

宇宙纪事：在超级计算机中模拟宇宙

第一部分：虚拟望远镜——我们为何要模拟宇宙

第1节：一个无法倒带的宇宙

宇宙学的研究提出了一项独特而深刻的挑战。与那些可以重复、修改和控制实验的实验室科学不同，天文学家只有一个宇宙可供观测。其长达138亿年的宏伟历史是一个独一无二的事件，一个已经展开且无法为第二次观看而倒带的故事。¹ 我们无法在实验室中创造一个“对照宇宙”，来看看假如引力稍有不同，或者宇宙大爆炸后的初始条件被改变，可能会发生什么。这一根本性的限制似乎将我们起源的终极问题置于传统实证科学的范围之外。

正是这一挑战，将宇宙学模拟从一个单纯的计算工具提升为现代天体物理学的基石。这些模拟本质上是我们的虚拟实验室——我们的宇宙时间机器。¹ 它们是计算模型，让科学家能够创建一个受已知物理定律支配的“盒子中的宇宙”，并在超级计算机上用数月甚至数天的时间，观察它在数十亿年间的演化。¹ 这些数字创造物的主要目的是复制宇宙的整个演化史，从宇宙大爆炸后不久的炽热、稠密、近乎均匀的状态，到我们今天所处的错综复杂、结构化的宇宙。³ 从原始等离子体中微小的、由量子播下的涨落开始，模拟追踪引力不懈的拉力，它放大了这些种子，将它们培育成我们用望远镜观测到的由星系和星系团构成的广阔宇宙网。⁷

这种方法的真正力量在于它能够在抽象理论与可观测现实之间建立起坚实的联系。一个宇宙学理论最终是一套数学方程，但这些方程在数十亿年复杂、非线性演化过程中的后果，是无法仅用纸笔计算出来的。⁴ 模拟充当了不可或缺的翻译者，将理论物理的语言转化为可以与望远镜收集的光线直接比较的虚拟现实。⁵ 这个过程让科学家能够严格检验他们的假设。⁵ 如果一个基于特定理论构建的模拟产生的宇宙在统计上与我们自己的宇宙相似，那么它就为该理论提供了强有力的支持。反之，如果模拟出的宇宙与现实毫无相似之处，那就表明其基础理论要么不完整，要么根本就是错误的。¹² 如此一来，宇宙学模拟不仅仅是宇宙学的一个应用；它是一种方法论上的必需品，使得宇宙学能够作为一门可检验的实证科学

而运作。

第2节：宏大问题与标准模型(Λ CDM)

宇宙学模拟并非凭空构建；它们旨在直面宇宙最深邃的奥秘。现代宇宙学的核心是一个被称为“拉姆达-冷暗物质模型”(Lambda-Cold Dark Matter model, 简称 Λ CDM)的主流理论框架。¹⁴ 这个宇宙学的“标准模型”为我们提供了关于宇宙组成和演化的最佳(尽管尚不完整)描述。它假定宇宙由三种主要成分构成, 其中两种极为神秘¹⁷:

- 普通物质(重子): 仅占宇宙总质能含量的约5%, 这就是我们熟悉的构成恒星、行星、气体和人类的“东西”。¹⁷
- 冷暗物质(CDM): 约占宇宙的27%, 这是一种看不见的、不发生相互作用的物质形式, 尚未被直接探测到。它的存在仅能通过其对我们可见物体的引力作用来推断。在 Λ CDM模型中, 暗物质扮演着“宇宙脚手架”的角色, 一个看不见的骨架, 其引力影响决定了星系的形成地点和方式。⁹
- 暗能量(拉姆达, 或 Λ): 占主导地位且最为神秘的成分, 约占宇宙的68%。暗能量被认为是空间本身固有的一种排斥性能量, 一种“反引力”, 正导致宇宙的膨胀随时间加速。

7

模拟是 Λ CDM模型的终极试验场。¹⁰ 科学家们基于 Λ CDM是正确的假设来构建他们的虚拟宇宙, 然后仔细审视结果。该模型最惊人的成功之一是它对“宇宙网”的自然预测。⁹ 当在时间上向前演化时, Λ CDM模拟会自发地产生一个由巨大的丝状结构和片状壁组成的广阔、相互连接的网络, 其间点缀着巨大的、空旷的空洞。星系和星系团并非随机散布, 而是优先在这些丝状结构的密集交汇处形成, 就像城市坐落于横跨大陆的高速公路交汇点一样。⁸ 这种预测结构与大型星系巡天(如斯隆数字化巡天, SDSS)得出的真实宇宙图谱之间惊人的一致性, 是支持 Λ CDM范式的最有力证据之一。²⁰

此外, 模拟对于探测暗能量的性质至关重要。一个关键问题是, 这种宇宙加速是由一个真正的宇宙学常数(Λ) (如爱因斯坦所提出的空间不变能量密度)引起的, 还是由某种其影响力随宇宙时间变化的“动态”流体造成的。¹² 通过运行相互竞争的模拟——一个采用恒定暗能量, 另一个则让其演化——并将所得的大尺度结构与来自巡天项目(如暗能量光谱仪, DESI)的精确观测数据进行比较, 科学家可以寻找可能揭示这种神秘力量真实性质的细微差异。

12

这个过程揭示了模拟与理论之间是一种动态的双向关系。虽然模拟旨在检验理论, 但其结果常常揭示出新的谜题, 这些谜题反过来又推动了理论和观测的进步。例如, 早期的 Λ CDM模拟虽然在宏观尺度上取得了成功, 但未能产生逼真的星系。它们遭受了“过度冷却问题”的困扰, 即过多的气体过早冷却并转化为恒星, 导致形成的星系质量过大。它们还存在“角

