

doi: 10.3788/gzxb20154411.1125003

利用虚光子散射对回旋脉塞自发辐射的分析

孟现柱

(聊城大学 物理科学与信息工程学院 山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252059)

摘要:利用电磁场变换分析了带电粒子在磁场中的螺旋运动,基于康普顿散射理论和多普勒公式分析了虚光子与带电粒子的康普顿散射,并推导了在磁场中做螺旋运动的带电粒子的自发辐射波长公式.结果表明,当带电粒子在回旋脉塞的磁场中作螺旋运动时,在粒子静止系中可以观察到运动的周期性变化电场和磁场,即运动的虚光子.通过与带电粒子发生康普顿散射,虚光子能够转化为实光子辐射出去.

关键词:自发辐射;虚光子;康普顿散射;回旋脉塞;回旋辐射;同步辐射

中图分类号:O463+.1; TN101

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)11-1125003-6

Research of Spontaneous Radiation of Cyclotron Maser by Virtual Photon and Compton Scattering

MENG Xian-zhu

(Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, School of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China)

Abstract: The spiral motion of charged particles in magnetic field was analyzed by the transformations of the electromagnetic field. Based on Compton scattering theory and Doppler formula, Compton scattering of virtual photon and charged particles was analyzed, and the wavelength formula of spontaneous radiation of the charged particles with spiral motion in magnetic field was derived. The results show that when charged particles performs spiral motion in magnetic field, the electric and magnetic field can be taken as periodic electric and magnetic field, and equivalent to virtual photon in the particle system. By Compton scattering of virtual photon and charged particles, the virtual photon can transformed into real photon to radiate out.

Key words: Spontaneous radiation; Virtual photon; Compton scattering; Cyclotron maser; Cyclotron radiation; Synchrotron radiation

OCIS Codes: 250.0250; 340.1365; 340.6720; 350.5610

0 引言

回旋脉塞器件,又叫做回旋管系列,属于快波器件,它们在毫米波及亚毫米波波段振荡与放大方面具有高频率、高功率和宽频带工作的能力,在雷达、通信、高功率微波武器、高能物理学、天体物理以及材料处理等领域有着广阔的应用前景^[1-4].回旋脉塞的辐射机理最早是 1958 年澳大利亚天文学家 Twiss R Q 提出的^[5].同期的苏联科学家 Gaponov A B 也提出了类似电磁波与螺旋运动的电子注相互作用的机制^[6].1964 年美国耶鲁大学的 Hirshfield J L 从实验上证实了回旋脉塞机理的存在^[7].经过几十年的发展,国内外对回

旋脉塞在理论、实验和数值模拟方面做了大量的分析和研究.例如, Li G D 等研究了环绕电子束互作用的太赫兹电子回旋脉塞问题^[8];Nusinovich G S 等研究了具有周期性慢波结构的回旋脉塞共振问题^[9];在天体辐射方面,Wu D J 等研究了回旋脉塞的机制问题^[10].然而回旋脉塞的有关理论研究始终面临着复杂繁琐的公式推导.刘濮鲲等将自由电子激光中的 Madey 理论用于回旋自谐振脉塞,并结合天线阵理论,实现了回旋自谐振脉塞的简化分析^[3].

本文利用虚光子与带电粒子的康普顿散射,对回旋脉塞的自发辐射进行分析.推导在磁场中作螺旋运动的带电粒子的自发辐射波长公式,并根据该公式讨

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11275089,11375081)资助

第一作者:孟现柱(1968-),男,副教授,硕士,主要研究方向为史密斯-帕塞尔辐射. Email:mengxz@lcu.edu.cn

收稿日期:2015-06-30; **录用日期:**2015-09-01

<http://www.photon.ac.cn>

论了回旋辐射、同步辐射、回旋脉塞的自发辐射.

1 在磁场中作螺旋运动的带电粒子的自发辐射

1.1 粒子静止系中的电场和磁场

在实验室系中,设磁场中带电粒子的带电量为 q , 静止质量为 m_0 , 运动速度为 v , v 与磁场 \mathbf{B} 的夹角为 θ . 从实验室系观察,带电粒子在磁场中作螺旋运动,回旋周期为

$$T_c = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m_0 \gamma}{Bq} \quad (1)$$

式中 $v_{\perp} = v \sin \theta$, 为带电粒子的横向速度; $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ 为带电粒子的洛伦兹因子. 建立以 v 为 z' 轴且与粒子相对静止的粒子静止系,从粒子静止系观察,磁场围绕带电粒子做反向螺旋平动. 图1给出了不

