GADGET-4 模拟中星系碰撞的恒星形成：对撞击速度和星系气体质量的依赖

作者：Gustavo Neves Pereira[1], Paulo Laerte Natti[2*]

[1]隆德里纳州立大学物理系，Celso Garcia Cid 公路，PR-445，大学校园，86037-390，巴西巴拉那州隆德里纳。电子邮箱：gustavonevespereira@gmail.com，ORCID https://orcid.org/0009-0001-2125-0223

[2]隆德里纳州立大学数学系，Celso Garcia Cid 公路，PR- 445，大学校园，86037-390，巴西巴拉那州隆德里纳。电子邮箱：plnatti@uel.br，ORCIDhttps://orcid.org/0000-0002-5988-2621

*通讯作者

摘要：
本研究探讨了改变速度和气体质量初始条件时，星系碰撞期间恒星形成率的变化。为此，我们使用 GADGET-4代码进行了流体动力学模拟，并通过 Galstep 和 SnapshotJoiner 程序生成初始条件。我们模拟了两个星系沿正面碰撞轨迹运动的系统，相对初速度范围为 100 千米/秒至 1000 千米/秒，并考察了两种情形：第一种是相同星系，第二种是大小不同的星系。对于初始相对速度较高的系统，两种情形的模拟均发现，由碰撞首次接触触发的恒星形成率峰值更为强烈，随后因气体弥散而大幅下降。相比之下，在初始速度较低的系统中，观测到星系之间发生并合，导致恒星形成率出现多个峰值。星系间较大的初始距离也与星系系统是否发生并合有关，因为这意味着引力作用的时间尺度更长，进而使碰撞发生时的相对速度更高。我们还发现，星系的恒星形成率明显取决于初始气体含量。此外，星系的初始气体含量也呈现出与恒星形成率之间的明显关联。总体而言，我们的结果表明，相对撞击速度、星系间的初始距离以及气体含量，都是分析碰撞星系恒星形成率的重要参数。

关键词：恒星形成；星系并合；流体动力学模拟；GADGET- 4

1 - 引言

星系相互作用是导致星系恒星形成率发生变化的原因之一。这些变化可能使恒星形成率远高于质量相近的星系的预期水平，例如 M82 星系，其恒星形成率极高，处于一种称为星暴的状态，而这正是它与邻近星系相互作用所致 [1]。

在两星系间的各种相互作用中，碰撞尤为突出。在这些碰撞中，由于星系盘内气体之间的相互作用，恒星形成率会发生变化。高速碰撞会将气体压缩至高密度，从而有助于提高恒星形成率 [2] ，进而导致碰撞后星系中的气体含量减少 [3]。

星系碰撞导致的恒星形成率变化受多个参数影响，包括碰撞过程中星系的相对速度、星系核之间的距离（即该距离的方向与

接近速度的方向不同，这一距离称为冲击参数）、碰撞是否为正面碰撞、星系的相对大小和气体密度等。这些参数会影响恒星形成率[2] ，也会影响相互作用后剩余气体的数量及其动力学[2,4]。

为了对涉及盘和气体云的星系碰撞开展这类分析，研究人员使用 RAMSES[5], GADGET [6], 和 Arepo [7]等计算工具进行三维流体动力学模拟。这些代码根据星系的初始参数模拟其动力学演化，而这些参数又可以借助 Galstep [8] 和 SnapshotJoiner [9]等工具生成。随后，可以使用 Glnemo2 [10] 和 Gadgetviewer [11], 等可视化与分析软件查看模拟结果；这些软件能够处理并提取模拟数据，以供定性和定量研究。

在这些数值实验中，研究目标是分析由两个碰撞星系组成的系统中恒星形成率的变化，实验使用了 Galstep 和 SnapshotJoiner 工具。因此，研究人员生成了一对标准且稳定的星系，并使其沿碰撞轨道运动。这些初始条件在 GADGET-4 程序中运行后，研究人员使用 Gadgetviewer 工具将结果可视化；该程序经过配置和参数设定，能够模拟气体盘中的恒星形成。这些可视化结果有助于分析和解释碰撞结果。

本文组织如下：第2节介绍星系组成初始条件的生成方法以及星系碰撞参数。第3节展示并讨论模拟结果，重点关注星系系统气体盘的行为和恒星形成率。第4节分析这些结果，并将其与文献中的数据进行比较。

2 - 材料与方法

本研究使用计算工具 GADGET-4 及其库来模拟星系碰撞。

2.1- 软件 GADGET-4

GADGET（GAlaxies with Dark matter and Gas intEracT）最初由 Volker Springel、Naoki Yoshida 和 Simon D. M. White 于2000年开发，是一种用于流体动力学和 N体宇宙学模拟的工具。它最初发布了两个版本：一个用于单处理器，即串行版本；另一个用于多处理器，可将计算分配给多个处理器，从而提升计算性能，并执行包含更多粒子的模拟（此版本约有7500万个粒子）[16]。

2005年，GADGET-2 发布了。与其前身相比，它进行了多项技术改进，例如使用多重时间步长来计算不同密度和加速度区域中的粒子相互作用。这些改进使多处理器得到更有效的利用，旨在**避免瓶颈，并通过涉及熵这一基本变量的计算**更好地守恒系统能量。该版本能够模拟超过 2.5 亿个粒子，并分析这些系统中的辐射冷却和恒星形成 [17]。

虽然 GADGET-3 未向公众发布，但 GADGET-4 于 2020年 发布，在改进 GADGET-2 所引入功能的基础上，进一步优化了时间运算和跨多处理器的并行化，同时在流体动力学模拟中采用了新的基于压力的方法，并继续保持与旧模型的兼容性 [24]。

其运行方式是使用一个初始条件，其中包含分析系统的所有初始数据，例如每个粒子的质量、速度和位置。该条件通常由另一个程序生成。此初始条件及其他模拟参数（例如引力常数、精度设置、恒星形成参数和运行时选项）都在一个文本文件中指定，然后由程序执行，生成若干快照，其中

包含系统演化情况的数据，以及提供其他量特定数据的文本文件，这些数据记录了系统演化过程中的情况[6]。

2.2 – Glnemo2 软件

Glnemo2 是一款交互式可视化软件，可用于查看 GADGET 等程序生成的宇宙学模拟。加载模拟输出结果后，它可以将粒子可视化，从而获取星系系统结构、晕、丝状结构和旋臂形成等方面的数据。它还会提供模拟中各类粒子的具体数据，无论这些粒子属于晕、核球还是盘。该软件专为处理数百万个粒子而设计，并支持分别分析这些系统的子集 [10, 20]。

鉴于细节层次和粒子数量，Glnemo2 在很大程度上依赖专用 GPU（图形处理器），因此在配备集成显卡的计算机上难以使用，正如其安装要求中所述 [20, 21]。

2.3 – Gadgetviewer 软件

与 Glnemo2 类似，Gadgetviewer 也是一款交互式可视化软件，可用于查看 GADGET 等程序生成的宇宙学模拟，并观察模拟星系系统的结构数据。它的操作方式是选择并加载由 GADGET 生成的快照，随后即可利用粒子生成三维模型。该软件还提供恒星形成、金属丰度、质量和密度的数据，并针对快照中各种可能选择的粒子，给出每项数据的平均值、最大值和最小值。此外，还可以分析时间演化，并生成展示这一演变过程的视频。

与 Glnemo2 不同，Gadgetviewer 对硬件的要求低得多，可在集成显卡上运行 [11]。鉴于生成存储图像所需的计算资源较少，模拟中通过一台配备集成显卡的计算机使用了该软件。

2.4 – Galstep 软件

Galstep 程序用于生成星系初始条件，随后可将其作为 GADGET 等代码进行模拟的输入。其操作包括选择若干初始参数，例如星系中恒星盘、核球、气体盘和暗物质晕的质量、粒子数、大小及密度。初始参数中设定的粒子数越多，模拟精度越高，因为数值计算中所作的近似越少；另一方面，粒子数增加也意味着进行模拟需要更强的计算能力 [6, 8, 12]。

选定各项参数后，运行 Galstep，程序会生成一个 HDF5 文件，其中包含该星系在这些初始条件下的数据。进行 GADGET 等程序的模拟时，需要使用这类文件 [6]。

2.5 – 软件 SnapshotJoiner

因此，Galstep 对于创建单个星系的初始条件非常有用。然而，研究碰撞时，需要一个包含两个处于碰撞轨迹上的星系的初始条件文件。要生成这个文件，可以使用 SnapshotJoiner。其操作包括选择两个由 Galstep 等程序生成的星系初始文件，以及设定这些星系的相对位置、速度和旋转条件。请注意，绕 Z轴旋转 180° 会使它们呈现“镜像”效果。在此语境中，正的相对速度表示星系正在彼此远离，而负的速度则表示它们正在彼此接近 [9]。选择各项参数后，运行 SnapshotJoiner，程序便会汇总输入数据，生成一个 HDF5 文件，

