

Изотоп Nd-150, эксперимент DCBA

Е. А. Куров^{1,2*}¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Физический факультет²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1 стр. 2

Эксперимент DCBA (Drift Chamber Beta-ray Analyzer) представляет собой проект по обнаружению двойного безнейтринного бета-распада в элементах Nd-150 и Se-82, в котором используется трековая камера со сверхпроводящим соленоидным магнитом (SCSM). Дальнейший поиск $0\nu\beta\beta$ при увеличении периодов полураспада вплоть до 1026 с возможен с помощью проекта MTD (Magnetic Tracking Detector), являющимся идейным продолжением эксперимента DCBA. В настоящее время разработка проекта MTD приостановлена по причине технической сложности получения Nd-150 с достаточной степенью обогащения.

PACS: 23.40.-s

УДК: 539.169

Ключевые слова: двойной бета-распад, нейтрино, эксперимент DCBA, Nd-150.

ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты по обнаружению безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu\beta\beta$) позволяют определить, являются ли нейтрино майорановскими частицами. Согласно теории лептогенезиса, массивные майорановские частицы играют важную роль в происхождении Вселенной, в частности они обеспечивают преимущество материи над антиматерией; таким образом, понимание природы нейтрино существенно для понимания происхождения ранней Вселенной.

Помимо этого, измерение периода полураспада $0\nu\beta\beta$, можно получить эффективную массу нейтрино ($\langle m_{\beta\beta} \rangle$). Из экспериментов по осцилляции нейтрино известны параметры осцилляции нейтрино; и несмотря на то, что они не могут содержать информации об абсолютной массе нейтрино, из них можно предсказать массовые спектры. Один из спектров заключается в том, что все собственные состояния масс (m_1, m_2, m_3) почти совпадают, что называют квазивырожденным (QD, quasi-degenerate) спектром. Два других спектра представляют собой случаи $m_2 > m_1 \gg m_3$ и $m_1 < m_2 \ll m_3$, и называются спектрами обратной (IH, inverted-hierarchy) и нормальной (NH, normal-hierarchy) иерархий, соответственно. Значение $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ составляют 100–500 мэВ, 10–50 мэВ и 1–5 мэВ для QD, IH и NH-спектров, соответственно.

1. РАСПАД Nd-150 И ФОНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

На рис. 1 приведены схемы распада Nd-150 и Bi-214, последний из которых относится к естественной цепи распадов U-238. Поскольку период полураспада по каналу $0\nu\beta\beta$ по оценкам больше 1024 лет, то события

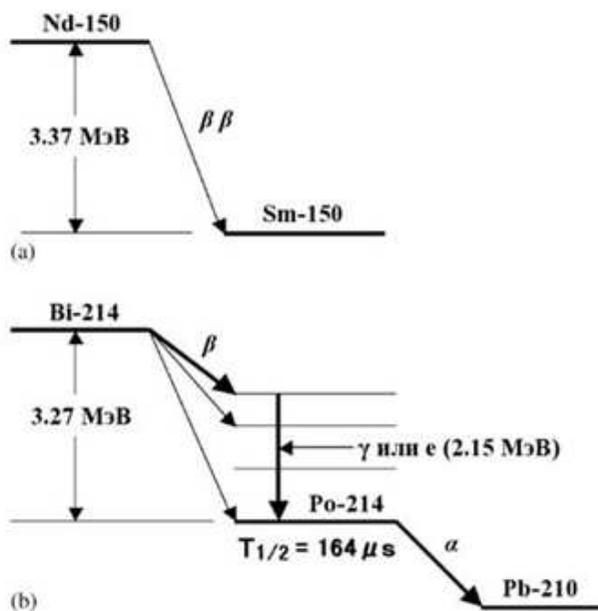


Рис. 1: Схема распада Nd-150 (а) и фонового события от цепочки распада Bi-214 (б)

$0\nu\beta\beta$ крайне редки. С другой стороны, распады Bi-214 имеют сходство с событиями $0\nu\beta\beta$, так как бета-распад Bi-214 до Po-210 с определённой вероятностью (рис. 2) происходит на возбуждённые состояния, из-за чего происходит испускание электрона внутренней конверсии; при этом разница масс между Bi-214 и Po-214 составляет 3.27 МэВ.

