



Il Colle di
Galileo

Muografia: l'uso dei muoni per l'imaging radiografico

Muography, X-Ray imaging with muons

Lorenzo Bonechi, Raffaello D'Alessandro

Riassunto. Dopo tanti anni, i muoni atmosferici sono tornati a essere dei protagonisti presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia di Firenze. Lo stesso Dipartimento che ha visto nascere la fisica dei raggi cosmici con Bruno Rossi e Giuseppe Occhialini.

Parole chiave: muografia, imaging, archeologia.

Introduzione

Dall'interazione dei raggi cosmici primari con i nuclei dell'atmosfera si ha la produzione naturale dei muoni atmosferici (Fig. 1). Questi raggiungono la superficie terrestre a una velocità di circa $1/\text{cm}^2/\text{min}$ con una distribuzione di energia ben nota, ampia e continua e un'energia media di $\sim 4 \text{ GeV}$ [1] che si estende fino ai TeV. Queste particelle sono estremamente penetranti e possono raggiungere profondità di oltre 500 metri nel suolo a seconda della densità del materiale e dell'energia dei muoni (Fig. 2).

L'attenuazione del flusso di muoni atmosferici che attraversa la materia può quindi essere utilizzata per stimare la densità e/o l'estensione delle strutture attraversate.

Abstract. How atmospheric muons made a comeback to the Department of Physics and Astronomy in Firenze. The same Department that saw the birth of cosmic ray physics with Bruno Rossi and Giuseppe Occhialini.

Keywords: muography, imaging, archaeology.

Introduction

Atmospheric muons are naturally produced in the atmosphere by the interactions of primary cosmic rays with the nuclei present in the atmosphere itself (Fig. 1). They reach the surface of the Earth at a rate of about $1/\text{cm}^2/\text{min}$ with a well-known, broad, continuous energy distribution and a mean energy of $\sim 4 \text{ GeV}$ [1] extending to TeVs. These particles are extremely pen-

Mediante un confronto con il rate di background del flusso muonico, la frazione di muoni rilevati lungo un dato percorso fornisce la densità integrata lungo quel percorso (Linea di vista, Line of Sight).

Il principio è analogo a quello della radiografia a raggi X, dove è possibile visualizzare gli organi interni del corpo umano grazie al diverso assorbimento delle radiazioni da parte dei tessuti che lo compongono.

Un'altra possibilità consiste nel quantificare la deflessione del muone in uscita rispetto alla sua direzione iniziale dovuta allo scattering multiplo interno, ma si tratta di una tecnica diversa da quella utilizzata dal nostro gruppo e non sarà più menzionata in questo documento.

Una delle prime applicazioni della tecnica della radiografia muonica (muografia) fu realizzata nel 1971 dal premio Nobel per la Fisica (1968) Luis Alvarez e dai suoi collaboratori per la ricerca di camere segrete all'interno della piramide

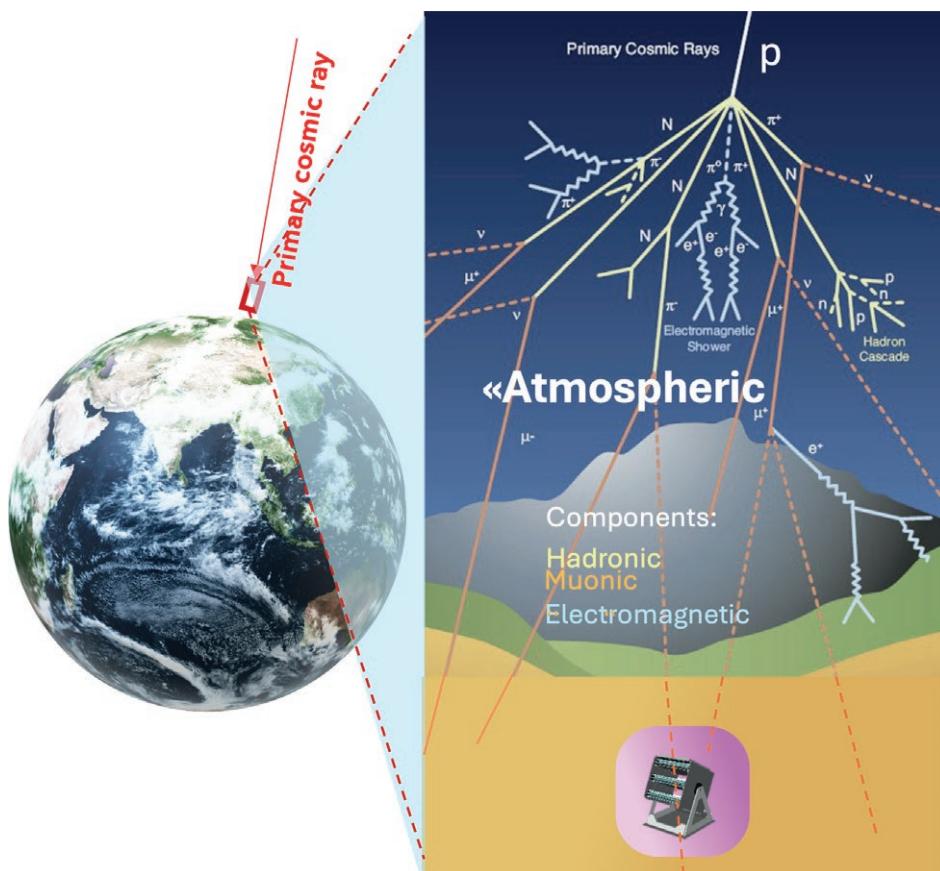


Figura 1. Interazione primaria nell'atmosfera terrestre.

