

银河和河外 γ 射线辐射

钟建霞

(中国科学院北京天文台)

提 要

本文系统地评述了 γ 射线天文学的发展历史和研究现状,分析介绍了银河 γ 射线辐射,河外 γ 射线辐射和分立源的 γ 射线辐射。

引 言

γ 射线天文学是60年代后期发展起来的一门新兴学科,它研究来自银河以及银河以外的高能电磁辐射。

早在50年代,理论工作者便计算了各种由高能相互作用过程产生的 γ 光子流量。但由于高能探测器在制造上存在许多技术困难,第一次成功探测到银河 γ 光子是在60年代末期。从那以后,相继发射了许多探测气球和卫星,尤其在60年代,SAS-II和COS-B两颗卫星的发射,使得 γ 射线天文学得到了突飞猛进的发展。人们曾对观测数据进行过详细的分析,其结果不但表明银河 γ 射线的大尺度分布和银河系的物质分布之间存在密切相关性,而且还表明存在一批 γ 射线分立源,这些分立源有属于银河系的,也有银河系以外的天体。这些辐射 γ 射线的天体,其辐射能量主要集中在 γ 射线波段。然而,现有理论框架无法解释这类天体的辐射机制,这便大大促进了对 γ 射线源的结构以及辐射机制的理论研究。另外,研究银河 γ 射线的大尺度分布结构,对于研究银河物质分布、宇宙线起源与分布等问题具有重要意义。

本文主要评述SAS-II和COS-B两颗卫星的观测与分析结果。

一、银河 γ 射线弥漫辐射

最早观测到银河 γ 辐射是在1968年,由OSO-3卫星观测到的。它第一次探测到了银河 γ 射线分布的非对称结构,不过,它总共只探测到621个 γ 光子($\geq 100\text{MeV}$)^[1]。1972年发射了SAS-II卫星,因为它采用了火花室探测装置,灵敏度和分辨率都大为改观。遗憾的是由于电子故障,它的飞行时间只有七个月。分析SAS-II所探测的800个 γ 光子($\geq 35\text{MeV}$),得到了与银河大尺度相关的 γ 射线银盘结构^[2]。1975年发射了COS-B卫星,它的装置与性能同SAS-II相似。COS-B的运行时间达6年半之久,它所采集的 γ 光子数是SAS-II的25倍,统计意义大为提高。分析COS-B观测数据,进一步表明了银河 γ 射线分布与银河物

质分布的相关性。这种相关尺度存在于几十个 kpc 的大尺度弯曲, 几个 kpc 的旋臂结构, 以至于几百个 pc 的分子云^[3]。

COS-B 卫星上天以后, 有很长一段时间没有再发射新的 γ 射线探测卫星。直到 1991 年初又发射了一颗 γ 探测卫星, 即 GRO。而在这期间, 不同作者对 COS-B 数据作了大量细致的分析, 在研究银河气体组成、宇宙线粒子分布等问题上, 得出许多有意义的结果。

1. 银河 γ 射线产生过程

在 50MeV—5GeV 内, 银河 γ 射线产生过程主要有以下三种:

(1) π^0 介子衰变。即宇宙线粒子(CR)中的质子和星际气体中的质子相互碰撞产生 π^0 , π^0 再衰变为 γ 光子, 其中由一个 π^0 衰变为两个 γ 光子。

(2) 韧致辐射。即宇宙线电子与星际气体的库仑场相互作用产生 γ 光子辐射。

(3) 逆康普顿散射。即高能宇宙线电子与软光子相互作用产生 γ 光子辐射。软光子包括光学波段、红外波段以及 2.7K 微波背景辐射等辐射场。

一般说来, 在较高能段($>100\text{MeV}$), π^0 衰变占主导地位。而在较低能段($<100\text{MeV}$), 韧致辐射和逆康普顿散射贡献较大^[4]。在银盘附近, 逆康普顿散射贡献较小, 估计不超过 5%—10%^[6]。但随着银纬的增大, 这种辐射机制也随之显著。这是因为辐射场分布的银盘厚度大于星际气体的分布厚度, 在较高银纬处, 星际气体相对较少。由此可见, 以上三种过程对 γ 射线发射率的相对贡献由 γ 射线能段以及在银河内的位置而定。

2. 银盘 γ 射线辐射分布

SAS-II 和 COS-B 卫星的观测结果都表明银河的 γ 辐射主要来自银盘区域。银盘总光度($>100\text{MeV}$)是 $(1-2) \times 10^{39} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中 5% 产生于太阳圈以外。这些 γ 辐射主要起源于上述弥漫过程, 尤其是 π^0 衰变。同时, 也包括了少量点源的贡献, 不过, 迄今为止, 还无法精确计算出点源对银河 γ 辐射的具体贡献。这是因为大部分点源还未找到其对应体的原故。

除了三个强源, 即 Crab pulsar, Vela pulsar 以及还未得到认证的 γ 点源 Geminga 以外, 如果忽略其他 γ 点源对银河 γ 射线流量的贡献来分析银河 γ 射线分布, 则表明它由两个不同成份组成, 它们的银纬宽度不同。而在高能段, 这种分布尤其明显。对各银经, γ 射线辐射分布有一 FWHM $\sim 10^\circ$ 的宽成份, 而在银心附近, 有一强的但银纬宽度很窄的成份迭加在这宽成份上^[6]。

