

缪子多模态成像图像质量分析

霍勇刚 严江余 张全虎

Image quality evaluation of multimodal imaging of muon

Huo Yong-Gang Yan Jiang-Yu Zhang Quan-Hu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 021401 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211083

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211083>

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

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>

宇宙线高能粒子对测试质量充电机制

Mechanism of cosmic ray high-energy particles charging test mass

物理学报. 2021, 70(22): 229501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210747>

天光背景下混浊大气中成像质量的分析方法

Image quality analysis method under background radiation in turbid atmosphere

物理学报. 2018, 67(8): 088701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172625>

基于图像内容视觉感知的图像质量客观评价方法

Objective assessment method of image quality based on visual perception of image content

物理学报. 2018, 67(10): 108702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180168>

基于图像内容对比感知的图像质量客观评价

Objective assessment of image quality based on image content contrast perception

物理学报. 2020, 69(14): 148702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200335>

基于图像色貌和梯度特征的图像质量客观评价

Objective image quality assessment based on image color appearance and gradient features

物理学报. 2020, 69(22): 228701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200753>

缪子多模态成像图像质量分析

霍勇刚 严江余 张全虎[†]

(火箭军工程大学核工程学院, 西安 710025)

(2021 年 6 月 8 日收到; 2021 年 10 月 1 日收到修改稿)

缪子多模态成像有效利用了宇宙线缪子与材料相互作用产生的散射信息以及产生次级诱发中子的缪子信息. 为对缪子多模态成像图像质量进行分析, 基于 GEANT4 程序设置了探测模型, 从缪子多重库仑散射模块和缪子诱发中子模块两部分对探测模型可靠性进行了验证, 开发了缪子多模态成像模拟程序, 得到了重建图像. 成像 12 h 可达到 4 mm 的空间分辨率, 成像时间在小时量级可清晰分辨边长 10 cm 的 ^{235}U 立方体和其他常见的高、中、低原子序数材料立方体. 经过 12 h 成像时间, 包覆模型的缪子散射成像图像会造成误判, 但缪子多模态成像图像能够正确反映 ^{235}U 材料存在. 不同成像时间内, 缪子多模态成像图像的结构相似性指标均优于单一成像方法成像图像. 研究表明与缪子散射成像图像和诱发中子符合的缪子成像图像相比, 缪子多模态成像图像有更好的成像质量, 能够适应更复杂的成像场景, 在特殊核材料的检测识别方面更有优势.

关键词: 宇宙线缪子, 缪子多模态成像, 图像质量**PACS:** 14.60.Ef, 87.57.C-, 25.30.Mr, 95.55.Vj**DOI:** 10.7498/aps.71.20211083

1 引言

缪子来源主要分为宇宙线缪子和加速器缪子, 宇宙线缪子由初级宇宙射线与大气分子碰撞产生的次级粒子衰变而来^[1], 带有单位电荷, 质量约为电子质量的 207 倍^[2], 具有连续的能量和角度分布^[3]. 缪子是地球表面发现的最丰富的带电轻子, 海平面的缪子通量为 $10000 (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$ ^[4], 比其他粒子通量大很多: 质子受强相互作用影响; 韧致辐射的能量损失取决于 $1/\text{m}^2$, 使缪子的能量损失为电子和正电子的 $1/40000$; 正电子很容易与大气原子中的电子发生湮灭^[5]. 宇宙线缪子作为广泛易得的天然源, 具有极强的穿透性, 能够很容易克服屏蔽问题^[6], 在火山测量、核材料监控、乏燃料监测、空间气象预测等众多领域^[7,8]发挥着重要作用.

宇宙线缪子在穿过材料时主要经历电磁能量损失和多重库仑散射^[9], 这两种效应成为缪子

透射成像技术和散射成像技术^[5,10]得以实现的基础. 美国洛斯·阿拉莫斯国家实验室 (Los Alamos National Laboratory, LANL) 首次提出了利用宇宙线缪子多重库仑散射效应探测重核材料的散射成像方法^[11], 并利用漂移管探测器证明了缪子散射成像对重核物质、尤其是高 Z 或特殊核材料的鉴别能力^[12]. 以提高探测器位置灵敏度和优化成像算法为主要研究方向, 缪子散射成像逐步发展出了气体电子倍增器、多丝正比室、阻性板探测器、多气隙阻性板探测器^[13–16]等不同类型的成像系统, 以及径迹类最近邻点算法、统计类最大似然散射角和位移算法、密度聚类算法^[17–19]等成像算法. 宇宙线缪子散射信息的统计分布反映了被检物质的元素组成和空间位置分布, 而多重库仑散射信息与物质的辐射长度以及厚度有关, 使缪子穿过厚的低原子序数物质的角度偏转与位移, 同穿过薄的高原子序数物质的角度偏转与位移相似的可能性增加^[11].

[†] 通信作者. E-mail: zhangqh_102@sina.com

传统依靠核共振荧光^[20]来识别物体的单侧成像技术受到穿透深度、辐射剂量的限制,利用被次级诱发中子标记的入射缪子,则能突破传统方法的局限,在军控核查领域以高穿透性和低剂量实现对特殊核材料 (special nuclear material, SNM) 的探测与成像^[21,22]. 当入射缪子通过能量损失完全停止在被测物质中时,一方面停止概率的高低说明了被测物质密度的大小;另一方面由于缪子的平均寿命远大于缪子的俘获时间,使得缪子被俘获后极有可能通过弱相互作用与物质原子核中的质子结合形成受激原子,从而产生缪子诱发裂变^[23],当被测物质是可裂变的 SNM 时,又会根据系统的中子有效增殖,产生更多的裂变中子,进一步增强次级信号. 诱发中子符合的缪子成像利用被次级中子标记的缪子实现对探测物体的成像,已被研究用于军控核查中 SNM、货物集装箱中屏蔽高浓铀的检测^[24,25]. 宇宙线缪子的平均能量为 3—4 GeV^[26],被俘获产生次级诱发中子的缪子数较少,因此成像时间长,成像质量较低.

