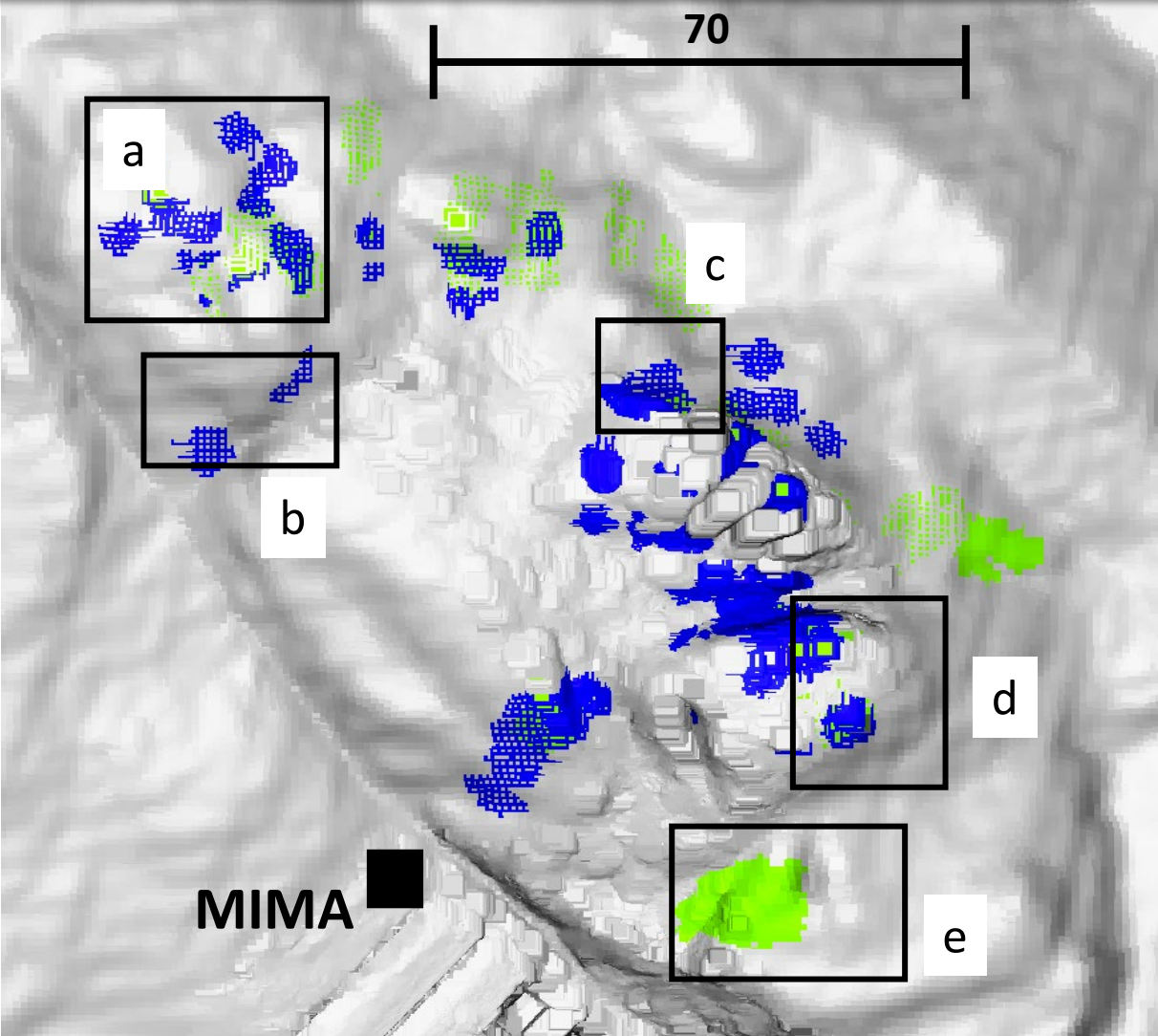
La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito archeologico

