

上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

BACHELOR' S THESIS



论文题目：一种基于 X 射线图像功率谱分
析的冷核星系团甄别方法

学生姓名：张宸浩

学生学号：5120729005

专 业：物理学（国际班）

指导教师：徐海光

学院(系)：物理与天文系

上海交通大学

毕业设计（论文）学术诚信声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

上海交通大学 毕业设计（论文）版权使用授权书

本毕业设计（论文）作者同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本毕业设计（论文）的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本毕业设计（论文）。

保密 ，在 ____ 年解密后适用本授权书。

本论文属于

不保密 。

（请在以上方框内打“√”）

作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

一种基于 X 射线图像功率谱分析的冷核星系团甄别方法

摘要

本文通过研究钱德拉 X 射线望远镜观测的 X 射线图像二维功率谱来提出一种新的诊断法用以区分冷核星系团 (CC) 和非冷核星系团 (NCC)。我们的样本包含 41 个星系团 (群, $z=0.01\sim 0.54$), 它们全部具有高光子数, 足够的角解析度, 相对完整的探测器覆盖, 用三种传统诊断法分类 (CC-NCC) 一致的特点, 并且都选自于钱德拉数据库。我们发现得到的图像功率谱在对数空间的大波数区域可以很好的用常数项表示, 而在小波数区域, 所有星系团的功率谱都存在着明显的功率超出 (相比于常数项), 并且冷核星系团的功率超出要更明显。通过引入新的冷核诊断参数: 功率超出指数 (PEI), 我们将自己样本中的星系团进行分类, 并与三种传统诊断法的分类结果进行比较, 发现一致度很高。通过计算模拟星系团的 PEI 值, 我们发现新的诊断指数对红移 0.5 以内, 中等程度大小, 大质量的星系团 (来自于钱德拉或者 XMM-Newton 观测) 适用性仍然很高。相比于三种传统的冷核诊断法, 本文新提出的冷核诊断法有很多优势, 例如, 新方法不用考虑到由星系团吸收所引起的 X 射线晕重心偏移问题, 并且相对应的计算都是很简单的, 几乎不涉及到复杂的光谱分析。

关键词: 星系, 星系团, 星系团内介质, 成像光谱技术, 功率谱

A NEW WAY TO DISTINGUISH COOL CORE CLUSTERS WHICH BASED ON THE ANALYSIS OF X-RAY IMAGE POWER SPECTRUM

ABSTRACT

In this work we propose a new diagnostic to segregate cool core (CC) clusters from non-cool core (NCC) clusters by studying the two-dimensional power spectra of the X-ray images observed with the Chandra X-ray observatory. Our sample contains 41 members ($z=0.01\sim 0.54$), which are selected from the Chandra archive when a high photon count, an adequate angular resolution, a relatively complete detector coverage, and coincident CC-NCC classifications derived with three traditional diagnostics are simultaneously guaranteed. We find that in the log-log space the derived image power spectra can be well represented by a constant model component at large wavenumbers, while at small wavenumbers a power excess beyond the constant component appears in all clusters, with a clear tendency that the excess is stronger in CC clusters. By introducing a new CC diagnostic parameter, i.e., the power excess index (PEI), we classify the clusters in our sample and compare the results with those obtained with three traditional CC diagnostics. We find that the results agree with each other very well. By calculating the PEI values of the simulated clusters, we find that the new diagnostic works well at redshifts up to 0.5 for intermediately sized and massive clusters with a typical Chandra or XMM pointing observation. The new CC diagnostic has several advantages over its counterparts, e.g., it is free of the effects of the commonly seen centroid shift of the X-ray halo caused by merger event, and the corresponding calculation is straightforward, almost irrelevant to the complicated spectral analysis.

Key words: galaxies, clusters, intracluster medium, imaging spectroscopy, power spectrum

目 录

第一章 引言.....	1
第二章 样本选择和数据准备.....	3
第三章 数据分析和结论.....	6
3.1 背景.....	6
3.2 气体性质的成像光谱研究.....	6
3.2.1 气体温度分布.....	6
3.2.2 X 射线表面亮度轮廓和气体密度分布.....	6
3.2.3 特征半径 r_{500}	7
3.2.4 传统诊断法下的 SCC-WCC-NCC 分类.....	8
3.2.5 X 射线图像的功率谱.....	8
第四章 讨论.....	14
第五章 总结.....	21
参考文献.....	22
谢辞.....	24

第一章 引言

过去 20 年的 X 射线观测表明一半以上的星系团都有一个明亮的, 致密的核, 在这个核内的星系团内介质 (ICM) 已经冷却到温度低于核周围的气体, 所以像这样的冷核 (CC, 由 Molendi & Pizzolato 在 2001 年提出的术语) 星系团中央的 X 射线辐射通常会达到顶峰。例如, 在基于反投影图像分析的爱因斯坦样本的 207 个星系团中, White 等 (1997) 发现冷核星系团占总数的 $62^{+12}_{-15}\%$ 。几乎在同一时间, Peres 等 (1998) 研究了 ROSAT 观测的 55 个星系团样本并发现其中 70-90% 的样本星系团可以被分类成冷核。随后 Chen 等 (2007) 利用图像光谱学研究了 ASCA 和 ROSAT 数据库中的 106 个星系团, 这些星系团选自 HIFLUGCS 样本 (X 射线流量最高的星系团样本; Reiprich 2001; Reiprich & Bohringer 2002), 他们推测出样本中有 49% 是冷核星系团。最近通过分析统计完备的钱德拉数据样本 (64 个星系团选自 HIFLUGCS 样本), Hudson 等 (2010) 发现冷核星系团存在的概率是 72% (不同研究中冷核星系团百分比的不同主要是由于对冷核的定义不同, 例如, 见 Hudson 等 (2010) 对于不同冷核诊断法的研究)。尽管以上所有研究样本中星系团的红移都小于 0.2, 并且是流量限制的, 因此可能会偏向星系团中出现明亮的核, 我们还是可以清楚的认为冷核出现在红移小于 0.2 的星系团中是一个比较普遍的现象。但是直到今天, 冷核的产生机制和维持条件仍未完全弄清

一个典型冷核的特征辐射冷却时间是短于星系团的年龄的, 因此根据传统冷却流模型的预测 (Fabian 1994), 一个明显的大质量沉积速率 (约为 $10^{2-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$) 的冷却流应该已经在运作了。但是, 观测到的冷核 X 射线气体温度从不会低于几个 keV, 并且对于那些被假设的有宽阔温度光谱分布的气体, 尤其是那些迅速冷却到 10^4K 以下的, 如果冷却流没有阻碍的在射电, 红外, 光学, UV 波段中进行, 将会有更少的冷却现象被发现。理论与观测的差距引入了额外的加热机制 (见 Makishima 等 2001; McNamara & Nulsen 2007; Fabian 2012), 由活动星系核 (AGN) 引起的加热是最普遍的, 由于 AGN 既具有足够的活跃程度, 又是可以自我调整的。事实上, 通过探测最亮中央星系周围大小几乎和冷核在同一尺度上 (见 Fabian 等 2006; Wise 等 2007; Baldi 等 2009; Blanton 等 2011) 的 X 射线腔, 喷流, 瓣, 或许还有小型射电晕 (小型射电晕与 AGN 的联系并不紧密, 见 Feretti 等 2012), 我们可以发现 CC 与 AGN 之间存在着明显的联系。在大约 70% 的冷核星系团中, 中央主导星系都是射电星系 (见 Burns 1990; Dunn & Fabian 2006; Best 等 2007; Mittal 等 2009), 并且几乎在所有冷核星系团中, 我们都可以在 X 射线气体内发现一个射电喷射的 AGN 产生腔 (见 Burns 1990; Eilek 2004; Sanderson 等 2006; Fabian 2012), 此外, 射电成分的多少与冷核强度的大小有着很强的关联性 (例如, 从弱冷核星系团演化为强冷核星系团后, 射电成份会从 67% 增长到 100%, 见 Mittal 等 2009)。因此, 我们可以很自然的预测 AGN 的喷发会压抑冷核星系团核区域的过度冷却并且使星系团维持在冷核状态, 同时在冷核燃料中冷却气体的反馈会控制 AGN 的活动 (见 Donahue 等 2005)。

尽管 AGN 和冷核自适应的相互作用是有条理的, 但这种自适应的相互作用并不能解释对非冷核星系团的观测, 在非冷核星系团中冷核被阻止形成并且 AGN 的燃料应该是已经被熄灭了的。第一个反例是 Gastaldello 等 (2008) 提出的, 他们发现在星系团 AWM4 中气体温度有着相对平坦的分布 (大约在 2.6keV 左右), 并且会在远离星系团中心 200kpc 的位置处快速下降 (越往外温度越低), 这说明在过去的一段主要加热时期中冷核已经被消除了。

此结论是有事实依据的，在 AWM4 中，相对应的中央冷却时间很长（大约 3Gyr）并且中央气体的熵很高。即使用最新的高质量钱德拉数据，也只能在星系团中央 2kpc 以内识别出一个很小的类冷核的结构或者星系冕（Sun 2009; O'Sullivan 等 2010）。与 A1650 和 A2244 展示出相似的热力学性质形成对照（Donahue 等 2005），AWM4 有一个中等活跃程度的中央射电星系并且它的射电瓣一直扩展到 100kpc 处，这说明了非冷核系统也可能拥有 AGN。事实上，类似的 AGN 爆发也发生在大约 45% 的非冷核星系团系统中（Mittal 等 2009; Sun 2009）。明显以上这些结果暴露出目前我们对 CC-AGN 之间联系的理解并不透彻，同时也提出了一个具有挑战性的问题：冷核星系团和非冷核星系团之间是否有明显的区别；也就是说冷核系统和非冷核系统的分类是否是本质上可靠的？为了回答这个问题，我们明显需要在冷核星系团和非冷核星系团的 X 射线性质上做一个更深层次的对比。

为了定义冷核和非冷核之间的区别，人们已经提出了很多种不同的诊断法，例如，中央温度下降（Sanderson 等 2006; Burns 等 2008），中央冷却时间（Bauer 等 2005; O'Hara 等 2006; Donahue 2007），表面亮度比（Santos 等 2008），质量沉积速率（Chen 等 2007），X 射线表面亮度的 cuspiness（Vikhlinin 等 2007）。为了确定这些方法中哪一个能够最明确的区分冷核星系团和非冷核星系团，Hudson 等（2010）对一个含有 64 个 HIFLUGCS 星系团的样本（红移均小于 0.2）测试了 16 种诊断法，并发现对于那些具有高质量数据离我们比较近的星系团，中央冷却时间是最优化的诊断参数，而对于高红移星系团（红移大于 0.03），cuspiness 是最优化的诊断系数。在本文中我们依据对 X 射线图像功率谱的研究引入一种新的冷核诊断法来解决上面提到的问题，这种新的诊断法可以提供非常精确的图像细节信息（见 Walker 等 2015; Zhuravleva 等 2015），样本中的 41 个星系团（ $z = 0.01 \sim 0.54$ ）全部选自于钱德拉近十五年来的数据档案。本文的组织构架如下，在第二章我们介绍了样本的选择标准和数据的准备处理过程。在第三章，我们提供了数据分析过程和图像功率谱的计算过程。在第四和第五章，我们讨论了我们得出的结论并且总结了此项工作。整篇文章我们采用的是一个平坦的 Λ CDM 宇宙学模型，密度参数是 $\Omega_{m=0.27}$ 和 $\Omega_{\Lambda} = 0.73$ ，哈勃常数是 $H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。除非有特殊说明，否则我们采用的都是 Grevesse & Sauval (1998) 中的太阳丰度标准，误差采用 68% 的置信度。

第二章 样本选择和数据准备

为了描绘星系团 X 射线图像功率谱的特征，星系团 X 射线图像必须同时具有高光子计数，足够的角解析度和相对完整的探测器覆盖。因此，我们通过搜索钱德拉数据库到 2015 年 10 月 1 日为止的所有公共观测的星系团数据来构建我们的样本，并使样本数据满足以下三个条件：（1）星系团被观测到至少 $0.45r_{500}$ 的位置（ r_{500} 的定义是在星系团这个范围内引力质量的平均密度是宇宙中在此星系团红移处临界密度的 500 倍），同时 $0.35r_{500}$ 以内的区域完全或者几乎完全被钱德拉高级 CCD 成像光谱仪（ACIS）的 S3 或 I0-3 片 CCD 覆盖，（2）观测中 $0.45r_{500}$ 以内收集到的光子数大于 12500cts，（3）用三种传统的冷核诊断法（基于中央冷却时间，cuspsiness 和表面亮度比的诊断法）可以将星系团严格分类成强冷核（SCC），弱冷核（WCC）和非冷核（NCC）。用这些筛选标准我们选出了 41 个星系团作为研究样本，它们的基本性质列在表 1 中。对于每一个星系团，我们用标准的钱德拉数据处理过程来处理数据（工具是 CIAO v4.4 和 CALDB v4.4.8）。表一为 41 个样本星系团的基本性质，其中每个星系团只用了一次信噪比最高的观测数据，这样做（没有结合多次观测）的原因是一次信噪比最高的优质观测数据已经足够我们对星系团的 X 射线图像进行了分析，没有必要引入一些观测不良的数据增加工作量，而且不良观测还有可能对结果精确度产生较大影响。41 个样本星系团的红移在 0.01-0.54 之间，其中大部分小于 0.2。表一中后三列分别是星系团 $0.2 - 0.5r_{500}$ 内的平均温度；星系团维理半径内的总质量；星系团的维理半径（ r_{500} 的定义是在星系团这个范围内引力质量的平均密度是宇宙中在此星系团红移处临界密度的 500 倍）。

