

星系核和类星体的反物质模型

陆 焱

(南京电讯仪器厂)

罗 辽 复

(内蒙古大学)

曲 钦 岳

汪 珍 如

(南京大学天文系)

星系核和类星体具有许多特殊性质,是目前天体物理领域的一个重要课题。活动星系核和类星体的辐射功率很大,其光辐射可达 10^{46} — 10^{47} 尔格/秒。这种天体的射电和光学的辐射大多有不规则的变光现象,有一年量级的长期变化,还往往含有时标很短的成分,比如一星期或一天量级,甚至还有短到小时量级的。这种变光现象表明星系核和类星体的核心是空间线度很小的天体。一般认为星系核或类星体的质量约为 10^8 — $10^9 M_\odot$,而半径约为 10^{15} — 10^{16} 厘米。体积之小与功率之大就构成一个突出的矛盾,其实质是能源问题。

目前在理论上,对星系核和类星体还很少了解。虽然曾提出过一些理论模型,却仍各有各的困难。广为流行的磁转子模型,其最大弱点是无法解释为什么没有观测到周期变光。恒星碰撞模型要求星系核内恒星的空間密度太高,而且大量释放能量的时标太短。也有人设想星系核和类星体内包含正、反两种物质,借助湮灭机制释放能量。这种模型的最大困难有二:(1)湮灭过速,不能稳定;(2)高能 γ 辐射过强。

本文提出一个新的模型,假定星系核和类星体的核心单纯由反物质(即反质子和正电子)构成。在吸积正物质过程中,就会在其表面附近发生湮灭,而抛射出大量高能粒子。高能电子在强磁场中产生同步加速辐射,提供光学辐射能源。由于星系核和类星体的射电辐射与光学辐射有显著不同的变光特性,而远红外的辐射又特强,可以认为射电辐射和远红外辐射除了湮灭起源外,可能还有别

的机制的贡献,因此本文模型主要讨论和解释光学辐射(包括紫外和近红外)。

反物质星系核吸积正物质引起的主要是低能 $p - \bar{p}$ 湮灭过程:

$$p + \bar{p} \rightarrow n\pi, \\ \left\{ \begin{array}{l} \pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix}, \quad \mu^\pm \rightarrow e^\pm + \begin{pmatrix} \nu_e \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{\nu}_\mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \\ \pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma. \end{array} \right.$$

因此,湮灭的最终产物为 γ , $e^\pm$ 和 ν , 其能量近似地按如下分配^[1]

$$\gamma \left(\sim \frac{2}{3} M_p c^2 \right), \quad e^\pm \left(\sim \frac{1}{3} M_p c^2 \right), \\ \nu \left(\sim M_p c^2 \right), \quad (1)$$

M_p 为质子质量。一个 γ 光子的平均能量约为 180 MeV; 一个正、负电子的平均能量 $\bar{e}$ 约为 90 MeV。本文将基于这种湮灭过程,计算星系核和类星体的各种特性。现将所得结果逐点分述如下。

1. 表面磁场

能量为 E 的高能电子在垂直磁场 $H_\perp$ 中产生的同步辐射形成一个谱,为简单计,可用峰值频率

$$\nu = a H_\perp E^2 \quad (a = 0.07 e / m^3 c^5) \quad (2)$$

的单色谱来近似描述。为能产生光频,比如 $\lambda = c/\nu = 4400 \text{ \AA}$, 取 $E \sim 90 \text{ MeV}$, 则要求磁场 $H_\perp \sim 1.8 \times 10^4$ 高斯。这样强的磁场是可能的^[2]。

2. 变光特性

电子经同步辐射而逐渐损失能量,其能量 E 降至 $E/2$ 所需的时间为^[3]:

本文 1977 年 5 月 16 日收到。

$$T_{1/2} = \frac{5.1 \times 10^8}{H_1^2} \left(\frac{mc^2}{E} \right) \text{秒}. \quad (3)$$

对于 $E \sim \bar{\epsilon}$, $H_1 \sim 1.8 \times 10^4$ 高斯, 有 $T_{1/2} \sim 9$ 毫秒. 可见在这样强的磁场中, 湮灭放出的高能电子几乎瞬时地(因而也是局域地)将其能量转化为光辐射. 就是说, 变光特性将直接决定于湮灭率的变化和湮灭区的尺度. 由于星系核和类星体核心的尺度很小, 短时标的变光是可以解释的. 对于特别短的变光时标, 比如 APLib 在 20 分钟内变化 0.35, 可能意味着吸积有明显的局部非均匀性. 这种局部非均匀吸积也有利于解释偏振的变化, 因为不同地点有不同的磁场结构.

