

# Легкая бозонная (аксионоподобная) темная материя



Дмитрий Левков  
(ИЯИ РАН & ИТМФ МГУ)



Научная сессия СЯФ ОФН РАН  
03/04/2024

# Легкие аксионоподобные частицы (ALP)

$$a(x)$$

- (Псевдо)скаляры
- Малая масса  $m_a$

Псевдо-голдстоуновские бозоны

Низкие энергии:  $\Phi = f_a \cdot e^{i\theta(x)}$

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} \sim \underbrace{f_a^2 (\partial_\mu \theta)^2}_{\text{теорема Голдстоуна}} - \underbrace{\Lambda^4 \mathcal{V}(\theta)}_{\text{явное нарушение}}$$

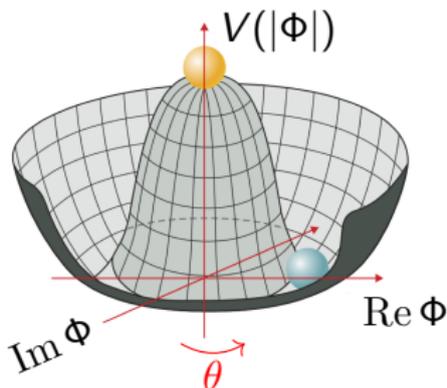
масштаб теории      масштаб нарушения

- $\theta = a(x)/f_a$  — нормированное поле

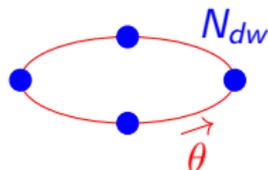
- $\mathcal{V} = \Lambda^4 [1 - \cos(N_{dw} a/f_a)] \leftarrow$  пример  
 $\sim \underbrace{(\Lambda^2/f_a)^2}_{m_a^2} a^2 - \underbrace{(m_a/f_a)^2}_{\lambda} a^4 + \dots$

- Взаимодействия подавлены ( $\theta = a/f_a$ ):

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} \supseteq \underbrace{g_{a\gamma\gamma} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}}_{f_a^{-1} \times \text{фотоны}} + \underbrace{g_{a\psi} \partial_\mu a \bar{\psi} i \gamma_5 \psi}_{f_a^{-1} \times \text{фермионы}}$$



низкие E:  $\Phi = f_a \cdot e^{i\theta(x)}$



- $N_{dw}$  вакуумов
- обычно  $N_{dw} = 1$

# Две популярные модели

## Аксионы КХД *Pecci, Quinn '77*

- Сильная CP-проблема:

$$\Delta\mathcal{L}_{QCD} \sim \theta G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu}, \quad \underbrace{\theta < 10^{-10}}_{\text{эксперимент}}$$

- Решение:  $\theta(x) \equiv a/f_a = \arg \Phi(x)$

низкие энергии:  $\Phi = f_a \cdot e^{ia(x)/f_a}$

аномалия  $\Rightarrow$  явное нарушение:

$$\mathcal{V} \sim \underbrace{N_{dw}}_{\text{цвет. аномалия}} a(x) G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu} / f_a$$

цвет. аномалия

потенциал: усредним по КХД

$$\langle \mathcal{V} \rangle_{\text{eff}} \sim f_\pi^2 m_\pi^2 [1 - \cos(aN_{dw}/f_a)]$$

$$\text{масса: } m_a \sim f_\pi m_\pi / f_a$$

- Взаимодействия:

$$g_{a\gamma\gamma} = f_a^{-1} \cdot \underbrace{\frac{\alpha_{em}}{2\pi} \left( \frac{E}{N_{dw}} - 1.92 \right)}_{10^{-4} \lesssim \dots \lesssim 1}$$

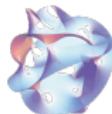
$$g_{ap} \sim g_{an} \sim f_a^{-1} \quad \text{di Cortona et al '16}$$

## Струнные аксионы

e.g. Arvanitaki et al '10

- Струны живут в

$$10d = 4d \times$$



6d Калаби-Яу

- Аксионы = нулевые моды  $\theta_i(x)$   
 $\leftrightarrow$  «симметрии» К-Я

обычно  $\sim 30$  аксионов

масштаб:  $f_a \equiv a/\theta \sim 10^{-2} M_{pl}$

явное нарушение: инстантоны

$$\text{масса: } m_a \sim \underbrace{\frac{\mu_{UV}}{f_a}}_{\text{любая}} \cdot e^{-S_{inst}/2}$$

- Взаимодействия крошечные:

$$g_{a\gamma\gamma} \sim g_{ap} \propto f_a^{-1}$$

$$\lambda \sim m_a^2 / f_a^2 \sim 10^{-100}$$

# Легкие аксионы — отличная темная материя

- Им не на что распадаться:

$$\Gamma^{-1} \left[ a \rightarrow \gamma \gamma \right] \sim \underbrace{g_{a\gamma\gamma}^{-2} m_a^{-3}}_{m_a^{-5}} \gg 10^{10} \text{ лет}$$

$\Rightarrow m_a \ll 100 \text{ эВ}$  (аксионы КХД)

