

文章编号: 1007- 4627(2000)02-0240-03

高能电子和正电子在晶体沟道中的辐射*

张 勇, 姚淑德, 周生强, 刘广智

(北京大学技术物理系, 北京 100871)

摘 要: 介绍了高能电子和正电子在晶体中的沟道辐射, 对超相对论电子和正电子在周期弯曲晶体中的相干辐射进行了分析, 并提出了初步的实验设想.

关键词: 电子; 正电子; 晶体; 辐射

中图分类号: O571.33 文献标识码: A

1 电子和正电子在晶体中的沟道辐射

电子和正电子在晶体中均存在沟道运动. 对电子, 虽然受到晶格原子很强的吸引, 却能以小角碰撞掠过原子核, 因此可以被吸引在晶轴或晶面附近而发生沟道运动. 对正电子, 其沟道运动发生在晶面间电子密度较低的区域, 因而同电子相比, 它同晶格原子近碰和同核外电子散射的几率都大大减少. 图1给出了电子和正电子作面沟道运动的经典

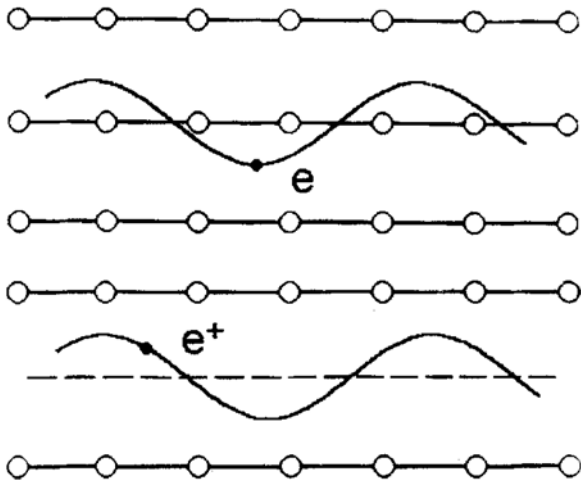


图1 电子和正电子在晶体沟道中运动的经典轨迹

轨迹. 由于电子和正电子有一定的横向能量, 它们在沟道中前进时伴随着周期振荡, 根据经典电磁理论, 这种振荡会产生电磁辐射, 以这种方式产生的辐射被称为电子和正电子的沟道辐射.

从70年代末开始, 人们在几 MeV 到上百 GeV 的能量范围内对沟道辐射进行了研究^[1-6], 取得了许多非常好的实验结果. 例如, Berman 等^[1]曾用54

MeV 的电子和正电子束沿着接近面沟道的方向入射到 LiH 和 LiD 晶体上, 获得了单色性非常好的沟道辐射谱. 同样, Gouanere 等^[5]用54 MeV 的电子束入射到金刚石面沟道内也取得了类似的结果.

为了得到强度更大、单色性更好和能量可调的 γ 光辐射, Korol 等^[7]提出了“周期弯曲晶体内超相对论带电粒子相干辐射”的设想.

2 周期弯曲晶体内高能粒子相干辐射

对在平直沟道内运动的电子和正电子, 随着穿透深度的增加, 它们的横能量分布变化很快, 这会使沟道辐射谱的单色性变差. Korol 等人提出在晶体中激发横弹性波, 使晶面产生周期弯曲(见图2, d 是晶面间距, a 是晶面弯曲的最大幅度, $a \gg d$, λ 是晶面弯曲的周期. z 方向与晶面平行, x 方向与晶面垂直), 并以此约束超相对论带电粒子在面沟道内的运动, 可得到强度大、单色性好并具有一定角频分布的高能 γ 辐射^[7].

高能带电粒子在弯曲晶体沟道内稳定运动的条件是, 沿弯曲沟道运动的粒子的最大离心力必须小于沟道内电场能提供的力. 设粒子能量为 E , 弯曲沟道的最小曲率半径为 R_{\min} , 粒子的电荷为 q , 沟道电场最大强度为 E_c , 该条件可表述为

$$\frac{E}{R_{\min}} < q E_c. \quad (1)$$

由于晶面间的电场强度可达到原子电场量级(约10

* 收稿日期: 1999-07-12

* 基金项目: 国家自然科学基金主任基金资助项目(19945002)

作者简介: 张 勇 (1974-), 男(汉族), 天津人, 硕士研究生, 从事离子束分析、离子束改性和离子束合成新材料等研究.

