

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
И АВТОМАТИЗАЦИИ

10 - 7919

К-758

КОЧКИН
Владимир Иванович

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО
ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Специальность 01.01.07 - вычислительная математика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1974

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук

Г.А.Ососков

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук

профессор

В.С.Барашенков,

кандидат физико-математических наук

Л.В.Майоров

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Факультет вычислительной математики и кибернетики МГУ

им. М.В.Ломоносова, г. Москва.

Автореферат разослан

1974 г.

Защита диссертации состоится

1974 г. на заседании

Ученого совета Лаборатории вычислительной техники и автоматизации

ОИЯИ, г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

Е.А.ЛОГИНОВА

10 - 7919

КОЧКИН
Владимир Иванович

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО
ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Специальность 01.01.07 - вычислительная математика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Метод Монте-Карло в современном его виде возник вместе с появлением ЭВМ и за короткий период времени стал одним из важных вычислительных методов для решения многих физических, математических и прикладных задач /1,2,3/.

В ядерной физике метод Монте-Карло успешно применяется для решения задач нейтронной физики, в расчетах взаимодействий элементарных частиц и ядер с ядрами по каскадной модели, к проблеме переноса излучений и т.д.

Целью настоящей работы явилось применение метода Монте-Карло к расчету характеристик сложных приборов и физических процессов, используемых и изучаемых в ядерной физике. Среди первых рассмотрены детекторы нейтронов сложной структуры и импульсные реакторы с подвижным отражателем; среди вторых – процессы двойной перезарядки Π -мезонов на ядрах и прохождение фотонов через толстые монокристаллы.

Всем этим задачам свойственны высокая размерность входящих в них параметров, сложная геометрия, трудности учета большого количества косвенных характеристик вероятностных процессов при последующем сравнении их с экспериментальными данными.

Большая актуальность перечисленных физических задач привлекла к их решению различными аналитическими и численными методами многих исследователей. Однако попытки использования способов, уже опубликованных к тому времени, для решения конкретных задач, возникавших

в практике физического эксперимента в ОИЯИ, приводили к необходимости постановки новых задач и поставили перед автором ряд трудностей.

Например, краткое сообщение 1957 г. Боллингера и Томаса /17/, посвященное расчетам нейтронных детекторов не содержало описания метода расчета. При решении этой задачи в ОИЯИ в 1959 году автору, помимо методических проблем реализации модели на ЭВМ и ускорения времени счета, потребовалось получить зависимость эффективности нейтронного детектора от его толщины.

Далее, каскадная модель движения частиц в веществе и в ядре обсуждалась в ряде работ, — Гольдбергера /21/ (1948), Бернардини и др. /22/ (1952), В.В.Чавчанидзе /19/ (1955), И.И.Пьянова и Н.С.Ивановой /23/ (1956), В.С.Барашенкова и других /20/ (1961). Эти работы инициировали наши исследования по разработке схемы моделирования, ее реализации на ЭВМ, приемов ускорения времени счета.

Полученная программа позволила эффективно провести для Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ расчеты по двойной перезарядке Π -мезонов на ядрах.

В 1966 г. в связи с проектированием ядерного реактора ИБР-2 для Лаборатории нейтронной физики был поставлен целый ряд задач по расчету импульсного реактора с подвижным отражателем.

К моменту проведения нашей работы были известны способы расчета симметричных систем по методу Монте-Карло (Г.А.Михайлов /24/, А.Д.Франк-Каменецкий /25/), однако программы для расчета реакторов в XYZ-геометрии не было.

Необходимо также отметить затруднения, вызванные проблемой расчета прохождения фотонов через толстый монокристалл. Имевшаяся

в печати работа Фелькеля /26/ содержала методику, относящуюся лишь к тонкому кристаллу. Автору пришлось заново разрабатывать алгоритмы расчета, учитывающие когерентные процессы в тормозном излучении и при образовании электронно-позитронных пар.

