

《Galaxy Formation and Evolution》读书报告

课程名称：星系天文学

完成日期：2023 年 8 月 15 日

作者：杜航慈

指导教授：陆由俊/毛淑德

目录

1 前言：写作背景、目的与个人研究取向	3
2 总体评价：这本书的方法论为何重要	3
3 从宇宙学到星系：全书最核心的物理骨架	4
3.1 宇宙学不是背景板，而是边界条件发生器	4
3.2 暗晕形成：结构形成的第一层骨架	5
3.3 冷却：星系从 halo 中被“分离”出来的关键步骤	5
3.4 恒星形成与反馈：星系形成理论最难、也最诚实的部分	6
3.5 并合与环境：暴力通道与外部边界条件	6
4 线性扰动、非线性坍缩与暗晕统计：形成理论的中层结构	7
4.1 线性扰动论与 Jeans 判据：结构从何开始增长	7
4.2 从 Press-Schechter 到 excursion set：粗糙但高产的统计理论	7
4.3 Halo concentration、spin 与 substructure：盘结构问题的上游变量	8
5 观测事实与统计量：理论必须面对的边界条件	8
5.1 观测不是附录，而是理论空间的边界	8
5.2 光度函数与特征尺度：星系形成理论的核心试题	8
5.3 颜色双峰与环境：形成史在统计空间中的投影	9
5.4 Tully-Fisher、Fundamental Plane 与 mass-metallicity：真正应解释的是相 关关系	9
6 盘星系：角动量、自引力与非轴对称结构	10
6.1 为什么这一部分对我最重要	10
6.2 盘尺度与角动量： $R_d \sim \lambda R_{\text{vir}}$ 的深意	10
6.3 为什么盘喜欢指数型：未完全解决，但极有启发	10
6.4 局域与全局不稳定性：Toomre Q 与 bar criterion	11

6.5 bar 与 spiral: 作为角动量运输器的统一理解	11
7 椭圆星系、AGN 与星系总体统计: 从个体动力学到总体规律	12
7.1 椭圆星系: 并合、耗散与黑洞共同塑造的热系统	12
7.2 AGN: 微观吸积与宏观 quenching 的桥梁	12
7.3 统计性质: 真正的形成理论必须解释总体统计	13
8 IGM 与再电离: 星系并不是在真空中形成的	13
8.1 从 Ly α forest 到 DLA: IGM 是宇宙密度场与重子循环的记录仪	13
8.2 再电离与 UV 背景: 低质量星系形成的全局阈值	14
9 从本人研究方向出发的理解: bar 与 spiral 在整套框架中的位置	14
9.1 bar 不是宇宙学的反面, 而是宇宙学的低能投影	14
9.2 spiral 也是形成史的动力学显像剂	15
9.3 我最认同的一种统一图景	15
10 本书的优点、局限与对本人研究训练的意义	15
10.1 我最欣赏的地方	15
10.2 我认为是的局限	16
11 结语: 这本书真正教会了我什么	16

1 前言：写作背景、目的与个人研究取向

本报告完成于 2023 年 8 月 15 日，系本人为满足博士培养方案中课程《星系天文学》的学分认定要求而撰写的课程读书报告。该报告将提交导师审阅与评分，并作为课程成绩与学分归属的重要依据。因此，这份报告的目标并不仅仅是“完成阅读任务”或“总结一本教材的内容”，而是要尽可能系统地展示本人对现代星系形成与演化理论框架的理解程度、物理判断力，以及将其与未来博士阶段科研方向相结合的能力。

本人在博士期间拟从事的主要研究主题为盘星系中的棒（bar）与旋臂（spiral）结构及相关动力学问题。正因如此，在阅读 Houjun Mo、Frank van den Bosch 与 Simon White 合著的经典教材 *Galaxy Formation and Evolution* 时，我始终带着一个非常明确的“阅读视角”：

如果 bar 和 spiral 不是单纯的形态学装饰，而是盘星系在特定形成史、角动量分布、气体供给、稳定性条件和环境作用下的动力学结果，那么这本书提供的宇宙学、暗晕、冷却、成星、反馈与并合框架，到底如何约束和塑造这些结构？

这意味着，我对本书的阅读并非平均分配注意力，而是始终在尝试把“星系形成”与“盘动力学结构”打通。某种程度上，这本教材最吸引我的，恰恰不是它罗列了多少观测事实，而是它从一开始就坚持一种非常强的物理学组织方式：**从宇宙学初始条件出发，经过引力增长、暗晕形成、重子冷却、恒星形成、反馈、并合和长期动力学演化，最终理解星系的整体统计性质与个体形态。**