动量问题”，即产生的星系盘相比真实的旋涡星系过小过密。²⁴ 这些由

模拟本身揭示的失败，迫使理论家们意识到，一个关键的物理环节缺失了：反馈。这指的是与恒星形成和超大质量黑洞相关的剧烈、高能过程，这些过程调节着星系的生长。这一认识催生了新一代更复杂的模拟，其中包含了反馈物理学，这些模拟在再现观测宇宙方面取得了远超以往的成功。²⁴ 因此，模拟不仅仅是思想的被动验证者；它是一个积极的探索者，它描绘了我们理解的边界，并为新的发现指明了方向。

第二部分：从灯泡到百亿亿次级——宇宙模拟简史

宇宙模拟的历程是一个雄心壮志、永不停歇的故事，与计算能力的指数级增长密不可分。从巧妙的桌面装置到遍布全球的超级计算机网络，构建虚拟宇宙的追求在80多年的时间里不断推动着科学和技术的边界。

第3节：先驱者与N体问题

远在硅芯片问世之前，第一次宇宙学模拟的尝试是一项模拟计算的巧思杰作。1941年，瑞典天文学家埃里克·霍姆伯格(Erik Holmberg)使用一个由精确定位的灯泡组成的系统，模拟了星系碰撞中的引力相互作用。²⁸ 他利用了引力的平方反比定律与光强度衰减在数学上的等效性，用一个光电管来测量每个“恒星”受到的“力”。这个巧妙的装置证明了该问题的巨大难度，这个挑战如此之大，以至于需要跳出常规思维。

模拟的数字时代始于20世纪60年代，由德国的塞巴斯蒂安·冯·霍尔纳(Sebastian von Hoerner)等先驱者进行了首次纯计算的模拟。⁵ 这些模拟在早期的巨型计算机上运行，只能追踪几百个粒子的运动，一次运行就可能消耗大量昂贵的计算机时间。²⁹ 他们面临的根本障碍是引力N体问题令人望而生畏的复杂性。为了精确地演化一个包含

N个粒子的系统，必须在每个时间步长计算每个粒子对其他所有粒子的引力。这意味着计算量与粒子数的平方成正比，这种关系表示为 $O(N^2)$ 。²⁸ 将粒子数量加倍，工作量不止是加倍，而是变成了四倍。这个“

N^2 的诅咒”使得模拟现实数量的恒星或暗物质粒子看起来完全不可能。

克服这一障碍成为了剑桥大学的斯韦勒·阿瑟斯(Sverre Aarseth)等人毕生的事业。²⁸ 从20世纪60年代开始，阿瑟斯开发了一系列日益复杂和高效的N体代码，引入了诸如自适应

时间步长(允许不同粒子以不同速率演化)和处理近距离粒子接触时出现的棘手奇点的方法等关键技术。²⁸ 他将自己的代码公之于众的理念,培养了一种合作精神,这对该领域的发展至关重要。³²

这些早期的先驱者面临着三大挑战。³² 首先,计算能力的极度匮乏是一个持续的限制。模拟一个仅有10万颗恒星的小型球状星团,据估计也需要一台“万亿次浮点运算”(Teraflop)的计算机,这比当时任何可用的计算机性能都高出几个数量级。³² 其次,可视化技术非常原始,这使得解读大量的数值输出和理解数据中展开的复杂三维动态变得极其困难。³² 最后,验证是一个持续的担忧。对于如此复杂的系统,如何能确定结果反映的是真实的物理,而不仅仅是数值误差的累积或是特定算法的产物?这个问题催生了最早的“合作实验”,即不同的小组用各自不同的代码模拟同一个问题以比较结果,这种做法至今仍然至关重要。³²

第4节:里程碑式的项目:雄心的新尺度

宇宙模拟的历史,在很多方面,就是超级计算机的历史。²³ 从单处理器机器到大规模并行架构——拥有数千个处理核心协同工作的计算机——的转变,是最终为大规模问题打破

N2诅咒并开启一个雄心新时代的技术飞跃。

这个新时代的到来以**千禧年模拟(Millennium Simulation)**为标志,该项目在2005年发布首批结果时,成为了宇宙学的一个分水岭时刻。³⁴ 该模拟由处女座联盟(Virgo Consortium)在德国加兴的马克斯·普朗克天体物理研究所的一台超级计算机上运行,其计算规模前所未有的。在一个多月的时间里,这台机器追踪了在一个边长超过20亿光年的模拟立方体空间内超过100亿个粒子的演化。¹⁶ 千禧年模拟是一次“仅暗物质”或“仅引力”的运行;它没有包含气体和恒星的复杂物理过程。相反,其目标是创建一个高保真度的宇宙引力“骨架”。¹⁶ 科学家们随后可以对这张暗物质地图进行后处理,使用称为半解析模型的简化配方,在预期形成星系的地方“绘制”上星系。³⁴ 该项目取得了巨大成功。其惊人的可视化图像首次提供了真正引人注目的、大尺度的宇宙网视图,成为定义我们对宇宙结构理解的标志性图像,并为所有后续工作树立了标杆。²²

尽管千禧年模拟具有革命性意义,但它无法直接模拟恒星的诞生与死亡以及宇宙气体的行为——即赋予星系可见形态的重子物理学——这使得故事的一个关键部分未能讲述。³⁹ 下一个巨大的飞跃是将流体动力学,即流体的物理学,直接整合到模拟中。这开启了“流体动力学时代”,其标志是两个主要的竞争项目,它们在2010年代中期取得了成果。

Illustris项目,于2014年首次发表,是首批实现大规模、高分辨率星系形成流体动力学模拟的项目之一。²⁷ 它采用了一种名为AREPO的新颖而强大的模拟代码,该代码使用动态的移动网格来追踪气体流动。该模拟包含了一个全面的物理模型,考虑了恒星形成以及来自恒

