

Поиск неупругого рассеяния частиц темной материи на ядрах ^{83}Kr с возбуждением низколежащего ядерного уровня

© А.В. Дербин¹, И.С. Драчнев¹, Ю.М. Гаврилюк², А.М. Гангапшев², В.В. Казалов², В.В. Кузьминов², В.Н. Муратова¹, Д.А. Семенов¹, Д.А. Текуева², М.В. Трушин¹, Е.В. Унжаков¹, С.П. Якименко²

¹ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ „Курчатовский институт“, Гатчина, Ленинградская обл., Россия

² Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

E-mail: derbin_av@npni.nrcki.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 13 августа 2025 г.

Принято к публикации 14 августа 2025 г.

Выполнен поиск возбуждения первого ядерного уровня с энергией 9.4 keV нуклида ^{83}Kr массивными слабовазаимодействующими частицами темной материи. Для поиска использовался газовый пропорциональный счетчик, заполненный изотопом ^{83}Kr . Эксперимент проводился в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН. В результате установлен новый верхний предел на сечение возбуждения ядерного уровня, который для частиц массой 20 GeV составляет $\sigma_0^{\text{SD}} \leq 3.4 \cdot 10^{-35} \text{ cm}^2$ для 90 % уровня достоверности.

Ключевые слова: темная материя, слабовазаимодействующие массивные частицы, WIMPs, неупругое рассеяние.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.24.61746.7930

Массивные слабовазаимодействующие частицы (weakly interacting massive particles, WIMPs), в частности легчайшие суперсимметричные частицы, продолжают оставаться наиболее популярными кандидатами на роль частиц темной материи. Большинство экспериментов, таких как XENON, LZ, PandaX, CDMS, DarkSide и др., направлено на поиски упругого когерентного спин-независимого рассеяния WIMPs на ядрах, в которых регистрируется ядро отдачи [1]. В то же время существуют возможности неупругого спин-зависимого рассеяния WIMPs с возбуждением низколежащих ядерных уровней. Несмотря на ожидаемое более низкое сечение такой реакции, очевидным преимуществом является возможность регистрации рентгеновских и гамма-квантов, конверсионных и оже-электронов, возникающих при разрядке низколежащего ядерного уровня с характерным энергетическим спектром и задержанных относительно сигнала от ядра отдачи на время жизни уровня.

Поиски неупругого рассеяния были выполнены в экспериментах ELEGANT V [2], DAMA [3,4] и COSINE [5] для ядер ^{127}I с использованием NaI-детекторов и XMASS [6–8] и XENON [9,10] для ядер ^{129}Xe с жидко-ксеноновыми времяпроекционными камерами. Помимо ядер ^{127}I и ^{129}Xe [11] теоретически были рассмотрены ожидаемые сечения для ядер ^{125}Te [12], ^{83}Kr [13] и ряда других ядер [14].

Переходы в возбужденные состояния [11,13] обычно энергетически подавлены, за исключением некоторых нечетных (по массовому числу A) ядер, которые имеют низколежащие возбужденные состояния и для которых возможны переходы в возбужденные состояния, обусловленные спин-зависимым взаимодействием. В на-

стоящей работе мы проанализировали энергетический спектр большого газового пропорционального счетчика, заполненного изотопом ^{83}Kr , который имеет ядерный уровень с энергией 9.4 keV. Ядро ^{83}Kr имеет нечетное число нейтронов и должно быть чувствительно к спин-зависимому взаимодействию WIMP–нейтрон. Переход с первого возбужденного состояния $7/2^+$ на основное состояние $9/2^+$ соответствует $M1$ -переходу с небольшой примесью $E2$ -перехода, которая составляет $\delta = 0.0129$. Время жизни уровня составляет 212 ns, что вполне допускает использование задержанных совпадений в жидкоцинтилляционных или твердотельных детекторах, но затруднено в газовых счетчиках из-за большого ($\sim 1 \mu\text{s}$) времени собирания заряда.