前期研究工作在结合缪子散射信息,以及产生次级诱发中子的缪子信息基础上,实现了缪子多模态成像^[27],初步证明了缪子多模态成像对有效信息的利用率更高,对 SNM 具有更好的成像本领. 本文通过对多种成像场景下的缪子多模态成像图像质量的分析评估,进一步深入研究缪子多模态成像性能,以期为实际应用提供有益参考.

2 研究方法

以缪子多模态成像对 SNM 的检测识别为研究背景,利用 Geant4 程序设计了以 ^{235}U 为主要材料的不同模型. 首先对探测模型的可靠性进行验证,以确保成像数据的正确性. 其次,成像时间对缪子多模态成像质量的影响通过不同成像时间内,线对模型成像结果的空间分辨率、不同物块成像结果的材料分辨力进行分析. 再次,通过对包覆模型成像,检验复杂屏蔽条件下缪子多模态成像图像表现信息的正确性. 最后,根据成像模型,在给定参考图像的情况下,通过计算缪子多模态成像图像与参考图像的结构相似性 (structural similarity, SSIM)^[28] 指标,并与缪子散射成像图像、诱发中子符合的缪子成像图像计算得到的 SSIM 指标进行对比,以定量的方法判断成像性能的优劣.

2.1 缪子源项、探测模型

美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL) 开发的 Cosmic-ray Shower Library (CRY) 考虑了太阳周期、海拔和地磁偏转对生成粒子的影响,能够产生同宇宙线分布一致的粒子^[29],模拟实验以该软件包产生的缪子作为源项输入. 探测模型由 4 块灵敏面积 $1000\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$ 的气体探测器组成,上下探测器平板间距 d 为 100 mm ,探测空间高度 L 为 1000 mm ,探测空间中心位置为坐标原点,如图 1 所示. CRY 缪子源从探测器 1 外侧向探测空间发射缪子,气体探测器用于记录缪子在探测器平面上的二维位置信息,加上固定的探测器高度,可分别得到缪子在空间中的入射轨迹和出射轨迹. 探测空间内根据成像场景的具体要求而设置不同的被测物体,探测空间填充介质设置为空气.

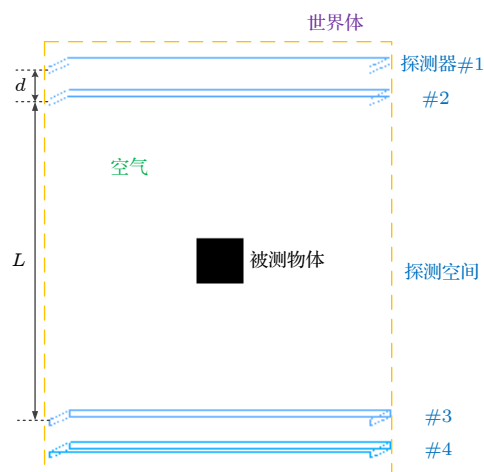


图 1 探测模型设置

Fig. 1. Detecting model setting.

2.2 缪子多模态成像原理

缪子多模态成像有效结合了穿透物质的缪子散射信息,以及被俘获产生次级诱发中子的缪子信息,能够提高有效信息利用效率,突破单一成像方法的局限,确保在准确检测 SNM 的前提下,提高成像质量. 缪子多模态成像所利用信息如图 2 所示:当宇宙线缪子入射被检物体后,大部分经历多重库仑散射的高能缪子最终出射到被检物体外,表现为入射径迹和出射径迹间的角度偏转,若入射位置和出射位置均被探测器有效记录,则为可利用的散射信息;低能缪子因能量损失而被物体阻止,一部分低能缪子,主要是低能负缪子与被检物质中的

质子结合形成受激原子并最终产生次级诱发中子,若初级缪子和次级诱发中子均被有效探测,则为可利用的产生诱发中子的缪子信息。

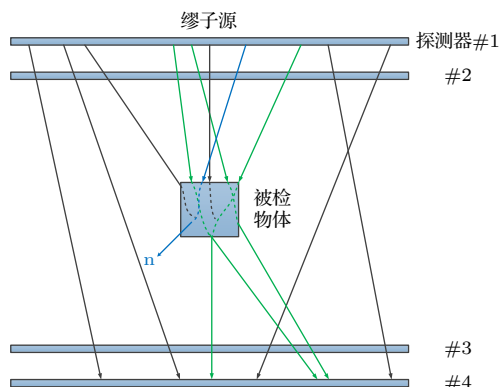


图2 缪子多模态成像图解 (绿色为发生散射的有效缪子,蓝色为产生次级诱发中子的有效缪子)

Fig. 2. Diagram of multimodal imaging of muon (Green trajectories are the effective scattering muons and blue trajectory is the effective muon producing secondary induced neutrons).

进一步利用成像算法处理缪子散射信息和产生诱发中子的缪子信息,得到计算多模态成像信息 w 所需的散射密度信息 λ 和缪子交点密度信息 ρ . 将成像平面划分为大小一致的网格,多模态成像信息 w_j 由同一网格 j 内,不同权重的散射密度信息 λ_j 与产生诱发中子的缪子交点密度信息 ρ_j 加权得到. 多模态成像信息的组成决定了散射密度信息 λ_j 和缪子交点密度信息 ρ_j 的权重将随成像场景的变化而调整,对一般材料成像时,散射密度信息 λ_j 权重 i 更大,对 SNM 成像时,缪子交点密度信息 ρ_j 权重 k 更大。

$$w_j = i\lambda_j + k\rho_j. \quad (1)$$

2.3 SSIM 指标

图像质量评估方法分为全参考质量评价、半参考质量评价、无参考质量评价 3 种 [30]. SSIM 作为一种全参考质量评价方法,将质量评价从逐像素计算带入了对图像结构的整体评估,可以获取符合人眼视觉系统的图像结构信息,得到了广泛应用 [31]. SSIM 大小越接近 1,评价图像与参考图像越相似. SSIM 评价算法如图 3 所示,通过亮度、对比度和结构 3 个方面计算两幅图像的相似性. 本文利用该算法计算成像灰度图和参考灰度图的 SSIM 指标,以此作为评估不同成像方法成像质量的定量依据。