星爆炸和超大质量黑洞的强大“反馈”。²⁷ 该项目将其庞大的数据宝库公开发布的承诺，使其成为整个天文学界宝贵的资源。²⁷

与此同时，千禧年模拟背后的团队——处女座联盟，正在开发自己的流体动力学模拟套件：**EAGLE**（星系及其环境的演化与组装），其首批成果于2015年出现。²⁶ EAGLE采用了不同的技术方法，使用了一个经过大量修改和改进的、更传统的平滑粒子流体动力学（SPH）代码P-Gadget3的版本。⁴¹ 一个关键的理念差异在于其校准策略。反馈的“次网格”配方经过明确调整，以使模拟能够再现当今真实星系群体的关键观测属性，例如不同质量星系的总数。²⁶

这些基础项目的成功为新一代更具雄心的模拟铺平了道路。**IllustrisTNG**（“下一代”）在原始Illustris的基础上，通过纳入新的物理学，最引人注目的是磁流体动力学，来研究宇宙磁场的作用，并通过在更大的体积和更高的分辨率下运行模拟。⁴³ 同样，像

Astrid这样的项目也推动了SPH模拟的边界，在一个巨大的宇宙体积中追踪近万亿个粒子，特别关注超大质量黑洞的动力学和合并，为未来的引力波天文台做出预测。⁴⁶ 总之，这些里程碑式的项目描绘了一条规模、复杂性和物理保真度不断增加的清晰轨迹，这直接反映了我们日益增长的计算能力和理论理解。

项目名称	首次成果年份	主要代码/方法	粒子数(约)	体积(约边长)	主要贡献/科学焦点
千禧年模拟	2005	GADGET-2 (N体)	100亿	20亿光年	首个大体积、高分辨率的宇宙暗物质“骨架”。 ¹⁶
Illustris	2014	AREPO (移动网格)	180亿 (总计)	3.5亿光年	首个具有全面星系形成模型的大尺度流体动力学模拟。 ²⁷
EAGLE	2015	P-Gadget3 (SPH)	70亿 (总计)	3.26亿光年	校准次网格物理以高保真度匹配当今的星系群体。 ⁴¹
IllustrisTNG (TNG300)	2017	AREPO (移动网格)	3000亿 (总计)	10亿光年	增加了磁流体动力学;为大质量星系团提供了大量统计数据。 ⁴³

Astrid	2022	MP-Gadget (SPH)	1万亿 (总计)	8.15亿光年	具有超大质量黑洞动力学和合并详细模型的大体积模拟。 ⁴⁶
--------	------	-----------------	----------	---------	---

第三部分：宇宙食谱——模拟宇宙的配方

在计算机中构建一个宇宙，好比遵循一份复杂的多阶段食谱。它始于一个简单的基础——暗物质的引力——然后逐步叠加更复杂、计算要求更高的成分，如气体的流体动力学以及恒星和黑洞的爆炸性物理过程。这些“宇宙食谱”的演变是一个算法创新的故事，其核心挑战在于捕捉宇宙巨大的物理尺度范围。

第5节：暗物质骨架：引力求解器的演进

任何宇宙学模拟的第一步也是最基本的一步，是模拟暗物质的演化，它构成了宇宙的引力骨架。²⁸ 这是经典的N体问题，而解决它的历史堪称计算优化的典范。核心挑战是物理学家所说的“动态范围”问题：一个模拟必须足够大，才能成为宇宙的公正样本，同时又要有足够的分辨率来观察星系形成的精细细节。⁴⁹ 在所有尺度上使用单一、统一方法的幼稚做法在计算上是不可能的。⁵¹ 因此，引力求解器的演进史就是一部发展巧妙策略，将计算精力集中在最需要的地方的故事。

最直接的方法是直接求和法(**Direct Summation**)。在这种方法中，代码计算模拟中每一对粒子之间的引力。这好比一个满是人的房间，每个人都必须与其他人握手。虽然这种方法完全精确，但其 $O(N^2)$ 的复杂性使其速度极其缓慢，对于现代模拟中数百万或数十亿的粒子来说完全不切实际。³⁰

一种快得多的方法是粒子-网格法(**Particle-Mesh, PM**)。它不是追踪单个相互作用，而是在模拟体积上放置一个规则的网格。每个粒子的质量被内插或“涂抹”到最近的网格点上。⁵⁵ 然后，使用一种称为快速傅里叶变换(FFT)的强大数学算法，在这个小得多的网格上非常迅速地计算引力势。³⁰ 最后，每个粒子上的力再从网格上内插回来。这好比一个城市规划师，他不是追踪每个人，而是创建一张人口密度图，并处理整个街区的属性。这种方法对于计算整个盒子中温和、长程的引力拉力非常高效，但它牺牲了小尺度上的精度。它无法解析

靠得很近的粒子之间尖锐、精细的力。⁴⁸

为了解决小尺度问题，**树形码(Tree Code)**方法被开发出来。由乔希·巴恩斯(Josh Barnes)和皮特·赫特(Piet Hut)开创的这项技术，构建了一个分层数据结构，通常是八叉树，它递归地将远处的粒子组合在一起。²⁸从任何一个给定粒子的角度来看，一个由一百万个其他粒子组成的遥远星团可以被近似为位于它们集体质心的一个单一、大质量的粒子。只有来自附近粒子的引力才被单独计算。这好比从远处看一片森林：你看不到单个的树木，你只看到森林作为一个整体。当你走近时，你开始分辨出单个的树木和树枝。这种方法为短程引力提供了极好的精度，但在计算长程引力场方面不如PM方法高效。⁵⁸

