

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 Иванов А.А., 2019 – 2022 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, и проведено сравнение с экспериментальными данными, полученными на действующей установке с использованием водного фантома. Полученные результаты показывают что предлагаемая конструкция детектора излучений со считыванием сигнала по пластиковому оптоволокну и которая включает в себя три разных датчика (первый на основе пластикового сцинтиллятора обогащенного бором, второй на основе простого пластикового сцинтиллятора, а третий без сцинтиллятора), позволяет измерять поток нейтронов, а также оценивать дозу, индуцированную гамма-излучением. Результаты моделирования с помощью пакета GEANT4 показали хорошее согласие с экспериментальными данными и могут быть использованы для дальнейшего совершенствования системы.

Научное содержание работы

Постановка задачи

В настоящее время, в ИЯФ СО РАН ведется разработка ускорительного источника эпитепловых нейтронов для проведения бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей. Всё это позволит в рамках реализации проекта начать лечить людей с онкологическими заболеваниями, в том числе с теми, которые не поддаются никаким другим методам лечения. Отдельно от разработки самого источника стоит задача измерения и верификация формируемых дозовых полей. Таким образом, необходимо было разработать как средства диагностики, так и провести верификацию получаемых с ее помощью результатов. Другим важным аспектом являлась отработка методики моделирования отклика детектора и поиска дальнейшего улучшения его параметров без необходимости использования реального ускорителя.

Современное состояние проблемы

В виду "тяжелых" условий эксплуатации, 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 1мм^3) с полистирольным литьевым сцинтиллятором было реализовано одновременное измерение и постоянное мониторирующее мощности поглощенной дозы ядерной реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ("борная" доза) на нашей установке (Т.А. Вуков 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>).

В тоже время, поиск и оптимизация конструкции разрабатываемого детектора, а также верификация получаемых распределений не могут осуществляться только с использованием результатов проведенных экспериментов. Однако, в рамках моделирования подобных экспериментов методом Монте-Карло, мы сталкиваемся с проблемой необходимости использования существенных вычислительных мощностей. Так, в частности, при потоке примерно $1\text{E}+16$ протонов падающих на нейтрон-генерирующую литиевую мишень, детектор регистрирует примерно только $1\text{E}+5$ нейтронов в максимуме распределения.

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, в геометрии максимально приближенной к режимам планируемых облучений пациентов, и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Спецификой данного пакета написанного на C++ и реализованная под UNIX, является возможность распараллеливания вычислений на все доступные вычислительные потоки, что позволяет кратно ускорить вычисления. Проведены сравнительные расчеты для разных физических моделей: QGSP_BIC_HP и QGSP_BIC_AllHP.

Полученные результаты

Результаты проведенного моделирования сравнивались с результатами измерения пространственного распределения "борной" дозы и дозы гамма-излучения с использованием специально изготовленного водного фантома.

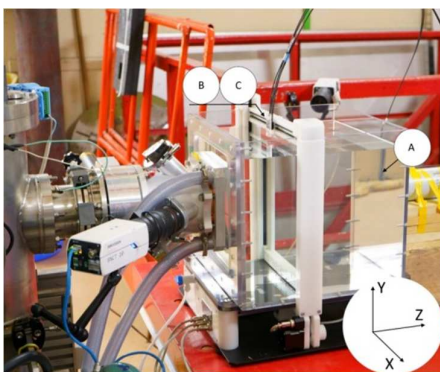


Рис.1 Схема эксперимента по измерению "борной" и гамма-дозы с использованием водного фантома. На рисунке отмечены места расположения датчиков в эксперименте.

На следующем рисунке представлены примеры регистрируемых распределений, из которых ясно видно что использование трех различных типов датчиков позволяет восстановить как вклад нейтронной компоненты $B(n)$, так и истинные значения сигнала в канале, регистрирующем вклад гамма излучения $B(\gamma)$.