2 mesi di acquisizione dati

MIMA si trova dentro il magazzino ed e' puntato verso la collina d'interesse

Satellite View





● ● areas identified with muography



La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito archeologico

Ricerca e ricostruzione di cavità non mappate alla Galleria Borbonica a Napoli

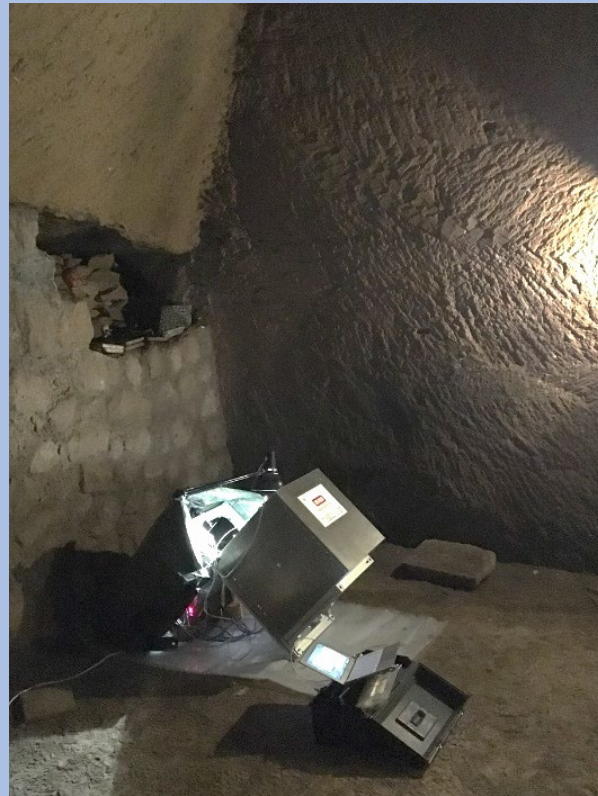
Galleria Borbonica (NA)



Galleria Borbonica: ingresso

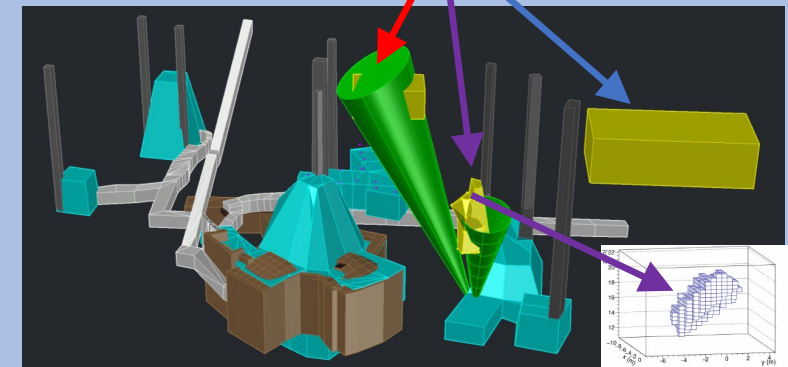
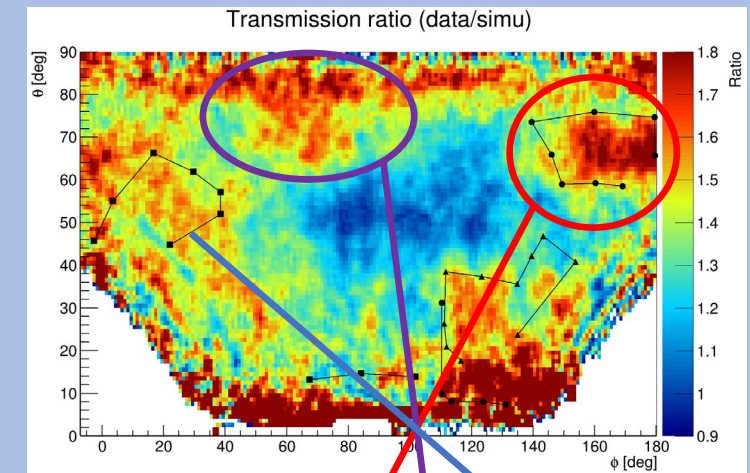


Galleria Borbonica:
esterno



Galleria Borbonica: misura

Muografia e profilo 3D di possibili cavità non mappate



Sono state individuate due nuove regioni da esplorare!!

