



SIMULATION OF DNA USING GEANT4

E.E.Dustmurodov^{1,2,3}

D.M.Nomozova⁴

D.K.Djumabayev²

Sh.S.Saydaliyeva²

Z.A.Yavkacheva²

F.B.Nematov^{2a}

¹Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

²Tashkent State University of Transport, Uzbekistan

³Joint Institute for Nuclear Research, 141980, Dubna, Moscow oblast, Russia

²Tashkent State University of Transport, Uzbekistan (student)
eldordustmurodov@mail.ru

ARTICLE INFO

Received: 02nd June 2024

Accepted: 06th June 2024

Online: 07th June 2024

KEY WORDS

Monte Carlo, Geant4,
Geant4-DNA,
microdosimetry,
nanodosimetry,
radiobiology.

ABSTRACT

The Geant4-DNA project envisages the development of open-source simulation software based on the general-purpose Geant4 toolkit for Monte Carlo simulation. The main aim of this software is to simulate biological damage induced by ionizing radiation at the cellular and sub-cellular levels. This project was originally initiated by the European Space Agency to forecast the harmful effects of radiation that could affect astronauts during future long-duration space missions. In this paper, the Geant4-DNA collaboration presents an overview of the entire current project, including its latest developments already available in the latest public release of Geant4 (9.3 BETA), as well as an illustrative example of simulating direct irradiation of chromatin fiber. Anticipated extensions, spanning multiple scientific domains such as particle physics, chemistry, and cellular and molecular biology, within the fully interdisciplinary framework of the Geant4 collaboration, are also discussed.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДНК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GEANT4

Элдор Эшбобоевич Дустмуродов^{1,2,3}

Дилноза Мамаражаб кизи Номозова⁴

Дилмурад Кутлимуратович Джумабаев²

Шахло Самиковна Сайдалиева²

Зулхумор Абдурасиловна Явкачева²

Фазлиддин Бахриддин угли Неъматов^{2a}

¹Институт Ядерной Физики АН РУз, Ташкент, Узбекистан

²Ташкентский государственный университет транспорта, Узбекистан

³Объединённый институт ядерных исследований, 141980, Дубна, Московская область, Россия

⁴Шахрисабзский государственный педагогический институт, Шахрисабз



ARTICLE INFO

Received: 02nd June 2024

Accepted: 06th June 2024

Online: 07th June 2024

KEY WORDS

Монте-Карло, Geant4,
Geant4-ДНК,
микродозиметрия,
нанодозиметрия,
радиобиология.

ABSTRACT

Проект Geant4-ДНК предполагает разработку открытого программного обеспечения для моделирования на основе общего инструмента Geant4 для Монте-Карло-симуляции. Основной целью этого программного обеспечения является моделирование биологических повреждений, вызванных ионизирующим излучением на клеточном и субклеточном уровнях. Этот проект был изначально инициирован Европейским космическим агентством для прогнозирования вредных для космонавтов во время будущих длительных космических миссий. В данной статье коллаборация Geant4-ДНК представляет обзор всего текущего проекта, включая его самые последние разработки, уже доступные в последнем общедоступном выпуске Geant4 (9.3 BETA), а также иллюстративный пример моделирования прямого облучения хроматинового волокна. Ожидаемые расширения, затрагивающие несколько научных областей, таких как физика частиц, химия и клеточная и молекулярная биология, в рамках полностью междисциплинарной деятельности коллаборации Geant4, также обсуждаются.

Введение

Понимание и моделирование негативных эффектов ионизирующего излучения на клеточном и субклеточном уровнях остаются вызовом для современных исследований радиобиологии. В частности, проверенные инструменты моделирования сегодня являются первостепенно важными для радиозащиты человека в определенных профессиональных сферах. Радиозащита является реальной проблемой на повседневной основе, например, для работников атомных электростанций, медицинского персонала, персонала ускорителей частиц, работающего на промышленных предприятиях и исследовательских лабораториях, а также для общественности через внутреннее облучение радоном, выбрасываемым из почвы. Все они непрерывно подвергаются низким дозам радиации (режим "низкой дозы" составляет несколько мкЭВ). В этом режиме оценка опасностей для здоровья от облучения ионизирующим излучением ограничена, потому что нет доступных экспериментальных данных. На данный момент биологические эффекты, возникающие от такого облучения низкой дозой радиации, могут только экстраполироваться из данных, собранных при намного более высоких дозах радиации, например, из эпидемиологических обследований, проведенных после