研究 γ 射线辐射的光谱特性, 结果是在 $|b| < 10^\circ$ 范围内, 辐射流量比 $F(70-150\text{MeV})/F(150\text{MeV}-5\text{GeV})$ 是银经的函数^[7], 具体表现在两个方面: (1) 对所有银经, 这个比值均大于纯 π^0 衰变谱, 说明宇宙线电子的韧致辐射或逆康普顿散射对 γ 辐射有较显著的影响; (2) 辐射谱指数随银经有系统变化。尤其值得注意的是在 $50^\circ > L > 280^\circ$ 区域, 谱指数比银盘其他区域软。这也许可以被解释为宇宙线电子数和宇宙线质子数的相对比值随银心半径变化, 在银心附近, 宇宙线电子密度增加。或者是由于在银心附近, 致密点源的贡献对 γ 射线辐射有显著影响, 而它们的谱特性不同于上述的弥漫过程。进一步研究还表明银心附近的谱指数与银盘其他地方的谱指数之差随能段而变化^[4]。计算内银河 ($310^\circ < L < 50^\circ, |b| < 30^\circ$) 的 γ 射线强度与外银河 ($90^\circ < L < 270^\circ, |b| < 30^\circ$) 的 γ 射线强度之比值, 得知这个比值在低

能段较大, 而在高能段较小。

3. 银河气体组成和宇宙线粒子分布

如果假设 γ 射线发射起源于宇宙线粒子和星际物质相互作用, 那么, γ 射线强度便是宇宙线粒子密度和气体总密度的作用结果沿视线方向积分的量度。假如宇宙线粒子密度为常数, 则 γ 射线强度是气体总密度的量度。反过来, 如果已知气体总密度分布便可研究宇宙线粒子分布。由于在较高能段中, γ 射线主要起源于 π^0 衰变, 而在较低能段中它主要起源于电子热韧致辐射。因此, 宇宙线粒子分布在高能段反应的是质子成份, 而在低能段反应的是电子成份。

气体总密度主要是 HI 和 H_2 的密度之和。长期以来, HI 的分布是由 21cm 线分布决定。而 H_2 的分布是由 CO 的 2.6mm 线分布确定。但对于 CO 和 H_2 之间的转换, 其转换因子 X 值一直难以确定 (X 定义为 $N(H_2)$ 和 $W(CO)$ 的比值, 即 $X = N(H_2)/W(CO)$, $N(H_2)$ 为 H_2 的柱密度, $W(CO)$ 为 CO 的 2.6mm 线宽度)。由于银河 γ 射线强度分布与气体总密度分布相关, 因此, 通过比较 γ 射线强度分布和 HI 以及 CO 的密度分布, 可以得到 X 值, 目前, X 值一般为 $(1-2) \times 10^{20}$ 分子数 $(\text{厘米})^{-2} (\text{K} \cdot \text{kms}^{-1})^{-1}$ 。从 X 值便可以求出 H_2 的质量分布。这种估算银河氢分子质量的方法称为 γ 射线估算法。

利用 COS-B 观测数据, 得到银河气体组成为:

$$\text{在内银河}(2-10\text{kpc}) \quad M(H_2) \approx 1.0 \times 10^9 M_{\odot}^{[8]}$$

$$M(\text{HI}) \approx 0.9 \times 10^9 M_{\odot}^{[9]}$$

$$\text{在太阳圈以外}(R < 15\text{kpc}) \quad M(H_2) \approx 2.5 \times 10^8 M_{\odot}^{[10]}$$

$$M(\text{HI}) \approx 1.1 \times 10^9 M_{\odot}^{[9]}$$

对整个银河系而言, γ 射线观测表明 H_2 的总质量不超过 $1.2 \times 10^9 M_{\odot}$, 而 HI 的总质量为 $4.8 \times 10^9 M_{\odot}$ 。

在半径为 400pc 的银河中心, CO 以及其他一些分子的柱密度大约是银盘其他地方的 5—10 倍。如果银河中心的转化因子 X 和 γ 射线发射率 ϵ_{γ} (每个氢原子发射的 γ 射线强度) 均和其他地方一样, 那么, 可望在银心观测到很强的 γ 射线辐射。但 COS-B 的观测数据并未显示出 γ 辐射流量有预计的强, 观测结果差不多比预计的低一个数量级^[11]。这个结果说明在银河中心, 要么是 γ 射线发射率较低, 要么是转化因子 X 较低。前者指宇宙线质子密度比其他地方低, 或者这些宇宙线粒子不能有效穿过分子云, 而后者则意味着银心的 H_2 质量只有 $6 \times 10^7 M_{\odot}$, 比 CO 观测所预计的低一个量级。目前还无法通过 γ 射线观测数据确定银心 γ 射线缺乏是由低 γ 射线发射率还是由低转化因子引起的。