Таким образом, для выделения $0\nu\beta\beta$ событий на фоне распадов Bi-214 необходимо детектировать альфа-частицу, испускаемую при распаде Po-214, т.е. детектировать альфа-частицу, испускаемую с задержкой, примерно равной периоду полураспада $T_{1/2} = 164 \mu\text{s}$. Эта задача осуществляется с помощью т.н. мгновенной аналогово-цифровой электрон-

*E-mail: ea.kurov@physics.msu.ru

ной системы получения данных (FADC-based DAQ, flash analog-to-digital data acquisition)

А. Эксперимент DCBA

Принцип действия детектора DCBA основан на том, что пластины из распадающегося элемента (Nd-150 или Se-82) расположены в камере, заполненной смесью He и CO₂ в соотношении 90% :10%. Магнитное поле **B** направлено параллельно пластинам (рис.3), поэтому при перпендикулярном испускании электрона из пластины-источника он движется по спиралевидной траектории, которая, в свою очередь регистрируется за счёт ионизации в камере.

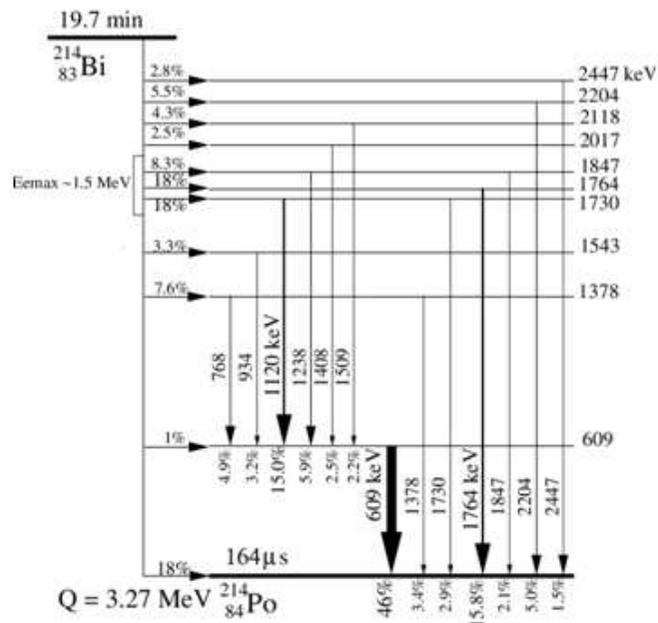


Рис. 2: Более подробная схема для Bi-214

Стоит отметить, что при бета-распаде в отличие от, например, альфа-распада, значительно меньше зависимость вероятности распада от энергии и существенную роль имеет уносимый электронами полный момент импульса **J**, что приводит к тому, что бета-распад часто происходит на возбуждённые состояния конечного ядра. При дальнейшем распаде из возбуждённого состояния в основное может происходить так называемое явление внутренней конверсии, в ходе которого испускается не гамма-квант, а т. н. конверсионный электрон, энергия которого равна разности энергии ядерного перехода и энергии связи электрона на оболочке, с которой он был испущен. Например, в рассматриваемом ниже детекторе DCBA электроны внутренней конверсии имеют значительный вклад в фон, а также используются для определения энергетического разрешения (рис. 5).

2. МАГНИТНЫЙ ДЕТЕКТОР ТРЕКОВ

Значительная часть экспериментов в области $0\nu\beta\beta$ -распадов использует калориметры для измерения энергии пучка бета-частиц. Однако, организацией КЕК был разработан детектор DCBA (Drift Chamber Beta-ray Analyzer), состоящий из детекторов треков и соленоидного магнита. Проект детектора DCBA представляет собой дальнейшее конструирование детектора MTD (Magnetic Tracking Detector, временное название).

