

观测宇宙学1986*

M. S. Longair

(英国皇家天文台)

“这次学术讨论会标志着观测宇宙学的真正开始。”

Allan Sandage 1986年8月29日

引 言

我感到非常荣幸能被邀请来对持续六天的热烈讨论作总结。实际上几乎现代观测宇宙学的所有方面都已在会上得到了描述和讨论，我的任务只是希望能将这大量的新材料综合在本文中。在所有这类综述中，每一位作者都不可避免地会引入个人的偏见，我认为我是在公正的立场上作评述的，但要由你们自己来对此作出判断。

首先，谈谈我的一般印象，我对这次讨论会感受最深的有两个方面：第一，除了少数重要的例外，天文学家们对许多最重要的观测结果取得了完全一致的意见。下面我列出了一些这种观测的例子。

- 微波背景辐射的谱和各向同性。
- 至少达到 60Mpc 尺度的空洞的存在。
- 暗星系计数。
- 射电源计数。
- 红移大于 2 左右时类星体共动体积密度的减少。这并不是由选择效应引起的。
- Lyman- α 吸收云在大红移处的空间分布。
- 类星体成团性，更确切地说成团性证据的缺乏。

第二，在理论方面也取得了许多重要的进展，但对于许多最重要的观测和许多可能是正确的见解来说，还不存在完整的理论来说明它们。在目前我愿意提醒大家观测结果比它们的理论说明有更好的一致性。我相信这是比其他的情况更为正常的状态。

昨天晚上 Dr. Allan Sandage 应邀为我写下了本文开头所引的一段话，它使我很激动，由于这句话是出自一位这一领域最杰出的开拓者之口。人们可以看到经过许多优秀的观测和理论天文学家的努力，我们的观测能力和天体物理洞察力有了巨大的飞跃。我希望我能够对他的观点加以公正的评判。

让我来作两个方法论上的评论，它们恰如其分地给这次讨论定下了框架。首先是关于宇

* ——在 IAU Symposium No. 124 上的总结发言；中国，北京。

• 经 IAU Symp.No. 124 的 SOC 主席 Burbridge 教授同意在本刊发表。

宇宙学参数的测定。原则上,我们希望能独立测定五个参数: Hubble 常数 H_0 , 宇宙年龄 T_0 , 减速参数 q_0 , 密度参数 Ω , 宇宙常数 Λ_0 , 而且它们也是原则上独立可测的, 它们对爱因斯坦广义相对论在目前可见的最大尺度上的可应用性提供了关键性的检验标准。例如, 在经典广义相对论中 $\Lambda_0=0$, $\Omega=2q_0$, T_0 是 Ω 和 H_0 的唯一函数。如果 $\Lambda_0 \neq 0$, $\Omega=2q_0+2/3\Lambda H_0^{-2}$, T_0 还是 H_0 、 Ω 、 q_0 和 Λ 的一个不同的唯一函数。因此, 这些关系式是可判别的。但是参数的测定已被证明是极端困难的, 我相信能作出这些检验之前还有很长的路要走。因此, 我认为虽然我们不应放弃独立测量所有参数这一重大目标, 但自洽性或许是我们目前能期望的最好途径。

其次, 考虑我们研究天体物理宇宙学的方法, 能用以下的流向图来表示这个过程。

观测 \longleftrightarrow 天体物理理论 \longleftrightarrow 已检验过的物理

重要的是要注意第二排箭头所表示的可逆作用。在几乎所有最好的天体物理理论中所应用的物理学内容都是经过实验室中的实验所证实的。这就是为什么我们可以说温度从 10^{13}K 到 3K 的宇宙热演化模型是可信的原因。我关心的是许多更时新的理论, 它们只是建立在那些经实验室检验过的物理理论的大量推论上, 基本粒子的大统一理论, 暴涨, 早期宇宙的相变等等是远远超出有实验物理范围的。正如 Dekel 所强调的那样, 粒子物理不存在任何限制。我担心的是对这些理论我们还没有实验方法能加以约束。如果我们能够 (也许仅仅在极早期宇宙中) 对自然界三种 (或四种) 力的统一理论进行检验, 并且把它们作为宇宙学对“现实”世界的有效应用, 一些人就会感到非常高兴。我的观点恰恰相反: 在我看来对理论缺乏约束是一个不幸。当然, 天体物理问题引出新的基本物理的事例并不缺少, 如开普勒的行星运动规律导致牛顿运动定律和引力定律的产生。Fred Hoyle 关于 ^{12}C 共振的著名预言导致三重 α 过程的发现等等。但是, 我相信在已有的事例中并没有应用如此大量和如此雄心勃勃的推论的情况。我担心的是能够达到的可能只是理论内部的自洽性而已, 但也可能我是过分悲观了。这些思想无疑是很有说服力的并且开辟了天体物理研究的新领域。

在以下的总结中, 我将不从专家的角度来评述这次讨论会, 而用这样一种方式来表达, 即告诉我的学生们, 新的工作对过去几年中我所讲授的标准天体物理宇宙学课程的冲击。它分为以下七节:

1. 基本观测。
2. 广义相对论的经典宇宙模型。
3. 宇宙学参数 H_0 , T_0 , q_0 , Ω 和 Λ 的测定。
4. 宇宙学时标上的天体物理演化。
5. 宇宙的热历史——真实宇宙的第一近似。
6. 第二近似——小扰动宇宙。
7. 第三近似——非线性宇宙。

我将告诉我的学生们, 在这次讨论会上谈到了哪些和哪些没谈到。

一、基本观测

1. 宇宙的各向同性

微波背景辐射仍然是整体尺度上宇宙各向同性的最好证据。Partridge 和 Lukash 对大尺度各向同性和各种独立的观测所作的评述得到了一致的赞同。Lukash 的清楚显出偶极各向异性的全天图像给人留下了深刻的印象。一致的结果是在大尺度上存在着幅度为 $\Delta T \approx 3\text{mK}$, 极大强度在 $11^{\text{h}}, -5^{\circ}$ 方向的偶极分量。在天球的辐射分布上没有检测到更高阶矩。四极和八极矩的上限为 $\Delta T/T < 5 \times 10^{-5}$ 。Lukash 提到这个水平上的光滑度对早期宇宙模型可能的各向异性行为的重要意义。

