



La Radiografia Muonica come strumento di
Imaging

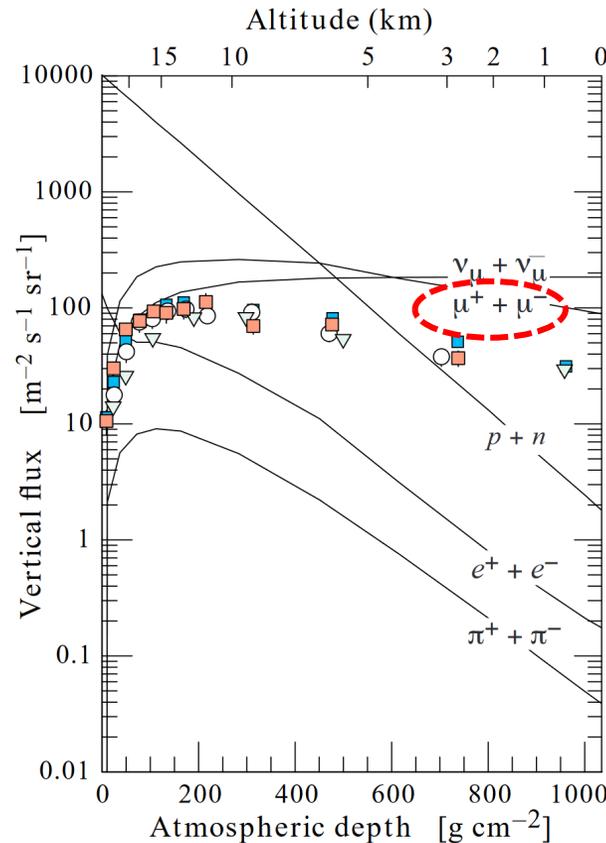
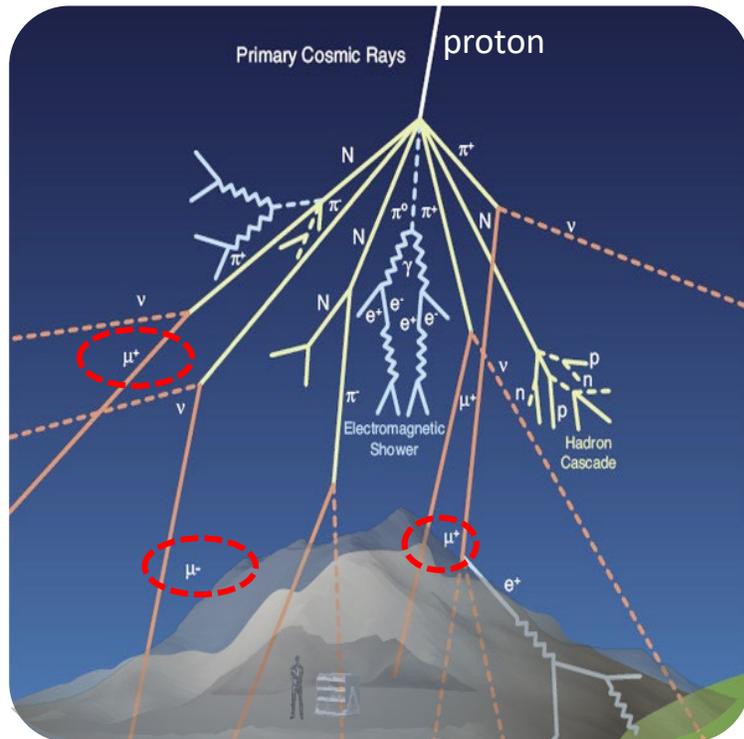
Discover Cosmic Particles

**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 $100 \mu\text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$

I muoni hanno una vita media τ di $\sim 2.2\mu\text{s}$ (2 milionesimi di secondo) ed una massa $m_\mu \cong 200m_e$ 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.

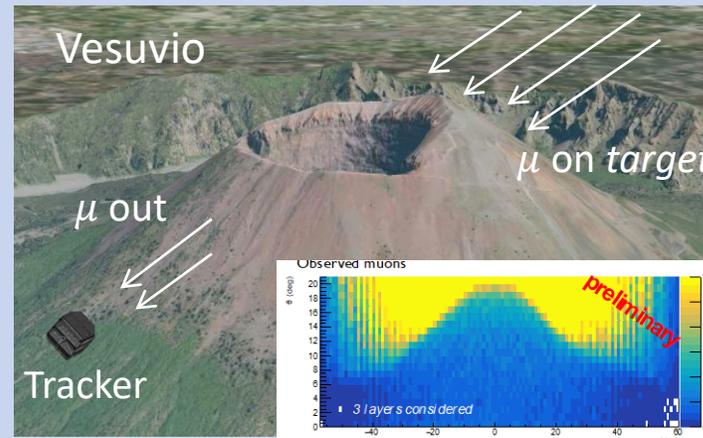
Radiografia



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

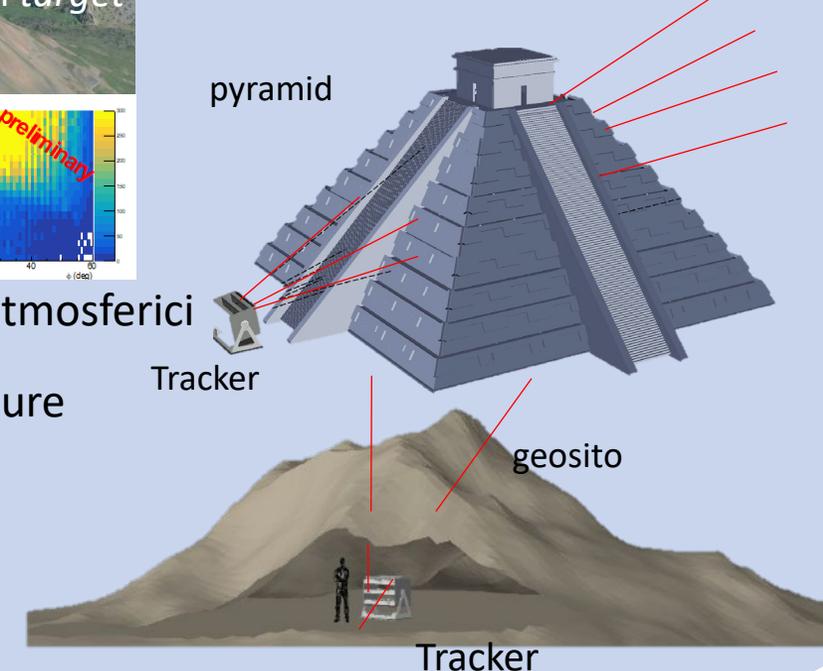
- ✓ Serve una sorgente di raggi X
- ✓ Applicazione a piccole strutture
- ✓ È una tecnica non invasiva
- ✓ Tempi di acquisizione: qualche minuto

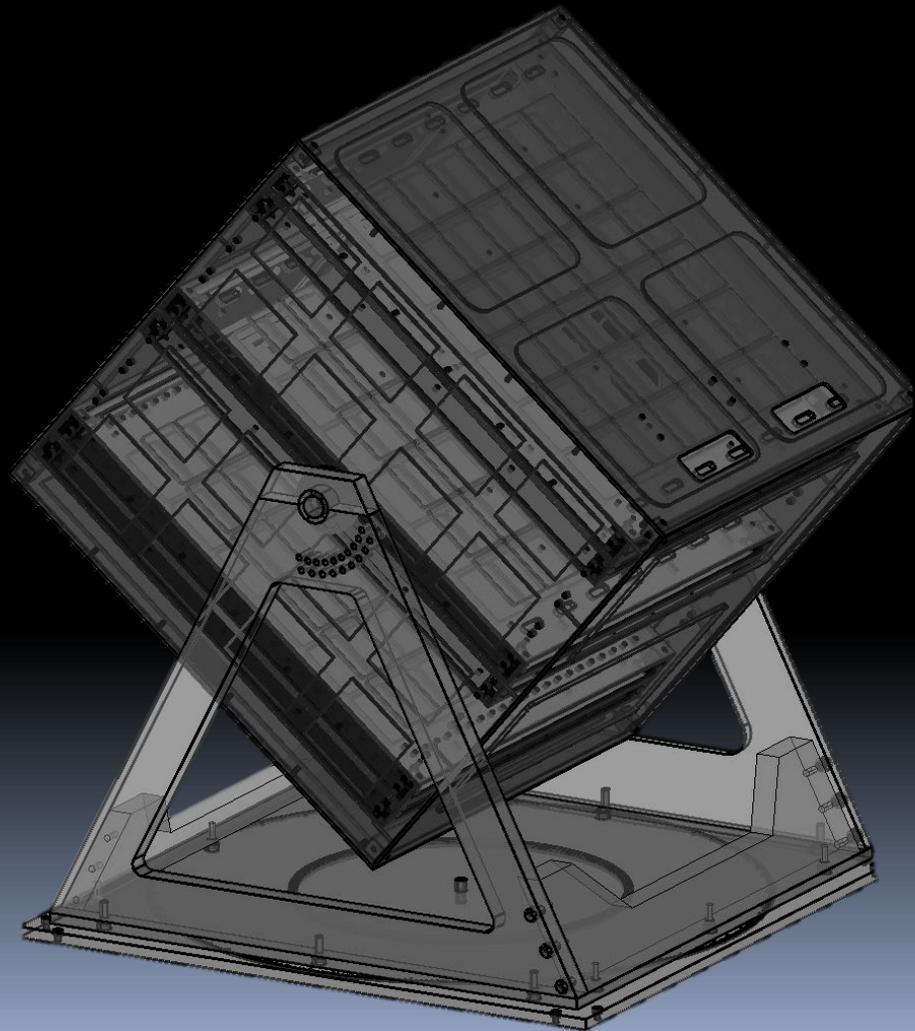
Muografia



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

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





Rivelatori per misure di radiografia muonica

La tecnica della radiografia muonica:

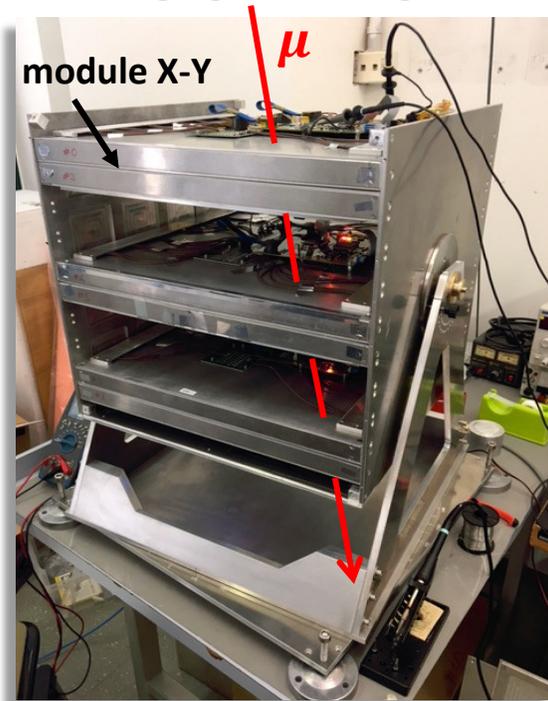
Rivelatori: tracciatori di particelle

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.

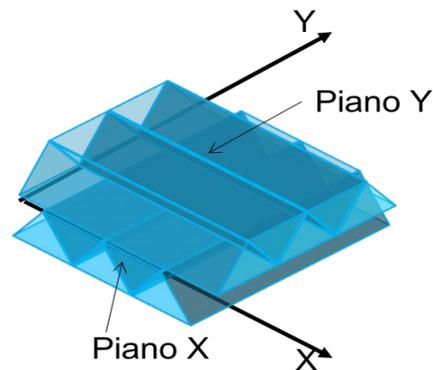
MIMA

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

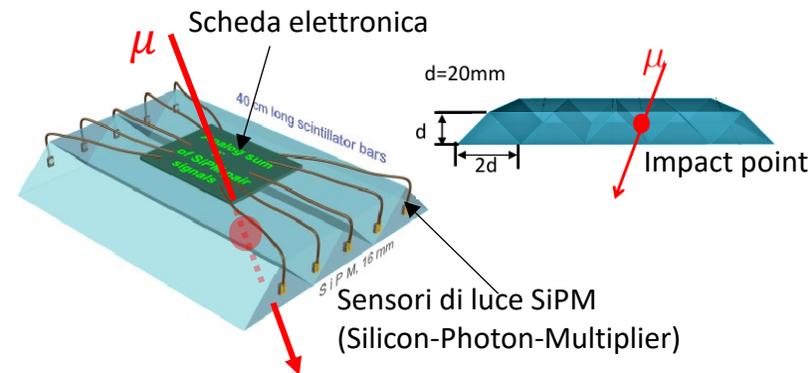


Ogni modulo tracciante XY è costituito da un piano X e un piano Y e permette di ottenere il punto XY d'impatto della particella.

Modulo XY

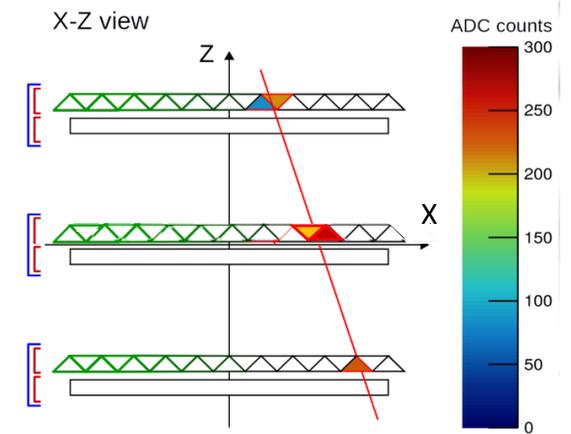


Singolo piano tracciante



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

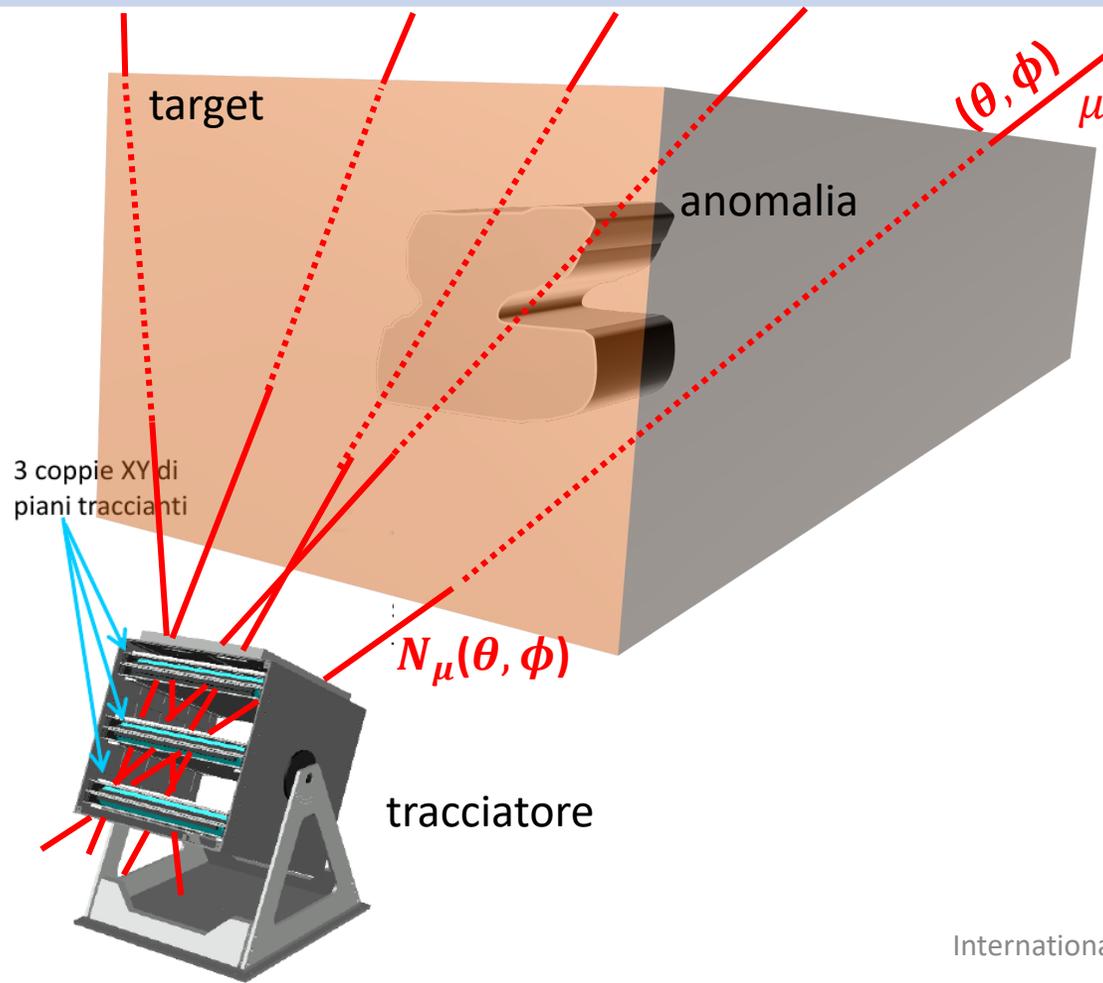
Metodologia della tecnica della radiografia muonica



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.

