

Тема работы

Разработка детектора для мониторинга потока нейтронов на установке БНЗТ ИЯФ СО РАН.

Состав коллектива

Поросев Вячеслав Викторович, с.н.с., ИЯФ СО РАН, к.ф.-м.н., porosev@inp.nsk.su,

уч.запись: vvporosev

Грантовая поддержка

Грант РФФИ № 19-72-30005 “Разработка ускорительного источника эпитепловых нейтронов и проведение бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей.”, руководитель Таскаев С.Ю., 2023 – 2025 гг.

Аннотация

В данном исследовании были проведены расчеты дозовых полей, формируемых на установке бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) в Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН в водном фантоме и проведено сравнение с экспериментальными данными. Кроме того, проводились исследования возможности применения разработанной системы для исследования дозовых полей, формируемых направленным пучком протонов. Полученные результаты показывают, что разработанная конструкция детектора излучений со считыванием сигнала по оптоволокну позволяет корректно оценивать дозу, индуцированную различными компонентами излучения.

Научное содержание работы

Постановка задачи

В настоящее время, в ИЯФ СО РАН активно ведется разработка ускорительного источника эпитепловых нейтронов для проведения бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей и подготовка к клиническим испытаниям. Отдельно от разработки самого источника стоит задача измерения и верификация формируемых дозовых полей. Таким образом, необходимо разработать как средства диагностики, так и провести верификацию получаемых с ее помощью результатов. Поэтому важным аспектом является отработка методики моделирования отклика детектора в различных условиях облучения и поиска путей дальнейшего улучшения его параметров.

Современное состояние проблемы

Интенсивные нейтронные поля, требуемые при облучении пациентов, не позволяют размещать детекторы и их электронику непосредственно вблизи генерирующего источника. Наиболее жизнеспособным показало себя решение с использованием чувствительного к нейтронам сцинтиллятора и считыванием генерируемого света по оптоволокну. (M. Ishikawa et al. Early clinical experience utilizing scintillator with optical fiber (SOF) detector in clinical boron neutron capture therapy: Its issues and solutions. Radiation

Oncology 11(1) (2016) <https://doi.org/10.1186/s13014-016-0680-0>, M. Ishikawa et al. Development of real-time thermal neutron monitor using boron-loaded plastic scintillator with optical fiber for boron neutron capture therapy. Appl. Radiat. Isot. 61(5) (2004) 775-779, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.05.053>). Аналогичным образом, с применением разработанного в ИЯФ СО РАН малогабаритного детектора нейтронов (размер чувствительного элемента примерно 1мм³) с полистирольным литьевым сцинтиллятором обогащенным бором, было реализовано одновременное измерение и постоянное мониторирование мощности поглощенной дозы ядерной реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ("борная" доза) на установке бор-нейтронозахватной терапии. (Т.А. Вукон et al. Initial trials of a dose monitoring detector for boron neutron capture therapy. Journal of Instrumentation, Volume 16, (2021) P01024 <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/01/P01024>). Поскольку при облучении на подобных установках образуется много продуктов ядерных реакций, актуально стоит задача исследования чувствительности датчиков к этим образующимся вторичным частицам и оценка их вклада в полезный сигнал. В частности, интересен вопрос возможности применения разработанной детекторной системы для мониторирования дозовых полей на терапевтических системах где ведется облучение протонами. Кроме того, в работе (Cirrone, G.A.P., Manti, L., Margarone, D. et al. First experimental proof of Proton Boron Capture Therapy (PBCT) to enhance proton therapy effectiveness. Sci Rep 8, 1141 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19258-5>) авторы наблюдали усиление биологической эффективности терапии при облучении протонами и использовании борсодержащих медпрепаратов, что они связали с возможным заметным вкладом продуктов реакции $^{11}\text{B} + p \rightarrow 3\alpha + 8.7 \text{ MeV}$. Поскольку в наших датчиках используется сцинтиллятор обогащенный бором, то исследование данного вопроса представляется актуальной задачей.

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

В рамках выполнения данной работы были выполнены следующие работы: проведение расчетов методом Монте-Карло с помощью пакета моделирования GEANT4 (<https://geant4.web.cern.ch/>) дозовых распределений в водном фантоме на установке БНЗТ, а также при облучении фантома направленным пучком протонов. Спецификой данного пакета, написанного на C++ и реализованная под UNIX, является возможность распараллеливания вычислений на все доступные вычислительные потоки, что позволяеткратно ускорить вычисления.

Полученные результаты

На рисунке 1 показано пространственное распределение дозы облучения в водном фантоме «карандашным» пучком протонов с энергией 150 МэВ, а также вклад в дозу облучения от образующихся альфа частиц. А на рисунке 2 показаны спектры энерговыделения от альфа частиц в сцинтилляторах с бором и без бора ($N1\alpha$, $N2\alpha$, объем чувствительных элементов $\sim 1\text{мм}^3$) расположенных на глубине 15 см, а также спектры энерговыделения от протонов и других продуктов реакций. Видно, что в области пика Брэгга вклад альфа частиц в дозу облучения почти на 3 порядка меньше. Кроме того, при текущей точности расчетов, явной разницы между двумя типами сцинтилляторов не наблюдается, не смотря на то что в одном из них массовая доля натурального бора составляет 4.5%.

