

计算天体物理期末作业：N-body simulation

黄齐丰 2201110289

一、背景介绍

星系并合 (galaxy merger) 对于星系的演化起着十分重要的作用。星系并合过程十分复杂，通常需要借助数值模拟来研究其中发生的具体过程，N 体模拟就是研究贫气体星系并合过程的重要手段。

对于恒星质量超过 $10^{11} M_{\odot}$ 的早型星系而言，它们中的大部分恒星都是通过与卫星星系的并合获得的。在并合过程中，星系的形态会在潮汐力作用下发生扭曲，产生壳层、星流、潮汐尾等潮汐结构。在此前的工作中，笔者利用 HSC-SSP 巡天的图像数据测量了大质量早型星系周围潮汐结构的亮度分布 (Huang & Fan, 2022)。我们发现，如果假设潮汐结构光度占星系总光度的比例 (f_{tidal}) 在并合后随时间指数衰减、且衰减特征时标为 $\tau \approx 3 \text{ Gyr}$:

$$f_{\text{tidal}} \propto e^{-t/\tau} \quad (1)$$

则可以重现观测到的潮汐结构亮度分布。本文将尝试通过 N 体模拟得到星系并合后潮汐结构的演化过程，对 Huang & Fan (2022) 的结论进行验证。由于时间所限，我们仅作十分简化的讨论，更详细的处理留给后续进行。

二、代码实现¹

1. 粒子网格与窗函数

本文参考 Springel (2016) 使用粒子网格方法进行 N 体模拟，并使用立方体均匀的窗函数计算密度场及粒子受力。

由粒子分布计算密度场：

```
def CIC_3D(part):
    '''
    Description:
        Nearest grid point (NGP) assignment of a particle to a 3D mesh.
    Input:
        - part
          column 0-2: positions of particles
          column 3-5: velocities of particles
```

¹本文所有代码可见 <https://github.com/BetaGem/N-body-galaxy>.

```

        column 6: masses of particles
Return:
    density metrix
'''
dens = np.zeros((Ng, Ng, Ng)) # Ng = number of grids
for i in part:

    m = i[im]
    q, p, r = int(np.floor(i[iz] - 1/2)), int(np.floor(i[iy] - 1/2)),
               int(np.floor(i[ix] - 1/2))
    qs, ps, rs = i[iz] - 1/2 - q, i[iy] - 1/2 - p, i[ix] - 1/2 - r

    dens[q % Ng][p % Ng][r % Ng] += (1 - ps) * (1 - qs) * (1 - rs) * m
    dens[q % Ng][(p + 1) % Ng][r % Ng] += ps * (1 - qs) * (1 - rs) * m
    dens[(q + 1) % Ng][p % Ng][r % Ng] += (1 - ps) * qs * (1 - rs) * m
    dens[(q + 1) % Ng][(p + 1) % Ng][r % Ng] += ps * qs * (1 - rs) * m

    dens[q % Ng][p % Ng][(r + 1) % Ng] += (1 - ps) * (1 - qs) * rs * m
    dens[q % Ng][(p + 1) % Ng][(r + 1) % Ng] += ps * (1 - qs) * rs * m
    dens[(q + 1) % Ng][p % Ng][(r + 1) % Ng] += (1 - ps) * qs * rs * m
    dens[(q + 1) % Ng][(p + 1) % Ng][(r + 1) % Ng] += ps * qs * rs * m

return dens

```

2. 引力求解

在得到引力势后，本文使用傅立叶变换求解三维泊松方程，傅立叶变换及逆变换由 `scipy.fft.fftn` 和 `scipy.fft.ifftn` 实现。

```

def poisson_solver_fft3(dens):
    '''
    Description: solve 3D Poisson equation with FFT.
    Input:
        dens: density field.
    Return:
        Phi: gravitational potential field.
    '''
    G = 1
    L = len(dens)
    g_k = np.concatenate((np.mgrid[:L//2,:L,:L][iz], np.mgrid[:L//2,:L,:L][
        iz] - L/2), axis=0) ** 2 + \
        np.concatenate((np.mgrid[:L,:L//2,:L][iy], np.mgrid[:L,:L//2,:L][
        iy] - L/2), axis=1) ** 2 +

```

```

\
np.concatenate((np.mgrid[:L,:L,:L//2][ix], np.mgrid[:L,:L,:L//2][
ix] - L/2), axis=2) ** 2

Phi_k = - fftn(dens) / g_k * G * L**2 / np.pi
Phi_k[0][0][0] = 0

Phi = ifftn(Phi_k).real

return Phi

```

3. 放置星系

本文根据 Binney & Tremaine (2008) 提供的模型设置星系的初始条件。对于椭圆星系，我们假设其完全球对称，恒星密度 $\rho(r)$ 和速度离散 $\sigma_i(r)$ 满足以下关系：

$$\rho_*(r) = \frac{\sigma^2}{2\pi G r^2}, \quad \sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_\phi = \sigma_* \quad (2)$$

