

活动星系核的X射线流

房 颐¹ 宋 峰²

(1. 南京师范大学附属中学 210003; 2. 南开大学物理科学学院 300071)

题目正文

介绍:活动星系核(Active Galactic Nuclei, AGN)是形成星系中心的超大质量黑洞,通过辐射和喷射粒子流来释放大量的能量。大多数AGN的特点之一是向外喷射物质,这些物质的辐射可以在无线电波波段中观察到,有时也可以在电磁波谱的其他波段,包括X射线波段中观察到。这些喷射物是大量的等离子体流(喷流),它们以相对论速度运动,长度为 10^{20} 米的量级,即约数万光年。喷流辐射出的X射线通常以同步辐射为主,这些同步辐射是相对论性电子在喷流的磁场中作回旋运动产生的。

A部分:喷流的一维流体模型

喷流可以近似认为是从AGN中心直接稳恒地发射出来的,因此,我们可以建立一个简单的一维模型来描述喷流,并且认为喷流中的等离子体和周

围环境保持压强平衡。假设处在生命周期中的星体会失去外层物质,并在单位时间内向单位体积的喷流提供恒定的质量。

喷流可以用以下参量来描述:喷流与星系核之间的距离 s ,喷流所形成的圆锥底面半径 r 。这些距离我们以秒差距(pc)为单位来描述, $1\text{pc} = 3.086 \times 10^{16} \text{m}$ 。假设喷流的速度方向沿着以星系核为中心的径向向外,速度的大小可以认为是只与 s 有关的函数。喷流中的等离子体由电子、质子和一些较重的电离核组成。在以大流量的喷射物参考系(喷流参考系)中,每个粒子所携带的平均能量为: $\varepsilon'_{av} = \mu_{pp}c^2 + h$ ^①,其中 h 包括了所有热力学能量,可以用压强 p 来表示, μ_{pp} 为粒子平均质量。

当喷流从恒星旁边经过时,恒星会失去一部分大气,这会导致单位体积的喷流在单位时间内增加的质量为 α ,新加入的平均粒子质量为 μ_{pp} 。这些新加入的粒子可被认为是相对于AGN参考系静止的。

以上模型可以被应用于半人马座-A的喷射行为。半人马座-A是离我们最近的活动星系核之一,所以我们可以更高的分辨率下来观察喷流的运动。喷流能量传输的总功率可估计为 $P_j = 1 \times 10^{36} \text{J/s}$ 。图2为半人马座-A的喷流的简单几何示意图。 s_1 是喷流的起始坐标, s_2 是喷流的终点坐标。半人马座-A的粒子平均质量为 $\mu_{pp} = 0.59 m_p$, $h = 13p/4n'$, n' 是喷流参考系中等离子体中的粒子数密度。环绕喷流的等离子体的压强为 $p(s) = 5.7 \times 10^{-12} (s/s_0)^{-1.5} \text{Pa}$,其中 $s_0 = 1 \text{kpc}$ 。

喷流可由以下参量描述,这些参量都是对应物质到AGN距离 s 的函数:

- AGN参考系中喷流的开口半径 $r(s)$
- AGN参考系中喷流的横截面面积 $A(s)$

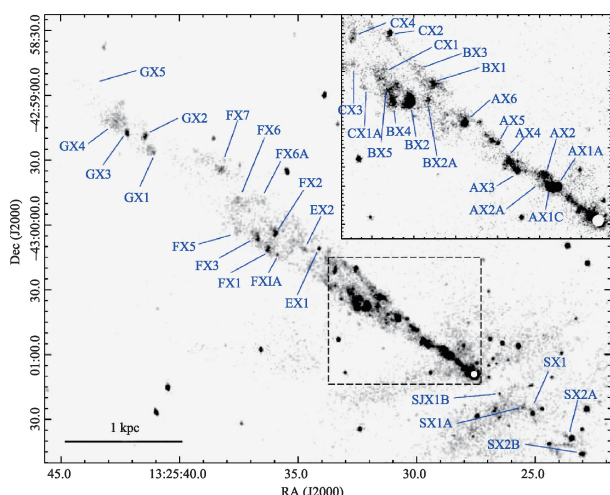


图1 半人马座A星系核喷流的X射线图像。较暗的区域代表高强度X射线的区域。较暗的喷流中较亮的区域称为结(Snios等, 2019年)

