

МОДЕЛЬ ОТВ2-FFC: НЕЛИНЕЙНАЯ КОМПРЕССИЯ ПОЛЯ ТЕМПА В СЛИВАЮЩИХСЯ СКОПЛЕНИЯХ ГАЛАКТИК

Аннотация

В работе предлагается сокращённое изложение модуля **ОТВ2-FFC** (*field-field compression*) — механизма нелинейной компрессии полевых провалов в сливающихся скоплениях галактик. Модуль предназначен для описания дополнительного линзирующего вклада в системах типа Bullet Cluster, где наблюдается разделение рентгеновского газа, галактик и пиков гравитационного линзирования.

В отличие от стандартной интерпретации через частичную тёмную материю, ОТВ2-FFC предполагает, что при столкновении двух скоплений взаимодействуют не только барионные компоненты, но и их уже существующие полевые провалы темпа процессов. При нелинейном перекрытии этих полей может возникать компрессионная добавка

$$\eta_{\text{comp}} = \delta \ln \Phi,$$

которая создаёт дополнительную эффективную линзирующую плотность.

В 1D toy-модели показано, что при параметрах

$$\Delta\eta \sim 10^{-5},$$

$$\lambda_{\Phi} \sim 50 - 70 \text{ кpc},$$

$$\beta_{\Phi} \sim 20 - 50,$$

$$\tau_{\Phi,0} \sim 0.5 - 1.0 \text{ Gyr},$$

механизм может дать порядок линзирующего вклада, необходимый для систем типа Bullet Cluster. Полное математическое изложение, расширенные расчёты и приложения приводятся в полной версии статьи по запросу.

Ключевые слова: ОТВ2, поле темпа процессов, field-field compression, Bullet Cluster, сливающиеся скопления, гравитационное линзирование, тёмная материя, нелинейная жёсткость поля.

1. Введение

Сливающиеся скопления галактик являются сильным тестом для моделей гравитации без частиц тёмной материи. В системах типа Bullet Cluster горячий газ тормозится, сжимается и остаётся ближе к центру столкновения, тогда как галактические компоненты проходят друг через друга почти бесстолкновительно.

В стандартной модели это объясняется тёмной материей:

$$\rho_{\text{tot}} = \rho_{\text{gas}} + \rho_{\text{stars}} + \rho_{\text{DM}}.$$

Тёмная материя проходит вместе с галактиками и даёт основные пики линзирования.

В ОТВ2 без тёмной материи возникает проблема: если поле создаётся только текущей барионной массой,

$$\nabla^2 \chi = \frac{4\pi G}{c^2} \rho_b,$$

то оно должно в значительной степени следовать за газом. Но наблюдаемое линзирование в Bullet Cluster связано не с газом, а с областями, близкими к галактическим компонентам.

Поэтому требуется дополнительный неравновесный механизм поля.

2. Базовые определения ОТВ2

В ОТВ2 фундаментальной величиной является поле относительного темпа физических процессов

$$\Phi(x, t).$$

Связь координатного времени и физического времени процесса задаётся формулой

$$d\tau = \frac{dt}{\Phi(x, t)}.$$

Удобно ввести логарифмическую переменную

$$\chi = \ln \Phi.$$

Гравитационное ускорение в слабом поле определяется градиентом поля:

$$\mathbf{g} = -c^2 \nabla \chi.$$

В статическом слабопольном пределе:

$$\nabla^2 \chi = \frac{4\pi G}{c^2} \rho_m.$$

В модуле ОТВ2-FFC полное поле записывается как

$$\chi(x, t) = \bar{\chi}(t) + \psi_{\text{stat}}(x, t) + \eta_{\text{comp}}(x, t),$$

где

$$\bar{\chi}(t)$$

— глобальный космологический фон,

$$\psi_{\text{stat}}$$

— обычный статический гравитационный вклад,

$$\eta_{\text{comp}}$$

— компрессионная добавка поля.

Подробный вывод базовых уравнений см. в полной версии статьи, разделы 3–4.

