

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.8

ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ И СВЕТОВОЙХОД ОБРАЗЦОВ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО
ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ ЭКСПЕРИМЕНТА ВМ@N

© 2023 г. Ф. Ф. Губер^a, А. П. Ивашкин^a, Н. М. Карпушкин^{a,*},
А. И. Махнев^a, С. В. Морозов^a, Д. В. Серебряков^a

^aИнститут ядерных исследований РАН
Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Физическая, 27

*e-mail: karpushkin@inr.ru

Поступила в редакцию 13.10.2022 г.

После доработки 20.10.2022 г.

Принята к публикации 12.12.2022 г.

Для идентификации нейтронов, образующихся в ядро-ядерных столкновениях при энергиях до 4 АГэВ в эксперименте ВМ@N с фиксированной мишенью на Нуклотроне (ОИЯИ, Дубна), и измерения их энергии планируется создать новый компактный времяпролетный детектор нейтронов. Этот детектор будет использоваться для измерения выходов и азимутальных потоков нейтронов, которые, как показано в различных теоретических моделях, должны быть чувствительны к уравнению состояния плотной ядерной материи. В качестве чувствительных элементов для активных слоев детектора нейтронов предлагается использовать пластиковые сцинтилляторы российского производства, а для регистрации фотонов – кремниевые фотоумножители с чувствительной площадью $6 \times 6 \text{ мм}^2$, по одному на каждую сцинтилляционную ячейку. Для достижения требуемого разрешения (порядка нескольких процентов) по энергии нейтронов в диапазоне энергий нейтронов до 4 ГэВ временное разрешение сцинтилляционных детекторов должно быть 100–150 пс. Обсуждается концепция времяпролетного нейтронного детектора. Приводятся результаты проведенных измерений световыходов и временного разрешения ряда образцов сцинтилляционных детекторов различных размеров. Результаты получены при использовании кремниевых фотоумножителей двух типов.

DOI: 10.31857/S0032816223030060, EDN: IRMZMA

ВВЕДЕНИЕ

ВМ@N (Baryonic Matter at Nuclotron) является действующим экспериментом с фиксированной мишенью на выведенном пучке Нуклотрона ускорительного комплекса NICA (ОИЯИ, Дубна, Россия) [1]. Исследовательская программа эксперимента ВМ@N направлена на изучение фазовой диаграммы состояния ядерной материи при высокой барионной плотности, которая образуется в процессе столкновения тяжелых ядер при энергиях до 4 АГэВ (где A – массовое число налетающих ядер). Плотность ядерной материи при таких энергиях столкновения может достигать значений, в несколько раз превышающих плотность обычной ядерной материи [2]. Значительный вклад в уравнение состояния ядерной материи, устанавливающее связь между давлением, плотностью, энергией и температурой, вносит также член, который характеризует степень изоспиновой (протон-нейтронной) асимметрии ядерной материи – энергию симметрии. В ряде эксперимен-

тов, выполненных ранее в GSI при энергиях налетающих ионов до 1 АГэВ, было показано, что отношения азимутальных прямых и эллиптических потоков нейтронов и протонов чувствительны к вкладу энергии симметрии в уравнения состояния [3–5]. При энергиях налетающих ионов в диапазоне 1–4 АГэВ экспериментальные данные по азимутальным потокам нейтронов отсутствуют, хотя именно в этой области энергий эти данные, совместно с данными по азимутальным потокам протонов, позволили бы определить параметры уравнения состояния плотной ядерной материи. Исследование зависимости энергии симметрии от плотности ядерной материи является принципиально важным как для ядерной физики, так и для астрофизики, поскольку структура нейтронных звезд, процессы при взрывах сверхновых, излучение гравитационных волн при слиянии звезд-компаньонов в двойных нейтронных звездах также тесно связаны с понятием энергии симметрии ядерной материи.

