

Компактные дополнительные измерения и свойства лептонов

Двухбранная модель как естественный источник нейтрино сверхвысоких энергий

Константин Э. Прокопьев

Научный руководитель: С. Г. Рубин
НИЯУ МИФИ

Наблюдательная проблема

Детекторы фиксируют нейтрино с очень высокими энергиями

Эксперимент	Событие	Энергия	Год	Значимость
IceCube	Первые каскады PeV-диапазона	1.04 и 1.14 ПэВ	2013	2.8 σ над атм. фоном
IceCube HESE	IC35 shower	~13 ПэВ	2025	Выше 5 ПэВ
Baikal-GVD	GVD2019_112_N	~1.2 ПэВ	2019	1-й в северном полушарии
KM3NeT	KM3-230213A	~220 ПэВ	2025	Рекорд

Открытый вопрос: какой физический механизм производит нейтрино с энергиями вплоть до 220 ПэВ без явного точечного источника?

Существующие решения и их ограничения

Имеющиеся модели имеют недостатки

Астрофизические ускорители

AGN, GRB

Механизм Ферми + адронные взаимодействия.

Согласуются с мульти-мессенджерными данными, но **не объясняют** экстремальные энергии без нефизических параметров.

Нет статистически значимой ассоциации с KM3-230213A.

Сверхтяжёлая тёмная материя

Распад ДМ, топологические дефекты

Принципиально могут достигать высоких энергий. Однако **нет прямых наблюдательных свидетельств**.

Часто **требуют предположений** о новых частицах и взаимодействиях.

ν Наш подход Двухбранная геометрия $f(R)$ -гравитации

- Двухбранная структура образуется спонтанно.
- **Не требует новых частиц и взаимодействий** за пределами SM. Тяжёлые нейтрино со второй браны распадаются через межбранную вершину Z-бозона.
- Подавление потока объясняется **геометрически** — экспоненциально малым перекрытием волновых функций.

Геометрия двухбранной вселенной

Метрический анзац для $D = 4 + n$ измерений

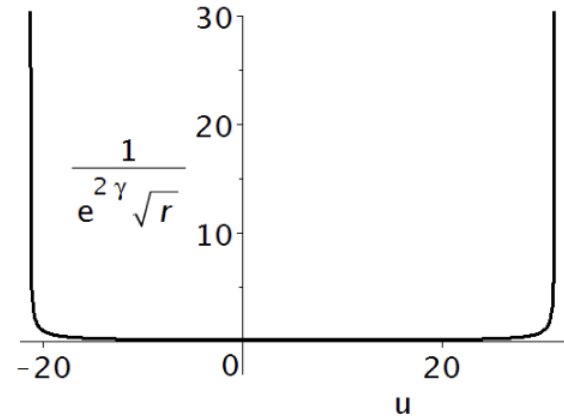
$$ds^2 = e^{2\gamma(u)} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu - du^2 - r^2(u) d\Omega_{n-1}^2$$

$\gamma(u)$ — варп-фактор, $r(u)$ — радиус компактного пространства.
Браны возникают как самопроизвольные решения уравнений $f(R)$ -гравитации

Профиль фермионов

$$\left(\partial_u + \frac{r'(u)}{2r(u)} + 2\gamma'(u) \right) Y(u) = 0$$

Решение имеет острые пики при $u = u_1, u_2$ — формирует две браны: 1 — наша брана; 2 — скрытая.



Профиль $Y(u)$ вдоль дополнительного измерения

Ключевая оценка

$$u_2 - u_1 \approx 80 m_D^{-1}$$

$$I^{(12)} \sim e^{(u_2 - u_1) m_D} = 10^{-30}$$

Разложение на функции бран

Декомпозиция D-мерного спинора для левого нейтрино:

$$\Psi_{\nu_L}^{(i)} = \left(\nu_L^{(i)}(x) \otimes \phi_{\nu_L}^{(i)}(y) \right) Y_{\nu_L}^{(i)}(u) \Psi_{\nu_L} = \Psi_{\nu_L}^{(1)} + \Psi_{\nu_L}^{(2)},$$

локализация на каждой бране независима, нулевые моды не взаимодействуют напрямую — только через Z-бозон в балке

Нулевая мода фермионов

$$\Gamma^a e_a^m (\partial_y - \omega_y + A_y) \phi(y) = 0$$

Решение этого уравнения требует определенной конфигурации калибровочного поля A_y для каждой метрики.

Роль второй браны

- На 2 бране значение вакуумного среднего поля Хиггса отличается от значения на первой бране ($\langle H \rangle^{(1)} = v^{(1)} \neq v^{(2)}$).
- Это естественным образом рождает **сверхтяжёлый нейтрино** $\nu_L^{(2)}$ с $m \sim m_D$
- Эти частицы — кандидаты в тёмную материю.

