

Осцилляции позитрония в зеркальную материю

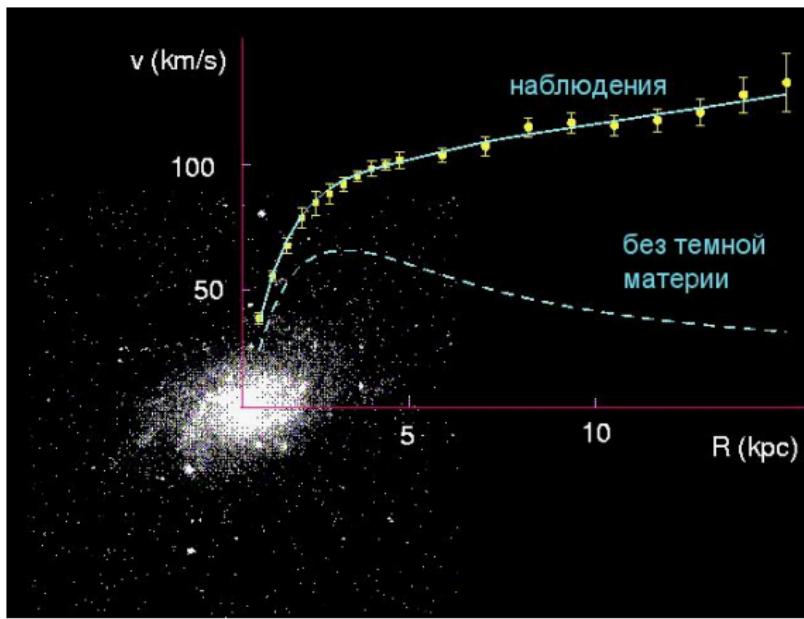
Токарева Анна

МГУ

January 12, 2012

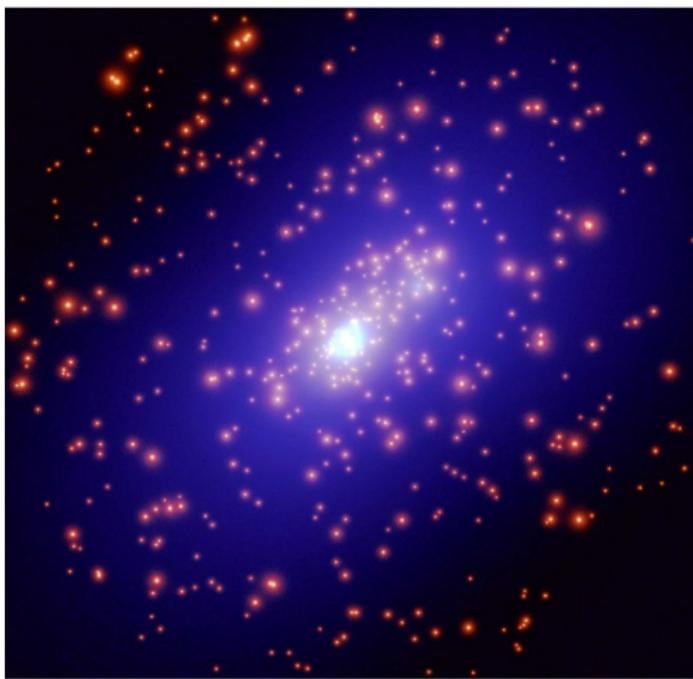
Проблема темной материи

■ Кривые вращения галактик



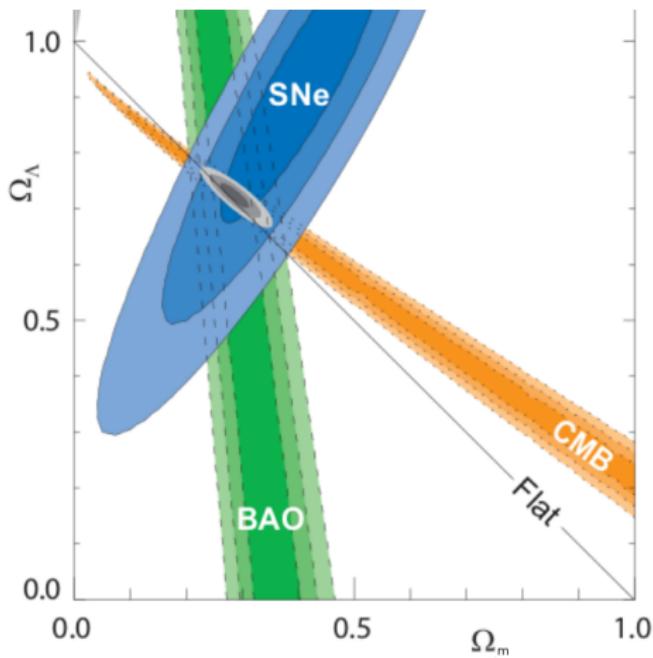
Проблема темной материи

- Распределение массы в скоплениях галактик



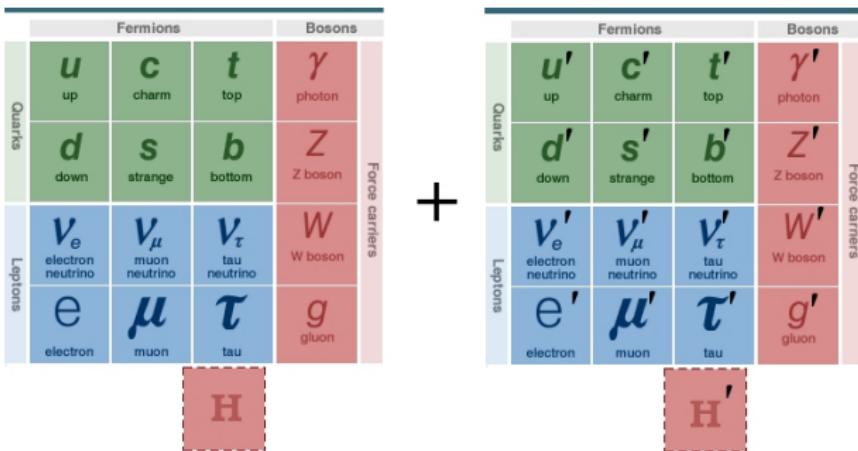
Проблема темной материи

■ Космология:



Зеркальный мир - идея

Стандартная модель + копия



$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \mathcal{L}' + \mathcal{L}_{int}$$

Зеркальный мир - идея

L_{int} - взаимодействия между нашими полями и зеркальными:

Зеркальный мир - идея

L_{int} - взаимодействия между нашими полями и зеркальными:

- гравитация (обязательно!)

