

# 14 MeV 中子照相中散射中子对成像影响的 Monte Carlo 模拟<sup>\*</sup>

章法强<sup>1)†</sup> 杨建伦<sup>1)</sup> 李正宏<sup>1)</sup> 应纯同<sup>2)</sup> 刘广均<sup>2)</sup>

1) 中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

2) 清华大学工程物理系 北京 100084)

(2006 年 9 月 26 日收到, 2006 年 11 月 13 日收到修改稿)

依据实验参数,建立了 14 MeV 快中子照相的物理模型,并利用 Monte Carlo 方法对照相过程进行了模拟. 分析了经聚乙烯样品散射的中子对快中子图像的影响随样品与探测器间距及样品参数的变化. 计算结果表明,样品与探测器的距离  $d < 5$  cm 时,样品中的散射中子对图像的影响强烈依赖于  $d$ ,而当  $d > 20$  cm 时,样品散射中子对图像的影响可忽略,当样品密度为  $3\text{--}5$  g/cm<sup>3</sup> 时散射中子对图像的影响相对最大,样品宽度越大,图像中的散射成分越多,当宽度在 3 cm 以上时散射成分的强度趋于饱和.

关键词: 14 MeV 中子, 快中子照相, 散射中子, Monte Carlo 模拟

PACC: 8170L, 2940T, 2540D

## 1. 引 言

快中子照相是一项较新的射线照相技术,其优点在于快中子单色性好,穿透力强,而且与 X 射线照相相比对低  $Z$  材料敏感度高<sup>[1]</sup>. 这些特点使得快中子照相在库存核武器检测<sup>[2,3]</sup>、反恐安检<sup>[4]</sup>等方面有广泛应用前景. 美国 Lawrence Livermore 国家实验室在 20 世纪 90 年代中后期开始快中子照相的研究工作<sup>[2,3,5]</sup>,其应用目标即建立紧凑型可移动快中子照相装置,实现对密封在高  $Z$  材料中的低  $Z$  材料进行无损检测. 日本则在 1986 年<sup>[6]</sup>就已经开展了基于反应堆中子源的快中子照相研究,针对反应堆中子源源强高的优点,尝试了多种快中子照相的技术路线<sup>[7-10]</sup>. 俄罗斯的研究在如何提高快中子照相效率方面做了大量工作<sup>[11-13]</sup>,而德国侧重于飞行时间法快中子照相的研究<sup>[14,15]</sup>. 近几年,美德等国家对快中子共振照相也开展了相关研究<sup>[4,16]</sup>. 国内的快中子照相研究尚处于起步阶段,中国科学技术大学和北京大学的 research 小组分别用自制的快中子辐射转换屏获得了快中子图像<sup>[17,18]</sup>. 核物理与化学研究所研制的高灵敏度快中子照相系统也取得了初步的实

验结果<sup>[19]</sup>.

与其他有关技术不同<sup>[20-22]</sup>,快中子照相利用中子在物体中穿透能力的差异来对其进行透视,洞察其内部结构状况. 然而在快中子照相实验中,环境散射中子<sup>[23,24]</sup>和样品散射中子<sup>[25-27]</sup>都会干扰包含着物体内部结构信息的直穿中子信号,对快中子图像的质量造成一定影响. 一般而言,环境散射中子本底对图像信号的影响是均匀的. 事实上,在快中子照相实验中,为保证探测器位置处中子通量率和照相所需的几何条件,探测器距中子源的位置一般约为几十厘米至几米<sup>[2,18,19]</sup>. 在这个距离范围内,刘荣等人<sup>[28]</sup>的实验和计算结果表明,K400 氘-氘中子发生器实验大厅内环境散射中子本底的分布随与源距离的增加呈现缓慢下降趋势,而且散射中子本底所占源中子比例不足 0.1%. 因此,本文主要针对样品散射中子对快中子图像的影响进行分析研究.

