

**СЕКЦИЯ 8. ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ФИЗИКА
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**ОЦЕНКА ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕМНЫХ ФОТОНОВ В МАГНИТНОМ
ПОЛЕ СПЕЦИАЛЬНОГО ВИДА**

И.В. Ворончихин, Б.И. Василишин

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. А.Ю. Трифонов
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: IVV1211@yandex.ru

**RADIATION OF DARK PHOTONS IN ELECTROMAGNETIC
FIELDS OF SPECIAL KIND**

I.V. Voronchikhin, B.I. Vasilishin

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.Yu. Trifonov
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: IVV1211@yandex.ru

Annotation. In this paper, using the Lagrangian of the standard model, taking into account the mixing of a dark and electromagnetic photon, an expression for the 4-potential of a dark photon is obtained. Assuming that the mass of the dark photon is small, longitudinal polarization can be neglected and synchrotron radiation formulas used for estimation.

Интенсивные исследования тёмной материи, проводятся как на крупнейших ускорителях (LHC, CEBAF) так и в экспериментах, не использующих ускорители (CAST, ADMX). Одна из трудностей в исследовании тёмной материи заключается в том, что она может наблюдаться только при гравитационном взаимодействии. Однако, имеется уникальная возможность существования новой силы взаимодействия между «тёмным» сектором и видимым веществом, передаваемая новым векторным бозоном (тёмным фотоном) [1]. Тёмный фотон может образовываться в реакции вида: $e^- Z \rightarrow ZA'$, когда пучок электронов (e^-) попадает на активную мишень (Z). Далее такой бозон может распасться на два лептона из тёмного сектора $A' \rightarrow \chi^- \chi$. Проведённые в 2016 году исследования по прямому поиску векторного бозона в суб-гэвном регионе масс в эксперименте NA64, SPS CERN, показали для набранной статистики в $4,3 \cdot 10^{10}$ электронов, попавших на мишень, отсутствие сигналов, характерных для такого процесса. Таким образом, были получены новые, более строгие, ограничения на константу смешивания A' с фотонами: $10^{-5} < \varepsilon < 10^{-2}$ для массы $m_{A'} \leq 1$ ГэВ [2].

В теории поля массивные частицы со спином 1 описываются как кванты векторных полей. Такие векторные бозоны играют роль посредников взаимодействий в физике частиц. Темный фотон это массивная векторная частица со спином 1, которая, по теоретическим предположениям, обладает схожими квантовыми числами с электромагнитным фотоном, с массой в пределах $0,002-0,4$ ГэВ и константой смешивания с электромагнитным фотоном $\varepsilon < 1,2 \cdot 10^{-4}$. Взаимодействие со стандартной моделью осуществляется через смешивание с электромагнитным фотоном. Общий лагранжиан имеет вид [2]:

$$L = -\frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} + \bar{\psi} \left\{ \gamma_{\mu} (i\partial^{\mu} - eA^{\mu}) - M_{\psi} \right\} \psi + \frac{1}{2} F'^{\mu\nu} F_{\mu\nu} - \\ - \frac{1}{4} F'^{\mu\nu} F'_{\mu\nu} + \frac{1}{2} \frac{M_{A'}^2 c^2}{\hbar^2} A'^{\mu} A'_{\mu} + \bar{\chi} \left\{ \gamma_{\mu} (i\partial^{\mu} - gA'^{\mu}) - M_{\chi} \right\} \chi,$$

где $F^{\mu\nu}, F'^{\mu\nu}$ – тензор напряженности электромагнитного поля и поля темного фотона;

A^{μ}, A'^{μ} – 4-вектор потенциала электромагнитного и темного фотонов, соответственно;

$M_{A'}, M_{\chi}, M_{\psi}$ – масса темного фотона, темного фермиона и частицы стандартной модели соответственно.

Используя уравнение Эйлера-Лагранжа, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \partial_{\mu} F'^{\mu\nu} + \lambda_{M_{A'}}^2 A'^{\nu} = \tau \partial_{\mu} F^{\mu\nu} \\ \partial_{\mu} F^{\mu\nu} = \tau \partial_{\mu} F'^{\mu\nu}, \end{cases}$$

решив данную систему, получим выражение для 4-потенциала темного фотона:

$$A'^{\nu} = \sum_{\mu, \lambda} e_{\lambda}^{\nu} \left(c_{\mu\lambda}^{-} e^{-ix_{\beta}\psi^{\beta}} + c_{\mu\lambda}^{+} e^{ix_{\beta}\psi^{\beta}} \right),$$

где x_{β}, ψ^{β} – 4-вектор координаты и волновой 4-вектор, соответственно;

e_{λ}^{ν} – вектор поляризации.