在我看来，这一组织方式非常适合用来训练未来从事 bar/spiral 研究的学生。因为它不断提醒我们：一个棒、一个双臂螺旋、一个 box/peanut bulge、一个核环，都不是孤立现象；它们是同一条形成链条在后期盘动力学阶段的具体表达。

本报告基于本人对该书多个章节的日常笔记整理、扩展和系统化而成。写作时，我尽量保持以下三点：

- (1) 不停留于教材内容的机械复述，而是突出其物理主线；
- (2) 尽可能将不同章节内容贯通起来，而不是孤立摘录；
- (3) 在保证专业性与严谨性的前提下，加入本人作为未来 bar/spiral 研究者的理解与思考。

2 总体评价：这本书的方法论为何重要

与很多按观测分类逐项铺陈的教材相比，*Galaxy Formation and Evolution* 最鲜明的特点，是它首先把星系形成与演化问题定义为一个**宇宙学背景下的多尺度非线性物理问题**。从导论开始，作者就反复强调两个层面：

- 宇宙学给出初始条件与边界条件；

- 真正决定星系性质的，是在这些条件下发生的物理过程及其耦合。

这听起来像一句很“总论性”的话，但实际上它深刻地改变了阅读方式。因为一旦接受这一点，我们就不再把星系看成独立对象，而会把它们理解为下列因果链条中的产物：

宇宙学参数与初始涨落 → 暗物质晕形成 → 气体吸积与冷却 → 恒星形成与反馈 → 并合、环境作

这本书最令我信服的地方，就在于它不断试图把零散现象纳入这一统一框架中。比如：

- 为什么光度函数有特征尺度而不是纯幂律？
- 为什么有蓝云与红序列？
- 为什么有 Tully–Fisher 关系和 Fundamental Plane？
- 为什么 massive galaxies 倾向于 quench？
- 为什么大量盘星系中会出现 bar 与 spiral？

从我的研究兴趣出发，这种框架尤为重要。因为它意味着 bar/spiral 不能被理解为“形成以后才附加上去的细节”，而应被看作是盘星系在特定条件下的**动力学接口**：宇宙学与重子物理所决定的质量分布、角动量、盘厚度、气体分数与速度弥散，最终通过盘不稳定性而非轴对称模态的增长，被投影成我们观测到的棒、旋臂、环和伪核球。

因此，若让我用一句话概括本书的价值，我会说：

这本书真正教会读者的，不是“宇宙里有哪些星系”，而是“为什么偏偏是这些星系，而且为什么它们之间存在这些紧密的缩放关系和形态差异”。

3 从宇宙学到星系：全书最核心的物理骨架

3.1 宇宙学不是背景板，而是边界条件发生器

书中最重要起点，是把宇宙学看成星系形成的舞台与边界条件来源。尺度因子 $a(t)$ 、宇宙成分（重子、暗物质、辐射、暗能量）以及初始涨落谱，共同决定了结构是否有足够时间增长、哪些尺度先进入非线性、以及后续暗晕统计的整体形状。

在这一点上，本书的叙述非常健康：它明确区分了我们对初始条件的**统计知识**和对单次 realization 的无知。我们并不知道某个具体 proto-galaxy 的“初始地图”，但我们知道原初扰动近似高斯、近尺度不变且绝热。星系形成理论正是在这一统计 ensemble 上工作的。

对我而言，这一点特别重要。因为很多学生会误以为 bar 和 spiral 是“纯局域”问题，与宇宙学几乎无关。实际上并非如此。一个盘是否容易长棒，当然取决于盘的冷却、自引力和稳定性；但这些量又来自更早期的 halo 质量、自旋、浓度、并合历史与气体供给史。也就是说，棒旋问题并没有脱离宇宙学，只是这种联系被多层非线性过程过滤过了。

3.2 暗晕形成：结构形成的第一层骨架

在初始密度扰动随时间增长并进入非线性后，collisionless dark matter 通过引力塌缩与暴烈弛豫形成暗物质晕。书中在这一部分非常成功地建立了两个层次的认识：

- (1) halo abundance 和 mass function 强烈依赖宇宙学参数与初始功率谱；
- (2) halo 的内部结构却呈现某种近乎“普适”的形态。

从后文内容可知，Press–Schechter 与 excursion set 理论虽粗糙，却成功捕捉了 halo 质量函数与 merger tree 的基本统计行为。更高精度模拟则进一步揭示了 halo 的 NFW/Einasto 型密度轮廓、浓度参数、三轴性、自旋分布和 subhalo population。

这一切对我的研究兴趣并非“背景材料”，而是非常直接的前提条件。因为：

- halo concentration 决定盘所在势阱的内区形状；
- halo spin parameter 影响盘尺度与比角动量；
- subhalo 与并合历史决定盘受到多大外扰动；
- halo 与盘之间的角动量交换，会影响 bar 的形成与演化。