表1 样本星系团的基本性质

名称	观测 ID	R. A. (J2000)	Dec. (J2000)	z	$T_{\text{avg}}^{\text{b}}$ (keV)	M_{500} ($10^{14}M_{\odot}$)	r_{500} (kpc)
A0193	6931	01:25:07. 3	+08:41:36. 00	0.048 6	$3.83^{+0.18}_{-0.18}$	$1.66^{+0.90}_{-0.28}$	816^{+127}_{-50}
A0520	4215	04:54:09. 7	+02:55:23. 41	0.199 0	$9.04^{+0.08}_{-0.08}$	$6.78^{+0.74}_{-0.48}$	1246^{+44}_{-30}
A0697	4217	08:42:53. 3	+36:20:12. 00	0.282 0	$12.43^{+1.31}_{-1.34}$	$11.34^{+6.04}_{-3.86}$	1439^{+220}_{-186}
A0795	1173	09:24:05. 4	+14:10:21. 00	0.135 9	$5.09^{+0.27}_{-0.27}$	$2.64^{+0.36}_{-0.52}$	928^{+41}_{-66}
A0963	903	10:17:03. 4	+39:02:53. 66	0.206 0	$6.59^{+0.28}_{-0.27}$	$4.20^{+0.66}_{-0.45}$	1060^{+53}_{-38}
A0970	1228	10:17:34. 5	-10:42:01.0 0	0.058 7	$4.18^{+0.39}_{-0.39}$	$5.94^{+7.75}_{-2.07}$	1245^{+390}_{-166}
A1068	1652	10:40:44. 5	+39:57:11. 07	0.137 5	$5.07^{+0.24}_{-0.24}$	$3.33^{+0.45}_{-0.39}$	1003^{+41}_{-50}
A1204	2205	11:13:20. 4	+17:35:40. 93	0.170 6	$4.56^{+0.35}_{-0.32}$	$2.09^{+0.13}_{-0.28}$	850^{+17}_{-39}

A1651	4185	12:59:22.	-04:11:44.8	0.085	$6.50^{+0.32}_{-0.33}$	$6.79^{+2.04}_{-1.71}$	1293^{+118}_{-120}
		3	7	0			
A1664	7901	13:03:42.	-24:14:43.6	0.128	$5.35^{+0.26}_{-0.20}$	$3.79^{+0.40}_{-0.38}$	1050^{+36}_{-38}
		4	6	3			
A1736	4186	13:26:52.	-27:06:33.0	0.045	$2.60^{+0.07}_{-0.08}$	$1.98^{+0.60}_{-0.73}$	866^{+80}_{-123}
		1	0	8			
A1991	3193	14:54:31.	+18:38:32.	0.058	$2.64^{+0.07}_{-0.07}$	$0.90^{+0.04}_{-0.07}$	664^{+9}_{-18}
		5	94	7			
A2034	1288	15:10:13.	+33:31:41.	0.113	$8.96^{+0.32}_{-0.32}$	$8.24^{+1.20}_{-0.35}$	1367^{+63}_{-20}
		6	1	0			
A2061	1044	15:21:15.	+30:39:17.	0.078	$5.05^{+0.17}_{-0.17}$	$3.63^{+1.73}_{-0.52}$	1051^{+146}_{-51}
		9	3	0			
A2104	895	15:40:06.	-03:17:39.0	0.153	$9.24^{+0.49}_{-0.49}$	$5.45^{+0.68}_{-0.47}$	1176^{+47}_{-35}
		8	0	3			
A2163	1653	16:15:34.	-06:07:26.0	0.203	$16.09^{+0.52}_{-0.53}$	$19.49^{+2.07}_{-2.51}$	1770^{+61}_{-79}
		1	0	0			
A2255	894	17:12:31.	+64:05:33.	0.080	$6.64^{+0.14}_{-0.14}$	$4.23^{+0.81}_{-0.48}$	1105^{+66}_{-44}
		0	00	6			
A2319	3231	19:20:45.	+43:57:43.	0.055	$10.17^{+0.32}_{-0.32}$	$11.50^{+3.07}_{-4.75}$	1554^{+127}_{-253}
		3	00	7			
A2443	1225	22:25:07.	+17:20:17.	0.108	$5.93^{+0.49}_{-0.49}$	$4.25^{+2.43}_{-1.01}$	1097^{+178}_{-94}
		7	4	0			
A2554	1696	23:12:15.	-21:33:56.0	0.110	$4.54^{+0.41}_{-0.34}$	$1.83^{+0.30}_{-0.32}$	828^{+43}_{-52}
		1	0	8			
A2657	4941	23:44:56.	+09:11:24.	0.040	$3.99^{+0.12}_{-0.12}$	$2.41^{+1.59}_{-0.90}$	927^{+171}_{-135}
		3	00	2			
A2667	2214	23:51:39.	-26:05:03.2	0.230	$7.97^{+0.89}_{-0.74}$	$6.51^{+2.52}_{-1.75}$	1217^{+140}_{-120}
		3	2	0			
A3158	3712	03:42:39.	-53:37:50.0	0.059	$4.96^{+0.09}_{-0.09}$	$3.22^{+0.50}_{-0.37}$	1016^{+49}_{-41}
		6	0	7			
A3364	9419	05:47:34.	-31:53:01.0	0.148	$7.41^{+0.57}_{-0.57}$	$4.83^{+1.19}_{-1.13}$	1131^{+86}_{-96}
		2	0	3			
A3376	3202	06:02:10.	-39:57:22.3	0.045	$4.37^{+0.14}_{-0.11}$	$3.35^{+0.85}_{-0.58}$	1033^{+81}_{-62}
		1	1	6			
A3391	4943	06:26:15.	-53:40:52.0	0.051	$4.88^{+0.20}_{-0.21}$	$2.27^{+0.74}_{-0.43}$	905^{+89}_{-62}
		4	0	4			
A3395SW	4944	06:26:48.	-54:32:43.0	0.051	$4.71^{+0.24}_{-0.23}$	$2.10^{+0.56}_{-0.27}$	883^{+73}_{-39}
		0	0	0			
A3822	8269	21:54:06.	-57:50:49.0	0.075	$5.20^{+0.26}_{-0.25}$	$3.37^{+0.62}_{-0.49}$	1026^{+59}_{-52}
		2	0	9			
AC114	1562	22:58:52.	-34:46:55.0	0.312	$7.38^{+0.38}_{-0.38}$	$3.33^{+0.17}_{-0.18}$	947^{+15}_{-17}
		3	0	0			
ESO306-G170B	3188	05:40:06.	-40:50:08.7	0.035	$2.66^{+0.13}_{-0.11}$	$0.87^{+0.21}_{-0.14}$	662^{+50}_{-36}
		4	3	8			

IC1262	7322	17:33:02.	+43:45:44.	0.034	$2.28^{+0.07}_{-0.07}$	$0.43^{+0.05}_{-0.03}$	522^{+18}_{-12}
		8	07	4			
MACSJ2211.7-03	3284	22:11:44.	-03:49:47.0	0.270	$14.93^{+2.81}_{-2.32}$	$9.32^{+1.19}_{-0.92}$	1354^{+56}_{-46}
49		6	0	0			
NGC1550	3186	04:19:37.	+02:24:31.	0.012	$1.27^{+0.02}_{-0.03}$	$0.26^{+0.10}_{-0.03}$	446^{+51}_{-15}
		9	95	0			
PKS0745-19	6103	07:47:31.	-19:17:42.2	0.102	$8.93^{+0.66}_{-0.51}$	$7.11^{+0.72}_{-0.56}$	1305^{+43}_{-35}
		4	9	8			
RBS797	7902	09:47:12.	+76:23:13.	0.354	$9.69^{+0.82}_{-0.83}$	$6.45^{+1.50}_{-1.29}$	1164^{+84}_{-84}
		8	77	0			
RXCJ1524-3154	9401	15:24:12.	-31:54:21.9	0.102	$4.22^{+0.22}_{-0.16}$	$3.13^{+0.35}_{-0.38}$	993^{+35}_{-42}
		9	9	8			
RXCJ2014.8-243	1175	20:14:51.	-24:30:22.5	0.161	$7.14^{+0.44}_{-0.40}$	$4.15^{+0.51}_{-0.40}$	1072^{+42}_{-35}
0	7	6	2	2			
RXJ1423.8+2404	4195	14:23:47.	+24:04:42.	0.543	$7.67^{+0.51}_{-0.51}$	$3.76^{+0.69}_{-0.80}$	907^{+52}_{-69}
		9	37	1			
Zw3146	909	10:23:39.	+04:11:11.	0.290	$9.26^{+0.62}_{-0.61}$	$6.64^{+0.97}_{-0.55}$	1200^{+56}_{-34}
		6	90	6			
ZwCL0015	1225	00:06:20.	+10:51:52.	0.167	$6.85^{+0.53}_{-0.36}$	$2.83^{+0.28}_{-0.42}$	941^{+30}_{-48}
	1	6	98	5			
ZwCL2089	1046	09:00:36.	+20:53:40.	0.240	$4.60^{+0.34}_{-0.32}$	$2.50^{+0.35}_{-0.34}$	882^{+39}_{-542}
	3	9	27	0			

注：平均温度指的是星系团 $0.2 - 0.5 r_{500}$ 范围内的平均温度。

第三章 数据分析和结论

3.1 背景

为了构造每一次观测位置的背景模板,我们从 S3 或 I0-3 CCD 的边界区域(在这些区域内星系团内介质(ICM)热发射的影响相对较小)提取了光谱,并且用包含 ICM 发射的一个模型拟合被提取的光谱(由 Kalberla 等在 2005 年和 Dickey & Lockman 在 1990 年提出的被银河柱密度吸收的一个热 APEC 成份。如果约束不好的话,气体丰度固定在 $0.3Z_{\odot}$),我们从钱德拉科学中心中可利用的钱德拉 blanksky 模板得到了宇宙 X 射线背景(CXB, $\Gamma = 1.4$ 的一个幂律成份,同时也被银河柱密度吸收,见 Mushotzky 等 2000; Carter & Read 2007),银河发射($kT = 0.2\text{keV}$ 和 0.08keV 的两个 APEC 成份,见 Humphrey & Buote 2006; Gu 等 2012)和粒子诱导的硬性成份。当拟合效果达到最好时,观测的背景模板(例如,银河+CXB+粒子成份)也因此可以被确定。当相应的数据可以被使用时,我们也比较了我们背景模板(在 $0.2 - 2\text{keV}$ 内计算)的计数率(在 $0.2 - 2\text{keV}$ 这个范围内,粒子成份的影响变得不明显)和 ROSAT 巡天(RASS)散布的背景图的计数率,并获得了一致的结果。很难估计在每次观测中银河和 CXB 背景成份的场对场变化。在接下来的分析中,我们同时考虑了统计和系统的不确定性(保守估计为 10%,见 Kushino 等 2002)来近似的估计模型参数误差范围。

3.2 气体性质的成像光谱研究

3.2.1 气体温度分布

每次观测我们以星系团 X 射线峰值为中心,定义 5-7 个同心环。每个环的宽度可以保证在 $0.7 - 7\text{keV}$ 内至少有 2500cts 的光子数,同时,最外环的光子数至少是背景处的 2 倍。我们从这些同心环中提取了钱德拉 ACIS S3 或者 I0-3 的光谱,然后用 X 射线光谱拟合工具包 XSPEC v12.8.2 (Arnaud 1996) 对其进行拟合。为了最小化高能段仪器背景和低能段修正不确定性的影响,我们把拟合区间限定在 $0.7 - 7\text{keV}$ 。在模型拟合中,我们用 XSPEC 模型 PROJECT 来估计外层球壳对内层球壳的影响,并且用光学薄,碰撞的等离子体模型 APEC (Smith 等 2001) 拟合了反投影光谱,它被前景光电子吸收模型 WABS (柱密度 N_H 固定在相对应的银河值处,见 Kalberla 等 2005 和 Dickey & Lockman 1990) 所吸收。当气体金属丰度被约束的不够好时,我们把它定在 $0.3Z_{\odot}$ 。由于最内环有可能被共存的多相气体所污染(如果 F 测试显示拟合提高到 90%的置信水平,见 Makishima 等 2001),我们对其添加了额外的 APEC 吸收成份。在这种情况下,ICM 的温度被确定在热相范围内。通过对环集的最优拟合模型参数的三次样条插值法,我们可以得到平滑的气体温度轮廓和平滑的金属丰度轮廓。最终,我们用上面提到的光谱模型来拟合从 $0.2 - 0.5r_{500}$ 提取出来的光谱,并计算得到了星系团的平均气体温度(表 1)。

