



# MUCH (MUography CHerenkov)

Radiografia e tomografia non invasiva di strutture tettoniche e geologiche di grandi dimensioni

Oswaldo Catalano

INAF- IASF Palermo

per la collaborazione MUCH

**TEAM MUCH**

# TEAM MUCH

Numero di partecipanti INAF al progetto: 13 + 4 associati per un totale di 4 FTE/anno

Unità operativa INAF	Responsabile
IASF-Palermo	Osvaldo Catalano
OACT	Giuseppe Leto
OAB	Daniele Spiga
IASF - Bologna	Fulvio Gianotti
OAPA	Fabio D'Anca

INAF	
IASF-Palermo	Simulazioni evento fisico Progettazione/realizzazione elettronica Progettazione meccanica Calibrazioni end to end camera Integrazione struttura telescopio-camera Analisi dati
OACT	Progettazione/realizzazione elettronica dei sistemi ausiliari (pannelli solari, GPS, Housekeeping) Supporto logistico a Serra La Nave ed Etna
OAB	Test e misure proprietà delle componenti ottiche a scala ridotta Test e misure proprietà delle proprietà ottiche del sistema ottico
IASF - Bologna	Realizzazione acquisizione dati Controllo remoto telescopio Analisi ed controllo qualità dati
OAPA	Progettazione/realizzazione meccanica
WEEROC (Francia)	
WEEROC	Progettazione/realizzazione elettronica di front-end

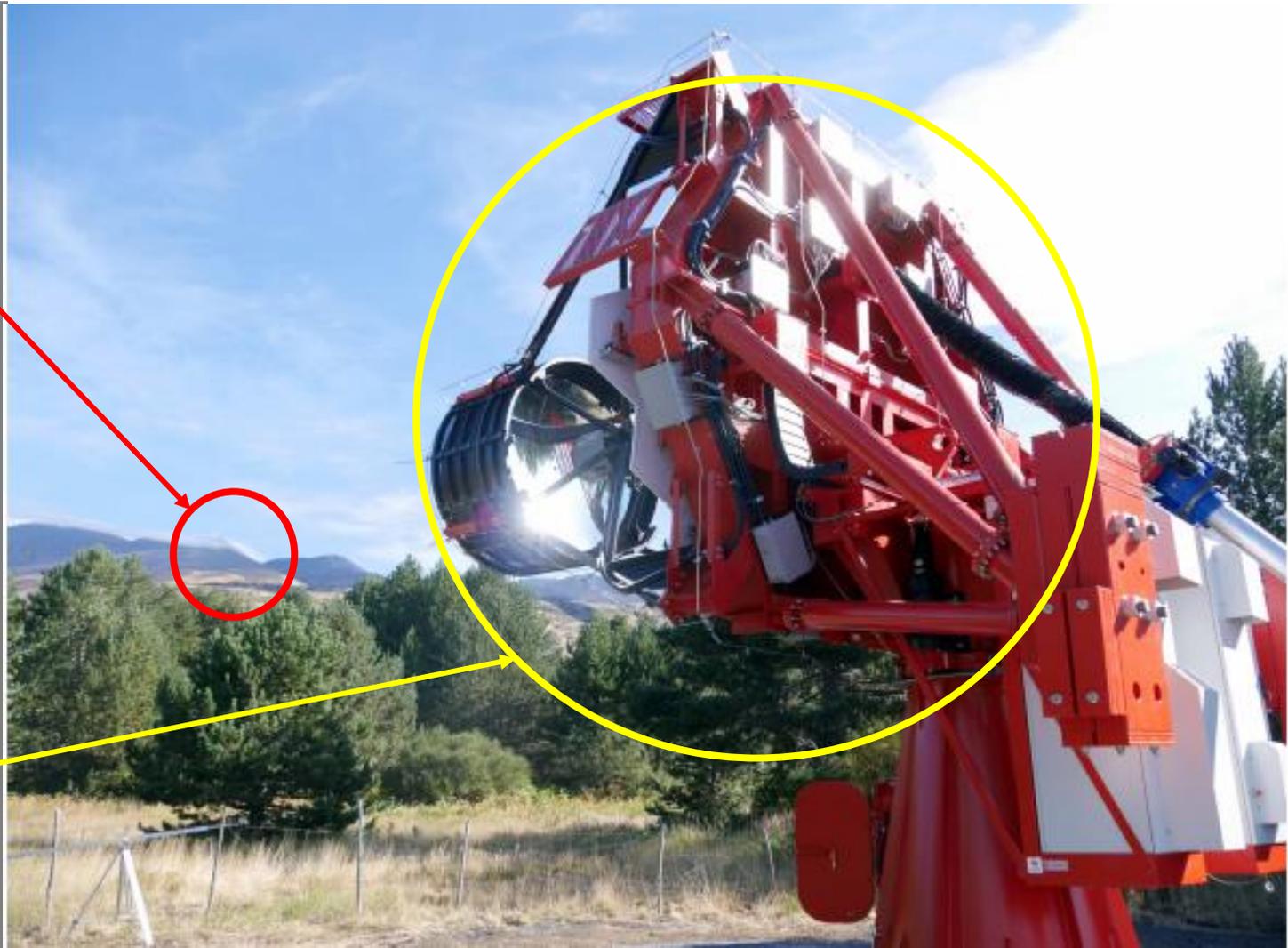
**ASPETTI SCIENTIFICI/TECNOLOGICI**

Un'applicazione innovativa delle tecnologie dell'astronomia moderna "Made in INAF"

