

# 利用 BEPC 建造极化 $\gamma$ 射线光源\*

庄杰佳 赵宇

(中国科学院高能物理研究所 北京 100080)

**摘要** 介绍利用北京正负电子对撞机的强流高亮度电子束与偏振强激光的康普顿背散射产生高能、高亮度、单色、极化  $\gamma$  射线束的特性和它的应用。

**关键词** 电子对撞机 强激光 康普顿背散射 自由电子激光 高亮度极化  $\gamma$  射线束

## 1 引言

高能电子束与光束的康普顿背散射产生短波长电磁辐射光源是在激光出现以后提出的<sup>[1]</sup>,但是由于康普顿散射截面太小( $6.67 \times 10^{-25}/\text{cm}^2$ ),电子和光子的密度小,早期实验所获得的光子产额太低<sup>[2]</sup>而没有引起人们的重视.近年强流高亮度电子束和强激光的迅速发展,特别是光阴极微波电子枪和线性调频(chirped)脉冲放大技术的应用,电子和光子束的密度都有大的飞跃,分别可达到  $10^{15}$  个/ $\text{cm}^3$  和  $10^{24}$  个/ $\text{cm}^3$  以上,使康普顿背散射光源成为极具竞争力的新型光源<sup>[3]</sup>.在 X 射线波段,它可成为小型、超短脉冲、高亮度、波长可调的 X 射线光源<sup>[4]</sup>.在  $\gamma$  射线波段,微分散射截面较 X 射线波段高得多,它可提供亮度比现有  $\gamma$  光源高几个数量级的,单色性很好的极化  $\gamma$  射线束<sup>[5]</sup>.它们在科学技术领域有重要的应用前景.并讨论利用北京正负电子对撞机第二对撞点的高亮度电子束与强激光的康普顿背散射产生高能极化  $\gamma$  射线束的特性及其应用前景.

## 2 康普顿背散射光源的特性

高能电子束与激光的康普顿背散射(见图 1),当在电子运动坐标系激光光子能量  $2\gamma h\nu$  远小于电子的静止能量  $mc^2$  时,对撞时电子受到光子的反冲作用可以忽略,线偏振激光等效于自由电子激光的平面扭摆器,散射光峰值的光子能量  $h\nu_c$  为:

$$h\nu_c = 2h\nu_0 \frac{\gamma^2(1 - \cos\phi)}{1 + K_0^2/2 + \gamma^2\theta^2}, \quad (1)$$

1999-07-23 收稿

\* 国家 863 计划激光领域 FEL 专题资助

$$K_0 = 0.85 \times 10^{-9} \lambda_0 [\mu\text{m}] I_0^{1/2} [\text{W}/\text{cm}^2]. \quad (2)$$

其中  $h\nu_0, K_0, \lambda_0, I_0$  分别为入射激光的光子能量、激光扭摆器的扭摆参数、波长和功率密度,  $\gamma$  为电子归一化能量,  $\theta$  为散射角,  $\varphi$  是电子束与激光束在作用区的夹角,背散射时,  $\varphi = \pi$ . 因此改变电子的能量或光束与电子束夹角  $\varphi$  可调节  $\gamma$  光子能量. 式(1)还表明光子能量与散射角有一一对应关系. 由于这种激光电磁扭摆器的周期比常规扭摆器小 4 个多数量级,因而产生同样光子能量所需电子能量可低 2 个数量级. 当  $K_0 \geq 1$  时为非线性康普顿散射,可产生高次谐波的辐射.

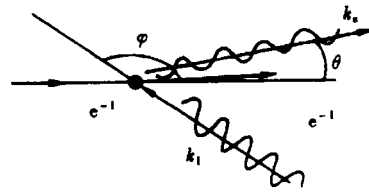


图 1 康普顿背散原理图

(1) 散射截面、光子产额和亮度<sup>[3]</sup>:

散射的微分截面

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = 4\pi r_e \gamma^2 \frac{1 + \gamma^4 \theta^4}{(1 + \gamma^2 \theta^2)^4} \quad (\gamma\theta \ll 1), \quad (3)$$

其中  $r_e$  为电子的经典半径,这表明康普顿背散射微分截面是与电子的能量平方成正比.