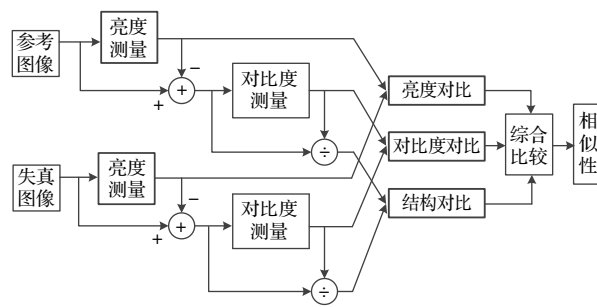


图3 SSIM 评价算法框架

Fig. 3. Flow chart of SSIM objective evaluation.

3 探测模型可靠性验证

保证成像所依据模拟数据的正确性是对缪子多模态成像图像进行质量分析的前提. 缪子多模态成像利用的物理机制主要是缪子的多重库仑散射和缪子诱发产生次级中子,因此,通过对缪子多重库仑散射模块和缪子产生诱发中子模块进行验证来确保探测模型的可靠性。

3.1 多重库仑散射模块验证

多重库仑散射模块的正确性通过统计缪子穿过材料后的散射角分布来验证,验证模型如图 4 所示. 1000 mm × 1000 mm × 100 mm 大小的待测平板中心位于探测空间坐标原点. 沿探测器 1 上表面均匀分布的 4 GeV 能量的缪子垂直入射待测平板,不同材料待测平板的入射缪子均为 20 万个。

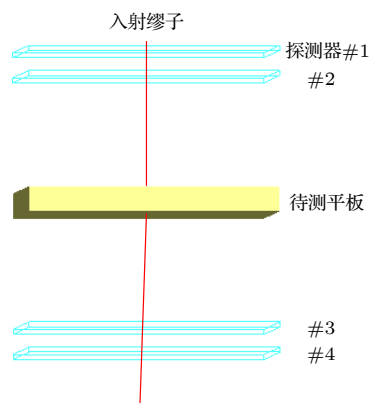


图4 散射模块验证模型

Fig. 4. Validation model of scattering module.

模拟得到分别代表 SNM、高原子序数、中原子序数、低原子序数材料的铀、铅、铁、铝的散射角分布如图 5 所示. 由图 5 可知,同为高原子序数材料的铀、铅散射角分布差别较小,但高原子序数、

中原序数、低原子序数材料间的散射角分布存在明显差距. 缪子穿过原子序数越高的材料发生大角度散射事件的可能性越大, 分布展宽更宽; 缪子穿过原子序数越低材料发生小角度散射事件的次数越多, 角度分布越集中. 表 1 为模拟得到的缪子散射角均方根值、理论值以及相对误差, 其中理论值计算方法为 [32]

$$\sigma_{\theta} = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} \sqrt{\frac{L}{L_0}} \left[1 + 0.038 \lg \left(\frac{L}{L_0} \right) \right], \quad (2)$$

其中, L 为材料厚度, L_0 为材料的辐射长度, p , β 为缪子动量和相对速度, c 为光速. 模拟得到的相对误差都在 4% 以内, 表明多重库仑散射模块可靠.

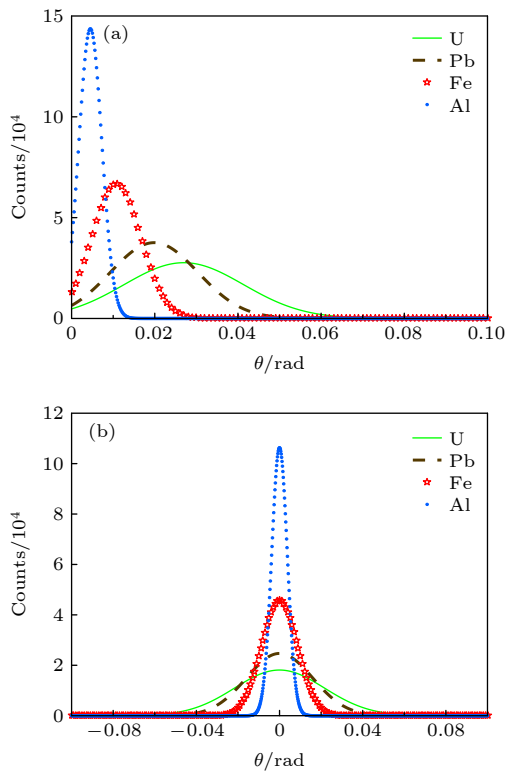


图 5 4 GeV 缪子入射 10 cm 厚不同材料的散射角分布 (a) 立体角分布; (b) 平面角分布

Fig. 5. Scattering angle distribution of 4 GeV muons incident on different materials with a thickness of 10 cm: (a) Solid angle distribution; (b) plane angle distribution.

表 1 4 GeV 缪子穿过 10 cm 厚不同材料的散射角
Table 1. Multiple scattering for 4 GeV muons passing through 10 cm of various materials.

材料	L_0/cm	实验值 θ/rad	理论值 θ/mrad	相对误差/%
U	0.32	21.58	21.49	0.42
Pb	0.56	15.92	15.94	0.13
Fe	1.76	8.67	8.64	0.35
Al	8.89	3.74	3.62	3.31

3.2 缪子产生诱发中子模块验证

缪子产生诱发中子模块通过测量各向同性的缪子点源与铀块相互作用后产生的次级中子出射率和次级中子能谱进行验证, 验证模型如图 6 所示. 参考文献 [21] 将 2 GeV 和 1 MeV 的正、负缪子点源置于边长 10 cm 的 HEU(90% ^{235}U) 立方体、LEU(19.5% ^{235}U) 立方体、DU(0% ^{235}U) 立方体中心, 每次模拟均发射 10 万个各向同性的缪子, 当次级中子出射到铀立方体外即视作有效计数. 模拟中使用 Geant4 自带物理模型 QGSP_BERT_HP, 该物理模型包含模拟缪子俘获的 muMinusCaptureAtRest 物理过程, 以及中子能量从亚电子伏到 20 MeV 范围内详细截面的 Neutron_HP 模型 [33,34].