Следует также учесть, что в период, к которому относится время разработки методики и алгоритмов большинства указанных задач, — конец 50-х, начало 60-х годов, — методы Монте-Карло в нашей стране еще не были разработаны в достаточной мере. Это вынудило автора, в частности, большое внимание уделить разработке элементов метода программ для выработки на отечественных ЭВМ того времени ("Сетунь", М-20) случайных последовательностей и других реализаций вероятностных схем.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Ниже излагается содержание диссертации по главам.

Существенной частью метода Монте-Карло является получение и статистический анализ случайных величин, распределенных по определенным законам, поэтому в первой главе диссертации описываются способы генерирования псевдослучайных равномерно распределенных (р.р.) чисел и результаты проверки таких чисел по системе тестов /4/; приводятся подпрограммы для проверки генераторов случайных чисел (ГСЧ) и подпрограммы для получения случайных чисел с разными законами распределения.

Известно /2/, что случайные величины с произвольной функцией распределения можно получать функциональным преобразованием с помощью случайных р.р. в (0,1) чисел, поэтому получение последних имеет фундаментальное значение.

Числа, получаемые на ЭВМ с помощью программных ГСЧ, называются псевдослучайными. Первыми способами получения р.р. псевдослучайных

чисел были метод "середины произведения" Дж. фон Неймана /27/ и метод вычетов Лемера /28/. На ряде отечественных машин р.р. случайные числа получаются способом перемешивания /18/.

В 1960 г. Ротенберг /5/ предложил модификацию метода Лемера, - смешанный конгруэнтный метод:

$$d_{i+1} \equiv [(2^a + 1)d_i + C] \pmod{2^m}, \quad a \geq 2, C - \text{нечетно.}$$

На основе модифицированного метода Лемера для машины М-20 нами был построен быстрый 4-х командный ГСЧ (α берется из таблицы случайных чисел), хорошо себя зарекомендовавший в большом числе расчетов.

Для ЭВМ БЭСМ-6 на основе метода Ротенберга автором написаны две подпрограммы: RAND(N) и RAN(1). ГСЧ RAND(N) позволяет получать до 12 независимых случайных подпоследовательностей, а быстрый ГСЧ RAN(1) генерирует одну последовательность р.р. в (0,1) случайных чисел.

Автором проведена детальная проверка имевшегося в библиотеке стандартных подпрограмм для БЭСМ-6 ГСЧ RNDM(-1) и его сравнение с ГСЧ RAND(N) и RAN(1) по специальной подпрограмме, реализующей всестороннюю систему тестов. Анализ результатов, представленных в таблице § I I главы, показывает, что случайные числа по ГСЧ

RAND(N) и RAN(1) имеют статистические свойства, удовлетворяющие гипотезам "равномерности", "случайности" и отсутствию корреляционной связи между парами идущих друг за другом случайных чисел, не уступающие свойствам случайных чисел, генерируемых RNDM(-1). Генераторы RAND(N) и RAN(1) тратят соответственно в 2,5 и 3,5 раза меньше времени на выработку одного случайного числа и занимают в памяти в 2 и 4 раза меньше ячеек, чем ГСЧ RNDM(-1).

В §2 I главы приводятся описания алгоритмов для моделирования случайных чисел, распределенных по закону Пуассона, экспонен-

циальному закону и по закону, заданному в виде гистограммы.

Во второй главе излагается методика и приводятся результаты расчета трех нейтронных детекторов. Расчеты характеристик нейтронных детекторов в общем случае можно рассматривать как оценки функционалов нейтронной плотности. В зависимости от состава среды и геометрии эти оценки сводятся к решению одномерных или многомерных задач переноса излучений. Аналитическое и численное решение их в настоящее время остается очень трудной математической задачей, если не прибегать к упрощению исходных посылок. В отличие от аналитических и других численных методов метод Монте-Карло путем моделирования случайных траекторий частиц в веществе позволяет сохранить строгость исходных допущений и получить все интересующие нас величины и распределения.

Несмотря на простейшую геометрию, сложный состав среды в задаче, рассматриваемой в § I II главы, обусловил выбор метода Монте-Карло для расчета.