光子产额(光子/s):在  $\Delta\omega/\bar{\omega}$  谱宽内光子产额为

$$\frac{dN}{dt} = 8.4 \times 10^{16} \eta I_b [\text{A}] f P_0 [\text{GW}] \frac{2\tau c}{Z_r} \left( \frac{\Delta\omega}{\bar{\omega}} \right), \quad (4)$$

$\tau, Z_r, \eta, I_b, P_0$  分别为作用时间、瑞利长度、充满因子、电子流强和激光功率,  $f$  为每秒对撞次数.

亮度(光子/s·mm<sup>2</sup>·mrad<sup>2</sup>·0.1% BW):

$$B = 8.1 \times 10^9 \eta \left( \frac{2\tau c}{Z_r} \right) \frac{I_b [\text{A}] E_b^2 [\text{MeV}] P_0 [\text{GW}]}{r_s^2 [\text{mm}]} \frac{(\Delta\omega/\bar{\omega})/(1 + \delta)}{(\Delta\omega/\bar{\omega}) + (\Delta\omega/\bar{\omega})_T}, \quad (5)$$

$E_b, r_s$  分别为电子的能量和二束相互作用重叠区的半径,其中

$$\delta = \left( \frac{\tau c}{\gamma_r r_s} \right)^2 \left[ \frac{\Delta\omega}{\bar{\omega}} + \left( \frac{\Delta\omega}{\bar{\omega}} \right)_T \right]. \quad (6)$$

(2) 辐射谱纯度:假定电子束和入射激光束都是单色的,散射光的谱均匀加宽  $\Delta\omega$ . 由激光脉冲长度所包含的光波波长数  $N$  决定

$$\left( \frac{\Delta\omega}{\bar{\omega}} \right)_0 = \frac{1}{2N}, \quad (7)$$

实际上电子束和激光束都是非单色的,且具有一定的发散角,因此散射光的实际谱宽应考虑由此引起的非均匀加宽,则总的谱宽可表示

$$\left( \frac{\Delta\omega}{\bar{\omega}} \right)_T = \left[ \left( \frac{\Delta\omega}{\bar{\omega}} \right)_0^2 + \left( \frac{\Delta\omega}{\bar{\omega}} \right)_i^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

其中非均匀加宽为

$$\left( \frac{\Delta\omega}{\bar{\omega}} \right)_i^2 = \left( \frac{\epsilon_n}{r_b} \right)^2 + \left( \frac{2\delta\gamma}{\gamma} \right)^2 + \left[ \frac{\gamma^4 \theta^4}{(1 + K_0^2/2)^2} \right]^2 + \left( \frac{\Delta\omega}{\bar{\omega}} \right)_l^2 \quad (9)$$

$\epsilon_n, r_b$  分别为在对撞区电子束的归一化发射度、半径,第四项为激光束不均匀性加宽. 由

(8)式可见,谱的纯度主要受电子束的能散度、发射度和激光束不均匀性限制.

假如电子束和激光束的非均匀加宽可忽略,则辐射谱的谱宽可表示为

$$\left(\frac{\Delta\omega}{\omega}\right)_T \cong \frac{\gamma^4 \theta^4}{(1 + K_0^2/2)^2}. \quad (10)$$

因此,通过改变光阑的大小可选择散射光的能量分辨率.

(3) 辐射脉冲宽度  $\tau$ : 辐射脉冲宽度由作用时间决定.

由上面的讨论可见,采用近几年发展起来的 T<sup>3</sup> 激光(table-top tawatt)与电子储存环电子束对撞可产生极化的、准单色的、高亮度的  $\gamma$  光束,且其光谱纯度和极化度可调.这些特性是其它  $\gamma$  光源难以与之竞争的(表 1).

表 1 几种  $\gamma$  光源主要性能比较

$\gamma$ 光源类型	峰值通量(光子/s)	单色性	极化度
韧致辐射	$10^{13}$	连续谱	-
标识谱线	$3 \times 10^5$	2%	-
正电子湮没	$6 \times 10^7$	10%	
激光电子康普顿散射	$10^{12-14}$	1%	100%

表 1 可见康普顿背散射  $\gamma$  光束的亮度、单色性、极化度在已有的  $\gamma$  光源中其性能是最好的.此外,如果激光用高功率密度的自由电子激光代替,则产生的  $\gamma$  光子能量还可以方便地调变.表 2 是在建和建成  $\gamma$  光源的主要性能.