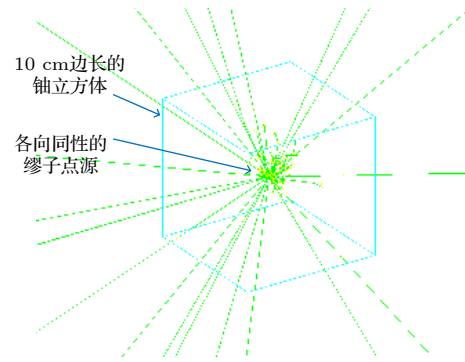


图 6 诱发中子模块验证模型

Fig. 6. Validation model of induced neutrons.

模拟得到不同能量下的正、负缪子入射 HEU 立方体、LEU 立方体、DU 立方体的次级中子产生情况, 以及 2 GeV 的负缪子入射 HEU 立方体、LEU 立方体、DU 立方体后产生的次级中子能谱, 分别如表 2 和图 7 所示. 由表 2 可知, 本文实验结果与文献 [21] 实验结果趋势一致: 低能负缪子在不同丰度的 ^{235}U 立方体中都产生了主要的中子输出, 具有数量级的优势; 与 LEU 立方体相比, HEU 立方体的中子出射率增加了 1 倍, LEU 立方体较 DU 立方体的中子出射率更高, 但相差范围较小. 由图 7 可知: 2 GeV 负缪子入射不同铀立方体后, 次级中子能量分布主要集中在 10^{-2} MeV 到 10 MeV 范围内; HEU 立方体较 LEU, DU 立方体的中子增益略有增加, 处于同一量级, 峰位整体向右偏移, 与参考文献 [21] 所示结果特征一致. 表明缪子产生诱发中子模块可靠.

表 2 铀立方体的中子出射率

Table 2. Rate of neutrons that are emitted from bare cubes of uranium.

	出射中子数/入射缪子数		
	HEU	LEU	DU
1 MeV负缪子	30.8	11.7	9.35
1 MeV正缪子	0.0538	0.0193	0.0164
2 GeV负缪子	0.0291	0.0152	0.0116
2 GeV正缪子	0.0286	0.0130	0.0124

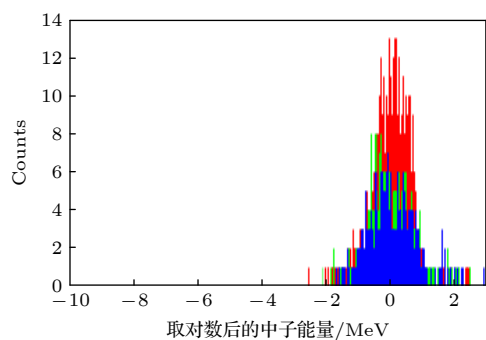


图 7 2 GeV 负缪子入射不同铀立方体后产生的次级中子能谱, HEU(红色)、LEU(绿色)、DU(蓝色)

Fig. 7. Secondary neutron spectrum that result from negative muon : HEU (red), LEU (green), DU (blue).

表 2 与文献 [21] 的中子出射率存在数量上的差异, 即本文实验所得中子出射率更高, HEU 的中子出射率增幅更大. 一方面是因为文献 [21] 为提高探测系统的信噪比, 仅统计了缪子发射后 1 μ s 内出射铀立方体的快中子数, 而本文研究统计了所有出射铀立方体的中子数, 使各次实验统计得到的中子数增加, 提高了中子出射率. 另一方面如前文所述, 当入射材料为可裂变的铀材料时, 诱发中子将触发裂变链, 进一步产生更多次级裂变中子, 且 ^{235}U 较 ^{238}U 的裂变截面更大, 产生的次级中子更多, 使文献 [21] 未统计的诱发中子对铀立方体中子出射率的贡献进一步增加, 提高了 HEU 立方体相较 LEU 立方体、DU 立方体的中子出射率.

4 成像质量分析

4.1 模型设置

为评价缪子多模态成像图像质量, 依据研究方法, 设计了如图 8 所示模型. 线对模型材料为 ^{235}U , 长度为 100 mm, 从左至右横截面为 4^2 , 4^2 , 6^2 , 6^2 , 10^2 , 10^2 , 20^2 , 20^2 mm², 狭缝宽度为 4, 6, 6, 10, 10, 20, 20 mm. 物块模型为边长 100 mm 的立方体, 分别以 ^{235}U 、铅、铁、铝为材料构建物块. 立方体包覆模型外部铅层边长为 140 mm, 厚度为 40 mm, 中间铁层边长 100 mm, 厚度 40 mm, 内部 ^{235}U 层边长 60 mm. 字母模型材料为 ^{235}U , 由边长 50 mm 的立方体组成, 字母 E、字母 P 分别由 16 个、15 个立方体相接组成.

4.2 成像时间对空间分辨率的影响

成像时间对缪子多模态重建图像空间分辨率的影响以线对模型为研究对象. 成像平面大小为 1000 mm \times 1000 mm, 像素大小为 2 mm \times 2 mm. 成像结果如图 9 所示, 两小时即能重建出 20 mm, 10 mm 以及 6 mm 线对; 成像时间达到 12 h, 能重建出 4 mm 的线对. 随着成像时间的进一步延长, 空间分辨率的提高较小.

