



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

International-Cosmic-Day (ICD) 2022

21-22/11/2022



Applicazione della fisica dei raggi cosmici

La Radiografia Muonica come
strumento di *imaging*



Introduzione:

La tecnica della radiografia muonica

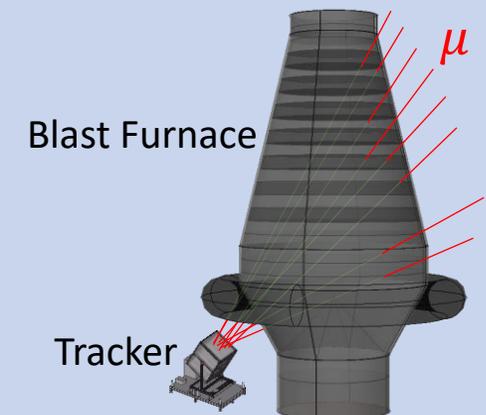
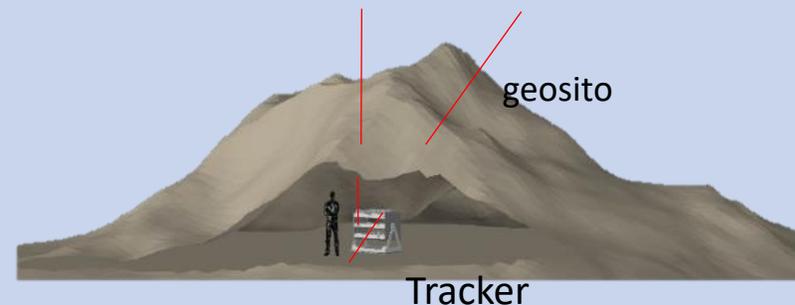
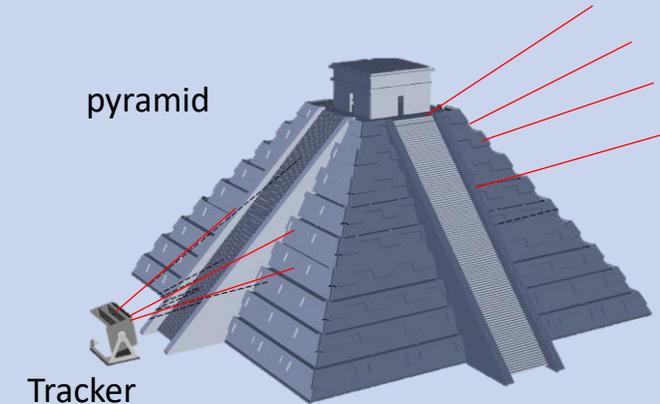
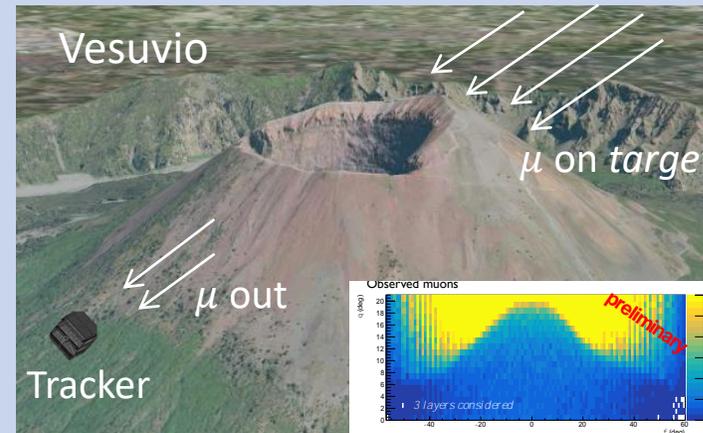
La **radiografia muonica (o muografia)** è una **tecnica di *imaging*** che permette di creare immagini bidimensionali o tridimensionali della densità interna dell'oggetto in esame (detto **target**) attraverso **misure di assorbimento di muoni cosmici**. I rivelatori utilizzati sono **tracciatori**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

- ✓ Il principio di funzionamento è lo stesso della radiografia a raggi X, studia l'assorbimento delle particelle all'interno del target



- ✓ Prima applicazione nel 1969 alla piramide di Chepren a Giza per la ricerca di camere nascoste
- ✓ È una tecnica non invasiva
- ✓ Molti ambiti di applicazione: geologico, minerario, archeologico, sicurezza civile
- ✓ Tempi di acquisizione: qualche mese

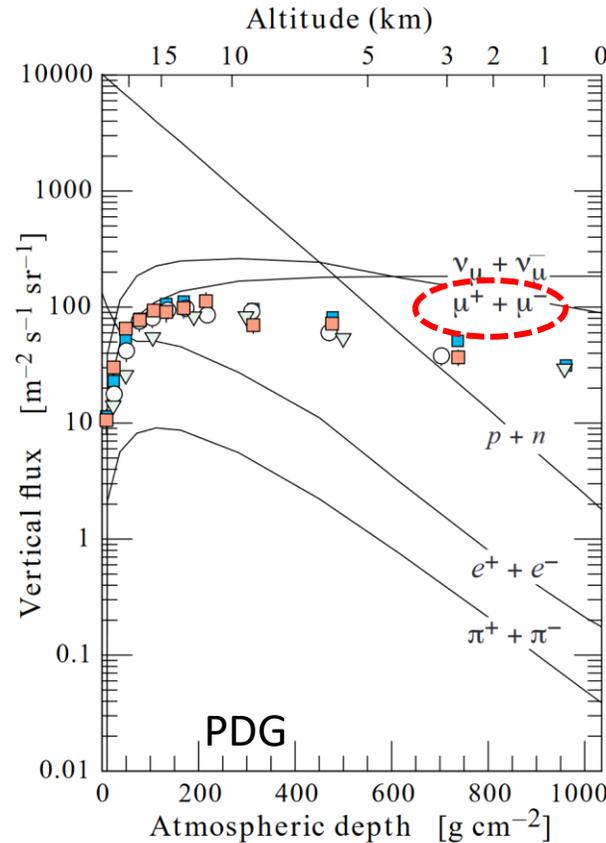
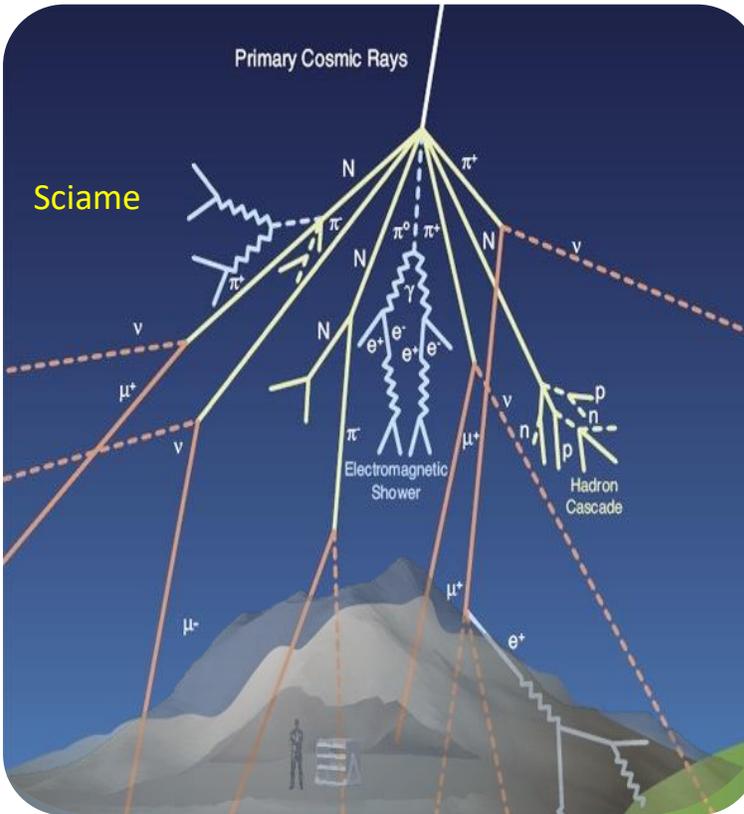
- ✓ Applicazione a grandi strutture



