

中子散射成像探测角分辨研究

张美 张显鹏 李奎念 盛亮 袁媛 宋朝晖 李阳

Angular resolution of a neutron scatter imaging system

Zhang Mei Zhang Xian-Peng Li Kui-Nian Sheng Liang Yuan Yuan Song Chao-Hui Li Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 042801 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.042801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.042801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

极化中子照相磁场量化技术方案比较与分析

Comparison of two approaches to magnetic field quantification by polarized neutron images

物理学报.2014, 63(18): 182801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.182801>

装置极化效率对极化中子成像质量的影响及修正分析

Effect of apparatus polarization efficiency on quantification analysis in polarized neutron imaging

物理学报.2013, 62(16): 162801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.162801>

基于小型加速器的编码中子源成像研究

Study of coded source neutron imaging based on a compact accelerator

物理学报.2013, 62(12): 122801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.122801>

中子散射成像探测角分辨研究*

张美^{1)2)3)†} 张显鹏¹⁾²⁾³⁾ 李奎念¹⁾³⁾ 盛亮¹⁾³⁾ 袁媛¹⁾³⁾
宋朝晖¹⁾³⁾ 李阳¹⁾²⁾

1)(西北核技术研究所, 西安 710024)

2)(西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049)

3)(西北核技术研究所, 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

(2014年8月2日收到; 2014年9月1日收到修改稿)

中子散射成像技术是近年来国外正在发展的一项新型辐射成像技术, 在深空宇宙探测、核材料监控等方面具有广阔的应用前景. 角分辨是衡量该技术成像能力的一项重要参数. 研究了位置不确定度和能量分辨对角分辨的影响. 理论分析表明: 以不同角度散射, 成像的角分辨不同; 位置不确定不仅直接影响角分辨, 还通过影响能量不确定度对角分辨间接贡献; 位置分辨主要来源于探测器的结构尺寸, 当探测器尺寸小于 5 cm, 影响角分辨的主要来源是能量不确定度. 利用所获得的理论结果指导设计了原理探测系统, 并对设计的原理系统开展了初步实验研究. 结果表明, 分析结果与实验得到的角分辨参数基本一致.

关键词: 角分辨, 中子散射成像, 核辐射成像

PACS: 28.20.Cz, 28.20.Pr, 28.52.Nh

DOI: 10.7498/aps.64.042801

1 引言

中子散射成像技术基于中子在多个闪烁探测器两次 (n, p) 散射动力学原理来获得入射中子方位和能量信息^[1,2], 该技术无需准直器、探测视场大、具有高的探测效率, 结合中子、伽马甄别方法, 可在混合辐射场中分别获取中子或伽马的信息. 该技术在星载核爆监测、深空宇宙探测、核爆炸材料分布探测中有广阔的应用前景. 由于中子具有深穿透性, 不带电荷, 较难以用重材料进行屏蔽, 这种技术可为特种核裂变材料的监控提供一种重要手段^[1-4]. 近年来, 美国圣地亚 (Sandia) 实验室及新罕布什尔 (New Hampshire) 大学相继开展了中子散射成像技术, 并从平板式闪烁体阵列探测器发展到圆柱式闪烁体快中子望远镜, 从用于地面武器级核材料的监控发展到空间中子探测^[1,5,6].

衡量中子散射成像的主要技术指标之一就是角分辨率. 影响角分辨率的因素很多, 包括系统能

量分辨、探测单元尺寸、时间的测量不确定度以及复原方法等, 这几个因素相互影响、互相关联. 目前相关的一些文献仅介绍了所设计的成像系统的角分辨指标^[1,3], 如圣地亚 (Sandia) 实验室建立的平板式闪烁阵列成像系统角分辨可达到 10°, 新罕布什尔 (New Hampshire) 大学采用圆柱阵列并利用闪烁光在圆柱闪烁体飞行时间获得更精确的作用, 取得近 5° 的角分辨. 但对中子散射成像角分辨的理论分析研究还未见报道. 本文针对闪烁平板探测阵列成像技术, 理论分析了位置不确定度和系统能量分辨对角分辨的影响, 根据理论分析结果指导原理探测系统的设计, 通过实验获得了系统的角分辨参数, 与理论模拟结果较为一致.