3. Механизм ОТВ2-FFC

ОТВ2-FFC означает **field–field compression** — компрессию полевых провалов.

Пусть два скопления имеют локальные полевые провалы:

$$\psi_1(x, t), \quad \psi_2(x, t).$$

В линейном режиме они просто складывались бы:

$$\chi_{\text{lin}} = \bar{\chi} + \psi_1 + \psi_2.$$

Но если поле Φ имеет нелинейную жёсткость, то при быстром перекрытии двух провалов возникает дополнительная компрессионная мода:

$$\chi = \bar{\chi} + \psi_1 + \psi_2 + \eta_{\text{comp}}.$$

Эта мода не является частицей тёмной материи. Она представляет собой локальное уплотнение градиента поля:

$$|\nabla\chi| \uparrow.$$

Именно оно создаёт дополнительную гравитацию:

$$\mathbf{g}_\eta = -c^2 \nabla \eta_{\text{comp}}.$$

Эффективная линзирующая плотность моды:

$$\rho_{\eta,\text{eff}} = \frac{c^2}{4\pi G} \nabla^2 \eta_{\text{comp}}.$$

То есть в ОТВ2-FFC стандартная тёмная материя заменяется не веществом, а кривизной неравновесной полевой структуры:

$$\rho_{\text{DM}} \rightarrow \rho_{\eta,\text{eff}}.$$

4. Уравнение компрессионной моды

Минимальное уравнение для компрессионной добавки:

$$\partial_t^2 \eta_{\text{comp}} + 2\Gamma_\Phi \partial_t \eta_{\text{comp}} - c_\Phi^2 \nabla^2 \eta_{\text{comp}} + \omega_\Phi^2 \eta_{\text{comp}} = S_{\text{ff}}.$$

Здесь

$$c_\Phi$$

— скорость компрессионной темповой моды,

$$\Gamma_\Phi$$

— затухание,

$$\omega_\Phi$$

— жёсткость восстановления поля,

$$S_{\text{ff}}$$

— источник от столкновения двух полевых провалов.

Источник задаётся как

$$S_{\text{ff}} = \beta_\Phi (\nabla\psi_1 \cdot \nabla\psi_2 + \frac{1}{c_\Phi^2} \partial_t \psi_1 \partial_t \psi_2).$$

Параметр

$$\beta_{\Phi}$$

характеризует нелинейную жёсткость поля:

$$\beta_{\Phi} = \frac{d \ln K_{\Phi}}{d\chi}.$$

Рабочий диапазон toy-модели:

$$\beta_{\Phi} \sim 20 - 50.$$

Полный вывод уравнения и обсуждение устойчивой формы $K_{\Phi}(\chi)$ см. в полной версии статьи, раздел 6.

5. Требуемое уплотнение поля

Чтобы получить линзирующий вклад порядка Bullet Cluster, требуется компрессионная добавка

$$\Delta\eta \sim 10^{-5}.$$

Так как

$$\eta = \delta \ln \Phi,$$

то

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi} \sim 10^{-5}.$$

Это малое относительное изменение поля. Важна не большая амплитуда, а локализация:

$$\lambda_{\Phi} \sim 50 - 70 \text{ кpc}.$$

Такой пик соответствует эффективной линзирующей массе

$$M_{\eta}(100 \text{ кpc}) \sim 10^{13} - 3 \times 10^{13} M_{\odot}.$$

Но эта величина не является реальной массой покоя. Это масса, которую стандартный анализ восстановил бы из линзирования.

В OTB2-FFC она соответствует кривизне поля:

$$\rho_{\eta,\text{eff}} = \frac{c^2}{4\pi G} \nabla^2 \eta_{\text{comp}}.$$

Подробные оценки Σ_{η} , $\rho_{\eta,\text{eff}}$, $\nabla\eta$ и $\nabla^2\eta$ см. в полной версии статьи, раздел 7.

