

Поиски сигналов образования темной материи в
электрон-позитронных столкновениях в модели с
дополнительной $U(1)$ симметрией и дополнительным
скалярным полем

Боос Э.Э., Буничев В.Е., Кейзеров С.И.

Трыков С.С.

НИИЯФ МГУ

3 апреля 2024

ОИЯИ, Дубна

Модель с дополнительной $U(1)$ симметрией и дополнительным скалярным полем: **Бозонная часть**

Лагранжиан:

$$\mathcal{L} \supset (D_\mu H)^\dagger (D^\mu H) + (D_\mu S)^\dagger (D^\mu S) - U(H, S) - \frac{1}{4} W_{\mu\nu} W^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} V_{\mu\nu} V^{\mu\nu} - \frac{\epsilon}{2 \cos \vartheta} V_{\mu\nu} B^{\mu\nu}, \quad (1)$$

с производными

$$D_\mu H = \left(\partial_\mu - ig_B B_\mu \frac{Y_H}{2} - ig_W W_\mu^i \tau^i \right) H, \quad D_\mu S = (\partial_\mu - ig_V V_\mu) S, \quad (2)$$

Потенциал скалярных полей:

$$U(H, S) = \mu_H^2 |H|^2 + \lambda_H^2 |H|^4 + \mu_S^2 |S|^2 + \lambda_S^2 |S|^4 - k |H|^2 |S|^2. \quad (3)$$

Вакуумные средние скалярных полей $\langle H \rangle = v$, $\langle S \rangle = u$ (для случая $v \neq 0$, $u \neq 0$):

$$\longrightarrow v = \sqrt{-\frac{2k\mu_S^2 + 4\lambda_S\mu_H^2}{4\lambda_H\lambda_S - k^2}}, \quad u = \sqrt{-\frac{2k\mu_H^2 + 4\lambda_H\mu_S^2}{4\lambda_H\lambda_S - k^2}}. \quad (4)$$

$$H = \begin{pmatrix} 0 \\ v + h' \end{pmatrix}, \quad S = \frac{u + \phi'}{\sqrt{2}}. \quad (5)$$

Массовая матрица:

$$\mathcal{M}^2 = \begin{pmatrix} 2v^2\lambda_H & -kvu \\ -kvu & 2u^2\lambda_S \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Собственные состояния h , ϕ задаются как

$$\begin{pmatrix} h' \\ \phi' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ \phi \end{pmatrix}, \quad \tan 2\theta = \frac{kvu}{\lambda_H v^2 - \lambda_S u^2}. \quad (7)$$

И квадраты собственных значений:

$$m_{h,\phi}^2 = \lambda_H v^2 + \lambda_S u^2 \pm \frac{\lambda_H v^2 - \lambda_S u^2}{\cos 2\theta}. \quad (8)$$

Мы имеем одно безмассовое A и два массивных Z, Z^* поля:

$$A_\mu = \cos \vartheta B_\mu + \sin \vartheta W_\mu^3 + \sin \alpha \cos \vartheta V_\mu, \quad (9)$$

$$Z_\mu = \cos \beta \cos \vartheta W_\mu^3 - \cos \beta \sin \vartheta B_\mu - (\sin \beta + \tan \alpha \cos \beta \sin \vartheta) \cos \alpha V_\mu, \quad (10)$$

$$Z_\mu^* = \sin \beta \cos \vartheta W_\mu^3 - \sin \beta \sin \vartheta B_\mu + (\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta \sin \vartheta) V_\mu, \quad (11)$$

с массами:

$$m_Z^2 = (\cos \beta - \tan \alpha \sin \beta \sin \vartheta)^2 m_{Z^*0}^2 + \frac{\sin^2 \beta}{\cos^2 \alpha} m_{Z^*0}^2, \quad (12)$$

$$m_{Z^*}^2 = \frac{\cos^2 \beta}{\cos^2 \alpha} m_{Z^*0}^2 + (\sin \beta + \tan \alpha \cos \beta \sin \vartheta)^2 m_{Z^*0}^2. \quad (13)$$