- AGN 参考系中喷流的喷射速度 $v(s)$
- AGN 参考系中喷流的洛伦兹因子 $\gamma(s)$
- 喷流参考系中的粒子数密度 $n'(s)$ ②

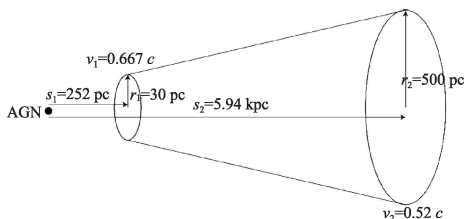


图2 半人马座喷流与活动星系核(AGN)相比的几何结构

在回答 A.1~4 问题时,答案可以用以上所有物理量表示。

A.1 写出在 AGN 系中的粒子数密度表达式 $n(s)$, 用喷流参考系中的固有粒子数密度 $n'(s)$ 以及其他和喷流有关的参量表达。固有粒子数密度是指在与喷流局域共动的参考系(即喷流参考系)中的粒子数密度。

A.2 写出与 AGN 相距 s 处面积为 A 的横截面上的粒子通量 $F_p(s)$ 。

A.3 用 s_1 、 s_2 处的相关参量和喷流总体积 V 等来描述流入和流出喷流的粒子通量的连续性关系。

A.4 用 s_1 、 s_2 处的喷流速度、穿过横截面的固有粒子数密度, 喷流总体积 V 以及其他所需的和喷流有关的参量来描述流入和流出喷流的能量通量的连续性关系。

喷流能量传输的功率定义为:

$$P_j(s) = F_E(s) - \dot{M}c^2,$$

其中, $F_E(s)$ 为通过距离 AGN 为 s 处的横截面的能量通量, $\dot{M} = F_p(s)\mu_{pp}$ 为通过距 AGN 的距离为 s 的横截面的质量通量。

A.5 根据前面部分的结果计算 $dP_j(s)/ds$ 。

A.6 计算出位于 s_1 处流入喷流的质量通量 $\dot{M}_1$ 和 s_2 处流出喷流的质量通量 $\dot{M}_2$ 的数值。

A.7 求出通过喷流的总动量通量 Π 的表达式, 并计算出其数值。

A.8 计算出半人马座-A 喷流因为的外部压强而受到的压力的合力 F_{pr} 的数值。

A.9 写出 Π 和 F_{pr} 之间的预期关系式, 本小题中计算得到的 Π 与 A.7 中算得的 Π 的百分比差值是多少?

B 部分: 极端相对论性的电子气

认为极端相对论性的电子气(洛伦兹因子 $\gamma \gg 1$) 是速率各向同性分布的(速率分布与方向无关)。能量位于 ε 到 $\varepsilon + d\varepsilon$ 之间的粒子数密度为 $f(\varepsilon)d\varepsilon$, 其中 ε 为每个粒子所含能量。考虑和电子气相接触的面积为 ΔA 的一面墙壁, 回答下列问题。

B.1 求出单位体积电子气总能量的积分表达式。

B.2 求出总的动量变化率大小 $\Delta p_z / \Delta t$ 的表达式, 这里动量的变化是由于电子气和墙壁碰撞导致的, z 方向是墙壁的法线方向。

B.3 求出极端相对论性的电子气的压强、体积和总内能之间的状态方程。

B.4 求出极端相对论性的电子气的压强、体积在绝热膨胀过程中所满足的方程。

C 部分: 同步辐射

在 AGN 的喷流中, 有大量高能电子处在强磁场中, 这就形成了产生同步辐射的条件。由于电子的能量通常极大, 它们具有极端相对论性, 即 $\gamma \gg 1$ 。

C.1 一个洛伦兹因子为 γ 且速度方向和磁场磁感应强度 B 的夹角为 ϕ 的电子的角速度为 Ω , 求出 Ω 的表达式。已知电子静质量为 m 。

由于磁场的存在, 一个加速的电子会产生电磁辐射。在相对于电子瞬时静止的参考系中, 电子向前后两方向释放的电磁辐射是相同的, 一半向前方发射, 一半向后方发射。然而, 在观察者参照系中, 一个 $\gamma \gg 1$ 的极端相对论性的电子产生的辐射会聚集在一个向前 $\theta \leq 1/\gamma$ 的圆锥内(所以总锥角为 $2/\gamma$)。由于电子在磁场中旋转, 观察者只能在向前的小圆锥扫过视线时才能以脉冲形式接收到电磁辐射。