与环境散射中子不同,位置灵敏的快中子探测器对样品散射中子的响应具有非均性. 随样品空间位置、密度分布和几何形状的不同,散射中子会对样品透视图像的亮度、对比度等造成一定影响. 特别地,对于具有锐边界的样品,样品散射中子会使图像

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金重点项目(批准号:10035030)和中国工程物理研究院双百人才基金(批准号:2004R0301)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zhangfaqiang@tsinghua.org.cn

具有所谓边界增强效果<sup>[29]</sup>, 这为样品密度的反演及图像重建<sup>[5,30]</sup>带来困难. 在以反应堆为中子源的快中子照相研究中, Yoshii 和 Kobayashi<sup>[26]</sup>曾建立了简单的数学模型, 分析了 1 MeV 平行中子束在圆柱形铁样品中的散射对快中子图像的影响. 他们的模型假设样品中的散射中子各向同性, 且散射中子在样品中的衰减与入射源中子相同, 最重要的是该模型隐含了快中子探测器无限薄的条件, 并不适合基于较厚快中子辐射转换体的快中子照相系统.

在由闪烁光纤阵列和高性能电荷耦合器件 (CCD) 组成的高灵敏度快中子照相系统<sup>[19]</sup>中, 为提高对快中子的探测效率, 闪烁光纤阵列厚达 10 cm. 本文针对文献 [19] 中的高灵敏度快中子系统, 利用 Monte Carlo 方法, 编制了相关的计算程序, 研究了样品散射中子随样品参数和照相条件的变化对快中子图像带来的影响, 为快中子图像的进一步分析奠定基础.

## 2. 计算模型与方法

照相过程可以分为两个部分: 14 MeV 氘-氘中子在聚乙烯样品中的输运和闪烁光纤阵列中的快中子成像. 考虑到快中子与核的作用以弹性散射为主, 计算中快中子与物质的作用截面都为相应的弹性散射截面. 另外, 在计算闪烁光纤阵列中每根光纤的荧光光子数时, 仅考虑 (n, p) 反应中反冲质子的贡献. 这是因为, 快中子与闪烁体中的碳核或氢核发生弹性碰撞后, 反冲核获得的能量  $E_A$  与中子能量  $E$ , 中子入射方向与反冲核运动方向之间的夹角  $\varphi$ , 以及反冲核质量数  $A$  有关<sup>[28]</sup>:

$$E_A = \kappa E \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

式中  $\kappa \approx 4A(1+A)$ . 而碳核与氢核两者  $\kappa$  之比为 0.28:1, 可见反冲碳核能量较反冲质子小得多. 另一方面, 相同能量的反冲碳核与反冲质子相比, 前者在闪烁体中的荧光产额远小于后者<sup>[32]</sup>.

快中子在样品和闪烁体中的输运计算还需要进一步考虑计算效率问题. 采用偏倚抽样方法, 限制源中子的角度使其尽量穿过样品或闪烁光纤阵列, 可显著提高中子抽样效率. 同时, 为保证源的原本属性, 源中子的权重  $W$  修改为  $(1 - \cos \theta_m)/2$ , 其中  $\theta_m$  为限制源中子抽样角度后源中子发射方向与  $Z$  方向的最大夹角. 为进一步提高计算效率, 强制进入闪烁体的中子与氢核发生作用, 即采用偏倚抽样

方法使自由程

$$\lambda = \ln(1 - p\xi) / \Sigma_T, \quad (2)$$

式中,  $\xi$  为 (0, 1) 区间均匀分布的随机数,  $\Sigma_T$  为中子与闪烁体作用的宏观截面,  $p = 1 - \exp(-\Sigma_T D)$  为中子在闪烁体中行程  $D$  时, 与闪烁体发生作用的概率. 相应的需要将中子的权重修改为  $W' = Wp\Sigma_H / \Sigma_T$ , 其中  $\Sigma_H$  为入射中子与闪烁体中氢核作用的宏观截面.

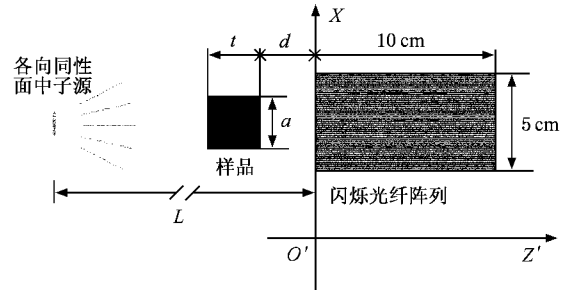


图 1 关于样品散射中子对图像质量影响的计算几何模型

参考 K400 氘-氘中子发生器的参数, 模拟计算中取中子源为各向同性的均匀面源, 源直径 12 mm, 中子能量 14 MeV. 闪烁光纤阵列由 100 × 100 根长 10 cm 截面为 500 μm × 500 μm 的方光纤组成. 计算几何模型如图 1 所示, 以过面源中心的法线为  $Z$  轴, 方向指向闪烁光纤阵列; 以水平方向为  $X$  轴, 并以闪烁光纤阵列前端面中心为原点建立坐标系. 图中  $L, t, a$  和  $d$  分别为中子源距闪烁体端面的距离、聚乙烯样品的厚度、宽度及其端面距闪烁体表面的距离.

