



源自活跃星系核的 X 射线喷射

简介

活跃的星系核 (AGN) 是超大质量黑洞, 形成星系的中心, 通过辐射光和粒子流来发射大量的能量。许多 AGN 的一个特征是喷射出喷射流, 喷射流可以通过测量无线电波段的辐射来观察, 有时也可以在电磁波谱的其他波段中观察到, 包括 X 射线。这些喷射流是大流量的等离子体, 以相对论速度运动, 长度为 10^{20} m, 即数万光年。喷射流发出的 X 射线主要源自同步辐射, 这种同步辐射是由以相对论速度运动的电子, 绕着喷射流的磁场回旋造成的。

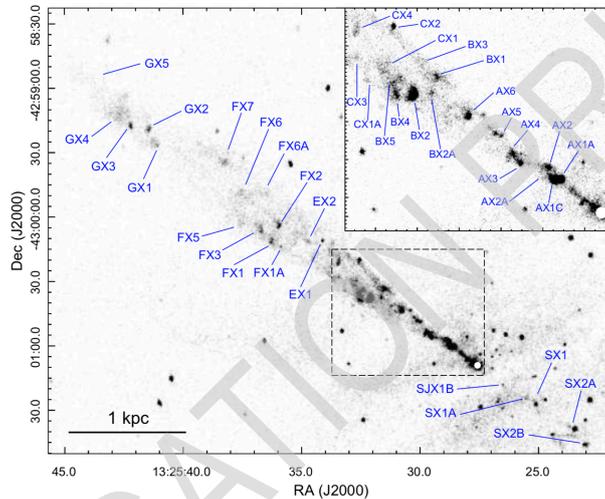


图 1: 来自人马座 A AGN 的 X-射线图像。深色区域代表更高强度的 x-射线; 在较弱的喷射流背景中的较亮的区域被称为结 (Snios et al., 2019)

A 部分: 1D 喷射流的流体模型

喷射流的简单模型假定流动是稳定的并且沿径向远离位于中心的活跃星系核 (AGN), 因而近似为一维, 并且喷射流中的等离子体与周围环境处于压强平衡。

喷射流的坐标用距离中心 AGN 的距离 s , 和锥形的开口半径 r 来表示 (参见图 2)。这些距离以 parsecs 为单位, $1 \text{ pc} = 3.086 \times 10^{16} \text{ m}$ 。假设喷射流的速度沿径向远离中心的 AGN, 并且只是 s 的函数。喷射流中的等离子体由电子, 质子和一些较重的电离的核组成。每个粒子携带的平均能量, 在喷射流参照系中, 是 $\epsilon_{\text{av}} = \mu_{\text{pp}} c^2 + h$, 其中 h 是包括所有热动能和势能的项, 将用压强 P 和等离子体数密度 n 来表示。

当喷射流流经恒星们, 恒星们会失去部分大气层, 导致质量注入进喷射流。假定单位时间单位体积注入进喷射流的质量是恒定的, 用 α 表示, 且假设注入的粒子相对于 AGN 静止。

这个模型被用于人马座 A 的喷射流。人马座 A 是离我们最近的 AGN 之一, 因此可以有较高的空间分辨率来观察其喷射流。喷射流携带的总功率估计为 $P_j = 1 \times 10^{36} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$ 。下图描绘了人马座 A 喷射流的几何形状, 包含了测量到的喷射流的具体参数。 s_1 是喷射流的起始坐标, s_2 是喷射流的终止坐标。在人马座 A 中每个粒子的平均质量是 $\mu_{\text{pp}} = 0.59 m_p$ 并且前述粒子平均能量中的 $h = \frac{13}{4} P/n$ 。在喷射流周围等离子体的压强 $P(s) = 5.7 \times 10^{-12} \left(\frac{s}{s_0}\right)^{-1.5} \text{ Pa}$, 其中 $s_0 = 1 \text{ kpc}$ 。