Зеркальный мир - идея

L_{int} - взаимодействия между нашими полями и зеркальными:

- гравитация (обязательно!)

Возможные перенормируемые взаимодействия:

Зеркальный мир - идея

L_{int} - взаимодействия между нашими полями и зеркальными:

- гравитация (обязательно!)

Возможные перенормируемые взаимодействия:

- $L_{int} = \frac{\epsilon}{2} F^{\mu\nu} F'_{\mu\nu}$, $F_{\mu\nu}$ - тензор напряженности электромагнитного поля



Зеркальный мир - идея

L_{int} - взаимодействия между нашими полями и зеркальными:

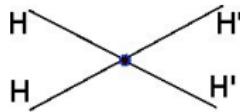
- гравитация (обязательно!)

Возможные перенормируемые взаимодействия:

- $L_{int} = \frac{\epsilon}{2} F^{\mu\nu} F'_{\mu\nu}$, $F_{\mu\nu}$ - тензор напряженности электромагнитного поля



- $L_{int} = \eta(H^\dagger H)(H'^\dagger H')$, H - поле Хиггса



и все!

Почему зеркальный?

Зеркальная симметрия в слабых взаимодействиях нарушена:

$$P(world) \neq world$$

Как восстановить? (обобщить?)

Почему зеркальный?

Зеркальная симметрия в слабых взаимодействиях нарушена:

$$P(world) \neq world$$

Как восстановить? (обобщить?)

A - преобразование, переводящее частицу в зеркальную.

Тогда $A(P(world)) = world!$

Почему зеркальный?

Зеркальная симметрия в слабых взаимодействиях нарушена:

$$P(world) \neq world$$

Как восстановить? (обобщить?)

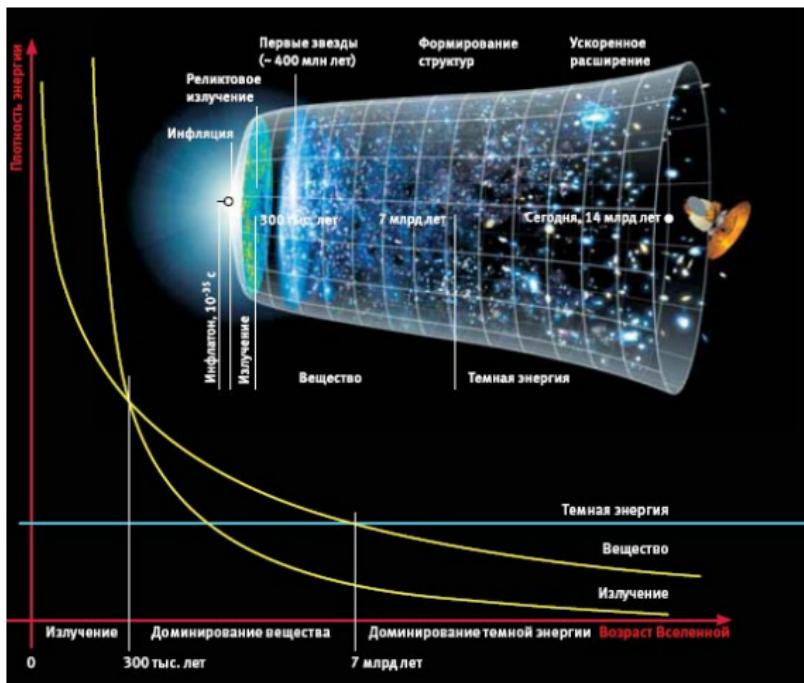
A - преобразование, переводящее частицу в зеркальную.

Тогда $A(P(world)) = world$!

И.Кобзарев, Л.Окунь, И.Померанчук, 1966 г.

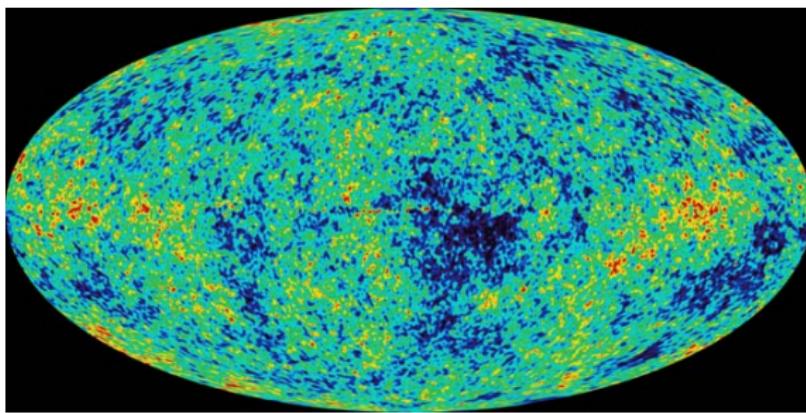
Как сделать из зеркальных частиц темную материю?

Космология



Как сделать из зеркальных частиц темную материю?

Космология



Как сделать из зеркальных частиц темную материю?

Космология

Другие начальные условия после инфляции - там холоднее →
все этапы космологической эволюции зеркальной плазмы
происходят раньше

Как сделать из зеркальных частиц темную материю?

Космология

Другие начальные условия после инфляции - там холоднее →
все этапы космологической эволюции зеркальной плазмы
происходят раньше

- Первичный нуклеосинтез → $\frac{T'}{T} = x < 0.5$.

Как сделать из зеркальных частиц темную материю?

