

高能电子在均匀磁场中作曲线轨道运动,其电磁辐射集中在轨道的切线方向,这种辐射称为同步辐射。与普通的电磁辐射相比,同步辐射具有方向准直、强度高、偏振度高、脉冲周期稳定等优点,它在物理、化学、生物和地质等方面有广泛的应用,并取得了丰硕的成果。目前世界上已有二十多台同步辐射装置供研究之用,每年有大量的论文发表。随着我国科学技术的发展,同步辐射引起了我国科技工作者的重视。中国科学院决定在北京和合肥分别建造大型的同步辐射装置,一旦建成必将对我国的同步辐射研究起到极大的推动作用。我们在这里要介绍的是同步辐射中一种有趣的现象——自旋反转效应。

自旋反转同步辐射

宋皓

一、自旋反转同步辐射

同步辐射的理论研究早在本世纪初就开始了,到了40年代,世界上第一台同步加速器诞生,同步辐射在实验室里实现了。从此以后,同步辐射研究不再是“纸上谈兵”了一些新的实验数据的获得要求理论物理学家给出相应的物理解释,同时一些理论预言又促使实验物理学家去进行进一步的实验观察,理论与实验的结合使同步辐射的研究突飞猛进,至今仍然经久不衰。

在同步辐射的研究领域中,一个非常有趣的现象就是自旋反转同步辐射。1960年,苏联物理学家 Ternov 等首先提出了自旋反转同步辐射的概念。打个比方说,把带自旋的电子看成人,头向上表示自旋沿磁场方向,头向下表示自旋逆磁场方向。大家在均匀磁场中绕一圆围走。开始有一半人头向上行走,另一半人象杂技演员一样头向下行走。经过一段时间后,就会发现几乎所有的人都成了杂技演员,也就是他们都头向下了。(见图1)这就是说,在均匀磁场中作圆围运

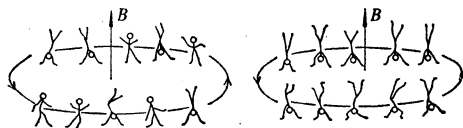


图1 自旋反转的建立

开始时,电子自旋向上和向下的数目相等,经过一段时间后,电子反平行于磁场排列

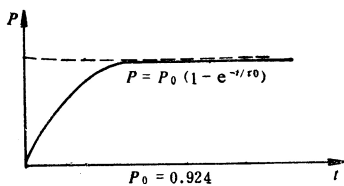


图2 极化率最终趋于 0.924

动的电子经过一段弛豫时间后,自旋沿反平行于磁场方向排列,这种现象就称为自旋反转(或称为电子的横向极

化)。与此同时,电子发出的电磁辐射就是自旋反转同步辐射。一般情况下自旋反转同步辐射的功率与普通同步辐射相比是相当小的,以北京正负电子对撞机(BEPC)为例,两者的总功率之比约 10^{-12} 。

计算结果表明并非所有电子都反平行于磁场排列。^[3]引入电子的横向极化率 P ,它是自旋反平行于磁场的电子数和平行于磁场的电子数之差与总电子数之值。经计算,自旋极化率为

$$P = P_0(1 - e^{-t/\tau_0})$$

$$\text{其中 } P_0 = 8/5\sqrt{3} \doteq 0.924,$$

$$\tau_0 = \frac{8}{5\sqrt{3}} \left(\frac{m^2 c^4 \rho^3}{e^2 \hbar \epsilon^3} \right)$$

是弛豫时间。(式中 ρ 是电子轨道半径, ϵ 是电子的能量。)从上式中可以看出极化率最终并不趋于 1,而是 0.924(见图2),这

就是说仍有极少数的电子自旋仍然沿着磁场方向排列。弛豫时间 τ_0 不是很小的量,可在实验室里测量。以正在北京建造的正负电子对撞机(BEPC)为例,电子能量为 2.8GeV 时,弛豫时间约 40 分钟。