在银纬几度以上区域观测到的 γ 射线辐射大部分起源于弥漫过程。因为 γ 射线点源的银纬分布很窄, 只有 $\langle |b| \rangle \approx 1:5$, 尽管在高银纬区, 点源探测能力更强。SAS-II 和 COS-B 的观测结果都表明: 在 $|b| \geq 10^\circ$ 区域, γ 射线强度由两部分组成。一部分是与银河气体物质分布相似的银河成份, 另一部分是起源于河外的各向同性成份。然而, 在中银纬区域 ($10^\circ < |b| < 20^\circ$) 观测到的强度明显大于从这一区域的气体所预计的强度。这点在正银纬区域尤其表现得明显。分析中银纬 γ 射线超的谱特性, 发现它的辐射谱明显比银盘辐射谱软。

针对中银纬 γ 射线超的上述特性, 不同作者提出几种不同解释:

(1) 一些作者认为大部分 γ 射线超起源于逆康普顿散射。逆康普顿散射可以解释一半以上的 γ 射线超的强度,而且它可以解释 γ 射线的软谱特性^[12]。

(2) 另外一些作者认为 γ 射线超可能起源于 Loop I 内宇宙线粒子密度增加的缘故^[13]。Loop I 中心位于 $L = 330^\circ$, $b = 18^\circ$, 半径为 60° 处。但据估计,由 Loop I 产生的 γ 射线强度比观测的 γ 射线超小一个数量级。

(3) 还有些作者认为所谓的 γ 射线超是由于在计算 γ 射线强度时忽略了电离气体的贡献^[14]。

目前还无法确认以上所述的哪一种解释更接近真实。

研究银河 γ 射线辐射的另一个主要目的便是确定宇宙线粒子分布和起源问题。如果与之相互作用的气体分布已知,问题很简单。但早期研究受到银河氢分子分布情况的不确定的影响。尽管 CO 分布可以用来计算 H_2 的分布,但由于早期的巡天观测只限于银道面很窄的区域,无法用它来与 γ 射线观测作比较。如今,大范围的 CO 巡天观测资料已获得,其巡天范围覆盖了整个银盘,且银纬宽度为 $|b| \approx 7^\circ - 10^\circ$, 这样便可以直接用 H_2 和 CO 的分布与观测的 γ 射线分布作大尺度比较,以求得 γ 射线发射率的三维分布以及宇宙线粒子的分布。

早期在 CO 巡天数据缺乏的条件下,人们研究银河第二、第三象限的 γ 射线与气体分布之间的关系。因为在这两个象限,气体成份主要是氢原子(HI),而 H_2 含量非常少。因此,CO 观测数据的不足,不影响对这两个象限的研究。SAS-II 工作组建立了气体分布的旋臂模型,假设在旋臂尺度下,宇宙线粒子密度正比于物质密度。结果发现观测到的 γ 射线强度与预计的符合得很好^[15]。Paul 等人^[16]采用不同的方法,他们考虑银河的非热射电辐射,结果也得出了同样的结论。进一步研究表明宇宙线粒子密度存在径向梯度^[17]。其他一些作者没有事先假设宇宙线粒子密度与物质密度成正比,而是直接比较 γ 射线径向分布与气体的径向分布,从而得到 γ 射线发射率的径向分布,其分析结果也表明了 γ 射线发射率朝银心方向增加^[18]。

新的 CO 巡天资料为研究 γ 射线发射率分布提供了新的方法。COS-B 工作组利用 COS-B 全部观测数据,以及 HI 和 CO 的分布图,研究 γ 射线发射率分布以及 CO 与 H_2 之间的转换关系。结果与 SAS-II 的结果比较,发现 γ 射线发射率的径向分布朝银心只有很弱的梯度,而 SAS-II 的分析结果表明有很强的梯度^[8]。这两个结果的不一致可能是由于分析 SAS-II 早期数据的统计意义不高引起的。尽管各种研究结果所表明的梯度强弱不尽相同,但都说明 γ 射线发射率确实存在径向分布梯度,即朝银心方向增加。 γ 射线发射率的分布反映了宇宙线粒子密度的分布。 γ 射线发射率的径向梯度,结合银河 γ 射线谱朝银心方向的谱指数比其他地方软的特性,说明朝银心方向宇宙线的电子密度增加。

二、银河 γ 射线点源辐射

早期气球 γ 射线装置曾多次声称探测到了 γ 射线点源辐射,但都由于探测到的 γ 光子数很少,统计意义很低,而无法区分 γ 光子是来自于真实源还是由统计涨落引起的。SAS-II 卫星的发射,证实了早期的一些观测结果,如 Crab pulsar、Vela pulsar 的 γ 脉冲辐射,

除此之外, 它在反银心方向还发现了一个强源(Geminga), 但没有明显的对应体。对 Cyg X-3 的观测, 发现它有与 X 射线波段一致的 4.8 小时的周期辐射。分析 SAS-II 的观测数据, 发现另外两个射电脉冲星(PSR1747-46)、(PSR1818-04)可能也有 γ 脉冲辐射。SAS-II 卫星的点源观测结果可参看文献^[19,20]。