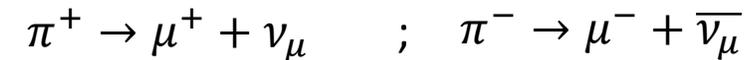
La tecnica della radiografia muonica

Perché usare i muoni?

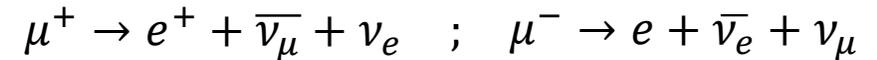
I muoni μ sono i raggi cosmici secondari carichi più abbondanti al livello del suolo.



I muoni vengono prodotti in atmosfera principalmente dal decadimento dei pioni carichi:



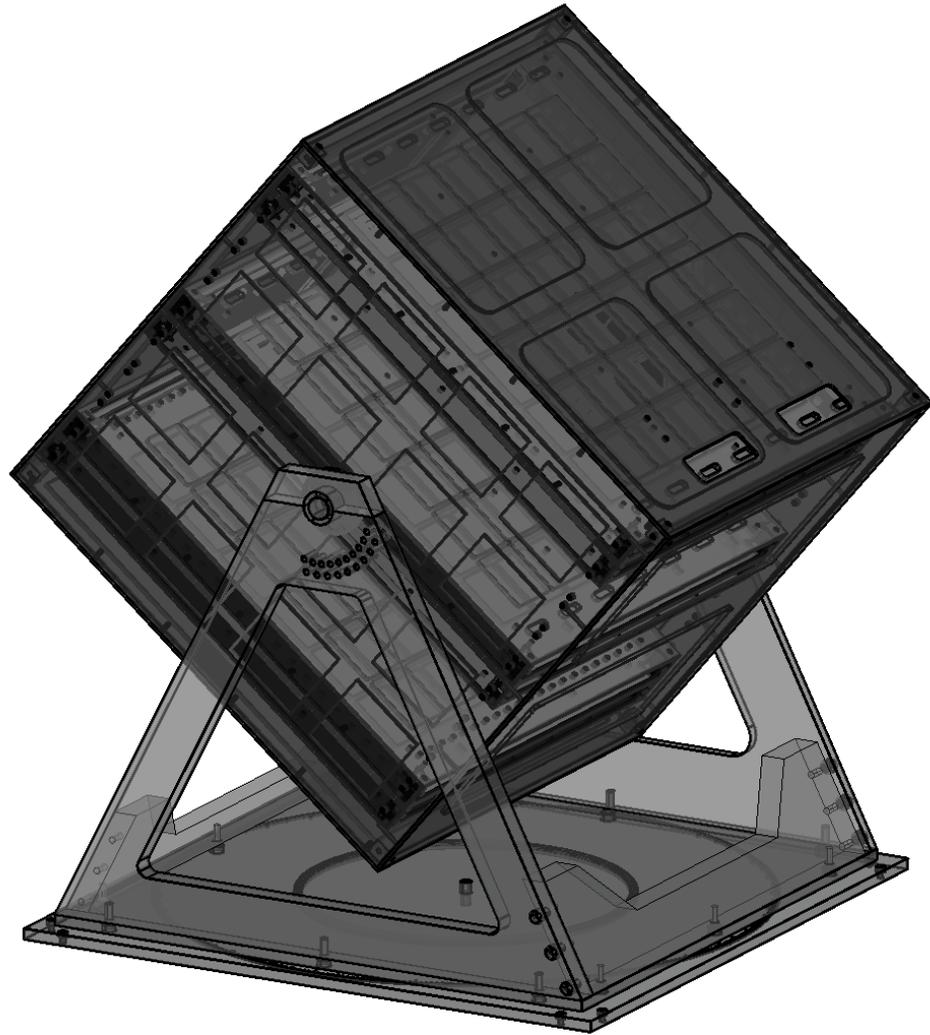
I muoni hanno una vita media τ di $\sim 2.2\mu\text{s}$ ed una massa $m_\mu = 106\text{MeV}/c^2$ e la loro vita decade in elettroni e positroni:



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

In direzione verticale al livello del mare il flusso di μ è di circa $100/\text{s m}^2$ e decresce come $\cos^2(\theta)$ in funzione dell'angolo zenitale θ

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



Rivelatori per misure di radiografia muonica

La tecnica della radiografia muonica:

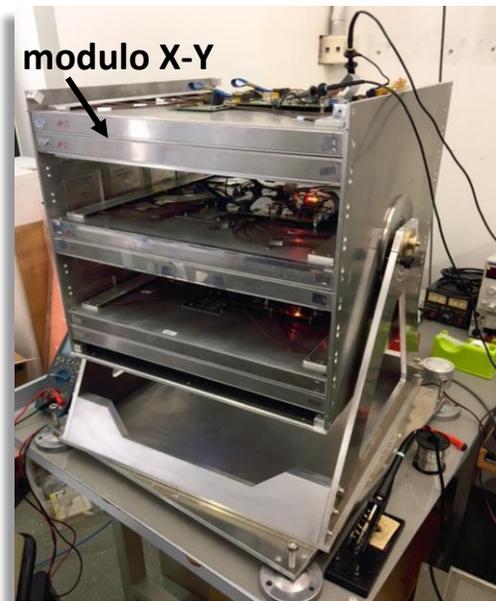
Rivelatori: tracciatori di particelle

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

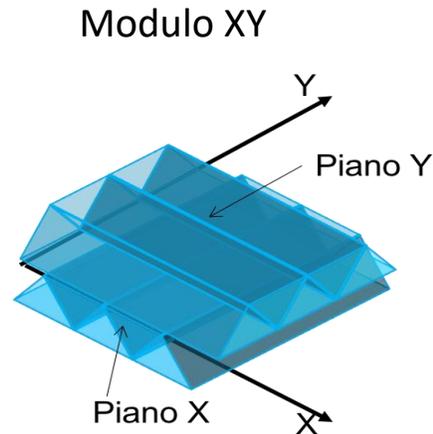
I tracciatori sono dei rivelatori costituiti da materiali sensibili al passaggio di particelle cariche e permettono di ricostruire la traiettoria della particella che ha attraversato il rivelatore e ottenere così la direzione di provenienza.

Esempio di tracciatore:

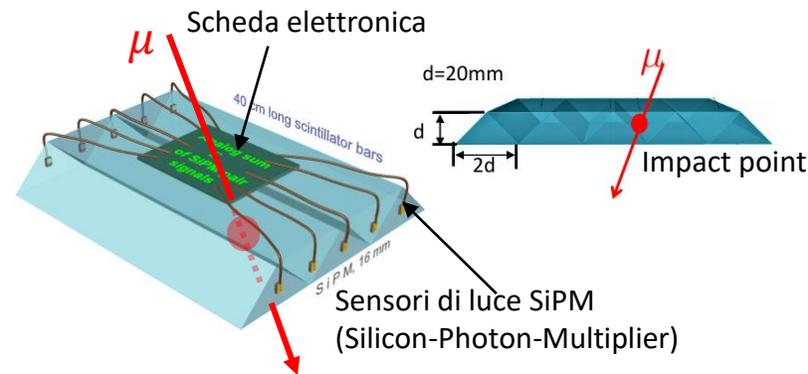
MIMA (Muon Imaging for Mining and Archaeology)



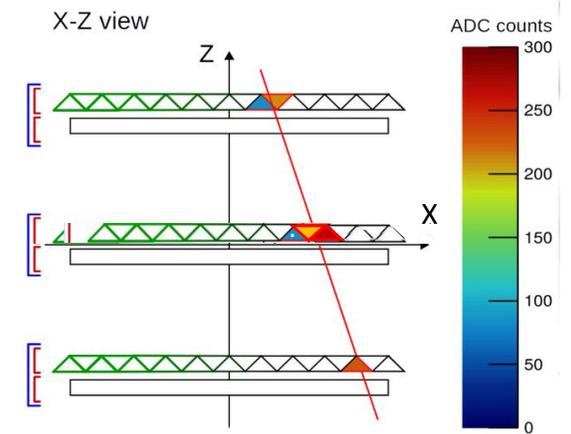
Ogni modulo tracciante XY è costituito da un piano X e un piano Y e permette di ottenere il punto XY d'impatto della particella.



Singolo piano tracciante



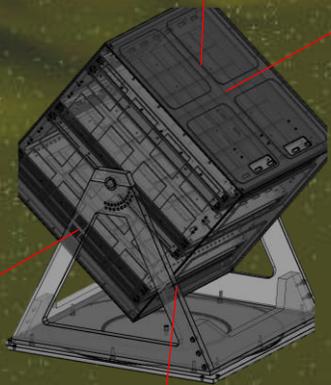
Esempio di ricostruzione della traccia di una particella



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

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

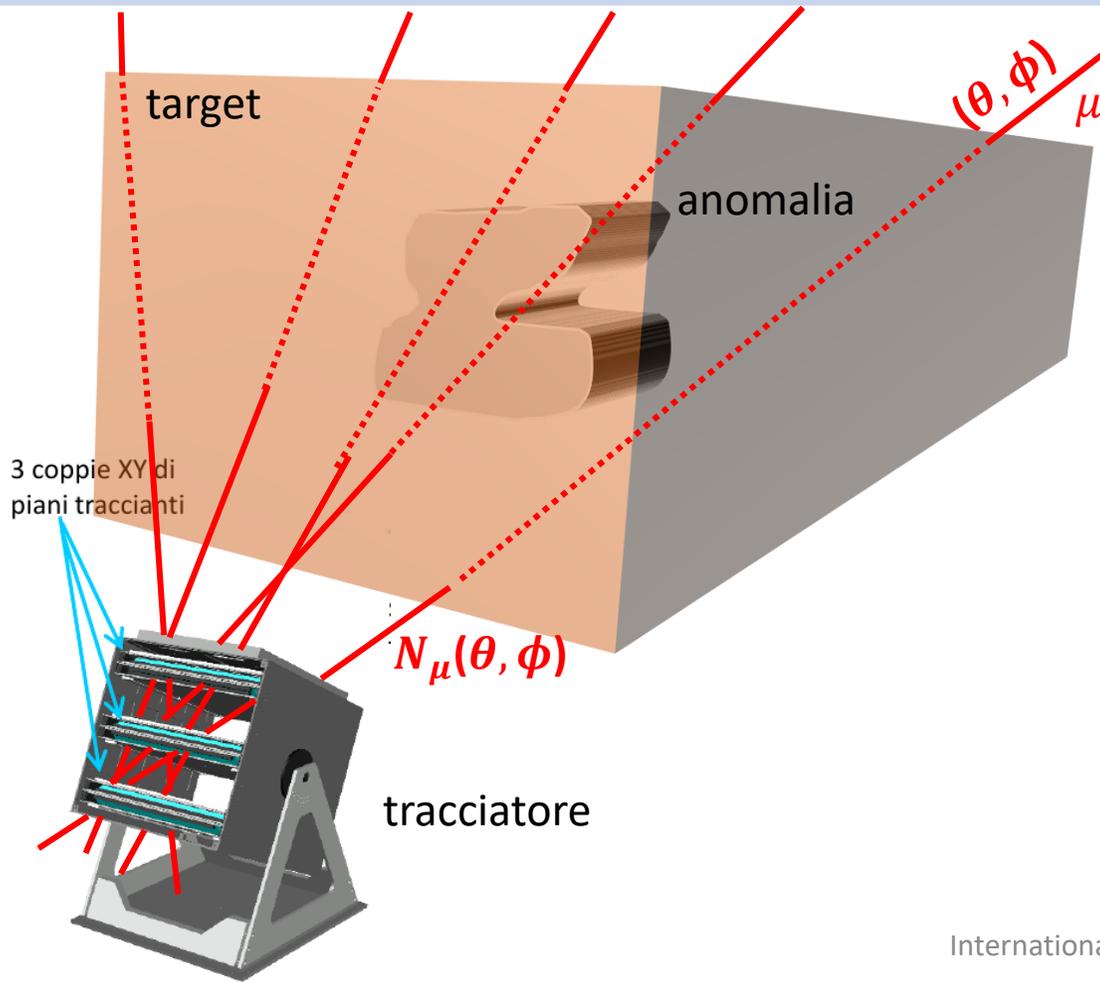
Metodologia della tecnica della radiografia muonica



