

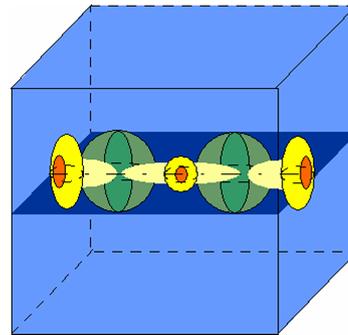
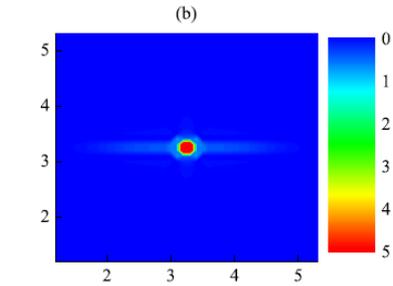
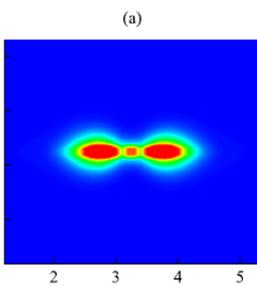
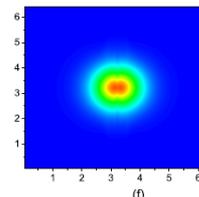
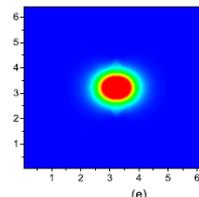
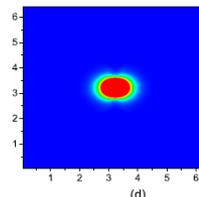
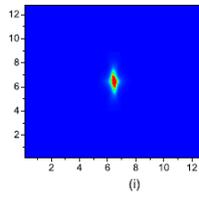
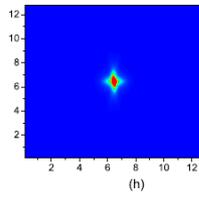
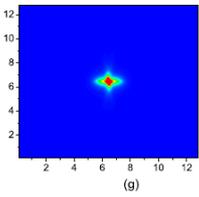
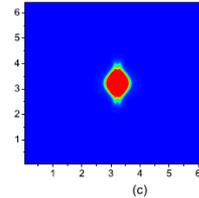
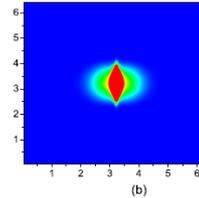
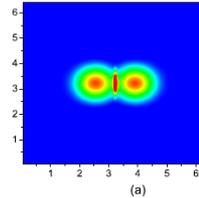
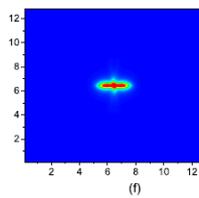
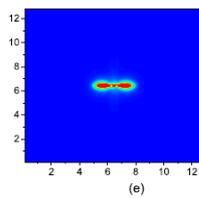
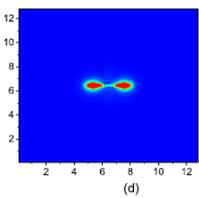
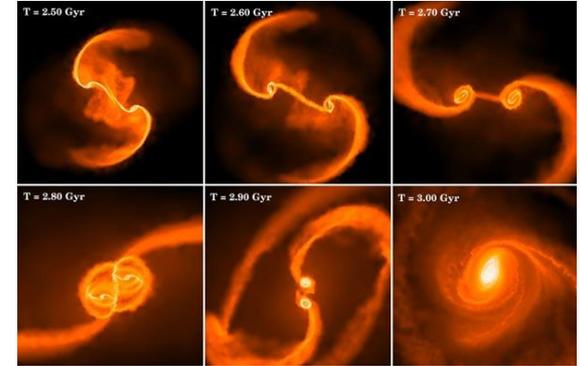
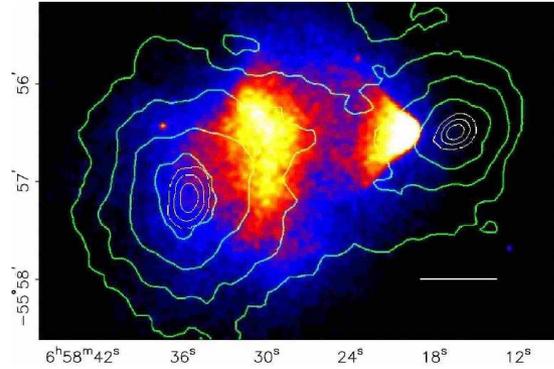
September 25-26, 2017, Moscow, Russia

«Волгоградский государственный университет»

**Численные газодинамические SPH-модели:
реализация на GPU**

Храпов С.С., Хоперсков А.В.





[V. A. Vshivkov, G. G. Lazareva, A. V. Snytnikov, I. M. Kulikov, A. V. Tutukov, 2010]

[A. V. Tutukov, G. G. Lazareva, I. M. Kulikov, 2011]

Галактика 1

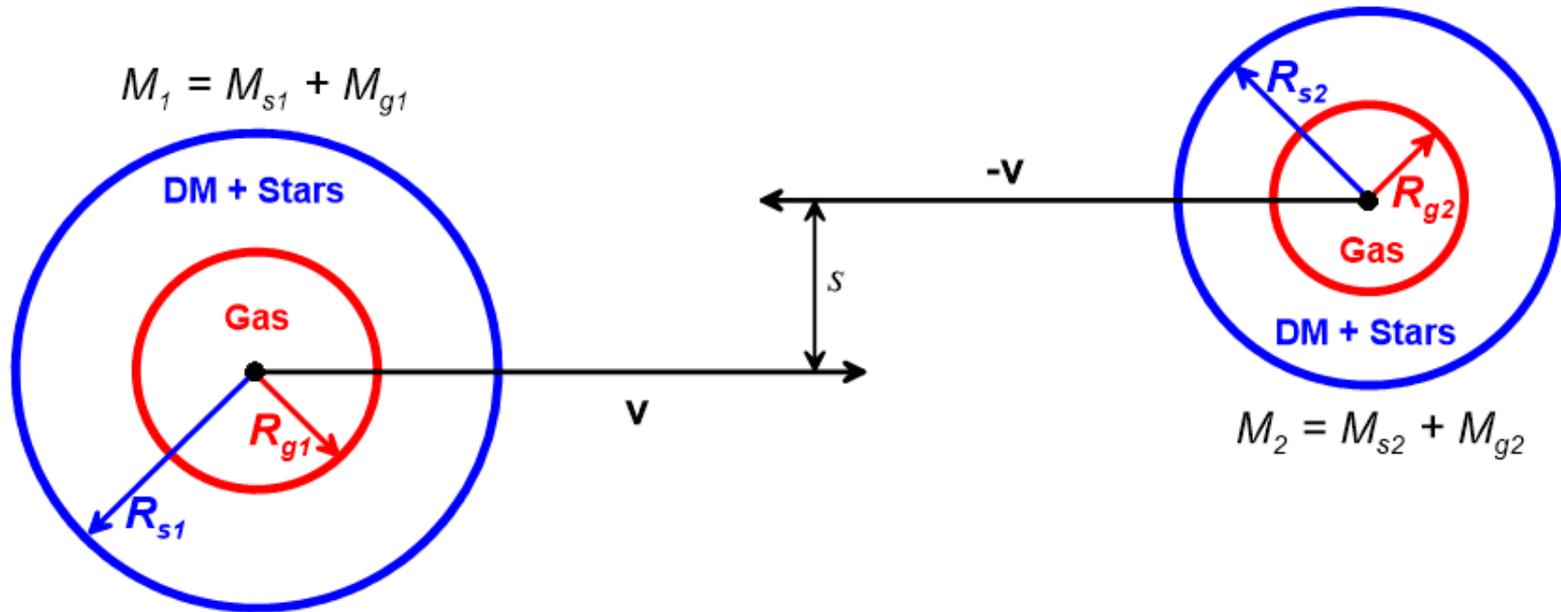
Бесстолкновительная
компонента M_{s1}
(темная материя + звезды)

Газовая
компонента M_{g1}

Галактика 2

Бесстолкновительная
компонента M_{s2}
(темная материя + звезды)

Газовая
компонента M_{g2}



Основные уравнения

Газовая компонента

$$i = 1, \dots, N_g$$

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -\frac{\nabla p_i}{\rho_i} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{f}_{ij}$$

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v}_i$$

$$\frac{de_i}{dt} = -\frac{p_i}{\rho_i} \nabla \cdot \mathbf{v}_i$$

$$e_i = \frac{p_i}{(\gamma - 1)\rho_i}$$

Гравитационное взаимодействие

$$\mathbf{f}_{ij} = -G \frac{m_j (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j + \delta|^3}$$

$$N = N_g + N_s$$

Бесстолкновительная компонента

$$i = 1, \dots, N_s$$

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{f}_{ij}$$

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v}_i$$

SPH - метод [Monaghan, 1992]

SPH - аппроксимация

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = - \sum_{j=1, j \neq i}^{N_g} m_j \Pi_{ij} \nabla W_p(|\Delta \mathbf{r}_{ij}|, h_{ij}) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{f}_{ij}$$

$$\frac{de_i}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1, j \neq i}^{N_g} m_j \Pi_{ij} \Delta \mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla W_p(|\Delta \mathbf{r}_{ij}|, h_{ij}),$$

$$\rho_i = \rho(\mathbf{r}_i) = \sum_{j=1}^{N_g} m_j W(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|, h_{ij})$$

$$\Delta \mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j$$

$$\Delta \mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j$$

$$h_{ij} = (h_i + h_j)/2$$

$$h_i = A (m_i / \rho_i)^{1/3}$$

$$\Pi_{ij} = \frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} + \nu_{ij}^a$$

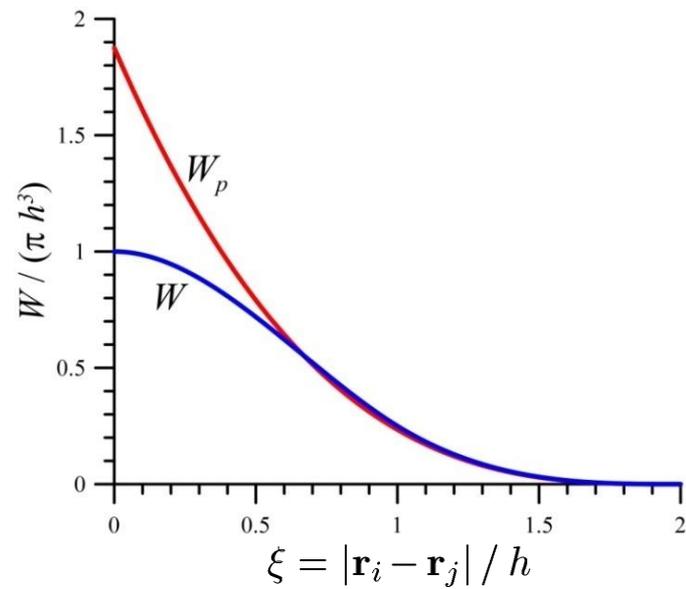
ν_{ij}^a - искусственная вязкость

$A = 1.2 \div 1.3$ [Monaghan, 2005; Lodato, 2011]

Сглаживающие ядра

$$W(\xi, h) = \frac{1}{\pi h^3} \begin{cases} 1 - \frac{3}{2} \xi^2 + \frac{3}{4} \xi^3, & 0 \leq \xi \leq 1; \\ \frac{1}{4} (2 - \xi)^3, & 1 \leq \xi \leq 2; \\ 0, & \xi \geq 2; \end{cases} \quad \text{[Monaghan, 1992]}$$

$$W_p(\xi, h) = \frac{15}{64\pi h^3} \begin{cases} (2 - \xi)^3, & 0 \leq \xi \leq 2; \\ 0, & \xi \geq 2; \end{cases} \quad \text{[Muller, 2003]}$$



Интегрирование по времени

Схема предиктор-корректор с перешагиванием (leapfrog)

(I) Предиктор (Kick):

$$\tilde{\mathbf{v}}_i(t + \Delta t) = \mathbf{v}_i(t) + \Delta t \mathbf{Q}_i[\mathbf{r}(t), \mathbf{v}(t), e(t)]$$

$$\tilde{e}_i(t + \Delta t) = e_i(t) + \Delta t E_i[\mathbf{r}(t), \mathbf{v}(t), e(t)]$$

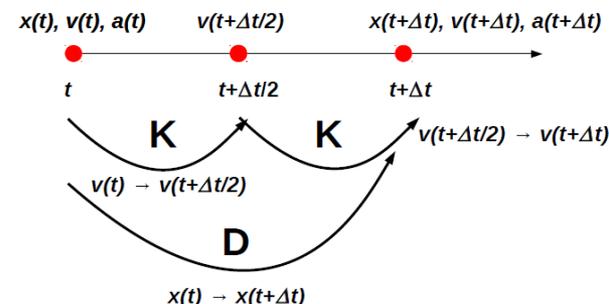
(II) Перешагивание для радиус-вектора частиц (Drift):

$$\mathbf{r}_i(t + \Delta t) = \mathbf{r}_i(t) + \frac{\Delta t}{2} [\tilde{\mathbf{v}}_i(t + \Delta t) + \mathbf{v}(t)]$$