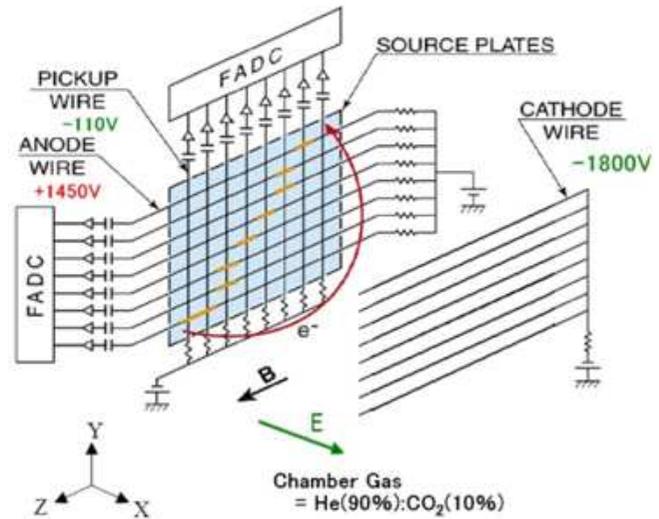


Рис. 3: Принцип устройства DCBA

В. DCBA-T2

Прототип DCBA-T2 подтвердил возможность принципа детектирования, описанного выше. В значительной степени улучшено разрешение Z-координаты за счёт сближения анодных и считывающих (pickup wire) проводов. Энергетическое разрешение было измерено с помощью точечного источника Bi-207, расположенного в центре камеры. На рис.4 приведены образцы траекторий электронов. На данных графиках число X означает число отсчётов, а числа Y и Z связаны с анодным и считывающим проводами, соответственно.

Треки электронов и альфа-частиц можно легко различить, так как импульс альфа-частицы с измеримой длиной трека слишком велик для того, чтобы получилась спиралевидная траектория, и помимо этого, высота импульса на считывающей аппаратуре значительно выше, чем для электрона. Импульс p (МэВ/с) и кинетическая энергия T (МэВ) связаны с углом наклона траектории λ , радиусом траектории r (см) и индукцией магнитного поля B (КГс) следующей формулой:

$$p \cos(\lambda) = 0.3rB.$$

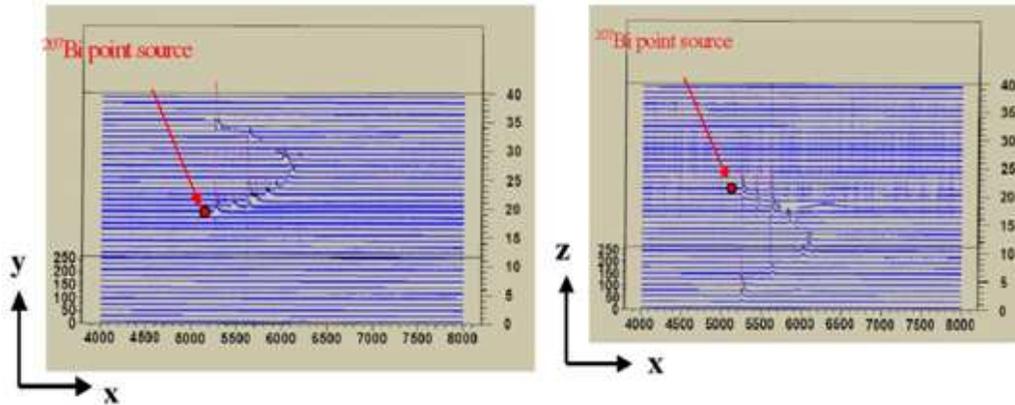


Рис. 4: Образцы треков электронов внутренней конверсии Bi-207

Кинетическую энергию бета-частицы можно рассчитать по формуле:

$$T = \sqrt{p^2 + m_e^2} - m_e.$$

В отличие от привычных двойных бета-распадов ($2\nu\beta\beta$), имеющих широкий непрерывный энергетический спектр, $0\nu\beta\beta$ -распады имеют пик в окрестности величины Q (энергии реакции) с шириной пика, зависящей от энергетической разрешающей способности детектора. Поскольку период полураспада $0\nu\beta\beta$ теоретически на 6 порядков выше, чем $2\nu\beta\beta$, то число событий $0\nu\beta\beta$ вблизи величины Q сравнимо с числом событий $2\nu\beta\beta$ в той же окрестности. По этой причине энергетическое разрешение должно быть максимально возможным вблизи Q , чтобы возможно различие между $0\nu\beta\beta$ и $2\nu\beta\beta$.

Основной причиной снижения энергетического разрешения в ДСВА является тот факт, что электрон претерпевает многочисленные рассеяния на молекулах газа, что приводит к искажению траектории. Таким образом, желательно уменьшить размеры траектории для снижения числа актов рассеяния. Из уравнения, приведённого ранее, видно, что увеличение B позволяет снизить r при том же значении p .

