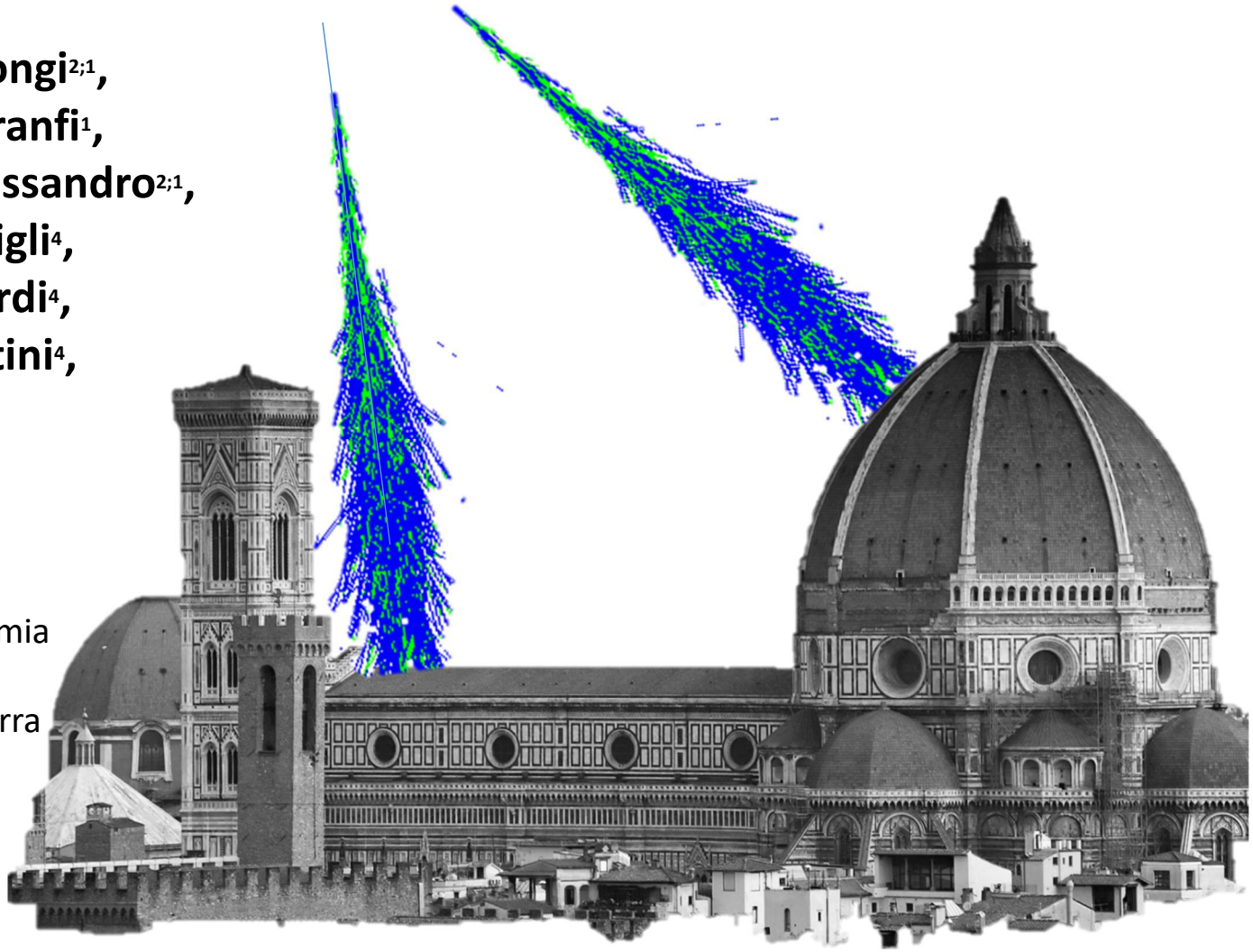
Giornata di Studio sulla Radiografia Muonica in ambito multidisciplinare – **GSRM2018**
29-30 ottobre 2018 (Firenze)

Introduzione alla radiografia muonica per assorbimento e sue applicazioni

L. Bonechi[1;2], G. Baccani[2;1], M. Bongi[2;1], D. Brocchini[3], N. Casagli[4], R. Ciaranfi[1], L. Cimmino[5;6], V. Ciulli[2;1], R. D'Alessandro[2;1], C. Del Ventisette[4], A. Dini[7], G. Gigli[4], S. Gonzi[2;1], S. Guideri[3], L. Lombardi[4], B. Melon[1], N. Mori[1;2], M. Nocentini[4], P. Noli[5;6], V. Pazzi[4], G. Saracino[5;6], P. Strolin[5;6], L. Viliani[1]

1 INFN Firenze
2 Univ. di Firenze, Dip. di Fisica e Astronomia
3 Parchi Val di Cornia, Livorno
4 Univ. di Firenze, Dip. Di Scienze della Terra
5 Univ. di Napoli Federico II, Dip. di Fisica
6 INFN Napoli
7 IGG-CNR, Pisa



Schema della presentazione

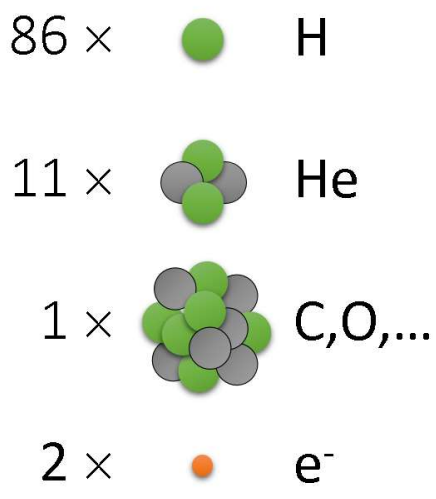
- ***Introduzione***
  - Raggi Cosmici e sciami atmosferici
  - I muoni e la tecnica di radiografia muonica

- ***Misure storiche e attività in corso***
  - Il panorama internazionale (2 slide!)

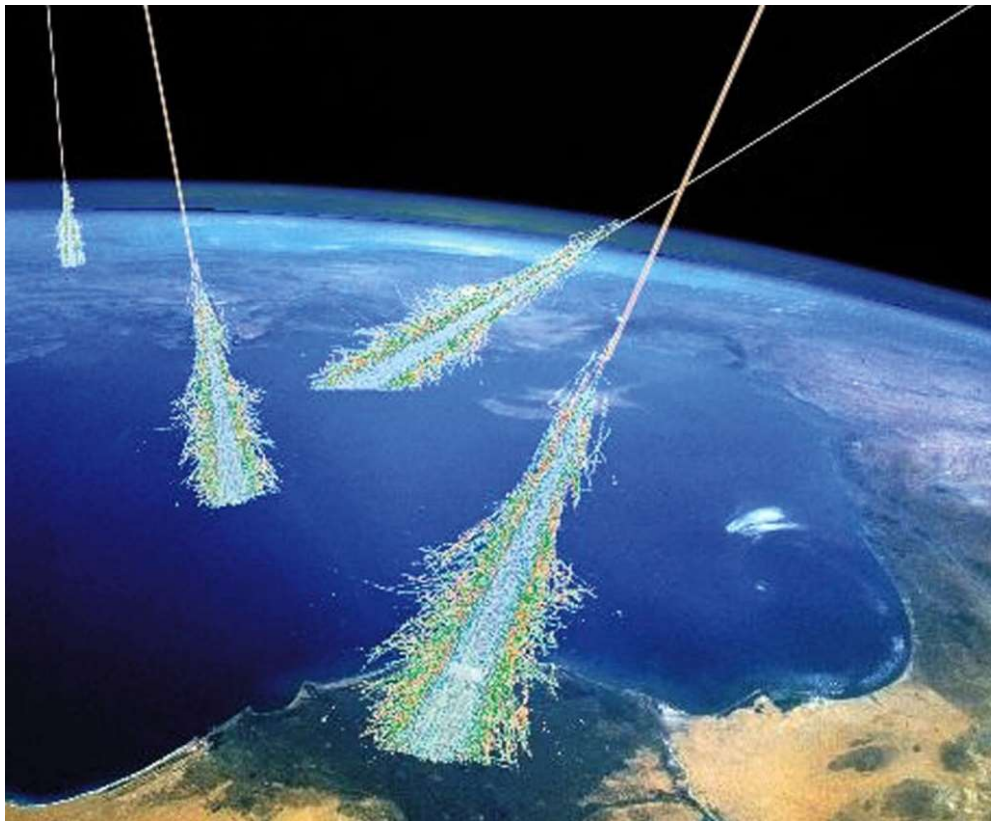
- ***Alcuni casi di studio in Toscana***
  - Miniere
  - Argini fluviali

Introduzione

I raggi cosmici



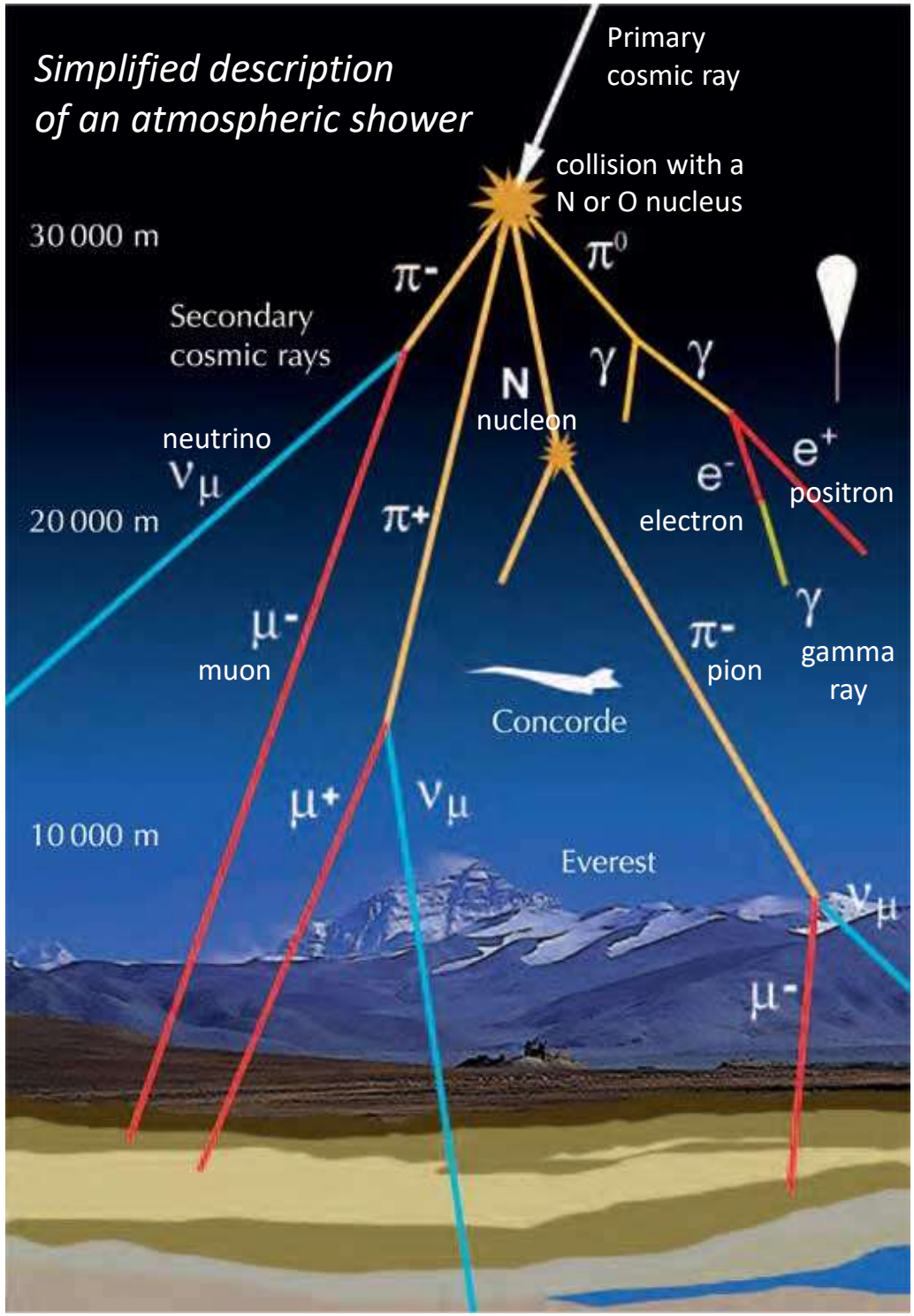
- **Particelle elementari e frammenti di atomi** di **altissima energia** e dotati di **carica elettrica** che viaggiano isotropamente nello spazio interstellare ed entrano nell'atmosfera terrestre con una frequenza di **1000/m²/s**
- Provengono in gran parte dalla nostra galassia
- I raggi cosmici interagiscono con i nuclei degli atomi presenti negli strati alti dell'atmosfera, producendo i cosiddetti **sciami atmosferici,** cascade di centinaia o migliaia di particelle elementari secondarie e frammenti di nuclei atomici