Космология

Другие начальные условия после инфляции - там холоднее →
все этапы космологической эволюции зеркальной плазмы
происходят раньше

- Первичный нуклеосинтез → $\frac{T'}{T} = x < 0.5$. Влияние лишних степеней свободы на темп расширения

Как сделать из зеркальных частиц темную материю?

Космология

Другие начальные условия после инфляции - там холоднее →
все этапы космологической эволюции зеркальной плазмы
происходят раньше

- Первичный нуклеосинтез → $\frac{T'}{T} = x < 0.5$. Влияние лишних степеней свободы на темп расширения
- Задолго до рекомбинации в обычном веществе темная материя должна стать зеркально-электрически нейтральной → $x < 0.3$.

Как сделать из зеркальных частиц темную материю?

Космология

Другие начальные условия после инфляции - там холоднее →
все этапы космологической эволюции зеркальной плазмы
происходят раньше

- Первичный нуклеосинтез → $\frac{T'}{T} = x < 0.5$. Влияние лишних степеней свободы на темп расширения
- Задолго до рекомбинации в обычном веществе темная материя должна стать зеркально-электрически нейтральной → $x < 0.3$. Реликтовое излучение, крупномасштабная структура Вселенной

Как сделать из зеркальных частиц темную материю?

Астрофизика

Результат нуклеосинтеза:

Обычная материя

$$He = 0.25$$

Зеркальная материя

$$x = 0.1 \rightarrow$$

$$He' = 0.6$$

Как сделать из зеркальных частиц темную материю?

Астрофизика

Результат нуклеосинтеза:

Обычная материя

$$He = 0.25$$

Зеркальная материя

$$\begin{aligned}x &= 0.1 \rightarrow \\He' &= 0.6\end{aligned}$$

- Эволюция зеркальных звезд происходит в ~ 30 раз быстрее.

Z.Berezhiani et al., 'Evolutionary and structural properties of mirror star MACHOs', astro-ph/0507153

Как сделать из зеркальных частиц темную материю?

Астрофизика

Результат нуклеосинтеза:

Обычная материя

$$He = 0.25$$

Зеркальная материя

$$x = 0.1 \rightarrow$$

$$He' = 0.6$$

- Эволюция зеркальных звезд происходит в ~ 30 раз быстрее.

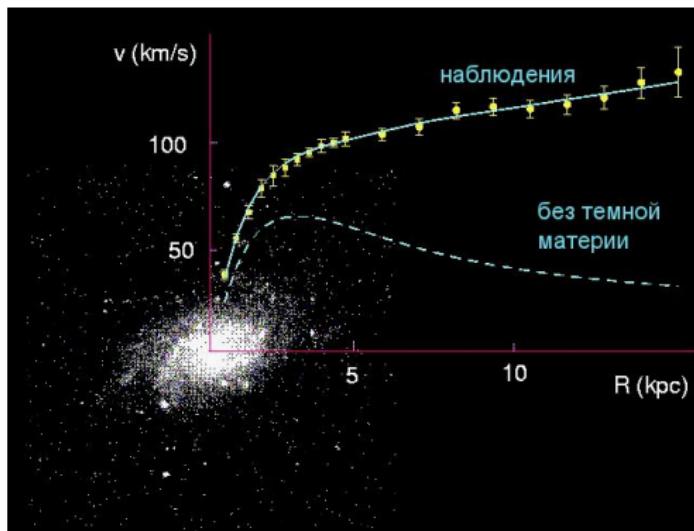
Z.Berezhiani et all, 'Evolutionary and structural properties of mirror star MACHOs', astro-ph/0507153

- Частые вспышки зеркальных сверхновых подогревают невидимое вещество в галактиках, в результате чего оно образует сферическое гало, в отличие от обычного вещества, формирующего диск

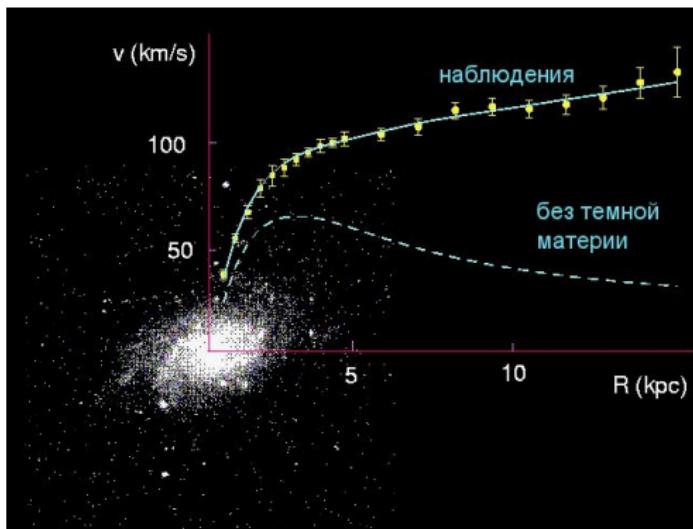
R. Foot, R.R. Volkas, Spheroidal galactic halos and mirror dark matter, astro-ph/0407522

Как сделать из зеркальных частиц темную материю?

