

# 激光康普顿光源的理论计算和基于 Geant4 的模拟研究

罗文<sup>1,2</sup>, 徐望<sup>2</sup>, 马燕云<sup>1,3</sup>, 赵娜<sup>1</sup>

(1. 国防科学技术大学理学院, 湖南长沙, 410073; 2. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海, 201800;

3. 激光聚变研究中心, 中国工程物理研究院, 四川绵阳, 621000)

**摘要:**随着加速器技术和激光技术的快速发展, 利用高功率激光和相对论自由电子束发生康普顿散射(LCS)来产生一个亮度高、脉冲短以及能量可调的 X/γ 射线源正成为国际研究的一个热点。基于 Geant4 独立发展一套的四维(三维时域和一维频域)蒙特卡罗模拟程序, 对激光康普顿 X/γ 射线源的能谱、角分布、时间结构等参数进行了详细的理论计算及模拟研究。对上海应用物理研究所开展的激光康普顿实验进行了模拟, 模拟结果与实验测量值是一致的。另外, 讨论了激光和电子束参数对激光康普顿光源参数的影响。上述程序及其模拟研究为激光康普顿光源的实验及其应用研究提供了积极的理论依据。

**关键词:**激光康普顿散射; Geant4 工具; 蒙特卡罗模拟; X/γ 射线

随着加速器技术(如第三代同步辐射光源)和激光技术的快速发展, 基于高功率激光和相对论自由电子的康普顿(或汤姆逊)X/γ 射线源(LCS 光源)的实验研究及其应用是国际研究的一个热点。由于此类光源具有亮度高、脉冲短、能量可调、准单色以及方向性好等特点, 世界各大科研机构 and 大学(如美国的 LLNL, BNL, SLAC, IAC 和 MIT, 日本的 Spring8, JAEA, AIST 和 Waseka University, 和欧洲的 INFN, ESRF 等)都正致力于激光康普顿散射的实验研究<sup>[1-6]</sup>, 以及其所产生的 LCS 光源在材料、化学、医学、生命科学和基础科学等领域的应用研究<sup>[1, 6-10]</sup>。并且取得了大批的科学研究成果, 在 Nature, Science 和 Phys. Rev. Lett. 等国际权威杂志上频繁发表<sup>[1-10]</sup>。另外, 利用激光康普顿散射(LCS)光源和核共振荧光(NRF)技术对同位素进行无损检测从而达到监测和管理核废料的的目的<sup>[11]</sup>, 以及利用高能 γ 射线束探测货物和包裹内隐蔽的核裂变材料对核能源系统中先进的安全防护, 和防止核扩散也是必不可少的<sup>[12]</sup>。

我国在康普顿光源的实验研究方面起步晚, 目前正处于光源的原理性实验阶段。目前只有中科院高能物理研究所<sup>[13]</sup>、清华大学<sup>[14]</sup>和中国科学院上海应用物理研究所进行了 LCS 光源的原理性实验研究<sup>[15-17]</sup>。2008 年, 上海应用物理研究所与上海光机所展开合作, 在所嘉定园区上海深紫外自由电子激光装置锥形机上(一台 100 MeV 电子直线加速器)分别用不同功率和脉宽的 Nd:YAG 激光器进行了两期 LCS 的原理性实验(SINAP-I & SINAP-II)<sup>[15-16]</sup>。两期实验成功观测到能量为 30 keV 左右的 X 射线及其能谱, 还验证了通过大角度激光入射角来调节散射光子能量的初步可行性。此外, 激光康普顿光源的优越性能和潜在的应用价值也引起了国内许多科学家的重视和关注。清华大学正在对汤姆逊散射 X 射线源(TTX)进行进一步的升级改造<sup>[17]</sup>。在完成预制研究(SINAP-I & SINAP-II)后, 基于国家大科学装置-上海光源的上海激光电子伽玛源(SLEGS)<sup>[18]</sup>已成功被纳入上海光源二期工程, 正处于筹备立项阶段。SLEGS 建成后将是 SSRF 上唯一的一条高通量 γ 光束线站。其性能指标将达到并部分优于国际同类装置。它的建成将为基础物理如核物理, 粒子物理和核天体物理等研究提供一个极为重要的平台, 并开拓了我国工业、医学、能源及国防等关键领域的应用前景。

