

Поиск тяжелой темной материи методами астрофизики частиц высоких энергий

Михаил Кузнецов

Научный руководитель
д.ф.-м.н. Григорий Игоревич Рубцов



INR

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Институт ядерных исследований, Москва
Сентябрь 2017

- Введение & мотивация
 - Астрофизика частиц: многокомпонентный подход (multimessenger)
 - Проблема темной материи
 - Тяжелая темная материя и ее непрямой поиск
- Частицы высоких энергий от распада тяжелой темной материи (Гл.1)
 - Физика распада
 - Вклады различных структур темной материи в поток частиц
 - Распространение частиц в космосе
- Ограничения из данных о фотонах высоких энергий (Гл.2)
 - Обзор наблюдательных данных
 - Ограничения на время жизни темной материи
- Ограничения из данных о нейтрино высоких энергий (Гл.3)
 - Обзор наблюдательных данных
 - Ограничения на время жизни темной материи
 - Интерпретация нейтрино IceCube
- Ограничения из данных об анизотропии космических лучей (Гл.4)
 - Обзор наблюдательных данных
 - Ограничения на время жизни темной материи
 - Перспективы дальнейшего поиска

Существенный прогресс за последнее десятилетие:
Fermi, IceCube, Pierre Auger, Telescope Array, HESS и др.

В частности:

I Достижения

- Fermi : ГэВ фотонный сигнал от центра Галактики Daylan et al. '14
- IceCube : регистрация нейтрино с энергиями до ПэВ Aartsen et al. '13
- Auger & TA : наблюдение ГЗК-обрезания Abraham et al. '08; Abu-Zayyad et al. '12

II Проблемы

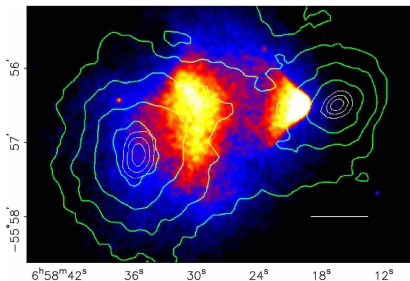
- Происхождение сигнала Fermi от центра Галактики
- Происхождение нейтрино IceCube
- Происхождение и состав космических лучей ультравысоких энергий

Проблема темной материи

- Скорости галактик в скоплениях
- Кривые вращения галактик
- Линзирование в скоплениях
- Угловой спектр CMB
- Масштаб BAO
- Крупномасштабная структура Вселенной
и т.д.



$$\Lambda\text{CDM}, \frac{\Omega_{DM}}{\Omega_c} = 0.26$$

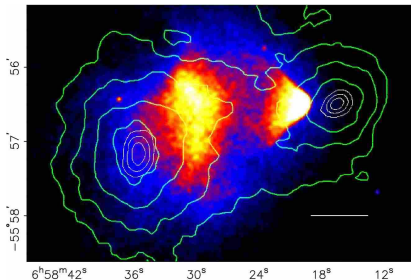


Проблема темной материи

- Скорости галактик в скоплениях
- Кривые вращения галактик
- Линзирование в скоплениях
- Угловой спектр CMB
- Масштаб BAO
- Крупномасштабная структура Вселенной и т.д.



$$\Lambda\text{CDM}, \frac{\Omega_{DM}}{\Omega_c} = 0.26$$



$$\text{WIMP: } m_\chi \sim \text{ТэВ}$$

Good:

- Мотивирован из SUSY (LSP) и космологии (WIMP miracle)
- Потенциально доступен для прямого детектирования

Bad:

- SUSY на масштабе до ~ 2 ТэВ не найдена **ATLAS '16**
- Прямое детектирование WIMP не произошло **LUX '17, Xenon1T '17**

Тяжелая темная материя: особенности и поиск

Частицы X с массой $M_X \gg 100$ ТэВ и временем жизни $\tau \gg 10^{10}$ лет

Kuzmin, Rubakov '97; Berezhinsky et al. '97

1. Нетермальная генерация в ранней Вселенной:
 - Нестационарные грав. поля
 - Неравновесная плазма
 - Распад инфлатона
2. Слишком маленькая концентрация сегодня \Rightarrow недоступно к прямому детектированию.
3. Непрямое детектирование чувствительно только к распаду ($\sigma_{\text{анн.}} \lesssim \frac{1}{M_X^2}$).
4. Для разных моделей генерации DM существуют ограничения на массу частиц. Мы рассматриваем $10^7 \leq M_X \leq 10^{16}$ ГэВ.

