

宇宙 X 射线背景辐射与活动星系核

汪珍如

(中国高等科学技术中心天文和天体物理分中心)
(南京大学天文系)

提 要

本文介绍了宇宙 X 射线背景的研究近况。主要就宇宙 X 射线背景的两种理论观点——弥漫源观点和分立源观点来进行讨论。并对两派观点争论的焦点问题进行了详细的阐述。这个焦点问题与活动星系核的 X 射线辐射紧密相关。

一、引 言

宇宙背景辐射给我们提供了现在能观测到的宇宙最遥远的信息。目前,这种最遥远的信息只能通过电磁辐射来得到,中微子发射和引力辐射的探测在这个课题上都是完全无能为力。宇宙背景辐射的全波段情况见图 1。本文只讨论 X 射线波段的背景辐射。X 射线背景辐射(简称 XRB)是 1962 年由 Giacconi, Gursky, Paolini 和 Ross 发现的^[7]。至今已超过四分之一世纪。但 XRB 的理论解释还是一个悬而未决和颇有争议的大难题。争论的焦点是:宇宙背景辐射是由弥漫热气体、非热气体还是由已知类型天体在极限光度情况下给出的辐射的总和?或者简单地说说是弥漫辐射还是未分解的分立源辐射的总和?用什么宇宙模型来实现这种相加?是否还有未知的新类型的天体?这些问题的解决与活动星系核(简称 AGN)的 X 射线辐射是戚戚相关的。

本文在介绍 XRB 的研究近况时,也同时讨论 XRB 与 AGN 的关系。

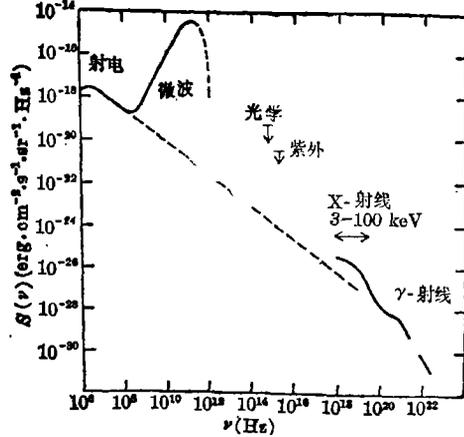


图 1 宇宙背景辐射的全波段图^[1]

二、XRB 的弥漫起源观点

Felton 和 Morrison^[4]、Brecher 和 Morrison^[2] 提出用 ~3 K 的微波背景辐射与相对论性电子的逆康普顿散射来解释宇宙 X 射线背景辐射的谱形。拟合结果如图 2 所示,似基本符合。问题是该模型对宇宙中相对论性电子密度和能量都有一定的要求,而目前这方面的知识是非常缺乏的。Silk^[21]和 Field & Perrenod^[5]提出用星系际热气体的弥漫辐射来解释

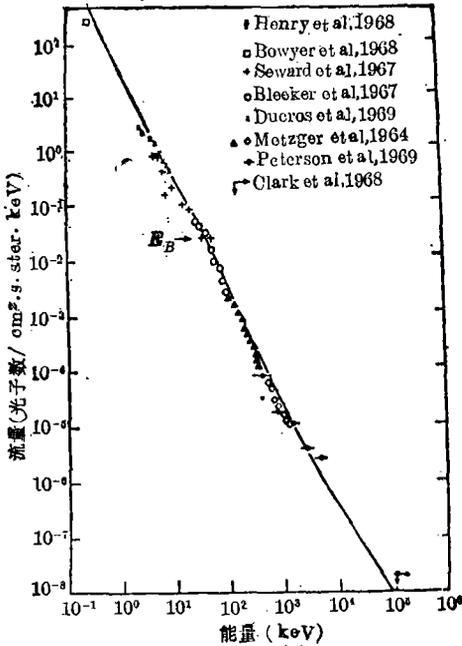


图2 宇宙背景辐射的代表性观测结果及理论曲线(相对论性电子与~3K微波背景作用)^[2]

