

Muografia: aspetti fondamentali della tecnica e ricostruzione dei dati di CRC

Esposito Giovanni Paolo¹, Fernando Kalumarakkalage Sithma Induwara¹, Lopes Eduardo¹

¹ 4AS, Liceo Scientifico - Linguistico Statale "V. Cuoco - T. Campanella", Napoli

ABSTRACT

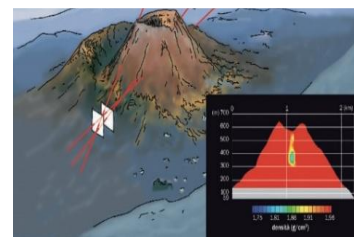
La muografia è una tecnica di ricostruzione di immagini basata sull'interazione dei muoni cosmici con la materia al fine di ottenere un muogramma, ovvero un'immagine interna dell'oggetto di studio. Questo articolo ne illustra i principi di funzionamento, descrivendo le applicazioni storiche della tecnica fino agli studi più recenti, ponendo particolare attenzione ai rivelatori a scintillazione. Sarà analizzato un set di dati del telescopio muonico portatile CRC (Cosmic Ray Cube), basato sulla scintillazione, per ricostruire la traiettoria di un muone; in seguito, saranno elaborati i dati raccolti utilizzando un foglio di calcolo Excel, ottenendo infine gli angoli di incidenza della particella.

INTRODUZIONE

1.1 DEFINIZIONE la muografia, o radiografia muonica, è una tecnica di imaging che consiste nell'analizzare l'interazione tra il flusso di muoni cosmici e un oggetto di studio, al fine di ricostruirne la struttura interna, identificando eventuali variazioni di densità e possibili anomalie. La radiografia muonica sfrutta l'elevata capacità di penetrazione nella materia dei muoni (μ), particelle elementari di massa duecento volte maggiore di quella degli elettroni, i quali riescono ad attraversare indisturbati l'atmosfera terrestre e i primi strati di sottosuolo.

1.2 STORIA La muografia è stata applicata, nel corso della storia, in maniera molto diversificata, portando contributi alle scienze della terra e all'archeologia. Il primo utilizzo noto al pubblico della tecnica risale al 1968, anno in cui il fisico statunitense Luis Walter Alvarez ottenne il primo muogramma della piramide di Chefredon [1], posizionando dei rivelatori muonici nell'interno della struttura. Concluse che l'antica piramide fosse particolarmente solida e priva di camere segrete. L'esperimento, mostrando l'assenza di cavità, permise di evitare un'analisi tradizionale basata su interventi invasivi e irreversibili.

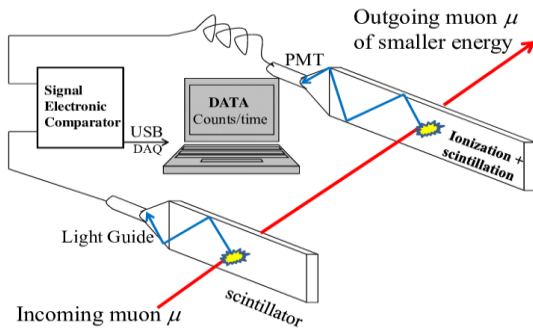
Fig. 1 muografia del vulcano Satsuma-Iwojima, in Giappone.



In seguito, numerosi altri esperimenti sono stati effettuati, tra i quali:

- Nel 2007, un gruppo di studiosi dell'Università Imperiale di Tokyo e dell'Università di Nagoya ha scoperto un ammasso di lava densa sotto il pavimento del cratere del monte Asama [2] e, sotto di esso, un'area a bassa densità, riconducibile ad un condotto poroso attraverso il quale il magma sarebbe rifluito verso il basso.
- Il progetto MURAVES (MUon Radiography of VESuvius), finanziato nel 2015, ha lo scopo di effettuare una muografia della parte sommitale del Vesuvio, in modo da permettere ai vulcanologi dell'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) di prevedere possibili future eruzioni. Il sistema di raccolta dati è formato da tre telescopi formati da diversi rivelatori a scintillazione ed è provvisto di un'area sensibile totale di 3m². Attualmente, l'apparato sperimentale sta acquisendo dati che saranno elaborati in futuro al fine di studiare la densità interna del vulcano [3].
- Nel 2017, sulla rivista scientifica *Nature* è stato pubblicato un articolo relativo alla scoperta di una Grande Galleria di oltre 30 metri all'interno della Grande Piramide di Cheope [4], individuata grazie a tre diverse tecniche di rivelazione muonica.
- Nel 2019 è stata effettuata la prima radiografia muonica del vulcano Stromboli, frutto della collaborazione tra INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) e INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia). I risultati, pubblicati il 30 aprile sulla rivista *Nature* [5] evidenziano una zona a bassa densità nell'area sommitale del vulcano, la quale corrisponde a un residuo piroclastico dell'eruzione del 2007.
- Nel 2023, un gruppo di ricercatori dell'Università di Napoli Federico II e dell'INFN, in collaborazione con l'Università di Nagoya ha sfruttato la radiografia muonica per studiare il sottosuolo del Rione Sanità, area del centro storico di Napoli, individuando la presenza di una camera funeraria sotterranea [6]. I due rivelatori a emulsione impiegati nella ricerca sono stati posizionati a 18 metri di profondità e hanno raccolto dati per circa un mese, segnalando oltre 10 milioni di muoni.

Fig.2 Schema di un rivelatore a scintillazione



1.3 RIVELATORI MUONICI A SCINTILLAZIONE

Alla base della tecnica di ricostruzione muografica è il funzionamento dei rivelatori muonici [7]. Il metodo più semplice sfruttato dai ricercatori per evidenziare la componente muonica dello sciame cosmico consiste nel far interagire i muoni con specifici materiali che generano un segnale luminoso, poi convertito in segnale elettrico, quando vengono attraversati dalle particelle.

Il tipo di rivelatore che sfrutta questa caratteristica è detto *a scintillazione* e i suoi componenti principali sono:

1. **Scintillatore:** è un materiale plastico capace di emettere fotoni (luce) quando attraversato da una particella carica
2. **Fibre a spostamento di lunghezza d'onda (WLS):** sono sfruttate per raccogliere la luce emessa dallo scintillatore, trasportandola all'apparato di rivelazione. Assorbono la luce ad una certa lunghezza d'onda (λ) e la riemettono a una lunghezza d'onda maggiore, per garantire la compatibilità con il dispositivo di rivelazione.
3. **Fotomoltiplicatori (PMT):** rilevano e amplificano i segnali luminosi restituendo segnali elettrici misurabili, sfruttando l'effetto fotoelettrico. Tra i fotomoltiplicatori di nuova generazione ritroviamo quelli a silicio (SiPM)

I singoli rivelatori evidenziano anche la presenza di eventi non correlati al flusso di raggi cosmici, come la radioattività naturale e il rumore della catena elettronica; pertanto, risulta funzionale discriminare le particelle di studio rispetto ai segnali indesiderati. La metodologia utilizzata per ridurre gli eventi casuali e individuare con accuratezza il passaggio dei muoni è la tecnica delle coincidenze: una coincidenza è il segnale emesso contemporaneamente da diversi rivelatori collegati fra loro.

L'interpretazione di un certo numero di dati raccolti dai rivelatori risulta essenziale per la ricostruzione muografica, poiché consente di determinare la distribuzione angolare delle particelle. Attraverso la *mappa di trasmissione*, relativa alla variazione dell'intensità del flusso in funzione della direzione, è possibile conoscere la densità interna del corpo in esame. Le aree con maggior attenuazione corrispondono alle zone di densità maggiore, mentre quelle che registrano un flusso meno attenuato corrispondono a zone cave o a bassa densità. La trasmissione $T(\theta, \varphi)$ misura il rapporto tra i muoni rilevati dal sensore dopo che hanno attraversato il materiale nella direzione descritta dagli angoli θ e φ e il numero di muoni attesi in assenza di ostacoli:

$$T(\theta, \varphi) = \frac{N_{\text{misurati}}}{N_{\text{attesi}}}$$

Se il valore di T è circa uguale a 1, il materiale attraversato non attenua il flusso atteso, indice della presenza di una cavità. Al contrario, se il valore di T misurato risulta molto inferiore a 1, ci si aspetta di trovare un materiale particolarmente denso che funge da ostacolo al passaggio delle particelle. Invece, se il valore della trasmissione corrisponde a 0, vuol dire che il materiale interposto fra il flusso e il rivelatore ha funzionato come una barriera totale.

