

Андрей Никитенко

Объединённый институт ядерных исследований,

Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова

nikitenko@theor.jinr.ru

### Аннотация

Рассмотрена многомерная модификация гравитации с масштабом гравитационного взаимодействия меньше массы Планка. Стабильные по предположению частицы темной материи могут распадаться при взаимодействии с виртуальными черными дырами. Оценены скорости затухания таких процессов. Показано, что при правильной фиксации параметров теории распада этих сверхмассивных частиц могут давать заметный вклад в поток космических лучей ультравысоких энергий, в частности вблизи предела Грейзена-Зацепина-Кузьмина. Такие частицы также могут создавать нейтрино очень высоких энергий, наблюдаемые в существующих подводных детекторах или детекторах в виде кубов льда.

### Введение

Космические лучи ультравысоких энергий (КЛУВЭ) — это космические лучи с энергией более  $10^{18}$  эВ.

Космические лучи экстремально высоких энергий (КЛЭВР) — это КЛУВЭ с энергией  $E \geq 10^{20}$  эВ.

Особенно интересны потоки частиц с энергиями, близкими к пределу Грейзена-Зацепина-Кузьмина (ГЗК)  $10^{20}$  эВ, иногда называемые космическими лучами экстремально высоких энергий (сокращенно КЛЭВЭ).

Экспериментально иногда наблюдаются частицы с энергией выше указанного предела. В связи с этим необходимо объяснить происхождение источника таких высокоэнергетических лучей. Однако никаких разумных астрофизических источников для них поблизости от нас не наблюдается.

Единого мнения о происхождении космических лучей сверхвысоких энергий нет.

Одним из возможных объяснений происхождения КЛУВЭ нарушающих предел ГЗК является распад сверхтяжелых частиц. Предполагается, что существуют частицы сверхтяжелой темной материи (ТМ) с массами в диапазоне  $(10^{12} - 10^{16})$  ГэВ и временем жизни, значительно большим чем возраст Вселенной  $t_U = 1.5 \cdot 10^{10}$  лет.

### Распад протона через виртуальную чёрную дыру

Обычно частицы темной материи считаются абсолютно стабильными.

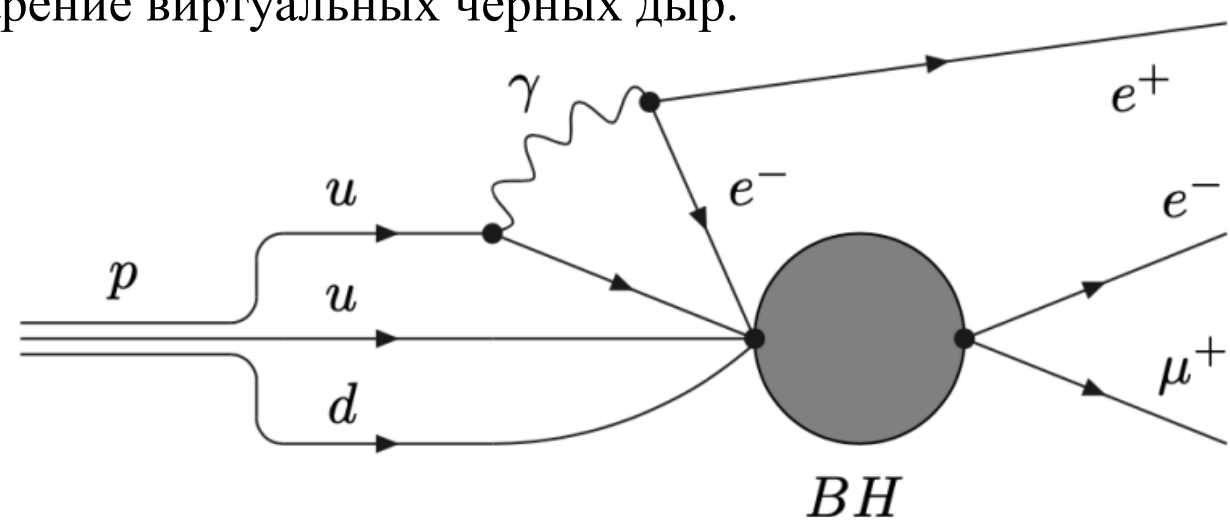
Механизм Зельдовича (1976): распад любых предположительно стабильных частиц через образование и испарение виртуальных черных дыр.

$$q + q \rightarrow (BH) \rightarrow \bar{q} + \bar{l},$$

$$\frac{\dot{n}}{n} = n\sigma_{BH} = \sigma_{BH} |\psi(0)|^2,$$

$$\sigma_{BH} \sim \frac{m_p^2}{M_{Pl}^4},$$

$$\tau_p = \frac{n}{\dot{n}} = \frac{M_{Pl}^4}{m_p^5}$$



$$\alpha = 1/137, m_p \approx 1 \text{ ГэВ}, m_q \sim 300 \text{ МэВ}, \Lambda \sim 300 \text{ МэВ}$$

Время жизни протона, вычисленное в канонической гравитации, с энергетическим масштабом, равным  $M_{Pl} = 1.22 \cdot 10^{19}$  ГэВ, чрезвычайно велико и много больше, чем возраст Вселенной  $\tau_p \sim 10^{45}$  лет.

