

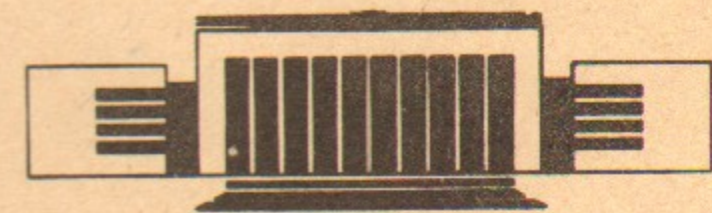


56
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

А.М. Махов

SCATTER — ПРОГРАММА ВЫЧИСЛЕНИЯ
СЕЧЕНИЙ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АДРОНОВ И ЛЕПТОНОВ
С ЯДРАМИ

ИЯФ 92-66



НОВОСИБИРСК

SCATTER—программа вычисления сечений
взаимодействия адронов и лептонов с ядрами

А.М. Махов

Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера
630090, Новосибирск 90

АННОТАЦИЯ

В работе приводится описание программы SCATTER, предназначенной для проведения численных расчетов дифференциальных сечений упругого рассеяния, полных сечений и сечений реакции K , π , N , d , α , e , μ взаимодействий с ядрами в области энергий налетающей частицы от 0 до 1 ГэВ; краткое описание алгоритмов; инструкция пользователю; результаты сравнения расчетов с экспериментом.

Оглавление

1. Введение	5
2. Краткое описание программы SCATTER	7
3. Ввод—вывод	8
4. Запуск программы	11
5. Краткий алгоритм вычислений	11
6. Структура программы	12
7. Тестирование блоков программы	18
8. Результаты сравнения расчетов с экспериментом	19
9. Приложение	28

ВВЕДЕНИЕ

Хотя за последние десятилетия ситуация с экспериментальными данными по сечениям многих ядерно-физических процессов существенно улучшилась, однако, по-прежнему, существуют сильные неопределенности даже для процессов, вносящих основной вклад в полное сечение частица-ядерных взаимодействий. Для ряда частиц, интенсивные пучки которых уже существуют (π , K , N , d , α), информация о сечениях в обширных диапазонах начальных энергий и массовых чисел ядер вообще отсутствует (например, для взаимодействий заряженных каонов с ядрами среднего и тяжелого веса при кинетических энергиях меньше 1 ГэВ). В таком положении единственным источником информации являются модельные расчеты, выполняемые с использованием разработанных кем-либо программ. В настоящее время существует большое количество программ для расчетов различных сечений частица-ядерных взаимодействий. Все они, однако, не лишены ряда недостатков, из которых для пользователя этих программ наиболее существенными могут являться следующие:

1. Узкая ориентированность программы на какой-либо ядерно-физический процесс, либо на определенную налетающую частицу; например, на расчет упругого рассеяния пионов ядрами—PIRK [1].

2. Необходимость подготовки входной информации, непосредственно не связанной с физической задачей (например, параметров математических методов, используемых в программе), что требует от пользователя довольно глубокого знания используемой программы.

3. Необходимость, в ряде случаев, выбора физической модели для решения задачи (например, выбор того или иного набора оптических

потенциалов или приближения при восстановлении микроскопического потенциала), что требует от пользователя анализа обширных и сильно разрозненных литературных сведений.

4. В большинстве программ отсутствует хороший пользовательский интерфейс, т.е. ввод-вывод осуществляется в неудобной для пользователя форме (например, выходная информация прямо не позволяет пользоваться доступными в настоящее время на IBM PC графическими пакетами, либо требуется вводить общеизвестные константы типа масс частиц и ядер, точность определения которых в настоящее время существенно лучше требований, предъявляемых к этим величинам точностью программы).

5. Отсутствие необходимых для расчета сведений для большинства ядер.