6. 1D toy-модель

Для первичной проверки берём два движущихся гауссовых полевых провала:

$$\psi_1(x, t) = -\psi_{01} \exp\left[-\frac{(x - X_1(t))^2}{2R_1^2}\right],$$

$$\psi_2(x, t) = -\psi_{02} \exp\left[-\frac{(x - X_2(t))^2}{2R_2^2}\right].$$

Компрессионный источник:

$$S_{\text{ff}}(x, t) = \beta_{\Phi} (\partial_x \psi_1 \partial_x \psi_2 + \frac{1}{c_{\Phi}^2} \partial_t \psi_1 \partial_t \psi_2).$$

Для контрольного набора параметров:

$$r_{\text{comp}} = 60 \text{ крс},$$

$$\lambda_{\Phi} = 60 \text{ крс},$$

$$\beta_{\Phi} = 50,$$

$$\tau_{\Phi,0} = 0.7 \text{ Gyr},$$

$$\varepsilon_{\Phi} = 0.10,$$

получается:

$$\eta_{\text{obs}} \sim 10^{-5}.$$

Отставание полевого пика от галактического пика:

$$\Delta x_{\Phi} = \varepsilon_{\Phi} v_{\text{gal}} t.$$

Для

$$v_{\text{gal}} = 2600 \text{ km/s},$$

$$t = 180 \text{ Myr}$$

получаем:

$$\Delta x_{\Phi} \approx 48 \text{ крс}.$$

Центральный остаточный пик оказывается малым:

$$\frac{\eta(0)}{\eta_{\text{peak}}} \sim 10^{-4}.$$

Итак, тоу-модель показывает, что компрессионная мода может дать нужный порядок линзирующего вклада без образования сильного центрального лишнего пика.

Подробные численные таблицы см. в полной версии статьи, раздел 8 и приложение А.

7. Энергетическая проверка

Энергия компрессионной моды оценивается через градиентную энергию:

$$u_{\eta} \sim \frac{c^4}{8\pi G} |\nabla \eta|^2.$$

Для

$$\Delta \eta \sim 10^{-5},$$

$$\lambda_{\Phi} \sim 60 \text{ крс},$$

получается:

$$E_\eta \sim 10^{54} - 10^{55} \text{ J.}$$

Кинетическая энергия столкновения массивных скоплений имеет порядок

$$E_{\text{kin}} \sim 10^{57} \text{ J.}$$

Следовательно,

$$\frac{E_\eta}{E_{\text{kin}}} \sim 10^{-3} - 10^{-2}.$$

То есть для возбуждения компрессионной моды требуется малая доля кинетической энергии столкновения.

Важно: нельзя считать энергию моды как

$$M_\eta c^2,$$

поскольку M_η — это не масса покоя, а эффективный линзирующий эквивалент кривизны поля.

Подробная энергетическая оценка см. в полной версии статьи, раздел 9.

8. Проверка на других сливающихся скоплениях

Если ОТВ2-FFC является физическим механизмом, он должен проявляться не только в Bullet Cluster.

Сохранность моды задаётся:

$$A_{\text{surv}} = \exp\left[-\frac{q_\Phi(z)t_{\text{merger}}}{\tau_{\Phi,0}}\right],$$

где

$$q_\Phi(z) = \frac{\bar{\Phi}(z)}{\bar{\Phi}_0}.$$

Для молодых систем типа Bullet Cluster и MACS J0025 ожидается сильная мода:

$$A_{\text{surv}} \sim 0.7 - 0.9.$$

Для более старых систем типа Musket Ball Cluster мода должна быть слабее или более размытой.

Для высококрасносмещённых систем типа El Gordo полевая мода должна жить дольше в координатном описании, поскольку

$$q_\Phi(z) < 1.$$

Для сложных многокомпонентных систем типа Abell 520 возможен центральный остаточный пик:

$$\eta_{\text{center}} \ll \eta_{\text{peak}}.$$

Полное сравнение с Bullet Cluster, MACS J0025, Musket Ball, Abell 520 и El Gordo см. в полной версии статьи, раздел 10.