бомбардировок Хиросимы и Нагасаки. Широко принято в качестве общего согласия, что биологические эффекты от радиации пропорциональны поглощенной дозе и, следовательно, что потенциальное облучение радиацией на любом уровне дозы может привести к биологическому эффекту без порога дозы. Следовательно, риски для здоровья человека от облучения низкими дозами радиации остаются в значительной степени неразрешенными [1].

1.1. Общего назначения метод Монте-Карло и подходы с открытым исходным кодом

Проект Geant4-ДНК предлагает использовать метод Монте-Карло. Хотя методы Монте-Карло могут потребовать больших вычислительных мощностей для моделирования сложных ситуаций и настроек, они могут достигать высокой точности и могут рассматриваться как альтернативное решение по сравнению с детерминированными подходами. Методы Монте-Карло используют генераторы случайных чисел, чтобы воспроизвести стохастическую природу физических взаимодействий между частицами и веществом.

Вместо разработки специализированного программного обеспечения метода Монте-Карло с ограниченным объемом для микродозиметрии и моделирования биологических повреждений только от радиации, проект Geant4-ДНК стремится расширить общеупотребительный инструментарий симуляции метода Монте-Карло Geant4 такими возможностями. Инструментарий Geant4 является передовым средством симуляции, описывающим взаимодействия частиц с веществом. Он был изначально разработан в Европейской организации по ядерным исследованиям (CERN) в Женеве, Швейцария, для симуляции экспериментов по физике высоких энергий на Большом адронном коллайдере (БАК). Разработка Geant4 придерживается стратегии с открытым исходным кодом: программное обеспечение полностью прозрачно и абсолютно бесплатно. Каждый может загрузить инструментарий Geant4 и разработать свои собственные приложения для симуляции. Инструментарий разрабатывается командой из более чем 80 международных коллег, а пользователи по всему миру активно участвуют в его валидации с целью определения его точности на микроскопическом и макроскопическом уровнях. Публичные выпуски доступны дважды в год.

Программное обеспечение Geant4 использует объектно-ориентированную технологию (C++), обеспечивая замечательную гибкость и расширяемость, что постепенно приводит к разработке новых приложений Geant4 в областях исследований, связанных с взаимодействием частиц с веществом, не ограничиваясь физикой высоких энергий, таких как биомедицинская физика и космическая физика, от субмикрометровых клеток и трассировки лучей до планетарных масштабов. Все разработки Geant4-ДНК включены в инструментарий Geant4 и пользуются простотой доступа к коду, что обеспечивает широкий доступ для общества радиобиологии к таким методам вычислений [2].

1.2. Сотрудничество Geant4-ДНК

Сотрудничество "Geant4-ДНК" объединяет разработчиков Geant4, которые являются членами коллаборации Geant4, а также внешних консультантов с



определенной экспертизой, включая теоретическую элементарную физику частиц, радиолиз и микродозиметрию. Текущие участники сотрудничества "Geant4-ДНК" перечислены в качестве авторов данной статьи. Проект является полной деятельностью Рабочей группы по низкоэнергетической электромагнитной физике Geant4 коллаборации Geant4, и все текущие разработки Geant4-ДНК включены в общедоступные выпуски инструментария Geant4. Они подробно описаны на специальном веб-сайте.

2. Физические процессы и модели Geant4-ДНК

Физические взаимодействия описываются конкретными "классами процессов" на языке C++, которые вычисляют полное сечение конкретных физических взаимодействий (например, упругое рассеяние, ионизация и т. д.); также предоставляется полное описание результатов взаимодействия (кинематика, образование вторичных частиц, депонированная энергия и т. д.). В Geant4-ДНК эти процессы являются чисто дискретными, то есть они моделируют все физические взаимодействия шаг за шагом с точным отслеживанием без использования каких-либо методов конденсации. Пользователь может вычислить определенную физическую величину в соответствии с различными моделями (теоретическими или полуэмпирическими) с помощью специальных "классов моделей", которые могут быть дополняющими в энергетических диапазонах или полностью альтернативными. Один "класс процесса" может вызывать один или несколько "классов моделей".