Согласно стандартной модели гало нашей галактики, плотность темной материи в области Солнечной системы составляет 0.2–0.6 GeV/cm³, распределение WIMPs по скоростям соответствует распределению Максвелла–Больцмана $f(v)$ с наиболее вероятной скоростью 230 km/s, обрезанному для скоростей больше 530 km/s [15]. Для вычисления потоков WIMPs в окрестности Земли распределение $f(v)$ должно быть преобразовано с учетом движения Земли со скоростью 230 km/s в составе Солнечной системы [16,17]. Средняя кинетическая энергия WIMPs в лабораторной системе составляет $\sim 0.5 \cdot 10^{-6}$ от массы WIMPs m_W , что при больших значениях m_W достаточно для возбуждения ядерных уровней с энергией ~ 10 keV. Для возбуждения ядерного уровня с энергией E_{ex} в ядре с массой m_A масса WIMPs должна превышать значение $m_{W \text{ min}} = m_A / (m_A v_{\text{esc}}^2 / 2E_{\text{ex}})$. Для ядра ^{83}Kr и скорости вылета из гало $v_{\text{esc}} = 600$ km/s минимальное значение

$m_{W \min}$ составляет 5 GeV. Это значение следует сравнить со значениями $m_{W \min} = 39$ и 21 GeV для ядер ^{127}I и ^{129}Xe соответственно. Эксперимент с ^{83}Kr позволяет существенно расширить область исследования возможных масс WIMPs.

При неупругом рассеянии с переходом ядра в возбужденное состояние энергия ядра отдачи должна быть выше некоторой минимальной энергии, которая зависит от энергии возбуждения E_{ex} , массы ядра m_A , массы WIMPs m_W и скорости вылета v_{esc} . Минимальная и максимальная энергия, которая может быть передана ядру отдачи ^{83}Kr при рассеянии WIMP с массой 20 GeV, составляет 0.05 и 50 keV соответственно [13].

Ожидаемая форма энергетического спектра ядер отдачи $S(E_i)$ в детекторе при рассеянии WIMPs со скоростями v_k вычисляется следующим образом:

$$S(E_i) = \frac{\rho_W}{m_W} \sum_{k_{\min}}^{k_{\text{esc}}} \sigma_{ex}(E_i, v_k) f(v_k) v_k \Delta v_k, \quad (1)$$

