



秦始皇陵地宫宇宙射线缪子吸收成像模拟研究

苏宁 刘圆圆 王力 程建平

Muon radiography simulation for underground palace of Qinshihuang Mausoleum

Su Ning Liu Yuan-Yuan Wang Li Cheng Jian-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 064201 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211582

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211582>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

缪子多模态成像图像质量分析

Image quality evaluation of multimodal imaging of muon

物理学报. 2022, 71(2): 021401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211083>

基于散射和次级诱发中子的缪子多模态成像

Multimodal imaging of muon based on scattering and secondary induced neutrons

物理学报. 2021, 70(19): 191401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210804>

特征 γ 射线谱分析的蒙特卡罗模拟技术

Monte Carlo simulation technology based on characteristic γ -ray spectrum analysis

物理学报. 2020, 69(11): 112801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200279>

质子照相中基于能量损失的密度重建

Density reconstruction based on energy loss in proton radiography

物理学报. 2018, 67(20): 206101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181039>

热辐射输运问题的高效蒙特卡罗模拟方法

An efficient Monte Carlo simulation method for thermal radiation transport

物理学报. 2020, 69(2): 029501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191315>

基于虚拟源原理的源边界参数蒙特卡罗反演技术

Source boundary parameter of Monte Carlo inversion technology based on virtual source principle

物理学报. 2019, 68(23): 232901 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191095>

秦始皇陵地宫宇宙射线缪子吸收成像模拟研究*

苏宁¹⁾ 刘圆圆^{1)†} 王力^{2)‡} 程建平¹⁾

1) (北京师范大学核科学与技术学院, 射线束技术教育部重点实验室, 北京 100875)

2) (北京师范大学物理学系, 北京 100875)

(2021年8月27日收到; 2021年11月11日收到修改稿)

宇宙射线缪子吸收成像技术是一种无损成像技术, 适用于对大尺度的成像目标进行无损探测. 考古学中现有的无损探测方法均存在一定的局限性, 若将缪子吸收成像技术应用于考古领域, 可以作为对传统无损探测方法的重要补充. 本文使用蒙特卡罗 GEANT4 程序, 对秦始皇陵地宫缪子吸收成像进行研究, 基于已有的秦始皇陵考古数据构建秦始皇陵地宫模型, 根据 Reyna 提出的海平面缪子能谱公式抽样产生缪子源的信息, 模拟了宇宙射线缪子在秦始皇陵地宫中的输运过程, 并利用图像重建算法实现墓室大小和位置的重构. 模拟结果表明, 利用单视角获得的缪子通量投影数据可以给出地宫中墓室边界的二维角坐标, 利用两个视角的投影数据可以重建墓室大小和三维位置, 重建得到的墓室边长和墓室中心位置相对于理论值的差异在 7% 左右.

关键词: 缪子吸收成像, 宇宙射线缪子, 蒙特卡罗模拟

PACS: 42.30.Wb, 95.85.Ry, 24.10.Lx

DOI: 10.7498/aps.71.20211582

1 引言

宇宙射线是来自于太空的高能射线. 对宇宙射线的观测研究^[1,2] 不仅推动了天体物理、粒子物理等基础研究的发展, 同时研究人员提出可以利用宇宙射线中的缪子 (μ 子) 能量高、穿透能力强的特点, 通过探测穿透待测物体的宇宙射线 μ 子的通量、角分布等信息实现对待测物体的成像, 这一技术被称为 μ 子成像技术. μ 子成像技术是一种辐射成像技术, 根据所利用的 μ 子与物质相互作用性质的不同, μ 子成像技术可分为两类: 散射成像和吸收成像. 散射成像利用宇宙射线 μ 子穿透物质时发生的多重库仑散射的散射角大小与材料的原子序数有关的特性, 适用于对小型、高密度、高原子序数的物体的成像^[3]. 吸收成像利用宇宙射线 μ 子穿透物质时的能量损失率与穿透路径上物质的密度、

厚度有关的特性来对物体的密度结构成像. 由于宇宙射线 μ 子能量很高、穿透能力强, μ 子吸收成像技术可以对尺度达千米量级的物体成像^[4].