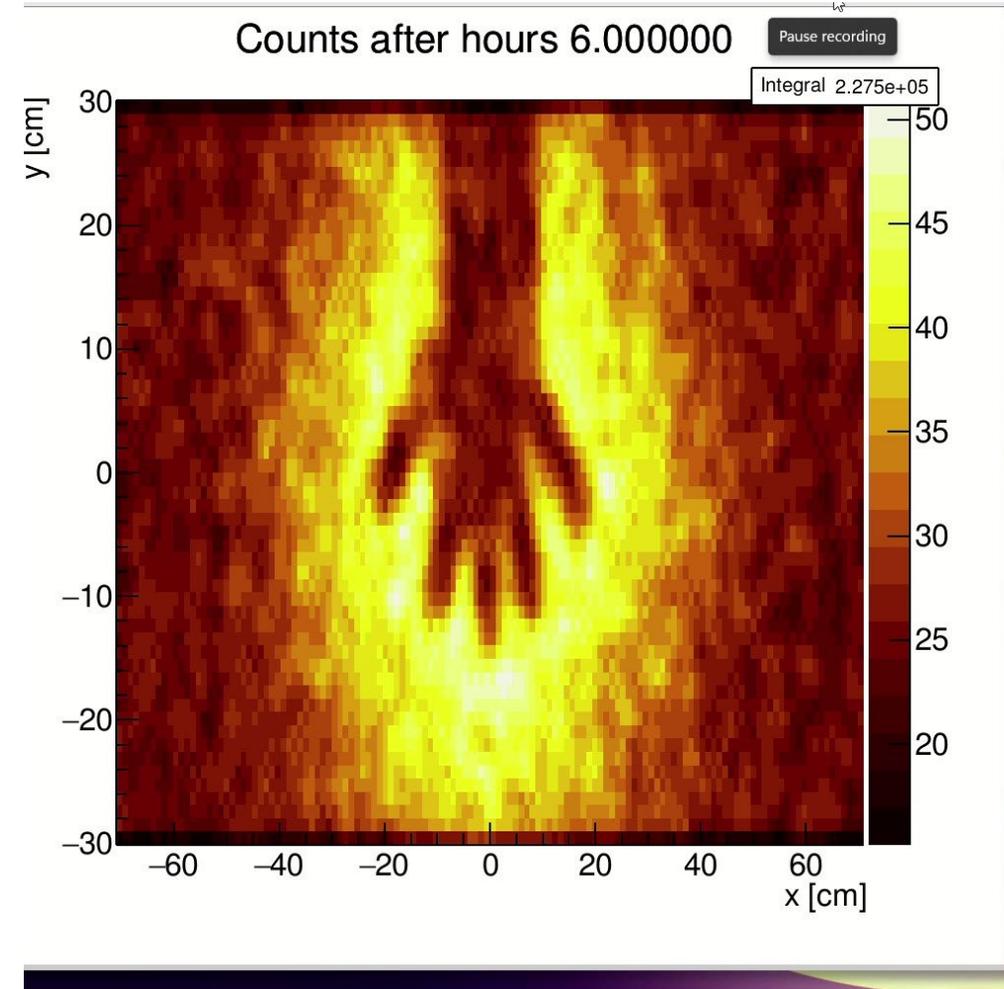


La tecnica della radiografia muonica: Esempio di misura di conteggi di muoni

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

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

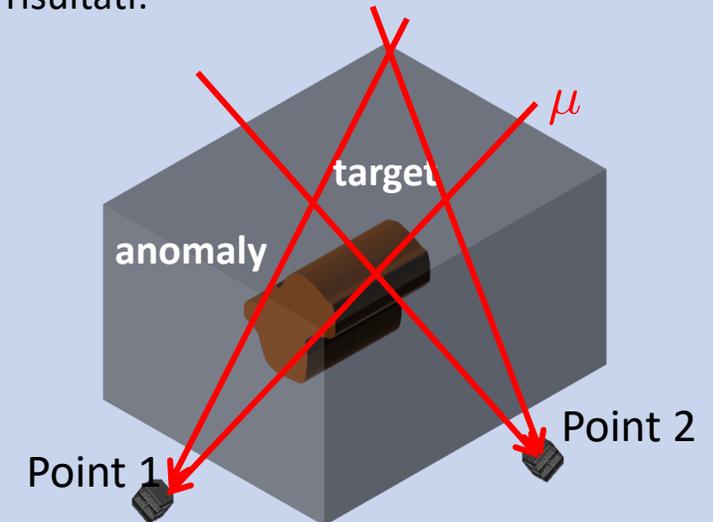
Trasmissione di μ simulata

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

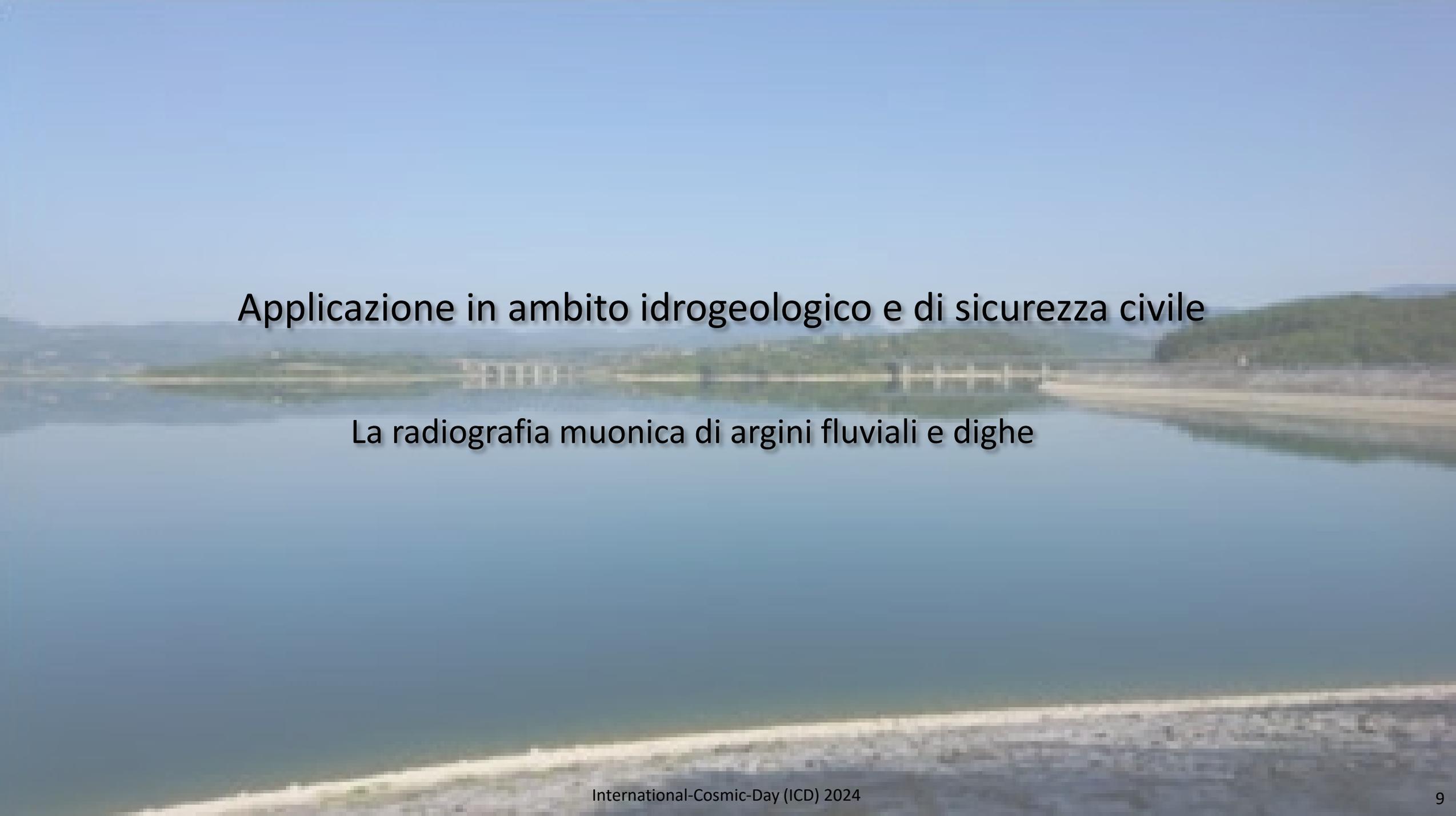
Variando $\bar{\rho}(\theta, \phi) : T_{misu}(\theta, \phi) = T_{simu}(\theta, \phi, \bar{\rho}) \rightarrow$ **Mappa 2D di densità $\rho_{target}(\theta, \phi)$**

