

增强的亚分辨率恒星形成模型在宇宙学模拟中

E. Lozano¹, C. Scannapieco^{1,2}, S.E. Nuza^{3,2}, Y. Ascasibar^{4,5}, L. Biaux¹ & F.G. Iza³

¹ Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

³ Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina

⁴ Departamento de Física Teórica, Campus de Cantoblanco, UAM, Madrid, Spain

⁵ Centro de Investigación Avanzada en Física Fundamental (CIAFF-UAM), 28049 Madrid, Spain

Resumen / Uno de los componentes cruciales para simular el crecimiento y la evolución de galaxias en un marco cosmológico es el modelizado de la formación estelar (SF) y su correspondiente retroalimentación. Tradicionalmente, la ley de SF se basa en la relación empírica de Kennicutt-Schmidt, una correlación entre la tasa de formación estelar (SFR) y la densidad total de gas. Recientemente, se ha encontrado que la SFR se correlaciona fuertemente con la abundancia de hidrógeno molecular (H_2). Esto da lugar a la pregunta de si el H_2 es un precursor necesario para la SF o es simplemente un trazador de la densidad total ya que ambos escenarios explicarían las correlaciones observadas. En este trabajo estudiamos el impacto de una ley de SF basada en el H_2 en simulaciones cosmológicas de la formación de galaxias de tipo Vía Láctea. Nuestro modelo predice la formación de una galaxia de disco que, comparada con la receta tradicional, retrasa la formación estelar por aproximadamente 500 Myr, lo que resulta en una menor SFR, menor tamaño del disco y una proporción mayor de gas neutro a ionizado. Estos hallazgos resaltan la importancia de incluir modelos de SF sofisticados, que puedan ser contrastados con distintas observaciones – incluidas aquellas relacionadas al H_2 – para lograr un mejor entendimiento de los procesos involucrados en la evolución galáctica.

Abstract / En un universo en expansión, la formación y evolución de las galaxias depende crucialmente de la formación estelar (SF) y su retroalimentación. Tradicionalmente, la ley de SF se basa en la relación empírica de Kennicutt-Schmidt, que relaciona la tasa de formación estelar (SFR) con la densidad del gas. Recientemente, se ha encontrado que la SFR está fuertemente correlacionada con la abundancia de hidrógeno molecular (H_2). Esto plantea la pregunta de si el H_2 es un precursor necesario para la SF o simplemente un trazador de la densidad total, ya que ambos escenarios podrían explicar las correlaciones observadas. En este trabajo, estudiamos el impacto de una ley de SF basada en el H_2 en simulaciones cosmológicas de la formación de galaxias tipo Vía Láctea. Nuestro modelo predice la formación de una galaxia de disco que, comparada con la receta tradicional, retrasa la formación estelar en unos 500 Myr, lo que resulta en una menor SFR, un disco más pequeño y una mayor proporción de gas neutro frente al ionizado. Estos resultados destacan la importancia de incluir modelos de SF más sofisticados, que puedan ser contrastados con diferentes observaciones – incluidas aquellas relacionadas con el H_2 – para lograr una mejor comprensión de los procesos involucrados en la evolución galáctica.

Keywords / 星系：恒星形成 — 星系：演化 — 星系：结构

1. 介绍

在标准宇宙学模型的框架内，星系的形成是气体在暗物质晕中凝聚的结果。这些晕是从小密度波动的引力坍缩中产生的，并随着时间通过吸积物质和较小的亚结构而增长。从星系形成的最早阶段开始，各种物理过程共同作用塑造了星系的特性，形成了贯穿宇宙历史的复杂机制相互作用。

在星系形成和演化的模拟中，精确建模恒星形成 (SF) 及其相关反馈是一个关键组成部分。恒星形成的开始是气体冷却，这决定了可用于恒星形成的密集气体的数量和分布。恒星的形成反过来又使星际介质 (ISM) 富集了化学元素和能量。气体冷却与超新星爆炸引起的加热之间的相互作用在调节时空中的恒星形成率 (SFRs) 方面至关重要。然而，由于恒星形成和恒星反馈发生在较小、无法解析的尺度上，因此

