

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 539.1.074.8

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОТОКА
НЕЙТРОНОВ НА УСТАНОВКЕ ДЛЯ БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ
ТЕРАПИИ¹

© 2025 г. В. В. Леонов^a, В. В. Поросев^{a, b, *}, Г. А. Савинов^a, С. Ю. Таскаев^{a, b}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

* e-mail: porosev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 27.12.2023 г.

После доработки 29.02.2024 г.

Принята к публикации 13.03.2024 г.

С появлением новых источников нейтронов на базе ускорителей для бор-нейтронозахватной терапии возникла необходимость создания независимой системы мониторинга потока частиц во время облучения пациентов. Представленные в данной работе результаты показали, что предлагаемая система на базе сцинтиллятор – оптоволоконно – кремниевый микропиксельный фотоумножитель, использующая три различных датчика, позволяет измерять поток нейтронов, а также оценивать дозу, наведенную гамма-излучением. Применение двух типов полистирольных сцинтилляторов – СЦ-301 и обогащенного бором СЦ-331 производства ИФВЭ, Протвино – позволяет оценить вклад нейтронов, а использование дополнительного датчика, не имеющего сцинтиллятора, дает возможность оценить вклад в сигнал от черенковского излучения, генерируемого в оптическом волокне. Реализованная система детектирования оптических сигналов на основе кремниевых фотоумножителей обладает высокой квантовой эффективностью, а применение счетного режима регистрации событий, реализованного в считывающей электронике, позволило достичь уровня собственных шумов порядка нескольких десятков герц.

DOI: 10.7868/S3034564225080259

1. ВВЕДЕНИЕ

Бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) представляет собой облучение тепловыми и эпитепловыми нейтронами, при котором в опухолевые клетки избирательно вводится соединение бора ¹⁰B. Тепловые нейтроны взаимодействуют с ¹⁰B в опухолевых клетках и приводят к их гибели за счет большой величины линейной передачи энергии образующихся α-частиц и ядер лития-7 при минимальном повреждении соседних нормальных клеток вследствие малого пробега образующихся частиц.

В настоящее время для измерения параметров терапевтических нейтронных пучков исполь-

зуются различные методы. Во-первых, измеряются интегральные сформированные дозовые профили в фантоме с помощью радиочувствительных гелей [1]. В то же время активно ведутся исследования по поиску более удобных методов диагностики, позволяющих непосредственно измерять параметры нейтронного потока в процессе облучения. В частности, применяются импульсные газовые камеры деления для измерения потока нейтронов и одновременно используются ионизационные камеры в токовом режиме для измерения сопутствующей дозы гамма-излучения [2]. Существенно возросшая интенсивность нейтронных источников привела также к необходимости создания нового поко-

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

ления диагностического оборудования. В частности, ожидаемый поток нейтронов составляет около 10^9 н/(см²·с) [3]. Примером таких разрабатываемых диагностических систем являются сдвоенные тканеэквивалентные пропорциональные счетчики [4]. По сравнению с газовыми детекторами детекторы на основе сцинтилляторов позволяют достичь существенно более высокого быстродействия. Кроме того, они значительно более компактны. Так, в Японии был разработан сцинтилляционный детектор на основе полимеризуемого сцинтиллятора Viscon BC490, обогащенного порошком LiF, с волоконно-оптическим считыванием информации [5]. Аналогичная конструкция, но на основе сцинтиллятора с бором Viscon BC454 ранее испытывалась этой же группой [6].

В нашей стране в ИФВЭ изготавливается бор-содержащий полистирольный сцинтиллятор СЦ-331, который имеет световыход 56–60 % от антрацена, максимум люминесценции света около 420 нм, время высвечивания около 2 нс, и содержит в себе 6 % ортокарборана, в составе которого присутствует природный бор [7]. Таким образом, для детектора с чувствительным объемом 1 мм³ ожидаемый поток событий будет составлять примерно 2 МГц, что позволяет регистрировать их с минимальными просчетами. Кроме того, использование бор-содержащих сцинтилляторов позволяет напрямую моделировать ситуацию с использованием бор-содержащих препаратов при облучении.