1.4 SCINTILLAZIONE APPLICATA ALLA MUOGRAFIA

Tra i telescopi muonici che sfruttano la scintillazione si annovera CRC (Cosmic Ray Cube), progettato e realizzato dai Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) per fini didattici [8]. Nella successiva parte dell'articolo, a partire da un set di dati raccolti da CRC, verrà illustrata la misura della traiettoria di un muone cosmico e saranno calcolati gli angoli di incidenza rispetto a z (angolo zenitale) e rispetto a x (angolo azimutale).

METODI:

1.1 CRC: Il Cosmic Rays Cube è un telescopio muonico di forma cubica, grande 30 cm per lato e formato da 4 piani di scintillatore disposti uno sopra l'altro e distanziati di 7 cm. Ogni piano è formato da due strati, a loro volta formati da 6 bacchette scintillanti contenenti ognuna una fibra ottica speciale (WLS) che raccoglie la luce prodotta dal passaggio della particella. Questo segnale luminoso viene inviato a un piccolo fotomoltiplicatore a silicio (SiPM)

Fig. 3 esempio di set di eventi CRC

1269	20180403	01030303
1270	10102020	20202020
1271	01040830	10080402
1272	01010204	01020408
1273	02020202	01010204
1274	02041828	20301010
1275	20080401	08080808
1276	10101010	20202020
1277	03141203	22011210

che lo trasforma in un segnale elettrico misurabile. Infine, la componente elettronica di CRC accende dei LED che evidenziano il passaggio del muone.

1.2 RACCOLTA DATI E RICOSTRUZIONE: Dall'app "Cosmic Rays Live", [9] seguendo il percorso "File Manager", quindi cartella "Download" e infine cartella "CRC", è possibile visualizzare un set di dati raccolti da CRC. Nella prima colonna è visualizzato il numero dell'evento (ad es.: **1272**), mentre nella seconda e nella terza colonna appaiono due stringhe di caratteri in esadecimale che, codificate, restituiranno i valori delle coordinate dei pixel accesi sulle due facce del cubo. È possibile decodificare i dati di CRC al fine di ricostruire la traiettoria di un muone seguendo i passaggi che seguono:

- 1) Nel nostro caso, si sceglie l'evento **1272** e si convertono le due stringhe numeriche da esadecimale a binario:

Evento 1272: 01010204 01020408

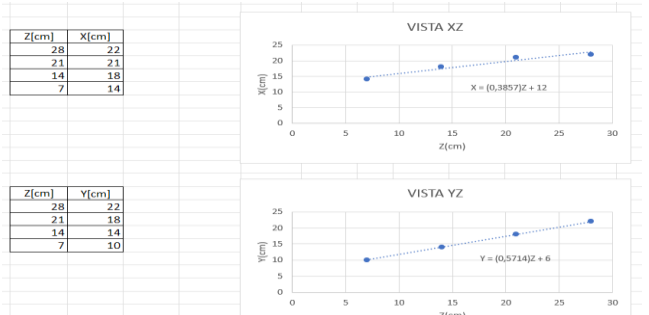
- Prima stringa (piano XZ): **01 01 02 04**, in binario: **01** → 000001, **01** → 000001, **02** → 000010, **04** → 000100
- Seconda stringa (piano YZ): **01 02 04 08**, in binario: **01** → 000001, **02** → 000010, **04** → 000100, **08** → 001000

Si procede ad inserire i numeri binari in una tabella di 4 righe e 6 colonne su Microsoft Excel, evidenziando il passaggio della particella con il colore giallo, noto che la cifra "1" indica la bacchetta di scintillatore *colpita dal muone*, mentre gli "0" indicano che la bacchetta *non è stata colpita*:

X						Y					
01010204						01020408					
esadec						esadec					
01	01	02	04	08	10	01	02	04	08	10	20
000001	000001	000010	000100	000000	000000	000001	000010	000100	001000	000000	000000
02	04	08	10	20	40	02	04	08	10	20	40
000010	000100	000000	000000	000000	000000	000010	000100	000000	000000	000000	000000
04	08	10	20	40	80	04	08	10	20	40	80
000100	000000	000000	000000	000000	000000	000100	000000	000000	000000	000000	000000