换句话说，一个盘星系最终呈现何种 bar/spiral 结构，首先取决于它“长在什么 halo 里”。

3.3 冷却：星系从 halo 中被“分离”出来的关键步骤

暗晕的形成只意味着引力势阱已建立，但这并不自动等于形成了星系。真正让 baryons 从 halo 中“抽离”出来的是冷却过程。

书中对 cooling function $\Lambda(T, Z)$ 的讨论十分关键。不同温度区间中自由–自由辐射、原子线冷却、分子冷却的不同主导地位，意味着冷却效率对 halo 质量、密度和金属丰度高度敏感。特别重要的几个门槛包括：

- $T_{\text{vir}} \lesssim 10^4$ K 时，若无金属和分子，冷却会被严重压制；
- 10^4 – 10^6 K 区间，原子线冷却效率高；
- 更高温时，主要由自由–自由辐射主导，冷却时间增长。

冷却的物理意义并不只是“把气体降温”，而是使重子能够在保持部分角动量的同时向更小半径塌缩，最终形成旋转支撑的盘。也正因此，盘的尺度与 halo 自旋之间存在近似关系

$$R_d \sim \lambda R_{\text{vir}}.$$

然而，教材也非常清楚地提示了历史上的 angular momentum catastrophe：如果重子过早冷却并在小子结构中凝聚，就会在并合中损失过多角动量，导致形成过小、过致密的盘。因此，冷却并不等于“越高效越好”。从现代观点看，反馈的一个重要功能，正是调节冷却发生的时间和空间尺度，使盘得以在保留合理角动量分布的前提下形成。

3.4 恒星形成与反馈：星系形成理论最难、也最诚实的部分

本书在恒星形成问题上的态度非常值得欣赏。作者并没有把 star formation law 描写成“已从第一性原理解决”的问题，而是坦率承认：从 GMC 到 dense cores 再到恒星，其间涉及湍流、磁场、自引力、分子形成、辐射反馈与超新星，仍然是一个高度复杂且部分依赖经验参数化的问题。

不过，在 galaxy formation 的尺度上，教材成功抓住了几个足够稳定的事实：

- 恒星形成常与分子气体面密度更直接相关；
- Kennicutt–Schmidt 律在统计意义上成立；
- 恒星形成效率并不高，存在明显的自调节；
- IMF 在多数普通环境中近似普适，但其理论起源仍不完全清楚。

真正使这些内容进入“星系形成主叙事”的，是反馈。早期 CDM 模型的核心困难不是“造不出星系”，而是“太容易把所有重子都变成恒星”。超新星反馈、再电离加热、AGN feedback 因而不是修补项，而是让宇宙不至于过度发光的关键机制。

在这里，我最关心的一点是：反馈并不只影响总恒星质量，它还会改变盘的**结构性**。例如更强反馈可以：

- 增加盘的厚度与速度弥散；
- 改变低角动量气体的保留与排出；
- 延迟中心质量浓集；
- 最终影响 bar instability 和 spiral activity 的发生条件。

因此，在我看来，反馈和 bar/spiral 并不是两个互不相干的主题。反馈通过改变盘的冷却历史和动力学“冷热程度”，直接进入了非轴对称结构发生的前提条件。

3.5 并合与环境：暴力通道与外部边界条件

层级宇宙学中，halo 的增长依靠 merger tree，这使并合成为星系形成中不可避免的一环。教材在这里非常清楚地区分了：

- halo-halo merger；
- galaxy-galaxy merger；
- major merger 与 minor merger；
- group/cluster 环境中的后续处理过程。

这一部分与后面椭圆星系形成、disk heating、thick disk、satellite quenching、harassment、ram-pressure stripping 等主题都直接相关。对盘星系尤其重要的是：minor merger 既可能触发 bar/spiral，也可能加厚盘、破坏薄盘，甚至通过长期累积改写盘的稳定性边界。

在我看来，盘星系的 bar 与 spiral 研究若脱离其环境史与并合史，往往会有一种“只研究实验室理想体系”的局限。真实宇宙中的盘并不是孤立演化的 razor-thin disk，而是在持续吸积、被小卫星扰动、与 halo 角动量交换、并在不同环境中被预处理的系统。

4 线性扰动、非线性坍缩与暗晕统计：形成理论的中层结构

4.1 线性扰动论与 Jeans 判据：结构从何开始增长

本书在宇宙学扰动论部分建立了一个极其清楚的物理图像：在膨胀背景上，小扰动的增长由引力、压强（或速度弥散）与 Hubble drag 的竞争决定。线性密度扰动方程

$$\ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} = 4\pi G\bar{\rho}\delta + \frac{c_s^2}{a^2}\nabla^2\delta + \dots$$