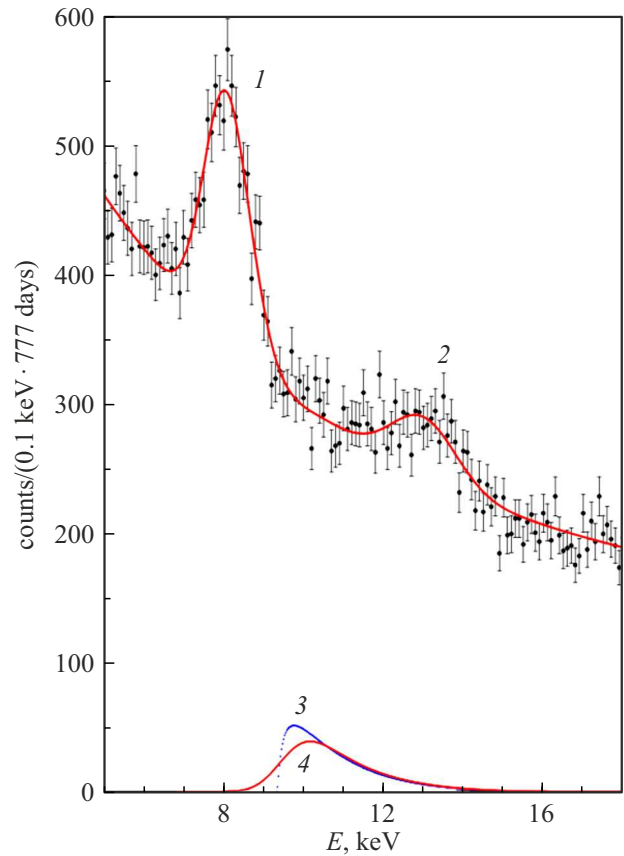
где $\rho_W = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$ — локальная плотность темной материи, σ_{ex} — сечение неупругого рассеяния WIMP с возбуждением ядерного уровня. Сумма вычисляется с шагом Δv_k от минимальной скорости $v_{\min}$, необходимой для возбуждения ядра ^{83}Kr , до максимальной скорости v_{esc} . При неупругом рассеянии с возбуждением ядерного уровня значение $v_{\min}$ увеличивается от минимальной скорости, необходимой в случае упругого рассеяния для получения ядром отдачи энергии E_i , $v_0 = (m_A E_i / 2\mu^2)^{1/2}$ до величины $v_{\min} = v_0 + v_{thr}^2 / 4v_0$. Здесь $\mu = m_A m_W / (m_A + m_W)$ — приведенная масса ядра и WIMPs, $v_{thr} = (2E_{ex} / \mu)^{1/2}$ — минимальная скорость, необходимая для возбуждения ядерного уровня. Изотоп ^{83}Kr имеет преимущество перед отмеченными выше изотопами ^{127}I и ^{129}Xe , связанное с более низкими значениями $v_{\min}$ и $m_{W \min}$, что расширяет область исследуемых масс и скоростей WIMPs.

Для стандартного спин-зависимого взаимодействия сечение взаимодействия обратно пропорционально квадрату скорости WIMPs [1]:

$$\sigma_{ex}(E_i, v_k) = \frac{m_{Kr}}{2\mu^2 v_k^2} \sigma_0^{SD} F_{SD}^2(E_i), \quad (2)$$

где σ_0^{SD} — спин-зависимое сечение в пределе нулевого переданного импульса, а F_{SD} — структурный ядерный форм-фактор [18]. Для получения реального спектра из выражений (1) и (2) следует учесть гашение ионизационного сигнала от ядер отдачи и конечное энергетическое разрешение детектора.

Низкофоновая установка с криптоновым пропорциональным счетчиком, снабженная пассивной для подавления внешних гамма- и нейтронного излучений и активной защитой из пластических скintилляторов для регистрации космических мюонов, располагалась в подземной Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН. Корпус цилиндриче-



Спектр Kr-счетчика и результаты подгонки двух гауссовых пиков суммой фона, описываемого экспоненциальной функцией, и функцией отклика детектора при неупругом рассеянии WIMPs. 1 — пик рентгеновского излучения меди; 2 — пик, связанный с распадом изотопа ^{81}Kr ; 3 — ожидаемый спектр от возбуждения уровня с энергией 9.4 keV при неупругом рассеянии WIMPs с массой 20 GeV с учетом гашения ионизационного сигнала; 4 — спектр 3 с учетом энергетического разрешения детектора.

ского счетчика изготовлен из меди и имеет внутренний диаметр 137 mm и длину 745 mm, полный объем составляет 10.8 л. Счетчик заполнен криптоном, обогащенным изотопом ^{83}Kr до 99.9%, при давлении 1.8 bar. Масса криптона в рабочем объеме счетчика (8.77 л) составляет 58 g. Спектр детектора, полученный за 777 суток реального („живого“) времени измерений, показан на рисунке. Первоначально эксперимент был выполнен с целью поиска резонансного поглощения солнечных аксионов с возбуждением первого ядерного уровня ^{83}Kr . Более подробно детали эксперимента описаны в работах [19–21].