## EVOLUZIONE DEL CONCETTO ASTRI

Vulcano

ASTRI

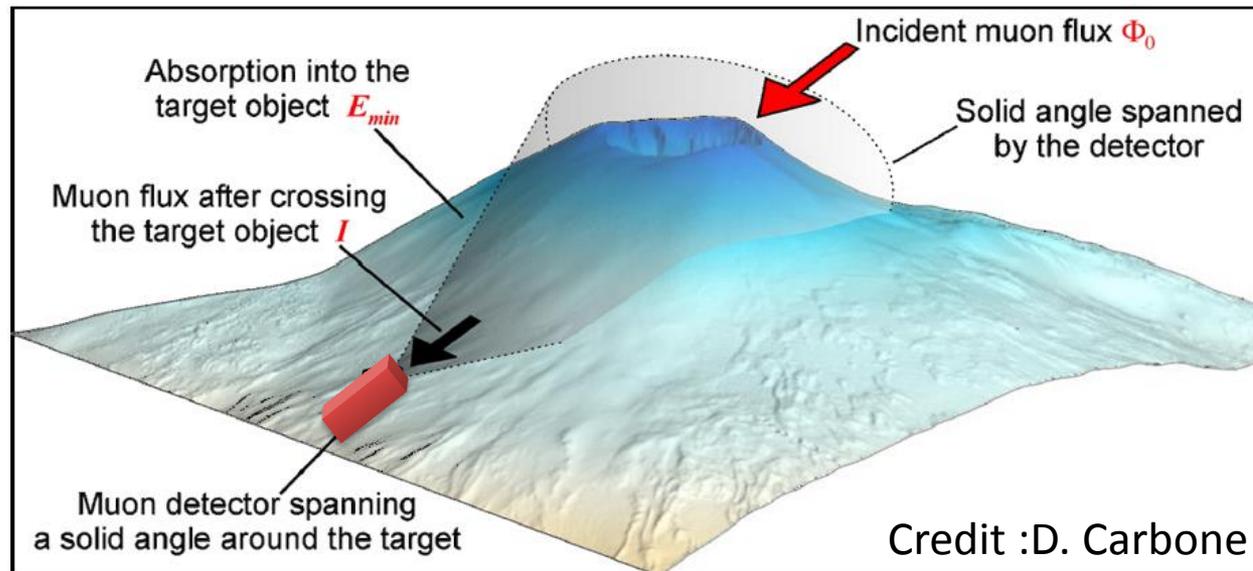


## Principio dell'immagine muonica

La distribuzione della densità all'interno di un vulcano può essere determinata misurando l'attenuazione differenziale del flusso di muoni in funzione della quantità di roccia attraversata lungo diverse direzioni. Qualsiasi variazione del flusso di muoni si traduce in una differenza nell'opacità ( $X$ ) che è definita come:

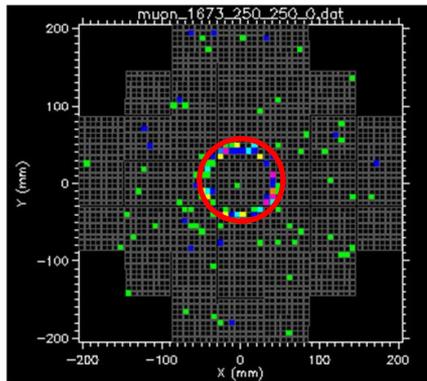
$$X(L) \equiv \int_L \rho(\xi) d\xi \text{ (g cm}^{-2}\text{)}$$

dove  $\rho$  è la densità e  $\xi$  è la coordinata spaziale misurata lungo la traiettoria  $L$ .



# VANTAGGI

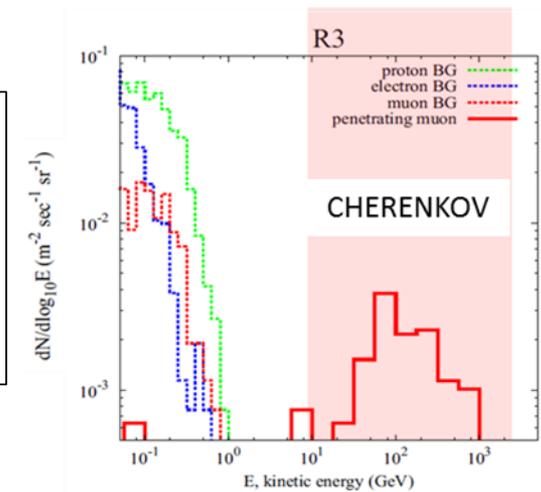
- Assenza quasi totale di coincidenze accidentali, ovvero di rumore, dato che i muoni vengono rivelati attraverso i fotoni che puntano verso l'ottica del telescopio (segnale direzionale ed altamente collimato), condizione che elimina anche il problema del back-flux, presente nella muografia ottenuta con i metodo tradizionali
- La tecnica di rivelazione consente di stimare, direttamente nel sito di installazione, lo spettro in energia dei muoni incidenti, necessario per ricavare l'assorbimento all'interno del target
- Analisi geometrica relativamente semplice dell'anello Cherenkov permette di ricostruire i parametri fisici del muone, cioè la sua energia e la direzione di arrivo



- Il raggio del ring corrisponde all'angolo Cherenkov  $\Theta$
- $E_\mu$  data da :

$$E_\mu = \frac{0.105}{\sqrt{1 - (n \cos \Theta)^{-2}}} \text{ (GeV)}$$

- La posizione del centro del ring identifica la direzione del muone rivelato rispetto all'asse ottico del telescopio



- Assenza di contaminazione del flusso rivelato di muoni da parte di altre particelle cariche o di muoni a più basse energie (riduzione drastica del livello di incertezza sulla stima della distribuzione delle densità all'interno della struttura massiva)

## ASPETTI SCIENTIFICI/TECNOLOGICI

- Il progetto, con una tecnica di nuova concezione, si basa sulla rivelazione e localizzazione spaziale di particelle altamente penetranti, muoni, che attraversano un target massivo
- Lo strumento, costituito da un ottica e una fotocamera multipixels posta al fuoco del sistema ottico, rivela la luce Cherenkov (nelle bande dell'UV e visibile) emessa dai muoni lungo la parte finale del loro percorso

