ХХІ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

УДК 530.1:539.1:524.8

Излучение тензорного медиатора темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью <u>И.В. Ворончихин</u> Научный руководитель: к.ф.-м.н., Д.В. Кирпичников

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050 E-mail: ivv15@tpu.ru

Radiation of tensor dark matter mediator in fixed-target experiments

I.V. Voronchikhin

Scientific Supervisor: PhD., D.V. Kirpichnikov Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050 E-mail: <u>ivv15@tpu.ru</u>

Abstract. The hidden spin-2 massive mediator can connect Standard Model (SM) and dark matter (DM) particles and lead to the existence of light thermal DM. In the present paper we consider the simplified model with the charged lepton sector of SM and Dirac fermions or scalar DM particles in the invisible mode. Also, we study in detail missing-energy signatures of spin-2 boson in cases of lepton fixed-target facilities, such as NA64e, LDMX, NA64 μ and M^3 . Moreover, we briefly discuss the impact of atomic form-factor parametrizations in the differential cross-section for the experimental reach of the fixed-fixed target facilities.

Key words: weakly interacting massive particles, form-factors, thermal dark matter, phenomenology.

Введение

материи используется для решения Илея темной проблемы несоответствия астрофизических наблюдений и теоретических предсказаний для обычной материи во Вселенной. Еще в 1933 году это несоответствие было обнаружено Фриц Цвикки на основе измеренной скорости в галактике и теореме о вириале. Однако, проблема этого несоответствия стала острой только после опубликования результата анализа вращательных свойств спиральных галактик в 1980 году Кентом Фордом и Верой Рубин. Поведение ротационных кривых показало явное противоречие с теоретическим предсказаниями на основе ньютоновской механики для видимой материи. Объяснить этого несоответствие в наблюдаемых гравитационных эффектах можно используя модифицированную ньютоновскую механику или предполагая существование дополнительной невидимой материи. Однако, эффект слабого гравитационного линзирования в кластере Пуля показывает, что место с наибольшей концентрацией видимой материи и гравитационные центры скоплений не совпадают. Следовательно, полученное наблюдение затрудняет объяснение на основе модификации ньютоновской механики. В итоге, на текущий момент модель дополнительной материи является доминирующей [1].

Темная материя с массами выше O(1) ГэВ практически исключена, что мотивирует рассмотрение частиц темного сектора в области термальной легкой темной материи. В случае термальной легкой темной материи ее реликтовая плотность противоречит экспериментальным наблюдениям. Однако, понизить реликтовую плотность до наблюдаемой позволяет введение медиатора темной материи, который осуществляет взаимодействие видимого и темного сектора и после момента отщепления термальной темной материи в ранние моменты эволюции Вселенной. Поиск медиатора темной матери в области от O(1) МэВ до O(1) ГэВ хорошо мотивирован для экспериментов с фиксированной мишенью из-за комбинирования преимуществ высоких интенсивности и энергии налетающего на мишень пучка [2].

106

ХХІ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

Экспериментальная часть

Взаимодействие поля тензорного медиатора $h^{\mu\nu}$ с материей описывается следующим эффективным лагранжианом [3]:

$$\mathcal{L}_{eff}^{G} = g_{ll}^{G} \left(\frac{1}{4} \eta_{\mu\nu} F_{\lambda\rho} F^{\lambda\rho} - F_{\mu\lambda} F_{\nu}^{\lambda} \right) - \frac{i g_{ll}^{G}}{2} \left(\bar{l} \left(\gamma_{\mu} \vec{D}_{\nu} + \gamma_{\nu} \vec{D}_{\mu} \right) l - \eta_{\mu\nu} \bar{l} \gamma_{\rho} \vec{D}^{\rho} l \right) - g_{DM}^{G} h^{\mu\nu} T_{\mu\nu}^{DM},$$

