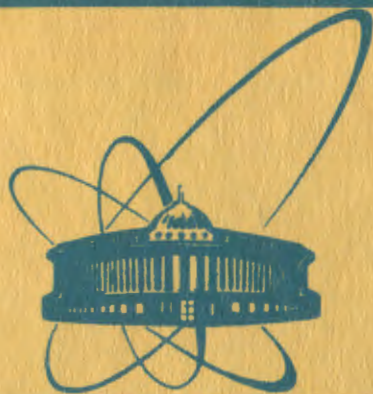


9/11-80



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

+

2516/2-80

P10-80-94

Ю.В.Заневский, Э.М.Иванченко, И.М.Иванченко,
П.В.Мойсенз, В.Д.Пешехонов, А.Е.Сеннер

МОДЕЛИРУЮЩАЯ ПРОГРАММА
ДЛЯ ИОННОЙ РАДИОГРАФИИ

1980

1. ВВЕДЕНИЕ

Заряженные частицы - протоны, ионы - в сравнении с рентгеновским излучением позволяют проводить радиографическое обследование биообъектов при существенно меньших дозах облучения. При этом результаты анализа тонкой анатомической структуры более информативны. Исследования в этом направлении проводятся в настоящее время во многих физических центрах, располагающих низкоэнергетическими выведенными пучками многозарядных ионов^{1/}.

При прохождении заряженной частицы через вещество происходит постепенное уменьшение энергии из-за ионизационного торможения на атомах вещества. Точное измерение остаточного пробега /определение точки остановки/ или остаточной энергии дает информацию об интегральной плотности вещества по пути частицы. Величина остаточного пробега /энергии/ моноэнергетических частиц имеет статистические флуктуации - так называемый страгглинг /энергетический страгглинг/. Наличие страгглинга обуславливает определенные требования к экспериментальной установке для достижения чувствительности, присущей методу. Целью данной работы явилось создание моделирующей программы и проведение с ее помощью оптимизации системы обработки информации и экспериментальной установки для радиографии на пучке альфа-частиц. Требования к моделирующей программе были следующими: универсальность по отношению к материалам, из которых подготовлены модули установки, возможность варьировать количество вещества на пути пучка; гибкость; простота использования; высокая скорость счета; рациональное использование запоминающих устройств.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Сущность моделируемого процесса заключается в следующем. Пучок моноэнергетических альфа-частиц проходит через набор однородных сред, заканчивающийся детектором остановки^{2/}. Схема экспериментальной установки, представленная в виде набора сред, показана на *рис.1*.

Под средней длиной пробега понимается величина

$$\bar{R} = \int_0^{\infty} x W(E, x) dx, \quad /1/$$

где $W(E, X)$ представляет собой распределение длины пробега.

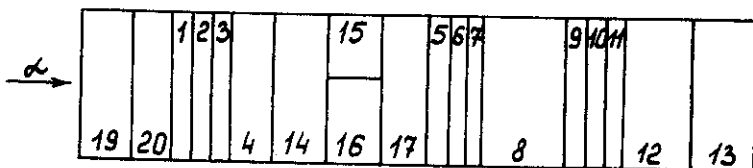


Рис.1. Схема экспериментальной установки для ионной радиографии, представленная в виде набора однородных сред. 1,3,5,7,9,11 - медь, 2,6,10 - вольфрам, 4,8,12,18,20 - воздух, 14,15,19 - оргстекло, 13 - алюминий, 16- оргстекло или воздух, 17 - вода.

Заряженные частицы, проходя через вещество, теряют энергию благодаря:

1/ потерям на ионизацию и возбуждение электронных оболочек атомов среды;

2/ поляризации атомов;

3/ радиационным потерям;

4/ ядерному торможению и перезарядке.

При кинетической энергии до 1 ГэВ потери энергии определяются главным образом первым процессом. Величина ионизационных потерь dE/dX частиц с кинетической энергией более 1 МэВ определяется по формуле Бете. Таким образом, для частиц с начальной энергией E_0 средняя величина пробега определяется как

$$\bar{R} = \int_0^{E_0} \left(-\frac{dE}{dX} \right)^{-1} dE. \quad /2/$$

Как было уже сказано, статистические флуктуации в потерях энергии заряженных частиц приводят к разбросам длин пробегов, распределение которых можно считать гауссовым^{/3/}. Обозначим через σ стандартное отклонение длин пробегов. Величина σ/\bar{R} слабо зависит от Z среды и для протонов с энергиями 8÷500 МэВ принимает значения в пределах 1,9±1,1% /в воздухе/. Величина σ/\bar{R} для частиц с массой M может быть представлена^{/4/} в виде

