

给宇宙做仿真*

姬扬[†] 译

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

2017-05-06收到

[†] email: jiyang@semi.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20170602

强大的计算机让宇宙学家首次在宇宙背景里求解爱因斯坦那复杂得可怕的广义相对论方程。

Tom Giblin, James Mertens 和 Glenn Starkman 描述了这个仿真新时代如何改变我们对宇宙的理解。

在希腊神话里, 盖亚(地球母亲)从混乱中诞生, 孕育了乌拉诺斯(天空之神)。从《旧约》的创世记到希腊神话, 人们一直对宇宙感到好奇、编织创世的神话来解释宇宙运行的方式。然而, 一百年前, 爱因斯坦换了个思路来讨论这个问题。此前最好的引力理论是牛顿的万有引力定律, 描述了宇宙中的物体是如何相互作用的。在爱因斯坦的广义相对论里, 时空(空间和时间混为一体)本身与其中的万物一起演化。从此, 研究宇宙及其演化的宇宙学, 至少在原则上成为了现代科学——可以用数学方程精确地描述, 能够做出准确的预测, 需要接受可证伪这些预言的观测结果的检验。

随着观测精度的提高, 我们对宇宙的认识也在进步, 现在看到的是一幅惊人的当代图景。我们生活于其中的宇宙在膨胀, 而日常生活里的普通物质——质子、中子和电子——仅占宇宙包容物的5%左右。大约25%是“暗物质”——它们与引力有关的行为像普通物质, 但迄今为止, 除了引力效应以外, 其他性质是观测不到的。宇宙中另外70%的东西则完全不同, 它们的“引力”作用是推开物质, 而不是把它们拉住, 从而导致宇宙在过去的数十亿年里加速膨胀。这种未知物质被称为“暗能量”, 我们对它的真实本性一无所知。

宇宙学已经研究了一百多年, 现在到处都是存在性的问题。如果真的有暗物质, 那么它是什么, 如何找到它? 暗能量是真空的能量吗? 也许它就是爱因斯坦在1917年首次提出的宇宙常数 Λ ? 爱因斯坦引入了这个常数, 误以为它会阻止

宇宙的膨胀或收缩(他后来称之为“最大的错误”), 所以没有能够预测到宇宙的膨胀——十多年以后才被观测发现。这些无影无踪的物质, 也许只是宇宙学家的凭空想象, 也许我们必须修改广义相对论。

面对这些基本问题, 宇宙学家正在用越来越精密的观测来检验目前公认的宇宙模型(Λ CDM)。(CDM表示暗物质粒子是冷的, 因为它们必须缓慢地移动, 就像冷饮里的分子一样, 这样才不会从星系中逃离, 而这些星系正是由于它们的帮助才结合起来。)我们可以用广义相对论描述宇宙是如何扩张的, 现在只是刚刚开始用完整的理论来模拟星系、星系团和超星系团产生和形成的特定细节和观测结果。这种情况的发生很简单, 但是广义相对论的方程不简单。

1 复杂得要命

爱因斯坦场方程很适合装饰T恤或咖啡杯(见下文图2), 但是难解得要命, 即使是用电脑。该方程涉及10个独立的四维时空的函数(描述了每个位置上的时空曲率), 以及40个函数(描述那10个函数是如何变化的), 还有另外100个函数(描述这40种变化又是如何变化的), 所有这些函数都以复杂的方式相加或相乘。必须对真实宇宙做高度简化的近似, 才可能有精确解。几十年来, 宇宙学家使用这些理想化的解, 把相对于它们的偏离看作小扰动——特别是他们认为, 任何相对于同质化的偏离, 都可以独立于均匀部分来处理, 而且彼此独立无关。

* 本文译自Tom Giblin, James Mertens, Glenn Starkman. *Physics World*, 2017, (5): 20

关于宇宙结构的早期发展——早期宇宙中几乎察觉不到密度的物质和暗物质，如何发展为星系、星系团和超星系团，这种“一阶摄动理论”告诉了我们很多。该理论的优点是，我们可以动手做很多分析，然后用计算机做其他的工作。但是，为了跟踪星系和其他结构从其形成到现在的演化和发展，我们通常是诉诸于牛顿的引力理论——也许是个很好的近似。

一阶摄动理论将宇宙结构作为独立的实体，受到宇宙的平均膨胀的影响，但是并不改变平均膨胀本身，也不会彼此影响。为了进一步理解，我们需要改进它。不幸的是，高阶微扰理论要复杂得多，一切的一切都是相互影响的。事实上，使用这些高阶近似而非“直接求解”广义相对论的全部方程，并没有任何明显的好处。

提高计算的精度是一回事，但我们还想知道，微扰描述到底有多准确——爱因斯坦方程太复杂了，它也许能给我们某个答案，但是这个答案正确吗？毕竟，在彻底求解非线性方程的时候，往往会发现它们的特性出乎意料，而且这些惊人的特性是很难预测的。例如，一些著名的宇宙学家认为，宇宙的加速膨胀(提出暗能量就是为了解释这个现象)来自于宇宙结构的集体效应，来自于广义相对论的神奇作用。其他宇宙学家却认为，这是瞎扯淡。