必须通过子网格模型来考虑它们对更大尺度的影响。

在过去几十年中,观测研究揭示了当考虑分子气体时,气体密度与恒星形成率之间的相关性变得更加强烈 (Leroy et al. 2008; Bigiel et al. 2010; Bolatto et al. 2011 及其中的参考文献)。这种关系在解析尺度 (Baker et al., 2021) 和跨越不同红移的星系范围尺度上均成立 (Baker et al., 2022)。此外,恒星形成的典型时间尺度似乎取决于星际介质的物理特性 (Bigiel et al., 2008, 2010; Bolatto et al., 2011; Leroy et al., 2013)。这些发现促进了模拟和半分析框架内更先进的恒星形成模型的发展 (Murante et al., 2010; Mollá et al., 2015; Millán-Irigoyen et al., 2020)。

在本研究中,我们探讨了一种基于分子氢的恒星形成规律对银河系形成的影响。我们的方法基于 Millán-Irigoyen et al. (2020) 发展的半解析模型,该模型假设星际介质由原子气体、电离气体和分子气体组成,还包括金属和尘埃。此模型在移动网格磁流体力学代码 AREPO (Springel, 2010) 中实现,该代码将气体成分表示为一系列离散单元的集合。每个单元假定具有多相结构,包括电离氢、原子氢和分子氢阶段,以及恒星成分。金属也使用 AREPO 的标准化学演化模型进行跟踪。各相之间的质量交换由一组微分方程描述,这些方程考虑了各种物理过程的影响。在恒星阶段内的恒星形成与分子氢的比例相关,并受密度依赖的时间尺度控制。

本过程结构如下。第 2 节概述了模拟代码、实现的物理原理以及新开发的恒星形成模型。在第 3 节中,我们利用该模型研究了一个类似银河系质量的星系的形成,并在一个宇宙框架内分析了模拟系统的预测属性,重点关注不同的阶段以及恒星形成的活动。最后,第 4 节给出了我们的结论。

2. 模拟和恒星形成模型

2.1. AREPO 代码

我们利用 N 体磁流体力学 (MHD) 代码 AREPO 来进行我们的模拟。在我们的实现中,我们仅修改分配给每个气体单元的 SF 处方,而其余的代码——包括反馈、冷却和金属增丰——保持不变。在标准的 SF 实现中,恒星粒子是从满足恒星形成必要条件的气体单元中随机生成的,并且恒星形成率与单元的总气体密度成正比。而在我们的模型中,恒星形成率则依赖

于整合四个微分方程,我们将在下面进行解释。对于主代码 AREPO 的详细描述,我们将读者引向 Springel (2010)。

为了模拟银河系质量星系的形成和演化,我们使用了 Auriga 项目 (Grand et al., 2017) 中的 Au6 晕初始条件 (ICs) (四级分辨率)。这些 ICs 对应于一个在 $z = 0$ 时具有 $M_{200} = 1.05 \times 10^{12} M_{\odot}$ 晕区的 virial 质量放大,且相对孤立。在原始的 Auriga 模拟中,这些 ICs 产生了一个性质类似于银河系的星系,如 Grand et al. (2017) 所述。在整个过程中,我们比较了两个模拟的预测:采用新恒星形成配方的 Au6_MOL 和使用标准恒星形成配方 (公式 1) 的 Au6_STD。

本研究中采用的宇宙学参数遵循来自 Planck Collaboration et al. (2014) 的: $\Omega_M = 0.307$, $\Omega_b = 0.048$, $\Omega_{\Lambda} = 0.693$ 和一个哈勃常数 $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, 带有 $h = 0.6777$ 。代码中的所有其他输入参数与 Auriga 项目 (Grand et al., 2017) 中使用的相同。

2.2. 恒星形成模型

在我们的恒星形成模型中,恒星颗粒是由多相气体单元通过随机方法形成的。该方法如 Springel & Hernquist (2003) 所述 (另见 Grand et al. 2017), 允许密度超过阈值 (ρ_{th}) 的气体单元有资格进行恒星形成。在标准实现中,星体粒子以由

$$\dot{m}_* = \frac{x M_{\text{cell}}}{t_*(\rho)}, \quad (1)$$

定义的速率随机形成,其中 x 表示冷气体的比例, M_{cell} 是气体单元的质量, $t_*(\rho)$ 是星体形成的时标,给定为

$$t_* = t_0^* \left(\frac{\rho}{\rho_{\text{th}}} \right)^{-1/2}, \quad (2)$$

这里 t_0^* , 最大星体形成时标,是模型的参数。通过这种选择,恒星形成率密度与气体密度的 $3/2$ 次方成正比,正如 Kennicutt-Schmidt 定律中所描述的那样。