准确预测激光康普顿光源的亮度、能谱以及角分布等参数对光源装置的优化设计、未来实验展开以及进一步基于此类光源的应用研究十分关键。借助理论计算以及蒙特卡罗模拟可以对激光康普顿

**作者简介:**罗文(1985—), 男, 湖南人, 讲师, 博士, 主要从事激光康普顿光源研究和蒙特卡罗模拟

**基金项目:**中国科学院百人计划项目(2006)(26010701)、国家自然科学基金——NSAF(Grant No:10976031)

光源的整体性能有一个全面的了解和掌握。从而一方面可以为激光康普顿光源的物理和工程设计提供更丰富的理论参考;另一方面可以帮助优化激光康普顿光源的科学目标。我们基于 Geant4 工具,独立开发了一套完整的四维(三维时域和一维频域)蒙特卡罗模拟程序(MCLCSS)<sup>[19]</sup>,用于准确模拟任意激光入射角下的激光康普顿光源的通亮、能谱、角分布以及脉冲时间结构等特征。同时,此程序可对激光康普顿光束线站的后续光学传输、准直以及探测等进行模拟研究,以获得实验区的光束参数。国外已有美国杜克大学、LLNL 等开发了专门的程序并对 LCS 光源进行了模拟研究<sup>[20-21]</sup>,日本的 CAIN 程序也可用于对 LCS 过程的模拟研究。

本文将首先对激光康普顿光源的特征进行必要的理论推导。接下来利用 MCLCSS 程序对激光康普顿 X/γ 射线源的能谱、角分布等参数进行数值计算和模拟研究、对上海应用物理研究所开展的激光康普顿实验进行了模拟,以及讨论激光和电子束参数对激光康普顿光束品质的影响。最后是本文的一个总结和展望。

### 1 激光康普顿过程的理论推导

线性康普顿散射可以描述成单个电子和单个激光光子的散射,  $\omega + e \rightarrow \omega' + e'$ , 这里  $\omega$  和  $\omega'$  分别表示入射激光和散射光子的频率。为描述在线性相互作用下康普顿散射的动力学,我们考虑三个坐标系:实验室坐标系( $X_L, Y_L, Z_L$ )、电子静止坐标系( $X_R, Y_R, Z_R$ )和旋转电子静止坐标系( $X_{rot}, Y_{rot}, Z_{rot}$ ),见图 1。在实验室坐标系(图 1.(a))下激光以  $\alpha$  角入射,其散射光子沿电子入射方向( $Z_L$  轴)以  $\theta$  角发射出去。其次,在电子静止坐标系(图 1.(b))中散射光子将沿电子入射方向( $Z_R$  轴)以  $\theta'$  角发射出去。最后在旋转电子静止坐标系(图 1.(c))中,为了与电子静止坐标系中激光入射方向平行(或一致) $Z_R$  轴以  $\psi$  角旋转。