Астрофизика

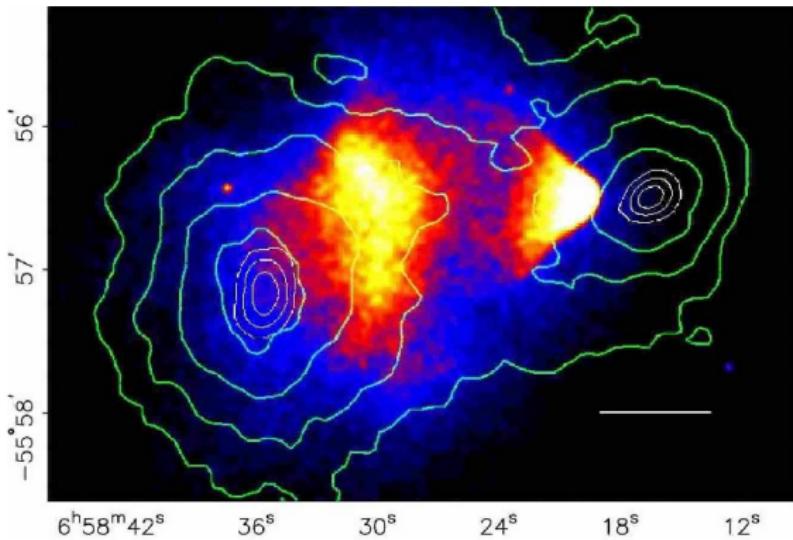


Как сделать из зеркальных частиц темную материю? Астрофизика

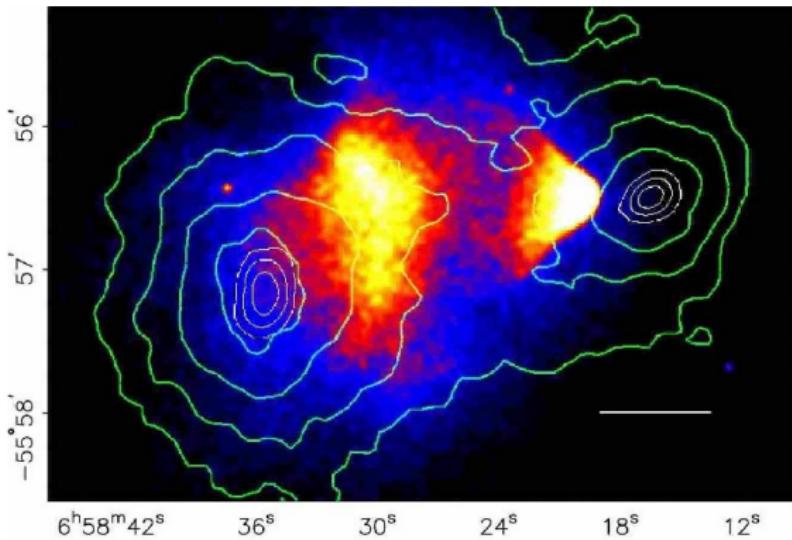


Найденные (?) в гало по микролинзированию невидимые объекты
МАЧО с массами $0.2 - 0.9 M_{Sun}$ - зеркальные звезды?

Возможная проблема - Bullet Cluster



Возможная проблема - Bullet Cluster



Ограничение на сечение рассеяния DM на себе $\frac{\sigma}{m} < 4 \text{ cm}^2/\text{g}$

Зеркальный мир - идея

L_{int} - взаимодействия между нашими полями и зеркальными:

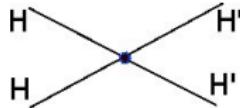
- гравитация (обязательно!)

Возможные перенормируемые взаимодействия:

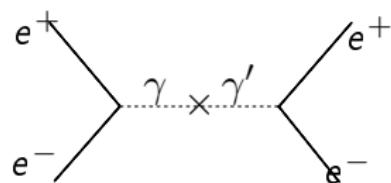
- $L_{int} = \frac{\epsilon}{2} F^{\mu\nu} F'_{\mu\nu}$, $F_{\mu\nu}$ - тензор напряженности электромагнитного поля



- $L_{int} = \eta(H^+ H)(H'^+ H')$, H - поле Хиггса



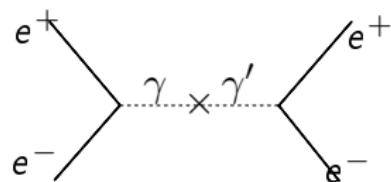
Возможный эффект - исчезновение позитрония



$$\langle \text{Ops} | L_{int} | \text{Ops}' \rangle = 2\pi\epsilon f \equiv \frac{\delta}{2},$$

$$f = 8.7 \cdot 10^4 \text{ MHz}$$

Возможный эффект - исчезновение позитрония

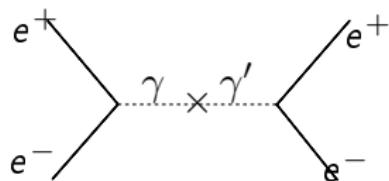


$$\langle \text{Ops} | L_{int} | \text{Ops}' \rangle = 2\pi\epsilon f \equiv \frac{\delta}{2},$$

$$f = 8.7 \cdot 10^4 \text{ MHz}$$

$$P(oPs \rightarrow oPs') = \sin^2\left(\frac{\delta t}{2}\right) e^{-\lambda t}$$

Возможный эффект - исчезновение позитрония



$$\langle \text{Ops} | L_{int} | \text{Ops}' \rangle = 2\pi\epsilon f \equiv \frac{\delta}{2},$$

$$f = 8.7 \cdot 10^4 \text{ MHz}$$

$$P(oPs \rightarrow oPs') = \sin^2\left(\frac{\delta t}{2}\right) e^{-\lambda t}$$

$$Br = \lambda \int_0^\infty P(oPs \rightarrow oPs') dt = \frac{\delta^2}{2} \frac{1}{\lambda^2 + \delta^2} \approx \frac{\delta^2}{2\lambda^2}$$

Ограничения на ϵ

- Исчезновение o-Ps: $\epsilon < 1.55 \cdot 10^{-7}$

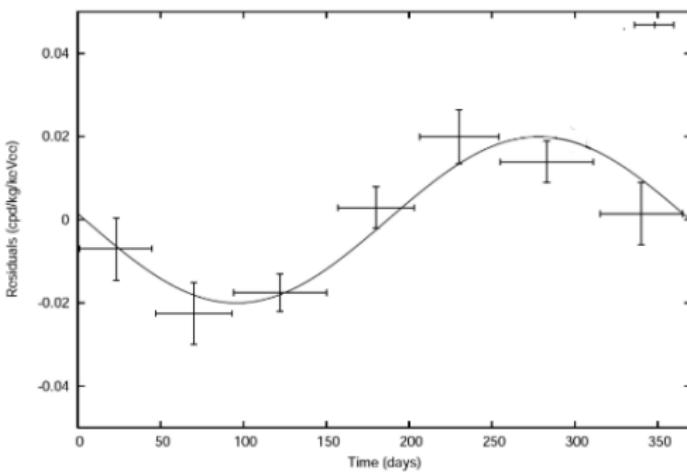
Ограничения на ϵ

- Исчезновение o-Ps: $\epsilon < 1.55 \cdot 10^{-7}$
- Космология: $\epsilon < 3 \cdot 10^{-10}$ - **симметричная модель**
Слишком сильное взаимодействие приведет к выравниванию температур, а должно быть $T'/T < 0.3$.
(Z.Berezhiani, A.Lepidi, 2009)