每一个星系外围设置一个按照 NFW 轮廓分布的暗物质晕：

$$\rho_{\text{halo}}(r) = \frac{\rho_0}{(r/a)(1+r/a)^2} \quad (3)$$

质量设为星系恒星质量的 20 倍。由于时间及计算资源有限，下面的模拟不考虑盘星系及暗物质晕的存在。

4. 时间演化

使用蛙跳法 (kick-drift-kick) 求解演化，并在第一步 kick 后更新引力势。

```

for n, t in enumerate(np.arange(0, t_tot, dt)):

    # kick
    part[:, iz:ix+1] += part[:, ivz:ivx+1] * dt / 2
    # update fields
    dens = ms.CIC_3D(part)
    Phi = Poisson.poisson_solver_fft3(dens)
    a = force.accel(Phi)
    # drift
    for i in range(len(part)):
        part[i][ivz:ivx+1] += force.Force(part[i][iz:ix+1], a) * dt /
        part[i][im]

    # kick
    part[:, iz:ix+1] += part[:, ivz:ivx+1] * dt / 2

```

三、星系并合模拟

本节展示模拟结果，模拟椭圆星系的主并合过程。本次模拟的网格大小为 512×512 ，共使用 21132 个恒星粒子。两星系的恒星质量分别设置为 $\log M_{1,*}/M_{\odot} = 11.2$, $\log M_{2,*}/M_{\odot} = 10.7$, 恒星粒子的质量为 $\log M_*/M_{\odot} = 7.0$, 空间分辨率为 0.165 kpc, 时间步长 10 Myr.

在初始时刻 ($t = 0$), 两星系的中心坐标分别为 (320, 330, 330), (160, 150, 150), 相距 49.6 kpc, 有沿 y 方向的相对速度 $\Delta v_y = 100$ km/s。系统随时间演化的过程如图 1 所示²。图像由平滑后的密度场添加背景噪声得到。

四、测光分析与讨论

根据图 1, 我们将 $t = 0.45$ Gyr 视为并合结束。从此刻开始, 依据类似于 Huang & Fan (2022) 中的方法测量了 f_{tidal} 随时间的演化情况, 如图 2 所示。

可以看到 f_{tidal} 随时间的演化确实近似满足指数衰减, 但衰减时标仅为 ~ 0.1 Gyr, 与文献相比严重偏小。主要原因在于:

- 使用的粒子数较少, 生成的模拟图像信噪比很低 (图 1, 接近 SDSS 图像中红移 0.2 左右的星系的情况), 面亮度低的潮汐结构无法探测。
- 部分潮汐结构离开了网格范围。
- 模拟中卫星星系缺少暗物质晕, 加快了潮汐撕裂过程。

参考文献

- [1] Huang, Q. and Fan L., 2022, ApJS, **262**, 39
- [2] Springel, V. 2016, Saas-Fee Advanced Course, **43**, 251.
- [3] Binney, J., & Tremaine, S. 2008, Galactic Dynamics, 2nd edition (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press)

²模拟动画见 https://github.com/BetaGem/N-body-galaxy/blob/main/major_merger.mp4.

