

同步辐射的局限性

张 家 铝 杨 建 明

(中国科技大学天体物理中心 合肥 230026)

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘 要

由于同步辐射机制在天体物理应用中取得了巨大成功,近十多年来已出现滥用的趋势。“幂律能谱的电子一定辐射幂律谱”的传统观念其实有错误。对非均匀磁场,正确的公式应该是同步-曲率辐射公式,而不是同步辐射公式。将一般磁场都看成平均均匀场,用同步辐射讨论,很可能导致对天体情况的错误描述。

关键词 同步辐射 — 弯曲磁场 — 幂律谱

分类号 P142.81

大约在 1951 年, Alfvén、Ginzburg 等人就指出,同步辐射可能是宇宙中天体辐射的一种极其重要的机制。他们导出了一个十分重要的结果,那就是能谱指数为 n 的幂律分布粒子,其辐射谱也是幂律的,而且谱指数 $q = (n - 1)/2$ 。这一观点逐渐为人们普遍接受,并用以正确解释了河内、河外众多天体的非热辐射,还导致了类星体的发现。因此“幂律能谱的电子一定发射幂律谱”的结论已成为大家的共识。而且由宇宙线的观测,人们还相信,宇宙各类辐射源中的粒子大都具有幂律形式的能谱分布,一系列幂律辐射谱的被探测到,就使同步辐射的地位更为突出。这时人们似乎已经忘记了它只是一个适用于均匀磁场的公式。

1970 年前后,由于在解释高亮度射电源(特别是解释脉冲星)的辐射上,同步辐射并未获得预期的成功,人们又提出了“曲率辐射”的概念。曲率辐射未获严格证明(其实是在我们推出同步-曲率辐射公式时才给出严格证明的),它只是与圆形运动的回旋辐射对比而得到,这就必须要求粒子一定束缚于磁力线上才能应用。但由于曲率辐射仍保持了幂律谱的特性,所以人们更加坚信了“幂律能谱电子一定辐射幂律谱”的观念。

在曲率辐射提出后, Goldreich, Cocke, Pocholczyk 等人就曾先后指出应考虑曲率辐射与同步辐射公式的光滑连接问题。确实,无论是同步辐射还是曲率辐射都是粒子在磁场中的辐射,其本质是一致的,它们的光滑连接,应该不成问题,但关键是如何连接?二十多年过去,并没有人能给出答案。但天体的磁场毕竟是非均匀的,为解释一些观测结果,其后人们又曾提出在一般磁场中电子的辐射可能由同步辐射和曲率辐射两种成分组

成的设想，但比例各占多少？无法确定。不过此时大家似乎还意识到非均匀磁场的辐射可能与均匀场有较大差异。

由于当时没有任何简单公式可用于计算非均匀场的电子辐射，再加上同步辐射和曲率辐射在天体物理应用上确实取得了重大成功，因此滥用的情况也逐渐发生，似乎磁场中电子的辐射如果不是曲率辐射就一定是同步辐射。一旦遇到弯曲磁场时，人们要么假定粒子会束缚于磁力线上产生曲率辐射，要么就想当然的认为可以看成平均的均匀场，直接用同步辐射计算。并没有深究这种做法什么时候才可运用，而“幂律能谱的电子一定辐射幂律谱”的观念，却成为人们的共识而深入人心。每当观测到磁场中的非热辐射谱不是幂律谱时，人们要么想像它们是由不同的辐射区发射，要么就在幂律谱的基础上加上一些其他机制，例如自吸收、辐射损耗、康普顿效应、重元素衰变以及热成分等来拟合观测结果。尤其是对近些年卫星观测到的，高频段谱指数比低频段谱指数更低的所谓高频过剩现象（如 X 射线或 γ 射线连续谱过剩），更是如此。人们如不怀疑观测结果，则会认为这是一种反常谱，而倍加重视。并发展了一整套增加其他机制的方法，来使同步辐射作为基础的计算与观测拟合。目前很多人已习惯于娴熟地应用这些方法去讨论问题。但这种做法，是否是天体物理状态的真实描述，是很值得怀疑的。因为通常要提高高频段的能量并非易事，往往要在幂律谱的基础上，增加两三种机制才有可能。机制越多，参数也越多。而且问题还在于，各类模型经过对一系列参数的调整，都可以足够好地拟合观测结果，似乎所有被加进的机制都可变成是主要的。因此，它们对真正理解 X-射线、 γ 射线过剩以及相应的现象又有多大帮助呢？！而且还可能会使已存在的问题更为复杂化。