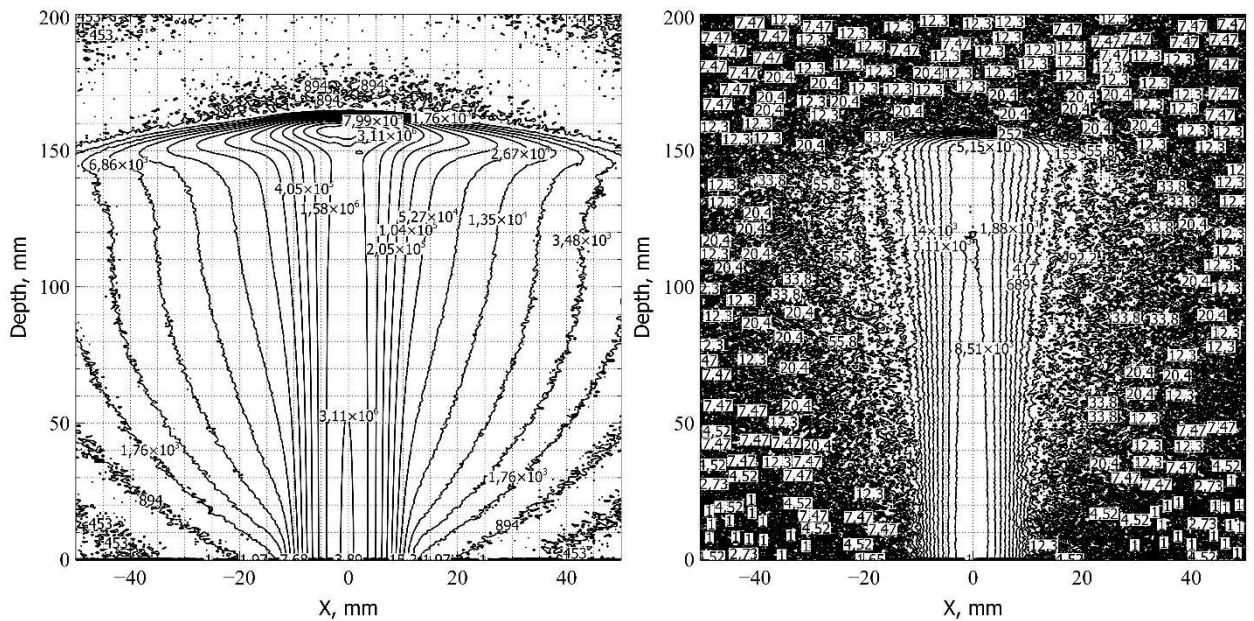


Рис 1. Вклад в дозу облучения от протонов и альфа-частиц в водном фантоме.

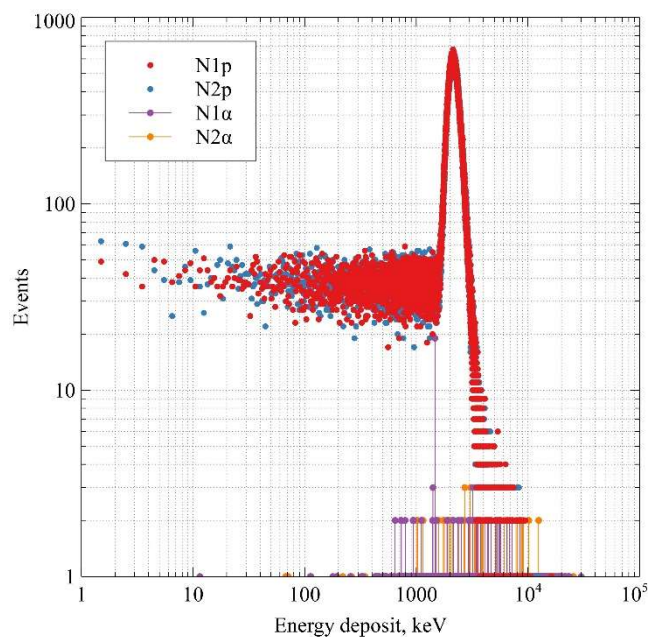


Рис.2 Энерговывделение в сцинтилляторах с бором и без бора (N1 и N2) от альфа-частиц и протонов при глубине расположения датчиков 15 см.

Здесь надо отметить что используемые в GEANT4 сечения реакций неупругого взаимодействия протонов с атомами бора сильно зависят от используемых моделей и имеют расхождения с наблюдаемыми в экспериментах значениями. Для примера на Рис.3 представлено полное сечение взаимодействия протонов с бором из GEANT4 при использовании различных физических моделей и отдельно, экспериментально полученное, сечение реакции $^{11}\text{B} + p \rightarrow 3\alpha + 8.7 \text{ MeV}$ (S. Taskaev et al., Measurement of the $^{11}\text{B}(p,\alpha)^8\text{Be}$ and the $^{11}\text{B}(p,\alpha)^8\text{Be}^*$ reactions cross-sections at the proton energies up to 2.2 MeV. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, Volume 555, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2024.165490>).