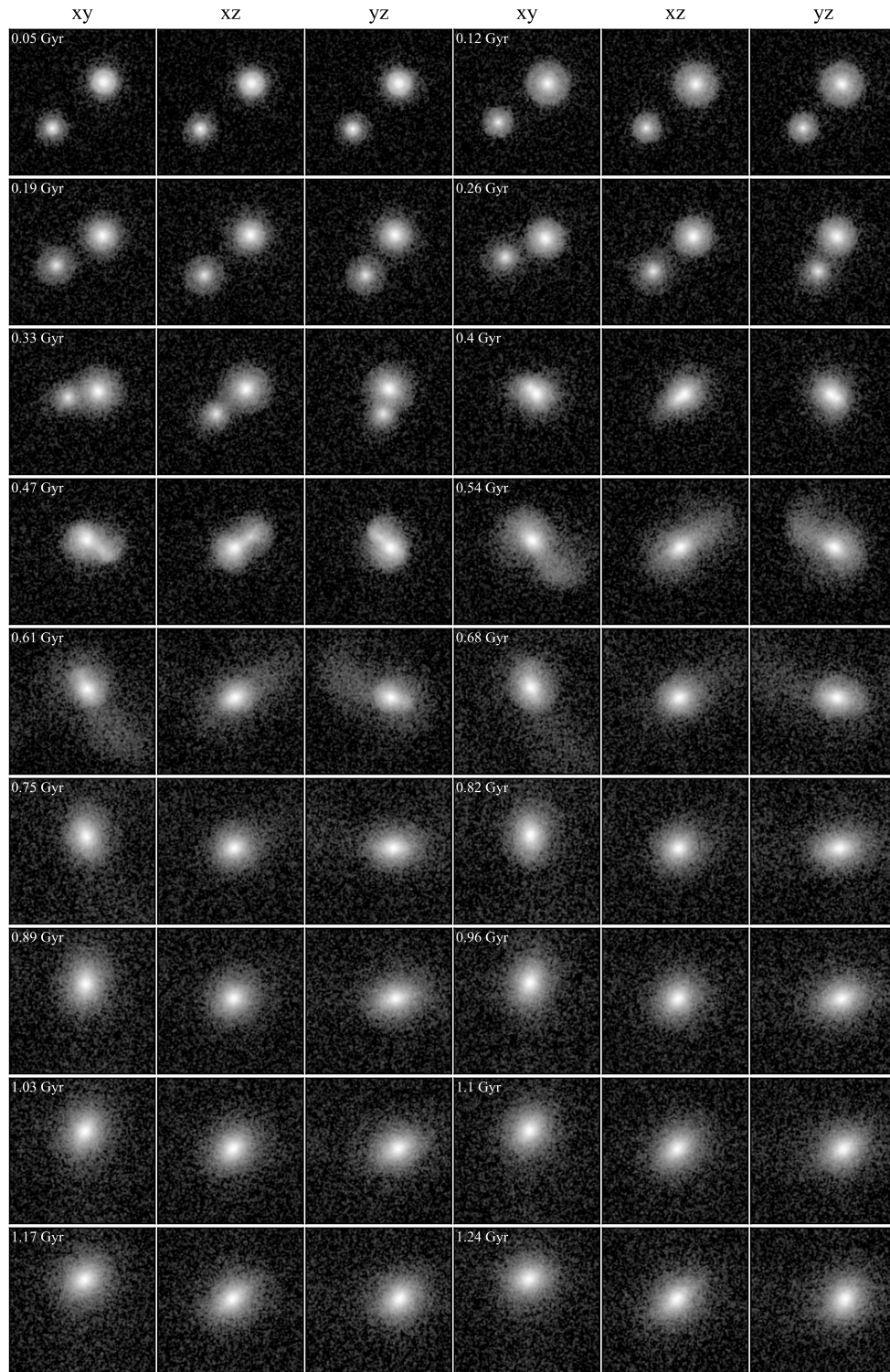


图 1: 星系并合模拟过程在不同视向上的投影图。相邻两个画面的时间间隔为 0.07 Gyr. $t < 0.15$ Gyr 时的环状结构是初始时刻星系没有维里化造成的。

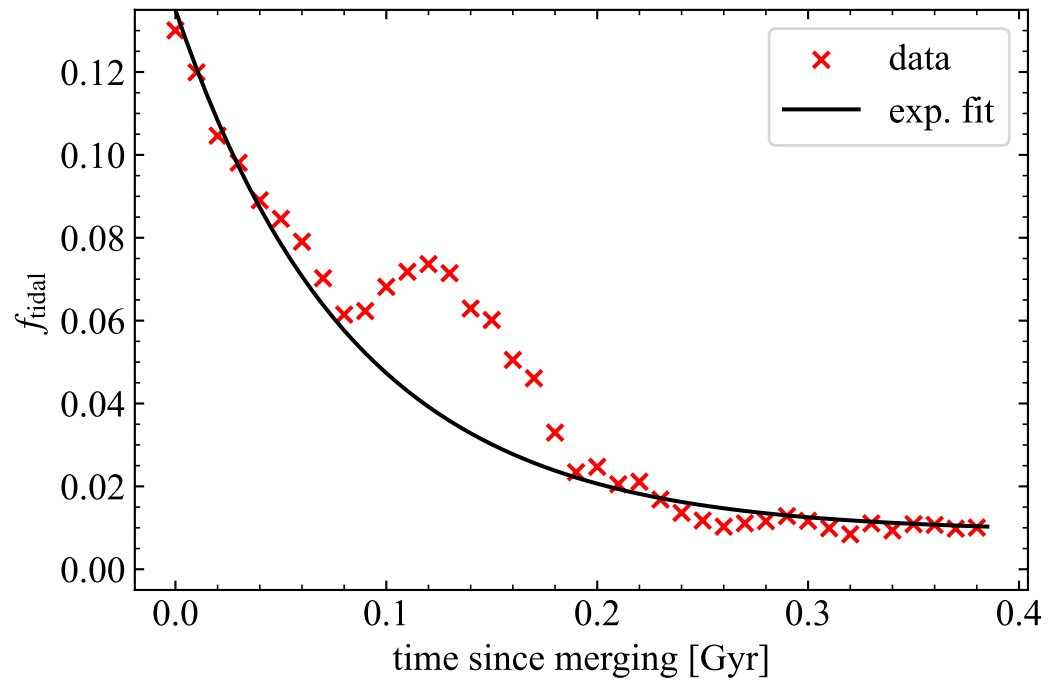


图 2: xy 平面投影图中 f_{tidal} 随时间的演化情况。红色散点为测量数据, 黑线为指数函数拟合: $f_{\text{tidal}} = 0.126e^{-11.9t} + 0.009$.