4.3 成像时间对材料分辨力的影响

成像时间对缪子多模态重建图像材料分辨力的影响以物块模型为研究对象. 成像平面大小为 160 mm \times 160 mm, 像素大小为 20 mm \times 20 mm. 为直观比较不同成像时间内的各材料物块的成像情况, 重建图像均归一化显示, 如图 10. 计算了不同时间内各材料物块相对于 ^{235}U 物块的多模态信息量均值, 如图 11 所示. 据图可知, 缪子多模态成

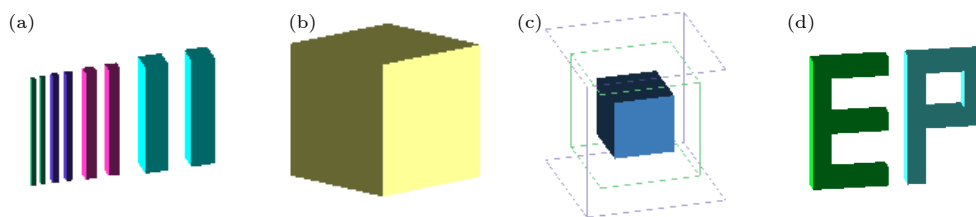


图 8 成像模型 (a) 线对模型; (b) 物块模型; (c) 包覆模型; (d) 字母模型

Fig. 8. Imaging models: (a) Line pair model; (b) object model; (c) cladding model; (d) letter model.

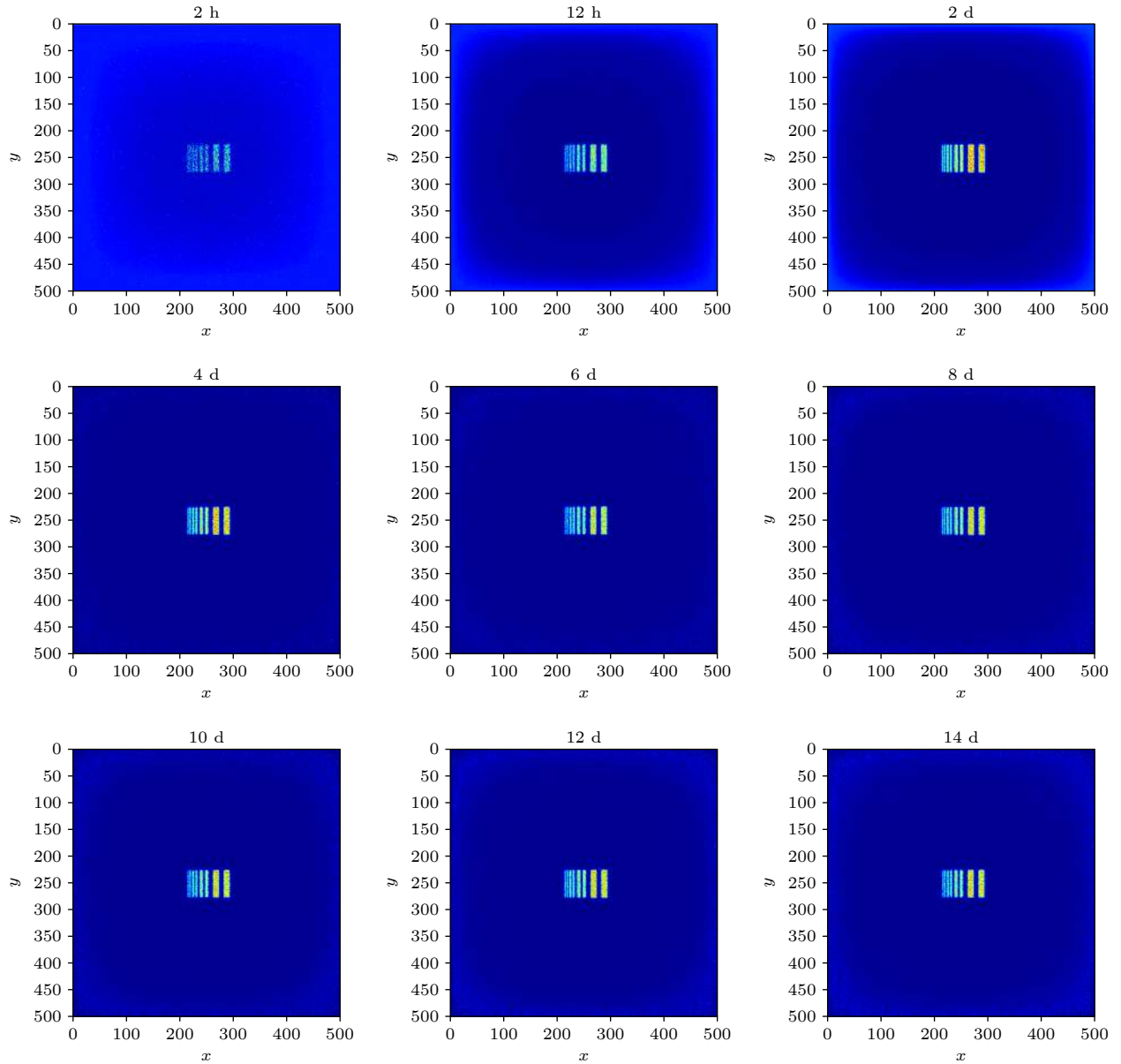


图9 不同成像时间内线对模型成像结果

Fig. 9. Imaging results of the line pair model in different imaging time.

像能有效区分高、中、低原子序数材料,且同为高原子序数材料的 ^{235}U 块、铅块也能明显分辨.随着成像时间延长,缪子多模态成像对 ^{235}U 材料的成像优势也逐步增强,这是因为一般材料的多模态成像信息 w 几乎仅由散射信息 λ 组成,而SNM的多模态成像信息 w 由散射信息 λ 和产生诱发中子的缪子交点密度信息 ρ 共同组成.随着成像时间的延长,缪子交点密度信息 ρ 更加丰富,从而增强对SNM的成像能力,加强多模态成像对SNM同其他高原子序数材料的分辨能力.