2 中子散射成像技术原理

如图 1 所示, 散射成像探测系统由前后闪烁体阵列探测器组成. 前探测阵列为散射探测器, 后探

* 国家自然科学基金 (批准号: 11105106, 11275155) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangmei@nint.ac.cn

测阵列作为吸收探测器, 中子在前探测器中发生一次弹性碰撞散射后进入后探测阵列中被记录^[1,7,8].

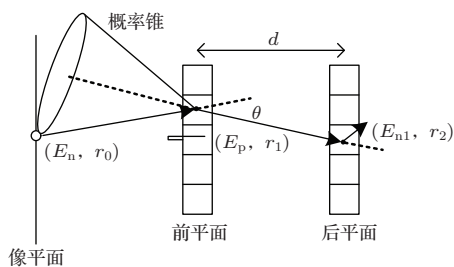


图1 中子散射成像原理示意图

假定中子在前探测器中散射产生反冲质子的能量为 E_p , 而散射后散射中子能量为 E_{n1} , 可通过记录前后两探测器之间的飞行时间确定, 由弹性散射公式可以确定中子散射角 θ 和入射中子能量 E_n :

$$\tan^2 \theta = \frac{E_p}{E_{n1}}, \quad (1)$$

$$E_n = E_p + E_{n1}. \quad (2)$$

如果知道中子在前探测器首次散射的作用位置和散射后的中子在后探测器中的作用位置, 通过 (1) 和 (2) 式, 就能确定一个“概率锥”, 入射的中子就可能分布在此概率锥上, 多个概率锥相交(粒子出现概率最大的地方)就确定入射粒子源区的位向分布. 散射成像位向的定义: 假定成像探测阵列中心轴为 z 轴, 中心为 o , o 与像面上重建得到的源的连线与 z 轴的夹角在 xoz 平面、 $yozy$ 平面的投影, 记为 (x°, y°) .

3 中子散射成像系统的角分辨

参考康普顿相机对角分辨定义^[9], 角分辨通常以角分辨测量 (angular resolution measure, ARM) 表示, 它的定义见图 2, 表示重建的位向与实际的源方向角度差异, 即 $ARM = \theta_g - \theta$, θ 是根据 (1) 和 (2) 式由实测得到的能量计算出的角度, θ_g 是实际位置和测量位置计算得到的角度. 图中 (E_p, r_1) ,

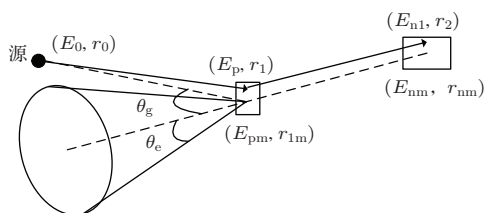


图2 ARM 示意图定义

(E_{n1}, r_2) 为实际作用的沉积能量和作用位置, $(E_{pm}, r_{1m}), (E_{nm}, r_{2m})$ 是测量得到的能量和位置.

$$\cos \theta_g = \frac{(r_{1m} - r_0) \cdot (r_{2m} - r_{1m})}{|r_{1m} - r_0| \cdot |r_{2m} - r_{1m}|}, \quad (3)$$

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{E_{nm}}{E_{pm} + E_{nm}}}. \quad (4)$$

3.1 位置不确定度对角分辨的影响

中子与前后探测器的作用位置决定了概率锥的中心轴, 位置的不确定度影响中心轴的方向, 从而造成复后得到源区位向与实际位向有差别, 而探测器的尺寸和几何结构是影响作用位置不确定度的主要因素.

在简化情况下, 如图 3 所示, 假设从 z 方向发射一束中子, 经 (x_1, y_1, z_1) 处散射后在 (x_2, y_2, z_2) 处被吸收, θ 是散射角, $\Delta\theta_p$ 是由位置不确定度引入的角分辨:

$$\theta = \arctan \frac{z_2 - z_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}. \quad (5)$$

应用误差传递原理, 可得到

$$\begin{aligned} (\Delta\theta_p)^2 &= \left(\frac{\partial\theta}{\partial x_1}\right)^2 (\Delta x_1)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial x_2}\right)^2 (\Delta x_2)^2 \\ &+ \left(\frac{\partial\theta}{\partial y_1}\right)^2 (\Delta y_1)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial y_2}\right)^2 (\Delta y_2)^2 \\ &+ \left(\frac{\partial\theta}{\partial z_1}\right)^2 (\Delta z_1)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial z_2}\right)^2 (\Delta z_2)^2 \\ &= \frac{2[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2](\Delta z)^2}{d^4} \\ &+ \frac{(z_2 - z_1)^2(p_1^2 + p_2^2)}{d^4}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, d 为前后两次作用位置之间的距离, $d^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$; Δz 为探测器厚度; p_1, p_2 为每个探测器的尺寸.