几乎浓缩了整套问题的精髓。

其中最打动我的，是 Jeans 长度的物理解释：

$$\lambda_J \sim c_s t_{\text{ff}}.$$

它说明“某个尺度上的扰动是否能塌缩”，本质上取决于声波传播能否在自由落体前把压力信息传遍扰动区域。这类“时间尺度竞赛”的思维方式，是我认为本书最有价值的方法训练之一。

对以后研究 bar/spiral 也很有启发意义。因为盘中的 Toomre Q 判据，本质上就是 Jeans instability 在差速旋转薄盘中的改写：自引力、压力/速度弥散与旋转剪切之间的竞争，决定盘上哪些模态能增长。

4.2 从 Press–Schechter 到 excursion set：粗糙但高产的统计理论

本书对 Press–Schechter 理论的处理非常有启发性。它既没有把 PS 神化，也没有轻蔑地把它一笔带过，而是清楚展示了这一理论的两重性：

- 它在细节上显然粗糙；
- 但它在统计上异常高产。

PS 理论通过把“线性平滑密度场超过坍缩阈值”与“形成质量大于某一尺度的 halo”联系起来，得到 halo mass function 的基本形状。excursion set 又把看似手工引入的 factor 2，转化为 first upcrossing 的自然结果。

我个人非常欣赏这一类理论工作的风格：先用一个错得优雅模型抓住主导结构，再用数值模拟告诉你它究竟错在哪里。这一风格对未来做 bar/spiral 理论也是有借鉴意

义的。因为许多盘动力学理论（例如局域线性稳定性分析、简化势中的轨道结构、swing amplification 模型）同样属于“并非全真，但非常高产”的理论。

4.3 Halo concentration、spin 与 substructure: 盘结构问题的上游变量

在读 halo 结构一章时，我最直接的感受是：许多看似“盘内部动力学”的问题，其实已经在 halo 层面被预设了一部分答案。

举例来说：

- halo concentration 影响内区引力势、旋转曲线形状和 bar slowdown；
- halo spin parameter 决定盘是否偏 extended 还是 compact；
- subhalo population 提供外部扰动源，可触发或扰乱 spiral/bar；
- assembly history 影响 halo concentration、自旋、substructure richness 以及 later gas supply。

特别值得强调的是 assembly bias 的思想。若固定 halo mass 后，不同形成历史仍对应不同 clustering、浓度、自旋和 subhalo 统计，那么星系结构性质（包括 bar fraction）理论上也可能承袭这种“次级依赖”。这为未来做 bar 与环境、bar 与 halo property 的统计关系研究，提供了非常值得重视的理论背景。

5 观测事实与统计量：理论必须面对的边界条件

5.1 观测不是附录，而是理论空间的边界

本书第二大优点，是把观测事实放在理论结构之中，而不是单独做一个“catalog 式附录”。无论是星系分类、旋转曲线、光度函数、颜色双峰、质量-金属丰度关系，还是环境依赖、高红移星系选择函数、CMB、weak lensing、Ly α forest，这些观测量都不是简单“描述世界长什么样”，而是在明确告诉理论：

任何可信的形成模型，至少必须解释到什么程度。

这一点对博士训练非常重要。因为在实际科研中，真正难的不是“提出一个有趣机制”，而是判断这个机制是否有资格进入主流物理叙事。一本好的教材应该不断训练读者：一个想法必须同时面对哪些硬约束。

5.2 光度函数与特征尺度：星系形成理论的核心试题

Schechter 函数

$$\phi(L)dL = \phi_* \left(\frac{L}{L_*} \right)^\alpha e^{-L/L_*} \frac{dL}{L_*}$$

之所以重要，不是因为拟合方便，而是因为它把两个根本事实写在一起：

- faint end 很陡，小系统很多；
- bright end 有指数截断，大系统极难高效形成恒星。

这直接把星系形成理论的核心问题暴露出来：为什么 baryons 在不同 halo 质量上的转化效率如此非平坦？为什么存在一个接近银河系质量尺度的“最佳形成窗口”？

结合后文 halo occupation、feedback、cooling flow suppression 与 AGN quenching 的讨论，我越来越强烈地感觉到：**宇宙中的“特征质量”不是一个单一来源的常数，而是多个时间尺度交叉的结果**。低质量端受再电离和反馈抑制；高质量端受冷却时间和 AGN 抑制；中间质量窗口形成效率最高。这种“两个极限之间最优”的结构，是本书反复出现的一种物理主题。