二、测量自旋极化率

1960 年自旋反转同步辐射被预言后,实验物理学家立刻投入紧张的工作,他们试图在实验上首次测出自旋极化率 P ,并以此来检验理论的准确程度。但直到 1968 年,人们才报告观察到了自旋反转的建立过程。

如何来测量电子在同步加速器中的横向极化率?这是实验物理学家碰到的第一个问题。有人对同步加速器储存环中电子的运动进行了研究,提出通过测量电子与电子散射(Möller 散射)截面来测出电子的自旋极化率的方法。电子在储存环中运动,由于存在着径向振荡而使电子产生相对运动,这种相对运动导致了

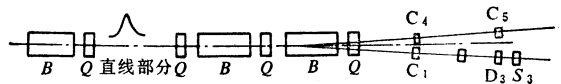


图3 Möller 散射电子偏离原轨道

Möller 散射的发生。设两个电子初态的质心能量为 E^* ,经过散射后具有能量 E_1 和 E_2 ,它们一般不同于电子在储存环中的能量 E 。这些散射后的电子在导向弯曲磁场的作用下与原来的电子束分离,并以近似对称于原电子束的轨道在相同的水平面上运动。这种向外散射(或称 Touschek 效应)是同步加速器储存环中电子束损失的重要因素,这种现象在能量不很高的情况下尤为显著。由于 Möller 散射截面与电子自旋状态有关,这样可通过测量向外散射的计数率来获得电子与电子散射截面,从而了解自旋反转的情况。

测量装置是由带有闪烁计数器的双臂望远镜所组成(见图3)。其中 C_1 、 C_2 、 D_3 、 S_3 、 C_4 和 C_5 都是计数器,用来符合计数,记录电子对的散射数目。 S_3 是簇射计数器,其阈值用来抵消背景。图中 B 和 Q 分别为导向弯曲磁场和四极磁场。导向弯曲磁场使电子绕着一条闭合轨道运动而产生储存束;四极磁场具有聚焦作用,使得电子沿着理想闭合轨道作径向和垂直方向的振荡。

利用这套装置可对自旋极化率进行测量。1975年在 SLAL 的 SPEAR 上测得的极化率 $P_0 = 0.85 \pm 0.15$, 弛豫时间为 90 ± 40 分钟,相应的理论值为 -0.25 , 弛豫时间为 124 分钟。人们看到实验数据的误差比较大。随着实验精度的提高,人们发现实验结果与理论预言值有一定的偏差。

1975年 Learned 等人认为储存环中电子束的结构对外散射的测量结果非常灵敏,这就妨碍了实验精度的进一步提高,故利用向外散射不能精确地测量极化率 P_0 。于是他们研究了反应 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ 和 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, 并以此来测量极化率 P_0 。他们测得极化率 $P_0 = 0.76 \pm 0.05$, 误差比较小。这一结果显然要比理论值小,这引起了人们的注意。下面,我们就来介绍自旋反转极化机制。

三、自旋反转极化原理

人们首先想到的是用两能级系统的自发辐射来解释自旋反转现象。同步加速器中的电子可看成是在垂直于均匀磁场的平面里作圆周运动。如果我们跟着电子一起运动,在这个和电子一起运动的参考系中磁场的方向与原来的磁场一样,只是在数量上改变了。电子自旋产生的 Dirac 磁矩与这个参考系中的磁场有相互作用,电子的能量就要发生分裂,分成上下两个能级,这一系统就称为两能级系统。上能级对应于电子自旋平行于磁场的状态,下能级对应于电子自旋反平行于磁场的方向(见图4)。由自发辐射原理,我们知道电