辐射热谱的符合程度也是非常好的。Partridge, Halpern 和 Mandolesi 表明目前所有的观测与 $T=2.75\text{K}$ 的 Planck 谱是相符的。独立测量热谱在 Rayleigh-Jeans 区和 Wien 区的亮温度得到了相同值, 这具有重要的天体物理意义。它将对可能发生的 Compton 加热的热量给以重要的限制。因为 Compton 散射效应将使整个谱朝高频方向移动而保持光子数不变, 导致了在 Wien 区域会比 Rayleigh-Jeans 区域有更高的温度。

从大角尺度来看, 对由星系、类星体、射电源等分立天体所确定的宇宙各向同性目前也有极好的证据。如仅限于计数统计, 很早就知道射电源在天空是各向同性分布。暗星系的计数现在也显示出很好的一致性。Ellis 和 Koo 各自独立地发表了暗到 24—25 等星系的计数, 发现星系的数目从一个区域到另一区域有小的变化, 但是他们都得出了相同的平均数和涨落。而且, 这些涨落可由星系随红移呈现的簇状分布来说明。后者不但与星系的“海绵”状分布有关, 还与观测到多少星系依赖于视线穿过了多少“薄片”这一事实有关。

现在已开始得到无偏的类星体大样本, 它们特别适合用来作成团性质的检验。Chu (褚耀泉)、Clowes、Shaver 和 Boyle 描述了这些研究的结果。正是由于高速测量仪器的出现, 才使我们有可能在几个 Schmidt 视场范围内客观地产生类星体大样本。例如, Clowes 和 Shaver^f 所讨论的一个宏大计划, 他们在 100 平方度天区中已发现了一千多个类星体。物端棱镜红移使它们的三维成团性也象二维一样能被检验。 $Z > 2$ 的类星体在天空呈现出随机的分布。Shaver 和 Chu 指出在 $Z < 2$ 时有小尺度成团的证据, 但这点还需要作进一步的考察。因为尽管作者们尽了最大的努力来扣除不均匀性和不完备性, 这些类星体还不是从一个均匀的星表中选出来的。Boyle 在他们的完备样本中发现了在尺度小于 $10h^{-1} \text{Mpc}$ 时 3σ 水平上类星体成团的证据, 但是 Crampton 却没有发现。

2. 宇宙的统一性

在上一节中描述的观测表明, 宇宙在足够大的尺度上是各向同性的, 因而也是均匀的, 但在小尺度上显然不是这样。洞穴、空洞、薄片、纤维结构在星系分布中是明显可见的, Geller 描述了史密森天体物理中心(CfA)的星系红移巡天工作, 这是目前在进行的最重要的观测之一。她指出这个观测的目的是测量 30,000 多个从 Zwicky 星系表中选出的星系的速度, 这个计划已完成过半, 大约再需五年才能全部完成。现在完成的区域已使星系的分布显示出一幅十分鲜明的图像, 存在大空洞的确定证据也已被观测到。关于这些图像的说明 Geller 提出了几个重点: 首先, 观测到空洞的最大尺度是 60Mpc 左右, 这可能是由于样本本身尺度的限制——更大的空洞还可能存在, 只是在 CfA 巡天中不易证认。其次, 相邻红移的样本薄片表明纤维结构并不是线状的, 而是分布在空洞或洞穴的表面上。这个图像从 Ellis 和 Koo 的更深红移观测中得到了充分的支持。他们观测到沿视线方向星系按红移有显著的成团性。第三,

许多片状结构是很薄的。

对空洞的性质可以问很多问题。例如,由 Lachièze-Rey 和他的同事们引入的一个函数称为空洞几率分布,它是怎样的?空洞中空的程度如何? Dekel 得出空洞中的星系密度仅为周围的 10%。Chincarini 指出在某些空洞中发现了矮星系。这些都是有潜在重要性的线索,需要由更大的数据样本来进一步证实。

Bahcall 描述了在更大尺度上团和超团的两点相关函数。它清楚地表明了超团-超团集合中存在着尺度大到 150Mpc 的结构。目前,这些相关的真实含义为现有的团和超团样本的尺度所限制,最好的数据来自于 Abell 星系团表。这些数据表明了一种明显的倾向,即大尺度结构的相关性比星系强,最大尺度的相关性比星系团强。这些观测与等级式图像是一致的。在这个图像中仅仅一部分星系参与组成团-团集合,而仅仅一部分团-团集合参与组成了超团-超团集合。今后几年,随着许多南半球星系和星系团巡天工作的完成,这些观测将会得到极大的改进。Olowin 描述了一项这样的巡天工作。

还剩下的一个问题是由空洞存在时的两点相关函数我们能知道些什么。每个人都知道 $\xi(r)$ 是相对于任一给定客体成团倾向的粗略而简单的描述。看起来仍然需要继续寻求在大尺度结构上研究星系分布的最佳统计方法。

另一个热门的课题是星系大尺度速度流的观测。这方面研究的历史可追溯到议论甚多的 Rubin 和 Ford 效应。对于很多人正准备退出而突然间又变得极受注意这样一种观测来说,这是一个很好的例子。Davies 从椭圆星系的距离和退行速度的研究得到流速度 $\approx 600\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。问题的复杂性在于流速度并不在微波背景辐射偶极分量的极大方向。对此,还未从争论中得出简单的图像来,但我发现非常有趣的是星系随机速度的值看起来有所升高,典型值达到 $300\text{--}400\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