(III) Корректор (Kick):

$$\mathbf{v}_i(t + \Delta t) = \frac{\mathbf{v}_i(t) + \tilde{\mathbf{v}}_i(t + \Delta t)}{2} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{Q}_i[\mathbf{r}(t + \Delta t), \tilde{\mathbf{v}}(t + \Delta t), \tilde{e}(t + \Delta t)]$$

$$e_i(t + \Delta t) = \frac{e_i(t) + \tilde{e}_i(t + \Delta t)}{2} + \frac{\Delta t}{2} E_i[\mathbf{r}(t + \Delta t), \tilde{\mathbf{v}}(t + \Delta t), \tilde{e}(t + \Delta t)]$$



Kick + Drift + Kick (KDK) scheme

Условие устойчивости

$$\Delta t = C_{CFL} \min_i \left[\frac{s_{ij}^{min}}{c_{ij}^{max} (1 + 1.2\alpha) + 1.2\beta \mu_{ij}^{max} + \sqrt{s_{ij}^{min} (|\mathbf{Q}_i| + |E_i|)}} \right]$$

$$s_{ij}^{min} = \min_j |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|, c_{ij}^{max} = \max_j c_{ij}, \mu_{ij}^{max} = \max_j \mu_{ij}.$$

[Monaghan, 1992; 2005]

[Khrapov, 2017]

Параллельная OpenMP-CUDA реализация численного алгоритма SPH+Nbody для гибридных вычислительных систем CPU+GPU

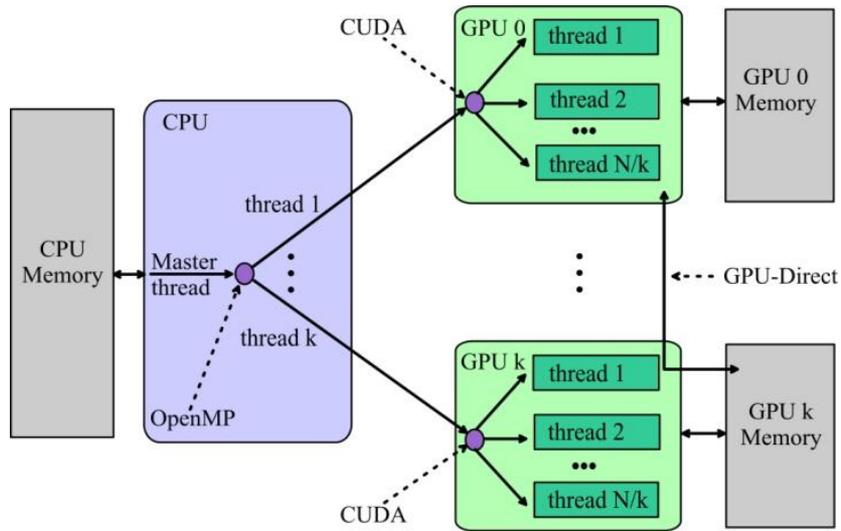
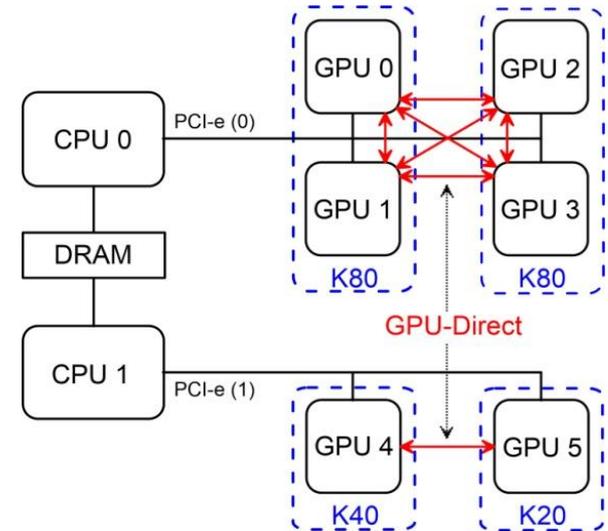
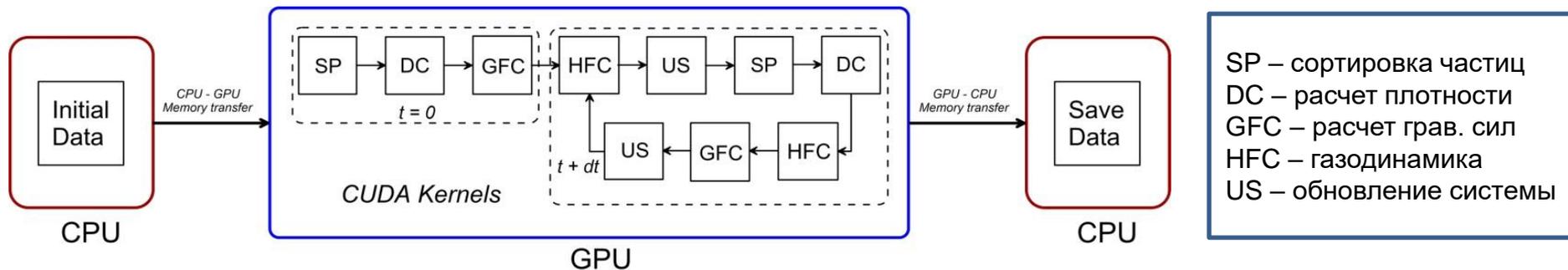


Схема распараллеливания OpenMP-CUDA



Архитектура CPU+GPU



Потоковая диаграмма вычислительного модуля

Параллельная реализация на Multi-GPU

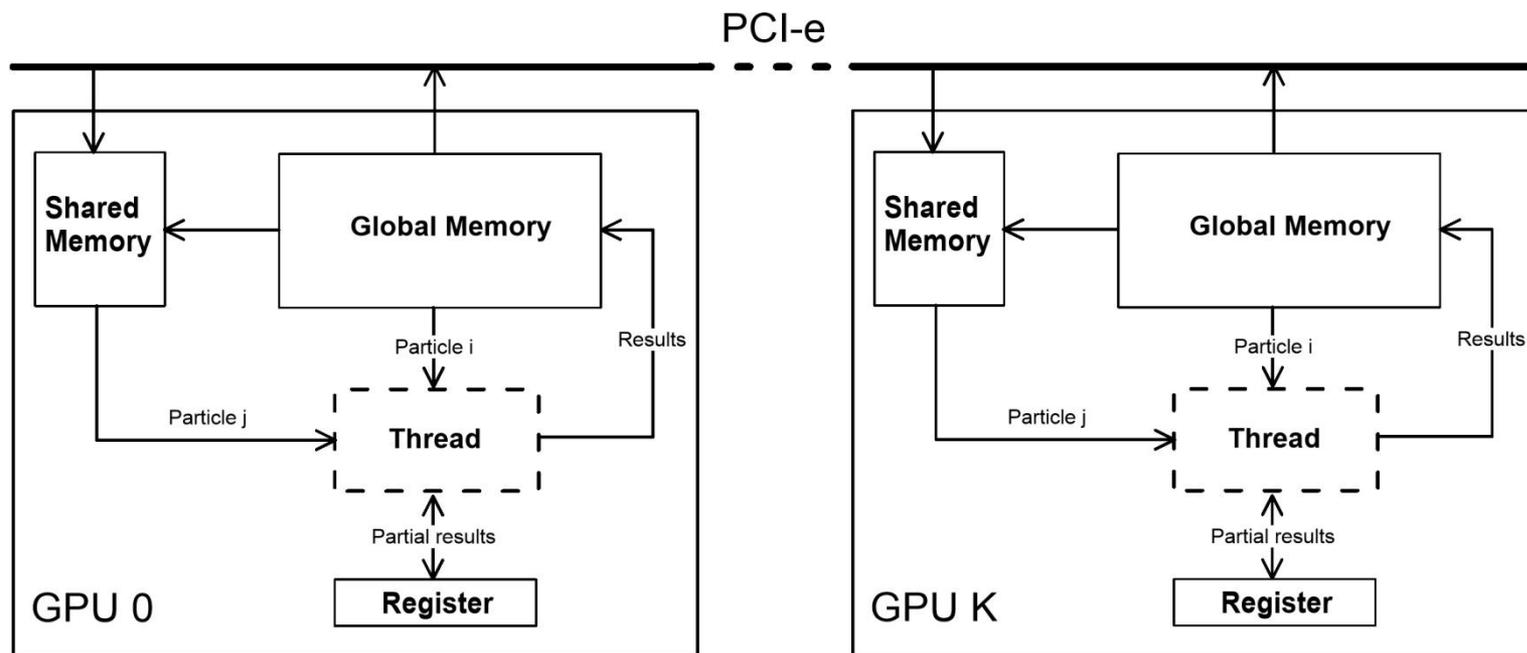


Схема параллельной реализации алгоритма Nbody на Multi-GPU.

Данные для i -частицы считываются из *global memory*. Каждое ядро копирует данные для j -частицы из (медленной) *global memory* в (быструю) *shared memory* и производит вычисления на j -частице.

Параллельная сортировка SPH-частиц на GPU

SP

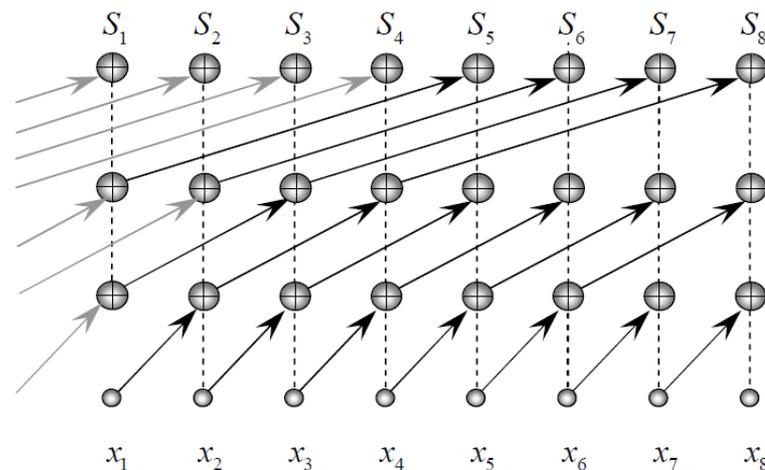
SP-0: NULL-инициализация массивов сортировки

SP-1: Распр-е ч-ц по ячейкам SPH и опред-е кол-ва ч-ц в них ($\text{indexPC}[i].x, \text{CellSPH}[k].x$)

SP-2: Опред-е кол-ва всех ч-ц в ячейках SPH от 0 до k в CUDA блоке $\text{CellSPH}[k].y = \text{CellSPH}[k-1].y + \text{CellSPH}[k].x$

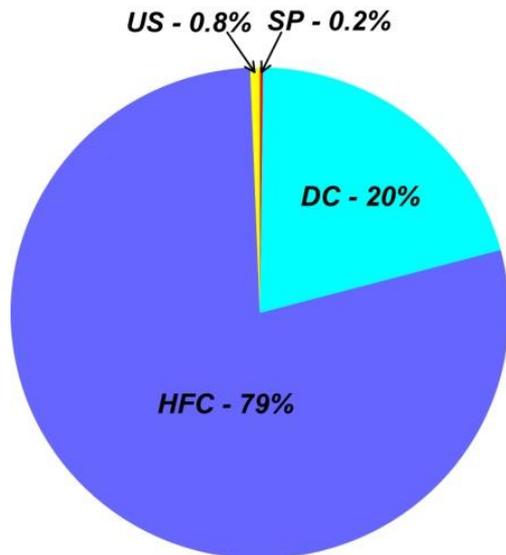
SP-3: Опред-е кол-ва всех ч-ц в ячейках SPH от 0 до k в CUDA сети

SP-4: Распред-е ч-ц по ячейкам SPH и опред-е номеров ч-ц в этих ячейках ($\text{indexPC}[i].y$)

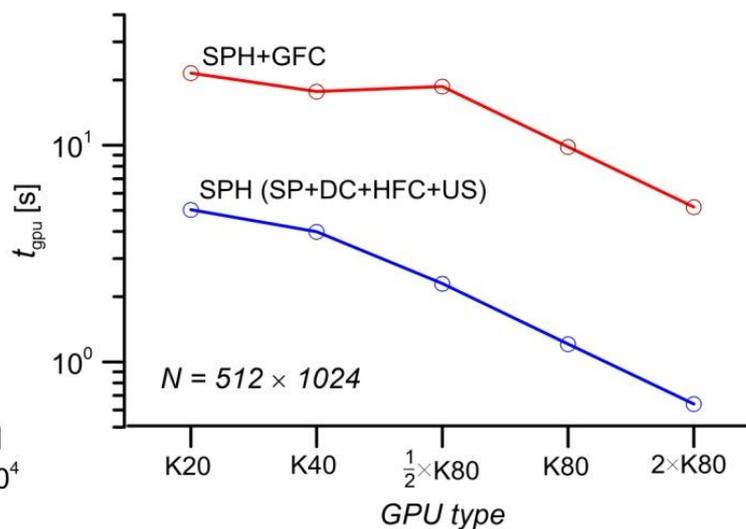
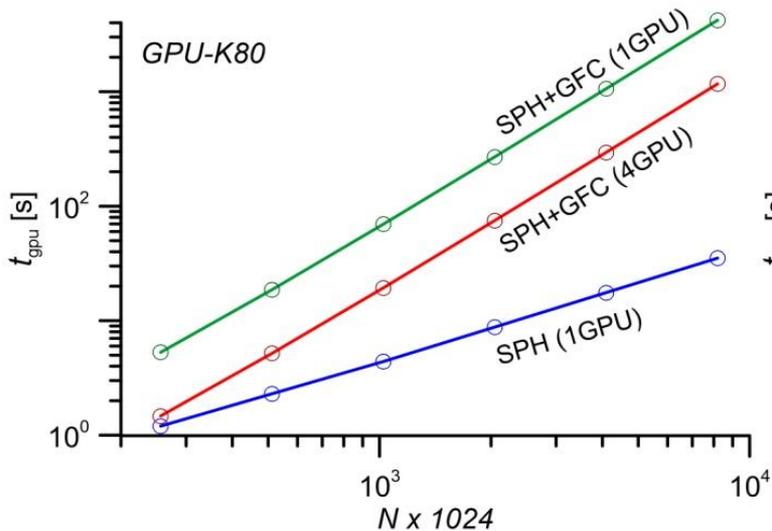