Все классы процессов и моделей Geant4-ДНК были полностью переработаны для последней общедоступной версии Geant4 (9.3 BETA - июнь 2009 года), вместе со всеми классами пакета Низкоэнергетической электромагнитной физики Geant4, чтобы принять согласованный подход к моделированию всех электромагнитных взаимодействий в Geant4. Переработанные классы включают новые функции, удобные для пользователей, такие как, например, прямой доступ к значениям сечения для заданной энергии частицы.

2.1. Доступные физические процессы и модели

Расширенный набор Geant4-ДНК в настоящее время охватывает основные взаимодействия легких частиц и ионов, включая электроны, протоны, частицы водорода, гелия и их заряженные состояния на уровне эВ в жидкой воде, основном компоненте биологических материалов. Некоторые из этих моделей являются чисто аналитическими, другие используют таблицы данных пересечений с помощью интерполяции для более быстрого вычисления. Список доступных процессов и моделей, как они доступны в текущей общедоступной версии Geant4 (9.3 BETA), приведен в таблице 1, а также их диапазон применимости.

2.2. Реализация "физического списка" Geant4-ДНК

В пользовательском приложении Geant4 пользователь должен указать в специальном классе "физического списка" частицы и соответствующие физические процессы, влияющие на эти частицы (например, электроны чувствительны к упругому рассеянию, возбуждению и ионизации). Список физики по умолчанию Geant4-ДНК, содержащий все частицы и процессы, перечисленные в Таблице 1 и показанные на Рис.



1 по Рис. 4, можно найти в "расширенном примере микродозиметрии" (более подробные сведения см. в разделе 5), а также на веб-сайте Geant4-ДНК [2].

Таблица 1. Список физических процессов Geant4-ДНК, доступных в версии 9.3 BETA инструментария Geant4, выпущенной в июне 2009 года. Также указана высоко- и низкоэнергетическая применимость соответствующих моделей.

Процесс	Модель	Нижний предел энергии	Верхний предел энергии
Электроны			
Упругое рассеяние	Скринированный Резерфорд	8.23 эВ	10 МэВ
	Чемпион (альтернативный)	8.23 эВ	10 МэВ
Возбуждение	Emfietzoglou	8.23 эВ	10 МэВ
Ионизация	Born	12.61 эВ	30 кэВ
Протон			
Возбуждение	Miller and Green	10 эВ	500 кэВ
	Born	500 кэВ	10 МэВ
Ионизация	Rudd	100 эВ	500 кэВ
	Born	500 кэВ	10 МэВ
Снижение заряда	Dingfelder	1 кэВ	10 МэВ
Водород			
Ионизация	Rudd	100 эВ	100 МэВ
Увеличение заряда	Dingfelder	1 кэВ	10 МэВ
He²⁺			
Возбуждение	Miller and Green	1 кэВ	10 МэВ
Ионизация	Rudd	1 кэВ	10 МэВ
Снижение заряда	Dingfelder	1 кэВ	10 МэВ
He⁺			
Возбуждение	Miller and Green	1 кэВ	10 МэВ
Ионизация	Rudd	1 кэВ	10 МэВ
Увеличение заряда	Dingfelder	1 кэВ	10 МэВ
Снижение заряда	Dingfelder	1 кэВ	10 МэВ
He (в нейтральном состоянии)			
Возбуждение	Miller and Green	1 кэВ	10 МэВ
Ионизация	Rudd	1 кэВ	10 МэВ
Увеличение заряда	Dingfelder	1 кэВ	10 МэВ

Фигуры 1-4 показывают полное сечение всех физических процессов и соответствующих моделей, доступных в расширении Geant4-ДНК инструментария Geant4 версии 9.3 BETA (июнь 2009 года). Некоторые из этих моделей в настоящее время находятся в стадии усовершенствования и ожидаются к выпуску в следующем релизе (версия 9.3) инструментария Geant4 в декабре 2009 года. Проверка моделей сечения - предмет другой статьи коллаборации Geant4-ДНК.