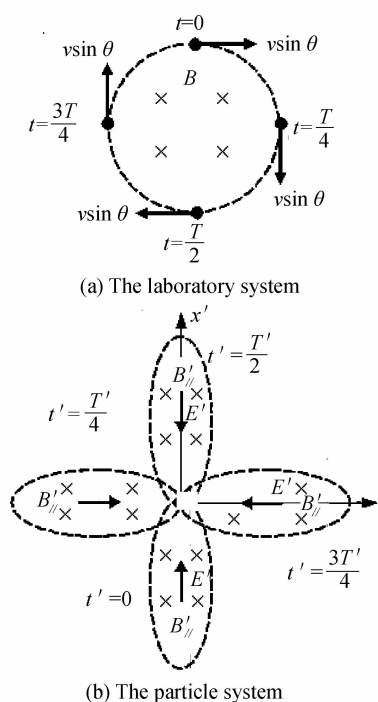


图1 磁场和带电粒子的相对运动

Fig. 1 Relative motion of magnetic field and charged particles

同参考系下磁场和带电粒子的相对运动情况,其中图1(a)为从实验室系中沿着磁场方向观察到的磁场和带电粒子的相对运动情况: $t=0$ 时刻,带电粒子处于磁场的上方; $t=T/4$ 时刻,带电粒子处于磁场的右方; $t=2T/4$ 时刻,带电粒子处于磁场的下方; $t=3T/4$ 时刻,带电粒子处于磁场的左方; $t=T$ 时刻,带电粒子又回到磁场的上方.即在实验室系中,磁场静止不动,带电粒作螺旋运动.图1(b)为从粒子静止系中沿着 z' 轴方向观察到的磁场和带电粒子的相对运动情况: $t'=0$ 时刻,磁场处于带电粒子下方的一 x' 轴上; $t'=T'/4$ 时刻,磁场处于带电粒子左方的一 y' 轴上; $t'=2T'/4$ 时刻,磁场处于带电粒子上方的 x' 轴上; $t'=3T'/4$ 时刻,磁场处于带电粒子右方的 y' 轴上; $t'=T'$ 时刻,磁场又回带电粒子下方的一 x' 轴上.即在粒子静止系中,粒子静止不动,磁场做反向螺旋平动.

根据相对论电磁场变换,在粒子静止系中既存在磁场 $\mathbf{B}' = \mathbf{B}_{\parallel} + \gamma \mathbf{B}_{\perp}$,又存在电场 $\mathbf{E}' = \gamma(\mathbf{v} \times \mathbf{B})_{\perp}$,其中 $B_{\parallel} = B \cos \theta$,为磁场平行于带电粒子速度 \mathbf{v} 的分量; $B_{\perp} = B \sin \theta$,为磁场垂直于带电粒子速度 \mathbf{v} 的分量. 磁场各个分量大小为

$$\mathbf{B}'_{\parallel} = \mathbf{B} \cos \theta, \mathbf{B}'_{\perp} = \gamma \mathbf{B} \sin \theta \quad (2)$$

电场的大小为

$$\mathbf{E}' = \gamma v \mathbf{B} \sin \theta \quad (3)$$

由于 \mathbf{B}_{\perp} 随着带电粒子的圆周运动周期性变化,因此在粒子静止系中 \mathbf{E}' 和 \mathbf{B}' 的方向周期性变化. 图2描述了粒子静止系中不同时刻 \mathbf{E}' 和 \mathbf{B}' 的方向: $t'=0$ 时刻, \mathbf{E}' 的方向沿 x' 轴正方向, \mathbf{B}' 的方向在 $(-y', z')$ 平面区域内; $t'=T'/4$ 时刻, \mathbf{E}' 的方向沿 y' 轴正方向, \mathbf{B}' 的方向在 (x', z') 平面区域内; $t'=2T'/4$ 时刻, \mathbf{E}' 的方向沿 x' 轴负方向, \mathbf{B}' 的方向在 (y', z') 平面区域内; $t'=3T'/4$ 时刻, \mathbf{E}' 的方向沿 y' 轴负方向, \mathbf{B}' 的方向在 $(-x', z')$ 平面区域内. 由于相对论效应,磁场绕带电粒子做反向螺旋平动的周长变为 $2\pi R/\gamma_{\perp}$,所以磁场绕带电粒子做反向螺旋平动的回旋周期为

$$T'_c = \frac{2\pi R/\gamma_{\perp}}{v \sin \theta} = T_c/\gamma_{\perp} \quad (4)$$