由于 SAS-II 卫星的运行时间有限, 大范围系统寻找 γ 射线源是在 COS-B 卫星发射之后进行的。第一次寻源结果编为 CG 源表^[21], 这个表包括 13 个点源。第二次寻源结果编为 2CG 源表^[22]。这次寻源方法是用相关函数法, 其优点是大大提高寻源灵敏度。2CG 源表共包含了 25 个点源。因为 COS-B 卫星探测器的角分辨率不高, 只有 $1^\circ-2^\circ$ 水平, 因此无法分辨真实点源和局部分子云的 γ 辐射。而早期寻源时, 没有考虑分子气体的分布。后来, 由于 CO 大面积巡天资料的获得, 可以把由星际气体引起的弥漫 γ 辐射从银河 γ 射线辐射中扣除, 从剩下的银河 γ 辐射分布中再次寻源便可得到较为精确的点源表。Mayer-Hasselwander (1990)^[23]利用 CO 巡天资料, 结合 21cm 线的巡天资料, 采用相关函数分析法, 处理 COS-B 全部观测数据得到 COS-B 最新点源表。这个源表说明 2CG 点源表中有 8 个源是真实点源辐射, 而有 14 个源可以被解释为气体分布的再辐射, 因为扣除气体分布影响后, 在这些源的位置附近并没有明显的点源辐射。另外, 这个点源表包括了 10 个新的点源, 当然, 这 10 个源均属于暗源。最新点源表无论在观测数据或处理方法上, 都比 CG 和 2CG 源表的更全面、更完整, 因此它是目前最为可靠的源表。

目前, 有对应体的 γ 射线源只有 4 个, 其中两个是射电脉冲星, 一个分子云, 一个河外天体, 即类星体 3C273。其他未证认源, 大部分在银道面附近, 主要属河内源, 在高银纬区, 也有少量源, 它们主要是河外源。对河外源, 下面还将另作介绍。

1. 射电脉冲星

γ 射线源中最引人注目的是射电脉冲星, 最早发现的 Crab 和 Vela 两颗射电脉冲星是 γ 射线脉冲星。后来分析 SAS-II 数据, 认为 PSR1747-46 和 PSR1818-04 两颗射电脉冲星也有 γ 脉冲辐射^[24]。分析 COS-B 数据, 没有证实 SAS-II 的分析结果, 而是认为另两颗射电脉冲星 PSR0740-28 和 PSR1822-09 具有 γ 脉冲辐射^[25]。当然, COS-B 的分析结果也需要得到进一步证实。李惕碛等人(1989)^[37]也分析了 COS-B 数据, 分别通过周期分析和成象分析, 认为射电脉冲星 PSR1951+32 和 PSR1820-11 具有 γ 脉冲辐射。同样, 这个结果还有待进一步证实。

由此可见, 虽然可能有许多射电脉冲星在 γ 射线波段有脉冲辐射, 但目前, 只有 Crab 和 Vela 两颗射电脉冲星在 γ 波段的辐射得到完全证实。

2. Crab 和 Vela 脉冲星

Crab 脉冲星(PSR0631+21)是唯一一颗在射电、光学、X 射线、 γ 射线等波段都有脉冲辐射的射电脉冲星, 各波段的光变曲线在误差范围内都是一致的, 光变曲线呈两个脉冲峰值, 且两个主脉冲之间的相位差为 0.4。除了这些共同特性, 各波段光变曲线也有其不同点: (1) 第二个脉冲峰与第一个脉冲峰的强度之比随不同能段变化。COS-B 数据还表明, 在 γ 射线波段, 这个比值存在几年的变化时标^[26]; (2) 两个峰值辐射与总脉冲辐射的比值随不同能段变化。

从射电至 γ 射线波段的辐射能谱表明, Crab脉冲星的能量辐射在硬X射线到软 γ 射线波段达最大。在COS-B能段内, Crab脉冲星的整个脉冲相位的平均辐射能谱表明为单一幂律谱, 谱指数为 2.00 ± 0.10 , 并且不同脉冲相位的谱指数没有明显的不同^[27]。

Vela脉冲星是观测到的最强的 γ 辐射源。但与Crab脉冲星相比, 它有许多不同的性质。虽然Vela脉冲星在 γ 波段辐射很强, 在X射线波段却没有观测到它的脉冲辐射。在光学波段有脉冲辐射, 但非常微弱。Vela脉冲星的各波段光变曲线也表现很不一致, 具体表现为: 在 γ 射线波段, 其光变曲线为两个脉冲峰, 相位差与Crab脉冲星的值相同, 在光学波段, 光变曲线也是两个脉冲峰, 但两个脉冲峰之间的相位差与 γ 射线波段不对应。而在射电波段, 光变曲线表现为单个脉冲峰值, 而且这个脉冲峰的相位也不与 γ 和光学波段的脉冲峰相对应, 而是比它们第一个脉冲相位提前一点。