В прототипе ДСВА-Т2, индукция магнитного поля была ограничена до 0.8 КГс в цилиндрическом объёме диаметром 0.5 м. и длиной 1.0 м. Это связано со большим электропотреблением соленоида и сложностями, связанными с его охлаждением. На рис. 5 приведен энергетический спектр, полученный на ДСВА-Т2, из которого видно, что энергетическое разрешение, определяемое, как полная ширина на половине высоты (FWHM) пика, при энергии 0.98 МэВ составляет около 0.15 МэВ. Если аналогично рассмотреть энергетическое разрешение при энергии, равной Q для Nd-150 (3.37 МэВ), то получим значение относительного энергетического расширения, равное 6,5%.

Для эффективного поиска $0\nu\beta\beta$ и получения эффективной нейтринной массы $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ вплоть до 30–50 мэВ требуется энергетическое разрешение меньше

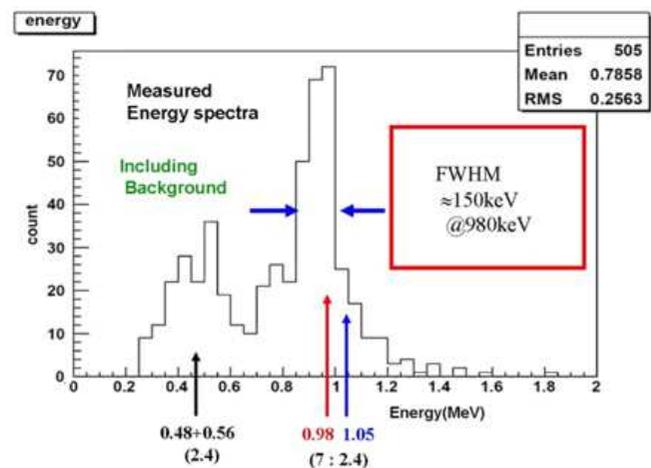


Рис. 5: Энергетический спектр электронов Bi-207

5,0% при энергии, равной Q . Согласно результатам моделирования с помощью Geant4, индукция магнитного поля должна составлять около 2.4 КГс для достижения энергетического разрешения в 4%.

1. ДСВА-Т3

Для достижения вышеупомянутого энергетического разрешения проводится конструирование прототипа ДСВА-Т3. Основными отличиями Т3 от Т2 являются индукция магнитного поля, расстояние между считывающими проводами и пластина-источник. В случае Т2 они составляют 0.8 КГс и 6 мм, соответственно, а также используется одна пластина размером $24 \times 24 \text{ см}^2$. В Т3 величина индукции магнитного поля ограничена 3 КГс, расстояние между считывающими проводами составляет 3 мм, и используются несколько пластин размером $45 \times 45 \text{ см}^2$, состоящие из 5,6% Nd-150. За счёт уменьшения размеров траектории возможно энергетическое разрешение менее 100 КэВ на всём энер-