具体来说, 对 μ 子吸收成像的研究最早可追溯至 1955 年, George^[5] 使用 μ 子探测器对澳大利亚一处地下工厂设施上方的岩层厚度进行测量. 20 世纪 60 年代末期, Alvarez 领导的实验组^[6] 使用 μ 子探测器对金字塔中可能存在的墓室进行搜寻, 这是此技术在考古领域的首次应用. 此后近三十年的时间里, 对 μ 子吸收成像技术的研究进展缓慢, 主要是对这一技术应用于火山^[7]、地下洞穴^[8]、矿体探测^[9] 的模拟分析和初步的实验应用. 进入 21 世纪后, 得益于探测器技术的进步, μ 子吸收成像技术得到了快速发展. 日本^[4]、意大利^[10] 等国家的科学家利用 μ 子吸收成像技术对多座火山的内部结构进行了较好的成像, 并开展了对火山内部密度结构动态监测的研究^[11], 尝试结合重力数据进行反投影

* 2021 年生态环境部核与辐射安全技术审评项目 (批准号: NSCCG2021-052) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yliu@bnu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: wangl@bnu.edu.cn

成像以提高成像精度^[12], 成像不再局限于二维, 而是发展到三维的密度结构成像^[13]. 在对金字塔^[14]、地下洞穴^[15]、矿体^[13]等不同类型观测目标的成像方面也有了一些重要的研究成果. 特别是2017年, Morishima等科学家^[14]分别将不同的 μ 子探测器先后放置在胡夫金字塔内部和外侧进行探测, 发现并验证了大走廊上方存在一个至少30 m长的未知墓室. 这一研究结果表明 μ 子吸收成像技术在对大型文物的无损探测方面具备极强的应用潜力. 而我国作为一个历史悠久的文明古国, 现存大量文物遗迹亟待考古研究. 针对帝王陵墓等一些大型文物内部结构的无损探测, 目前考古学中传统的地球物理方法存在着一定的局限性, 例如电法、磁法易受地面环境的干扰; 地震波法成本较高^[16]; 探地雷达法的探测深度范围在几米到十几米之间浮动^[17], 可探测深度相对较浅. 且每一种方法仅对特定的一两种物性敏感, 存在多解性的问题^[18]. 将 μ 子吸收成像技术应用于考古领域, 可以成为对传统地球物理方法的重要补充.

目前国内对 μ 子吸收成像的研究较少, 且集中在地质探测方面, 在 μ 子吸收成像应用于大型文物成像方面的研究几乎空白. 本文以秦始皇陵地宫为研究对象, 利用蒙特卡罗模拟的方法研究 μ 子吸收成像应用于帝王陵墓无损探测的可行性.

2 μ 子吸收成像算法

2.1 μ 子与物质相互作用原理

宇宙射线 μ 子是一种轻子, 它主要由原初宇宙射线与大气层中的原子相互作用产生的 π 介子和K介子的衰变产生, 能量很高, 在相对论效应的作用下能够在发生衰变之前到达海平面. 海平面观测到的宇宙射线 μ 子的平均能量在3—4 GeV, 平均通量约为 $1 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, 是到达海平面的宇宙射线的主要成分^[19]. 到达地面的 μ 子的天顶角 θ 可以是 0° — 90° 间的任意值, μ 子通量随 θ 的增大而减小. 图1(a)为实验中测得的不同天顶角方向入射的海平面宇宙射线 μ 子动量分布, 图1(b)为天顶角 θ 、方位角 φ 示意图.

μ 子穿过物质会通过电离、韧致辐射、电子对产生、核相互作用等方式损失能量, 其平均能量损失率可一般地表达为^[4]

$$-\frac{dE}{dX} = a + bE, \quad (1)$$

其中 E 代表 μ 子能量, $X = \int \rho(x) dx$ 为 μ 子穿过物质的密度对穿透长度的积分, a 对应电离导致的能量损失率, bE 对应其他作用导致的能量损失率. a , b 与 μ 子能量和所穿透物质的种类有关.

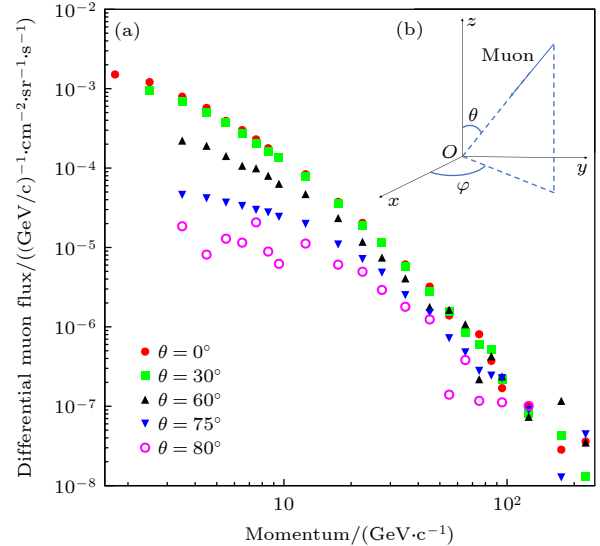


图1 (a) 实验测量得到的不同方向上的海平面 μ 子通量^[20]; (b) 探测器探测到的 μ 子的方位角 φ 和天顶角 θ , 其中 xOy 为水平面

Fig. 1. (a) Sea-level muon flux at different zenith angles measured in experiment^[20]; (b) zenith angle θ and azimuth angle φ of the muon detected by a detector. The xOy plane represents for horizontal plane.

