

Рост аксионных звезд



Дмитрий Левков

ИЯИ РАН & ИТМФ МГУ



Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН,
посвященная 70-летию В.А. Рубакова

А. Дмитриев, ДЛ, А. Панин, И. Ткачев, PRL **132** (2024) 091001

& работа продолжается!

Темная материя из аксионов КХД

$$m_a \sim 10^{-5} \div 10^{-3} \text{ эВ}$$

Klaer, Moore '17
Gorghetto et al '21

Аксионы КХД — бозоны a

- Решают CP-проблему

Pescei, Quinn '77

- Слабо взаимодействуют:

$$\lambda_{a^4} \sim 10^{-50}, \lambda_{ae^+e^-} \lesssim 10^{-15}$$

⇒ только гравитация!

- Образуют холодную ТМ

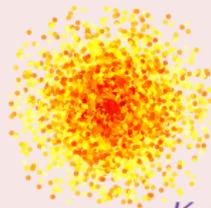
Preskill et al '83; Abbott, Sikivie '83

→ медленную: $v_a \ll 1$

→ перезаполненную: $f \gg 1$

= волновую $\psi_a(t, \mathbf{x})$

Аксионные миникластеры



Kolb, Tkachev '93

Vaquero, Redondo, Stadler '19

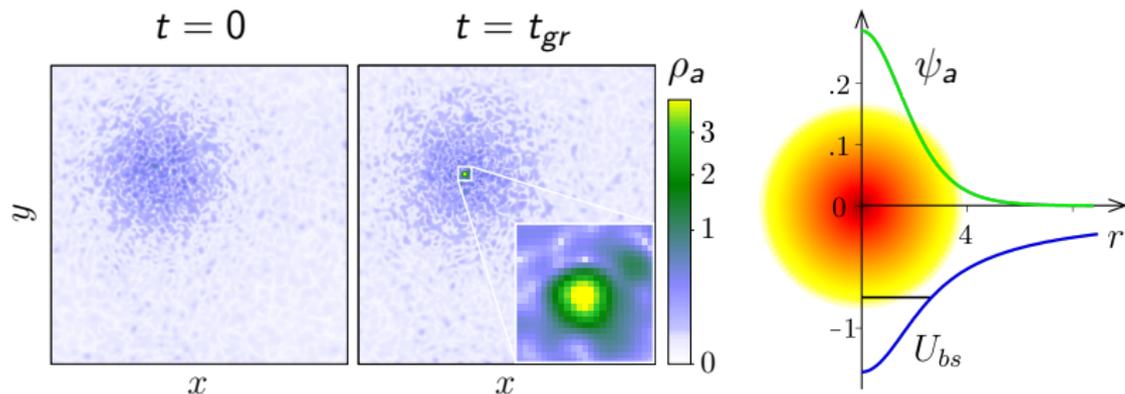
- Астероидные массы:

$$M_{tot} \sim 10^{-17} - 10^{-12} M_{\odot}$$

- Сейчас грав связаны:

$$R_{mc} \sim \text{a.e.}$$

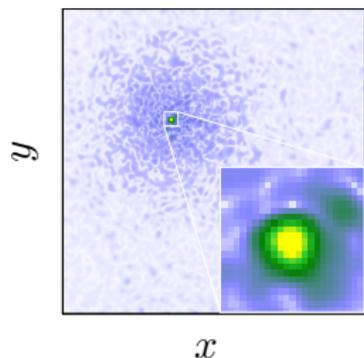
- Содержат ~ 70% ТМ



- Гравитационное рассеяние: $\sigma_{gr} = \left| \begin{array}{c} a \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ a \end{array} \right|^2 \propto \frac{(m_a G)^2}{v_a^4}$
- \Rightarrow **Бозе-конденсация:** $t_{gr} \sim (\sigma_{gr} v_a n_a f_a)^{-1} \ll \underbrace{10^{10}}_{\text{аксионы КХД}} \text{ лет}$
- **Аксионная звезда** = Бозе-конденсат на нижнем уровне U_{bs}
- \Rightarrow Вселенная **заполнена** аксионными звездами КХД!

Но как они растут?

Кинетическое уравнение



аксионная
звезда

частицы в окрестности:



$$F(t, \omega) \equiv \frac{1}{N} \frac{dN}{d\omega}$$

Приближения

- $U = 0$ ← среднее гравполе
- Столкн-я: интеграл Ландау

Но учитываем!