Figure 1. Primary interaction in the Earth atmosphere.

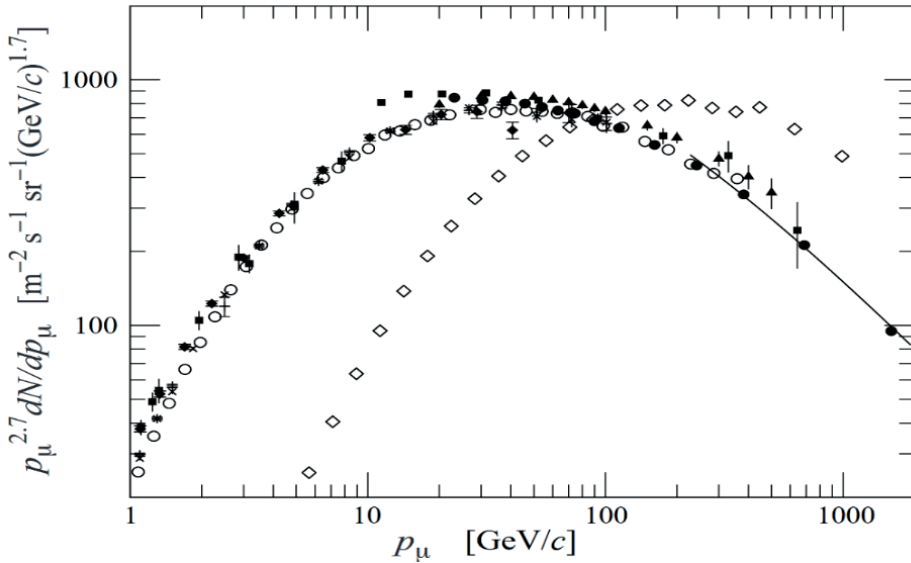


Figura 2. Frazione di muoni in funzione dell'impulso. La distribuzione si sposta verso le alte energie per i muoni vicini all'orizzonte. <https://pdg.lbl.gov>.

Figure 2. Muon flux as a function of momentum. The distribution hardens for muons near the horizon. <https://pdg.lbl.gov>.

di Chefren [2]. Installando una camera a scintillazione alla base della piramide, all'interno dell'unica camera conosciuta, riuscirono a dimostrare l'assenza di altre camere nel volume indagato (furono in grado di identificare una variazione del

etrating and can reach depths of more than 500 metres below the surface depending on the material density and muon energy (Fig. 2).

The attenuation of the atmospheric muon flux passing through matter, can thus be used to estimate the density and/or the extension of the structures through which they pass. Through a comparison to background muon flux rates, the fraction of muons detected along a given path provides the integrated density length along that path (Line of Sight).

The principle is similar to that of X-rays where it is possible to visualize the internal structure of the human body due to the different absorption of radiation by the tissues that compose it. Another possibility is to measure the deflection of the outgoing muon respect to its initial direction due to internal multiple scattering, but this is a different technique to the one used by our group and will not be referred to any more in this paper.

One of the first applications of muon radiography (Muography) was, in 1971, by Luis Alvarez (1968 Physics Nobel Prize) and his collaborators who were searching for hidden chambers in the Chephren pyramid [2]. Using a spark chamber placed in the only known chamber, located at the base of the pyramid, they were able to demonstrate the absence of further chambers in the investigated volume (they were able to identify a variation of 2% in the thickness of the limestone rocks that compose the pyramid along a certain direction). In Fig. 3 we show how a modern day measurement might take place without having to place the detector inside the volume itself.

After a few decades of tentative experiments, Muography took off in the first decade of the new millennium, when the first studies of volcanoes were performed in Japan. These clearly

2% nello spessore delle pietre calcaree che compongono la piramide lungo una certa direzione). Nella Fig. 3 viene mostrato come potrebbe avvenire una misurazione moderna senza dover collocare il rivelatore all'interno del volume stesso.

Dopo alcuni decenni di tentativi, la muografia è decollata nella prima decade del nuovo millennio, quando in Giappone sono stati effettuati i primi studi sui vulcani. Questi hanno dimostrato chiaramente il potenziale di questa tecnica, che sfrutta i muoni più energetici, per studiare la struttura interna dei vulcani [3]. Per una descrizione più dettagliata della tecnica e della relativa applicazione si rimanda a [4].

Muografia a Firenze, gli esordi

Nel 2008 abbiamo ottenuto un finanziamento per lo sviluppo di moduli di sensori ottici avanzati SSOA (2008). Questi moduli erano basati su Fotomoltiplicatori al silicio, che all'epoca rappresentavano l'ultimo sviluppo nel campo della rilevazione dei fotoni. Contemporaneamente, un gruppo di Napoli guidato dal Prof. Paolo Strolin aveva deciso di applicare la muografia alla mappatura del Vesuvio (Fig. 4), il progetto Mu-Ray finanziato dall'INFN CSN5. Il Dott. Guido Castellini, caro amico e ricercatore senior del CNR, ci mise in contatto con il gruppo di Napoli, citando le nostre competenze in materia di tracciamento di particelle e sensori ottici.