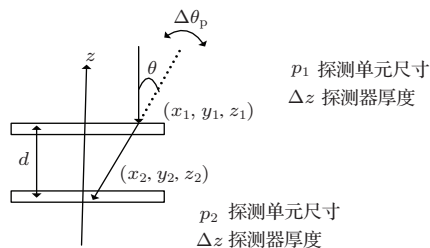


图3 探测器位置分辨对角分辨贡献的计算模型

图 4 是通过 (6) 式计算得到的角分辨与探测器尺寸以及前后探测器之间距离的关系. 图 4(a)

是当 $d = 0.4$ m 时角分辨随探测器尺寸的变化, 图 4(b) 是探测器尺寸为 5 cm 时角分辨随前后探测器距离 d 的变化. 由图 4 可知, 角分辨随探测器尺寸的增大近似呈线性增大, 随 d 的增大而呈 e 指数衰减, 并且随着 d 的增大不同散射角的角分辨趋于相等; 从图 4(a) 可知, 当探测器尺寸大于 3 cm 时, 角分辨随散射角的增大而减小.

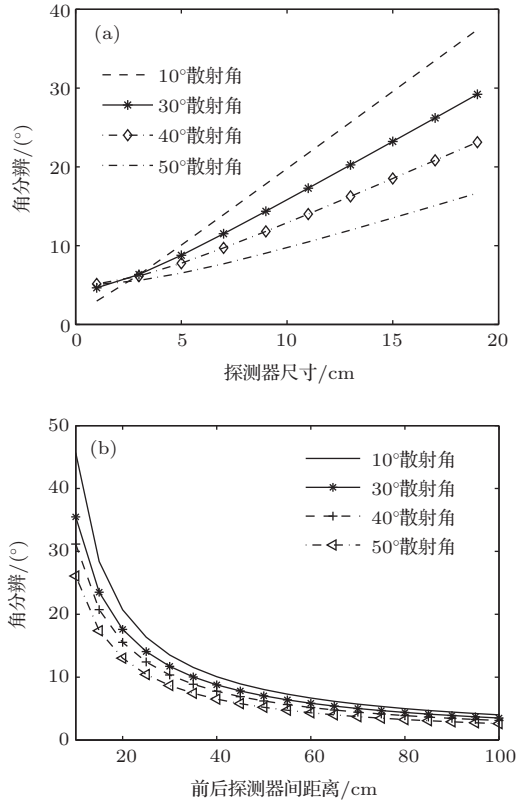


图 4 位置不确定度对角分辨的影响 (a) 角分辨随探测器尺寸的关系; (b) 角分辨随前后探测器距离 d 的变化

3.2 能量分辨不确定度对角分辨的影响

另一个影响角分辨的因素是能量不确定度, 由 (2) 式和不确定度传递原理得到, 由能量不确定度引入的角分辨 $\Delta\theta_E$:

$$(\Delta\theta_E)^2 = \left(\frac{E_{n1}}{E_p + E_{n1}} \right)^2 \frac{E_{n1}}{E_p} \times \left[\frac{1}{4} \frac{(\Delta E_p)^2}{E_{n1}^2} + \frac{1}{4} \frac{E_p^2 (\Delta E_{n1})^2}{E_{n1}^4} \right]. \quad (7)$$

ΔE_p 主要由闪烁体本征分辨率、光电子统计噪声、数据采集系统工作参数漂移等造成. 根据文献 [9], 相对分辨率 $\frac{\Delta E_p}{E_p}$ 可以采用下式推算得到:

$$\frac{dL}{L}(E) = \sqrt{A^2 + \frac{B^2}{L} + \frac{C^2}{L^2}}, \quad (8)$$

其中, L 是闪烁体被激发产生的光输出, 单位为 MeVee, 表示沉积 1 MeV 电子能量的输出光量; A 是闪烁体光产生位置不同而引起的能量分辨的因子; B 是统计涨落相关因子, 与闪烁光产生、吸收、光电子转换和电子放大过程的涨落有关; C 是暗电流和电子学等噪声引起的能量分辨因子. 这里, 假定 ΔE_p 主要与闪烁体的材料有关, 与闪烁体的结构尺寸无关.