其中包含这两个星系系统在所选初始条件和相对位置/速度下的数据。随后，可以在 GADGET 等程序中使用此文件来分析该系统的演化 [6]。

3 - 结果

3.1 – 初始条件

为获取两个星系正面碰撞系统的建模数据，使用 Galstep 程序生成每个星系的初始条件，所需参数包括星系的晕、盘、核球和气体。本研究的模拟中创建了两个标准星系。

对于 Galstep 生成的第一个星系（指定为大星系），气体与其他类型重子物质的初始比例设为 14 %，因此盘的质量设为 $5 \times 10^{10} M_{\odot}$，核球的质量设为 $10^{10} M_{\odot}$，气体盘的质量设为 $10^{10} M_{\odot}$（这样，将重子成分相加可得总质量 $7 \times 10^{10} M_{\odot}$，其中气体部分 $10^{10} M_{\odot}$ 占 14%）。至于由暗物质组成的晕，其初始质量设为 $10^{12} M_{\odot}$。

对于由 Galstep 生成的第二个星系（指定为小星系），其初始设置包括质量为一半的晕，以及恒星盘、气体盘和核球。径向尺寸也缩小了 $\sqrt{2}$ 倍，以保持两个建模星系中的气体和物质密度相等。

这一初始参数化的重要组成部分，还包括确定这些质量如何分布在星系中。需要注意的是，粒子数量越多，结果越准确，因为这更接近真实星系中存在的粒子数量，尽管代价是更高的计算成本。

对于使用大星系进行的模拟，初始质量为 $10^{12} M_{\odot}$ 的晕组分被分配为 10,000 个粒子，每个粒子都由大量太阳质量组成，从而使模拟成为可能 [18]。同样，盘被划分为 10,000 个粒子；由于核球的质量较低，核球被划分为 4,000 个粒子；而作为实验重点的气体组分则被划分为 40,000 个粒子。盘和气体的径向尺度因子均为 3.5kpc，径向截断为 30kpc。核球和晕遵循 Denhen剖面，其中 $\gamma = 1$，晕和核球的尺度半径分别为 47kpc 和 1.5kpc，截断半径分别为 900kpc 和 30kpc [8]。

对于使用小星系进行的模拟，所有这些数值都减半。其他 Galstep 参数均保持默认值。最后，运行该程序以创建这两个星系模型。

创建这些星系模型后，便使用 SnapshotJoiner 程序将两个星系合并为一个系统，例如模拟正面碰撞。为此，需要定义两个重要参数：星系之间的初始距离及其初始相对速度。在这些实验中，星系之间的相对速度从 100 千米/秒变化到 1000 千米/秒，增量为 100 千米/秒；星系之间的初始距离则设为 200 千秒差距。根据这些参数，构建了十个由两个相同星系（两个大星系）组成、用于模拟正面碰撞的星系系统。同样，还构建了另外十个星系系统，每个系统由两个不同的星系（一个大星系和一个小星系）组成，也用于模拟正面碰撞。

构建这两组发生碰撞的星系系统的初始条件后，即可使用 GADGET-4 程序进行模拟。在这些模拟中，启用了恒星形成函数 [6]，使恒星能够由星系气体盘中的气体形成。

3.2 – 数值模拟：GADGET-4

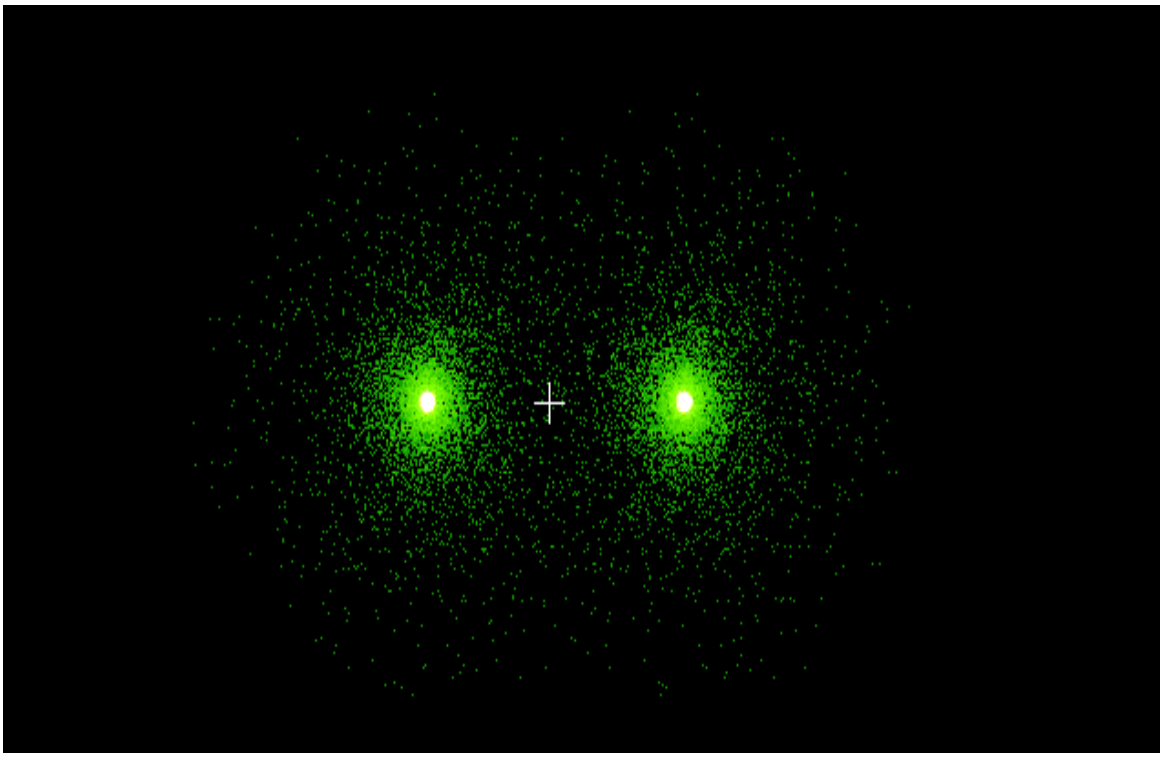
正确配置 GADGET-4 以描述一个星系系统的正面碰撞后，便执行了模拟。每次模拟都会生成多个快照文件，每个文件都记录了星系碰撞模拟过程中的一个时刻。随后，使用 Gadgetviewer 程序分析每个快照，生成模拟中各快照时刻粒子位置的可视化界面，从而获取星系碰撞动力学方面的信息，包括生成视频。

此外，还分析了 GADGET-4 得出的另一项结果。每次模拟生成的文件 sfr.txt [6]，提供了恒星形成率总量（单位为太阳质量/十亿年）。从 sfr.txt 文件中提取的连续数据之间的时间间隔约为 1.5×10^{-4} 十亿年。使用 Microsoft Excel 绘制了恒星形成率随时间变化的曲线图。

3.2.1 – 两个大型星系的碰撞与相对速度的关系

在这十次模拟中，所分析的两个大型星系具有相同的初始相对距离、质量和粒子数。因此，GADGET-4 为这十次模拟分别生成的第一张快照都显示相同的初始构型（图1）。

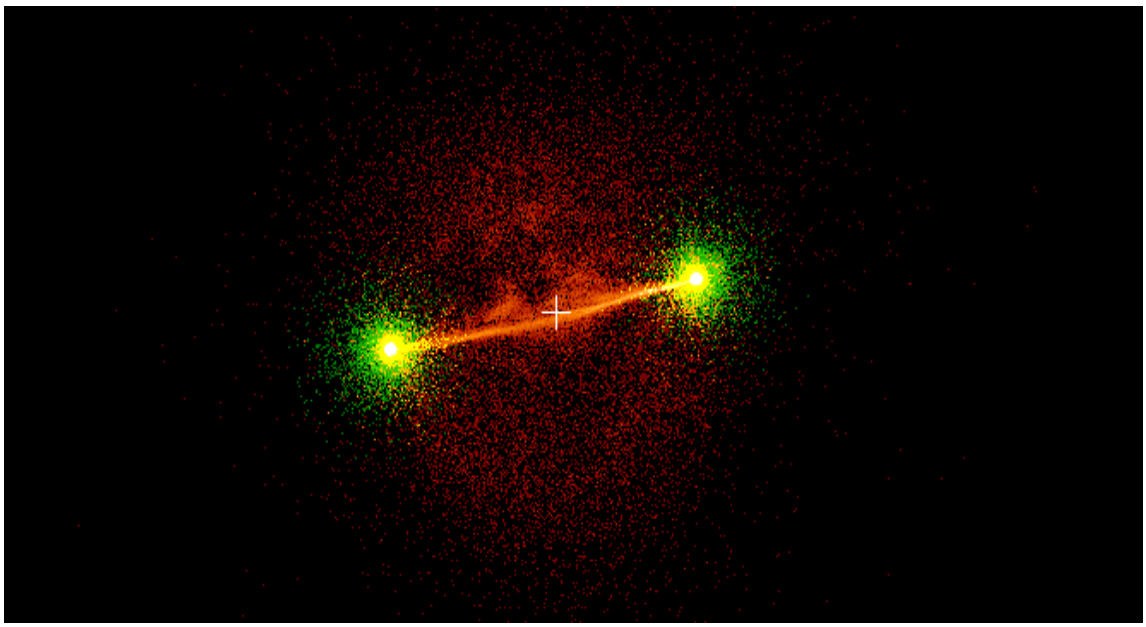
图1 – Gadgetviewer 可视化界面中两个大型星系的初始构型，相对距离为200千秒差距。



在图1中，星系周围的绿色点代表暗物质粒子，它们仅通过引力相互作用。星系中心的白色点是由重子成分构成的粒子，也就是盘和核球中存在的气体和恒星团。STARFORMATION 参数会在碰撞过程中将这些团中的气体转化为恒星。在图2所示的模拟中，星系系统以初始相对

