

宇宙线 μ 子成像技术研究进展

杨紫艳¹, 王鹤^{1,2}, 张荣庆¹, 刘威¹

¹中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

²中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙

Email: yzy674836751@163.com

收稿日期: 2021年3月23日; 录用日期: 2021年4月23日; 发布日期: 2021年4月30日

摘要

宇宙线 μ 子成像技术(Muography)是一种新型无损成像方法,它利用 μ 子穿过不同物质时的透射或散射特性差异来反映目标对象内部结构等信息。该技术分为透射成像(absorption-based muography, AM)和散射成像(scattering-based muography, SM)。早在20世纪30年代,物理学家Carl D. Anderson利用威尔逊云雾室发现了 μ 子,然而宇宙线 μ 子成像技术在近二十年才得到快速发展。本文详细介绍了宇宙线 μ 子成像原理、探测器类型以及应用情况等。

关键词

宇宙线 μ 子, 透射成像, 散射成像

Research Progress of Cosmic Ray Muon Muography Technology

Ziyan Yang¹, He Wang^{1,2}, Rongqing Zhang¹, Wei Liu¹

¹School of Geoscience and Info-physics, Central South University, Changsha Hunan

²Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha Hunan

Email: yzy674836751@163.com

Received: Mar. 23rd, 2021; accepted: Apr. 23rd, 2021; published: Apr. 30th, 2021

Abstract

Muography is a novel nondestructive imaging technology, which based on the absorption or scattering of atmospheric muons to reflect the internal structure of the targets. The technology can be divided into absorption-based muography (AM) and scattering-based muography (SM). Muons were discovered by physicist Carl D. Anderson in the Wilson Cloud Room in the 1930s, however, muography has been rapidly developed in the last two decades. In this paper, the principle of mu-

ography, the types of detectors and its applications are introduced.

Keywords

Cosmic Ray Muons, Absorption-Based Muography, Scattering-Based Muography

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 宇宙线 μ 子成像技术发展迅速, 关于宇宙线 μ 子成像的学术论文数量迅速增长, 专利和商业化应用也逐渐增多。早期的宇宙线 μ 子成像技术的研究内容主要是透射成像, 自本世纪初, 科学家们开始了基于宇宙线 μ 子的散射原理的成像研究。宇宙线 μ 子成像技术第一次应用于实际可以追溯到 20 世纪 50 年代, 英国科学家在澳大利亚的矿山研究了利用宇宙射线能量损失估算隧道顶部岩石厚度的可行性。自此, 宇宙线 μ 子探测被应用于多个领域, 包括金字塔探测、火山研究、矿物勘探、山脉地下洞穴的探测、山脉基岩和冰川分布、水文地质、地质封存超临界 CO_2 的成像、重核物质检测等。

2. 宇宙线 μ 子及其成像原理

宇宙射线是指是来自外太空的高能次原子粒子, 大部分是质子、原子核或电子, 小部分是正电子或反质子。初级宇宙射线进入大气层时, 与大气层中的原子核(主要是氮和氧)发生高能碰撞, 产生了次级宇宙射线粒子, 如 π 介子(π^+ 、 π^- 和 π^0)、 k 介子(K^+ 、 K_S^0 、 K_L^0 、 K^+)。这两种介子不稳定, 衰减产生了 μ 子(见式 1)。



μ 子衰减产生电子和中微子(见式 2)。



在到达地面之前, 这些初级和次级粒子可以进一步与大气层相互作用。宇宙射线大气簇射到达海平面的有 μ 子、电子、质子等寿命较长的粒子, 其中 μ 子是一种主要的粒子。

2.1. 宇宙线 μ 子透射成像原理

电离和原子激发是 μ 子穿过物质时的主要能量损失途径。大气 μ 子的动量谱峰值在 4 GeV 左右, 平均能量损失率满足 Bethe-Block 公式:

$$-\frac{dE}{dx} = -\frac{dE}{\rho dS} \approx 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln Kc^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right) \quad (3)$$

$$K = \frac{2m_e}{I^2} \quad (4)$$

式中 ρ 为材料的密度, N_A 为阿伏伽德罗常数, r_e 为经典电子半径, m_e 为电子质量($m_e = 511 \text{ keV}$), z 为入射粒子电荷量, Z 为材料的原子序数, A 为材料的相对原子质量, δ 为密度效应修正参数, I 为平均激发能($I = 16Z^{0.9} \text{ eV}$)。

$$-\frac{dE}{dS} \propto \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(K \frac{\beta^2}{1-\beta^2} \right) + \delta_1 \right] \quad (5)$$