C.2 求洛伦兹因子为 γ , 运动方向与磁场夹角为 ϕ 的电子, 被观察者观测到的同步辐射脉冲的时间间隔 Δt_a 。

C.3 由上一问估算同步辐射的特征频率 ν_{chro} 。

已知同步辐射的总功率为: $P_s = \frac{1}{6\pi\epsilon_0}$

$$\left(\frac{q^4 B^2 \sin^2 \phi}{m^4 c^5} \right) E^2。$$

C.4 估算一个能量为 E 的电子在同步辐射中失

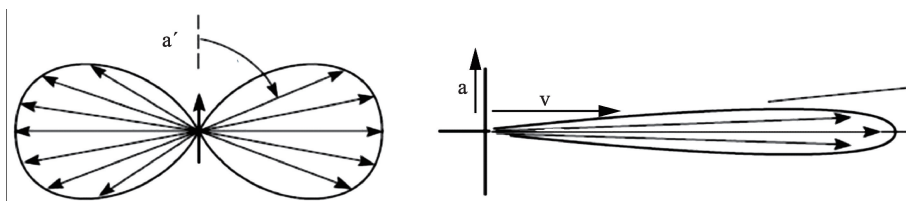


图3 左图显示了向上加速的电子在电子瞬时静止参考系中辐射功率的分布。右图显示了同样的电子在观察者参考系中的辐射功率分布,在这个参考系中,大部分辐射都集中在向前的锥角内。在观察者参考系中,电子的加速方向由 a 矢量方向表示,其速度方向由 v 矢量方向表示

去能量所需要的时间 τ 。

D部分: AGN喷流的同步辐射

AGN喷流中电子的能量分布是: $f(\epsilon) = \kappa \epsilon^{-p}$, 其中 $f(\epsilon)d\epsilon$ 是能量在 ϵ 到 $\epsilon+d\epsilon$ 间的粒子数密度。同步辐射的相应光谱取决于电子能量分布,而不是由单个电子的光谱决定。相关光谱满足:

$$j(\nu)d\nu \propto B^{(1+p)/2} \nu^{(1-p)/2} d\nu。$$

其中 $j(\nu)d\nu$ 是单位体积内以光子形式辐射的且光子频率介于 ν 到 $\nu+d\nu$ 之间的总能量。对半人马座-A和其他星系核的喷流观测后发现,其各处辐射呈现复杂的结构,其中集中明亮的辐射区域称为结(knots)。对这些结在不同时间的观测表明,某些结的运动和亮度都随着时间发生了变化。结的亮度的降低可以归因于两种机制:结中的电子气的绝热膨胀和结中电子气里的电子同步辐射冷却。

假设喷流中等离子体内的磁场是冻结的,即任意体积的等离子体,即使等离子体的形状和体积发生变化,通过其表面边界的磁通量也必须保持恒定。

D.1 对于一个球形结,体积向各个方向均匀地从 V_0 膨胀到 V ,初始时结内的匀强磁场磁感应强度大小为 B_0 ,求膨胀过后球形结内的磁场磁感应强度 B 的大小。

D.2 求球形结绝热膨胀到体积 V 时的电子能量密度分布 $f(\epsilon)$ 。已知初始时,球形结体积为 V_0 ,电子能量密度分布为 $f_0(\epsilon) = \kappa_0 \epsilon^{-p}$,其中 $f_0(\epsilon)d\epsilon$ 是能量在 ϵ 到 $\epsilon+d\epsilon$ 之间的粒子数密度。

D.3 求同步辐射冷却对电子分布的影响。即经过一段时间的同步辐射冷却后,以 ϵ 为自变量的电子能量分布函数是变陡峭、平缓还是不变。通过考虑电子

能量处于 $\epsilon_1, \epsilon_2 (\epsilon_1 < \epsilon_2)$ 状态时,结合方程论证你的答案。

表1是对半人马星座-A(Cen A)和M87这两个AGN喷流的结(亮区)的部分观测结果。

D.4 根据表1中的数据,在表2中找出各个结的亮度降低的最可能的原因,并指出前文中支持你结论的问题的题号。

表1

AGN	观测时间间隔	结	X射线的亮度变化	X射线的频谱变化	其他频谱区域(如紫外线、可见光)的亮度变化
CenA	15年	AX1C	-23%	无变化	无数据
CenA	15年	BX2	-15%	无变化	无数据
M87	5年	HST-1	-73%	无数据	无变化
M87	5年	KnotA	-12%	无数据	无变化

表2

AGN	结	亮度降低的可能原因	支持你的结论的问题题号
CenA	AX1C	☐ 同步辐射冷却 ☐ 绝热膨胀 ☐ 两者都不是	
CenA	BX2	☐ 同步辐射冷却 ☐ 绝热膨胀 ☐ 两者都不是	
M87	HST-1	☐ 同步辐射冷却 ☐ 绝热膨胀 ☐ 两者都不是	
M87	KnotA	☐ 同步辐射冷却 ☐ 绝热膨胀 ☐ 两者都不是	

注:

① 为了形式统一,此处喷流系中粒子能量的表达式对原文做了调整,改写为 ϵ'_{av}

② 为了形式统一,此处喷流系中粒子数密度对原文做了调整,改写为 n' 。问题A.1中AGN系中粒子数密度的表达式对原文做了调整,改写为 n 。

(2019年亚洲物理奥林匹克竞赛理论第二题)