Muon (absorption) radiography

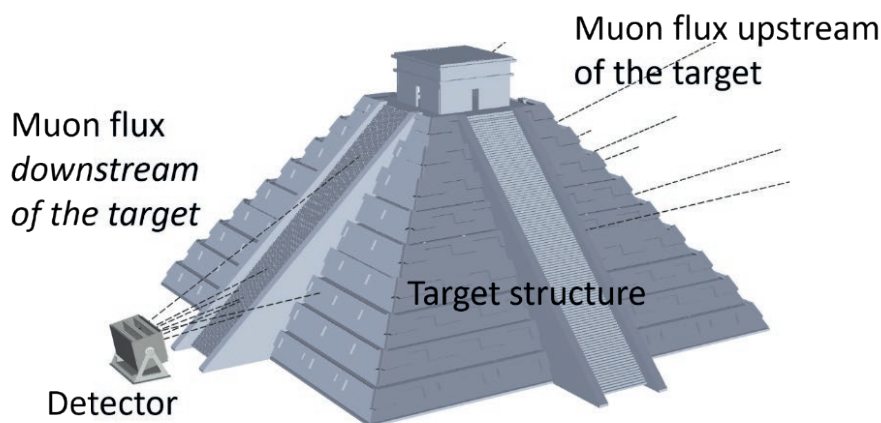


Figura 3. Pittogramma di un'ipotetica indagine muografica di una piramide.

Figure 3. Pictogram of a hypothetical muographic survey of a pyramid.

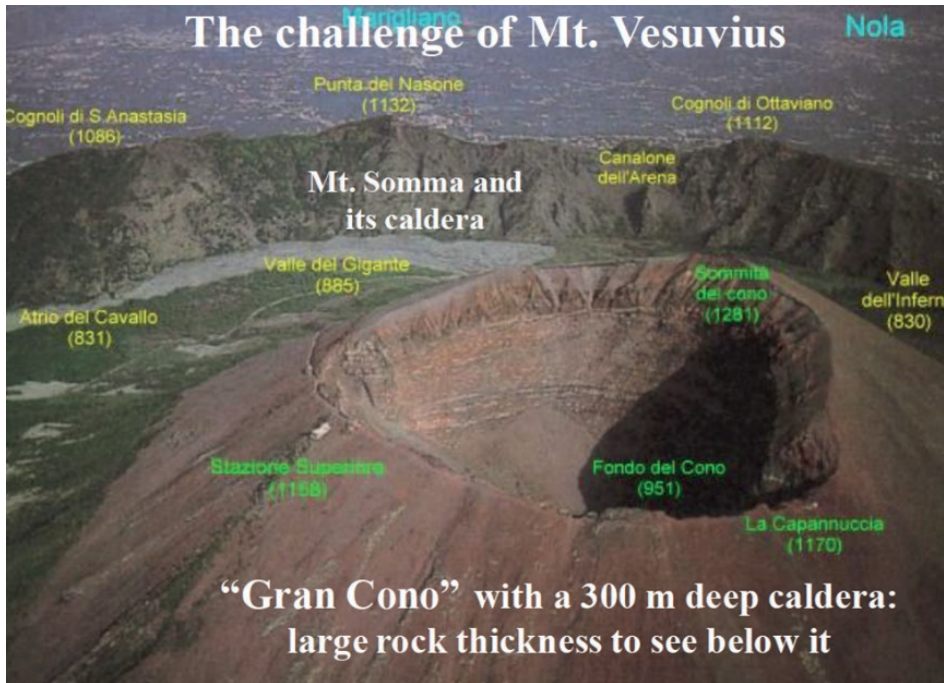


Figura 4. Vista aerea del cono del Vesuvio all'interno della caldera del vulcano.

Figure 4. Aerial view of the Vesuvius cone within the caldera of the volcano.

demonstrated the potential of this technique, exploiting the most energetic muons, to study the internal structure of volcanoes [3]. A more detailed description of the technique and its application can be found in [4].

Muography in Firenze, beginnings

In 2008, we received funding for the development of advanced optical sensor modules SSOA (2008). These modules were based on Silicon Photomultipliers, which at the time were a state-of-the-art development in the field of photon detection. At the same time a group in Naples led by Prof. Paolo Strolin had decided to apply Muography to the mapping of the Vesuvius (Fig. 4), the MuRay project financed by INFN CSN5. Dr. Guido Castellini, a close friend and senior researcher at CNR, put us in contact with the group in Naples, citing our expertise in particle tracking and optical sensors.

Thus an ongoing collaboration was started, dedicated to the mapping of the Vesuvius cone. This project (MURAVES) was a specially funded project by the Ministero della Ricerca and led by the Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. The first detectors were installed between the end of 2018 and the beginning of 2019 (see Fig. 5) inside a purposely built hut with a photovoltaic power source. Given the thickness of the surveyed zone (> 600 metres) the data taking will take up to ten years. A first very preliminary look at the data was published in 2022 and is shown in Fig. 6, with the empty cone region well reproduced by the data.



Figura 5 Uno dei tre rivelatori MURAVES installati presso Casina Amelia sulle pendici del Vesuvio. Il rivelatore è costituito da quattro piani traccianti da 1 m^2 .

Figure 5. One of the three MURAVES detectors installed at Casina Amelia on the slope of the Vesuvius. The detector consists of four one m^2 tracking planes.