Introduzione

Sciami atmosferici e muoni

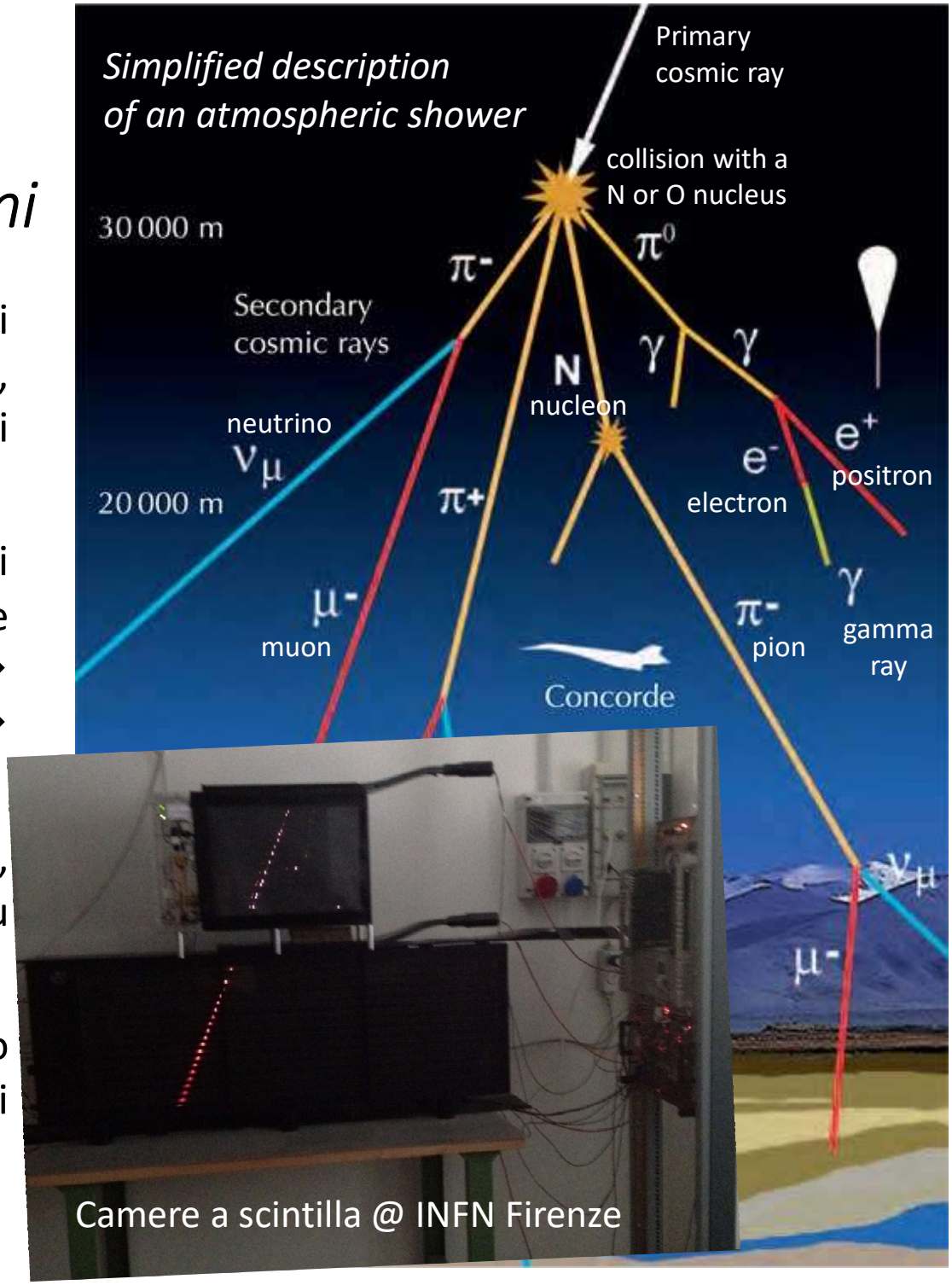
- I **muoni** ($\mu^{\pm}$) vengono prodotti nei decadimenti di pioni ($\pi^{\pm}$) and kaoni (**K**$^{\pm}$), particelle instabili presenti nei prodotti secondari degli sciami
- Il **flusso di muoni** al livello del suolo è di circa (100÷200) particelle/m^2/s alle nostre latitudini (circa 3 volte maggiore ai poli → contributo solare a basse energie → aurore polari)
- ***I muoni sono particelle molto penetranti***, simili agli elettroni, ma 200 volte più pesanti.
- A seconda della loro **energia**, possono attraversare fino a centinaia di metri di roccia.



Introduzione

Sciami atmosferici e muoni

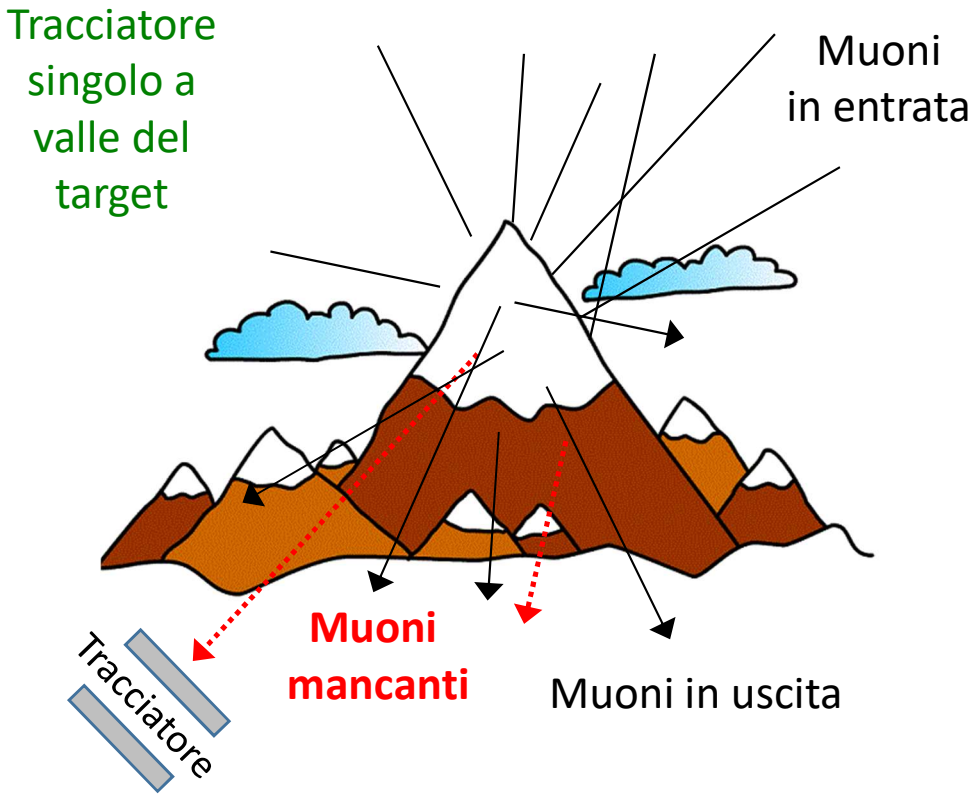
- I **muoni** ($\mu^{\pm}$) vengono prodotti nei decadimenti di pioni ($\pi^{\pm}$) and kaoni (**K**$^{\pm}$), particelle instabili presenti nei prodotti secondari degli sciami
- Il **flusso di muoni** al livello del suolo è di circa (100÷200) particelle/m^2/s alle nostre latitudini (circa 3 volte maggiore ai poli → contributo solare a basse energie → aurore polari)
- ***I muoni sono particelle molto penetranti***, simili agli elettroni, ma 200 volte più pesanti.
- A seconda della loro **energia**, possono attraversare fino a centinaia di metri di roccia.



Introduzione

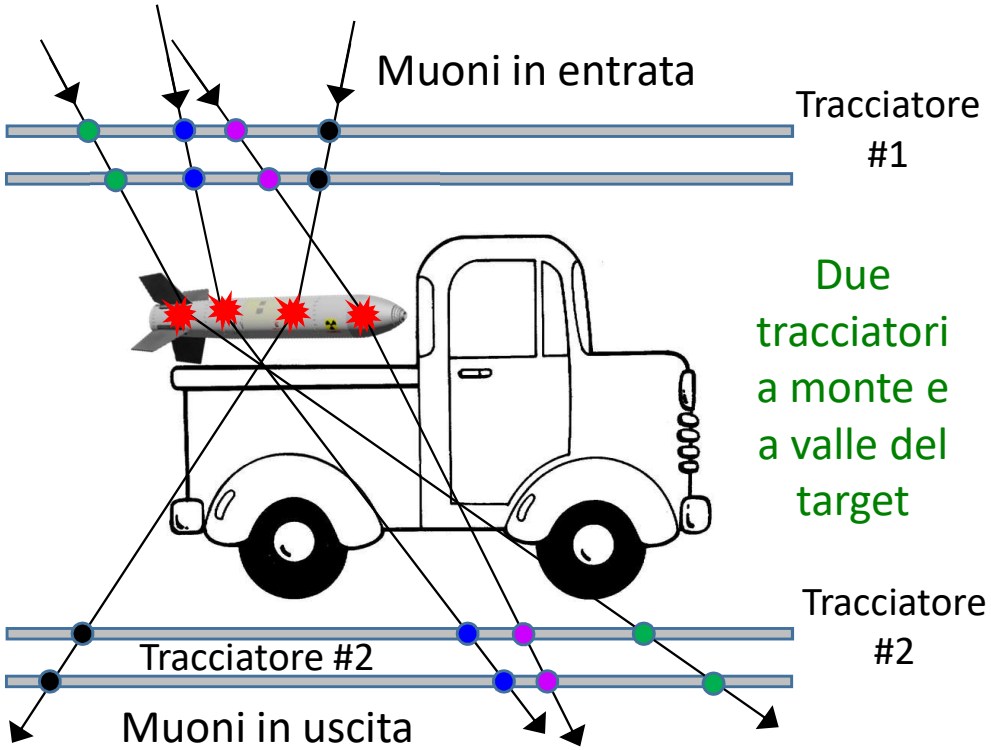
L'imaging con muoni

Radiografia muonica per assorbimento (o trasmissione)



Si basa sulla perdita di energia e sull'assorbimento dei μ nei materiali. Appropriata per l'imaging di grandi volumi.

Tomografia muonica per diffusione coulombiana

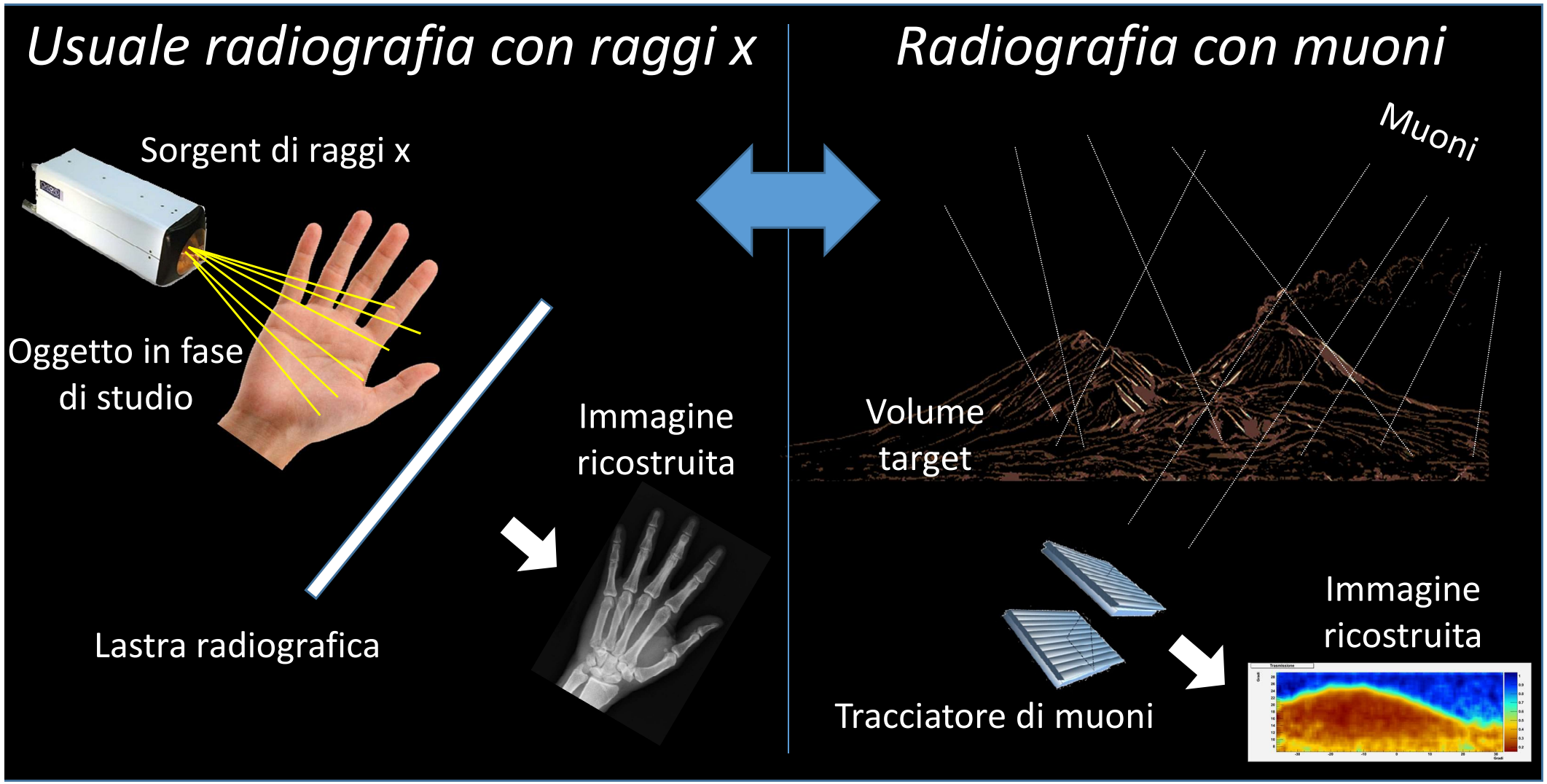


SI basa sulla deflessione delle traiettorie dei μ nei materiali ad alto Z. Appropriata per imaging di volumi medio-piccoli.