在我们的方法中,我们没有使用方程 1,而是通过求解一组微分方程来计算每个气体单元的恒星形成率。这些方程跟踪四个组分的质量分数演化: (1) 温度约为 $\sim 10^4 \text{ K}$ 的电离相, (2) 大约 $\sim 100 \text{ K}$ 温度的原子相, (3) 温度为 $\sim 10 \text{ K}$ 的分子相,以及 (4) 恒星*。通过几个过程在各相之间发生质量交换: 电

* 尽管气体由氢、氦和金属组成,该模型仅包括在相之间交换质量的主要

离气体的复合、原子氢的凝结、分子气体的光解、原子的光电离、恒星形成以及恒星向星际气体的质量归还。我们将每相相对于总细胞质量的质量分数表示为 $f_X = M_X/M_{\text{cell}}$ ，其中 X 可以是 i (离子化)、 a (原子态)、 m (分子态) 或 s (恒星)。任意时刻 t ，气体单元的总质量为：

$$M_{\text{cell}}(t) = M_i(t) + M_a(t) + M_m(t) + M_s(t), \quad (3)$$

其中相应质量分数之和必须等于一，即

$$f_i + f_a + f_m + f_s = 1. \quad (4)$$

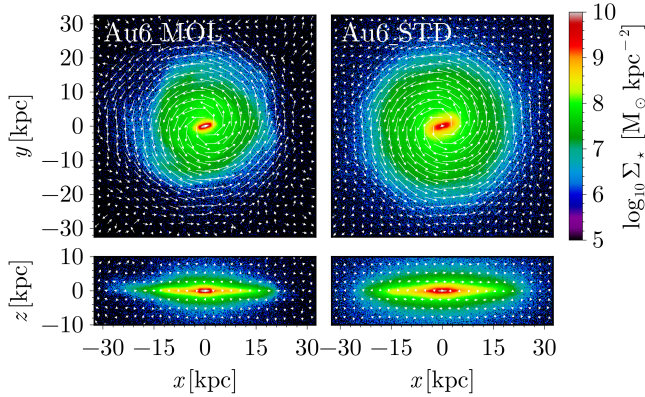


Fig. 1. 投影恒星质量分布（面视和侧视图）对于 Au6_MOL 和 Au6_STD 在 $z = 0$ 的情况。白色箭头表示相应的速度场。

这些阶段的演化由以下方程组控制：

$$\frac{d}{dt} f_i(t) = -\frac{f_i(t)}{\tau_r(t)} + \eta_i \psi(t) + R \psi(t), \quad (5a)$$

$$\frac{d}{dt} f_a(t) = \frac{f_i(t)}{\tau_r(t)} - \eta_i \psi(t) - \frac{f_a(t)}{\tau_c(t)} + \eta_d \psi(t), \quad (5b)$$

$$\frac{d}{dt} f_m(t) = \frac{f_a(t)}{\tau_c(t)} - \eta_d \psi(t) - \psi(t), \quad (5c)$$

$$\frac{d}{dt} f_s(t) = (1 - R) \psi(t), \quad (5d)$$

其中， $\psi(t)$ 代表瞬时恒星形成率分数。我们假设 $\psi(t)$ 仅依赖于分子气体的数量，并受恒星形成时间尺度 τ_s 调节。具体来说，根据 Millán-Irigoyen et al. (2020) 我们取

$$\left. \frac{d}{dt} f_s(t) \right|_{\text{SFR}} =: \psi(t) = \frac{f_m}{\tau_s}. \quad (6)$$

由于复合、冷凝和恒星形成引起的质量交换使用时间尺度（分别为 τ_r, τ_c 和 τ_s ）来建模，这些时间尺度取决于气体的性质，并且会随时间和单元条件的变化而变化。同时，假设光电离、光解和质量回归过程与 $\psi(t)$

氢反应。

成正比，比例系数固定（分别为 η_i 、 η_d 和 R ）。这些因子是半解析计算得出的，并且仅依赖于金属丰度，如 Millán-Irigoyen et al. (2020) 所示。