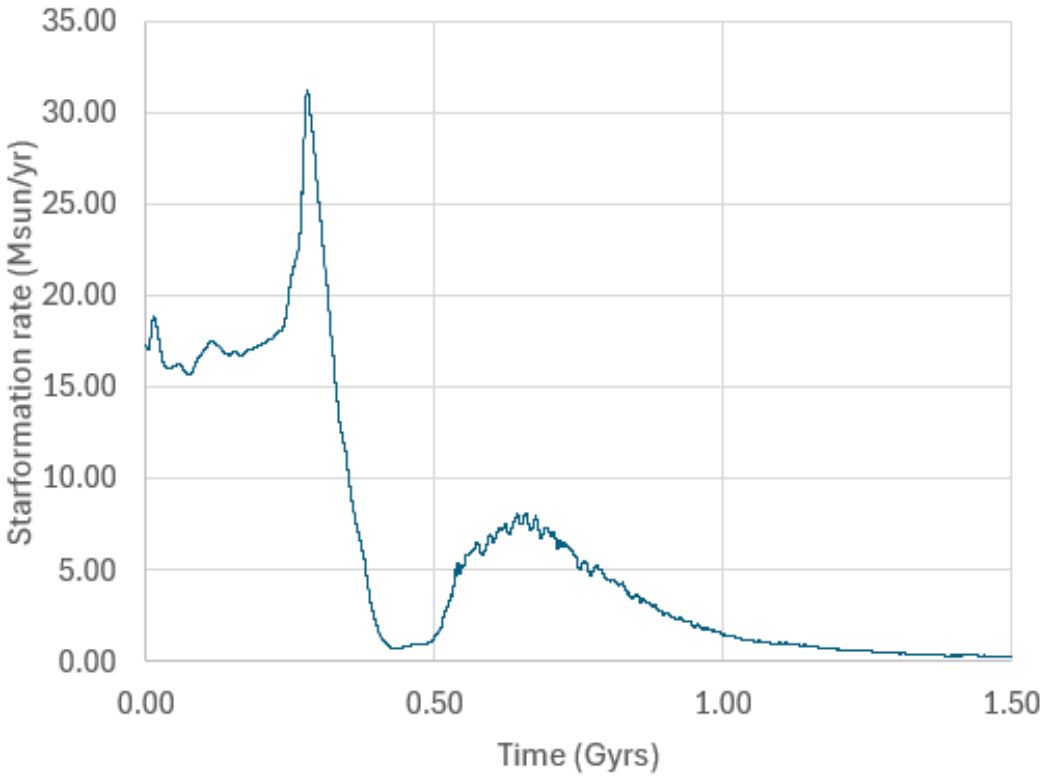
速度为 1000 千米/秒。碰撞后，大量气体（红色点）被碰撞剥离并弥散开来，星系沿相反的轨迹继续运动。

图2 –初始相对速度为 1000 千米/秒的两个大型星系正面碰撞数值模拟的最终构型。



在图2中，星系之间的红色点代表气体团。值得注意的是，碰撞后，几个原本位于星系中心的气体团散布到了整个星系系统中 [2]。图3根据 sfr.txt 文件绘制，这些文件提供了此次模拟中恒星形成率随时间的变化。

图3 - 初始相对速度为 1000 千米/秒的两个大型星系正面碰撞中的恒星形成率



数值模拟还针对其他初始相对速度条件进行了。图4展示了两个大型星系正面碰撞时恒星形成率随时间的变化，初始相对速度从100千米/秒到1000千米/秒，每隔100千米/秒取一个值。

图4 - 两个大型星系以100千米/秒至1000千米/秒的初始相对速度发生正面碰撞时的恒星形成率。

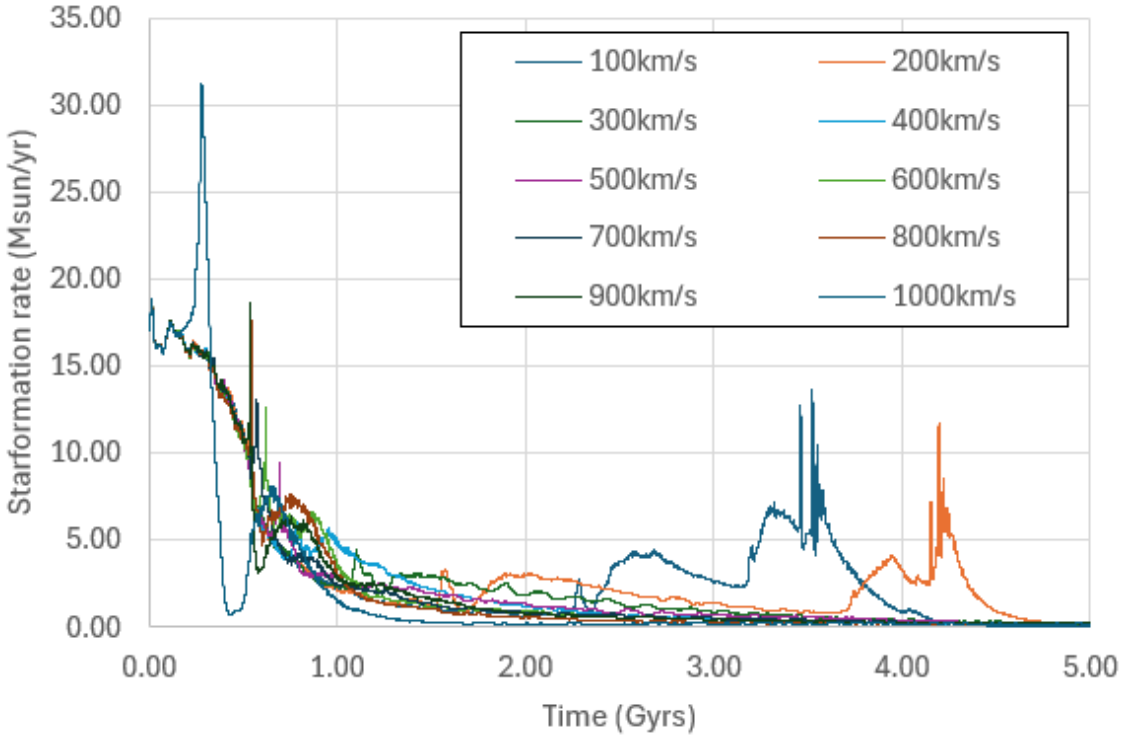


图5 - 两个大型相同星系发生正面碰撞但未并合时的恒星形成率。

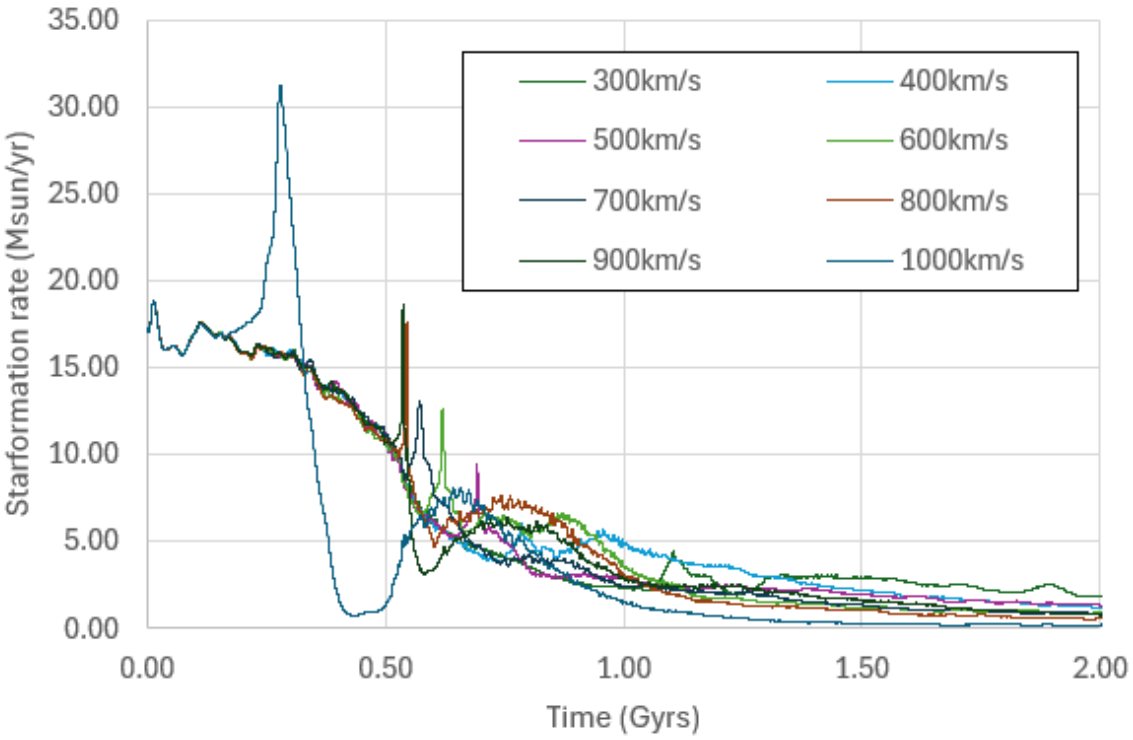


图4概述了两个大型星系在不同初始相对速度下发生正面碰撞时的恒星形成率。在相对速度较高的碰撞中，恒星形成率呈现出与图3所示相似的行为：碰撞发生前，星系系统的恒星形成率出现一些波动；碰撞期间，恒星形成率出现一个轮廓鲜明的峰值，随后急剧下降，之后又回到缓慢递减的状态。图5展示了呈现这一模式的模拟。在这些模拟中，正面碰撞后，星系朝相反方向彼此远离，并未发生并合，这与图2所示的构型类似。