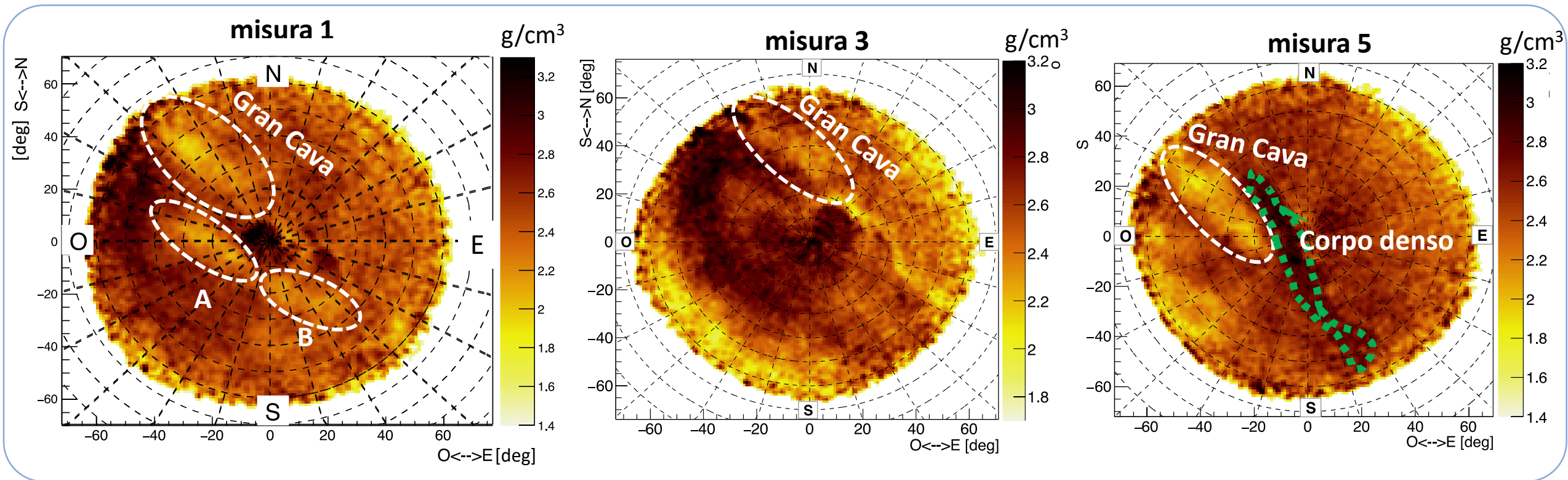


Applicazione in ambito geologico

La radiografia muonica di miniere



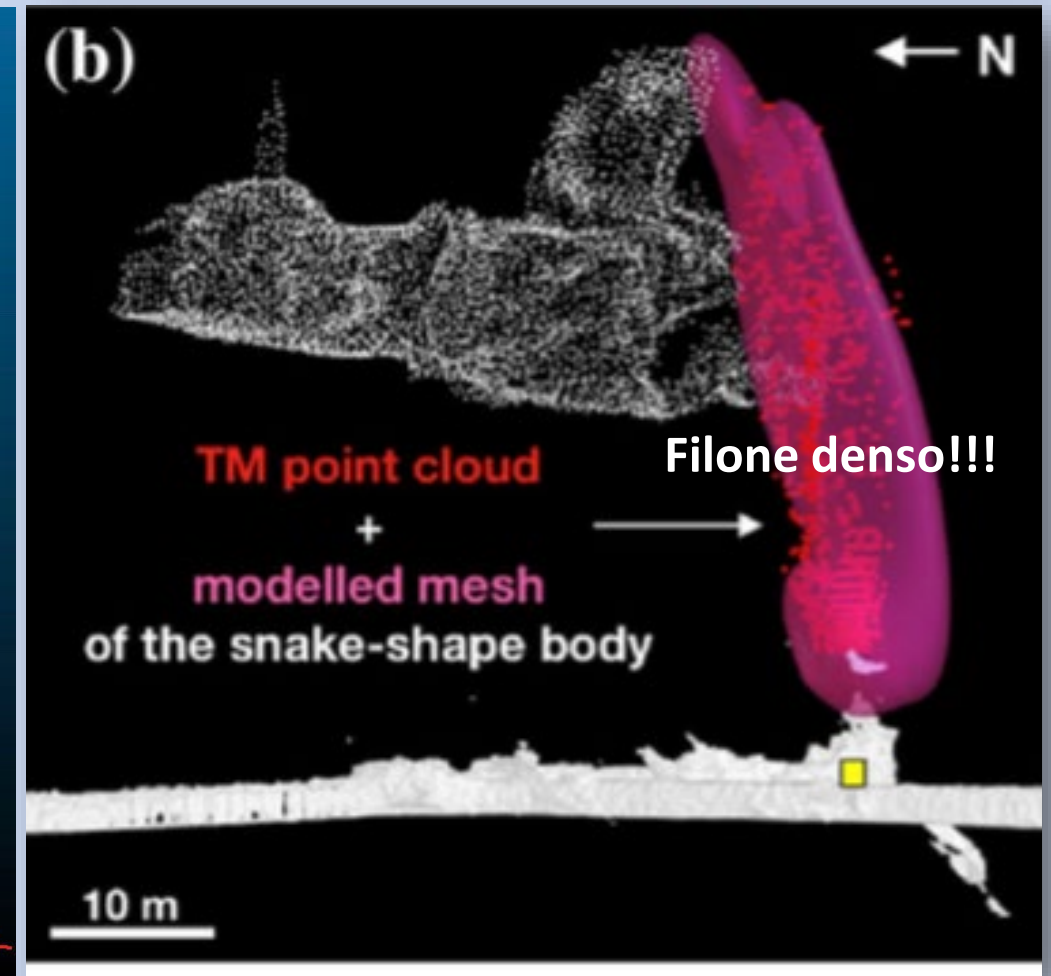
Mappe angolari 2D di densità:

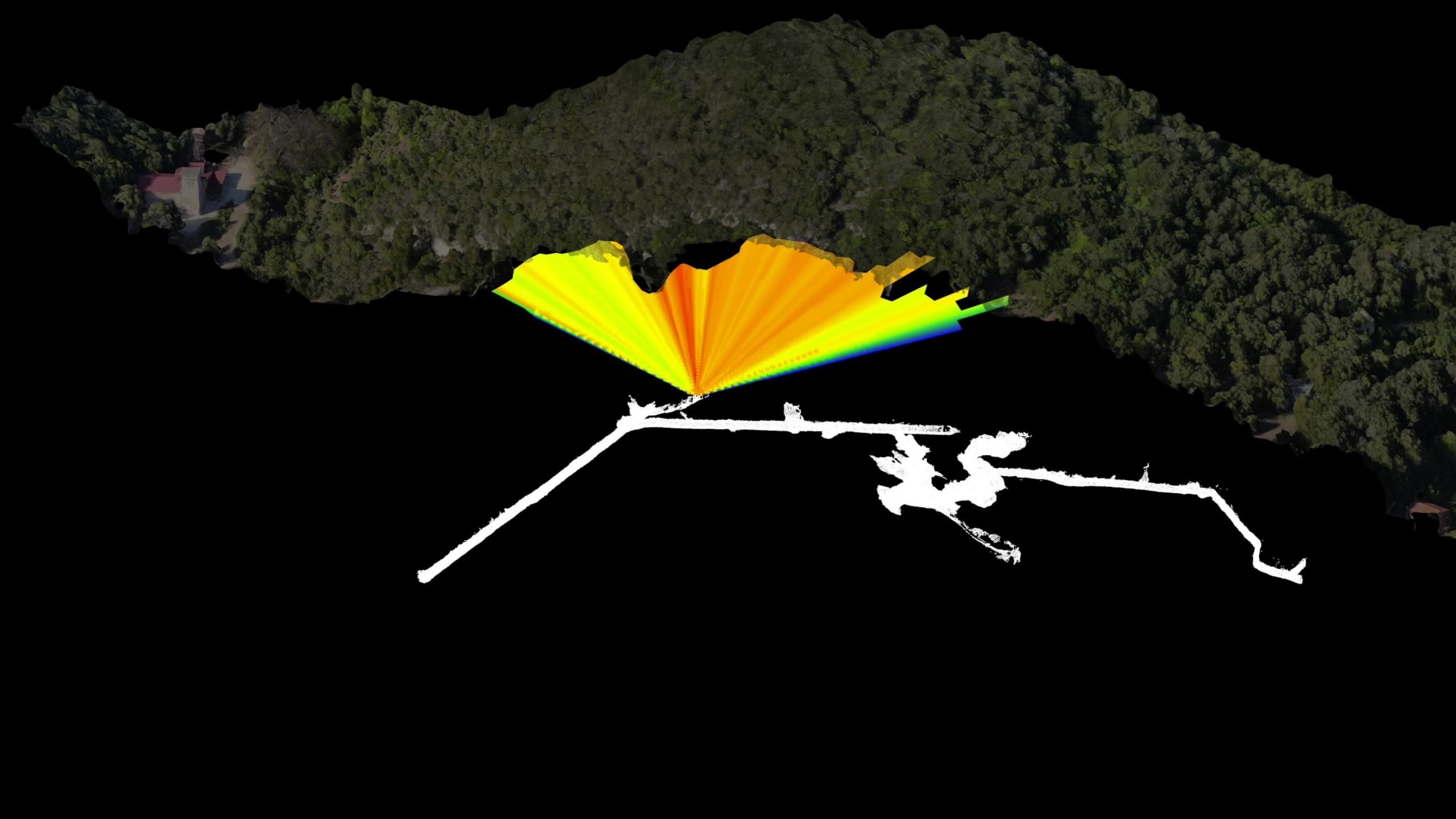


Oltre alla Gran Cava sono visibili altri segnali a bassa densità

La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito geologico minerario

Ricostruzione 3D delle cavità e di corpi densi osservate con la radiografia muonica