Характерное время собирания электронов в газовом счетчике составляет около $1 \mu\text{s}$, что существенно превосходит время жизни рассматриваемого ядерного уровня ^{83}Kr . В результате сигнал неупругого взаимодействия WIMPs с ядром ^{83}Kr будет суммой сигналов от ядра отдачи и частиц (рентгеновского и гамма-излучения,

конверсионных и оже-электронов), возникающих при разрядке уровня с энергией 9.4 keV.

При разрядке ядерного уровня появляются в основном конверсионные электроны с L -, M - и N -оболочек (отношение вероятностей излучения конверсионного электрона и γ -кванта составляет $e/\gamma = 14.1$) и сопровождающее их рентгеновское излучение при переходах на L -оболочку. Фактически только γ -кванты могут вылетать из рабочего объема счетчика, фотоны L -серии, равно как и конверсионные и оже-электроны, полностью регистрируются детектором. В результате функция отклика Кг-счетчика при регистрации частиц с энергией 9.4 keV представляет собой гауссов пик при той же энергии с шириной, определяемой энергетическим разрешением детектора ($\sigma = 420$ eV).

Ионизация в газе, производимая ядром отдачи с энергией E_r , меньше, чем ионизация, производимая электроном с такой же энергией. Для события, в котором возникают электрон и ядро с энергиями E_e и E_r соответственно, зарегистрированная энергия E_{vis} выражается следующим образом: $E_{vis} = E_e + q(E_r)E_r$, где $q(E_r)$ — зависящий от энергии фактор гашения ионизации для ядер отдачи. Мы использовали фактор гашения для ядер ^{83}Kr , найденный из модели Линхарда [22,23]. Значение $q(E_r)$ меняется от 0.2 до 0.3 при изменениях E_r от 4 до 100 keV. В работе использовалось среднее значение $q(E_r) = 0.25$ для всех значений энергии. На рисунке показан вычисленный ожидаемый энергетический спектр неупругого рассеяния для WIMP массой $m_W = 20$ GeV (линия 4). В спектре учитывается энергетическое разрешение Кг-счетчика.

Измеренный спектр счетчика подгонялся выражением, описывающим непрерывный фон, двумя гауссовыми функциями с известной энергией и искомой ответной функцией для WIMPs массой 20 GeV. Результаты подгонки показаны на рисунке. Два хорошо выраженных гауссовых пика связаны с рентгеновским излучением меди, из которой изготовлен корпус счетчика, и распадами долгоживущего радиоактивного изотопа ^{81}Kr . Статистически значимой функции отклика для WIMPs с массой 20 GeV обнаружено не было, верхний предел на число событий в пике составил $S_{lim} = 140$ отсчетов для 90 % уровня достоверности (C.L.).

Ожидаемое число зарегистрированных событий неупругого рассеяния WIMPs $S = TN\varepsilon \sum S(E_i)$ определяется произведением потока WIMPs $\Phi_W = (\rho_W/m_W)\langle v \rangle$ (где $\langle v \rangle$ — средняя скорость WIMPs), сечения неупругого спин-зависимого взаимодействия, времени измерений $T = 6.71 \cdot 10^7$ s, числа атомов ^{83}Kr в счетчике $N = 4.19 \cdot 10^{23}$ и эффективности регистрации события $\varepsilon \approx 1$. Условие ($S \leq S_{lim}$) вместе с выражениями (1) и (2) и в предположении, что структурный ядерный форм-фактор $F_{SD} \approx 1$, позволяет ограничить сверху значение σ_0^{SD} :

$$\sigma_0^{SD} \leq 3.4 \cdot 10^{-35} \text{ cm}^2 \text{ (90 \% C.L.)}. \quad (3)$$

Ограничение (3) уступает достигнутым пределам, полученным в экспериментах DAMA [4], COSINE [5], XMASS [7] и XENON [10], которые использовали упомянутые выше сцинтилляционные и жидкоксереновые детекторы, ориентированные на поиск упругого рассеяния WIMPs на ядрах и имеющие значительно большую массу. Эксперимент по поиску возбуждения уровня 9.4 keV ядра ^{83}Kr был выполнен впервые. Для расширения исследований в область малых масс WIMPs мы планируем проанализировать данные эксперимента с низкотемпературным микрокалориметром на основе кристалла тулиевого граната ($\text{Tm}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), в состав которого входит изотоп ^{169}Tm , имеющий ядерный уровень с энергией всего 8.4 keV [24].