3. 光谱特性

一个能量为 E 的电子对于 ν 处单位频率间隔内的同步辐射所贡献的能量为:

$$\frac{dE}{d\nu} = \frac{1}{2\sqrt{aH_1\nu}}. \quad (4)$$

记 t 时刻单位时间间隔内, 由于湮灭而抛射出的电子数为 $N(t)$, 记其能谱密度为 $f(\epsilon)$, 注意到 $\epsilon > E = \sqrt{\nu/aH_1}$ 的所有电子迟早均会产生 ν 处的同步辐射, 因此这些电子对于 ν 处的总贡献为:

$$L(\nu) = \frac{N(t)}{2\sqrt{aH_1}} \nu^{-0.5} \int_{\sqrt{\nu/aH_1}}^{\infty} f(\epsilon) d\epsilon. \quad (5)$$

由此可知, 在低频段 ($\nu \ll aH_1\bar{\epsilon}^2$), 积分

$$g(\nu) = \int_{\sqrt{\nu/aH_1}}^{\infty} f(\epsilon) d\epsilon \approx 1,$$

辐射谱将取

$$L(\nu) \sim \nu^{-0.5} \quad (6)$$

形式. 随着 ν 的增大, 积分 $g(\nu)$ 逐渐变小, 谱形变陡, 可唯象地取为:

$$L(\nu) \sim \nu^{-\alpha} \quad (\alpha > 0.5). \quad (7)$$

当 $\epsilon \gtrsim 30 \text{ MeV}$, 有 $f(\epsilon) \sim \epsilon^{-m}$, $m \sim 1-2^{(4)}$, 此时

$$\alpha \approx -m/2.$$

这种谱形与观测事实基本一致.

4. 吸积湮灭层

光学辐射光子在星系核或类星体核心内

运动时, 主要将发生与 e^+ 之间的 Thomson 散射, 其截面 $\sigma_T = 6.65 \times 10^{-25} \text{ 厘米}^2$. γ 光子则主要是与 e^+ 间的 Compton 散射以及与 $\bar{p}$ 间的电子对形成过程, 两种过程的总截面(对于 180 MeV γ 光子) $\sigma_\gamma \approx \sigma_T/40$. 取吸积质子的运动温度以及星系核表面处的温度 $\sim 10^{10} \text{ K}$, 相应的 $p + \bar{p} \rightarrow p + \bar{p}$ 大角散射截面 σ_R 相当大, $\sigma_R \gg (\sigma_T, \sigma_\gamma)$. 吸积质子将与反质子频繁地进行弹性散射, 最终在远小于光辐射和 γ 光子自由程的极薄的表面层内发生湮灭, 因而光辐射和 γ 光子在星系核和类星体核心内的自吸收可以忽略不计. 按 (1) 式, 可以建立 γ 光子(数)强度 L_γ (光子数/秒) 与 $e^\pm$ (能量) 强度 $L_{e^\pm}$ (尔格/秒) 间的关系, 而 $e^\pm$ 能量又几乎全部地、局域地转化为光辐射, 因而有

$$L_\gamma \sim \frac{2}{3} \times 10^4 L_{e^\pm} \approx \frac{2}{3} \times 10^4 \int L(\nu) d\nu, \quad (8)$$

$L(\nu)$ 为光辐射谱强度.

5. 辐射功率与寿命

在本文模型中, 辐射是由吸积引起的, 辐射功率存在 Eddington 极限^[5]

$$L_{\max} = 1.3 \times 10^{38} (M/M_\odot) \text{ 尔格/秒}. \quad (9)$$

对于星系核和类星体核心, $M \sim 10^8 - 10^9 M_\odot$, 因此 $L_{\max} \sim 10^{46} - 10^{47}$ 尔格/秒, 与观测事实一致. 根据 (9) 式, 并考虑到 (1) 式, 可以求得最大吸积率, 从而估算得星系核和类星体的寿命

$$\tau \gtrsim M \{dM/dt\}_{\max}^{-1} \sim 10^8 \text{ 年}. \quad (10)$$

6. γ 光子的辐射流量

除了个别例外, 星系核和类星体的视星等暗于 16^m. 以 16^m 为例, 红移的影响可以忽略, 这时 (8) 式可表示为如下的流量形式:

$$f_\gamma \approx \frac{2}{3} \times 10^4 \int_{\nu_1}^{\nu_2} S(\nu) d\nu \quad (11)$$

$$(\nu_1 \sim 10^7 \text{ Hz}, \nu_2 \sim aH_1\bar{\epsilon}_0^2, \bar{\epsilon}_0 \sim 300 \text{ MeV}).$$

取 (7) 式谱形, 取 $\alpha \sim 0.7$, 按照相星等 16^m 计算, 可得

[下转 535 页]