注意到恰好在这些速度被发现的同时空洞成了星系大尺度分布的组成部分,这是很有意思的,它有着正反两方面的意义,从有利的一面讲,一个 $600\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的流速度将使星系在宇宙年龄时间中移动大约 10Mpc。因此,能在较大的区域中形成星系的真空,但这种区域的尺度还未达到已知的最大结构的尺度。而不利的一面则是,这样的速度将破坏在 CfA 巡天中观测到的星系很薄的薄层结构。究竟情况如何还不清楚。

3. Hubble 流

值得强调的是, Sandage 已指出利用红移在 $0.01 < Z < 0.5$ 之间的星系团中的最亮星系很好地确定了 Hubble 流 $V \propto r$ 。确实,我相信这无疑在整个天文学中被定得最好的线性关系之一。如果我们选用强射电星系也可以得到同样的结果。一个喜欢追究的人或许想知道为什么这些天体会明显地成为如此好的标准烛光。对于星系团中的星系,我们能在星系光度函数普适性的基础上给出很好的解释,如果需要的话,还可以加上吞并效应。换句话说,在这种情形中一直到 $Z=0.5$, $V \propto r$ 的关系是可信的。对射电星系,我们还不理解为什么仅仅只有成为强射电源的最亮星系才是好的标准烛光,因此情况是不清楚的,但根据经验发现,由强射电辐射选出的星系,其绝对星等的弥散度非常小。

另一重要之点是仅仅只需在 0 到 0.5 的范围内得出 $V \propto r$ 。在更大的红移时宇宙要比现在年轻得多,因此宇宙动力学和星系光度可能会有较大的变化,我们将在第四节中讨论这个问

题。

4. 结论

为导出 Robertson-Walker 度规所必需的基本观测现已处于非常好的状况。

由于所有本次讨论会的参加者都能推导宇宙的经典 Friedmann 模型,我们将直接进入第三节。

三、宇宙学参数的测定

我再强调一遍 H_0 , T_0 , q_0 , Ω 和 Λ 在原则上都是可观测参数。

1. Hubble 常数 H_0

Tammann 以他常有的清晰和有说服力的方式提出了 H_0 的测定问题。他强调关键的问题是消除 Malmquist 偏差和精确测定近距星系的距离。他的结果倾向于 H_0 近似为 $50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, Aaronson 用无 Malmquist 偏差的数据从红外 Tully-Fisher 关系得到的 H_0 值约为 $90 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 。Giraud 分析了在不同距离群中的 Tully-Fisher 关系,发现有证据表明 H_0 值随距离而增大:在大距离处 H_0 倾向于更高的值。我已经简单地叙述了在这次讨论会上所提出的观点,这些观点形成了一个熟悉的循环。正如我告诉我的学生们那样,在这种情况下你不要去取平均以发现 H_0 的最佳估值,因为这些测定值的误差主要是来源于系统误差而不是随机误差。

这是一种并不令人满意的状况,这种状况已持续了多年。这个问题部分是由于需要应用标距天体所引起的,而这些标距天体只是从星系性质的经验研究中得出。我们希望能在坚实的有预言能力的天体物理基础上来获得标距天体。最终这个愿望将被实现,但在目前,看起来我们还面临着僵局。

Tammann 列举了一系列理由说明为什么 $H_0 = 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 是不可取的。事实上我相信他的每一个论据都可独立地用来作 H_0 值的估计,并倾向于 H_0 接近 $50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 。这些论据之中的一个是用球状星团年龄测得的宇宙年龄 T_0 , 它的估值为 $17 \pm 3 \times 10^9$ 年。除非我们考虑 $\Lambda \neq 0$ 的模型,否则对 $H_0 = 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 的情况它会大得不相称。Narlikar 正确地告诫我们不要用 $\Lambda \neq 0$ 这个论据来作为一个估计 H_0 的方法,其理由我在引言中已叙述过了。我相信每个天体物理学家在这个问题上都会作出自己的判断。我的途径是十分实用主义的。目前还没有证据表明 $\Lambda \neq 0$, 并且我发现经典的 Friedmann 模型由于它的简单性和优美形式而具有极大的吸引力。因此,如果我在计算中需采用 H_0 , 我宁肯用 $H_0 = 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 作为一个“安全”的值。正如我们刚才所看到的那样,它与恒星演化是相容的。我知道这个值是与 de Vaucouleurs, Aaronson 和其他一些人的采用值相冲突的。

确实,我们需要估计 H_0 的新的物理方法。Birkinshaw 描述了用星系团中热气体云来作 Sunyaev-Zeldovich-Gunn 检验,得出 $H_0 > 11 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, 这对解决问题显然没有帮助。Canizares 和 Burke 提出,原则上只要能观测到有很好模型的引力透镜的时延,就能确定 H_0 。但正如 Canizares 所指出的,直到现在为止还未在任何引力透镜中观测到所期待的时延,这个问题依然有待于将来的进展。

Dr. Sandage 向我建议我们或许可以提出暂停 H_0 的估计。我认为在由 SZG 方法能显著改进精度的真实前景出现之前, 我们当然应当暂停 Birkinshaw 的估计方法。我反对暂停 50/100 的争议, 因为这里存在着重要的天体物理问题需要得到澄清, 并且我们的希望只能是: 随着对数据有更好的天体物理上的理解, 能找到引起这种差别的起因。

2. 减速参数 q_0

Spinrad 把我们带到了测量星系团和射电星系的红外红移-视星等关系的时代。在 3CR 和 1-Jy 样本中测量非常暗射电星系的谱和红移是十分困难的, 这里我不妨再重复一次对他坚持不懈地推进这一任务的钦佩。他向我们展示了由这些样本所得到的重要结果。当然我应当声明我自己对这项工作的利害关系, 我和 Dr. Simon Lilly 做了一部分工作。Spinrad 描述的工作引起了对 q_0 测定可能性的乐观估计, 因此我想利用我“评论者的特权”提出我自己对这项工作某些部分的意见。

