

Моделирование столкновений шарового звездного скопления с массивными объектами с применением полуаналитической двутельной регуляризации в задаче N тел.



Витка И.Н., Лежнин К.В., Соловьев С.В., Чернягин С.А.

Московский Физико-Технический Институт

Аннотация

В работе производится численное моделирование столкновений шаровых скоплений с точечными массивными объектами (черными дырами) средних масс в 1000-10000 масс солнца. Наблюдается эффект выброса тел из шарового скопления в направлении противоположном движению скопления и изменение направления движения массивного тела.

Методика.¹

Функция Лагранжа задачи многих тел:

$$L = \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i^2}{2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n G \frac{m_i m_j}{|r_j - r_i|}$$

Шаг интегрирования различен для всех тел, вычисляется согласно известной эмпирической формуле Арсета:

$$dt = \sqrt{\eta \frac{\dot{w}^2 + w\ddot{w}}{\ddot{w}^2 + \dot{w}\ddot{w}}}; \quad \eta = \text{const} \approx 0,02$$

На каждом шаге выбираем тело с наименьшей разницей между текущим временем программы и концом времени интегрирования данного тела (l -ое) и действующее на него с наибольшей силой (k -ое)

$$L = \sum_{i=1, j \neq l, k}^n \frac{m_i v_i^2}{2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1, j \neq l, k}^n \left(\sum_{j=1, j \neq i, l, k}^n G \frac{m_i m_j}{|r_j - r_i|} + \left(\frac{m_k v_k^2}{2} + \frac{m_l v_l^2}{2} + G \frac{m_k m_l}{|r_k - r_l|} \right) \right)$$

Выбор метода интегрирования:

-Трудоемкость шага интегрирования по коническому сечению примерно в $p=10$ раз превышает трудоемкость прямого интегрирования + применимость теории возмущений (величина возмущения примерно в p раз меньше энергии невозмущенной кеплеровой задачи)

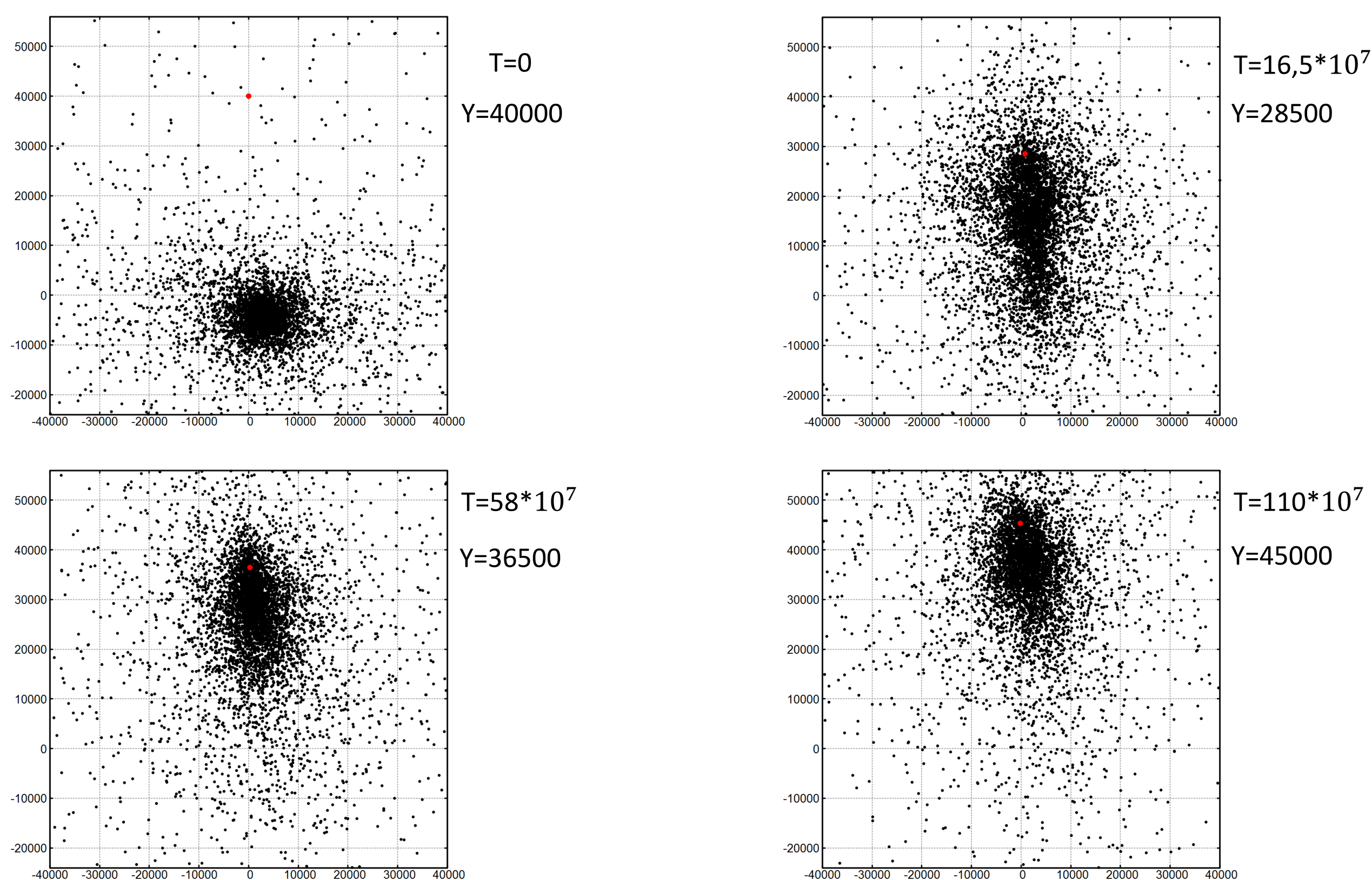
-Условие применения интегрирования «по коническому сечению»:

$$\frac{\min(\Delta t_{lcs}, \Delta t_{kcs})}{\max(\Delta t_l, \Delta t_k)} > p, \quad \Delta t_{cs} = \min(\Delta t_{lcs}, \Delta t_{kcs})$$

Условие не выполняется – интегрирование методом Эрмита

Условие выполняется – интегрирование методом —конических сечений

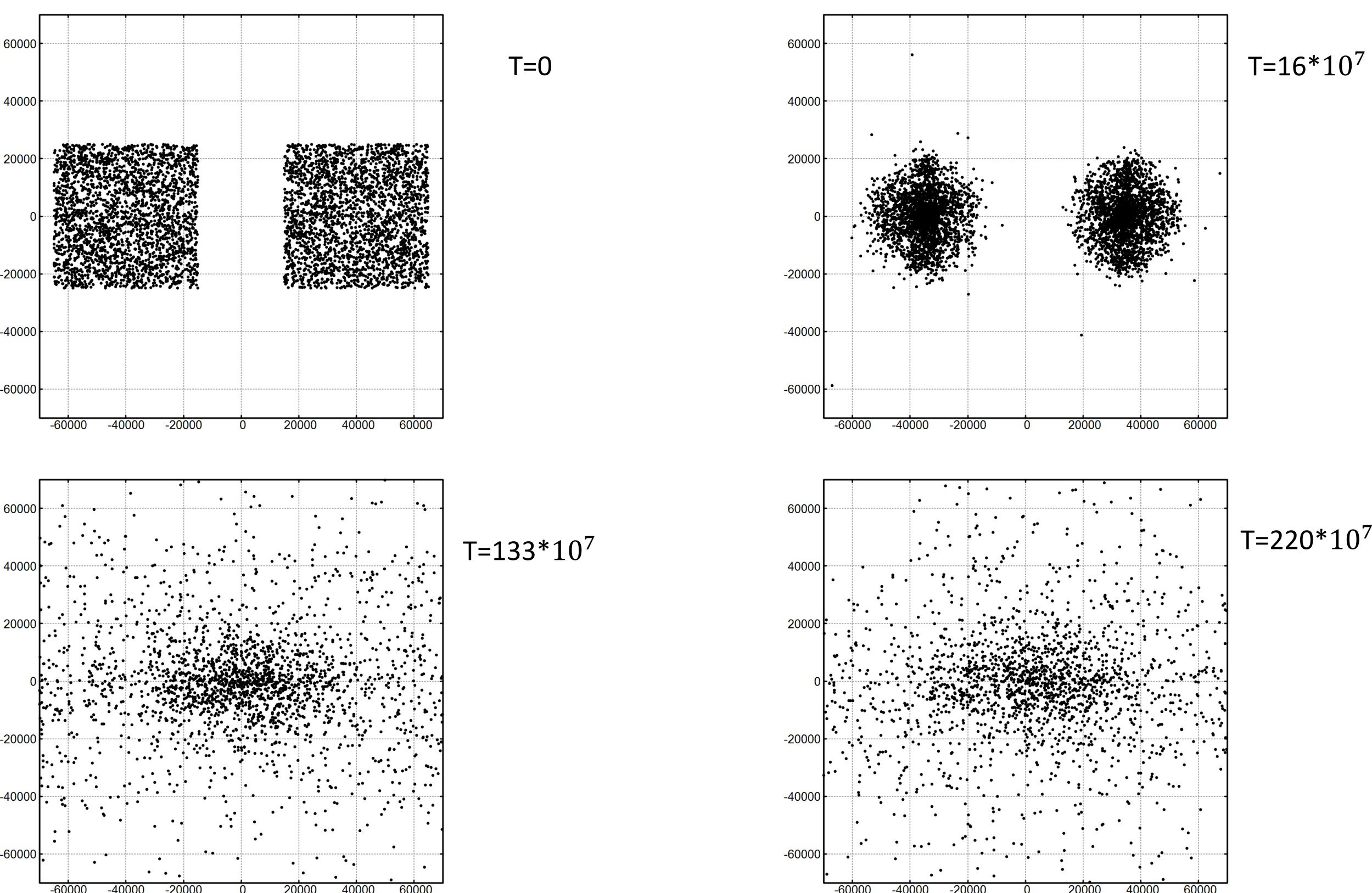
Столкновение массивного тела с шаровым скоплением



T - в земных года
Масштаб сетки в сотнях а.е.
Масса скопления $10000 M_{\odot}$
Масса массивного тела $10000 M_{\odot}$
Y – координата массивного тела (в сотнях а.е.)

- Наблюдается выброс тел из скопления в направлении против движения скопления.
- Массивное тело меняет направление движения.
- За время моделирования массивное тело не достигает центра плотности скопления.