本来同步辐射只适用于均匀磁场，这是大家都清楚的；而曲率辐射又要求带电粒子必须束缚在弯曲磁力线上运动，这又是一般情况无法办到的，这两种非常特殊情况下才能用的辐射公式又怎能用于任意磁场以及任意投射角的带电粒子呢？！在我们提出的同步-曲率 (Synchro-Curvature) 辐射机制里，同步辐射和曲率辐射的地位其实十分清楚。它们在我们导出的一套包括总功率、频谱、特征频率及偏振特性在内的统一公式中^[1~3]，只是适用于非常极端情况下的两组公式。我们的公式并非同步辐射和曲率辐射的简单相加，而是使同步辐射和曲率辐射光滑连接而且统一于一个整体。这两种辐射的全部结果都可以很自然地由统一公式给出。在我们推出的新公式中，辐射的特征频率为：

$$\omega_c = \frac{3}{2} \gamma^3 c Q_2$$

其中

$$Q_2 = \frac{1}{\rho} \left[\frac{r_B^3 + \rho r_B^2 - 3r_B \rho^2}{\rho r_B^2} \cos^4 \alpha + \frac{3\rho}{r_B} \cos^2 \alpha + \frac{\rho^2}{r_B^2} \sin^4 \alpha \right]^{1/2}$$

显然，当磁场曲率半径 $\rho \rightarrow \infty$ 时， $\omega_c = \frac{3}{2} \gamma^3 \omega_B \sin \alpha$ ，就给出同步辐射的特征频率；当 $\alpha = 0, r_B = 0$ 时 $\omega_c = \frac{3}{2} \gamma^3 \frac{c}{\rho}$ ，就是曲率辐射的特征频率。所以这两种辐射只是极端情况下的特例而已。同步-曲率辐射的频谱可表示为：

$$\frac{dP}{d\omega} = -\frac{\sqrt{3}e^2\gamma}{4\pi r_c} \frac{\omega}{\omega_c} \cdot \left\{ \left(\int_{\frac{\omega}{\omega_c}}^{\infty} K_{5/3}(y) dy - K_{2/3}\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \right) + \frac{[(r_B+\rho)\Omega_0^2+r_B\omega_B^2]^2}{c^4 Q_2^2} \left[\int_{\frac{\omega}{\omega_c}}^{\infty} K_{5/4}(y) dy + K_{2/3}\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \right] \right\}$$

其中 Ω_0 是引导中心沿磁力线的角速度, r_c 是粒子轨道的曲率半径。将频谱公式对圆频率 ω 积分, 我们就得到其辐射总功率

$$P = \frac{-3\sqrt{3}e^2\gamma^4 c Q_2}{8\pi r_c} \left[\left(1 + \frac{[(r_B+\rho)Q_0^2+r_B\omega_B^2]^2}{c^4 Q_2^2} \right) \Gamma\left(\frac{7}{3}\right) \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) + \left\{ \frac{[(r_B+\rho)Q_0^2+r_B\omega_B^2]^2}{c^4 Q_2^2} - 1 \right\} \Gamma\left(\frac{4}{3}\right) \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) \right]$$

上述公式, 在两个极端情况下, 就可自然得到同步辐射和曲率辐射的频谱和总功率。

我们的同步-曲率辐射公式使天体磁场的处理能更加精确^[4], 而且不管场强高低都能用, 并不像曲率辐射必须强度非常强才行。当然, 当辐射光子的特征频率 ω_c 增加到使 $h\omega_c$ 与相对论性粒子的能量可以比拟时, 量子效应会不断突出并变成不可忽略的重要因素。因此将同步-曲率辐射新机制进一步推广至量子情况是理论和应用都必需的。我们完成了这一新机制的量子化推广, 成功地建立了从经典到量子的比较完整的同步-曲率辐射理论体系^[5~7], 这就使这一新机制有了更坚实的基础。即使是最近观测到的磁星(其磁场可高达 10^{11}T 以上), 我们的公式也能用。