Тяжелая темная материя: физика распада I

- Распад описывается на языке первичных каналов, например $X \rightarrow b\bar{b}$, $X \rightarrow \mu^+\mu^-$ и т.д. Можно задать модель с известным брэнчингом.
- Возникает каскад с полной или частичной адронизацией.
- В конечном состоянии набор частиц $\{e^\pm, p, \bar{p}, \gamma, \nu_{e,\mu,\tau}, \bar{\nu}_{e,\mu,\tau}\}$.

Методы вычисления:

Полное Монте-Карло моделирование каскада (PYTHONIA, HERWIG).

- Максимальная доступная точность
- Подходит для любых каналов распада
- Можно получить спектр при любых $x \equiv \frac{2E}{M_X}$
- Медленное вычисление
- Сложно в использовании
- Для слишком больших энергий (масс DM) не работает (по техническим причинам)

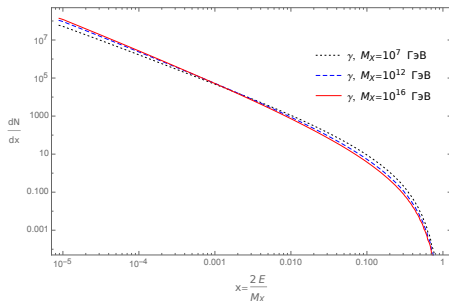
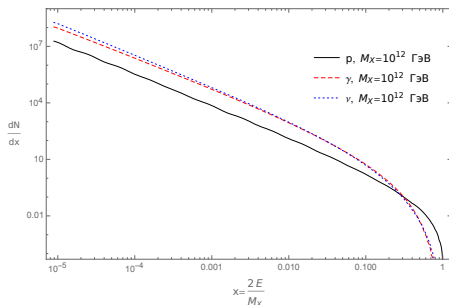
Численно-аналитическое вычисление с помощью фрагментационных функций

- Более низкая точность
- Полностью разработано только для адронных каналов распада
- Верно только в ограниченной области x (для слишком малых x не подходит)
- Быстрое вычисление
- С помощью уравнений ДГЛАП можно использовать для любых M_X

Тяжелая темная материя: физика распада II

Предположения:

1. Решение ДГЛАП в ведущем порядке по α_s с помощью численного кода [Aloisio et al. '03](#).
2. Пренебрегаем электрослабыми поправками к спектру [Cirelli et al. '11](#).
3. Основной поток фотонов идет от распада $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$.
4. Поток нейтрино от цепочки распадов $\pi \rightarrow \mu\nu_\mu$, $\mu \rightarrow e\nu_\mu\nu_e$.
5. Вклад каонов порядка 10%, остальное еще меньше — можем пренебречь



Фотоны высоких энергий: распространение

Фотоны рассеиваются на фоновом излучении (CMB, EBL, ради фон)



При энергиях $10^{14} \text{ эВ} < E < 10^{20} \text{ эВ}$ длина затухания $< 30 \text{ Мпк}$



Внегалактический поток $\sim 1\%$ от галактического — можно пренебречь

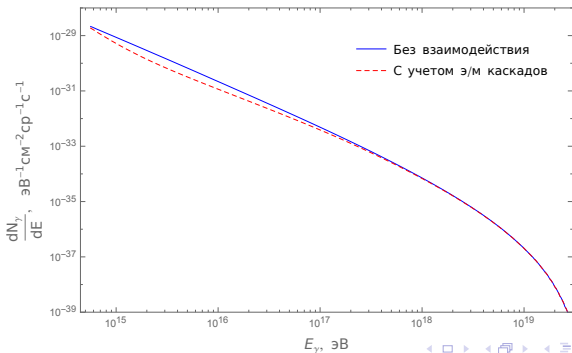
Более точно:

Взаимодействие с фоновым излучением порождает $\gamma \rightarrow e^+e^- \rightarrow \gamma$ каскады.