对于周期表内中等原子序数的元素来说, $\frac{Z}{A}$ 的值接近 $\frac{1}{2}$ 。 K 的值取决于 I , 而 I 与 Z 近似线性相关, K 在公式中为对数的真数, 因此 K 的变化对能损率的实际影响较小。总的来说, 除氢元素以外, 可以近似地认为: 相同能量的 μ 子穿过材料时, 能损率与材料的密度线性相关。

2.2. 宇宙线 μ 子散射成像原理

带电粒子穿过物质时, 受到原子核附近强电场的作用会发生散射, 这就是库伦散射。每次散射对粒子产生的影响积累后, 粒子相对于入射方向就产生了偏移, 这就是多重库伦散射(Multiple Coulomb Scattering)。单个散射的偏转角 $\Delta\theta$ 的概率分布遵循卢瑟福定律 $P(\Delta\theta) \propto \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)}$ 。大多数偏转很小,

穿过宏观物体后, 实际分布特征近似高斯分布。带电粒子与核碰撞产生的大角度散射类似于卢瑟福散射, 在 $P(\Delta\theta)$ 的尾部渐近满足卢瑟福定律。98%的实际分布可以描述为高斯近似值。因此, μ 子穿过有一定厚度的目标体, 散射角分布均方根值(Root Mean Square)可以近似描述为:

$$\theta_{RMS} = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} Q \sqrt{\frac{x}{x_0}} \left[1 + 0.038 \ln \frac{x}{x_0} \right] \quad (6)$$

p 为 μ 子动量(单位为 MeV/c), Q 为 μ 子的电荷量, x 为从入射到出射的路径长度, x_0 为辐射长度。辐射长度可计算如下:

$$x_0 \approx \frac{716.4 (\text{g}/\text{cm}^3)}{\rho} \frac{A}{Z(Z+1) \log\left(\frac{287}{\sqrt{Z}}\right)} \quad (7)$$

ρ 为材料密度, A 为相对原子质量, Z 为材料的原子序数。从式中可以明显看出, 散射角的均方根值与原子序数 Z 直接相关[1]。

2.3. 宇宙线 μ 子透射和散射成像对比

μ 子透射和散射成像都依赖大样本的统计分布, 例如从单个 μ 子的轨迹无法推断出高 Z 材料的存在。一般来说, 在目标体较大的情况下, μ 子透射成像是一个有力方法。而 μ 子散射成像更适用于中小型目标体。散射成像需要重建粒子轨迹, 对山脉或大建筑物这类目标体来说是不实际的。而透射成像则不受此限制。目标越大, 穿过的 μ 子越少, 这也不利于散射成像方法的数据信息的获得。而从另一方面讲, 散射成像对材料原子序数的不同具有敏感性, 如: 识别高 Z 物质等。

3. 宇宙线 μ 在成像技术应用领域

3.1. 火山监测

日本, 意大利, 法国和哥伦比亚等国家陆续将 μ 子透射成像技术用于火山监测。在 1995 年, 日本东

京大学 Nagamine K 等人研发了简易塑料闪烁体 μ 子探测器,进行了 Tsukuba 山内部结构探测[2]。之后东京大学 H. Tanaka 等人对北海道 Showa-Shinzan 熔岩穹丘[3] (2007 年)、Asama 火山[4] (2009 年, 见图 1)、Sakurajima 火山[5] (2018 年)进行了试验测量。意大利的 MU-RAY、法国的 DIAPHANE、TOMUVOL 等多个项目组也开展了相关研究。2013 年, TOMUVOL 和 MU-RAY 合作对 Puy de Dôme 不活跃火山使用两种探测器进行了测量[6]。2017 年, DIAPHANE 对 Soufrière of Guadeloupe 活火山以及地下隧道进行了探测[7]。哥伦比亚对 μ 子成像应用于火山学也展开了初步研究, 2019 年, I. D. Guerrero 等人对在 Galeras 火山附近布置探测器进行了设计研究[8]。