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.



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

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

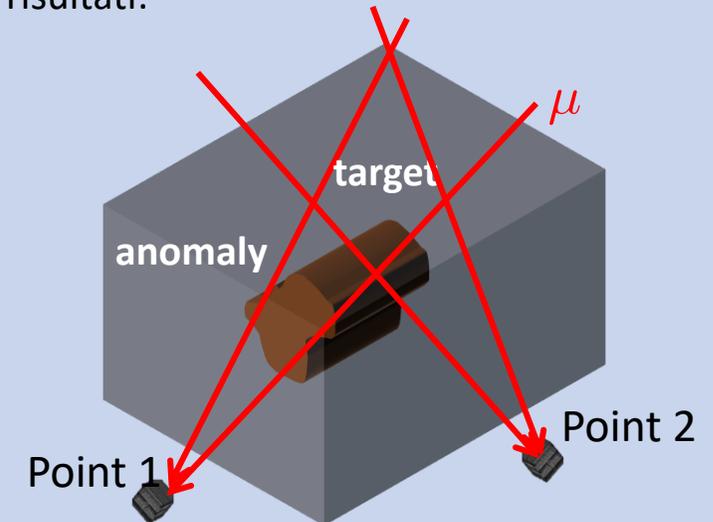
Trasmissione di μ simulata

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

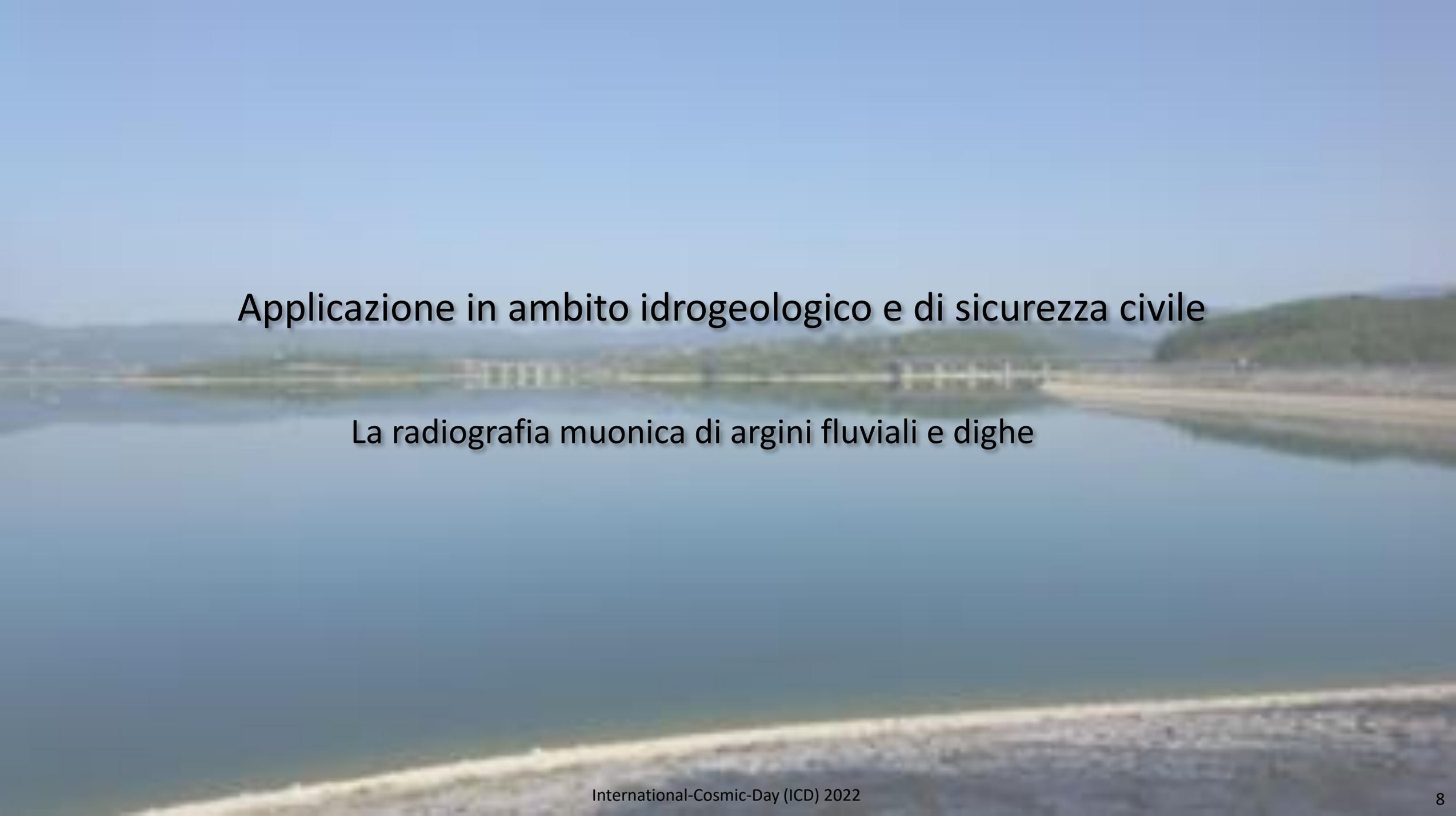
Variando $\bar{\rho}(\theta, \phi) : T_{misu}(\theta, \phi) = T_{simu}(\theta, \phi, \bar{\rho}) \rightarrow$ **Mappa 2D di densità $\rho_{target}(\theta, \phi)$**

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 pebbly bank of the river.