现代仅引力模拟的标准是强大的**TreePM**混合算法，它是GADGET和AREPO等代码的核心。⁵⁸这种方法巧妙地结合了前两种技术的优点，将引力分为两个部分。平滑的长程部分使用PM方法在网格上高效计算。然后，尖锐的短程部分使用树形码方法精确计算邻近粒子间的相互作用。这种“两全其美”的方法在所有尺度上都提供了速度和高保真度，极大地扩展了模拟可以达到的动态范围。⁵⁸为了防止当两个粒子靠得非常近时力变得不合物理地无限大，使用了一种称为“引力软化”的数值技巧，有效地将每个粒子不视为一个完美的点，而是一个小的、模糊的球。²⁸

第6节：增添“光彩”：流体动力学的挑战

一旦暗物质骨架就位，下一步就是添加宇宙的“血肉”：构成我们能看到的气体、恒星和行星的5%的普通(重子)物质。这需要与引力协同求解流体动力学——即流体运动的物理学——方程，这极大地增加了复杂性。⁵几十年来，出现了两种主要的竞争理念来应对这一挑战，每种都有其自身的优点、缺点和忠实的用户群体。这种多样性很重要；一个“模拟”不是一个单一的实体，而是对宇宙特定模型的一种实现。比较不同方法的结果对于识别哪些预测是稳健的，哪些可能是特定数值选择的产物至关重要。

第一种方法是平滑粒子流体动力学(**Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH**)。这是一种拉格朗日方法，意味着它跟随流体移动。流体被离散化为一组粒子，每个粒子都带有质量、温度和压力等物理属性。⁶⁴为了计算流体力(如压力梯度)，每个粒子的属性在其给定半径内的邻近粒子上被“平滑”处理。这好比通过追踪每个个体的运动来模拟人群。这种方法天然具有自适应性——在流体变得更稠密的地方，粒子自然会聚集在一起，从而提高分辨率——并且它在守恒动量等物理量方面表现出色。⁵¹然而，传统的SPH公式在精确捕捉尖锐激波和某些流体不稳定性方面存在困难，并且它们需要使用“人工粘性”来防止粒子在激波前沿相互穿透，这种修正有时会使流体在其他区域变得不切实际地“粘稠”。⁶⁶著名的代码如GADGET、GASOLINE和最近的ASTRID都是基于SPH方法构建的。⁶

第二种主要方法是自适应网格加密(Adaptive Mesh Refinement, AMR)。这是一种欧拉方法, 意味着它在填充模拟盒的静态网格上求解流体方程。⁵¹ 其定义性特征是其适应性。代码会持续监控模拟, 在需要更高分辨率的区域(如正在坍塌的气体云或激波), 它会动态地在较粗的网格上放置更小、更精细的子网格。这些加密的网格本身也可以被再次加密, 从而创建一个嵌套的层次结构, 将计算能力精确地集中在最需要的地方。⁵¹ 这好比一张智能数字地图, 它会自动放大以显示密集城市的街道级细节, 而在空旷的农村地区只显示州界。AMR代码在捕捉尖锐激波和解析复杂气体结构方面表现出色。其主要缺点是, 在粗细网格的边界处可能会发生一些数值扩散, 并且由于网格在空间中是固定的, 如果感兴趣的物体在域内快速移动, 它们的效率可能会降低。⁵¹ 著名的AMR代码包括ENZO、RAMSES和ART。

6

近年来, 出现了第三种综合了两者优点的方法: 移动网格(Moving Mesh)**代码, 以用于Illustris和IllustrisTNG模拟的AREPO代码为代表。⁶ 在这种方法中, 模拟体积被细分成一个单元格网格(像AMR), 但网格本身不是静态的。它是一个动态的沃罗诺伊镶嵌, 其中生成网格的点随气体流动而移动, 这意味着单元格会拉伸、变形, 并以拉格朗日方式跟随流体(像SPH)。²⁷ 这种混合方法在很大程度上避免了传统SPH的激波捕捉问题和AMR的基于网格的平流误差, 代表了流体动力学模拟技术的一个重要进步。⁷²

方法	核心思想	主要优点	已知弱点	著名代码
平滑粒子流体动力学 (SPH)	流体由移动的粒子集合表示(拉格朗日法)。	天然的自适应分辨率; 出色的质量和动量守恒。	难以处理尖锐激波和流体不稳定性; 需要人工粘性。 ⁶⁴	GADGET, GASOLINE, ASTRID ⁶
自适应网格加密 (AMR)	在静态网格上求解流体, 并动态添加更精细的子网格(欧拉法)。	在捕捉激波和解析复杂气体结构方面表现出色。	网格边界处的数值扩散; 可能存在角动量守恒问题。 ⁵¹	ENZO, RAMSES, ART ⁶
移动网格	在随流体流动而移动和变形的单元格网格上求解流体(混合法)。	结合了SPH的自适应性与AMR的激波捕捉精度。	计算复杂; 是较新的发展。	AREPO (Illustris/TNG) ⁶

第7节: 像素之下的物理学: 次网格模型与反馈

即使拥有地球上最强大的超级计算机, 一个根本性的限制依然存在: 分辨率。在模拟整个星系的同时, 解析其中形成的每一颗恒星, 或每一次超新星爆炸的精确冲击波, 在计算上是不

可能的。⁴⁹ 物理尺度的鸿沟实在太大了。为了弥合这一差距，宇宙学家依赖于他们手艺中最关键也最具争议的组成部分之一：“次网格”或“次分辨率”物理学。⁶

这个概念最好通过一个类比来理解。如果你在模拟整个城市的交通流量，你不会去模拟每辆汽车内部内燃机的复杂运作。相反，你会实施一个简化的规则或“配方”：如果交通灯是绿色的并且前方道路通畅，汽车就以一定的速率加速。次网格模型就是宇宙学模拟的物理配方。它们是一套规则，规定了当满足某些物理条件时，在单个模拟单元或粒子分辨率以下的尺度上会发生什么。