2.2 图像重建算法

由(1)式可知, μ 子穿透一定量的物质后平均损失的能量 ΔE 可表示为

$$\Delta E = \int_0^{X_0} -(a + bE) dX, \quad (2)$$

其中 X_0 为 μ 子穿透物质的密度对穿透路径的积分. X_0 越大, 则 μ 子穿透物质平均损失的能量越多, 能穿透物质的 μ 子越少, 故可根据探测器探测到的穿透待测物体的 μ 子数量的多少推断 μ 子穿透物质的 X 的大小. 辅助一些已知信息, 即可计算未知量. 如已知穿透路径上的平均密度时, 可计算出路径长度; 已知穿透路径长度时, 可计算出穿透路径上的平均密度.

本文基于对待测物体掌握的先验知识(待测物体几何尺寸、部分区域的密度分布), 假设待测物体内部存在密度分布不同于先验知识的感兴趣区域

(region of interest, ROI), 所使用的 μ 子吸收成像的图像重建算法可概括为以下 3 步:

第一步, 获取 μ 子通量. 假设 $N_\mu(\theta, \varphi)$ 表示探测器在 (θ, φ) 方向上探测到的 μ 子数, 则探测器探测到的 μ 子通量 $\Phi_0(\theta, \varphi)$ 为

$$\Phi_0(\theta, \varphi) = \frac{d^3 N_\mu(\theta, \varphi)}{dS d\Omega dt}, \quad (3)$$

其中 S 为探测器面积, Ω 为立体角, t 为测量时间.

第二步, 与先验知识对比, 获取 ROI 边界的二维角坐标信息. 利用已知的待测物体的几何尺寸和密度信息建立参考模型, 模拟得到宇宙射线 μ 子穿透参考模型后剩余的 μ 子通量 $\Phi_s(\theta, \varphi)$, 定义 μ 子通量差 $f(\theta, \varphi) = \Phi_0(\theta, \varphi) - \Phi_s(\theta, \varphi)$. 当 $f(\theta, \varphi) \neq 0$ 时, 代表 (θ, φ) 方向上的密度分布与利用已知信息构建的模型的密度分布不同, (θ, φ) 位于 ROI 内. 若 $f(\theta, \varphi) < 0$, 则代表 (θ, φ) 方向上存在密度偏高的结构 (如高密度矿物), 若 $f(\theta, \varphi) > 0$, 则代表 (θ, φ) 方向上存在密度偏低的结构 (如空穴). 可根据 $f(\theta, \varphi)$ 发生突变处对应的 (θ, φ) 确定 ROI 边界的角坐标.

第三步, 重构 ROI 的三维图像. 探测器在单个测量点得到的数据仅能给出 ROI 相对该测量点的二维角坐标信息, 为了获得 ROI 的三维信息, 需要有两个或两个以上不同位置的测量点的数据. 以两个测量点为例, 当 ROI 为简单的几何体 (如长方体) 时, 可以很方便地将两个测量点观测到的 ROI 边界角坐标对应起来. 如图 2, 在测量点 1 观测到 ROI 的面 $abcd$ 的角坐标为 (θ_1, φ_1) , 在测量点 2 观测到面 $abcd$ 的角坐标为 (θ'_1, φ'_1) , 则可结合

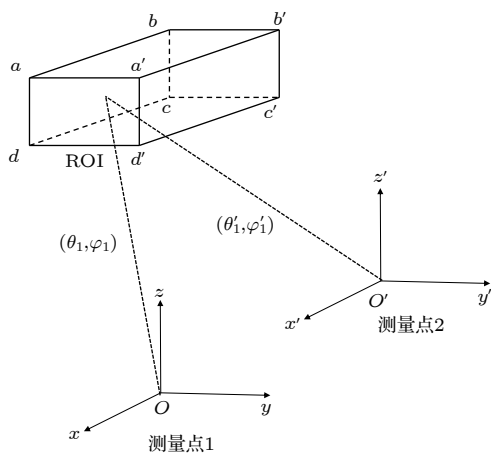


图 2 测量点与 ROI 之间的几何关系示意图

Fig. 2. Geometric relationship between viewpoint and ROI.

两个测量点的位置信息, 根据几何关系计算出面 $abcd$ 的三维坐标, 以此类推, 最终重建出 ROI 的几何大小和三维位置信息.

3 模拟系统建立

本文基于 Geant4 模拟宇宙射线 μ 子在秦始皇陵中的输运过程. Geant4 是欧洲核子中心使用 C++ 语言开发的一款模拟粒子输运过程的蒙特卡罗软件包, 能提供构建几何模型、跟踪粒子径迹、模拟粒子与物质的相互作用等功能^[21]. 本文模拟系统的建立主要包括 3 个方面: 秦始皇陵地宫模型、 μ 子探测器、海平面宇宙射线 μ 子源.