- Должны влезать в галактики:

$$(m_a v)^{-1} \lesssim \text{кпк} \Rightarrow m_a \gtrsim 10^{-22} \text{ eV}$$

- Квантовая («fuzzy») темная материя:

$$(m_a v)^{-1} \sim \text{кпк} \Rightarrow m_a \sim 10^{-22} \text{ эВ}$$

- Большие числа заполнения:

$$m_a \ll 100 \text{ эВ} \Rightarrow f \sim (\rho_{dm}/m_a)/(m_a v)^3 \gg 1$$

термализация  $\Rightarrow$  Бозе-конденсация

Галактика Печь



$$\rho_{dm} \sim 0.1 M_{\odot}/\text{пк}^3$$
$$R \sim \text{кпк}$$
$$v \sim 10 \text{ км/сек}$$



Сверхлегкая бозонная темная материя

# Генерация: перестройка вакуума при $f_a > H_{\text{infl}}/2\pi$

- Актуально для **струнных аксионов**
- $\Phi = f_a \cdot e^{ia(t, \mathbf{x})/f_a}$  до инфляции
- После инфляции  $a = a(t)$

$$\underbrace{\ddot{a} + m_a^2 a}_{\text{осциллятор}} + \underbrace{3H(t) \dot{a}}_{\text{трение } H \propto t^{-1}} = 0$$

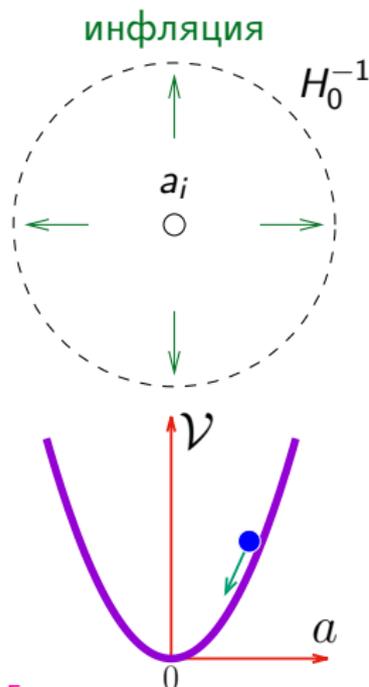
- Решение:  $a \sim \begin{cases} a_i = \text{const}, & m_a < 3H \\ \frac{a_i}{t^{3/4}} \cos(m_a t), & m_a > 3H \end{cases}$

пыль = частицы с  $\mathbf{p} = 0$

- Плотность:  $\rho_a \sim \underbrace{a_i^2 m_a^2 s_0/s_i}_{\text{фиксирует } a_i < 2\pi f_a} \sim 25\% \rho_c$

тонкая подстройка:  $a_i \ll 2\pi f_a$  если  $\underbrace{m_a \ll 2 \cdot 10^{-5} \text{ эВ}}_{\text{антропное окно}}$  (аксион КХД)

- Ограничения на флуктуации:  $H_{\text{infl}} \lesssim 10^{14} \text{ GeV} \left( \frac{10^{-11} \text{ эВ}}{m_a} \right)^{1/4}$



# Генерация: перестройка вакуума при $f_a < H_{\text{infl}}/2\pi$

- При  $T \lesssim f_a$

$$\Phi = f_a \cdot e^{ia(x)/f_a}$$

→  $a(x)$  — зависит от области  $l_H = H^{-1}$

⇒ образуются струны толщины  $f_a^{-1}$

*Kibble '76*

- $m_a < 3H$  — безмассовые волны  $a(x)$

⇒ перемешиваются ( $\rho_a \approx \text{const}$ ) внутри  $l_H$

→ аттрактор:  $\sim 1$  струна внутри  $l_H$

- $m_a \sim 3H$  — важен  $\mathcal{V}(a) \Rightarrow$  вакуум  $a = 0$

⇒ образуются доменные стенки  $0 \rightarrow a \rightarrow 2\pi f_a$

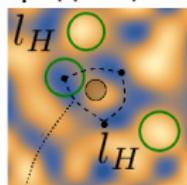
⇒ струны & стенки аннигилируют

**Неоднородности размера  $l_H$ :  $m_a \sim 3H$ !**

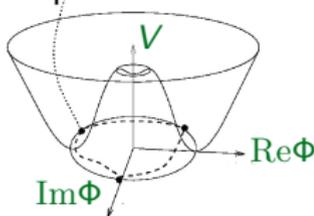
- $m_a > 3H$  — пыль  $a \propto \cos(m_a t)$

$m_a < 3H(t)$

радиация

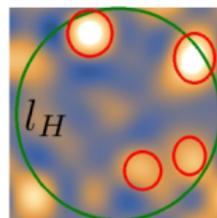


перемешивание



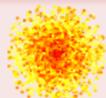
$m_a > 3H(t)$

пыль = «песок»