请注意图5：在所有模拟中，两个大型相同星系正面碰撞期间都会出现一个初始峰值，其出现时间随初始相对速度而变化。峰值之后，恒星形成率急剧下降，随后恢复到逐渐下降的状态，与碰撞前观察到的行为相似。

另一方面，图4中还有另一组曲线，对应于星系碰撞的最终构型为单个星系的情况，也就是说，星系发生并合，如图6所示。

图6 – 两个大型星系发生并合过程时碰撞的最终构型。

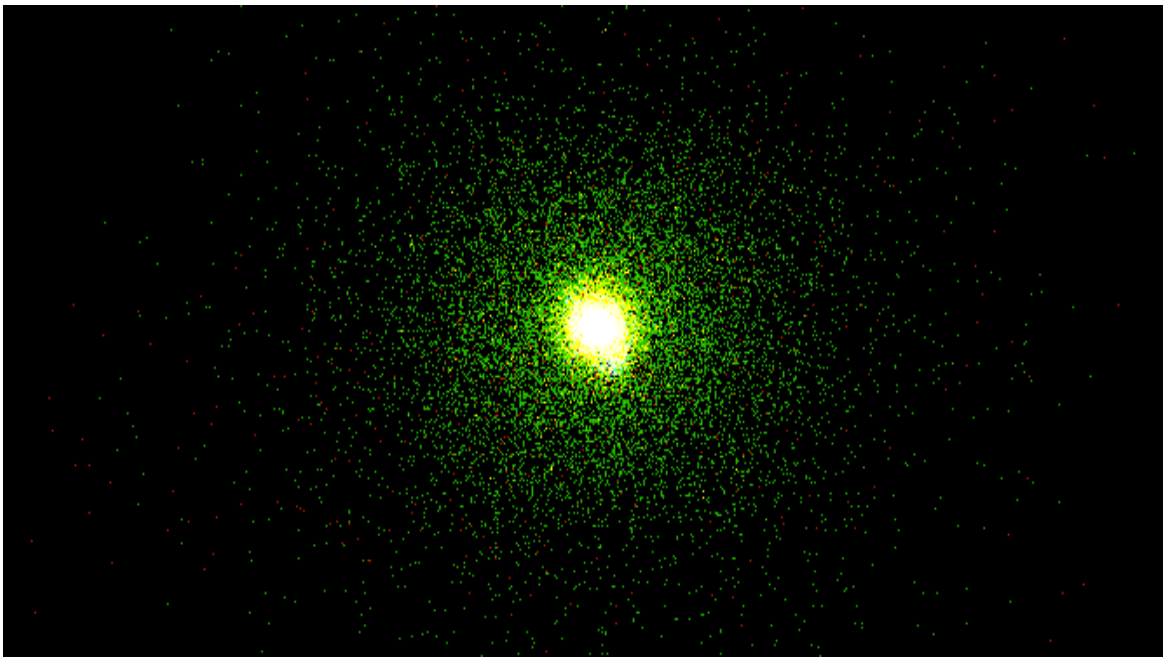


图7单独展示了发生并合过程时两个大型星系正面碰撞的恒星形成率。在这一星系并合过程中，随着星系相互穿越（次级正面遭遇），恒星形成率出现多个峰值；这一振荡过程持续到并合过程最终趋于稳定。

星系间的初始距离是决定并合过程是否发生的另一个重要参数。以两个大型星系组成的系统为例，当初始相对速度为 300 千米/秒、初始距离仅为 100 千秒差距时，可以观察到星系之间发生了并合过程，如图8所示；相比之下，初始距离是其两倍的系统则没有出现这种情况。请注意，尽管该系统的初始相对速度与图5所示的其中一个系统相同（即初始相对速度为 300 千米/秒的系统），但由于引力以及行进距离不同，星系在迎面碰撞时的相对速度也不同，这解释了星系系统最终构型的差异。

图7 - 正面碰撞（并合）中具有多个峰值的相同星系系统的恒星形成率。

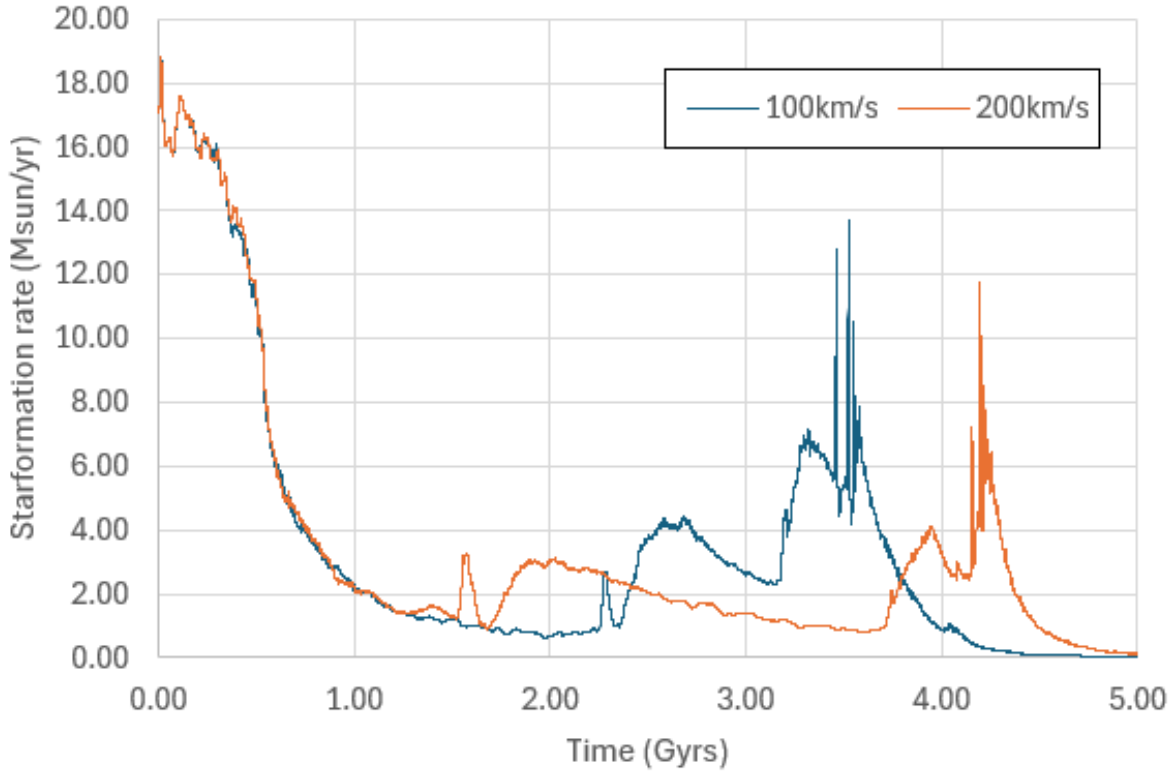
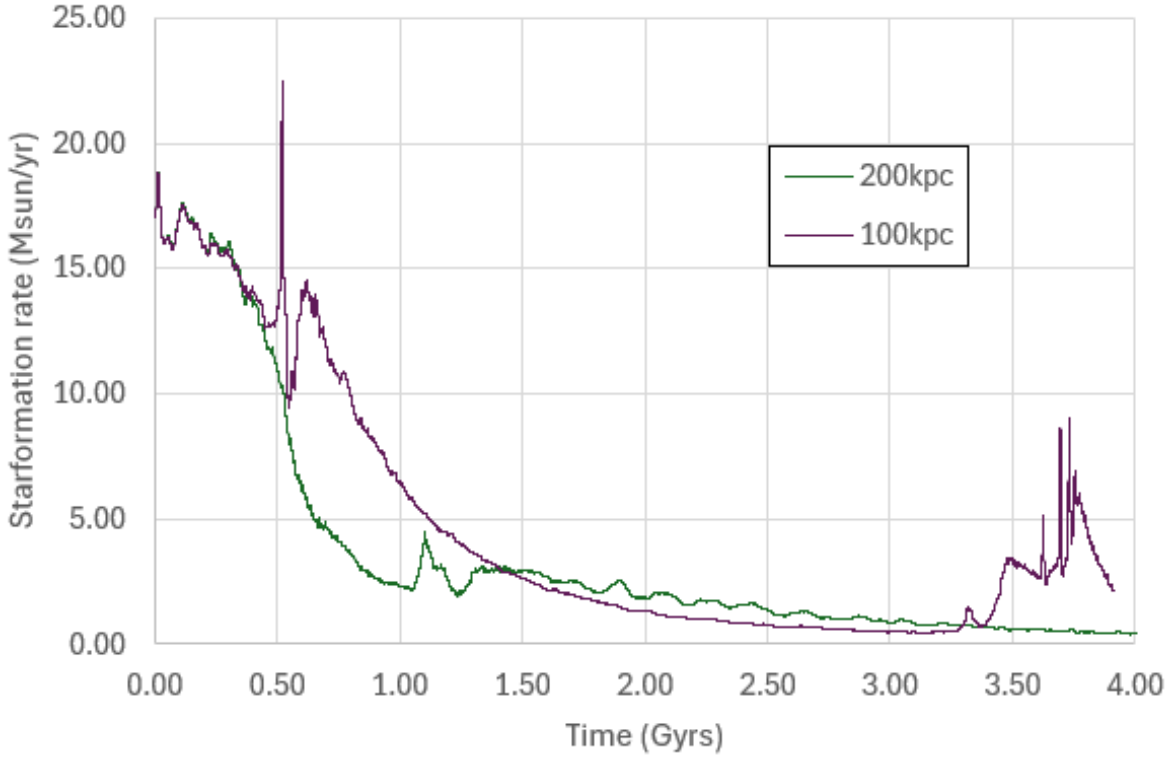