- обмен ч-цами со звездой

$$\partial_t F = G^2 \int d\sigma_{gr} F^3$$

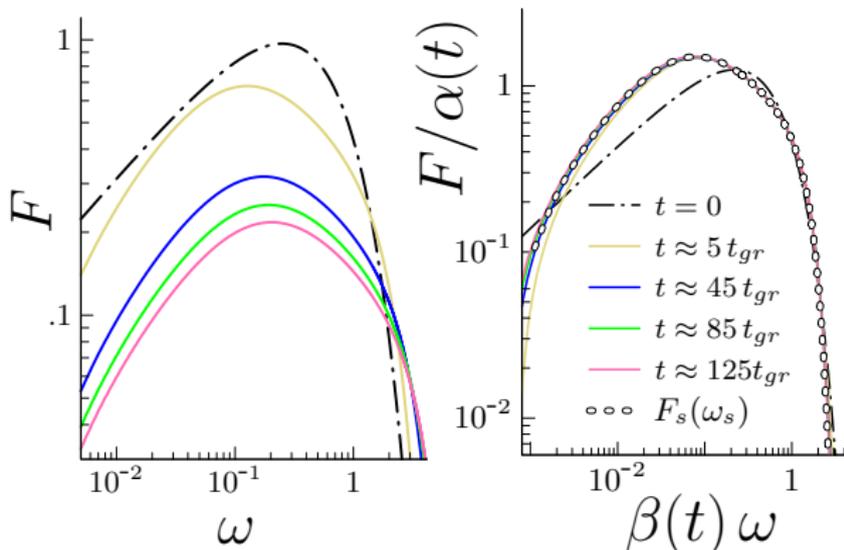
грав. вз-я

$$J_N \Big|_{\omega=0} \neq 0 \text{ — конденсация!}$$

Решаем численно

Ключевое наблюдение

$$\partial_t F = G^2 \int d\sigma_{gr} F^3$$



$F(t, \omega)$ масштабируется!

$$F = \alpha F_s(\beta\omega)$$

$$\alpha \propto t^{-1/D}, \beta \propto t^{2/D-1}$$

$$\Rightarrow E^3/M^5 \propto t$$

где $D = 5/2$

Самоподобный анзац проходит уравнение !

$$(2/D - 1)\omega_s \partial_{\omega_s} F_s - F_s/D = G^2 \int d\sigma_{gr} F_s^3 \quad | \quad \text{грануловия} \Rightarrow D = 5/2$$

Решение становится самоподобным!

Адиабатическое самоподобие

$$\partial_t F = G^2 \int d\sigma_{gr} F^3 + J_E(t, \omega) \quad \leftarrow \text{ВН. ИСТОЧНИК}$$

нарушает самоподобие!

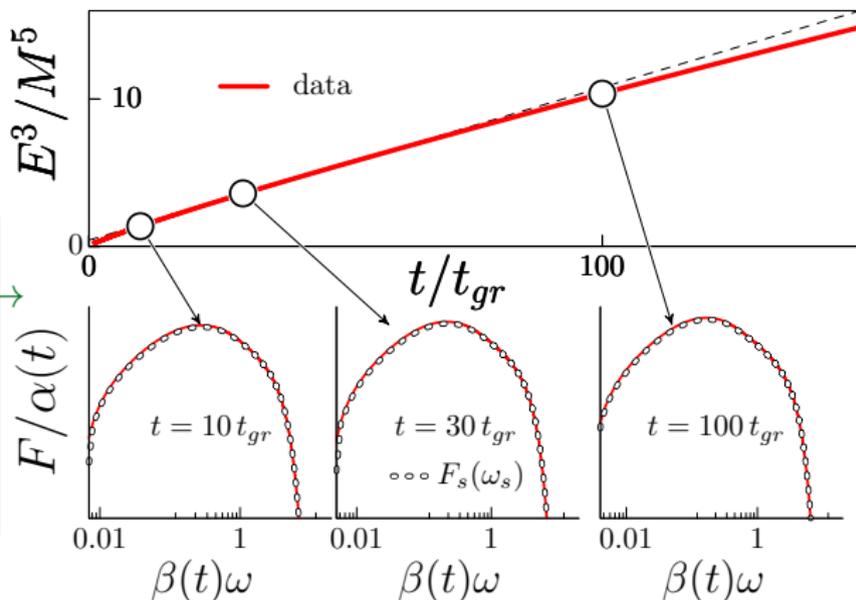
\approx самоподобно

$$F = \alpha F_s(\beta\omega)$$

$$\alpha \propto t^{-1/D}, \beta \propto t^{2/D-1}$$

Но $D = D(t)$

медленно!



$$(2/D - 1) \omega_s \partial_{\omega_s} F_s - F_s/D = G^2 \int d\sigma_{gr} F_s^3 + J_s$$

Самоподобные решения — кинетические аттракторы!