В ближайшие годы измерения азимутальных потоков нейтронов при энергии налетающих тяжелых ионов в диапазоне 1–4 АГэВ возможны только в эксперименте BM@N на выведенном пучке Нуклотрона в ОИЯИ. Азимутальные потоки протонов можно будет измерять с помощью существующей детекторной системы BM@N, а для измерения азимутальных потоков нейтронов необходимо разработать и изготовить новый детектор нейтронов.

КОНЦЕПЦИЯ НЕЙТРОННОГО ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА BM@N

В экспериментах, выполненных в GSI, при измерениях азимутальных прямых и эллиптических потоков нейтронов, полученных в столкновениях ядер золота при энергиях меньше 1 АГэВ, для идентификации нейтронов и измерения их энергии использовался времяпролетный детектор LAND [6]. Отдельные активные элементы детектора LAND представляют собой сборки из десяти чередующихся слоев длинных пластин пластикового сцинтиллятора и железа с размерами $200 \times 10 \times 0.5$ см. Свет с торцов каждой такой сборки считывается двумя фотоумножителями. Временное разрешение этого детектора составляет порядка 250 пс, координатная точность восстановления точки первого взаимодействия нейтрона в детекторе – порядка 3 см. Эффективность регистрации LAND одного нейтрона в событии составляет порядка 80% при энергии нейтрона более 400 МэВ.

Для экспериментов по исследованию свойств ядерной материи, образующейся при столкновениях радиоактивных ядер, которые планируются проводить в рамках R3B проекта на строящемся ускорительном комплексе FAIR в Дармштадте, Германия, изготавливается новый нейтронный детектор – NeuLAND [7]. Этот детектор собран только из пластиковых сцинтилляционных пластин с размером сцинтиллятора $250 \times 5 \times 5$ см. Свет с противоположных торцов сцинтилляционных пластин считывается также двумя фотоумножителями. Временное разрешение NeuLAND составляет 150 пс, координатная точность восстановления точки первого взаимодействия нейтрона в детекторе – 1.5 см. Эффективность регистрации одного нейтрона в событии достигает более 95% при энергии нейтрона в диапазоне 400–1000 МэВ. Часть уже изготовленного детектора предлагается использовать в эксперименте по измерению энергии симметрии в столкновениях ядер золота при энергиях меньше 1 АГэВ в эксперименте на ускорителе SIS18 в GSI [8].

Однако нейтронные детекторы типа LAND или NeuLAND не могут быть использованы для измерения азимутальных потоков нейтронов в области энергий сталкивающихся ядер более 1 АГэВ из-за

недостаточной гранулярности этих детекторов. Поэтому, в отличие от детекторов LAND и NeuLAND, в разрабатываемом нейтронном детекторе для эксперимента BM@N сцинтилляционные слои предлагается собирать из отдельных небольших пластиковых сцинтилляционных детекторов с площадью около 10–20 см².

Свет с каждого из этих сцинтилляционных детекторов предполагается считать напрямую с помощью полупроводниковых кремниевых фотоумножителей. Похожую структуру имеет, например, сегментированный адронный калориметр Fe-ANCal, созданный коллаборацией CALICE [9]. Но в этом детекторе свет с отдельных пластин сцинтилляционных детекторов собирается с помощью спектросмещающего оптоволоконка, что не позволяет получить временное разрешение порядка 100–150 пс.

Создание нейтронного детектора для BM@N требует выполнения целого комплекса исследований, включающих в себя как моделирование геометрии активных и пассивных элементов детектора для достижения необходимого разрешения по энергии нейтронов и эффективности регистрации нейтронов, так и разработку алгоритмов и программного обеспечения для реконструкции энергии нейтронов, разработку системы считывания и т.д.