图8 - 初始相对速度为300千米/秒、初始距离为100kpc的两个大型星系正面碰撞时的系统恒星形成率。



在图8中，在起始距离为100千秒差距的系统中，由于首次正面碰撞，恒星形成率出现了一个初始峰值；但经过较长时间后，又出现了新的峰值。这种恒星形成率的动力学特征，是涉及并合的星系碰撞所具有的，其最终构型类似于图6所示，而非起始距离为200千秒差距的系统中观察到的最终构型；后者则类似于图2。

3.2.2 – 相对速度变化下大小星系的碰撞 **d**

在这十次模拟中，所分析的星系具有相同的初始相对距离，但质量和粒子数各不相同。其中一个星系的√2倍于另一个星系，但建模时使两者的气体密度相等。物质密度也同样如此。最后，这些星系再次被初始放置在相距200千秒差距的位置。因此，检查GADGET-4为这十次不同模拟分别生成的第一张快照时，得到的初始布局相同，如图9所示。在图9中，我们可以看到右侧的小星系和左侧的大星系。

与此前的模拟一样，环绕星系的绿色点代表暗物质粒子，而白色点对应重子盘和核球组分。这些组分中包含气体，在适当的物理条件下，气体可以按照 STARFORMATION子程序的参数设定形成恒星。

与对两个大型星系正面碰撞所开展的研究类似，我们首先考虑一种构型，其中星系的初始相对速度为 1000 千米/秒。同样，碰撞后气体（红色点）大量流失，两个星系向相反方向移动，如图10所示。

图9 – Gadgetviewer可视化界面中的大小星系初始构型。

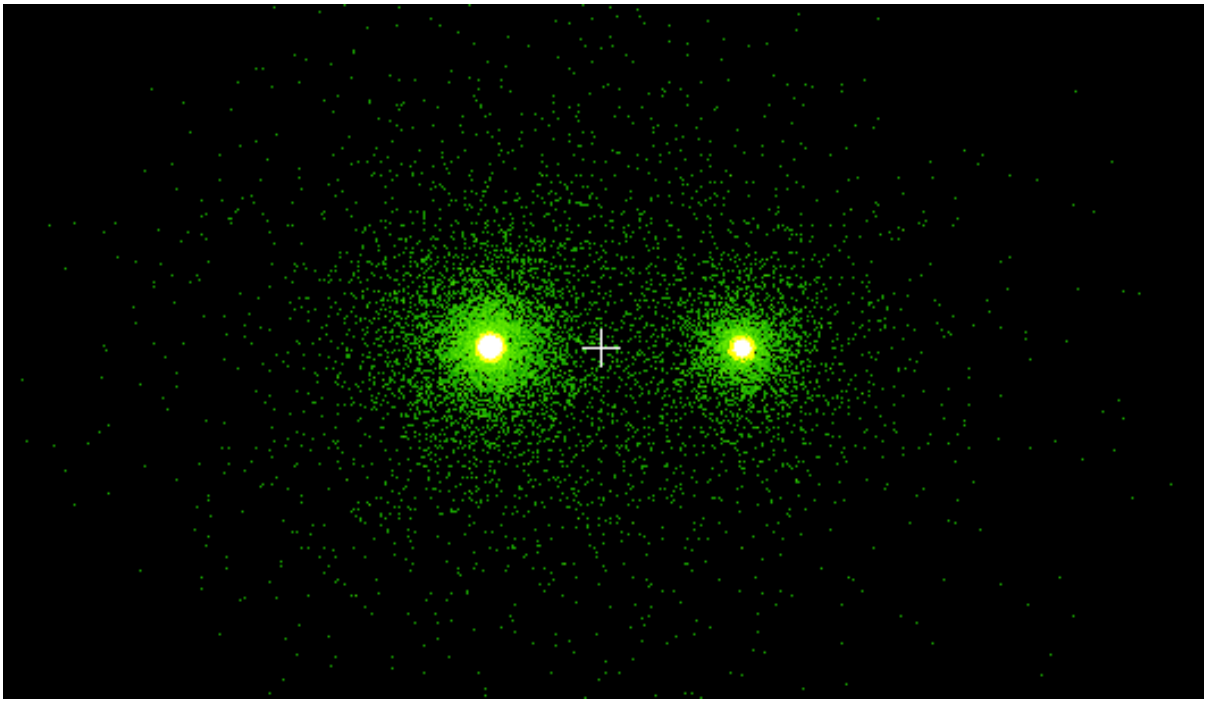
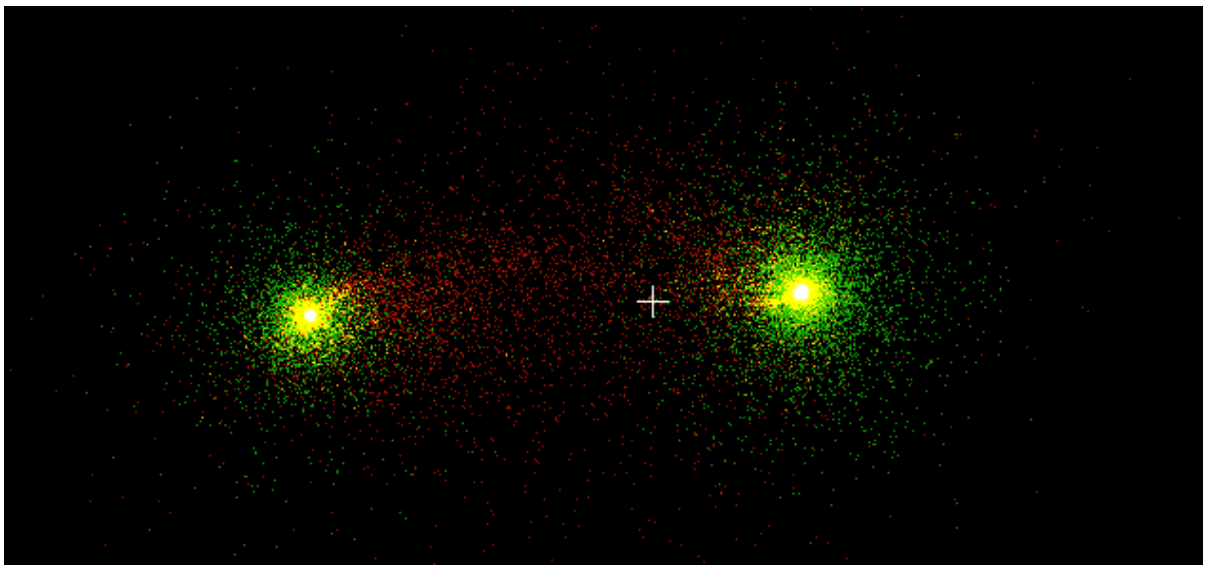
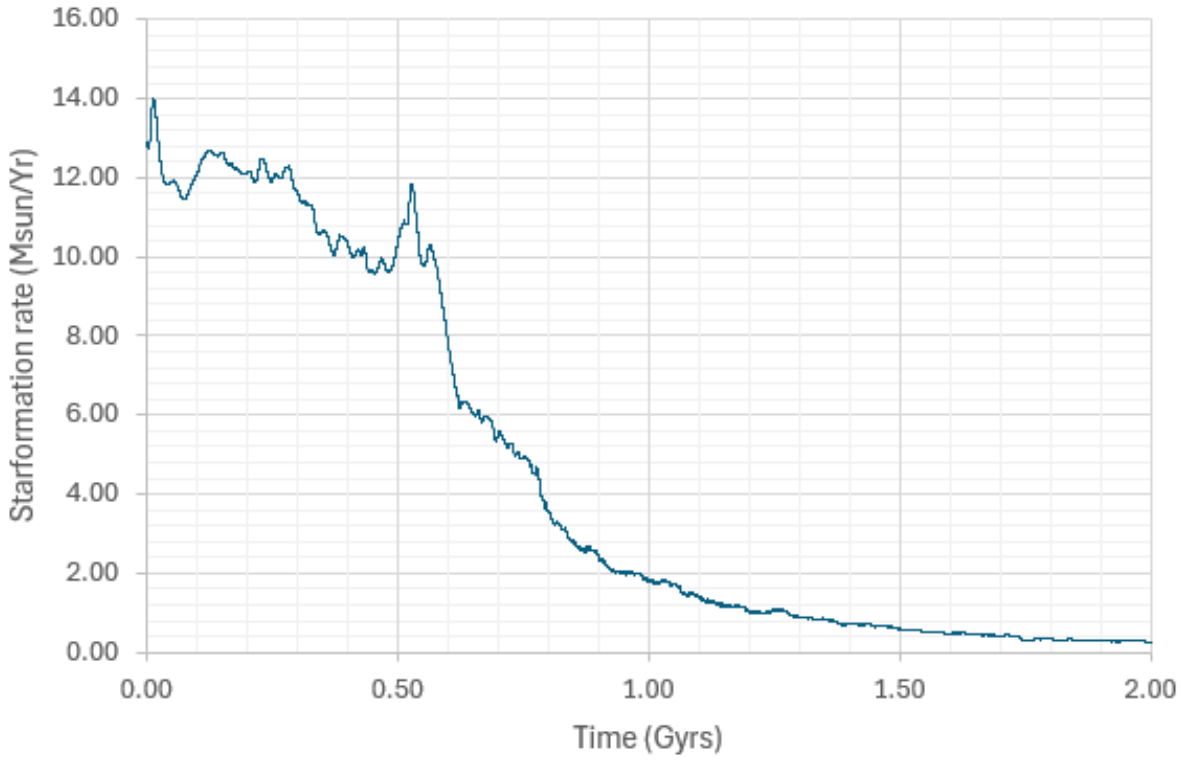