两个最重要的次网格过程是恒星形成和反馈。

恒星形成：模拟并非从第一性原理形成单个恒星。相反，它们采用一种恒星形成配方。一个典型的模型会持续检查每个气体单元或粒子，如果其密度超过某个阈值，温度低于某个值，并且气体正在引力坍缩，代码就会将该气体质量的一部分转化为一个“恒星粒子”。²⁴ 这个单一的粒子代表了在同一时间和地点诞生的一个由成千上万甚至数百万颗恒星组成的整个星族。

反馈：这是对抗引力不懈拉力的关键力量。没有反馈，“过度冷却问题”就会泛滥；模拟星系中几乎所有的气体都会冷却和坍缩，形成远超现实观测数量的恒星。²⁴ 反馈模型是描述恒星和黑洞如何将巨大的能量和动量注入其周围环境，从而调节自身生长及其宿主星系演化的配方。

- 恒星反馈：这主要来自大质量的年轻恒星。次网格模型规定，在一个“恒星粒子”经过几百万年的“老化”后，它将引发超新星爆炸。这通过向邻近的气体粒子或单元注入大量的热能和动量来模拟。²⁵ 这个过程可以驱动强大的星系“超级风”，其强度足以将气体完全吹出较小的星系，从而熄灭它们的恒星形成，并用重元素丰富星系际介质。⁷⁴ FIRE模拟项目的可视化图像精美地展示了这些剧烈的流出。⁷⁶ 其他过程，如来自年轻恒星的强烈辐射压力和快速的恒星风，也包含在这些反馈配方中。⁷⁴
- 活动星系核（AGN）反馈：在宇宙中最庞大的星系中，中心的超大质量黑洞成为反馈的主导引擎。²⁵ 随着气体被引向黑洞，它形成一个灼热的吸积盘，其亮度可以超过整个宿主星系。AGN反馈的次网格模型规定了这巨大能量的一小部分如何耦合回周围的星系环境。这可以以两种主要模式发生：一种是剧烈的“类星体模式”，其中辐射压力驱动强大的外流，将气体从星系中排出；另一种是更温和、更持续的“射电模式”，其中高能粒子喷流加热星系周围广阔的气体晕，阻止其冷却和形成新的恒星。⁷⁷ 这种AGN反馈被认为是宇宙中最庞大的星系被观测为“红而死”——即不再形成恒星——的主要原因。⁷⁷

一个关键点是，支配这些配方的参数——例如，恒星形成效率(f_*)或热反馈效率(ϵ)——并非从第一性原理精确得知。它们必须被校准。²⁴ 模拟团队运行大量的模拟套件，系统地改变这些参数，直到他们的模拟星系群体的属性（例如，星系恒星质量函数）与观测到的宇宙提供良好的匹配。²⁴ 这个校准过程是像EAGLE和IllustrisTNG这样的大型模拟项目之间差异的主要来源，也代表了现代计算宇宙学中最大的不确定性之一。

第四部分：下一代——虚拟宇宙的未来

宇宙学模拟领域正经历一场深刻的变革，这场变革由两大技术革命的交汇所驱动：人工智能的崛起和百亿亿次级计算的黎明。这些新能力正在打破旧有的限制，为一个精密宇宙学时代铺平道路，在这个时代，我们的虚拟宇宙将成为强大的预测工具，帮助解开宇宙最深邃的秘密。

第8节：人工智能宇宙学家：分辨率的革命

几十年来，宇宙学家一直陷入一个根本性的妥协之中。即使拥有世界上最强大的超级计算机，他们也面临着一个严峻的选择：要么以低分辨率模拟一个广阔的宇宙体积，要么以高分辨率模拟一个微小的、“放大的”宇宙区域。⁴⁹ 同时拥有尺寸和细节是不可能的。这一权衡已被人工智能的应用所打破，特别是一类被称为深度神经网络的算法。

关键的创新是一种称为**超分辨率(super-resolution)**的技术。⁴⁹ 这个过程在概念上很优雅。科学家首先对一个小的宇宙体积运行一对匹配的模拟：一个低分辨率(计算成本低)和一个高分辨率(计算成本非常高)。然后，他们将这些成对的模拟数据输入到一个神经网络中，通常是一个生成对抗网络(GAN)，它让两个网络相互竞争学习。⁴⁹ “生成器”网络学习从低分辨率输入中产生高分辨率输出，而“判别器”网络则学习区分AI生成的输出和真实的高分辨率模拟。通过这个竞争过程，AI学习到连接大尺度结构与小尺度细节的复杂、非线性规则。这好比一位艺术伪造大师，他研究了数千幅原作及其模糊的照片。最终，这位伪造者变得如此技艺高超，以至于当给他一张新的模糊照片时，他能创造出一个细节完美到专家也无法与真品区分的复制品。⁸²

这项技术带来的回报是惊人的。一旦训练完成，AI模型可以接收一个新的、大规模、低分辨率的模拟——这种模拟可以快速且廉价地运行——并在短短几分钟或几小时内生成一个统计上正确的高分辨率版本。这项任务，如果用传统模拟在超级计算机上完成，需要花费数月时间。⁴⁹ 这代表了一种范式转变，使科学家能够快速生成大量的大型、高分辨率的模拟宇宙，这对于解读下一代星系巡天带来的数据洪流至关重要。⁵²

至关重要的是，这不仅仅是一种复杂的图像增强技巧。这些最先进的AI模型不仅仅作用于投影的密度场；它们学习预测填充高分辨率体积所需的数百万个额外粒子的位置和速度。这意味着输出是一个真正的模拟实现，一个可以用与传统模拟相同的工具进行分析的完整数据集。⁴⁹ 此外，AI还被用于构建“代理模型”(emulators)——这是一种极其快速的替代模型，在经过一系列模拟训练后，可以为任何给定的宇宙学参数集(例如，暗物质的数量或暗