В ряде случаев, когда недостаток времени не позволяет произвести обширные литературные и программные изыскания с целью воспроизведения сечений частица-ядерных взаимодействий, был бы удобен единый программный комплекс для расчетов различных ядерно-физических процессов рассеяния частиц на любых ядрах, возможности которого позволили бы описать существенную часть полного сечения взаимодействия в широком интервале энергий.

В настоящем описании представлена одна из версий (3.2) программного комплекса SCATTER для расчетов сечений частица-ядерных взаимодействий, лишенная перечисленных выше недостатков и удовлетворяющая отмеченным выше требованиям. Результаты расчетов прежних версий программы опубликованы в [2-4].

SCATTER предназначен для проведения численных расчетов дифференциальных сечений упругого рассеяния, полных сечений и сечений реакции K , π , N , d , α , e , μ взаимодействий с ядрами, а также некоторых поляризационных характеристик, искаженных волновых функций (ИВФ) и амплитуд рассеяния. Может работать в пакетном и диалоговом режимах.

SCATTER имеет встроенную базу данных по распределениям плотности нуклонов в ядрах и оптическим потенциалам, которая может быть легко изменена пользователем. Имеется удобный пользовательский интерфейс: для старта программы достаточно ввести символ частицы, символ ядра (и его массовое число в случае чистого изотопа), символы требуемых величин (а также число угловых точек и значения угла в них для угловых распределений) и число энергетических точек с указанием значений в них какой либо из кинематических величин — полной или кинетической энергий частицы в л.с.к., либо импульса в л.с.к.

Имеется также режим справки (Help) и дружественная диагностика ошибок ввода. Формат выходных файлов позволяет пользоваться различными графическими пакетами для IBM PC.

SCATTER может быть полезен научно-исследовательским группам, использующим в своей работе сведения по частица-ядерным взаимодействиям (например, занимающимся моделированием событий в физике высоких энергий), в некоторых случаях группам, работающим в области частица-ядерного рассеяния и реакций, в ряде дозиметрических расчетов, а также при обучении студентов ВУЗ-ов как демонстрационная обучающая программа по теории рассеяния и ядерной физике.

Программный комплекс для расчетов сечений рассеяния и взаимодействия K , π и N с ядрами создан Маховым А.М. и передан в ИЯФ СО РАН на условиях договора N 5 между ИЯФ СО АН СССР и центром "АРС" (без права некоммерческого распространения).

Краткое описание программы SCATTER

Налетающая частица: $K^{+,-,0}$, \bar{K}^0 , K_L^0 , K_S^0 , $\pi^{+,-,0}$, p , n , d , α , $e^{+,-}$, $\mu^{+,-}$

Ядро—мишень: любое ядро и нуклоны.

Энергетический диапазон: для мезонов $T^{lab} \leq 1$ ГэВ; для нуклонов $10 \text{ МэВ} \leq T^{lab} \leq 1$ ГэВ; для дейтонов $T^{lab} \leq 100$ МэВ и всюду ниже 1 ГэВ, где есть данные по феноменологическим dA -потенциалам; для α -частиц всюду ниже 1 ГэВ, где есть данные по феноменологическим αA -потенциалам; для лептонов ниже 1 ГэВ.

Вычисляемые величины: полное сечение взаимодействия, сечение реакции, дифференциальные и интегральные сечения упругого рассеяния, рассеяния с перезарядкой π , K , N и регенерации K_L^0 , K_S^0 ; сечение поглощения пионов; полное сечение взаимодействия, сечение реакции, дифференциальные и интегральные сечения упругого рассеяния d , α ; дифференциальные сечения упругого рассеяния $e^{+,-}$, $\mu^{+,-}$ на ядрах; оптический потенциал, искаженные волновые функции и амплитуды упругого рассеяния, ряд поляризационных характеристик. Возможно сравнение расчета с вводимыми экспериментальными данными с использованием χ^2 — критерия и χ^2 — оптимизация физических параметров задачи.