Проанализирован энергетический спектр большого газового пропорционального счетчика, заполненного изотопом ^{83}Kr , с целью поиска возбуждения низколежащего ядерного уровня с энергией 9.4 keV частицами темной материи. Для регистрации конверсионных и оже-электронов, гамма- и рентгеновских квантов, возникающих при разрядке данного уровня, использовался Кг-счетчик в низкофоновой установке Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН. Фоновый спектр был измерен в интервале 4–20 keV с энергетическим разрешением 420 eV (σ). В результате анализа спектра, полученного за 777 суток со счетчиком с 58 g изотопа ^{83}Kr , установлено новое ограничение на сечение неупругого рассеяния для WIMPs с массой 20 GeV: $\sigma_0^{SD} \leq 3.4 \cdot 10^{-35} \text{ cm}^2$ (90 % C.L.).

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-12-00046).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Navas, C. Amsler, T. Gutsche, C. Hanhart, J.J. Hernández-Rey, C. Lourenço, A. Masoni, M. Mikhasenko, R.E. Mitchell, C. Patrignani, C. Schwanda, S. Spanier, G. Venanzon, C.Z. Yuan, K. Agashe et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D, **110**, 030001 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevD.110.030001
- [2] K. Fushimi, H. Ejiri, R. Hazama, N. Kudomi, K. Nagata, H. Ohsumi, K. Okada, J. Tanaka (ELEGANT V Collaboration), Nucl. Phys. B, **35**, 400 (1994). DOI: 10.1016/0920-5632(94)90290-9
- [3] P. Belli, R. Bernabei, V. Landoni, F. Montecchia, W. Di Nicolantonio, A. Incicchitti, D. Prosperi, C. Bacci, D.J. Dai (DAMA Collaboration), Phys. Lett. B, **387**, 222 (1996). DOI: 10.1016/0370-2693(96)00951-3
- [4] R. Bernabei, P. Belli, R. Cerulli, C.J. Dai, G. Ignesti, A. Incicchitti, F. Montecchia, D. Prosperi (DAMA Collaboration), New J. Phys., **2**, 15 (2000). DOI: 10.1088/1367-2630/2/1/15