3.2.2 X 射线表面亮度轮廓和气体密度分布

通过计算每一个伴随热气体光谱(具有同星系团相同的平均温度和金属丰度)的光谱权重,我们得到了每一个观测图像的曝光图。我们先用曝光图移除光晕的影响和曝光时间波动来修正星系团 X 射线图像,然后用以气晕 X 射线峰值为中心的同心环在 $0.7 - 7\text{keV}$ 范围内提取 X 射线表面亮度轮廓 $S_x(R)$ (R 是二维的半径)。

在流体动力学平衡和球对称的假设下,当一个可探测到的中央表面亮度超出出现在内部

区域时, 三维的气体电子密度分布 n_e 可以用 β 模型表示 (见 Cavaliere & Fusco-Femiano 1976),

$$n_e(r) = n_0 \left[1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-\frac{3\beta}{2}} \quad (1)$$

或者用双 β 模型表示 (见 Jones & Forman 1984),

$$n_e(r) = n_{0,1} \left[1 + \left(\frac{r}{r_{c,1}} \right)^2 \right]^{-\frac{3\beta_1}{2}} + n_{0,2} \left[1 + \left(\frac{r}{r_{c,2}} \right)^2 \right]^{-\frac{3\beta_2}{2}} \quad (2)$$

其中 r_c 是核的半径, β 是斜率。由刚刚得到的气体密度轮廓和前一节得到的气体温度轮廓 $T(r)$, 金属丰度轮廓 $A(r)$, 我们可以构建出 X 射线表面亮度轮廓:

$$S_X(R) = \int_R^\infty \Lambda(T, A) n_e n_p(r) \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}} + S_{bkg} \quad (3)$$

其中 S_{bkg} 是背景, $\Lambda(T, A)$ 是冷却方程。当通过 χ^2 测试获得观测表面亮度轮廓的最优拟合时, 气体电子密度 $n_e(r)$ 就可以确定了。

3.2.3 特征半径 r_{500}

为了得到特征半径 r_{500} , 我们先计算了在流体静力学平衡假设下, 被钱德拉望远镜视野所覆盖区域的星系团总引力质量的分布:

$$M(< r) = -\frac{r^2 k_b T_X}{G \mu m_p} \left[\frac{1}{T_X} \frac{dT_X}{dr} + \frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dr} \right] \quad (4)$$

其中 $\mu = 0.61$ 是每个氢原子的平均分子质量, k_b 是玻尔兹曼常数, m_p 是质子质量。在钱德拉望远镜视野外的区域, 可以用 NFW 轮廓模型 (Navarro 等 1996) 来拟合上面得到的结果, 以获得质量轮廓 $M(< r)$:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(1+r/r_s)^2 r/r_s} \quad (5)$$

其中 $\rho(r)$ 是总引力质量的密度, 我们将最优拟合质量轮廓外推到一个特殊点上, 在此点以内的封闭引力质量的平均密度是在相同星系团红移条件下宇宙临界密度的 500 倍 (计算得到的 M_{500} 和 r_{500} 在表 1 中列出)。本文和前人工作中的计算得到的 M_{500} 数值对比如图 1 所示, 结果显示我们与前人的计算结果是一致的。

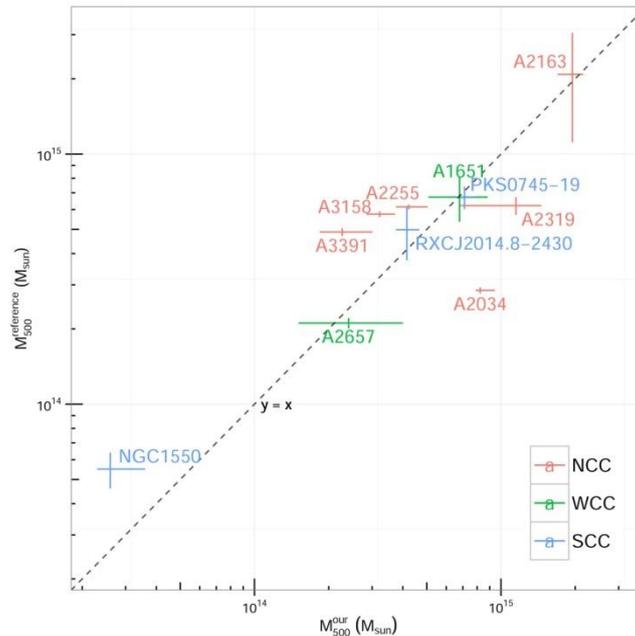


图 1 本文和前人工作中计算的 M_{500} 值对比 (Zhao 等 2015)

3.2.4 传统诊断法下的 SCC-WCC-NCC 分类

用前面观测得到的 X 射线表面亮度, 气体温度, 金属丰度和气体密度轮廓, 我们样本中的星系团可以被明确的分类成 SCC (强冷核), WCC (若冷核) 或者 NCC (非冷核) 系统, 并且分类结果与三种传统的, 经常被引用的 CC (冷核) 诊断法一致。这三种传统 CC 诊断法分别是中央冷却时间 (CCT, Hudson 等 2010)

$$t_{cool} \equiv \frac{5}{2} \frac{(n_e + n_i)kT}{n_e n_H \Lambda(T, A)} \text{ for } r < 0.048r_{500} \quad (6)$$

Cuspiness (Vikhlinin 等 2007)

$$\alpha \equiv -\frac{d \log(n_e)}{d \log(r)} \text{ at } r = 0.04r_{500} \quad (7)$$

和表面亮度集中参数 (Santos 等 2008)

$$C_{SB} \equiv \frac{\sum(r \leq 40kpc)}{\sum(r \leq 400kpc)} \quad (8)$$

其定义为星系团中心 40kpc 以内和 400kpc 以内的整体表面亮度比。通过这些诊断参数和表 2 列出的相对应的判断标准, 样本星系团可以被分类成 SCC, WCC 或者 NCC 系统, 分类结果列在表 3 中的第 8 列斜杠前。

我们发现样本中 12 个 SCC 星系团中有 9 个的中央光度超出与 $0.45r_{500}$ 以内总光度 ($R_{excess} \equiv L_{excess}^{0.7-7keV} / L_{total}^{0.7-7keV}$) 的比是明显的, 其比例从 8% 到 50% 不等 (表 3)。在 9 个 WCC 星系团中有 7 个被探测到中央表面亮度超出, 但超出比例 R_{excess} 明显要低于 SCC 星系团 (通常只有几个百分比), 除了 A1651 (约为 10%) 和 ESO306-G170B (约为 21%)。在 NCC 星系团中几乎探测不到中央光度超出, 即使有, 也低的可以忽略。

3.2.5 X 射线图像的功率谱

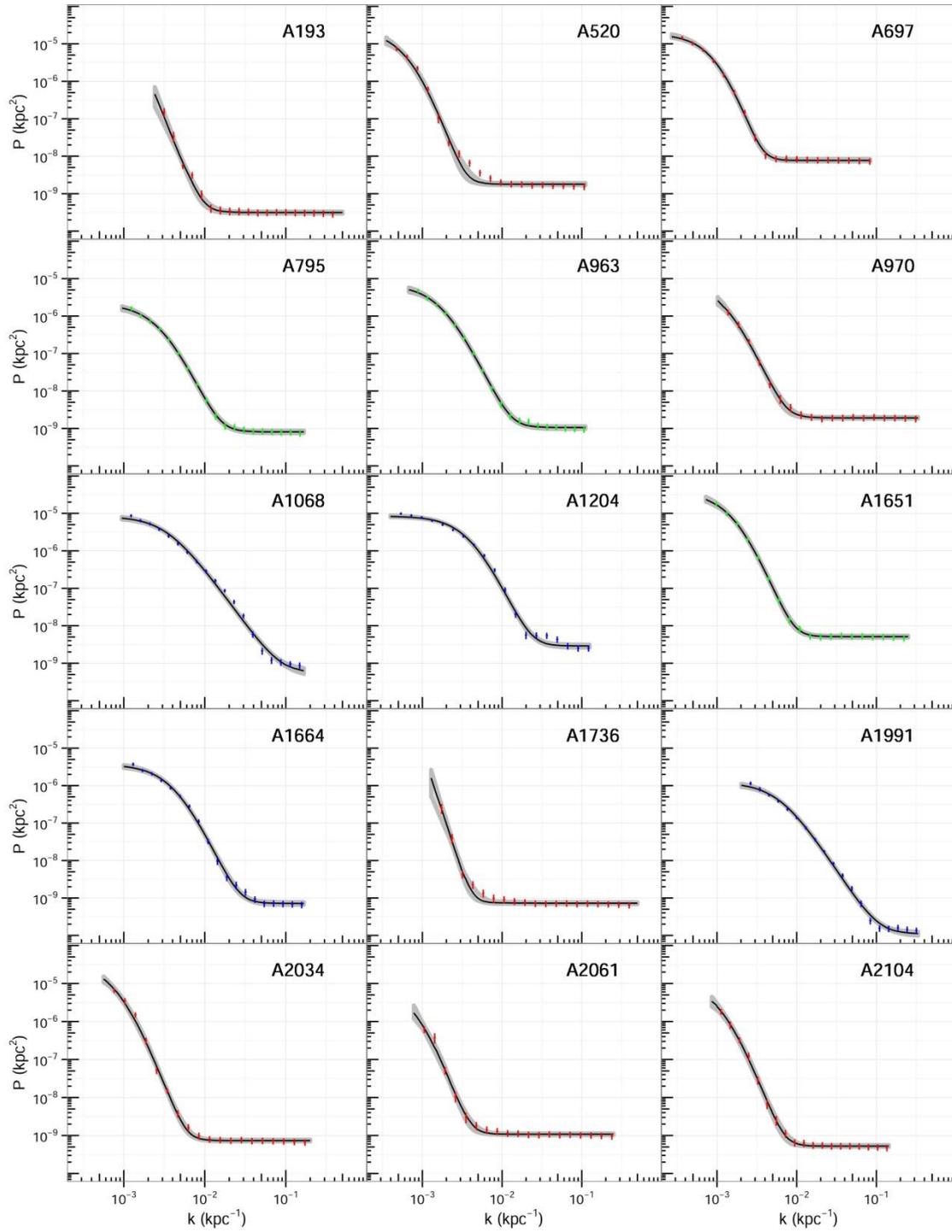
对于每一个星系团, 我们先计算了减去背景和曝光修正后的 X 射线图像的二维傅里叶变换 (流量分布 $F(\vec{R})$, 还没有进行平滑处理):