5.3 颜色双峰与环境：形成史在统计空间中的投影

蓝云与红序列是现代 galaxy evolution 最有力的经验图景之一。教材把它放回 halo/central/satellite 框架中理解：低质量 central 持续供气而偏蓝，高质量 central 在 hot halo + AGN 环境下 quench 而偏红；satellite 因 strangulation、ram-pressure stripping 和 tidal effects 倾向更快变红。

这种理解对我很有启发。因为它说明，许多表面上看是“内部 secular evolution”的结构问题，其实早已被外部供给史与环境预处理过。一个 gas-poor red disk 与一个 gas-rich blue disk，在 bar 形成与后续演化上的命运显然不同。而二者差异的上游原因，很可能首先来自 halo mass 与环境，而不是盘内部本征差异。

5.4 Tully–Fisher、Fundamental Plane 与 mass–metallicity：真正应解释的是相关关系

本书不断强调一个非常健康的理论目标：不是解释单个观测量，而是解释观测量之间的相关关系。这一点我极其认同。

以盘星系为例，Tully–Fisher 关系

$$L \propto V^\alpha$$

要求模型同时协调 halo mass、baryon conversion efficiency、disk self-gravity 和 halo response。对椭圆星系，Fundamental Plane 则把尺寸、速度弥散、表面亮度与质量光度比耦合起来。mass–metallicity relation 又要求形成模型在 inflow、outflow、retention 与 SFE 之间给出正确趋势。

对我未来做 bar/spiral 研究而言，这一点尤其关键。若一项关于 bar fraction 的工作只停留于“描述某类星系更容易长棒”，而不把 bar 的出现与整体缩放关系、气体分数、质量–尺寸关系、halo 结构联系起来，那么它其实还没有真正进入 galaxy formation 的层面。

6 盘星系：角动量、自引力与非轴对称结构

6.1 为什么这一部分对我最重要

作为未来拟从事 bar 与 spiral 研究的学生，我在本书中最关注的自然是盘星系相关章节。原因很直接：我希望弄清楚，盘、棒、旋臂到底在整个 galaxy formation 叙事中处于什么位置。

本书给出的答案，我认为非常有力量：

- 盘的存在首先来自冷却与角动量守恒；
- 盘的尺度来自 halo virial radius 与 spin parameter 的组合；
- 盘并不总是稳定，它会通过 bar、spiral、clumps 等非轴对称模态进行自我重塑；
- 这些结构又反过来改变气体内流、中心质量浓集、成星史与形态演化。

因此，bar/spiral 不是主线以外的末梢现象，而是盘星系在形成后的**长期自组织过程**。它们把先前所有章节给出的宇宙学与重子物理信息，转化为可见结构与后续演化路径。

6.2 盘尺度与角动量： $R_d \sim \lambda R_{\text{vir}}$ 的深意

对指数盘而言，一个最核心的一阶关系是

$$R_d \sim \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{j_d}{m_d} \right) \lambda R_{\text{vir}}.$$

这条关系的魅力在于，它极其清楚地揭示了盘尺度的真正控制量：

- 不是“星形成了多少”；
- 而是“每单位质量最终保留了多少比角动量”。

从 bar/spiral 的角度看，这一点至关重要。因为盘稳定性不仅与总质量有关，更与面密度分布有关。相同质量下，更紧致的盘有更高中心面密度，更容易全局不稳定；更扩展的盘则可能只维持多臂结构而不形成强棒。

这也让我对“角动量问题”有了更深的理解。角动量不仅决定盘能否形成，更决定盘形成后在稳定性相图中的位置。因此，任何研究 bar/spiral 的工作，如果不认真考虑盘的角动量来源、保留与再分配，就很难从形成论角度讲清问题。

6.3 为什么盘喜欢指数型：未完全解决，但极有启发

本书讨论了盘表面密度近似指数分布这一经典事实，同时指出：这并非显然结果。仅靠暗晕的原初角动量分布，并不能自然得到严格指数盘；黏滞或引力力矩所致的长期角动量输运，则可能使更广泛的初始条件演化向指数分布靠近。

我很认同教材在这里的保留态度。指数盘并不是“理应如此”的背景设定，而是 galaxy formation 理论最深的问题之一。尤其从 bar/spiral 研究者角度看，指数盘不是静态背景，而是各种不稳定性发生时的初始条件；而 bar/spiral 本身又会进一步重塑盘，使它偏离、接近或重新生成指数分布。

这让我越来越倾向于一种理解：**真实盘的结构，不是纯粹的初始条件遗产，也不是单一 secular process 的产物，而是冷却、成星、反馈与长期角动量输运共同作用后的 attractor。**