Спектр фотонов достигающих Земли более мягкий.

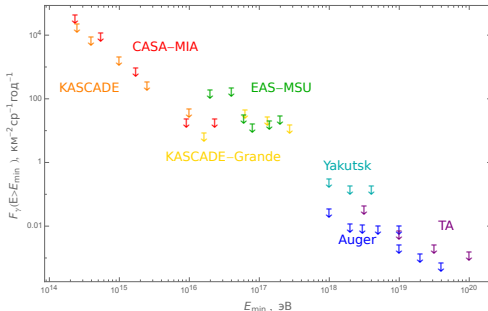
Для учета эффектов распространения используем код.

Kalashov, Kido '14

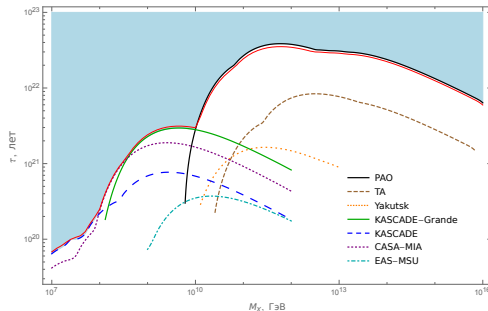


Фотоны высоких энергий: наблюдательные данные и результаты

- Фотоны с энергиями $E \geq 100$ ТэВ не наблюдались ни в одном эксперименте.
- Существуют верхние пределы на диффузный поток.

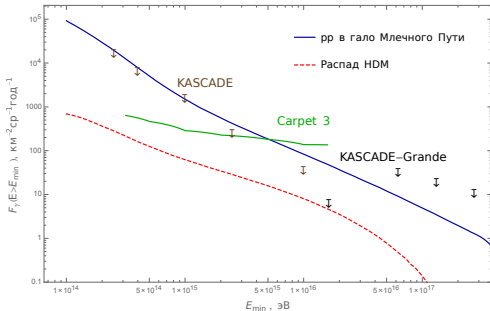


- Сравниваем предсказываемый поток с наблюдательными данными для каждого эксперимента.
- Для каждой массы M_χ получаем ограничение на время жизни.



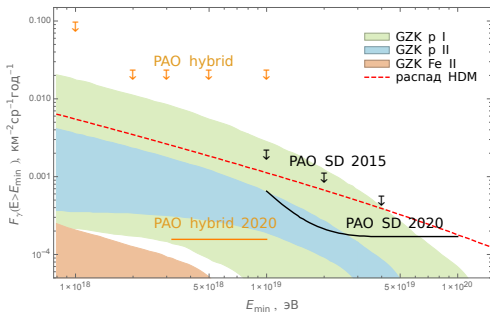
Фотоны высоких энергий: возможное происхождение

Предсказания моделей темной материи и космогенных моделей происхождения фотонов лежат в одной области параметров.



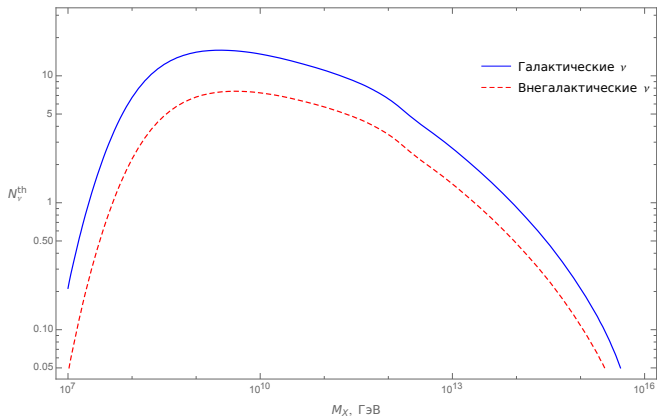
Вывод:

Если фотоны будут зарегистрированы, то нужно исследование дополнительных наблюдаемых величин, таких как анизотропия их потока, чтобы выяснить их происхождение.