快中子与氢核或碳核碰撞后实验室系散射角余弦  $\cos \varphi$  的抽样参考文献 [33]. 设碰撞前中子方向为  $\Omega(\mu, \nu, \omega)$ , 则碰撞后中子的方向  $\Omega'(\mu', \nu', \omega')$  可表达为<sup>[34]</sup>

$$\mu' = \frac{-np\omega\mu - nq\nu}{\sqrt{1 - \omega^2}} + m\mu, \quad (3)$$

$$\nu' = \frac{-np\omega\nu + nq\mu}{\sqrt{1 - \omega^2}} + m\nu, \quad (4)$$

$$\omega' = np\sqrt{1 - \omega^2} + m\omega, \quad (5)$$

其中,  $m = \cos \varphi, n = \sin \varphi, p = \cos \chi, q = \sin \chi, \chi$  由 (0, 2π) 上均匀分布中抽样确定. 当  $1 - \omega^2$  趋近于零时, 不能应用 (3)–(5) 式,  $\Omega'(\mu', \nu', \omega')$  可简单表达为

$$\Omega'(\mu', \nu', \omega') = \Omega'(\sin \varphi \cos \chi, \sin \varphi \sin \chi, \cos \varphi), \quad (6)$$

中子与氢核碰撞后的能量  $E'$  由(1)式和能量守恒可得

$$E' = E(1 - \cos^2 \varphi), \quad (7)$$

而中子与碳核碰撞后的能量与质心系散射角余弦  $\cos \varphi_c$  有关<sup>[35]</sup>, 即

$$E' = E(1 + A^2 + 2A \cos \varphi_c)(1 + A)^{-1}. \quad (8)$$

闪烁体中反冲质子方向  $\Omega_p$  由动量守恒可得, 即

$$\Omega_p = (\Omega \sqrt{E} - \Omega' \sqrt{E'}) / \sqrt{E_p}, \quad (9)$$

式中,  $E_p$  为反冲质子能量. 能量为  $E_p$  的反冲质子在闪烁体中的射程由 TRIM 程序计算可得. 根据反冲质子的射程和运动方向, 考虑端壁效应<sup>[34]</sup>, 利用剩余射程法计算反冲质子在相关闪烁光纤中的能量沉积. 进一步根据质子在闪烁体中沉积能量与荧光产额的关系计算相应光纤中的荧光光子数<sup>[33]</sup>. 最终在完成适当数量的源中子抽样及相关计算后, 统计输出每根光纤中累计的光子数, 即可得模拟图像的矩阵文件. 经 Matlab 程序处理后得到图像文件.

### 3. 计算结果及分析

为保证探测系统均匀的平场响应, 避免繁杂的图像平场校正, 需要合理选择快中子源与闪烁光纤阵列的间距  $L$ . 图 2 是计算的  $L$  在 5—50 cm 范围内变化时闪烁光纤阵列的平场响应图像. 模拟图像沿  $X$  轴的亮度曲线见图 3. 由图可见, 距离  $L$  小于 20 cm 时图像均匀性较差; 而当  $L$  大于 50 cm 时, 图像亮度起伏小于 3%, 具有较好的均匀性. 在实验中, 较远的间距  $L$  固然可以使快中子照相系统更接近于具有空间平移不变性的线性成像系统, 但是距离  $L$  越远, 在相同的曝光时间内探测器接收到的源中子就越少, 图像的统计涨落也就越大. 虽然延长曝光时间可以增加到达探测器位置的中子注入量, 进而减弱统计涨落带来的影响, 但在电荷耦合器件 (CCD) 成像系统中曝光时间是有限制的. 考虑到上述因素, 在计算中选定源与闪烁光纤阵列之间的距离为 50 cm.