неоднородности

Неоднородности  $\Rightarrow$  миникластеры *Kolb, Tkachev '94*



грав/связ

Аксионы КХД сейчас: 70% в миникл-х,

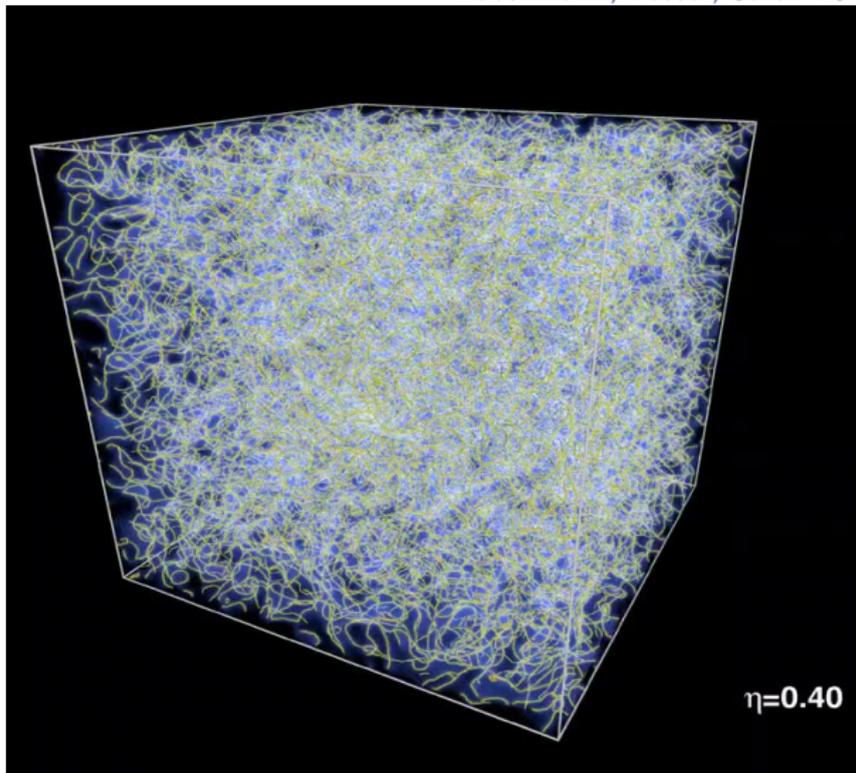
$R_{\text{МК}} \sim 10 \div 500 \text{ а.е.}, M_{\text{МК}} \sim 10^{-(10 \div 18)} M_{\odot}$

*Pierobon et al '23*

- Акс. КХД:  $T \sim \text{ГэВ}$  (фаз.переход КХД),  $m_a \propto T^{-4}$

# Симуляция фазового перехода КХД

*Buschmann, Foster, Safdi '19*



## Симуляции:

*Kolb, Tkachev '94*

*Klaer, Moore '17*

*Buschmann et al '19 '22*

*Ghorghetto et al '20*

$$\rho_a = 25\% \rho_c$$



$$m_a = \underbrace{10^{-5} \dots 10^{-3}} \text{ эВ}$$

Систематика:  $\frac{f_a}{H} \sim 10^{30}$



неопределенности  
миникластеров

# Бозе-конденсация за счет гравитационного рассеяния

DL, Panin, Tkachev '18

- Гравитационная релаксация:

сечение Резерфорда

$$\sigma_{gr} = \left| \begin{array}{c} \phi \text{---} \phi \\ | \quad | \\ \text{---} g \text{---} \\ | \quad | \\ \phi \text{---} \phi \end{array} \right|^2 \propto \frac{(m_a G)^2}{v^4}$$

$$t_{gr} \sim \frac{1}{\sigma_{gr} v n f}$$

Бозе-усиление

(фазовая плотность)

$$f \propto \frac{n}{m_a^3 v^3}$$

большие факторы при  $v \ll 1, f \gg 1$

- «Fuzzy» ТМ в карликовых галактиках:

$$m_a \sim 10^{-22} \text{ эВ} \Rightarrow t_{gr} \gtrsim 10^6 \text{ лет}$$

$$\text{Эксперимент: } m_a \gtrsim 2 \cdot 10^{-20} \text{ эВ} \Rightarrow t_{gr} \gtrsim 10^{14} \text{ лет}$$

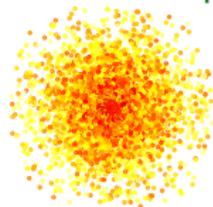
Rogers, Peiris '20



- Аксионы КХД в миникластерах:

$$m_a \sim 10^{-4} \text{ эВ}, \quad t_{gr} \gtrsim \text{час}$$

миникластер



- $f \gg 1$  { релаксация  $\Rightarrow$  Бозе-конденсация  
классическое поле  $a(x)$