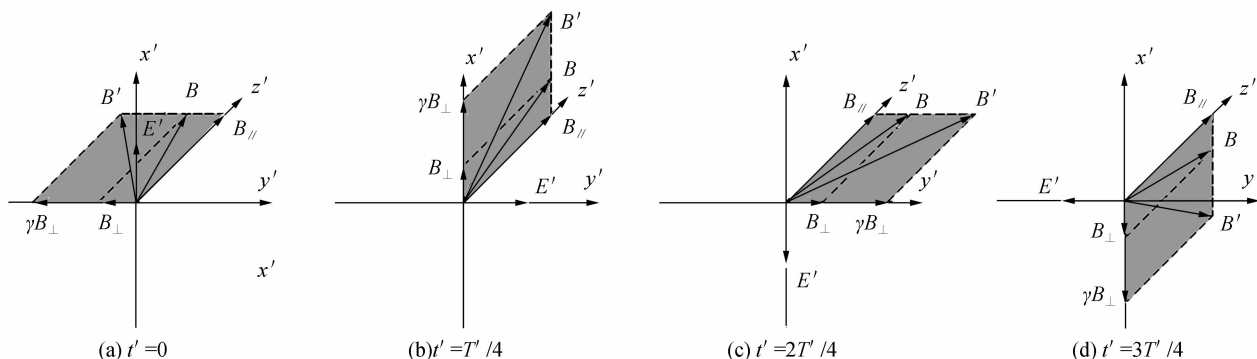


图2 粒子静止系中电场 \mathbf{E}' 和磁场 \mathbf{B}' 的方向

Fig. 2 The direction of the electric and magnetic fields in the particle system

式中 $\gamma_{\perp} = 1/\sqrt{1-(v\sin\theta)^2/c^2}$. 按照电磁理论, 周期性变化的电场和磁场形成电磁波. 考虑 \mathbf{E}' 和 \mathbf{B}' 周期性变化的周期等于 T'_c , 对应光子的波长为

$$\lambda'_c = cT'_c = cT_c/\gamma_{\perp} \quad (5)$$

由于该光子只能利用相对论变换从粒子静止系中观察到, 不能从实验室系中观察到, 所以这种光子被称为虚光子^[11-13] 或赝光子^[14-15] (本文简称虚光子).

1.2 在磁场中作螺旋运动的带电粒子的自发辐射

图3给出了康普顿散射中的夹角定义. 图3(a)为粒子静止系中的夹角定义: θ'_1 为虚光子的入射角(虚光子运动方向与 z' 轴的夹角), θ'_2 为散射光子的出射角

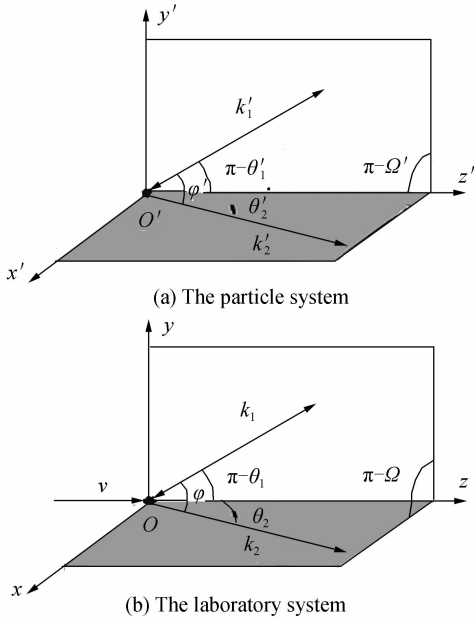


图3 康普顿散射中的夹角定义

Fig. 3 The angle definition in Compton scattering

(散射光子运动方向与 z' 轴的夹角), ϕ' 为散射角(虚光子与散射光子运动方向间的夹角), Ω' 为虚光子运动方向与 z' 轴构成的平面与散射光子运动方向与 z' 轴构成的平面间的夹角. 图3(b)为实验室系中的夹角定义: θ_1 为虚光子的入射角(虚光子运动方向与 z 轴的夹角), θ_2 为散射光子的出射角(散射光子的运动方向与 z 轴的夹角), ϕ 为散射角(虚光子与散射光子运动方向间的夹角), Ω 为虚光子运动方向与 z 轴所构成的平面与散射光子运动方向与 z 轴所构成的平面间的夹角.