Muoni che attraversano il cratere SE dell'Etna

luce Cherenkov

telescopio MUCH

anello Cherenkov

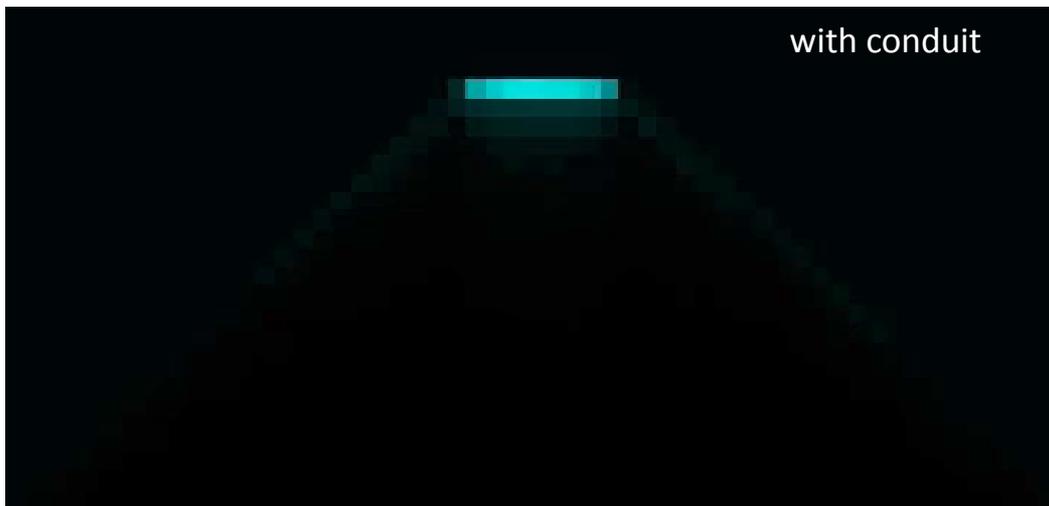


Poiché i muoni interagiscono molto poco con la materia, possono attraversare gran parte della struttura rocciosa, perdendo una frazione di energia proporzionalmente allo spessore delle rocce attraversate. La distribuzione della densità dell'interno di un vulcano, per esempio, può essere determinata misurando l'attenuazione differenziale del flusso muonico in funzione della quantità di rocce attraversate lungo direzioni diverse.

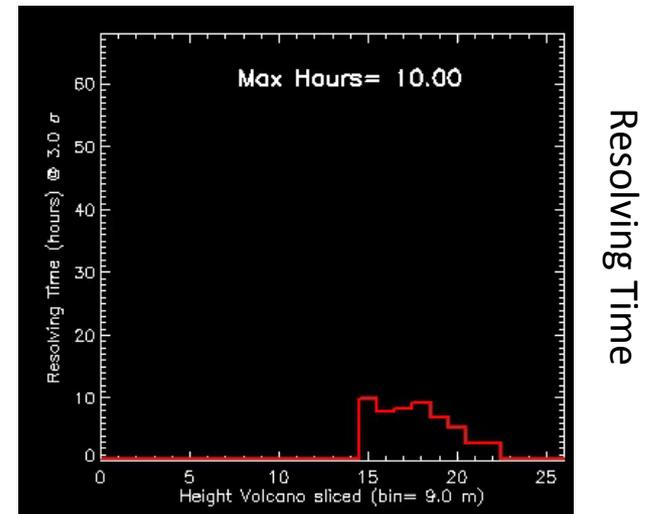
## misura del condotto lavico di un Vulcano



- Immagini ad alta risoluzione (4.5 m tipica)
- Alto contrasto sia per densità elevate che basse del target rispetto alla densità media della struttura massiva
- Risoluzione di targets all'interno di strutture massive di diametri dell'ordine del Km di roccia ( $2.65 \text{ g/cm}^3$ )