除了光变曲线不一样, Vela脉冲星的辐射能谱也与Crab脉冲星不同。从射电到 γ 射线波段, 其能谱表明Vela脉冲星的辐射能量在几百MeV附近达最大, 而在硬X射线波段只探测到上限值。在COS-B的观测能段内Vela脉冲星的整个相位的平均辐射谱不能用单一幂律谱表示, 在300MeV处有突变。具体表现为: 在50—300MeV能段, 谱指数为 1.72 ± 0.07 , 在300—5000MeV能段, 谱指数为 2.12 ± 0.07 。如果进一步考虑Vela脉冲星不同脉冲相位的辐射能谱, 结果会发现对于不同相位, 其谱指数也不同^[28]。这点和Crab脉冲星非常不一致。

研究Vela脉冲星的长时标变化, 发现它的辐射也有几年的变化时标, 而且它的变化幅度比Crab脉冲星大。尤其值得注意的是对于不同相位成份, 其变化量也各不相同。这说明了在Vela脉冲星上, 不同的辐射成份均对脉冲辐射有贡献。

3. Cyg X-3 在各波段的观测研究

Cyg X-3在各波段都有观测研究。它是个很强的X射线源, 在甚高能波段也有辐射, 并且由此认为它可能是银河系中宇宙线粒子最强的发射源。进一步研究还表明Cyg X-3是一个双星系统。

Cyg X-3在X射线波段有4.8小时的周期辐射^[29]。在红外波段也观测到了同样的周期辐射^[30]。在甚高能波段也有类似结果^[31]。在射电波段虽然没有观测到周期辐射, 但具有射电爆发, 使得Cyg X-3一度成为全天最亮的射电源^[32]。

然而, 在 γ 射线波段, 观测结果却不甚一致。早期气球观测结果曾发现它有周期辐射^[33]。可是, 紧跟着发射的另一颗气球却根本没有探测到Cyg X-3的 γ 辐射, 只给出上限值^[34]。SAS-II卫星对Cyg X-3的观测表明它有4.8小时的周期辐射^[35]。后来的COS-B卫星也对Cyg X-3进行多次观测。COS-B上除了 γ 射线探测器以外, 还用X射线探测器进行同步观测。COS-B的观测结果表明Cyg X-3在X射线波段存在着4.8小时的周期辐射, 但没有探测到 γ 射线辐射^[36]。COS-B组成员认为COS-B卫星和SAS-II卫星观测结果不一致是由于处理SAS-II数据时未充分考虑天鹅座区域复杂结构。而SAS-II组成员则认为不一致是由于Cyg X-3的 γ 辐射随时间变化。

由上可知, Cyg X-3在X射线波段、甚高能波段以及红外波段均有4.8小时的周期辐射, 而在 γ 射线波段内所得的结果还不一致。如果各观测结果均属实的话, 那将意味着Cyg

X-3 是一个变化剧烈的强源。

4. γ 射线源的证认

自从 CG 源表、2CG 源表发表以来, 人们为了更好地理解 γ 射线源的性质, 诸如源的结构、辐射机制等, 首先便是致力于寻找 γ 射线源在其他低频波段的对应体。但是, 由于 γ 射线探测器的分辨率低, 源的误差盒很大, 一般为 1° — 2° , 从而给寻找对应体工作带来极大困难。目前, 只有几个亮源在其他波段有对应体。它们是: 2CG289+64^[38], 2CG184-05, 2CG263-02, 2CG353+16; 其对应体分别是: 3C273^[38], Crab 脉冲星, Vela 脉冲星^[40], ρ Oph 分子云^[3]。

虽然目前只有上述 4 个 γ 射线源有对应体, 但寻找未证认源在其他波段对应体的工作却一直在进行着。利用现有源表, 如光学、射电、X 射线等的观测源表进行系统证认, 或对其个别天区进行多波段证认。如对 Geminga 源的证认, 现已取得某些进展。遗憾的是对其他源, 目前还没有确切的结果。

Geminga, 即 2CG195+04, 是反银心方向最亮的 γ 射线源, 也是未证认源中最亮的一个源, 源的误差盒半径为 0.4 , 这个源首先被 SAS-II 发现, 后又被 COS-B 所证实。SAS-II 的数据分析还显示它有 60 秒的周期辐射^[41]。而 COS-B 的观测数据并没有显示出 60 秒的周期辐射。

早期对 Geminga 源在其他波段的观测均没有结果, 如 Mandolesi 等人用 10 米射电望远镜观测 Geminga 误差盒^[42], 结果表明没有观测到 1 至 1000 秒范围内的任何周期辐射。还有不少人做过类似的搜寻工作^[43,44], 但都没有结果。在光学波段和 X 射线波段也进行了搜寻工作, 但因误差盒较大, 早期的 X 射线观测, 其分辨率和灵敏度都不高, 所以对 Geminga 源的证认工作没有多大进展。