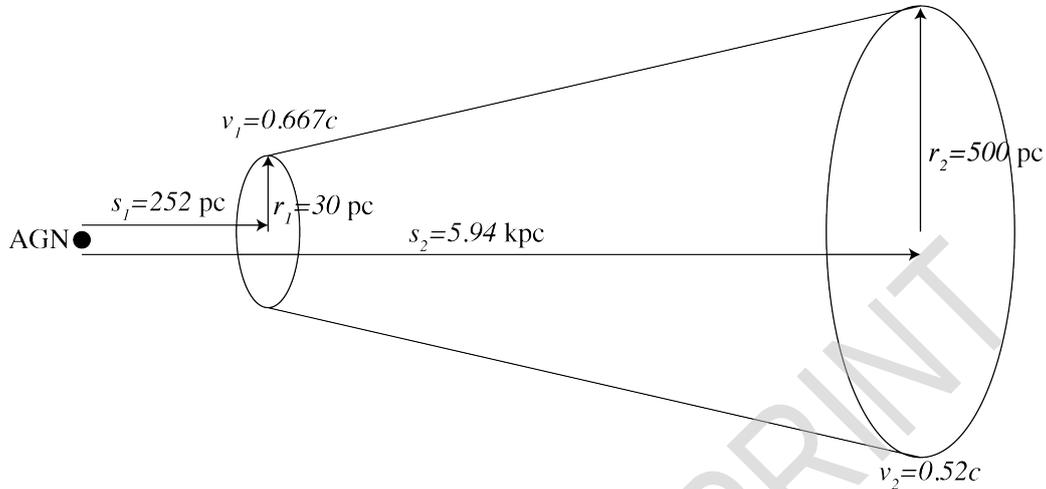


图 2: 人马座 A 喷射流, 显示的是其相对于活动星系核 (AGN) 的几何形状。

喷射流由以下喷射流参数描述, 所有这些参数都取决于到 AGN 的距离 s :

- 在 AGN 参照系中 (AGN 系) 喷射流锥形的开口半径 $r(s)$
- 在 AGN 系, 喷射流的横截面积 $A(s)$
- 在 AGN 系, 喷射流的速率 $v(s)$
- 在 AGN 系, 喷射流的洛伦兹伽玛因子 $\gamma(s)$
- 在喷射流系中, 粒子的数密度 $n(s)$

上述这些参数可能被用于你对问题 A1-4 的回答。

A.1 表达出在 AGN 参考系中粒子的数密度 $n'(s)$, 用恰当数密度, $n(s)$ 和上列的其它喷射流参数来表示。恰当数密度是指与喷射流同速运动的参照系中粒子数密度, 该参照系我们简称为喷射流系。 0.3pt

A.2 表达出粒子流在距离 AGN 中心 s , 截面积为 A 处流过的通量 (单位时间流过给定截面的粒子数) $F_p(s)$ 。 0.2pt

A.3 写出粒子流入流出喷射流的连续性关系式, 用在 s_1 和 s_2 处的喷射流参数, 以及人马座喷射流的总体积 V 和其它必要的参数来表示。 0.5pt

A.4 写出流入和流出喷射流的能量通量间的关系式, 用在 s_1 和 s_2 处的喷射流速度, 截面积, 恰当数密度; 以及总体积 V 和其它必要的人马座 A 喷射流参数来表示。 0.6pt

喷射流所带的功率被定义为整体动能能流和热能能流的总和, 因此

$$P_j(s) = F_E(s) - \dot{M}c^2 \quad (1)$$

其中 $F_E(s)$ 是在 s 处流过横截面的能量通量, \dot{M} 是在相同距离 s 通过横截面的质量通量。



A.5	利用你在前面的部分的答案，表达出 $\frac{dP_1}{ds}$.	0.6pt
A.6	计算在 s_1 处流入人马座 A 喷射流的质量流量 \dot{M}_1 ；和在 s_2 处流出的质量流量 \dot{M}_2 。	0.4pt
A.7	给出通过人马座 A 喷射流的总动量流量 Π 的表达式，并进行数值计算。	0.5pt
A.8	计算出外界压强作用在人马座 A 喷射流上的总的力 F_{Pr} 。	0.5pt
A.9	写出期望的 Π 和 F_{Pr} 间的关系；并计算你在 A7 中算出的模型值 Π 与期望值之间的百分比差。	0.2pt

B 部分：超相对论电子的气体

考虑一种超相对论电子气体 ($\gamma \gg 1$)，具有各向同性的速度分布（不依赖于方向）。能量在 ϵ 和 $\epsilon + d\epsilon$ 之间的恰当粒子数密度用 $f(\epsilon)d\epsilon$ 表示，其中 ϵ 是每个粒子的能量。还考虑壁上与气体接触的一段面积 ΔA 。

B.1	写出每单位体积电子气体总能量的表达式。	0.2pt
B.2	写出由于与壁的碰撞引起的气体动量沿 z 方向的总变化率 $\Delta p_z / \Delta t$ 的关系式， z 方向垂直于墙壁。	0.8pt
B.3	导出超相对论电子气的状态方程，即，将压强，体积和总内能联系起来。	0.6pt
B.4	导出经历绝热膨胀的超相对论电子气的压强和体积之间的关系。	0.6pt

C 部分：同步辐射

在 AGN 的喷射流中，在强磁场区域有高能电子群。这为同步辐射的高通量发射创造了条件。这些电子通常是非常高能的，以至于可以描述为超相对论情形 $\gamma \gg 1$ 。

C.1	写出 Ω 的表达式，即给出电子的回旋角频率，用洛伦兹因子 γ 及电子行进方向和磁场 B 之间的角度 ϕ 表示。	0.7pt
------------	--	-------