Каскадная схема нахождения частных сумм

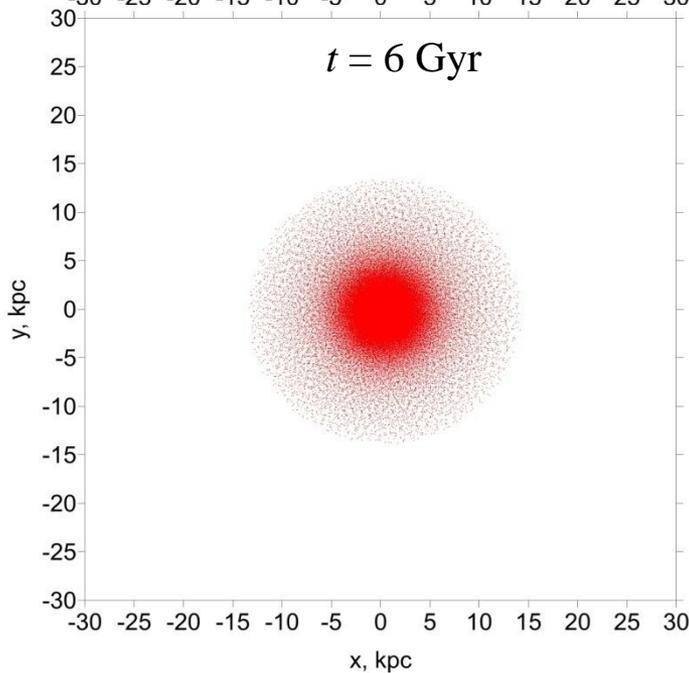
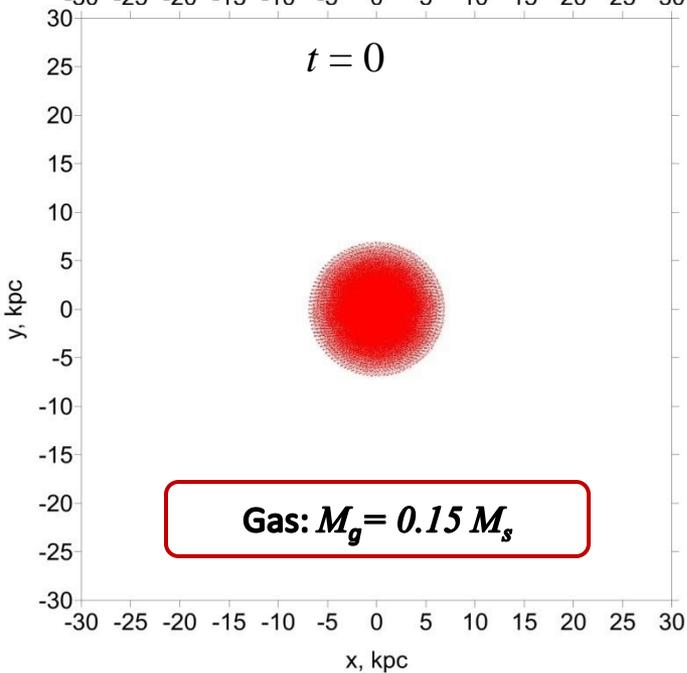
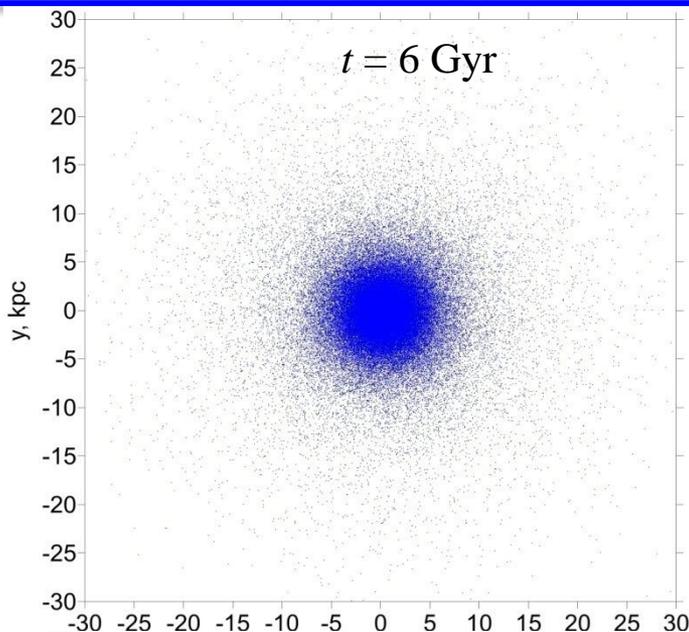
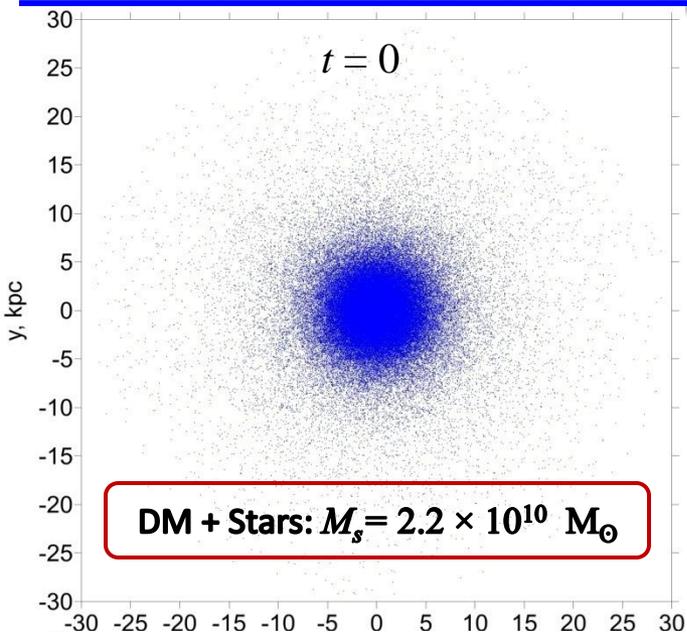
Эффективность распараллеливания численного алгоритма



Доля времени выполнения CUDA-ядер (SP+DC+HFC+US) SPH алгоритма



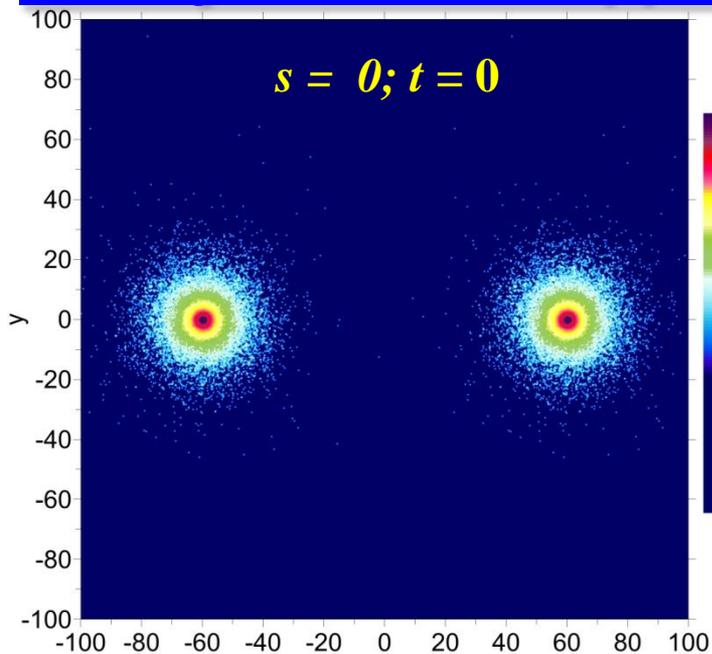
Время выполнения CUDA-ядер SPH и GFC на различных GPU. Зависимость t_{gpu} от числа частиц N (а) показана слева, а от типа GPU справа



*“живое”
темное гало*

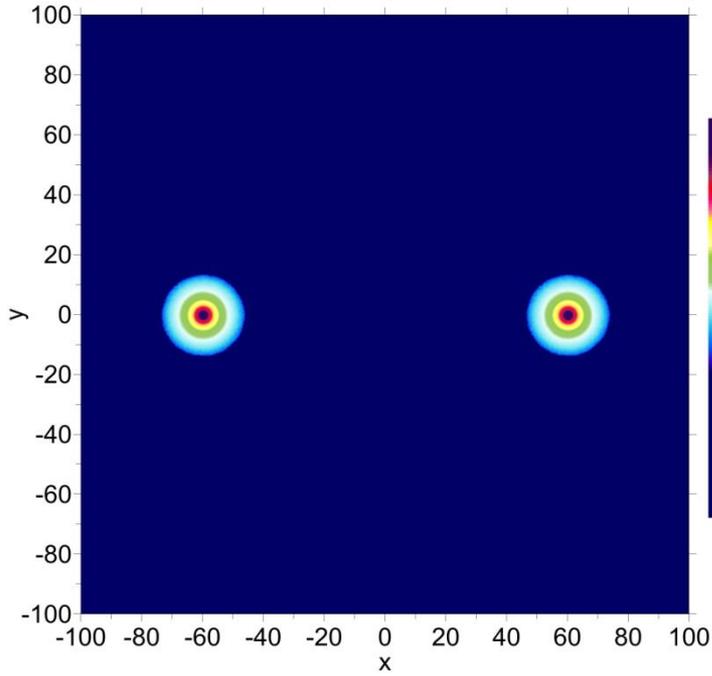
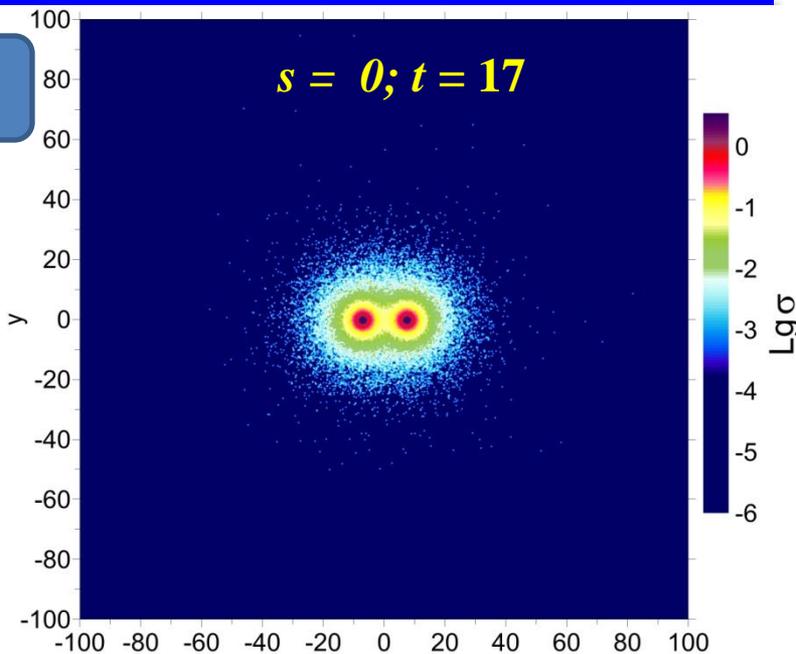
[Rodionov, Sotnikova, 2009]

$r_0 = 1$ kpc
 $v_0 = 100$ km/s
 $t_0 = 0.01$ Gyr
 $m_0 = 2.2 \times 10^9 M_\odot$
 $G = 1$