4-потенциалы темного и электромагнитного фотона отличаются количеством поляризаций и наличием массы в степени экспоненты.

Далее рассмотрим случай, что масса темного фотона мала, тогда для оценки вероятности рождения темного фотона можно пренебречь продольной поляризацией. В этом случае можно использовать формулы для синхротронного излучения электромагнитного фотона, основываясь на формулах из источника [3], мощность излучения для темного фотона имеет вид:

$$W = \frac{ce_0^2}{2\pi} \int \delta(E - E' - \hbar\omega_{A'}) (\Phi_2 + \Phi_3) d^3\psi \ll \Phi_2 = (\vec{\alpha} \cdot \beta_2) (\vec{\alpha} \cdot \beta_2), \quad \Phi_3 = (\vec{\alpha} \cdot \beta_3) (\vec{\alpha} \cdot \beta_3)$$

где E, E' – энергия электрона до и после излучения;

$\omega_{A'} = \sqrt{(c\hbar\psi)^2 + (M_{A'}c^2)^2}$ – частота темного фотона;

β_2, β_3 – линейные поляризации;

$\vec{\alpha}$ – средние матрицы Дирак.

В случае движения электрона в однородном и постоянном магнитном поле, направленном вдоль оси Oz спектр энергий, имеет вид [4]:

$$E = \sqrt{(m_0c^2)^2 + 2n(c\hbar)^2 \frac{\omega_c}{c\lambda_k} + c^2 p_3^2}, \quad E' = \sqrt{(m_0c^2)^2 + 2n'(c\hbar)^2 \frac{\omega_c}{c\lambda_k} + (\hbar p_3 - \hbar\psi_3)^2}$$

где ω_c – циклотронная частота;

λ_k – длина Комптона;

n, n' – номера состояний до и после излучения;

$\vec{p}, \vec{\psi}$ – импульс электрона и волновой вектор темного фотона.

В случае нулевой проекции импульса электрона на ось Oz модуль волнового вектора темного фотона с учетом дельта-функции под интегралом:

$$c\hbar k = \left\{ \frac{E^2}{\sin^4(\theta)} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\left\{ 2\nu(c\hbar)^2 \frac{\omega_c}{c\lambda_k} + (M_A c^2)^2 \cos^2(\theta) \right\} \sin^2(\theta)}{E^2}} \right)^2 - (M_A c^2)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

В магнитном поле данного вида вероятность рождения темного фотона мала. Рассмотрение электромагнитных полей более общего вида и выявление условий, в которых вероятность рождения достаточна для экспериментального обнаружения, связано с трудностями решения уравнения Дирака для произвольных электромагнитных полей, в данном случае возможно использование асимптотических методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gninenko S. N. Search for MeV dark photons in a light-shining-through-walls experiment at CERN// Phys. Rev. D. – 2014. – vol. 89. – no.8. – Article number 075008.
2. D. Banerjee et al. (The NA64 Collaboration), Search for vector mediator of dark matter
3. Соколов А.А., Тернов И.М. Релятивистский электрон: 2-е изд., перераб. – М.: Наука, 1983. – 304 с.

РЕАЛИЗАЦИЯ МАГИСТЕРСКОЙ ПРОГРАММЫ ПО ИЗОТОПНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ

Л.И. Дорофеева, А.П. Вергун

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

IMPLEMENTATION OF MASTER DEGREE PROGRAM ON ISOTOPE TECHNOLOGIES IN CONDITIONS OF ELECTRONIC EDUCATIONAL ENVIRONMENT DEVELOPMENT

L.I. Dorofeyeva, A.P. Vergun

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: dorofeyeva @tpu.ru

Annotation. *The level training increasing problem of the Master's degree students in Modern Isotope technologies and Radiation safety, having demanded competences in the field of Nuclear physics and Technology, is relevant for enterprises characterized by high level of technique and technology, automation and knowledge-intensity, as well as scientific and educational organizations. The work considers the main issues on the organization of the educational process in cooperation with enterprises - partners in the conditions of development of the electronic educational environment.*

Развитие промышленности и общества в целом неразрывно связано с изменениями в системе образования и потребностями в новых навыках и компетенциях. Прежде всего, профессиональные компетенции претерпевают изменения в зависимости от запросов общества в силу его динамичного развития. Профессиональные компетенции (знания, умения и владение опытом) обновляются вслед за новыми процессами, возникающими в меняющемся мире [1–12]. Такие изменения, как показывает опыт реализации образовательной программы по изотопным технологиям [13] направления «Ядерные