根据我们的同步-曲率辐射理论, 同步辐射及曲率辐射这两种只在极其特殊情况下才适用的公式, 其适用性也可适当放宽。其实同步辐射并不要求一定是均匀场, 而曲率辐射也并不一定要求粒子沿着磁力线运动, 而是要看投射角 α 、回旋半径 r_B 及磁场曲率半径 ρ 三者的关系而定。当 $\sin^2\alpha \gg r_B/\rho$ 时, 才可应用同步辐射公式, 这也就是将磁场看成平均均匀场应满足的条件; 而当 $\sin^2\alpha \ll r_B/\rho$ 时, 曲率辐射公式可应用。但是在更普遍的广大区域, 这两种辐射就都不能应用了, 而必须用我们新推出的同步-曲率辐射公式。该公式一般不受磁场强度大小和磁场弯曲程度的限制, 并且适用所有投射角, 是具有普适性的。如果乱用同步辐射公式就可能给出错误的结果。我们发现通常同步-曲率辐射的功率和特征频率都有可能比同步辐射高, 有时甚至可高达两、三个量级, 而且其偏振度仅是同步辐射的 $2/5$, 正好符合了很多射电源偏振度低的事实。尤其同步-曲率辐射的集体行为更与同步辐射不同, 例如其集体谱就有多种形式, 并非一定是幂律谱。我们从物理上及数学计算上做了大量的分析, 发现被广泛应用于天体物理研究中的“幂律能谱分布的相对论性电子一定发射幂律谱”的传统观念是错误的^[8]。这一结论其实只对同步辐射或曲率辐射才正确。如果磁场出现弯曲, 正确的公式就不是同步辐射公式, 而应该是我们提出的同步-曲率辐射公式。同步辐射公式所以会导致“幂律谱”的原因, 主要是由于其罗仑兹因子 γ 并不出现在单个电子的频谱公式中, 而只是隐含于特征频率 ω_c 内。但是同步-曲率辐射, 完全改变了这点, 在统一公式中, 不但 ω_c 与 γ 的关系变得复杂了, 而且 γ 还通过轨道曲率半径 r_c 直接出现于单电子的频谱公式中。这样一来, 即使是幂律分布的电子, 其集体谱一般也不一定是幂律谱, 而是不同斜率的幂律

谱的叠加。只有在其中一种谱起主要作用时，才可能表现为谱指数单一的幂律谱。

“幂律谱”结论的改变，其意义应该是十分深远的，因为这一结论已被天文学界普遍接受，并广泛应用于讨论各种各样的天体物理问题。然而，我们的结果清楚表明，幂律分布的电子其集体辐射谱并不一定是幂律谱，磁场的弯曲将改变谱的形状。过去被认为是“反常”的高能过剩并不反常，它们很可能是在弯曲磁场中同步-曲率辐射的自然结果^[9]。而且我们所给出的同步-曲率集体辐射谱公式，可以适用于任何以前在天体物理讨论中认为是以同步辐射或曲率辐射为主的源，例如：脉冲星、超新星遗迹、射电源、活动星系和活动星系核等等。相对于其它增加多种机制的处理而言，其描述的物理过程更清晰、合理，可调参数最少，数值计算也不复杂^[8,9]。我们认为如果辐射区磁场不是均匀的，即使还需要加其它的机制（如：逆康普顿效应等）也应以前同步-曲率辐射（而不是同步辐射）为基础进行，如果在纯粹的幂律谱上增加，给出的就可能不是正确描述。

参 考 文 献

- 1 Zhang J L, Cheng K S. *Phys. Letter A*, 1995, 208: 47
- 2 张家铝, 郑广生. *天文学报*, 1995, 36(4): 432
- 3 Cheng K S, Zhang J L. *Ap. J.*, 1996, 463: 271
- 4 Lieu R, Axford W I, Mckenzie J F. *Phys. Rev. E*, 1997, 55: 1872
- 5 袁业飞, 张家铝. *中国科学 (A 辑)*, 1997, 27(10): 954
- 6 Yuan Y F, Zhang J L. *Science in China A*, 1998, 41(1): 99
- 7 Zhang J L, Yuan Y F. *Ap. J.*, 1998, 493: 826
- 8 Zhang J L, Xia T S, Yang J M. *Phys. Letter A*, 2000, 275: 315
- 9 Xia T S, Zhang J L. *Astron. Astrophys.* 2001, 371: 93

Limitation of the Synchrotron Radiation

Zhang Jialu Yang Jianming

(Center for Astrophysics, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026)

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

Abstract

In recent years, owing to the great success of the synchrotron radiation in contemporary astrophysical research, the abusive use of synchrotron radiation has been emerged. In this paper, we show that the traditional idea, “electrons with a power-law energy distribution certainly yield a power-law radiation spectrum”, should be changed. If the magnetic field of radiation region is not flat and straight, the synchro-curvature radiation, instead of the synchrotron radiation, should be used to get a real description. In a curved magnetic field, the resulting spectrum of electrons could obviously distinct from a power-law one. This means that the way of only adding many other mechanisms to a pure power-law spectrum to get the expected spectrum might not be reasonable.

Key words synchrotron radiation—curved magnetic field—synchro-curvature mechanism