4.4 复杂屏蔽下多模态成像图像的正确性检验

复杂屏蔽条件下,缪子多模态成像图像的正确性检验以包覆模型和大小相同的铅立方体为研究对象.成像时间为12 h,成像平面大小为200 mm × 200 mm,像素大小为20 mm × 20 mm.按 ^{235}U 密度18.95 g/cm³、铅密度11.35 g/cm³、铁密度7.9 g/cm³计算得到包覆模型质量30.08 kg,为质量31.14 kg铅立方体的96.6%.首先以单一缪子散射成像方法对铅立方体和包覆模型成像,再根据缪子多模态成

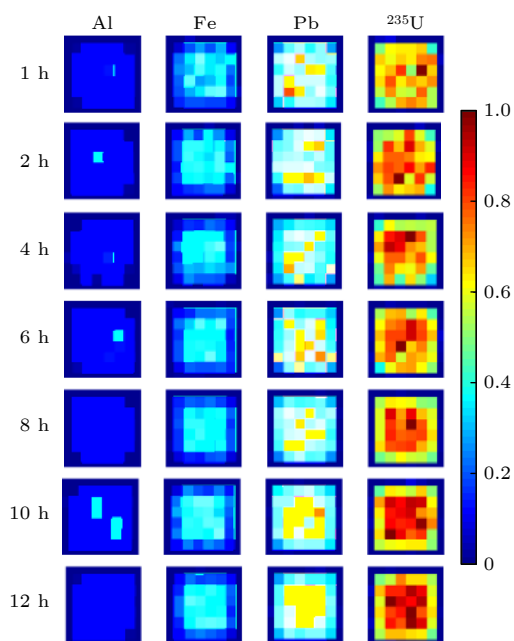


图 10 不同成像时间内物块模型成像结果

Fig. 10. Imaging results of the object model in different imaging time.

像方法对包覆模型成像, 得到成像结果如图 12 所示, Z 轴数值代表散射密度或多模态信息量的大小. 铅立方体的散射成像图像较为均匀, 单个像素网格内的散射密度值较大. 仅根据散射成像图像无法检测出包覆模型含有比铅原子序数更高的 ^{235}U 材料, 由于中间铁层材料的影响, 散射成像结果显示 ^{235}U 所在位置散射密度小于外部铅材料所在位置的散射密度. 缪子多模态成像图像反映出包覆模型中部位置含有比外部铅原子序数更高的材料, 这与包覆模型的实际结构一致. 包覆模型的多层结构使缪子多模态成像包含的诱发中子信息位置精度

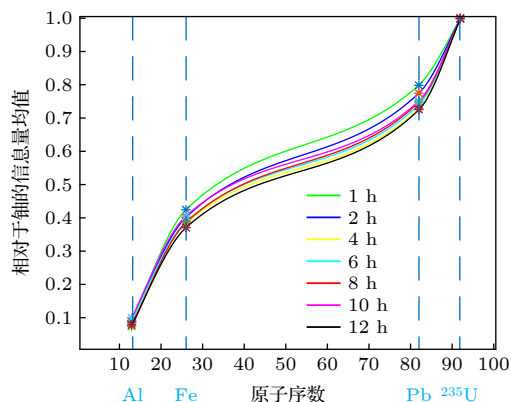


图 11 不同成像时间内物块模型的重建多模态信息量

Fig. 11. Amount of reconstructed multimodal information of the object model in different imaging time.

较低, 导致多模态成像图像对 ^{235}U 材料的重建位置不够精确.

4.5 成像质量定量评估

缪子多模态成像质量的定量评估以字母模型为研究对象. 成像空间大小为 $500\text{ mm} \times 400\text{ mm}$, 像素大小为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$. 图 13 所示灰度图为不同成像时间内, 缪子多模态成像结果、缪子散射成像结果、诱发中子符合的缪子成像结果以及参考图像. 根据 SSIM 评价算法得到不同成像时间内, 3 种成像方法的重建图像与参考图像的 SSIM 指标, 结果如图 14 所示. 计算结果表明缪子多模态成像图像较缪子散射成像图像、诱发中子符合的缪子成像图像质量更高, 且随着成像时间延长, 缪子多模态成像图像的 SSIM 值越大, 相较单一成像方法的优势越明显.

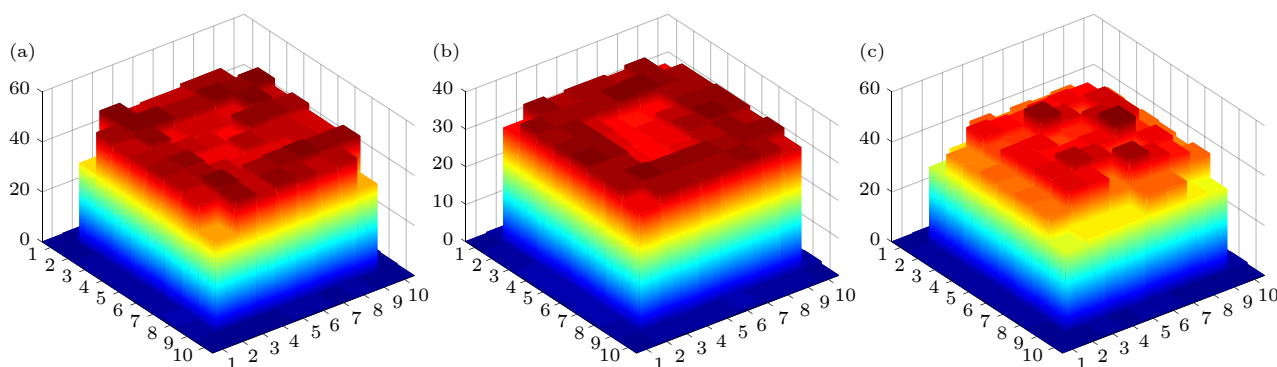


图 12 铅立方体和包覆模型成像结果 (a) 铅立方体的散射成像图像; (b) 包覆模型的散射成像图像; (c) 包覆模型的多模态成像图像

Fig. 12. Imaging results of lead cube and cladding model: (a) Scattering imaging image of lead cube; (b) scattering imaging image of cladding model; (c) multimodal imaging image of cladding model.