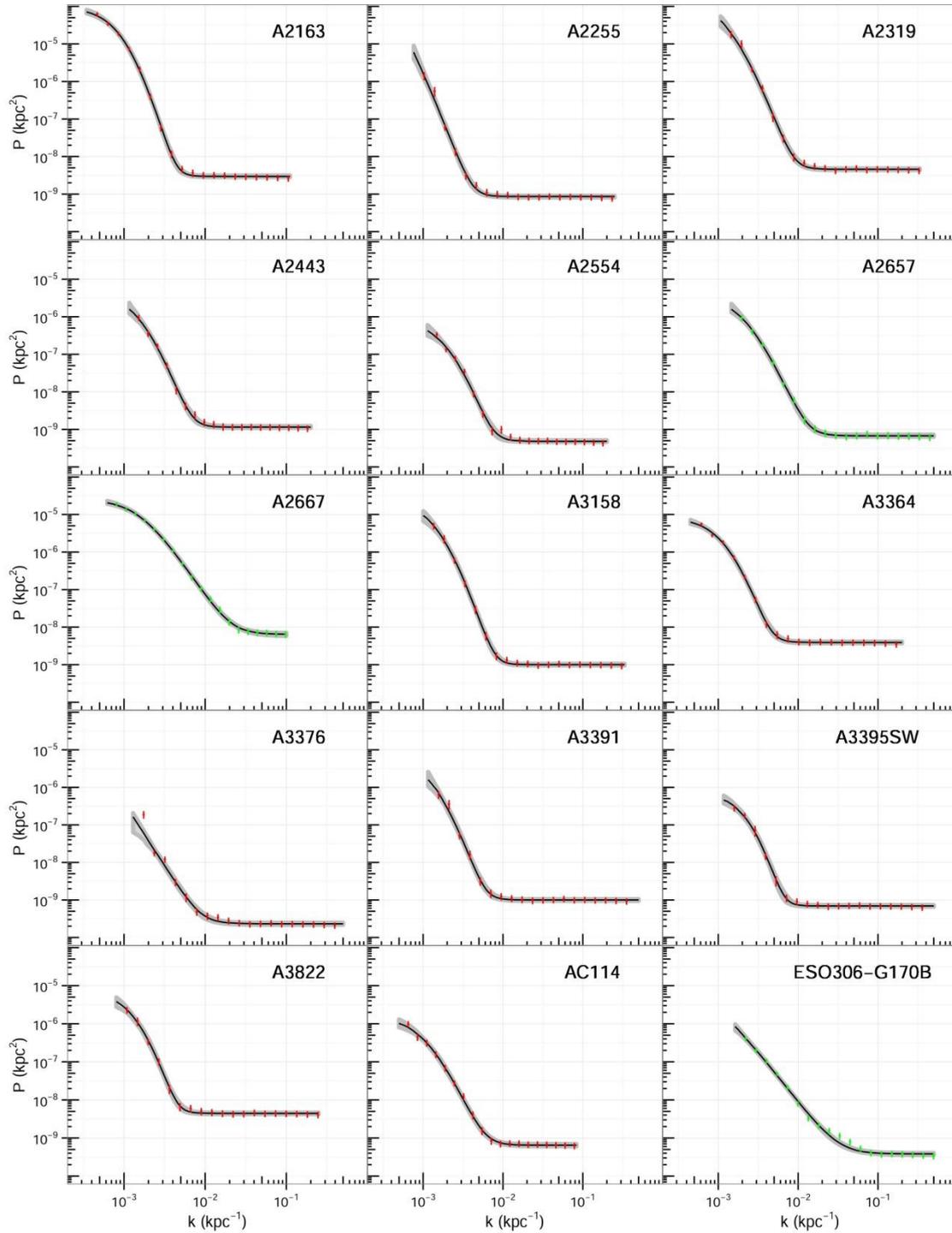
$$\tilde{F}(\vec{k}) = \int_S F(\vec{R}) e^{i\vec{R}\vec{k}} d\vec{R} \quad (9)$$

其中 k 是波数, S 代表的是用 MATLAB 工具 fft2 和 fftshift 处理的整幅图片。我们移除了所有探测到的超过 3σ 的点源, 然后在假设泊松统计的前提下用相邻的像素点填补了相对应的被挖去的点源区域。ACIS-I 的 4 片 CCD 之间的间隔也用相同的方法进行了填补。我们发现在我们感兴趣的波数范围内 ($0.2kpc^{-1} \leq k \leq 0.001kpc^{-1}$), 图像处理过程中引入的系统误差要远小于统计误差 (可能会被低估)。接下来我们可以得到二维功率谱:

$$P(k) = \langle |\tilde{F}(\vec{k})|^2 \rangle \quad (10)$$

接下来, 对于观测图像我们使用蒙特卡洛模拟来制造一个随机的波动分布 $F_{err}(\vec{R})$ 去估计每一个像素点上的波动 (假设符合泊松分布), 然后把波动图像添加到观测图像上去形成一个模拟图像 $F_{sim}(\vec{R})$ ($F(\vec{R}) + F_{err}(\vec{R})$)。在随机构造 100 幅模拟图片后, 我们计算了它们的功率谱, 然后用它们功率谱之间的散布去确定星系团图像功率谱 $P(k)$ 的误差范围。在模拟中考虑到精细的数值和仪器效应 (例如, 划分图像引起的误差, 周期性边界条件, 相邻像素点上曝光的不均匀, 移除和填补点源的方法, 见 Hudson 等 2010), 我们额外添加了 5% 的系统误差。在图 2 中我们画出了样本星系团的功率谱和相对应的误差范围。





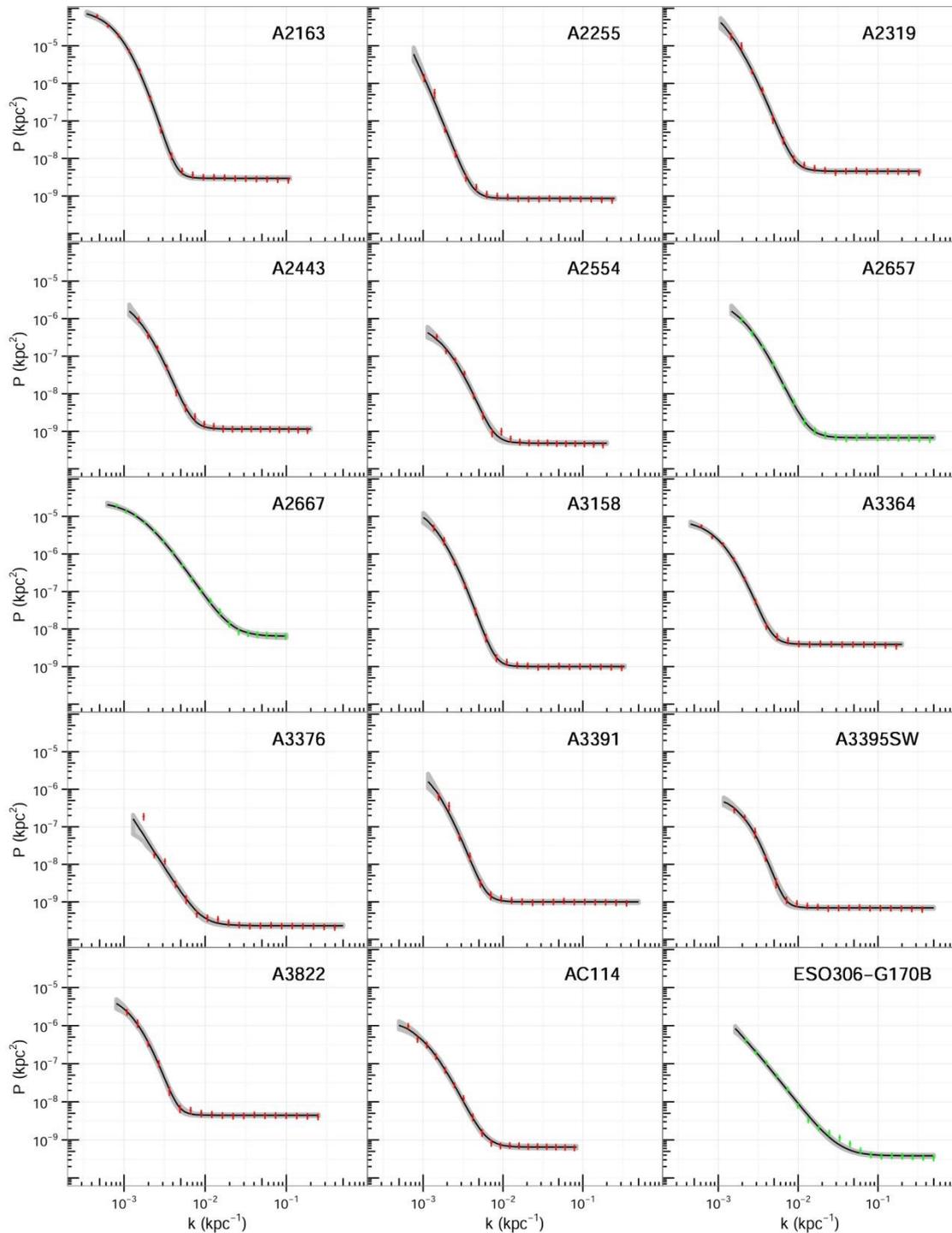


图 2 所有样本星系团的功率谱图

注：此图为每个星系团观测到的功率谱和功率谱的最优拟合模型（ β +常数成份）以及相对应的置信带，拟合模型曲线及其误差用黑色实线和灰色阴影画出。不同的颜色代表不同的星系团分类，蓝色代表 SCC，绿色代表 WCC，红色代表 NCC。需要注意的是尽管在小波数范围内功率的相对误差有大约 10%，由于对数化坐标轴，功率误差棒在图中并不明显。

我们发现在对数空间中随着波数的增大, 41 个样本星系团中有 39 个的图像功率谱变得很平坦, 并且当波数足够大时 (对于其中 31 个星系团, $k \geq 0.01 - 0.05 kpc^{-1}$; 对于其中 7 个星系团, $k \geq 0.05 - 0.1 kpc^{-1}$; 对于其中 1 个星系团, $k \geq 0.1 kpc^{-1}$) 可以用一个常数项表示, 然而在小波数区域所有星系团都出现了相比于常数项的功率超出, 并且明显 CC 星系团中的功率超出要强于 NCC 星系团中的功率超出。这很有可能是由于 CC 星系团有明亮的大核引起的 (Vikhlinin 等 2007; Santos 等 2008), 明亮的大核可能会明显增强冷却半径尺度上的功率 (r_{cool} , $\sim 0.1 r_{500}$ 见表 3; 冷却半径是气体冷却时间刚好小于 $7.7 \times 10^9 yr$ 的半径处, 见 Rafferty 等 2006)。为了说明上面的观点, 我们在图 3 中画了相对核亮度 (定义为 $0.048 r_{500}$ 半径范围内与 $0.45 r_{500}$ 半径范围内总表面亮度的比值) 与功率比 (定义为 $0.35 r_{500}$ 的功率与大波数处衰减为常数的功率的比值, 可以代表功率超出) 的对比图, 发现两个参数之间存在着明显的相关性。在对功率谱的拟合中我们试图在模型中添加一个 β 成份来代表功率超出, 并且发现对所有样本星系团, 模型 (β +常数成份) 可以在对数空间提供一个很好的对功率谱的拟合 (图 2)。在另一方面, 包含两个 β 成份的模型对大多数星系团功率谱的拟合效果较差。

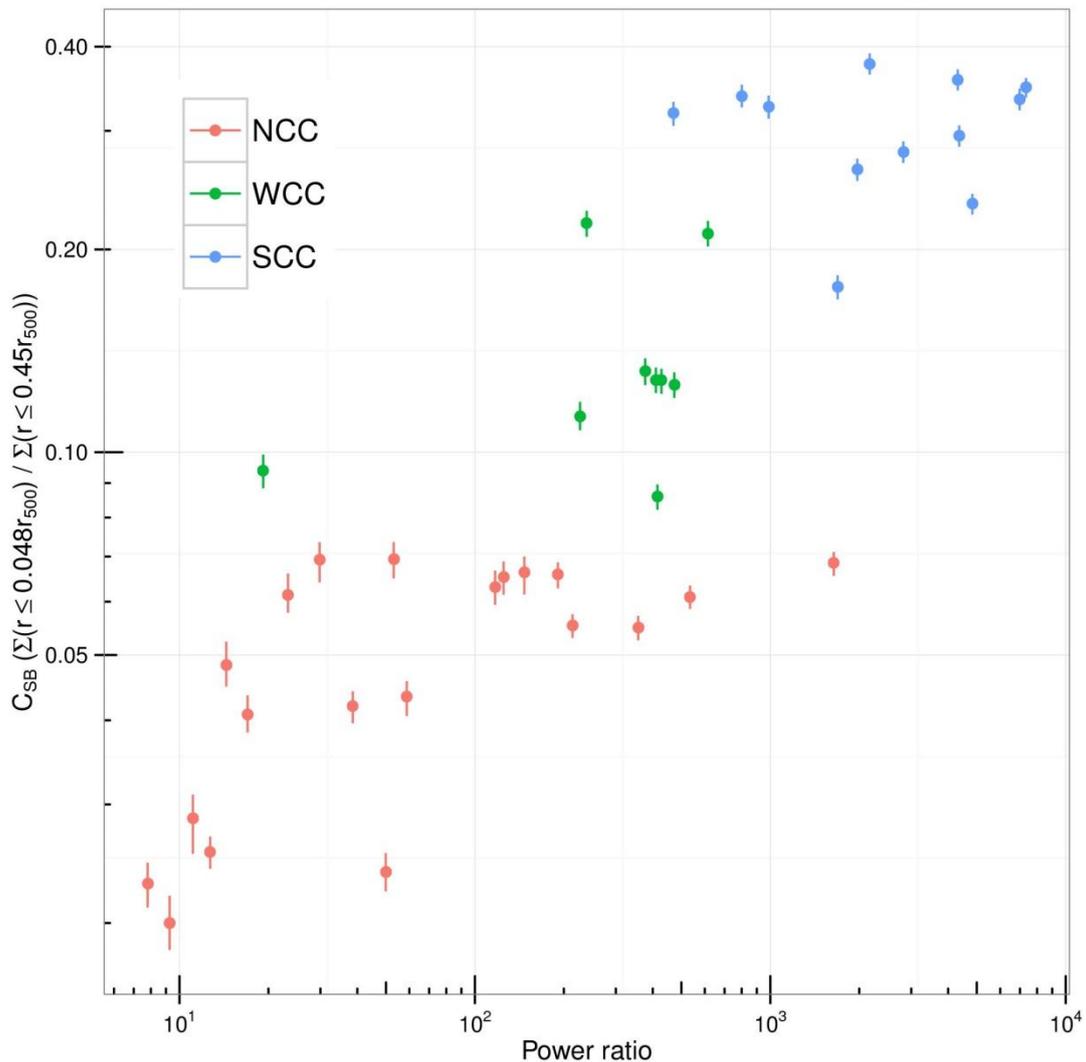


图 3 星系团相对核亮度与功率比的对比图

注: 功率比的定义是星系团功率谱 $0.35 r_{500}$ 处的功率与大波数处衰减为常数的功率的比值。SCC-WCC-NCC 的分类依据是三种传统冷核诊断法, 见 3.2.4 小节。