- [5] G. Adhikari, N. Carlin, J.Y. Cho, J.J. Choi, S. Choi, A.C. Ezeribe, L.E. França, C. Ha, I.S. Hahn, S.J. Hollick, E.J. Jeon, H.W. Joo, W.G. Kang, M. Kauer, B.H. Kim et al. (COSINE-100 Collaboration), *Phys. Rev. D*, **108**, 092006 (2023). DOI: 10.1103/PhysRevD.108.092006
- [6] H. Uchida, K. Abe, K. Hieda, K. Hiraide, S. Hirano, K. Ichimura, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, S. Moriyama, K. Nakagawa, M. Nakahata, H. Ogawa, N. Oka, H. Sekiya, A. Shinozaki, Y. Suzuki, A. Takeda, O. Takachio, D. Umemoto, M. Yamashita, B.S. Yang, S. Tasaka, J. Liu, K. Martens, K. Hosokawa, K. Miuchi, A. Murata, Y. Onishi, Y. Otsuka, Y. Takeuchi, Y.H. Kim, K.B. Lee, M.K. Lee, J.S. Lee, Y. Fukuda, Y. Itow, K. Masuda, Y. Nishitani, H. Takiya, N.Y. Kim, Y.D. Kim, F. Kusaba, K. Nishijima, K. Fujii, I. Murayama, S. Nakamura (XMASS Collaboration), *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2014**, 063C01 (2014). DOI: 10.1093/ptep/ptu064
- [7] K. Abe, K. Hiraide, K. Ichimura, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, M. Kobayashi, S. Moriyama, M. Nakahata, T. Norita, H. Ogawa, K. Sato, H. Sekiya, O. Takachio, A. Takeda, S. Tasaka, M. Yamashita, B.S. Yang, N.Y. Kim, Y.D. Kim, Y. Itow, K. Kanzawa, R. Kegasa, K. Masuda, H. Takiya, K. Fushimi, G. Kanzaki, K. Martens, Y. Suzuki, B.D. Xu, R. Fujita, K. Hosokawa, K. Miuchi, N. Oka, Y. Takeuchi, Y.H. Kim, K.B. Lee, M.K. Lee, Y. Fukuda, M. Miyasaka, K. Nishijima, S. Nakamura (XMASS Collaboration), *Phys. Lett. B*, **789**, 45 (2019). DOI: 10.1016/j.physletb.2018.10.070
- [8] T. Suzuki, K. Abe, K. Hiraide, K. Ichimura, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, M. Kobayashi, S. Moriyama, M. Nakahata, H. Ogawa, K. Sato, H. Sekiya, A. Takeda, S. Tasaka, M. Yamashita, B.S. Yang, N.Y. Kim, Y.D. Kim, Y. Itow, K. Kanzawa, K. Masuda, K. Martens, Y. Suzuki, B.D. Xu, K. Miuchi, N. Oka, Y. Takeuchi, Y.H. Kim, K.B. Lee, M.K. Lee, Y. Fukuda, M. Miyasaka, K. Nishijima, K. Fushimi, G. Kanzaki, S. Nakamura (XMASS Collaboration), *Astropart. Phys.*, **110**, 1 (2019). DOI: 10.1016/j.astropartphys.2019.02.007
- [9] E. Aprile, J. Aalbers, F. Agostini, M. Alfonsi, F.D. Amaro, M. Anthony, F. Arneodo, P. Barrow, L. Baudis, B. Bauermeister, M.L. Benabderrahmane, T. Berger, P.A. Breur, A. Brown, E. Brown et al. (XENON100 Collaboration), *Phys. Rev. D*, **96**, 022008 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevD.96.022008
- [10] E. Aprile, J. Aalbers, F. Agostini, M. Alfonsi, L. Althueser, F.D. Amaro, S. Andalo, E. Angelino, J.R. Angevaere, V.C. Antochi, F. Arneodo, L. Baudis, B. Bauermeister, L. Bellagamba, M.L. Benabderrahmane et al. (XENON1T Collaboration), *Phys. Rev. D*, **103**, 063028 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevD.103.063028
- [11] J.D. Vergados, H. Ejiri, K. G. Savvidy, arXiv:1307.4713v1
- [12] J.D. Vergados, F.T. Avignone III, M. Kortelainen, P. Pirinen, P.C. Srivastava, J. Suhonen, A.W. Thomas, arXiv:1601.06813v2