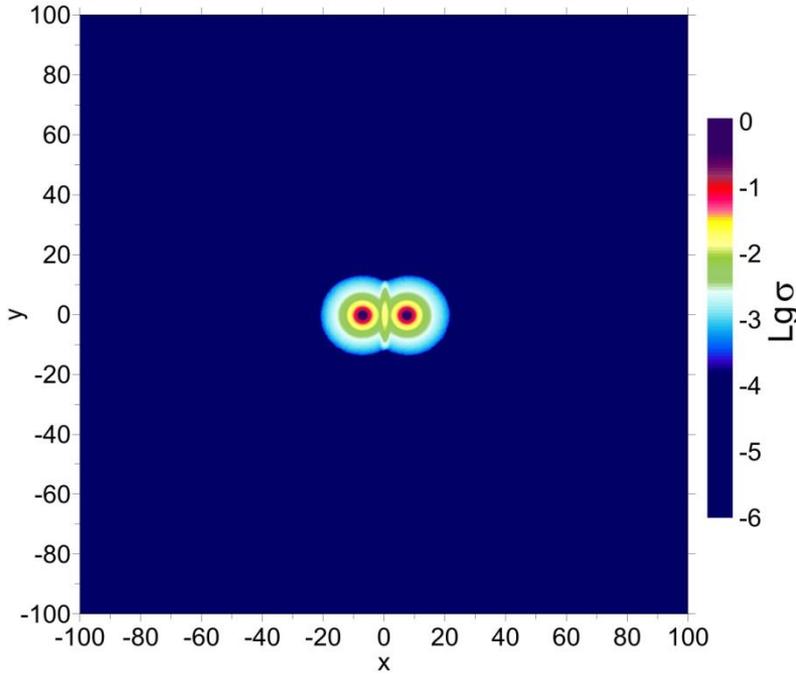


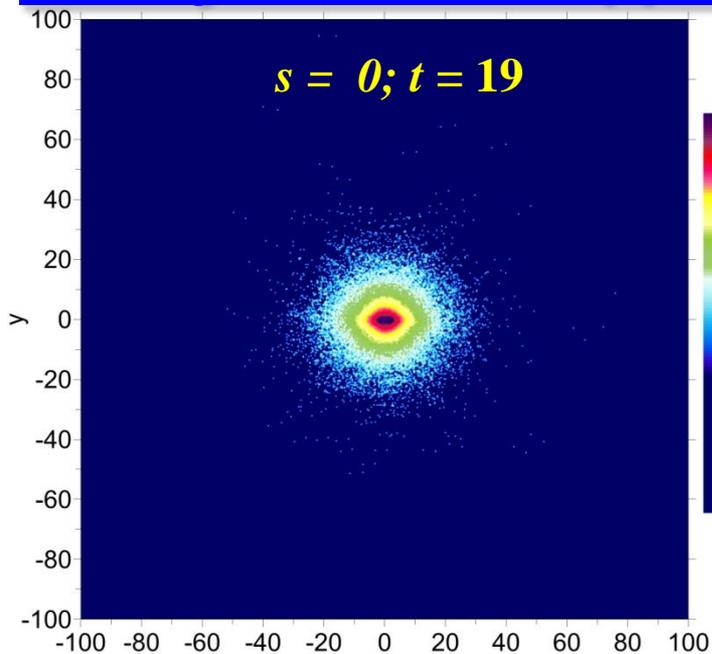
$$V_{coll} = 6$$

DM + Stars
 $M_s = 50$



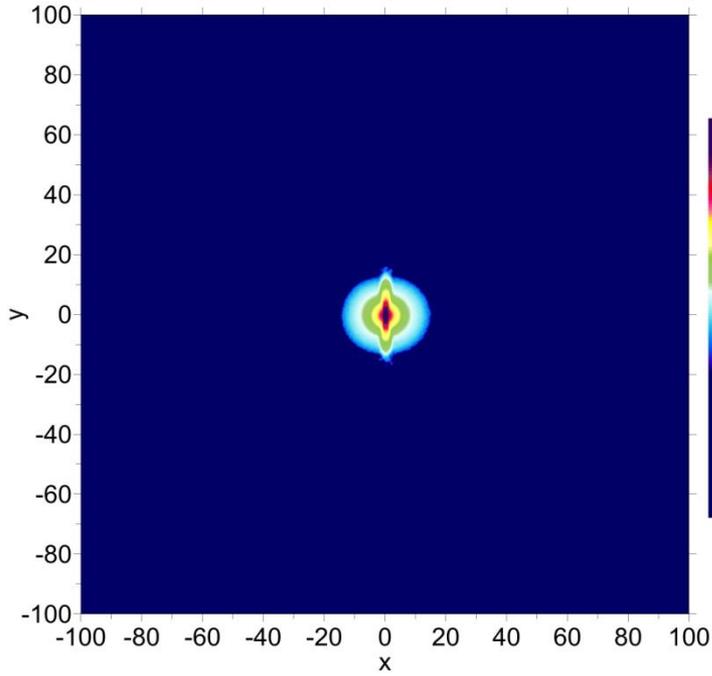
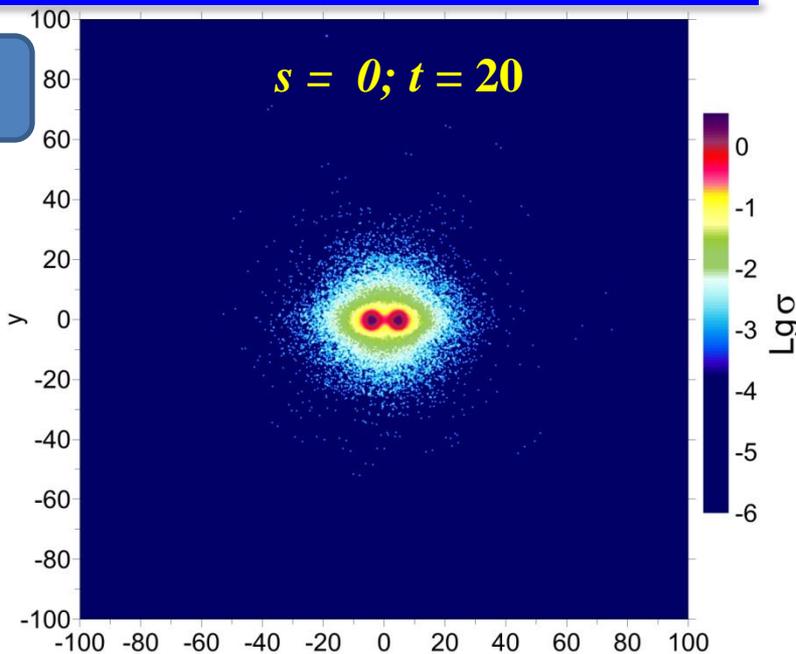
Gas
 $M_g = 7.5$



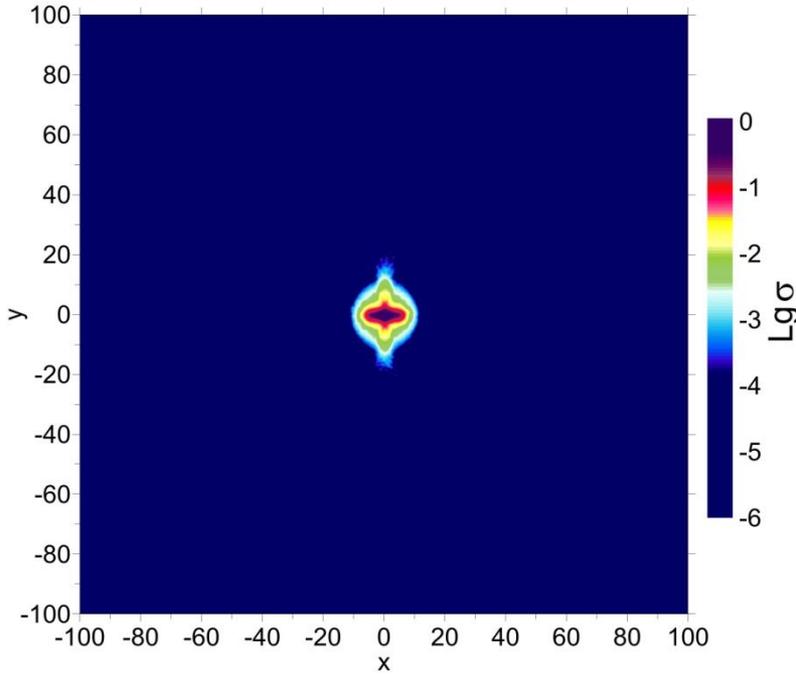


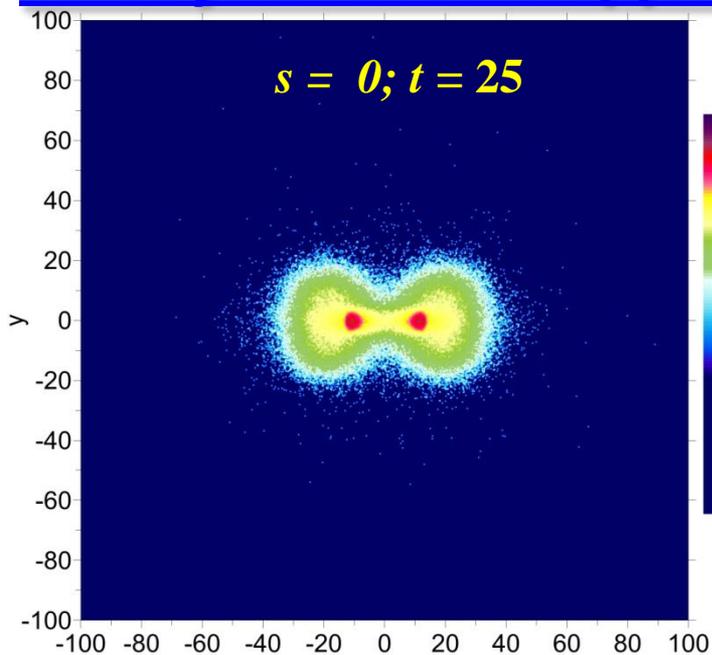
$$V_{coll} = 6$$

DM + Stars
 $M_s = 50$



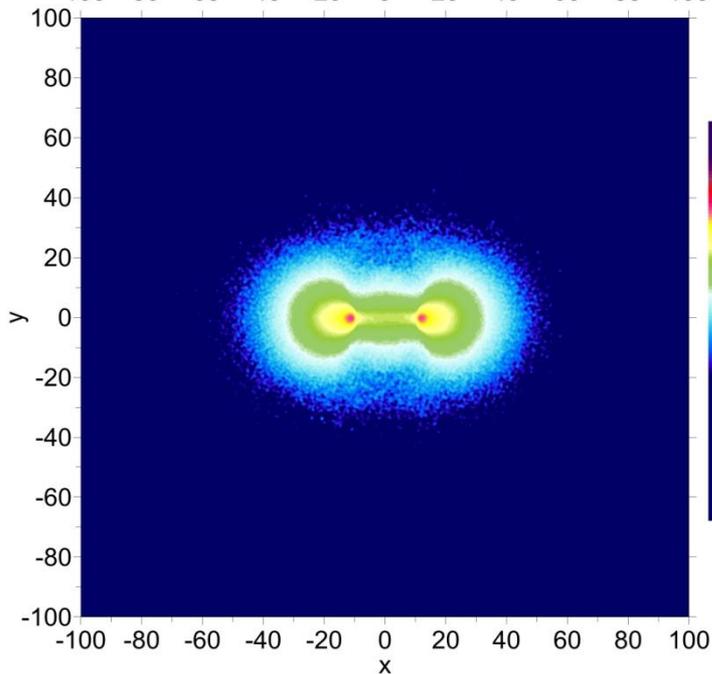
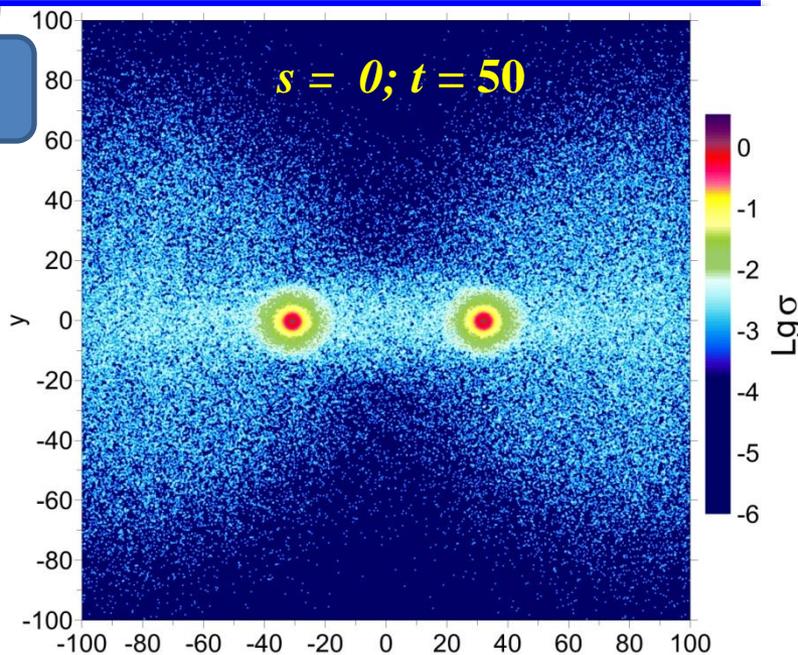
Gas
 $M_g = 7.5$