在图 4 中我们画了所有样本星系团 X 射线图像的二维功率谱和 X 轴经过 r_{500} 归一化, Y 轴经过 $0.01r_{500}$ 处功率归一化后的功率谱, 在所有情况下功率谱都在 5pixel^{-1} 处被截断。在图中我们根据以传统冷核诊断参数 (中央冷却时间, cuspsiness, 表面亮度比, 见表 2) 为依据的分类给功率谱标上颜色: 蓝色表示 SCC 星系团, 绿色表示 WCC 星系团, 红色表示 NCC 星系团。误差在小波数处大致为 10%, 在大波数处大致为 20%, 与 Zhuravleva 等在 2015 年研究中的误差尺度基本一致 (Zhuravleva 等 2015 主要研究的是英仙座星系团), 但在图中的轮廓看起来并不明显。尽管没有归一化的 SCC, WCC 和 NCC 系统的功率谱有很大的散布, 我们可以发现的它们的形状有系统性的差别。当我们观察归一化的功率谱时, 这些差别就更加明显了, 这说明钱德拉图像功率谱可以被用来分类 $z \leq 0.5$ 的星系团是 CC 还是 NCC 系统, 接下来我们会详细讨论。

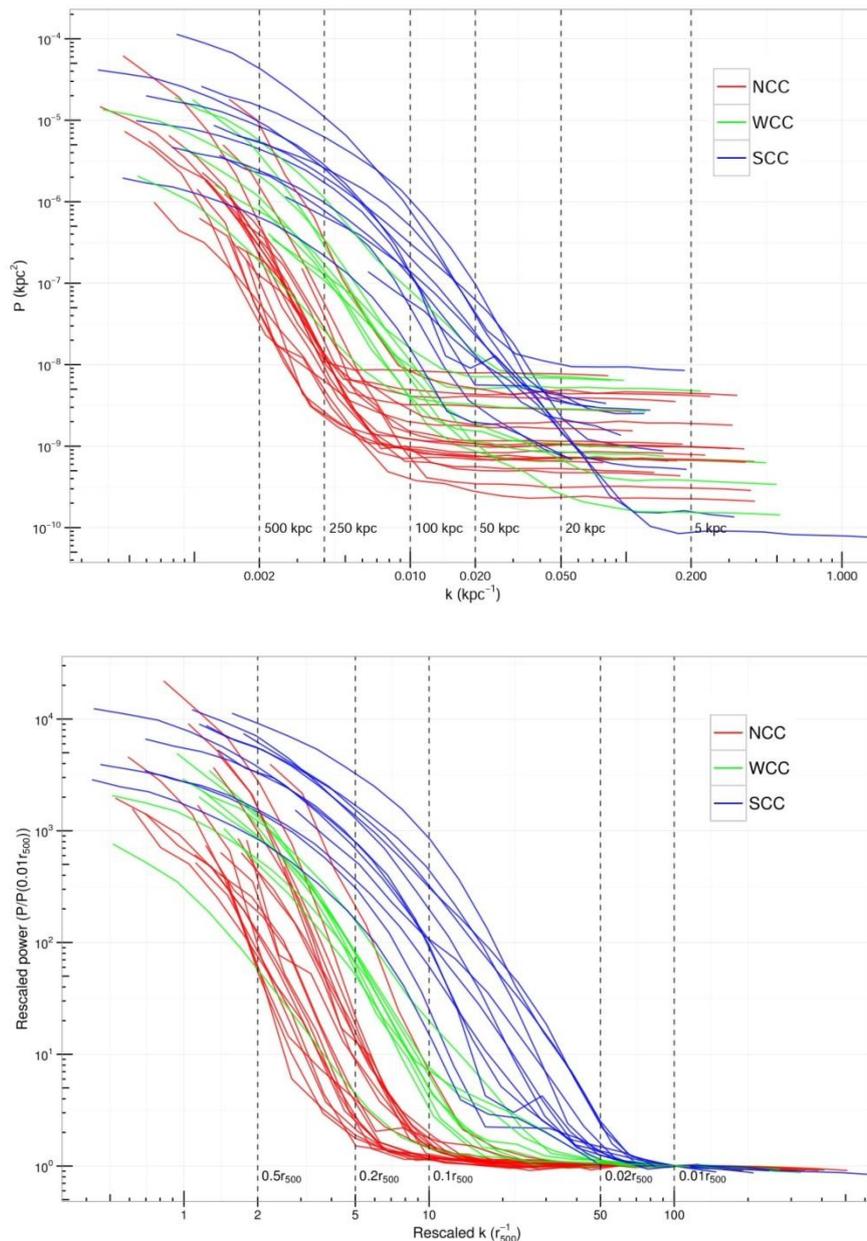


图 4 所有样本星系团的二维功率谱图

注: 下图是上图在 r_{500} 处和 $0.01r_{500}$ 功率处进行归一化后的图, 典型误差在小波数处大约为 10%, 而在大波数处大约为 20%。

第四章 讨论

为了能够很明显的区分出 SCC, WCC 和 NCC 系统的图像功率谱, 我们在归一化后的功率谱上定义两个特殊尺度, 分别对应波数 $k=1/0.35$ 和 $1/0.035$, 实空间 $0.35r_{500}$ 和 $0.035r_{500}$ 的尺度, 然后用两个尺度所代表的直线与归一化功率谱的两个交点来确定图 5 中的矩形区域, 并分别作为矩形区域的左上顶点和右下顶点。利用这个矩形区域, 我们引入一种新的 CC 诊断参数: 功率超出指数 PEI, 它可以量化功率超出的程度, 其表达式是 $\Delta_{PE} \equiv A_{below} / (A_{below} + A_{above})$, 其中 A_{below} 和 A_{above} 分别代表矩形中在功率谱曲线之下和之上的面积区域。

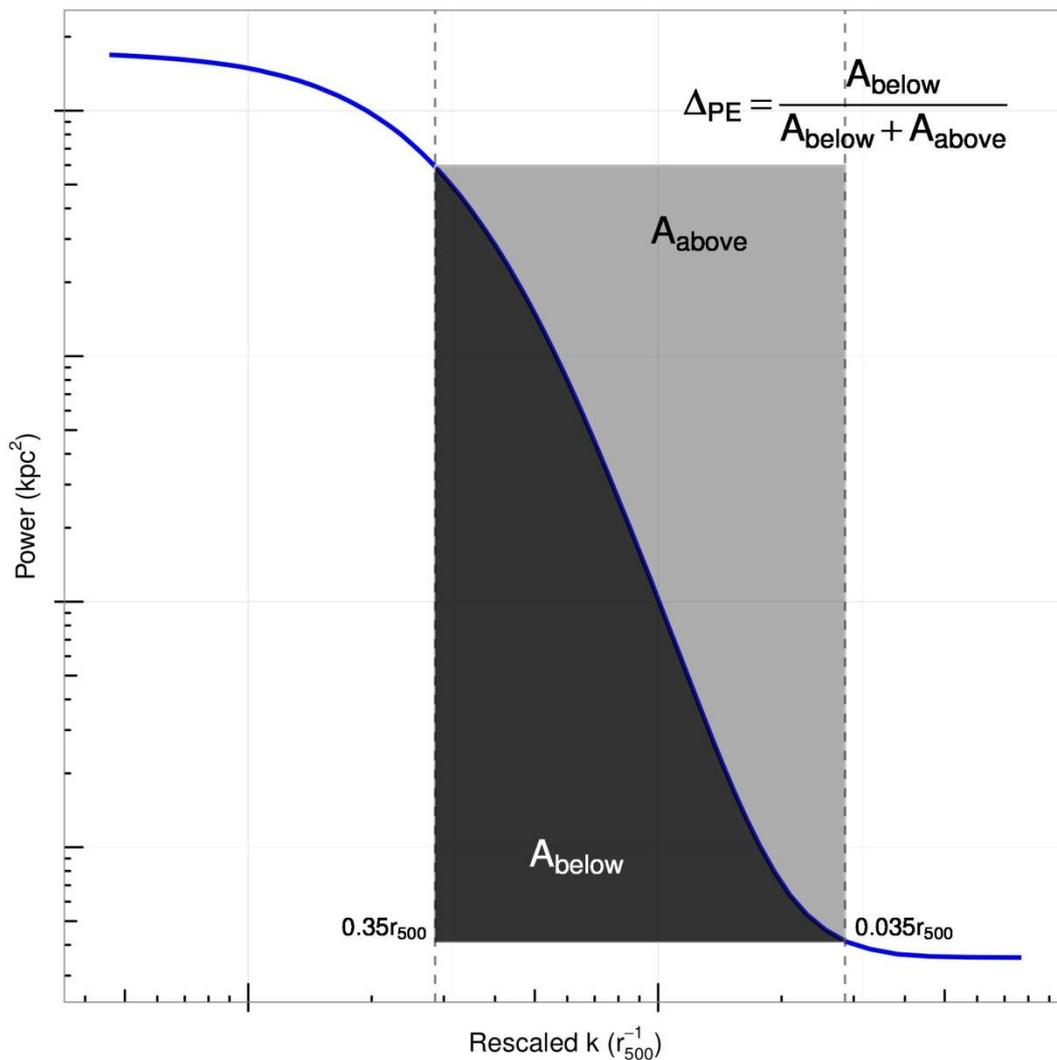


图 5 功率超出指数 (PEI) 的定义

这样定义的 CC 诊断法相比于传统方法有几个潜在的优势, 可能会对未来的大面积巡天有帮助 (如 e-ROSITA)。例如, PEI 的使用不用考虑到由并合现象引起的 X 射线晕的重心偏移效应 (并合可能会使 X 射线气体晕的重心选取变得困难), 并且相对应的计算是非常直接的, 几乎与复杂的光谱分析不相关。接下来我们用新的诊断参数和表 2 中列出的相对应的判

断标准对我们样本中的星系团进行了分类，结果如图 6 所示。我们发现我们的分类与传统 CC 诊断法的分类结果吻合度很高，如图 6 所示，除了三个特殊的星系团：A2319，A2667 和 ZwCl0015。下面将讨论可能造成分类不同的原因。

表 2 三种传统冷核诊断法和本文新引入的 PEI 诊断法

分类	CCT $t_{cool}(h_{71}^{-1/2}Gyr)$	Cuspiness α	Concentration C_{SB}	PEI Δ_{PE}
SCC	<1	>0.75	>0.155	>0.42
WCC	1-7.7	0.5-0.75	0.075-0.155	0.31-0.42
NCC	>7.7	<0.5	<0.075	<0.31