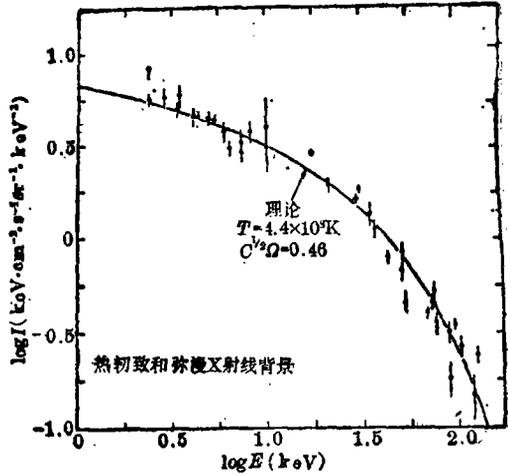


图3 XRB的热韧致辐射模型曲线(观测资料选用^[18],图取自^[6])

XRB 的谱形(图 3)。但正如 Field 等指出的,这要求电子温度达 $4.4 \times 10^8 \text{K}$, 气体的能焓达 $4 \times 10^{-13} \text{erg/cm}^3$, 大于星系际空间其他形式的能量密度(除了微波背景辐射)。八十年代, Marshall 等^[13]利用卫星 HEAO-1 上的 A-2 仪器准确地测量了 $3 \text{keV} - 60 \text{keV}$ 的 XRB, 并指出它与热韧致温度为 $40 \text{keV} \pm 5 \text{keV}$ 的光学薄等离子体的自由-自由发射谱符合得非常好(图 4)。概括起来说,上述弥漫源观点的共同优点是能解释 XRB 的谱形,特别是 Marshall 的观点。存在的比较显著的问题是要求热气体或非热气体具有巨大的能量,这是至今无法解释的。

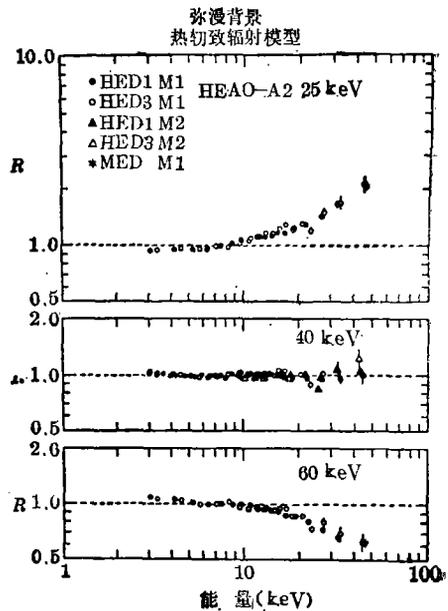


图4 用 HEAO-1 上的 A-2 仪器测量的 XRB 与热韧致辐射模型比较图^[11]

三、XRB的分立源观点

七十年代 Schwartz & Gursky^[18]、Grindlay^[9]和 Schnopper 等^[17]就提出活动星系核 (AGN)会对 XRB 有显著贡献,并能对此作出解释。

持弥漫源观点的人对分立源观点提出了异议。认为分立源的明显弱点是无法解释 XRB 的谱形。因为通常考虑的分立源是 AGN 等 X 射线源,其 X 射线谱是幂律谱,谱指数在 $\alpha \approx 0.7$ 左右,而纯粹用幂律谱是无法拟合 XRB 谱的^[11,13]。图5给出了 XRB 谱与幂律谱相对比较的结果,这表明用 $\alpha = 0.4$ 或通常认为的 $\alpha = 0.7$ 都无法解释 XRB 的谱。

Einstein 卫星的发射,使 X 射线探测的灵敏度提高了一千倍,灵敏度达 $2.6 \times 10^{-14} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。利用 Einstein 卫星大量的观测资料进行分析综合,Giacconi 和 Zamorani^[8]总结出下述结果。

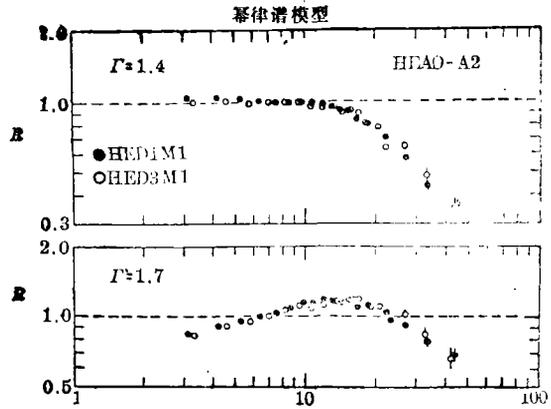


图5 用 HEAO-1 的 A-2 仪器测量的 XRB 与幂律谱的比值^[11]