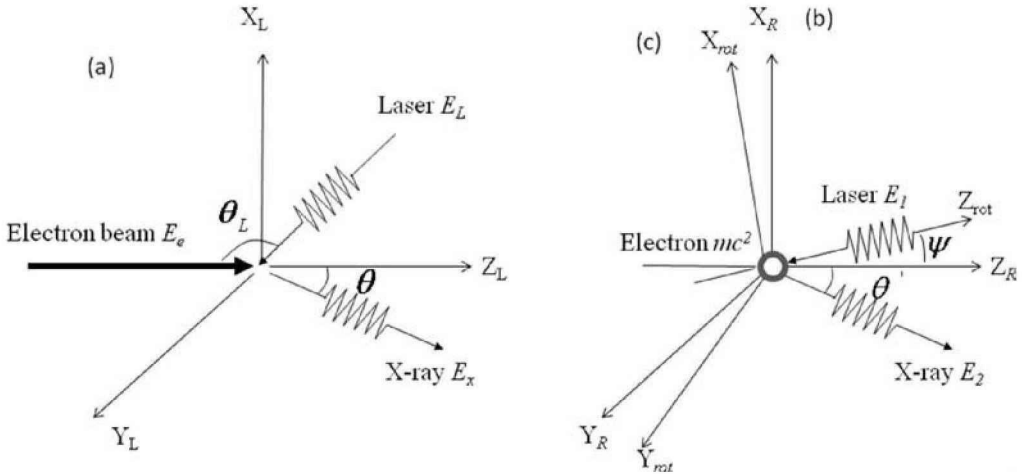


图 1 激光康普顿散射在实验室坐标系(a)、电子静止坐标系(b)和旋转电子静止坐标系(c)中的动力学示意图

$E_e$  是入射高能电子的能量,  $E_L$  和  $E_L'$  分别是实验系和电子静止坐标系下入射激光的能量,  $E_e$  和  $E_e'$  分别是实验系和电子静止坐标系下散射光子的能量。

根据动能量守恒、质壳条件以及静止坐标系和实验室坐标系之间的转换,可以得到实验室坐标系下散射光子的能量  $E_x$  为

$$E_x = \frac{E_L (1 - \beta \cos \theta_L)}{1 - \beta \cos \theta + \frac{E_L}{E_e} \gamma^2 (1 - \beta) (1 + \cos \theta) (1 - \beta \cos \theta_L)} \quad (1)$$

在  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 180^\circ$ , 即散射光子平行(或沿)和平行(或逆)电子运行方向时,散射光子分别有最大能量  $E_x^{\max}$  和最小能量  $E_x^{\min}$ 。其最大和最小能量分别为

$$E_x^{\max} = \frac{\gamma^2 E_L E_e (1 + \beta) (1 - \beta \cos \theta_L)}{E_e + 2\gamma^2 E_L (1 - \beta \cos \theta_L)} \quad (2)$$

和

$$E_x^{\min} = \gamma^2 E_L (1 - \beta)(1 - \beta \cos \theta_L). \quad (3)$$

散射光子的能量发散主要由公式(1)中的变量  $E_e$ ,  $E_L$  和  $\theta$  的不确定度,以及电子束的发射度  $\theta_e$  造成,有如下表达式:

$$\left(\frac{\Delta E_x}{E_x}\right)^2 = \left(2 \frac{\Delta E_e}{E_e}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E_L}{E_L}\right)^2 + (\gamma \sqrt{\theta_e^2 + \theta^2})^4, \quad (4)$$

其中等式右边第一项来自于电子束能散的贡献,第二项为激光波长分布,第三项为电子束的发散角  $\theta_e$  和散射角  $\theta$ 。当准直器孔径对应的准直角  $\theta_e$  与散射角的大小可比拟时,取决于两者的共同贡献。

对于高能电子束 ( $\psi = 0$ ),在电子静止坐标系中对散射光子求极化平均后康普顿散射微分截面有<sup>[17]</sup>

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta'} = \pi r_v^2 R^2 \left(R + \frac{1}{R} - 1 + \cos^2\theta'\right), \quad (5)$$

这里  $r_v$  是电子的经典半径,以及  $R$  是散射光子和入射激光光子的能量比。因此,实验室坐标系下散射光子的角度微分截面有

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \pi r_v^2 \frac{1 - \beta^2}{(1 - \beta \cos\theta)^2} R^2 \left(R + \frac{1}{R} - 1 + \cos^2\theta'\right). \quad (6)$$

根据公式(1)和(6),散射光子的能谱微分截面有<sup>[19]</sup>

$$\frac{d\sigma}{dE_x} = \frac{d\sigma}{d\cos\theta} \frac{d\cos\theta}{dE_x} = \pi r_v^2 R^2 \left(R + \frac{1}{R} - 1 + \cos^2\theta'\right) \frac{\gamma^2 E_e E_L (1 - \beta)(1 - \beta \cos\theta_L) - E_e^2 \beta}{\gamma^2 E_L (1 - \beta \cos\theta_L) (E_x - E_e \beta)^2}. \quad (7)$$