火山监测是宇宙线 μ 子透射成像技术应用的主要领域之一, 通过数月的 μ 子数据信息收集, 可以探测火山的内部组成, 提供岩体的不同密度信息。

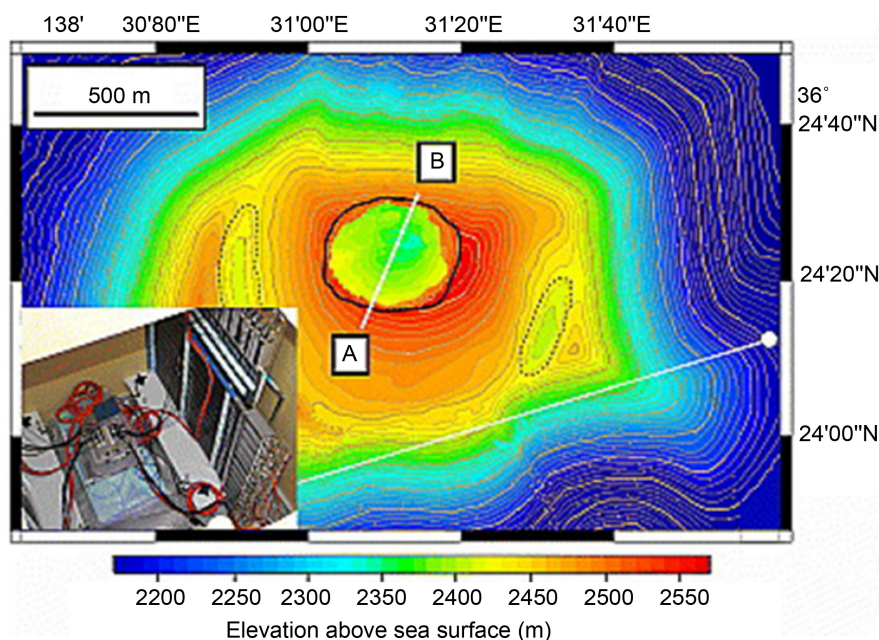


Figure 1. The location of the cosmic-ray muon detector
图 1. 宇宙线 μ 子探测器的位置

3.2. 矿产勘查

早在 1979 年, L. Malmqvist 等人就研究了 μ 子成像技术在采矿勘探中的应用可行性, 并将传统的布置在隧道内的探测装置与可放置在狭小钻井内的装置进行了比较[9]。2014 年, Nyrstar 公司对加拿大 Myra Falls 矿的含锌、铜、铅、银的火山成因硫化物矿床进行了勘探。2015 年, Teck 公司对美国密西西比河谷型(Mississippi Valley Type, MVT)铅锌矿进行了成像。2018 年, CRM GeoTomography Technologies 公司使用 μ 子成像技术对位于加拿大 McArthur 河的铀矿进行了成像(见图 2)。同年, Guglielmo Baccani 等人采用 MIMA 探测器(Muon Imaging for Mining and Archaeology),对位于 Tuscany 的 Temperino 矿进行了测量。

在实际测量中, 探测器的大小、探测区域的密度差以及观测时间均会对测量产生明显影响。放置在隧道内的探测器适合寻找已知矿体的延伸区, 而寻找新的矿体则需要微型钻孔探测器。

3.3. 冰川测量

对采用地球物理方法对冰川进行勘探通常是在其表面开展的, 因此对冰和基岩的边界分辨率较低。

2015年, R. Nishiyama 等人首次将宇宙线 μ 子成像技术应用于冰川研究, 测量了瑞士阿尔卑斯山 Aletsch 冰川的基岩结构[10]。2017年, R. Nishiyama 等人在瑞士 Eiger 峰下方的 Jungfraubahn 铁路的三个不同位置进行了探测, 见图 3 [11]。联合不同位置得到的三个二维图像, 可以得到基岩-冰川界面的三维成像。基于岩石和冰的密度差异, 可以重建基岩形状。

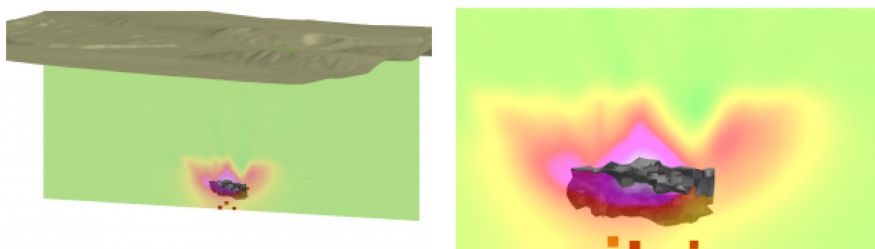


Figure 2. The ore shell at about 600 m depth, the detector locations (cubes) and a section of the density profile at the McArthur River uranium mine