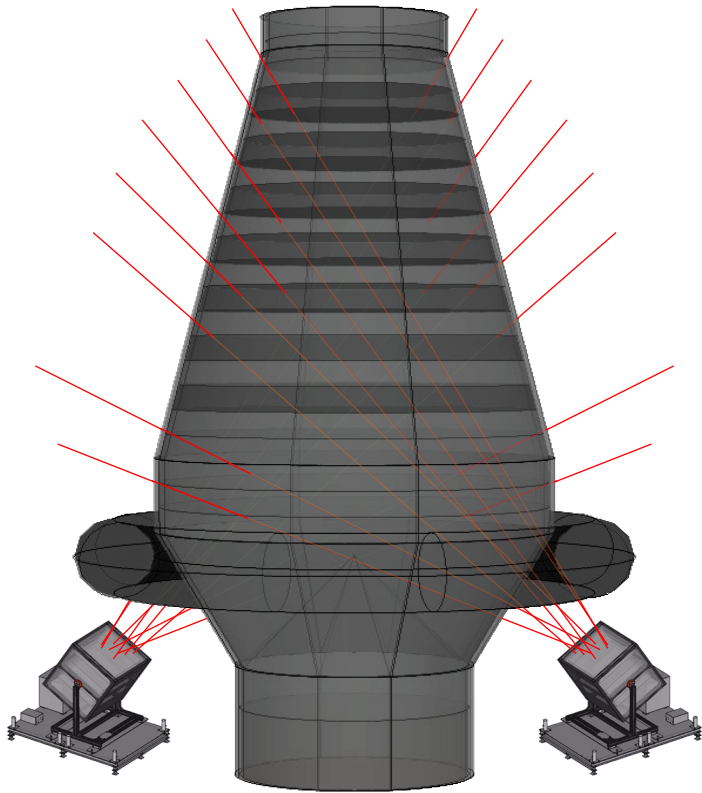


Applicazione in ambito culturale e di sicurezza civile

La radiografia muonica sulla Cupola del Brunelleschi a Firenze

La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito industriale

Sito di Misura: Altoforno situato nell'acciaiera dell'Arcelormittal a Brema (Germania)



Discover Cosmic Particles

INTERNATIONAL COSMIC DAY

Grazie a tutti!!!!