能量的性质) 即时预测宇宙的最终状态。²³ 这种绕过为每个新理论运行完整模拟的能力, 极大地加速了将我们的模型与现实进行对比的过程。从本质上讲, AI正在成为一种新型的科学仪器, 一种从数据本身学习宇宙演化有效规则的工具。

第9节: 百亿亿次级计算与精密宇宙学时代

与AI的算法革命并行的是一场硬件革命: **百亿亿次级计算(exascale computing)**的到来。这标志着计算能力的新前沿, 其定义是能够执行exaflop——即每秒一万亿亿次(10¹⁸)浮点运算的惊人速度。²³ 新一代超级计算机, 如橡树岭国家实验室的Frontier和阿贡国家实验室的Aurora, 正在为宇宙学家提供前所未有的强大工具。²³

百亿亿次级计算使得以往无法想象的模拟成为可能。像ExaSky合作项目使用硬件/混合加速宇宙学代码(HACC)进行的运行, 现在可以模拟足够大的宇宙体积, 以便与最广泛的观测巡天直接比较, 同时还包含了流体动力学的复杂物理学——这种尺度和保真度的结合曾是遥不可及的。³³ 这种巨大的能力也让理论家首次能够将更精细的物理过程纳入他们的模型中, 例如宇宙磁场的影响、宇宙射线的压力以及大质量中微子的引力影响, 从而将模拟推向一个更完整的宇宙物理描述。¹⁰

该领域的终极未来在于这三个前沿领域的宏大综合: 下一代观测、百亿亿次级计算和人工智能。这种融合将创造一个强大的、自我强化的发现循环。

1. 观测: 新的天文台, 如詹姆斯·韦伯空间望远镜(JWST)、欧几里得空间望远镜和薇拉·鲁宾天文台, 将以前所未有的深度和精度绘制宇宙地图, 提供海量的高质量数据。²
2. 模拟: 百亿亿次级超级计算机将运行少量巨大的“旗舰级”模拟。这些运行将是迄今为止创建的物理上最完整、保真度最高的宇宙模型, 作为我们理论的黄金标准基准。²³
3. 推断: 在这些旗舰级百亿亿次级运行上训练的AI模型, 将充当强大的加速器。它们将快速生成探索理论可能性全景所需的数千个变体模型宇宙, 并创建理解观测巡天的选择效应和系统误差所需的大量模拟星表。⁸²

通过将这个由AI生成的庞大虚拟宇宙库与我们望远镜的真实数据进行比较, 科学家将能够以前所未有的精度约束宇宙学的基本参数——暗物质的性质、暗能量的行为、中微子的质量。这种强大的协同作用有潜力最终照亮那95%仍笼罩在黑暗中的宇宙。²³ 最终的愿景是创建一个我们宇宙的真正“数字孪生”, 一个如此强大和精确的虚拟实验室, 它能引导我们对自然基本定律有新的、更完整的理解。

Works cited

1. Cosmological simulations - Wikiversity, accessed June 25, 2025, https://en.wikiversity.org/wiki/Cosmological_simulations

2. Cosmology | Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian, accessed June 25, 2025, <https://www.cfa.harvard.edu/research/science-field/cosmology>
3. www.numberanalytics.com, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/cosmological-simulations-explained#:~:text=Cosmological%20simulations%20are%20computational%20models.universe%20into%20its%20current%20form.>
4. Formation of the large-scale structure in the Universe: simulations, accessed June 25, 2025, <https://cosmicweb.uchicago.edu/sims.html>
5. Cosmological Simulations Explained - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/cosmological-simulations-explained>
6. Cosmological Simulations in Galactic Cosmology - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-cosmological-simulations-galactic-cosmology>
7. Λ CDM Model of Cosmology - Nasa Lambda, accessed June 25, 2025, https://lambda.gsfc.nasa.gov/education/graphic_history/univ_evol.html
8. Large Scale Structure | Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian, accessed June 25, 2025, <https://www.cfa.harvard.edu/research/topic/large-scale-structure>
9. Cosmological Simulations: Large-Scale Structure - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/cosmological-simulations-large-scale-structure>
10. Probing the Universe: Cosmological Simulations - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/probing-universe-cosmological-simulations>
11. www.numberanalytics.com, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/cosmological-simulations-explained#:~:text=Cosmological%20simulations%20are%20essential%20for%20understanding%20the%20universe%2C%20as%20they.and%20interpret%20complex%20observational%20data.>
12. A Simulated Universe Works Better When Dark Energy Changes Over Time, accessed June 25, 2025, <https://www.universetoday.com/articles/a-simulated-universe-works-better-when-dark-energy-changes-over-time>
13. Inside The Largest Simulation Of The Universe Ever Created - Popular Science, accessed June 25, 2025, <https://www.popsci.com/technology/article/2012-11/video-largest-most-hi-res-cosmological-simulations-known-universe/>
14. Lambda-CDM model - Wikipedia, accessed June 25, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Lambda-CDM_model
15. Cosmology with Lambda-CDM - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/cosmology-with-lambda-cdm-model>
16. Bolshoi cosmological simulation - Wikipedia, accessed June 25, 2025,