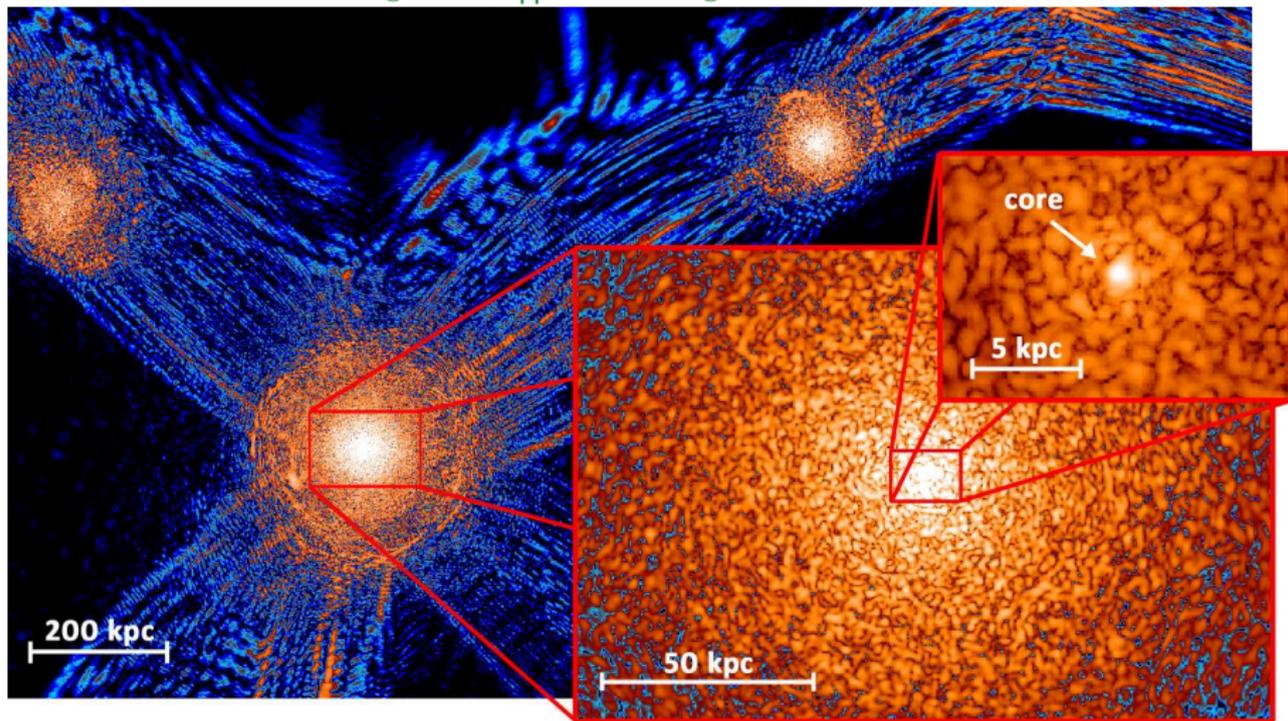
Конденсат в миникластерах!

# Конденсат в «fuzzy» темной материи, $m_a \sim 10^{-22}$ эВ

Карликовая галактика  $\sim$  Fornax:

$$M \sim 4 \times 10^9 M_{\odot}, M_{\text{конд}} \sim 10^8 M_{\odot}$$

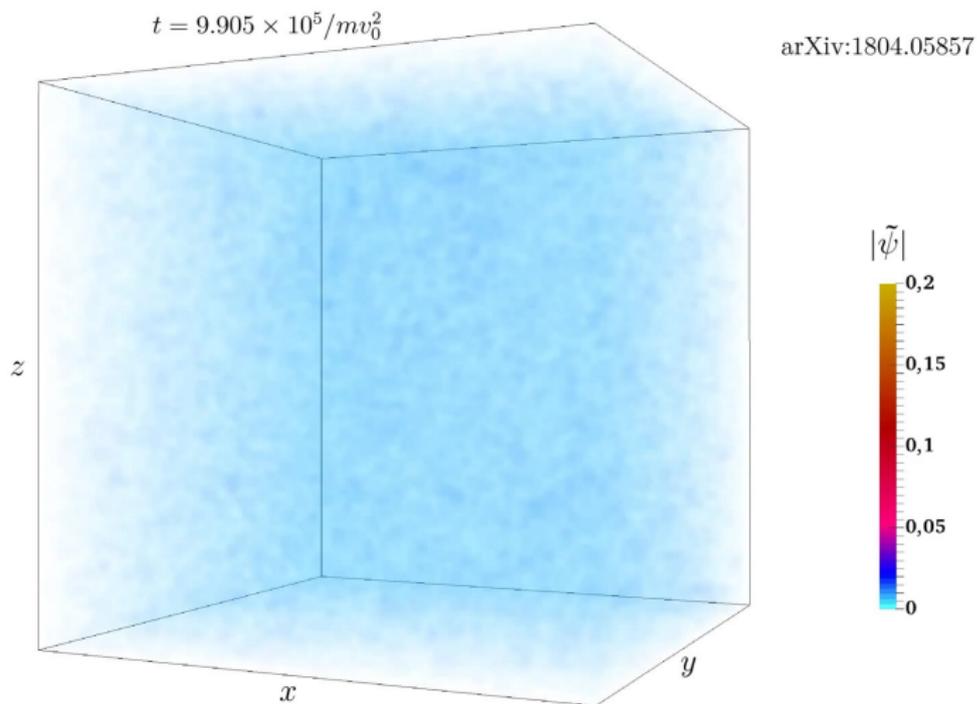
*Schive, Chiueh, Broadhurst '14*



Но эксперимент:  $m_a \gtrsim 2 \cdot 10^{-20}$  эВ  $\leftarrow$  *Rogers, Peiris '20*