3.1 秦始皇陵地宫模型

本文根据使用综合地球物理方法得到的秦始皇陵考古数据建立了两个秦始皇陵地宫简化模型^[22]. 其中模型 1 为待测物体模型, 包括了封土堆、土地和地宫, 其中地宫由细夯土墙、宫墙、回填夯土和墓室组成; 模型 2 为参考模型, 仅包括封土堆和土地. 模型几何及关键结构的尺寸如图 3 所示. 表 1 列出了地宫模型中不同区域的材质和密度, 其中空气定义为 70% 的氮气和 30% 的氧气, 黄土的组分定义参考了文献^[23].

3.2 μ 子探测器模型

本文采用了理想 μ 子探测器模型, 参考常见的 μ 子探测器几何结构, 将探测器模型表面积设为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 其作用为提取到达探测器区域的 μ 子的速度方向信息. 选取探测器位置时考虑了以下 4 个因素: 1) 探测器位置的海拔高度需要低于地宫区域, 且避开已知的文物理藏区域; 2) 由于 μ 子通量随天顶角增大而显著减少, 为保证 μ 子的计数率, 应避免探测器对待测区域探测方向的天顶角过大; 3) 目标探测区域要尽可能离探测器近以提高计数率; 4) 目标探测区域内不同密度的待探测结构在探测方向上尽量没有重叠. 为了给出成像目标的三维信息, 选定两个测量点, 如图 3(a4) 所示. 测量点 1 选取在 μ 子计数率最高的地宫正下方, 探测器水平放置, 埋深 80 m; 测量点 2 选取在非垂直方向的地宫边缘下方, 位于地宫中心正南方 80 m 处, 探测器埋深 89.5 m, 探测器表面与水平面成 40° 夹角, 使探测平面法线方向指向墓室中心, 从而增大此方向上的 μ 子计数率.