В процессе вычисляются эффективность детектора ϵ и среднее время жизни нейтрона в детекторе τ :

$$\epsilon = \frac{N_{\text{поглотивш.}}}{N_{\text{упавших}}} = f_1(E, \bar{x}, \Sigma t)$$

$$\tau = \frac{(\Sigma t)_{\text{поглотивш.}}}{N_{\text{поглотивш.}}} = f_2(E, \bar{x}, \Sigma t)$$

Проведенный расчет позволил определить эффективность детектора с естественным бором в зависимости от толщины, данных о которой до сих пор не имелось. Методика "фиктивных ядер" привела к значительному ускорению счета и оказалась оправданной с физической точки зрения.

Расчет, описанный в § 2 второй главы, показал, что вполне возможно создание детектора из твердотельных дисков (полиэтилен, кадмий, индий) с высокой эффективностью и малым временем жизни.

Представленный в § 3 II главы расчет характеристик сцинтилляционного детектора нейтронов деления был выполнен в XYZ-геометрии сложной формы и многокомпонентной среды. Экспериментально определенные характеристики этого детектора хорошо совпали с расчетными.

Результаты работ, представленных во второй главе, показывают, что метод Монте-Карло позволяет с достаточной точностью предсказывать характеристики сложных экспериментальных устройств.

В третьей главе представлен ряд расчетов по определению двойных дифференциальных распределений продуктов ядерных реакций от протонов с энергиями до 660 Мэв для различных ядер, кинематических характеристик остаточных ядер в каскадном процессе, а также расчет процесса двойной перезарядки Π -мезонов на ядрах. Все расчеты проводились по методу Монте-Карло путем прямого моделирования каскадного процесса в ядре.

Двойная перезарядка Π -мезонов является сравнительно редким событием по сравнению с упругим рассеянием, неупругим рассеянием и поглощением.

Метод введения статистических весов, когда принимаются реализующимися все возможные процессы, очень сильно загружает память ЭВМ (расчеты проводились на ЭВМ М-20) и для тяжелых ядер оказывался неприемлемым. В связи с этим в нашей программе для ускорения счета партнер (нуклон) после столкновения с ним Π -мезона в дальнейшем исключался из рассмотрения.

Результаты экспериментов показывают удовлетворительное согласие энергетических распределений вторичных мезонов и полного сече-

ния двойной перезарядки Π^+ - мезонов с результатами расчета.

В четвертой главе для расчета "статических" характеристик импульсного реактора с подвижным отражателем был выбран метод Монте-Карло по следующим соображениям:

1) подвижный отражатель усложняет геометрию реактора и нарушает его симметрию, что становится сложным для расчета классическими численными методами, алгоритмы достаточно точных численных методов намного сложнее алгоритма метода Монте-Карло;

2) метод Монте-Карло дает простую возможность учесть анизотропию углового распределения рассеянных нейтронов;

3) метод Монте-Карло является единственным методом определения $P(\theta)$ - распределения нейтронов по времени жизни между последовательными делениями.

Далее, в четвертой главе диссертации в сжатой форме рассматривается методика расчета основных характеристик описываемого реактора. На основе этой методики автором была создана программа (для ЭВМ БЭСМ-4), все расчеты по которой находятся в хорошем согласии с экспериментом.

В пятой главе описывается методика и приводятся результаты расчета по методу Монте-Карло прохождения γ -квантов через толстый монокристалл кремния. Метод Монте-Карло выбран здесь для расчета потому, что другие методы очень сложны, если учитывать развитие ливня и когерентные явления в образовании электронно-позитронных пар в кристалле и в тормозном излучении электронов и позитронов.

Удовлетворительное согласие расчетов по методу Монте-Карло (см. рис. I) с экспериментом позволяет в случае других кристаллов, не производя измерения, использовать расчетные спектры фотонов для дальнейших исследований.