Здесь

$$\sin \vartheta = \frac{Y_H g_B}{\sqrt{Y_H^2 g_B^2 + g_W^2}}, \quad \sin \alpha = \frac{\varepsilon}{\cos \vartheta}, \quad (14)$$

$$\tan 2\beta = \frac{\sin 2\alpha \sin \vartheta m_{Z^*0}^2}{m_{Z^*0}^2 - (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \sin^2 \vartheta) m_{Z^*0}^2}; \quad (15)$$

$$m_{Z^*0}^2 = m_{Z^*}^2(\varepsilon = 0) = \frac{v^2}{4} (Y_H^2 g_B^2 + g_W^2), \quad m_{Z^*0}^2 = m_{Z^*}^2(\varepsilon = 0) = u^2 g_V^2. \quad (16)$$

Лептонный сектор $\left(Y_{f_L} = -Y_H, e = \frac{1}{2} \sin 2\vartheta \sqrt{Y_H^2 g_B^2 + g_W^2}, Y_{e_R} = -Y_H \right)$:

$$i\bar{f}_L \gamma^\mu D_\mu f_L + i\bar{e}_R \gamma^\mu D_\mu e_R = i\bar{e} \gamma^\mu \partial_\mu e + i\bar{\nu}_L \gamma^\mu \partial_\mu \nu_L - e A_\mu \bar{e} \gamma^\mu e + \quad (17)$$

$$+ \frac{e}{4 \sin \vartheta \cos \vartheta} \left[\cos \beta \left(4 \sin^2 \vartheta - 1 \right) - 3 \sin \beta \tan \alpha \sin \vartheta \right] Z_\mu \bar{e} \gamma^\mu e + \quad (18)$$

$$+ \frac{e}{4 \sin \vartheta \cos \vartheta} \left[\cos \beta - \sin \beta \tan \alpha \sin \vartheta \right] Z_\mu \bar{e} \gamma^\mu \gamma_5 e + \quad (19)$$

$$+ \frac{e}{4 \sin \vartheta \cos \vartheta} \left[\sin \beta \left(4 \sin^2 \vartheta - 1 \right) + 3 \cos \beta \tan \alpha \sin \vartheta \right] Z_\mu^* \bar{e} \gamma^\mu e + \quad (20)$$

$$+ \frac{e}{4 \sin \vartheta \cos \vartheta} \left[\sin \beta + \cos \beta \tan \alpha \sin \vartheta \right] Z_\mu^* \bar{e} \gamma^\mu \gamma_5 e + \quad (21)$$

$$+ \frac{e}{4 \sin \vartheta \cos \vartheta} \left[\cos \beta - \sin \beta \tan \alpha \sin \vartheta \right] Z_\mu \bar{\nu}_L \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \nu_L + \quad (22)$$

$$+ \frac{e}{4 \sin \vartheta \cos \vartheta} \left[\sin \beta + \cos \beta \tan \alpha \sin \vartheta \right] Z_\mu^* \bar{\nu}_L \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \nu_L + \quad (23)$$

$$+ \frac{e}{\sqrt{2} \sin \vartheta} W_\mu^+ \bar{\nu}_L \gamma^\mu e_L + \frac{e}{\sqrt{2} \sin \vartheta} W_\mu^- \bar{e}_L \gamma^\mu \nu_L. \quad (24)$$

$$\text{Кварковый сектор} \left(Y_{Q_L} = \frac{1}{3} Y_H, Y_{d_R} = -\frac{1}{3} Y_H, Y_{u_R} = \frac{2}{3} Y_H \right):$$