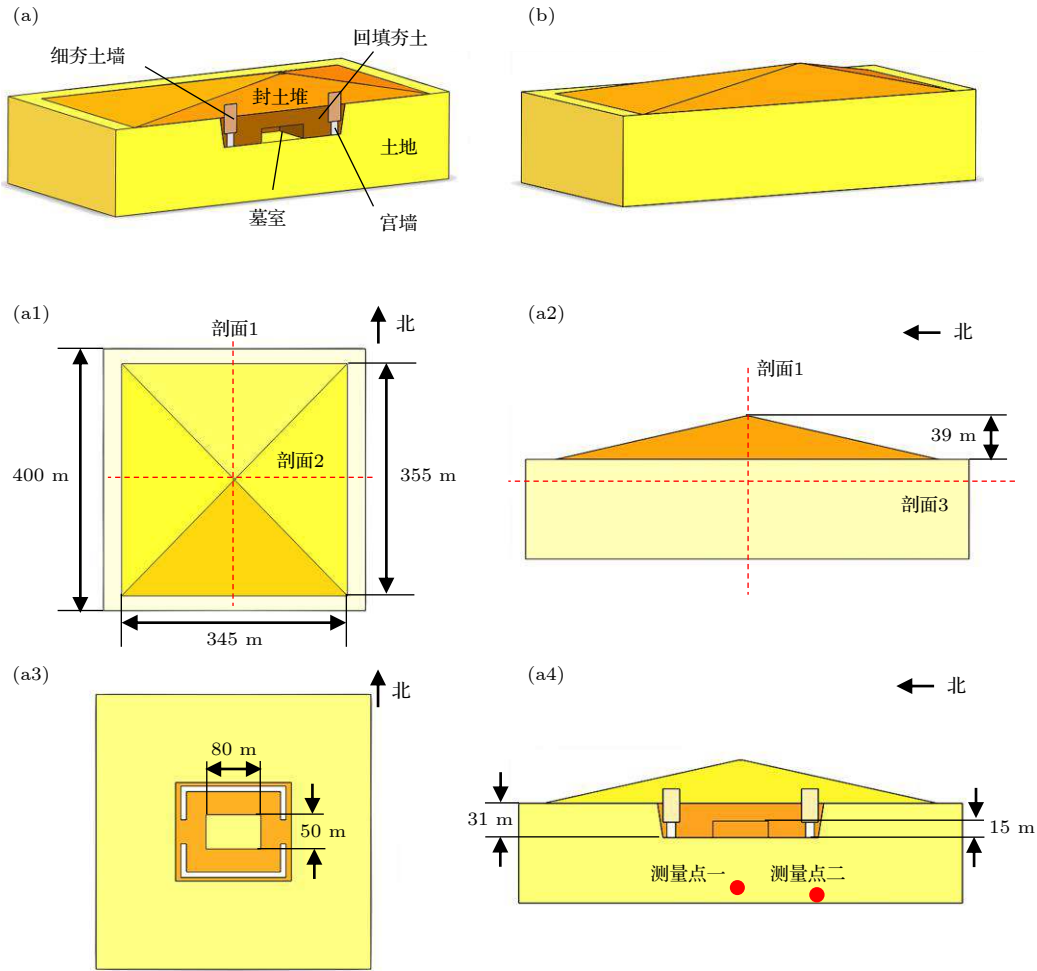


图 3 秦始皇陵模型示意图 (a) 模型 1 内部结构示意图; (a1) 模型 1 俯视图; (a2) 模型 1 正视图; (a3) 模型 1 剖面 3 示意图; (a4) 模型 1 剖面 1 示意图; (b) 模型 2 示意图 (无内部结构);
 Fig. 3. Model of Qinshihuang Mausoleum: (a) Inner structure of Model 1; (a1) top view of Model 1; (a2) front view of Model 1; (a3) profile 3 of Model 1; (a4) profile 1 of Model 1; (b) Model 2 (no inner structure).

表 1 秦始皇陵地宫模型材质及密度定义表^[22]
 Table 1. Material and density definition table of the Qinshihuang Mausoleum model^[22].

区域名称	材质	密度 / (g · cm ⁻³)
土地	黄土	1.6
封土堆	黄土	1.85
细夯土墙	黄土	1.95
回填夯土	黄土	1.85
宫墙	碳酸钙	2.7
墓室	空气	1.29 × 10 ⁻³

3.3 μ子源产生

模拟中μ子源根据海平面μ子能谱经验公式抽样产生. 关于海平面μ子能谱分布的模型有很多种, 例如 Gaisser^[24], Reyna^[25], 以及 Smith 和 Duller^[26] 等提出的模型. 比较这些模型发现, Reyna 总结的

海平面μ子能谱公式能在 $1 \text{ GeV}/c \leq p \leq 2000/\cos\theta \text{ GeV}/c$ 的范围内拟合全部天顶角范围内的μ子能谱分布, 适合于μ子吸收成像中μ子源的抽样^[27]. 其表达式为

$$I(p, \theta) = c_1 \cos^3 \theta \times (p \cos \theta)^{-[c_2 + c_3 \lg(p \cos \theta) + c_4 \lg^2(p \cos \theta) + c_5 \lg^3(p \cos \theta)]}, \quad (4)$$

$I(p, \theta)$ 为海平面μ子微分通量, 单位为 $(\text{GeV}/c)^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; p 为μ子动量, 单位为 GeV/c ; θ 为μ子速度方向天顶角大小; $c_1 = 0.00253$, $c_2 = 0.2455$, $c_3 = 1.288$, $c_4 = -0.2555$, $c_5 = 0.0209$.

模拟中使用的μ子源通过对 (4) 式在 $p = 30\text{--}1000 \text{ GeV}/c$, $\theta = 0^\circ\text{--}70^\circ$ 的范围内抽样产生, 以减少对无法穿透土地到达探测器的低能μ子的模拟, 所使用的μ子源的动量和天顶角分布如图 4.

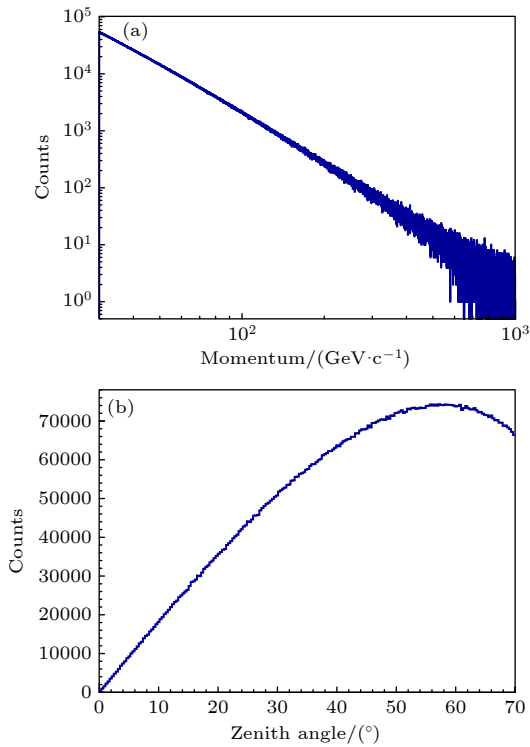


图 4 根据 Reyna 公式抽样产生的 1000 万个 μ 子的动量和天顶角分布 (a) μ 子数量随 μ 子动量变化分布; (b) μ 子数量随 μ 子速度方向的天顶角变化分布

Fig. 4. Momentum spectrum and zenith angle distribution of the 10 million muons sampled by Reyna formula: (a) Momentum spectrum of the sampled muons; (b) zenith angle distribution of the sampled muons.