#### 3.1. 散射中子对图像影响随 $d$ 的变化

图 4 是  $d$  值在 0—20 cm 范围内变化时模拟图像沿  $X$  轴的亮度曲线, 图中纵坐标对应源中子归一化后在每根光纤中产生的荧光光子数. 在具体的计算中, 聚乙烯样品厚度  $t = 5$  cm, 宽度  $a = 1.5$  cm, 高

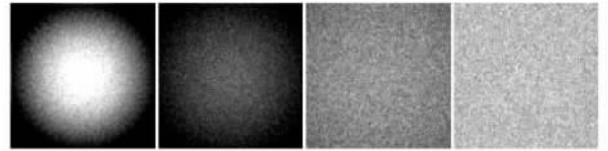


图 2 中子源与闪烁光纤阵列距离  $L$  分别为 5, 10, 20, 50 cm 时的模拟图像

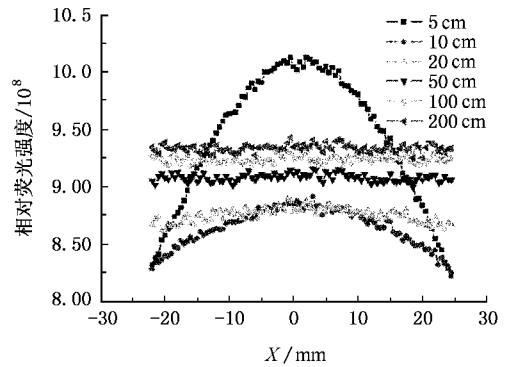


图 3 中子源与闪烁光纤阵列端面距离  $L$  变化时无样品图像沿  $X$  轴的亮度分布

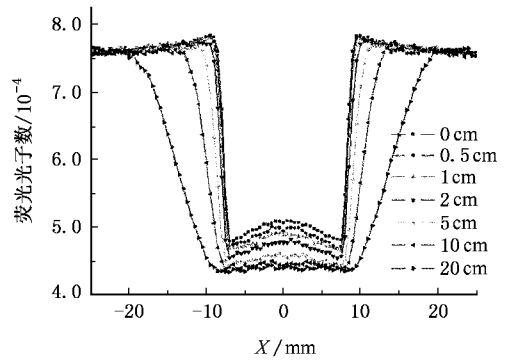


图 4 模拟图像沿  $X$  轴的亮度曲线随  $d$  的变化

度 4 cm, 密度取  $1.0 \text{ g/cm}^3$ . 图中, 当  $d \leq 5$  cm 时, 样品投影区域内亮度曲线呈拱形, 极大值出现在  $d = 0$  曲线上  $x = 0$  附近, 对应于样品在  $X$  轴方向的中心位置. 而当  $d \geq 10$  cm 时, 该区域亮度曲线接近水平. 对于较大  $d$  值, 受几何因素影响图像中样品边界展宽, 分辨率变差<sup>[36]</sup>.

在不考虑散射中子的情况下, 图像对比度  $\eta$  与样品厚度  $t$  和中子与样品宏观截面  $\Sigma$  有关<sup>[20]</sup>:

$$\eta = 1 - e^{-t\Sigma}. \quad (10)$$

实际上由于样品散射中子的影响, 图像的对比度要比理论值小. 图 5 反映了  $X = 0$  附近与图像边缘对比度随  $d$  值的变化. 可见, 当  $d$  在 0—5 cm 时,

图像中心与边缘对比度变化较大;而当  $d > 10$  cm 时,图像对比度增加缓慢,在  $d = 20$  cm 处  $\eta = 42.5\%$ ,这与理论计算值  $43.8\%$  相差仅  $1.3\%$ . 由此可以推断,当样品与探测器距离大于  $20$  cm 时,散射中子对图像的影响已经可以忽略,然而在实验中为追求较好的分辨率,样品一般都与探测器尽量接近,这使得散射中子对图像的影响不可忽略.