事实上,激光和电子束团的康普顿散射过程非常复杂,其中有多重因素对散射光子的产额和脉冲宽度产生影响。在考虑激光和电子脉冲密度(或强度)为三维高斯分布,且碰撞过程较为理想情况下:1)考虑电子束和激光束位置偏差均为0;2)电子束的聚集较弱,且激光束长度远小于其瑞利长度时,可以忽略电子束的发射度和激光衍射的影响;3)不考虑激光和电子的时间晃动时,散射光子总产额和束团脉冲长度分别有如下表达式(注:计算过程在此不再细述):

$$N_p = \frac{cf\sigma_c N_e N_l (1 - \beta \cos\theta_L)}{2\pi \sqrt{\sigma_{he}^2 + \sigma_{hp}^2} \sqrt{\sigma_{wp}^2 (1 - \beta \cos\theta_L)^2 + \sigma_{we}^2 (\beta - \cos\theta_L)^2 + \sigma_{ke}^2 \beta^2 \sin^2\theta_L + \sigma_{lp}^2 \sin^2\theta_L}}, \quad (8)$$

以及

$$\tau_p = \frac{\sigma_{ke} \sqrt{\sigma_{wp}^2 (1 - \beta \cos\theta_L)^2 + \sigma_{we}^2 (\beta - \cos\theta_L)^2 + \sigma_{lp}^2 \sin^2\theta_L}}{c \sqrt{\sigma_{wp}^2 (1 - \beta \cos\theta_L)^2 + \sigma_{we}^2 (\beta - \cos\theta_L)^2 + \sigma_{ke}^2 \beta^2 \sin^2\theta_L + \sigma_{lp}^2 \sin^2\theta_L}}, \quad (9)$$

这里下标  $e$  和  $p$  分别表示电子和激光,  $\sigma_{we}$ ,  $\sigma_{he}$  和  $\sigma_i$  分别是水平(横向),垂直(纵向)和纵向均方根大小;  $N_e$  和  $N_l$  是单个束团内电子和激光光子总数;  $f$  为激光与电子束碰撞频率。

本节从单电子和单光子康普顿散射出发,给出不同激光入射角下散射光子的能量和散射角度和能量微分截面公式。并理论计算激光与电子束团相互作用下的激光康普顿散射光子产额、脉冲长度、产额以及能谱分布。这些理论计算为下一步的物理建模及模拟研究做准备。

## 2 MCLCSS 程序介绍及其模拟结果

Geant4(GEometry ANd Tracking)<sup>[22]</sup>是由欧洲核子研究中心(CERN)主导、国际众多著名实验室和机构合作开发的进行辐射粒子与物质相互作用蒙特卡罗模拟的大型平台,具有丰富的粒子与物质相互作用物理过程描述、强大的复杂物质成分和几何结构处理、开放的源码、良好的扩展性、持续更新及免费下载使用等系列特点。得益于 Geant4 的众多优异性能,我们以 Geant4 软件为平台,对任意激光入射角下激光康普顿散射过程(激光-电子碰撞点处散射光子的产生)以及散射光子的传输和准直过程,建立合理的物理模型并编写了相应的程序代码。由于康普顿散射的截面太小,在低能情况下近似为汤姆逊散射截面( $\sim 665$  mb),因此模拟过程采用权重法,以提高 LCS 过程的模拟效率。MCLCSS 程序的模拟一共分为四个阶段:

- (1) 根据激光与电子相互作用区域内的电子束的相空间坐标进行抽样；
- (2) 利用激光束在碰撞点的局域密度计算激光康普顿散射的概率。根据这个概率，散射事件被抽样。如果散射过程发生，一个 X/γ 射线将被产生；
- (3) 在电子静止坐标中抽样康普顿散射角度微分截面，从而获得该散射光子的能量，产生位置和方向等信息；
- (4) 散射光子传输至实验探测区，得到实验区的 X/γ 束的能谱、角分布、束团尺寸和亮度等物理量。