Нейтрино высоких энергий: распространение и детектирование

- Нейтрино распространяются без взаимодействия на космологические расстояния.
- Для начального состава ароматов из распада пионов и непрерывного распределения источников, до Земли доходит полностью перемешанный поток. $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \simeq 1 : 2 : 0 \rightarrow \nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \simeq 1 : 1 : 1$
- Соотношение галактического и внегалактического вкладов $\sim 2 : 1$



Нейтрино высоких энергий: наблюдательные данные и результаты

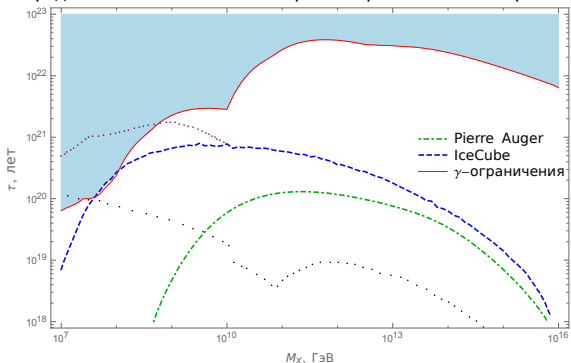
Используем новейший набор данных IceCube (два события с энергией порядка ПэВ при нулевом фоне) IceCube '16.

Для сравнения — результаты Pierre Auger (отсутствие событий при энергиях более 100 ПэВ) Pierre Auger '15.

Нейтринная экспозиция экспериментов зависит от энергии нейтрино.



Верхние пределы на поток зависят от рассматриваемого спектра нейтрино.

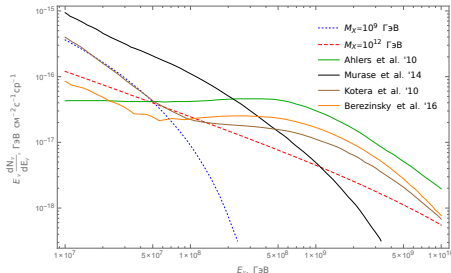


Ограничения почти везде слабее фотонных. Т.о. интерпретация событий IceCube распадом DM не поддерживается.

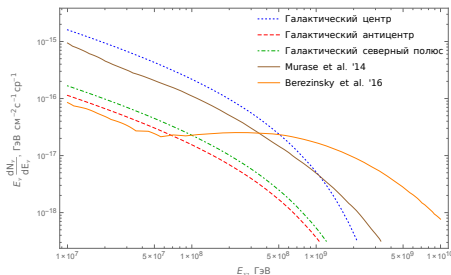
Нейтрино высоких энергий: возможное происхождение

Сравнение нейтринных сигналов от темной материи, разрешенной фотонными ограничениями, с космогенными нейтринными сигналами.

Усредненный по небу сигнал неотличим



Сигнал из галактического центра можно отличить (если распределение темной материи — NFW)



Анизотропия космических лучей: наблюдение и моделирование

Эксперименты ШАЛ наблюдают только часть неба \Rightarrow сложно обнаружить крупномасштабную анизотропию. Решения:

1. Гармонический анализ по прямому восхождению α (полнота благодаря вращению Земли, усреднение по склонению δ в области обзора).

$$J(\alpha, E) = a_0(E) + \sum_n [a_n(E) \sin(n\alpha) + b_n(E) \cos(n\alpha)] , \quad (1)$$

Основная наблюдаемая — амплитуда первой гармоники $r_1(E) = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$.