2. ОПИСАНИЕ ДЕТЕКТОРА

Датчики детектора имеют одинаковую конструкцию, при которой каждый из них содержит три независимых оптических канала регистрации. Первый канал регистрации основан на сцинтилляторе СЦ-331 с бором, второй на СЦ-301 без бора и третий – оптоволокну без сцинтиллятора. Сцинтилляторы выполнены в виде цилиндров диаметром 1 мм и длиной 1 мм. Боковые стороны сцинтиллятора, а также торец третьего оптоволокну покрываются белой светоотражающей краской. Сцинтилляторы монтируются на торцы оптоволокну с помощью оптического кремнийорганического каучука СКТН-МЕД марки Д (ООО “СУРЭЛ”) и защищены пластиковым светонепроницаемым корпусом. Регистрация оптических импульсов осуществляется с помощью микропиксельных

лавинных фотодиодов MPPC S13360-3050CS (HAMAMATSU).

Электроника регистрации реализована на базе специализированной 32-канальной микросхемы EASIROC (CITIROC в более поздней модификации) [8]. Каждый канал включает в себя восьмиразрядный цифро-аналоговый преобразователь, предусилитель с программируемым коэффициентом усиления, биполярный формирователь импульса, а также дискриминатор. Тот факт, что сцинтилляторы, обогащенные бором и сцинтилляторы, не содержащие бора, имеют несколько разный световой выход [9, 10] приводит к необходимости использования различных порогов детектирования в считывающей электронике.

В данном случае две микросхемы были подключены параллельно, чтобы иметь возможность регистрировать одни и те же события с двумя разными порогами. Число зарегистрированных событий в каждом канале электроники регистрации непрерывно накапливаются и с интервалом 10 мс передаются в компьютер для дальнейшей обработки. В процессе работы программа управления контролирует температуру платы, где смонтированы фотодиоды, и регулирует при необходимости напряжение их смещения для поддержания постоянного коэффициента усиления. Кроме того, для уменьшения величины собственных шумов микропиксельных лавинных диодов все фотоприемники охлаждаются до температуры 0 °С с помощью элемента Пельтье. Разница в отсчетах двух датчиков с бором и без бора позволяет оценить вклад нейтронной компоненты, регистрируемой детектором. Разность же отсчетов в канале детектора без бора и числа событий, зарегистрированных в канале без сцинтиллятора, дает сигнал, пропорциональный дозе гамма-излучения в точке измерения. На рис. 1 показана упрощенная блок-схема электроники регистрации (слева) и фотография экспериментальной установки (справа).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В первоначальной версии детектора для передачи света к фотоприемникам мы использовали пластиковый оптоволоконный кабель ASANI SC-1000 (Япония) диаметром 1 мм. Несмотря на большое значение числовой апертуры $NA = 0.6$, данный тип кабеля имеет существенное погло-