4 模拟结果

4.1 墓室二维成像结果

对模型 1 和模型 2 均模拟了等效于实际测量一年的 μ 子量, 对两个测量点在模型 1 和模型 2 测得的 μ 子通量作差得到 $f(\theta, \varphi)$ 的分布, 如图 5 所示, 图中灰度值表示 $f(\theta, \varphi)$ (单位: $\text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

图 5(a) 中间的白色矩形区域 $f(\theta, \varphi) > 0$, 说明此方向上存在密度偏低的结构, 即墓室, 根据白色矩形关于图像中心的对称性可知测量点 1 位于墓室正下方; 周围的深色矩形区域 $f(\theta, \varphi) < 0$, 说明此方向上存在密度偏高的结构, 即墓室周围的墙体; $\tan\theta_y = 0$ 附近深色矩形区域边缘处向内凹陷的部分对应于墙体的不连续部分. 图 5(b) 中的白色扇形区域 $f(\theta, \varphi) > 0$, 对应于墓室; 周围的深色弧形区域 $f(\theta, \varphi) < 0$, 对应于墙体; 弧形区域与白色扇形区域之间的区域 $f(\theta, \varphi) < 0$, 对应于地宫开挖范围内回填的夯土. 对比图 5(a) 和图 5(b) 可知,

相对于测量点 1, 测量点 2 除可以显示墙体、墓室外, 还可以看出地宫开挖范围回填夯土所在区域, 这是因为在测量点 1 的探测方向上墙体总是与回填夯土区域有重叠, 导致两者的位置在图 5(a) 所示的角度投影图上也是相互重叠的.

为了便于墓室三维重建, 选择图 3(a1) 所示剖面 1、剖面 2 处的 $f(\theta, \varphi)$ 进行分析, 从而定位墓室墙壁在这两个剖面处的角坐标. 如图 5 所示, 虚线表示剖面方向, 圆点表示剖面处的墙壁的角坐标位置, 其中点 B ($23.75^\circ, 270^\circ$) 和 E ($38.8^\circ, 0^\circ$) 对应于剖面 1 处的南墙, 点 A ($25.64^\circ, 90^\circ$) 和 F ($58.0^\circ, 0^\circ$) 对应于剖面 1 处的北墙, 点 C ($35.75^\circ, 180^\circ$) 对应于剖面 2 处的西墙, D ($37.23^\circ, 0^\circ$) 对应于剖面 2 处的东墙.

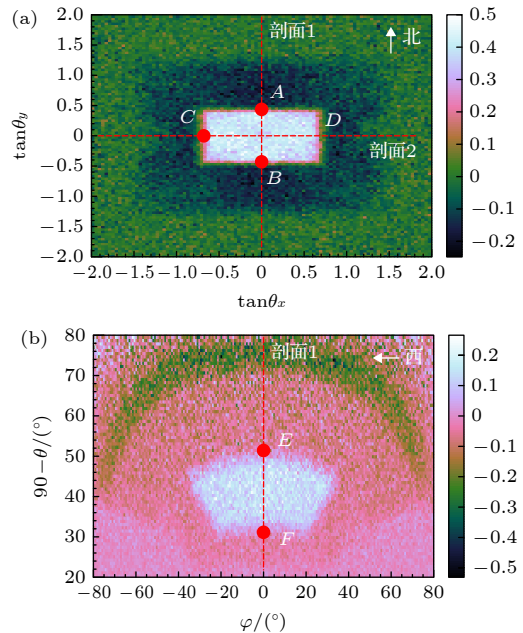


图 5 两个测量点得到的 $f(\theta, \varphi)$ 的二维投影图 (a) 测量点 1 的 $f(\theta, \varphi)$ 投影图, 其中, $\tan\theta_x = \tan\theta\cos\varphi$, $\tan\theta_y = \tan\theta\sin\varphi$; (b) 测量点 2 的 $f(\theta, \varphi)$ 投影图

Fig. 5. Two-dimensional projection of $f(\theta, \varphi)$ obtained at viewpoint 1 and 2: (a) Distribution of $f(\theta, \varphi)$ obtained at viewpoint 1, where the $\tan\theta_x = \tan\theta\cos\varphi$, $\tan\theta_y = \tan\theta\sin\varphi$; (b) distribution of $f(\theta, \varphi)$ obtained at viewpoint 2.