Язык программирования — FORTRAN

Ориентировочный объем — 9000 строк текста. Исполняемый файл ~1 Мбайт для ЕС ЭВМ в CBM. ~300 кбайт в VAX/VMS.

Занимаемая оперативная память — 1-3 Мбайт (в зависимости от величины получаемых в расчетах таблиц парциальных ИВФ).

Библиотечные подпрограммы не используются.

Требуемое для расчетов машинное время сильно зависит от используемой формы плотности и в фиксированной точке начального лабораторного импульса p^{ac} при точности II – IV знака квадратично зависит от p^{ac} и составляет для расчетов на ЕС-1061 для рассеяния на ^{12}C : для $K^{\pm,0}$ при $p^{ac}=1$ ГэВ — 5 мин; для $\pi^{\pm,0}$ при $p^{ac}=0.4$ ГэВ — ~ 1 мин; для N при $p^{ac}=1.4$ ГэВ — ~ 15 мин.

Пользовательский интерфейс: комплекс может работать в пакетном и диалоговом режимах, имеет широкую систему умолчаний, режим справки (Help) и дружественную пользователю диагностику ошибок ввода. Формат выходных файлов позволяет пользоваться различными графическими пакетами для IBM PC.

Будущие и возможные расширения следующих версий: взаимодействие антинуклонов с ядрами, расширение энергетического диапазона до 5–6 ГэВ, включение неупругого рассеяния с возбуждением конкретных уровней ядра и реакции выбивания нуклонов и кластеров, включая выбивание с перезарядкой, генерирование наполовину немассовых частиц ядерных амплитуд.

ВВОД — ВЫВОД

В диалоговом режиме пользователь вводит данные по запросу программы, а в пакетном режиме он должен подготовить входной файл, который передается через канал 5 на ЕС и SYS\$ INPUT на VAX. Все кинематические величины задаются в ГэВ, угловые — в градусах. Первые 4 строки и признак конца ввода & обязательны.

В первой строке по формату (A4, X, F10, 2F5) вводятся: символ частицы, ее масса, заряд, спин. Если пользователь задал только символ частицы, остальные параметры берутся из базы данных.

Во второй строке по формату (A4, X, F10, 3F5) вводятся: символ ядра, масса ядра, его массовое число, его заряд, его спин. Если задан только символ ядра все параметры берутся из базы данных. Списки ядер и частиц, внесенных в базу данных SCATTER, можно посмотреть по директиве Help в диалоговом режиме. Вид файла с базой данных по плотностям нуклонов и по параметрам оптических потенциалов приведен в Приложении.

В третьей строке по формату (A1, I4) вводится символ кинематической переменной и число точек полей. Пробел соответствует импульсу налетающей частицы в л.с.к., символ "E" — полной ее энергии, символ "T" — кинетической энергии.

В четвертой строке по формату F5 вводятся значения кинематической переменной. Возможен ввод из нескольких строк.

После обязательных строк с данными следуют строки с кодовыми словами, определяющими типы вычисляемых сечений. Для дифференциальных сечений после строки с кодовыми словами следуют списки углов.

Ввод всех кинематических величин в ГэВ, углов — в градусах.

КОДОВЫЕ СЛОВА

ST	Полное сечение без кулоновского рассеяния.
STC	Полное сечение с учетом кулоновского $d\sigma/d\Omega$.
SR	Сечение всех неупругих каналов.
SE	Интегральное сечение упругого рассеяния.
SEC	То же с учетом кулоновского $d\sigma/d\Omega$.
SA	Сечение поглощения пиона.
SXT	Сечение перезарядки в любое состояние конечного A.
SXE	Сечение перезарядки в аналоговое состояние A.
TKLS	Сечение регенерации в любое состояние конечного A.
EKLS	Сечение регенерации в основное состояние A.
DSE N	(A4, 2X, I4) Дифференциальное упругое сечение $d\sigma/d \cos \theta$ и число точек по углу. Следующие строки — значения θ в градусах в формате F5, если $N > 0$; либо 1 строка (начальное значение и шаг), если $N < 0$.
DSEN N	Аналогично DSE разность упругого и резерфордовского сечений.
DSEC N	Совпадает с DSE и является служебным для задания области интегрирования по углам в SEC и STC.
DSXE N	Дифф. сечение перезарядки в аналоговое состояние. Дальше аналогично DSE, если $N = 0$, то таблица углов совпадает с DSE.
DKLS N	Дифф. сечение регенерации в основное состояние. Дальше аналогично DSE. Если $N = 0$, то таблица углов совпадает с DSXE.
&	Признак конца ввода.