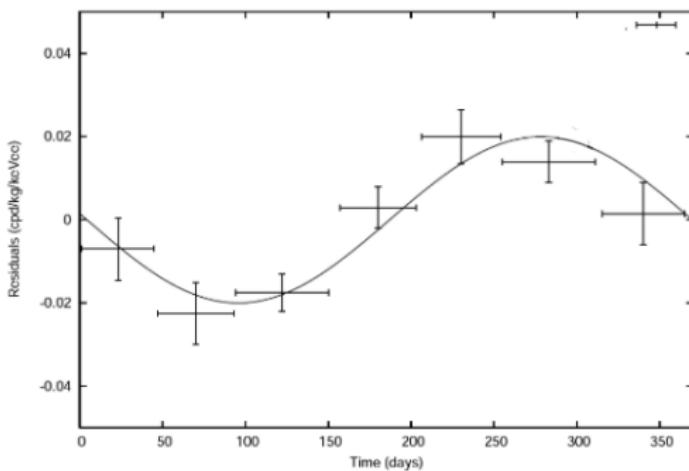
Ограничения на ϵ

- Исчезновение o-Ps: $\epsilon < 1.55 \cdot 10^{-7}$
- Космология: $\epsilon < 3 \cdot 10^{-10}$ - **симметричная модель**
Слишком сильное взаимодействие приведет к выравниванию температур, а должно быть $T'/T < 0.3$.
(Z.Berezhiani, A.Lepidi, 2009)
- **Асимметричная модель** $\epsilon < 3 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{\frac{m'}{m}}$

Сигнал DAMA

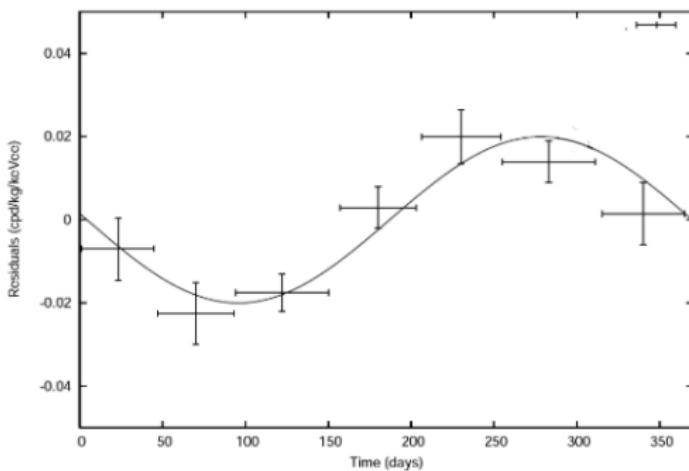


Сигнал DAMA



8.9σ

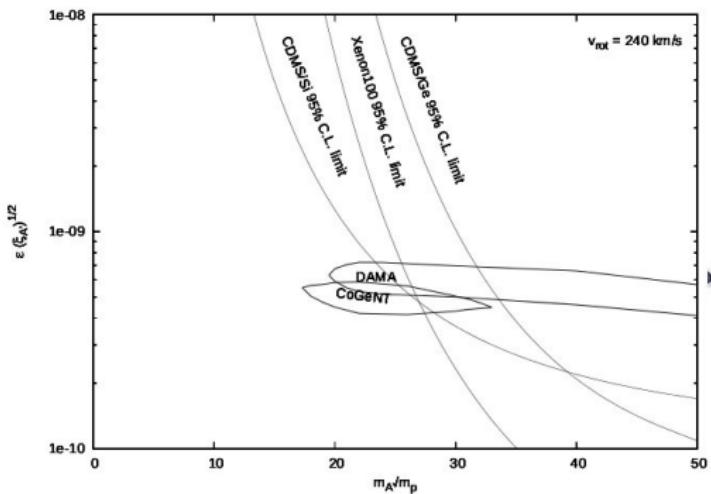
Сигнал DAMA



8.9σ

CoGent - подтверждение модуляции на уровне 2.9σ

DAMA, CoGent, CDMS, XENON100



Объяснение - резерфордовское рассеяние зеркальных ядер с зарядом ϵeZ на ядрах мишени (R.Foot, 2011)

DAMA, CoGent, CDMS, XENON100

- Объяснение - резерфордовское рассеяние зеркальных ядер с зарядом ϵeZ на ядрах мишени (R.Foot)

DAMA, CoGent, CDMS, XENON100

- Объяснение - резерфордовское рассеяние зеркальных ядер с зарядом ϵeZ на ядрах мишени (R.Foot)
- $\frac{d\sigma}{dE} \sim \frac{1}{E^2}$

DAMA, CoGent, CDMS, XENON100

- Объяснение - резерфордовское рассеяние зеркальных ядер с зарядом ϵeZ на ядрах мишени (R.Foot)
- $\frac{d\sigma}{dE} \sim \frac{1}{E^2}$
- $\epsilon \sqrt{\eta_{A'}} \approx (7 \pm 3) \cdot 10^{-10}$
- $\frac{m_{A'}}{m_p} \approx 22 \pm 8$

DAMA, CoGent, CDMS, XENON100

- Объяснение - резерфордовское рассеяние зеркальных ядер с зарядом ϵeZ на ядрах мишени (R.Foot)
- $\frac{d\sigma}{dE} \sim \frac{1}{E^2}$
- $\epsilon \sqrt{\eta_{A'}} \approx (7 \pm 3) \cdot 10^{-10}$
- $\frac{m_{A'}}{m_p} \approx 22 \pm 8$
- Диапазон энергий отсюда: DAMA - 2-8 keV, CoGent - 0.5-2 keV