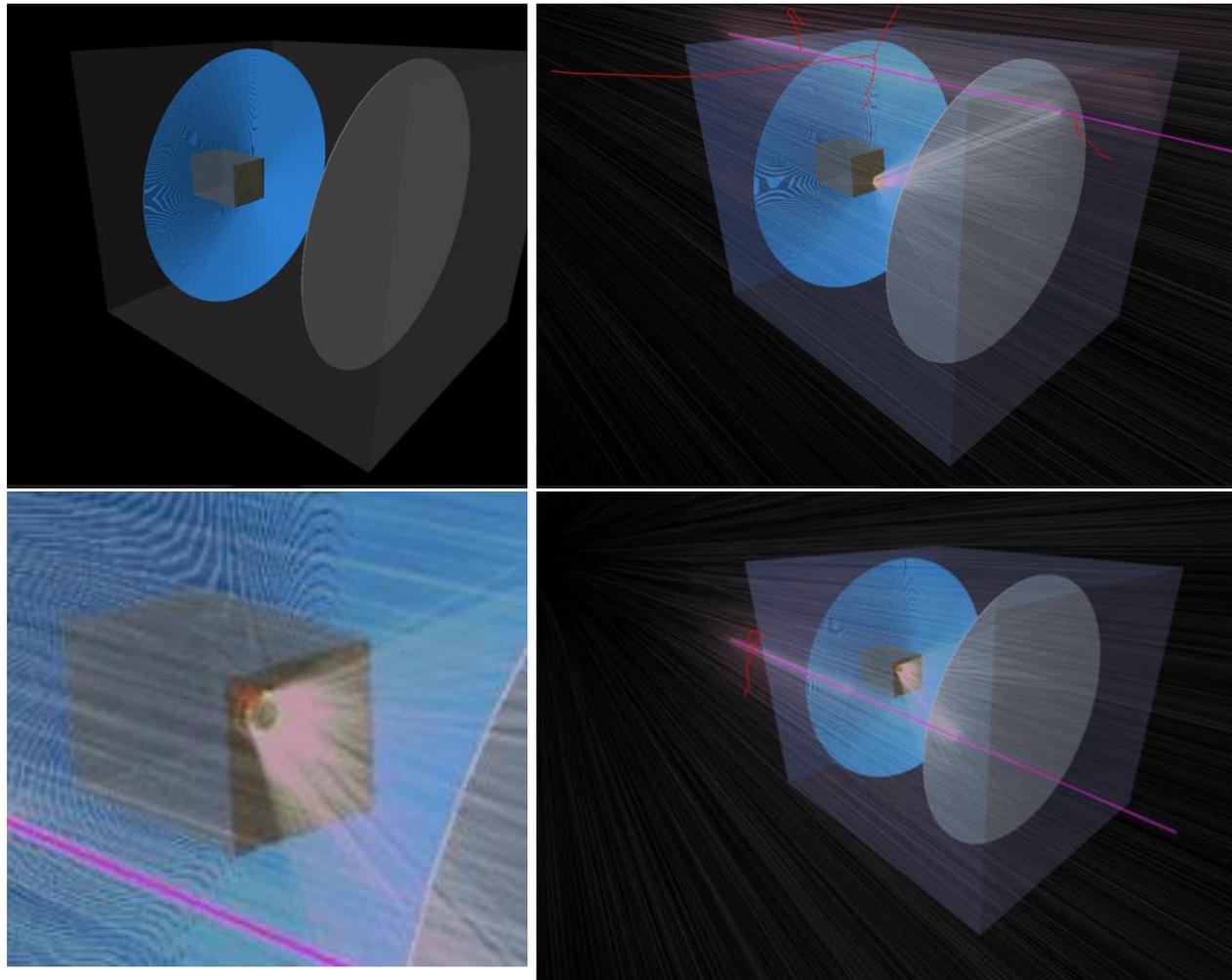
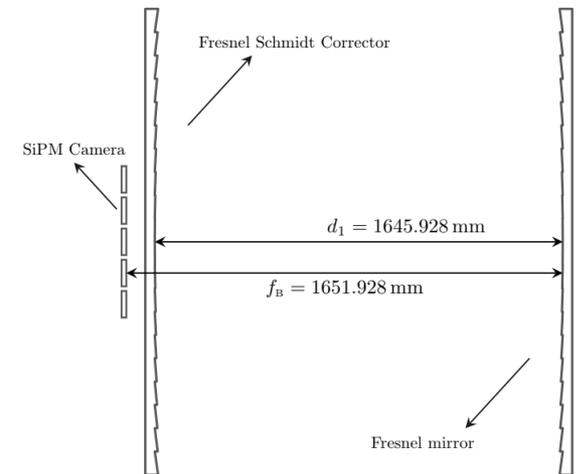
Immagini simulate dell'interno di una struttura vulcanica.  
Il condotto lavico di 50 m di diametro è visibile.



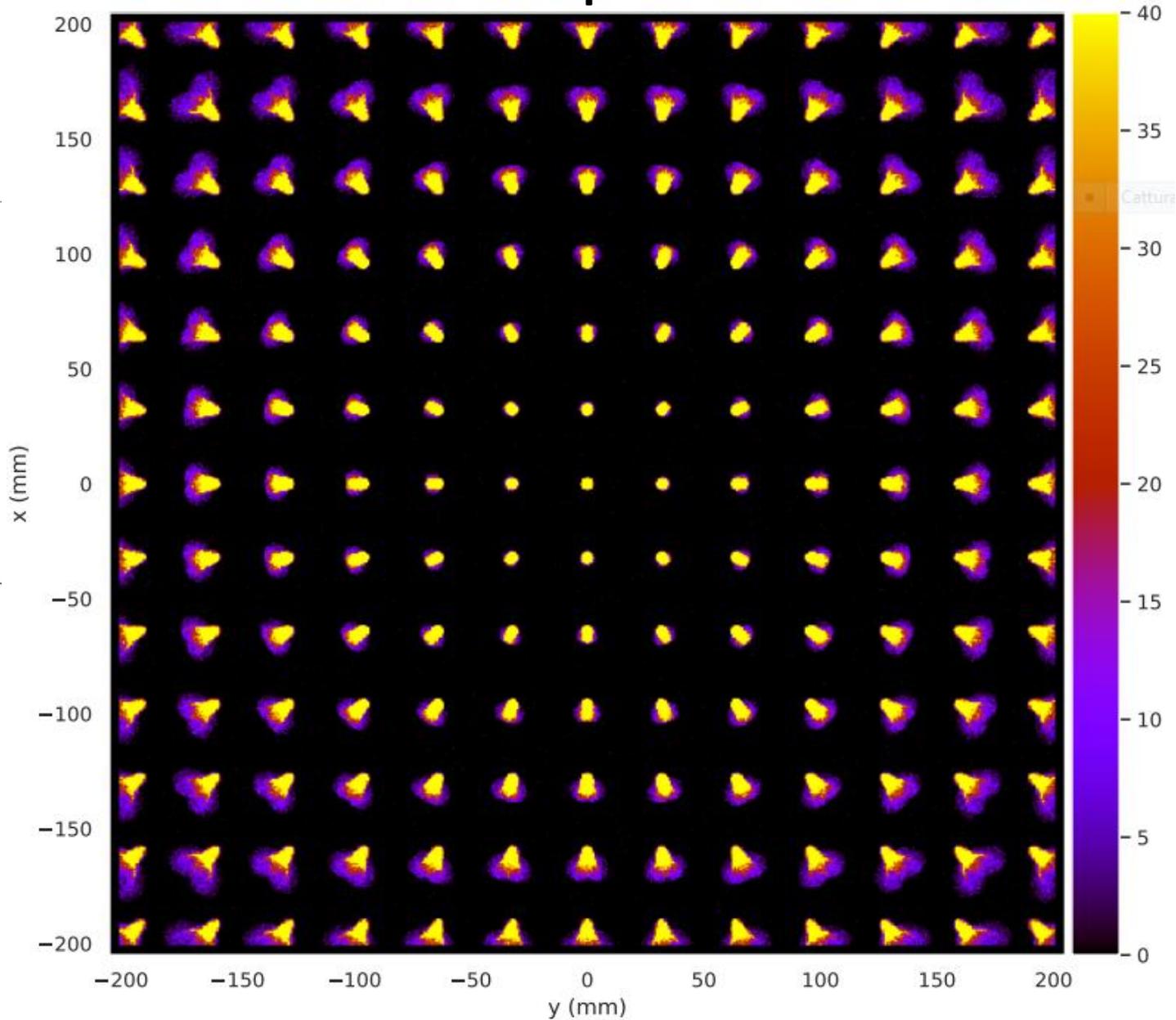
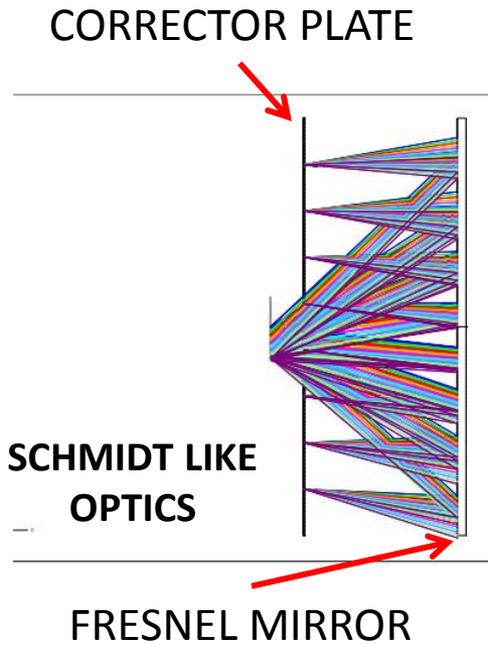
# INNOVAZIONE TECNOLOGICA