根据图1(b), 在粒子静止系中, 周期性变化的电场和磁场均相对于粒子静止系以速度 $-v$ 运动, 因此产生虚光子的光源是运动的. 利用相对论多普勒公式得粒子静止系中虚光子的波长为

$$\lambda'_1 = \lambda'_c \gamma [1 - \beta \cos(\pi - \theta'_1)] \quad (6)$$

在粒子静止系中, 这种虚光子与带电粒子发生康普顿散射后就会转换为实光子辐射出去, 根据自发辐射定义^[16-18], 该辐射就是带电粒子的自发辐射. 辐射波长为

$$\lambda'_2 = \lambda'_1 + \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \phi') \quad (7)$$

利用相对论多普勒公式得实验室系中观察到的辐射光子波长为

$$\lambda_2 = \lambda'_2 \gamma (1 - \beta \cos \theta_2) \quad (8)$$

该波长就是在磁场中作螺旋运动的带电粒子的自发辐射波长, 由式(5)~(8)得

$$\lambda_2 = \left[\frac{cT_c}{\gamma_{\perp}} \gamma (1 + \beta \cos \theta'_1) + \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \phi') \right] \cdot \gamma (1 - \beta \cos \theta_2) \quad (9)$$

利用相对论光行差公式和几何关系 $\cos \phi' = \cos \theta'_1 \cos \theta'_2 + \sin \theta'_1 \sin \theta'_2 \cos \Omega'$ ^[19], 得在磁场中作螺旋运动的带电粒子的自发辐射波长为

$$\lambda_2 = \frac{cT_c (1 - \beta \cos \theta_2)}{\gamma_{\perp} (1 - \beta \cos \theta_1)} + \frac{h}{m_0 c} \left\{ 1 - \frac{\gamma^2 (\cos \theta_1 - \beta) (\cos \theta_2 - \beta) + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \Omega}{\sqrt{[\gamma^2 (\cos \theta_1 - \beta)^2 + \sin^2 \theta_1] [\gamma^2 (\cos \theta_2 - \beta)^2 + \sin^2 \theta_2]}} \right\} \gamma (1 - \beta \cos \theta_2) \quad (10)$$

由于 $\cos \phi = \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \Omega$, 式(10)可以改写为

$$\lambda_2 = \frac{cT_c (1 - \beta \cos \theta_2)}{\gamma_{\perp} (1 - \beta \cos \theta_1)} + \frac{h}{m_0 c \gamma (1 - \beta \cos \theta_1)} \quad (11)$$

其中 $h/m_0 c = 2.4263 \times 10^{-12}$ m 为带电粒子的康普顿波长, 远小于 T_c , 因此可以忽略, 式(11)近似为

$$\lambda_2 = \frac{cT_c (1 - \beta \cos \theta_2)}{\gamma_{\perp} (1 - \beta \cos \theta_1)} \quad (12)$$

2 分析与讨论

2.1 同步辐射和回旋辐射的自发辐射

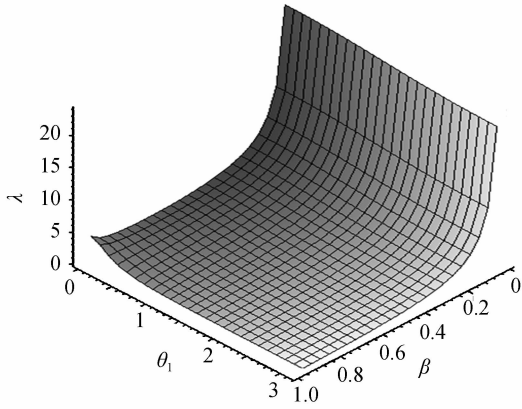
根据式(12)可以推导出同步辐射和回旋辐射的自发辐射波长和角频率. 在电子加速器中, 带电粒子的速度与磁场垂直, $v_{\perp} = v$, 带电粒子在磁场中做圆周运动,

此时产生的辐射分别称为回旋辐射和同步辐射. 考虑 $v_{\perp} = v$, $\gamma_{\perp} = \gamma$, $T_c = \frac{2\pi R}{v}$, 则式(12)变为