DAMA, CoGent, CDMS, XENON100

- Объяснение - резерфордовское рассеяние зеркальных ядер с зарядом ϵeZ на ядрах мишени (R.Foot)
- $\frac{d\sigma}{dE} \sim \frac{1}{E^2}$
- $\epsilon \sqrt{\eta_{A'}} \approx (7 \pm 3) \cdot 10^{-10}$
- $\frac{m_{A'}}{m_p} \approx 22 \pm 8$
- Диапазон энергий отсюда: DAMA - 2-8 keV, CoGent - 0.5-2 keV
- XENON100, CDMS не видят сигнала: порог CDMS - 10 keV

Ограничения на ϵ

- Исчезновение o-Ps: $\epsilon < 1.55 \cdot 10^{-7}$

Ограничения на ϵ

- Исчезновение o-Ps: $\epsilon < 1.55 \cdot 10^{-7}$
- Космология: $\epsilon < 3 \cdot 10^{-10}$

Ограничения на ϵ

- Исчезновение o-Ps: $\epsilon < 1.55 \cdot 10^{-7}$
- Космология: $\epsilon < 3 \cdot 10^{-10}$
- DAMA, COGENT: $\epsilon \sim 10^{-9}$

Ограничения на ϵ

- Исчезновение о-Ps: $\epsilon < 1.55 \cdot 10^{-7}$
- Космология: $\epsilon < 3 \cdot 10^{-10}$
- DAMA, COGENT: $\epsilon \sim 10^{-9}$
- **Возможности нового эксперимента (S.Gninenko, P. Crivelli et al, 2010): $\epsilon \sim 10^{-9}$**

Эксперимент

Эксперимент

- В рамках проекта AEgIS было предложено провести эксперимент (Crivelli, Gningko et al, 2010) по поиску запрещенных распадов ортопозитрония. Основная цель проекта - получение макроскопических количеств антивещества.

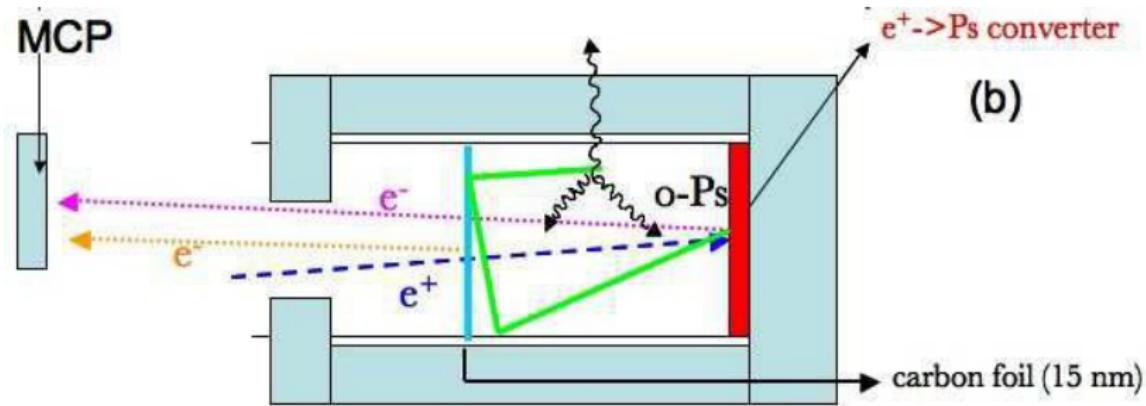
Эксперимент

- В рамках проекта AEgIS было предложено провести эксперимент (Crivelli, Gningko et al, 2010) по поиску запрещенных распадов ортопозитрония. Основная цель проекта - получение макроскопических количеств антивещества.
- Начальная стадия - получение ортопозитрония. (связанное состояние e^+e^- со спином 1)

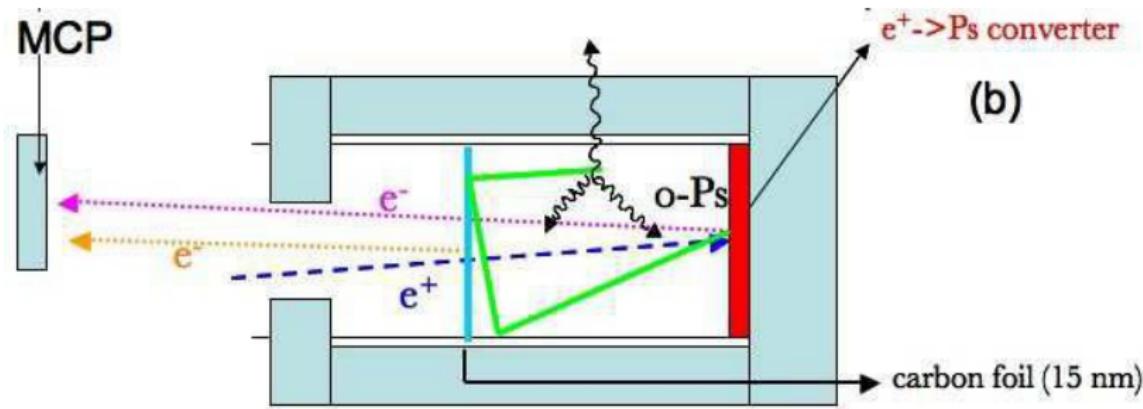
Эксперимент

- В рамках проекта AEgIS было предложено провести эксперимент (Crivelli, Gnenko et al, 2010) по поиску запрещенных распадов ортопозитрония. Основная цель проекта - получение макроскопических количеств антивещества.
- Начальная стадия - получение ортопозитрония. (связанное состояние e^+e^- со спином 1)
- Идея - искать возможное исчезновение ортопозитрония из замкнутого объема, окруженного калориметром (регистрируются фотоны от аннигиляции α -Ps) (P.Crivelly, S.Gninenko et all, 2010)

Эксперимент



Эксперимент



$$p - Ps \rightarrow 2\gamma \text{ (0, 125 нс)}, \quad o - Ps \rightarrow 3\gamma \text{ (143 нс)}$$