实现康普顿背散射的关键问题是高密度的电子束和激光光子束的获得,以及电子束与激光束在作用区的时空重叠.

表 2 在建和建成  $\gamma$  光源的主要性能

加速器名称	电子能量	激光波长	$\gamma$ 光子能量	光子通量
Duke-FEL * [13]	1.2GeV		200MeV	$10^7$ ph/s·1% BW
FTL-LCP * [8]	200—800MeV	1.06 $\mu$ m	1—10MeV	$2 \times 10^5$ ph/s·3% BW
UVSOR * [14]	600MeV	270nm/466nm	14.6—25MeV	$2 \times 10^6$ ph/s
Super-ACO * [11]	800MeV	0.35 $\mu$ m	35MeV	$5 \times 10^6$ ph/s
PETRA	12GeV	20—50 $\mu$ m	60MeV	$10^{12}$ — $10^{14}$ ph/s
ESRF	6GeV	300MeV		$10^{14}$ ph/s

\* 实验结果

### 3 BEPC 高亮度、极化 $\gamma$ 光源

由上面讨论可见,激光与高能电子对撞产生  $\gamma$  光束,要求电子能量在几百 MeV 以上.因此电子储存环是合适的电子源.电子储存环康普顿背散射  $\gamma$  光源可有两种运行模式:专用模式和兼用运行模式.前者具有  $\gamma$  光子能量高而环内的电子寿命短,这是由于散射光子的能量是以电子的能量损失为代价的,经作用后电子束的能散度将变坏而丢失;后者  $\gamma$  光子能量低,但不影响储存环的正常运转,最大光子能量受储存环的能量接收度限制.下面以北京正负电子对撞机为例,它有两个对撞点,其一已用于高能物理实验,第二对撞

点可进行背散射实验(见图 2).

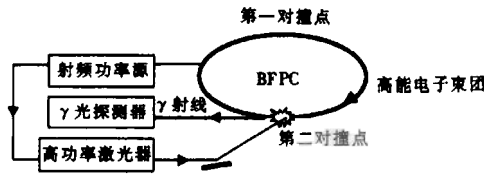


图 2 BEPC- $\gamma$  光源示意图

利用红外激光与北京正负电子对撞机的电子束对撞,激光和电子束的性能参数见表 3(兼用运行模式的激光参数如括号所示). 两种运行模式相应的  $\gamma$  射线束的特性如表 4, 表中第二行是假定电子储存环的能量接收度为 1%, 激光的波长采用中红外 ( $10\mu\text{m}$ ), BEPC- $\gamma$  光源在兼用运行模式下,背散射  $\gamma$  光子束的特性.

表 3 北京正负电子对撞机<sup>[6]</sup>和红外激光的性能参数

第二对撞点电子束的性能参数		红外激光束的性能参数	
能量( $E$ )	1.1—2.8GeV	激光波长( $\lambda$ )	1.06(10.6) $\mu\text{m}$
能散度( $\Delta\gamma/\gamma$ )	$7.4 \times 10^{-4}$	脉冲能量( $E_0$ )	1J
电流( $I_e$ )	273A	脉冲长度( $\tau_0$ )	1ps
电子长度( $\tau_e$ )	193ps	光场模式	基模
束斑尺寸( $\sigma_z/\sigma_x$ )	0.069/0.89mm	半斑半径( $r_0$ )	20(100) $\mu\text{m}$
电子发射度( $\epsilon_z/\epsilon_x$ )	$(0.048/0.62) \times 10^{-6}\text{mrad}$	瑞利长度( $Z_r$ )	1.2(3.0)mm
重复频率( $f_e$ )	1.258MHz	重复频率( $f_0$ )	1kHz

表 4  $\gamma$  射线束的特性 (单位:光子/( $\text{s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 0.1\% \text{BW}$ ))