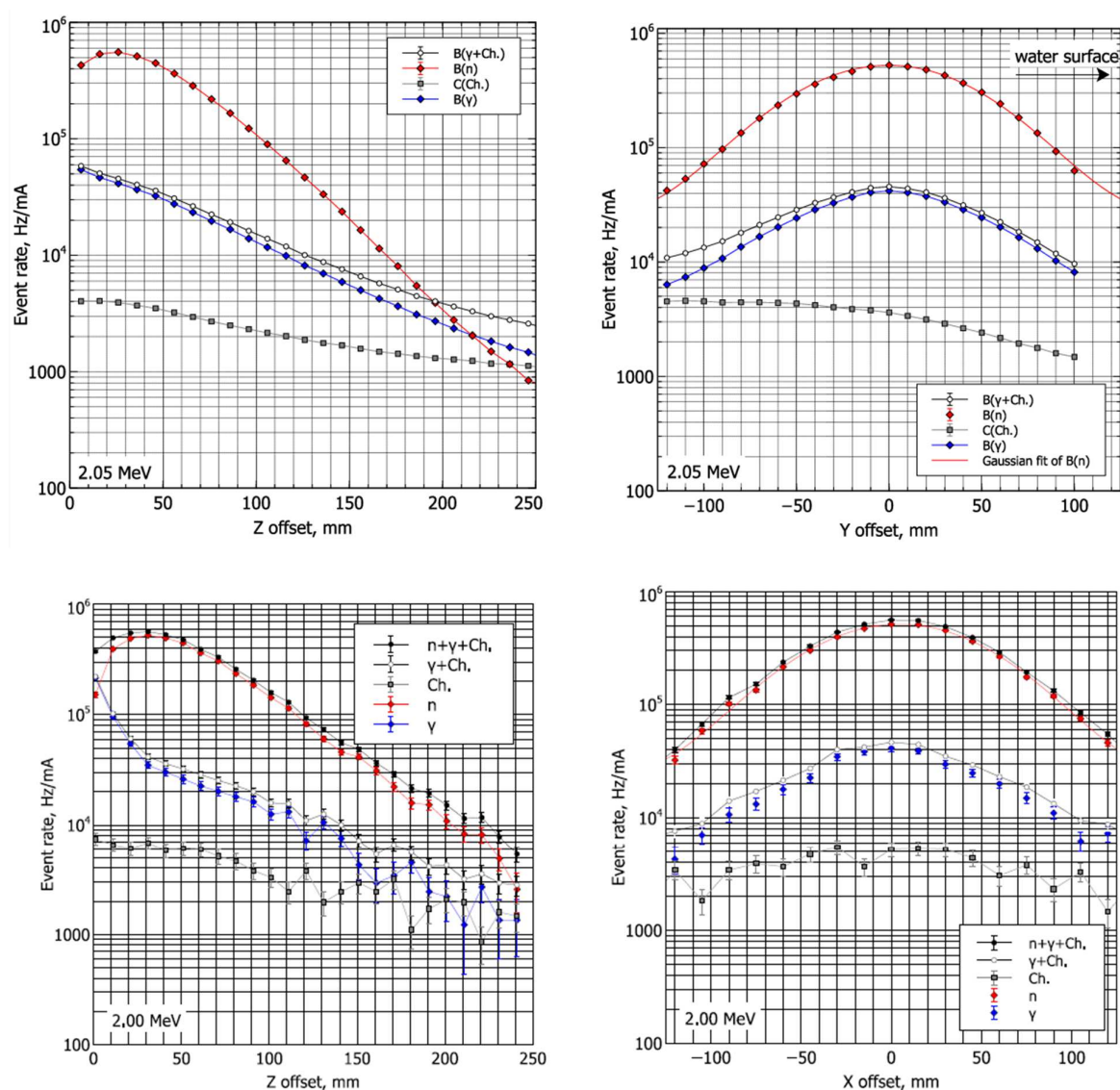


Рис.2 Результат измерения пространственного распределения числа зарегистрированных тепловых нейтронов по глубине (Z-распределение) и поперек пучка (Y-распределение) (вверху) и результаты расчетов с GEANT4 (внизу).

Результаты сравнения абсолютной величины потока измеренного в эксперименте и полученного в расчетах с помощью пакета GEANT4 продемонстрировали примерно 20% расхождение. Этому расхождению имеется несколько объяснений. Во-первых, реальное напряжение ускорителя, как следует из данных калибровки, было в $0,983 \pm 0,001$ раз меньше, чем фактическое. Во-вторых, фактический диаметр изготовленных сцинтилляторов находился в диапазоне 0,95–0,97 мм, а в моделировании использовалось значение 1 мм. Еще одна причина — это не идеальный дизайн

датчиков и как следствие меньшее значение оптических сигналов, чем ожидалось из симуляций. Следовательно, некоторая часть событий, связанных с нейтронами, которые давали сигнал ниже порога регистрации, могла быть пропущена. Таким образом, результат моделирований и экспериментов дают хорошее совпадение результатов.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Для иллюстрации эффекта использования кластера достаточно сказать что моделирование прохождения $1E+9$ 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

T.A. Bykov, D.A. Kasatov, A.M. Koshkarev, A.N. Makarov, V.V. Leonov, V.V. Porosev, G.A. Savinov, S.S. Savinov, I.M. Shchudlo, S.Yu. Taskaev, G.D. Verkhovod. Evaluation of depth-dose profiles in a water phantom at the BNCT facility at BINP. Journal of Instrumentation, Volume 16, P10016(2021)
<https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/16/10/P10016>

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, благо в Университете есть медицинский факультет, где есть или будет оборудование которое тоже не любит отключение энергии.