我们求解每个符合条件的气体单元的方程组 5，以进行恒星形成**，在积分过程中假设该气体单元的质量、密度和金属度保持不变。这使我们能够估计每单位气体的恒星形成速率（SFR）作为恒星阶段质量除以总积分时间（ t_i ），即：

$$\dot{m}_* = \frac{f_s M_{\text{cell}}}{t_i}, \quad (7)$$

我们利用这个来计算一个气体单元随机形成一颗恒星粒子的概率。

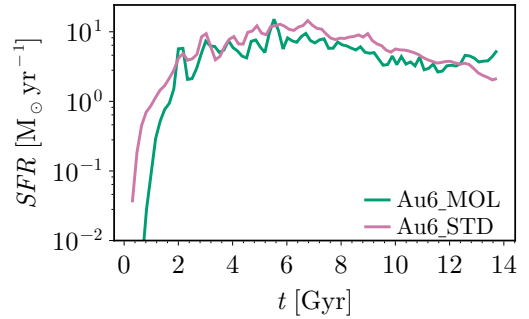


Fig. 2. 来自 $z = 0$ 处恒星年龄的 Au6_MOL 和 Au6_STD 的 SFR 历史。

3. 结果

3.1. 模拟星系的性质 $z = 0$

图 1 展示了 Au6_MOL 和 Au6_STD 在 $z = 0$ 的预期恒星质量分布，包括正面和侧面（ z 轴与恒星角动量对齐）。两个星系都表现出螺旋形态，具有扩展的支持旋转盘以及中心球状成分。Au6_MOL 的速度场表明恒星盘在大约 20 kpc 的半径内呈现有序旋转，而 Au6_STD 则延伸至 ~ 30 kpc。

图 2 显示了两种模拟的恒星形成率。Au6_MOL 在最初的几吉年中显示出快速早期增长，在 ~ 3 Gyr 之后稳定在 $\sim 4 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ ，但与 Au6_STD 相比延迟了 ~ 500 Myr。在整个演化过程中，Au6_STD 的恒星形成率始终高于 Au6_MOL，尽管它们最终在 $z = 0$ 处具有相似的值。我们的发现证实了恒星反馈在调节

**首次进入恒星形成程序的细胞假定没有恒星或分子质量，它们的初始电离和原子分数由 AREPO 中电离和中性相的标准处理方法决定。

恒星形成率中起着根本作用，尽管演化中的差异可能对于决定最现实的模型很重要。

3.2. 气体成分在 $z = 0$

我们使用包含总质量 (Iza et al., 2022)^{***} 的 95% 测量了各个组件的盘尺寸。我们发现所有气体组件的尺寸对于 Au6_MOL 来说大致相同，为 ~ 33 kpc，而对于 Au6_STD 来说略高，为 ~ 38 kpc。这些结果与我们的模型产生一个不太扩展的恒星盘一致，如图 1 所示。

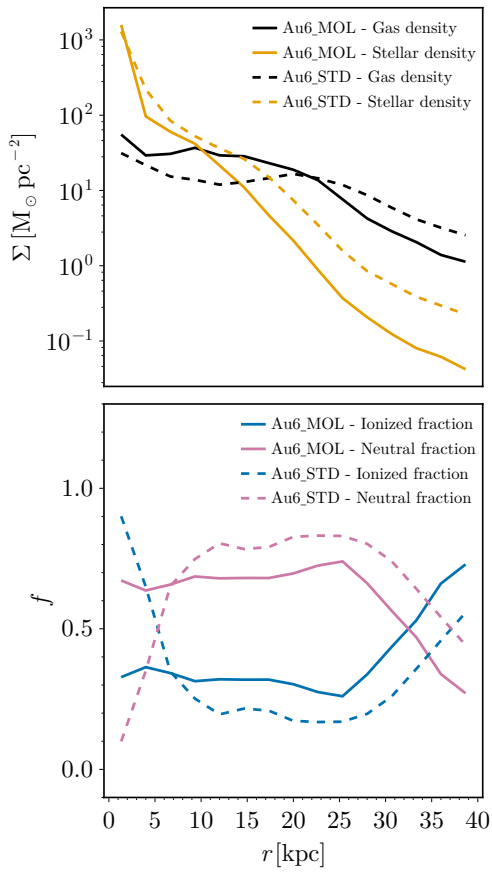


Fig. 3. 顶部面板: Au6_MOL 和 Au6_STD 中恒星和气体的投影面密度轮廓在 $z = 0$. 底部面板处的分布。: 离子化和中性相的径向质量分数轮廓，归一化到总气体质量。