$$i\bar{Q}_L \gamma^\mu D_\mu Q_L + i\bar{u}_R \gamma^\mu D_\mu u_R + i\bar{d}_R \gamma^\mu D_\mu d_R = \\ = i\bar{u} \gamma^\mu \partial_\mu u + i\bar{d} \gamma^\mu \partial_\mu d + \frac{2}{3} e A_\mu \bar{u} \gamma^\mu u - \frac{1}{3} e A_\mu \bar{d} \gamma^\mu d + \quad (25)$$

$$+ \frac{e}{12 \cos \vartheta} \left(5 \sin \beta \tan \alpha + \cos \beta \left[\frac{3}{\sin \vartheta} - 8 \sin \vartheta \right] \right) Z_\mu \bar{u} \gamma^\mu u - \quad (26)$$

$$- \frac{e}{4 \cos \vartheta} \left(\frac{\cos \beta}{\sin \vartheta} - \sin \beta \tan \alpha \right) Z_\mu \bar{u} \gamma^\mu \gamma_5 u + \quad (27)$$

$$+ \frac{e}{12 \cos \vartheta} \left(3 \frac{\sin \beta}{\sin \vartheta} - 5 (\cos \beta \tan \alpha + \sin \beta \sin \vartheta) \right) Z_\mu^* \bar{u} \gamma^\mu u - \quad (28)$$

$$- \frac{e}{4 \cos \vartheta} \left(\frac{\sin \beta}{\sin \vartheta} + \cos \beta \tan \alpha + \sin \beta \sin \vartheta \right) Z_\mu^* \bar{u} \gamma^\mu \gamma_5 u - \quad (29)$$

$$- \frac{e}{12 \cos \vartheta} \left(\frac{\cos \beta (1 + 2 \cos 2\vartheta)}{\sin \vartheta} + \sin \beta \tan \alpha \right) Z_\mu \bar{d} \gamma^\mu d + \quad (30)$$

$$+ \frac{e}{4 \cos \vartheta} \left(\frac{\cos \beta}{\sin \vartheta} - \sin \beta \tan \alpha \right) Z_\mu \bar{d} \gamma^\mu \gamma_5 d - \quad (31)$$

$$- \frac{e}{12 \cos \vartheta} \left(\frac{\sin \beta (1 + 2 \cos 2\vartheta)}{\sin \vartheta} - \cos \beta \tan \alpha \right) Z_\mu^* \bar{d} \gamma^\mu d + \quad (32)$$

$$+ \frac{e}{4 \cos \vartheta} \left(\frac{\sin \beta}{\sin \vartheta} + \cos \beta \tan \alpha \right) Z_\mu^* \bar{d} \gamma^\mu \gamma_5 d + \quad (33)$$

$$+ \frac{e}{\sqrt{2} \sin \vartheta} W_\mu^+ \bar{u}_L \gamma^\mu d_L + \frac{e}{\sqrt{2} \sin \vartheta} W_\mu^- \bar{d}_L \gamma^\mu u_L. \quad (34)$$

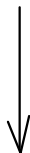
$Z^* \rightarrow A'$:

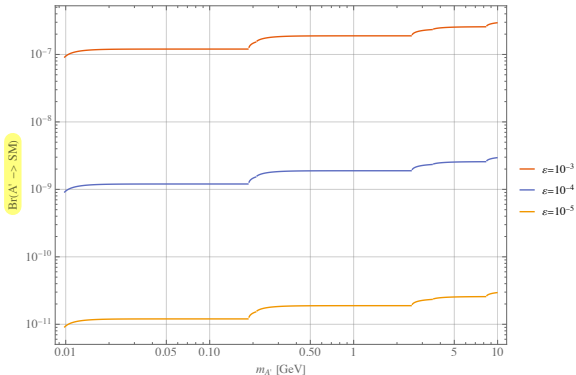
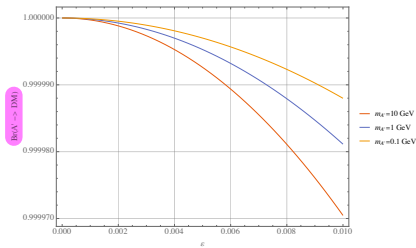
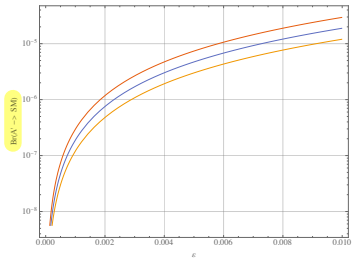
$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{A'} = -\varepsilon e A'_\mu J_{\text{EM}}^\mu - e_D A'_\mu J_{\text{DM}}^\mu. \quad (35)$$