**CORRECTOR PLATE e FRESNEL MIRROR in acrilico (PMMA) progettati e simulati con GEANT4.**

## OTTICA COMPATTA



# OPTICS Point Spread Function



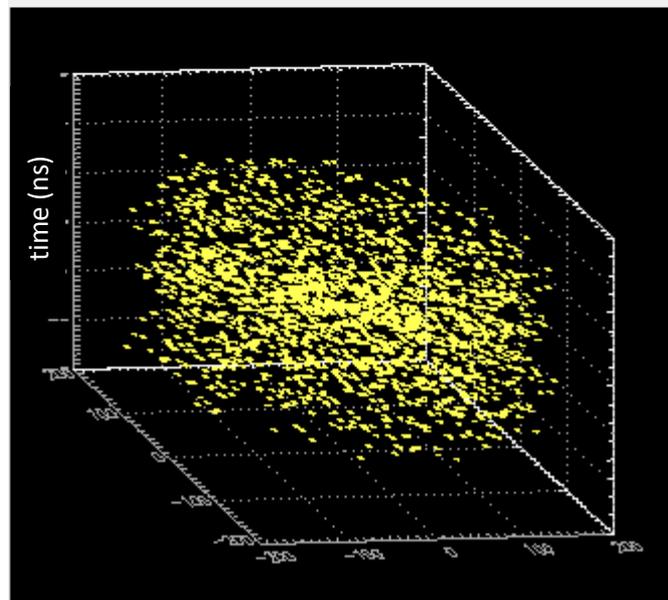
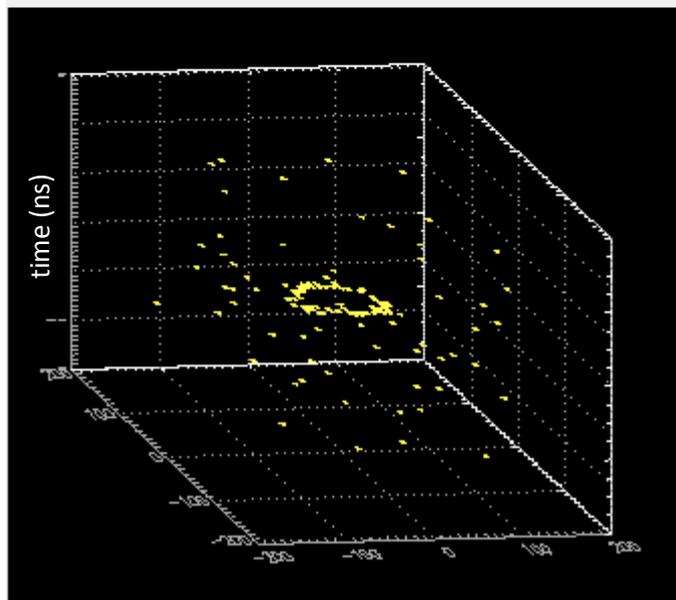
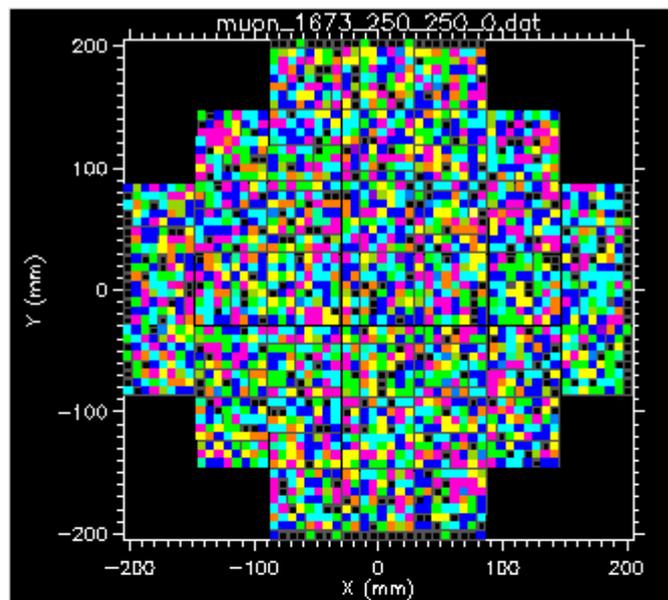
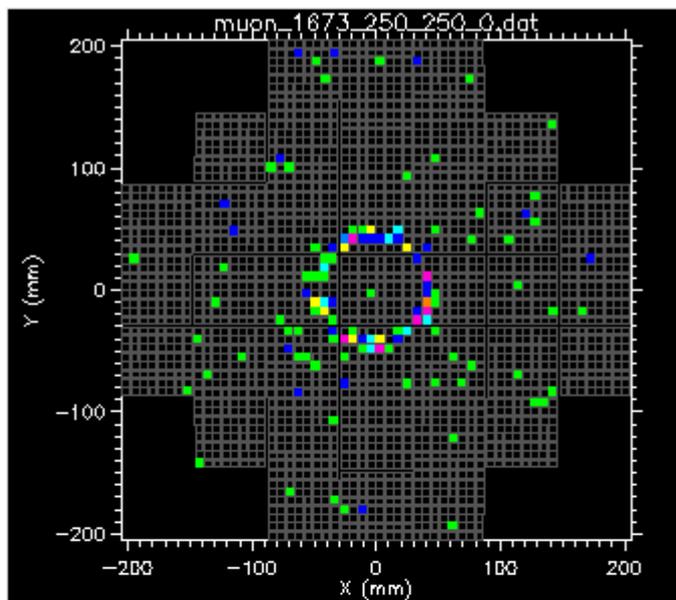
# INNOVAZIONE TECNOLOGICA