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



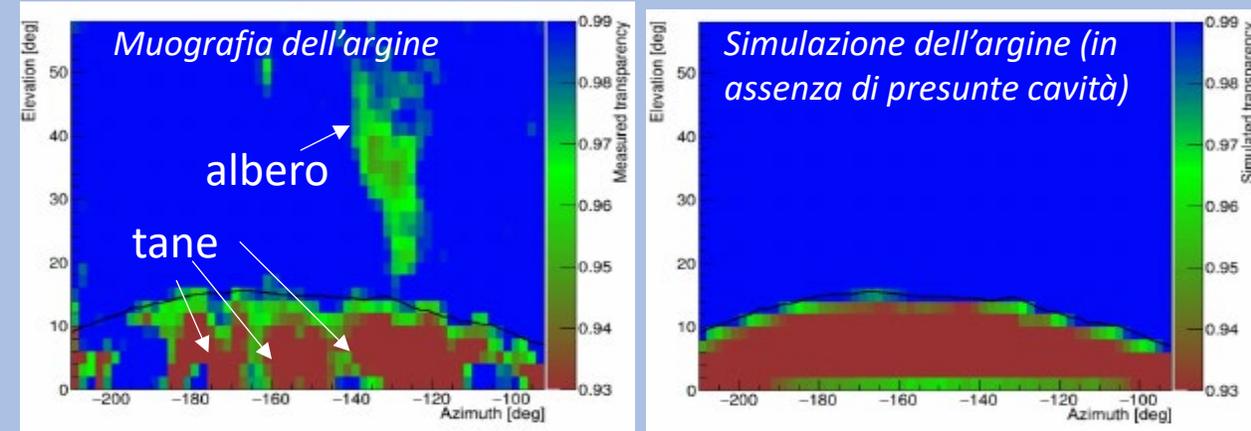
Argine: tana scavata dalla fauna locale



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.

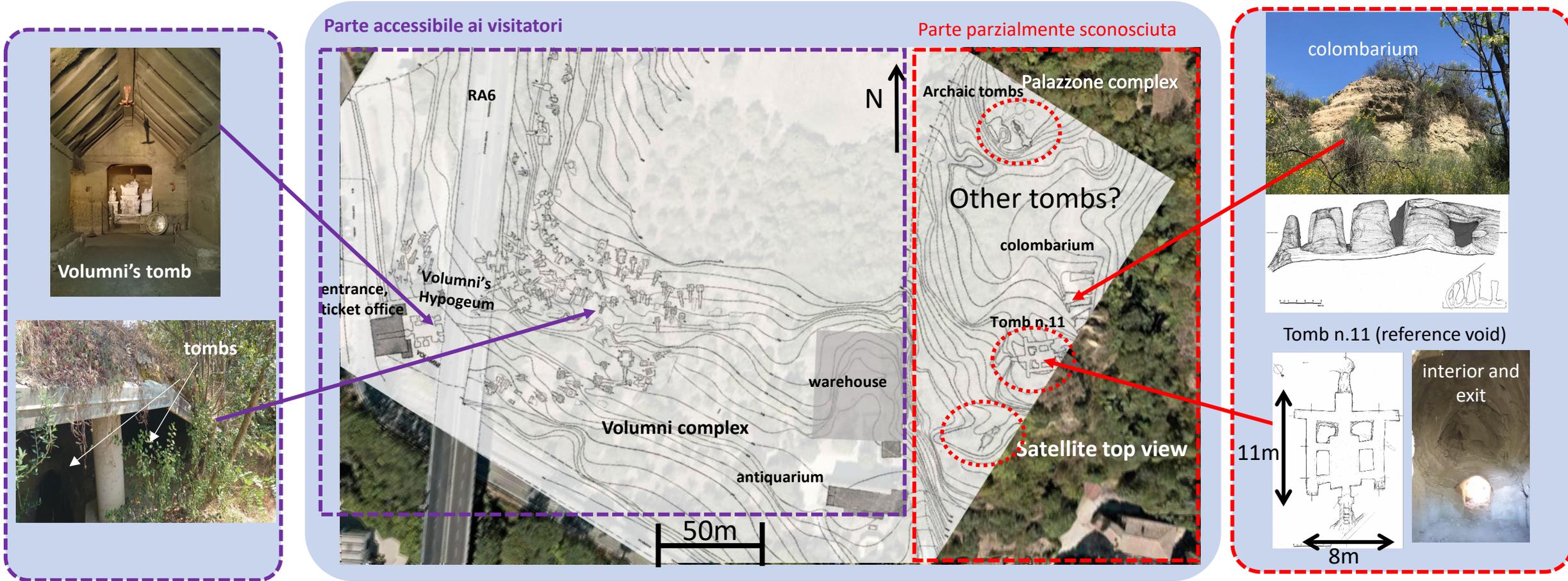


A photograph of a cave interior. The walls are made of rough, textured rock. In the foreground, there is a bright, circular opening, possibly a tunnel entrance or a large hole, which is illuminated from within, creating a strong contrast with the dimly lit cave. The text is overlaid on the upper part of the image.

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



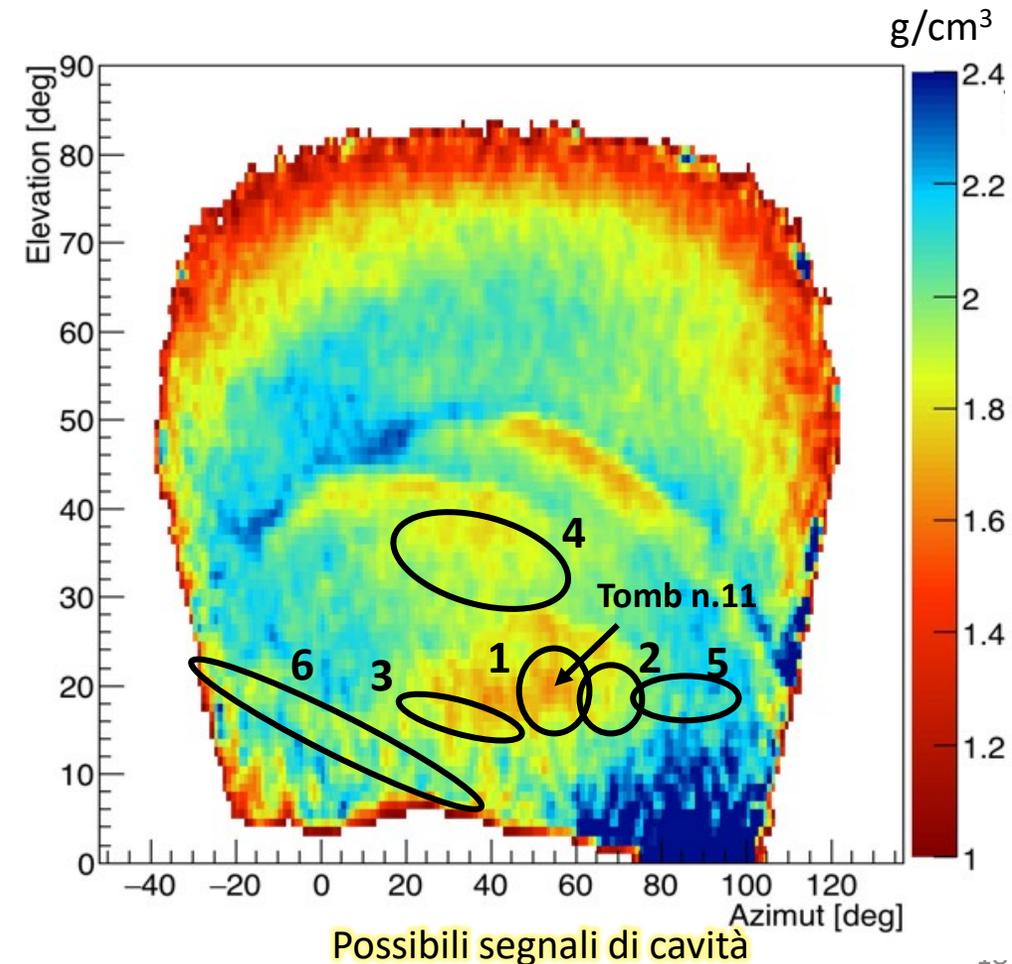
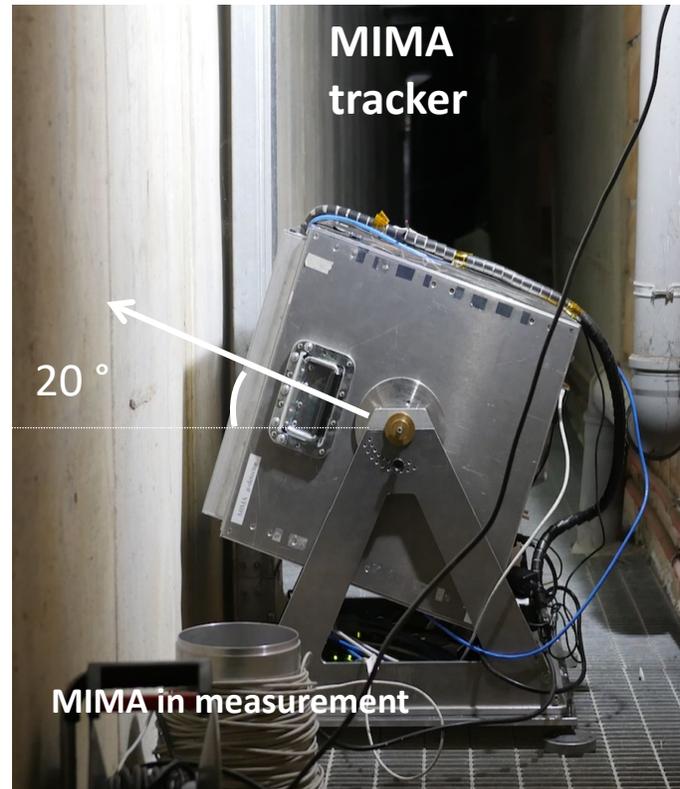
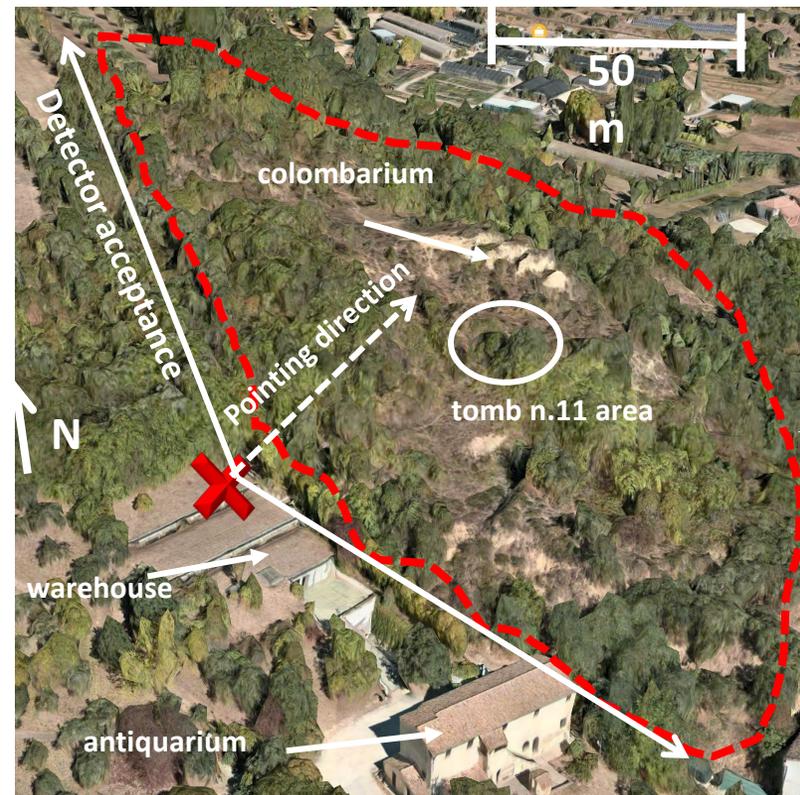
Area d'interesse per misure muografiche