где g_{ll}^{G} , g_{DM}^{G} – константы связи тензорного медиатора с лептоном Стандартной модели и с темным сектором, соответственно; l – лептон Стандартной модели; γ_{μ} – гамма-матрицы Дирака; $\eta_{\mu\nu}$ – метрический тензор Минковского; $F_{\lambda\rho}$ – тензор напряженности для поля фотона A_{μ} ; $\vec{D}_{\nu} = \partial_{\mu} - ieA_{\mu}$ – ковариантная производная; e – заряд электрона и выражение для симметризованных тензоров энергии-импульса для скалярной $T_{\mu\nu}^{S}$ и диаковской $T_{\mu\nu}^{\psi}$ и векторной $T_{\mu\nu}^{V}$ могут быть найдены в источнике [3].

Далее, двойное дифференциальное сечение излучения медиатора темной материи на ядре в приближении Вайцзеккера-Вильямса принимает вид [4]:

$$\frac{d\sigma(p+P_i \to p'+P_f+k)}{dxd\cos(\theta_{\rm MED})}\Big|_{\rm WW} = \frac{\alpha\chi}{\pi} \frac{E_l^2 x \beta_{\rm MED}}{1-x} \frac{d\sigma(p+q \to k+p')}{d(pk)}\Big|_{t=t_{\rm min}},\tag{1}$$

где α – постоянная тонкой структуры; β_{MED} – типичная скорость медиатора; $k = (E_{MED}, \mathbf{k})$, $p = (E_l, \mathbf{p}), p' = (E'_l, \mathbf{p}')$ – импульсы медиатора, входящего и выходящего лептона, соответственно; $P_i = (M, 0), P_f = (P_f^0, \mathbf{P}_f)$ – импульсы ядра в начальном и в конечном состоянии, соответственно; $x = E_{MED}/E_l$ – доля энергии медиатора; θ_{MED} – угол между начальным направлением лептона и импульсом медиатора; $q = P_i - P_f$ – переданный импульс; A – атомный номер ядре мишени; Z - заряд ядра; $t \equiv -q^2$ – виртуальность и поток виртуальных фотонов χ выраженный через упругий форм-фактор F(t) следующим образом:

$$\chi = Z^2 \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \frac{t - t_{\min}}{t^2} F^2(t) dt,$$

В качестве форм-факторов используются следующие выражения [5]:

$$F_{\rm TS}(t) = F_{\rm scr}(t) \frac{1}{(1+t/t_{\rm d})}, F_{\rm H}(t) = F_{\rm scr}(t) \frac{3j_1(\sqrt{t}R_{\rm H})}{\sqrt{t}R_{\rm H}} e^{-s_{\rm H}^2 t/2}, F_{\rm E}(t) = F_{\rm scr}(t) \exp(-tR_{\rm exp}^2/6),$$

где $F_{\rm TS}(t)$, $F_{\rm H}(t)$, $F_{\rm E}(t)$ – форм-факторы Тсаи-Шиффа, Хельма и экспоненциальный, соответственно; $F_{\rm scr}(t) = t/(t_{\rm a} + t)$ – форм-фактор, учитывающий экранирование атомными электронами [4, 6]; $t_{\rm a}$ – типичный импульс, связанный с экранированием ядра; $t_{\rm d}$ – типичный импульс, связанный с размером ядра; $R_{\rm H}$ – эффективные радиус ядра и толщина ядерной оболочки в модели Хельма и $R_{\rm exp}$ – эффективный радиус ядра в модели экспоненциального форм-фактора. Матричный элемент для дифференциального сечения соответствующего комптоновского процесса в формуле Вайцзеккера-Вильямса (1) может быть найден в источнике [5].