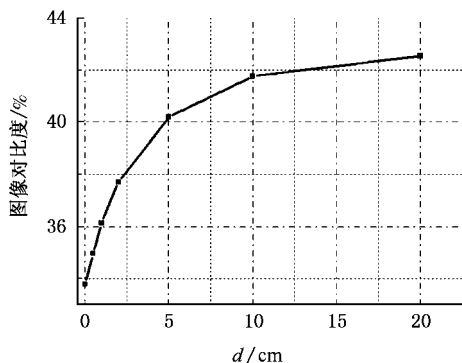


图5 图像对比度随  $d$  的变化

### 3.2. 散射中子对图像影响随样品密度的变化

由 (10) 式可知,图像对比度与样品厚度  $t$  和中子与样品宏观截面  $\Sigma$  的乘积  $t\Sigma$  有关. 同样,图像中散射中子的强度也依赖于二者乘积. 由于  $\Sigma$  可表达为

$$\Sigma = \rho N_0 \sigma / A, \quad (11)$$

式中,  $N_0$ ,  $\rho$ ,  $A$  和  $\sigma$  分别为阿佛加得罗常数和样品的密度、质量数和微观截面,所以对于具有相同组成的样品,散射中子的强度实际上与样品密度  $\rho$  和样品厚度  $t$  的乘积  $\rho t$  有关. 在计算中,若改变样品厚度则会使得照相的几何条件发生变化,使计算结果的可比性变差. 相反地,改变样品密度却不会引入几何因素. 因此,为考察照相中在一定几何条件下样品散射中子的强度变化,较好的做法是改变样品密度而保持样品厚度不变. 实际上,在一定空间内物质结构的瞬态变化就是样品组成和厚度不变而密度在瞬间内发生变化. 原则上,以等离子体焦点(DPF)装置为脉冲中子源,配以高性能增强型电荷耦合装置(ICCD)的高灵敏度快中子照相系统已经具有诊断物质结构瞬态变化的能力<sup>[19,37]</sup>,而且由于 DPF 中子源区尺寸较小(约  $1-2$  mm),有利于获得更好空间分辨的图像,其缺点在于中子产额较小,一般为  $10^{10}$  中子/脉冲,对记录系统的效率要求较高.

计算中,设样品紧贴闪烁光纤阵列端面,且样品

厚度均为  $5$  cm,宽度均为  $1.5$  cm. 聚乙烯样品密度为  $0.5-20$  g/cm<sup>3</sup> 时模拟图像沿  $X$  轴的亮度曲线如图 6 所示. 可见,当样品密度大于  $7$  g/cm<sup>3</sup> 时,图中的亮度曲线趋于一致且对应样品所在区域起伏较大,而当密度较小时,图像受散射中子的影响也较小. 图 7 是图像对比度随样品密度的变化曲线,图中公式计算值按 (10) 式计算,偏离值为计算值与模拟值之差. 当样品密度为  $3-5$  g/cm<sup>3</sup> 时模拟图像的对比度与理论值相差最大,约达  $17\%$ ;密度在  $10$  g/cm<sup>3</sup> 以上时,对比度变化缓慢,趋于  $85\%$ .