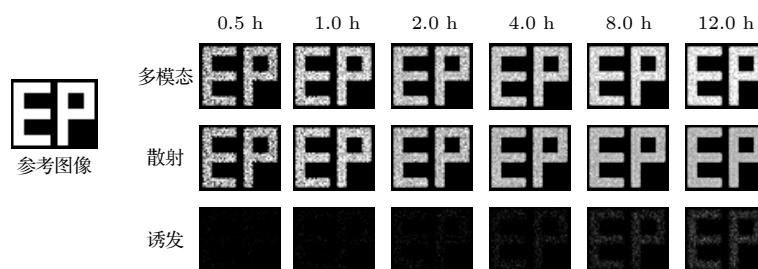


图 13 参考图像和 3 种成像方法成像灰度图

Fig. 13. Reference image and gray images of three imaging methods.

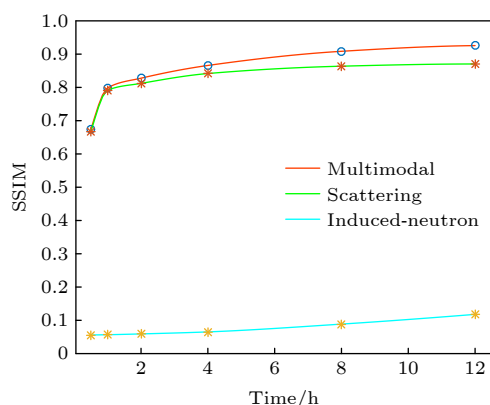


图 14 不同成像时间内 3 种成像方法成像图像的 SSIM 计算结果

Fig. 14. SSIM calculation results of three imaging methods in different imaging time.

5 结 论

本文在确保探测模型可靠的基础上, 主要研究了成像时间对缪子多模态成像图像质量的影响, 以及复杂屏蔽条件下缪子多模态成像图像的正确性, 并在给定参考图像的情况下, 通过计算 SSIM 指标对缪子多模态成像图像质量进行定量分析评估. 由研究结果可知, 成像时间越长, 缪子多模态成像图像质量越高: 成像时间在 12 h 内就能达到 4 mm 的空间分辨率, 但随着成像时间进一步延长, 空间分辨率改善不大; 缪子多模态成像在小时量级即可分辨 ^{235}U 材料和其他常见的高、中、低原子序数材料, 且随着成像时间延长, ^{235}U 材料与高原子序数材料铅之间的区分更加明显. 缪子多模态成像能够克服复杂屏蔽的影响, 能够检测出包覆模型中的 ^{235}U 材料, 而单一的散射重建图像会造成误判. 根据计算得到 ^{235}U 立方体组成的字母模型重建图像的 SSIM 指标可知, 在相同成像时间内, 缪子多模态成像图像具有比单一缪子散射成像图像和诱发中子符合的缪子成像图像更高的质量. 研究表明缪

子多模态成像满足成像一般材料的能力, 能够克服复杂屏蔽对一般成像方法的影响, 特别在检测成像 SNM 方面具有更大优势, 在军控核查领域和维护国土安全方面具有潜在的应用价值.

参考文献

- [1] Mollerach S, Roulet E 2018 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **98** 85
- [2] Luo X W, Yang Y X, Li Y, Bao Y, Shu L 2020 *Atom. Energ. Sci. Technol.* **54** 2296 (in Chinese) [罗小为, 杨燕兴, 李祥, 鲍煜, 姜蕾 2020 原子能科学技术 **54** 2296]
- [3] Shukla P, Sankrith S 2018 *Int. J. Mod. Phys. A* **33** 1850175
- [4] Yu B H 2016 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [于百蕙 2016 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [5] Lorenzo B, Raffaello D A, Andrea G 2020 *Rev. Phys.* **5** 100038
- [6] Erlandson A, Anghel V N P, Godin D, Jewett C, Thompson M 2021 *J. Instrum.* **16** 02024
- [7] Chatzidakis S, Liu Z Z, Hayward J P, Scaglione J 2018 *Appl. Phys.* **123** 124903
- [8] Ayuso S, Blanco J J, Tejedor J, Herrero R J, Vrublevskyy I, Población O G, Medina J 2021 *J. Space Weather Space Clim.* **11** 13
- [9] Durham J M, Poulson D, Plaud-Ramos K, Bacon J, Chichester D L, Guardincerri E, Morris C L, Plaud-Ramos K, Schwendiman W, Tolman J D, Winston P 2018 *Phys. Rev. Appl.* **9** 044013
- [10] Procureur S 2018 *Nucl. Instrum. and Meth. A* **878** 169
- [11] Borozdin K N, Hogan G E, Morris C, Priedhorsky W C, Saunders A, Schultz L J, Teasdale M E 2003 *Nature* **422** 277
- [12] Zhi Y, Zhou J, Chen L, Li P Y, Zhao M R, Liu W D, Jia S H, Zhang Y Y, Hu S Y 2020 *Atom. Energ. Sci. Technol.* **54** 990 (in Chinese) [智宇, 周静, 陈雷, 李沛玉, 赵明锐, 刘雯迪, 贾世海, 张昀昱, 胡守扬 2020 原子能科学技术 **54** 990]
- [13] Schultz L J, Borozdin K N, Gomez J J, Hogan G E, McGill J A, Morris C L, Priedhorsky W C, Saunders A, Teasdale M E 2004 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **519** 687
- [14] Baesso P, Cussans D, Glaysher P, Thomay C, Vassallo C, Velthuis J, Quillin S, Robertson S, Steer C 2012 *J. Instrum.* **7** P11018
- [15] Gnanvo K, Grasso L, Hohlmann M, Locke J B, Quintero A, Mitra D 2011 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **652** 16
- [16] Chen X L, Wang Y, Chen G, Han D, Guo B, Yu Y, Zhang Q, Lyu P, Wang F 2020 *J. Instrum.* **15** C03012
- [17] Schultz L J, Borozdin K N, Gomez J J, Hogan G E, Mc Gill J