- https://en.wikipedia.org/wiki/Bolshoi_cosmological_simulation
17. DOE Explains...Cosmology | Department of Energy, accessed June 25, 2025, <https://www.energy.gov/science/doe-explainscosmology>
 18. MIT Open Access Articles Cosmological simulations of galaxy formation, accessed June 25, 2025, <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/129432/1909.07976.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
 19. Cosmological Simulations - Observatoire de la Côte d'Azur, accessed June 25, 2025, <https://www.oca.eu/en/research-fields/1706-cosmological-simulations>
 20. Large-Scale Structure - Dark Energy Survey, accessed June 25, 2025, <https://www.darkenergysurvey.org/supporting-science/large-scale-structure/>
 21. Unveiling the Cosmic Web - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/cosmic-web-observational-cosmology>
 22. Know about the Millennium Simulation at the Max Planck Institute for Astrophysics and learn how to simulate the universe on a personal computer - Britannica, accessed June 25, 2025, <https://www.britannica.com/video/overview-researchers-Millennium-Simulation-universe-Germany-Max/-204051>
 23. Supercomputers Are Simulating the Universe to Unlock Its Darkest Secrets - SciTechDaily, accessed June 25, 2025, <https://scitechdaily.com/supercomputers-are-simulating-the-universe-to-unlock-its-darkest-secrets/>
 24. Calibration of a star formation and feedback model for cosmological simulations with enzo | Monthly Notices of the Royal Astronomical Society | Oxford Academic, accessed June 25, 2025, <https://academic.oup.com/mnras/article/497/4/5203/5891248>
 25. Cosmological Simulations with Feedback - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/cosmological-simulations-with-feedback>
 26. The EAGLE simulations - The EAGLE simulationsThe EAGLE ..., accessed June 25, 2025, <https://eagle.strw.leidenuniv.nl/wordpress/>
 27. Illustris project - Wikipedia, accessed June 25, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Illustris_project
 28. N-body simulation - Wikipedia, accessed June 25, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/N-body_simulation
 29. History of Planetary N-body Simulations - Sam Hadden, accessed June 25, 2025, http://shadden.github.io/nbody_history/
 30. Mastering N-Body Simulations in Cosmology - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-nbody-simulations-in-cosmology>
 31. Gravitational N-Body Simulations - Library of Congress, accessed June 25, 2025, <https://catdir.loc.gov/catdir/samples/cam041/2003046028.pdf>
 32. N-Body Simulations - Interdisciplinary Studies | Institute for ..., accessed June 25, 2025, <https://www.ias.edu/piet/act/comp/simulations>

33. A Superfast Supercomputer Creates the Biggest Simulation of the Universe Yet, accessed June 25, 2025, <https://www.universetoday.com/articles/a-superfast-supercomputer-creates-the-biggest-simulation-of-the-universe-yet>
34. Millennium Simulation Project - MPA, Garching, accessed June 25, 2025, <https://www.mpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>
35. Millennium Run - Wikipedia, accessed June 25, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Millennium_Run
36. Cosmology Meets Simulation - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/millennium-simulation-cosmology-guide>
37. Data Visualization - MPA, Garching, accessed June 25, 2025, https://www.mpa.mpa-garching.mpg.de/galform/data_vis/
38. Millennium Simulation Visualizations - HITS gGmbH - Heidelberg Institute for Theoretical Studies, accessed June 25, 2025, <https://www.h-its.org/de/2014/11/09/millennium-simulation-visualizations/>
39. About - Illustris simulation, accessed June 25, 2025, <https://www.illustris-project.org/about/>
40. Illustris - Main, accessed June 25, 2025, <https://www.illustris-project.org/>
41. The Ultimate Guide to Eagle in Cosmology - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-to-eagle-in-cosmology>
42. EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments | Monthly Notices of the Royal Astronomical Society | Oxford Academic, accessed June 25, 2025, <https://academic.oup.com/mnras/article/446/1/521/1316115>
43. IllustrisTNG - Main, accessed June 25, 2025, <https://www.tng-project.org/>
44. Project Description - IllustrisTNG, accessed June 25, 2025, <https://www.tng-project.org/about/>
45. First results from the IllustrisTNG simulations: the stellar mass content of groups and clusters of galaxies | Monthly Notices of the Royal Astronomical Society | Oxford Academic, accessed June 25, 2025, <https://academic.oup.com/mnras/article/475/1/648/4683271>
46. Astrid Webpage, accessed June 25, 2025, <https://astrid.psc.edu/>
47. ASTRID simulation: the evolution of supermassive black holes - Oxford Academic, accessed June 25, 2025, <https://academic.oup.com/mnras/article/513/1/670/6533522>
48. Cosmological Simulations in Galaxies - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/cosmological-simulations-galaxies>
49. AI-assisted superresolution cosmological simulations - PMC - PubMed Central, accessed June 25, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8126773/>
50. Chapter 0 Hydrodynamic methods and sub-resolution models for cosmological simulations, accessed June 25, 2025, <https://arxiv.org/html/2502.06954v1>
51. Fluids in the Universe: Adaptive Mesh Refinement in Cosmology - IEEE Computer Society, accessed June 25, 2025, <https://www.computer.org/csdl/magazine/cs/1999/02/c2046/13rRUXAStVU>