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

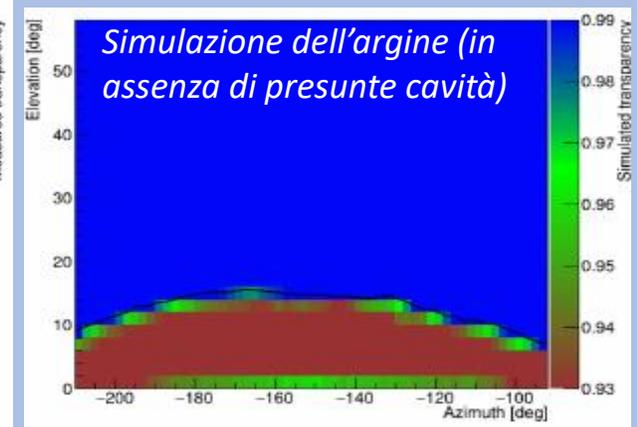
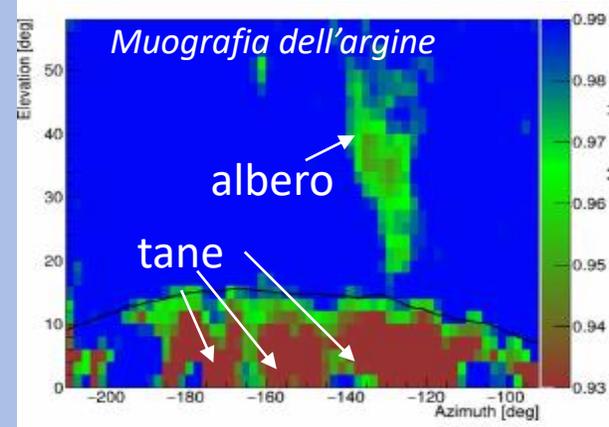


MIMA

Argine: tana scavata dalla fauna locale



Argine: misura



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

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 central part of the image.

Applicazione in ambito archeologico
La radiografia muonica di siti archeologici

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

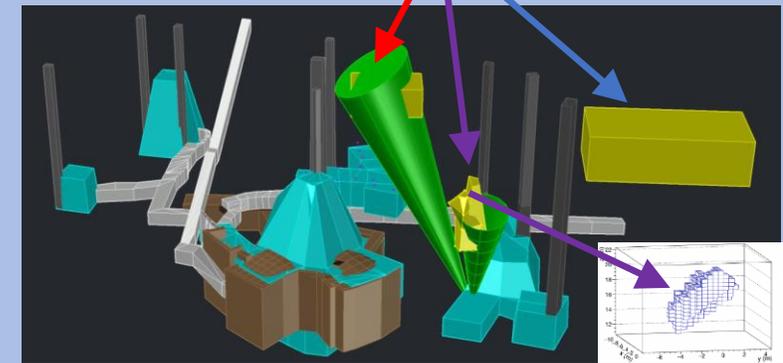
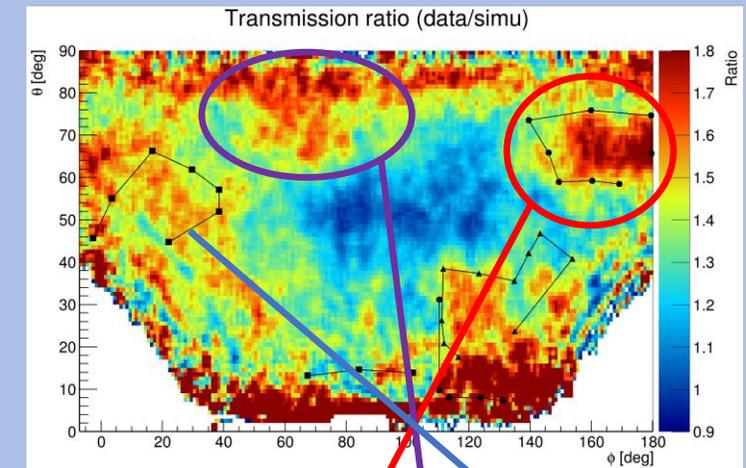


Galleria Borbonica:
esterno



Galleria Borbonica: misura

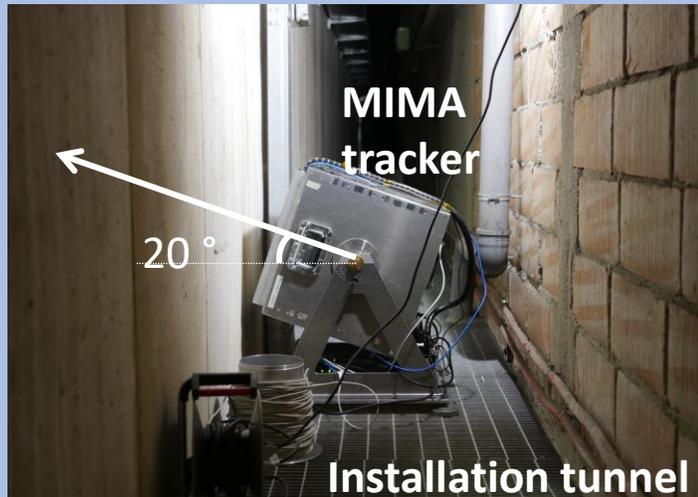
Muografia e profilo 3D di possibili cavità non mappate