Introduzione

Radiografia muonica per assorbimento/trasmissione

Si basa sulla perdita di energia e sull'assorbimento dei μ nei materiali.

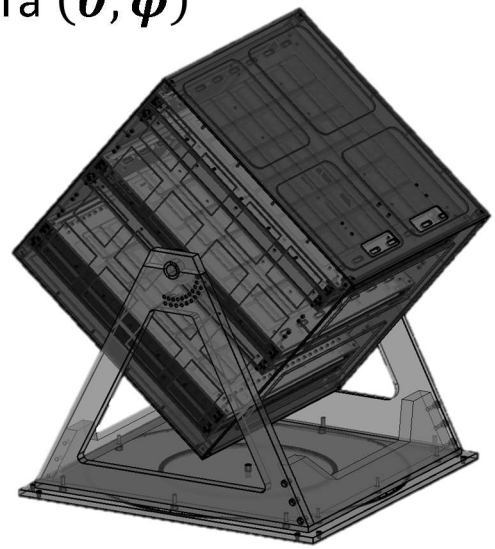


Introduzione
Metodologia

FASE DI MISURA

- **Sopralluogo** per definire il punto di misura e la direzione di misura $(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})$
- **Installazione** del rivelatore e test
- **Misura I**: durata $\boldsymbol{\Delta t_T}$; di fronte al target (T=target) → $\boldsymbol{N_T(\theta, \varphi)}$
- **Misura II**: durata $\boldsymbol{\Delta t_{FS}}$, a cielo libero (FS=free sky) → $\boldsymbol{N_{FS}(\theta, \varphi)}$
- Ricostruzione della **Trasmissione** dei muoni

$$\boldsymbol{T_\mu(\theta, \varphi)} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon_{FS}}}{\boldsymbol{\varepsilon_T}} \frac{\boldsymbol{\Delta t_{FS}}}{\boldsymbol{\Delta t_T}} \frac{\boldsymbol{N_T(\theta,\varphi)}}{\boldsymbol{N_{FS}(\theta,\varphi)}}$$



SIMULAZIONI e CONFRONTO

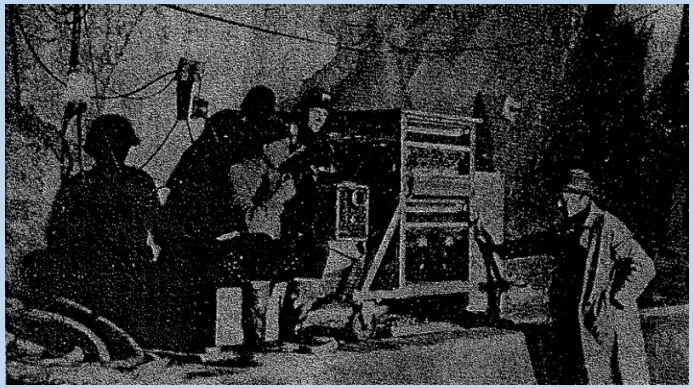
- **Modelli digitali del terreno**
- **Generatore di muoni**
- Integrazione delle mappe e del generatore di muoni nei SW di simulazione
- Confronto con simulazione a densità uniforme → identificazione anomalie
- Confronto con simulazioni varie densità → ricostruzione mappa densità

Misure storiche

Le origini – prime applicazioni con i muoni

La prima applicazione con i μ : nel 1955 da **E.P. George** per valutare lo strato di roccia sopra un tunnel sotterraneo

- *E.P. George Commonwealth Engineer (1955) 455*



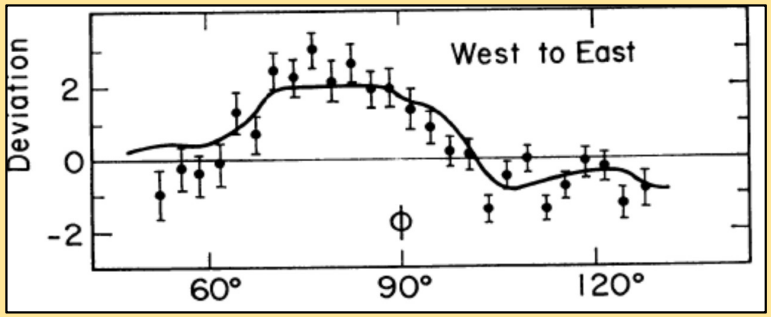
Stima con muoni:
(16.3 ± 0.8) kg/cm^2

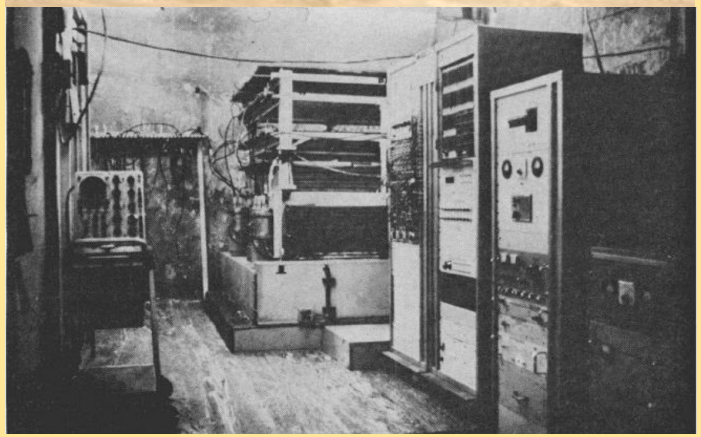
Misura con carotaggio:
(17.5 ± 0.6) kg/cm^2

In accordo!

La prima radiografia con i μ: applicazione ad opera del premio Nobel **L.W. Alvarez** per cercare stanze nascoste nella piramide di Chefren

- L.W. Alvarez et al. Science 167 (1970) 832

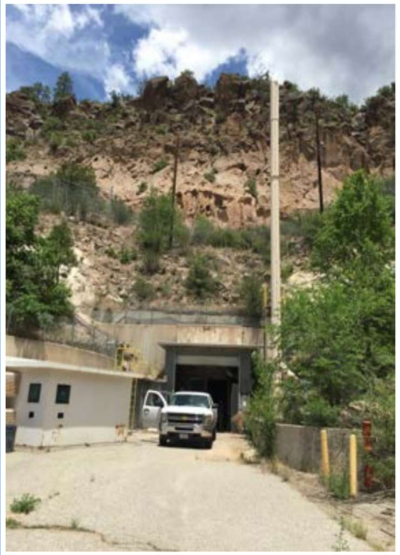


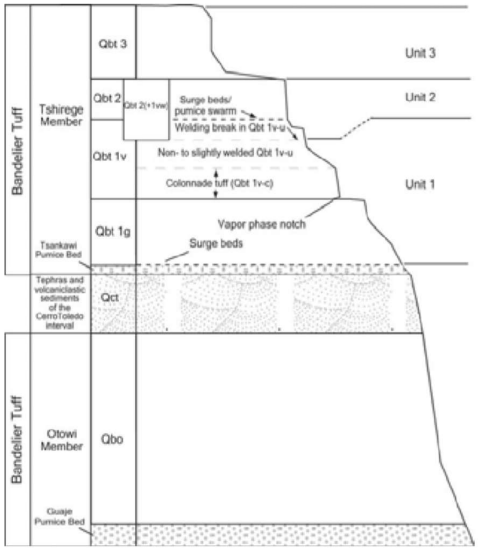


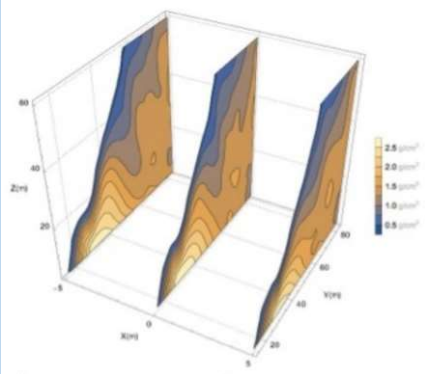
Attività recenti o in corso

Applicazioni in ambito internazionale

Misure a **Los Alamos** (LANL)







Pure Appl. Geophys. **174** (2017) 2133–2141

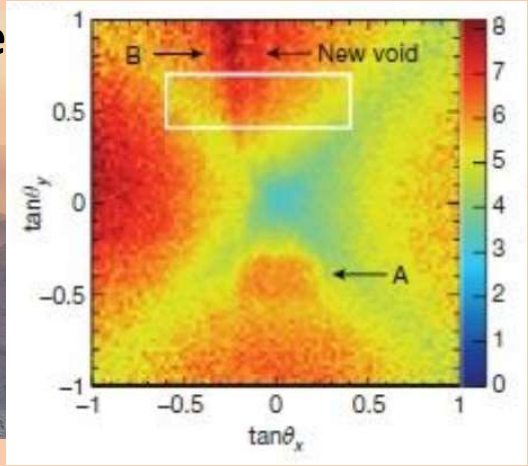
Le piramidi americane

La Milpa nel Belize
Univ. Texas

Teotihuacan in Mexico
Univ. Mexico

Progetto **Scan-pyramids**

La piramide di Cheope



Muon flux

Nature **vol. 552**, pages 386–390, (21 Dec. 2017)

Attività recenti o in corso

Applicazioni in ambito internazionale

2322 Kullapha Chaiwongkhot et al. IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 65, NO. 8, AUGUST 2018

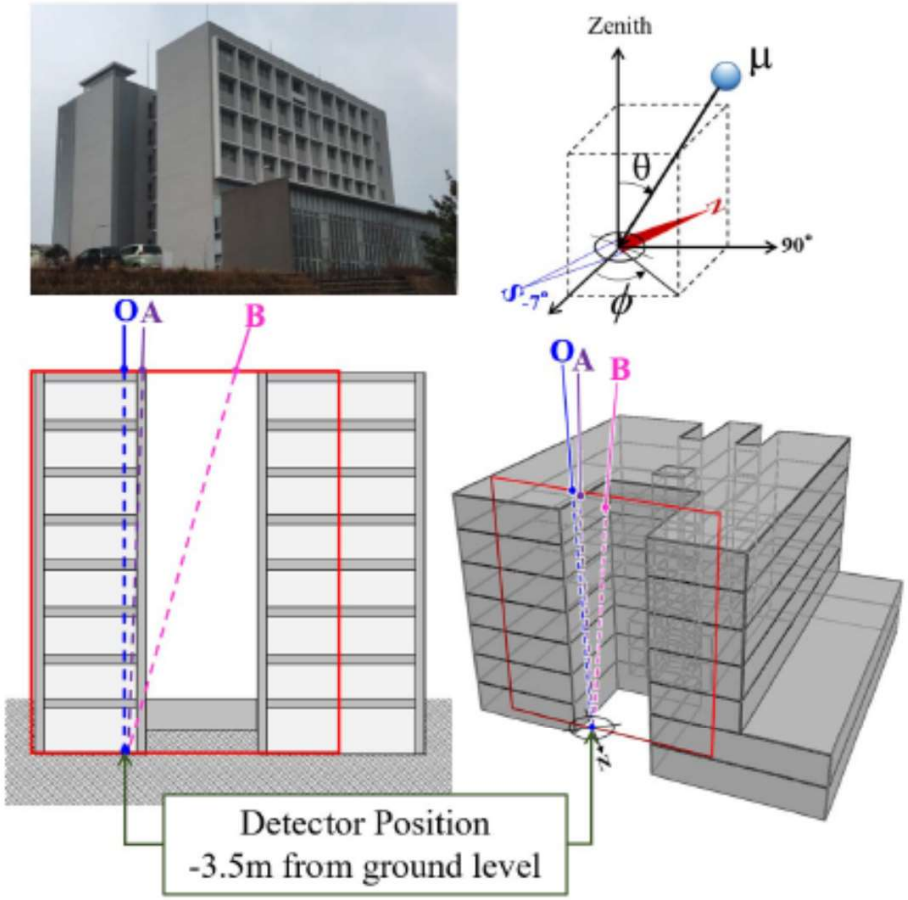


Fig. 10. Drawing of the seven-story concrete building.