模拟程序建立后，通过对模拟程序输出的光子能谱、角分布和通量等典型参数与国际上已有的可靠实验测量进行比较，例如美国 LLNL 的 PLEIADES 装置，杜克大学的 HIγS 装置以及日本 UVSOR-II 上的斜碰实验，成功检验了模拟程序算法和模拟结果输出的可靠性和合理性<sup>[19]</sup>。因而 MCLCSS 程序得到很好的基准。下面将给出程序模拟的部分结果。

由公式(8)数值计算得到的 LCS 能谱见图 2。根据公式(2)，LCS 能谱的高能端有一个陡直的康普顿边沿。在忽略电子束能散、发散角等参数的情况下，此边沿由激光和电子束能量，以及  $\theta_L = 0$  确定。散射光子能谱强度在散射角  $\theta = 0$  处有最大值，在  $\theta = 1/\gamma$  附近有最小值。忽略高能电子的反冲效应，散射光子能谱强度的最大值和最小值之比约为 2 : 1。此外，从图 2 可以发现，50% 的散射光子以  $\theta \leq 1/\gamma$  的圆锥立体角出射。因此可以得到结论：LCS 光源一般具有良好的方向性，它主要依赖高能电子束的相对论因子。以采用 3.5GeV 的电子束为例，散射光子的方向性好于 0.13mrad。

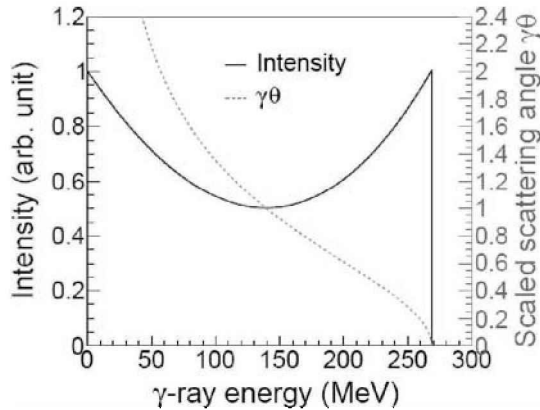


图 2 800nm 激光束和 3.5GeV 电子束康普顿背散射(激光入射角为  $180^\circ$ )产生的散射光子能谱分布(实线),以及经电子洛伦兹因子缩放后的光子散射角  $\gamma\theta$  与散射光子能量的对应关系(虚线)。实线所示的 LCS 能谱是准直前的理想能谱。

根据公式(1),可以得到  $\theta_L = 180^\circ$  和  $\theta_L = 90^\circ$  的激光入射角下的散射光子能量  $E_x$  与散射角  $\gamma\theta$  的关系(见图 3)。从图 3 中可以看出,在散射角一定的情况下入射电子束的能散可对散射光子能量分布产生影响,影响程度参考见公式(4);在不考虑电子束能散的情况下,散射光子能量与散射角之间有确定的对应关系。而且,在一个相对较小的散射角区域,如  $\gamma\theta \leq 1.5$  rad,散射光子的能量下降速度非常快。因此,我们可以设计一个小孔径的准直器,仅使狭小散射角范围内的散射光子顺利通过准直器,从而在实验区获得准单色的 X/γ 射线束。

对于基于激光康普顿光源的核物理、天体物理以及核共振荧光实验研究,光源的能谱及其分布(是否准单色)通常被广泛关注。如上所述,MCLCSS 程序可以模拟散射光子经准直器准直后的能谱分布。对于不同实验环境下,例如电子束能量,能散,水平发射度,以及准直器孔径等值均不一致的情况下,程序模拟的两组能谱分布见图 4。作为对比,图 4 还给出杜克大学 HIγS 装置的实验测量结果以及该实验室的模拟输出<sup>[23]</sup>。可以看到,MCLCSS 程序给出的模拟结果与实验测量值吻合得较好。模拟的伽玛光子能谱主要由电子束能散和准直器孔径对应的准直角决定。由于 HIγS 实验中采用了一个较大的准直器孔径,模拟和实验给出的伽玛束能谱为非高斯分布,在低能端有一个较长的拖尾,见图 4(左)。反之,较长的拖尾可能会被准直器切割掉(cut-off)而呈现出准高斯分布,见图 4(右)。