<b>Detector Read-Out</b>	SiPM, SiPM array
<b>Number of Channels</b>	64
<b>Signal Polarity</b>	Positive
<b>Sensitivity</b>	Trigger on 1/3 of photo-electron
<b>Timing Resolution</b>	Better than 35 ps FWHM on single photo-electron
<b>Dynamic Range</b>	Up to 2000 photo-electrons @ $10^6$ SiPM gain
<b>Packaging &amp; Dimension</b>	BGA 20x20 mm <sup>2</sup>
<b>Power Consumption</b>	310 mW – Supply voltage: 1.2 V
<b>Inputs</b>	64 analogue inputs with independent SiPM HV adjustments
<b>Outputs</b>	2 direct outputs per channel, selectable channel-per-channel, either : <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 LVDS triggers</li> <li>• 2 TTL triggers</li> <li>• 1 TTL triggers and 1 analog outputs</li> <li>• 2 analog outputs</li> </ul> 2 multiplexed analogue outputs 3 NOR64 trigger outputs
<b>Internal Programmable Features (I2C)</b>	64 HV adjustment for SiPM (64 x 8 bits), 3 trigger threshold tuning (10bits), channel-by-channel gain and shaping time adjustment ( $\tau = 20$ ns to 300 ns), individual trigger masking and cell powering.

Weeroc acknowledge exclusive right and IP transfer of the test board. Exclusive right in the muography application domain of the RADIOROC ASIC for the MUCH muography project is possible pending further IP contract.

LO STESSO  
EVENTO



Single Photon Counting - 5 NSB : Trigger  $\geq 3$  pe  
Clear signal (Signal dominated)

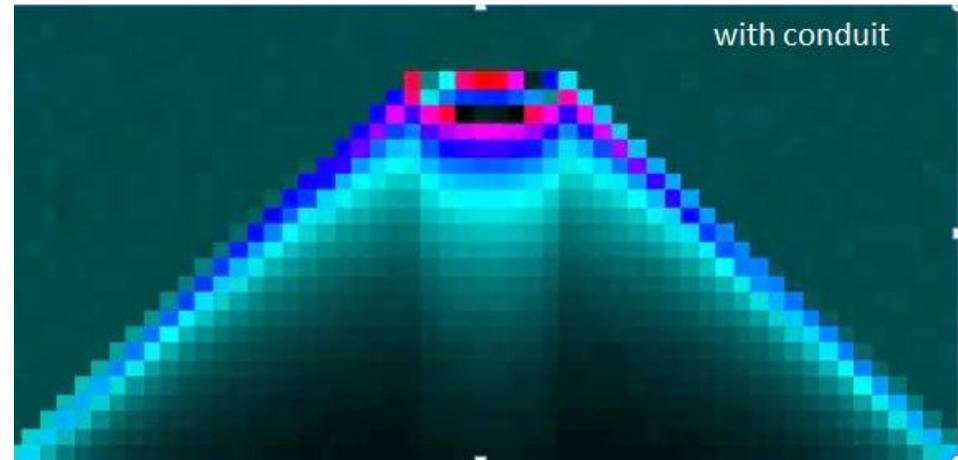
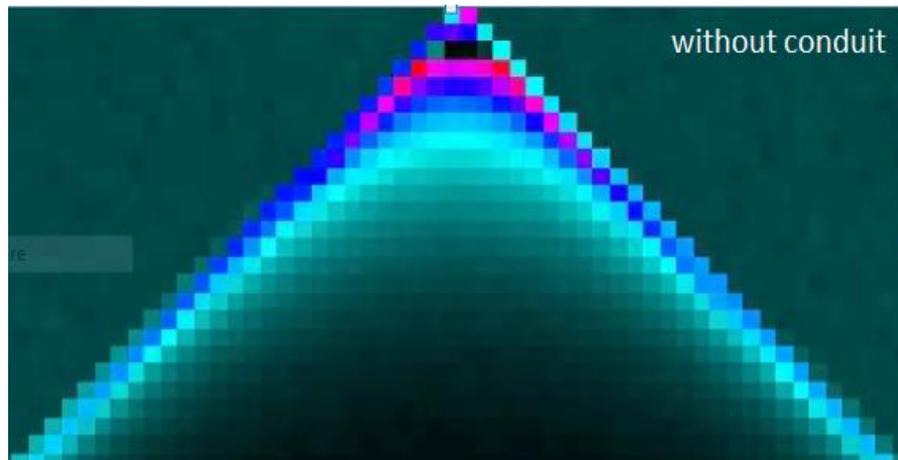
Integrazione 20 ns - 5 NSB : Trigger  $\geq 3$  pe  
Signal buried by the NSB (Noise dominated)