	2 cm	6 cm	10 cm	14 cm	18 cm	22 cm		2 cm	6 cm	10 cm	14 cm	18 cm	22 cm
piano 4 = 28 cm	0	0	0	0	0	1		0	0	0	0	0	1
piano 3 = 21 cm	0	0	0	0	0	1		0	0	0	0	1	0
piano 2 = 14 cm	0	0	0	0	1	0		0	0	1	0	0	0
piano 1 = 7 cm	0	0	0	1	0	0		0	0	1	0	0	0

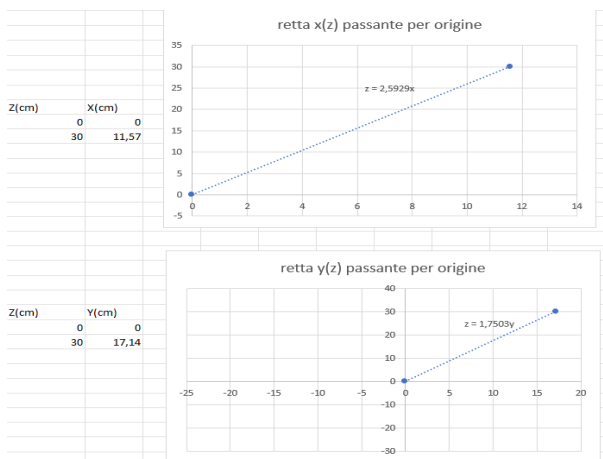
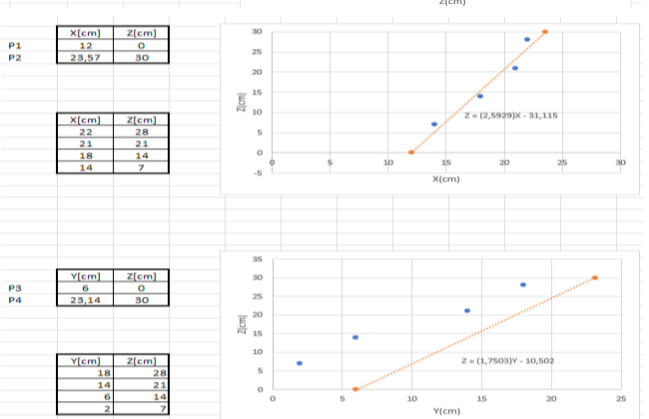
2) Conoscendo la larghezza delle strip (4 cm) e la distanza fra i diversi piani (7 cm) è possibile compilare una tabella in cui inserire i valori di Z (altezza del cubo), delle X e delle Y. Nella stessa pagina, si procede a determinare le linee di tendenza dell'andamento dei punti trovati, assumendo una dipendenza lineare fra i valori Z e X e fra Z e Y



3) Si disegnano le rette trovate sulle due facce del cubo in cui sono stati scambiati gli assi, in modo da ottenere sulle ascisse i valori di Z: si definiscono, per ciascun piano, due punti:

P1: [x(0);0], P2 : [x(h);h], con h=30cm, altezza totale del cubo; **P3 :[y(0);0], P4 : [y(h);h]**

Le linee di tendenza individuate rappresentano le proiezioni della traiettoria del muone sul piano ZX e ZY



4) Al fine di individuare la traiettoria della particella in 3D, è necessario calcolare il **vettore direttore "v"**, da cui è possibile ricavare gli angoli: θ e ϕ . Per fare ciò, si procede facendo passare per l'origine degli assi le due rette ottenute nel secondo passaggio, ponendo l'intercetta **q** uguale a 0. Si disegnano le rette nei piani con assi invertiti come nel terzo passaggio.

Si ottengono due rette del tipo: $X=m_x Z$ e $Y=m_y Z$, parallele alle rette trovate nel passaggio 2, riportate con assi invertiti: $X=m_x Z + q_x$ e $Y=m_y Z + q_y$

RISULTATI

Il vettore direttore ha componenti: $v = (v_x, v_y, v_z)$. Per semplificare i calcoli, si normalizza il vettore ponendo $v_z=1$. In questo modo, è possibile scrivere il vettore come: $v = (m_x, m_y, 1)$.