图 2. McArthur 河铀矿 600 米深度矿壁、探测器位置(立方体)和密度剖面图

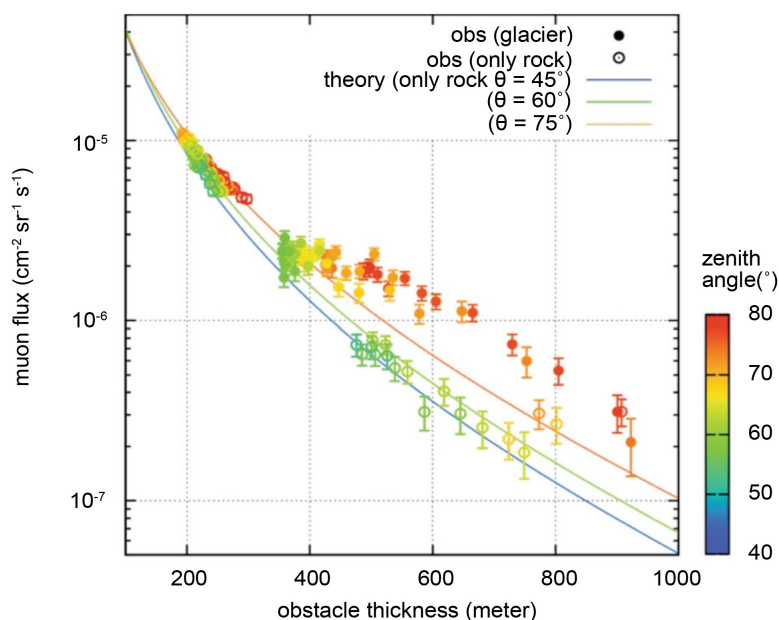


Figure 3. Attenuation of muon flux as a function of the obstacle thickness. The colours of the data point represent the zenith angle of muons arriving at the detector. The solid circles denote muons, which crossed both the ice and the underlying bedrock. The open circles denote muons, which passed only through the bedrock and were observed. These data are used for calibration purposes by comparing them with the theoretical predictions of the flux attenuation in pure rock (density) reported as solid lines.

图 3. μ 子通量随岩石厚度变化的衰减情况。数据点的不同颜色代表了 μ 子到达探测器的不同天顶角, 实型圆圈代表穿过基岩和冰的 μ 子, 空心圆圈代表只穿过基岩的 μ 子, 实线代表穿过密度为的岩石的 μ 子通量的理论值

3.4. 金字塔探测

1969年, 美国诺贝尔物理学奖获得者 Luis W. Alvarez 等人测量了埃及 Giza 金字塔和 Chephren 金字塔的内部结构, 这是宇宙线 μ 子成像技术首次被应用于考古学[12]。 μ 子技术还被应用于探测位于墨西哥

的世界第三大金字塔 - 太阳金字塔(Pyramid of the Sun), 结果表明在金字塔南面存在一个低密度区, 可能是由于金字塔该区域的结构较弱[13]。2017年, 日本名古屋大学的 Kunihiro Morishima 等利用 μ 子对埃及最大的金字塔——胡夫金字塔进行了成像。此次探测使用了核乳剂探测器(见图 4)、闪烁体探测器和气体探测器三种探测器, 将三种探测器获取的数据进行对比, 发现了之前未被发现的巨大密室, 该成果被发表于《Nature》杂志[14]。