Пример файла исходных данных приведен в Приложении.

Порядок строк с 5-ой строки не влияет на порядок вывода блоков сечений в канал 3.

В случае расчетов сечений перезарядки после & необходимо ввести энерговыделение реакции перезарядки. Умолчание при вводе пустой

строки или 0. Ввод 0 означает, что используется энергосвечение реакции перезарядки на нуклоне.

В случае расчетов сечений перезарядки π^0 при вводе строки 1 после символа частицы P10 необходимо ввести знак пиона в конечном состоянии в формат A1 ("+" или "-").

Первый символ строк ввода таблиц углов для дифференциальных сечений — E, N, C, X, или L.

Символы частиц и ядер:

частица	π^+ , π^- , π^0 , K^+ , K^- , K^0 , \bar{K}^0 , K_L^0 , K_S^0 ,
символ	PI+ PI- P10 K+ K- K0 AK0 KL KS
частица	p, n, d, \bar{p} , \bar{n} , α , e^- , e^+ , μ^- , μ^+
символ	P N D AP AN ALFA E- *E+ MU- MU+
ядро	Be, C, O, Na, Al, Fe, Kr, I, Cs, Pb
символ	BE, C, O, NA, AL, FE, KR, I, CS, PB

θ — угол в с.п.м. (в градусах); E — полная энергия частицы в л.с.к. (в ГэВ); p — ее л.с. импульс (в ГэВ/с).

Подробнее символы ядер см. в Help.

При работе программы на терминал (в канал 6) проводится во всех режимах контрольный вывод: частица, ядро, массив начальных энергий или импульсов, названия выводимых в канал 3 таблиц, таблицы введенных углов. В процессе счета выводится кинетическая энергия и импульс, полное сечение процесса (без фиксации конечного состояния ядра), интегральное сечение перехода на основное состояние конечного ядра и дифференциальное сечение этого процесса.

Вывод в канал 3: последовательный файл с длиной записи 22 байта. состоит из блоков интегральных и дифференциальных сечений. Каждый блок интегрального сечения начинается со строки, выводимой по формату ("***", I3, 2X, A1, 3A4), число точек по кинематической переменной, признак кинематической переменной, кодовое слово, символы частицы и ядра. Затем следуют строки по формату (2G11.5), содержащие величины кинематических переменных в ГэВ и сечения в мб.

Каждый блок дифференциальных сечений содержит такую же первую строку, затем следует строка, выводимая по формату (G11, I3), содержащая значение кинематической переменной в ГэВ и N число точек по углу. Далее по формату (2G11.5) выводятся N строк, содержащих значения углов в градусах и дифференциальные сечения в мб в системе центра масс при данной энергии.

Запуск программы

Для запуска SCATTER в ИЯФ СО РАН на ЕС-1061 необходимо подсоединить диск 191 идента D516 и назначить ему моду Z. Затем для диалога можно пользоваться процедурой SCATTERD. Обращение к ней следующее:

SCATTERD Имя, здесь параметр — имя выходного файла канала 3 (расширение FILEOUT). Для пакетного режима можно пользоваться процедурой SCATTER. Обращение к ней следующее:

SCATTER Имя1 Имя2, здесь первый параметр — имя вышеописанного входного файла с расширением IN, а второй — выходных файлов каналов 3 и 6 (расширение FILEOUT и OUT, соответственно).