Nacque così una collaborazione continuativa, dedicata alla mappatura del cono del Vesuvio.

Questo progetto (MURAVES) è stato finanziato specificamente dal Ministero della Ricerca e condotto dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. I primi rivelatori sono stati installati tra la fine del 2018 e l'inizio del 2019 (si veda Fig. 5) all'interno di una stazione di misura costruita ad hoc e dotata di una fonte di energia fotovoltaica. Considerato lo spessore della zona indagata (> 600 metri),

Muography in Firenze, growth

The MURAVES project not only gave us the opportunity to develop novel, rugged, and transportable detectors but, more importantly, allowed us to recruit PhD students and young post-docs, and consequently follow theses on Muography for the BSc or MSc programs for the Department of Physics and Astronomy.

This in turn led our group to branch out away from strictly volcanoes, and develop wholly new applications. One of the first was with the Sellafield nuclear waste repository in England, where we performed, on request of a Glasgow University group, an evaluation study on the possibility of applying transmission muography to their storage silos namely to identify the spent fuel caskets within (Fig. 7).

With financing from various sources (INFN, University), we developed and built a small portable muon tracker MIMA (Muon Imaging for Mining and Archaeology, Fig. 8) which is still with us today and has been used in various projects of which the most important has been the collaboration with the Parco Archeominerario di San Silvestro focused on the Temperino mine complex.

For the past eight years, this project has enabled us not only to increase our expertise in the field, but also to develop new and highly sophisticated algorithms for the three-dimensional reconstruction of the underground features found. The mine, situated near the Tuscan coast of Piombino, had been in use since the times of the Etruscans and was only closed in 1973

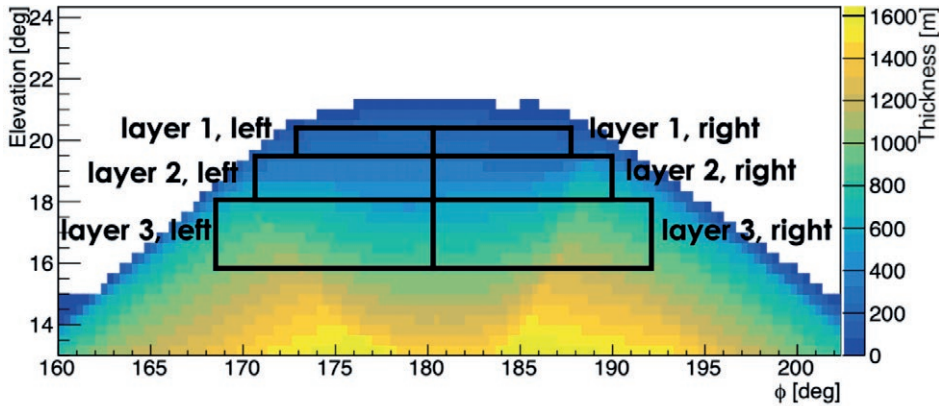


Figura 6. Prima misura delle asimmetrie di proiezione della densità relativa al Monte Vesuvio. Riprodotta da Ref [5].

Figure 6. First measurement of density projection asymmetries relative to mount Vesuvius. Reproduced from Ref[5].

l'acquisizione dei dati richiederà fino a dieci anni. Un esame preliminare ai dati è stato pubblicato nel 2022 ed è mostrato nella Fig. 6, con la regione del cono vuoto ben riprodotta dai dati.

Muografia a Firenze, sviluppo

Il progetto MURAVES non solo ci ha permesso di sviluppare nuovi rivelatori robusti e trasportabili, ma ci ha soprattutto dato la possibilità di reclutare dot-

(Fig. 9). It is now a tourist destination but with many uncharted tunnels and pits the localization of which could be of significant interest for further exploitation and for assessments related to site safety.

Thus, we started a formal collaboration with Parchi Val di Cornia SpA and, most importantly, with a team of geologists led by Prof. Nicola Casagli from the Department of Earth Sciences in Florence that is still ongoing. The aim has been to provide a muographic mapping of various points of interest above the mine tunnel that is currently open to tourists (Fig.10). This has proved, during the years, to have been an invaluable training ground for both code and hardware development. Fig. 11 highlights the state of the art we have reached with muographic imaging and the level of detail one can obtain from the data. The data taken during these campaigns was also integrated by our collaborators with geological surveys of the mine [6-7]. Through the combination of this information we were able to identify a high density ore deposit burrowing its way beside the Gran Cava (Fig. 12). In addition to the excellent results, this activity has allowed our team to grow thanks to the many students that, during the years have been captivated by the results obtained at the Temperino mine. In fact, a sizable section of the collaboration agreement with the Parchi Val di Cornia SpA has been dedicated to outreach activities and student engagement. This in turn has brought many talented individuals to engage in muographic projects, proving the benefits that derive from such activities.

torandi e giovani post-doc, e di conseguenza di seguire tesi sulla muografia per i corsi di laurea o di laurea magistrale del Dipartimento di Fisica e Astronomia.

Questo, a sua volta, ha spinto il nostro gruppo ad esulare dall'ambito strettamente vulcanico e a sviluppare applicazioni del tutto nuove. Una delle prime ha riguardato il deposito di scorie nucleari della centrale nucleare di Sellafield, in Inghilterra, dove abbiamo realizzato, su richiesta di un gruppo dell'Università di Glasgow, uno studio di valutazione sulla possibilità di applicare la muografia per trasmissione ai loro silos di stoccaggio, in particolare per identificare la presenza di combustibile esaurito al loro interno (Fig. 7).