然而, 爱因斯坦天文台的发射, 使得 X 射线波段的观测有了一个飞跃, 它的分辨率和灵敏度都大大高于以往的探测器。把 X 射线观测结果和 COS-B 结果对比, 发现 X 射线源 1E0630+178 在 2CG195+04 误差盒内。Bignami 等人^[45]对 1E0630+178 源的爱因斯坦天文台的观测数据以及结合 EXOSAT 的观测数据, 作进一步的周期分析, 发现 1E0630+178 有大于 59 秒的周期辐射。这一时变现象与早期 SAS-II 观测数据的分析结果一致, 说明 SAS-II 对 Geminga 源的数据分析是正确的。通过这两个波段所具有的周期相同, 便可证认 1E0630+178 源为 Geminga 源在 X 射线波段的对应体。同时也把 Geminga 源的误差盒半径从 0.4 缩小到 $3''.2$ 。在 1E0630+178 源内再进行光学搜寻便容易多了。Halpen^[46]在这个 X 射线源的误差盒内用 CCD 进行深度测光, 发现了一个暗弱天体, 其 g 星等为 25 等, 色指数 $g-r = -0.92$, 由于这个天体非常蓝而认为它是 1E0630+178 的光学对应体, 进而认为它是 Geminga 源的光学对应体。Bignami 等人^[47]对这个暗源进行了 B、V 波段的测光观测。结果表明它并没有 Halpen 观测结果所显示的那么蓝。他的结果是 $m_b = 26.5 \pm 0.5$, $B-V \geq 1$ 。

对 γ 点源的证认之所以进展缓慢, 最主要的是它的误差盒太大, 不容易作位置相关证认, 而只能基于物理性质作证认, 并且主要是通过时变特性。如 Crab 和 Vela 脉冲星以及上述的 Geminga 源, 都是通过分析 γ 射线波段和其他波段之间的共同时间特性来确认其对

应体的。并且对 γ 射线源的证认多数是集中于寻找源的时间特性上,这当然限制了 γ 源的证认范围。最新发射的 γ 射线观测台 GRO,由于它的灵敏度增加了10倍,角分辨率增加到 0.5° 的水平,而且 GRO 含有四个探测器,其总覆盖能谱范围为 $100\text{keV}-30\text{GeV}$ 。这些优于以往任何 γ 探测器的性质,势必将推动 γ 源的证认工作,并取得更大成果。

三、河外 γ 射线点源辐射

研究河外天体的 γ 辐射对于了解这些天体的辐射机制、内部结构以及河外 γ 射线弥漫背景起源等问题具有重要意义。

目前,只探测到为数极少的几个河外活动星系核的 γ 流量、得到一批活动星系核的 γ 流量上限。这是因为 SAS-II 和 COS-B 卫星的大部分观测时间是用来观测银河 γ 射线辐射分布的,在高银纬区的观测时间有限,且河外天体的 γ 射线流量值一般较低。尽管有这些因素,但对活动星系核的 γ 流量测量结果,结合其他波段的观测数据,还是得到了一些有关活动星系核的重要性质,为研究这些天体的结构和辐射提供重要信息。

据观测估计,银河系 γ 射线光度为 $5 \times 10^{38} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1} (\geq 100 \text{MeV})$ ^[48]。假设与之相似的其它旋涡星系也具有类似的 γ 射线光度,那么,即便是离我们最近的 M31,其流量也只有 COS-B 卫星探测流量上限的十分之一。因此,对于正常星系, COS-B 很难观测到它们的 γ 辐射。GRO 的探测灵敏度虽然大大高于 COS-B 的,但它最多只能勉强探测到这些正常星系的 γ 辐射。然而,对于活动星系,由于它们一般都在 X 射线波段有较强的辐射,所以在 γ 射线波段,可能也有较强的辐射。因此,搜寻河外天体的 γ 辐射主要是集中在活动星系上,如 Seyfert 星系、类星体、BL Lac 天体、射电星系等。

首先得到确切证认的河外 γ 射线源是 2CG289+64,它的对应体是类星体 3C273。在 X 射线波段,3C273 是观测到的最亮的类星体,也是唯一一个在 100MeV 以上探测到的河外源。结合 X 射线波段的观测数据,分析 3C273 的连续辐射谱,结果表明它可以用幂律谱表示。不过,值得注意的是在连续谱从 X 射线到 γ 射线波段的过渡区域中,谱指数明显发生变化,即在较高能段,谱指数在要变陡。并且连续辐射谱还表明在 2MeV 附近,3C273 的光度达最大。

在 γ 射线波段观测到的活动星系核还有 Seyfert 星系 NGC 4151^[49]、射电星系 Cen A 等^[49],他们和 3C273 一样,连续辐射谱都有一个共同的特性:从 X 到 γ 射线波段,连续谱为幂律谱,且谱指数在几 MeV 附近要发生突变,在 高能段,谱变陡。对于活动星系核,这种在 高能段谱指数变陡的特性可能是它们的一般特性。其他一些分析也得到类似的结论。

不同作者利用 SAS-II、COS-B 在高银纬的观测数据,寻找河外天体的 γ 射线辐射。Pollack 等人^[50]用最大似然法分析 COS-B 的观测数据,除了 3C273 天体外,未发现明显的源辐射,且对一些活动星系核得出其流量上限。同样,Biggami 等人(1979)^[51]利用 SAS-II 数据,得到一批活动星系核的 γ 射线辐射流量的上限值。香港大学 E.C.M. Yong 等人^[52]也利用 SAS-II 观测数据,用相关函数分析法,寻找河外天体的 γ 辐射,他们的结果得出:有 15 个活动星系核有 γ 射线辐射,其中 11 个类星体,3 个 BL Lac 天体,一个 Seyfert 星