1. 在 1—3keV 的能量范围,在极限灵敏度的流强下,河外 X 射线源的表面密度是 $19 \pm 8/\text{deg}^2$,对 XRB 的贡献为 $26 (\pm 11) \%$ 。
2. Einstein 深度搜索的光学证认表明,在这种弱流极限下,~60%—75% 的河外 X 射线源是类星体或低光度的 AGN。
3. Einstein 中度搜索表明,AGN 的百分比是 68%,与深度搜索结果同数量级。
4. Einstein 深度和深度搜索中余下的其他 X 射线源已证认为星系和星系团。
5. 近似 30 个 Seyfert 星系在 2—20keV 有相当可靠的 X 射线谱资料,其谱指数为 0.65 ± 0.15 。Seyfert 星系在 2—10keV 范围内能解释 XRB 的 10%—25%。在更高的能域(如 ~400 或 150keV) XRB 甚至全可用 Seyfert 星系解释。
6. 近年来的资料分析表明,类星体在 X 射线射线上没有共同的谱指数^[3]。射电宁静的类星体的平均 X 射线谱指数为 1.0—1.2。
7. 星系团的 X 射线发射可用特征温度为 2—7keV 的光学薄热致模型符合^[6]。
8. 正常星系的谱特性尚知道得不多,旋涡星系的谱比椭圆星系的要陡一些。

持分立源观点者认为,既然上述分立源有可观的 X 射线辐射,特别是 AGN。把这些源的计数与辐射流密度之间的关系(也就是 $\log N - \log S$ 关系)外推,就可以导出分立源对 XRB 的贡献(见图 6, 7)。他们认为弥漫源观点完全忽略了分立源的辐射贡献,这显然是与现有观测事实不相符合的。

Setti^[20]、Schmidt & Green^[16]和 Giacconi & Zamorani^[8]估计了分立源对 2keV 处 XRB 的贡献如下表所示。

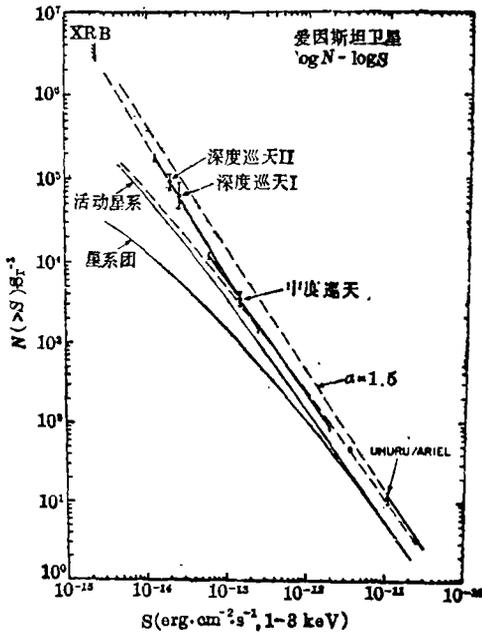


图6 河外X射线源的 $\log N(>S) - \log S$ 关系^[14]

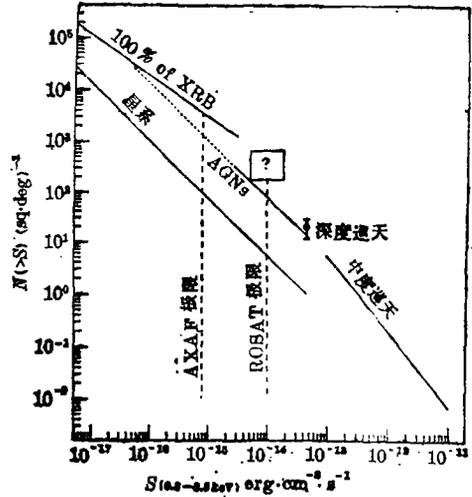


图7 河外X射线源的 $\log N(>S) - \log S$ 关系^[8]

表 1 分立源对XRB的贡献(%)

分立源	Setti (1985)	Schmidt & Green (1986)	Giacconi & Zamorani (1987)
类星体	≥20	8—13	≥40
Seyfert	34	29	
BL La	< 7	1	
星系	~13	4—8	~13
星团	<10	10	
合计	~70	53—62	≥53