$$\frac{\sigma}{\bar{R}} = \sqrt{\frac{200 m_e}{M}} \cdot f(E/MC^2), \quad /3/$$

где m_e - масса электрона. Таким образом, для частиц с начальной энергией E_0 , движущихся в однородных средах, можно моделировать точку остановки, используя выражения /2/ и /3/. Для повышения скорости счета используются значения величин $\bar{R}(E_0)$ из работ^{/3,5/}. Моделирование процесса прохождения частиц через вещество осуществляется с учетом индивидуальных характеристик

сред и исходных геометрических и кинематических параметров события. Зная значение исходной энергии пучка частиц, по зависимости $\bar{R}(E)$ для конкретной среды находим величину средней энергии частиц на выходе из среды и, используя результаты работы ^{6/}, определяем значение σ_E . В работе ^{8/} дается значение энергетического страгглинга нерелятивистских частиц при энергетических потерях, доходящих до 80% /в отдельных случаях и выше/ от исходной кинетической энергии E_0 . Вычисления справедливы для значений E_0 , достигающих 30% от энергии массы покоя частиц, и не зависят от вида материала поглотителя. В нашем случае кинетическая энергия альфа-частиц - около 800 МэВ, что составляет ~21% от величины энергии покоя. На рис. 2 показаны зависимости величин σ_E^2 от средних энергетических потерь для альфа-частиц, заимствованные из работы ^{8/}. По оси ординат отложены значения $\frac{\sigma_E^2}{E_0(E_0-E)} \cdot \log U_0 \frac{\epsilon_p}{\epsilon}$, где $\epsilon = \frac{4m_e}{M} (1 + \frac{m_e}{M})^{-2}$, M - масса частицы, ϵ_p - значение ϵ для протонов, $U_0 = \epsilon E_0 / I$, I - потенциал ионизации.

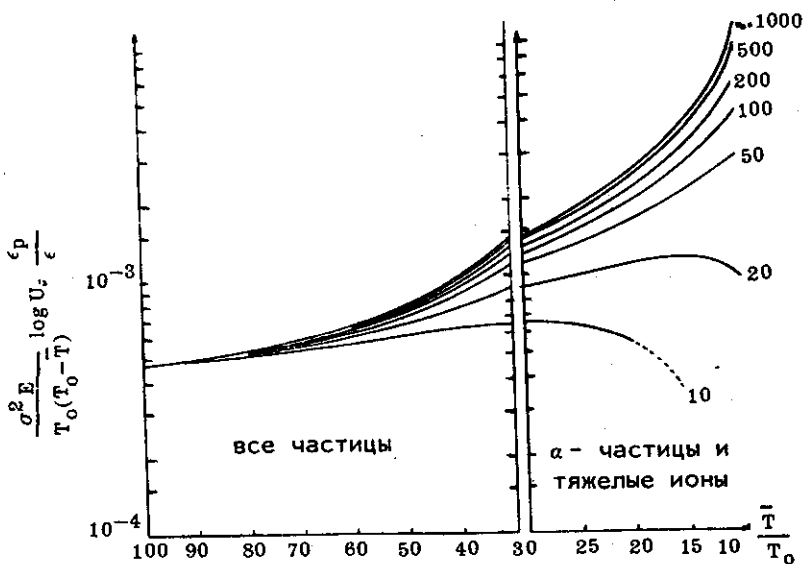


Рис. 2. Зависимость $\delta^2 E$ от величины средних потерь энергии.

Полученные параметры E , σ_E используются для определения значения энергии на выходе из среды в предположении гауссово-

го характера распределения потерь энергии. Указанная выше процедура производится последовательно для всех сред, находящихся до детектора остановки. С использованием рассчитанного значения энергии на выходе ДО моделируется z -координата точки остановки. В табл.1 приведены параметры некоторых материалов, используемые при расчетах.