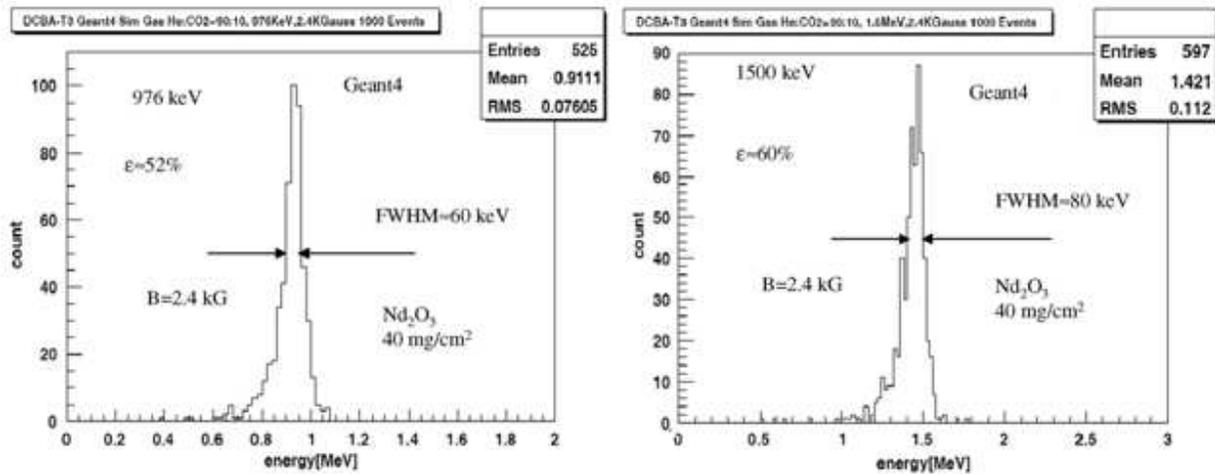


Рис. 6: Результаты моделирования энергетического разрешения в DCBA-T3 с помощью Geant4 при энергиях около 1 МэВ (слева) и 1.5 МэВ (справа)

гетическом диапазоне от 0.5 до 3.0 МэВ, что означает достижение относительного энергетического разрешения в 5% при энергии 3.37 МэВ. Ранее были приведены схематическое изображение DCBA-T3 и результаты моделирования для энергетического разрешения.

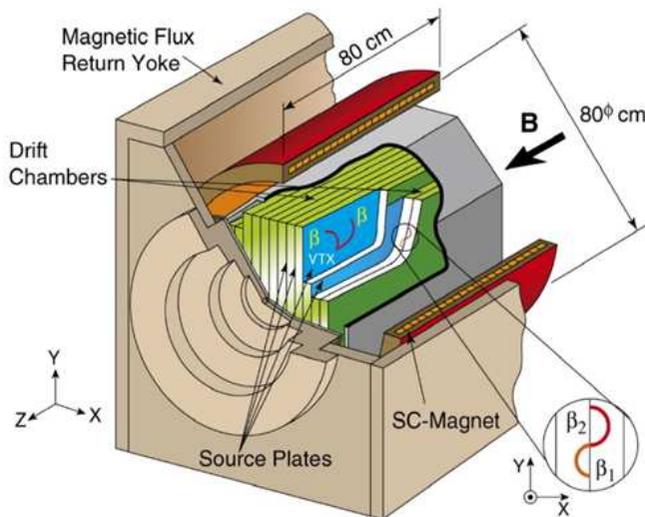


Рис. 7: Схема DCBA-T3

камер), но и обеспечивает значительное снижение потребления электроэнергии за счёт уменьшения систем охлаждения. В частности, несмотря на то, что индукция магнитного поля была увеличена от 0.8 до 2.4 КГс, а рабочий объём — от $1.2 \times 10^5 \text{ см}^3$ до $3 \times 10^5 \text{ см}^3$, потребление электроэнергии фактически не изменилось при переходе от DCBA-T2 к DCBA-T3.

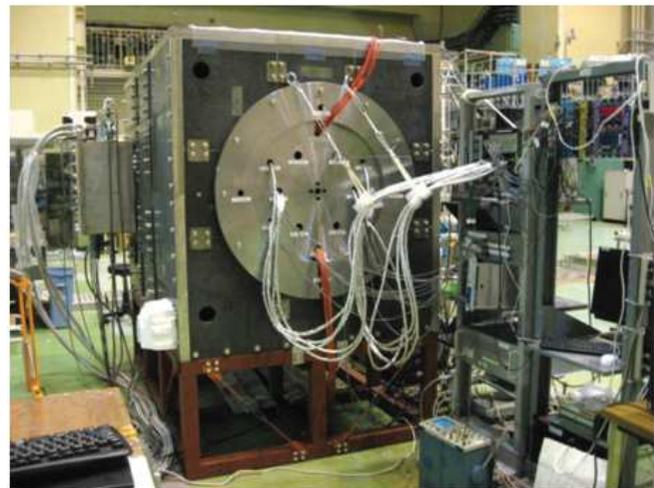


Рис. 8: SCMS для DCBA-T3

2. Сверхпроводящий соленоидный магнит (SCSM) для DCBA-T3

Для обеспечения упомянутых выше значений индукции магнитного поля в DCBA-T3 будет использоваться т. н. SCSM (Superconducting Solenoid Magnet), обеспечивающий не только необходимые значения B , составляющее 2.4 КГс (что требуется для того, чтобы радиус траекторий не превышал 5 см, т.е. ширины каждой из