Командный файл для запуска SCATTER на VAX в VMS следующий:
 \$ ASSIGN DISK\$D1[МАКНОВ]:V3ROOP.FIL FOR004
 \$ ASSIGN Имя1 SY\$INPUT
 \$ ASSIGN Имя2 FOR003
 \$ RUN DISK\$D1[МАКНОВ]:SCATER.EXE.

Параметры Имя1 и Имя2 аналогичны вышеописанным, но могут иметь любые расширения. Командный файл для диалога:
 \$ ASSIGN DISK\$D1[МАКНОВ]:V3ROOP.FIL FOR004
 \$ ASSIGN Имя2 FOR003
 \$ RUN DISK\$D1[МАКНОВ]:SCATER.EXE.

Краткий алгоритм вычислений

В настоящей версии программы выбраны наиболее оптимальные с точки зрения автора модели взаимодействий частиц с ядрами, однако этим не ограничиваются возможности SCATTER.

Последовательность операций в программе следующая:

После заполнения всех параметров, определяющих режимы работы SCATTER по исходным данным, введенным пользователем, следует построение оптического потенциала в микроскопическом подходе, являющемся развитием метода работы [4] (для нуклонов с энергиями больше 100 МэВ, пионов с энергиями больше 70 МэВ и каонов). Для медленных пионов используется феноменологический оптический потенциал типа Кисслингера с рядом поправок [5–7]. Для медленных нуклонов, дейтонов и α -частиц используются феноменологические потенциалы стандартного вида [8]. Затем следует численное решение волнового уравнения. При сшивании полученного решения с кулоновскими функциями за границей ядра определяются диагональные элементы S-матрицы и нормируются

формируются выходные файлы. Возможно сравнение рассчитанных величин с экспериментальными данными с использованием χ^2 -критерия и оптимизация физических параметров задачи.

Область применимости: вышесказанный алгоритм позволяет удовлетворительно воспроизводить экспериментальные величины в указанном выше энергетическом диапазоне. Есть существенные основания предполагать пригодность SCATTER для расчетов рассеяния адронов более высоких энергий в случае введения в него данных о элементарных амплитудах в этой кинематической области.

Структура программы

1. Группа подпрограмм вычисления элементарных частица-нуклонных амплитуд в заданной точке p^{ac} . Возможно использование результатов, приведенных в таблице фазовых анализов:

Группа	Год	Изоспин	Система	Энерг. диапазон
BGRT	1970-1974	1, 0	K^+N	$p^{ac} \leq 1,5$ ГэВ/с
Martin B.R.	1975	0, 1	K^+N	$p^{ac} \leq 1,5$ ГэВ/с
Corden M.J. et al.	1982	0	K^+N	$p^{ac} \leq 1,5$ ГэВ/с
Arndt R.A. et al.	1985	1	K^+p	$p^{ac} \leq 3,0$ ГэВ/с
Gopal G.P. et al.	1977	0, 1	K^-N	$p^{ac} \leq 1,9$ ГэВ/с
RSL	1978	3/2, 1/2	πN	$T^{ac} \leq 400$ МэВ
Arndt R.A.	1985	3/2, 1/2	πN	$T^{ac} \leq 1100$ МэВ
Arndt R.A.	1974	0, 1	NN	$T^{ac} \leq 500$ МэВ
Arndt R.A. et al.	1983	0, 1	NN	$T^{ac} \leq 1050$ МэВ

Блок позволяет: вычислять свободные или усредненные по Ферми-движению в ядре парциальные xN -амплитуды. При усреднении возможно использование распределения по импульсам внутриядерных нуклонов в форме осцилляторных функций ($A \leq 56$), либо для Ферми-газа нулевой температуры. Ферми-усреднение можно производить для амплитуд, t -матриц, или коэффициентов оптического потенциала.