Con il finanziamento di varie fonti (INFN, Università), abbiamo sviluppato e costruito un piccolo tracciatore di muoni portatile il cui acronimo è MIMA



Figura 7. Vista aerea dell'impianto di Sellafield (sinistra) e alcuni silos per lo stoccaggio dei rifiuti (destra).
Figure 7. Aerial view of the Sellafield site (left) and some waste storage silos (right).

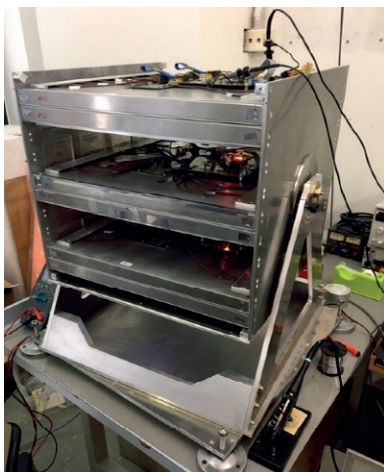


Figura 8. Rilevatore MIMA. Questo piccolo tracciante di muoni (40 x 40 x 40 cm³) ha accompagnato le attività del nostro gruppo negli ultimi 10 anni.

Figure 8. The MIMA detector. This small sized (40 x 40 x 40 cm³) muon tracker has accompanied our group activities for the past 10 years.

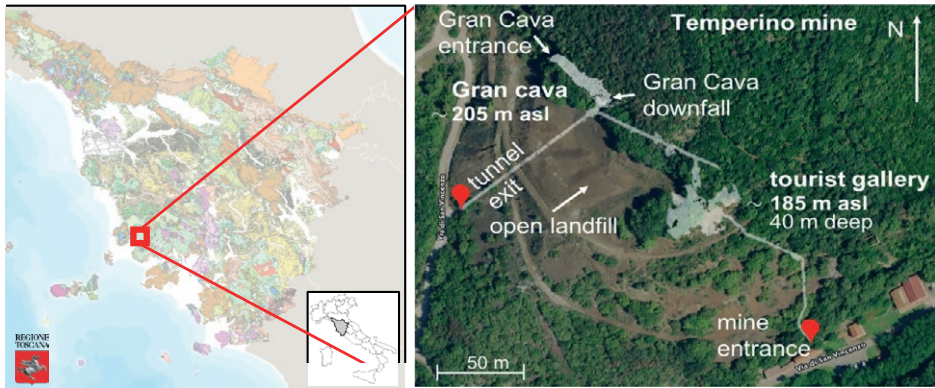


Figura 9. Mappa e vista aerea del complesso minerario di Temperino.

Figure 9. Map and aerial view of the Temperino mine complex.

(Muon Imaging for Mining and Archaeology, Fig. 8), che ci accompagna tutt'oggi ed è stato utilizzato in vari progetti di cui il più importante è stato la collaborazione con il Parco Archeominerario di San Silvestro focalizzata sul complesso minerario del Temperino.

Negli ultimi otto anni, questo progetto ci ha permesso non solo di rafforzare le nostre competenze nel settore, ma anche di sviluppare nuovi algoritmi altamente sofisticati per la ricostruzione tridimensionale delle caratteristiche sotterranee rilevate. La miniera, situata nei pressi della costa toscana di Piombino, era in uso già in epoca etrusca ed è stata chiusa solo nel 1973 (Fig. 9). Oggi è una meta

Muography in Firenze, today

After many years, we are now a well-structured group of researchers. Some of us have permanent positions while others have long-term contracts. The aim of our research was and is to investigate the potential of Muography applied to various fields such as industrial engineering, archaeological sites, and cultural heritage in general.

Our group has been actively involved in the investigation of Etruscan burial sites, stratigraphic measurements of containment dams, mapping of riverbanks burrows to assess their solidity, preliminary studies of the Brunelleschi dome in Florence (with whom we have an ongoing collaboration agreement through the Opera del Duomo), and many others.

Unfortunately there's not enough space to detail the results of all these endeavours, but recently we have participated in a European Community funded project BLEMAB where our team was tasked with providing muographic surveys of a blast furnace in Bremen during the process of iron smelting (Fig. 13). This has been a huge undertaking. We were funded to build two new prototype muon trackers each with a 1m^2 surface. We then managed the transportation to the site and the data acquisition operations which lasted many months.

This was a completely novel experience for our group. We found ourselves in the midst of a huge industrial complex in a very hostile environment (Fig. 14). Our detectors were protected within an air conditioned robust enclosure (Fig. 15) placed in proximity of the blast furnace tower. A preliminary calibration of the detectors was implemented inside the site. Subsequent

turistica, ma con molte gallerie e pozzi ancora inesplorati, la cui localizzazione potrebbe essere di grande interesse per ulteriori ricerche e per le valutazioni relative alla sicurezza del sito.

Abbiamo quindi avviato una collaborazione formale con Parchi Val di Cornia SpA e, cosa più importante, con un team di geologi guidati dal Prof. Nicola Casagli del Dipartimento di Scienze della Terra di Firenze, tuttora in corso. Scopo del progetto era fornire una mappatura muografica dei vari punti di interesse sopra la galleria della miniera, attualmente aperta ai turisti (Fig. 10).