Детектор нейтронов должен обеспечивать измерение кинетической энергии нейтронов в диапазоне от 300 МэВ до 4 ГэВ с точностью до нескольких процентов. Для того чтобы получить такое энергетическое разрешение по энергии нейтронов при максимально возможной на BM@N времяпролетной базе порядка 6 м, необходимо, чтобы каждый из сцинтилляционных детекторов в активном слое нейтронного детектора имел временное разрешение порядка 100–150 пс. Это накладывает ограничение как на допустимые поперечные геометрические размеры сцинтилляционных детекторов, так и на их толщину. Это обусловлено тем, что свет предполагается регистрировать одним кремниевым фотоумножителем с чувствительной площадью 6×6 мм². Выбор поперечного размера сцинтилляционного детектора имеет важное значение и для оптимизации стоимости нейтронного детектора. Так, рассматривая нейтронный детектор с поперечными размерами 40×40 см², для одного активного слоя понадобится 100 сцинтилляционных детекторов с поперечным размером 4×4 см² или 169 таких детекторов с поперечным размером 3×3 см². Поскольку полное число активных продольных слоев в детекторе оценивается на уровне 15–20, одним из первых шагов при разработке нейтронного детектора является оптимизация геометрических

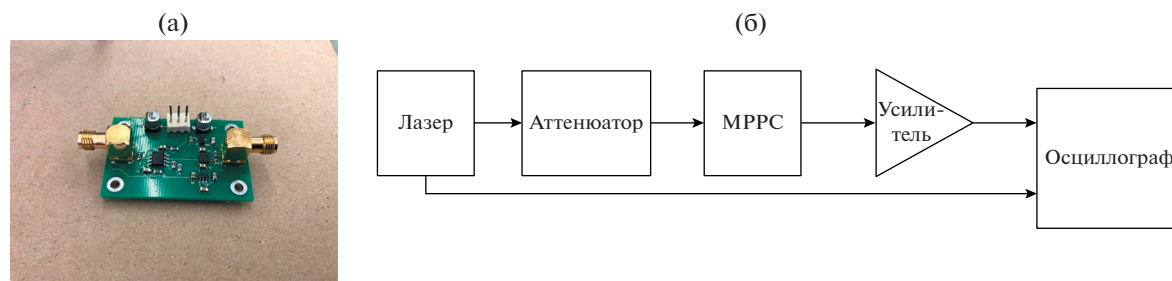


Рис. 1. Фото усилителя (а) и схема установки для измерения собственного разрешения тракта фотоприемника с усилителем (б). МРРС - многопиксельный счетчик фотонов (кремниевый фотоумножитель).

размеров сцинтилляторов и выбор доступных кремниевых фотоумножителей для получения требуемого временного разрешения.

В следующих разделах приводятся описание конструкции сцинтилляционных детекторов и установки для измерения временного разрешения на космических мюонах, а также результаты измерений для различных размеров детекторов, сцинтилляционных материалов и используемых кремниевых фотоумножителей.

КОНСТРУКЦИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Для измерения временного разрешения сцинтилляционных детекторов было изготовлено несколько образцов сцинтилляционных ячеек с поперечными размерами 40×40 , 35×35 и 30×30 мм². Ячейки выполнены на основе полистирола с добавками 1.5% паратерфенила и 0.01% РОРОР. Кроме того, использовались и пластиковые сцинтилляционные ячейки, изготовленные в АО ИФТП [10] на основе полистирола, но с другим процентным соотношением добавок. Толщина всех детекторов составляла 25 мм. Одна из больших граней сцинтилляторов была покрыта черной светопоглощающей лентой с окном 6×6 мм в центре, в которое устанавливался кремниевый фотоумножитель. Другие грани были покрыты белым красителем на основе TiO₂, обеспечивающим эффективное диффузное отражение.

Фотоприемники (кремниевые фотоумножители) были смонтированы на разработанных несущих печатных платах. Оптический контакт со сцинтиллятором обеспечивался тонким слоем диметилсилоксана (Dow Corning 200). Сцинтиллятор и плата с фотоприемником были помещены в светозащитный корпус, изготовленный из пластика с помощью 3D-печати.