Таблица 1

Вещество	I /эВ/	ρ /г/см ³ /	L /см
H	18,7	-	-
C	78	-	-
O	101	-	-
Al	163	2,70	8,9
Fe	273	7,87	1,76
Cu	314	8,96	1,43
W	-	19,3	0,35
H ₂ O	72,08*	1,0	36,1
Оргстекло	68,15*	1,18	34,5
C ₅ H ₈ O ₂			
Воздух	85*	1,205x10 ⁻³	30050

3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Моделирующая программа создана для установки^{/2/} по проведению радиографических исследований на пучке ионов гелия с энергией около 200 МэВ/нуклон. Установка содержит сцинтилляционные счетчики; двухкоординатные пропорциональные камеры /ПК1 ÷ ПК3/; модуль из пропорциональных камер для определения точки остановки частиц - детектор остановки /ДО/; набор пластин из оргстекла, используемых в качестве поглотителя; бокс с водой для размещения исследуемого объекта. Катоды ПК1÷ПК3 намотаны медной проволокой диаметром 0,1 мм с шагом 2 мм, аноды всех камер - золоченой вольфрамовой проволокой диаметром 0,02 мм

* Значение потенциала ионизации определялось по формуле $\ln I = \sum f_i \ln T_i$, где $f_i = n_i Z_i / \sum n_i Z_i$ / n_i - число атомов в i см³ каждого из элементов/.

Таблица 2

Ключевое слово	Содержание
SENE	- исходная кинетическая энергия частиц E_0 .
TABN	- Z - координаты фантома и Y - координата изменения плотности.
STDT	- толщина канала Д0.
VENG	- величина стандартного отклонения значений E_0 /по нормальному закону распределения/.
VEVE	- максимальное отклонение значений энергии от величины E_0 /значения распределены равномерно/.
EXRG	- координаты излучаемой области фантома.
XYVR	- величина стандартного отклонения $RX(y) = [X(y)ЛГ - X(y)ПКЗ]$, где ЛГ - координаты частиц на левой границе экспериментального объема, ХПКЗ - координаты в плоскости ПКЗ.
ELMN	- X(y) - размер элементарной ячейки.
STMN	- нижняя граница статобеспеченности для элементарной ячейки.
IERN	- +число каналов от наиболее вероятного канала Д0 при режиме обработки FGAU.
FAVR	- указатель обработки информации по методу "среднего".
FMPF	- указатель вычисления модуляционной передаточной функции.
FGAU	- указатель обработки информации по методу "Гаусс".
FMNK	- указатель для вычисления X, Y-координат трека в плоскости фантома, если FMNK=0, за эти значения принимаются координаты по ПК1; если FMNK=1, эти значения определяются по информации с ПК1÷ПК3 методом наименьших квадратов.
ABSO	- Z - координаты поглотителя.
WATR	- Z - координаты бокса с водой.
PION	- значения потенциала ионизации для сред.
PLTN	- значения плотности для сред.
PINT	- Z - координата левой границы экспериментального объема.
IPNT	- указатель массивов длин пробегов для сред /соответствующие значения энергий хранятся в массиве/.
LMOA, RMOA	- Z - коэффициенты левой и правой стенок бокса с водой соответственно.

с шагом 2 мм. Д0 - представляет собой систему из 12 независимых газовых счетчиков /каналов/ с размещенными между ними поглотителями, роль которых выполняют алюминиевые катоды толщиной 175 мкм.

В моделирующей программе ПК рассматривается как набор трех сред (Cu, W, Cu), а Д0 - как поглотитель из Al.

Моделирующая программа создана на основе пакета GEANT^{/7/}. В состав программы включен пакет подпрограмм статистической обработки. Управляющие карты читаются в соответствии с требованиями программы FFREAD^{/8/}. В табл.2 даны функциональные значения некоторых используемых управляющих карт. Для определения величины страгглинга, характеризующего чувствительность метода, изучаемая область фантома /имитирующего заданную неоднородность по плотности/ разбивается на элементарные ячейки. Анализируются статистически нормированные распределения точек остановки частиц в Д0 по каждой ячейке. Результаты выводятся на АЦПУ в виде диаграмм рассеяния. Координаты точки остановки /средней величины пробега/ определяются двумя методами. По

первому методу \bar{R} находится как $\bar{R} = \sum_{i=1}^N iP(i)$, где N - число каналов в Д0, P(i) - вероятность остановки частицы в i-том канале. Во втором методе \bar{R} вычисляется по результатам фитирования распределения точек гауссовой кривой.