由于考虑分立源时所用的外推估计等分析方法的不同,或观测资料和处理分析上的不同,有些人得到分立源对 XRB 的贡献更大,甚至认为可达55%—90%^[80]。

Giacconi & Zamorani 认为,既然分立源对 XRB 的贡献最小也在50%以上,那么讨论产生 XRB 的机制时,就应研究剩余的 XRB,即把观测到的 XRB 扣掉未分解的分立源的贡献。在讨论谱特性时,也应该是指剩余的XRB的谱特性。图8实线是观测谱, a、b、c和d是剩余谱, P是指被扣掉的谱在观测的 XRB 中所占的百分比, α 是被扣掉的谱的谱指数。

这样一来,弥漫机制要解释的就不是原来观测的 XRB,而是要解释剩余的 XRB。例如, Felton & Morrison 的逆康普顿散射模型本来就难以解释 3—20keV 的较平的部分。那么,在同样的能谱区,剩余谱就比观测谱更平。为了产生的幂律谱指数为 0.0—0.2, 要求电子能谱指数为 1.0—1.4。如此平的电子能谱在银河系、正常星系和大功率射电星系都是难以找

到的。

至于热的星系际气体的热韧致辐射,虽然 Marshall 给出它对观测的 XRB 的谱拟合似乎很诱人,但对剩余的 XRB 的谱来说,就不可能再拟合得这样好。如应用热韧致辐射的公式

$$S(E) = AE^{-\beta}e^{-E/kT} \quad (1)$$

来拟合剩余谱,并确定 β 和 T 的最佳拟合值,得到的结果如图 9 所示。实圆代表 3—50keV 的剩余谱的拟合,空圆代表 3—20keV 剩余谱的拟合,而实线表示一个光学薄热韧致辐射理论模型所预期的两参数关系。理论关系与观测点不相重合。因为任何一对参数都不能解释剩余的 XRB 的平谱部分,它的任何组合都不会比单个谱更平,故光学薄热韧致辐射的任何多个组合都不能解释剩余的 XRB。

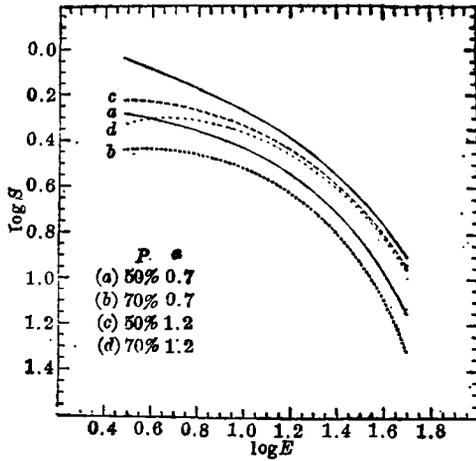


图 8 在 3—50keV 观测的 XRB(实线)及剩余谱的四种不同估计^[8]

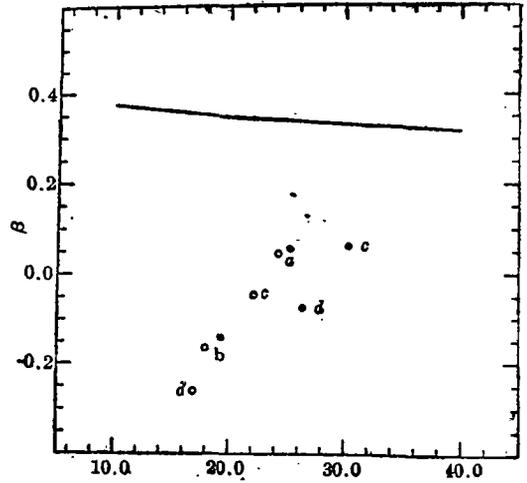


图 9 光学薄热韧致辐射模型的 $\beta(E/kT)$ 的函数和 kT 的关系(实线),圆点和圈代表剩余谱的最佳拟合^[8]

如果考虑一个部分不透明的韧致模型,其有效光深为 $\tau_{eff} = [\tau_{abs}(\tau_{abs} + \tau_{scat})]^{1/2}$ 。由于剩余谱未出现强的维恩峰,应该认为其康普顿参数的数量级为 1。Giacconi & Zamorani [8] 由此导出源的大小为 $5 \times 10^{15} - 2 \times 10^{18} \text{cm}$, 数目为 $10^6/\text{sr}$ 。这样一来,剩余谱还是归结为由分立源产生,弥漫源是无能为力的。