图 5(a) 是文献 [10] 实验标定给出的液闪 BC501A 对电子沉积能量的测量不确定度, 并由此给出 (8) 式中相应的参数值: $A = 7.8\%$, $B = 10.6\%$, $C = 0.5\%$; 图 5(b) 是质子-电子光响应函数. 由此可推算出液闪对质子能量沉积的测量不确定度.

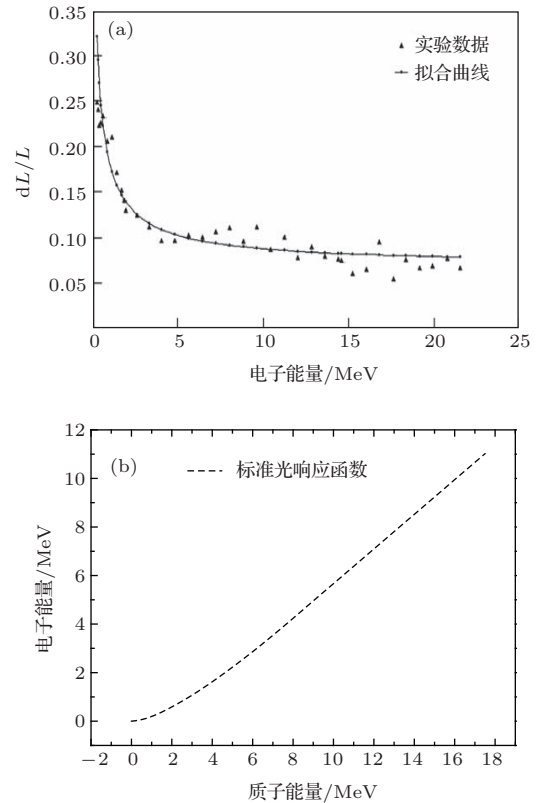


图 5 液闪对质子沉积能量测量不确定度的分析数据 (a) 液闪对电子能量的分辨; (b) 质子-电子光响应函数

实际测量中, 散射中子能量由飞行时间法获得, 其能量不确定度 ΔE_{n1} 按下式给出:

$$(E_{n1})^2 = 4E_{n1}^2 \left[\frac{(\Delta d)^2}{d^2} + \frac{(\Delta t)^2}{t^2} \right]. \quad (9)$$

从 (9) 式可看出, ΔE_{n1} 与飞行距离的不确定度 Δd 和飞行时间的不确定度 Δt 有关, Δt 主要由探测器的时间分辨和时间分析仪的时间分辨构成, 设系统时间分辨为 1 ns, 目前高性能探测技术和数采系统

可以达到. 而 Δd 由中子与探测器作用位置的不确定引入, 与探测器尺寸和厚度以及几何结构相关. 通过 (6) 和 (9) 式表明, 探测器的结构尺寸引入的位置不确定度不仅直接贡献于角分辨, 还通过影响能量分辨间接贡献于角分辨.