6.4 局域与全局不稳定性：Toomre Q 与 bar criterion

在盘稳定性分析中，本书非常清楚地区分了局域不稳定与全局不稳定。

局域上，Toomre 判据

$$Q = \frac{\sigma_{Rk}}{3.36G\Sigma}$$

(对恒星盘) 告诉我们自引力、速度弥散与差速旋转之间的竞争。它不仅决定盘是否会发生局域碎裂、spiral fragment 或 clump formation，也直接关系到 ISM 是否容易形成 GMC 和恒星形成阈值。

全局上，则需要考虑 bar-mode instability。书中引用的 Efstathiou/Ostriker-Peebles 类判据，本质上都指向同一物理事实：如果盘太冷、太薄、太自引力，而 halo/bulge 提供的稳定背景不足，就容易形成强 $m = 2$ 模态，即 bar。

这部分对我的研究极其重要。因为它明确指出：**棒不是盘的“偶发故障”，而是冷薄自引力盘在给定约束条件下寻找新平衡的一种方式。**

6.5 bar 与 spiral：作为角动量运输器的统一理解

我最认同本书的一点，是它没有把 bar 与 secular evolution 完全边缘化。虽然篇幅上它们不像 halo/cooling 那样展开得极深，但逻辑位置是明确的：非轴对称结构是盘星系形成之后的**持续重塑机制**。

如果用我自己的语言重述，我会这样概括：

bar 和 spiral 的本质，不在于它们是图像中的条纹或臂，而在于它们是盘中高效的角动量运输器。

其主要后果包括：

- 把内盘角动量输送给外盘与 halo；
- 驱动气体向内流动；
- 诱导核区成星、环状结构与伪核球；
- 通过 buckling 形成 box/peanut bulge；
- 改写盘的径向质量分布与速度弥散结构。

对 spiral 而言，我也很欣赏教材保持开放的态度。spiral 既可能与准稳密度波有关，也可能是 swing amplification 支持的瞬态再生结构，或由伴星潮汐、bar forcing、噪声与 GMC 散射共同维持。就我个人理解而言，spiral 的真正魅力恰恰在于它不应被过度单一化；它更像是盘在接近引力不稳定边界时的一种组织化非稳态。

7 椭圆星系、AGN 与星系总体统计：从个体动力学到总体规律

7.1 椭圆星系：并合、耗散与黑洞共同塑造的热系统

本书关于椭圆星系的章节给我最大的启发，是彻底打破了“椭圆就是简单 spheroid”的印象。箱形/盘形等光度线、core/cusp 结构、slow/fast rotator 区分、Fundamental Plane、黑洞-速度弥散关系，都表明椭圆星系是极其丰富的动力学系统。

我尤其喜欢作者对形成机制的现代组织方式：真正重要的不是简单说“椭圆由并合形成”，而是进一步区分：

- wet mergers: 有气体耗散参与，更易形成 fast rotator、较陡中心结构；
- dry mergers: 少气体、近无耗散，更易形成 massive, boxy, slow-rotating ellipticals 与 core。

这一框架之所以强大，在于它把多个观测事实——光度结构、旋转支撑、中心 cusp/core、stellar population age——统一到并合时的**气体分数**这一更基本变量上。

虽然本人未来主要研究盘星系，但这一章对我同样重要。因为 pseudo-bulge 与 classical bulge 的区分、box/peanut bulge 的动力学起源，以及 massive spheroid 与 disk regrowth 的可能性，都说明盘和椭圆并不是完全割裂的两个世界。现实星系的很多形态成分，其实是多种通道叠加的结果。

7.2 AGN：微观吸积与宏观 quenching 的桥梁

AGN 章节给我的最大感受，是它把“活动星系核”从一个似乎很 exotic 的专题，重新放回 galaxy formation 主线之中。Eddington luminosity、薄吸积盘、相对论喷流、BLR/NLR 与 torus 统一图景，这些内容固然精彩，但更重要的是它们在 galaxy formation 中的角色：

- (1) 解释 SMBH 如何高效释放引力势能；
- (2) 说明黑洞增长如何与 spheroid growth 紧密耦合；
- (3) 提供 massive halos 中抑制冷却流与星形成的最合理反馈机制。

对我而言，AGN 还有一个与 bar/spiral 研究特别相关的意义：AGN fueling 本质上是一个**多尺度角动量输运问题**。从 halo 吸积到盘内非轴对称扭矩，再到核区结构和吸积盘，

每跨一级都必须进一步移除角动量。bar、interaction、minor merger、nuclear spirals 等，因此都可能是 AGN 供给链条中的重要环节。