四、XRB 辐射的分立源观点与光谱佯谬可能会解除

上面已经提到分立源问题的主要困难是未能解释 XRB 的谱形,即 Boldt^[1]提出的光谱佯谬。最近, Schwartz & Tucker^[10]提出不是活动星系核不能解释 XRB,而是用单个幂律谱来拟合 AGN 的谱这个假定有问题。如果放弃单个幂律谱的假定,所谓佯谬即可解除。他们提出了活动星系核的两种谱形

1. 原来简单的幂律谱是

$$f = kE^{-\alpha}$$

即
$$\log f = \log k - a \log E,$$

现在取谱形
$$\log f' = \log f - \log k = -a \log E + b(\log E)^2 \tag{2}$$

即加上 $\log E$ 的平方项。这个谱可以很好地拟合 3—12keV 的 XRB, 为了更好地符合 40keV 处的谱以及几百 keV 的谱, 引入高能切断因子 e^{-E/E_c} , 即

$$f = kE^{-a+b \log E} e^{-E/E_c} \tag{3}$$

这里取 $E_c = 125\text{keV}$ 。

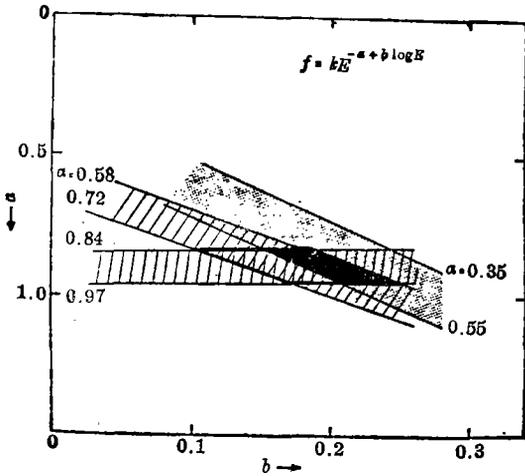


图 10 在 (a, b) 平面上表示的幂律谱(影线区域)与 3—12keV 的 XRB 谱^[10]

图 10 在 (a, b) 平面上给出对 AGN 幂律谱 $\alpha = 0.905 \pm 0.065$ 于 0.2—4.5keV 能域 (Urry et al, 1987) 的 90% 置信区间和 $\alpha = 0.65 \pm 0.07$ 于 2—30keV 能域 (Mushotzky, 1984) 的 90% 的置信区间。它们分别显示于图 10 中的近水平影线区域和斜交的影线区域, 重叠的平行四边形区域能同时是这两者的 90% 的置信区间。这一重叠区域在 (a, b) 图上指出了 a, b 的允许范围。这一区域也同时是 Rothschild 等^[16] 给出的 $\alpha = 0.54 \pm 0.38$ 于 20—160keV 能域的 90% 的置信区域。平行四边形区域近似地沿一直线, 其 (a, b) 值从点 $(0.83, 0.13)$ 到点 $(1.03, 0.30)$ 。带点的区域则能符合 3—12keV 的 XRB, 全黑的区域则同

时给出 XRB 和 AGN 的 90% 置信区域。

2. 幂律谱加上热韧致谱

$$f(E) = k[E^{-\beta} + xg(E, T)e^{-E/kT}] \tag{4}$$

如取 $\beta = 1, x = 0.075$ 和 $kT = 125$ 能在 90% 的置信度内符合各个能区的幂律谱。图 11 给出了由 (4) 式确定的曲线(实线)以及幂律谱 $E^{-0.905}$ 于 0.2—4.5keV (虚线)、 $E^{-0.65}$ 于 2—30keV (虚点线) 和 $E^{-0.50}$ 于 3—50 keV (点线) 的表示。

Schwartz & Tucker 假定每个 AGN 的发射谱是 (3) 或 (4)。由于红移的影响, 各个 AGN 的观测谱就不会一样 (如果是幂律谱, 红移对谱不会有影响)。因此, 观测的 XRB 谱依赖于光度随红移的分布。对 Friedmann 宇宙, 弥漫背景在能量 E_0 处观测到的光谱强度为