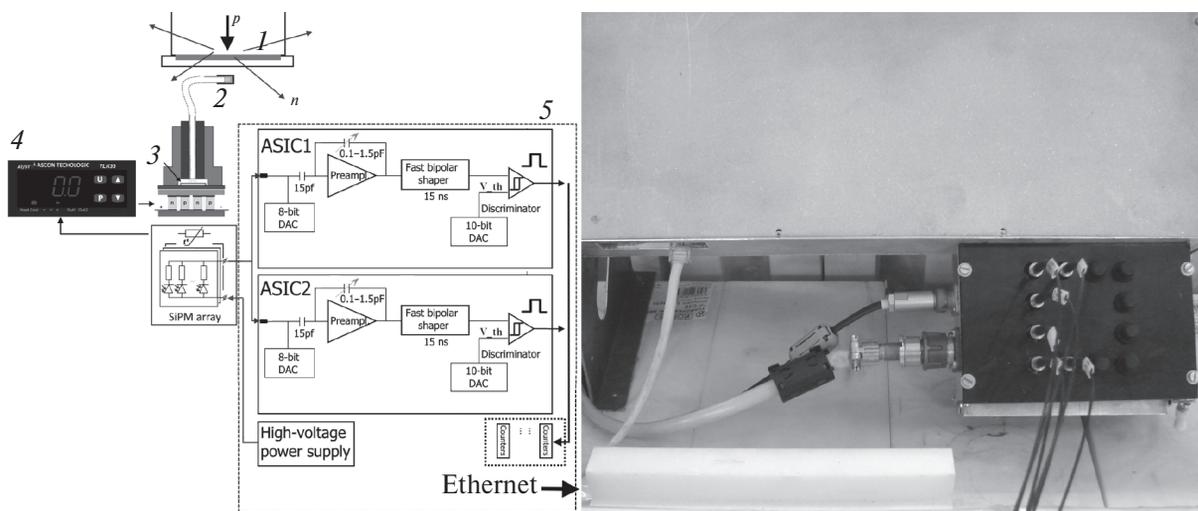


Рис. 1. Блок-схема электроники регистрации и фотография детектора: 1 – нейтрон-генерирующая мишень, 2 – датчик, 3 – микропиксельный лавинный фотодиод, 4 – контроллер элементов Пельтье, 5 – считывающая электроника.

шение около 40% на длине 8.5 м в области максимума эмиссии сцинтиллятора, и пластиковые оптоволоконные кабели продемонстрировали ограниченную радиационную стойкость [11]. Поэтому в новой версии детектора мы применили кварцевое волокно также диаметром 1 мм

CeramOptec HUV (Германия) с числовой апертурой $NA = 0.5$. Меньший угол захвата света у данного волокна компенсируется существенно возросшим светопропусканием.

Рисунок 2 демонстрирует результат измерения на стенде на базе монохроматора МДР-12У

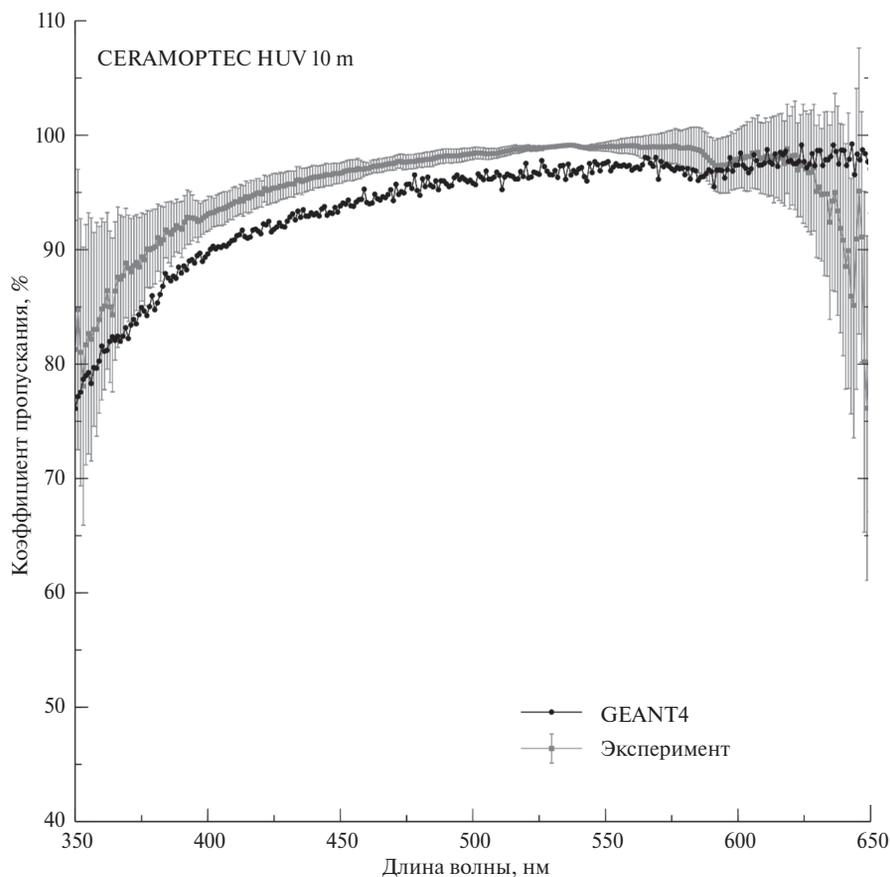


Рис. 2. Спектр пропускания оптоволоконна CeramOptec HUV.