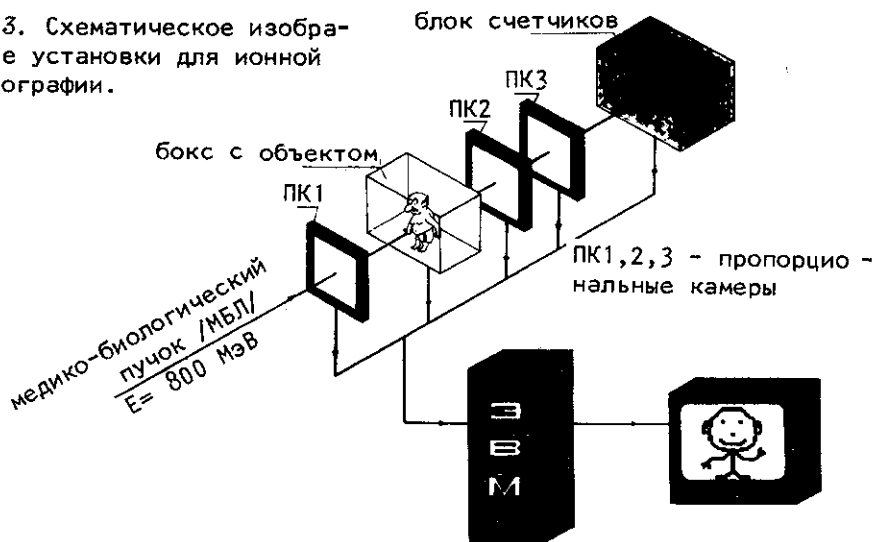
Имеется возможность получения характеристик пространственного разрешения системы, соответствующих определенному перепаду плотности и так называемой величины "нерезкости" по тековому методу^{/9/}.

Гистограммирование, обработка и представление информации производятся с помощью пакета программ HBOOK^{/10/}.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная программа использовалась для моделирования работы установки /рис.3/, в состав которой входят 3 двухкоординатных ПК, бокс с водой, служащий для размещения биообъектов, детектор остановки, представляющий собой набор независимых каналов (Al) толщиной 0,035 см. Угловая расходимость пучка альфа-частиц принималась равной не более 2 мрад. Предполагалось прохождение моноэнергетичного пучка альфа-частиц через три ПК и слой воды. При толщине слоя воды 15,2 см и кинетической энергии альфа-частиц (E) ~620 МэВ средняя точка остановки частиц равна 5,6 канала Д0, а величина страгглинга ($\sigma_{стр}$) - 1,3 в единицах канала Д0. При увеличении слоя воды до 20 см и E до 750 МэВ средняя точка остановки будет находиться в 4,9 канале Д0 и $\sigma_{стр} = 1,9$ канала Д0.

Рис. 3. Схематическое изображение установки для ионной радиографии.



Проводилось моделирование работы реальной установки для радиографических исследований^{/2/}. Учитывалось, что в этом случае существует дополнительно некоторое количество оргстекла в виде стенок бокса с водой /суммарная толщина ~ 2,8 см/. Кроме того, использовался набор пластин оргстекла различной толщины для смещения средней точки остановки частиц в область центральных каналов ДО. В предположении, что все количество оргстекла /поглотитель толщиной 7,3 см/ находится перед ПК1, а энергия альфа-частиц составляет 800 МэВ, определены средняя точка остановки частиц, равная 5,3 канала ДО, и $\sigma_{стр.} = 1,63$ канала ДО. Отсюда остаточная величина пробега альфа-частиц в ДО составляет ~ 0,185 см и $\sigma_{стр.} = 0,057$ см А1.

Результаты моделирования хорошо соответствуют результатам, полученным при работе реальной установки с эталонным фантомом.

В заключение авторы пользуются случаем выразить благодарность члену-корреспонденту АН СССР М.Г.Мещерякову, члену-корреспонденту АН СССР Н.Н.Говоруну за поддержку и интерес к работе. Авторы благодарны И.Н.Семенюшкину за оказанную помощь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заневский Ю.В. и др. ОИЯИ, 14-11330, Дубна, 1977.
2. Анисимов Ю.С. и др. ОИЯИ, P13-18872, Дубна, 1978.

3. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. "Наукова думка", Киев, 1975.
4. Symon K.R. Harvard University, Thesis, 1948.
5. Atkinson J.H. Jr., Willis B.H. High-Energy Particle Data, v.II, UCRL-2426, 1957.
6. Tschalar C. Nucl.Instr. &Meth., 1968, 61, p.141.
7. Brun R. et al. GEANT User Guide and Reference Manual. CERN-DD/78/2.
8. Brun R. et al. FFREAD User Guide. CERN-DD/EE/78-2.
9. Заневский Ю.В. и др. ПТЭ, 1978, 2, с.7.
10. Brun R., Ivanchenko I., Palazzi P. HBOOK Histogramming Fitting and Data Presentation Package. CERN-DD/77/9.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 февраля 1980 года.