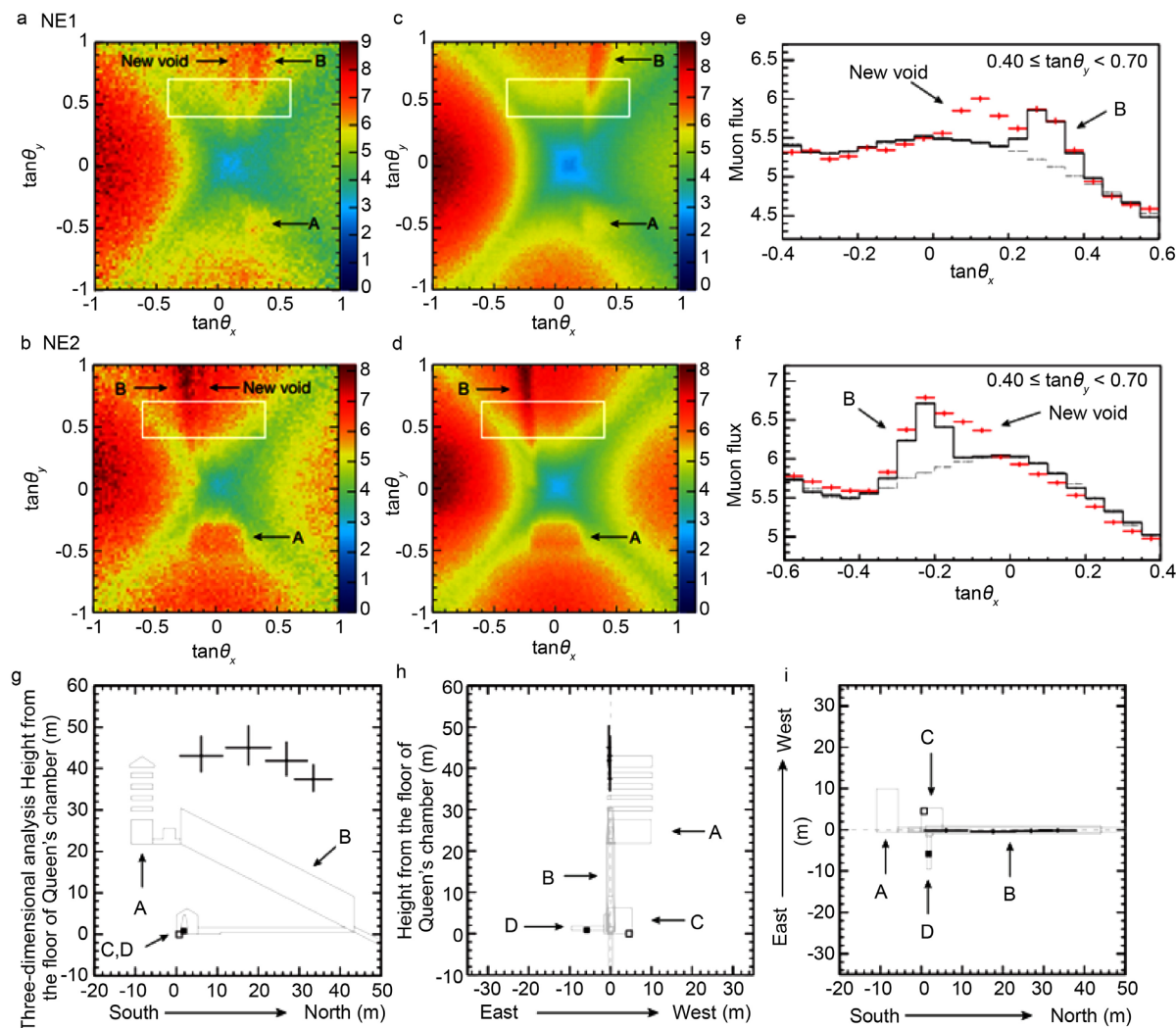


Figure 4. Results of the analysis of the nuclear emulsion films

图 4. 核乳剂探测器数据分析

3.5. 断层和水文地质

2011年, H. Tanaka 等人在日本 Itoigawa-Shizuoka 大断裂通过测量断层带周围的降水渗透来探测地下断层, 在强降雨之后, 雨水下渗引起目标体密度增大, 可对目标体的可渗透区域进行宇宙线 μ 子成像[15]。2014年, F. Hivert 等人将 μ 子成像应用于测量水文地质过程造成的岩石密度变化。对于不同的置信度, 可以测量的最大深度不同。同时研究结果表明, 在不含高 Z 元素的情况下, 相对于密度变化, 岩石的元素组成对 μ 子通量的变化影响可以忽略[16]。

3.6. CO₂地质封存监测

2012年, Vitaly A. Kudryavtsev 等人建立了地质封存室模型, 研究了 μ 子成像技术用于CO₂封存监测的可行性[17]。2015年, J. Klinger 等人通过建立数值模型, 分析了 μ 子探测器对CO₂注入有良好的敏感性[18]。2018年, Jon Gluyas 等人通过建立模型研究了 μ 子成像应用于CO₂地质封存监测的可行性, 并开发了一套可持续监测的 μ 子成像装置[19]。

在二氧化碳地质封存监测方面, μ 子探测器可放置于钻井孔内来实施监测。探测器需要在含盐、高温的复杂地质环境下工作。封存室深度至少为1 km且探测器要持续监测几十至上百年。