Рост аксионной звезды

- Адиабатическое самоподобие

$$D = D(t), \text{ но медленно } E^3/M^5 \approx (t - t_i)/t_*$$

- Дополнительно: $t_*, t_i = \text{const}$
- Сохранение энергии & массы

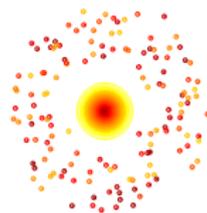
$$E + E_{bs} = \text{const},$$

газ звезда

$$M + M_{bs} = \text{const}$$

газ звезда

- Параметры аксионной звезды: $E_{bs} = -\gamma M_{bs}^3$
известная константа



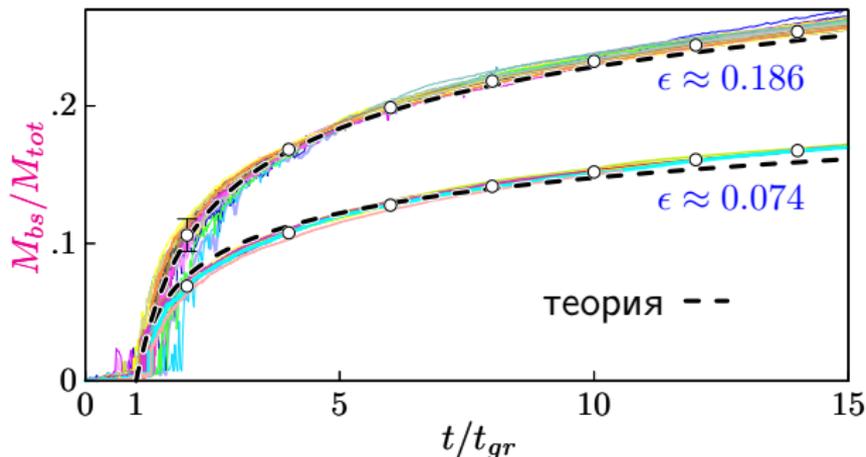
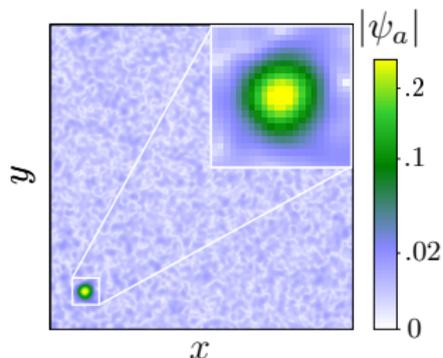
$$\frac{(1 + x^3/\epsilon^2)^3}{(1 - x)^5} = \frac{t - t_i}{t_{gr} - t_i}$$

- $x(t) \equiv M_{bs}/M_{tot}$
- $\epsilon^2 = E_{tot}/\gamma M_{tot}^3$
- t_i — параметр фита

Простой алгебраический закон!

Сравнение с точными симуляциями

$f \gg 1$ \Rightarrow случайные волны $\psi_a(t, \mathbf{x})$

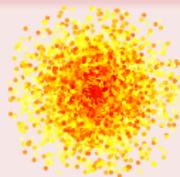


Совпадает со всеми известными симуляциями!

cf. Levkov et al '18, Eggemeier et al '19, Chan et al '22, Schive et al '14

Что это значит для космологии?

Миникластеры



$$M \sim 10^{-(17 \div 12)} M_{\odot}$$

$$\Phi = \delta \rho_a / \bar{\rho}_a |_{\text{РД}} \\ = 0 \div 10^3$$

Hogan, Rees '88; Kolb, Tkachev '93

Аксион КХД $m_a \sim 10^{-4} \text{ eV}$

- Время релаксации:

$$t_{gr} \sim 5 \cdot 10^8 \text{ лет} / \Phi^4 \gtrsim \text{час}$$

- Конденсация 10% миникластера:

$$t_{10} \sim \frac{7 \cdot 10^{18} \text{ лет}}{\Phi^8} \cdot (10\%)^9 < \underbrace{10^{10} \text{ лет}}$$

если $\Phi \gtrsim 1$

- $\Rightarrow \sim 10\%$ темной материи = аксионные звезды?

- Большие аксионные звезды: $M_{bs} \sim 10^{-17} - 10^{-12} M_{\odot}$
 $R_{bs} \sim 100 \text{ км}$

- Наблюдательные следствия: Бозе-новое, радиоизлучение, ...

Нужно распределение аксионных миникластеров!

Спасибо за внимание!

Доклад поддержан грантом РФФ 22-12-00215