(ЛОМО) оптической прозрачности волокна. Для сравнения представлены результаты моделирования в пакете GEANT4. Видно, что использованные параметры материалов в моделировании позволяют получить результаты, которые совпадают с результатами эксперимента в пределах 2% и, соответственно, могут быть использованы в дальнейших расчетах по оптимизации конструкции детектора.

На рис. 3 показана величина счета в каналах детектора в зависимости от порога регистрации для двух подключенных датчиков при облучении их потоком нейтронов на установке БНЗТ в ИЯФ СО РАН. Представленные зависимости однозначно демонстрируют избыток счета в каналах с сцинтиллятором, обогащенным бором. Кроме того, в каналах SiPM7 и SiPM8 показаны собственные шумы микропиксельных лавинных фотодиодов без каких-либо подключенных к ним датчиков. Видно, что в области

малых порогов (малых сигналов) собственные шумы существенно меньше, чем вклад от черенковского излучения, генерируемого в кварцевом волокне.

Для сравнения на рис. 4 показан уровень шумов в тех же каналах в лабораторных условиях. В процессе измерения характеристик детектора интегральный заряд протонов на нейтрон генерирующей мишени составил около 70 Кл (10 мА·ч). На таком масштабе датчики не показали заметной деградации параметров и поэтому требуют дальнейшего исследования их радиационной стойкости. Наблюдаемый разброс сигналов между датчиками объясняется технологическим разбросом их параметров при изготовлении, что компенсируется путем предварительной калибровки датчиков на источнике рентгеновского излучения.

К сожалению, кварцевое волокно CeramOptec имеет недостаточную защиту от окружающего