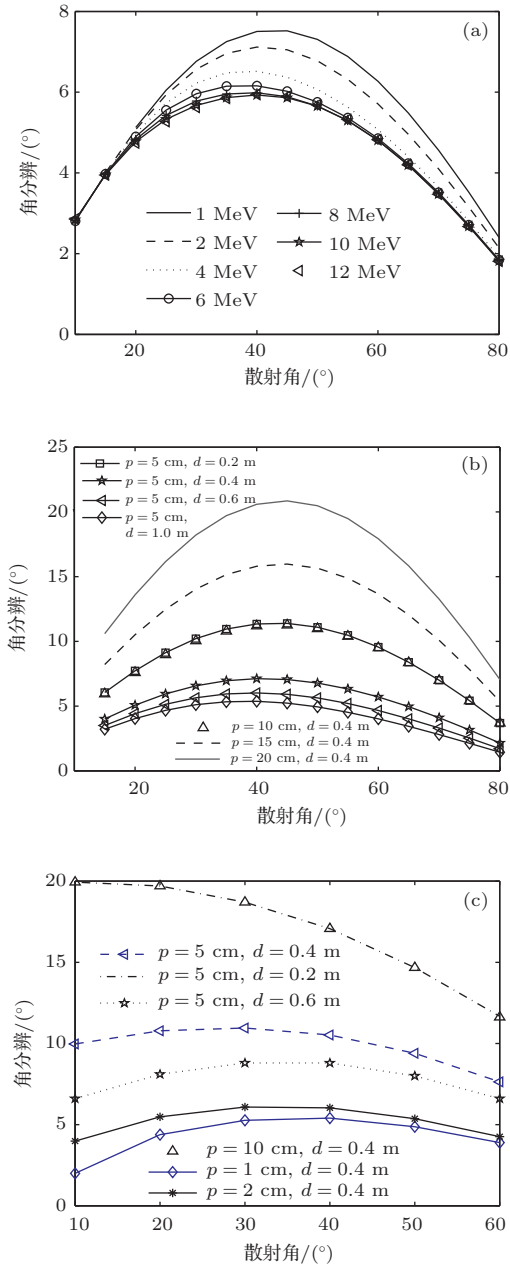


图6 能量分辨和位置不确定度对角分辨的影响 (a) 不同能量中子散射成像角分辨随散射角的变化; (b) 不同结构尺寸的探测器能量测量不确定度引入的角分辨随散射角的变化; (c) 能量不确定度和位置不确定度对角分辨的共同贡献

考虑到实际测量系统存在本底噪声, 通常系统要设定一个阈值, 认为大于阈值的信号为真实信号, 小于阈值的信号为噪声信号. 在模拟计算中探测阈值设为 0.1 MeV. 图 6 是模拟得到的能量分辨

以及其与位置分辨共同对角分辨的影响. 图 6(a) 是探测器尺寸为 5 cm, $d = 0.4$ m 时角分辨随散射角和入射中子能量的变化; 图 6(b) 是中子能量为 2 MeV 时, 不同散射角的角分辨随探测器尺寸 p 和距离 d 的变化 (该曲线仅考虑探测器尺寸和距离造成的能量不确定度, 并由此贡献的角分辨); 图 6(c) 是在探测器尺寸为 5 cm, $d = 0.4$ m 时由位置不确定度和能量不确定度共同贡献的角分辨. 从图 6 可看出: 阈值为 0.1 MeV 情况下, 对于能量为 1—12 MeV 的入射中子, 在能量不确定度贡献中, 角分辨随散射角的变化呈先增加后减小的趋势, 在散射角为 40° 左右时最大; 角分辨随入射中子的能量增大而减小, 但能量达到一定后角分辨几乎不随能量变化; 角分辨随 d 增大而减小; 探测器尺寸增加造成散射中子能量测量不确定度的增加, 从而使角分辨增大. 图 6(c) 表明, 其他条件不变, $p = 2$ cm 和 $p = 5$ cm 探测器的角分辨几乎相近, 说明当探测器尺寸小于 5 cm 时, 角分辨的贡献主要来源于能量不确定度. 比较图 4 与图 6(b) 可知, 探测器尺寸和距离 d 直接对角分辨的贡献要大于通过能量不确定度传递给角分辨的贡献.

由 1—10 MeV 的中子与氢核 (液闪 BC501A 或 EJ301 中的碳氢比接近 1 : 1) 散射作用截面可知^[11], 散射角接近 45° 时, 产生反冲质子与散射中子的共同截面最大. 参照图 4 和图 6 所示的不同散射角处的角分辨曲线, 如使散射成像系统的角分辨小于 10° , 则单个探测器的尺寸应小于 5 cm, 前后探测器之间的距离应大于 40 cm.

4 散射成像原理实验

散射成像系统原理实验在原子能科学研究院开展, 成像探测阵列由 8 个液闪光灯倍增管探测器组成, 分成前后两排, 两排液闪阵列的距离为 40 cm. 液闪为 BC501A, 尺寸为 5.08 cm, 光电倍增管为 EMI9815 型. 数采系统是基于 CAMAC 机箱的插件, 可以获得粒子幅度谱、时间飞行谱以及甄别谱数据, 整系统在实验前进行了谱参数标定. 探测阵列和数采系统实物图见图 7.