Однако меньший масштаб гравитации и огромная масса частиц ТМ  $M_X \sim 10^{12}$  ГэВ могут привести к сильному усилению эффекта Зельдовича.

Сверхтяжелые частицы ТМ с массой могут распадаться через образование промежуточной виртуальной ЧД с временем жизни всего на несколько порядков больше чем возраст Вселенной.

Это может быть достигнуто в теории, в которой масштаб кантовой гравитации меньше массы Планка.

$$M_{Pl}^2 \sim M_*^{2+d} R_*^d, R_* \sim \frac{1}{M_*} \left( \frac{M_{Pl}}{M_*} \right)^{2/d}, M_* \approx 3 \times 10^{17} \text{ ГэВ}, R_* \sim 10^{(8/d)} / M_* > 1 / M_*$$

Ширина распада протона на положительно заряженные лептон и кварк-антикварковую пару:

$$\Gamma(p \rightarrow l^+ \bar{q} q) = \frac{m_p \alpha^2}{2^{12} \pi^{13}} \left( \ln \frac{M_{Pl}^2}{m_q^2} \right)^2 \left( \frac{\Lambda}{M_{Pl}} \right)^{4+\frac{10}{d+1}} \int_0^{1/2} dx x^2 (1-2x)^{1+\frac{5}{d+1}}$$

### Тяжёлая тёмная материя протонного типа

Возьмем в качестве примера частицы ТМ гораздо более тяжелый аналог протона, а именно частицы с массой  $M_X = 10^{12}$  ГэВ стабильные, стабилизированные с точностью до эффектов с виртуальной чёрной дырой приближенным сохранением барионного числа или чего-то похожего на него. Время жизни этой частицы представлено ниже в уравнении как функция неизвестного параметра

Небольшое изменение  $\Lambda_*$  вблизи  $10^{15}$  ГэВ позволяет зафиксировать время жизни X-частиц темной материи в интересующем нас диапазоне. Они будут достаточно стабильны, чтобы играть роль скрытой массы, а их распад сможет дать значительный вклад в космические лучи сверхвысоких энергий.

$$\tau_X = \frac{1}{\Gamma_X} \approx 6.6 \times 10^{-25} s \cdot \frac{2^{10} \pi^{13}}{\alpha_*^2} \left( \frac{\text{GeV}}{M_X} \right)^6 \left( \frac{M_*}{\Lambda_*} \right)^{4+\frac{10}{d+1}} \left( \ln \frac{M_*}{M_X} \right)^{-2} I(d)^{-1},$$

$$I(d) = \int_0^{1/2} dx x^2 (1-2x)^{1+\frac{5}{d+1}}, I(7) \approx 0.0057.$$

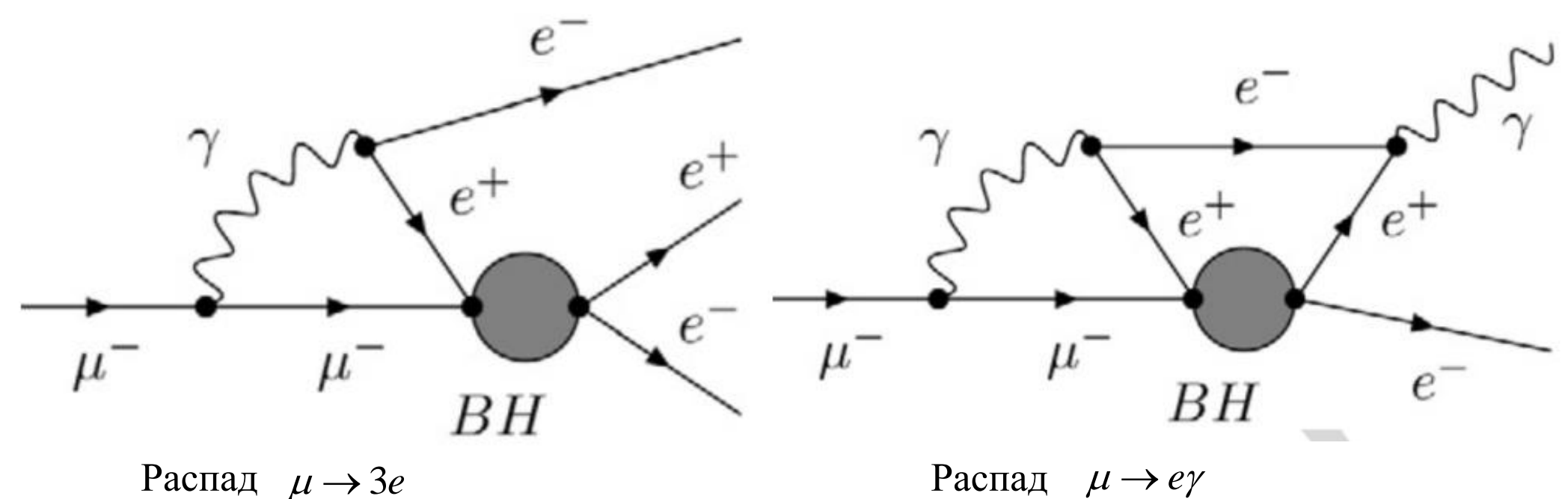
$$\alpha_* = 1/50, d = 7, M_* = 3 \times 10^{17} \text{ ГэВ}, M_X = 10^{12} \text{ ГэВ}, m_{q_*} \sim M_X, \tau \approx 7 \times 10^{12} = \left( \frac{10^{15} \text{ GeV}}{\Lambda_*} \right)^6 \text{ лет},$$