16 giorni presa dati

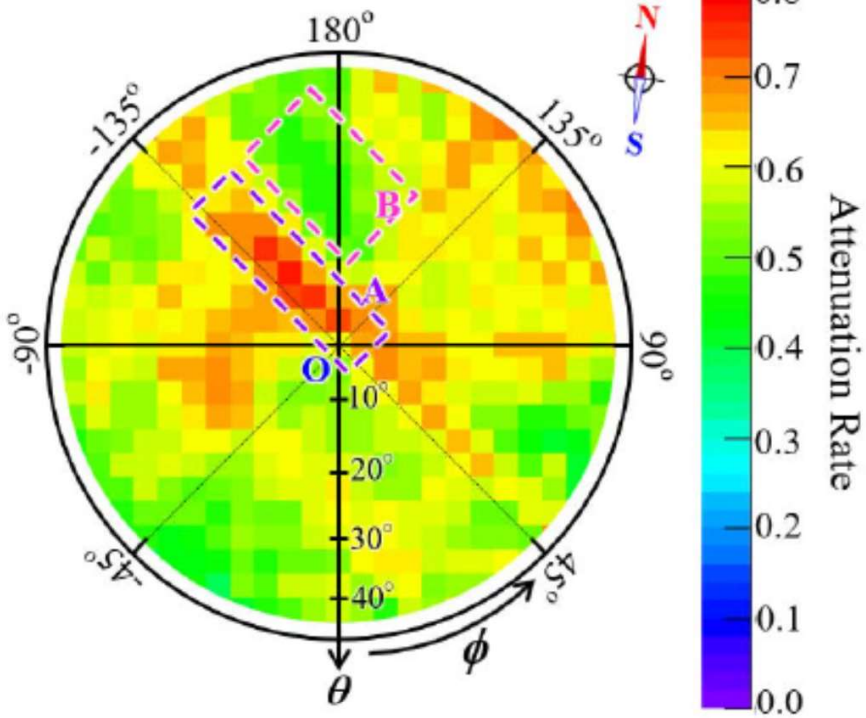


Fig. 12. Muon attenuation rate measured as a function of the incident muon direction defined by zenith and azimuth angles $D(v_{i,j})$. The shadow shows the building core structure. The detector position at 0° zenith angle is labeled with "O" at the center of the plot. Areas A and B are examples of the largest and smallest thicknesses of the concrete structure, respectively.

Attività recenti o in corso

Radiografia muonica di strutture vulcaniche

PROSSIMA PRESENTAZIONE
a cura del
Prof. Giulio Saracino (UNINA – INFN Napoli)

Misure di radiografia muonica in Toscana

Collaborazione tra INFN, Dipartimenti di Fisica UNIFI e UNINA e Dipartimento di Scienze della Terra UNIFI

- **Miniera del Temperino** all'interno del Parco Archeominerario di San Silvestro in località Campiglia Marittima (LI)
  - Fine 2017 – metà 2018

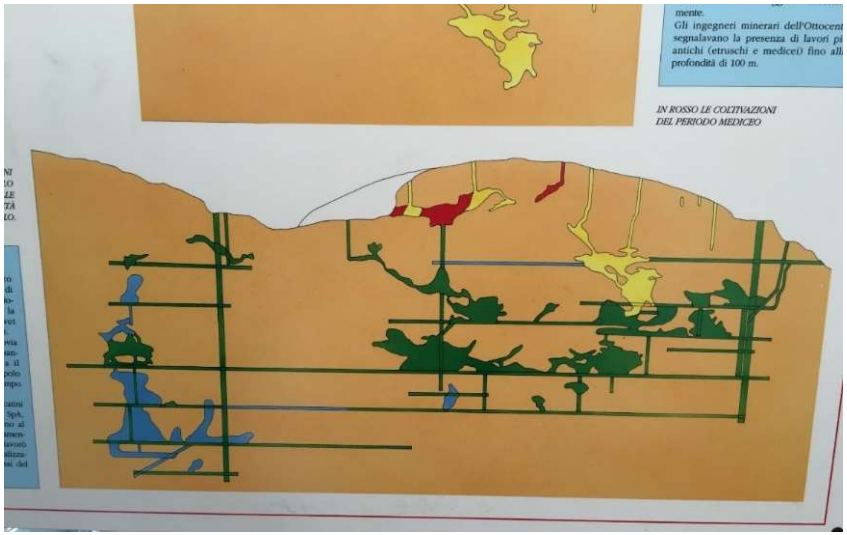
Vedere anche:
D. Brocchini
sessione archeologia
29 ottobre ore 14:00

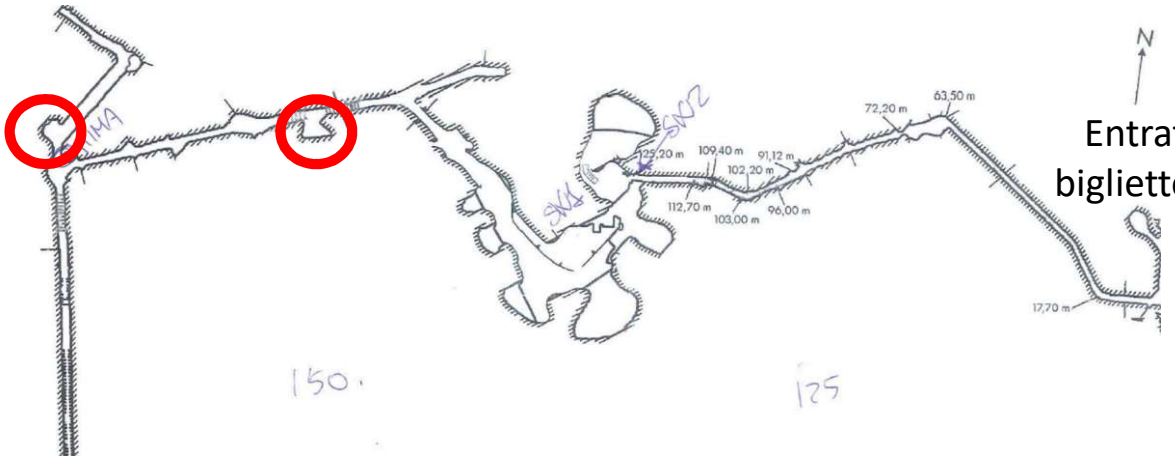
- **Argine del fiume Arno** in località Mantignano (FI)
  - Seconda metà 2017
- **Argine del torrente Bure** in località Pontenuovo (PT)
  - Seconda metà 2018

Vedere anche:
V. Pazzi
sessione ingegneria
30 ottobre ore 9:30

Misura alla miniera del Temperino (Li)

identificazione di cavità note e misura del profilo 2D di densità

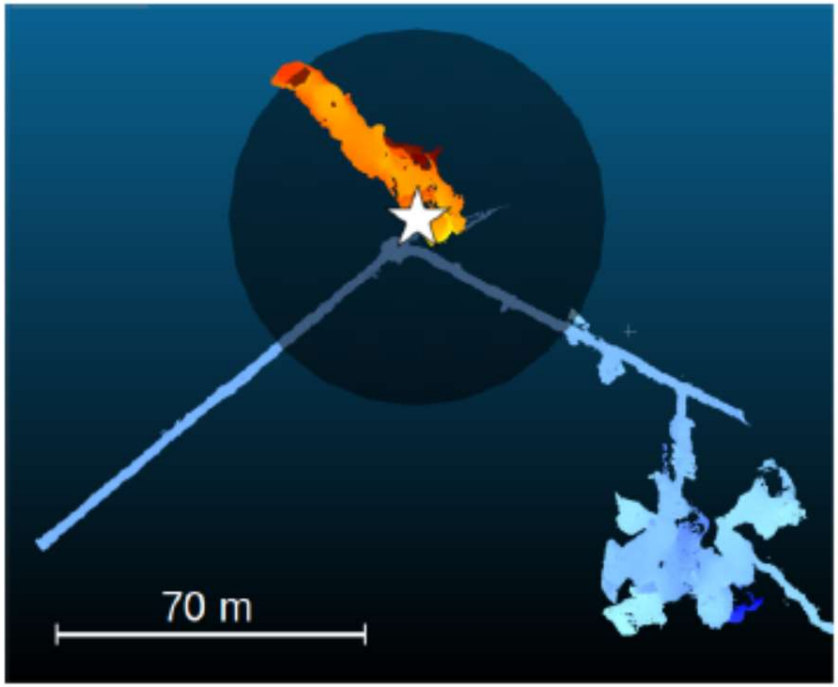


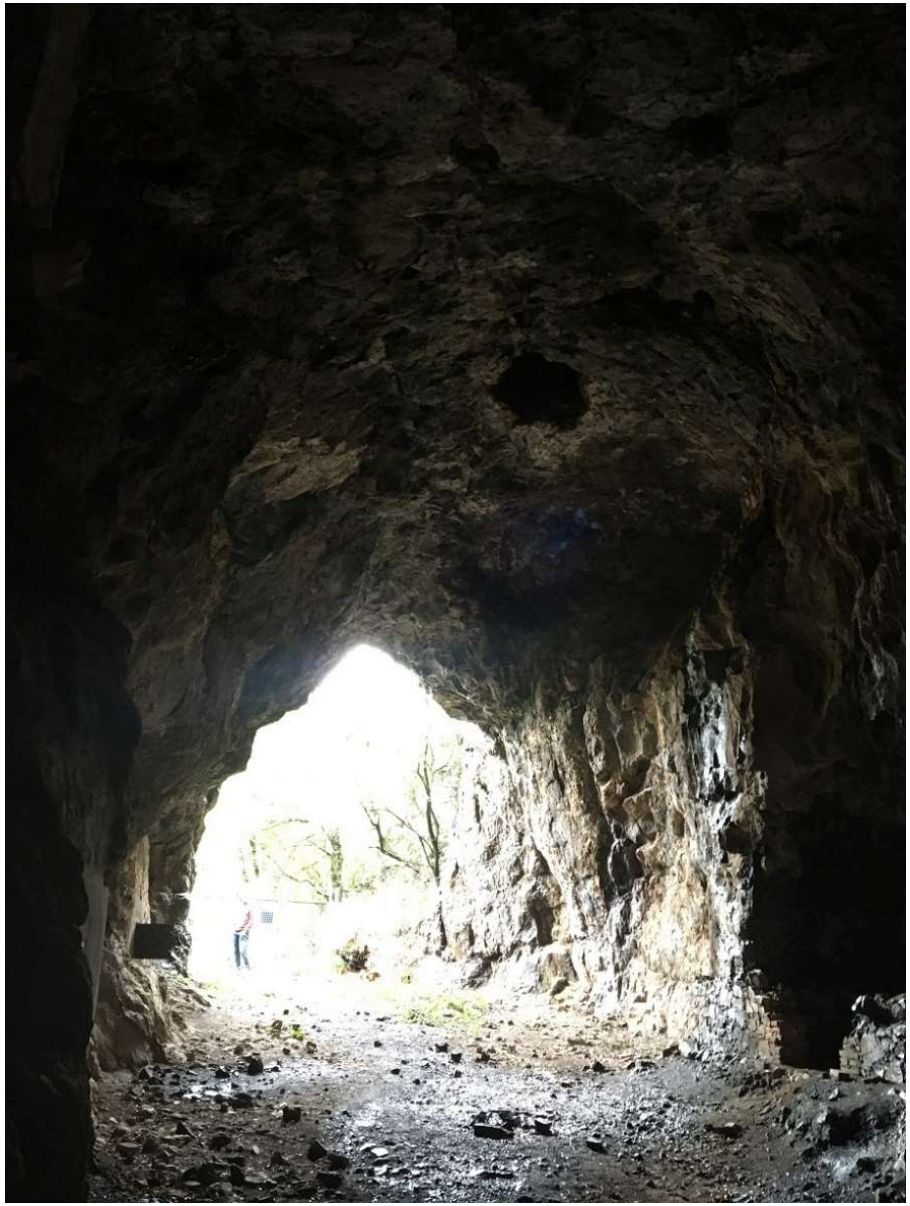


Entrata biglietteria

Miniera del Temperino (Li)

identificazione di cavità note e misura del profilo 2D di densità

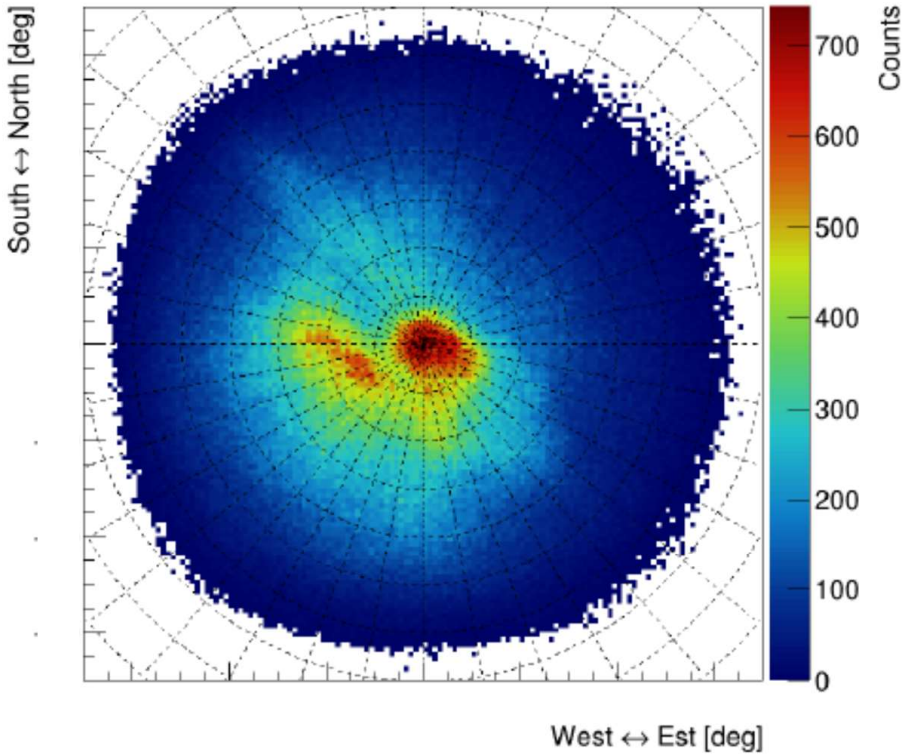




Miniera del Temperino (Li)