$$\Gamma_{\ell\bar{\ell}}^{A'} = \frac{1}{3} \varepsilon^2 \alpha m_{A'} \left(1 + \frac{m_\ell^2}{m_{A'}^2} \right) \sqrt{1 - 4 \frac{m_\ell^2}{m_{A'}^2}}, \quad (36)$$

$$\Gamma_{q\bar{q}}^{A'} = \varepsilon^2 \alpha m_{A'} \left(1 + \frac{m_q^2}{m_{A'}^2} \right) \sqrt{1 - 4 \frac{m_q^2}{m_{A'}^2}}, \quad (37)$$

$$\Gamma_{\chi\bar{\chi}}^{A'} = \frac{1}{3} \alpha_D m_{A'} \left(1 + \frac{m_\chi^2}{m_{A'}^2} \right) \sqrt{1 - 4 \frac{m_\chi^2}{m_{A'}^2}}. \quad (38)$$





Лептоны и скалярные поля:

$$\mu_e H^\dagger \bar{e}_R f_L + \mu_e \bar{f}_L e_R H = m_e \bar{e}e + \cos\theta \frac{m_e}{v} h \bar{e}e + \sin\theta \frac{m_e}{v} \phi \bar{e}e. \quad (39)$$

Кварки и скалярные поля:

$$\begin{aligned} \mu_d H^\dagger \bar{d}_R Q_L + \mu_d \bar{Q}_L d_R H + \mu_u H_c^\dagger \bar{u}_R Q_L + \mu_u \bar{Q}_L u_R H_c = m_u \bar{u}u + m_d \bar{d}d + \\ + \cos\theta \frac{m_u}{v} h \bar{u}u + \cos\theta \frac{m_d}{v} h \bar{d}d + \sin\theta \frac{m_u}{v} \phi \bar{u}u + \sin\theta \frac{m_d}{v} \phi \bar{d}d. \end{aligned} \quad (40)$$

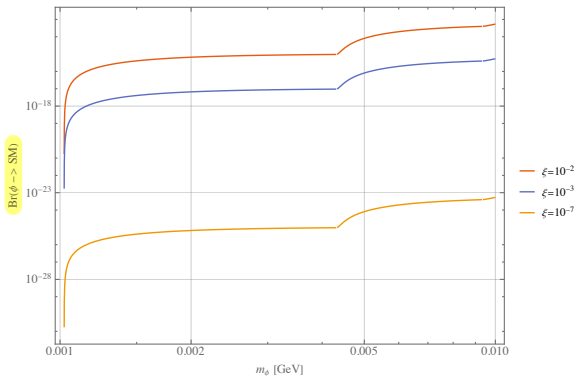
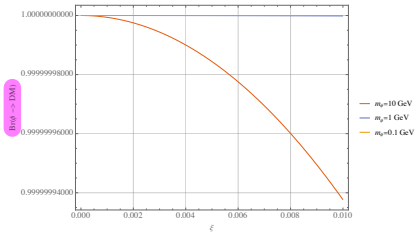
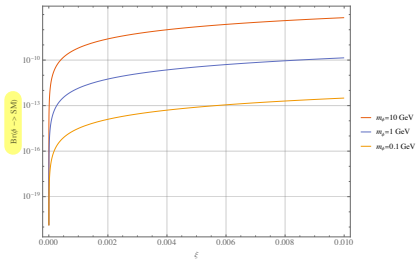
$$\mathcal{L}_{\text{int}}^\phi = -\xi \sum_{f=l,q} \frac{m_f}{v} \bar{f} \phi f - g_D \bar{\chi} \phi \chi. \quad (41)$$