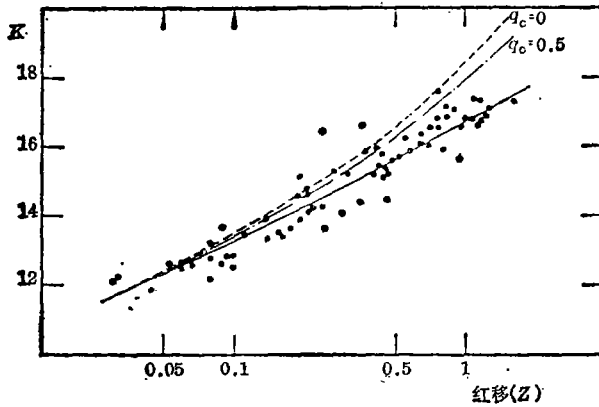


图 1. 红外 K-Z Hubble 图。点线表示对 $q_0=0$ 和 $q_0=0.5$ 的固定光度的椭圆星系所预言的关系。实线表示对 $Z=1$ 处有约一个星等的光度演化数据的模型拟合(摘自 Lilly, S. J. and Longair, M. S., MNRAS, 211(1984), 849)。

我在图 1 中再现了我们的射电星系 K-Z 关系的结果。对这张图我想提出以下几点: 首先, 注意到在小的和大的红移时内禀绝对星等弥散很小。 $Z < 0.5$ 和 $Z > 1$ 时弥散只有 0.5 等左右, 这表明在这个红移范围中星系呈现一种系统的性质。这种小弥散由 Spinrad 从 1-Jy 样本中加入的新的点所肯定。其次, 我们必须非常仔细地找出各种相关性, 这些相关性可能引起对 K-Z 关系的偏离。 Yates 描述了他为搜索射电光度相关性所作的工作, 发现存在着一个较小的正相关, 这个正相关与射电星系的环境有关。在我们开始估计 q_0 之前, 应当弄清楚这些效应的意义。第三, 在红外波段对母体样本中恒星演化的改正是比较直接的。第四, 虽然这个结果还不十分明显, Simon Lilly 发现 $q_0 \sim 0-1$, 考虑演化改正的最佳拟合曲线与我们数据的符合程度略好于无演化改正、大 q_0 值的情况。这表明如果在红移 1—2 的范围内我们能获得充分的统计数据, 则 K-Z 曲线的形状将有助于用来消去演化效应。

考虑到所有这些因素, 我相信我们已经可以说 q_0 的范围是 0—1, 但我并不象 Spinrad 那样乐观。请注意, 用下一代大望远镜和低噪声检测材料的红外光谱仪, 我们应当能够在近红

外波段进行光谱观测来直接检验演化效应。

Wampler 描述了对类星体完备样本中光学红移-星等关系的有趣的再分析, 在消除了数据已知的各种相关性以后, 他发现 q_0 的最佳拟合值约为 3。这与我们从未作恒星演化改正的射电星系 $K-Z$ 关系得出的结果几乎完全一致。这是否表示类星体的基底光度演化与射电星系中恒星样本的光度演化是相同的呢? 如果确实如此, 那将是极为重要的。因为这可能表明在这两类非常不同的活动中有某些直接或间接的物理联系。进一步的研究肯定是必要的, 并且对类星体光度函数的演化也是很有意义的。

还提到了其他一些测定 q_0 的方法。但在现阶段很多方法都受到演化效应的严重影响。Kapahi 讨论了射电双源的角直径-红移检验, Sargent 提出了遥远类星体吸收线红移的方法。Loh 讨论了计数并宣布用多色测光红移得到了好的结果——但正如 Ellis 所强调的, 目前我们对红移大于 0.5 的星系光谱了解得究竟如何这个问题还需要作更详细的研究。

3. 密度参数 Ω

Tully 和 Sancisi 评述了测定宇宙局部物质密度的各种方法。这方面的大部分情况是大家熟悉的。旋涡星系和椭圆星系的质光比约为 10—30, 相应于 $\Omega \sim 0.02$ 。旋涡星系必定有某些暗物质组成的晕使旋转曲线一直到最大可测半径处还保持着扁平状。注意到 Sancisi 在他所研究的某些星系的最外部引用了约 5,000 的 M/L 值。经过仔细研究的大星系团的 $M/L \sim 350-500$, 如果这是宇宙中发光物质的典型值, 则 $\Omega \sim 0.2$ 。Tully 根据近距星系群的研究得到了 Ω 的新估值, 发现 $\Omega \gg 0.1$ 。

尽管所有这些估计都遇到隐匿物质是否象星系一样分布这个困难的问题, 但在由 Tully 描述的朝 Virgo 星系团下落的检验和宇宙维里定理中它显得尤其突出。在这两种情形中, 速度是由对物质分布平均密度的扰动所引起的。在向 Virgo 团下落的例子中, $V \propto H_0 r \Omega^{0.6} \delta$, δ 是由本超星系团引起的局部密度增加。如我们假定所有的物质分布都象星系一样, 则 $\delta = 2$, $\Omega = 0.3$ 。但如假设隐匿物质分布得比星系更分散, 则 $\delta < 2$, 因此 Ω 更大。同样的论点也是使宇宙维里定律陷入困惑的原因。

Rowan-Robinson 报告了一个关于加速度起源的有趣的新结果。这个加速度可能是引起相对于微波背景辐射的 $600 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度的原因。他应用 IRAS 星系分布来求出这些星系引起的局部引力加速度, 假定这些星系就是质量分布的示踪物质, 他发现加速度矢量与微波背景辐射偶极分量极大方向是一致的。他的计算给出了 Ω 的一个估值: $\Omega = 1$ 。看起来, 这与向 Virgo 团下落检验和宇宙维里定理在同样假定下得出的值 $\Omega \sim 0.2-0.3$ 是相矛盾的。这个矛盾的原因现在还不了解。在 IRAS 样本中还需要得到更多的星系速度来作出更可靠的 g 的估计。在所有的情形中, 可见物质和暗物质的分布问题是最根本的。Sancisi 和 Burke 在星系自转曲线和引力透镜研究的基础上指出, 在星系尺度上亮暗物质分布的一致性肯定是不真实的。