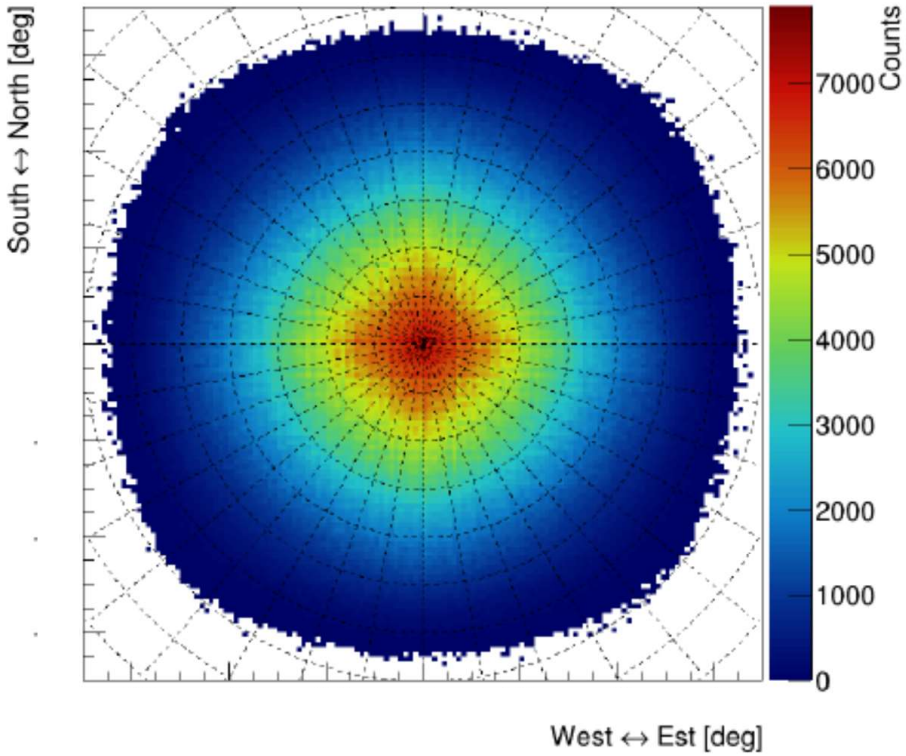
Primi risultati (G. Baccani et al., proceedings di ICNFP 2018, Creta – in fase di pubblicazione su EPJ Web of Conference)

Distribuzione angolare dei muoni



(a) *Target configuration* $N_{tar}(\theta, \varphi)$.

2 milioni di eventi
53 giorni di presa dati



(b) *Free sky configuration* $N_{free}(\theta, \varphi)$.

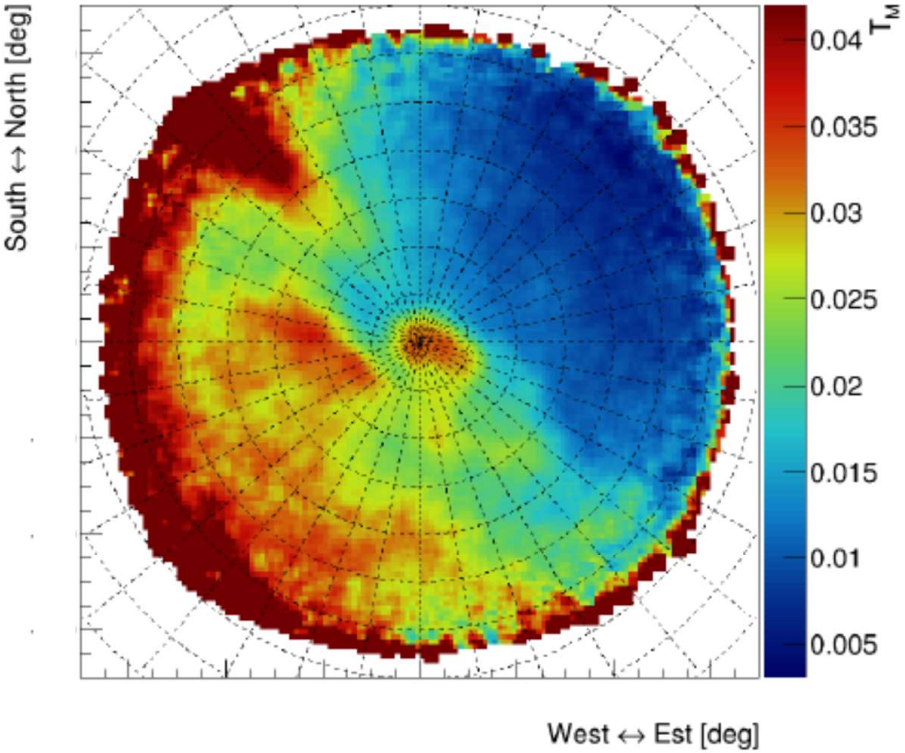
35 milioni di eventi
17 giorni di presa dati

Miniera del Temperino (Li)

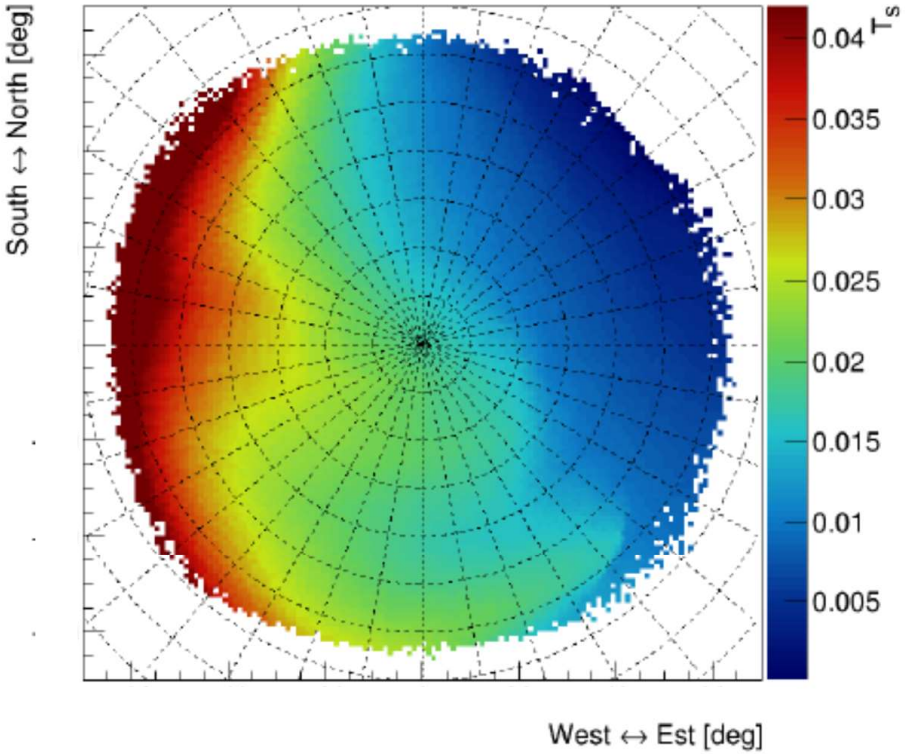
Primi risultati (G. Baccani et al., proceedings di ICNFP 2018, Creta – in fase di pubblicazione su EPJ Web of Conference)

Trasmissione

(frazione di muoni che penetra nella roccia e raggiunge il rivelatore MIMA)



(a) *Measured transmission* T_M.

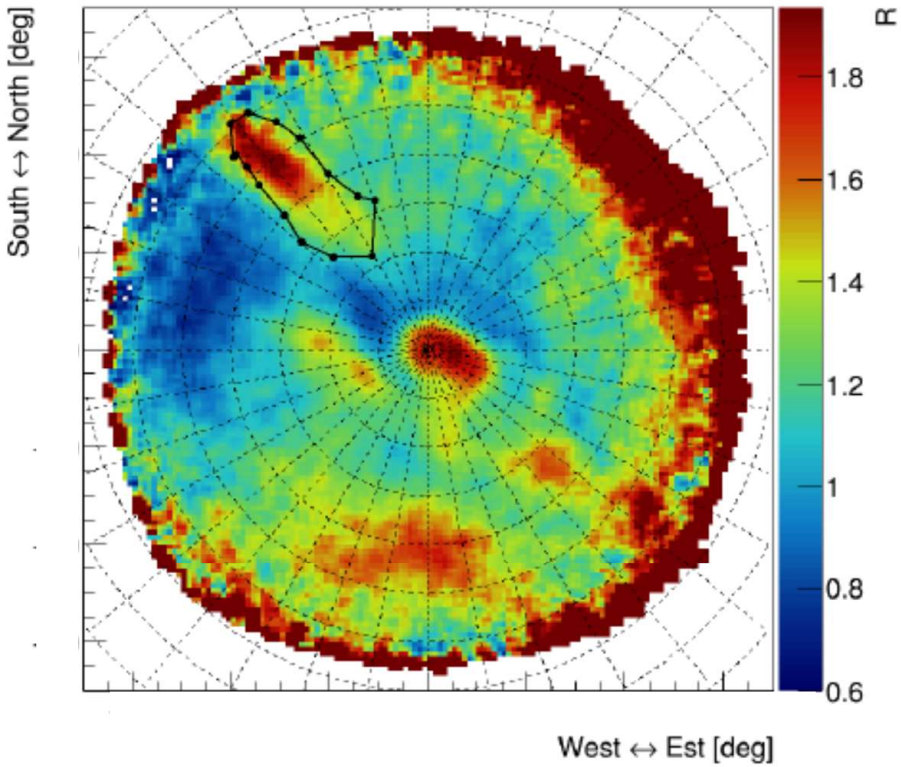


(b) *Simulated transmission* T_S.

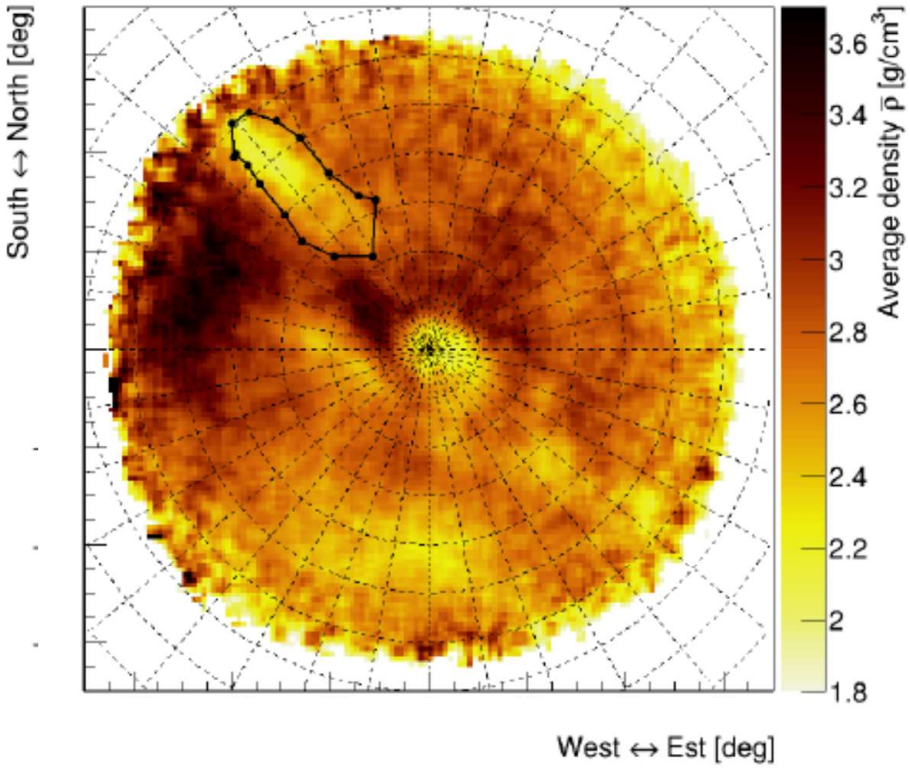
Miniera del Temperino (Li)

Primi risultati (G. Baccani et al., proceedings di ICNFP 2018, Creta – in fase di pubblicazione su EPJ Web of Conference)

Confronto con simulazione e mappa di densità



(a) *Relative transmission R.*



(b) *Average density $\bar{\rho}$.*

Test di radiografia muonica di argini fluviali

- Studio dello **stato di conservazione** di argini
  - Identificazione di cavità, tane di animali o eventuali strutture ad alta densità
- **Confronto con altre metodologie** d'indagine
  - Collaborazione fisici/geologi per confronto tra radiografia muonica e metodo geoelettrico