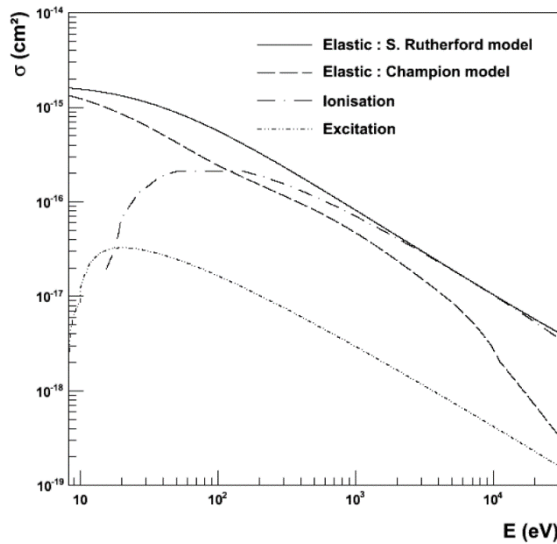


Рис.1. Общее сечение процессов электронов, доступных в Geant4-DNA 9.3 BETA, в зависимости от энергии падающего электрона, в диапазоне от 8,23 эВ до 30 кэВ: упругое рассеяние (модель скринированного Резерфорда - сплошная линия, модель Чемпиона - пунктирная линия), ионизация (пунктирно-пунктирная линия) и возбуждение (пунктирно-пунктирно-пунктирная линия). Упругое рассеяние является доминирующим процессом в нижнем диапазоне энергии, т.е. ниже 100 эВ. Упругое рассеяние (только модель скринированного Резерфорда) и ионизация доминируют при более высоких энергиях.

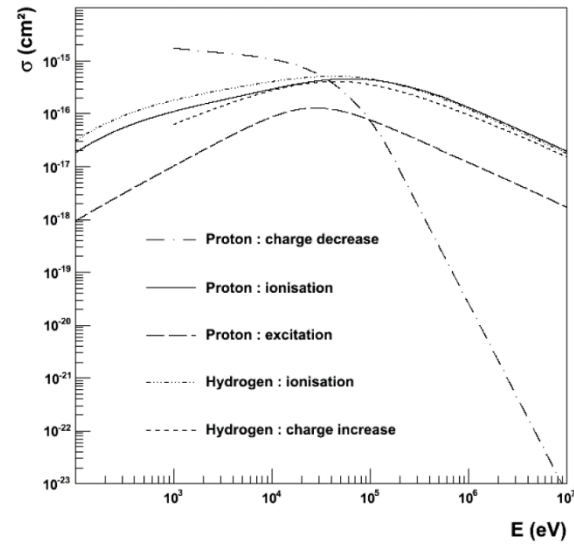


Рис.2. Общее сечение процессов протонов и водорода, доступных в Geant4-DNA 9.3 BETA, в зависимости от энергии падающей частицы (от 100 эВ до 10 МэВ). Протоны: уменьшение заряда (пунктирно-пунктирная линия), ионизация (сплошная линия), возбуждение (длинная пунктирная линия). Водород: ионизация (пунктирно-пунктирно-пунктирная линия), увеличение заряда (короткая пунктирная линия). Для протонов уменьшение заряда доминирует при низких энергиях, в то время как ионизация становится доминирующей при более высоких энергиях. Для водорода ионизация доминирует во всем диапазоне энергий.