**RISULTATI E/O PROSPETTIVE**

ALCUNE POSSIBILI APPLICAZIONI

Prospezioni geologiche non invasive

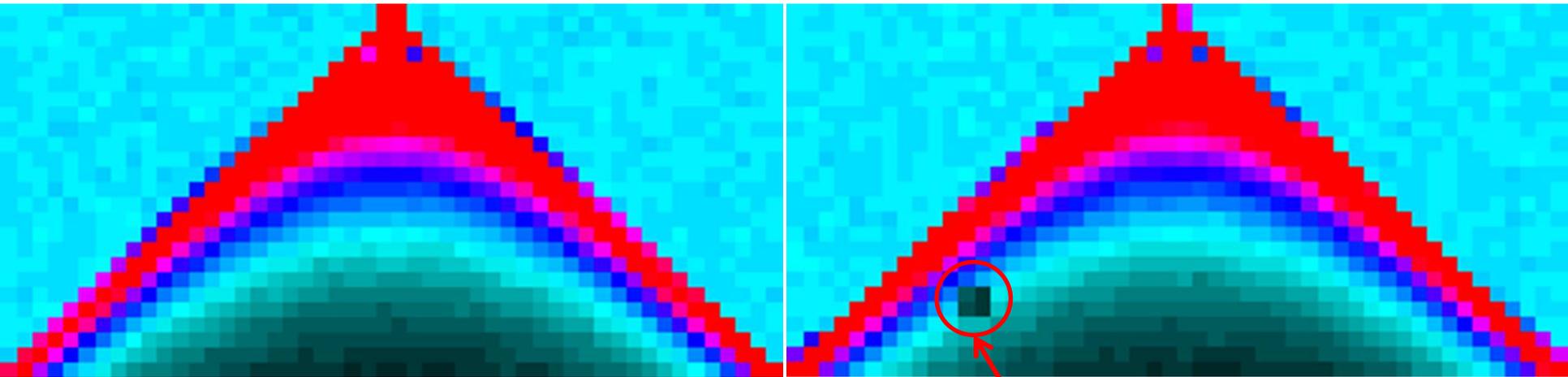
- Vulcani (misura del condotto lavico)
- Sacche d'acqua all'interno di colline o terrapieni
- Giacimenti minerali pesanti



ALCUNE POSSIBILI APPLICAZIONI

Monitoraggio non invasivo di strutture civili

- Centrali nucleari
- Sistemi di contenimento di materiali radioattivi e di stoccaggio

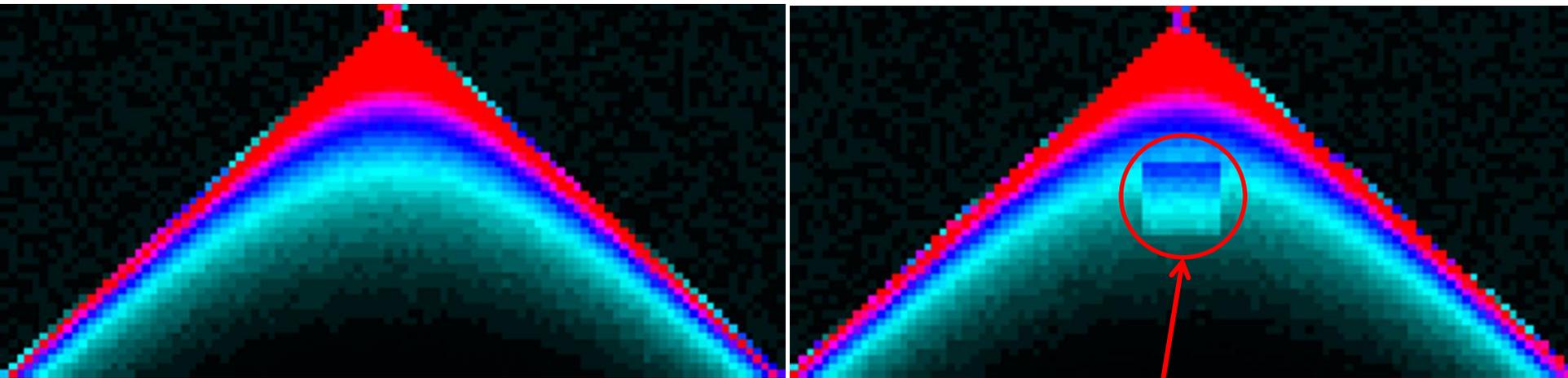


Box di densità 19 g/cm<sup>3</sup>

ALCUNE POSSIBILI APPLICAZIONI

Ricerche archeologiche non invasive

- Sondaggio siti archeologici per strutture interrate
- Radiografia della struttura interna di piramidi



Box vuoto

# Programmazione e fondi

# PROGRAMMAZIONE E FONDI

TIME SCHEDULE											
TASKS	4 MONTHS	DONE	first year			second year			third year		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Design and optics simulations	1										
Reduced size optics procurement	1										
Optics lab test on reduced size optics	1										
Full size Optics manufacturing	1										
Optics test	1										
SiPM procurement	2										
Realization FE and FPGA boards	2										
Realization Back-End											
Realization Voltage Disibution board	2										
FE-FPGA-BE-VDB- DAQ integration and test	1										
Focal plane realization, mechanics & others	2										
Container purchase	1										
Integration of Optics and Camera	1										
Integration inside container and Telescope commisioning	2										
DATA HANDLING AND ANALISYS	3										

	Attrezzature, strumentazione e prodotti software	Altre prestazioni di terzi (industrie)	Contratti per il personale (vedi tabella personale da reclutare)	Missioni	Totale
<i>IASF-PA</i>	316	305	300 (1 AdR + 2 TD)*	40	961
<i>OACT</i>	47	15	55 (1 TD)**	30	147
<i>OAB</i>	25	15	55 (1 TD)**	35	130
<i>IASF-BO</i>	30		55 (1 TD)**	20	105
<b>TOTALE</b>	<b>668</b>	<b>85</b>	<b>465</b>	<b>125</b>	<b>1343</b>

<b>IASF-Palermo</b>	1 AdR 2 TD x 2 anni *
<b>OACT</b>	1 TD x 1 anno **
<b>OAB</b>	1 TD x 1 anno **
<b>IASF-BO</b>	1 TD x 1 anno **

**Tabella riassuntiva dei costo del progetto nei tre anni - 1 telescopio prototipo (valori in migliaia di euro)**

# Leadership e Criticità

La leadership del progetto MUography CHERENKOV è INAF  
Brevetto attivo in Italia, Unione Europea, USA e a breve in Giappone.