唯一可以确定的方法是使用广义相对论的全部方程。好消息是，计算机终于变得足够快，完全用广义相对论来为宇宙建模(没有传统的近似)不再是疯狂的计划。在未来的十年里，经过一些艰苦的努力，这种方法很可能是可行的。

2 电脑来救驾

数值广义相对论本身并非新鲜事物。早在1950年代后期，Richard Arnowitt, Stanley Deser和Charles Misner(一起被称为ADM)构建了基本框架，可以将时空谨慎地分解为时间和空间——这是用计算机解决广义相对论的重要第一步。其他研究人员也行动了起来，包括Thomas Baumgarte,

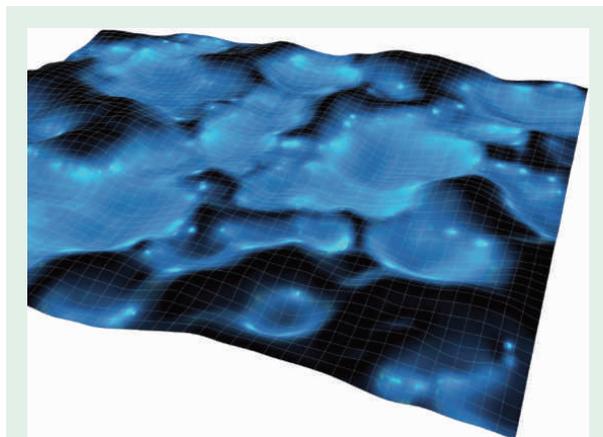


图1 全新的印象。用广义相对论做仿真，原作者得到了弯曲时空“海”的图像

Stuart Shapiro, Masaru Shibata 和 Takashi Nakamura, 在1980年代和1990年代，他们对ADM系统的数值特性作出了重要的改进，可以在足够长的时间里精确地跟踪系统的动态。

为了获得这样的长期稳定性，还开发了其他一些技术，包括一种从流体力学引进的方法。这种方法被称为自适应网格细化，用来让稀缺的计算机内存资源全力对付最需要关注的问题。这样的进步已经允许数值相对论学者高精度地模拟两个黑洞的融合并产生引力波(时空里的涟漪)。由此产生的图像不仅看起来绚丽多姿；对于以美国为基地的激光干涉引力波观测(LIGO)合作项目来说，这些方法是必不可少的——他们在去年宣布，首次直接探测到了引力波。

通过对两个黑洞的许多不同构型做仿真(不同的质量、不同的自旋、不同的轨道)，LIGO的数值相对论学者为每种构型的引力波信号生成了模板。然后，其他研究人员将这些仿真结果与实验观测进行比较，直到发现了一个信号与其中的某个模板匹配。这个信号来自于一对黑洞，距离我们十亿光年，它们相互旋进、最终融合为一个更大的黑洞。

黑洞的融合仅仅是单一的天体物理事件，与这种事件的仿真相比，使用数值广义相对论给宇宙学做仿真，面对的是更加独特的挑战。通过合理的小尺度仿真，可以回答一些定性的宇宙学问题；最先进的“N体”仿真则使用牛顿引力理

论，在数十亿年的时间里追随数以万亿计的独立质量，考察引力会把它们带到哪里。但是，与牛顿引力相比，广义相对论至少有一个很大的优点——它是局域的。

在牛顿引力的仿真里，有一个困难，计算任



图2 切莫等闲视之。爱因斯坦的广义相对论适合于装饰咖啡杯或T恤，但它们的求解绝对不容易

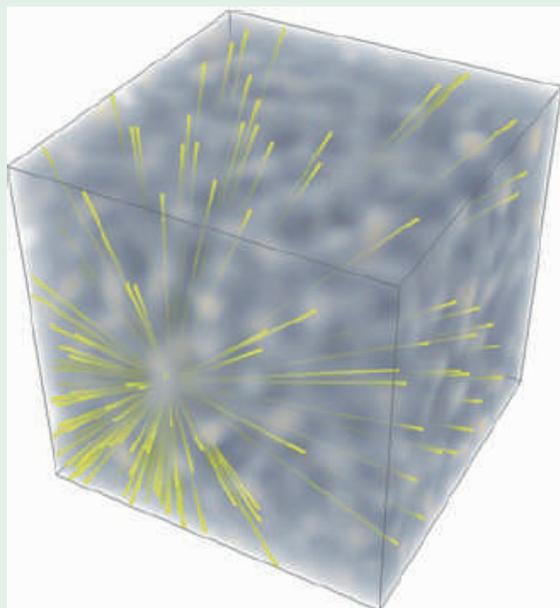


图3 光芒四射。“坐标不变性”的微妙之处：不管用什么标签来确定事件的位置和时间，物理定律应该是相同的。在仿真中，通过向宇宙某处的观察者发送光束(黄色)，可以实现这一点