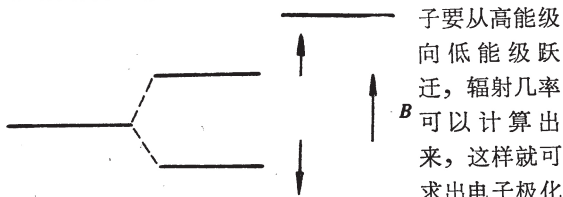


图4 电子能级发生分裂, B 为磁场的弛豫时间。但这一直观的图象给出的极化率是 1, 即电子要从自旋平行于磁场的状态全部跃迁到自旋反平行磁场的状态。

实际上自旋极化率并不为 1, 两能级系统能直观地描述自旋反转现象,但也存在着缺点,这就是忽略了自旋与轨道的相互作用。电子磁矩绕磁场方向进动,

如果进动的频率很快,这一体系就有足够的时间建立两能级并进行磁偶辐射,可以不考虑轨道运动的影响。换句话说,就是和电子一起运动的参考系近似地等于电子的静止系,并可以用简单的非相对论理论来处理自转反转问题。但是,当磁矩进动不是很快时自旋和轨道的相互作用就必须考虑。电子轨道能量有一定的宽度,其量子化程度很小,可以把轨道能量看成是连续的。电子自旋能谱嵌在轨道能谱中,于是自旋反平行于磁场方向的态可以向轨道能量较低的自旋平行于磁场方向的态跃迁,从而使极化率最后小于 1。(见图5)

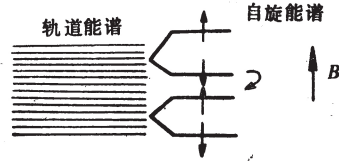


图5 自旋向下的态向自旋向上的态跃迁

借助于量子力学微扰论的方法,可对自旋反转现象作定量的描述。采用这一方法可有不同的出发点,或从粒子自旋运动的 BMT 方程出发,或从粒子所满足的 Dirac 方程出发,所得到的结果除在纵向(粒子运动方向)外在横向是完全相同的,都是 0.924;弛豫时间与两能级系统差一比例常数,由此可见,两能级系统反映了一定的物理内容。至于具体的推导计算过程,有兴趣的读者可以参考有关文献,这里就不作介绍了。值得一提的是在上面的推导计算过程中我们忽略了高阶量子效应对自旋极化现象的影响,其实在同步辐射中高阶量子效应主要来源于两个方面:一是电子轨道运动能量的量子化;二是光子辐射场对运动电子的量子反冲作用,这种量子作用是考虑了算符不对易性而引进的修正。理论计算表明,这两种效应都与储存环中电子的能量和磁场有关,我们可引入两个无量纲量来表征这两种量子效应的大小。电子轨道能量的间隔与电子能量 ε 之比:

$$\eta = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \left(\frac{B}{B_c}\right) \left(\frac{mC^2}{\varepsilon}\right)^2$$

其中 $B_0 = 4.4 \times 10^{13}$ 高斯, m 是电子的静止质量, B 是磁场强度。光子场对电子轨道运动的反冲作用可用参数 x 来表示:

$$x = \left(\frac{B}{B_0}\right) \left(\frac{\varepsilon}{mC^2}\right)$$

式中的字母的物理意义与前式一样。从这两个式中我们看到当电子能量很高时,完全可以忽略前一种量子效应,只考虑后一种量子效应对自旋极化率的影响,这一影响在粒子能量很高、磁场又很强的脉冲星上尤为明显。我们对后一种量子效应进行了计算,发现光子辐射场对电子的量子作用使得电子自旋反转极化率减小,而使弛豫时间增长。由于这种修正在目前同步加速器中是很小的,它不足以解释极化率的实验值为 0.76 ± 0.05 这一事实。

那么是什么原因使实验值为 0.76 ± 0.05 呢? 目前认为主要是由电子的退极化效应所引起, 但还需要对一些细节问题作进一步的研究.

至此, 我们只是对同步辐射中的自旋反转现象作了一个粗略的介绍, 当然同步辐射的研究还远远不止这些. 我们相信, 随着我国科学技术的发展, 同步辐射的研究必将出现一个飞跃发展的局面.