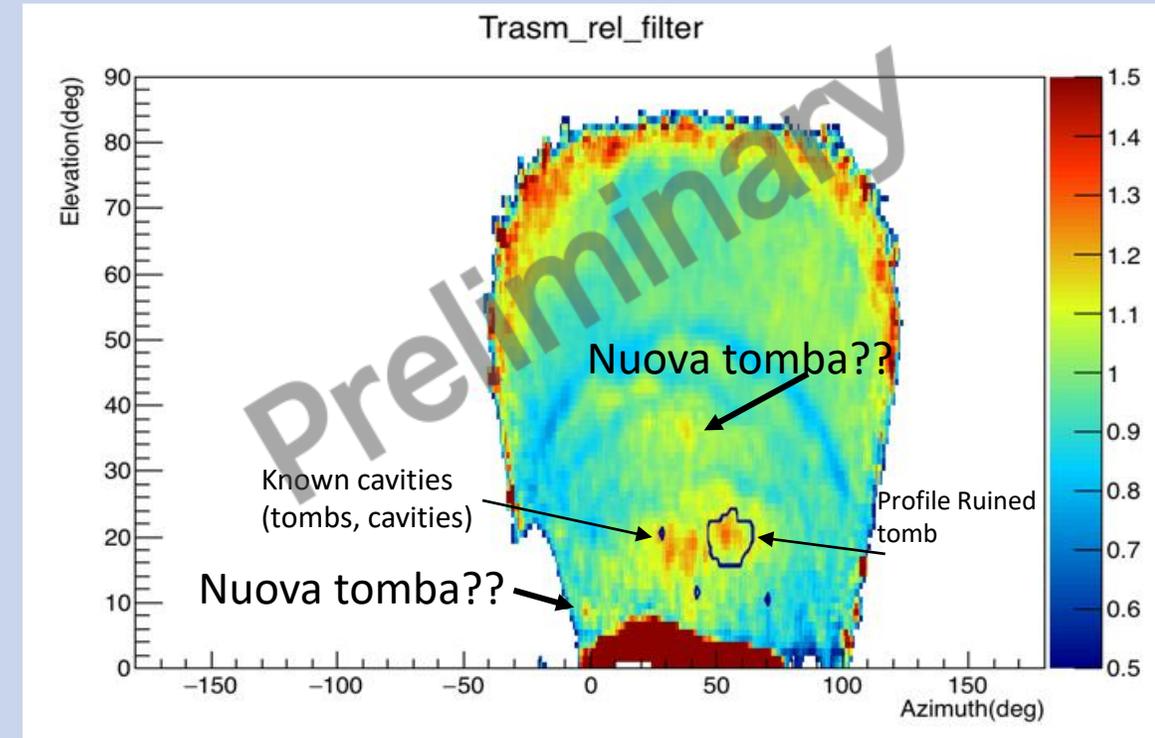
Sono state individuate due nuove regioni da esplorare!!

La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito archeologico

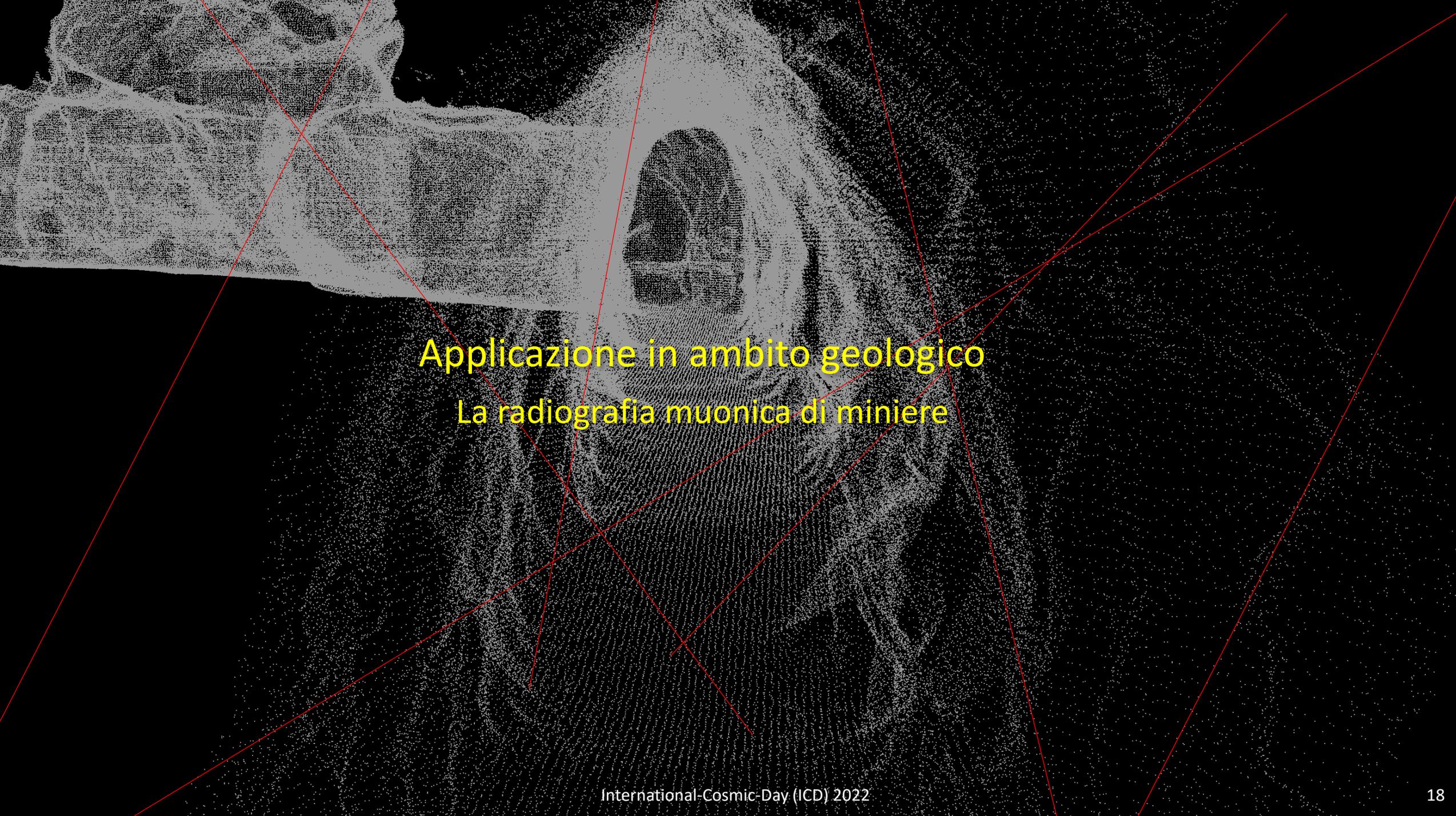
Ricerca e ricostruzione di cavita non mappate alla Necropoli del Palazzone - Perugia