$$\Gamma_{\ell\bar{\ell}}^\phi = \frac{\xi^2 m_\ell^2 m_\phi}{v^2 8\pi} \left(1 - 4 \frac{m_\ell^2}{m_\phi^2}\right)^{3/2}, \quad (42)$$

$$\Gamma_{q\bar{q}}^\phi = 3 \frac{\xi^2 m_q^2 m_\phi}{v^2 8\pi} \left(1 - 4 \frac{m_q^2}{m_\phi^2}\right)^{3/2}, \quad (43)$$

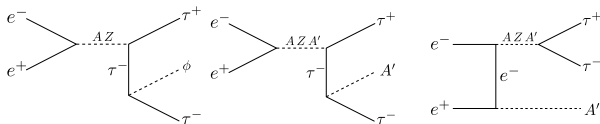
$$\Gamma_{\chi\bar{\chi}}^\phi = \frac{g_D^2 m_\phi}{8\pi} \left(1 - 4 \frac{m_\chi^2}{m_\phi^2}\right)^{3/2}. \quad (44)$$



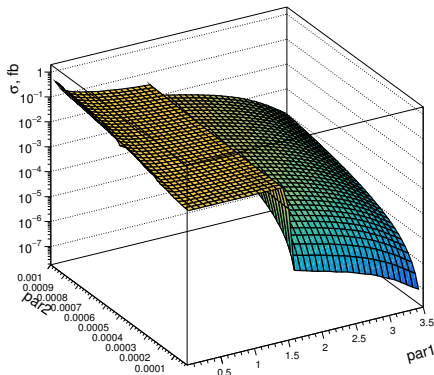


Темный скаляр и темный фотон на будущем e^+e^- -коллайдере

Диаграммы Фейнмана для процессов образования ϕ and A' в e^+e^- столкновениях

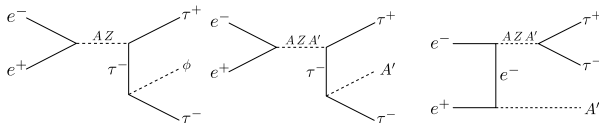


$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^- + \bar{\chi}\chi$, $m_\phi = 1 \text{ GeV}$, $\xi = 0.1$:

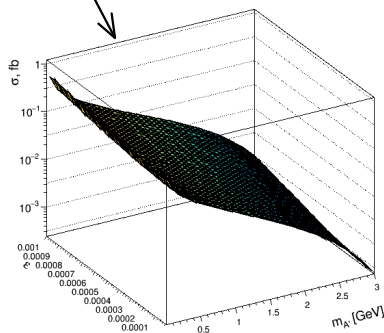
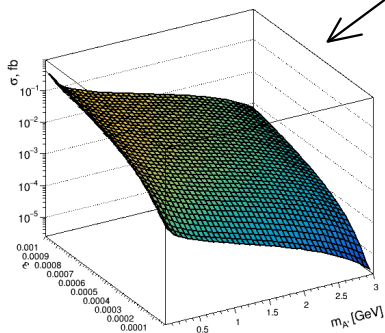