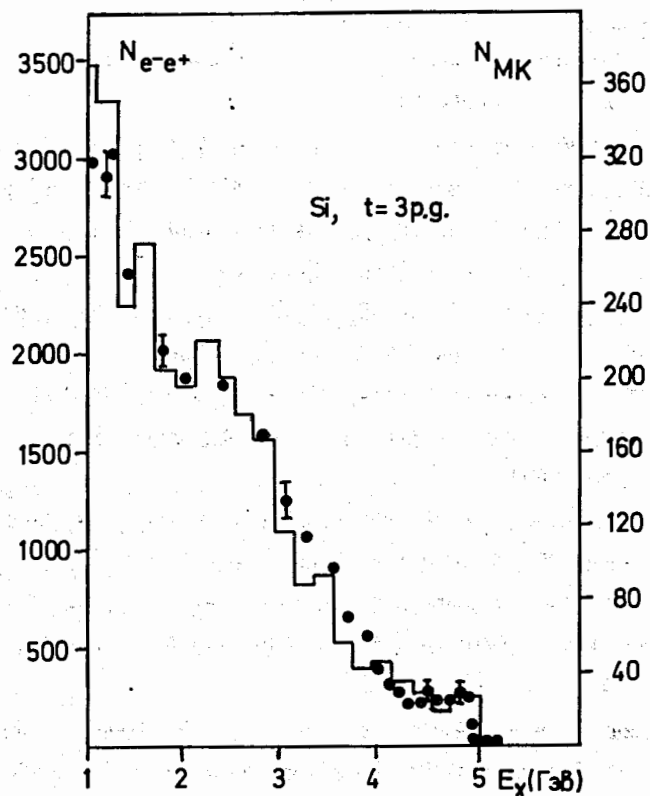


Рис.1. Энергетический спектр фотонов, вышедших из монокристалла кремния толщиной 30 см. Угол влета фотонов относительно оси (110) $\theta = 8$ мрад., $\alpha = 0$. Точками обозначены экспериментальные измерения ($N_{e^-e^+}$). Гистограмма - результат расчета по методу Монте-Карло ($N_{МК}$).

Заключение

В диссертации проведено обоснование выбора метода Монте-Карло для осуществления рассматриваемых расчетов, описаны алгоритмы, разработанные для решения ряда задач прохождения частиц через вещество; алгоритмы включают в себя соответствующую базу - подпрограммы для генерации различных случайных величин. Проведено систематическое сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными. Составленные программы могут быть использованы для различных других расчетов.

Сформулируем основные, полученные в диссертации, результаты:

1. На основе модифицированного метода Лемера построен быстрый генератор р.р. случайных чисел для ЭВМ БЭСМ-4 и БЭСМ-6; создана система стандартных подпрограмм для проверки ГСЧ (на языке ФОРТРАН) по расширенной системе тестов; создана система подпрограмм для генерации случайных чисел с различными законами распределения.

2. Разработана методика и проведены по методу Монте-Карло расчеты характеристик ряда нейтронных детекторов. Расчетные характеристики хорошо совпали с экспериментальными. Построенные на основе расчетов детекторы эксплуатируются в Лаборатории нейтронной физики.

3. В каскадной модели по методу Монте-Карло выполнены расчеты двойных дифференциальных распределений каскадных нуклонов для различных ядер и кинематических характеристик остаточных ядер в каскадном процессе от протонов с энергиями до 660 Мэв.

Проведен расчет процесса двойной перезарядки Π -мезонов на ядрах.

4. Создана программа и проведены расчеты по методу Монте-Карло для ЭВМ БЭСМ-4 статических характеристик импульсного реактора с подвижным отражателем сложной геометрии и состава.

5. Разработана методика, составлена программа на языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6 и проведены по методу Монте-Карло расчеты энергетического и углового распределения фотонов, прошедших толстый монокристалл кремния.