4.2 墓室三维重建结果

墓室的大小和位置是秦始皇陵考古研究最关心的问题之一, 利用 4.1 节中得到的墓室墙壁的角坐标, 结合两个测量点的三维坐标可以重建墓室的三维位置. 如图 6(a) 所示, 由几何关系可计算出墓室南北方向长 53.35 m, 墓室中心埋深 22 m. 再由图 5(a) 中墓室东墙、西墙的角坐标结合墓室埋深

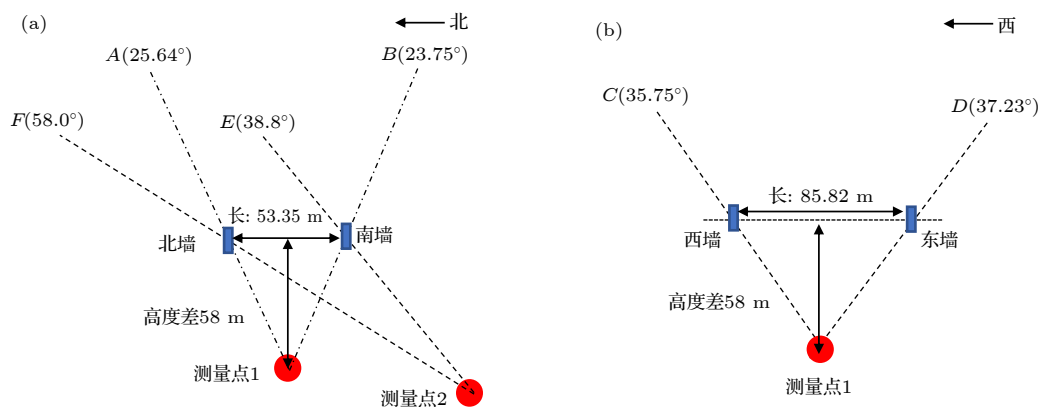


图 6 墓室三维重建结果 (a) 剖面 1 处重建结果; (b) 剖面 2 处重建结果

Fig. 6. Three-dimensional reconstruction results of the chamber: (a) Reconstruction result at Profile 1; (b) reconstruction result at Profile 2.

可计算出墓室东西方向长度为 85.82 m, 如图 6(b) 所示. 重建得到的墓室墙壁边长相较于理论值的差异约为 7%, 埋深差异约为 6%. 该重建结果相对于真值的差异与模拟中探测器位置、统计误差、算法等有关. 在未来的实际测量中, 还需要考虑探测器的角分辨率、几何接受度、探测效率, 以及本底和噪声等对径迹重建和图像重建的影响.

5 总结

本文使用 GEANT4, 基于现有的秦始皇陵考古数据以及理想 μ 子探测器, 对秦始皇陵地宫 μ 子吸收成像进行了模拟研究. 成像结果初步验证了秦始皇陵地宫 μ 子吸收成像的可行性, 单视角获得的 μ 子通量投影数据可以清晰地反映出地宫内部的不同结构, 并能给出墓室墙壁的二维角坐标信息, 利用两个视角下获得的通量数据可以重建出墓室大小和三维位置, 重建得到的墓室边长和墓室中心埋深相对于理论值的差异在 7% 左右. 本文仅是对 μ 子吸收成像应用于秦始皇陵地宫无损探测的初步研究, 后续研究中将进一步细化秦始皇陵模型和 μ 子探测器模型, 调整测量点的位置, 增加测量点数量, 优化多视角三维图像重建算法, 深入分析影响图像重建结果的各种因素.

参考文献

[1] Amenomori M, Bao Y W, Bi X J, et al. 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 51101
 [2] Cao Z, Aharonian F A, An Q, et al. 2021 *Nature* **594** 33
 [3] Liu Y Y, Chen Z Q, Zhao Z R, Zhang L, Wang Z T 2009 *Tsinghua Sci. Technol.* **14** 313