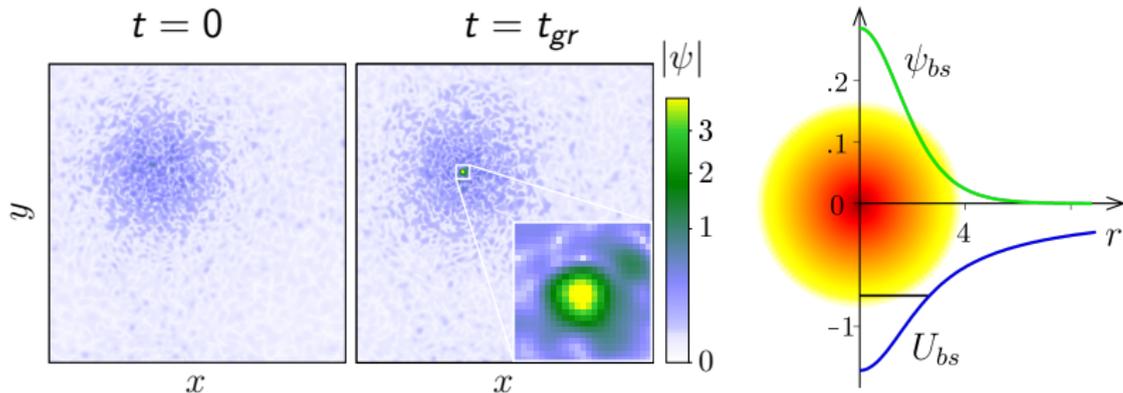
# Симуляция Бозе-конденсации

Старт: вириализованный (случайный) газ в миникластерах



*DL, Panin, Tkachev '18*

# Бозе-конденсат+гравитация = Бозе (аксионная) звезда



- Все аксионы на основном уровне  $U_{bs}(\mathbf{x})$

## Рост Бозе-звезд

- **Симуляции:** почти не растут при  $M_{bs} \propto \underbrace{M_{МК}^{1/2} / R_{МК}^{1/2}}_{\text{«кор-гало»}}$  — маленькие!  
*Schive et al '14*
- **Самоподобная кинетика:**  $M_{bs} \propto t^{1/3}$  — медленный рост продолжается  
*Dmitriev et al '23*
- ⇒  $O(1)$  миникластеров съедено Бозе-звездами!  
10 ÷ 50% темной материи — Бозе-звезды

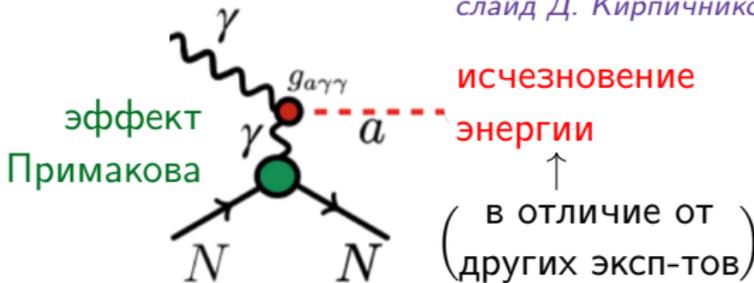
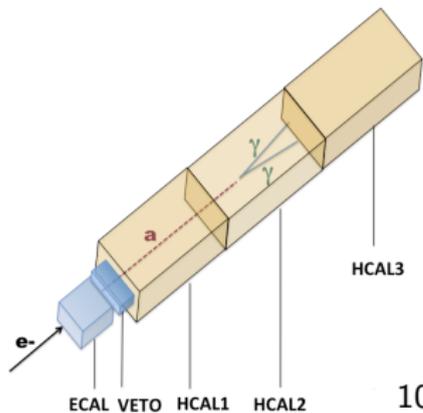
**Нужны точные и реалистичные симуляции!**