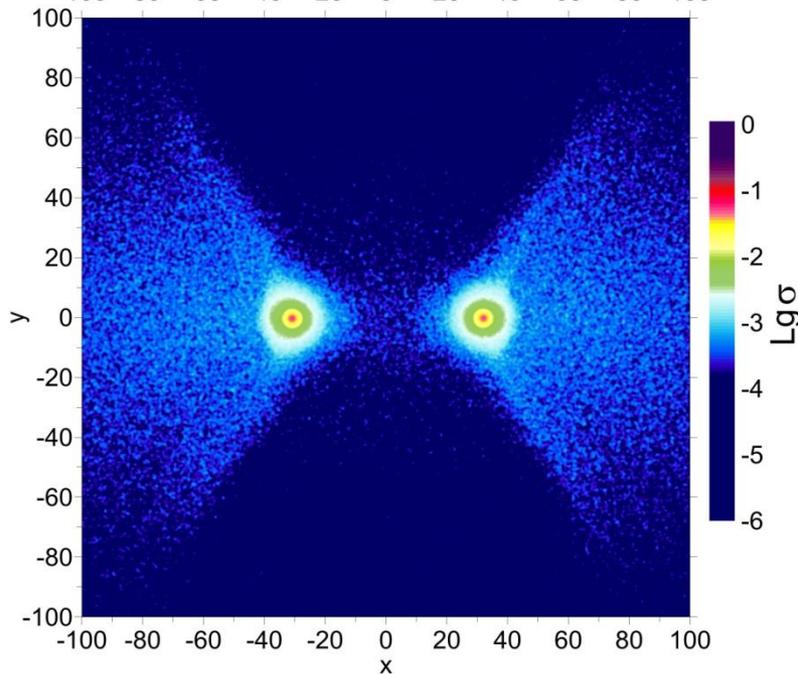


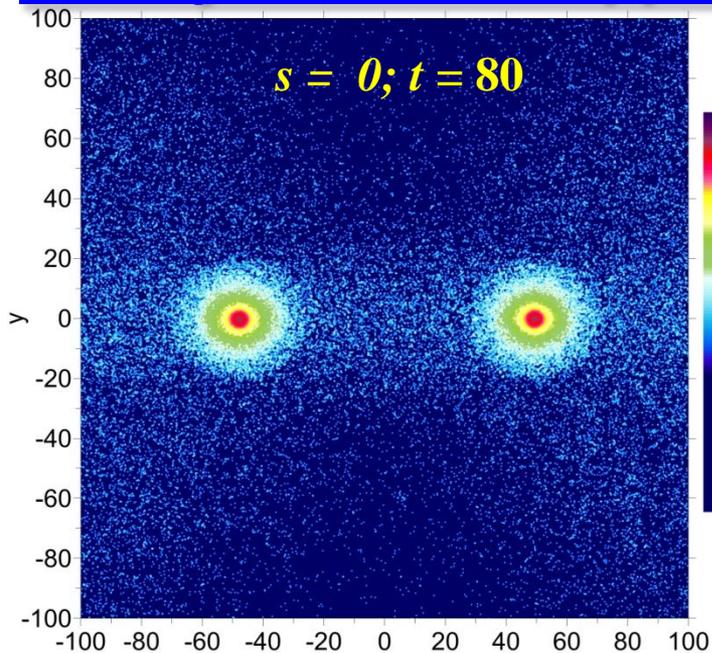
$$V_{coll} = 6$$

DM + Stars
 $M_s = 50$



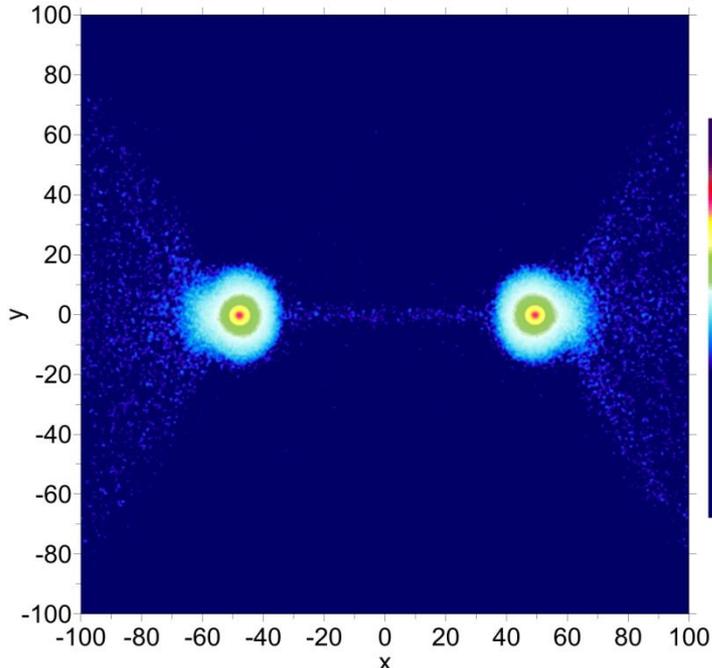
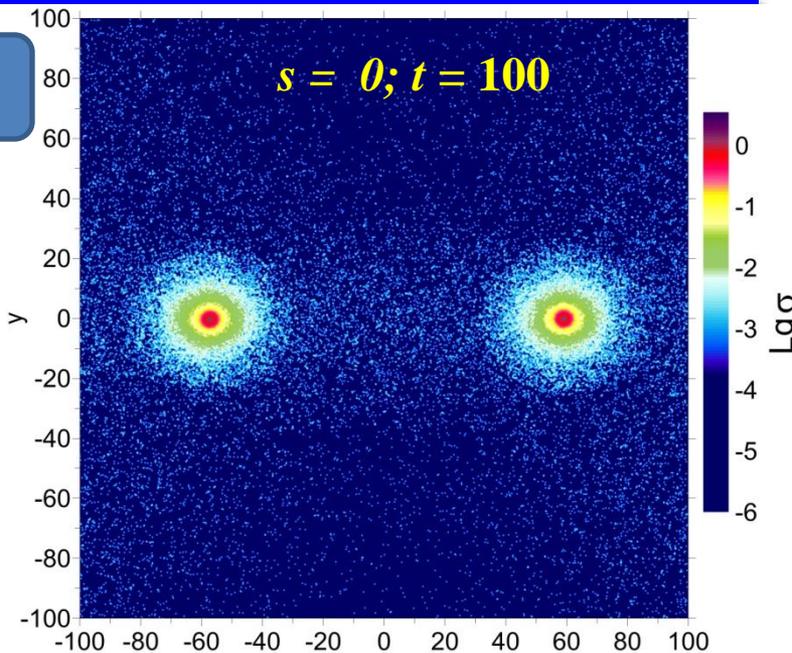
Gas
 $M_g = 7.5$