- A, Morris C L, Priedhorsky W C, Saunders A, Teasdale M E 2003 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **519** 687
- [18] Schultz L J, Blanpied G S, Borozdin K N, Fraser A M, Hengartner N W, Klimenko A V, Morris C L, Orum C, Sossong M J 2007 *IEEE Trans. Image Process.* **16** 1985
- [19] Hou L J, Huo Y G, Zuo W M, Yao Q X, Yang J Q, Zhang Q H 2020 *Nucl. Eng. Technol.* **53** 208
- [20] Warren G A, Caggiano J A, Bertozzi W, Korbly S, Ledoux R J, Park W H 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 317
- [21] Guardincerri E, Bacon J, Borozdin K, Matthew D J, Fabritius J, Hecht A, Milner E C, Miyadera H, Morris C L, Perry J, Poulson D 2015 *Nucl. Instrum. Methods A* **789** 109
- [22] Bacon J D, Borozdin K N, Fabritius II J M, Morris C, Perry J O 2013 *Muon Induced Fission Neutrons in Coincidence with Muon Tomography* (Los Alamos, Los Alamos National Lab, LA-UR-13-28292 [R])
- [23] Volker E, Oberacker, Umar A S, Karpeshin F F 2004 arXiv: nucl-th/0403087 [nucl-th]
- [24] Morris C, Durham J M, Guardincerri E, Bacon J D, Wang Z H, Fellows S, Poulson D C, Plaud-Ramos K O, Daughton T M, Johnson O R 2015 *A new method of passive counting of nuclear missile warheads -a white paper for the Defense Threat Reduction Agency* (Los Alamos: Los Alamos National Lab, LA-UR-15-26068 [R])
- [25] Blackwell T B, Kudryavtsev V A 2015 *J. Instrum.* **10** 05006
- [26] He W B 2019 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [何伟波 2019 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [27] Yan J Y, Zhang Q H, Huo Y G <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1958.O4.20210529.1750.002.html> [2021-06-08]
- [28] Wang Z, Bovik A, Sheikh H R, Simoncelli E P 2004 *IEEE Trans. Image Process.* **13** 600
- [29] Ide K, Becchetti M F, Flaska M, Poitrasson-Riviere A, Hamel M C, Polack J K, Lawrence C C, Clarke S D, Pozzi S A 2012 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **694** 24
- [30] Li K W, Xu L, Chen Q 2020 *Comput. Sci.* **47** 159 (in Chinese) [李凯文, 徐琳, 陈强 2020 *计算机科学* **47** 159]
- [31] He K, Niu J H, Shen C N, Lu W X 2018 *J. Tianjin Univ.* **51** 763 (in Chinese) [何凯, 牛俊慧, 沈成南, 卢雯霞 2018 *天津大学学报* **51** 763]
- [32] Xiao S 2018 *Ph. D. Dissertation* (Mianyang: China Academy of Engineering Physics) (in Chinese) [肖洒 2018 博士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院)]
- [33] Malyskhina Y, Pshenichnova I, Mishustina I, Hughesd T, Heidd O, Greiner W 2012 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **289** 79
- [34] Kasztelan M, Jedrzejczak K, Szabelski J 2019 *Mod. Phys. Lett. A* **6** 1950046

Image quality evaluation of multimodal imaging of muon

Huo Yong-Gang Yan Jiang-Yu Zhang Quan-Hu[†]

(School of Nuclear Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

(Received 8 June 2021; revised manuscript received 1 October 2021)

Abstract

Both the information about the scattering of muons due to their interaction with material and the information about the material-stopped muons generating secondary induced neutrons effectively are used for multimodal imaging of muon. In order to evaluate the image quality of multimodal imaging of muon, the detection model is established based on Geant4 and the reliability of the detection model is verified. Both the multiple Coulomb scattering module and the muon induced neutron module prove to be reliable. The multimodal imaging simulation program is developed, and the images are reconstructed on the basis of the simulated data. Four imaging models are developed. The first model is a line pair model used to study the spatial resolution of reconstructed images with imaging time ranging from two hours to two weeks. The line pair model is composed of ^{235}U and the length of each line pair is set to be 100 mm. The cross sections are set to be 4^2 , 4^2 , 6^2 , 6^2 , 10^2 , 10^2 , 20^2 , and 20^2 mm², respectively. The second model is a cube model used to study the material resolution of reconstructed images with imaging time ranging from one hour to twelve hours. The side length of each cube is 100 mm. The third model is the cladding model used to test the reliability of multimodal imaging images in complex shielding situations. The outermost layer is of lead, with the side length being 140 mm and the thickness 40 mm. The middle layer is of iron, with the side length being 100 mm and the thickness 40 mm. The innermost layer of ^{235}U , with the side length being 60 mm. The last letter model is used to calculate the structural similarity of reconstructed images, with imaging time ranging from half an hour to twelve hours. The letter model is made of ^{235}U and consists of cubes with side length of 50 mm. The letters “E” and “P” are made up of 16 cubes and 15 cubes respectively. The spatial resolution reaches 4 mm when imaging time is within 12 hours. The ^{235}U and other common high-z, medium-z, and low-z material can be distinguished when imaging time is on the order of hours. Muon scattering imaging image of the cladding model will cause misjudgment. However, the multimodal imaging image can correctly reflect the existence of ^{235}U . The structure similarity between the reconstructed image and the reference image in different imaging times proves that multimodal imaging has higher quality than single imaging method. The study indicates that the multimodal imaging of muon has better imaging quality, can adapt to more complex imaging scenes and has more advantages in the detection and recognition of special nuclear material than muon imaging method with single interaction information.

Keywords: cosmic ray muon, multimodal imaging of muon, image quality

PACS: 14.60.Ef, 87.57.C-, 25.30.Mr, 95.55.Vj

DOI: 10.7498/aps.71.20211083

[†] Corresponding author. E-mail: zhangqh_102@sina.com