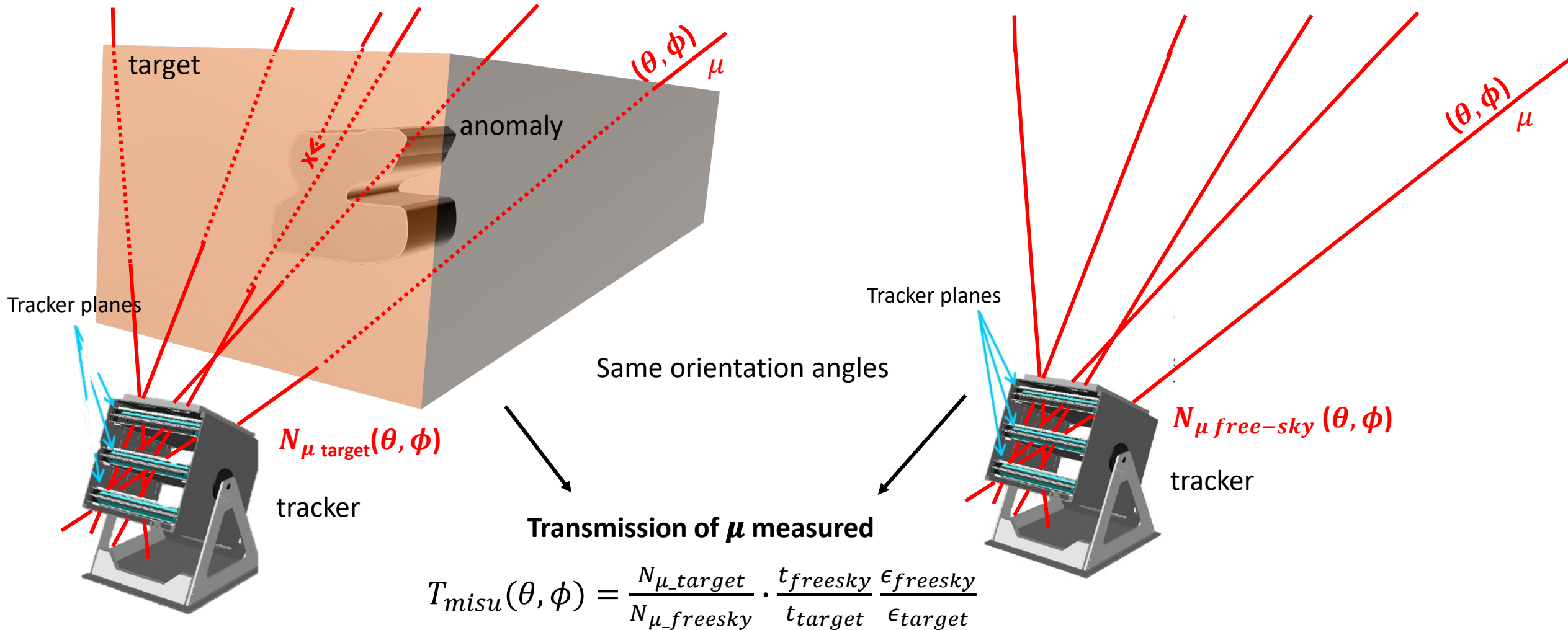
November 26 | 2024

Target measurement

Acquisition time: t_{target}

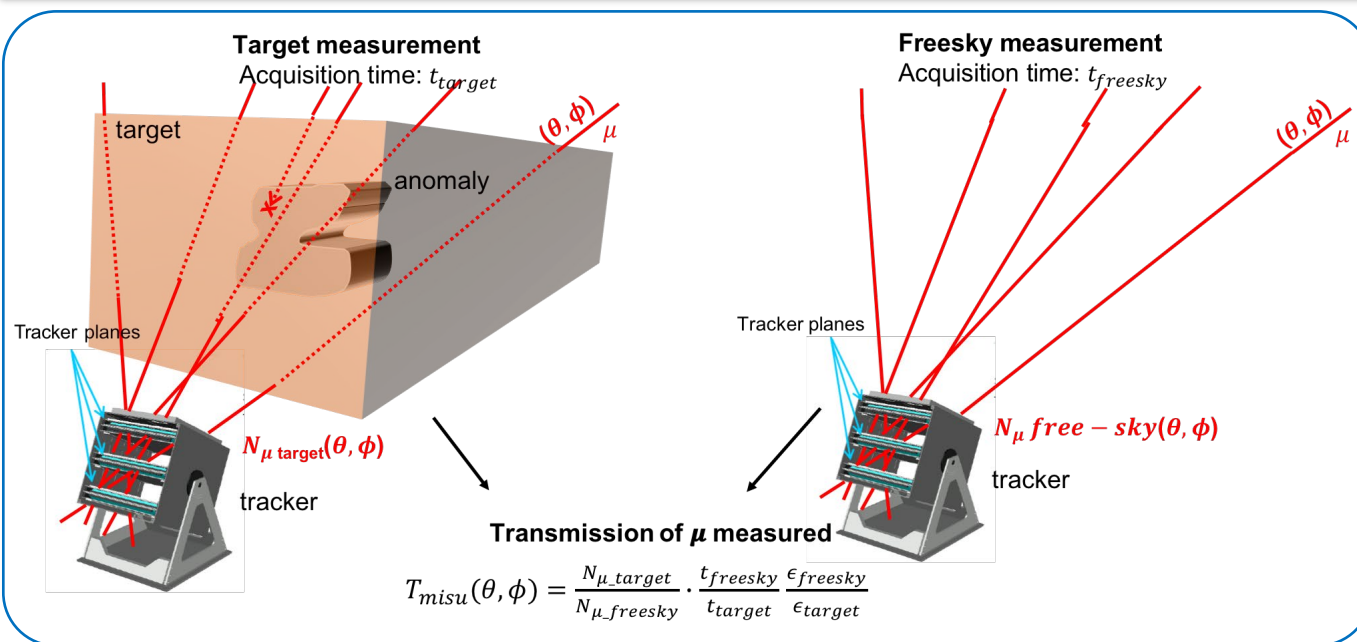
Freesky measurement

Acquisition time: $t_{freesky}$



Muographic Study of the Palazzone Necropolis (Perugia - Italy)

Muon radiography: imaging methodology



Simulation in the case of absence of anomalies