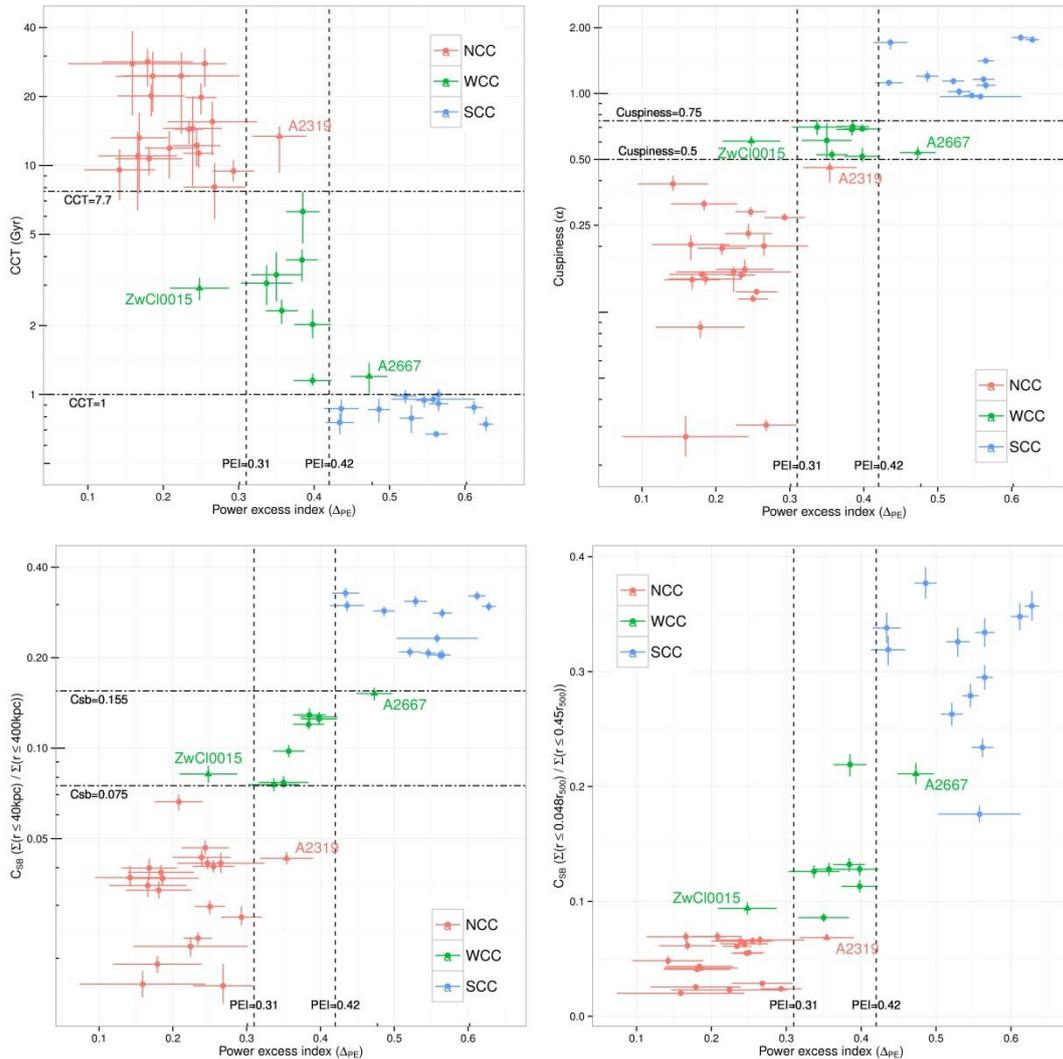


图 6 用三种传统诊断法和 PEI 诊断法得出的 SCC-WCC-NCC 分类对比图

注：右下角是用相对核亮度（3.2.5 节）和 PEI 诊断法得出的 SCC-WCC-NCC 分类对比图。

表 3 三种传统冷核诊断法和新的 PEI 诊断法对样本星系团的分类

名字 ¹	t_{cool} ² ($h_{71}^{-1/2}Gyr$)	α ³	C_{SB} ⁴	r_{cool} ⁵ (kpc)	Δ_{PE} ⁶	R_{excess} ⁷ (%)	分类 ⁸
A0193	$12.22^{+2.27}_{-2.31}$	$0.23^{+0.03}_{-0.01}$	$0.047^{+0.003}_{-0.002}$	$14.9^{+9.1}_{-6.4}$	0.24 ± 0.03	1.9 ± 0.5	NCC/NC C

A0520	$8.04^{+2.21}_{-2.22}$	$0.03^{+0.00}_{-0.00}$	$0.016^{+0.003}_{-0.002}$	/	0.27	/	NCC/NC
					± 0.04		C
A0697	$11.04^{+3.02}_{-4.62}$	$0.20^{+0.02}_{-0.03}$	$0.035^{+0.002}_{-0.003}$	/	0.17	/	NCC/NC
					± 0.05		C
A0795	$3.87^{+0.42}_{-0.74}$	$0.68^{+0.02}_{-0.04}$	$0.120^{+0.006}_{-0.005}$	$83.6^{+13.5}_{-7.2}$	0.38	/	WCC/W
					± 0.02		CC
A0963	$2.32^{+0.27}_{-0.29}$	$0.52^{+0.03}_{-0.03}$	$0.098^{+0.005}_{-0.005}$	$88.1^{+12.2}_{-9.9}$	0.36	1.7 ± 0.2	WCC/W
					± 0.02		CC
A0970	$15.45^{+3.47}_{-4.44}$	$0.20^{+0.03}_{-0.02}$	$0.041^{+0.003}_{-0.003}$	/	0.26	/	NCC/NC
					± 0.06		C
A1068	$0.91^{+0.06}_{-0.07}$	$1.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.281^{+0.011}_{-0.010}$	$109.4^{+4.4}_{-5.3}$	0.56	45.7	SCC/SCC
					± 0.01	± 21.9	
A1204	$0.75^{+0.07}_{-0.08}$	$1.12^{+0.02}_{-0.04}$	$0.328^{+0.013}_{-0.013}$	$111.6^{+8.0}_{-5.4}$	0.43	/	SCC/SCC
					± 0.02		
A1651	$3.06^{+0.60}_{-0.60}$	$0.70^{+0.05}_{-0.06}$	$0.076^{+0.004}_{-0.004}$	$66.8^{+18.9}_{-14.7}$	0.34	10.2	WCC/W
					± 0.03	± 1.7	CC
A1664	$0.99^{+0.06}_{-0.07}$	$1.14^{+0.03}_{-0.04}$	$0.209^{+0.008}_{-0.008}$	$93.4^{+3.8}_{-3.6}$	0.52	15.3	SCC/SCC
					± 0.01	± 2.7	
A1736	$24.62^{+6.50}_{-10.89}$	$0.15^{+0.01}_{-0.03}$	$0.022^{+0.002}_{-0.002}$	/	0.22	1.2 ± 0.3	NCC/NC
					± 0.08		C
A1991	$0.67^{+0.01}_{-0.02}$	$1.16^{+0.01}_{-0.03}$	$0.204^{+0.007}_{-0.007}$	$67.3^{+1.4}_{-1.3}$	0.56	50.4	SCC/SCC
					± 0.01	± 11.7	
A2034	$19.79^{+2.97}_{-3.09}$	$0.12^{+0.01}_{-0.00}$	$0.030^{+0.001}_{-0.002}$	/	0.25	0.3 ± 0.0	NCC/NC
					± 0.02		C
A2061	$27.75^{+10.82}_{-11.16}$	$0.03^{+0.01}_{-0.01}$	$0.016^{+0.002}_{-0.002}$	/	0.16	/	NCC/NC
					± 0.09		C
A2104	$27.77^{+4.58}_{-5.75}$	$0.12^{+0.00}_{-0.00}$	$0.040^{+0.002}_{-0.002}$	$9.5^{+8.1}_{-9.5}$	0.26	0.5 ± 0.1	NCC/NC
					± 0.03		C
A2163	$14.36^{+1.25}_{-2.04}$	$0.15^{+0.01}_{-0.01}$	$0.023^{+0.001}_{-0.001}$	/	0.23	/	NCC/NC
					± 0.02		C
A2255	$28.27^{+3.81}_{-6.21}$	$0.09^{+0.01}_{-0.01}$	$0.019^{+0.001}_{-0.001}$	/	0.18	/	NCC/NC
					± 0.06		C
A2319	$13.40^{+1.39}_{-4.11}$	$0.46^{+0.02}_{-0.07}$	$0.043^{+0.002}_{-0.002}$	/	0.35	0.8 ± 0.1	NCC/WC
					± 0.04		C
A2443	$14.51^{+5.54}_{-6.38}$	$0.16^{+0.02}_{-0.01}$	$0.043^{+0.003}_{-0.003}$	/	0.24	/	NCC/NC
					± 0.04		C
A2554	$11.87^{+2.20}_{-3.12}$	$0.20^{+0.01}_{-0.01}$	$0.066^{+0.004}_{-0.004}$	/	0.21	1.1 ± 0.3	NCC/NC
					± 0.03		C
A2657	$3.33^{+0.84}_{-0.79}$	$0.61^{+0.12}_{-0.11}$	$0.077^{+0.004}_{-0.003}$	$38.2^{+14.9}_{-12.6}$	0.35	1.0 ± 0.1	WCC/W
					± 0.03		CC
A2667	$1.20^{+0.18}_{-0.18}$	$0.54^{+0.03}_{-0.04}$	$0.152^{+0.007}_{-0.008}$	$135.9^{+14.2}_{-12.9}$	0.47	4.5 ± 0.5	WCC/SC
					± 0.02		C
A3158	$11.27^{+1.28}_{-1.54}$	$0.29^{+0.02}_{-0.01}$	$0.041^{+0.002}_{-0.002}$	$24.8^{+7.0}_{-3.9}$	0.25	0.1 ± 0.0	NCC/NC
					± 0.02		C

A3364	$13.19^{+3.77}_{-5.65}$	$0.14^{+0.01}_{-0.01}$	$0.040^{+0.003}_{-0.004}$	$13.5^{+46.4}_{-13.5}$	0.17 ± 0.04	/	NCC/NC C
A3376	$9.44^{+1.10}_{-0.94}$	$0.27^{+0.01}_{-0.01}$	$0.027^{+0.002}_{-0.002}$	/	0.29 ± 0.03	/	NCC/NC C
A3391	$24.47^{+6.87}_{-7.37}$	$0.14^{+0.01}_{-0.01}$	$0.037^{+0.002}_{-0.002}$	/	0.19 ± 0.05	0.7 ± 0.2	NCC/NC C
A3395SW	$20.14^{+2.56}_{-3.74}$	$0.31^{+0.01}_{-0.02}$	$0.039^{+0.002}_{-0.002}$	/	0.18 ± 0.04	/	NCC/NC C
A3822	$9.56^{+2.21}_{-2.51}$	$0.39^{+0.04}_{-0.03}$	$0.037^{+0.002}_{-0.002}$	$38.9^{+15.1}_{-9.5}$	0.14 ± 0.05	/	NCC/NC C
AC114	$10.71^{+1.39}_{-1.68}$	$0.15^{+0.00}_{-0.01}$	$0.034^{+0.002}_{-0.002}$	/	0.18 ± 0.04	/	NCC/NC C
ESO306-G170B	$2.02^{+0.34}_{-0.26}$	$0.52^{+0.05}_{-0.03}$	$0.125^{+0.006}_{-0.006}$	$45.9^{+6.9}_{-7.5}$	0.40 ± 0.02	20.7 ± 2.7	WCC/W CC
IC1262	$1.15^{+0.08}_{-0.06}$	$0.69^{+0.03}_{-0.02}$	$0.127^{+0.005}_{-0.005}$	$49.1^{+2.0}_{-2.8}$	0.40 ± 0.03	4.9 ± 0.6	WCC/W CC
MACSJ2211.7-0349	$6.28^{+1.39}_{-1.71}$	$0.71^{+0.04}_{-0.04}$	$0.129^{+0.007}_{-0.007}$	$81.7^{+24.1}_{-15.4}$	0.39 ± 0.02	/	WCC/W CC
NGC1550	$0.95^{+0.04}_{-0.04}$	$0.97^{+0.03}_{-0.02}$	$0.232^{+0.008}_{-0.008}$	$33.0^{+1.0}_{-1.6}$	0.56 ± 0.06	19.5 ± 3.4	SCC/SCC
PKS0745-19	$1.00^{+0.06}_{-0.07}$	$1.41^{+0.02}_{-0.04}$	$0.204^{+0.008}_{-0.007}$	$104.6^{+5.3}_{-4.1}$	0.56 ± 0.01	13.9 ± 1.0	SCC/SCC
RBS797	$0.86^{+0.10}_{-0.10}$	$1.20^{+0.07}_{-0.07}$	$0.286^{+0.010}_{-0.011}$	$138.1^{+10.0}_{-8.0}$	0.49 ± 0.01	/	SCC/SCC
RXCJ1524-3154	$0.88^{+0.06}_{-0.06}$	$1.80^{+0.07}_{-0.06}$	$0.321^{+0.011}_{-0.011}$	$79.1^{+3.2}_{-3.1}$	0.61 ± 0.01	/	SCC/SCC
RXCJ2014.8-2430	$0.74^{+0.06}_{-0.06}$	$1.76^{+0.07}_{-0.05}$	$0.296^{+0.011}_{-0.011}$	$104.5^{+5.3}_{-6.1}$	0.63 ± 0.01	37.5 ± 2.0	SCC/SCC
RXJ1423.8+2404	$0.87^{+0.08}_{-0.11}$	$1.71^{+0.07}_{-0.12}$	$0.298^{+0.012}_{-0.013}$	$114.6^{+10.7}_{-6.6}$	0.44 ± 0.02	26.1 ± 3.6	SCC/SCC
Zw3146	$0.94^{+0.07}_{-0.06}$	$0.98^{+0.02}_{-0.02}$	$0.207^{+0.008}_{-0.008}$	$143.0^{+5.8}_{-6.9}$	0.55 ± 0.01	7.6 ± 0.5	SCC/SCC
ZwCL0015	$2.91^{+0.32}_{-0.33}$	$0.61^{+0.03}_{-0.03}$	$0.082^{+0.005}_{-0.005}$	$49.1^{+7.3}_{-6.0}$	0.25 ± 0.04	4.1 ± 0.7	WCC/NC C
ZwCL2089	$0.79^{+0.11}_{-0.11}$	$1.02^{+0.04}_{-0.04}$	$0.308^{+0.013}_{-0.012}$	$113.8^{+10.7}_{-8.7}$	0.53 ± 0.02	23.1 ± 4.4	SCC/SCC