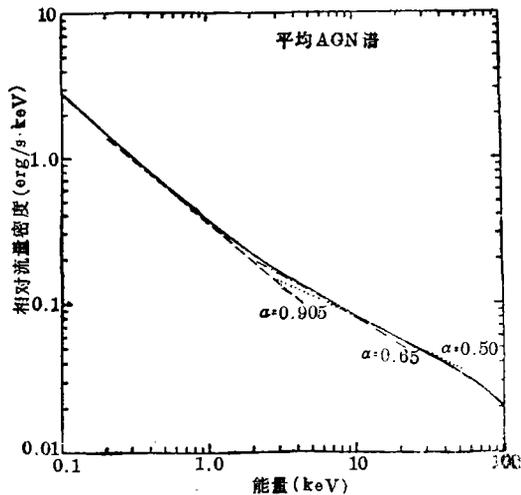


图 11 谱 $E^{-1+0.075g(E, T)e^{-E/kT}}$ (实线)与几种幂律谱的比较^[10]

$$\frac{dI(E_0)}{dE_0} = \frac{R_H}{4\pi} \int_0^{z_{\max}} \frac{j[E_0(1+z), z]}{(1+z)^2(1+q_0z)^{1/2}} dz \quad (5)$$

其中 R_H —Hubble 常数, q_0 —减速参数, Z_{\max} —AGN 的极大红移值, $j(E, z)$ 是在红移 z 、能量 $E = E_0(1+z)$ 处的体积发射率。假定 AGN 的光谱形状 $f(E)$ 不随时间变化。在静止参考系, 源的 X 射线分光光度为

$$L_x(E) \propto L_T f(E) \quad (6)$$

其中 L_T 是静止参考系源的热光度。

则

$$j(E, z) \propto \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} L_T f(E) N(L_T, z) dL_T \quad (7)$$

如果光谱形状不随 z 演化, 则有

$$L_x N(L_x, z) dL_x \propto L_T N(L_T, z) dL_T \quad (8)$$

$$\frac{dI(E_0)}{dE_0} \propto \int_0^{z_{\max}} dz \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} \frac{f[E_0(1+z)] L_x N(L_x, z)}{(1+z)^2(1+2q_0z)^{1/2}} dL_x \quad (9)$$

取

$$\int L_x N(L_x, z) dL_x \sim (1+z)^n \quad (10)$$

得

$$\frac{dI(E_0)}{dE_0} \propto \int_0^{z_{\max}} (1+z)^p f[E_0(1+z)] dz \quad (11)$$

其中

$$p = (3.5 - 2.5\gamma) / (\gamma - 1), \quad \gamma = 1 + \frac{1}{n} \quad (12)$$

图 10 中点线区域相当于 $p=0$ 。图 12 给出以 (4) 式表示的 AGN 谱 ($\beta=1, x=0.075$ 和 $kT=125$) 所预期的背景谱 (实圆)、Marshall 给出的热韧致谱 (实线)、弥漫辐射流的 HEAO-1 (空圆) 及气球测量结果^[12] (星号)。

Schwartz & Tucker 讨论了谱形 (3) 或 (4) 的机制问题。如取 AGN 的谱形为 (3) 式, 从理论上可用同步加速辐射的自康普顿散射解释, 另外电子谱指数具有高斯分布的混合谱也会是谱形 (3)。至于谱形 (4), 是热辐射与非热辐射的组合。例如正负电子对的平衡过程可产生幂律谱, 而吸积盘可产生其中的热成份。

Schwartz & Tucker 建议从观测资料上注意幂律谱是否不能准确地拟合 AGN 的 X 射线谱, 并提出有必要用这里提出的谱形 (3) 或 (4) 重新拟合有关的观测资料。这样一来, 只要引入两参数的上述谱形以代替幂律谱, 就可用 AGN 的 X 射线辐射来解释 0.2—160keV 的 XRB, 无需要求 AGN 的谱有演化。

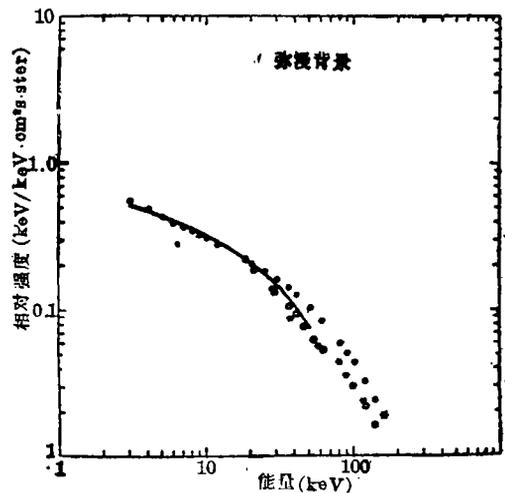


图 12 AGN 预期的 XRB 谱 (实圆)、Marshall 谱 (实线) 和 XRB 实测谱 (空圆和星号)^[12]