# Прямые ограничения на аксионы: эксперимент NA64

→ 16 институтов (ИЯИ РАН, ОИЯИ, ...) + CERN SPS

NA64 '20

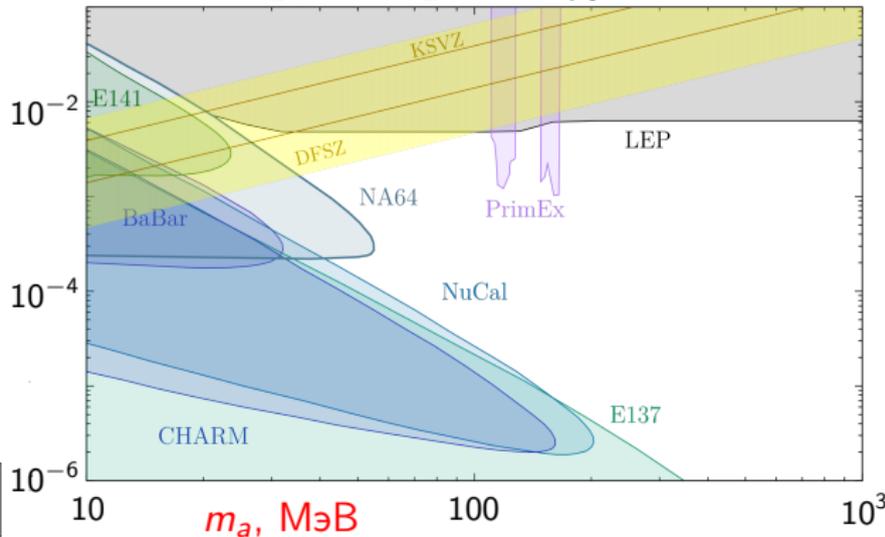
слайд Д. Кирпичникова



при  $m_a \ll 10$  МэВ

$g_{a\gamma\gamma}, \Gamma\text{эВ}^{-1}$

$$g_{a\gamma\gamma} \lesssim 2 \cdot 10^{-4} \Gamma\text{эВ}^{-1}$$



# Некоторые эксперименты: аксионы

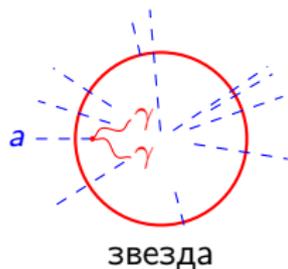
см. Irastorza, Redondo '18

## ● Охлаждение звезд

Излучение  $a$  из  $V_{\text{звезды}} \Rightarrow$  эволюция быстрее

$\Rightarrow$  больше красных гигантов

SN1987a: сигнал  $\nu$  короче

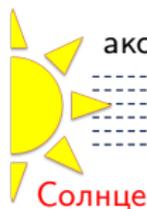


$$g_{a\gamma\gamma} \gtrsim 10^{-10} \text{ ГэВ}^{-1}$$

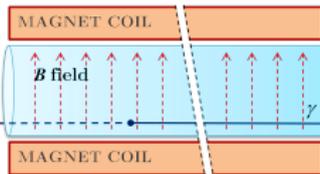
## ● Гелиоскопы [CAST, IAXO] (план)

Регистрация аксионов

от Солнца



аксионы



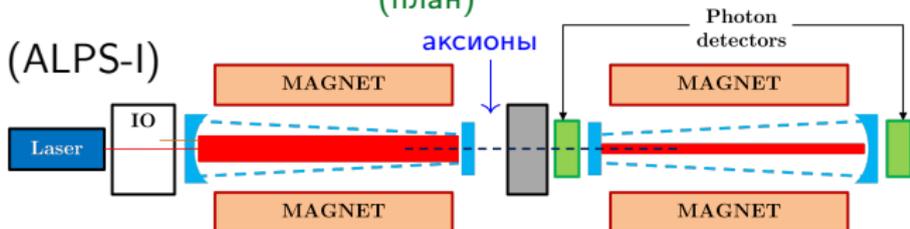
X-лучи  
 $\sim 3 \text{ КэВ}$

$$g_{a\gamma\gamma} \gtrsim 10^{-10} \text{ ГэВ}^{-1} \text{ (CAST)}$$

## ● Свет сквозь стену [ALPS, OSQAR, ALPS-II, III] (план)

$$g_{a\gamma\gamma} \gtrsim 10^{-7} \text{ ГэВ}^{-1} \text{ (ALPS-I)}$$

ВИДИМЫЙ СВЕТ



# Некоторые эксперименты: аксионы темной материи

- $f \sim 10^{27} (m_a/\mu\text{eV})^{-4} \gg 1$  — когерентное усиление!

*см. Irastorza, Redondo '18*

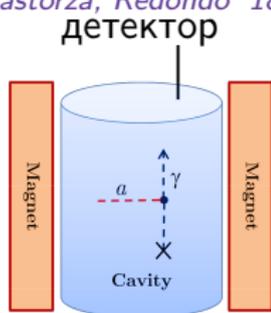
- Галоскопы (ADMX)

- + резонанс:  $m_a = \omega \sim L^{-1} \sim \mu\text{eV}$

- ⇒ высокая чувствительность!

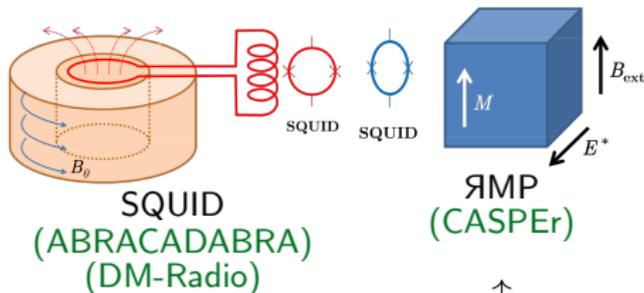
- резонанс: сканирование по  $\omega = m_a$

$$g_{a\gamma\gamma} \gtrsim 10^{-15} \text{ ГэВ}^{-1} \quad \text{при} \quad m_a \sim 2 - 3 \mu\text{eV} \quad (\text{ADMX})$$



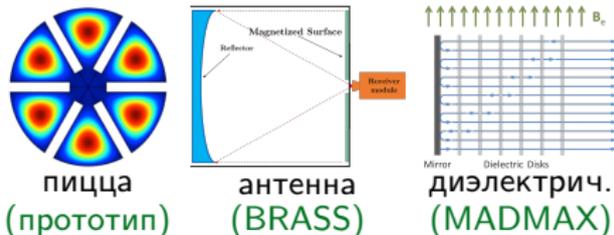
- Другие идеи — множество!