С. Проект MTD

Для дальнейшего поиска $0\nu\beta\beta$ при увеличении периода полураспада до 1026 лет необходимо по меньшей мере 100 моль вещества-источника. Если предположить наличие 100% обогащённый источник Nd-150, то полный вес пластин-источников будет составлять около 150 кг. Основываясь экспериментах на DCBA-T2

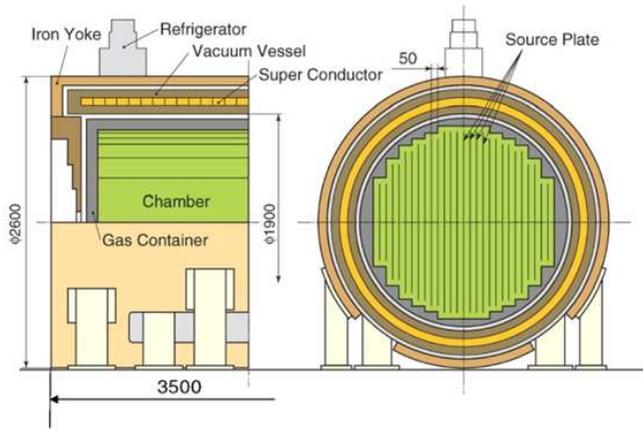


Рис. 9: Схематическое изображение MTD

и DCBA-T3, предложена идея крупномасштабного детектора MTD (Magnetic Tracking Detector, временное название), схема которого приведена на рис. 9. MTD имеет внешний диаметр 2.6 м и длину 3.5 м и позволяет разместить до 80 м² пластин-источников. Если плотность пластин составляет 40 мг/см², то в каждом

из модулей можно разместить до 30 кг источника. Таким образом, 5 модулей MTD обеспечат наблюдение $0\nu\beta\beta$ до периода полураспада порядка 1026 лет при 100% обогащённом Nd-150. Если использовать природный Nd (степень обогащения Nd-150 — 5,6%), то требуется установка 100 модулей, что вызывает значительные технические сложности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, стоит сказать, что детекторы DCBA/MTD способны обнаруживать не только события $2\nu\beta\beta$, но и $0\nu\beta\beta$. После окончания конструирования DCBA-T3 и проверки энергетического разрешения при энергии, равной Q для Nd-150, возможна установка детекторов DCBA-T3 в подземной лаборатории за счёт компактности детектора, SCSM и систем охлаждения. Несмотря на то, что обогащение Nd пока не представляется возможным, в будущем с помощью проекта MTD будут достижимыми значения $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ до 30 мэВ, что соответствует периоду полураспада $0\nu\beta\beta$ примерно от 10^{25} до 10^{26} лет.

- [1] Ishihara N. et al. J. Phys.: Conf. Ser. **375**. 042017. (2012).
 [2] Ishihara N. et al. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. **623**. P. 457. (2010).
 [3] Kawai M. et al. Prog. Theor. Exp. Phys. 023H01. (2014).

- [4] Kato Y. et al. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. **498**. P. 430. (2003).
 [5] Arnold R. et al. Phys.Rev. D. **92**. 072011. (2015).

Nd-150 isotope, DCBA experiment

E. A. Kurov^{1,2}

¹Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University Leninskie gory, Moscow 119991, Russia
 E-mail: ea.kurov@physics.msu.ru

The DCBA (Drift Chamber Beta-ray Analyzer) experiment is a project aimed at discovering of neutrinoless double beta decay in isotopes of Nd-150 and Se-82; that utilizes a track chamber with a Superconducting Solenoid Magnet (SCSM). Further search for $0\nu\beta\beta$ with increasing half-life ranging to the order of 1026 s is possible by means of the MTD (Magnetic Tracking Detector) project, which is a follow-up prototype based upon the DCBA experiment. Presently the development of the MTD project is halted due to the technical difficulty of obtaining Nd-150 of sufficient enrichment factor.

PACS: 23.40.-s.

Keywords: double beta decay, neutrino, DCBA experiment, Nd-150.

Сведения об авторе

Куров Евгений Алексеевич — студент физического факультета МГУ, кафедра общей ядерной физики; тел. (499) 784-71-54; (903) 527-40-78, e-mail: ea.kurov@physics.msu.ru.