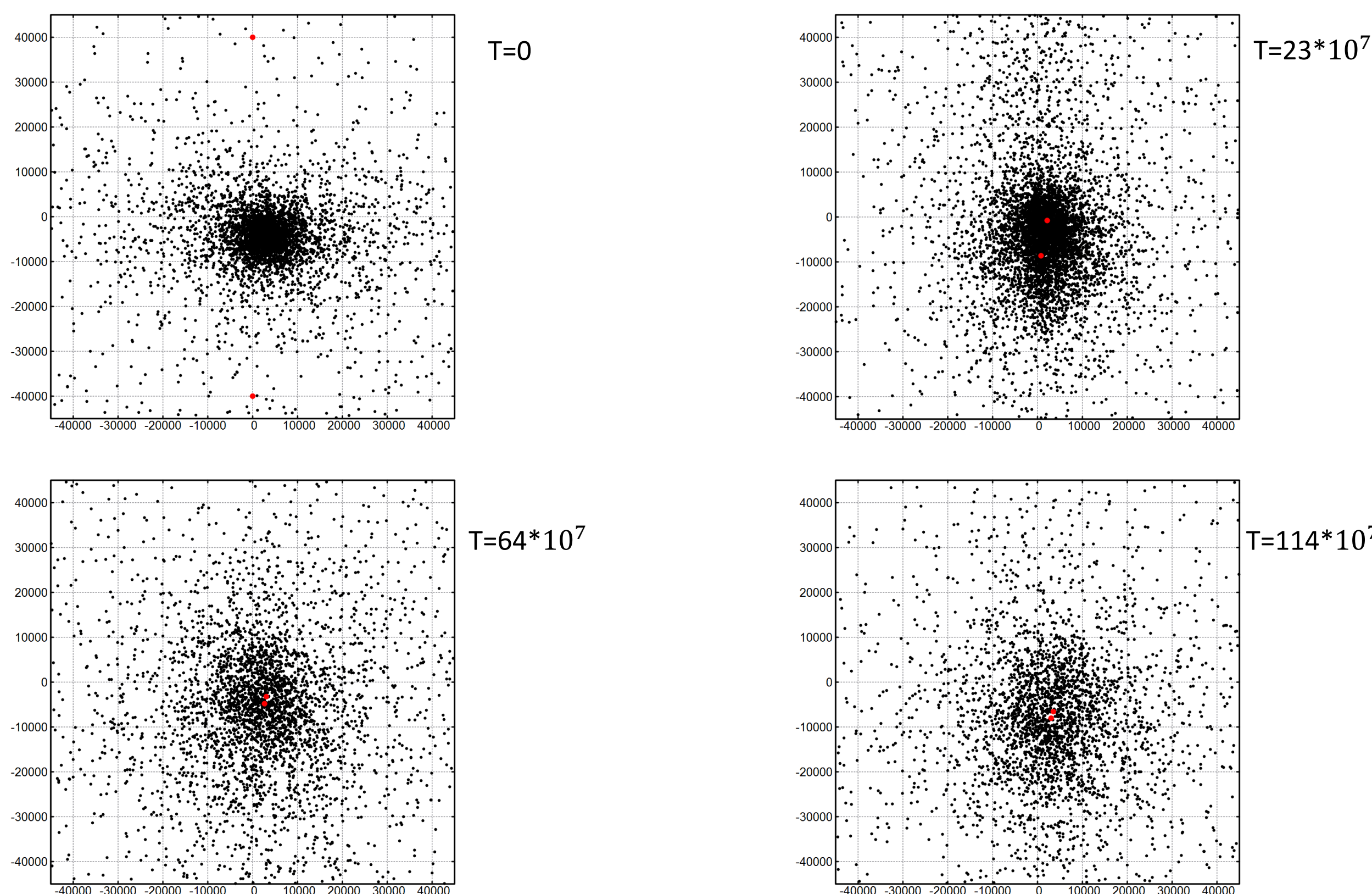
Столкновение двух скоплений с массивными телами в центре



T - в земных года
Масштаб сетки в сотнях а.е.
Масса скоплений $2500 M_{\odot}$
Масса массивных тел по $2500 M_{\odot}$

- Тела ($1 M_{\odot}$) равномерно распределены в кубах с (ребром 5млн а.е.) с массивным телом в центре ($2500 M_{\odot}$).
- В процессе моделирования массивные тела образуют тесную двойную систему и “разбрасывают” тела скоплений.

Столкновение двух массивных тел со скоплением



T - в земных года
Масштаб сетки в сотнях а.е.
Масса скопления $10000 M_{\odot}$
Масса массивных тел по $3000 M_{\odot}$

- В процессе моделирования массивные тела образуют тесную двойную систему.
- Расстояние между этими массивными объектами со временем уменьшается.
- Со временем уменьшается плотность скопления вокруг тесной системы.

Заключение

В результате проведенного моделирования выявлены и рассмотрены эффекты происходящие при столкновениях, такие как эффект отдачи при столкновении одиночного массивного объекта со скоплением и разрушение скопления при столкновении с парой массивных объектов. Одновременно с этим проверялась эффективность предложенного метода интегрирования в применении к объектам с сильным различием масс. Предложенный метод подтвердил свою эффективность и точность интегрирования для любых масс объектов и их соотношений.¹

Литература:

1. Lezhnin K.V., Chernyagin S.A. Astronomy Letters, Volume 40, Issue 6, pp 382-387 (2014).
2. Dehnen W., Read J. Eur. Phys. J. Plus, 55
3. Alan P. Lightman and Stuart L. Shapiro The dynamical evolution of globular clusters Rev. Mod. Phys. **50**, 437 – Published 1 April 1978