Tomba in rovina alla Necropoli del Palazzone



In Studio

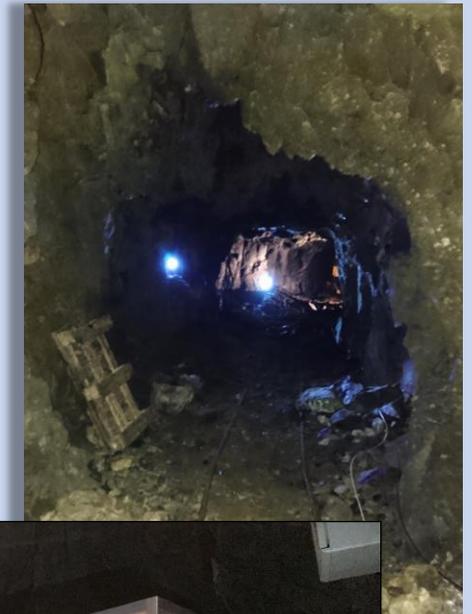
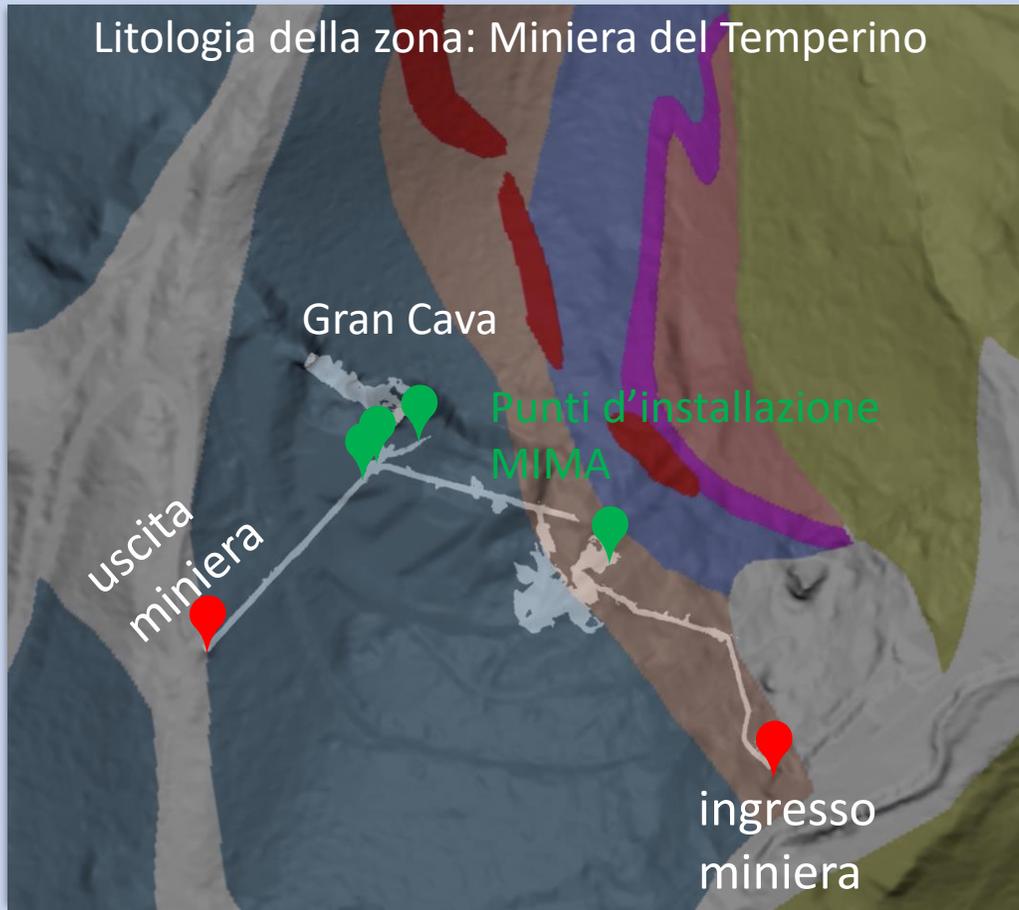


Applicazione in ambito geologico
La radiografia muonica di miniere

La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito geologico minerario



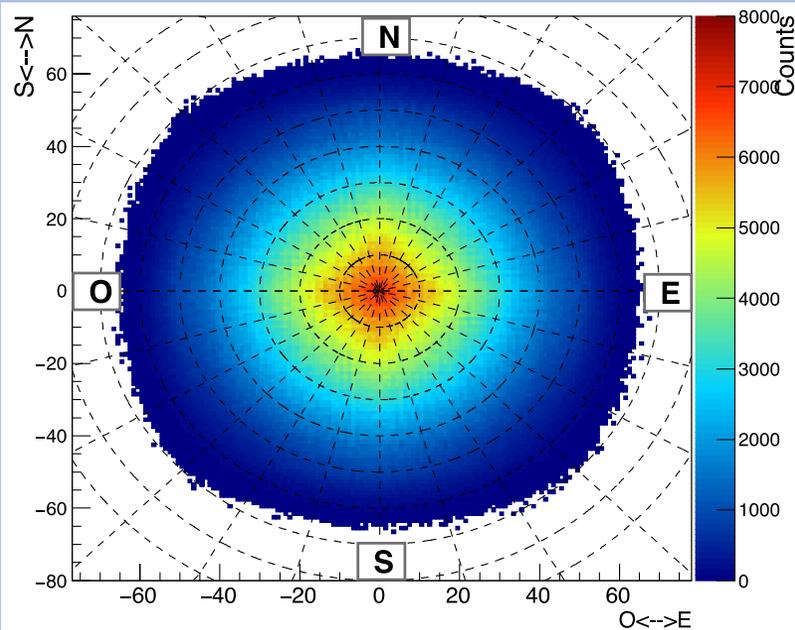
Ricerca di cavità alla miniera del Temperino a Campiglia Marittima (Toscana) d'interesse archeologico e geologico e finalizzate alla messa in sicurezza della miniera



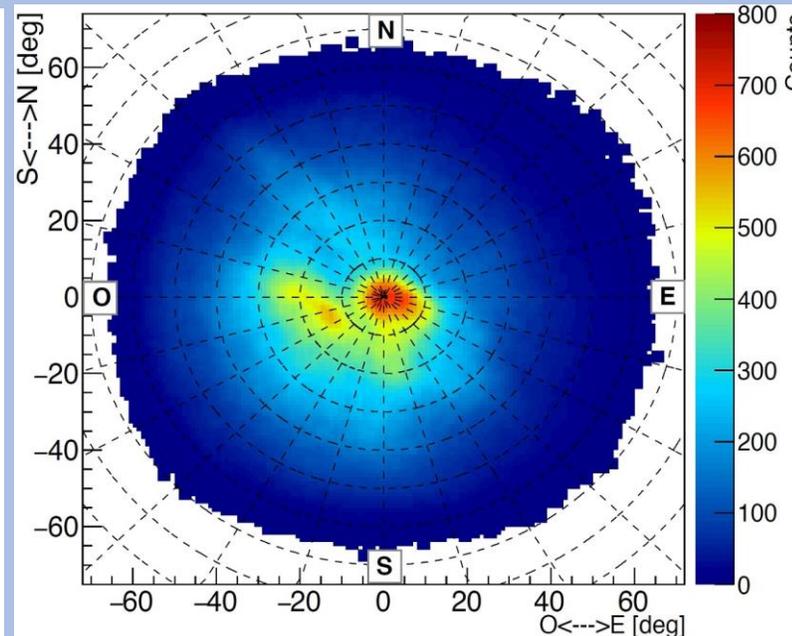
Risultati delle misure di radiografia muonica realizzate con MIMA