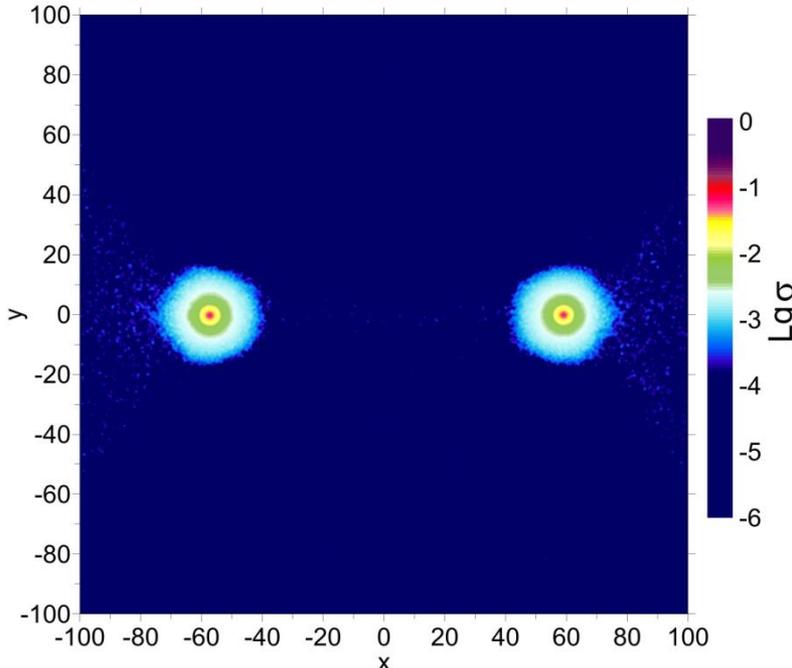


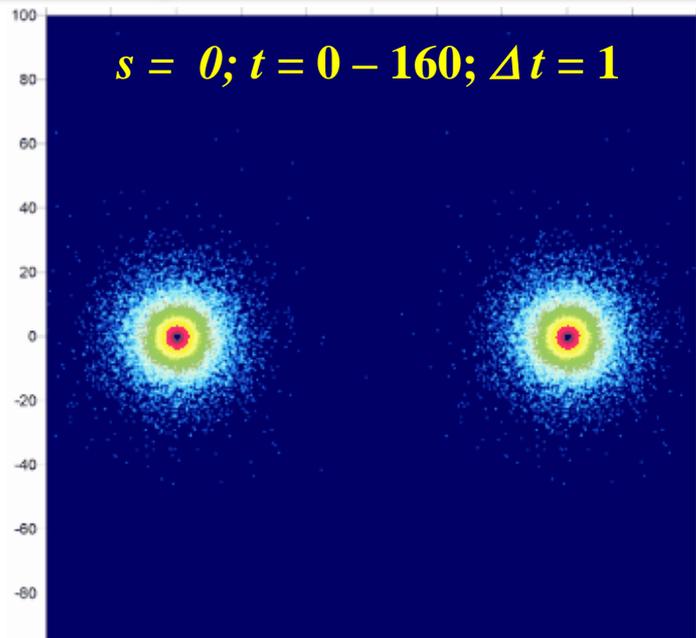
$V_{coll} = 6$

DM + Stars
 $M_s = 50$

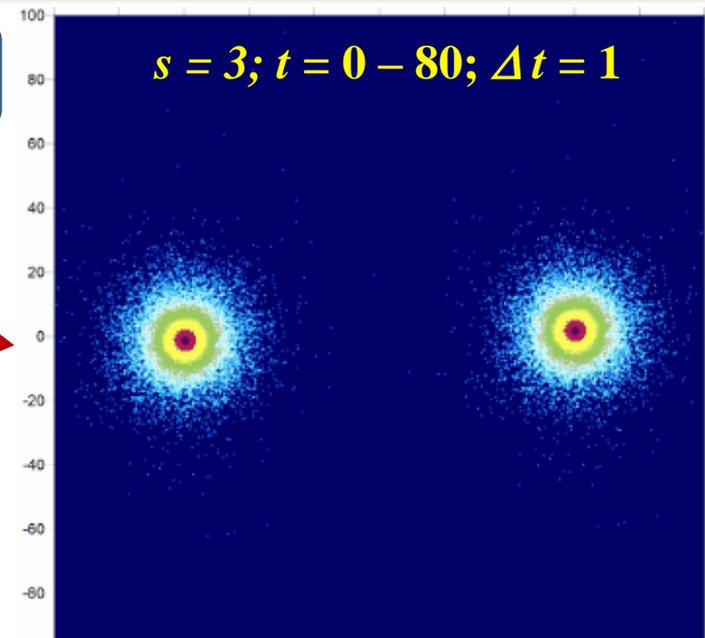


Gas
 $M_g = 7.5$

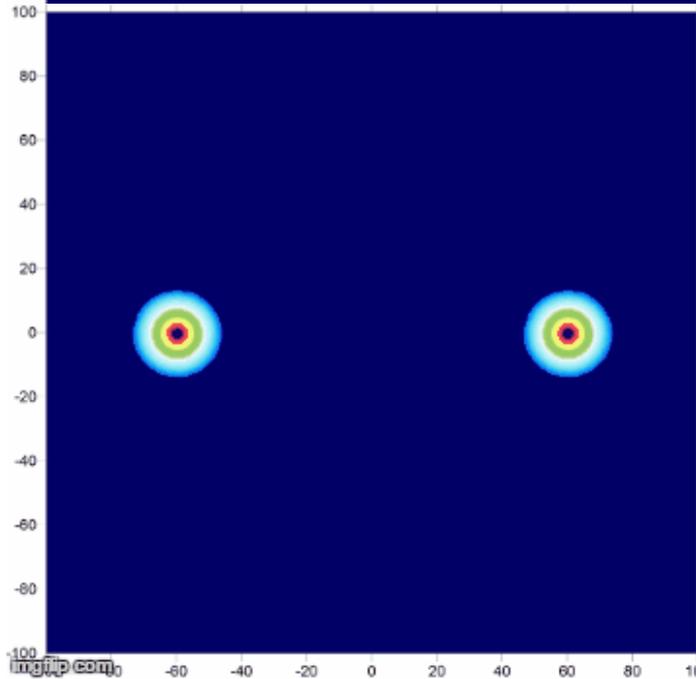




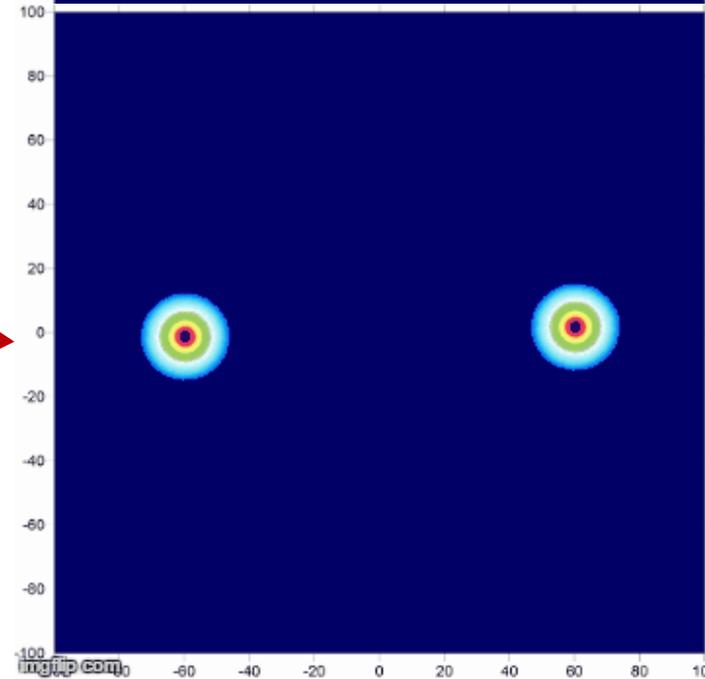
$V_{coll} = 6$

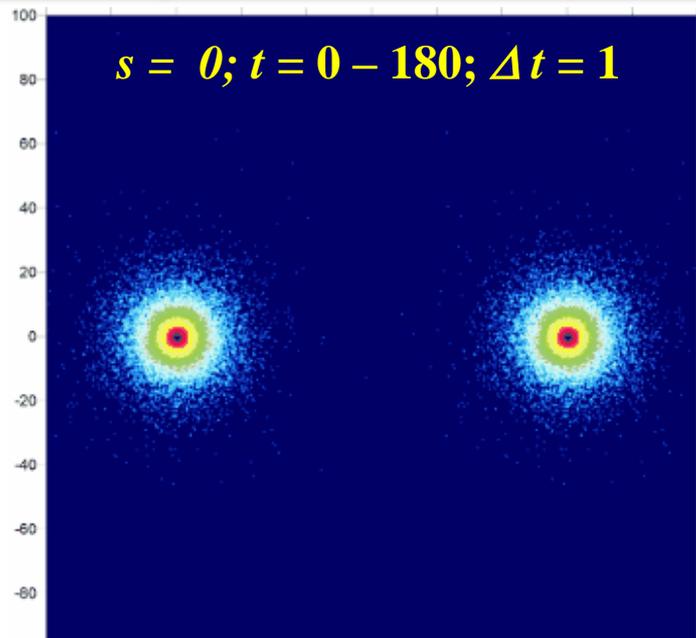


DM + Stars
 $M_s = 50$



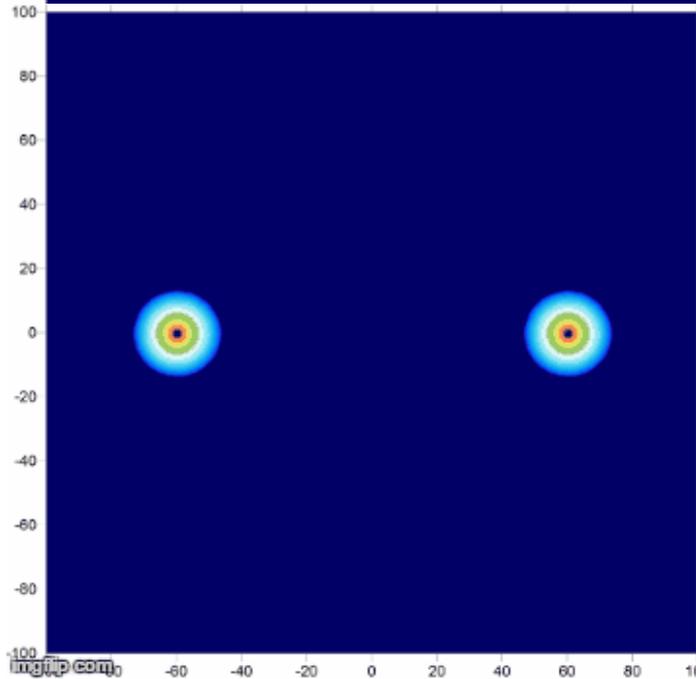
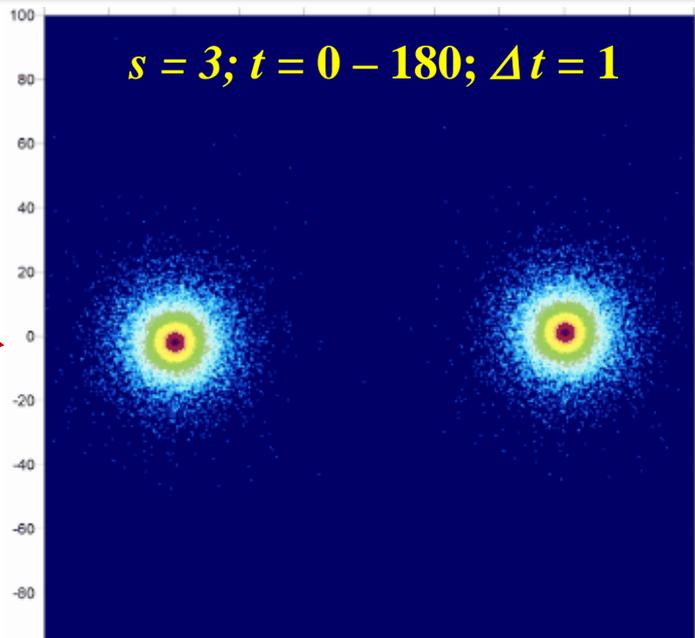
Gas
 $M_g = 7.5$