Факторы реальной установки

- В вакууме для $\epsilon = 10^{-9}$ имеем $\delta = 1090 \text{ s}^{-1}$

$$Br = \lambda \int_0^\infty P(oPs \rightarrow oPs') dt = \frac{\delta^2}{2\lambda^2} = 1.2 \cdot 10^{-8}$$

Факторы реальной установки

- В вакууме для $\epsilon = 10^{-9}$ имеем $\delta = 1090 \text{ s}^{-1}$

$$Br = \lambda \int_0^\infty P(oPs \rightarrow oPs') dt = \frac{\delta^2}{2\lambda^2} = 1.2 \cdot 10^{-8}$$

- Столкновения с молекулами воздуха
- Внешние поля: электрические и магнитные
- Столкновения со стенками калориметра

Формула: газ + внешнее поле

$$Br = \frac{\delta^2}{2} \frac{\lambda + w/2}{\lambda} \frac{1}{(\lambda + w/2)^2 + (\Delta - w_{Re})^2}$$

- $\delta = 2 < Ops | L_{int} | Ops' > = 4\pi\epsilon f \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$
- $\lambda = 7,04 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ - обратное время жизни o-Ps
- w - частота столкновений с газом
- $\Delta = E' - E$ - разность энергий (энергия внешнего поля, разность масс для несимметричного случая)
- $w_{Re} = \eta w$, $\eta = \sqrt{\frac{4\pi}{3mT\sigma}}$. $\eta \sim 3$ для $T \sim 300$ К

Учет столкновений со стенками - идея

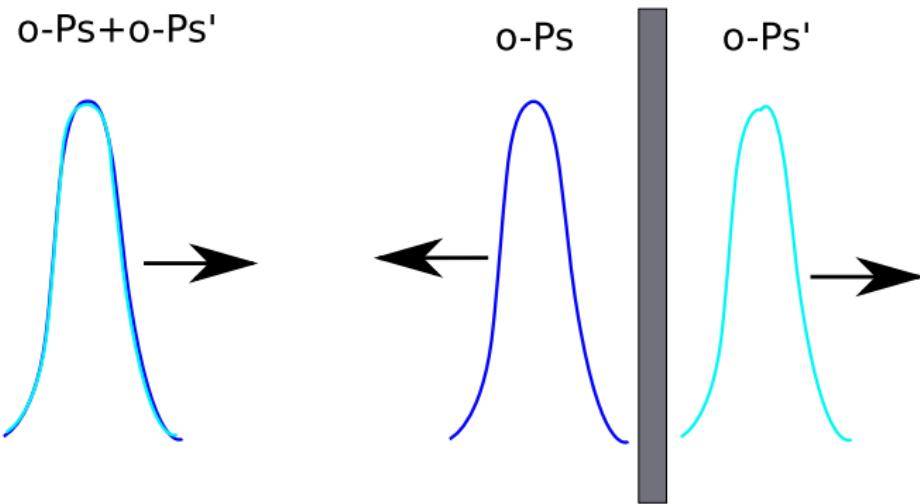
До столкновения:

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_1 & y \\ y^* & \rho_2 \end{pmatrix}$$

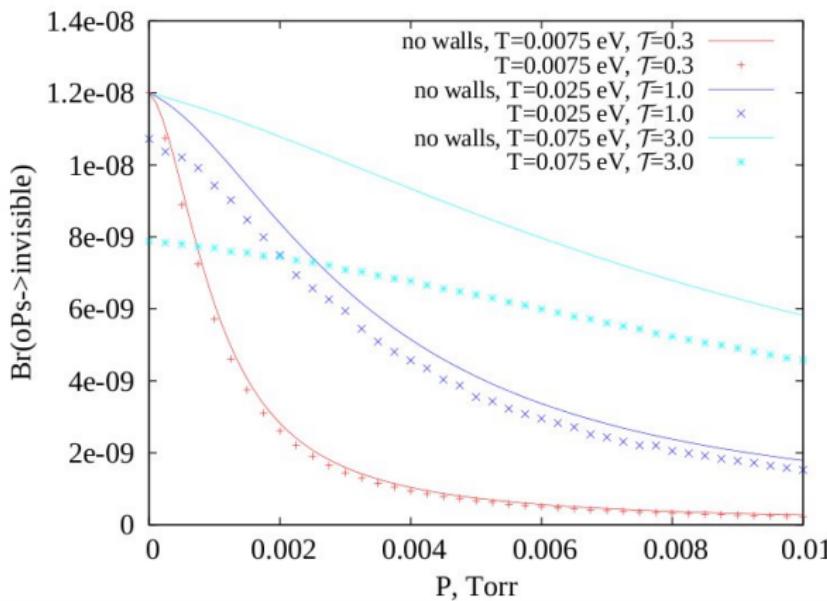
После столкновения:

$$\rho = \int d^3x \begin{pmatrix} \psi\psi^* & \psi^*\psi' \\ \psi\psi'^* & \psi'\psi'^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_1 & 0 \\ 0 & \rho_2 \end{pmatrix}$$