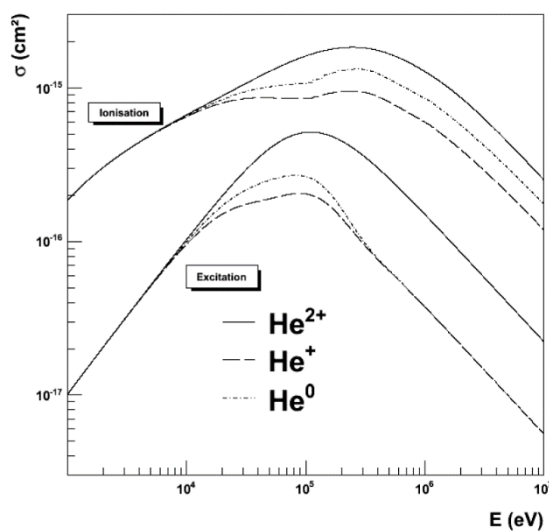
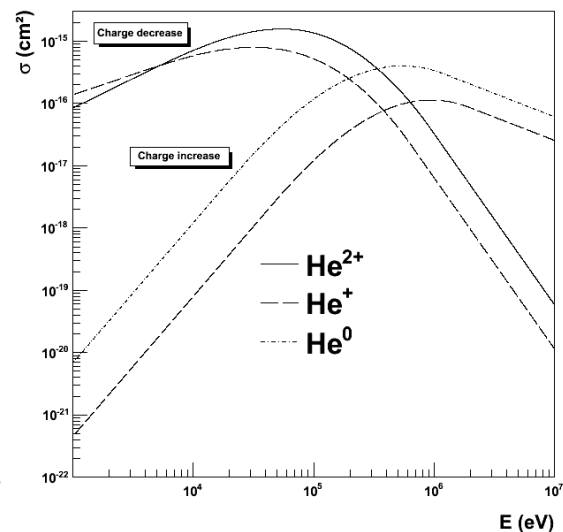


Рис.3. Общее сечение процессов ионизации и возбуждения нейтрального гелия (пунктирно-пунктирная линия), He^+ (пунктирная линия) и He^{2+} (сплошная линия), доступных в Geant4-ДНК 9.3 BETA, в зависимости от энергии падающей частицы (от 1 кэВ до 10 МэВ). Ионизация является доминирующим процессом при всех энергиях.



Следует отметить, что процессы возбуждения и изменения заряда (увеличение/уменьшение) специфичны для расширения Geant4-ДНК и не доступны в стандартном или в пакете низкоэнергетической электромагнитной физики Geant4 [3].

2.3. Моделирование структуры

Для иллюстрации возможностей моделирования треков на наномасштабе расширения Geant4-ДНК, на Рис. 5 и Рис. 6 показаны структуры треков нескольких частиц, полученные с использованием всех процессов, перечисленных в Таблице 1.

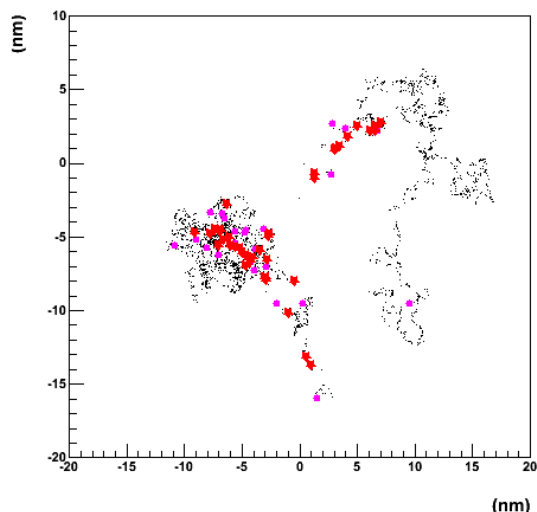


Рис.5. Проекция 2D-структуры, созданной одиночным электроном с энергией 1 кэВ в жидкой воде с использованием физических процессов Geant4-DNA. Первичная частица появляется в позиции (0,0). Показаны элементарные взаимодействия: упругое рассеяние с использованием теоретической модели Чемпиона [18] (черные точки), возбуждение с использованием модели Эмфиетозлу (фиолетовые круги) и ионизация согласно модели Борна (красные звезды).