Nel corso degli anni, questa si è rivelata una preziosa palestra per lo sviluppo del codice e dell'hardware. La Fig. 11 evidenzia lo stato dell'arte che abbiamo raggiunto con l'imaging muografico e il livello di dettaglio che è possibile ottenere dai dati.

Inoltre, i dati acquisiti durante queste campagne sono stati integrati dai nostri collaboratori con le indagini geologiche della miniera [6-7]. La combinazione di queste informazioni ci ha permesso di individuare un giacimento ad alta densità scavato accanto alla Gran Cava (Fig. 12). Oltre agli ottimi risultati, questa attività ha portato alla crescita del nostro team grazie ai tanti studenti che, nel corso degli anni, sono stati affascinati dai risultati ottenuti presso la miniera del Temperino.

Infatti, una parte consistente dell'accordo di collaborazione con la Parchi Val di Cornia SpA è stata dedicata alle attività di informazione esterna e al coinvolgimento degli studenti. A sua volta, questo ha portato molti talentuosi individui a dedicarsi a progetti muografici, a dimostrazione dei benefici che derivano da tali attività.



Figura 10. L'ingresso crollato della Gran Cava (a sinistra) e il rivelatore MIMA che acquisisce dati all'interno della miniera del Temperino, nella galleria aperta ai turisti a 50 metri di profondità (a destra). Il box che protegge il rivelatore è dotato di una finestra che consente ai turisti in visita di vedere cosa c'è all'interno. Il rivelatore è rivolto verso l'alto.

Figure 10. The collapsed Gran Cava entrance (left), and the MIMA detector taking data inside the Temperino mine in the tunnel open to tourists which is 50 metres below the surface (right). The box protecting the detector has a window for curious tourists wishing to see what's inside. The detector is pointing upwards.

Muografia a Firenze, oggi

Dopo diversi anni, oggi siamo un gruppo di ricercatori ben strutturato. Alcuni di noi ricoprono posizioni permanenti, altri hanno contratti a lungo termine. L'obiettivo della nostra ricerca era indagare il potenziale della muografia applicata a vari campi quali l'ingegneria industriale, i siti archeologici e il patrimonio culturale in generale.

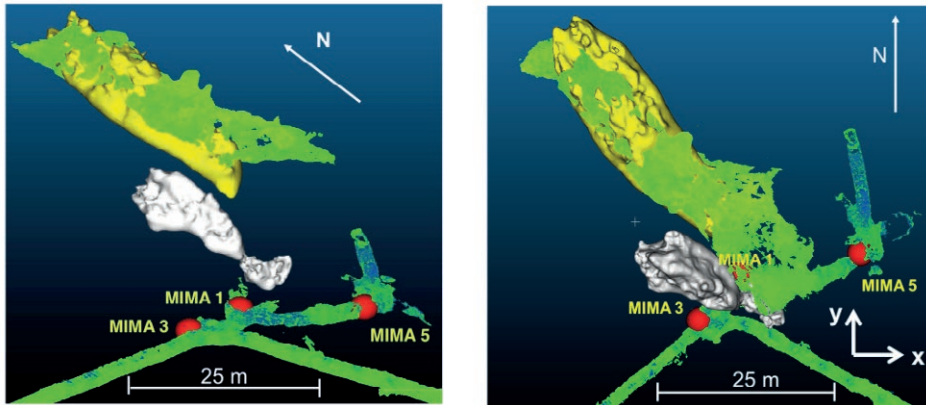


Figura 11. Imaging muografico della Gran Cava (nuvola gialla), da diversi punti di osservazione del rilevatore MIMA (punti rossi) all'interno della galleria. La nuvola verde è stata ottenuta dai dati di scansione laser. Le nuvole bianche rappresentano due cavità sconosciute poste appena al di sotto della Gran Cava rilevate dai nostri dati muografici.

Figure 11. Muographic imaging of the Gran Cava (yellow cloud), from different observation points of the MIMA detector (red spots) inside the tunnel. The green cloud was obtained from laser scan data. The white clouds are two unknown cavities lying just below the Gran Cava found from our muographic data.

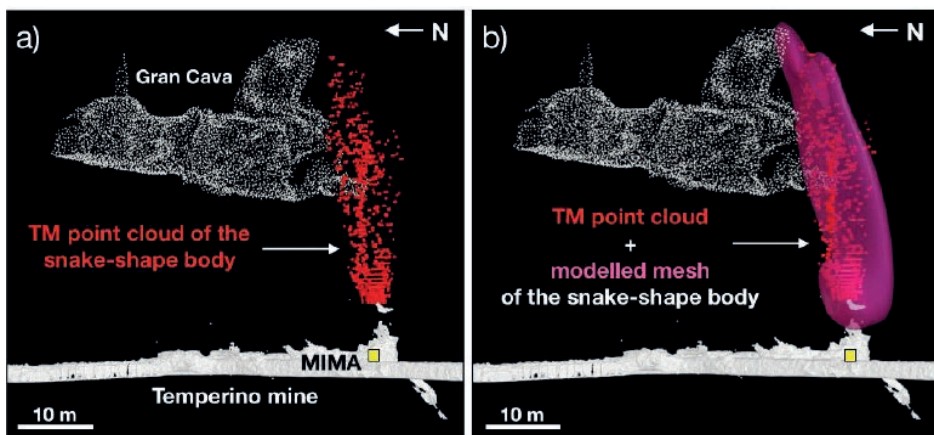


Figura 12. Una nuvola del corpo denso ottenuta da dati muografici (a sinistra). Questi dati sono stati poi integrati con quelli delle indagini geologiche (a destra).