Argine fiume Arno – Firenze

Argine torrente Bure – Pistoia

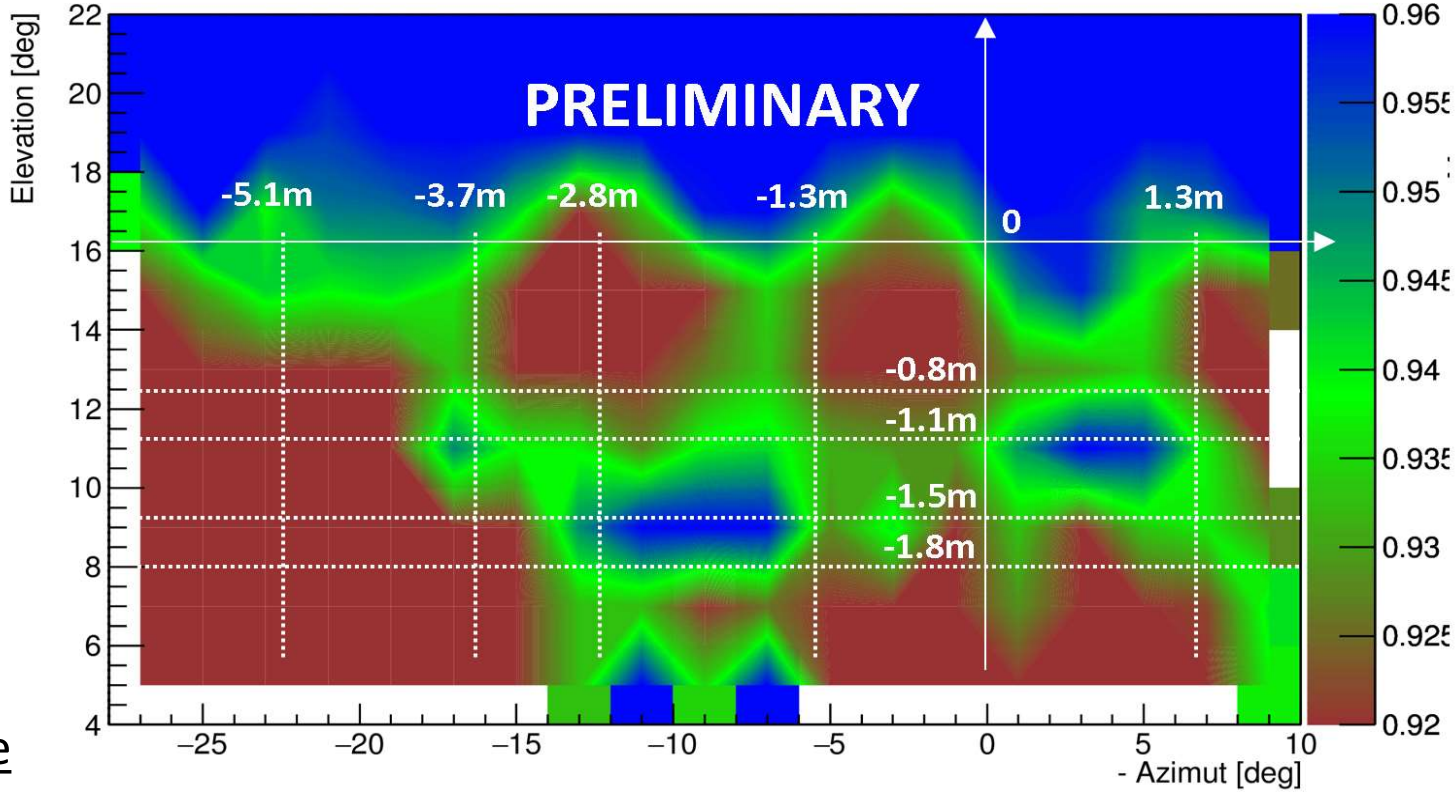
Test di radiografia muonica di argini fluviali

Primi risultati: Arno (FI)

<u>Durata della presa dati</u>: 7 gg target + 7 gg cielo libero (circa)

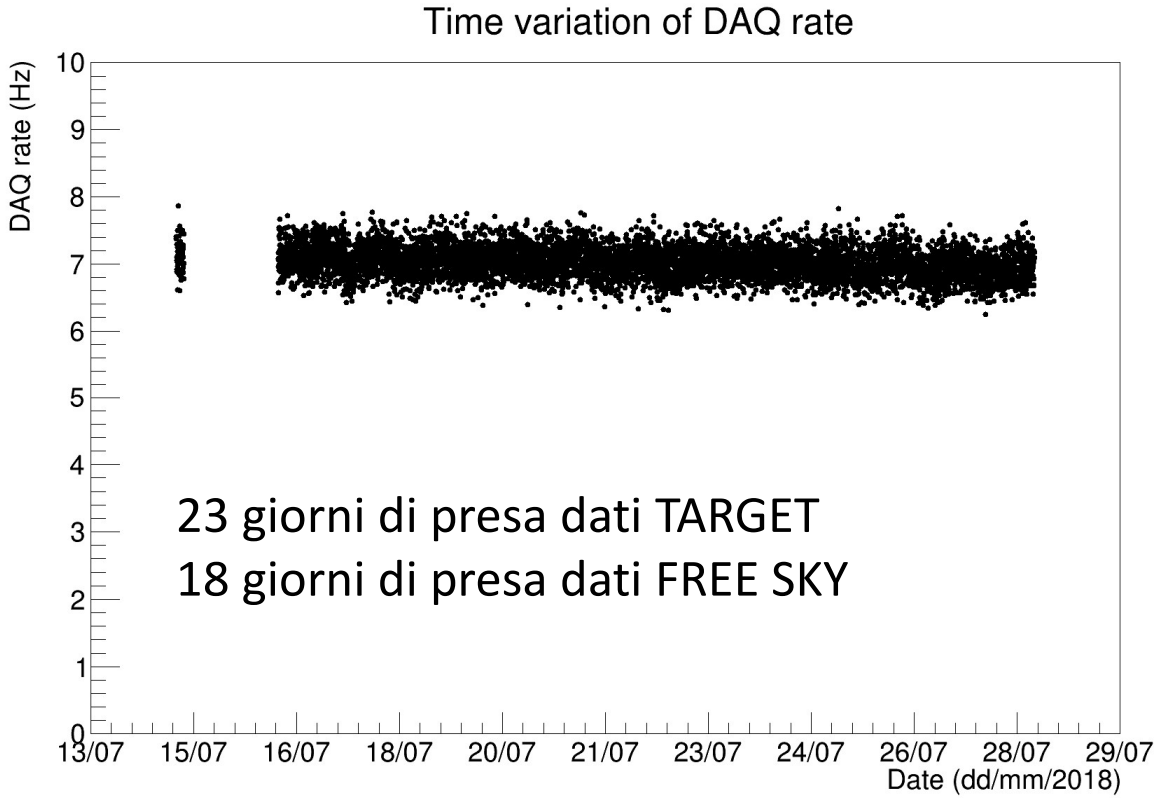
Argine demolito subito dopo la misura: <u>impossibilità di verifica dei risultati</u>

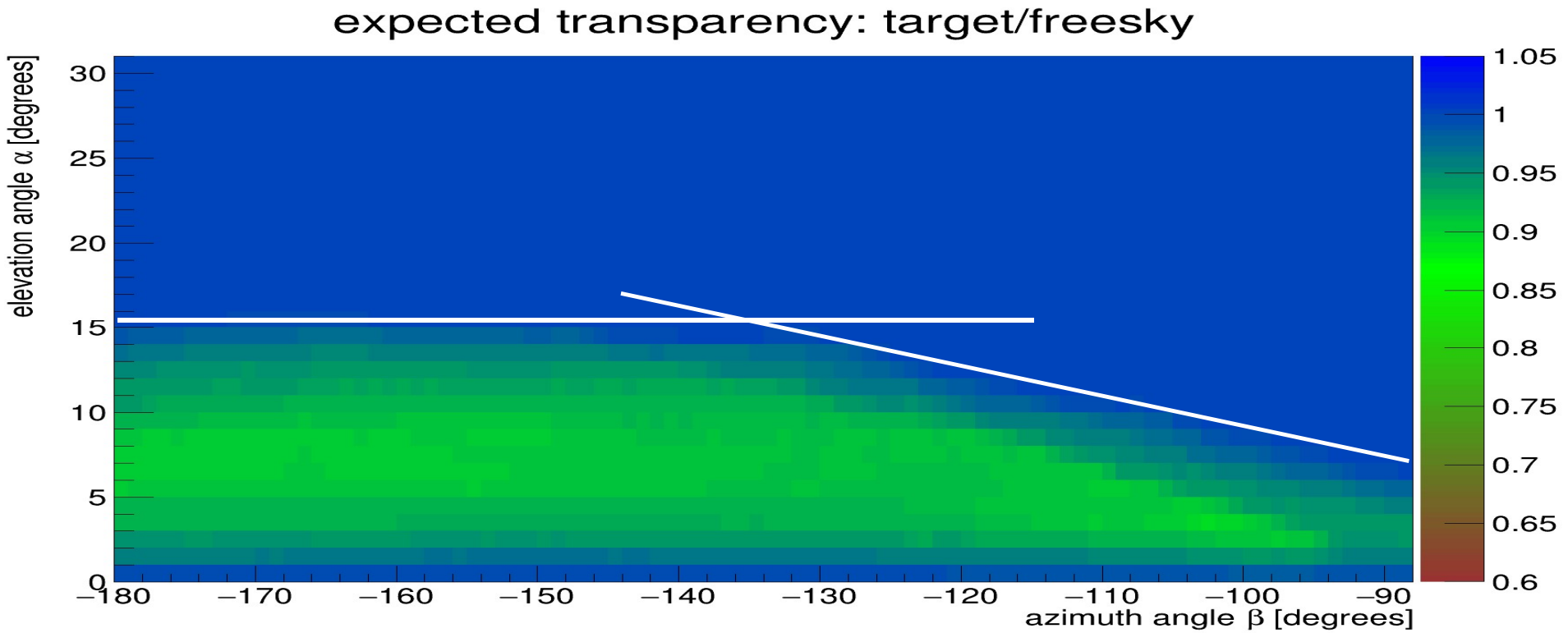
Misura utile per l'<u>ottimizzazione delle operazioni di installazione</u>

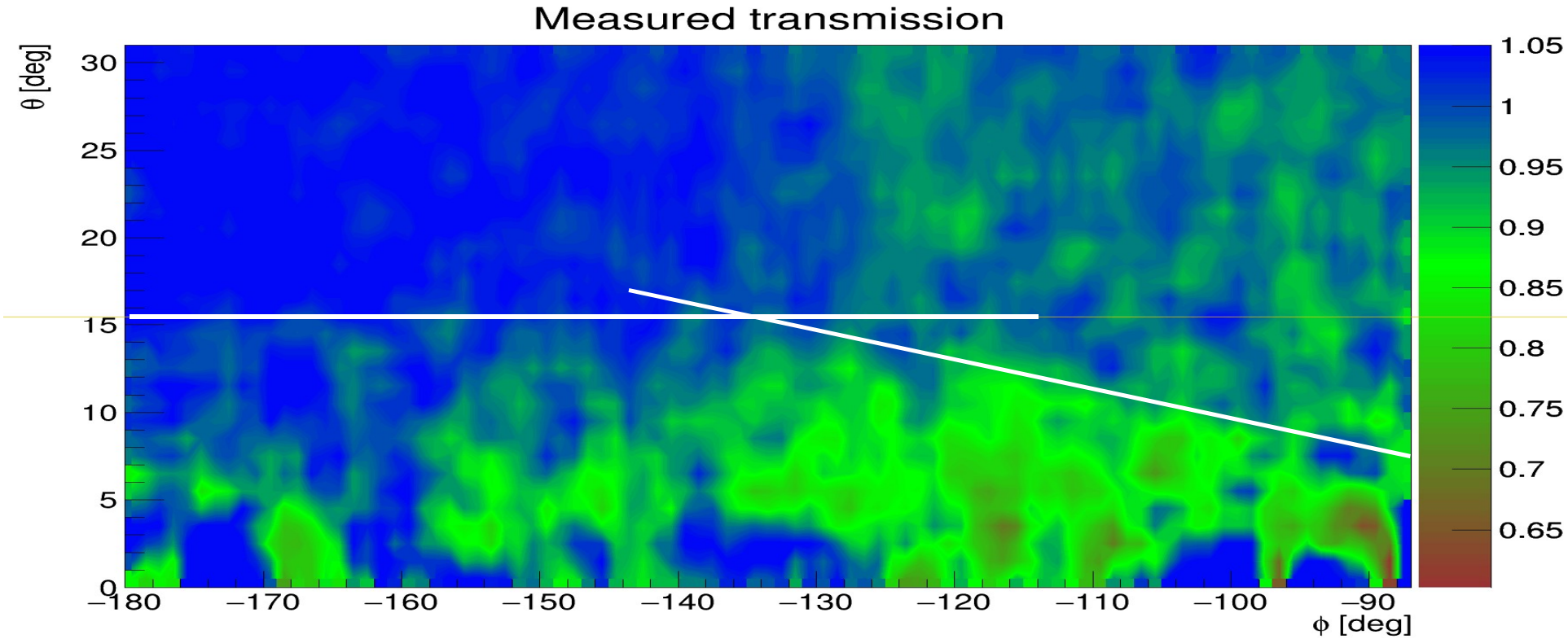


Test di radiografia muonica di argini fluviali

Primi risultati: Bure (PT)