Массовый член и seesaw

- Разные VEV на двух бранах порождают матрицу масс нейтрино
- Тяжёлое нейтрино локализовано на бране 2 и невидимо на бране 1 без Z-медиации.

Межбренный механизм генерации нейтрино

1: 4D-редукция фермионного действия

D-мерное действие интегрируется по дополнительным координатам. Вклады от производных по дополнительным измерениям обнуляются по условию нулевой моды. Остаётся стандартный 4D кинетический член с нормировкой $I_L^{(12)}$.

2: Эффективный лагранжиан

$$\mathcal{L} = g_Z \bar{\nu}_L^{(1)} \gamma^\mu Z_\mu \nu_L^{(1)} + g_Z \bar{\nu}_L^{(2)} \gamma^\mu Z_\mu \nu_L^{(2)} + I_L^{(12)} g_Z \bar{\nu}_L^{(1)} \gamma^\mu Z_\mu \nu_L^{(2)} + I_L^{(21)} g_Z \bar{\nu}_L^{(2)} \gamma^\mu Z_\mu \nu_L^{(1)}$$

Межбренный член подавлен малым $I_L^{(12)} \sim 10^{-30}$

Канал 1: Распад (доминирует \checkmark)

$$\nu^{(2)} \rightarrow \nu^{(1)} + Z \rightarrow \nu^{(1)} + \nu^{(1)} + \bar{\nu}^{(1)}$$

Ширина: $\Gamma \approx (I_L^{(12)})^2 g_Z^2 m^2 / 16\pi$

Время жизни: $\tau \sim 10^{30}$ с при $m_2 \sim 4.4 \times 10^8$ ГэВ

Канал 2: Аннигиляция (отвергнут \times)

$$\bar{\nu}^{(2)} + \nu^{(2)} \rightarrow Z \rightarrow \bar{\nu}^{(1)} + \nu^{(1)}$$

Поток на ~ 18 порядков ниже наблюдаемого из-за зависимости m_2^{-4} . Физически несостоятелен при $m^2 \sim 10^8 - 10^9$ ГэВ.

Результаты за прошедший семестр

1 4D-редукция фермионного действия

- Выведен стандартный 4D кинетический член из D-мерного действия.
- Показано обращение в ноль вкладов от дополнительных измерений по условию нулевой моды.

2 Нулевые моды

- Построено представление для фермионов и бозонов в D-измерениях.
- Показана равномерность профиля Z-бозона вдоль u . Ренормировка константы связи g через интеграл перекрытия I .

3 Эффективный межбренный лагранжиан

- Двухбранное разложение диагональные + недиагональные (межбреннные) члены.
- Межбреннная вершина подавлена интегралом перекрытия $I_L^{(12)}$.

4 Сравнение двух каналов производства

- Аннигиляционный канал отвергнут: поток на 18 порядков ниже IceCube.
- Канал распада возможен при $m_2 \sim 10^9 \text{ ГэВ}$.

5 Оценка диффузного потока нейтрино

- Получена оценка наблюдаемого потока ~ 10 ссм из данных IceCube.
- Показана совместимость параметров модели с наблюдением KM3-230213A (220 ПэВ).

Главный результат и ключевые числа

220 ПэВ

Энергия KM3-230213A

10^{30} сек

Время жизни ν

10^{-30}

$I_L^{(12)}$ (требуемое)

~ 18

Порядков: превосходство
распада

Параметр	Значение	Физический смысл
m_2 (масса $\nu(2)$)	$\approx 4.4 \times 10^8$ ГэВ	Совпадает с энергией KM3-230213A
$I_L^{(12)}$ (перекрытие)	$\sim 10^{-30}$	Геометрическое подавление, не тонкая настройка
$u_2 - u_1$ (расстояние)	$\sim 80 m_D^{-1}$	Из f(R)-решений, не введено предварительно
Φ_{ann}/Φ_{obs}	$\sim 10^{-18}$	Аннигиляция неэффективна, распад — доминирует



Вывод: двухбранная геометрия f(R)-гравитации *без новых частиц* обеспечивает естественный механизм генерации УНЭ-нейтрино. Сверхмалая вероятность распада объясняется экспоненциальным подавлением межбранного перекрытия волновых функций.

Задачи на следующий семестр

1

Исследование структуры бран

Теоретическое исследование структуры бран и механизма локализации материи

2

Возникновение массы

Исследование механизма возникновения большой массы частиц на скрытой бране, возникновение SeeSaw-механизма

3

Изучение структуры нулевых мод

Условия нормируемости киральной нулевой моды нейтрино на разных бранах

4

Анализ результатов

Анализ полученных результатов и сравнение их с другими моделями



Публикация: рукопись «High-energy neutrinos from hidden brane» (Prokojev, Rubin) в процессе подготовки. Ожидается подача на публикацию в следующем семестре.

Спасибо за внимание!