因此，我并不把 bar/spiral 与 AGN 看成两个平行话题，而是把它们视作“角动量输运链条上不同尺度的节点”。

7.3 统计性质：真正的形成理论必须解释总体统计

在读到 halo occupation、conditional luminosity function、color bimodality、stellar mass function、clustering bias 等内容时，我有一个非常强烈的感受：形成理论真正的试金石，不是能否为某个著名星系讲出一个故事，而是能否在总体上同时解释：

- 星系数目随光度和质量如何分布；
- 不同颜色、类型、环境样本如何聚类；
- central 和 satellite 的统计行为如何不同；
- 成星史与 quenching 如何随质量和红移演化。

这对未来做 bar fraction、spiral fraction 研究同样是重要提醒。真正有形成论意义的问题不是简单问“有多少棒”，而是问：

$$P(\text{bar} \mid M_*, f_{\text{gas}}, B/T, \mu_*, \lambda, \text{env}, z, \dots).$$

也就是说，bar/spiral 的出现应被放回高维条件分布中理解，而不是作为一个脱离主框架的形态学标签来统计。

8 IGM 与再电离：星系并不是在真空中形成的

8.1 从 Ly α forest 到 DLA：IGM 是宇宙密度场与重子循环的记录仪

本书对 IGM 的处理让我印象非常深。它清楚地表明，IGM 不是“星系之外的背景气体”，而是：

- 星系形成之前的原料库；
- 星系形成过程中持续交换质量和金属的外部储层；
- 可通过吸收线直接探测的大尺度密度场与热史记录。

尤其 Ly α forest 章节极其优雅。它把原本被理解为“一朵朵离散吸收云”的现象，重新组织成“连续 IGM 密度场沿视线方向的一维投影”。我非常欣赏这种观念转变，因为它和现代统计场论、功率谱分析以及 cosmic web 图景完全一致。

对未来做盘动力学研究，这部分虽然不像 bar/spiral 那样直接，但它仍然提醒我：盘的燃料来源、金属丰度历史、CGM/IGM 循环与高红移吸积模式，都可能在后期盘结构中留下长期影响。一个看似很“内部”的 bar-driven inflow 问题，其实可能已经被更早的 CGM supply history 所决定。

8.2 再电离与 UV 背景：低质量星系形成的全局阈值

Gunn–Peterson optical depth、再电离 photon budget、UV background 与 photoheating 的讨论，则直接进入了低质量 halo 星系形成问题。再电离提高了低质量系统气体保持和冷却的门槛，成为 dwarf galaxy abundance、faint-end slope 与浅势阱系统成星史的重要上游控制因素。

从方法论上说，我很喜欢这一章的一点是：它总是在提醒读者，大尺度背景并不是“恒定已知的外参”，而是星系形成理论必须自洽面对的一部分。你不能一边讨论小尺度 galaxy formation，一边假装再电离背景、IGM 热史与吸积环境不存在。

9 从本人研究方向出发的理解：bar 与 spiral 在整套框架中的位置

9.1 bar 不是宇宙学的反面，而是宇宙学的低能投影

如果只看尺度，宇宙学初始涨落、CMB、halo merger tree 似乎离 bar 很远；但本书恰恰让我更坚定地认为：bar 是宇宙学供给条件在盘动力学层面的一种低能投影。

一个星系能否形成 bar，至少取决于：

- halo mass 与 concentration；
- halo spin 与角动量分布；
- disk mass fraction；
- disk thickness 与 velocity dispersion；
- gas fraction 及其冷却/反馈史；
- bulge 是否存在以及中心质量浓集如何增长；
- 外部扰动与并合史。

这些量没有一个不是先前 galaxy formation 链条中的产物。因此，bar 的存在本身就在回答一个问题：

在给定的 cosmological assembly history 下，这个盘有没有进入全局非轴对称不稳定区？

而 bar 一旦形成，又会反过来改变后续演化：

- 向外盘和 halo 输送角动量；
- 向内输送气体；
- 形成 nuclear ring 与 pseudo-bulge；

- 可能影响 AGN fueling;
- 通过 buckling 改写垂向结构。

所以在我看来, bar 并不是“形成完成以后”的附录, 而是处在 galaxy formation 主链条中后段的一个**关键重整器**。

9.2 spiral 也是形成史的动力学显像剂

对 spiral 结构, 我的理解与 bar 略有不同。它更不适合用“有或无”来描述, 而更像一个由多种机制共同维持的模式集合: 准稳密度波、瞬态 swing-amplified 模态、tidal arms、bar-driven spirals、局域碎裂形成的 arm fragments 等都可能参与。

但无论具体机制如何, spiral 的强度、臂数、形态和持续时间都离不开如下参数:

- 盘面密度 $\Sigma(R)$;
- 径向速度弥散 σ_R ;
- 旋转曲线, 即 $\Omega(R)$ 与 $\kappa(R)$;
- 气体分数、多相 ISM 结构与反馈;
- 外扰动和伴星环境。