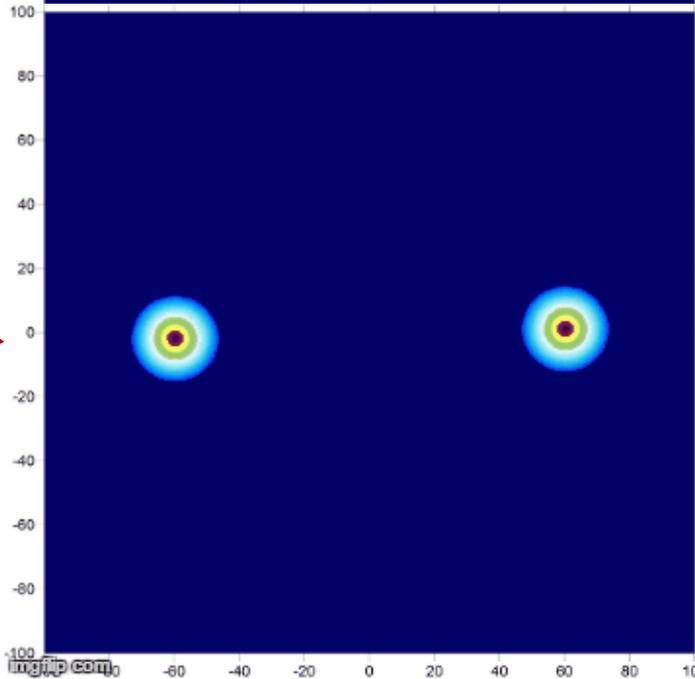


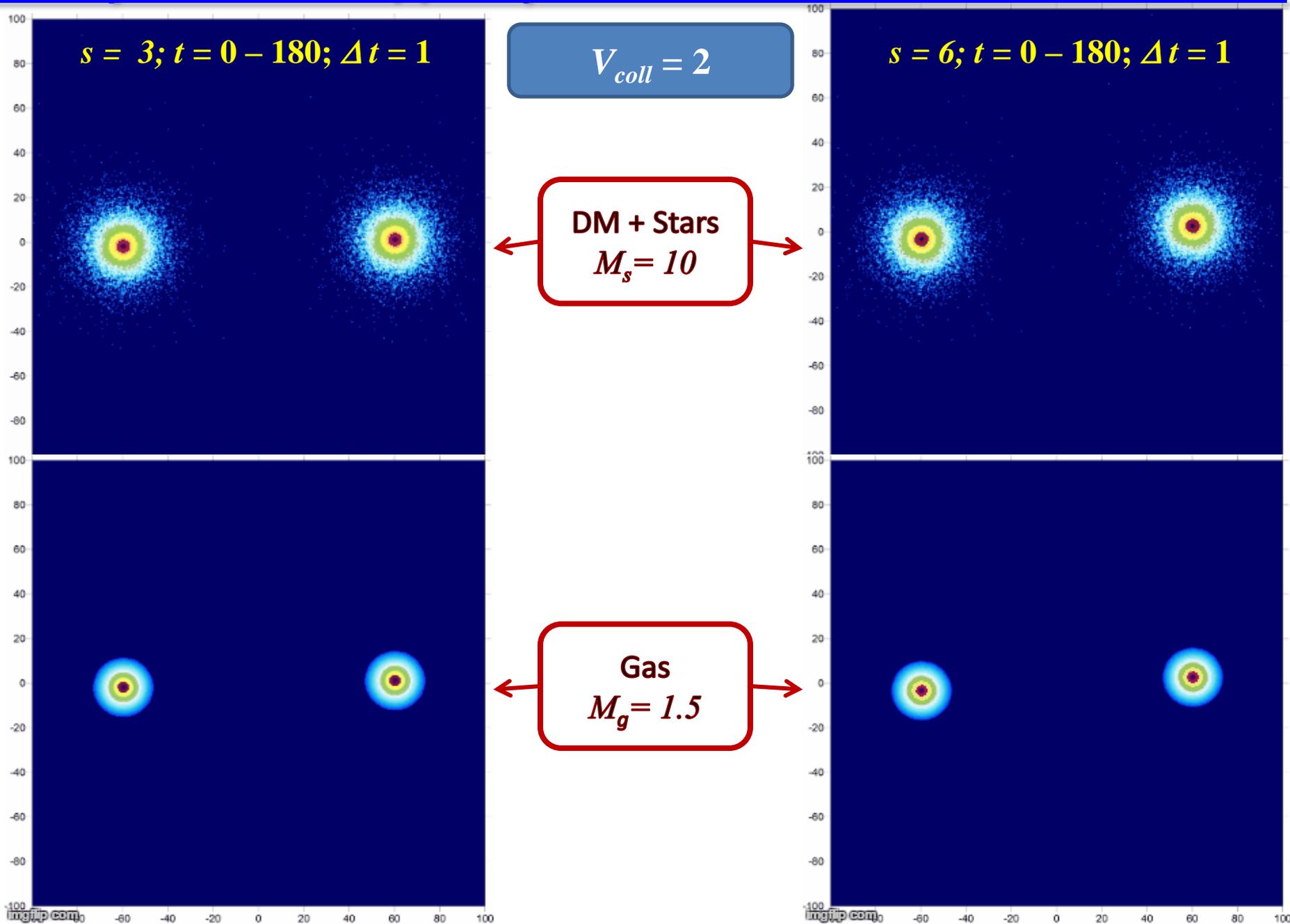
$V_{coll} = 2$

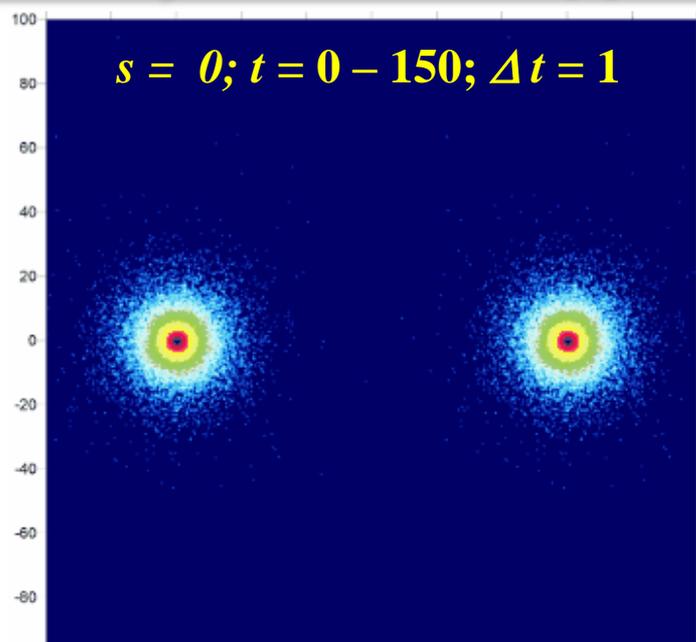
DM + Stars
 $M_s = 10$



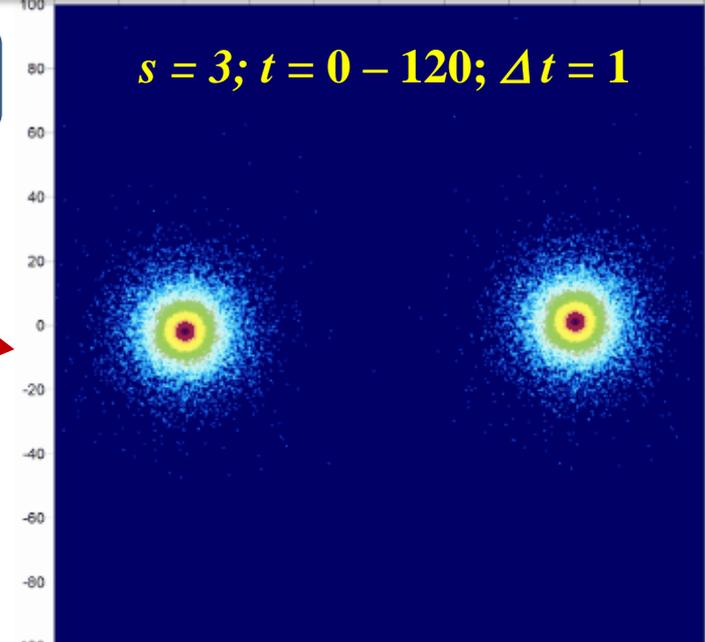
Gas
 $M_g = 1.5$



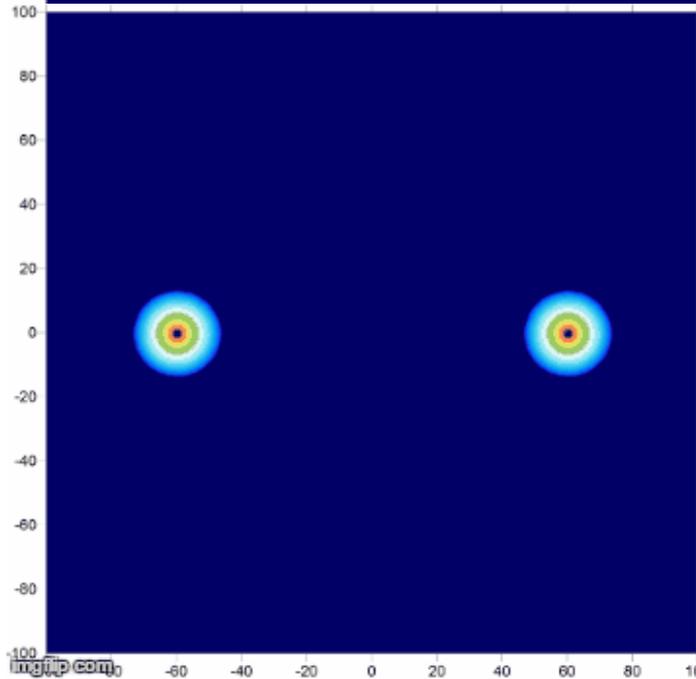




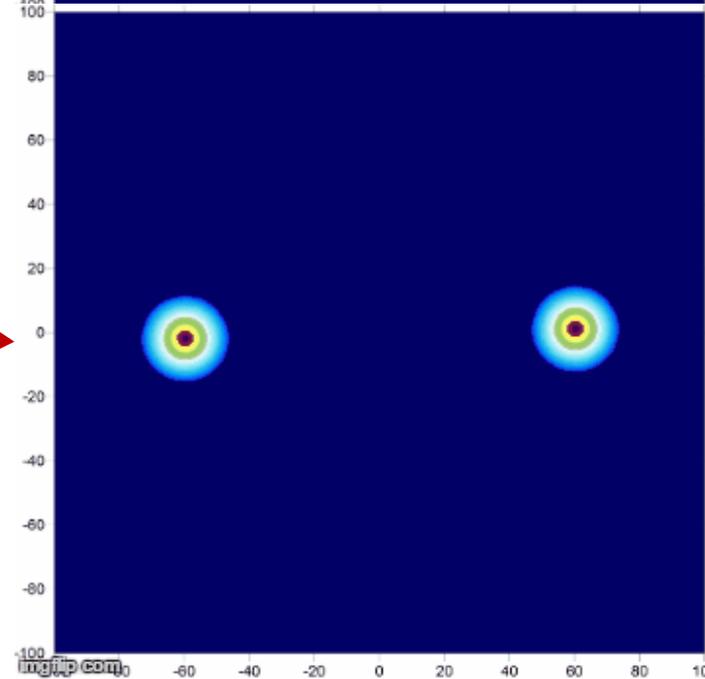
$V_{coll} = 3$

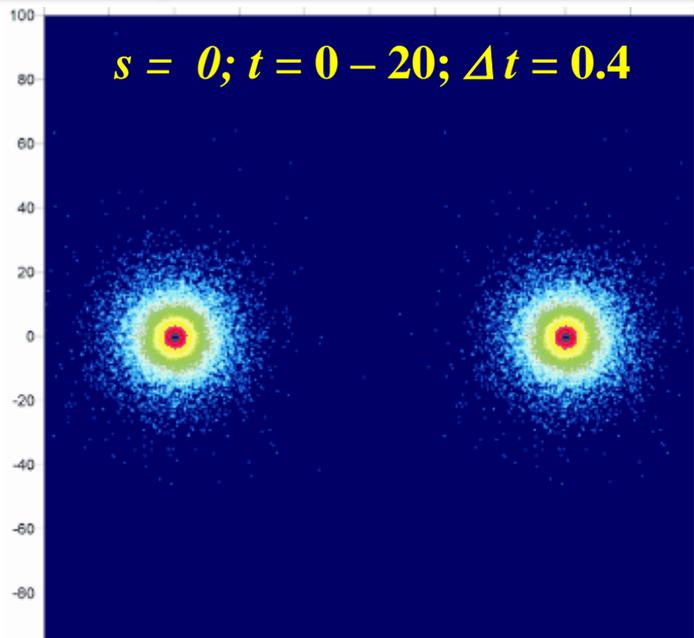


DM + Stars
 $M_s = 10$



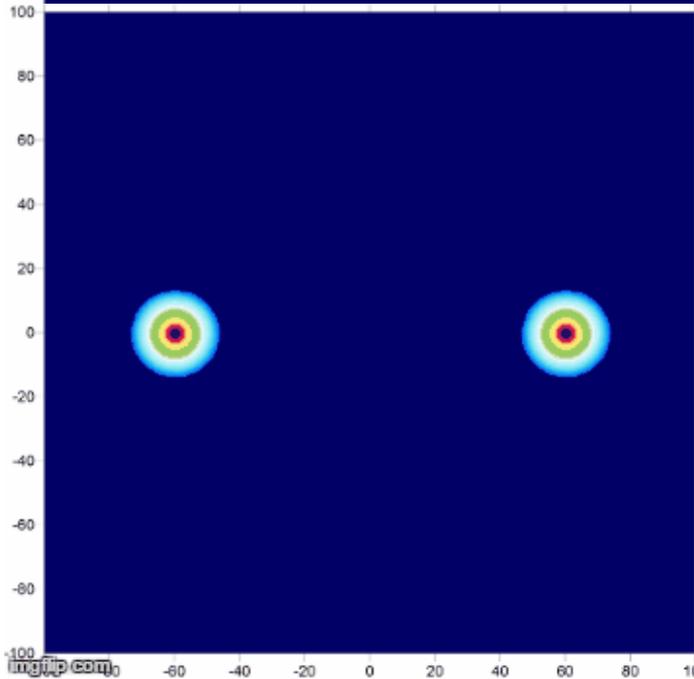
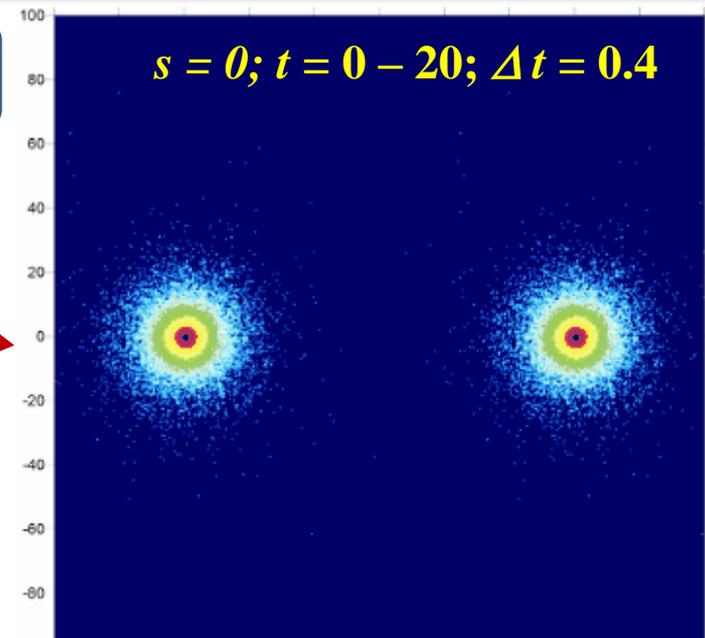
Gas
 $M_g = 1.5$





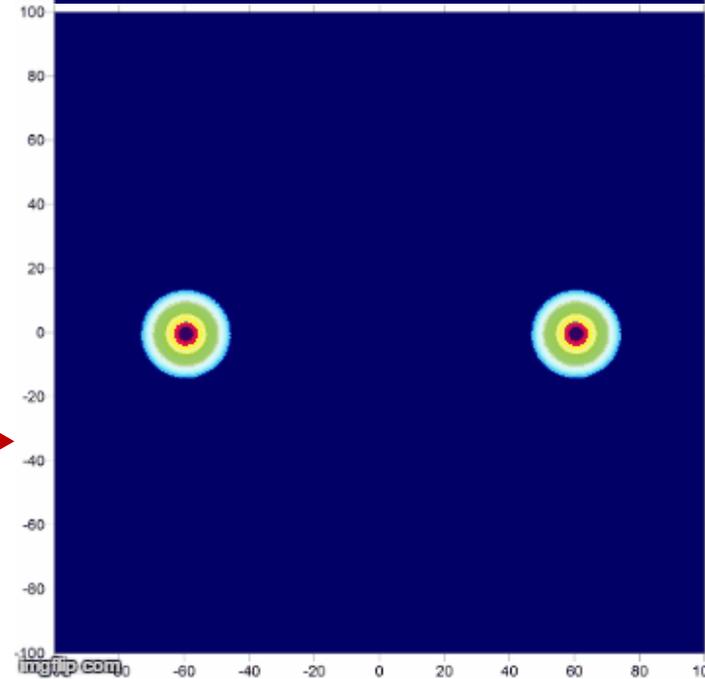
$V_{coll} = 15$

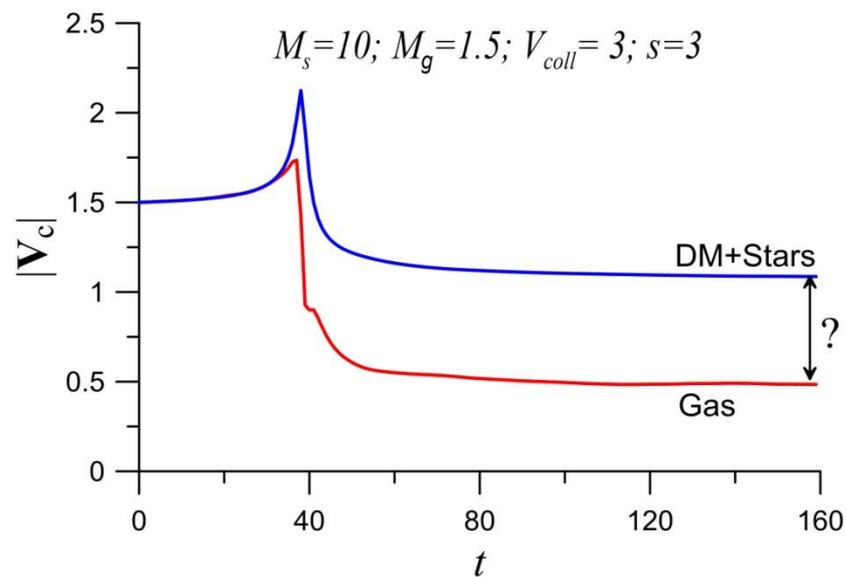
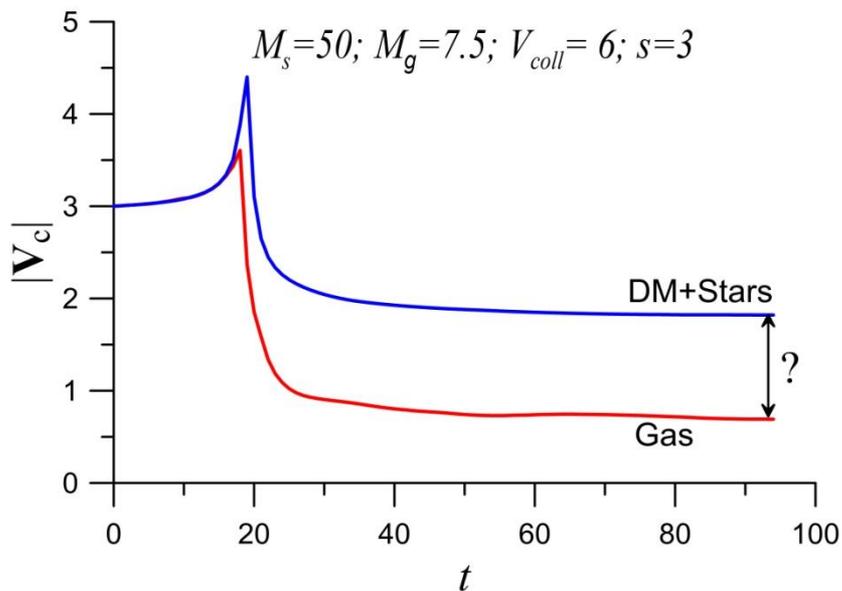
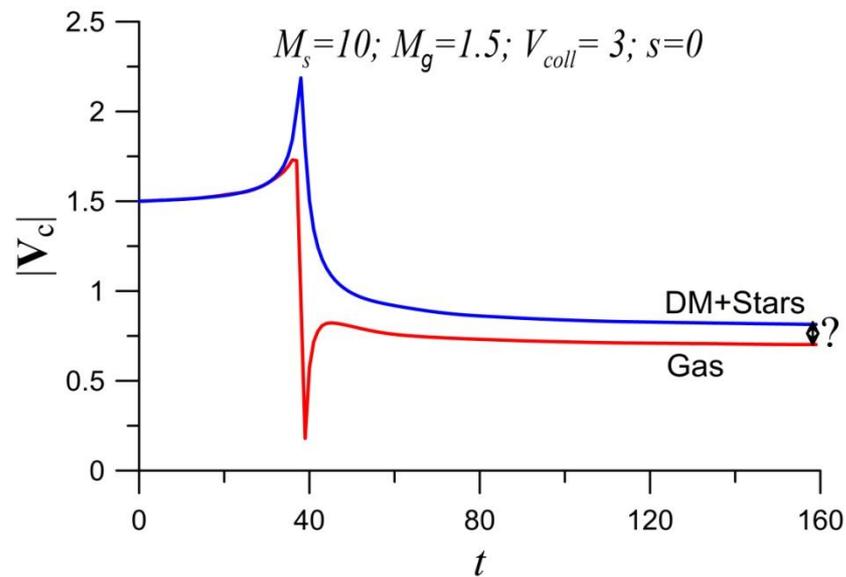
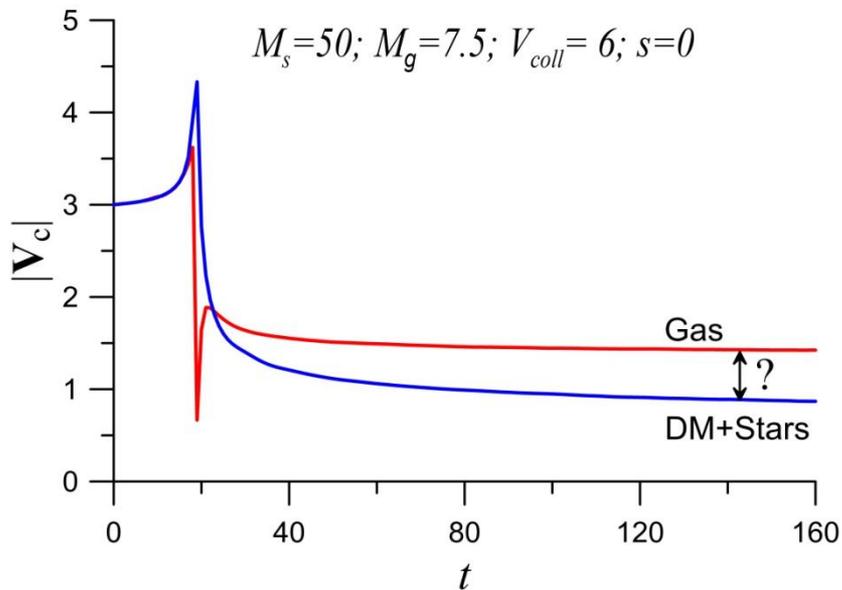
DM + Stars
 $M_s = 50$