2. Комбинация данных двух экспериментов и гармонический анализ по полному небу. TA & PAO '14

$$J(\delta, \alpha, E) = \sum_{l \geq 0} \sum_{m=-l}^l a_{lm}(E) Y_{lm}(\delta, \alpha) , \quad (2)$$

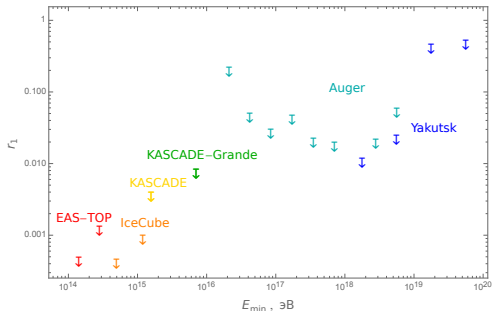
Наблюдаемые — коэффициенты $a_{lm}(E)$ или угловой спектр $C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_m |a_{lm}|^2$.

Моделируем полный поток как сумму изотропного “экспериментального” потока и небольшой анизотропной примеси от распада темной материи:

$$J_{\text{total}}(E, \delta, \alpha) = J_{\text{exp}}(E) + J_{\text{DM}}^p(E, \delta, \alpha) + J_{\text{DM}}^{\gamma}(E, \delta, \alpha)$$

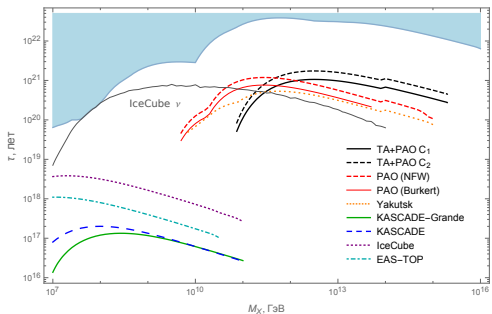
Анизотропия космических лучей: наблюдательные данные и результаты

- Анизотропия величиной $r_1 \sim 10^{-4}$ обнаружена при энергиях 100 – 1000 ТэВ.
EAS-TOP '09; IceCube '16
- При больших энергиях есть только верхние пределы*.
KASCADE '04;
KASCADE-Grande '15;
Pierre Auger '15; Yakutsk '14; Pierre Auger & TA '14



* После публикации этой диссертации Pierre Auger заявили о достоверном наблюдении дипольной анизотропии при $E \gtrsim 10$ ЭэВ

- Сравниваем предсказываемый поток с наблюдательными данными для каждого эксперимента.
- Для каждой массы M_χ получаем ограничение на время жизни.

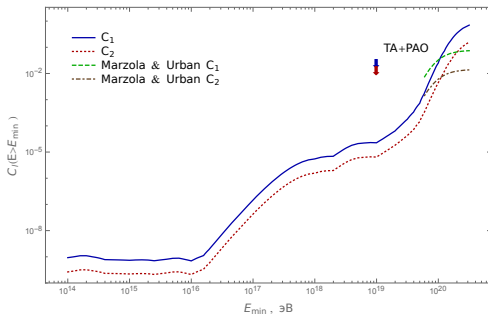
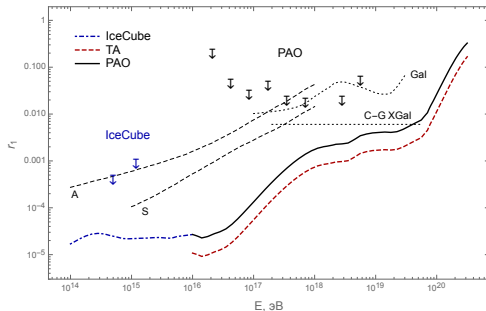


Анизотропия космических лучей: возможное происхождение

Фиксируем время жизни темной материи, разрешенное фотонными ограничениями, находим чувствительность к анизотропии, необходимую для детектирования сигнала темной материи.

Выводы:

- Фотонные ограничения сильнее анизотропийных в существующих экспериментах.
- Если будет детектирована анизотропия без детектирования фотонов \Rightarrow анизотропия происходит не из DM.
- Если будут найдены фотоны \Rightarrow для выяснения их происхождения нужно анализировать поток нейтрино и анизотропию за пределами первой гармоники.