中国科学院上海应用物理研究所嘉定园区的 100MeV 直线加速器上开展了两期激光康普顿

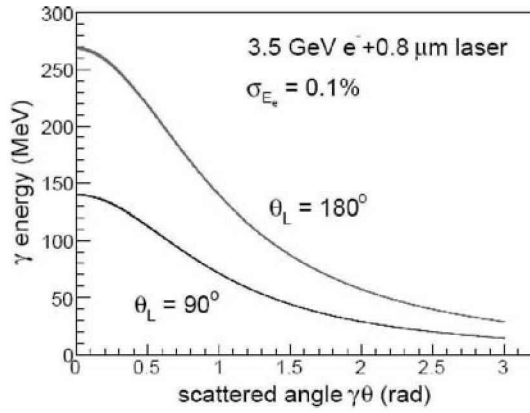


图3 散射光子能量随散射角的关系

模拟所用参数:电子束能量 3.5 GeV,能量发散度 0.1%,  
以及入射激光波长 0.8 μm.

散射原理性实验(SINAP-I和SINAP-II)。两期实验作为未来的上海激光电子伽玛源(SLEGS)的前期研究,摸索SLEGS所需的部分关键技术和积累经验,如通过改变激光入射角来调节散射光子能量的可行性、激光和电子束的时间同步和位置重合。在SINAP-II中,采用一台脉冲能量为2J、脉冲宽度为8ns、波长为1064nm的Nd:YAG激光器与能量为112MeV、0.03nC(正常运行时约为1.0nC)的电子束宏脉冲发生康普顿散射。实验所用的激光入射角为 $(44 \pm 2)^\circ$ ,产生的X射线能量约为32keV。利用MCLCSS程序对SINAP-II的实验布局(包括散射光子传输、探测器布局)进行了合理构建,并且模拟了实验探测的X射线能谱(见图5)。与实验测量结果<sup>[16]</sup>进行比较可以得出结论:模拟和实验结果在系统误差范围内是一致的。

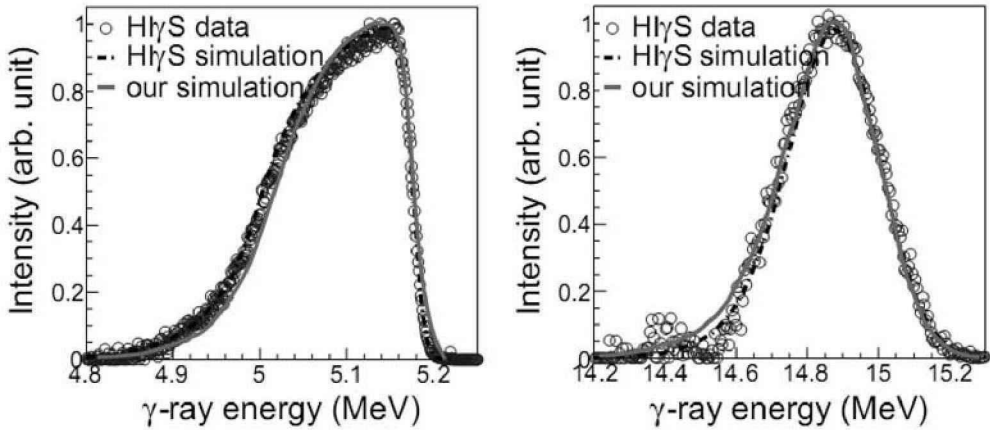


图4 模拟以及HlyS装置上实测的散射光子能谱

左图所用的电子束能量、能散和发射度分别为611.46MeV、0.37%和7.5nm-rad,  
准直器孔径大小为12.7mm;右图所用的电子束能量、能散和发射度分别为466.49MeV、0.1%  
和7.5nm-rad,准直器的位置为激光-电子相互作用点下游60m.