系。这些不同作者的分析，无论是得出活动星系核的辐射流量上限值，还是具体流量值，它们都有一个共同特性，即从X到 γ 射线波段过渡区域，其谱指数在几 MeV 附近要发生变化。由此可以得出结论：对于活动星系核，在 γ 射线波段的辐射流量值远小于从X射线谱外推到 γ 射线波段所对应的流量值。活动星系核的这一特性对于研究河外 γ 射线弥漫辐射的起源问题具有重要意义。

解释活动星系核这种辐射特性一般用同步自康普顿模型。一般认为相对论高速电子的同步辐射产生活动星系核的射电、红外以及光学波段的主要辐射流量。那么，高能电子再散射这些同步辐射光子可以产生X射线和 γ 射线的辐射流量。即X射线和 γ 射线产生于高能电子对较低频的同步辐射光子的逆康普顿散射，而这些同步辐射光子也由这些高能电子产生。对于在几 MeV 附近，谱指数发生突变问题，同步自康普顿模型解释为原始电子能谱分布的突变，或者解释为通过X射线和 γ 射线光子之间的碰撞，产生电子偶而引起 γ 射线的吸收，从而造成 γ 射线谱变陡。

四、弥漫 γ 射线辐射

SAS-II 和 COS-B 卫星除了完成整个银盘的巡天观测以外，在高银纬区也作了大量的观测，这些观测资料已经用来分析河外 γ 射线的辐射情况。COS-B 卫星的观测时间远远大于 SAS-II 的，但前者的仪器背景辐射比后者强，因此，对于 γ 流量较低的河外 γ 射线辐射，很多分析是建立在 SAS-II 观测数据的基础上。数据分析结果表明，在高银纬区 γ 射线辐射可以分为两部分：一部分为河外弥漫背景辐射，它的谱指数较陡，且为各向同性。另一部分是银河背景辐射，它的谱指数较平，且与高银纬的银河物质分布有很好的相关性。

在X射线波段，同样也观测到了各向同性的河外弥漫背景辐射，辐射谱呈幂律谱形式。把X射线和 γ 射线的河外弥漫辐射谱联系起来，便发现一个有趣的特点，即在几 MeV 附近辐射谱有一个鼓包，且在 γ 射线较高能段，辐射谱较陡。

对上述 γ 射线谱的起源，有两种不同的理论解释：

(1) Stecker(1969)^[63]等人认为鼓包是由早期宇宙 π^0 衰变而来。因为那时的宇宙线密度和气体密度都比现在的大得多，由于红移的原因，使得产生的 γ 射线峰值移至几 MeV 处。Omnes(1969)^[64]发展了重子对称宇宙论模型，提出河外背景流量起源于早期星系团形成时的物质—反物质湮灭。

(2) 还有一种不同的观点则认为河外背景谱是由河外分立源迭加而来。河外 γ 射线分立源一般都是活动星系核，而它们的连续谱特性和弥漫背景谱特性很相似。由于这种相似性，很多人计算了河外分立源对背景流量的贡献，如果这种贡献占主要成分，则认为背景谱辐射主要由分立源贡献。反之，则认为背景谱辐射是起源于弥漫过程。Young(1988)^[65]分析 SAS-II 数据，估计了类星体、Seyfert 星系等活动星系的 γ 辐射对河外背景流量的贡献。结果为：类星体对背景辐射的贡献约为 40%，Seyfert 星系贡献 20%，再加上其他活动星系的贡献，他们推论在 35—100 MeV 之间，河外 γ 射线背景辐射主要由河外分立源的辐射迭加而来。Bignami(1979)^[61]分析 SAS-II 数据，得到一批活动星系核 γ 射线辐射流量的上限值。

他估计活动星系核对背景流量的贡献后得出了类似的结论,即类星体, Seyfert 星系, BL Lac 天体等活动星系核的 γ 射线辐射可以解释 1MeV 以上各向同性背景辐射的主要部分。