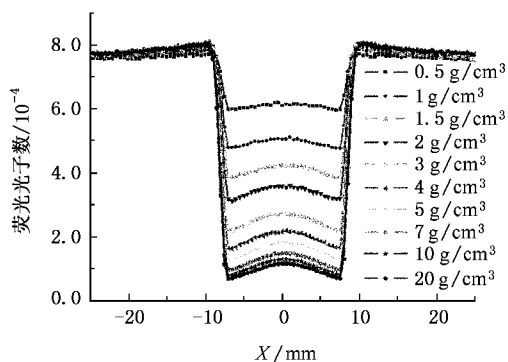


图6 模拟图像沿  $X$  轴的亮度曲线随样品密度的变化

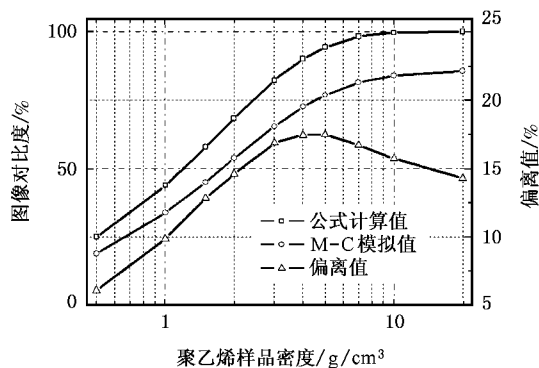


图7 图像对比度随样品密度的变化

### 3.3. 散射中子对图像影响随样品宽度的变化

图 8 是样品宽度由  $0.5$  cm 变化至  $3.5$  cm 时模拟图像沿  $X$  轴的亮度变化. 计算时,除样品密度为  $1$  g/cm<sup>3</sup> 外,其他参数同前节. 由图可见,随样品宽度增加,图像中散射成分明显增加. 当宽度由  $0.5$  cm 增至  $2.5$  cm 时,图像中心亮度增加较大;而宽度在  $3$  cm 以上时图像中心亮度趋于一致. 图 9 是图像中心与边缘对比度随样品宽度的变化. 由图,样品宽度为  $0.5$  cm 时,对比度为  $38.9\%$ ;而宽度增至  $3.5$  cm

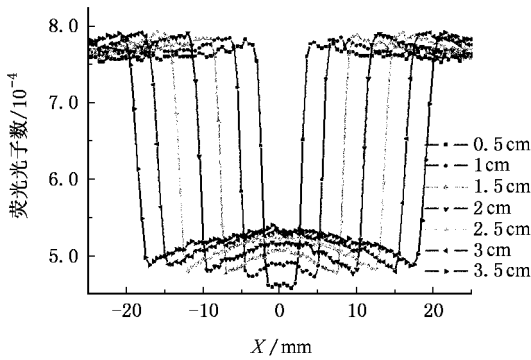


图8 模拟图像沿  $X$  轴的亮度曲线随样品宽度的变化

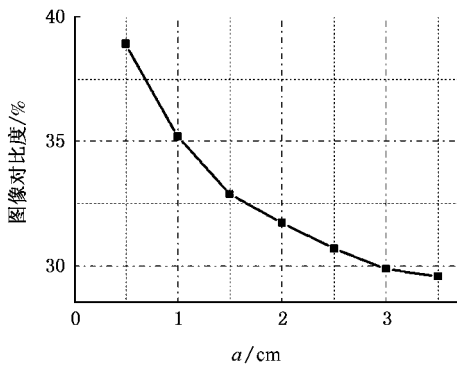


图9 图像对比度随样品宽度的变化

时,对比度不足 30%。相比与按 (10) 式计算的图像对比度 43.8% ,二者分别相差 5% 和 14%。

## 4. 结 论

针对高灵敏度快中子照相系统,利用 Monte Carlo 方法,参考在 K400 氘-氘中子发生器上进行的快中子照相实验中的参数,编制了相关程序,模拟了快中子照相的物理过程,分析了经聚乙烯样品散射的中子对快中子图像影响程度随样品与探测器间距、样品密度和样品宽度的变化。计算结果表明,样品与探测器间距小于 5 cm 时,图像中散射成分的强度随间距增加而迅速减小,当间距大于 20 cm 时,散射中子对图像的影响可以忽略;样品密度为 3—5 g/cm<sup>3</sup> 时散射中子对图像的对比度的影响最大;样品宽度越大,散射中子对图像的影响也越大,而当样品宽度大于 3 cm 时,散射中子对图像的影响趋于饱和状态。这些计算模拟结果一方面为了解样品散射中子对快中子图像的影响提供了详细的信息,另一方面也为快中子图像的密度反演及图像重建提供了相关参考信息。

[ 1 ] Fujine S, Yoneda K, Yoshii K, Kamata M, Tamaki M, Ohkubo K, Ikeda Y, Kobayashi H 1999 *Nucl. Instrum. Meth. A* **424** 190

[ 2 ] Dietrich F, Hall J, Logan C 1997 *AIP Conf. Proc.* **392** 837

[ 3 ] Hall J, Dietrich F, Logan C, Schmid G 1999 *Proc. SPIE* **3769** 31

[ 4 ] Chen G Y, Lanza R C 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 1919

[ 5 ] Hall J, Dietrich F, Logan C, Rusnak B 2001 *AIP Conf. Proc.* **576** 1113

[ 6 ] Fujine S, Yoneda K, Yoshii K, Kamata M, Tamaki M, Ohkubo K, Ikeda Y, Kobayashi H 1999 *Nucl. Instrum. Meth. A* **424** 190