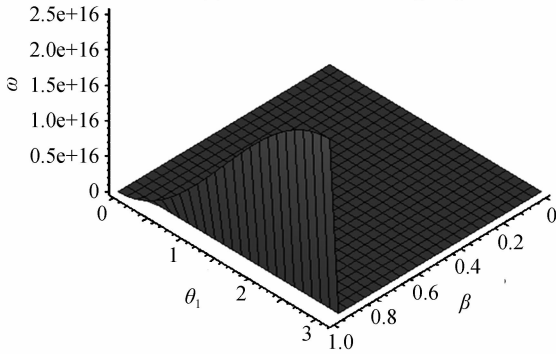
$$\lambda_2 = \frac{2\pi R (1 - \beta \cos \theta_2)}{\beta \gamma (1 - \beta \cos \theta_1)} \quad (13)$$

式(13)即同步辐射和回旋辐射波长的统一表达式^[11-12]. 带电粒子的回旋半径 R 不变, 迎着带电粒子 ($\theta_2 = 0$) 观察时, 同步辐射和回旋辐射的 $\lambda_2(\omega_2)$ 曲线如图4. 分析图4可知, 当带电粒子的能量不大, 带电粒子的回旋速度 $v \ll c$ 时, 辐射近似为单一的频率, 辐射的方向性不强, 这时辐射称回旋辐射, β 约为 0, 考虑 $\beta \cos \theta_1 \approx 0$, $\beta \cos \theta_2 \approx 0$, $\gamma \approx 1$, 由式(13)得回旋辐射的波长为

$$\lambda_2 = \frac{2\pi R}{\beta} \quad (14)$$



(a) The curve of wavelength λ_2



(b) The curve of angular frequency ω_2

图4 同步辐射和回旋辐射的 $\lambda_2(\omega_2)$ 曲线

Fig. 4 The curve of wavelength λ_2 (or angular frequency ω_2) in the synchrotron radiation and cyclotron radiation

当带电粒子的能量很大, 以至其回旋速度 v 约为 c 时, 辐射有一个宽广平滑的连续谱, 包含从红外到 X 射线的各种波长, 而且辐射的方向性极强. 这时辐射称为同步辐射, $\beta \sim 1$, 考虑相对论效应, $\theta_2 \approx 1/\gamma \approx 0$, $\frac{1-\beta\cos\theta_2}{1-\beta\cos\theta_1} \approx \frac{1-\beta}{1-\beta\cos\theta_1} \approx \frac{1}{2\gamma^2(1-\beta\cos\theta_1)}$, 由式(13)得

表2 电子的能量 ϵ_e 和相应特征波长的光子能量 ϵ_c 数据

Table 2 Data of electron energy and Character photon energy

Parameter	Value						
ϵ_e/keV	0.58	1.4	2.7	4.7	7.4	11	15.7
ϵ_e/GeV	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
$\epsilon_c/\epsilon_e^3/\text{eV}^{-2}$	1.72×10^{-25}	1.75×10^{-25}	1.72×10^{-25}	1.74×10^{-25}	1.72×10^{-25}	1.71×10^{-25}	1.72×10^{-25}

2.2 回旋脉塞的自发辐射

根据式(12)还可以推导出回旋脉塞的自发辐射波长和角频率. 在回旋脉塞中, 带电粒子在磁场中作螺旋运动^[23-25], 这时产生的电磁辐射叫回旋脉塞的自发辐射. 考虑 $T_c = \frac{2\pi m_0 \gamma}{Bq}$, 利用式(12)得回旋脉塞的自发辐射波长为

$$\lambda_2 = \frac{2\pi m_0 \gamma (1-\beta\cos\theta_2)}{Bq\gamma_{\perp} (1-\beta\cos\theta_1)} \quad (17)$$

同步辐射的波长为

$$\lambda_2 = \frac{\pi R}{\beta\gamma^3 (1-\beta\cos\theta_1)} \quad (15)$$

根据式(15), 不同的 θ_1 , 对应不同的同步辐射的波长 λ_2 , 当 $\theta_1 = 0$ 时, 同步辐射的波长为 $\frac{2\pi R}{\beta\gamma}$; 当 $\theta_1 = \pi$ 时, 同步辐射的波长为峰值特征波长 $\lambda_c \approx \frac{\pi R}{2\beta\gamma^3}$; 当 θ_1 介于 0 和 π 之间时, 同步辐射的波长介于 $\frac{2\pi R}{\beta\gamma}$ 和 $\frac{\pi R}{2\beta\gamma^3}$ 之间^[11-13]. 结论与经典实验的结果一致. 表1给出了由合肥国家同步辐射实验室获得的主要参数以及利用式(7)计算的峰值特征波长 λ_c , 峰值特征波长的计算值与文献[20]图3的峰值(临界波长 2.4 nm^[21]附近的能谱极大值)一致.