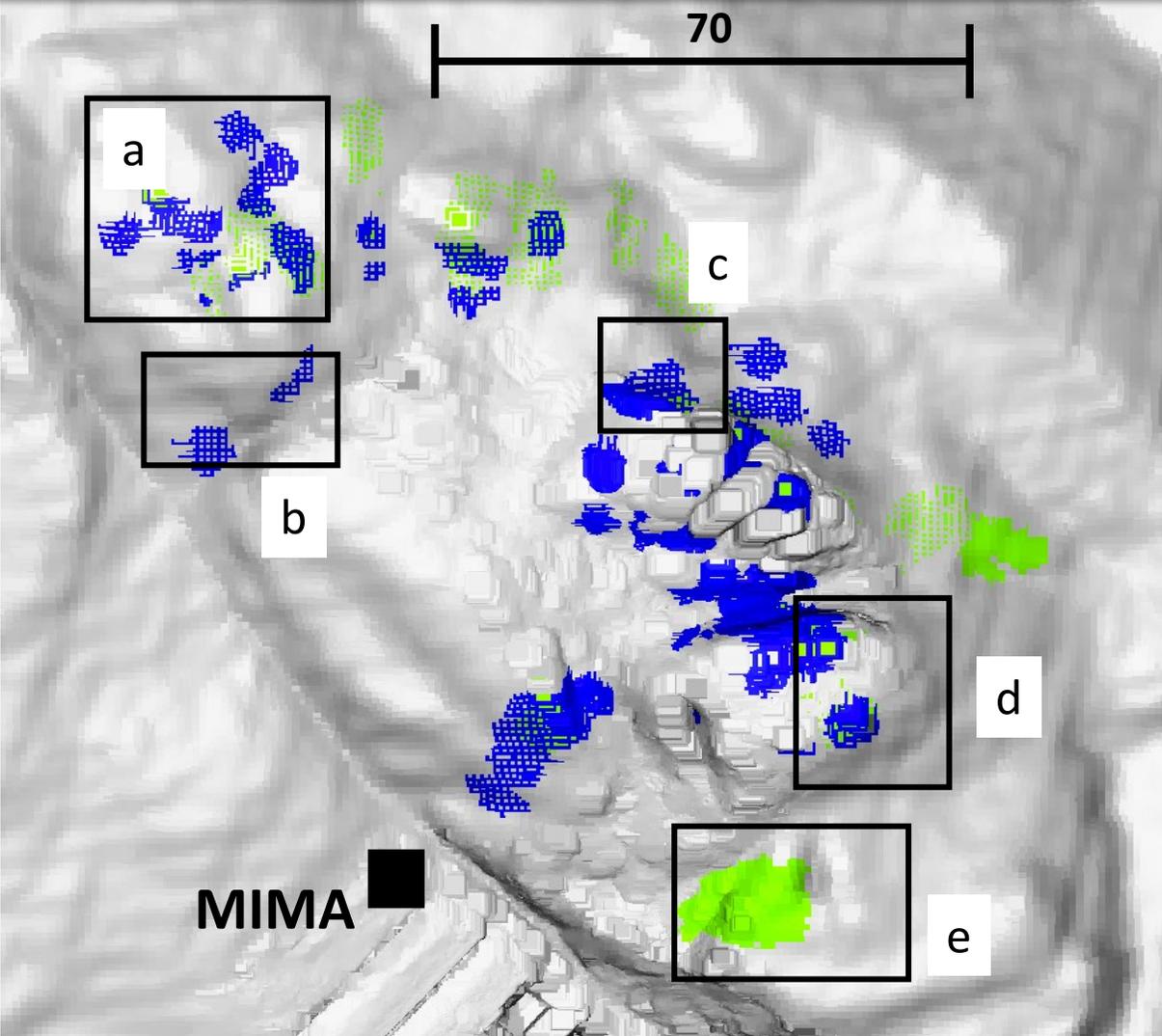
La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito archeologico

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

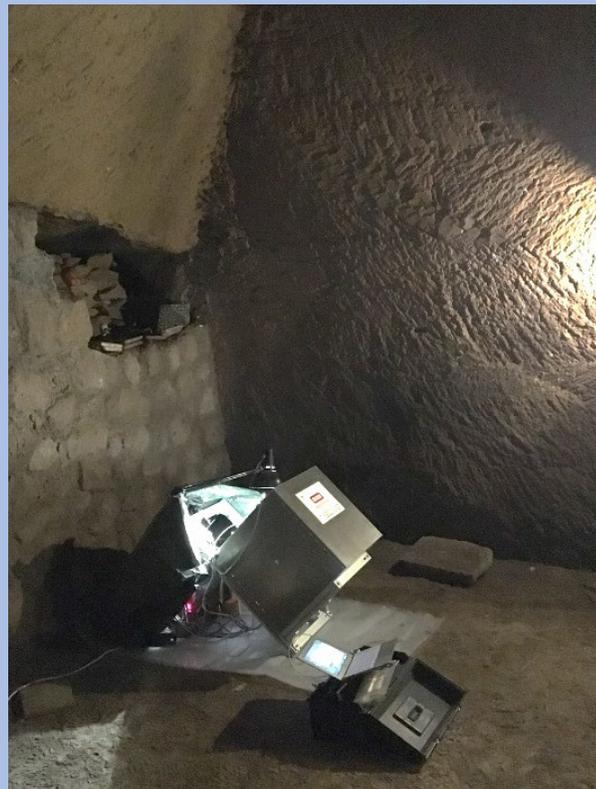
Galleria Borbonica (NA)