3.7. 核安全

2003年, 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)的 Konstantin N. Borozdin 等人在基于 μ 子的多重库伦散射特性对钨质圆柱体及其两条钢轨支架进行了成像, 该结果被发表于《Nature》[20]。LANL先后提出了PoCA (The Point of Closest Approach)、MLSD (Maximum Likelihood Scattering and Displacement)、MAP (Maximum A Posteriori)等算法, 搭建了探测器并开展了实验, 对不同材料(如W, Fe, Al)进行了识别成像[21], 将 μ 子散射成像技术用于货车的核材料等检查。2008年, LANL把技术转让给美国决策科学公司(Decision Science Corporation, DSC), DSC开发出了用于货车和集装箱监测的多种成像模式被动探测系统(Multi Mode Passive Detection System, MMPDS)。2017年, LANL的D. Poulson 等人首次将滤波反投影算法(filtered back projection algorithms)用于宇宙线 μ 子散射成像, 基于Geant4模拟平台对乏燃料储存容器进行了成像[22]。日本东芝公司和LANL合作利用 μ 子成像技术对福岛核反应堆芯进行了成像, 观测到了堆芯内出现的空洞[23]。意大利核物理研究院(Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, INFN)提出了 μ 子门禁项目(The Muon Portal Project)。2017年, F. Riggi 等人在 μ 子门禁项目中, 用 μ 子探测器对集装箱进行了高Z物质识别成像[24]。加拿大核能实验室成立了CRIPT (Cosmic-Ray Inspection and Passive Tomography)合作组, 研制了探测器装置对集装箱中的高Z材料进行了探测。2019年, 加拿大核能实验室的Oleg Kamaev 等人研究了 γ 能谱、中子计数和 μ 子散射成像技术的互补效果[25]。英国AWE (Atomic Weapon Establishment)和Bristol大学、Glasgow大学合作研制了阻性板探测器(RPC)和闪烁光纤探测器, 并对算法进行了改进, 开发出了多元数据分析等算法[26] [27] [28]。国内, 清华大学开展了利用 μ 子对高Z物质的识别成像研究, 研制了阻性板探测器(RPC)和多气隙阻性板探测器(MRPC), 实现了PoCA、MLSD等经典算法[29] [30] [31]。北京大学[32] [33]、中国科学技术大学[34] [35]、中国原子能科学研究院[36] [37]等也开展了 μ 子成像装置及算法的研究工作。

4. 宇宙线 μ 子成像技术在地球科学领域的应用前景

4.1. 宇宙线 μ 子成像技术的优缺点

在地球科学领域, 宇宙线 μ 子成像技术可以与重力测量、地震勘探、电磁法、探地雷达等传统的探测技术进行互补。一是在很多情况下, 与独立反演相比, 联合 μ 子和地球物理方法进行反演可以更好地重建目标体的三维结构。例如, 对Puy de Dôme火山的 μ 子数据和重力数据进行了独立密度反演和贝叶斯方法联合反演; 二是有时采用不同的地球物理方法会得到不同解, 在这种情况下利用 μ 子数据可以帮助确定反演的正确解, 例如在对Somma-Vesuvius火山的内部结构进行重力和地震勘探时得到了不一致的结果, 可以利用 μ 子成像技术确定正确解; 三是在传统方法无法进行更精确探测时, 也可以考虑采用 μ 子成像方法来提高成像精确率。例如, 传统方法可以探测到在火山内存在大岩脉, 但无法进行准确探测, 而 μ 子成像的分辨率更高, 可以有效提高精度; 四是在受地形影响大、常规物探成本高的情况下, 可以

采用 μ 子成像技术, 将探测器布置在隧道、钻孔中, 单点多次观测, 减少工作量。同时, μ 子成像技术也存在某些不足, 比如探测粒子受大气环境影响明显、数据采集时间长等。

4.2. 研究展望

无论是核安全领域还是地球科学等领域, 国外的 μ 子探测装备和反演算法都相对成熟。而目前国内相关机构在 μ 子成像方面的研究主要是关于核安全方面, 在地球科学等领域相关研究较少, 还有很多研究工作需要开展。在探测装备方面, 选择并改进 μ 子探测技术方案(闪烁体探测器、核乳胶探测器、气体探测器、切伦科夫探测器等), 进行野外小型 μ 子探测装置的研发。在反演算法方面, 不同地质体与 μ 子相互作用过程复杂, 要获取地质体三维密度分布图, 需在现有反演技术的基础上, 开展针对地球物理方法的反演研究。