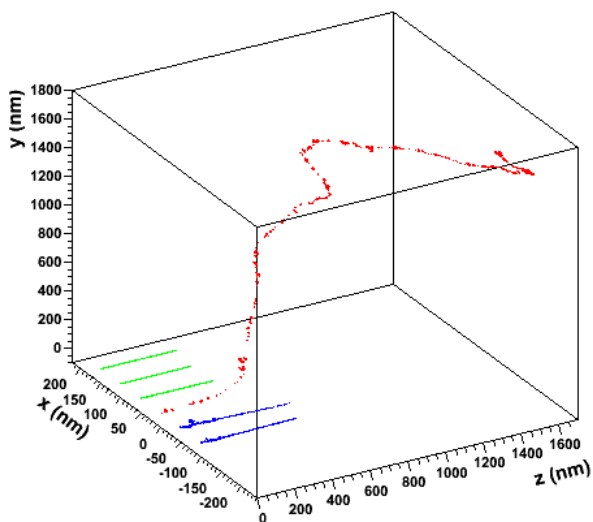


Рис.6. Сравнение шести трехмерных структур треков, полученных с использованием физических процессов Geant4-DNA для одиночных частиц с энергией падающей частицы 10 кэВ в жидкой воде. Частицы испускаются в направлении положительной оси z и из различных положений по оси x для большей ясности: протон (x=-50 нм), водород (x=-100 нм), электрон (x=0), He²⁺ (x=50 нм), He⁺ (x=100 нм), гелий (x=150 нм).

На Рис. 5 показана структура ионизирующего трека одиночного электрона с энергией 1 кэВ в жидкой воде. Первичный падающий электрон и вторичные электроны, образованные ионизацией, отслеживаются до самого низкого предела энергии, равного 8.23 эВ. Ниже этой энергии электроны останавливаются и депонируют свою энергию в среде. Пунктирное облако представляет каждое отдельное упругое рассеяние. В этом диапазоне энергии упругое рассеяние в значительной степени доминирует над возбуждением (фиолетовые круги) и ионизацией (красные звезды), как показано на Рис. 1.

На Рис. 6 показано сравнение трехмерных структур треков, полученных для всех частиц и процессов, доступных в расширении Geant4-ДНК. Первичные частицы имеют начальную кинетическую энергию 10 кэВ и испускаются в направлении положительной оси z (см. легенду к рисунку для идентификации частиц).

Участвующие частицы отслеживаются, постепенно теряя свою энергию, пока не достигнут предельных значений энергии, указанных в Таблице 1. Ниже этих пределов частицы останавливаются и депонируют свою энергию локально. Каждая точка в структуре трека соответствует отдельному физическому взаимодействию.

3. Моделирование прямых повреждений ДНК излучением

Поскольку физические процессы и модели Geant4-ДНК полностью интегрированы в набор инструментов Geant4, их легко можно комбинировать с возможностями геометрического моделирования Geant4. В частности, становится возможным реализовать геометрию биологических объектов с высоким разрешением на субмикрометровой шкале и полностью отслеживать частицы внутри этих геометрий, используя физические процессы Geant4-ДНК. Эти геометрии представляют собой значительное улучшение геометрических моделей, используемых ранее для дозиметрических исследований с помощью набора инструментов Geant4 на уровне биологических клеток. Для реализации геометрий с высоким разрешением могут быть использованы два подхода: воксельный и атомистический.

3.1. Геометрии биологических объектов с использованием вокселей

Воксельный подход, основанный, например, на восстановленных трехмерных изображениях, полученных с помощью техник высокого разрешения, таких как конфокальная микроскопия, был представлен в [10]. Мы разработали модели геометрии клеток высокого разрешения для Geant4 на субмикрометровой шкале. Эти фантомы представляют реалистичные отдельные клетки кератиноцитов человека - включая клеточное ядро, внутренние нуклеолы и цитоплазму - для более точного расчета дозиметрии в экспериментах по облучению клеток с использованием микропучков отдельных ионов. Физические расчеты выполнялись с использованием низкоэнергетических электромагнитных процессов Geant4. Пример "микропучок" Geant4 демонстрирует, как реализовать такие клеточные фантомы, и уже доступен пользователям непосредственно в наборе инструментов Geant4. Он полностью документирован на веб-сайте Geant4 "advanced examples" [4].