运行模式	$\gamma$ 射线的能量	峰值亮度*	单脉冲产额	脉宽/重复频率
专用模式	20—140MeV	$2.7\text{—}17.3 \times 10^{20}$	$9 \times 10^8$ 光子/脉冲	1ps/1kHz
兼用模式	2—13MeV	$2.2\text{—}13.8 \times 10^{19}$	$4 \times 10^8$ 光子/脉冲	1ps/1kHz

应当指出在专用运行模式下,由于损失的电子未能及时得到补充而出现死时间. 电子束的寿命  $\tau_e$  可表示为<sup>[11]</sup>

$$\tau_e^{-1} = \frac{16\lambda_0 r_e^2 P_0}{3hc[(r_0^2 + 4\sigma_x^2)(r_0^2 + 4\sigma_z^2)]^{1/2}}, \quad (11)$$

$\sigma_x, \sigma_z, r_0$  分别为作用区电子束的横向尺寸和激光束的半径

## 4 结束语

利用 BEPC 对撞机第二对撞点的直线段进行高能电子与偏振强激光的康普顿背散射产生高能量、高亮度、单色的、背景干净的极化  $\gamma$  射线束,可进一步扩展 BEPC 对撞机在科学技术等领域的应用范围. 高度极化的  $\gamma$  光束是研究原子核和核子内部结构及其基本性质的理想光源. 利用几 MeV 到 10MeV 的  $\gamma$  光子直接打 W 靶可产生高通量的超短脉冲

正电子,它是材料科学、表面科学等方面研究的有效探针。在医疗方面对不易开刀的深度肿瘤如脑肿瘤可进行有效的治疗。此外还可模拟宇航电子组件、芯片的宇宙辐射损伤以及核废料处理等等<sup>[10-12]</sup>。在 BEPC 上采用兼用模式产生  $\gamma$  光束,投资小,不影响对撞机的正常运行,又可进一步扩展 BEPC 的应用领域,是值得开展的工作。

### 参考文献 (References)

- 1 Richard H. Milburn, Phys. Rev. Lett., 1963, **10**:75
- 2 Casano L et al. Frascati Report, 1974, LNF - 74/60
- 3 Sprangle P et al. J. Appl. Phys., 1992, **72**(11):5032
- 4 ZHUANG JieJia, ZHAO Kui. The Laser Synchrotron Source (in Chinese). The Second Academic Conference of Accelerator Technology. Ningbo: 1998, 192  
(庄杰佳,赵葵. 激光同步辐射射线光源. 第二届加速器技术学术交流会. 宁波:1998,192)
- 5 ZHUANG JieJia. The Interaction between Lasers and High - Energy Electrons (in Chinese). The Third Conference of Chinese Particle Accelerator Academy. Xian: 1985  
(庄杰佳. 激光与高能电子相互作用. 中国粒子加速器学会第三届学术交流会. 西安:1985.)
- 6 Preliminary Design of BEPC, BEPC Design Group, IHEP, Beijing 1982,
- 7 Saldin E L et al. Nucl. Instr. Meth., 1996, **A375**:606
- 8 Ohgaki H et al. Nucl. Instr. Meth., 1996, **A375**:602
- 9 Carman T S et al. Tech. Report, TUNL, Duke Univ,1995
- 10 O'shea P G et al. Nucl. Instr. Meth., 1996, **A375**:530
- 11 Nutarell D et al. Nucl. Instr. Meth., 1998, **A407**:459
- 12 Saldin E L et al. Nucl. Instr. Meth., 1994, **A339**:583
- 13 Litvinenki V N et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:4569
- 14 Hosaka M et al. Nucl. Instr. Meth., 1997, **A393**:525

## Building Polarized $\gamma$ -Ray Source in BEPC\*

ZHUANG JieJia ZHAO Yu

(Institute of High Energy Physics, CAS Beijing 100080, China)

**Abstract** A proposal to produce monochromatic  $\gamma$  rays of high brightness and high polarization is presented by Compton backscattering in the collision between intense polarized laser and intense current electron beam of high brightness in BEPC. The features and applications of this new kind of  $\gamma$ -ray source are also described.

**Key words** electron positron collider, intense laser, Compton backscattering, free electron laser, high - brightness polarized  $\gamma$ -ray beam

Received 23 July 1999

\* Supported by National 863 Project in Laser Technology Field