图10 – 初始相对速度为1000千米/秒的大小星系正面碰撞数值模拟的最终构型。



在图10中，碰撞后，这些气体团中的大部分扩散到星系际空间，而其中一部分受到晕的引力吸引并回落到星系上 [2]。图11根据sfr.txt中提供的数据绘制，展示了该星系系统的恒星形成率随时间的变化。

图11 - 相对速度为1000千米/秒的大小星系正面碰撞中的恒星形成率。

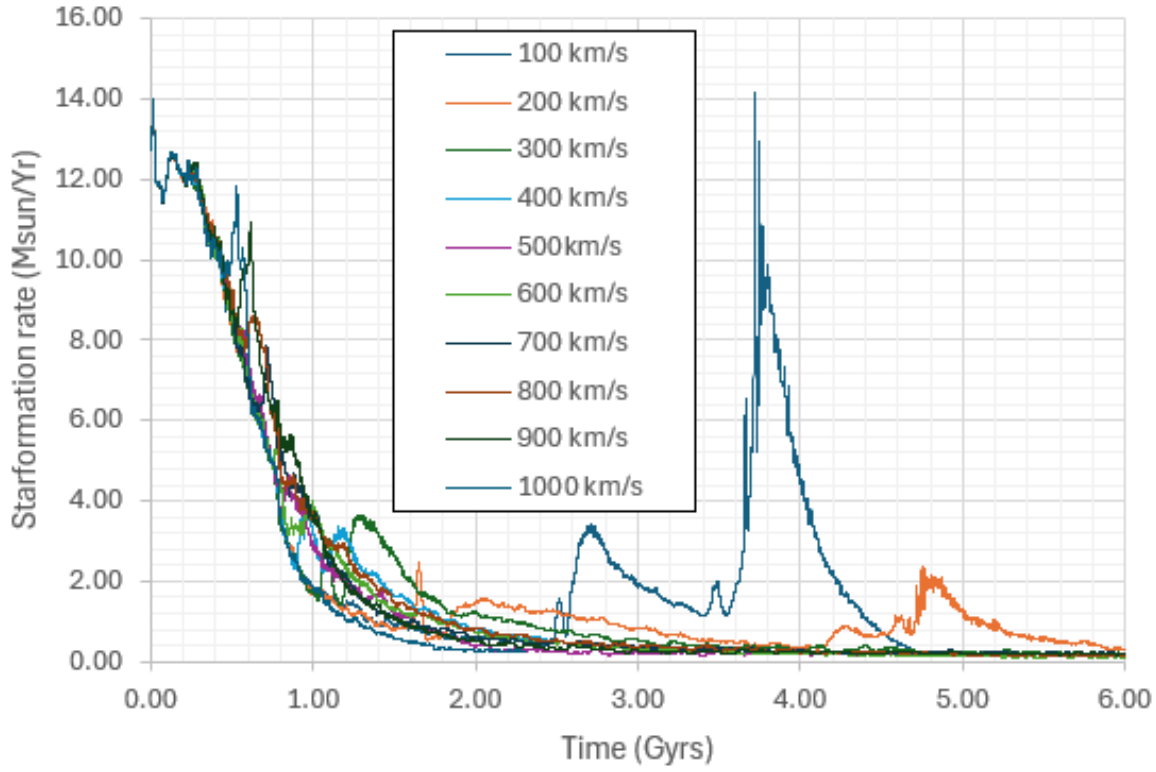


比较图3和图11中展示的恒星形成率可以发现，对于大-小星系，即使它们从相同的初始距离出发，碰撞发生的时间也有所不同。在图3中，模拟开始约0.3十亿年后出现第一个峰值，而在图11中，该峰值约出现在0.5十亿年后。

观察到的另一个差异是这些初始峰值的振幅：图3中的峰值远高于图11中的峰值。尽管存在这些差异，碰撞之后，两个系统都呈现出相同的变化趋势，即恒星形成率逐渐下降。

我们针对其他初始相对速度条件进行了数值模拟。图12展示了不同初始相对速度下恒星形成率随时间的变化。再次说明，恒星形成率曲线对应的相对速度范围为100千米/秒至1000千米/秒，间隔为100千米/秒。

图12 – 初始相对速度从 100 千米/秒到 1000千米/秒的大型星系与小型星系正面碰撞时的恒星形成率。



与两个大型星系碰撞的情况一样，数值模拟可分为两类：一类的恒星形成率仅出现一个峰值，另一类则观测到多个峰值；后一种情况会在星系合并时发生。图13展示了初始相对速度不同时，观测到单个峰值的星系碰撞数值模拟。

在图11和图13中，可以观察到碰撞发生前星系系统的恒星形成率存在一些波动，碰撞期间恒星形成率出现一个界定清晰的峰值，而撞击后恒星形成率逐渐下降；这一行为与此前观察到的两个大型相同星系碰撞时的情况类似。

图14展示了发生并合过程的大型星系与小型星系正面碰撞时的恒星形成率。在这一星系并合过程中，由于星系在并合前呈现振荡动力学，恒星形成率会出现多个峰值。图15展示了这些并合星系系统的最终构型。

Figure 13 - 大小星系未并合时正面碰撞的恒星形成率 .