实验中用 Cf252 源作为测试源, 辐射能谱在 1—10 MeV 之间近似裂变中子谱, 峰值在 1 MeV 附近. Cf252 源在垂直方向上距探测阵列中心 33 cm, 水平方向上距 134 cm. 图 8(a) 是重建得到的 Cf252 源位向分布二维图像, 在测量不确定度范围内与实际位向一致, 图 8(b) 是 (a) 图的一维径向分布曲

线, 图 8(b) 曲线半高全宽为 11° . 应用曲线的半高全宽表征系统的角分辨, 则系统角分辨为 11° . 取中子能量为 1 MeV, 按照成像系统结构, 根据图 4 和图 6 计算得到的角分辨约为 12° (散射角为 40°), 两者相近.

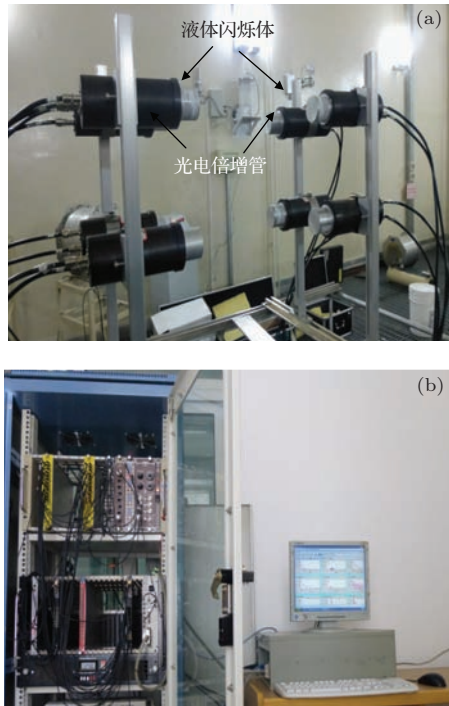


图 7 中子散射成像原理系统实物图 (a) 8 单元探测阵列; (b) 数据采集系统

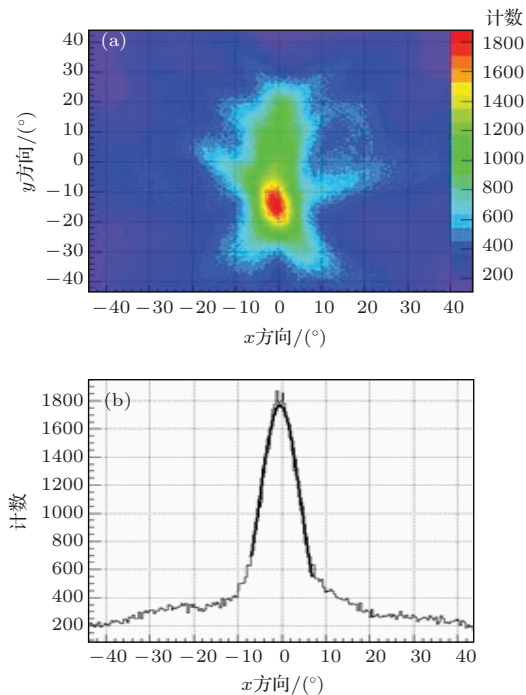


图 8 (网刊彩色) 实验测得 Cf252 源的位向分布 (a) Cf252 源位向的二维分布; (b) 一维径向分布曲线

5 结 论

本文对平板式液闪阵列散射成像系统的角分辨进行了理论分析, 给出了探测阵列结构和系统能量分辨对角分辨的影响, 从理论分析的结果看: 1) 角分辨与散射角有关, 中子以不同散射角散射, 其角分辨不同; 2) 探测器尺寸越大, 角分辨越大, 当探测器尺寸小于 5 cm, 角分辨的贡献主要来源于能量的测量不确定度; 3) 角分辨随前后探测阵列距离的增大而减小, 但是由于增大距离, 会降低系统的探测效率和计数率, 实际设计需综合考虑; 4) 要使系统的角分辨小于 10° , 探测器尺寸应小于 5 cm, 前后探测阵列距离大于 40 cm. 对设计的原理系统进行了初步实验, 表明在不确定度范围内, 实验与理论计算结果较为一致.