[4] Tanaka H K M, Nakano T, Takahashi S, et al. 2007 *Earth Planet. Sci. Lett.* **263** 104
 [5] George E P 1955 *Commonw. Eng.* 1955 455
 [6] Alvarez L W, Anderson J A, Bedwei F E, et al. 1970 *Science* **167** 832
 [7] Nagamine, K, Iwasaki, M, Shimomura K, Ishida K 1995 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **356** 585
 [8] Caffau E, Coren F, Giannini G 1997 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **385** 480
 [9] Malmqvist L, Jonsson G, Kristiansson K, Jacobsson L 1979 *Geophysics* **44** 1549
 [10] Carbone D, Gibert D, Marteau J, Diamant M, Zuccarello L, Galichet E 2014 *Geophys. J. Int.* **196** 633
 [11] Tanaka H K M 2016 *Sci. Rep.* **6** 39741
 [12] Rosas-Carbajal M, Jourde K, Marteau J, Deroussi S, Komorowski J C, Gibert D 2017 *Geophys. Res. Lett.* **44** 6743
 [13] Schouten D, Ledru P 2018 *J. Geophys. Res. Solid Earth* **123** 8637
 [14] Morishima K, Kuno M, Nishio A, et al. 2017 *Nature* **552** 386
 [15] Saracino G, Amato L, Ambrosino F, et al. 2017 *Sci. Rep.* **7** 1181
 [16] Jiang H Y, Zhang L M 1997 *Chin. J. Geophys.* **40** 383 (in Chinese) [蒋宏耀, 张立敏 1997 *地球物理学报* **40** 383]
 [17] Zong X, Wang X Y, Liu C S, Luo L 2016 *J. Geo-Information Science* **18** 273 (in Chinese) [宗鑫, 王心源, 刘传胜, 骆磊 2016 *地球信息科学学报* **18** 273]
 [18] Lin X J 2011 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [林金鑫 2011 博士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
 [19] Beringer J, Arguin J F, Barnett R M, et al. 2012 *Phys. Rev. D* **86** 010001
 [20] Tsuji S, Katayama T, Okei K, Wada T, Yamamoto I, Yamashita Y 1998 *J. Phys. G:Nucl. Part. Phys.* **24** 1805
 [21] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. 2003 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **506** 250
 [22] Yu G M, Wang S M, Wang B B, et al. 2005 *Geophysical Exploration for the Underground Palace of Emperor Qinshihuang Mausoleum* (Beijing: Geological Publishing House) pp17–58 (in Chinese) [于国明, 王书民, 王帮兵, 等 2005 秦始皇陵地宫地球物理探测成果与技术 (北京: 地质出版社) 第17–58页]
 [23] Wu M Q, Wen Q Z, Pan J Y, Diao G Y 1996 *Prog. Nat. Sci.* **01** 82 (in Chinese) [吴明清, 文启忠, 潘景瑜, 刁桂仪 1996 *自然科学进展* **01** 82]

- [24] Gaisser T K 1990 *Cosmic Rays and Particle Physics* (New York: Cambridge University Press) p71
- [25] Reyna D 2006 arXiv: 0604145v2 [hep-ph]
- [26] Smith J A, Duller N M 1959 *J. Geophys. Res.* **64** 2297
- [27] Su N, Liu Y Y, Wang L, Wu B, Cheng J P 2021 *Front. Energy Res.* **9** 640

Muon radiography simulation for underground palace of Qinshihuang Mausoleum*

Su Ning¹⁾ Liu Yuan-Yuan^{1)†} Wang Li^{2)‡} Cheng Jian-Ping¹⁾

1) (*Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

2) (*Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

(Received 27 August 2021; revised manuscript received 11 November 2021)

Abstract

Muon radiography is a nondestructive imaging technology based on the naturally existing cosmic ray muons. Because cosmic ray muons have the strong ability to penetrate, muon radiography in which the absorption of muons through matter is utilized, is especially suitable for the imaging of large-scale objects. While the traditional geophysical technologies used in archeology have some limitations, muon radiography is expected to become a powerful supplement in the nondestructive detection of large-scale cultural relics. Based on Monte Carlo simulation method Geant4, the muon radiography of the underground palace of Qinshihuang Mausoleum is studied in this work. A model of the underground palace of Qinshihuang Mausoleum is set up with GEANT4 program according to the data acquired by the previous archaeological study of Qinshihuang Mausoleum's inner structure, as well as a reference model without these inner structure. By investigating the differences between the muon fluxes obtained from the two models, the muon radiography image of the inner structure of the model can be obtained. During the simulation, the cosmic ray muon source is generated by sampling according to an empirical formula summarized by Reyna, which can accurately describe the energy spectrum and angular distribution of cosmic ray muons at sea level. In addition, two viewpoints are selected in order to determine the three-dimensional position of the chamber. The simulation data are processed by using an image reconstruction algorithm which can be described as the following three steps. Firstly, the counts of muons in different directions are converted into muon flux. Secondly, the muon flux of the reference model is deducted from that of the Qinshihuang Mausoleum model, and the angular coordinates of the chamber walls are determined. Finally, combined with the wall's angular coordinates obtained from the two viewpoints and the relative position between the two viewpoints, the chamber size and its position are reconstructed according to the geometric relationship. The errors of the reconstructed chamber center position and the length of chamber walls are both approximately 7%. In this article, we conduct only a preliminary study of muon radiography applied to the nondestructive detection of Qinshihuang Mausoleum, but the results show that muon radiography can be a promising tool for the archeological study of Qinshihuang Mausoleum. In the follow-up study, more factors will be taken into consideration, including the details of Qinshihuang Mausoleum model, and the improvement of image reconstruction algorithm.

Keywords: muon radiography, cosmic ray muon, Monte Carlo simulation

PACS: 42.30.Wb, 95.85.Ry, 24.10.Lx

DOI: 10.7498/aps.71.20211582

* Project supported by the Nuclear and Radiation Security Technology in Ministry of Ecology and Environment, China (Grant No. NSCCG2021-052).

† Corresponding author. E-mail: yyliu@bnu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: wangl@bnu.edu.cn