注：（1）星系团名称，（2）中央冷却时间（CCT，定义在 $0.048r_{500}$ ），（3）cuspsiness，（4）表面亮度比，（5）冷却半径，（6）功率超出指数（PEI），（7）中央光度超出与总光度的比值，（8）依据三种传统诊断法和新诊断法 PEI 的分类。

A2319: 这是一个很近的大质量并合系统，它有一个扩展到大约 $35'$ ($\sim 2\text{Mpc}$; Storm 等 2015) 的巨大射电晕。通过检查它的钱德拉观测图像，我们发现这个星系团的核区域是松散的，平坦的，但却演化出了很明显的边界。此外这个星系团的核显示出了分层的结果，可以看到一个平坦的核正在嵌入另一个。用对类似的图像结构比较敏感的 PEI 诊断法，我们将这

个星系团分类成 WCC 系统。这是被 O'Hara 等 (2004) 的研究结果所支持的, 他们发现了一个相对较弱的冷气体团会轻微的影响钱德拉温度图像中的 X 射线峰并使它被辨认为一个之前不知道的冷核。在另一方面, 我们发现因为 A2319 的气体温度很高, 核很松散, 相比于典型的 WCC 星系团它有更长的中央冷却时间和比较低的表面亮度比。这就是用传统的 CC 诊断法会将它分类成 NCC 星系团的原因。

A2667: 用 PEI 诊断法我们将这个明亮的星系团分类成 SCC 系统, 依据来源于在我们的反投影光谱分析 (图 7-1) 中, 可以在中心 100kpc 的范围内探测到剧烈的气体温度下降。之前的 ROSAT 观测发现 A2667 中央主导星系中出现了很强的 H_{α} 和 $[O II] \lambda 3727$ 线, 强力的论证了这个星系团中有一个冷核 (Rizza 等 1998)。值得注意的是, 用中央冷却时间和表面亮度比的诊断法可以将这个星系团边界的分类为 SCC 系统 (1σ 置信水平), 但用 Cuspsness 诊断法, 这个星系团将被分类为 WCC 系统 (接近 NCC 系统)。

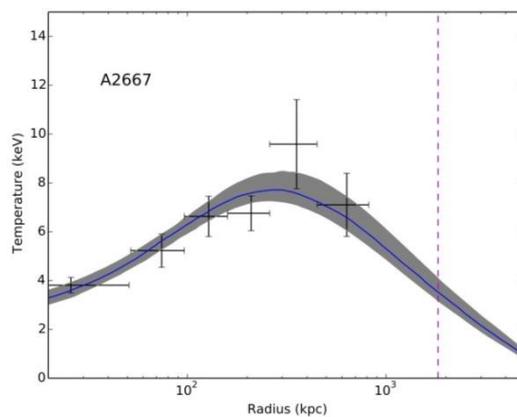


图 7-1 用钱德拉望远镜得到的 A2667 的气体温度轮廓图

注: 红色虚线代表的是 $1.5r_{500}$ 。

ZwCL0015: 相比于上面提到的两个阿贝尔系统, 这个星系团在文献研究中出现的比较少。观察它的钱德拉图像我们可以发现, 尽管从核区域发射出的辐射很强, 导致了相对于 NCC 星系团较低的中央冷却时间和较高的表面亮度比, 但从核发出的 X 射线辐射还是要明显弱于大多数 WCC 星系团的。并且这个星系团的气体温度轮廓展示出非常平稳的空间变化, 几乎和常数分布保持一致 (图 7)。由于以上这些事实, 用 PEI 诊断法会将这个星系团分类成 NCC 系统, 而不是传统 CC 诊断法分类成的 WCC 系统。

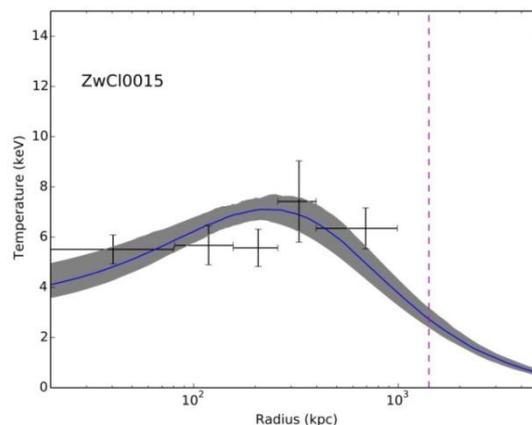


图 7-2 用钱德拉望远镜得到的 ZwCL0015 的气体温度轮廓图

注: 红色虚线代表的是 $1.5r_{500}$ 。

为了探究是否 PEI 诊断法可以适用于 $z \approx 0.5$ 或者更高红移的星系团，我们选取了 3 个 SCC 星系团 (A1068, A1664 和 RXCJ2014.8-2430)，3 个 WCC 星系团 (A2667, A795 和 A963) 和 3 个 NCC 星系团 (A2104, A2443 和 AC114)，它们每一个都严格属于自己的分类，以它们作为模板，我们构造了红移处于 0.5, 0.6 和 0.7 的相对应的模拟星系团 (在没有演化的假设下)。在构造模拟星系团的过程中我们假设典型的 50ks 钱德拉或 XMM-Newton 曝光时间，并且考虑到了由于角度和光度距离变化引起的效应 (见 Santos 等 2008 了解这一过程的更多细节，见 Bouwens 等 1998 了解在光学波段最原始的应用)。我们发现如果空间解析度和信噪比可以达到典型的钱德拉或者 XMM-Newton 观测水平，在模拟星系团的流量对于钱德拉不小于 $\approx 2.8 \times 10^{-13} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 或者对于 XMM-Newton 不小于 $\approx 1.6 \times 10^{-13} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的前提下 (大致相对于气体温度 $\sim 3 \text{keV}$ 的中等程度大小的星系团)，PEI 诊断法可以很好的应用在红移为 0.5 的星系团上。用 PEI 诊断法分类的模拟星系团和原始星系团的对比图如图 8 所示。

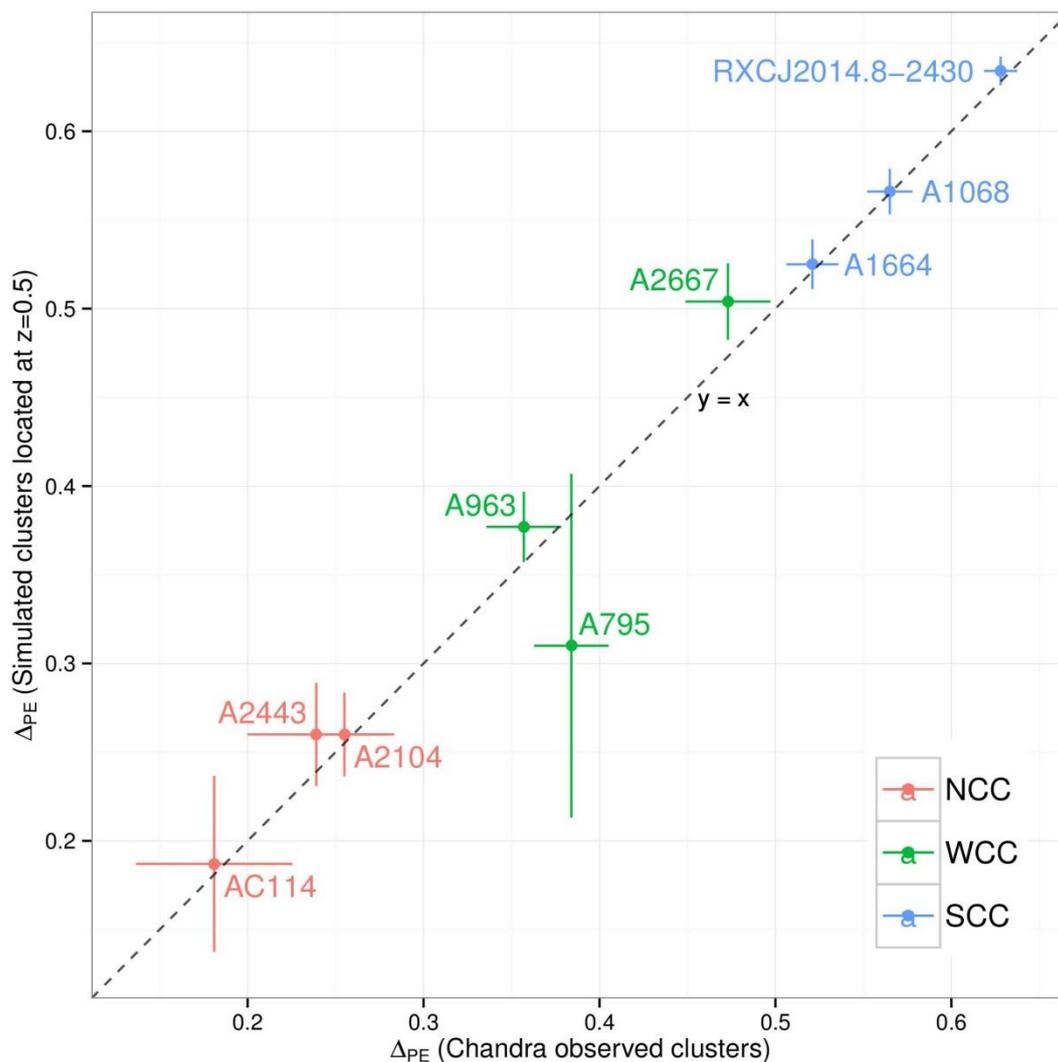


图 8 依据钱德拉观测得到的数据和在 $z=0.5$ 处模拟得到数据的 PEI 诊断法分类对比图

对于红移为 0.6 的模拟星系团，由于有限的信噪比和典型钱德拉/XMM-Newton 观测的空间解析度，PEI 诊断法出现了 20% 的判断偏差。根据上面得到的这些结果，我们可以推断出在现有的钱德拉和 XMM-Newton 的数据下，新的 PEI 诊断法可以安全的被应用到至少中等程度红移的星系团上 (相对于传统诊断法是有意义的补充)，如果未来的观测可以提供更高

质量的数据，则 PEI 诊断法可以应用到更高红移的星系团上。

值得注意的是 31 个星系团（样本中的 76%）的功率超出开始于 $k \lesssim 0.01 - 0.05 \text{kpc}^{-1}$ 的位置上，7 个星系团（样本中的 17%）的功率超出开始于 $k \lesssim 0.05 - 0.1 \text{kpc}^{-1}$ 的位置上。它们现对于实空间 $\geq 20 - 100 \text{kpc}$ 和 $\geq 10 - 20 \text{kpc}$ 的位置，碰巧这两个尺度上正是 X 射线表面亮度，气体密度和速度发生波动的地方（见 Walker 等 2015; Churazov 等 2012; Zhuravleva 等 2015; Rebusco 等 2005; Rebusco 等 2006）。这些被预测由于 AGN 反馈，或者并合，或者两者共同作用引起的波动，可能会对功率超出有一些贡献但不是全部，因为相比于明显的功率超出（ ≈ 1 个量级对 SCC， $\lesssim 0.5$ 个量级对 WCC， ≈ 0.5 个量级对 NCC，在 200kpc 处），这些被探测到的波动应该处于较弱的水平。为了进一步评估这个问题，我们已经试图用一个空间平滑的二维 β 或者 2β 模型去近似估计样本星系团的辐射分布。我们发现用模拟星系团计算的功率谱展示出和观测相似的功率超出。尽管如此，想要量化的回答气体波动对观测到的功率超出到底有多大影响还需要在未来更深一步的研究。

第五章 总结

关于冷核星系团 (CC), 到目前为止我们能够确定的结论是: 冷核是星系团核心气体一种长期的、较为稳定的状态, 冷核星系团约占星系团总数量的一半; 由于气体密度极高, 冷核向外发出强烈的 X 射线辐射, 导致其 X 射线光度呈现一个明显的峰值区域, 并且使气体的冷却时间短于星系团的存在时间, 冷核的温度也由于辐射带走大量能量而远低于星系团的特征温度; 而在辐射冷却的同时, 这部分气体还处在某种或某些机制的加热之下, 使其无法一直冷却形成恒星。

到目前为止人们对 CC-AGN 之间联系的理解并不透彻 (虽然 CC 中一会出现 AGN, 但在某些 NCC 中也会出现 AGN, 数量占到 45% 左右), 并且 CC 和 NCC 之间是否有明显区别尚存争议, 所以, 天文学家急需一种有效的 CC 诊断法来帮助天文学家分开 CC 与 NCC 并理解 CC 与 AGN 之间存在的联系。经过调查研究, 我们发现现有的主流 CC 诊断法: 中央冷却时间、中央表面亮度梯度、中央表面亮度聚集和中央温度下降等存在着一些缺点, 比如计算复杂, 需要考虑复杂的光谱分析, 需要考虑由并合引起的气体晕偏移等问题。