Положения выносимые на защиту I

- 1) Получены наиболее сильные на сегодняшний день консервативные ограничения на время жизни темной материи состоящей из частиц X с массами $10^7 \leq M_X \leq 10^{16}$ ГэВ, распадающейся в адроны. Эти ограничения получены с помощью пределов на диффузный поток фотонов с энергиями выше 100 ТэВ установленных экспериментами по детектированию широких атмосферных ливней.
- 2) Ограничения на модели тяжелой темной материи получены из экспериментальных данных о нейтрино с энергиями выше 100 ТэВ. Показано, что ограничения на время жизни почти для всех масс M_X не превосходят фотонных ограничений.
- 3) Ограничения на модели тяжелой темной материи получены из экспериментальных данных об анизотропии космических лучей с энергиями выше 100 ТэВ. Показано, что ограничения на время жизни не превосходят фотонных ограничений.
- 4) На основании сравнения нейтринных и фотонных ограничений сделан вывод о том, что интерпретация нейтрино, зарегистрированных в эксперименте IceCube в качестве продуктов адронного распада темной материи с массами $10^7 \leq M_X \leq 10^{16}$ ГэВ, не поддерживается.

- 5) Сделаны предсказания уровня чувствительности установок по регистрации космических лучей к анизотропии, необходимого для детектирования сигнала распада темной материи удовлетворяющей современным фотонным ограничениям.
- 6) Показано, что наиболее перспективным направлением поиска сигнала распада тяжелой темной материи является поиск фотонов ультравысоких энергий на установках по регистрации широких атмосферных ливней, тогда как исследования анизотропии и нейтринного сигнала могут быть вспомогательными инструментами для выяснения происхождения обнаруженного фотонного сигнала.

1. O. E. Kalashev and M. Yu. Kuznetsov, "Constraining heavy decaying dark matter with the high energy gamma-ray limits," Phys. Rev. D **94**, no. 6, 063535 (2016) [arXiv:1606.07354 [astro-ph.HE]].
2. M. Yu. Kuznetsov, "Hadronically decaying heavy dark matter and high-energy neutrino limits," JETP Lett. 105, no. 9, 561 (2017) [arXiv:1611.08684 [astro-ph.HE]].
3. O. E. Kalashev and M. Yu. Kuznetsov, "Heavy decaying dark matter and large-scale anisotropy of high-energy cosmic rays," JETP Lett. (2017) [arXiv:1704.05300 [astro-ph.HE]].

1. O. E. Kalashev and M. Yu. Kuznetsov, "Constraining heavy decaying dark matter with the high energy gamma-ray limits," Phys. Rev. D **94**, no. 6, 063535 (2016) [arXiv:1606.07354 [astro-ph.HE]].
2. M. Yu. Kuznetsov, "Hadronically decaying heavy dark matter and high-energy neutrino limits," JETP Lett. 105, no. 9, 561 (2017) [arXiv:1611.08684 [astro-ph.HE]].
3. O. E. Kalashev and M. Yu. Kuznetsov, "Heavy decaying dark matter and large-scale anisotropy of high-energy cosmic rays," JETP Lett. (2017) [arXiv:1704.05300 [astro-ph.HE]].

Спасибо за внимание!

Примеры фундаментальных взаимодействий, которые обеспечивают канал распада $X \rightarrow q\bar{q}$:

$$\tilde{\phi}\bar{Q}U, \quad \phi\bar{Q}D \quad \Rightarrow \quad X \rightarrow q\bar{q}, \quad 100\%$$

$$Q = \begin{pmatrix} U \\ D \end{pmatrix}, \quad \phi = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix}, \quad \tilde{\phi} = i\sigma^2\phi^*$$

$$XG_{\mu\nu}G^{\mu\nu} \quad \Rightarrow \quad X \rightarrow \text{адроны}, \quad 100\%$$