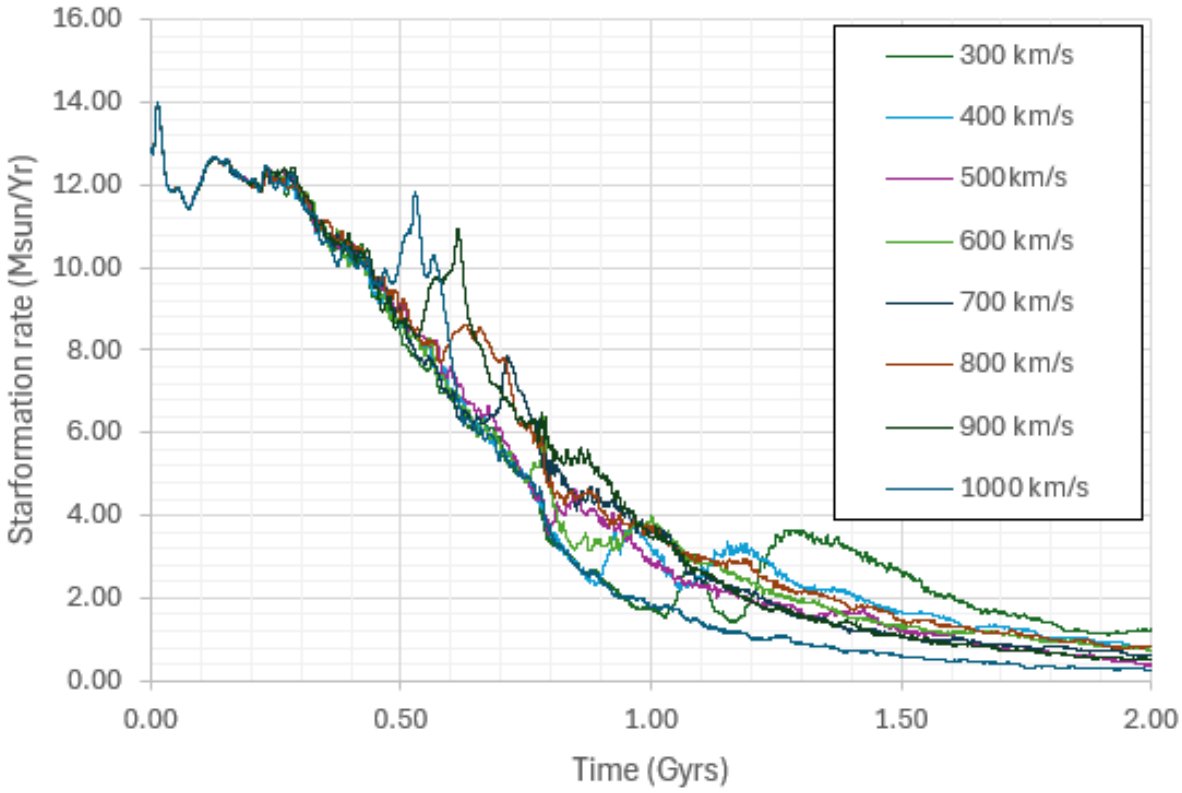


图14 - 大、小星系系统在正面碰撞中出现多个峰值（并合）时的恒星形成率。

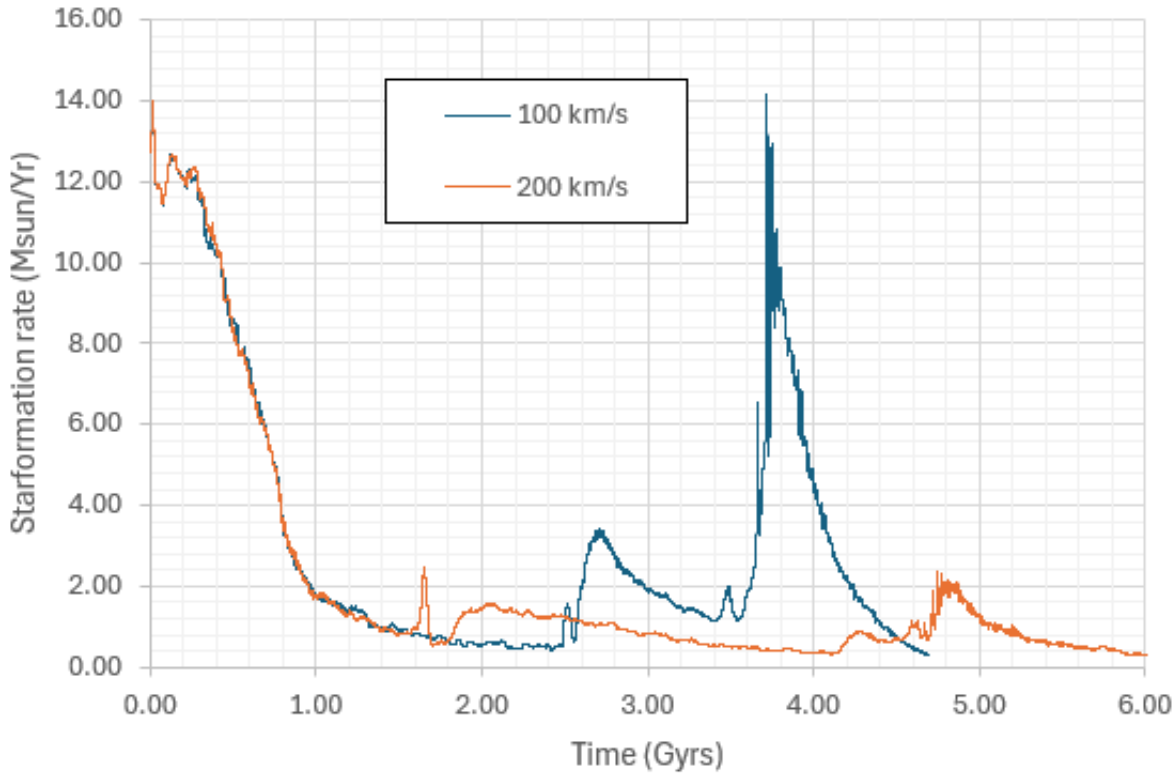
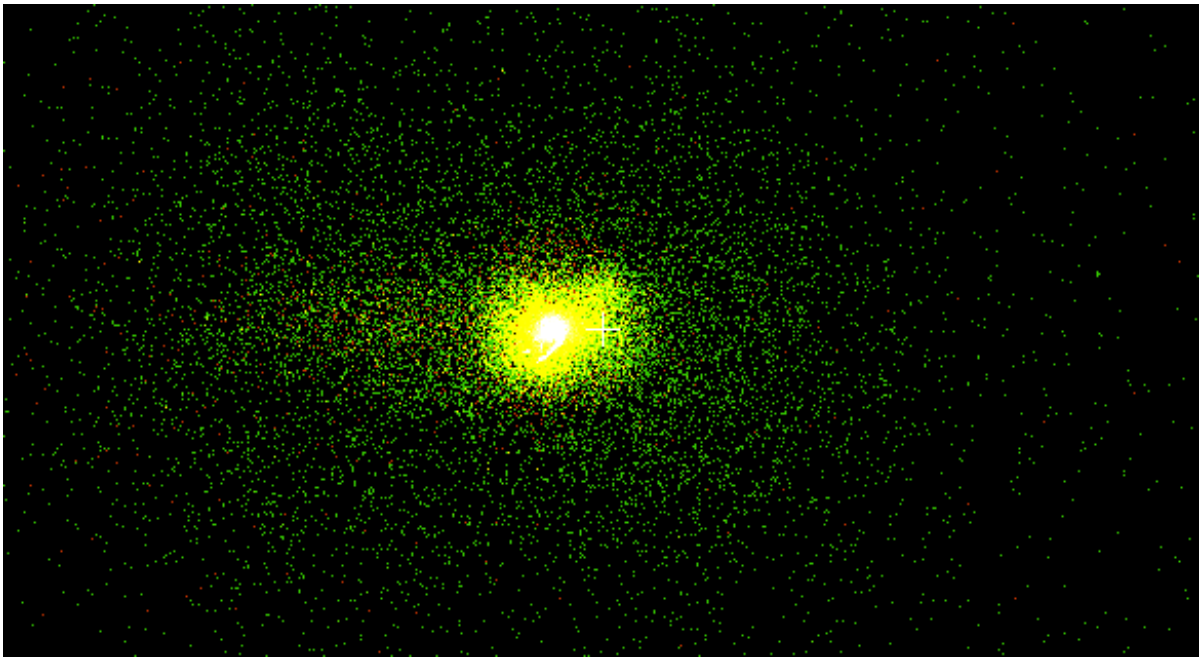
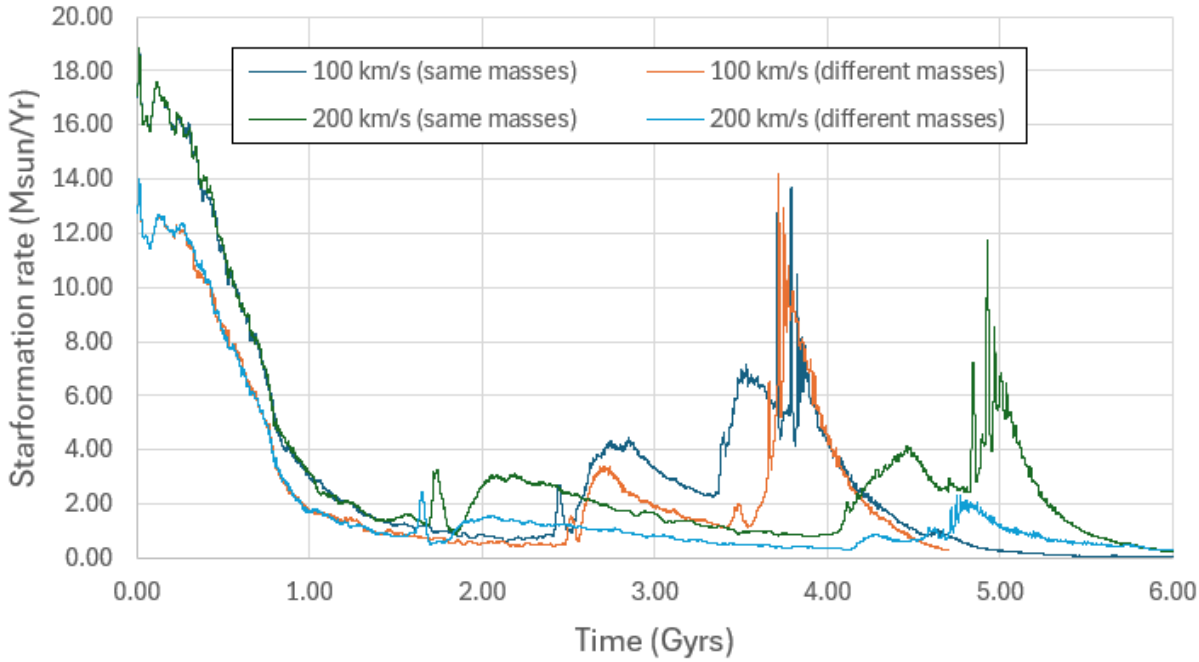