- [13] J.D. Vergados, F.T. Avignone III, P. Pirinen, P.C. Srivastava, M. Kortelainen, J. Suhonen, *Phys. Rev. D*, **92**, 015015 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevD.92.015015
- [14] G. Savvidy, J.D. Vergados, *Phys. Rev. D*, **87**, 075013 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevD.87.075013
- [15] K. Freese, J. Frieman, A. Gould, *Phys. Rev. D*, **37**, 3388 (1988). DOI: 10.1103/PhysRevD.37.3388
- [16] J. Lewin, P. Smith, *Astropart. Phys.*, **6**, 87 (1996). DOI: 10.1016/S0927-6505(96)00047-3
- [17] K. Freese, M. Lisanti, C. Savage, *Rev. Mod. Phys.*, **85**, 1561 (2013). DOI: 10.1103/RevModPhys.85.1561
- [18] S.B. Hu, J. Padua-Argüelles, S. Leutheusser, T. Miyagi, S.R. Stroberg, J.D. Holt, arXiv:2109.00193v2
- [19] Ю.М. Гаврилюк, А.Н. Гангапшев, А.В. Дербин, И.С. Драчнев, В.В. Казалов, В.В. Кобычев, В.В. Кузьминов, В.Н. Муратова, С.И. Панасенко, С.С. Раткевич, Д.А. Семенов, Д.А. Текуева, Е.В. Унжаков, С.П. Якименко, *Письма в ЖЭТФ*, **101** (10), 739 (2015). DOI: 10.7868/S0370274X15100021 [Yu.M. Gavriluk, A.N. Gangapshev, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, V.V. Kazalov, V.V. Kobychyev, V.V. Kuz'minov, V.N. Muratova, S.I. Panasencko, S.S. Ratkevich, D.A. Semenov, D.A. Tekueva, E.V. Unzhakov, S.P. Yakimenko, *JETP Lett.*, **101**, 664 (2015). DOI: 10.1134/S0021364015100069].
- [20] Ю.М. Гаврилюк, А.Н. Гангапшев, А.В. Дербин, И.С. Драчнев, В.В. Казалов, В.В. Кобычев, В.В. Кузьминов, В.Н. Муратова, С.И. Панасенко, С.С. Раткевич, Д.А. Текуева, Е.В. Унжаков, С.П. Якименко, *Письма в ЖЭТФ*, **107** (10), 617 (2018). DOI: 10.7868/S0370274X18100016 [Yu.M. Gavriluk, A.N. Gangapshev, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, V.V. Kazalov, V.V. Kobychyev, V.V. Kuz'minov, V.N. Muratova, S.I. Panasencko, S.S. Ratkevich, D.A. Tekueva, E.V. Unzhakov, S.P. Yakimenko, *JETP Lett.*, **107**, 589 (2018). DOI: 10.1134/S0021364018100090].
- [21] Ю.М. Гаврилюк, А.Н. Гангапшев, А.В. Дербин, И.С. Драчнев, В.В. Казалов, В.В. Кузьминов, М.С. Микulich, В.Н. Муратова, Д.А. Текуева, Е.В. Унжаков, С.П. Якименко, *Письма в ЖЭТФ*, **116** (1), 13 (2022). DOI: 10.31857/S123456782213002X [Yu.M. Gavriluk, A.N. Gangapshev, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, V.V. Kazalov, V.V. Kuz'minov, M.S. Mikulich, V.N. Muratova, D.A. Tekueva, E.V. Unzhakov, S.P. Yakimenko, *JETP Lett.*, **116**, 11 (2022). DOI: 10.1134/S0021364022601075].
- [22] J. Lindhard, Kong. Danske Vidensk. Selsk., *Mat.-Fys. Medd.*, **10**, 36 (1968).
- [23] J. Ziegler, J. Biersack, M. Ziegler, *SRIM: the stopping and range of ions in matter* (SRIM, Chester, MD, 2008). DOI: 10.1007/978-1-4615-8103-1_3
- [24] A.H. Abdelhameed, S.V. Bakhlanov, P. Bauer, A. Bento, E. Bertoldo, L. Canonica, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, N. Ferreira Iachellini, D. Fuchs, D. Hauff, M. Laubenstein, D.A. Lis, I.S. Lomskaya, M. Mancuso, V.N. Muratova, S. Nagorny, S. Nisi, F. Petricca, F. Proebst, J. Rothe, V.V. Ryabchenkov, S.E. Sarkisov, D.A. Semenov, K.A. Subbotin, M.V. Trushin, E.V. Unzhakov, E.V. Zharikov, *Eur. Phys. J. C*, **80**, 376 (2020). DOI: 10.1140/epjc/s10052-020-7943-5