五、结 束 语

上面介绍了从理论上研究 XRB 的两派观点,两派论点至今仍在不断地争论, XRB 的问题尚未真正解决。这有赖于今后 X 射线更高灵敏度的观测(如 ROSAT 或 AXAF)。应该努力的方向是

1. 更准确地测量 AGN 的光谱,以得到 AGN 的更好的谱形。
2. 寻找新类型的弱 X 射线源,譬如活动星系的前身,年轻类星体或年轻星系等。
3. 进行更深度的搜索,导出更准确的 $\log N - \log S$ 的关系。

参 考 文 献

- [1] Boldt, E., *Physics Reports*, **146** (1987), 215.
- [2] Brecher, K. and Morrison, P., *Phys. Rev. Letters*, **23** (1969), 802.
- [3] Elvis, M., Wikes, B. J. and Tananbaum, H., *Ap. J.*, **292** (1985), 357.
- [4] Felton, J. E. and Morrison, P., *Ap. J.*, **146** (1966), 688.
- [5] Field, G. and Perrenod, S., *Ap. J.*, **215** (1977), 717.
- [6] Forman, W. and Jones, C., *Ann. Rev. Astr. Ap.*, **20** (1982), 547.
- [7] Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F. R. and Rossi, B. B., *Phys. Rev. Letters*, **9** (1962), 439.
- [8] Giacconi, R. and Zamorani, G., *Ap. J.*, **313** (1987), 20.
- [9] Grindlay, J., *Nature*, **273** (1978), 211.
- [10] Hamilton, T. T. and Helfand, D. J., *Bull. A. A. S.*, **17** (1985), 857.
- [11] Holt, S. S., in *X-ray Astronomy with the Einstein Satellite*, ed. by R. Giacconi, p. 173, (1981).
- [12] Kinzer, R., Johnson, W. and Kurfess, J., *Ap. J.*, **222** (1978), 370.
- [13] Marshall, F. E., Boldt E. A., Holt, S. S., Miller, R., Mushotzky, R. F., Rose L. A., Rothschild, R. E. and Serlemitsos, P. J., *Ap. J.*, **235** (1980), 4.
- [14] Murray, S. S., in *X-ray Astronomy with the Einstein Satellite*, ed. by R. Giacconi, p. 281, (1981).
- [15] Rothschild, R., Mushotzky, R. F., Baity, W., Gruber, D., Matteson, J. and Peterson, L., *Ap. J.*, **269** (1983), 5.
- [16] Schmidt, M. and Green, R. F., *Ap. J.*, **305** (1986), 68.
- [17] Schnopper, H. W., Davis, M., Delvaile, J. P., Geller, M. J. and Huchra, J. P., *Nature*, **275** (1978), 719.
- [18] Schwartz, D. A. and Gursky, H., in *X-ray Astronomy*, ed. by R. Giacconi and H. Gursky, p. 359, (1974).
- [19] Schwartz, D. A. and Tucker, W. H., *Ap. J.*, **332** (1988), 157.
- [20] Setti, G., in *Nonthermal and Very High Temperature Phenomena in X-ray Astronomy*, ed. by G. C. Perola and M. Salvati, p. 159, (1985).
- [21] Silk, J., *Ann. Rev. Astr. Ap.*, **11** (1973), 269.

(责任编辑 林一梅)

Cosmic X-Ray Background Radiation and Active Galactic Nuclei

Wang Zhenru

(Center of Astronomy and Astrophysics, CCAST[World Lab.])

and

(Department of Astronomy, Nanjing University)

Abstract

The recent researches of cosmic X-ray background radiation are introduced in this paper. It is stretched mainly on two classes of theoretical point of view—origin from discrete extragalactic sources or diffuse origin. We discuss in detail on the focus between the arguments of the above two basic views which are very closely related to the X-ray radiation of active galactic nuclei.