Hewitt 为搜索引力透镜现象观测了 4,000 个射电源, 并对其中引力透镜出现的频率进行了分析, 从而得到关于大质量黑洞对宇宙现有质量密度贡献的有趣的新结果。在这个样本中仅发现了少量的候选者, 这就对宇宙中不同质量引力透镜存在的数目加上了限制。统计结果现在正在得出一些非常有趣的限制, 使得例如透镜质量为 $10^{10}-10^{12} M_\odot$ 时, 可以排除 $\Omega =$

四、宇宙学时标上的天体物理演化

1. 活动星系和类星体

首先,我想考虑“非热源”的宇宙学演化。射电源,不管是射电星系还是射电类星体,都与光学选择类星体样本一样出现相似的强烈宇宙学演化。Wall 分析了射电数据,并给出了平谱及陡谱射电源所要求的演化类型。Schmidt 和 Boyle 指出,射电宁静类星体样本的强烈光度演化,可用来说明类星体计数以及在不同星等上的红移分布。Deng (邓祖淦) 在仔细考虑了物端棱镜巡天的选择效应后指出怎样在小范围红移中推断出演化。目前,关于可靠性已有很好的内部符合。这个效应的说明还不清楚,但 Miley 令人信服地说明了环境对改变大红移双源性质的影响,他指出 $Z > 1.5$ 的类星体比低红移的类星体受到更多的扰动。根据他的观测, $Z > 1.5$ 的射电源环境比低红移源的环境更复杂。

Yee 研究了射电星系和类星体的周围环境。他的结果表明 $Z > 0.5$ 的类星体与小红移的类星体相比,所在星系团的丰富度将更大一些。Yates 指出对射电星系情况也一样。再回到环境本身,无论是大量的伴星系还是弥漫气体都能对演化效应作出贡献。Byrd 在他对 Seyfert 星系的第一流研究工作中指出,对许多 Seyfert 星系都已观测到了密近伴星系,而这些伴星系可能会导致 Seyfert 活动。

2. Lyman- α 吸收云

看起来目前关于类星体紫外谱中 Lyman- α 吸收云的共动数密度演化是意见一致的。Sargent 和 Chen (陈建生) 报告了到观测极限 $Z = 3$ 云数目的增长都正比于 $(1 + Z)^2$ 。有趣的是,恰恰相反,给定光度的类星体数目在 $Z > 2$ 时差不多按 $(1 + Z)^{-2}$ 规律减少。这种现象的原因还不清楚。这主要是由于 Lyman- α 云的性质还不清楚——它们是膨胀的还是被束缚的?它们是否受到类星体紫外辐射流的侵蚀? Webb 报告了一个有趣的结果, Lyman- α 云在速度标度小于 $150 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 时是成团的。

3. 一般星系

Ellis 和 Koo 获得的漂亮的新结果对红移小于 0.5 左右星系的演化提出了重要的限制。在 $M = 22$ 处星系的数目比均匀非演化宇宙模型的预言要略多一些,但在最暗星等处却不是这样。因此,这表明在过去阶段星系更亮的演化过程是不大可能的。这个结果被他们两个组所完成的深空光谱巡天所肯定。在给定视星等的红移分布中也没有发现演化的证据。Ellis, Koo 和 Karachentsev 研究的红移表明它们的分布是高度不均匀的。这可能反映了星系被限制在薄层上的事实。这些薄层是星系分布“海绵”状结构的一部分。

计数和红移分布结果的一致性,显然可用来对星系一般在何时第一次形成作出重要限制。我预计这个限制将会充分发挥作用。

4. 再论射电星系

在测定 q_0 的内容中已提到射电星系。在那里的叙述中,提到有明显的证据表明射电星系中的恒星样本演化正起着重要的作用。Spinrad 已描述了他对这些数据的研究途径。我们自己的方法也非常类似。我希望指出两者之间的某些区别——我相信在实际的观测上并不存在重

大的差别。在我们的方法中,我们仔细地地区分射电星系和星系团中的最亮星系。虽然这些不同类型的星系在红移大于等于 0.4 时有类似的光度,但在不同类型的活动系统的更近演化阶段它们会有所不同,诚然,正如 Machalski 所提到的,射电天体怎样从类星体样本中选出,一般来说还是一个棘手的问题。

关于不同类星体样本在大红移的行为有着很好的一致性。对光学选择样本大于 $Z \sim 2$ 的类星体的共动数密度随红移的增加而减小。这已在 Crampton 和 Schmidt 描述的新观测中发现, Véron 在分析了现有星表中的数据后也发现了类似的下降。源的共动空间密度极大值位于红移 2 左右,然后朝大红移方向减少。Hewett 用自动底片测量技术搜索类星体候选者,找到了 $Z = 4.01$ 的新的最大红移类星体。Savage 报告了在最近这几个月中发现红移大于 3.5 的类星体的新高潮,然而,这些发现还不足以使空间密度朝大红移减少的倾向逆转。

Dunlop, Peacock 和他们的同事们在平谱射电选择类星体样本中发现了完全同样的现象这是非常重要的。由于主要的选择标准是射电流密度,因此它是一种完全独立的观测大红移类星体演化的方法。应当强调的是类星体的共动数密度没有截止值但有一个较宽的极大。我猜想,光度和空间密度随宇宙学时间的高斯分布可能会是一个好模型,可将它应用于星系的起源和类星体的强宇宙学演化。

最终或许能对分立 X 射线源作同样的研究,但在目前由 Gioia 所描述的主要观测是对亮源样本进行的,这与射电源 3CR 巡天的计数工作相类似。她将 Einstein 卫星中等流密度巡天扩展到 800 多个源,使建立河外 X 射线源样本的工作取得了重大进展。目前对 X 射线源样本宇宙学演化的最强限制来自 X 射线源积分强度的上限。正如 Schmidt 和 Setti 所指出的,具有常数光学-X 射线谱指数的类星体样本的光度演化与观测到的 X 射线背景所施加的限制是一致的,尽管由于大量低光度 X 射线源的存在,密度演化产生了太大的强度。X 射线背景的强度、谱和光滑度的解释是一个有争议的问题, Boldt 曾对它作过一个评述。我完全赞同他的观点,即在 40 keV 处谱跳变的起源和背景的光滑度是大部分已知类型 X 射线源面临的主要问题。