В качестве фотоприемников использовались кремниевые фотоумножители SensL MicroFJ-60035TSV и Hamamatsu S13360-6050PE. Оба фотоприемника имеют эффективность регистрации

фотонов 41%, но расчетное усиление кремниевого фотоумножителя SensL ($3 \cdot 10^6$) в 2 раза выше, чем у Hamamatsu ($1.7 \cdot 10^6$). Кроме того, у фотоприемника SensL имеется емкостно-сопряженный “быстрый” выход, который также возможно использовать для считывания сигнала с этого фотоприемника. Сигнал со сцинтилляционного детектора с фотоприемником Hamamatsu усиливался с помощью усилителя (усиление 20 дБ, полоса 600 МГц по уровню -3 дБ, шум < 2.2 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$), рис. 1а. Для фотоприемника SensL использовался усилитель с коэффициентом усиления 2.5 (8 дБ).

Собственное временное разрешение фотоприемника с усилителем было измерено с помощью полупроводникового лазера с длиной волны 408 нм и длительностью импульсов менее 300 пс. Был измерен разброс задержки между триггерным сигналом лазера и откликом фотоприемника, который составил 30–40 пс. Схема измерений приведена на рис. 1б.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА КОСМИЧЕСКИХ МЮОНАХ

Для измерений временного разрешения образцов сцинтилляционных детекторов на космических мюонах детекторы были включены в состав мюонного телескопа: испытуемый детектор помещался на штанге над стартовым детектором, а набор данных выполнялся по порогу амплитуды испытуемого детектора. В качестве стартового детектора использовался микроканальный фотоэлектронный умножитель Photonis XP85012-FIT/Q с радиатором из кварца толщиной 20 мм, работающий как черенковский детектор. Этот фотоумножитель был разработан для детектора FIT в эксперименте ALICE [11], временное разрешение такого детектора 22 пс. Сигнал со сцинтилляционного детектора вместе с сигналом от стартового детектора оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя CAEN DT5742. Схема и фото установки приведены на рис. 2.

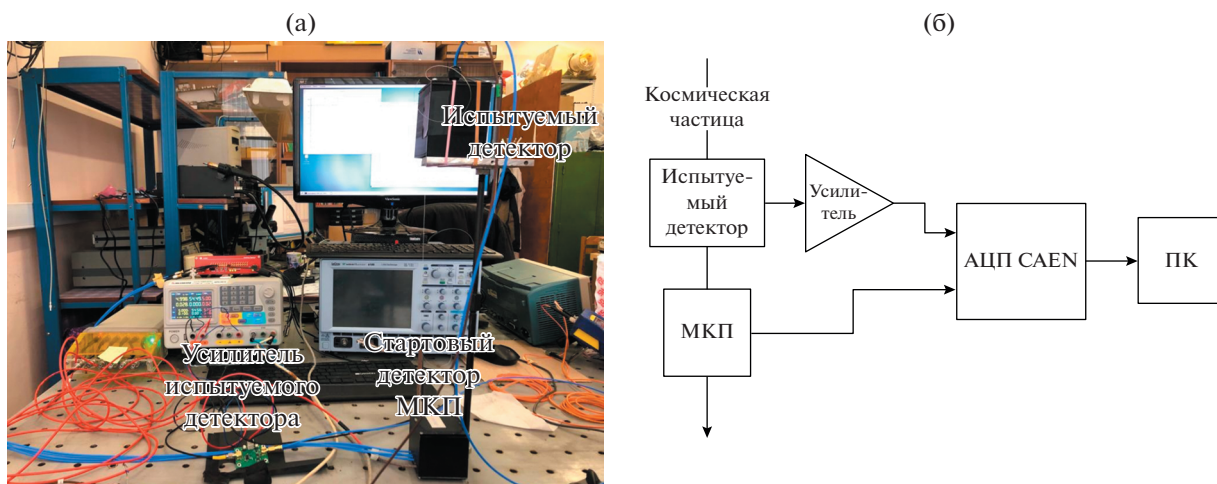


Рис. 2. Фотография установки (а) и схема установки для измерения характеристик детекторов на космических мюонах (б). Роль стартового детектора выполняет микроканальная пластина (МКП) Photonis XP85012-FIT/Q.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ АМПЛИТУДНЫХ И ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦОВ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Измерения амплитудных и временных параметров сцинтилляционных детекторов выполнены для российских пластиковых сцинтилляторов различных типов с разными поперечными размерами, но одинаковой толщины (25 мм), а также с двумя типами фотоприемников и усилителей. Варианты конфигураций и результаты измерений представлены в табл. 1. Для определения свето-