Основные результаты диссертации опубликованы /7-16/ и докладывались на Международном совещании по автоматизации обработки экспериментальных данных (Дубна, окт. 1967), на II Всесоюзном совещании по методам Монте-Карло (Сухуми, окт. 1969) и на Совещании по программированию и математическим методам решения физических задач (Дубна, окт. 1973).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бусленко Н.И. и др. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), СМБ, Физматгиз, М., 1962.
2. С.М.Ермаков. Метод Монте-Карло и смежные вопросы, Наука, М., 1971.
3. Symposium on Monte-Carlo methods, ed. H.A.Meyer, N.Y. Wiley, 1956.
4. Г.А.Ососков, Р.В.Полякова. Псевдослучайные числа для ЭВМ "Минск-22", депонированная публикация ОИЯИ, БИ-II-5165, Дубна, 1970.
5. A.Rotenberg. Journal of the Association for Computing Machinery, p.p. 75-77, 1960, vol.7, N^o1.
6. M.D.MacLaren and G.Marsaglia. J. of the ACM, January 1965, vol.12, N1, pp. 83-89.
7. В.И.Кочкин, А.Б.Попов, И.И.Шелонцев. Расчет характеристик нейтронного детектора методом Монте-Карло. Препринт ОИЯИ, 744 (1961).
8. В.И.Кочкин и др. Препринт ОИЯИ, P-1713, Дубна, 1964.
9. Ю.А.Батусов, В.И.Кочкин, В.М.Мальцев. Расчет процесса двойной перезарядки Π -мезонов на ядрах. Препринт ОИЯИ, P2-3004, Дубна, 1966; то же ЯФ, т.6. вып. I, 1967, стр. 158-163.
10. В.И.Кочкин и др. Препринт ОИЯИ, P2-3201, Дубна, 1967, то же ЯФ, т.У1, вып. I, 1968, 31-35.

11. В.И.Кочкин, Е.П.Шабалин. Применение метода Монте-Карло к расчету импульсного реактора с подвижным отражателем. Препринт ОИЯИ, II-4098, Дубна, 1968.
12. В.И.Кочкин, А.Б.Попов, И.И.Шелонцев. Препринт ОИЯИ, II-4602, Дубна, 1969.
13. В.И.Кочкин, Ю.В.Рябов, И.И.Шелонцев. Препринт ОИЯИ, II-4665, Дубна, 1969.
14. В.И.Кочкин, Е.П.Шабалин. Сообщение ОИЯИ, II-5407, Дубна, 1970.
15. В.И.Кочкин. Сообщение ОИЯИ, II-6409, Дубна, 1972.
16. Р.О.Авакян, А.А.Армагян, С.М.Дарбинян, В.И.Кочкин, Г.А.Ососков, И.И.Шелонцев, Н.Ю.Шурикова. Вычисление по методу Монте-Карло энергетического спектра и углового распределения фотонов, прошедших толстый монокристалл кремния. Препринт ОИЯИ, PII-7494, Дубна, 1973.
17. L.M.Bollinger, I.E.Thomas, Rev.Sci. Instr., 28, N7, 1957.
18. И.М.Соболев. Теория вероятностей и ее применения, т.Ш, вып.2, М., 1958.
19. В.В.Чавчанидзе. Изв. АН СССР, 19, 629 (1955).
20. V.S.Varashenkov, V.M.Maltsev, E.K.Mikhul, Nucl.Phys., 24,642(1961)
21. Goldberger M.R. Phys.Rev., 74, 1268 (1948)
22. Bernardini Y., Booth E.T., Lindenbaum S.L., Phys.Rev., 88,1017(1952)
23. Н.С.Иванова, И.И.Пьянов. "Ж.эксперим. и теор. физ.", 31, 416(1956)
24. Г.А.Михайлов. Ж. выч. матем. и матем. физики, 6, 71, 380 (1966).
25. А.Д.Франк-Каменецкий. Атомная энергия, 16, 119 (1964).
26. Volkel. Preprint DESY 65/6.
27. Neumann J. NBS appl.math.series, 1951, N12, 36-38.

28. Lehmer D.H. Proc.sympos. on large-scale digital calcul. machinery, Harvard Univ. press, 1949, 141-146.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 мая 1974 года.