### 3 总结和展望

对于任意激光入射角,理论推导了激光-电子线性康普顿散射过程,给出了激光康普顿光源的能谱、角分布、通量以及脉冲长度等主要参数。基于Geant4工具独立开发了一套4D(三维时域和一维频域)激光康普顿散射蒙特卡罗模拟程序,利用此程序对激光-电子康普顿散射过程,以及散射光子的后续传输、准直等开展了模拟研究,讨论了部分激光和电子束参数对激光康普顿光束品质的影响。这些研究结果可对未来的激光康普顿光源的装置建设和实验研究提供理论依据。同时,模拟给出的物

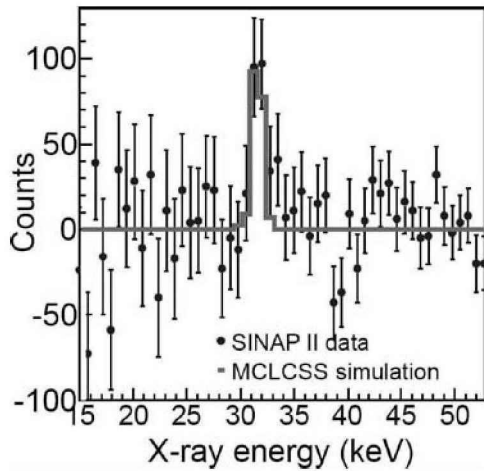


图5 模拟的 X 射线能谱与 SINAP-II 实测谱相比较

理量可为准确模拟基于激光康普顿光源的物理实验提供一个合理且可靠的入口。

## 致谢

本工作获得中国科学院百人计划项目(2006)(26010701)和国家自然科学基金——NSAF(Grant No:10976031)的部分资助,对此表示感谢。

## 参考文献:

- [1] R. W. Schoenlein et al. . Femtosecond X-ray Pulses at 0.4 Å Generated by 90° Thomson Scattering: A Tool for Probing the Structural Dynamics of Materials [J]. Science. 1996. 274: 236-238.
- [2] Szu-yuan Chen et al. . Experimental observation of relativistic nonlinear Thomson scattering [J]. Nature. 1998. 396: 653.
- [3] V. N. Litvinenko et al. . Gamma-Ray Production in a Storage Ring Free-Electron Laser [J]. Phys. Rev. Lett. . 1997. 78: 4569-4572.
- [4] M. Babzien et al. . Observation of the second harmonic in Thomson scattering from relativistic electrons [J]. Phys. Rev. Lett. . 2006. 96 (5): 054802-054805.
- [5] W. P. Leemans et al. . Laser-Based Sub-Picosecond Electron-Bunch Characterization Using 90° Thomson Scattering [J]. Phys Rev. Letts. 1996. 77: 4182.
- [6] D. J. Gibson et al. . PLEIADES: A picosecond Compton scattering x-ray source for advanced backlighting and time-resolved material studies [J]. Physics of Plasmas. 2004. 11 (5): 2857-2864.
- [7] N. Kikuzawa et al. . Nondestructive Detection of Heavily Shielded Materials by Using Nuclear Resonance Fluorescence with a Laser-Compton Scattering  $\gamma$ -ray Source [J]. Applied Physics Express. 2009. 2: 036502-036504.
- [8] H. Ikeura-Sekiguchi et al. . In-line phase-contrast imaging of a biological specimen using a compact laser-Compton scattering-based x-ray source [J]. Appl. Phys. Lett. . 2008. 92 (13): 131107-131109.
- [9] H. Utsunomiya et al. . M-1 gamma Strength for Zirconium Nuclei in the Photoneutron Channel [J]. Phys. Rev. Lett. . 2008. 100: 162502-162505.
- [10] S. Goko et al. . Partial photoneutron cross sections for the isomeric state  $^{180}\text{Tm}$  [J]. Phys. Rev. Lett. . 2006. 96 (19): 192501-192504.
- [11] Ryoichi HAJIMA et al. . Proposal of Nondestructive Radionuclide Assay Using a High-Flux Gamma-Ray Source and Nuclear Resonance Fluorescence. [J]. Journal of UCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY. 2008. 45 (5): 441-451.
- [12] J. Pruet et al. . Detecting clandestine material with nuclear resonance fluorescence [J]. Journal of Appl. Phys. . 2006. 99: 123102.