Kapahi 报告了他对红移与射电双源尺度关系的新分析,所有他得出的结果都表明双源的内禀尺度随红移的增大而减小: $l = l_0(1 + Z)^{-\beta}$, $\beta = 1.5 - 3$ 。虽然看起来这个结果不难得到,但实际上这是一个复杂的问题,因为各种强演化效应可以对各种类型的源以什么样的比例出现在不同的流密度上产生极大的影响。由于对小数目物体的检验灵敏度问题,直到现在我还不能完全肯定 $\beta \neq 0$, 但我认为在这个结果中出现的红移可能来自于星系团中最亮星系动力学演化的贡献。因此,在 Lilly 和我的工作中,我们仅非常谨慎地考虑射电星系。例如,探索星系演化的一种有效的方法是用光学-红外颜色 $r-K$ 。图 2 显示了我们得到的 $r-K$ 对红移的关系图,同时还画出了“被动演化”线,它表示如在星系中所有的恒星很早就形成了而后的演化仅仅是由于初始恒星样本的演化的情况下所预计的颜色变化。重要的是没有一个观测点位于此线上方。我认为此线相应于一个合理的星系演化的零假设。低于此线的观测点有显著的弥散,这说明在观测时期中星系有明显的恒星形成活动。Spinrad 用一个简单的 Bruzual 类型 $\mu = 0.7$ 的模型来说明它。我们认为弥散比较大不能仅用单个模型来说明,演化与分立的恒星形成事件有关,或许还与形成射电源的事件有关。有趣的是某些点位于“被动演化”线附近,这表明在这些星系中几乎没有不断发生的恒星形成活动。

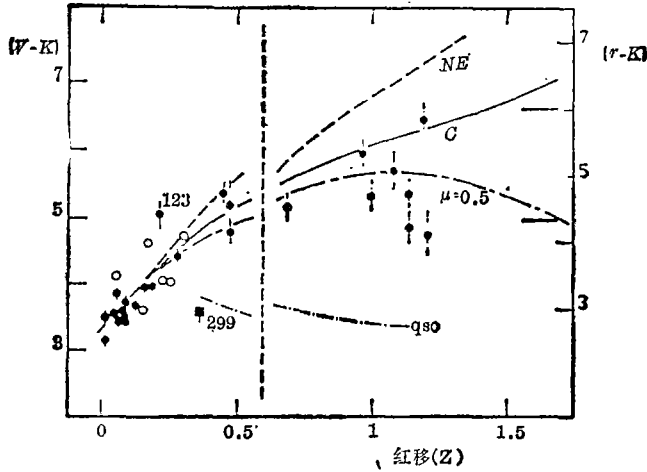


图 2. 3CR 射电星系的光学-红外颜色(V-K)和(r-K)。C 表示标准椭圆星系中恒星样本被动演化的模型。 $\mu=0.5$ 的模型取自 Bruzual(见 Lilly and Longair, *Op. Cit.*, p.845)。

Sandage 讨论了 Spinrad 和 Hamilton 的观测，他们从 400nm 跳变幅度随红移的变化来寻找星系中恒星样本演化的证据。Spinrad 发现了跳变随红移的增加而减小，这与恒星样本的演化是一致的，同时 Hamilton 却没有发现这种现象。这些情况以及类似的恒星样本特性，对星系中恒星样本的演化提供了决定性的证据。随着大望远镜的不断建成，我们期望能将这些研究扩展到那些最大红移的星系。

这个计划最有意义的结果之一是来自 Allington-Smith 的 1-Jy 样本的研究。这个样本是设计用来检验 3C 观测的结论，并将它向更大的红移扩展。图 3 显示了 $r-K$ 与 K 星等的关系，我们用 K 而不用红移来作距离指标，原因是没能得到样本中所有源的红移值。注意到在暗星等有一组源呈现出被动演化星系的颜色。我们相信它们可能是在红移 1 到 3 范围内的被动演化星系。

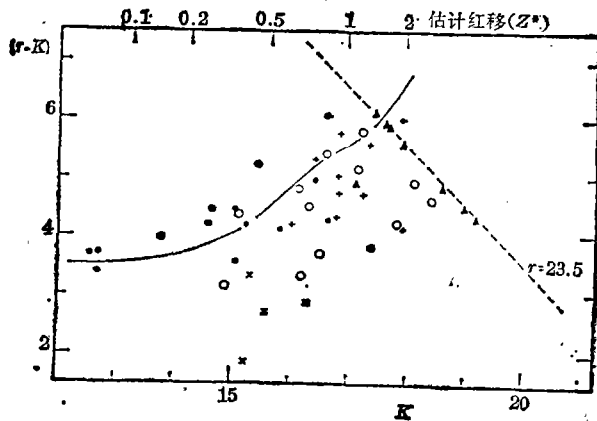


图 3. 1-Jy 样本中源的 $(r-K)-K$ 颜色星等图。点线表示证认所达到的极限星等 $r=23.5$ 。连续曲线表示 Bruzual 的被动演化 C 模型。图的上端标出了估计的红移值。

假若果真如此,则这将具有重大的宇宙学意义,因为它们必定形成在明显早于3的时代。确实,我相信这些数据已能用来对此类星系的形成年代加以有意义的限制。例如,若星系在红移3或4处形成,然后即使它们仅仅经历被动演化,它们中任何一个在任何低红移处将不会暗于 $K=18$ 等。这种类型的研究具有最重大的意义,为了检验这些想法需要更大的样本。