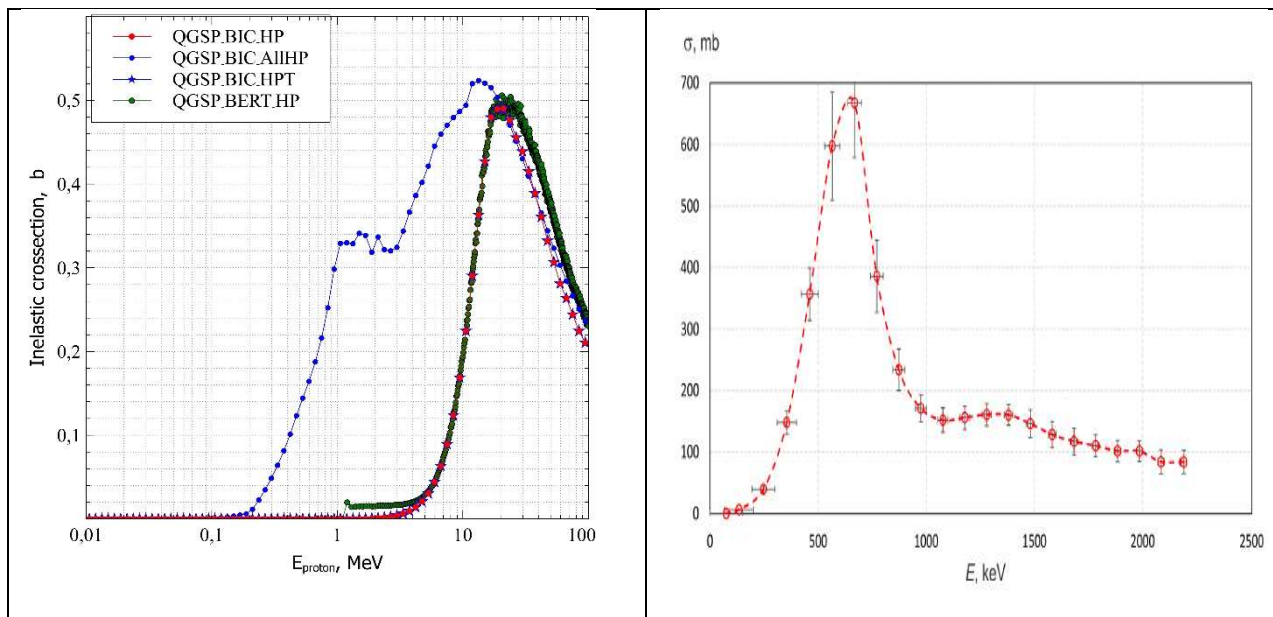


Рис 3 Сечения реакций неупругого взаимодействия протонов с атомами бора в GEANT4 (слева) и реакции $11\text{B} + p \rightarrow 3\alpha + 8.7 \text{ MeV}$ (справа).

Тем не менее, на основании данных полученных в моделировании при использовании модели QGSP_BIC_AIHHP, предложенный механизм усиления биологической эффективности, наблюдаемый в упомянутых исследованиях, вызывает сомнения в виду существенно меньшего вклада в дозу облучения от альфа частиц по сравнению с основной компонентой, вызванной ионизационными потерями протонов. Таким образом, необходимо дальнейшее изучение данного вопроса и поиск альтернативных механизмов, объясняющих наблюдаемый эффект. Кроме того, малость вклада от альфа частиц позволяет использовать разработанные датчики при измерении дозы и на протонных ускорителях.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Для иллюстрации эффекта использования кластера достаточно сказать, что моделирование прохождения $1\text{E}+9$ сгенерированных нейтронов занимало порядка 4- 5 дней при наличии 80 доступных вычислительных ядер при статистической точности результата позволяющей проводить сравнение результатов с экспериментальными данными. Моделирование такой задачи на персональном компьютере за приемлемое время не представляется возможным.

Публикации

Ибрагим И.С., Быков Т.А., Колесников Я.А., Соколова Е.О., Сычева Т.В., Верховод Г.Д., Щудло И.М., Кузнецов А.С., Бикчурина М.И., Кошкарев А.М., Касатов Д.А., Поросев В.В., Таскаев С.Ю. Дозиметрия нейтронного потока и гамма-излучения для двух систем формирования пучка нейтронов на установке VITA с использованием сцинтилляционного детектора. Сибирский физический журнал. 2023;18(4):71-78. <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2023-18-4-71-78>

Ваши впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также Ваши предложения по их совершенствованию.

Все работает замечательно. Было бы идеально останавливать задачи (hibernate) при глобальных отключениях энергии и восстанавливать их выполнение при возобновлении питания вычислительного центра или вообще построить аварийную генераторную станцию для обеспечения бесперебойной работы такого дорогостоящего оборудования.