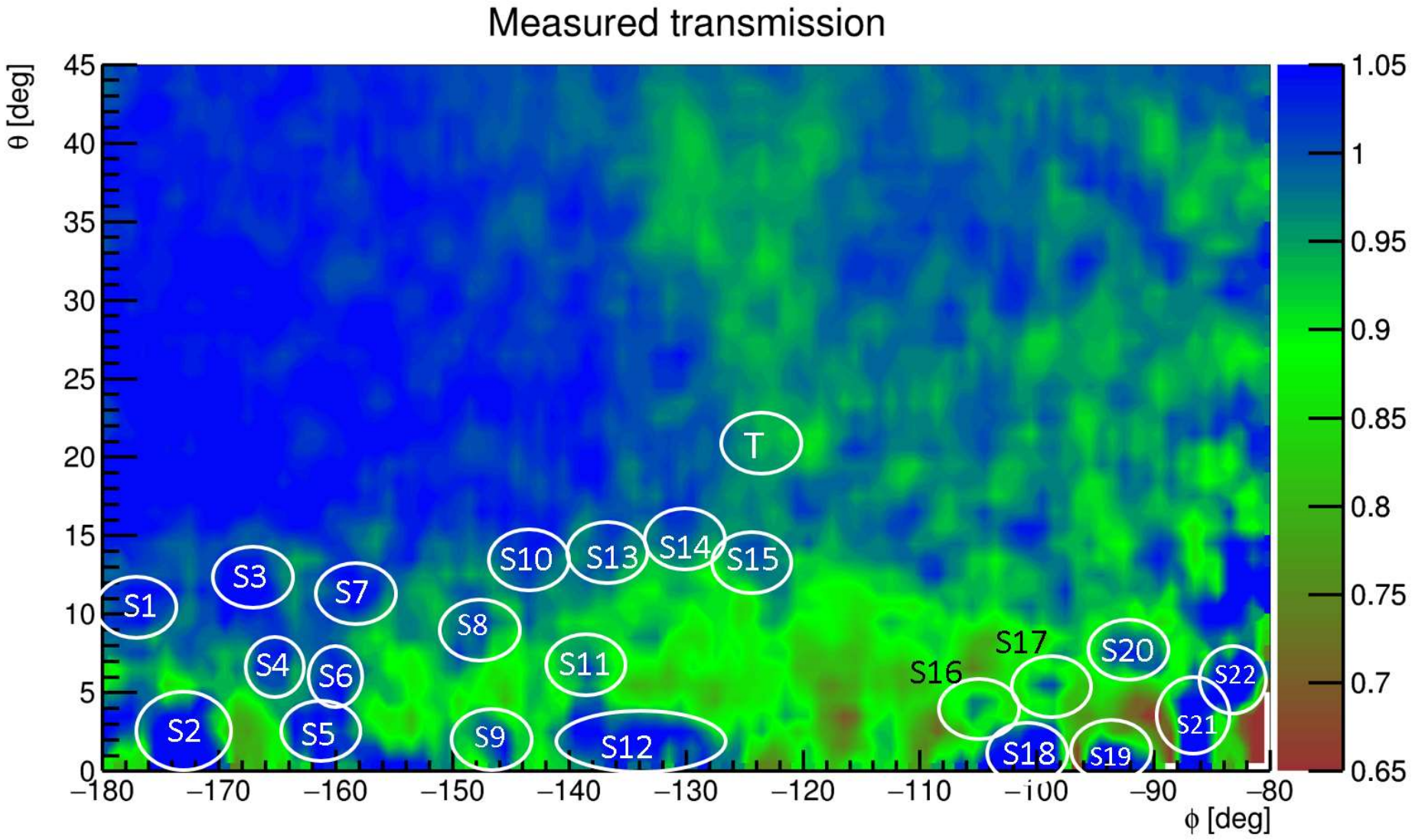



expected transparency: target/freesky
elevation angle α [degrees]
azimuth angle β [degrees]
30
25
20
15
10
5
0
−180
−170
−160
−150
−140
−130
−120
−110
−100
−90
1.05
1
0.95
0.9
0.85
0.8
0.75
0.7
0.65
0.6

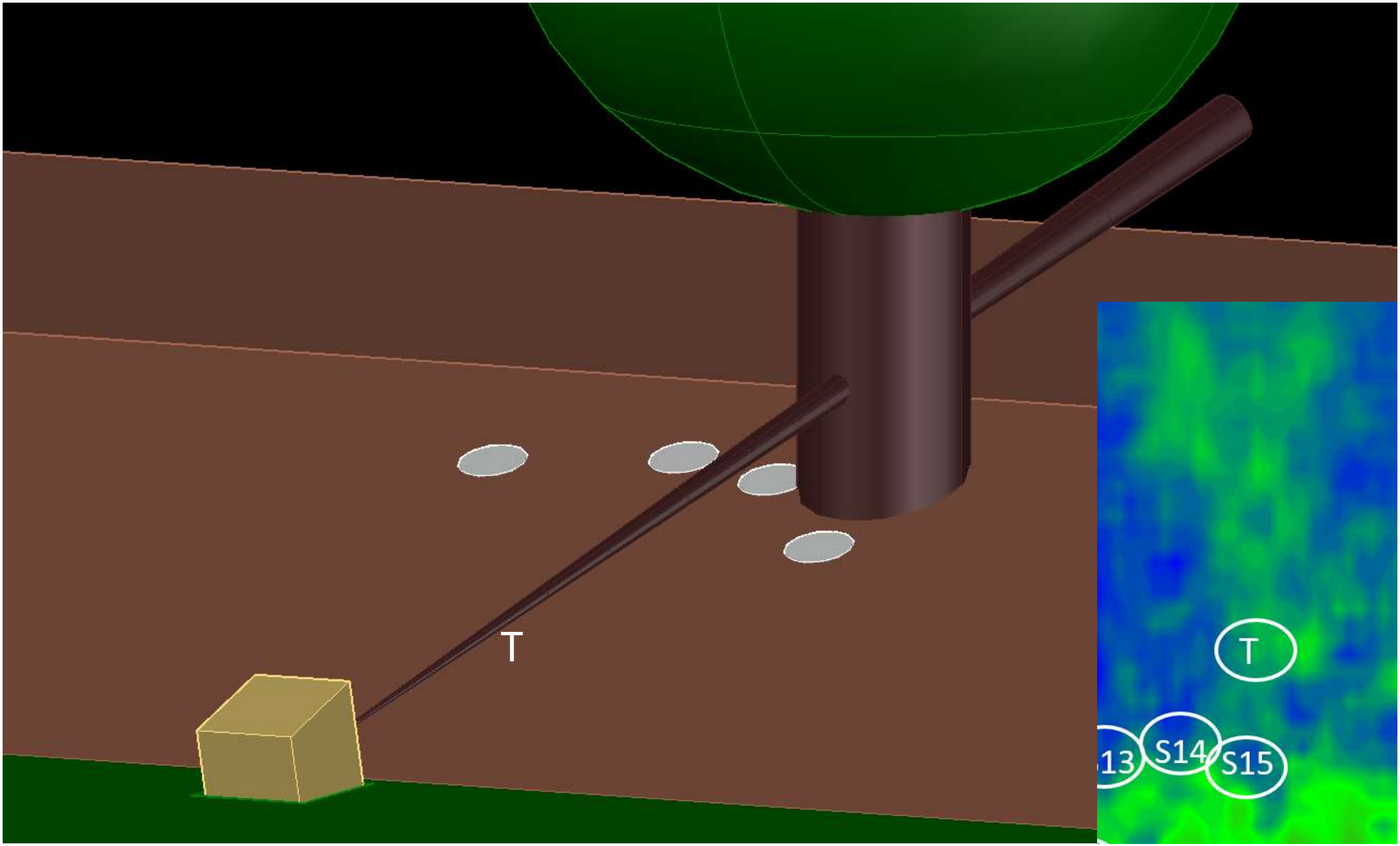

Measured transmission
θ [deg]
ϕ [deg]
30
25
20
15
10
5
0
−180
−170
−160
−150
−140
−130
−120
−110
−100
−90
1.05
1
0.95
0.9
0.85
0.8
0.75
0.7
0.65

Test di radiografia muonica di argini fluviali

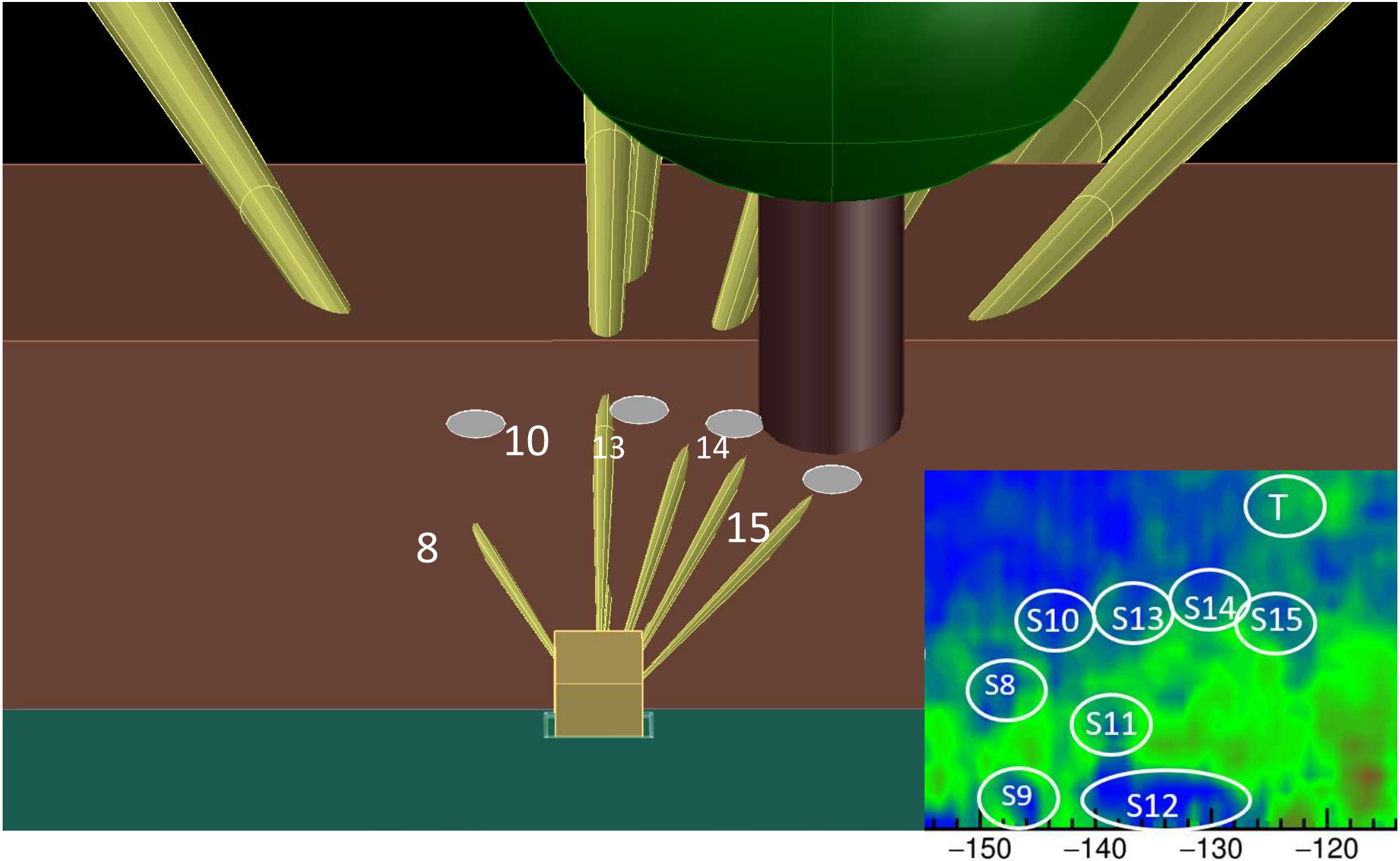
Primi risultati: Bure (PT)