9. Предсказания модели

OTB2-FFC даёт несколько проверяемых предсказаний.

1. Линзирующий пик должен быть около галактик, но немного позади них

$$x_{\text{lens}} \approx x_{\text{gal}} - \Delta x_{\Phi}.$$

Ожидаемый порядок для молодых систем:

$$\Delta x_{\Phi} \sim 20 - 70 \text{ крс.}$$

2. Пик не должен следовать за рентгеновским газом

Для простых бинарных слияний:

$$x_{\text{lens}} \boxminus x_{\text{gas}}.$$

3. Молодые слияния должны иметь более сильные пики

$$\eta_{\text{comp}} \propto e^{-q_{\Phi}(z)t_{\text{merger}}/\tau_{\Phi,0}}.$$

4. Старые слияния должны показывать ослабление или размытие пиков

Если

$$t_{\text{merger}}$$

велико, то

$$A_{\text{surv}}$$

меньше.

5. Высококрасномещённые слияния должны зависеть от $\bar{\Phi}(z)$

$$z \uparrow \Rightarrow q_{\Phi}(z) \downarrow \Rightarrow A_{\text{surv}} \uparrow.$$

6. Сложные многокомпонентные слияния могут иметь центральный остаточный пик

$$\eta_{\text{center}} \ll \eta_{\text{peak}}.$$

Эти предсказания отличают OTB2-FFC от простой статической OTB2 и от стандартной модели с полностью бесстолкновительной тёмной материей.

10. Ограничения

OTB2-FFC пока является предварительной теоретической гипотезой.

Главные ограничения:

1. модель пока построена в 1D toy-приближении;
2. нет полноценного fit к картам $\kappa(\theta)$ и $\gamma(\theta)$;
3. параметры β_{Φ} , λ_{Φ} , τ_{Φ} , ε_{Φ} пока являются рабочими, а не измеренными;
4. требуется 2D/3D-моделирование;
5. нужно вывести уравнение моды из полного действия поля;

6. необходимо проверить устойчивость нелинейной жёсткости;
7. нужно сравнивать модель с исходными observables, а не только с уже восстановленными массами.

Правильный статус:

OTB2-FFC допустима по порядку величин, но не доказана.

Полный список ограничений см. в полной версии статьи, раздел 12.

11. Заключение

В сокращённой статье предложен модуль OTB2-FFC — механизм нелинейной компрессии полевых провалов в сливающихся скоплениях галактик.

Главный результат:

столкновение двух полевых провалов $\rightarrow \eta_{\text{comp}} \rightarrow$ дополнительное линзирование.

Компрессионная добавка

$$\eta_{\text{comp}} = \delta \ln \Phi$$

может создавать эффективную линзирующую плотность

$$\rho_{\eta, \text{eff}} = \frac{c^2}{4\pi G} \nabla^2 \eta_{\text{comp}}.$$

В 1D toy-модели существует рабочая область параметров:

$$\Delta\eta \sim 10^{-5},$$

$$\lambda_{\Phi} \sim 50 - 70 \text{ кpc},$$

$$\beta_{\Phi} \sim 20 - 50,$$

$$\tau_{\Phi,0} \sim 0.5 - 1.0 \text{ Gyr},$$

$$\varepsilon_{\Phi} \sim 0.05 - 0.15.$$

Энергетически механизм не запрещён:

$$E_{\eta}/E_{\text{kin}} \sim 10^{-3} - 10^{-2}.$$

OTB2-FFC не доказывает отсутствие тёмной материи, но предлагает проверяемый альтернативный механизм дополнительного линзирования в неравновесных сливающихся скоплениях.

Итоговая формулировка:

OTB2-FFC следует рассматривать как предварительный, но физически оформленный механизм, который переводит проблему дополнительной линзирующей массы в вопрос о нелинейной динамике поля темпа процессов.

Полная версия статьи с подробным выводом уравнений, численными оценками, toy-моделью и расширенным обсуждением предоставляется по запросу.