52. AI-assisted superresolution cosmological simulations - PNAS, accessed June 25, 2025, <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2022038118>
53. The Ultimate Guide to N-Body Simulations in Cosmology - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-to-n-body-simulations-in-cosmology>
54. Cosmological simulations using the hierarchical tree method - ResearchGate, accessed June 25, 2025, https://www.researchgate.net/publication/230759179_Cosmological_simulations_using_the_hierarchical_tree_method
55. Particle mesh - Wikipedia, accessed June 25, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_mesh
56. 2D particle-mesh n-body code - Johan Hidding pages, accessed June 25, 2025, <https://jhidding.github.io/nbody2d/>
57. Particle-mesh techniques - (Astrophysics I) - Vocab, Definition, Explanations | Fiveable, accessed June 25, 2025, <https://library.fiveable.me/key-terms/astrophysics-i/particle-mesh-techniques>
58. Physical Models of Galaxy Formation in a Cosmological Framework - Rachel S. Somerville & Romeel Davé, accessed June 25, 2025, <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March19/Somerville/Somerville2.html>
59. N-Body Methods, accessed June 25, 2025, https://home.ifa.hawaii.edu/users/barnes/ast626_05/nbm.pdf
60. TreePM Method for Two-Dimensional Cosmological Simulations Suryadeep Ray, accessed June 25, 2025, <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/joaa/025/03-04/0103-0113>
61. GG : an N-body TreePM relativistic code for cosmological simulations - arXiv, accessed June 25, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2301.11854>
62. Mastering N-Body Simulations in Cosmology - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/mastering-n-body-simulations-in-cosmology>
63. Cosmological Hydrodynamical Simulations Explained - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/cosmological-hydrodynamical-simulations-explained>
64. Smoothed Particle Hydrodynamics in Cosmology - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-smoothed-particle-hydrodynamics-cosmological-simulations>
65. Smoothed-particle hydrodynamics - Wikipedia, accessed June 25, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Smoothed-particle_hydrodynamics
66. Direct collapse to supermassive black hole seeds: comparing the AMR and SPH approaches - Oxford Academic, accessed June 25, 2025, <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/459/3/3217/8105614/stw698.pdf>
67. Chapter 3 A Comparison of AMR and SPH cosmology codes, accessed June 25,

- 2025, https://web.pa.msu.edu/people/osheabr/thesis/bwoshea_thesis_chap3.pdf
68. Mastering Adaptive Mesh Refinement - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/mastering-adaptive-mesh-refinement>
69. Adaptive mesh refinement - Wikipedia, accessed June 25, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Adaptive_mesh_refinement
70. Adaptive Mesh Refinement - Enzo's documentation! - Read the Docs, accessed June 25, 2025, https://enzo.readthedocs.io/en/latest/physics/adaptive_mesh.html
71. Field-Level Comparison and Robustness Analysis of Cosmological N-Body Simulations, accessed June 25, 2025, <https://arxiv.org/html/2505.13620v1>
72. GIZMO | Phil Hopkins' Research Group - Caltech (Tapir), accessed June 25, 2025, <http://www.tapir.caltech.edu/~phopkins/Site/GIZMO.html>
73. Moving mesh cosmology: numerical techniques and global statistics | Monthly Notices of the Royal Astronomical Society | Oxford Academic, accessed June 25, 2025, <https://academic.oup.com/mnras/article/425/4/3024/1079965>
74. Cosmological Simulations: Feedback Changes Everything | Phil Hopkins' Research Group, accessed June 25, 2025, http://www.tapir.caltech.edu/~phopkins/Site/animations/Movies_cosmo.html
75. Home | FIRE: Feedback In Realistic Environments, accessed June 25, 2025, <https://fire.northwestern.edu/>
76. Visualizations | FIRE: Feedback In Realistic Environments, accessed June 25, 2025, <https://fire.northwestern.edu/visualizations/>
77. Cosmological AGN Feedback: A Comprehensive Guide - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/cosmological-agn-feedback-guide>
78. The Impact of AGN Feedback on Galaxy Evolution - Number Analytics, accessed June 25, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/agn-feedback-galaxy-evolution>
79. Modes of AGN feedback - Galaxy Formation - Joseph Silk et al., accessed June 25, 2025, <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept13/Silk/Silk8.html>
80. [2002.02670] Calibration of a star formation and feedback model for cosmological simulations with Enzo - arXiv, accessed June 25, 2025, <https://arxiv.org/abs/2002.02670>
81. Machine learning accelerates cosmological simulations - NSF, accessed June 25, 2025, <https://www.nsf.gov/news/machine-learning-accelerates-cosmological>
82. Machine Learning Accelerates Cosmological Simulations - Carnegie Mellon University, accessed June 25, 2025, https://www.cmu.edu/mcs/news-events/2021/0504_supersims.html
83. AI-assisted super-resolution cosmological simulations IV: An emulator for deterministic realizations | Published in The Open Journal of Astrophysics, accessed June 25, 2025, <https://astro.theoj.org/article/129471-ai-assisted-super-resolution-cosmological-simulations-iv-an-emulator-for-deterministic-realizations>
84. Record-Breaking Suite of Cosmic Simulations Aims to Identify Universe's Parameters, accessed June 25, 2025,

<https://www.simonsfoundation.org/2021/07/07/record-breaking-suite-of-cosmic-simulations-aims-to-identify-universes-parameters/>

85. Supercomputer runs largest and most complicated simulation of the universe ever, accessed June 25, 2025,
<https://www.livescience.com/technology/computing/supercomputer-runs-largest-and-most-complicated-simulation-of-the-universe-ever>
86. Supercomputer Runs Largest Simulation of the Universe Ever – Human Progress, accessed June 25, 2025,
<https://humanprogress.org/supercomputer-runs-largest-simulation-of-the-universe-ever/>
87. Λ CDM cosmological simulations: Topics by Science.gov, accessed June 25, 2025,
<https://www.science.gov/topicpages//lambda+cdm+cosmological+simulations>
88. Advanced Cosmological Simulation Techniques – Number Analytics, accessed June 25, 2025,
<https://www.numberanalytics.com/blog/advanced-cosmological-simulation-techniques>
89. Astrophysicists Reveal Largest-Ever Suite of Universe Simulations | Center for Astrophysics, accessed June 25, 2025,
<https://www.cfa.harvard.edu/news/astrophysicists-reveal-largest-ever-suite-universe-simulations>
90. New MillenniumTNG simulation helps to test standard model of cosmology, accessed June 25, 2025,
<https://www.mpg.de/20761326/millennium-tng-cosmology-simulation>