表1 自发辐射的主要参数

Table 1 Main parameters of spontaneous radiation

Parameter	Value
Electron energy/MeV	800
Bending radius/m	2.2221
Bending magnet field/T	1.2
Circum fence/m	66.1308
Peak value wavelength(λ_c)/nm	0.9096

峰值特征波长 $\lambda_c \approx \frac{\pi R}{2\beta\gamma^3}$ 结合 $\gamma = \frac{E_e}{m_0 c^2}$ 得

$$\frac{E_c}{E_e^3} = \frac{2h}{\pi m_0^3 c^5 R} \quad (16)$$

同一个加速器的半径 R 为常数, 因此 E_c/E_e^3 为常数. 表2给出了根据斯坦福直线加速中心的同步辐射曲线^[22]绘制的加速电子的能量 E_e 和相应峰值特征波长的光子能量 E_c 数据. 从表2看出, E_c/E_e^3 的比值基本为 $1.72 \times 10^{-25} \text{ eV}^{-2}$, 这与利用文献[22]中周长 234 m 估算得到的数值 $1.6 \times 10^{-25} \text{ eV}^{-2}$ 非常接近.

令 $\omega_c = \frac{Bq}{m_0}$, 利用关系式 $\omega = 2\pi c/\lambda$, 则回旋脉塞的自发辐射角频率为

$$\omega_2 = \frac{\gamma_{\perp} (1-\beta\cos\theta_1)}{\gamma (1-\beta\cos\theta_2)} \omega_c \quad (18)$$

式(18)即回旋脉塞的自发辐射角频率的统一表达式. 在磁场 \mathbf{B} 不变、 $\theta_1 = \pi/4$ 时, 迎着带电粒子 ($\theta_2 = 0$) 观察, 回旋脉塞的自发辐射波长 $\lambda_2(\omega_2)$ 曲线如图5. 分析图5可知, 当带电粒子的速度 $v \ll c$ 时, $\beta \sim 0$, $\beta\cos\theta_1 \approx 0$, $\beta\cos\theta_2 \approx 0$, $\gamma \approx 1$, $\gamma_{\perp} \approx 1$, 由式(18)得回旋脉塞的自

发辐射角频率为

$$\omega_2 = \omega_c \quad (19)$$

可见这时自发辐射近似为单一的频谱,并且没有相对论多普勒上移,这时产生的电磁辐射对应非相对论回旋脉塞的自发辐射.当带电粒子的速度 $v_z \sim c$ 时, $\beta \sim 1$, 考虑 $\theta_2 \approx 1/\gamma \approx 0$, $1 - \beta \cos \theta_2 \approx 1 - \beta \approx \frac{1}{2\gamma^2}$, 由式(18)得

相对论回旋脉塞的自发辐射角频率为

$$\omega_2 = 2\gamma\gamma_{\perp}(1 - \beta \cos \theta_1)\omega_c \quad (20)$$

可见这时部分角频率有较大的相对论多普勒上移,产生的电磁辐射对应相对论回旋脉塞的自发辐射.根据式(20),在相对论回旋脉塞中,不同的 θ_1 对应不同的角频率 ω_2 , 当 $\theta_1 = 0$ 时, $\omega_2 \approx \omega_c \gamma_{\perp} / \gamma$; 当 $\theta_1 = \pi$ 时, $\omega_2 \approx 4\gamma\gamma_{\perp} \omega_c$; 当 θ_1 介于 0 和 π 之间时,角频率介于 $\omega_c \gamma_{\perp} / \gamma$ 和 $4\gamma\gamma_{\perp} \omega_c$ 之间. 结论与经典理论的结果一致^[1].