五、宇宙的热历史

由Audouze精致地给出的观点目前已成为宇宙热历史的标准观点。这个题目主要是关于轻元素 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^3\text{He}$ 、D和 ${}^7\text{Li}$ 在它们被观测到的宇宙部分中合成的必要性。Duncan漂亮的新观测表明 ${}^7\text{Li}$ 的丰度已怎样成为恒星演化的灵敏的示踪物,以及在被认为对流区窄的那些恒星中,由于 ${}^7\text{Li}$ 还没有被对流带到有足以使它分解的温度区域,怎样或多或少地保留了不变的“原始”丰度。所有这些研究得出的结果是:如果重子的密度参数 Ω 大于 $0.2(50/H_0)^2$,则产生的氘就会显得太少了。

这个结果已变得如此使人信服以至没有人想向它挑战。它已成为下面这个假定的根本基础,即如果宇宙的密度值真正大于此值,则我们必须求助于各种形式的暗物质,质量不为零的中微子等等才能消除矛盾。而实际上,星系形成研究工作的繁荣局面依赖于可能存在这样一种非寻常形式的暗物质。因此,检验所有可能绕过这个论点的方法是非常重要的。大部分这类天体物理建议已被证明是不可接受的。由Audouze提出的一个可能性是:或许能建立一个重子密度 $\Omega=1$ 的寻常宇宙模型,条件是能找到某种方法来破坏在这个模型中过多地产生 ${}^4\text{He}$ 。这里引证在标准 $\Omega=1$ 模型中的一些数字:产生26%左右的 ${}^4\text{He}$ 和小一个量级的D。因此,只要少量的 ${}^4\text{He}$ 能转换成 ${}^3\text{He}$ 和D,我们就可得到轻元素的观测丰度。但怎样能实现这种转换是不清楚的。由Audouze提出的一种途径是:可能存在一种半衰期为 10^{5-6} 秒的不稳定大质量粒子能使核合成过程依然不变,但通过衰变成 γ 射线,它能分解某些 ${}^4\text{He}$ 核。这或许不是一个理想的解决方法。我也不知道引入在目前实验中还未发现的其他物质形式如冷暗物质,轴子,宇宙弦等等是否更为自然。

我只提这个可能性是因为轻元素合成在我们目前流行的宇宙图像中起着关键的重要作用。如果我们能发现一种允许 $\Omega_{\text{重子}}=1$ 的公式,则对所有的宇宙学都将引起重要的反响。例如,正如Dekel所提到的,存在一些 $\Omega=1$ 的星系形成模型能与包括微波背景低涨落水平在内的一切观测相容。

六、小扰动宇宙

理论和观测之间决定性的相遇点取决于微波背景辐射涨落的上限,这个上限已由Partridge和Davies描述过。Silk和Dekel阐述了我们现在对宇宙中结构起源的理解。Silk的观点是大部分观测能被涉及冷暗物质、大统一理论、暴涨等等的单一理论所容纳。Dekel采取了在某种程度上更少雄心的观点,给出一个相当宽的对星系形成有利的参数空间。

在这个争论中,观测宇宙学家有一些重要的问题需要考虑。毫无疑问,大量有关的理论

来自各种基本粒子理论的预言和统一自然界四种力的企图。如假设强相互作用理论和弱-电理论在甚高能处是统一的,那么正是这些理论导致了大量过多的可能存在的新粒子。如果这些粒子从假真空到真真空解的相变发生在足够晚的阶段,则在早期有可能产生暴涨。在这些纯理论领域,我不是一位非常胜任的评论者,但是我愿意强调,我们正在讨论的并不是任何单一的基本相互作用,它是基本粒子物理学家们所赞同的,并且还能产生我们理解星系形成所需要的物理。相反,更确切地说,粒子物理学家们提出的是更普遍的理论形式,它们能被调整以得到有宇宙学意义的结果。但是这离一个现实的可证明的早期宇宙图像还很远。我强烈希望天体物理学家回忆一下Dekel的评述:在甚高能处的基本过程的理论实质上是不受限制的。

我简单地作了这些评论是为了强调,我们必须密切注视基本粒子理论的发展,同时,作为观测宇宙学家,在说明我们的数据时,我们不应盲从它们,也不要受它们的束缚。在基本粒子物理的领域中,时尚改变得非常之快。实际上存在着许多不同的成分,它们都是宇宙结构起源理论所必需的。其中许多是天体物理问题,这些问题是属于观测宇宙学领域的。

这些考虑给了我一种个人的信念即宇宙大尺度结构起源的理论并不是单一的而是多元的。虽然Silk宣称他已在用单一理论讨论宇宙中一切的起源上取得了极大成功,但我相信,在事实上,这是很多种理论以一种特殊的方式组合在一起。下面我列出它们中间的一部分:

- 宇宙小扰动理论。
- 等级成团理论。
- 宇宙学演化中的耗散过程理论。
- 星系和结构的爆发形成理论。
- 星系演化的天体物理。

我相信大家还能扩充这个目录。我个人倾向于每次尝试和解决它们中的一个,而不是同时解决所有的问题。

关于小扰动理论的现况已由Dekel作了极好的总结。值得重复的是无论对理论家还是观测家来说都应考虑更广泛的参数空间

- $\Omega = 0.1$ 到 1 ; $\Lambda = ?$; $H_0 = ?$
- 暗物质: 重子, 热, 温, 冷, 不稳定
- 涨落: 热, 等温
- 它们的起源: 暴涨, 弦, 它们的谱和几率分布
- 爆发一天体物理过程
- 可见物质和暗物质的相对分布

我相信随着时间的推移参数空间可能还会扩大。

我认为如何将理论和实验相比较是一个有趣的方法论问题。这些比较中的许多地方与得到星系两点相关函数 $\xi_{\rho\rho}(r)$ 的正确形状和强度的努力有关。问题在于如果存在暗物质,它就可能不是宇宙中全部物质相关函数的映照。我相信,不同质量天体形成方面的研究可能会变得更重要。因为这将与生成星系的扰动变成非线性 $\delta\rho/\rho \gg 1$ 的时刻有关,而不管这些扰动的起源如何。在第四节我已讲了现在对各种类型的天体如星系和射电星系形成时间能加以何种限