参考文献

- [1] Bonechi, L., D'Alessandro, R. and Giammanco, A. (2020) Atmospheric Muons as an Imaging Tool. *Reviews in Physics*, **5**, Article ID: 100038. <https://doi.org/10.1016/j.revip.2020.100038>
- [2] Nagamine, K., Iwasaki, M., Shimomura, K., et al. (1995) Method of Probing Inner-Structure of Geophysical Substance with the Horizontal Cosmic-Ray Muons and Possible Application to Volcanic Eruption Prediction. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, **356**, 585-595. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)01169-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)01169-9)
- [3] Tanaka, H., Nakano, T., Takahashi, S., Yoshida, J., Ohshima, H., Maekawa, T., Watanabe, H. and Niwa, K. (2007). Imaging the Conduit Size of the Dome with Cosmic-Ray Muons: The Structure beneath Showa-Shinzan Lava Dome, Japan. *Geophysical Research Letters*, **34**, L22311. <https://doi.org/10.1029/2007GL031389>
- [4] Tanaka, H.K.M., Uchida, T., Tanaka, M., et al. (2009) Detecting a Mass Change inside a Volcano by Cosmic-Ray Muon Radiography (Muography): First Results from Measurements at Asama Volcano, Japan. *Geophysical Research Letters*, **36**, L17302. <https://doi.org/10.1029/2009GL039448>
- [5] Oláh, L., et al. (2018) High-Definition and Low-Noise Muography of the Sakurajima Volcano with Gaseous Tracking Detectors. *Scientific Reports*, **8**, Article No. 3207. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21423-9>
- [6] Ambrosino, F., et al. (2015) Joint Measurement of the Atmospheric Muon Flux through the Puy de Dome Volcano with Plastic Scintillators and Resistive Plate Chambers Detectors. *Journal of Geophysical Research*, **120**, 7290. <https://doi.org/10.1002/2015JB011969>
- [7] Marteau, J., et al. (2017) DIAPHANE: Muon Tomography Applied to Volcanoes, Civil Engineering, Archaeology. *Journal of Instrumentation*, **12**, C02008. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/02/C02008>
- [8] Guerrero, I.D., Cabrera, D.F., Paz, J.C., et al. (2019) Design and Construction of a Muon Detector Prototype for Study the Galeras Volcano Internal Structure. *Journal of Physics: Conference Series*, **1247**, Article ID: 012020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1247/1/012020>
- [9] Malmqvist, L., Jönsson, G., Kristiansson, K. and Jacobsson, L. (1979) Theoretical Studies of *In-Situ* Rock Density Determination Using Cosmic-Ray Muon Intensity Measurements with Application in Mining Geophysics. *Geophysics*, **44**, 1549-1569. <https://doi.org/10.1190/1.1441026>
- [10] Nishiyama, R., et al. (2017) First Measurement of Ice-Bedrock Interface of Alpine Glaciers by Cosmic Muon Radiography. *Geophysical Research Letters*, **44**, 6244-6251. <https://doi.org/10.1002/2017GL073599>
- [11] Nishiyama, R., et al. (2019) Bedrock Sculpting under an Active Alpine Glacier Revealed from Cosmic-Ray Muon Radiography. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 6970. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43527-6>
- [12] Alvarez, L.W., et al. (1970) Search for Hidden Chambers in the Pyramids. *Science*, **167**, 832-839. <https://doi.org/10.1126/science.167.3919.832>
- [13] Menchaca-Rocha, A. (2014) Using Cosmic Muons to Search for Cavities in the Pyramid of the Sun, Teotihuacan: Preliminary Results. *Proceedings, 10th Latin American Symposium on Nuclear Physics and Applications*, Montevideo, 1-6 December 2013, Volume XLASNPA, 12. <https://doi.org/10.22323/1.194.0012>
- [14] Morishima, K., et al. (2017) Discovery of a Big Void in Khufu's Pyramid by Observation of Cosmic-Ray Muons. *Nature*, **552**, 386. <https://doi.org/10.1038/nature24647>
- [15] Tanaka, H., et al. (2011) Cosmic Muon Imaging of Hidden Seismic Fault Zones: Rainwater Permeation into the Mechanical Fractured Zones in Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, **306**, 156. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.03.036>