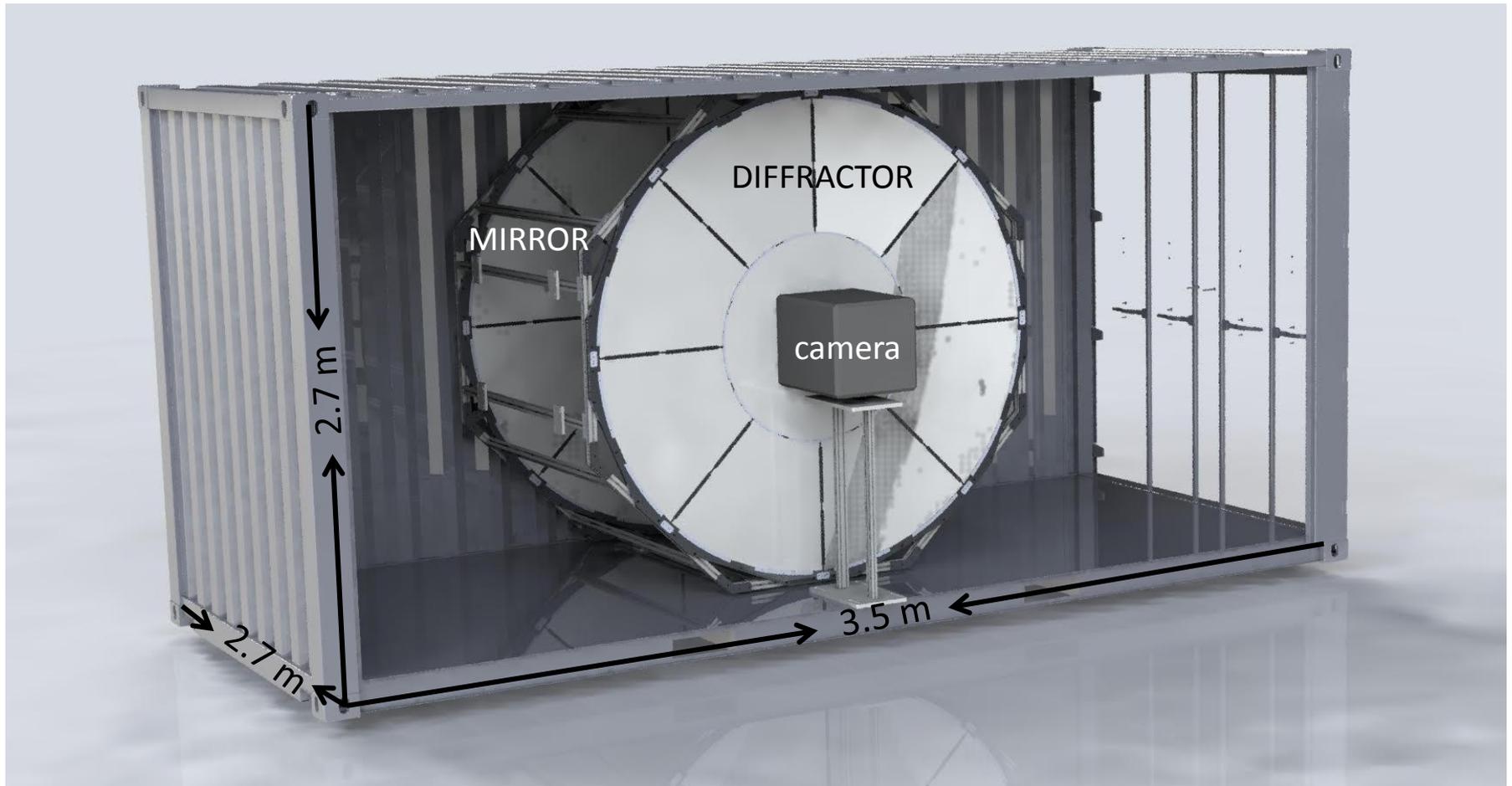
### CRITICITA'

L'esperienza maturata con ASTRI è di grande utilità nella gestione delle eventuali criticità. Ad oggi una possibile criticità, comune a tutti, la lentezza burocratica nel bandire ed espletare le gare per gli acquisti.

### INTERESSE DEI MEDIA E DELLA COMUNITA' SCIENTIFICA

- **Discovery Channel** in Canada with the series, "DAILY PLANET" – the world's only one-hour nightly science and technology series
- Articolo sulla rivista **Scientific American** tedesca  
<http://www.spektrum.de/news/kann-man-mit-einem-teleskop-durch-den-aetna-blicken/1377309>
- Articolo sulla rivista **IEEE Spectrum** edita dall'IEEE con sede a New York  
<http://spectrum.ieee.org/tech-talk/at-work/test-and-measurement/to-see-deep-inside-a-volcano-use-a-telescope-built-for-quasars>
- Contatti telefonici con la giornalista americana **Liz Kruesi**
- Il 7 di Novembre 2016 firmato a Tokyo, presso l'Ambasciata Italiana, un accordo di collaborazione scientifica tra INAF e ERI richiesto dall'Istituto di **Earthquake Research Institute, University of Tokyo**
- Lettera di intenti collaborazione scientifica tra **INAF e Weeroc** in data 1 Luglio 2019
- Interviste sull'argomento di "Rai Cultura" e "Focus"

## RENDERING DEL TELESCOPIO MUCH



PESO TELESCOPIO  $\approx 200$  Kg  
CONSUMO CAMERA  $\approx 200$  W

Il prototipo di telescopio è concepito come uno strumento trasportabile ed energeticamente autosufficiente.

**GRAZIE PER L'ATTENZIONE**