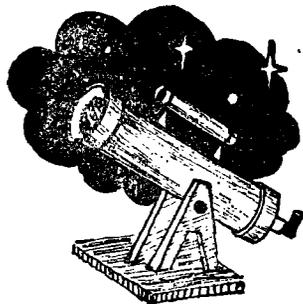


中子星上的 γ 射线爆

——典型习题中的现代物理知识

杨 大 卫



第五届全国中学生物理竞赛中有一试题,涉及到高能天体物理的一件有趣事例。该题说:“1979年,7颗人造卫星同时接收到来自远方的中子星发射的 γ 射线,经分析确认,这些 γ 光子是电子-正电子对湮灭时放出的,即 $e^- + e^+ \rightarrow n\gamma$,其中 n 表示光子数目。已知电子、正电子的静止质量 $m_0 = 8.2 \times 10^{-14} \text{J}/c^2$,静止质量为 m_0 的粒子其能量 E 和动量 P 满足 $E^2 = c^2P^2 + m_0^2c^4$,光子的动量 $=h\nu/c$ 。1.试证明 $n \neq 1$; 2.若电子、正电子动量为零, $n = 2$,求 γ 光子的频率。”

题中叙述的事件是指1979年3月5日发现的 γ 射线爆——GB790305。所谓 γ 射线爆是能量约为兆电子伏特(MeV)的高能光子流在极短时间(十分之几秒至几十秒)内流量陡增的现象。由于 γ 射线是波长短于 10^{-12} 米的电磁波,被地球大气吸收严重,因而要直接探测,只能利用高空探测器、人造卫星或行星际飞行器。GB790305就是由九颗分布在太阳系不同轨道上的飞行器(不仅仅是7颗卫星)探测到的。根据它们各自探测记录的差异,可判断出这些 γ 射线来自大麦哲伦云中的一个超新星遗迹。

大麦哲伦云距太阳系约 1.6×10^{21} 米,若 γ 爆的辐射是各向同性的,则依这次爆发持续的时间(仅0.12秒!)以及探测器记录的流量(\sim 光子数/厘米²·秒)和光子能谱(\sim 兆电子伏),即可算出它的总能量竟高达 5×10^{37} 焦耳,相当太阳在4000年里所释放的能量(4.8×10^{37} 焦耳)!这是目前探测到的最强的 γ 爆。

科学家们是如何分析出这些高能 γ 光子是由电子-正电子对湮灭产生的呢?

(1)要同时满足能量守恒和动量守恒定律,每对

小至数十埃,发生量子尺寸效应,硅的带隙变宽,载流子的浓度随即下降,晶丝或晶粒的载流子将耗尽,从而限制了小尺寸晶粒继续腐蚀。这一模型将多孔硅的形成机理与发光机理统一起来。

电化学腐蚀是形成多孔硅的主要方法,但是在一定条件下用 $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 溶液直接进行纯化学腐蚀,也可形成多孔硅,这种方法又称染色法。此外,用化学气相淀积生长的纳米硅薄膜也有荧光现象。这也可以用量子限制效应解释,但发光体已不是

自由的电子-正电子在湮灭过程中产生的 γ 光子数就只能为2,即 $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$ 。

(2)若电子-正电子对的总动量为零($P_- + P_+ = 0$),那么湮灭后产生出的两个光子的总动量也一定为零,进而可知原来电子和正电子的能量相等($=m_0c^2$),后来两光子的能量也相等($=h\nu_\gamma$),所以 $m_0c^2 = h\nu_\gamma$ (式中 $m_0 = m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$),由此可得 γ 射线的频率 $\nu_\gamma \geq m_0c^2/h = 1.24 \times 10^{20}$ 赫兹,其能量大于或等于 8.19×10^{-14} 焦耳,即0.511兆电子伏特。

(3)正、负电子的相对速度 v 越小,湮灭的几率就越大,即湮灭时产生0.511兆电子伏射线几率最大。

(4)电子-正电子对的总动量一般不是零,湮灭时产生的两个光子实际上并不等频。如以电子为参照,正电子速度为 v ,在极端相对论的情况下,向前射出的光子能量 $h\nu_1 \sim m_0c^2$,而向后射出的另一个光子能量 $h\nu_2 \sim m_0c^2$ 。这就是说,即使正、负电子对总动量不为零的情况下也会产生能量为0.511兆电子伏的谱线。

总之,能谱中0.511兆电子伏谱线就是正、负电子湮灭的特征谱线。通过分析探测器记录的能谱,只要发现这条特征谱线,就可以确认那些高能 γ 光子是由正、负电子湮灭产生的。回顾原题,可以看出该题实际上是要求在湮灭几率最大条件下计算特征谱线频率。

为了进一步解释GB790305为什么会释放出惊人的能量,科学家们又提出了星震模型。他们认为,这次强大的 γ 爆可能是来自前述超新星遗迹内的一颗中子星。由于中子星内部发生剧烈震动,其震动能量以激波形式传到中子星表面,在那里产生由正、负电子组成的等离子体,随即湮灭并发射大量的高能 γ 光子。

多孔状材料,在结构和发光性质上更稳定,但目前发光效率还较低。

自1990年开始,多孔硅研究进入了一个新阶段,即高孔度发光多孔硅研究阶段。近三年的研究,已有了很大进展,但是至今在应用方面尚未突破。在机理研究方面也还有待深入。无论在理论研究和应用研究方面,都还有很长的路要走,有待突破。人们对非常诱人的多孔硅应用前景充满信心,研究的热潮方兴未艾。