По желанию возможен вывод на печать парциальных t_{ij}^I , и их линейных комбинаций.

Блок состоит: из пяти подпрограмм и BLOCK DATA.

Общий объем: 1370 строк.

2. Группа подпрограмм вычисления параметров частица-ядерного потенциала в заданной точке p^{ac} . Здесь также рассчитываются все кинематические величины, необходимые в программе. Возможно использование либо:

2. Группа подпрограмм вычисления параметров частица-ядерного потенциала в заданной точке p^{ac} . Здесь также рассчитываются все кинематические величины, необходимые в программе. Возможно использование либо:

а) потенциала типа Кисслингера со спин-орбитальным членом для рассеяния адрона x на ядре A на любой угол:

$$\hat{U}_{onm}(r) = \sum_{N=p,n} \left\{ (2\pi\gamma_N/\omega_{xN}) \left[\sum_{i=1}^8 A_i^N \nabla_r^{2i-2} \rho_N(r) A_0^N \hat{\nabla} \rho_N(r) \hat{\nabla} + (2/p^2 r) \sum_{i=1}^7 B_i^N d(\nabla_r^{2i-2} \rho_N(r))/dr \times (\vec{S}, \vec{L}) \right] \right\} + U_C + U_C^{LS} \times (\vec{S}, \vec{L}), \quad (1)$$

где суммирование ведется по протонной и нейтронной плотностям, L — орбитальный момент в с.ц.и. xN , $\rho_N(r)$ — плотность внутриядерных нуклонов N , γ_N — кинематический множитель, ω_{ij} — приведенная энергия, p — импульс в с.ц.и. xN , U_C — кулоновский потенциал в приближении равномерно заряженного шара, величина радиуса которого может быть оптимизирована из условия наименьшего отклонения от потенциала, даваемого зарядовым распределением ядра, отдельным небольшим программным модулем (с объемом 100 строк и типичным временем оптимизации порядка минуты на ЕС-1061).

б) включить в него следующие поправки:

1) учет принципа Паули через усредненный по углам оператор Паули (для NA — рассеяния);

2) учет двухнуклонного поглощения для πA ($\sim \rho^2$);

3) учет Ферми-движения в s -волне (иногда используется для πA);

4) учет Ферми-движения в p -волне (иногда используется для πA), как эффекта отдачи;

5) учет Эриксона — Эриксона-фактора;

6) возможно использование следующих приближений для кинематического множителя (нормирующего) потенциала — сильной связи внутриядерного нуклона, отсутствия связи, формы Кисслингера 1980 г;

7) введение сдвига в энергию в элементарной амплитуде при построении потенциала, как учет влияния поля ядра на элементарное взаимодействие. В этом случае коэффициенты A и B в (1) могут слабо меняться с радиусом.

8) можно учитывать (КМТ-подход), или нет (Ватсон), множитель $(A-1)/A$ в потенциале.

в) Можно оценивать поглощение пионов ядром в приближении, близком работе [5].

г) Можно вводить (из базы данных) параметры оптических потенциалов, в которых не больше четырех различающихся радиальных зависимостей формы Вудса – Саксона, либо двух любых других параметров из имеющихся в SCATTER форм радиальной зависимости потенциала.