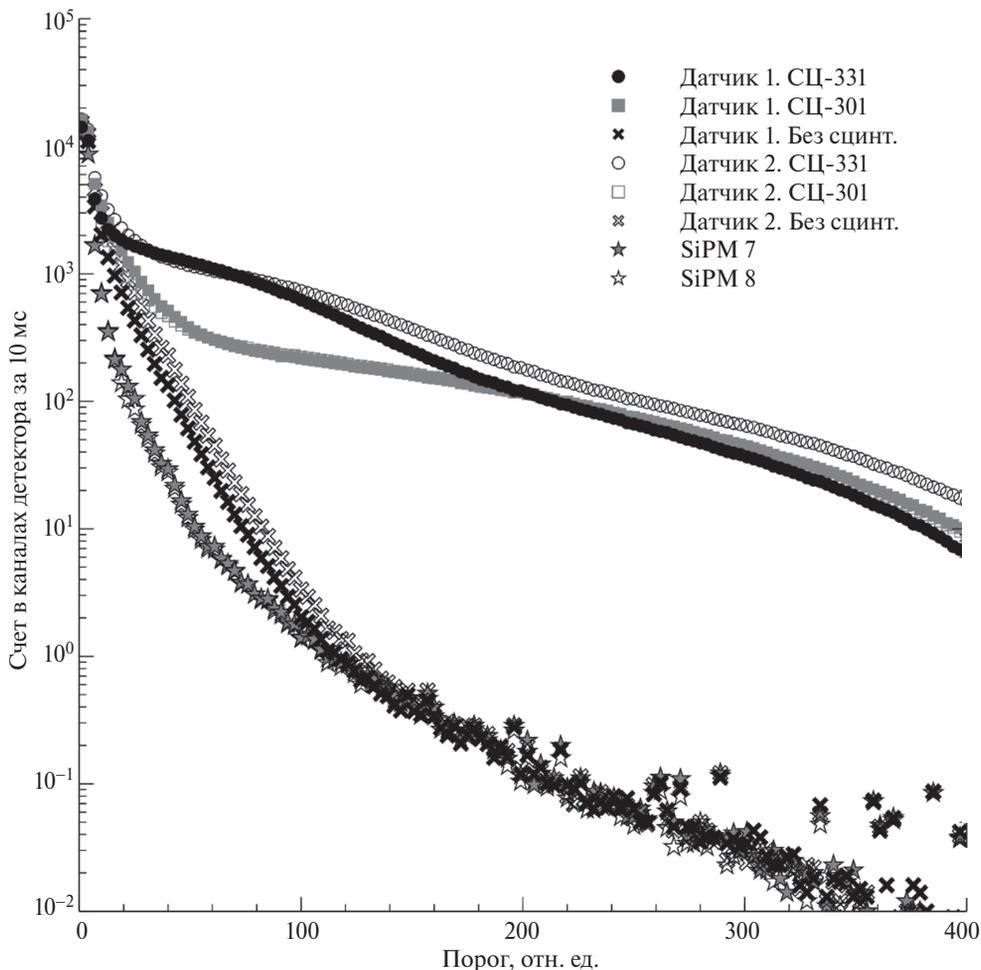


Рис. 3. Зависимость счета в каналах регистрации от величины порога для двух датчиков и двух отдельно стоящих микропиксельных лавинных фотодиодов при облучении нейтронами.