Темный скаляр и темный фотон на будущем e^+e^- -коллайдере

Диаграммы Фейнмана для процессов образования ϕ and A' в e^+e^- столкновениях

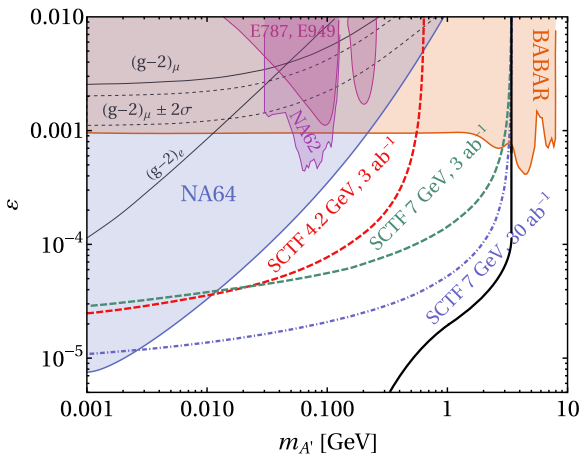


$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^- + \tilde{\chi}\chi$, $m_\phi = m_{A'}$, $\xi = 0.01$ и $\xi = 0.1$:



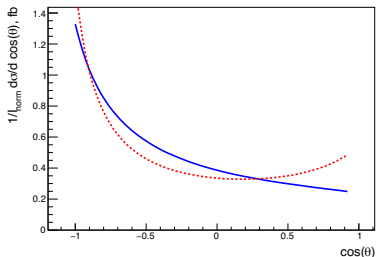
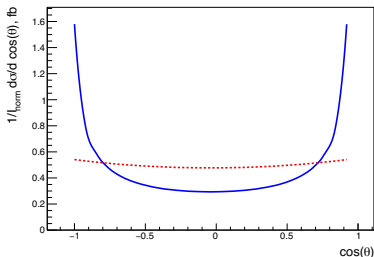
Темный скаляр и темный фотон на будущем e^+e^- -коллайдере

Кривые чувствительности на 90%-м уровне достоверности к параметру кинетического смешивания ϵ в зависимости от массы темного фотона $m_{A'}$ для процессов $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^- + \bar{\chi}\chi$



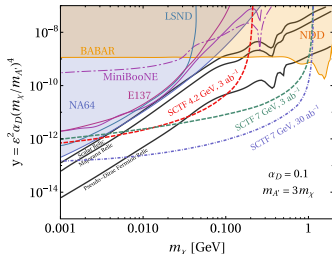
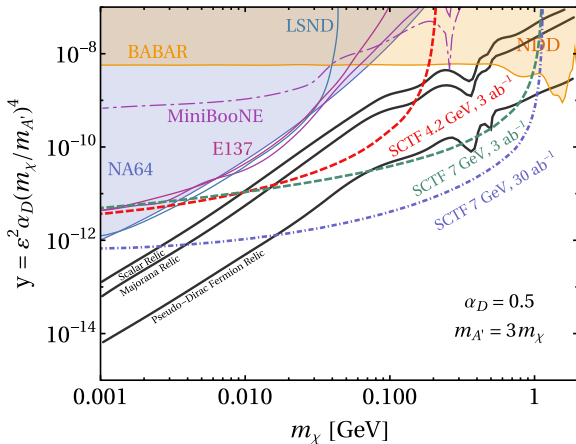
Phys.Rev.D 107 (2023) 7, 075021

На графике слева: θ — угол между импульсами начального электрона и конечного медиатора. На графике справа: θ — угол между импульсами конечного тау и конечного медиатора. Красная пунктирная линия соответствует темному скаляру с массой $= 0.5$ ГэВ и $\xi = 0.1$, синяя сплошная линия соответствует темному фотону с $\varepsilon = 0.0003$, $\sqrt{s} = 7$ ГэВ.



- выражения для физических полей, их масс и взаимодействий;
- предельный случай малых масс медиаторов и малых значений параметров смешивания;
- парциальные ширины распадов медиаторов и сечения ассоциативного образования темной материи с парой тау-лептонов в конечном состоянии в e^+e^- столкновениях.

Предпочтительные значения параметров для учета наблюдаемой реликтовой плотности темной материи



Кривые чувствительности на 90%-м уровне достоверности к параметру связи ξ в зависимости от массы темного скаляра m_ϕ для процессов $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^- + \bar{\chi}\chi$