何特定质量所受到的引力，都必须考虑所有其他质量的影响。甚至牛顿本人也认为，这种“超距作用”是其模型的失败之处，因为它意味着，信息在瞬间从仿真宇宙的一端跑到另一端，违反了光速恒定的限制。然而，在广义相对论里，所有的方程都是“局域的”，在任何时刻或任何地点，为了确定引力，只需要知道片刻之前、本地附近的引力和物质分布。换句话说，这应当可以简化数值计算。

最近，我们三人的工作表明，宇宙学问题终于可以处理了(*Phys. Rev. Lett.*, 116, 251301 和 *Phys. Rev. D*, 93, 124059)。论文发表后几天，意大利卡塔尼亚大学的 Eloisa Bentivegna 和英国朴茨茅斯大学的 Marco Bruni 也取得了成功(*Phys. Rev. Lett.*, 116, 251302)。这两个小组分别给出了低分辨率仿真的结果，其中的格点间距为4000万光年，只有长波长的扰动。以宇宙的标准来看，这些宇宙仿真的时间很短(在这段时间里，宇宙的尺寸仅仅增大了一倍)，但都采用了全部的广义相对论来跟踪这些扰动的演变，没有任何简化或近似。著名的意大利物理宇宙学家 Sabino Matarrese 在《自然物理学》上说，“利用广义相对论对宇宙学进行数值仿真的时代，已经开始了”。

与现代的 N 体仿真求解相比，无论是分辨率、持续时间还是动态范围，这些初步的研究工作还有很大差距。为了提高竞争力，需要改进软件，使得代码可以在大得多的计算机集群上运行。还需要让代码在数值计算上更加稳定，以便对更长的宇宙膨胀时期进行仿真。数字仿真的长期目标是，尽可能地匹配宇宙及其中万物的实际演化过程，这意味着使用完整的广义相对论。但是，现有的完全使用广义相对论的仿真结果，并没有发现驱动宇宙加速膨胀的涨落波动，加速膨胀似乎需要新的物理学——也许是暗能量，也许是新的引力理论。

通过与简单的微扰理论作比较，这两个小组也观察到似乎是时空动力学的小修正。Bentivegna 和 Bruni 研究了早期宇宙结构的坍塌，发现它们

的积聚似乎比标准简化理论的预言更快。

3 完美的未来

关于仿真的具体结论，仍然是广义相对论的一个微妙问题。该理论的数学核心是“坐标不变性”原理，本质上说，无论用什么标签来标记事件的位置和时间，物理定律都应该是相同的。我们都熟悉这种对称不变性的简化版：无论测量的位置是纽约还是伦敦，基本的科学定律都不会改变；从标准时间转换到夏时制的时候，也不需要新版的教科书。广义相对论的坐标不变性只是一个更极端的版本，但这意味着，我们必须确保，从实验结果提取的任何信息并不依赖于仿真时做标记的具体方式。

我们的研究小组特别小心地对待这个微妙之处。从长久的过去、在遥远的地点发送模拟光束，使之以光速穿过时空到达此地此刻。然后，用这些光束给宇宙的膨胀历史做仿真，再与观测结果做对比。由此出现的宇宙表现出的平均行为，符合相应的光滑均匀的模型，但是它还具有不均匀的结构。这些额外的结构对被仿真的可观察量的偏差有贡献，真正的观测者应该很快就能看到它们。

这项工作仅仅是旅程的开始。创建足够准确而又灵敏的代码，对未来的观测计划做出切实的预测——例如，由大型巡天望远镜(Large Scale Synoptic Telescope)或欧几里得卫星(Euclid satellite)进行的全天空巡天——需要我们研究更加广阔的空间。这些研究既包括超大尺度(几亿光年)的结构，也包括更小尺度的结构(例如星系和星系团)。他们还必须长时间地跟踪这些空间，比目前可能的时间还要更长。

所有这一切都需要引入一些改进(正是由于这些改进，才能够预测由黑洞融合而产生的引力波)，例如，自适应网格细化从而分辨较小的结构(如星系)， N 体仿真以便允许物质在这些结构之间自然地流动。这些改进将会完整地考虑广义相对论，从而更精准地描述星系和星系团的统计特性以及我们的观测结果。但是，这样做需要具有几百万个核的计算机集群，而不是现在使用的几百个核。

改进代码需要时间、精力和协作。世界各地的研究小组(包括上述的两个)都有机会做出重要的贡献。数值广义相对论宇宙学的研究尚处于起步阶段，但是，妥善地利用今天正在设计和制造的新一代宇宙调查，未来十年将会取得巨大的进步。这项工作可能会增强我们对科学创世记(Λ CDM)的信心，即使失败了，也会告诉我们：关于宇宙的演化过程，还有很多想法要尝试呢！



微弱信号检测

半个世纪的骄傲

Model 7124
精密锁相放大器

低温物理
设计极致



Model 5186
差分前置放大器



生产商：阿美特克商贸(上海)有限公司北京分公司
电话：010-85262111-10 传真：010-85262141-10
Email: info@ametek.cn
网址: www.signalrecovery.com.cn

中国代理商：北京三冠阳光科技发展有限公司
电话：010-65202180/81 传真：010-65202182
Email: sales@sunnytek.net
网址: www.sunnytek.net