- [16] Hivert, F., *et al.* (2017) Muography Sensitivity to Hydrogeological Rock Density Perturbation: Roles of the Absorption and Scattering on the Muon Flux Measurement Reliability. *Near Surface Geophysics*, **15**, 121. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2016053>
- [17] Kudryavtsev, V.A., *et al.* (2012) Monitoring Subsurface CO₂ Emplacement and Security of Storage Using Muon Tomography. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **11**, 21-24. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.07.023>
- [18] Klinger, J., *et al.* (2015) Simulation of Muon Radiography for Monitoring CO₂ Stored in a Geological Reservoir. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **42**, 644. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.09.010>
- [19] Gluyas, J., *et al.* (2018) Passive, Continuous Monitoring of Carbon Dioxide Geostorage Using Muon Tomography. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **377**, Article ID: 20180059. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0059>
- [20] Borozdin, K.N., Hogan, G.E., Morris, C., *et al.* (2003) Radiographic Imaging with Cosmic-Ray Muons. *Nature*, **422**, 277.
- [21] Tripathy, S., *et al.* (2019) Material Identification with Cosmic Ray Muons Using RPCs. *Journal of Instrumentation*, **14**, C07007. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/07/C07007>
- [22] Poulson, D., *et al.* (2017) Cosmic Ray Muon Computed Tomography of Spent Nuclear Fuel in Dry Storage Casks. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **842**, 48-53. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.10.040>
- [23] Takamatsu, K., Takegami, H., Ito, C., *et al.* (2015) Cosmic-Ray Muon Radiography for Reactor Core Observation. *Annals of Nuclear Energy*, **78**, 166-175. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.12.017>
- [24] Riggi, F., Antonuccio, V., Bandieramonte, M., Becciani, U., Bonanno, G., Bonanno, D.L., Bongiovanni, D., Fallica, P.G., Gallo, G., Garozzo, S., Grillo, A., La Rocca, P., Leonora, E., Longhitano, F., Lo Presti, D., Marano, D., Randazzo, N., Parasole, O., Petta, C., Riggi, S., Romeo, G., Romeo, M., Russo, G.V., Santagati, G., Timpanaro, M.C. and Valvo, G. (2017) The Muon Portal Project: Commissioning of the Full Detector and First Results. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **912**, 16-19. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.10.006>
- [25] Kamaev, O., Rand, E.T., van der Ende, B.M., Thompson, M., Livingstone, S. and Golovko, V.V. (2019) Complementary Non-Destructive Detection of Nuclear Materials with Passive Neutron and Gamma-Ray Detectors, and a Large-Volume Muon Tomography System. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **944**, Article ID: 162503. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162503>
- [26] Baesso, P., *et al.* (2013) A High Resolution Resistive Plate Chamber Tracking System Developed for Cosmic Ray Muon Tomography. *Journal of Instrumentation*, **8**, P08006. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/08/P08006>
- [27] Baesso, P., *et al.* (2012) High Resolution Muon Tracking with Resistive Plate Chambers. *Journal of Instrumentation*, **7**, P11018. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/11/P11018>
- [28] Frazão, L., *et al.* (2016) Discrimination of High-Z Materials in Concrete-Filled Containers Using Muon Scattering Tomography. *Journal of Instrumentation*, **11**, P07020. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/07/P07020>
- [29] 刘圆圆, 赵自然, 陈志强, 张丽, 岳骞, 李树伟, 王振天. 一种基于 μ 子进行核材料探测成像的模拟系统[J]. 中国体视学与图像分析, 2008(2): 102-105.
- [30] 叶瑾. 利用宇宙线对高Z物质进行成像的技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2009.
- [31] 罗志飞. 缪子能量测量及其在缪子散射成像中的应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2016.
- [32] Li, Q.-T., *et al.* (2013) A Sub-Millimeter Spatial Resolution Achieved by a Large Sized Glass RPC. *Chinese Physics C*, **37**, Article ID: 016002. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/37/1/016002>
- [33] Chen, S., *et al.* (2014) Simulation of a Small Muon Tomography Station System Based on RPCs. *Journal of Instrumentation*, **9**, C10022. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/10/C10022>
- [34] 王月. 灰色关联聚类在宇宙射线 μ 子探测成像中的应用[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2011(1): 292.
- [35] 钟金金. 宇宙射线 μ 子成像在CO₂地质封存监测中的应用可行性研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [36] 庞洪超, 刘森林, 王红艳, 徐勇军, 杨宏伟, 王列民. 宇宙射线 μ 子探测高Z材料的仿真研究[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(7): 872-874.
- [37] 王烈铭, 王红艳, 刘志英, 杨宏伟, 庞洪超. 宇宙射线 μ 子探测裂变核材料的成像算法[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(8): 874-877.