图 3 显示了 Au6_MOL 和 Au6_STD 在 $z = 0$ 处的恒星和气体成分的径向分布。两种模拟中的气体密度分布相似，但与我们之前的发现一致的是，与 Au6_MOL 相比，Au6_STD 中的恒星分布具有更高

^{***}在气体的情况下，我们定义最大半径为 40 kpc，鉴于盘区域之外存在大量气体。

的值。这是由于两个模型中气体转化为恒星的不同转换率造成的。该图的底部面板显示了在 $z = 0$ 处离子化和非离子化成分的径向分布。我们发现，在整个盘区域，Au6_MOL 中的非离子化气体占主导地位，而在 Au6_STD 中，内部 5 kpc 处的情况正好相反。这些结果可以通过与现有观测进行详细比较，帮助解开使用 H_2 作为恒星形成的必要前体对星际介质性质的影响。

4. 结论

在这项工作中，我们引入了一个模型来描述数值模拟中星系形成过程中氢的电离、原子和分子成分。我们还分析了将恒星形成与分子相联系的影响，旨在为恒星形成提供一个更现实的框架。

我们的方法基于 Millán-Irigoyen et al. (2020) 中的形式主义构建，将其适应于磁流体力学宇宙模拟代码 AREPO 的化学和反馈模块。每个气体单元被建模为离子化、原子态和分子氢的混合物，以及恒星。这些成分之间的质量交换通过多个过程发生：复合（从离子化到原子态）、冷凝（从原子态到分子态）、恒星形成（从分子态到恒星态）、光致解离（从分子态到原子态）、光致电离（从原子态到离子化态）和质量返还（从恒星态到离子化态）。虽然这些过程以简单的方式进行建模，但它们包含了效率和时间尺度的主要变化，这取决于星际介质的性质。

为了测试我们的模型，我们使用 Auriga 项目 (Grand et al., 2017) 中的一个宇宙学放大查看初始条件模拟了一个银河系质量星系的形成过程，并将我们的恒星形成模型 (Au6_MOL) 与标准 AREPO 实现方案 (Au6_STD) 进行了比较，后者将恒星形成与总气体质量相关联。运行结果表明，Au6_MOL 在整个演化过程中具有较低的恒星形成率 (SFR)，导致在 $z = 0$ 时形成了一个比 Au6_STD 拥有更小恒星圆盘和更高中性气体分数的星系，同时保持了与螺旋星系相似的结构特征——包含年轻、旋转支持的恒星圆盘以及较小的核球。

这项工作代表了我们在宇宙学模拟中首次尝试建模分子氢的形成。尽管简单到足以在宇宙学环境中模拟单个星系（有效避免了在 $\lesssim 100$ pc 规模上的星际介质物理复杂性），它仍然捕捉到了星际介质与 SF 过程之间在解析尺度上的关系。

Acknowledgements: S.E.N. 和 C.S. 是 CONICET 的 Carrera del Investigador Científico 成员。他们感谢 Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica 通过 PICT 2021-GRF-TI-00290 和 Universidad de Buenos Aires 通过 UBACyT 20020170100129BA 提供的支持。

References

- Baker W.M., et al., 2021, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 510, 3622
- Baker W.M., et al., 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 518, 4767
- Bigiel F., et al., 2008, The Astronomical Journal, 136, 2846
- Bigiel F., et al., 2010, The Astronomical Journal, 140, 1194
- Bolatto A.D., et al., 2011, The Astrophysical Journal, 741, 12
- Collaboration P., et al., 2014, Astronomy and Astrophysics, 571, A16
- Grand R.J.J., et al., 2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 467, 179
- Iza F.G., et al., 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 517, 832
- Leroy A.K., et al., 2008, The Astronomical Journal, 136, 2782
- Leroy A.K., et al., 2013, The Astronomical Journal, 146, 19
- Millán-Irigoyen I., Mollá M., Ascasibar Y., 2020, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 494, 146
- Mollá M., et al., 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 451, 3693
- Murante G., et al., 2010, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 405, 1491
- Springel V., 2010, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 401, 791
- Springel V., Hernquist L., 2003, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 339, 289