выхода, выраженного в фотоэлектронах, были проведены измерения откликов фотоприемников при их облучении лазером. Эти измерения позволили установить связь между величиной наблюдаемого сигнала, выраженной в милливольтгах, с величиной сигнала, выраженной в фотоэлектронах. Для этого была использована следующая процедура. Известно, что спектр отклика кремниевого фотоумножителя подчиняется статистике Пуассона, где наблюдается равенство между математическим ожиданием и дисперсией случайной величины, роль которой в данном случае

Таблица 1. Результаты измерения световых выходов и временного разрешения сцинтилляционных детекторов на космических мюонах

Сцинтиллятор	Кремниевый фотоумножитель	Число фотоэлектронов/МІР	Временное разрешение, пс
Производство АО "ИФТП"			
ПС-Б2, 40 × 40 мм ²	SensL	41 ± 11	265 ± 10
ПС-Б3, 40 × 40 мм ²	SensL	89 ± 25	184 ± 7
ПС-Н3-С, 40 × 40 мм ²	SensL	169 ± 28	160 ± 6
ПС-Н3-П, 40 × 40 мм ²	SensL	175 ± 28	171 ± 5
ПС-Н3-С, 30 × 30 мм ²	SensL	316 ± 49	129 ± 6
ПС-Н3-П, 30 × 30 мм ²	SensL	347 ± 53	133 ± 4
Производство ОИЯИ			
40 × 40 мм ²	SensL	144 ± 32	183 ± 6
40 × 40 мм ²	Hamamatsu	100 ± 19	200 ± 4
30 × 30 мм ²	Hamamatsu	171 ± 30	142 ± 6

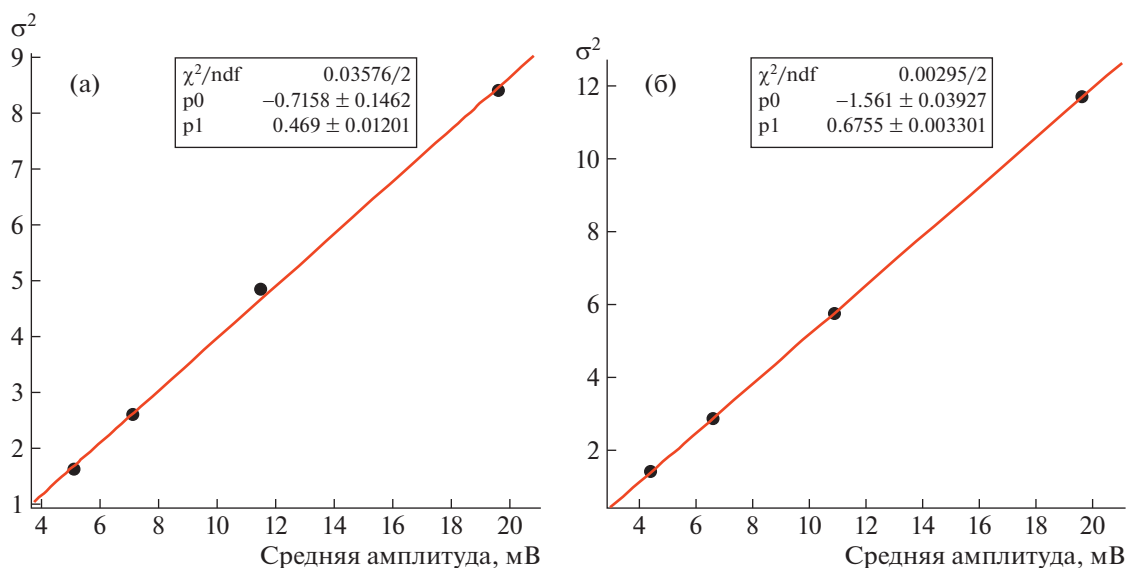


Рис. 3. Зависимость дисперсии измеренного сигнала от его средней амплитуды при измерении фотоприемниками: Hamamatsu S13360-6050PE (а) и SensL MicroFJ-60035TSV (б).