[ 7 ] Matsubayashi M, Hibiki T, Mishima K, Yoshii K, Okamoto K 2001 *Nucl. Instrum. Meth. A* **463** 324

[ 8 ] Matsubayashi M, Soyama K 2004 *Nucl. Instrum. Meth. A* **529** 384

[ 9 ] Yoshii K, Kobayashi H 1996 *Nucl. Instrum. Meth. A* **377** 68

[ 10 ] Matsubayashi M, Hibiki T, Mishima K, Yoshii K, Okamoto K 2003 *Nucl. Instrum. Meth. A* **510** 325

[ 11 ] Mikerov V, Waschkowski W 1999 *Nucl. Instrum. Meth. A* **424** 48

[ 12 ] Mikerov V I, Zhitnik I A, Barmokov J N, Bogolubov E P, Ryzhkov V I, Koshelev A P, Soshin N P, Waschkowski W, Lanza R C and Hall J M 2004 *Appl. Radiat. Isotopes* **61** 529

[ 13 ] Bogolubov E, Bugaenko O, S, Mikerov V, Monitch E, Monitch A and Pertsov A 2005 *Nucl. Instrum. Meth. A* **542** 187

[ 14 ] Dangendorf V, Laczko G, Reginatto M, Vartsky D, Goldberg M, Mor I, Breskin A, Chechik R 2005 *Nucl. Instrum. Meth. A* **542** 197

[ 15 ] Dangendorf V, Kersten C, Laczko G, Vartsky D, Mor I, Goldberg M B, Feldman G, Breskin A, Chechik R, Jagutzky O, Spillmann U 2004 *Nucl. Instrum. Meth. A* **535** 93

[ 16 ] Dangendorf V, Laczko G, Kersten C, Jagutzky O, Spillmann U 2002 *Fast Neutron Resonance Radiography in a Pulsed Neutron Beam* (7th World Conference on Neutron Radiography, Rome)

[ 17 ] Pei Y Y, Tang G Y, Guo Z Y, Zhang G H 2005 *Nucl. Phys. Rev.* **22** 79 (in Chinese) (裴宇阳、唐国有、郭之虞、张国辉 2005 原子核物理评论 **22** 79)

[ 18 ] Jiang S P, Chen L, Chen Y, Du H J, Wang Z M, Fan Y M, Han R D 2005 *Nucl. Tech.* **28** 151 (in Chinese) [蒋诗平、陈亮、陈阳、杜淮江、王忠民、范扬眉、韩荣典 2005 核技术 **28** 151]

[ 19 ] Zhang F Q, Yang J L, Li Z H, Zhong Y H, Ye F, Qin Y, Chen F X, Ying C T, Liu G J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 583 (in Chinese) [章法强、杨建伦、李正宏、钟耀华、叶凡、秦义、陈法新、应纯同、刘广均 2007 物理学报 **56** 583]

[ 20 ] Chen J W, Gao H Y, Zhu H F, Xie H L, Li R X, Xu Z Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1132 (in Chinese) [陈建文、高鸿奕、朱化凤、谢红兰、李儒新、徐至展 2005 物理学报 **54** 1132]