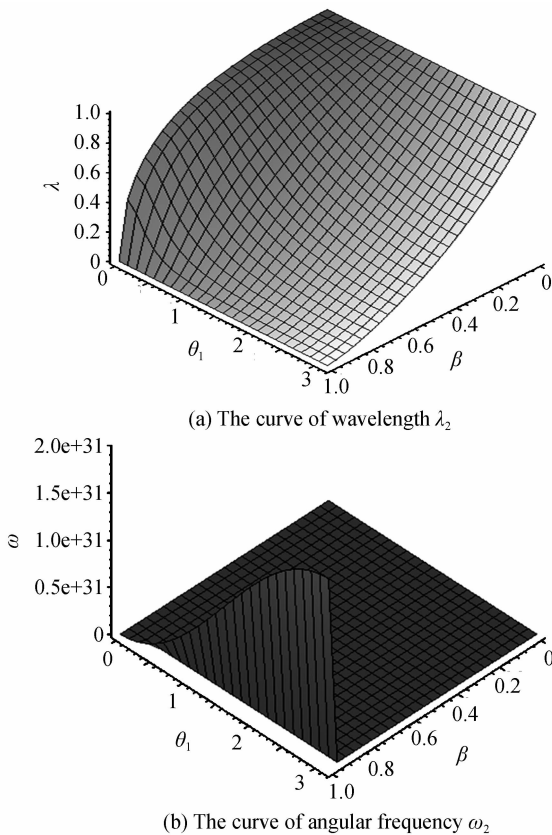


图5 回旋脉塞的自发辐射 λ_2 (ω_2) 曲线

Fig. 5 The curve of wavelength λ_2 (or angular frequency ω_2) of spontaneous radiation in the cyclotron maser

3 结论

由本文研究可知,在实验室系中,当带电粒子在磁场中作螺旋运动时,在粒子静止系中可以观察到粒子静止不动,磁场做反向螺旋平动.利用电磁场变换,在粒子静止系中可以观察到运动的周期性变化电场和磁场,即在粒子静止系中可以观察到运动的虚光子.当虚光子与带电粒子发生康普顿散射时,虚光子能够转化

为实光子辐射出去,该辐射就是带电粒子的自发辐射.利用康普顿散射理论和多普勒公式可以推导出在磁场中作螺旋运动的带电粒子的自发辐射波长公式,回旋辐射、同步辐射、回旋脉塞的自发辐射波长公式都是该公式的特例,可以由其推导得出,所得结果与经典理论推导的结果一致.

参考文献

- [1] 刘盛纲. 回旋脉塞和回旋管的进展[M]. 成都:四川教育出版社, 1988, 1-16.
- [2] YU Shan-fu, LIU Sheng-gang, XU Xiao-xi, et al. Experimental analysis of stimulated radiation in the electrostatic electron cyclotron resonance maser [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1992, **20**(3): 77-78.
于善夫, 刘盛纲, 徐晓曦, 等. 静电电子脉塞的受激辐射的实验研究[J]. *电子学报*, 1992, **20**(3): 77-78.
- [3] LIU Pu-kun, TANG Cang-jian, YANG Zhong-hai. Cyclotron auto-resonance maser and its simplified analysis[J]. *Journal of UEST of China*, 1993, **22**(3): 291-296.
刘濮鲲, 唐昌建, 杨中海. 回旋自谐振脉塞及其简化分析[J]. *电子科技大学学报*, 1993, **22**(3): 291-296.
- [4] LIU Pu-kun, DU Chao-hai. Review of the gyrotron traveling-wave-tube amplifier development [J]. *Journal of Microwaves*, 2013, **29**(5): 033-042.
刘濮鲲, 杜朝海. 毫米波回旋行波放大器的发展评述[J]. *微波学报*, 2013, **29**(5): 033-042.
- [5] TWISS R Q. Radiation transfer and the possibility of negative absorption in radio astronomy [J]. *Australian Journal of Physics*, 1958, **11**: 564-579.
- [6] GAPONOV A V. Interaction between electron fluxes and electromagnetic waves in waveguides [J]. *Izv Vyssh Uchebn. Zaved. Radiofiz*, 1959, **2**: 450-462.
- [7] HIRSHFIELD J L, WACHTELL J M. Electron cyclotron maser[J]. *Physical Review Letters*, 1964, **12**: 533-536.
- [8] LI G D, KAO S H, CHANG P C, et al. Terahertz electron cyclotron maser interactions with an axis-encircling electron beam[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, **22**(4): 043109.
- [9] NUSINOVICH G S, ZHAO D. Combined resonances in cyclotron masers with periodic slow-wave structures [J]. *Plasma Science IEEE Transactions on*, 2015, **43**(3): 804-814.
- [10] WU D J, CHEN L, ZHAO G Q, et al. A novel mechanism for electron-cyclotron maser[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2014, **566**(940): 595-595.
- [11] MENG Xian-zhu. Research of synchrotron radiation and cyclotron radiation by virtual photon compton scattering[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2004, **28**(8): 898-900.
孟现柱. 利用虚光子 Compton 散射对同步辐射和回旋辐射的研究[J]. *高能物理与核物理*, 2004, **28**(8): 898-900.
- [12] MENG Xian-zhu. Research of synchrotron radiation by virtual photon and compton [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(3): 477-480.
孟现柱. 利用虚光子和康普顿散射对同步辐射的分析[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(3): 477-480.
- [13] MENG Xian-zhu. Research of free-electron laser using compton scattering [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2004, **10**(1): 11-13.
孟现柱. 利用康普顿散射对自由电子激光器的研究[J]. *量子光学学报*, 2004, **10**(1): 11-13.
- [14] ZHU Jia-qing. Collision analogue of a free electron laser [J].