выполняет число зарегистрированных фотоэлектронов. Таким образом, наклон линейной зависимости дисперсии измеренного сигнала от его среднего отражает связь между выходной амплитудой импульса и числом фотоэлектронов. Отклики обоих фотоприемников были измерены при облучении их короткими вспышками от лазерного источника с различными интенсивностями. Результат измерения для фотоприемника Hamamatsu S13360-6050PE показан на рис. 3а, а для SensL MicroFJ-60035TSV – на рис. 3б.

Как видно из результатов линейной аппроксимации, для фотоприемника Hamamatsu было получено значение 0.47 мВ/фотоэлектрон, а для фотоприемника SensL это значение составило 0.68 мВ/фотоэлектрон. Далее, среднее значение амплитуды сигнала, полученного при прохождении космических мюонов через сцинтиллятор, являющихся минимально ионизирующими частицами (MIP – Minimum Ionizing Particles), было выражено в фотоэлектронах. Полученные таким образом значения световых выходов в единицах фотоэлектронов приведены в табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерено временное разрешение на космических мюонах для различных типоразмеров сцинтилляционных детекторов, изготовленных из российских пластиковых сцинтилляторов с использованием двух типов фотоприемников для считывания сигналов. Показано, что для заданного типоразмера сцинтиллятора временное раз-

решение при использовании фотоприемников SensL MicroFJ-60035TSV оказывается лучше по сравнению с Hamamatsu S13360-6050PE. Показано также, что временное разрешение лучше для детекторов, изготовленных с использованием сцинтилляторов ПС-НЗ-С.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в ИЯИ РАН и поддержана грантом Российского научного фонда № 22-12-00132.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность ОИЯИ и АО “ИФТП” за предоставление образцов сцинтилляторов для проведения измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kapishin M.* // JPS Conf. Proc. 2020. V. 32. P. 010093. <https://doi.org/10.7566/JPSCP.32.010093>
2. *Arsene I., Bravina L., Cassing W., Ivanov Yu., Larionov A., Randrup J., Russkikh V., Toneev V., Zeeb G., Zschesche D.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 75. P. 034902. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.75.034902>
3. FOPI Collaboration. *Leifels Y. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. P. 963. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.71.963>
4. FOPI Collaboration. *Lambrecht D. et al.* // Z. Phys. A. 1994. V. 350. P. 115. <https://doi.org/10.1007/BF01290679>
5. *Russotto P., Wu P., Zoric M., Chartier M., Leifels Y., Lemmon R., Li Q., Lukasik J., Pagano A., Pawłowski P.,*

- Trautmann W.* // Phys. Let. B. 2011. V. 697. P. 471.
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2011.02.033>
6. LAND collaboration. *Blaich T. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 1992. V. 314. P. 136.
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(92\)90507-Z](https://doi.org/10.1016/0168-9002(92)90507-Z)
7. R3B collaboration. *Boretzky K. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2021. V. 1014. P. 165701.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165701>
8. *Rusotto P., Le Fèvre A., Lukasik J., Boretzky K., Cozma M.D., De Filippo E., Gašparić I., Leifels Y., Lihtar I., Pirrone S., Politi G., Trautmann W.* // arXiv: 2105.09233 [nucl-ex].
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.09233>
9. CALICE collaboration. *Chadeeva M. et al.* // JINST. 2020. V. 15. Iss. 07. C07014.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/07/C07014>
10. URL <https://iftp.ru/>
11. ALICE Collaboration. *Karavicheva T. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012186.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/798/1/012186>