另外, 红移是我们需要着重考虑的另一因素, 高红移处冷核星系团比例较低的“冷核缺失”现象在很多研究中均有出现。除了样本的选择性偏差带来的影响之外, 冷核星系团的演化可能是造成这一现象的更主要原因。高红移星系团相对较年轻, 处于演化的前期, 而冷核作为一种稳定的结构, 是星系团经过一段时间演化之后的结果, 因此在高红移处, 冷核星系团的比例应该相对较低。但最新的一些研究却并未发现冷核从 $z=0$ 到 $z=1$ 具有明显的演化趋势。关于冷核的演化过程我们还需要做更细致的探索, 而传统诊断法对高红移样本的不适用性是导致我们无法更深入认识该问题的最关键原因。

在对这些传统 CC 诊断法的优缺点进行诊断时, 我们观察了几乎所有近十年内钱德拉数据库中的星系团 X 射线图像, 发现 CC 星系团相比于 NCC 星系团有明显的核边界和更亮的核区域, 可能有助于对 CC 和 NCC 的分类, 于是我们根据对 41 个星系团 ($z = 0.01 \sim 0.54$) 的钱德拉 X 射线图像的二维功率谱研究提出了一种新的 CC 诊断法 PEI。通过计算功率超出指数 PEI 我们发现依据我们新诊断法的 CC-NCC 分类与传统 CC 诊断法的分类结果相吻合, 并且具有计算直接简便, 无需复杂光谱分析, 无关并合引起的气体晕偏移等优点。经过对样本星系团的模拟, 我们还发现这个新的 CC 诊断法可以被安全的用到至少中等程度红移的星系团上, 相对于传统的 CC 诊断法是一个有益的补充, 相信在未来随着观测卫星图像解析度的增加, 功率超出指数 PEI 可以被应用到更高红移星系团的 CC 性质诊断上。

参考文献

- [1] Arnaud, K.-A. \ 1996, *Astronomical Data Analysis Software and Systems V*, 101, 17
- [2] Ashman, K.-M., Bird, C.-M., \& Zepf, S.-E. \ 1994, \aj, 108, 2348
- [3] Baldi, A., Forman, W., Jones, C., et al. \ 2009, \apj, 707, 1034
- [4] Bauer, F.-E., Fabian, A.-C., Sanders, J.-S., Allen, S.-W., \& Johnstone, R.-M. \ 2005, \mnras, 359, 1481
- [5] Best, P.-N., von der Linden, A., Kauffmann, G., Heckman, T.-M., \& Kaiser, C.-R. \ 2007, \mnras, 379, 894
- [6] Blanton, E.-L., Randall, S.-W., Clarke, T.-E., et al. \ 2011, \apj, 737, 99
- [7] Bouwens, R., Broadhurst, T., \& Silk, J. \ 1998, \apj, 506, 557
- [8] Burns, J.-O. \ 1990, \aj, 99, 14
- [9] Burns, J.-O., Hallman, E.-J., Gantner, B., Motl, P.-M., \& Norman, M.-L. \ 2008, \apj, 675, 1125
- [10] Carter, J.-A., \& Read, A.-M. \ 2007, \aap, 464, 1155
- [11] Cavaliere, A., \& Fusco-Femiano, R. \ 1976, \aap, 49, 137
- [12] Chen, Y., Reiprich, T.-H., Böhringer, H., Ikebe, Y., \& Zhang, Y.-Y. \ 2007, \aap, 466, 805
- [13] Churazov, E., Vikhlinin, A., Zhuravleva, I., et al. \ 2012, \mnras, 421, 1123
- [14] Donahue, M., Voit, G.-M., O'Dea, C.-P., Baum, S.-A., \& Sparks, W.-B. \ 2005, \apjl, 630, L13
- [15] Dickey, J.-M., \& Lockman, F.-J. \ 1990, \araa, 28, 215
- [16] Donahue, M. \ 2007, *Heating versus Cooling in Galaxies and Clusters of Galaxies*, 20
- [17] Dunn, R.-J.-H., \& Fabian, A.-C. \ 2006, \mnras, 373, 959
- [18] Eilek, J.-A. \ 2004, *The Riddle of Cooling Flows in Galaxies and Clusters of galaxies*, 165
- [19] Fabian, A.-C. \ 1994, \araa, 32, 277
- [20] Fabian, A.-C., Sanders, J.-S., Taylor, G.-B., et al. \ 2006, \mnras, 366, 417
- [21] Fabian, A.-C. \ 2012, \araa, 50, 455
- [22] Feretti, L., Giovannini, G., Govoni, F., \& Murgia, M. \ 2012, \aapr, 20, 54
- [23] Freeman, P.-E., Kashyap, V., Rosner, R., \& Lamb, D.-Q. \ 2002, \apjs, 138, 185
- [24] Gastaldello, F., Buote, D.-A., Brighenti, F., \& Mathews, W.-G. \ 2008, \apjl, 673, L17
- [25] Grevesse, N., \& Sauval, A.-J. \ 1998, \ssr, 85, 161
- [26] Gu, L., Xu, H., Gu, J., et al. \ 2012, \apj, 749, 186
- [27] Hudson, D.-S., Mittal, R., Reiprich, T.-H., et al. \ 2010, \aap, 513, A37
- [28] Humphrey, P.-J., \& Buote, D.-A. \ 2006, \apj, 639, 136
- [29] Jones, C., \& Forman, W. \ 1984, \apj, 276, 38
- [30] Kalberla, P.-M.-W., Burton, W.-B., Hartmann, D., et al. \ 2005, \aap, 440, 775
- [31] Kushino, A., Ishisaki, Y., Morita, U., et al. \ 2002, \pasj, 54, 327
- [32] Makishima, K., Ezawa, H., Fukuzawa, Y., et al. \ 2001, \pasj, 53, 401
- [33] McLachlan, G.-J., \& Basford, K.-E. \ 1988, *Statistics: Textbooks and Monographs*, New York: Dekker, 1988

- [34] McNamara, B.~R., \& Nulsen, P.~E.~J. \ 2007, \araa, 45, 117
- [35] Mittal, R., Hudson, D.~S., Reiprich, T.~H., \& Clarke, T. \ 2009, \aap, 501, 835
- [36] Molendi, S., \& Pizzolato, F. \ 2001, \apj, 560, 194
- [37] Mushotzky, R.~F., Cowie, L.~L., Barger, A.~J., \& Arnaud, K.~A. \ 2000, \nat, 404, 459
- [38] Navarro, J.~F., Frenk, C.~S., \& White, S.~D.~M. \ 1996, \apj, 462, 563
- [39] O'Hara, T.~B., Mohr, J.~J., \& Guerrero, M.~A. \ 2004, \apj, 604, 604
- [40] O'Hara, T.~B., Mohr, J.~J., Bialek, J.~J., \& Evrard, A.~E. \ 2006, \apj, 639, 64
- [41] O'Sullivan, E., Giacintucci, S., David, L.~P., Vrtilik, J.~M., \& Raychaudhury, S. \ 2010, \mnras, 407, 321
- [42] Peres, C.~B., Fabian, A.~C., Edge, A.~C., et al. \ 1998, \mnras, 298, 416
- [43] Rafferty, D.~A., McNamara, B.~R., Nulsen, P.~E.~J., \& Wise, M.~W. \ 2006, \apj, 652, 216
- [44] Rebusco, P., Churazov, E., Böhringer, H., \& Forman, W. \ 2005, \mnras, 359, 1041
- [45] Rebusco, P., Churazov, E., Böhringer, H., \& Forman, W. \ 2006, \mnras, 372, 1840
- [46] Reiprich, T.~H. \ 2001, Ph.D.~Thesis
- [47] Reiprich, T.~H., \& Böhringer, H. \ 2002, \apj, 567, 716
- [48] Rizza, E., Burns, J.~O., Ledlow, M.~J., et al. \ 1998, \mnras, 301, 328
- [49] Sanderson, A.~J.~R., Ponman, T.~J., \& O'Sullivan, E. \ 2006, \mnras, 372, 1496
- [50] Santos, J.~S., Rosati, P., Tozzi, P., et al. \ 2008, \aap, 483, 35
- [51] Smith, R.~K., Brickhouse, N.~S., Liedahl, D.~A., \& Raymond, J.~C. \ 2001, \apjl, 556, L91
- [52] Storm, E., Jeltema, T.~E., \& Rudnick, L. \ 2015, \mnras, 448, 2495
- [53] Sun, M., Voit, G.~M., Donahue, M., et al. \ 2009, \apj, 693, 1142
- [54] Sun, M. \ 2009, \apj, 704, 1586
- [55] Vikhlinin, A., Burenin, R., Forman, W.~R., et al. \ 2007, Heating versus Cooling in Galaxies and Clusters of Galaxies, 48
- [56] Walker, S.~A., Sanders, J.~S., \& Fabian, A.~C. \ 2015, \mnras, 453, 3699
- [57] White, D.~A., Jones, C., \& Forman, W. \ 1997, \mnras, 292, 419
- [58] Wise, M.~W., McNamara, B.~R., Nulsen, P.~E.~J., Houck, J.~C., \& David, L.~P. \ 2007, \apj, 659, 1153
- [59] Zhao, H.-H., Li, C.-K., Chen, Y., Jia, S.-M., \& Song, L.-M. \ 2015, \apj, 799, 47
- [60] Zhuravleva, I., Churazov, E., Arévalo, P., et al. \ 2015, \mnras, 450, 4184

谢辞

岁月如梭,转眼间我就将完成为期四年的本科物理学业,在论文即将完成之时,不禁感慨良多。首先,我要衷心的感谢我的导师徐海光老师这四年来对我的帮助和支持。无论是在平日研究工作中的悉心讲解还是生活做人上的指点,都令我受益匪浅。徐海光老师不仅是良师,更是益友,他有着严谨的治学态度、开阔的思维和强大的亲和力,无不给我留下了深刻的印象,并将使我受益终身。

同时,我也要感谢我的学长朱正浩,李维天和学姐胡丹在科学研究中对我的帮助,从论文课题的选定,程序的设计,到数据的处理与论文的撰写和修改,都凝结了学长与学姐的心血和智慧结晶,与学长学姐讨论问题也往往能带给我与众不同的思路。

最后,我要感谢我的父亲和母亲这些年来对我的呵护与支持,感谢他们为我提供的良好的学习环境,父母对我的爱,我将一直牢记在心。

A NEW WAY TO DISTINGUISH COOL CORE CLUSTERS WHICH BASED ON THE ANALYSIS OF X-RAY IMAGE POWER SPECTRUM

X-ray observations performed in the past two decades have revealed that more than half of the galaxy clusters host a bright, dense core where the intracluster medium (ICM) has cooled down to temperatures lower than that of the ambient gas, so that such cool core clusters usually exhibit sharply peaked central X-ray emission. Despite the fact that some previous samples whose redshifts are mostly within 0.2, are flux-limited and thus may be biased to a certain degree toward clusters with a bright core, it is very clear that the cool core can be regarded as a common phenomenon in clusters located at $z \leq 0.2$.

In order to define the CC-NCC dichotomy different diagnostics have been proposed in terms of, e.g., central temperature drop, central cooling time, surface brightness concentration, mass deposition rate, or X-ray surface brightness cusps. To determine which one of these can be used to unambiguously segregate CC from NCC clusters Hudson et al. (2010) applied 16 CC diagnostics to a sample of 64 HIFLUGCS clusters ($z \leq 0.2$), and found that the central cooling time is the best diagnostic parameter for nearby clusters with high quality data, whereas the cusps is the best for high redshift ($z \geq 0.03$) clusters.

In this work we propose a new diagnostic to segregate cool core (CC) clusters from non-cool core (NCC) clusters by studying the two-dimensional power spectra of the X-ray images observed with the Chandra X-ray observatory. Our sample contains 41 members ($z=0.01\sim 0.54$), which are selected from the Chandra archive when a high photon count, an adequate angular resolution, a relatively complete detector coverage, and coincident CC-NCC classifications derived with three traditional diagnostics are simultaneously guaranteed. We find that in the log-log space the derived image power spectra can be well represented by a constant model component at large wavenumbers, while at small wavenumbers a power excess beyond the constant component appears in all clusters, with a clear tendency that the excess is stronger in CC clusters. By introducing a new CC diagnostic parameter, i.e., the power excess index (PEI), we classify the clusters in our sample and compare the results with those obtained with three traditional CC diagnostics. We find that the results agree with each other very well. By calculating the PEI values of the simulated clusters, we find that the new diagnostic works well at redshifts up to 0.5 for intermediately sized and massive clusters with a typical Chandra or XMM pointing observation. The new CC diagnostic has several advantages over its counterparts, e.g., it is free of the effects of the commonly seen centroid shift of the X-ray halo caused by merger event, and the corresponding calculation is straightforward, almost irrelevant to the complicated spectral analysis.