3.2. Атомистическая геометрическая модель ДНК

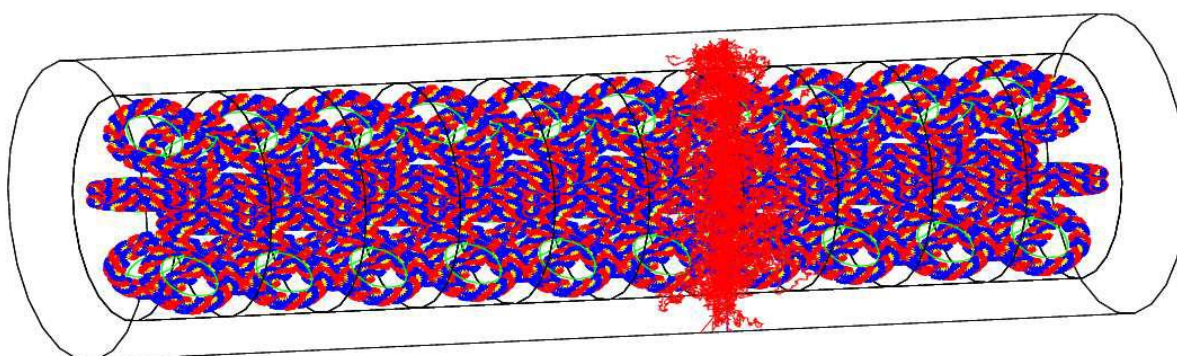




Рис.7. Визуализация Geant4 всего хроматинового волокна, описанного в тексте, облученного одиночной частицей He^+ с энергией 500 кэВ, испускаемой перпендикулярно главной оси вращения волокна. Группы фосфодиэстерной ДНК представлены синим и красным цветом. Они собраны в петли спирали. Каждый гистон имеет две петли ДНК и формирует нуклеосому. Каждый из 10 "срезов" этого волокна содержит 6 нуклеосом в конформации В-ДНК. Также показана полная структура трека, индуцированного входящей частицей и смоделированного с помощью физических процессов Geant4-ДНК. Эта иллюстрация была получена с использованием визуализатора DAWNFILE, доступного в наборе инструментов Geant4.

В атомистическом подходе мы предлагаем моделировать биологические объекты с более высокой гранулярностью на нанометровой шкале, такие как молекула ДНК, с использованием комбинаций простых математических объемов. Геометрическая модель ДНК, представленная в этой статье, вдохновлена работой М. А. Bernal и J. А. Liendo [22] в исследовании возможностей метода Монте-Карло PENELOPE в нанодозиметрии. Эта модель организована на четыре уровня геометрии: пары дезоксирибонуклеотидов, ДНК-двойная спираль, нуклеосомы (два петельных участка ДНК, обернутые вокруг хромосомного белка под названием гистона) и хроматиновое волокно (т.е. ДНК, собранная в хромосомы).

Ливень частиц, показанный на Рис. 9, был получен путем испускания одной единственной частицы He^+ с энергией 500 кэВ на волокно. SSB засчитывается, если одна мишень (группа фосфодиэстерной ДНК) получает энерговклад больше 10,79 эВ, первого уровня ионизации молекулы воды. DSB засчитывается, если два SSB расположены на противоположных нитях и разделены не более чем на 10 пар оснований. Для иллюстрации, с таким определением, симуляция Geant4 предсказывает, что одна единственная частица He^+ с энергией 500 кэВ, например, может породить 9 SSB и 2 DSB в геометрической модели волокна, результат прямого взаимодействия ионизирующих частиц и геометрической модели.

4. Пример микродозиметрии для пользователей Geant4

Пример "микродозиметрии" в наборе инструментов Geant4 включает в себя "продвинутый пример", названный "пример микродозиметрии". Список физических процессов ("физический список"), доступных в этом примере, был адаптирован в Geant4 версии 9.3 BETA (выпуск июня 2009 года) к новому дизайну процессов и моделей Geant4-ДНК, который теперь общий для стандартных и низкоэнергетических электромагнитных процессов и моделей Geant4 [5]. Он демонстрирует пользователям, как реализовать физический список Geant4-ДНК (см. Таблицу 1), включая возможность идентификации физических процессов Geant4-ДНК пользовательскими именами, генерацию первичных частиц и извлечение полных трехмерных структур треков частиц в жидкой воде с использованием полного набора физических процессов Geant4-ДНК. Также предоставлен файл макроса ROOT для удобного отображения структуры треков отслеживаемых частиц, например, треков, показанных на Рис. 5 и Рис. 6.

5. Заключение

В данной статье было представлено текущее состояние и разработки, доступные в расширении Geant4-ДНК для набора инструментов Geant4. Процессы Geant4-ДНК



расширяют возможности набора инструментов Geant4 до моделирования физических взаимодействий частиц на субмикронном уровне в жидкой воде. В сочетании с предварительными детальными геометрическими моделями молекулы ДНК мы ожидаем быть способными симулировать прямые повреждения, такие как одноцепочечные и двухцепочечные разрывы, вызванные ионизирующим излучением[6-11].