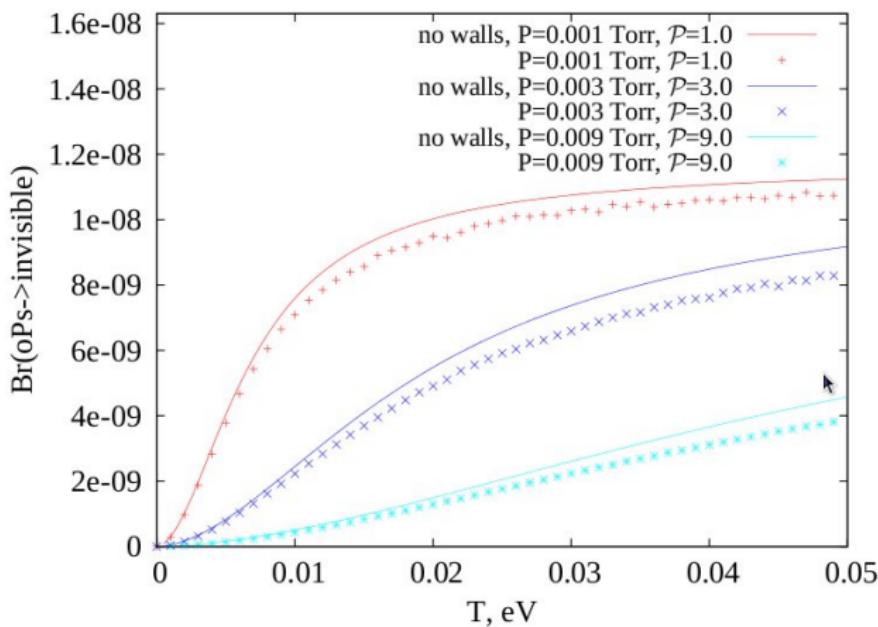
Иллюстрация



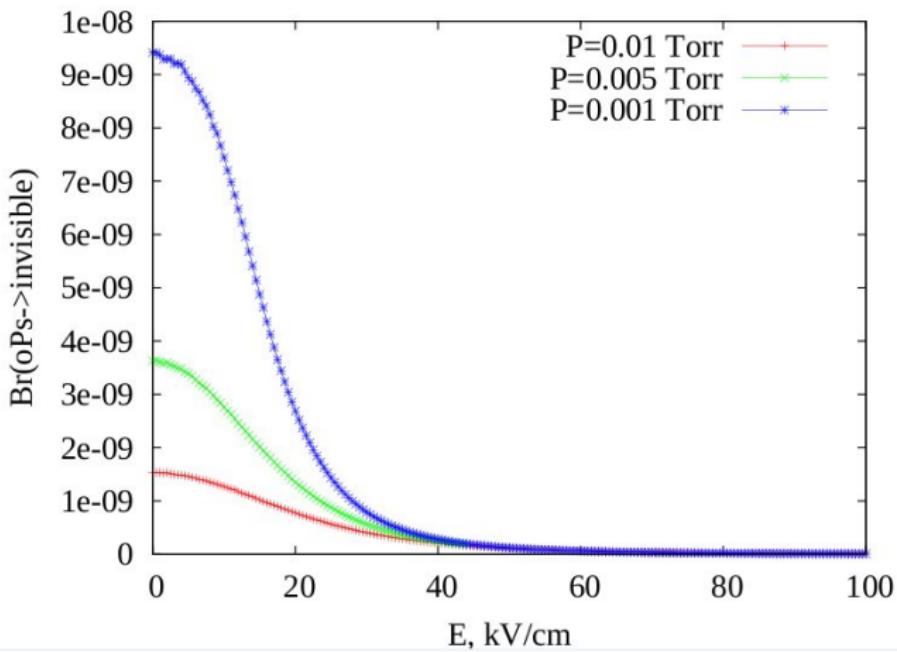
Зависимость вероятности исчезновения от давления



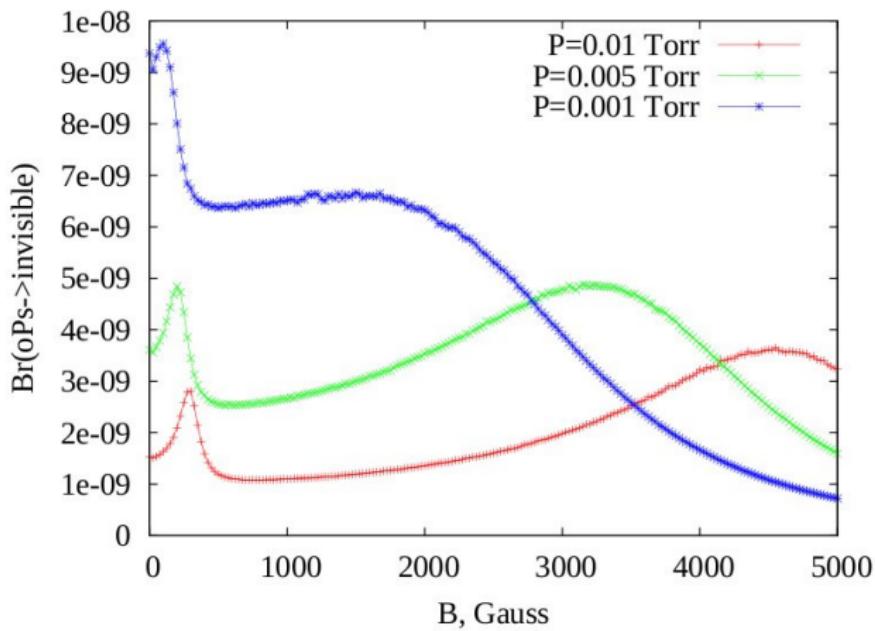
Зависимость вероятности исчезновения от температуры



Электрическое поле



Магнитное поле



Выводы

- Осцилляции $o - Ps$ – $o - Ps'$ – самый чувствительный путь поиска зеркальной материи в лаборатории и получения ограничений на величину смешивания фотона с зеркальным партнёром.

Выводы

- Осцилляции $o - Ps$ – $o - Ps'$ – самый чувствительный путь поиска зеркальной материи в лаборатории и получения ограничений на величину смешивания фотона с зеркальным партнёром.
- Получена аналитическая формула для вероятности исчезновения ортопозитрония в будущем эксперименте без учета столкновений со стенками.

Выводы

- Осцилляции $o - Ps$ – $o - Ps'$ – самый чувствительный путь поиска зеркальной материи в лаборатории и получения ограничений на величину смешивания фотона с зеркальным партнёром.
- Получена аналитическая формула для вероятности исчезновения ортопозитрония в будущем эксперименте без учета столкновений со стенками.
- Рассмотрено влияние внешних полей.

Выводы

- Осцилляции $o - Ps$ – $o - Ps'$ – самый чувствительный путь поиска зеркальной материи в лаборатории и получения ограничений на величину смешивания фотона с зеркальным партнером.
- Получена аналитическая формула для вероятности исчезновения ортопозитрония в будущем эксперименте без учета столкновений со стенками.
- Рассмотрено влияние внешних полей.
- Численный расчет вероятности для реального эксперимента в замкнутом объеме с заданным распределением по скоростям
(С. Демидов)

Спасибо за внимание!