目前, 由于观测数据有限, 还不好判断哪种解释更接近真实情况。而已经上天的 GRO 卫星的观测数据将对这些问题作出更好的回答。

致谢: 本文是在李启斌研究员指导下完成的, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Kraushaar, W. L. et al., *Ap. J.*, 177 (1972), 341.
- [2] Fichtel, C. E. et al., *Ap. J.*, 198 (1975), 163.
- [3] Hermsen, W. et al., in *Surveys of the Southern Galaxy*, ed. by W. B. Burton and F. P. Israel, p. 65, D. Reidel Publishing Company, (1982).
- [4] Bloemen, J. B. G. M. et al., *Ap. J. Lett.*, 317 (1987), L15.
- [5] Bloemen, J. B. G. M. et al., *Astron. Astrophys.*, 145 (1985), 391.
- [6] Mayer-Hasselwander, H. A. et al., *Astron. Astrophys.*, 105 (1982), 164.
- [7] Mayer-Hasselwander, H. A., in *Kinematics, Dynamics, and Structure of the Milky Way*, ed. by W. L. H. Shuter, p. 223, D. Reidel Publishing Company, (1983).
- [8] Strong, A. W. et al., *Astron. Astrophys.*, 207 (1988), 1.
- [9] Henderson, A. P. et al., *Ap. J.*, 263 (1982), 182.
- [10] Bloemen, J. B. G. M. et al., *Ap. J.*, 279 (1984), 136.
- [11] Blitz, L. et al., *Astron. Astrophys.*, 143 (1985), 267.
- [12] Strong, A. W., *Astron. Astrophys.*, 145 (1985), 81.
- [13] Bhat, P. N. et al., *Nature*, 314 (1985), 515.
- [14] Bloemen, J. B. G. M. et al., *Astron. Astrophys.*, 204 (1988), 88.
- [15] Fichtel, C. E. et al., *Astron. Astrophys.*, 134 (1984), 13.
- [16] Paul, J. A. et al., *Ap. J.*, 207 (1976), 62.
- [17] Cesarsky, C. J. et al., *Astron. Astrophys.*, 60 (1977), 139.
- [18] Li Ti Pei et al., *J. Phys.*, G8 (1982), 1141.
- [19] Hartman, R. C. et al., *Ap. J.*, 230 (1979), 597.
- [20] Will, R. D., in *Proc. 12th Eslab Symp. Recent Advances in Gamma-Ray Astronomy*, ed. by B. Batterick and R. D. Wills, ESA SP 124, p. 378, (1977).
- [21] Hermsen, W. et al., *Nature*, 269 (1977), 494.
- [22] Swanenburg, B. N. et al., *Ap. J. Lett.*, 243 (1981), L69.
- [23] Mayer-Hasselwander, H. A. et al., *Adv. Space Res.*, 10 (1990), No. 2, 89.
- [24] Ogelman, H. et al., *Ap. J.*, 209 (1976), 584.
- [25] Buccheri, R. et al., *Nature*, 274 (1978), 572.
- [26] Will, R. D., *Philos. Trans. R. Soc. London.*, A301 (1981), 537.
- [27] Clear, J. et al., *Astron. Astrophys.*, 174 (1987), 85.
- [28] Grenier, I. A. et al., *Astron. Astrophys.*, 204 (1988), 117.
- [29] Dolan, J. F. et al., *Astrophys. Letters*, 22 (1982), 147.
- [30] Becklin, E. E. et al., *Nature*, 245 (1973), 302.
- [31] Samorski, M. et al., *Ap. J. Lett.*, 268 (1983), L17.
- [32] Gregory, P. C. et al., *Nature*, 239 (1972), 440.
- [33] Galper, A. M. et al., *Pis'ma Astron. Zh.*, 2 (1976), 254.
- [34] Mckechnie, S. P. et al., *Astrophys. J.*, 207 (1976), 608.
- [35] Lamb, R. C. et al., *Astrophys. J. Lett.*, 212 (1977), L63.
- [36] Hermsen, W. et al., *Astron. Astrophys.*, 175 (1987), 141.
- [37] 李揚培等人, *天体物理学报*, 9 (1989), 286.
- [38] Bignami, G. F. et al., *Astron. Astrophys.*, 93 (1981), 71.
- [39] Thompson, D. J. et al., *Ap. J. Lett.*, 214 (1977), L17.
- [40] Kniffen, D. A. et al., *Nature*, 25 (1974), 397.
- [41] Thompson, D. J. et al., *Ap. J.*, 213 (1977), 252.

- [42] Mandolesi, N. et al., *Astron. Astrophys.*, 67 (1978), L5.
[43] Mayer-Hasselwander, H. A. et al., Proc. Int. Cosmic Ray Conf., 16th, Kyoto, 1 (1979), 206.
[44] Ozel, M. E. et al., *Nature*, 285 (1980), 645.
[45] Bignami, G. F. et al., *Nature*, 310 (1984), 464.
[46] Halpern, J. P. et al., *Ap. J.*, 330 (1988), 201.
[47] Bignami, G. F. et al., *Astron. Astrophys.*, 202 (1988), L1.
[48] Strong, A. W. et al., *J. Phys.*, A 9 (1976), 823.
[49] Dean, A. J. et al., *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, A301 (1981), 577.
[50] Pollock, A. M. T. et al., *Astron. Astrophys.*, 96 (1981), 116.
[51] Bignami, G. F. et al., *Ap. J.*, 232 (1979), 649.
[52] Young, E. C. M. et al., *Nucl. Phys.*, 14 (1988), L115.
[53] Stecker, F. W., *Ap. J.*, 157 (1969), 507.
[54] Omnes, R., *Phys. Rev. Lett.*, 23 (1969), 38.
[55] Young, E. C. M. et al., *Ap. J. Lett.*, 330 (1988), L5.

(责任编辑 林一梅)

The γ -Ray radiation of the Galaxy and Extragalactic Sources

Zhong Jianxia

(Beijing Observatory, Academia Sinica)

Abstract

This paper gives a systematic review on the developing history and present study of the γ -ray astronomy, and presents the γ -ray sources, as well as the diffuse γ -ray radiation of the Galaxy and extragalactic sources.