这些参数又无一不是形成史的投影。于是, spiral 与 bar 一样, 也应被理解为 formation history 的动力学示踪器, 而不是图像特征本身。

9.3 我最认同的一种统一图景

在读完整本书相关章节并结合本人兴趣后, 我越来越倾向于用下面这句话概括星系结构研究与星系形成理论之间的关系:

宇宙学决定盘是否可能存在, 星系形成决定盘会长成什么样, 而盘动力学决定盘如何继续自我改写。

bar 与 spiral, 正是这个“自我改写阶段”最清晰、最优美、也最可诊断的语言。

10 本书的优点、局限与对本人研究训练的意义

10.1 我最欣赏的地方

(1) **诚实** 本书几乎从不把未解决问题包装成“已经理解”。无论是 IMF、反馈、SMBH 种子、椭圆星系的形成细节, 还是 halo 中 baryon cycle 的微观机制, 作者都保持了很高的学术诚实。这一点我非常欣赏。

(2) **强调时间尺度比较** 无论冷却、动力学时间、成星时间、并合时间, 还是吸积与 quenching, 本书都不断强调: 物理过程是否重要, 取决于它和别的过程相比有多快。这是一种非常标准、也非常有力量的理论物理思维训练。

(3) **历史观正确** 书中的历史回顾不是简单列文献, 而是展示不同理论是如何被观测一步步逼出来的。这种写法帮助读者理解: 标准模型不是“大家喜欢它”, 而是它在多重约束下生存了下来。

(4) **统计与个体并重** 本书既讲 halo/galaxy population 的统计规律, 也讲单个系统的动力学和结构。这种层次切换, 对培养真正的 galaxy formation 视角非常重要。

10.2 我认为的局限

(1) **对 bar/spiral 的篇幅仍偏后置** 尽管作者承认 secular evolution 的重要性, 但总体叙事仍倾向于把 bar/spiral 视作形成后的后期动力学修饰。以今天的视角看, 我认为可以更进一步强调: 对许多盘星系而言, 这些结构不是次要修饰, 而是形态生成本身的重要机制。

(2) **对冷流、CGM 与 baryon cycle 的强调若从今天回看可更强** 成书时代限制使得 CGM、cold streams、galactic fountains、circumgalactic recycling 等内容不如近年来那样突出。而这些过程对盘的持续供给、气体金属丰度和长期 bar/spiral 活动其实都很关键。

(3) **对角动量问题的“危机感”可以更强** 书中当然讨论了盘尺度与比角动量, 但若从未来做盘动力学的角度看, 我会更想把 angular momentum catastrophe 及其现代变体更早、更鲜明地作为核心问题提出。因为盘拿不到对的角动量, 一切关于 bar/spiral 的精细讨论都会失去基础。

11 结语: 这本书真正教会了我什么

读完 *Galaxy Formation and Evolution* 并整理这份课程报告后, 我觉得这本书真正教会我的, 至少有以下几点:

1. 星系形成首先是宇宙学问题。

任何关于星系结构的解释, 若不问初始涨落、暗晕统计和宇宙膨胀史, 都是不完整的。

2. 星系形成是一个时间尺度竞赛问题。

不是看某个过程“存不存在”, 而是看它相对于冷却、反馈、并合、动力学重排到底谁更快。

3. 形态不是标签, 而是形成史与动力学史的压缩投影。

不论是盘、椭圆、棒、旋臂、伪核球还是 box/peanut bulge, 都是某段物理历史写在相空间中的结果。

4. **真正好的理论不是解释一张漂亮图片，而是解释一整组紧关系。**

光度函数、颜色双峰、TF、FP、质量-金属丰度关系、clustering bias、IGM 吸收统计等，才是理论真正要面对的对象。

5. **bar 与 spiral 不是次要现象，而是盘星系形成理论与真实动力学相接的地方。**

对我未来的博士研究而言，这一点尤其重要。研究棒旋结构，不应停留在图像分析，而应把它们放回 halo growth、气体供给、反馈、环境与 secular transport 的整体框架中理解。

最后，我愿意用一句更偏个人化的话来结束这份报告：

宇宙学给出随机初始场，引力把它织成暗晕网络，冷却把重子从晕里拽出来，恒星形成与反馈决定哪些重子能留在星系里，而 bar 与 spiral 则是盘星系在这一切历史重压之下，对角动量与自引力做出的最诚实、也最优美的回答。

对我来说，这也正是为什么我希望在博士阶段继续深入 bar 与 spiral 研究：因为它们不是“细节图案”，而是星系形成理论落到真实动力学上的瞬间。

报告完成时间：2023 年 8 月 15 日