Для производства частиц с независимой и постоянной интенсивностью справедливо распределение Пуассона. Используя байесовскую статистику и фиксировав степень достоверности в 90 %, получим условие $N_{MED}^{brem.} > 2.3$. В результате, число событий $N_{MED}^{brem.}$ излучения медиатора темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью может быть записано как [2]:

$$N_{\rm MED}^{brem.} = {\rm LOT} \frac{\rho N_A}{A} L_T \int_{x_{min}}^{x_{max}} dx \frac{d\sigma_{2\to3}}{dx} \eta_{\rm MED}^{brem.},$$

где LOT — число лептонов, упавших на мишень; ρ — плотность; N_A — число Авогадро; L_T — эффективная длина взаимодействия лептона в мишени $d\sigma_{2\to3}/dx$ - проинтегрированное по углу сечение Вайцзеккера-Вильямса.

8 XXI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

Результаты

Для получения ограничений использовалось отсутствие сигнала в текущих экспериментах NA64e и NA64µ в Европейском центре ядерных исследований и планируемых экспериментах LDMX и M³ в Фермилабе [2]. В итоге, для различных экспериментов с фиксированной мишенью и форм-факторов на рисунке 1 показаны ограничения на константу смешивания соответствующего лептона и тензорного медиатора.



Рис. 1. На левом графике расположены ограничения на константу смешивания гравитона с лептоном на основе отсутствия сигнала в экспериментах с фиксированной мишенью. Реликтовые плотности в случае g^G_{DM} = 1 ГэВ⁻¹ и т_{DM}/т_{MED} = 1/2 для скалярной, дираковской фермионной и векторной темной материей изображены бирюзовой, коричневой оранжевой пунктирной линией, соответственно [3]. Черной непрерывной линией изображено ограничение на основе эксперимента BaBar в реакции асимметричной электрон-позитронной аннигиляции [3]. Зеленой непрерывной линией показаны ограничения эксперимента NA64e на основе текущей статистики с 3.22 × 10¹¹ накопленных электронов электронов. Красной и фиолетовой пунктирной линией показаны ограничения для экспериментов с планируемой статистикой как NA64µ с 5 × 10¹³ и M³ с 1 × 10¹³ мюонов, соответственно. Зеленой и синей пунктирной линией показаны ограничения для экспериментов с планируемой статистикой как NA64e с 5 × 10¹² и LDMX с 1 × 10¹⁶ электронов, соответственно. Зеленной область показана регион для g-2 аномалии. На правом графике расположена относительная разница ограничений на константу смешивания в случае различных форм-факторов

Заключение

Полученные результаты для ограничений на константу смешивания массивного тензорного медиатора и лептонов показывают. Во-первых, использование других параметризаций форм-факторов оказывают малое влияние на ограничения. В частности, < 2 % для масс меньше 100 МэВ и < O(1) % для масс O(1) ГэВ. Во-вторых, ожидаемые результаты экспериментов исключают дираковскую темную материю для электрона и мюона. Дополнительно, результаты экспериментов исключают векторную темную материю для масс меньше 500 МэВ для электрона и для масс меньше 350 МэВ в случае мюонного пучка.

Список литературы

1. Bertone G., Hooper D. History of dark matter // Reviews of Modern Physics. – 2018. – Vol. 90, No 4. – P. 045002.

2. Гниненко С.Н., Красников Н.В., Матвеев В.А. Поиск лёгкой тёмной материи в эксперименте NA64 // Успехи физических наук. – 2021. – Т. 191, № 12. – С. 1361–1386.

3. Kang Y.J., Lee H.M. Lightening gravity-mediated dark matter // The European Physical Journal C. -2020. - Vol. 80, N 7. - P. 1–23.

4. Kim K.J., Tsai Y.S. Improved Weizsäcker-Williams method and its application to lepton and W-boson pair production // Physical Review D. – 1973. – Vol. 8, № 9. – P. 3109.

5. Voronchikhin I.V., Kirpichnikov D.V. Probing hidden spin-2 mediator of dark matter with NA 64 e, LDMX, NA 64 μ , and M 3 // Physical Review D. – 2022. – Vol. 106, No 11. – P. 115041.

6. Schiff L.I. Energy-angle distribution of thin target bremsstrahlung // Physical review. – 1951. – Vol. 83, № 2. – P. 252.