- Journal of Huazhong Normal University (Natural Sciences)*, 1988, **22**(3): 293-296.
- 祝家清. 自由电子激光的“碰撞”模拟[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 1988, **22**(3): 293-296.
- [15] ZHU Jia-qing. Energy conversion of free electron laser [J]. *Acta Physica Sinica* 1996, **45**(1): 52-57.
祝家清. 自由电子激光的能量转换[J]. 物理学报, 1996, **45**(1): 52-57.
- [16] LI Zhi-quan, YAN Lei, GUO Jia-liang, *et al.* Characteristic analysis of noise factor in the periodic stripe long range surface plasmon polaritons structure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0319001.
李志全, 严蕾, 果佳良, 等. 周期条状结构中长程表面等离子激元噪声特性分析[J]. 光子学报, 2015, **44**(3): 0319001.
- [17] LI Xiao-li, MENG Xu-dong, WU Yan-hua, *et al.* The transformation from electromagnetically induced transparency to lasing without population inversion based on spontaneously generated coherence [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 0819002.
李晓莉, 孟旭东, 吴艳华, 等. 基于自发辐射相干控制的电磁感应透明诱导无反转光放大效应[J]. 光子学报, 2014, **43**(8): 0819002.
- [18] LIU Lan-lan, YANG Wei, WU Chong-qing, *et al.* Active spontaneous emission of edf pumped by arbitrary waveform pulse [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1206001.
刘岚岚, 杨伟, 吴重庆, 等. 任意波形脉冲泵浦下掺铒光纤的自发辐射[J]. 光子学报, 2014, **43**(12): 1206001.
- [19] MENG Xian-zhu. Research the scatter on photon interacting with moveable particle [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2003, **9**(3): 102-104.
孟现柱. 对光子和高速粒子散射的研究[J]. 量子光学学报, 2003, **9**(3): 102-104.
- [20] TANG Yu-guo LI Fu-tian. Characteristics of synchrotron radiation emitted by heifei 800MeV electron storage ring [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 1994, **14**(8): 795-799.
唐玉国, 李福田. 合肥 800MeV 电子储存环同步辐射特性[J]. 光学学报, 1994, **14**(8): 795-799.
- [21] ZHANG Shan-cai, DIAO Cao-zheng, HE Duo-hui, *et al.* The design of FEL compton backscattering experiment in NSRL [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(3): 281-284.
张善才, 刁操政, 何多慧, 等. 利用 FEL 康普顿背散射实现对 NSRL 辐射波段的扩展[J]. 强激光与粒子束, 2000, **12**(3): 281-284.
- [22] HUANG Zheng-dong, CHEN Feng-zhi. Synchrotron radiation and its applications [J]. *College Physics*, 1995, **15**(2): 38-40.
黄正东, 陈凤至. 同步辐射及其应用[J]. 大学物理, 1995, **15**(2): 38-40.
- [23] LIU Sheng-gang, YU Shan-fu, LIU xiu-hong. Electrostatic electron cyclotron rosonance maser and electrostatice free electron laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1989, **1**(2): 99.
刘盛纲, 于善夫, 刘秀红. 静电电子回旋脉塞与静电自由电子激光[J]. 强激光与粒子束, 1989, **1**(2): 99.
- [24] LI Yue-bao, ZHU Da-jun, LIU Sheng-gang. PIC simulation of periodic dielectric cerenkov maser [J]. *Journal of UEST of China*, 2008, **37**(05): 27-29.
李悦宝, 祝大军, 刘盛纲. 周期性介质切伦柯夫脉塞的粒子模拟[J]. 电子科技大学学报, 2008, **37**(05): 27-29.
- [25] PENG Kai, LIU Da-gang, LIAO Chen, *et al.* Numerical simulation and study of electron cyclotron maser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(9): 091301.
彭凯, 刘大刚, 廖臣, 等. 三维电子回旋脉塞的数值模拟研究[J]. 物理学报, 2011, **60**(9): 091301.