Figure 12. A cloud of the dense body obtained from muographic data (left). This data was then integrated with geological surveys (right).

Il nostro gruppo è stato coinvolto attivamente nell'investigazione di siti di sepoltura etruschi, nelle misure densimetriche di dighe di contenimento, nella mappatura di cunicoli negli argini dei fiumi per valutarne la solidità, negli studi preliminari della cupola del Brunelleschi a Firenze (con cui abbiamo un accordo di collaborazione in corso attraverso l'Opera del Duomo) e in molti altri.

Sfortunatamente lo spazio a disposizione non è sufficiente per illustrare i risultati di tutti questi interventi, quindi ci limiteremo al recente progetto BLEMAB, finanziato dalla Comunità Europea, in cui il nostro team è stato incaricato di fornire indagini muografiche di un altoforno a Brema durante il processo di fusione del ferro (Fig. 13).

È stato un lavoro al limite delle risorse del nostro gruppo ma ricco di soddisfazioni. Abbiamo ottenuto un finanziamento per costruire due nuovi prototipi di tracciatori di muoni, ciascuno con una superficie di quasi 1 m². Successivamente abbiamo gestito il trasporto verso il sito e le operazioni di acquisizione dei dati che sono durate diversi mesi.

È stata un'esperienza del tutto nuova per il nostro gruppo. Ci siamo trovati nel bel mezzo di un enorme complesso industriale in un ambiente particolarmente ostile (Fig. 14). I nostri rivelatori erano protetti all'interno di un robusto involucro climatizzato (Fig. 15) situato in prossimità della torre dell'altoforno. Una calibrazione preliminare dei rilevatori è stata effettuata all'interno del sito. In seguito, gli apparecchi di misura sono stati spostati in due posizioni diverse davanti allo stesso altoforno.

Nella parte finale del progetto, uno dei prototipi è stato trasportato in un altro altoforno più piccolo. Abbiamo poi elaborato i dati acquisiti e sono stati inviate



Figura 13. Il sito della fonderia di Arcelor Mittal.

Figure 13. The Arcelor Mittal iron foundry site in Bremen.



Figura 14. Uno dei siti di installazione accanto a un altoforno.

Figure 14 One of the installation sites next to a blast furnace.



Figura 15. Uno dei prototipi di rilevatori all'interno della protezione dedicata.

Figure 15. One of the prototype detectors inside its dedicated enclosure.

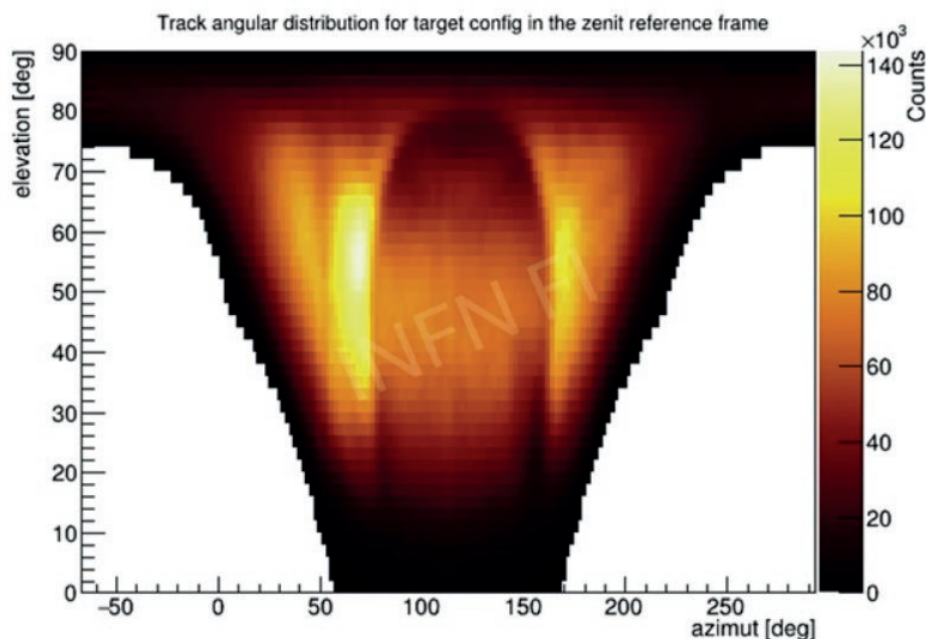


Figura 16. Distribuzione del conteggio dei muoni ottenuta davanti a un grande altoforno nell'ambito del progetto BLEMA B.

Figure16. Muon count distribution obtained in front of a large blast furnace in the framework of the BLEMA B project.

ly, the measurement apparatuses were moved to two different positions in front of the same blast furnace. In the final part of the project, one of the prototypes was transported to another, smaller blast furnace. The acquired data were then processed by us and periodic reports were sent to the collaborating institutes and companies. Thanks to the muographic data (Fig. 16) we highlighted the presence of backdrop structures along the line of sights of the muons that interfered with the measurement itself (Fig. 17).