$$1/\text{GeV} = 6.6 \times 10^{-25} s$$

### Тяжёлая тёмная материя лептонного типа

Более многообещающей и менее подверженной теоретическим неопределенностям является гипотеза создания темной материи из сверхтяжелых нейтральных лептонов L. Такие лептоны могут быть стабильны по отношению к взаимодействиям физики частиц благодаря сохранению лептонного числа, если тяжелый лептон L не смешивается с более легкими лептоном стандартной модели. Аналогично обсуждаемой в литературе устойчивости тяжелых нейтрино 4-го поколения, если исчезает смешивание с более легкими первых трех поколений.

Однако это предположение приводит к абсолютной устойчивости стерильного лептона, поскольку он не будет распадаться через виртуальную черную дыру, так как L имеет спин 1/2 и не может превратиться в бесспиновую частицу, которая может быть захвачена ЧД. Для этого необходимо ввести какое-то новое взаимодействие L с другими элементарными частицами, не нарушающее его (квази)устойчивости. Процесс возможного распада L через виртуальную ЧД описывается схемами, аналогичными тем, которые описывают мюона.



$$\text{Ширина уровня распада мюона } \Gamma(\mu \rightarrow 3e)_d = \frac{\alpha^2 m_\mu}{2^{11} \pi^5} \left( \ln \frac{M_*^2}{m_\mu^2} \right)^2 \left( \frac{m_\mu}{M_*} \right)^{4\left(1+\frac{1}{d+1}\right)} \frac{2}{\kappa^{d+1}}$$

Вероятность распада подавлена дополнительной степенью  $\alpha_L$ , но отношение двухчастичного фазового пространства к трехчастичному компенсирует это дополнительное подавление, так что вероятность распада по рассматриваемому механизму будет примерно такой же, как распада  $\mu \rightarrow e\gamma$ .

$$\text{Ширина уровня распада лептона } \Gamma(L \rightarrow 3f)_d = \frac{\alpha_L^2 M_L}{2^{11} \pi^5} \left( \ln \frac{M_*^2}{M_L^2} \right)^2 \left( \frac{M_L}{M_*} \right)^{4\left(1+\frac{1}{d+1}\right)} \frac{2}{\kappa^{d+1}}$$

Если L абсолютно стерильна, она не будет распадаться по механизму виртуальной черной дыры, потому что у L нет возможности превратиться в частицу с нулевым спином, которая может быть захвачена ЧД. Чтобы обойти эту проблему, мы можем ввести произвольную слабую связь L с гипотетическим векторным или скалярным бозоном V с очень слабой связью с частицами со спином 1/2 f.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Утверждается, что в многомерной модификации гравитации могут существовать сверхтяжелые частицы темной материи, устойчивые по отношению к обычным взаимодействиям частиц. Однако такие частицы ТМ должны распадаться через образование виртуальной черной дыры.

Мы исследовали два возможных типа частиц тёмной материи: это протоноподобная тёмная материя, состоящая из трех сверхтяжелых кварков и тёмная материя лептонного типа, подобная сверхтяжелому нейтрино. Последний вариант выглядит более естественным и менее зависимым от параметров. Привлекательной особенностью этой версии является создание очень высокоэнергетических потоков космических нейтрино, происхождение которых недостаточно изучено.

При правильном выборе параметров время жизни таких квазистабильных частиц тёмной материи может быть больше возраста Вселенной на 3-4 порядка. Это позволяет им вносить существенный вклад в поток космических лучей ультравысоких энергий и, в частности, за пределы энергий отсечки ГЗК. Рассмотренный механизм может привести к эффективному рождению космических нейтрино очень высоких энергий, наблюдаемых на детекторах IceCube и Baikal.