Galleria Borbonica: ingresso

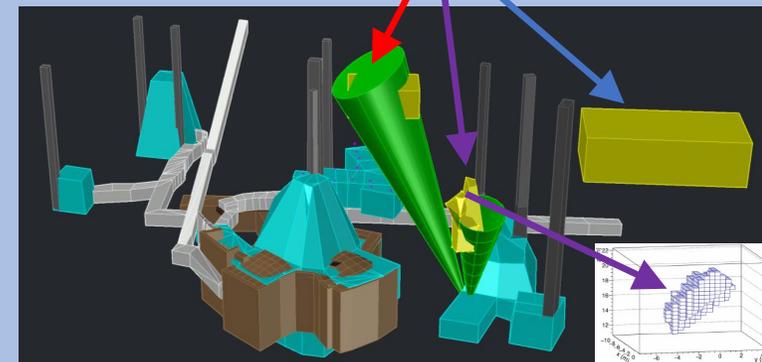
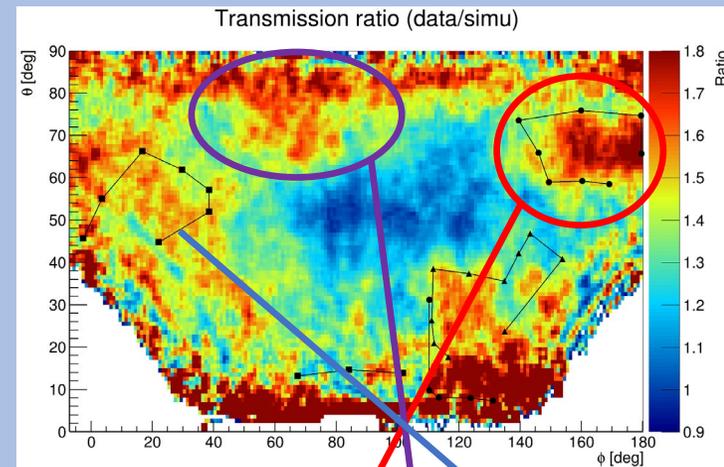


Galleria Borbonica:
esterno

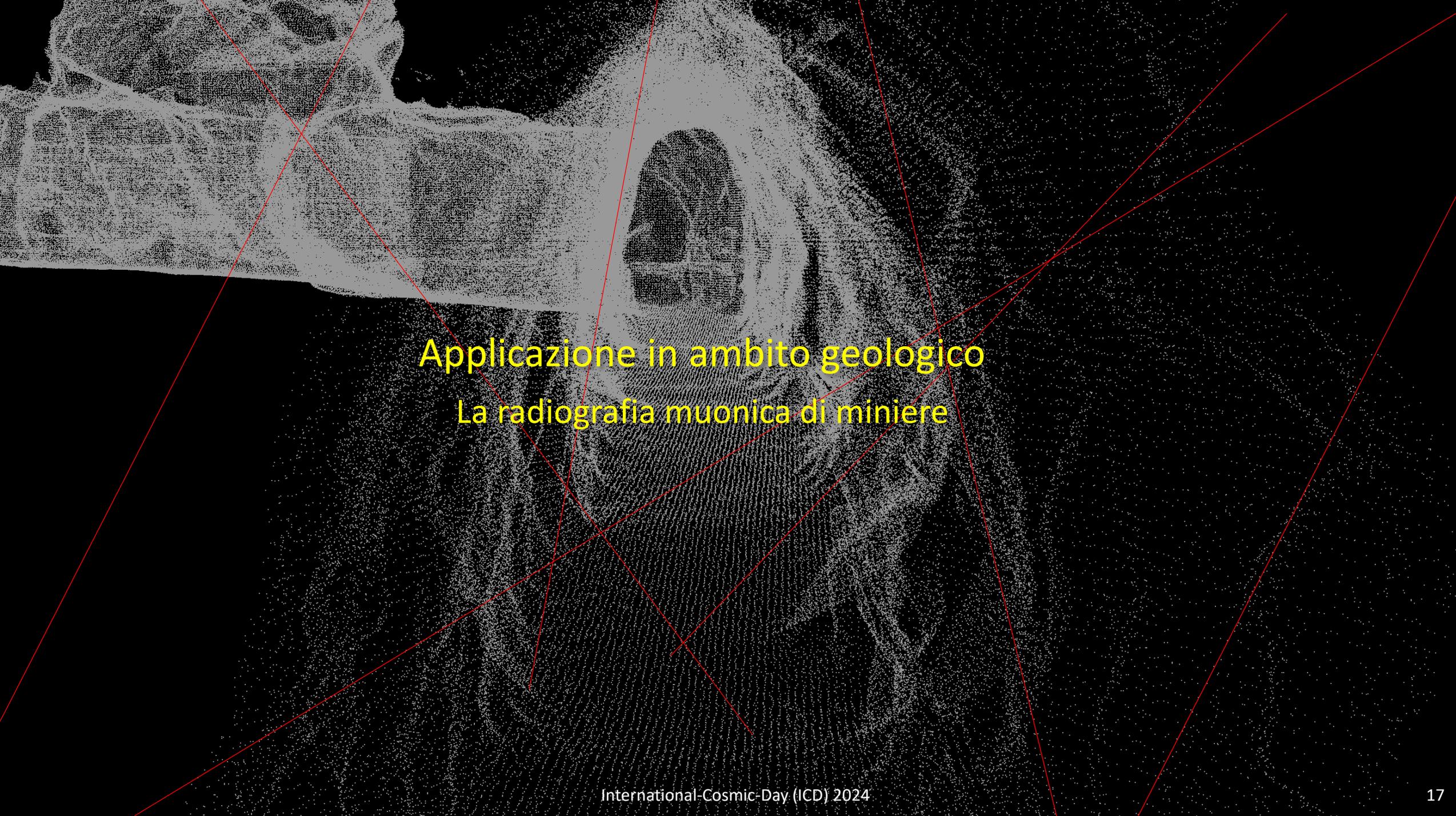


Galleria Borbonica: misura

Muografia e profilo 3D di possibili cavità non mappate

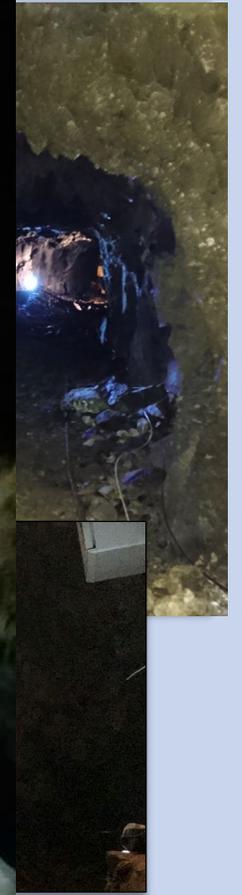


Sono state individuate due nuove regioni da esplorare!!