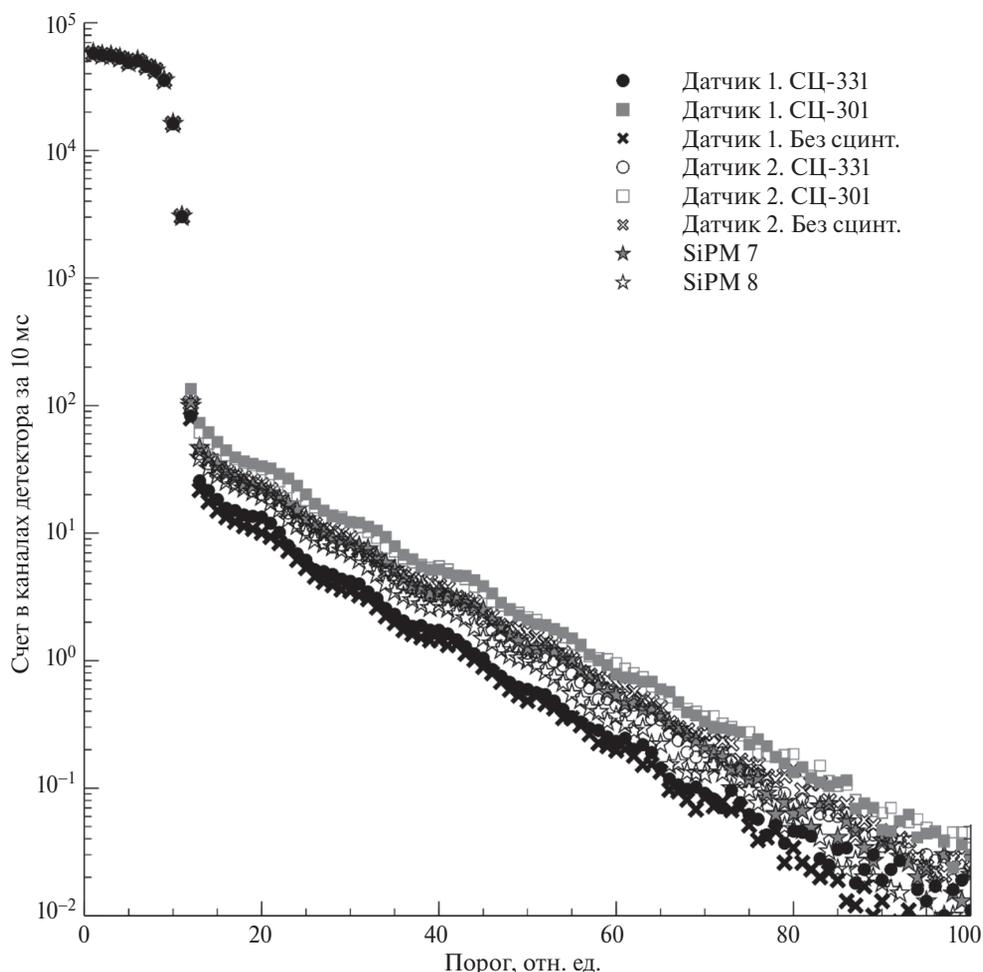


Рис. 4. Зависимость счета шумовых импульсов в каналах регистрации от величины порога в лабораторных условиях.

освещения ввиду меньшей толщины защитного полиэтиленового покрытия (200 мкм) на нем по сравнению со стандартной толщиной оболочки (500 мкм) на пластиковых волокнах и требует установки дополнительных экранов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН разработана система мониторинга потока нейтронов на установке для БНЗТ на основе оптоволоконного датчика и микропиксельных лавинных фотодиодов. Повышенная прозрачность кварцевого волокна в новой модификации детектора позволила компенсировать уменьшение светосбора из-за меньшей, чем у пластикового волокна, числовой апертуры, и на масштабе нескольких сеансов облучения данный тип волокна продемонстрировал стабильность своих параметров. Тем не менее необходимо проведение дальнейших исследований радиационной стойкости датчиков и определения их ресурса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-30005, <https://rscf.ru/project/19-72-30005/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Uusi-Simola J., Heikkinen S., Kotiluoto P., Seren T., Seppala T., Auterinen I., Savolainen S.* // *J. Applied Clinical Medical Phys.* 2007. V. 8. P. 114. <https://doi.org/10.1120/jacmp.v8i2.2409>
2. *Tanner V., Auterinen I., Helin J., Kosunen A., Savolainen S.* // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.* 1999. V. 422. P. 101. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01071-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01071-7)
3. International Atomic Energy Agency, Current Status of Neutron Capture Therapy. IAEA-TECDOC-1223, IAEA, Vienna, 2001.

4. *Moro D., Colautti P., Lollo M., Esposito J., Conte V., De Nardo L., Ferretti A., Ceballos C.* // *Appl. Radiat. Isot.* 2009. V. 67. P. 171.
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.03.042>
5. *Ishikawa M., Yamamoto T., Matsumura A., Hiratsuka J., Miyatake S.-I., Kato I., Sakurai Y., Kumada H., Shrestha S.J., Ono K.* // *Radiat. Oncol.* 2016. V. 11. P. 105.
<https://doi.org/10.1186/s13014-016-0680-0>
6. *Ishikawa M., Ono K., Sakurai Y., Unesaki H., Uritani A., Bengua G., Kobayashi T., Tanaka K., Kosako T.* // *Appl. Radiat. Isot.* 2004. V. 61 (5). P. 775.
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.05.053>
7. *Брутвич Г.И., Бреховских В.В., Семенов В.К., Холоденко С.А.* Основные характеристики полистирольных сцинтилляторов производства ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 2013-23. Протвино, 2013.
8. *Callier S., Taille C.D., Martin-Chassard G., Raux L.* // *Physics Proced.* 2012. V. 37. P. 1569.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.486>
9. *Porosev V.V., Savinov G.A.* // *JINST.* 2019. V. 14 P. 06003.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/06/P06003>
10. *Bykov T.A., Kasatov D.A., Koshkarev A.M., Makarov A.N., Porosev V.V., Savinov G.A., Shchudlo I.M., Taskaev S.Yu.* // *JINST.* 2019. V. 14. P. 12002.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/12/P12002>
11. *Bykov T.A., Kasatov D.A., Koshkarev A.M., Makarov A.N., Porosev V.V., Savinov G.A., Shchudlo I.M., Taskaev S.Yu., Verkhovod G.D.* // *JINST.* 2021. V. 16. P. 01024.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/01/P01024>