- [13] 赵宇. 激光康普顿散射光源的理论和实验研究[D] 博士学位论文. 中国科学院高能物理研究所. 2001.
- [14] DU Ying-Chao (杜应超), HUANG Wen-Hui (黄文会), HUA Jian-Fei (华剑飞) et al. . Preliminary experiment of the Thomson scattering X-ray source at Tsinghua University [J]. Chinese Physics C (HEP & NP), 2008, 32: 75.
- [15] W. Luo, W. Xu, Q. Y. Pan et al. . A laser-Compton scattering prototype experiment at 100 MeV linac of Shanghai Institute of Applied Physics [J]. Rev. of Sci. Instr. . 2010, 81 (1): 013304.
- [16] W. Luo, W. Xu, Q. Y. Pan et al. . X-ray generation from slanting laser-Compton scattering for future energy-tunable Shanghai Laser Electron Gamma Source [J]. Applied Physics B, 2010, 101 (4): 761-771. ; An X-ray spectroscopy system and its application to the laser-Compton scattering experiments [J]. Nucl. Instr. and Meth. A, 2010, 624: 141-147.
- [17] C. X. Tan, W. H. Huang, R. K. Li et al. . Tsinghua Thomson scattering X-ray source [J]. Nucl. Instr. and Meth. A, 2009, 608 (1): s70-s74.
- [18] Q. Y. Pan, W. Xu, W. Luo et al. . A Future Laser Compton Scattering (LCS)  $\gamma$ -Ray Source: SLEGS at SSRF [J]. Synchrotron Radiation News, 2009, 22 (3): 11-20.
- [19] W. Luo, W. Xu, Q. Y. Pan et al. . et al. . A 4D Monte Carlo laser-Compton scattering simulation code for the characterization of the future energy-tunable SLEGS [J]. Nucl. Instr. and Meth. A (accepted).
- [20] C. Sun and Y. K. Wu. Theoretical and simulation studies of characteristics of a Compton light source [J]. Phys. Rev. ST Accel. Beams, 2011, 14: 044701-044718.
- [21] W. J. Brown et al. . Experimental characterization of an ultrafast Thomson scattering x-ray source with three-dimensional time and frequency-domain analysis [J]. Phys. Rev. ST Accel. Beams, 2004, 7: 060702.
- [22] S. Agostinelli et al. . GEANT4—a simulation toolkit [J]. Nucl. Instr. and Meth. A, 2003, 506: 250-303.
- [23] C. Sun, Y. K. Wu, G. Rusev and A. P. Tonchev. End-to-end spectrum reconstruction method for analyzing Compton gamma-ray beams [J]. Nucl. Instr. and Meth. A, 2009, 605: 312.

## Theoretical and Geant4-based simulation studies of a laser-Compton light source

LUO Wen<sup>1,2</sup>, XU Wang<sup>2</sup>, MA Yan-yun<sup>1,3</sup>, ZHAO Na<sup>1</sup>

- (1. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha of Hunan Prov, 410073, China;  
 2. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China;  
 3. Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang of Sichuan Prov, 621000, China)

**Abstract:** During the last few decades, the rapid developments of electron accelerator and laser techniques, have opened new possibilities for the generation of short-pulse, high-flux, energy-tunable X/ $\gamma$ -ray sources, i. e. laser-Compton source. This kind of source is produced with high power laser scattering by relativistic electrons and recently it becomes a hot topic. A four-dimensional (three-dimensional time and frequency-domain) Monte Carlo laser-Compton scattering simulation code has been developed independently with Geant4 toolkit. Utilizing this code the spectral, spatial and temporal characteristics of the source is studied with theoretical calculation and simulation. The measured X-ray energy spectrum from the laser-Compton scattering experiment in our institute is also reproduced with our simulation code, which shows a good agreement. In addition, the dependence of the characteristics of this source on the parameters of laser and electron beams is discussed. This procedure and the simulation could provide us a theoretical basis for the laser-Compton experiment and its application in the future.

**Key words:** Laser-Compton scattering; Geant4 toolkit; Monte Carlo simulation; X/ $\gamma$ -ray