Gas
 $M_g = 7.5$

Gas
 $M_g = 15$

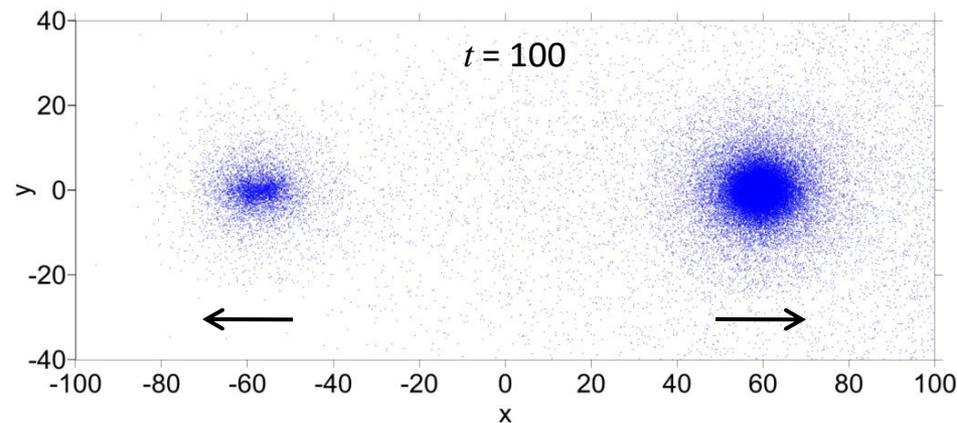
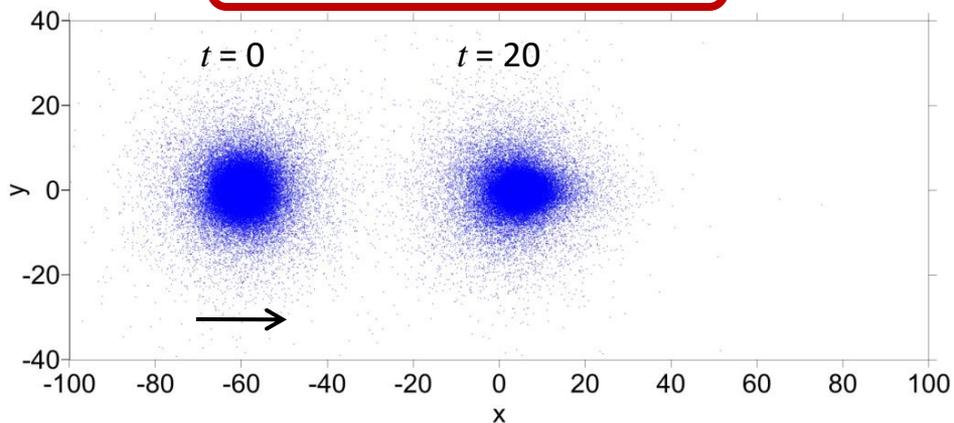




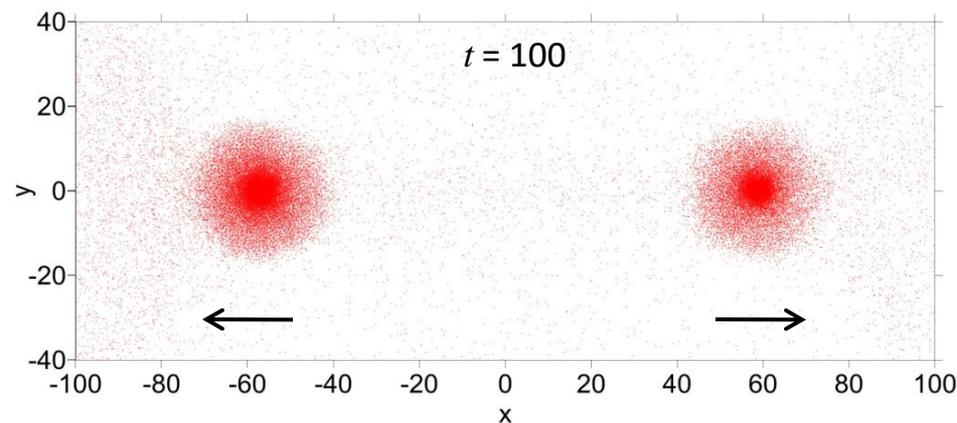
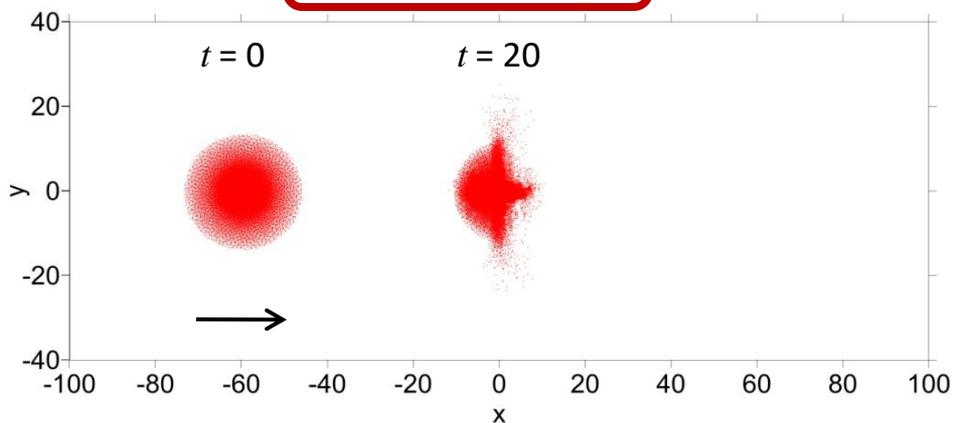
Отображаются только частицы галактики 1

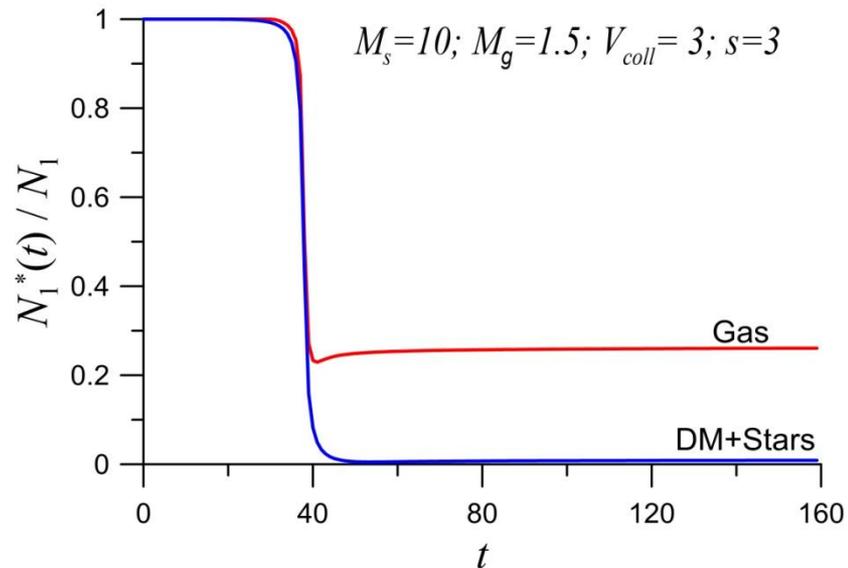
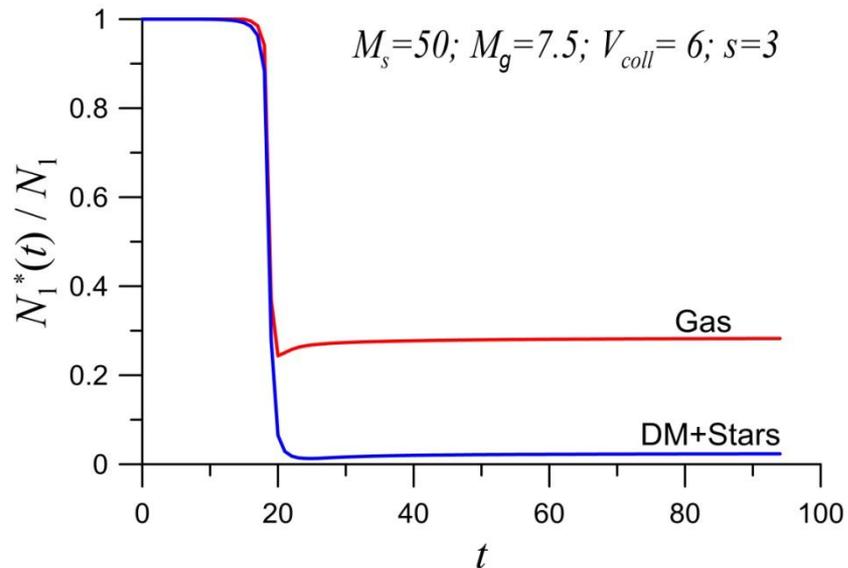
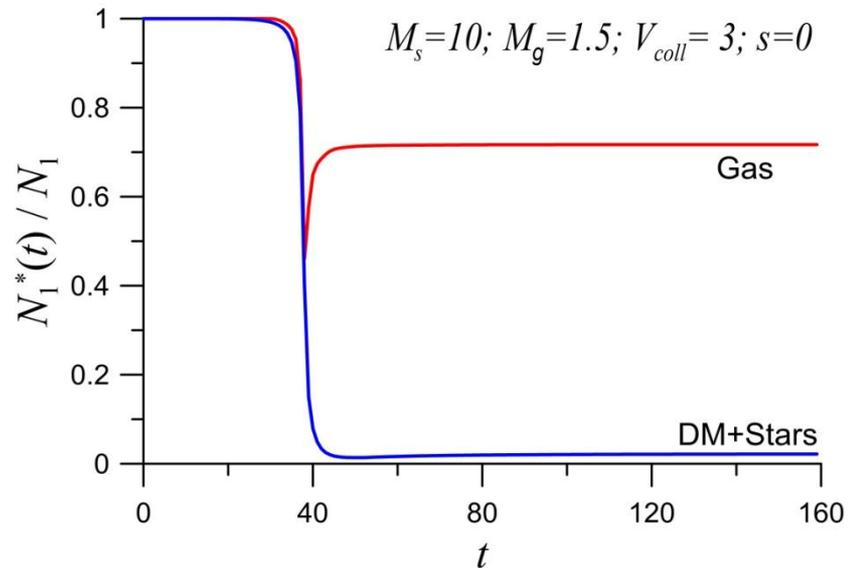
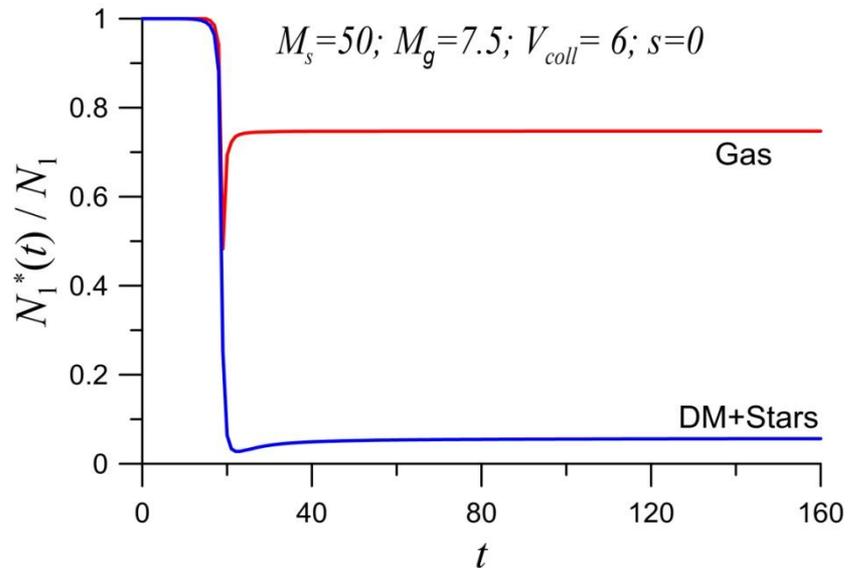
DM + Stars $M_s = 50$

$V_{coll} = 6$



Gas $M_g = 7.5$





1. Разработан программный комплекс (OpenMP-CUDA) для исследования самосогласованной динамики газовой и бесстолкновительной компонент галактик.
2. Проведено численное моделирование столкновения сферически-симметричных галактик на гибридных вычислительных системах CPUs+GPUs. Изучена эффективность распараллеливания численного алгоритма (SPH+Nbody).
3. Показано, что при учете самосогласованной динамики газовой и бесстолкновительной компонент в сталкивающихся галактиках не происходит:
 - существенного вытягивания газа в направлении сближения галактик;
 - образования третьей галактики при начальном содержании газа от 15 до 30%.
4. Продемонстрирован эффект существенного обмена газом (80%) между двумя сталкивающимися галактиками.