制, 以及对大尺度系统还能得到一些什么样的结论。可能这正是各种质量尺度上扰动成为不稳定的时刻的一个较好的标志。

目前的情况依然是: 在对星系形成时期的各种限制中, 由缺乏微波背景涨落所加的限制是最严格的。事实上, 如果在比现有实验灵敏度高十倍的情况下还没发现涨落, 则我们可能不得不对星系形成理论重新评价。

我们不应忘记, 从对现有数据的仔细说明中可能会发现关于初始涨落的重要线索。给我留下深刻印象的是Gott所作的杰出分析(以三维形式提出)。他对星系大尺度分布的拓扑怎样与初始涨落的随机相位相联系的说明, 是怎样用宇宙大尺度结构的观测数据来得到重要见解的卓越事例。他也为我们研究三维星系分布提供了一个强有力的概念工具。正是这个分析使我立刻转变到用“类海绵状的”这一术语来描述星系大尺度分布的立场上来。

七、非线性宇宙

非线性宇宙是我们熟悉和喜爱的宇宙。正是这些非线性产生了我们所看到的星系, 并使我们可以把宇宙结构的起源问题表述为如何使非线性回溯到它们的线性阶段的问题。在这一节中, 我基本上概括了所有为理解星系、类星体、射电源、星系际云等等的性质所必需的天体物理工具。下面我给出这些现象的一个简短和不完整的目录。

1. 星系和天体的形成时期

对此我已经强调了几次, 其他还未提到的观测有:

(a) 由Matsumoto及随后由Xie(谢光中)进行的近红外背景辐射的观测。如果它确实有宇宙学成分, 则对宇宙学有极大的潜在重要性。Matsumoto指出它的强度与Peebles和Partridge很久以前从年轻星系所预言的背景强度并没有很大的差别。进一步研究近红外背景看来是一个很重要的任务。

(b) 在大红移处富金属吸收系统中重元素丰度的形成的化学分布图像, 是研究星系中化学元素的一般分布的一个重要工具。Hunstead报告说他认为已首次在一个大红移吸收线系统中检测到了低金属丰度。这类天体可能有助于追踪星系中元素化学丰度随宇宙学时标的演化。

(c) Swarup建议搜索与星系团形成前物质相联系的星系际气云。我认为这是一类必须追踪的观测, 它将使我们进一步深入到红移4到1,000的未知领域去。

2. 星际气体的再加热

这依然是一个值得注意但实际上注意得较少的宇宙学问题。虽然Setti指出用 $\Omega=1$ 及温度 $kT=40\text{keV}$ 的星系际气体的热轫致辐射来说明X射线背景的观测强度是合适的, 但这可能引起很大的星系际气体压力去压缩Lyman- α 云。Sargent报告说, 如果星系际气体施加在Ly γ Ly β Ly α 云上的压力不太大, 则对它的性质可有一更严格的限制。他也报告了最近从大红移类星体的Gunn-Peterson检验得到的 $Z=3$ 处中性氢原子数密度的新上限。观测到的小于5%的减小率意味着 $Z=3$ 时 $N_{\text{H}} \leq 2 \times 10^{-12} \text{cm}^{-3}$ 。Koo报告了他用推断的在大红移处存在的类星体数目之最佳估计值对星系际气体云电离问题的研究。可以推测, 只有较低密度的星系际气体能

被类星体辐射出的Lyman连续流所电离。但重要的问题正是这个密度究竟低到何种程度。与此有关的一个问题是遥远类星体和富金属星系际气体云中的化学元素是在哪个红移值上形成的。这些问题都与第一代恒星的形成时期有关。

3. 在非线性区域影响 $\xi(r)$ 的天体物理过程

我认为爆发、形成类星体等等,不可避免地以这样或那样的方式导致星系以有偏形成。事实上,我宁肯从反面来提出问题,看起来无偏的星系形成比有偏的更难达到,并在这两种方式中偏倚都很容易发展起来的。这纯粹是一个天体物理问题而且答案是重要的。例如,虽然中微子热暗物质图像的模拟看起来能将宇宙的海绵状结构说明得非常好,但如Dekel所描述的它也许会被爆发和类星体形成等天体物理过程所削弱。

4. 天体物理

最后,我恳切地希望能对天体物理宇宙学的工具有更好的理解,这不单单是象Baade所提倡的那样(见Sandage的文章)对星系、矮星系、星系团和类星体等天体而言,而且还包括例如在测定 q_0 中起着如此重要作用的相关性。这个评论不仅仅可应用于如Tully-Fisher关系、星系速度弥散度-直径关系等相关性,还用于所有其他观测宇宙学的经验规律。

结 论

我们已总结了五天来的杰出成果,令人非常高兴的是我们的中国同行们能听到这么多杰出的专家们对重大问题所作的讨论,这些专家们对我们目前所达到的理解作出了重大贡献。除了重复我在本文开头所引的Sandage的话以外,¹不需要再对这个评述作任何总结了。我们已经站在天体物理宇宙学新纪元的起始点上。特别令人高兴的是这与中国物理学的巨大高涨是相一致的。

我们度过了美妙的一星期,我引用Francesco Sansovinos在解释Venice城名字时所作的可爱的说明来作为结论。他指出Venezia的名字来源于一个拉丁词组Veni etiam,他解释这个词组的意思是“来吧,再来吧,不管你来到这里多少次,你所看到的将永远是新奇和美丽”。对于北京城和中国天文学家,对于我们从主人那里受到的盛情款待,再没有什么会比这句话更合适了。

(潘容士译 周之宏 刘金铭校)

Observational Cosmology 1986

A Summary of IAU Symposium No. 124, Beijing, China

M. S. Longair

(Royal Observatory, UK)