GV/cm), 因而上述条件容易满足. 横弹性波激发的周期弯曲沟道形如正弦波, 即

$$x(z) = a \sin \left| \frac{2\pi z}{\lambda} \right|. \quad (2)$$

采用高能电子或正电子时, 由于它们的速度十分接近光速 c , 因此在它们沿沟道穿行时, 沟道可视为不动的. 而 $a \gg d$. 使得电子在晶面上或正电子在晶面间的小幅振动可以忽略, 即电子或正电子的运动轨迹可近似由(2)式得到描述. 根据经典电磁理

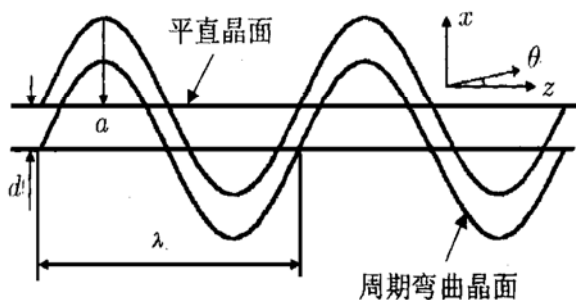


图2 周期弯曲的晶面与沟道

论, 当发出的光子能量远小于粒子的能量时, 可不考虑辐射反冲. 由此可得到各阶辐射光子的圆频率 ω_K , 半宽度 $\Delta\omega$, 辐射频谱与角分布如下:

$$\omega_K = \frac{4cKk_w}{a^2k_w^2 + 2/\gamma^2 + 2\theta^2}, \quad (3)$$

$$\Delta\omega = \frac{2}{N_w} \cdot \frac{\omega_K}{K}, \quad (4)$$

$$\frac{d^2W}{d\Omega d\epsilon} \propto \frac{a^2k_w^2K^2N_w^2}{(a^2k_w^2 + 2/\gamma^2 + 2\theta^2)^2} \cdot \left| \frac{\sin[\pi N_w(\omega - K\omega)/\omega]}{\pi N_w(\omega - K\omega)/\omega} \right|^2, \quad (5)$$

其中, $k_w = 2\pi/\lambda$ 是晶体声学振动的波矢量. γ 是电子或正电子的相对论因子, θ 是辐射角, $\theta = 0$ 表示正前方, $K = 1, 2, 3$ 等为辐射波的阶次, W 是辐射通量, ϵ 是辐射波的能量, N_w 是沟道弯曲的周期数, 当晶体厚度为 L 时, $N_w = L/\lambda$. 由(3)式可以看到, 辐射光子的能量 ϵ 可由 a, γ 和 λ 来连续调节, 而半宽度 $\Delta\omega$ 与辐射波的阶次 K 无关, 只随 N_w 的增大而减小, 即 N_w 越大, 谱线越尖锐. 辐射波的频谱有明显的相干结构, 各阶辐射波谱线的谱形相同, 在辐射光子的圆频率 $\omega = K\omega_K$ 处, 谱线分布具有 $(\sin(x)/x)^2$ 的形状.

根据(3)和(4)式, 若正电子或电子的能量为 1.4 GeV, 晶体厚 $400 \mu\text{m}$, $N_w = 20$, 晶面弯曲幅度 $a = 2 \text{ nm}$, 则可算得 1 阶辐射波的光子能量为 0.375 MeV, 半宽度 $\Delta\omega$ 为 37.5 keV. 图3为计算得到的正前方的辐射频谱. 由于在正前方, 没有 K 为偶数的各阶辐射, 图中只给出 $K = 1, 3, 5, 7$ 等奇数阶的辐射.

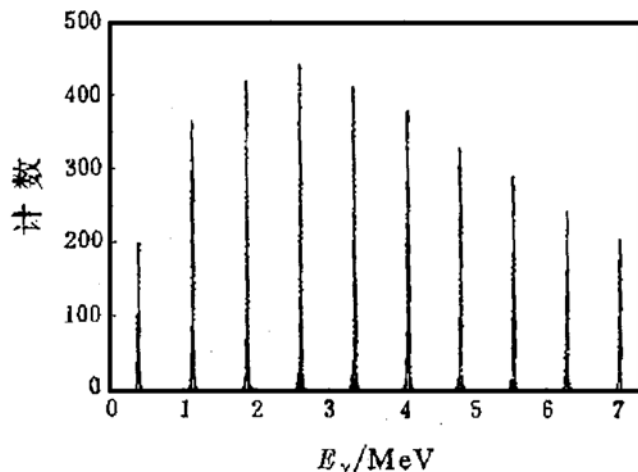


图3 正前方的辐射频谱

由左到右的峰依次对应于 $K = 1, 3, \dots$ 奇数阶的辐射.