图15 – 发生并合过程的大小星系正面碰撞的最终构型。



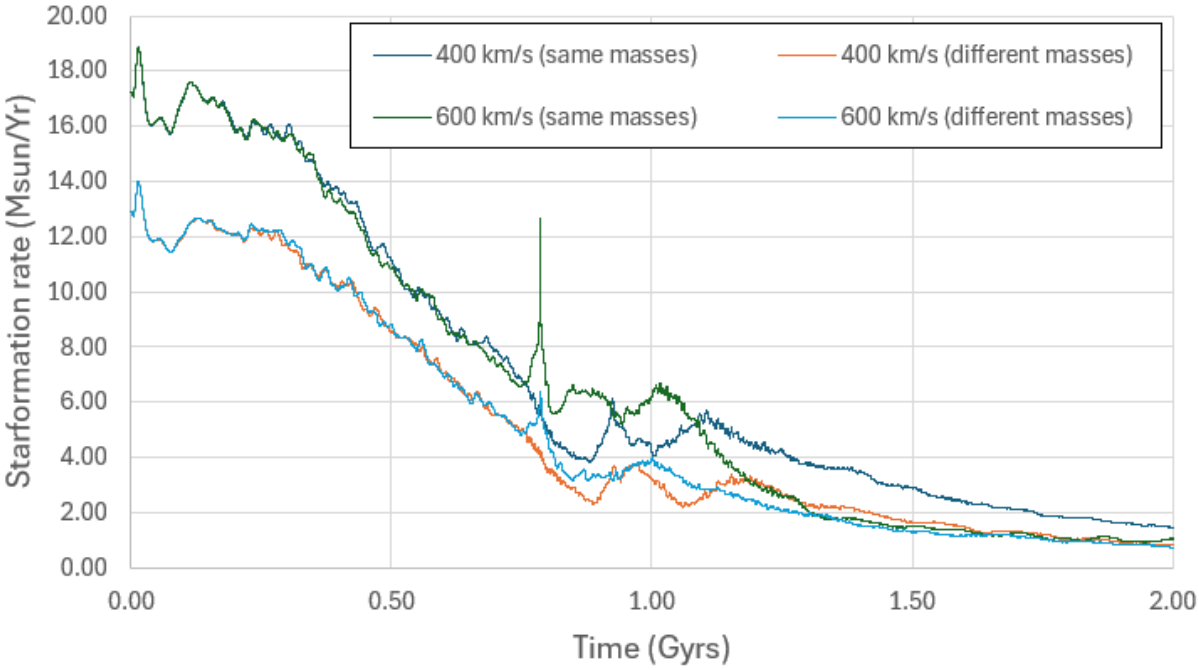
根据所进行的模拟，由于两个大型星系组成的系统中气体总量更多，质量更大的星系表现出比大小星系系统更高的恒星形成率。图16展示了发生星系并合时，质量相同和不同的系统中恒星形成率的比较。

图16 – 发生并合时，相同和不同星系正面碰撞中的恒星形成率比较。



同样可以观察到，在未发生并合的情况下，经历正面碰撞的星系系统中，两个大型星系（质量更大的星系）之间碰撞时的恒星形成率也更高。此外还发现，在这类构型中，峰值更高，如图17所示。

图17 – 未发生并合时，相同和不同星系正面碰撞中的恒星形成率比较。



最后，在图16和图17中可以观察到，恒星形成率逐渐下降，经过很长一段时间后达到近似恒定值。

3.3 – 星系正面碰撞的特征

可以观察到，最初所有系统都呈现出非常高的恒星形成率，每年达到几十个太阳质量的量级。这是由于所建模星系的初始条件造成的，其气体比例相对于物质总量而言过高。然而，可以注意到，最终这一较高的恒星形成率会下降到较低且恒定的水平，通常为每年几个太阳质量，这表明星系中气体与物质的比例更加平衡 [15]。

另一个常见特征是，每当可视化界面记录到星系发生碰撞时，也会记录到系统恒星形成率的峰值，这是由于星系气体盘之间的相互作用所致 [2]。

具体而言，在相对速度较高的碰撞中，碰撞后会观察到星系气体的大量弥散，这是一种预期现象 [3] ，并且与“飞溅桥” [22]相似。在这种情况下，碰撞 [2]后恒星形成率会大幅降低。我们的研究中，对于初始相对距离为 200kpc 的情况，观察到的阈值为 v =200km/s。

另一方面，相对速度较低的星系碰撞（即速度低于相对距离固定为 200kpc 时的阈值）可能导致星系并合，这显然取决于它们的质量。在这些情况下，恒星形成率会出现多组峰值，其中第一个峰值总是与首次碰撞相关，也就是星系第一次彼此穿过时。由于星系系统受到引力捕获，这些星系最终会在一段时间后再次相互作用，并在它们再次彼此穿过时出现第二个恒星形成率峰值。这个过程会不断重复；每次相互作用后，星系的相对速度都会降低，随后发生并合过程 [2]。对碰撞星系系统的天文观测表明，相对速度介于 100 千米/秒和 200 千米/秒之间的系统最为常见 [23]。

最后，星系在碰撞过程中的初始距离，或首次天文观测时的距离，也尤为重要。在我们的研究中，对于初始相对速度为 300 千米/秒的星系，其是否并合取决于星系的质量和初始观测距离。

不过，这两个案例研究也存在差异：两个大型星系之间的碰撞，以及大小星系之间的碰撞。观测发现，恒星形成率的峰值较高，这与含有更多气体的星系有关 [2]。

4 – 结论

本研究旨在观察，两个星系处于正面碰撞轨道时，系统初始参数化的变化如何影响恒星形成率以及该系统的演化。

在初始相对速度较低（100 千米/秒至 200 千米/秒）的模拟中，观察到了两个参与碰撞的星系并合的情况；这种情况在观测研究中更为常见 [32], 。另一方面，当星系的相对速度较高时，例如达到约 1000 千米/秒，碰撞后不会发生并合；气体会大量从星系盘弥散至星系际介质中，因此这些情况下的恒星形成率会显著下降。

致谢：作者 Gustavo N. Pereira 获得了 PICME–OBMEP/CNPq本科生研究奖学金的资助。 我们感谢

参考文献

[1] Schreiber, N. F., Genzel, R., Lutz, D., & Sternberg, A. (2003). M82 中星暴活动的性质。《天体物理学杂志》，*599*(1), 193。https://doi.org/10.1086/379097

[2] Haworth, T. J., Tasker, E. J., Fukui, Y., Torii, K., Dale, J. E., Shima, K., Takahira, K., Habe,

[3] Ruggiero, R. (2019). 星系团中的星系演化。arXiv 预印本 arXiv:1902.05363。https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.05363

[4] Roediger, E. 与 Brüggen, M.（2006）。盘星系的冲压剥离：倾角的作用。《皇家天文学会月刊》，*369*（2），567-580。https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10335.x

[5] Teyssier, R.（2006）。RAMSES 用户指南。宇宙基本定律研究所。https://irfu.cea.fr/Projets/COAST/ramses_ug.pdf

[6] Springel, V.（2021）。GADGET-4 手册。马克斯·普朗克天体物理研究所。https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/gadget4/gadget4_manual.pdf

[7] Springel, V., Pakmor, R., & Weinberger, R. (2019). Arepo 文档. 马克斯·普朗克天体物理研究所。https://arepo-code.org/wp-content/userguide/index.html

[8] Ruggiero, R.（2014）。Galstep。GitHub。https://github.com/rruggiero/galstep

[9] Mello, E. (2007)。快照合并器。GitHub。https://github.com/elvismello/snapshotJoiner
[10] Lambert, J.-C. (2007)。Glnemo2。GitHub。
https://github.com/jeancharleslambert/glnemo2[11] Helly, J. (2019)。Gadgetviewer。
GitHub。https://github.com/jchelly/gadgetviewer

[12] Ruggiero, R., & Lima Neto, G. B. (2017). 落入星系团的星系中气态盘的命运。《皇家天文学会月刊》，*468*(4), 4107-4115。https://doi.org/10.1093/mnras/stx744

[13] Springel, V., & Hernquist, L. (2003, January). 星系形成模拟的多相模型。载于 国际天文学联合会专题讨论会（第208卷，第273-282页）。剑桥大学出版社。 https://doi.org/10.1017/S0074180900207225

[14] Kruijssen, J. M. (2025). 球状星团的形成。arXiv 预印本 arXiv:2501.16438。
https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.16438

[15] Chomiuk, L., & Povich, M. S. (2011). 探索银河系及其他星系恒星形成率测定的统一方法。《天文学杂志》，*142*(6), 197。https://doi.org/10.1088/0004-6256/142/6/197

[16] Springel, V., Yoshida, N., & White, S. D.（2001）。GADGET：用于无碰撞和气体动力学宇宙学模拟的代码。《新天文学》，*6*（2），79-117。https://doi.org/10.1016/S1384-1076(01)00042-2

[17] Springel, V.（2005年）。宇宙学模拟代码 GADGET-2。《皇家天文学会月刊》，*364*（4），1105-1134。
https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09655.x

[18] Springel, V., Pakmor, R., Zier, O., & Reinecke, M.（2021）。使用 GADGET-4代码模拟宇宙结构形成。《皇家天文学会月刊》，*506*（2），2871-2949。https://doi.org/10.1093/mnras/stab1855

[19] Iannuzzi, F. 与 Dolag, K.（2020年）。GADGET 中的自适应引力软化。《皇家天文学会月刊》，*417*（4），2846-2859。https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19446.x

[20] Lambert, J. C.（2012年）。Glnemo2：用于N体数据的交互式三维可视化程序。第二十一届天文数据分析软件与系统会议，*461*，897。https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012ASPC..461..897L

[21] Segal, M. 与 Akeley, K.（2006年）。OpenGL 图形系统：规范（2.1 版）。科纳斯组织。
https://registry.khronos.org/OpenGL/specs/gl/glspec21.pdf

[22] Yeager, T. 与 Struck, C.（2020年）。飞溅桥中的恒星形成。《天体物理学杂志》，905（2），118。
https://doi.org/10.3847/1538-4357/abc82a

[23] Pawlowski, M. S., Kanehisa, K. J., Taibi, S., & Li, P. (2022). 星系对的相互速度ΛCDM——观测到的速度峰值位于~ 130 km s− 1 并非修正牛顿动力学所独有。《天文学与天体物理学》，664，L6。
https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243646