Signal T from the TREE direction



Signals from the TREE direction

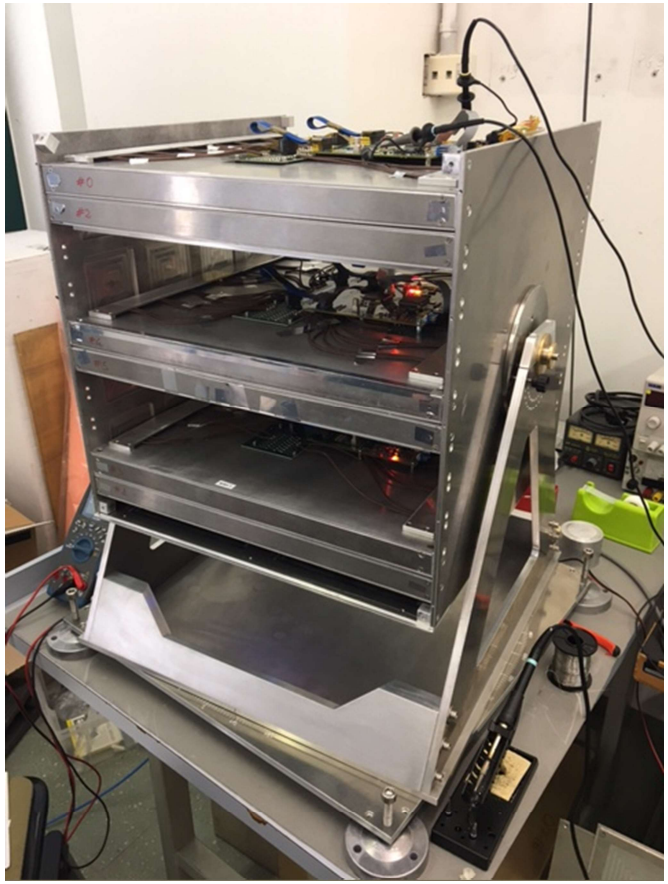


Backup slides

Development of hodoscope dedicated to muon absorption radiography

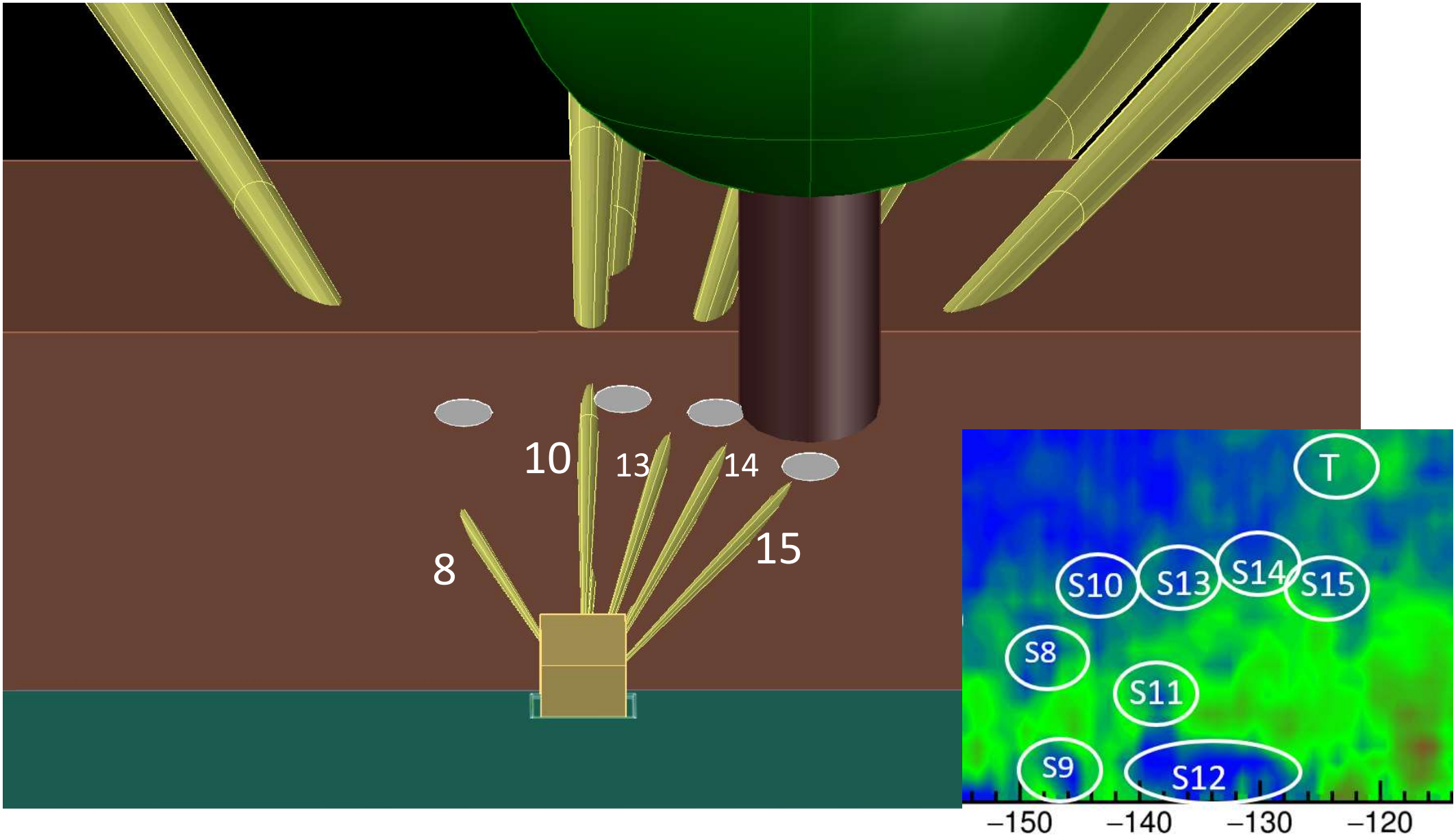
Purpose: rugged, light and low power detector to be installed in inhospitable environment (mines, archaeological sites etc.)

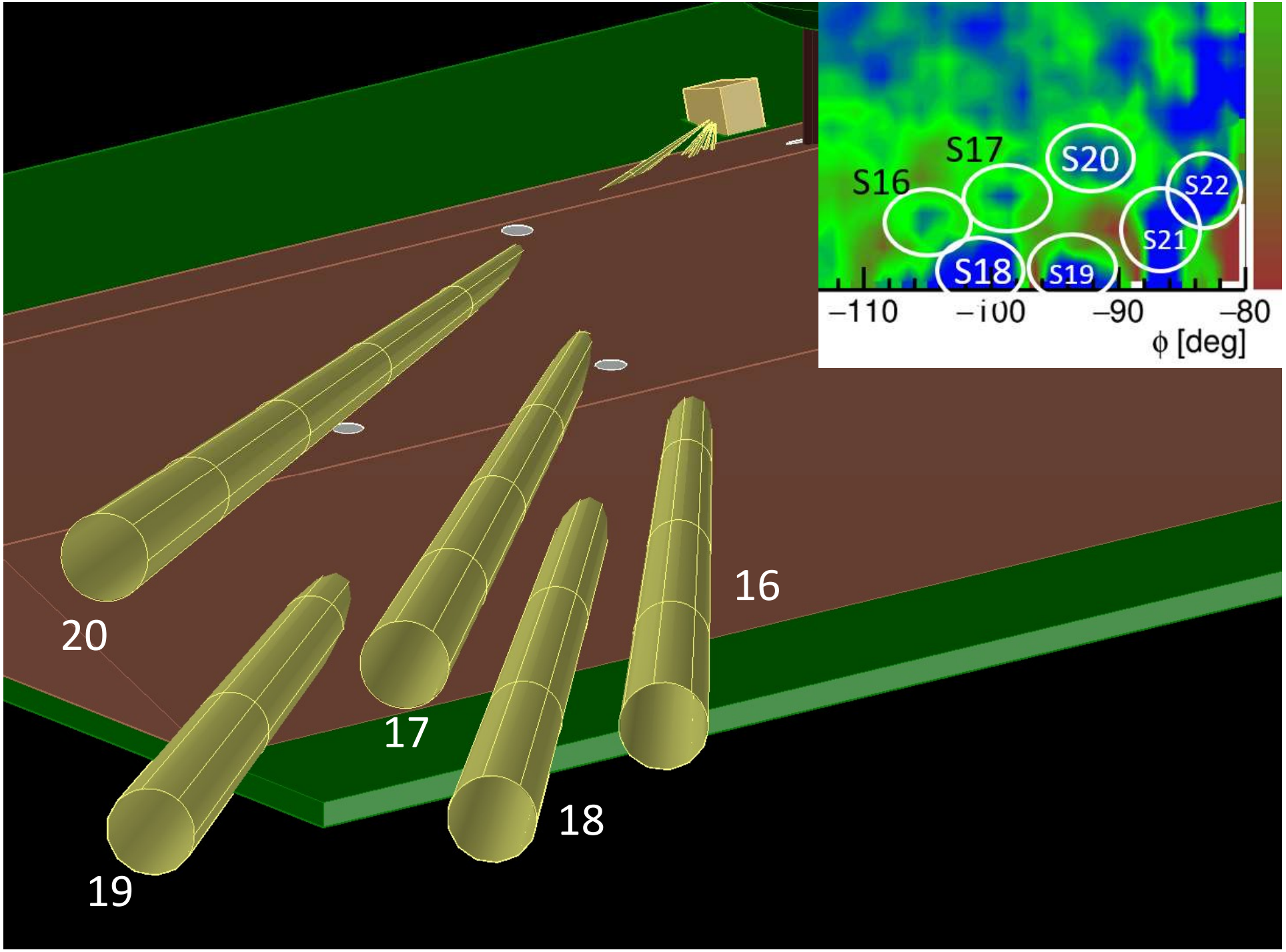
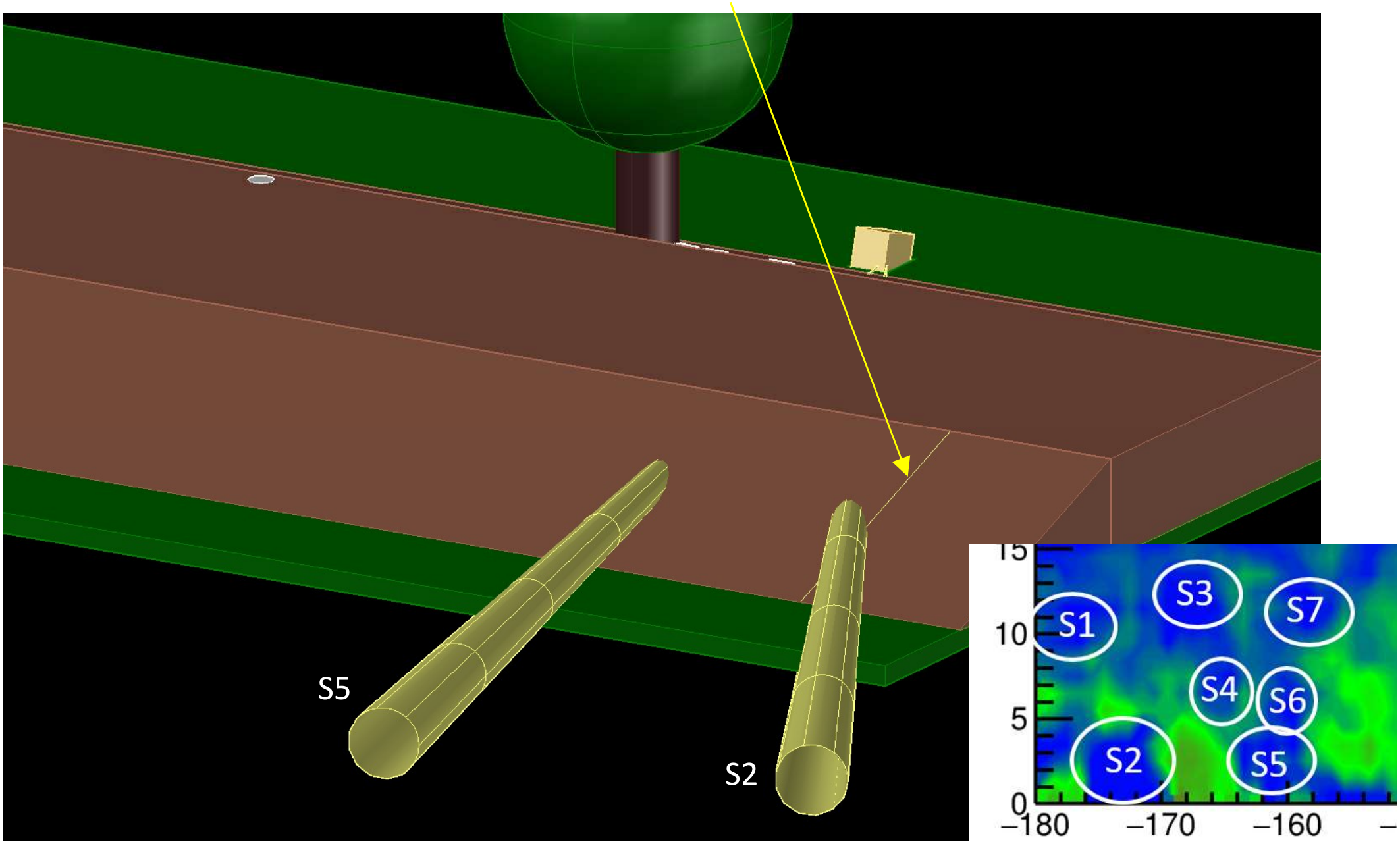
The MIMA detector in Firenze
(**M**uon **I**maging for **M**ining and **A**rchaeology)



- Based on **plastic scintillators**
- **30 W** total power consumption
- 50 cm x 50 cm x 50 cm
- ~ **10 mrad** angular res.
- **Altazimutal** mounting

MIMA
MUON DETECTOR


10
13
14
8
15
T
S10
S13
S14
S15
S8
S11
S9
S12
−150
−140
−130
−120


S16
S17
S20
S22
S21
S18
S19
−110
−100
−90
−80
ϕ [deg]
20
17
19
18
16

Holes were found also on the river side. This line shows a coordinate of one of these holes.