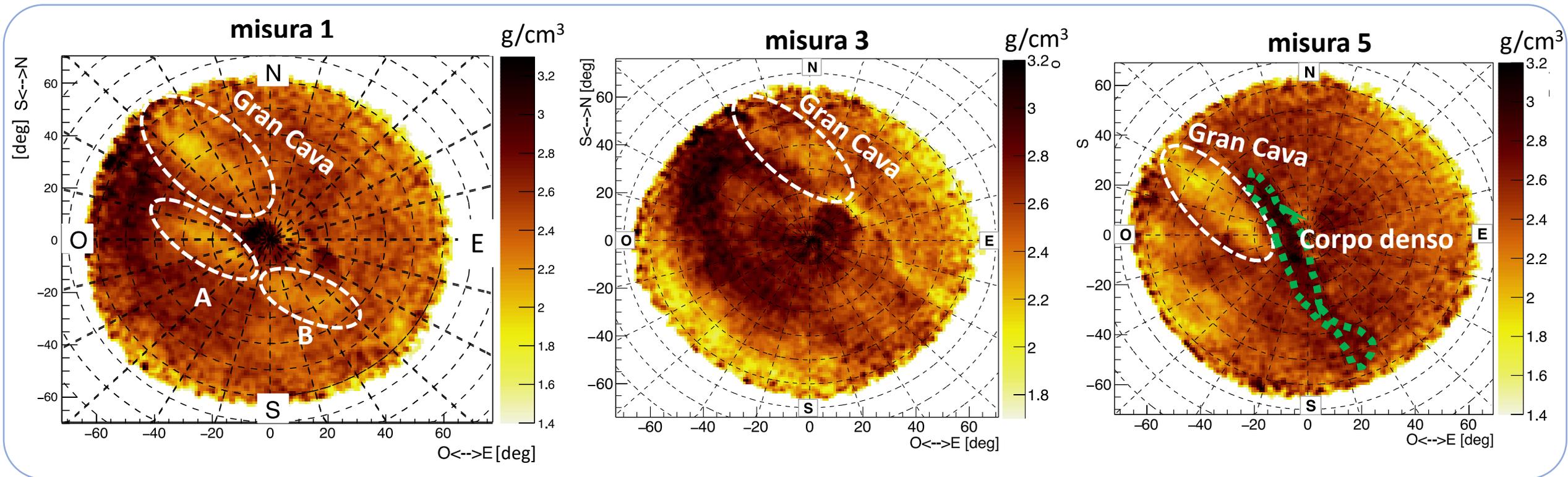


Applicazione in ambito geologico

La radiografia muonica di miniere



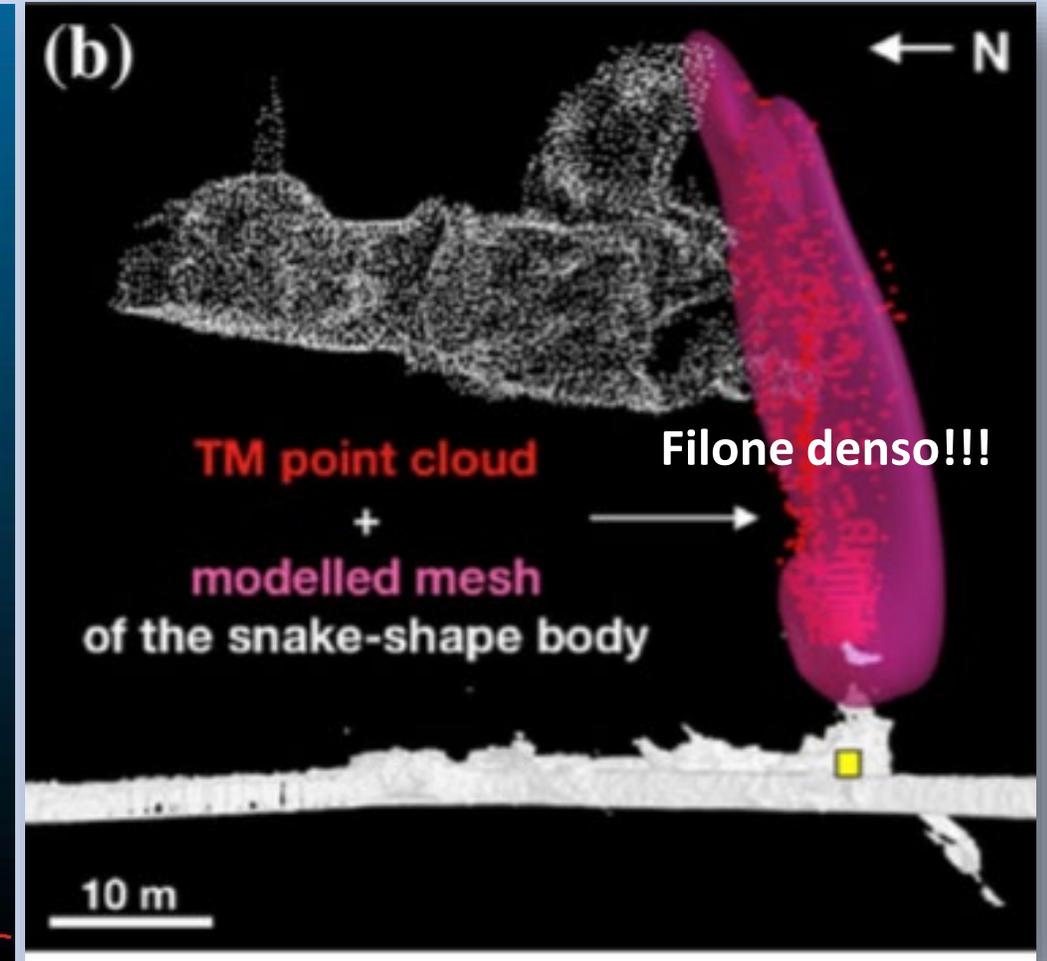
Mappe angolari 2D di densità:

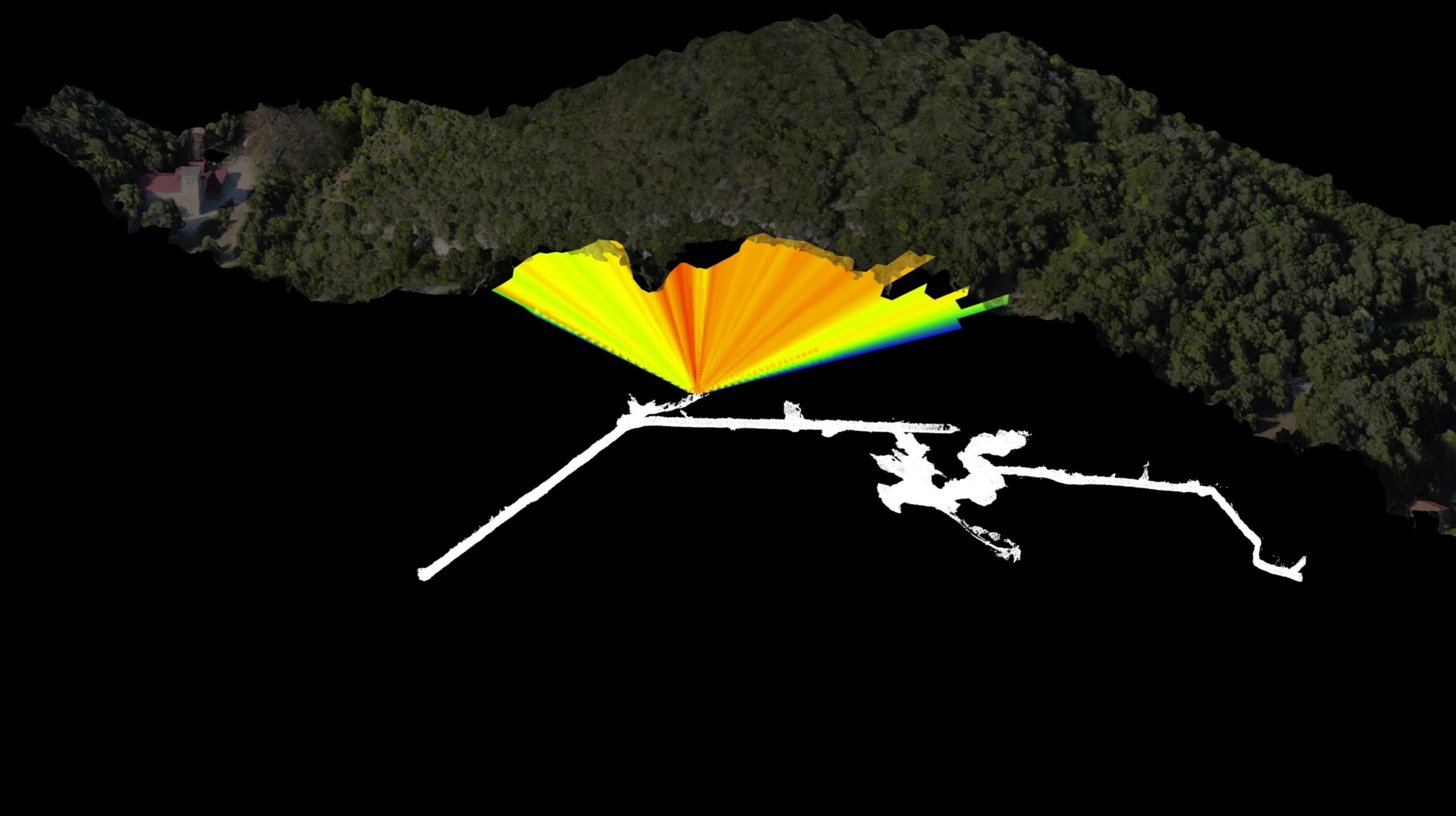


Oltre alla Gran Cava sono visibili altri segnali a bassa densità

La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito geologico minerario

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





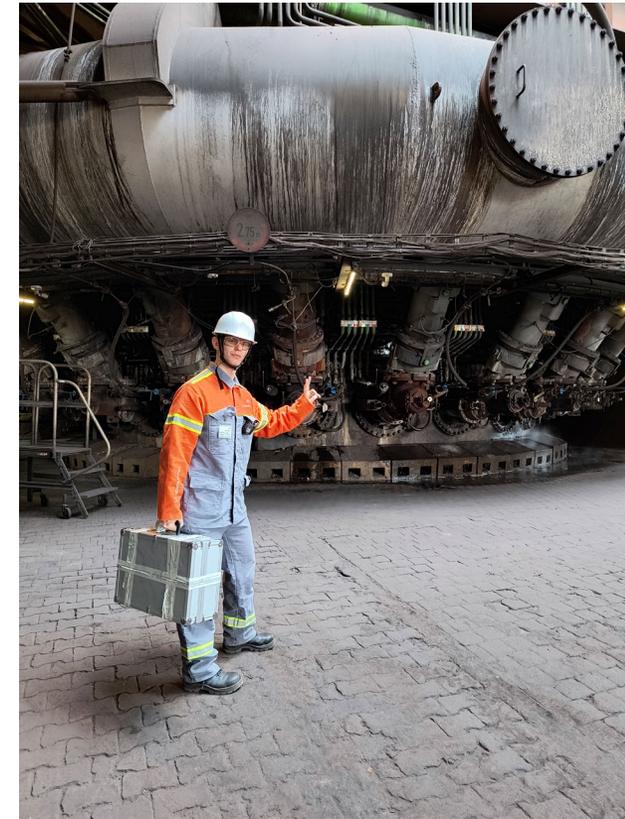
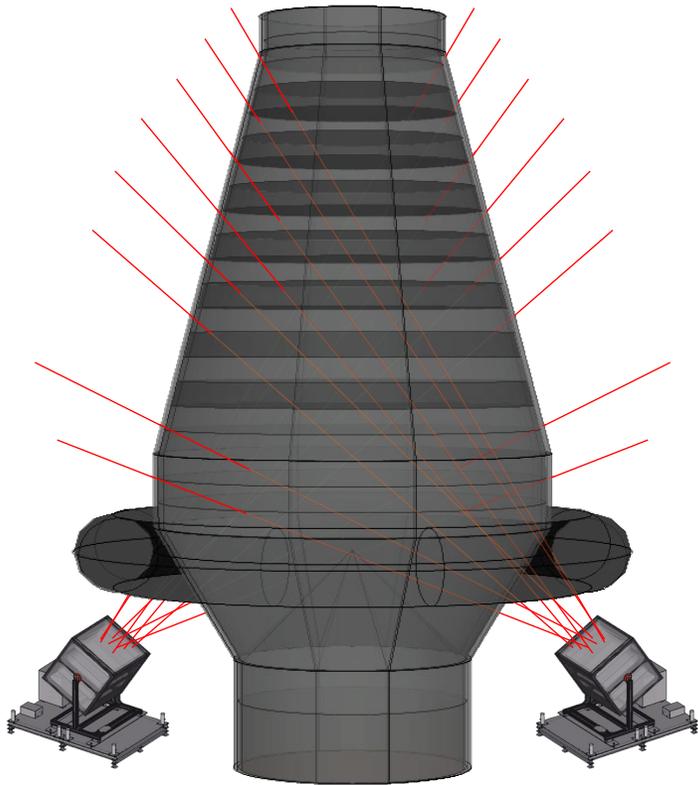


Applicazione in ambito culturale e di sicurezza civile

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!!!!

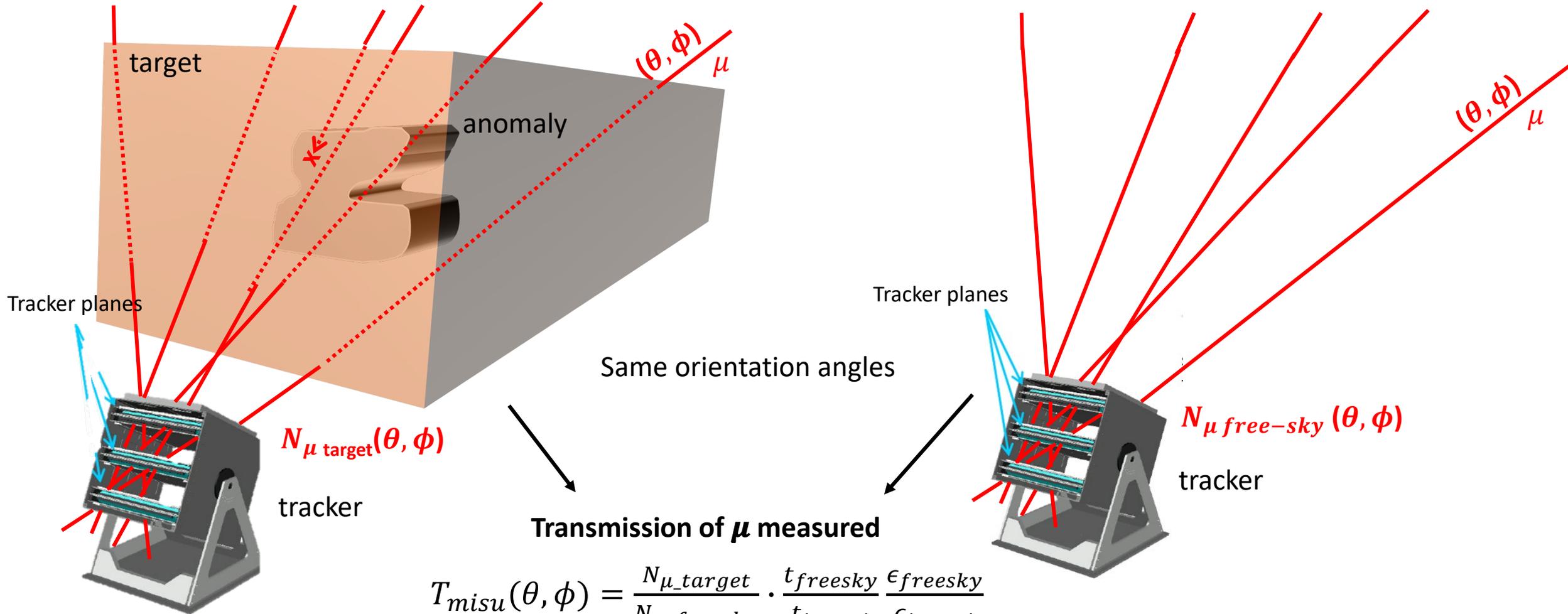
November 26 | 2024

Target measurement

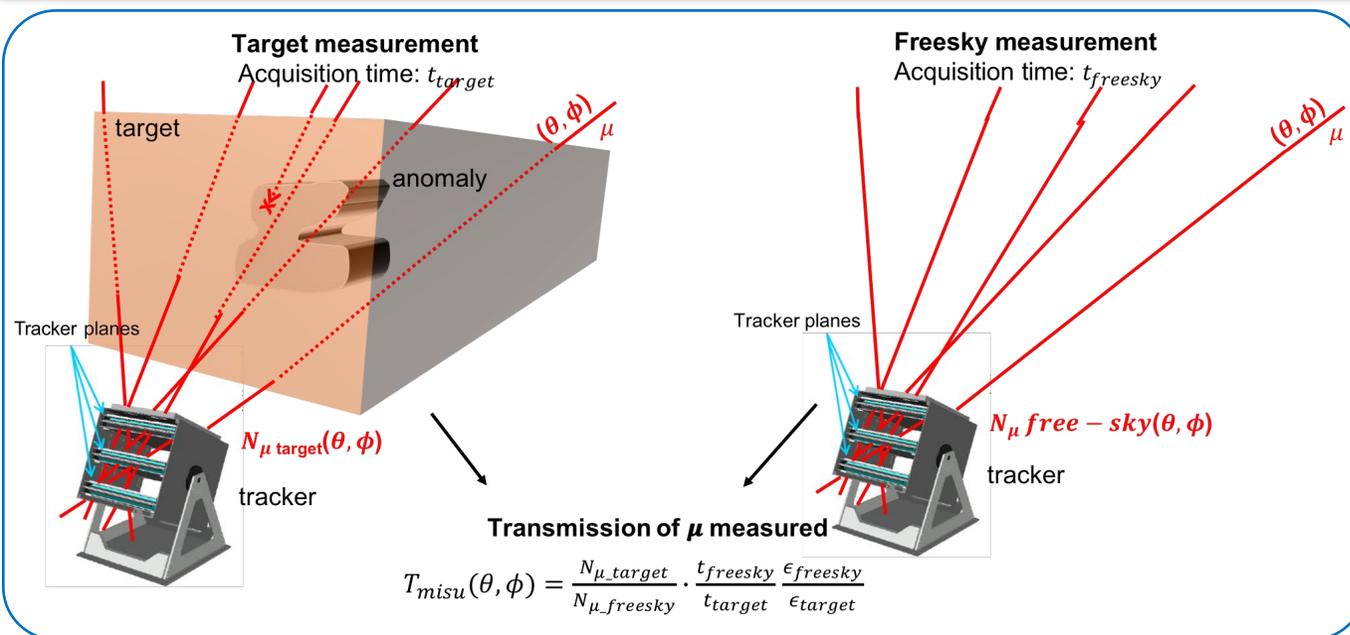
Acquisition time: t_{target}

Freesky measurement

Acquisition time: $t_{freesky}$



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



Simulation in the case of absence of anomalies