$m_a \ll \mu\text{eV}$  — большой объем



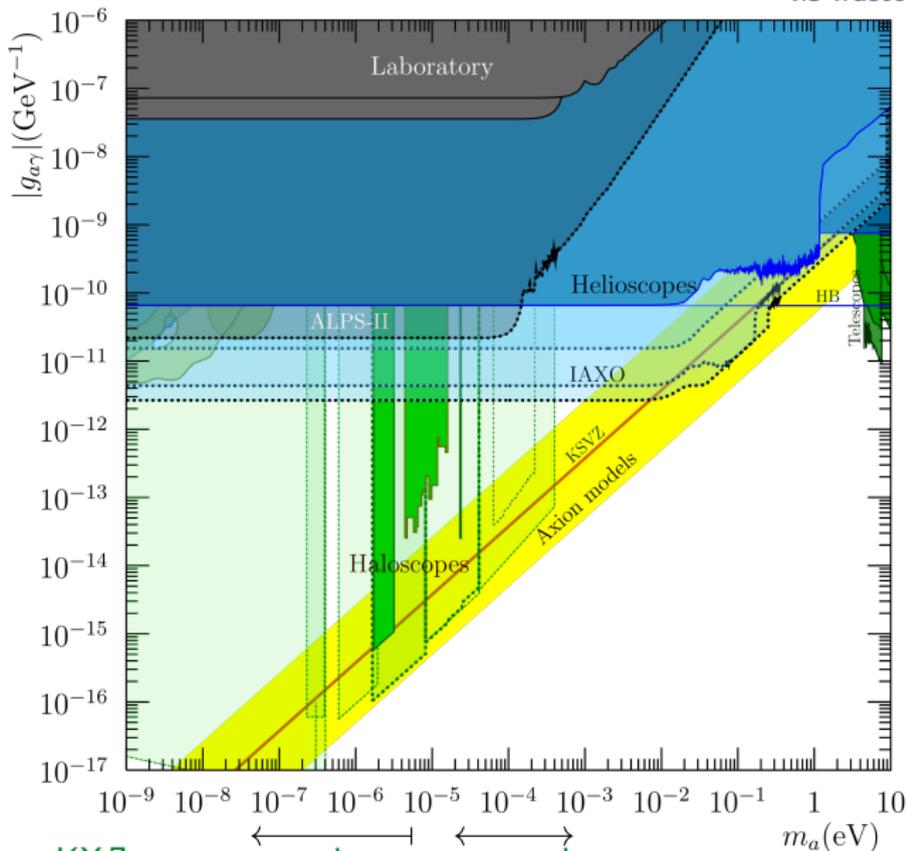
$$\uparrow \\ \partial_\mu a \bar{N} i \gamma^5 N$$

$m_a \gg \mu\text{eV}$  — малый объем



# Ограничения на аксионную темную материю

из Irastorza, Redondo '18



Аксион КХД:

Дмитрий Левков

← до инфл | после инфл →

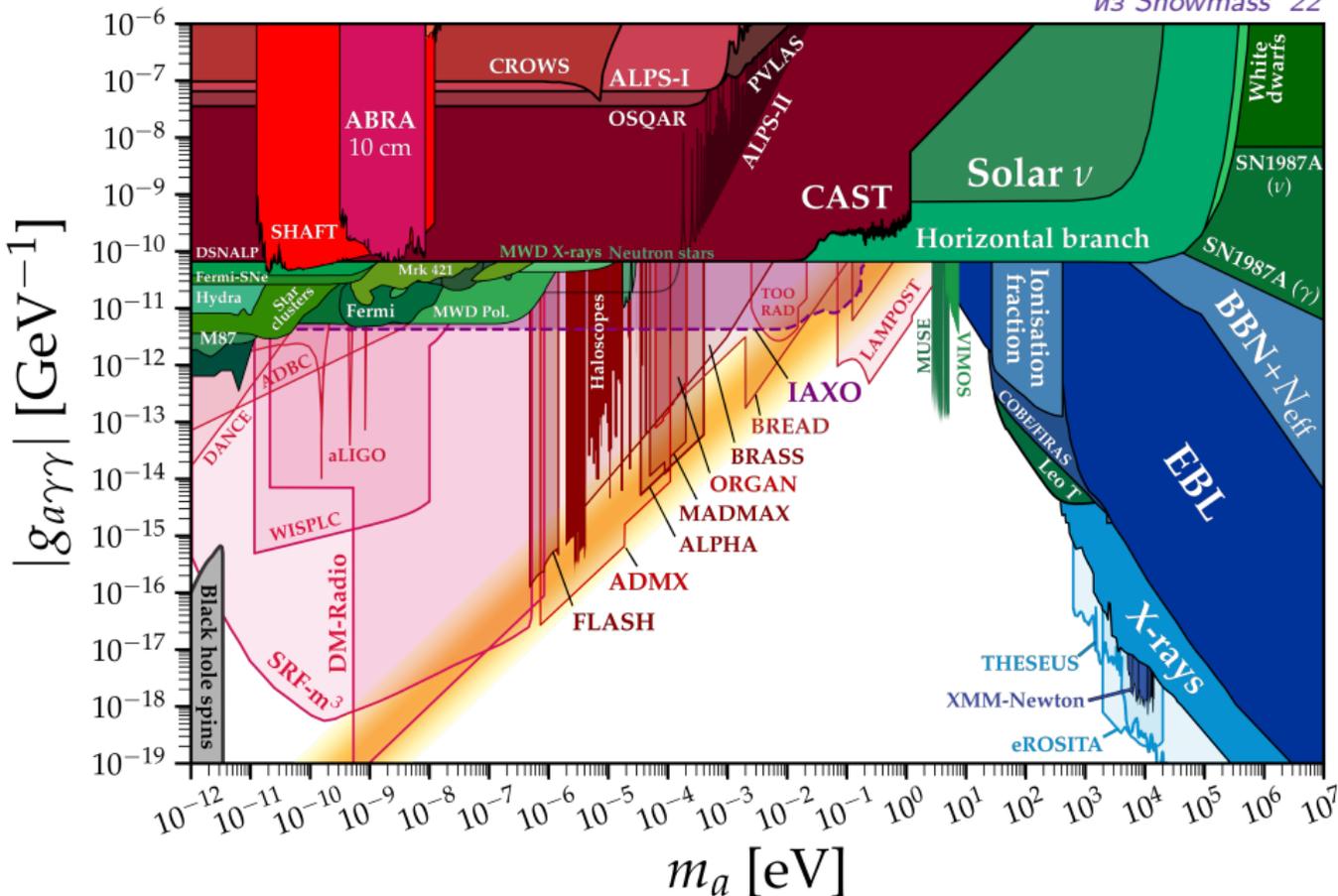
Аксионные звезды

ОИЯИ, 03/04/2024

15 / 19

# Планируемые эксперименты

из Snowmass '22



# Проявления миникластеров

## ● Подавление сигнала

*Eggemeier et al '22*

миникластеры  $\Rightarrow$  мини-пустоты

$\rightarrow$  в среднем: сигнал  $\times \underbrace{\sqrt{30\%}}_{0.5}$

$\rightarrow$  в мини-пустотах: сигнал/3.5

## ● Микролинзирование?

*Kolb, Tkachev '94*

$\rightarrow$  условия:  $M_{\text{МК}} \gtrsim 10^{-11} M_{\odot}$ ,  $m_a \gtrsim 10^{-3} \text{ эВ}$

не выполняются для акс КХД?

$\Rightarrow$  на грани ...

*Ellis et al '22*

## ● Приливные потоки

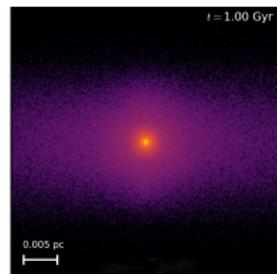
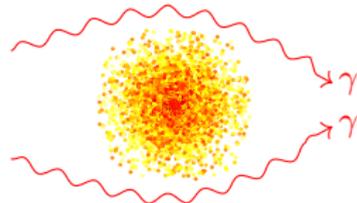
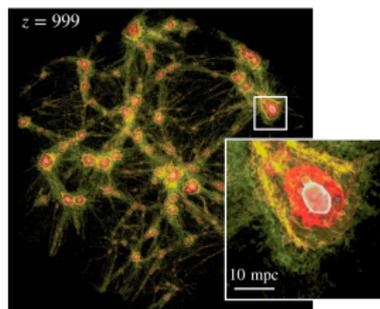
*Tinyakov et al '15, Shen et al '22*

$\rightarrow$  встреча с миникластером: раз в  $10^5$  лет

$\rightarrow$  Но: миникластер + звезда = поток

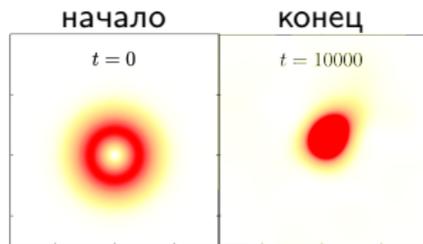
$\rightarrow$  встреча с потоком: раз в  $\sim 20$  лет

$\Rightarrow$  галоскопам может повезти!



# Проявления Бозе-звезд

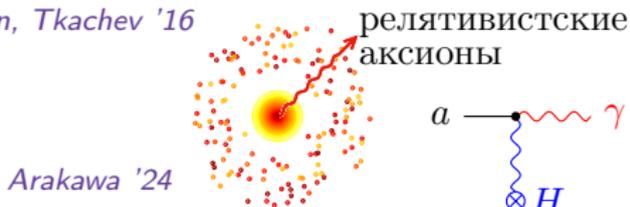
- **Вращающиеся распадаются** *Dmitriev et al '21*  
сбрасывают угловой момент  
⇒ плохая замена ч. дырам *Sanchis-Gual '19*



- **Тяжелые коллапсируют** *DL, Panin, Tkachev '16*  
 $\lambda a^4$  притяжение ⇒ **Бозе-новые**

Аксионы КХД:  $M_{bs} \gtrsim 10^{-13} M_{\odot}$

Магнитное поле ⇒ **вспышки!**

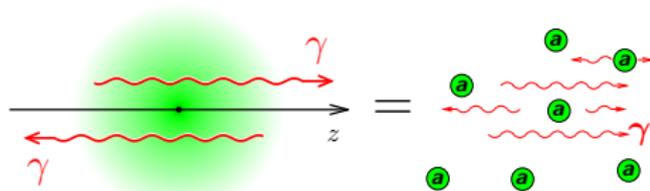


- **Аксионный лазер**

лавина  $a \rightarrow \gamma\gamma$  *Tkachev '87*

→  $g_{a\gamma\gamma} \gtrsim 10^2 \cdot g_{a\gamma\gamma}^{\text{КХД}}$

*DL, Panin, Tkachev '20*



⇒ **Вспышки на небе!** — быстрые радиовсплески?

→ Могут зажигаться из-за Бозе-новой

⇒ Реионизация Вселенной

⇒ Вклад в диффузный ради фон

*Escudero et al '23*

*Eby, Takhistov '24*

# Выводы

## Сверхлегкая темная материя

- Обоснована теоретически
- Ведет к необычной космологии
- Миникластеры и Бозе-звезды — интересные объекты
- Поиск аксионов — творческое дело!

Тяжелая ТМ —  
это классика



А легкая —  
это тяжелый рок!



Спасибо за внимание!

Поддержано грантом РФФ 22-12-00215