- [ 21 ] Chen B , Xia Q Z , Lebedev V T 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2821 ( in Chinese ) [ 陈 波、夏庆中、Lebedev V T 2005 物理学报 **54** 2821 ]
- [ 22 ] Chem F X , Zheng J , Yang J L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5947 ( in Chinese ) [ 陈法新、郑 坚、杨健伦 2006 物理学报 **55** 5947 ]
- [ 23 ] Ambrosi R M , Watterson J I W , Kala B R K 1998 *Nucl. Instrum. Meth. B* **139** 286
- [ 24 ] Shin M W , Bai J H , Whang J H 2005 *Shielding Calculation for Neutron Radiography Facility Using Portable Neutron Generator* , Proceeding of the international symposium on research reactor and neutron science , Daejeon , Korea
- [ 25 ] Hassanein R , Lehmann E , Vontobel P 2005 *Nucl. Instrum. Meth. A* **542** 353
- [ 26 ] Yoshii K , Kobayashi H 1996 *Nucl. Instrum. Meth. A* **377** 76
- [ 27 ] Buck R M , Hall J M 1999 *Proc. SPIE* **3771** 127
- [ 28 ] Liu R , Jiang L , Wang M , Liu C L , Wang D L , Li Y J , Yang K 2001 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **21** 241 ( in Chinese ) [ 刘 荣、蒋 励、王 玫、刘成龙、王大伦、励义俊、杨 可 2001 核电子学与探测技术 **21** 241 ]
- [ 29 ] Harms A A , Wyman D R 1986 *Mathematics and Physics of Neutron Radiography* ( Dordrecht : D. Reidel Publishing Company ) p98
- [ 30 ] Ambrosi R M , Watterson J I W 1999 *AIP Conference Proc.* **475** 1078
- [ 31 ] Ji C S 1998 *Neutron Detection Experiment Method* ( Beijing : Atomic Energy Press ) p66 ( in Chinese ) [ 汲长松 1998 中子探测实验方法 ( 北京 : 原子能出版社 ) 第 66 页 ]
- [ 32 ] Yang J L , Peng X J , Yang H Q , Yang G Z , Wang L Z , Zhong Y H 2004 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **24** 346 ( in Chinese ) [ 杨建伦、彭先觉、杨洪琼、杨高照、王立宗、钟耀华 2004 核电子学与探测技术 **24** 346 ]
- [ 33 ] Zhang F Q , Yang J L , Li Z H , Chen F X , Ying C T , Liu G J 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 325 ( in Chinese ) [ 章法强、杨建伦、李正宏、陈法新、应纯同、刘广均 2006 强激光与粒子束 **18** 325 ]
- [ 34 ] Pei L C , Zhang X Z 1980 *Monte Carlo Method and Application in Particle Transport Problem* ( Beijing : Science Press ) p531 ( in Chinese ) [ 裴鹿成、张孝泽 1980 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用 ( 北京 科学出版社 ) 第 531 页 ]
- [ 35 ] Du S H , Wang Y Z , Feng T G , Zhang S F , Xing J R 1989 *Computer Simulation for Transport Problems* ( Changsha : Hunan Science & Technology Press ) p575 ( in Chinese ) [ 杜书华、王元璋、冯庭桂、张树发 1989 输运问题的计算机模拟 ( 长沙 湖南科技出版社 ) p575 ]
- [ 36 ] Zhang F Q , Li Z H , Yang J L , Ye F , Wang Z , Xiang G X , Ying C T , Liu G J 2007 *Sci in Chin ; Ser. G* ( in Chinese ) ( in Press )
- [ 37 ] Zhang F Q , Li Z H , Yang J L , Guo C , Ying C T , Liu G J 2006 Proceeding of the 27th international Congress on High-Speed Photography and Photonics , Xi'an , China

# Monte Carlo simulation of effect of neutron scattering on image information in 14 MeV fast neutron radiography<sup>\*</sup>

Zhang Fa-Qiang<sup>1)†</sup> Yang Jian-Lun<sup>1)</sup> Li Zheng-Hong<sup>1)</sup> Ying Chun-Tong<sup>2)</sup> Liu Guang-Jun<sup>2)</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

<sup>2</sup> *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

( Received 26 September 2006 ; revised manuscript received 13 November 2006 )

## Abstract

Referring to the experimental parameters, the physical model of neutron radiography with 14 MeV neutrons is built and the process of radiography is simulated using the Monte Carlo method. Effect of neutron scattering by a polyethylene sample on radiography is analyzed as a function of  $d$ , the distance between the sample and the detector, and parameters of the sample. The calculated results indicates that for a  $d$  values smaller than 5 cm, intensity of scattered neutron component strongly depends on  $d$ , while when  $d$  is greater than 20 cm, the influence of scattered neutrons to the image is reduced to a negligible level. The results also indicates that the effect of neutron scattering is relatively large when density of the sample ranges from 3 g/cm<sup>3</sup> to 5 g/cm<sup>3</sup>, and intensity of scattered neutron component increases with width of the sample and is almost saturated at width greater than 3 cm.

**Keywords** : 14 MeV neutron, fast neutron radiography, neutron scattering, Monte Carlo simulation

**PACC** : 8170L, 2940T, 2540D

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Program of National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10035030 ) and the Foundation of Double-Hundred Talents of China Academy of Engineering Physics ( Grant No. 2004R0301 ).

<sup>†</sup> E-mail : zhangfaqiang@tsinghua.org.cn