本文在假定质子沉积能量的测量不确定度不随探测器尺寸改变, 并且假定系统时间分辨能力不随中子能量改变的情况下进行理论模拟, 将在下一步工作中建立更详细的模型, 考虑这两种因素变动情况下的角分辨, 并探讨圆柱形液闪探测阵列角分辨的影响因素, 开展相应实验研究, 建立更系统的散射成像角分辨分析模型, 为高分辨、高探测效率、小型化散射成像系统提供理论指导.

参考文献

- [1] Nick M, Jim B, Kevin K, Jim L, Peter M, Julia R, Jim R, John M 2006 *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* San Diego, USA, October 29–November 1, 2006 p185
- [2] Peter M, James B, Kevin K, Nicholas M, Stanley M 2007 *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* Honolulu, USA, October 26–November 3, 2007 p170
- [3] John R M, Ulisse B, Benoit P, James M R 2007 *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* Honolulu, USA, October 29–November 3, 2007 p17
- [4] Yin W, Liang J Q 2003 *Chin. Phys.* **12** 599
- [5] Bravar U, Woolf R S, Paul J B, Flückiger E O, Legere J S, MacKinnon A L, Macri J R, Mallik P C, McConnell M L, Pirard B, Ryan J M 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 2947
- [6] Nicholas M, James B 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 1269
- [7] Zhang X P, Zhang M, Sheng L, Ouyang X P 2012 *High Power Laser Particle Beams* **24** 2464 (in Chinese) [张显鹏, 张美, 盛亮, 欧阳晓平 2012 强激光与粒子束 **24** 2464]
- [8] Zhang M, Zhang X P, Li Y, Sheng L, Li B K, Li K N, Zhang X D, Wei F L, Zhao J Z, Yuan Y 2014 *High Power Laser Particle Beams* **26** 054003 (in Chinese) [张美, 张

- 显鹏, 李阳, 盛亮, 李斌康, 李奎念, 张小东, 魏福利, 赵吉祯, 袁媛 2014 强激光与粒子束 **26** 054003]
- [9] Dan X 2006 *Ph. D. Dissertation* (Michigan Ann Arbor: The University of Michigan)
- [10] Huang H X, Ruan X C, Chen G C, Zhou Z Y, Li X, Bao J, Nie Y B, Zhong Q P 2009 *Chin. Phys. C* **33** 677
- [11] Liu Q Z 1994 *Technology of Pulsed Nuclear Radiation Fields Diagnosis* (Beijing: Science Press) p495 (in Chinese) [刘庆兆 1994 脉冲辐射场诊断技术 (北京: 科学技术出版社) 第 495 页]

Angular resolution of a neutron scatter imaging system*

Zhang Mei^{1)2)3)†} Zhang Xian-Peng¹⁾²⁾³⁾ Li Kui-Nian¹⁾³⁾ Sheng Liang¹⁾³⁾ Yuan Yuan¹⁾³⁾
Song Chao-Hui¹⁾³⁾ Li Yang¹⁾²⁾

1) (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

2) (School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 2 August 2014; revised manuscript received 1 September 2014)

Abstract

Using a combination of imaging and spectroscopic capabilities, neutron scatter imaging is a novel method of detecting neutrons in an energy range from 1 to 20 MeV. The technique can be applied to measurements in a variety of areas, including solar and atmospheric physics, radiation therapy, and nuclear materials monitoring. Angular resolution is an important parameter for a neutron scatter imaging system. There are some factors causing the uncertainty in the reconstructed image due to the imperfection of the detector system and natures of neutron scattering. These factors mainly are the uncertainties of the position and the energy. In this paper, the contributions of these factors to the angular resolution are discussed. The results show that the angular resolution varies with scatter angle; the position uncertainty not only directly affects the angular resolution, but also indirectly contributes to the angular uncertainty by influencing energy uncertainty; when the detector dimension is less than 5 cm, the energy uncertainty becomes a dominating factor for angular resolution. The prototype is designed based on the above analysis results. The angular resolution of the designed prototype is tested on Cf252 source. The experimental results are basically consistent with the simulation results.

Keywords: angular resolution, neutron scatter imaging, nuclear radiation imaging

PACS: 28.20.Cz, 28.20.Pr, 28.52.Nh

DOI: 10.7498/aps.64.042801

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11105106, 11275155).

† Corresponding author. E-mail: zhangmei@nint.ac.cn