3 实验安排与问题分析

周期弯曲晶体内超相对论电子和正电子相干辐射的实验研究, 可在中科院高能物理研究所 1.5 GeV 电子/正电子加速器上进行, 基本的实验装置如图4所示, 除此之外, 还应有必要的装置来降低本底计数. 利用漂移室组件, 对束流空间位置的测量精度可达到 0.5 mm . 通过采用高精度三维定角器, 可使束流发射角测量的精确度达到 $10 \mu\text{rad}$ 左右. 对 1.4 GeV 电子或正电子, 沿 Si (110) 面沟道穿行的 Lindhard 临界角约为 $180 \mu\text{rad}$, 因此完全可以实现沿面沟道入射.



图4 沟道辐射实验装置示意图

上述计算中对实验参数的选择是合理可行的. 此外当晶体较薄时(如厚度在 $400 \mu\text{m}$), 电子和正电子的平面退道、沟道能损、正电子在晶体中的湮灭均可忽略. 现在, 采用溅射沉积 ZnO 薄膜(膜厚约

10 μm) 的方法可获得振动频率在 200 MHz 以上的微波声学振动, 这可用于激发所需的周期弯曲沟道. 由于岩盐晶体有潮解的缺点, 实验上可采用碳、硅等高品质单晶.

带电粒子同晶体相互作用, 还会产生其他类型的辐射, 如相干韧致辐射和跃迁辐射, 就频率间隔而言, 它们与相干的沟道辐射完全可以分开^[8]. 相干的沟道辐射强度大、单色性好的优点, 可以作为

研究晶体结构、分子、原子的探针. 如一束能量为 100 keV 的射线, 具有 10^{-20} s 的时间分辨率. 时间分辨率的这种大幅度提高不论对基础研究还是对应用研究都有重大意义. 由于这里 γ 辐射是相干的且能量连续可调, 故可用于探测核电磁性质中迄今未细致了解的详情. 此外, 高强度的高能单色 γ 辐射还有其他非常广泛的用途, 在此不一一叙述.

参 考 文 献:

- [1] Berman B L, Kephart J O, Datz S *et al.* Channeling Radiation from LiH and LiD [J]. Nucl Instr & Meth, 1996, B119: 71–78.
- [2] Kononets Yu V. Radiation Emission and Related Processes for Multi-GeV Electrons and Positrons in Aligned Crystals [J]. Nucl Instr & Meth, 1998, B135: 40–44.
- [3] Baurichter A, Kirsebom K, Kononets Yu V *et al.* Radiation Emission and Its Influence on the Motion of Multi-GeV Electrons and Positrons in Strong Crystalline Fields [J]. Phys Rev Lett, 1997, 79(18): 3 415– 3 418.
- [4] Kirsebom K, Medenwaldt R, Mikkelsen U *et al.* Experimental Investigation of Photo Multiplicity and Radiation Cooling for 150 GeV Electrons/Positrons Traversing Diamond and Si Crystals [J]. Nucl Instr & Meth, 1996, B119: 79–95.
- [5] Gouanere M, Cue N, Berman B L *et al.* Sharp-line and Broad-continuum Radiation from Electrons Channeled in Diamond [J]. Nucl Instr & Meth, 1982, 194: 225–228.
- [6] Filatova N A, Forycki A, Carrigan R A *et al.* Radiation from 10 GeV Positrons Channeled in Silicon Crystals [J]. Nucl Instr & Meth, 1982, 194: 239–241.
- [7] Korol A V, Solov' yov A V, Walter Greiner. Coherent Radiation of an Ultra Relativistic Charged Particle Channeled in a Periodically Bent Crystal [J]. J Phys G: Nucl Part Phys, 1998, 24: L45–53.
- [8] 王广厚. 粒子与固体相互作用物理学(下册) [M]. 北京: 科学出版社, 1991, 1 165~ 1 168.

Channeling Radiation from High-energy Electrons and Positrons in Crystals*

ZHANG Yong, YAO Shu-de, ZHOU Sheng-qiang, LIU Guang-zhi

(*Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: The channeling radiation of high-energy electrons and positrons in crystals was introduced. According to the new idea proposed by A. V. Korol, the coherent radiation of ultra relativistic electrons and positrons channeled in periodically bent crystals was analyzed. The characteristics of the radiation were obtained by using classic electromagnetic theory and a tentative experimental plan for testing was suggested.

Key words: electron; positron; crystals; radiation