当电子由于磁场而加速时，它会发射电磁辐射。在电子瞬间静止的参考系，没有优势的辐射发射方向。一半向前发射，一半向后发射。然而，在观察者的参考系，电子运动速度 $\gamma \gg 1$ ，辐射集中在 $\theta \lesssim 1/\gamma$ 前向锥形（因此锥体的总角度为 $2/\gamma$ ）。当电子绕磁场旋转时，任何观察者只能看到前向锥体扫过视线时的辐射脉冲。

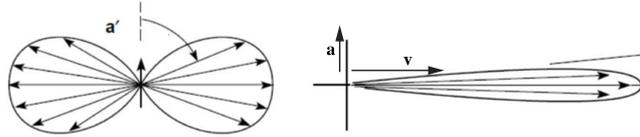


图 3: 左图显示了, 在电子瞬间静止的参考系, 页面中的电子向上加速时, 电子辐射功率的分布。右图显示了, 在观察者参考系同一电子的辐射功率分布, 其中大部分辐射向前锥形发射。在观察者系中, 加速度用矢量 \mathbf{a} , 速度用矢量 \mathbf{v} 来表示

C.2 某个电子以洛伦兹因子 γ , 与磁场 B 成角度 ϕ 运动, 写出它发出的同步辐射脉冲的持续时间 Δt 的表达式。 0.5pt

C.3 由此, 估计同步辐射的特征频率 ν_{chr} 。 0.3pt

发出的同步辐射总功率是

$$P_s = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \left(\frac{q^4 B^2 \sin^2 \phi}{m^4 c^5} \right) E^2 \quad (2)$$

C.4 估计能量 E 的电子通过同步辐射冷却失去能量的时间 τ 。 0.2pt

D 部分: AGN 喷射流的同步辐射

AGN 喷射流中的电子能谱通常遵循幂律, 其形式为 $f(\epsilon) = \kappa \epsilon^{-p}$, 其中 $f(\epsilon)d\epsilon$ 是能量在 ϵ 和 $\epsilon + d\epsilon$ 之间的粒子数密度。相应的同步辐射光谱取决于电子能谱, 而不是单个电子的辐射能谱。这个光谱是

$$j(\nu)d\nu \propto B^{(1+p)/2} \nu^{(1-p)/2} d\nu \quad (3)$$

这里 $j(\nu)d\nu$ 是频率在 ν 和 $\nu + d\nu$ 之间的每单位体积光子的能量。

对人马座 A 喷射流, 以及其他喷射流的观察, 显示出多结的结构, 这些紧致的更加明亮的发射区域叫结。在不同时间对这些结的观察已经显示出一些结的运动和亮度变化。亮度降低的两种可能机制是结中气体的绝热膨胀, 以及结中气体中电子的同步辐射冷却。

假设磁场被冻结在喷射流中的等离子体中。考虑任意体积的等离子体, 即使包含等离子体的体积改变形状和尺寸, 通过界定体积的表面的磁通量必须保持恒定。

D.1 一个球形的结, 均匀地向各个方向膨胀, 从体积 V_0 变化到 V , 其内最初的均匀磁场 B_0 。求出在膨胀了的结中的磁场 B 。 0.4pt

D.2 写出球形的结因其体积绝热膨胀到 V 时对电子能量密度 $f(\epsilon)$ 的影响, 已知体积 V_0 的结具有初始的电子分布 $f_0(\epsilon) = \kappa_0 \epsilon^{-p}$ 其中是 $f_0(\epsilon)d\epsilon$ 能量在 ϵ 和 $\epsilon + d\epsilon$ 之间的电子数密度。 1.0pt

D.3 同步辐射冷却如何影响电子的分布? 经过一段时间的同步辐射冷却, 电子能量的分布作为 ϵ 的函数会更陡峭, 更浅或保持不变? 考虑两个电子能量 $\epsilon_1 < \epsilon_2$ 下的情况, 用关系式支持你的回答。 0.3pt



下表总结了来自两个 AGN，人马座 A (Cen A) 和 M87 的喷射流中的结（较明亮区域）的一些观测结果。

AGN	观测之间的时间	结	X 射线的亮度变化	X 射线的光谱变化	其他频段的亮度变化 (例如 UV, 可见光)
Cen A	15 years	AX1C	-23%	No change	No data
Cen A	15 years	BX2	-15%	No change	No data
M87	5 years	HST-1	-73%	No data	No change
M87	5 years	Knot A	-12%	No data	No change

(Data from Snios et al., 2019a; 2019b.)

D.4 在答题纸中的表格，找出导致每个结亮度减少的更可能的原因，并确定之前哪个或哪些部分支持你的结论。 0.6pt