Al fine di ricavare gli angoli θ (angolo di inclinazione rispetto all'asse x) e ϕ (angolo azimutale rispetto al piano xy), si fa uso di un sistema di coordinate sferiche e si inseriscono su Excel i coefficienti angolari delle rette ottenute nel secondo passaggio, ottenendo i valori degli angoli in gradi e in radianti secondo le funzioni:

$$\theta = \arccos(v_z/v) \text{ e } \phi = \arctan2(v_y, v_x)$$

$$\text{con } v_z=1 \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad v_x = m_x = 0,386 \quad v_y = m_y = 0,57$$

$$\theta = 34,58^\circ \quad \phi = 34,01^\circ$$

Ripetendo la procedura per più eventi, posizionando il rivelatore o più rivelatori a valle dell'oggetto di studio (come un vulcano o una piramide) è possibile mappare la distribuzione delle particelle e ottenere un muogramma finito.

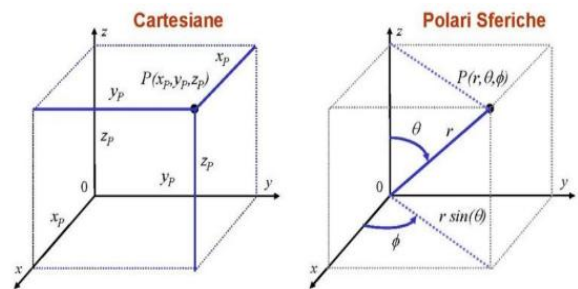


Fig. 4: sistemi di coordinate cartesiane e polari sferiche in tre dimensioni

CONCLUSIONI

In questo studio è stato proposto un paragrafo introduttivo sulla muografia, compreso di definizione, possibili applicazioni e dei risultati più significativi raggiunti nel corso del tempo. Successivamente, introducendo le tecniche di rivelazione, si è trattato di rivelatori a scintillazione e, come esempio, è stato presentato CRC, un telescopio muonico portatile i cui dati sono accessibili in rete. A partire da una stringa numerica in esadecimale, è stata ricostruita la traiettoria di un muone che ha attraversato CRC, risalendo all'angolo zenitale (formato con la verticale) e quello formato con l'asse x. Gli angoli ottenuti descrivono la direzione di arrivo del muone rispetto al sistema di riferimento. Questi dati, in generale, permettono di localizzare la traiettoria di diversi flussi e, tramite la mappa di trasmissione, consentono di studiare l'attenuazione del flusso muonico e, conseguentemente, analizzare la densità interna dell'oggetto di studio.

Nonostante il successo ottenuto dall'applicazione della muografia in vari campi, la tecnica presenta ancora delle limitazioni, relative soprattutto alle dimensioni dei rivelatori e alle tecniche di analisi dati.

REFERENCES

- [1] "Search for Hidden Chambers in the Pyramids"
Luis.W.Alvarez, 6 February 1970, *Science*, vol. 167, issue 3919
- [2] "High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography : the density structure below the volcanic centre of Mt.Asama, Japan"
Hiroyuki K.M Tanaka, 15 November 2007, *EPSL*, vol. 263, issues 1-2
- [3] "The MURAVES Experiment: A Study of the Vesuvius Great Cone with Muon Radiography"
M.D'Errico, 24 February 2022, *Journal of advanced instrumentation in science*, vol. 2022, pag. 273, 1-6
- [4] "Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons"
Kunihiro Morishima, 2 November 2017, *Nature*, vol. 552, issues 386-390
- [5] "First muography of Stromboli volcano"
Valeri Tioukov, 30 April 2019, *Nature, Sci Rep* 9, 6695
- [6] "Hidden chamber discovery in the underground Hellenistic necropolis of Neapolis by muography"
Valeri Tioukov, 3 April 2023, *Nature, Sci Rep* 23, 5438
- [7] <https://physicsopenlab.org/2016/04/03/raggi-cosmici-rivelatore-a-scintillazione-in-coincidenza/>
- [8] <https://web.infn.it/OCRA/misura-della-rate-di-muoni-cosmici/>
- [9] <https://web.infn.it/OCRA/misura-della-rate-di-muoni-cosmici/>