В будущем разработке будет включено усовершенствование и внедрение дополнительных физических моделей для фотонов, для более тяжелых ионов, таких как углерод и кислород (общее требование новых техник гадронной терапии и космических приложений радиации), а также для других материалов-мишеней биологического интереса (например, основы ДНК). Эти новые модели будут охватывать расширенные диапазоны энергий в сочетании с уже существующими физическими моделями Geant4 (стандартные электромагнитные процессы и процессы с низкой энергией электромагнитных процессов). В частности, планируется включение моделей вибрационного возбуждения на основе работ Мишо и Санче до 0,025 эВ.

Проект будет извлекать выгоду из доступности в открытом доступе набора инструментов Geant4 и его международной видимости, поскольку он является полным компонентом Geant4. Он будет предоставлять бесплатно и полностью прозрачно полностью интегрированную платформу симуляции повреждений ДНК излучением для любого заинтересованного пользователя. Ожидается, что проект окажет влияние на несколько областей исследований, выходящих за рамки первоначальной задачи Geant4 для симуляций в области высокоэнергетической физики (HEP). Действительно, подтвержденные модели смогут охватить области применения, связанные с ионизирующим излучением и биологическими объектами на уровне клеток. Предвидимые приложения включают, например, радиационную защиту и микродозиметрию для программ длительного космического исследования, включающих людей и биологические образцы, а также радиотерапевтические приложения.

References:

1. S. Chauvie, Z. Francis, S. Guatelli, S. Incerti, B. Mascialino, P. Moretto, P. Nieminen, M. G. Pia, Geant4 physics processes for microdosimetry simulation: design foundation and implementation of the first set of models, IEEE Trans. Nucl. Sci. 54 ,6-2, 2619-2628, 2007
2. Geant4 collaboration web site: <http://cern.ch/geant4>
3. Э.Э. Дуstmуродов, ОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТИЦ ПРИ РЕЛЯТИВИСТСКОМ СТОЛКНОВЕНИИ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР НА LHC (С ПОМОЩЬЮ GEANT4), Science and Education, toml (9) с.59-65 (2020)
4. Collaboration G. Geant4. – 2021.
5. Э.Э. Дуstmуродов, РОЖДЕНИЕ БЫСТРЫХ ПО-МЕЗОНОВ В ЯДРОЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ 4, 5 А ГэВ/с С РАСЧЁТАМИ ПО МОДЕЛИ FRITIOF, Science and Education, toml (4) с.11-15 (2020)



6. Юлдашев Б. С. и др. Процессы образования ядер ${}^7\text{Be}$ и системы $(\alpha + {}^3\text{He})$ в каналах с выходом α -частиц в 160p-взаимодействиях при 3.25 А ГэВ/с //Узбекский физический журнал. – 2018. – Т. 20. – №. 5. – С. 283-286.
7. Юлдашев, Б. С., Дустмуродов, Э. Э., Турдиев, Б. Р., & Файзиев, Т. Б. (2020). ПОНИМАНИЕ БОЗОНА ХИГГСА С ПОМОЩЬЮ Lhc. Science and Education, 1(4), 16-21.
8. ATLAS Collaboration et al. Search for pair production of higgsinos in events with two Higgs bosons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions at the ATLAS experiment //arXiv preprint arXiv:2401.14922. – 2024.
9. Dustmurodov E., Yavkacheva Z., Maxmudova D. ИЗМЕРЕНИЕ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ НА ТЭВ-КОЛЛАЙДЕРАХ //Modern Science and Research. – 2024. – Т. 3. – №. 1. – С. 1-4.
10. ugli Dustmurodov E. E. et al. MEASUREMENT OF THE STANDARD MODEL AT THE TEV COLLIDERS //Academia Repository. – 2024. – Т. 5. – №. 3. – С. 326-331.
11. Dustmurodov E. E., Mahmudova D. H. Atomic Relaxation Simulation in Geant4: Expanding the Possibilities //Web of Semantics: Journal of Interdisciplinary Science. – 2024. – Т. 2. – №. 3. – С. 343-345.