Mappe 2D di conteggi di muoni fuori e dentro la miniera

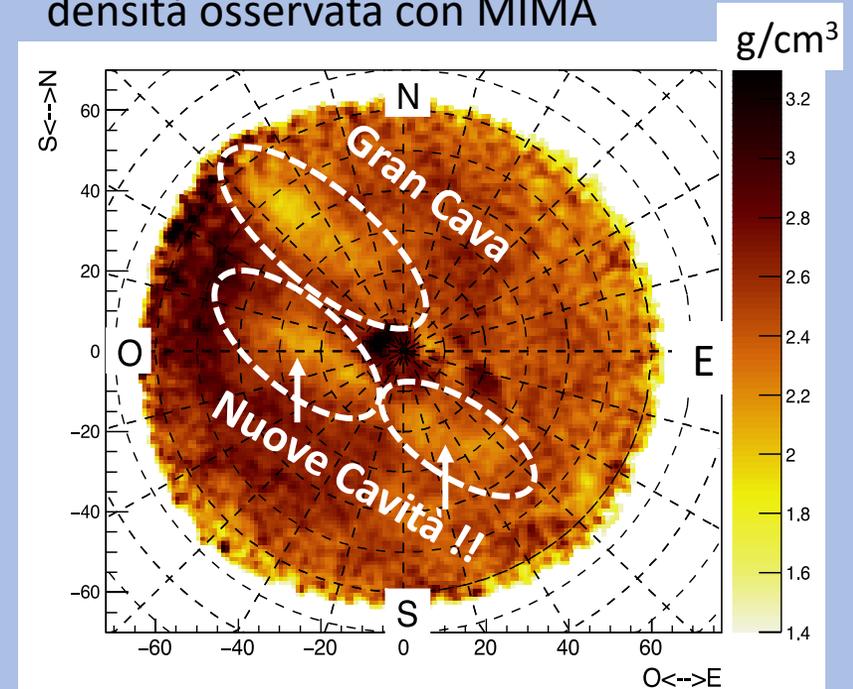
Configurazione di freesky



Configurazione *target*



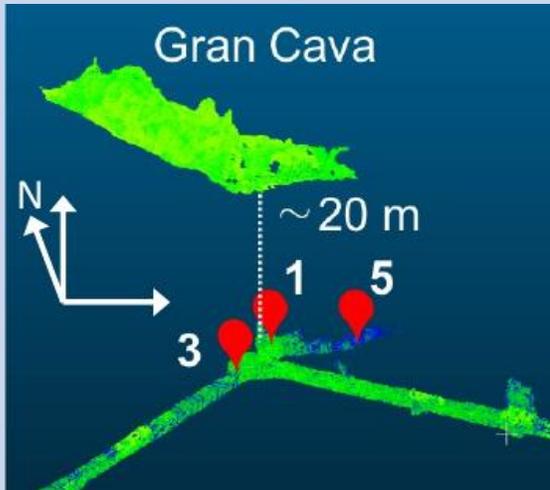
Mappa 2D di densità Ogni colore rappresenta un valore di densità osservata con MIMA



Ogni colore rappresenta un valore del numero di muoni rivelato in quella direzione

- 3 zone a densità troppo bassa per essere rocce → possibile presenza di cavità

Ricostruzione 3D delle cavità osservate con la radiografia muonica

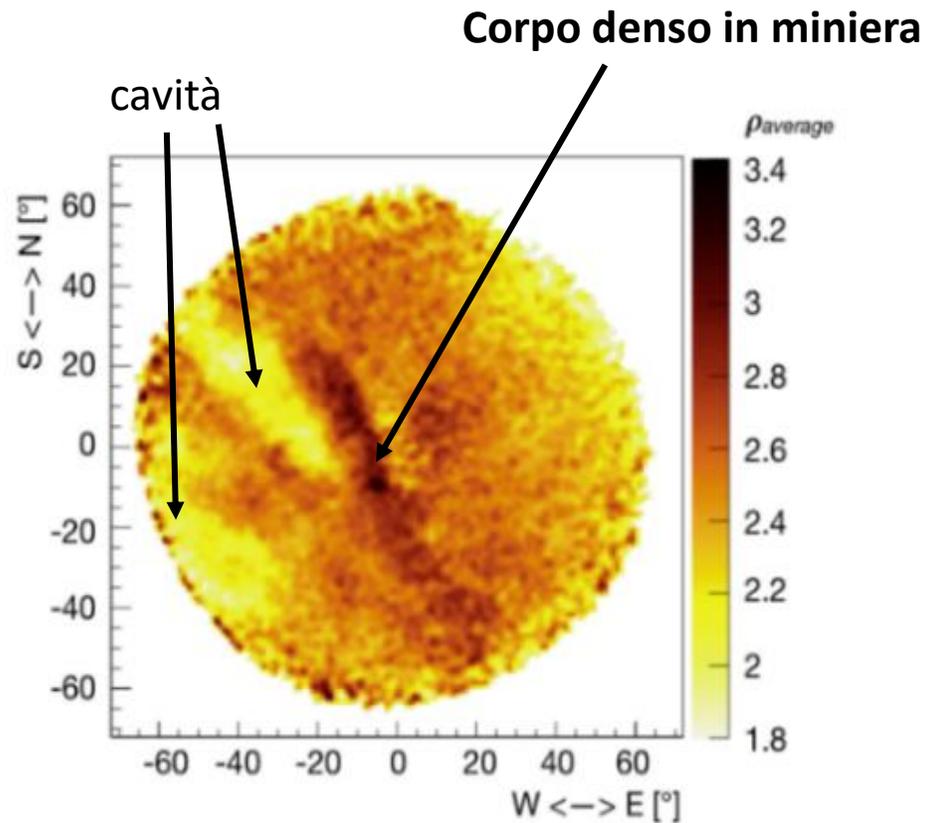


●
Punti d'installazione
del rivelatore MIMA



Sono in atto ricerche
per l'ispezione delle
nuove cavità

Non solo cavità....



Mappa di densità

Ricostruzione 3D del corpo denso