Notwithstanding this we were able to identify the cohesive zone inside the blast furnace, where the molten iron coalesces from the ore above, and give an estimate of its geometrical position, a valuable information for the steel company.

Conclusions

Muography is now an established reality in Florence. Our continuing collaboration with the Department of Earth Sciences has added much needed and very much appreciated insights to the physical data collected.

Our group has expanded and now counts many young and enthusiastic researchers that actively participate in both data taking campaigns and subsequent analysis.

We have had tentative contacts with industrial and mining ventures that are very interested in the potential shown by this imaging tool. We are now in the process of developing these contacts, looking to further expand Muography applications outside a purely academic environment.

relazioni periodiche agli istituti e alle aziende collaboratrici. Grazie ai dati muografici (Fig. 16) abbiamo evidenziato la presenza di strutture retrostanti lungo la linea di vista dei muoni che interferivano con la misura stessa (Fig. 17).

Malgrado ciò, siamo stati in grado di identificare la cosiddetta zona coesiva all'interno dell'altoforno, dove il ferro fuso si fonde con il minerale grezzo sovrastante, e di fornire una stima della sua posizione geometrica, un'informazione preziosa per l'acciaieria.

Conclusioni

La muografia è oggi una realtà consolidata a Firenze. La nostra collaborazione continua con il Dipartimento di Scienze della Terra ha aggiunto approfondimenti indispensabili e molto apprezzati ai dati fisici raccolti.

Il nostro gruppo si è ampliato e ora annovera molti ricercatori giovani ed entusiasti che partecipano attivamente sia alle campagne di acquisizione dati sia alle analisi successive.

Abbiamo avuto dei primi contatti con imprese industriali e minerarie particolarmente interessate al potenziale di questo strumento di imaging. Attualmente stiamo sviluppando questi contatti, cercando di espandere ulteriormente le applicazioni di muografia al di fuori di un ambiente puramente accademico.

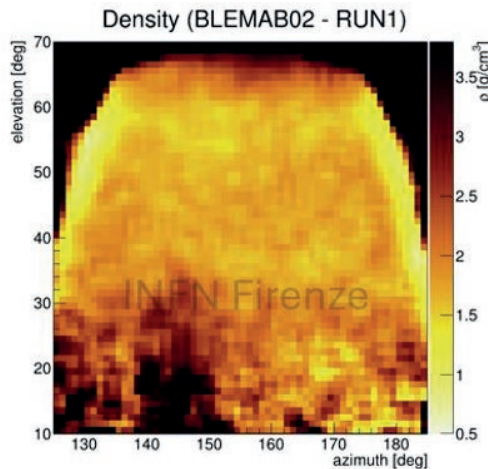


Figura 17. Distribuzione angolare della densità dell'altoforno ricostruita per un grande altoforno nell'ambito del BLEMAB.

Figure 17. Density angular distribution of the blast furnace reconstructed for a large blast furnace in the framework of the BLEMAB project.

Bibliografia

- [1] P. K. F. Grieder (2001), *Cosmic Rays At Earth*, Elsevier.
- [2] L.W. Alvarez et al. (1970), *Science* 167 832.
- [3] H.K.M. Tanaka et al. (2007) High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan *Earth and Planetary Science Letters* 263.1, pp. 104–113.
- [4] L. Bonechi, R. D'Alessandro, A. Giammanco, Atmospheric muons as an imaging tool, *Reviews in Physics*, Volume 5, 2020, 100038, ISSN 2405-4283, <https://doi.org/10.1016/j.revip.2020.100038>.
- [5] M. D'Errico et al. The MURAVES experiment: study of the Vesuvius Great Cone with Muon Radiography. *Journal for Advanced Instrumentation in Science*, 1:273, 2022
- [6] D. Borselli, T. Beni, L. Bonechi et al. Three-dimensional muon imaging of cavities inside the Temperino mine (Italy). *Sci Rep* 12, 22329 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26393-7>
- [7] T. Beni et al. "Muon Imaging for Cu-Fe Ore Shoot Identification: Results and Next Challenges", *Journal of Advanced Instrumentation in Science*, vol. 2024, no. 1, Mar. 2024.

References

- [1] P. K. F. Grieder (2001), *Cosmic Rays At Earth*, Elsevier.
- [2] L.W. Alvarez et al. (1970), *Science* 167 832.
- [3] H.K.M. Tanaka et al. (2007) High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan *Earth and Planetary Science Letters* 263.1, pp. 104–113.
- [4] L. Bonechi, R. D'Alessandro, A. Giammanco, Atmospheric muons as an imaging tool, *Reviews in Physics*, Volume 5, 2020, 100038, ISSN 2405-4283, <https://doi.org/10.1016/j.revip.2020.100038>.
- [5] M. D'Errico et al. The MURAVES experiment: study of the Vesuvius Great Cone with Muon Radiography. *Journal for Advanced Instrumentation in Science*, 1:273, 2022
- [6] D. Borselli, T. Beni, L. Bonechi et al. Three-dimensional muon imaging of cavities inside the Temperino mine (Italy). *Sci Rep* 12, 22329 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26393-7>
- [7] T. Beni et al. "Muon Imaging for Cu-Fe Ore Shoot Identification: Results and Next Challenges", *Journal of Advanced Instrumentation in Science*, vol. 2024, no. 1, Mar. 2024.