Общий вид феноменологического потенциала с двумя различающимися радиальными зависимостями:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{onm}(r) = & \sum_{i=1}^2 \left\{ \sum_{j=1}^8 A_j^i \nabla_r^{2j-2} \rho_i(r) + C_3 Z^i \rho_i + \left[\sum_{j=1}^7 B_j^i d(\nabla_r^{2j-2} \rho_i(r)) / dr + \right. \right. \\ & \left. \left. + U_c^{SL}(\vec{S}, \vec{L}) / r \right\} + \left(\sum_{i=1}^2 A_0^i C_4^i \rho_1(r) \right) \times \left(1 + \sum_{i=1}^2 A_0^i \rho_i(r) \right)^{-1} + C_1 (N \rho_1(r) + \\ & + Z \rho_2(r))^2 + \hat{\nabla} f(r) \hat{\nabla} + U_c; \quad Z^1 = N = A - Z; \quad Z^2 = Z; \quad (2) \\ f(r) = & \frac{\left\{ \sum_{i=1}^2 A_0^i \rho_i(r) + C_2 (N \rho_1(r) + Z \rho_2(r))^2 \right\}}{\left[1 + C_5 \left\{ \sum_{i=1}^2 A_0^i \rho_i(r) + C_2 (N \rho_1(r) + Z \rho_2(r))^2 \right\} \right]} \end{aligned}$$

Общий вид феноменологического потенциала с четырьмя различающимися радиальными зависимостями Вудса – Саксона:

$$\begin{aligned} U_{onm}(r) = & U_c(r) - V f_v(r) - i [W_V f_W(r) - 4a_W W_S d(f_W(r)) / dr] + \\ & + V_{LS} M_\pi^2(\vec{S}\vec{L}) / rd(f_{LS}(r)) / dr + V_{ILS} M_\pi^2(\vec{S}\vec{L}) / rd(f_{ILS}(r)) / dr, \\ f_i(r) = & (1 + \exp[(r - c_i) / a_i]). \end{aligned}$$

д) В SCATTER включены три параметризации параметров потенциала (3) для дейтон-ядерного рассеяния при $T_d^{nc} \leq 100$ МэВ и $A \geq 10$: два релятивистских потенциала DVC 79 и один BMNORT 88, а также 8 параметризаций параметров NA-потенциалов, полученных с 60-ых по 90-ые годы.

По желанию возможен вывод на печать параметров потенциала и кинематических переменных.

Возможны модификации используемых потенциалов без изменения текста основной программы за счет использования базы данных по плотностям и потенциалам.

Блок состоит: из четырех подпрограмм.

Общий объем: 900 строк.

3. Группа подпрограмм вычисления парциальных искаженных волновых функций (ПВФ), элементов S-матрицы частица-ядерного взаимодействия.

Эта группа подпрограмм решает волновые уравнения в заданном потенциале одновременно для всех используемых ПВФ слева направо (с ростом радиуса) методом Рунге–Кутты четвертого порядка. В зависимости от входных параметров решается либо нерелятивистское уравнение Шредингера, либо уравнение Шредингера с релятивистской кинематикой, либо различные приближения уравнения Клейна–Гордона (для полей скалярных мезонов). В волновом уравнении возможно использование приближения приведенной энергии, либо бесконечной массы ядра. Граничные условия ставятся на левой границе интервала, которая для конкретной ПВФ может смещаться вправо с ростом l . При постановке начальных условий предполагается слабое изменение ядерного потенциала при $r \sim 0$. Используются функции Бесселя в комплексной плоскости. Решение уравнений может проводиться либо при автоматическом контроле сходимости с равномерным увеличением относительной погрешности вычисляемых ПВФ с ростом r (контроль при уменьшении шага интегрирования в 2 раза), либо с заданным шагом интегрирования.

Возможно использование следующих радиальных зависимостей $\rho(r)$:

а) модифицированное двухпараметрическое осцилляторное распределение

$$\rho = \rho_0 (1 + \omega(r/c)^2) \exp(-(r/c)^2);$$

б) трехпараметрическое распределение Ферми

$$\rho = \rho_0 (1 + \omega(r/c)^2) / [1 + \exp((r - c)/a)];$$

в) экспоненциальная зависимость $\rho = \rho_0 \exp(-r/a)$;

г) прямоугольная плотность;

д) трапециевидальное распределение;

е) осцилляторное распределение для ядер $1p-2s$ и $1d-2s$ подболочек;

ж) распределение Вудса – Саксона,

з) модифицированное распределение Гаусса (трехпараметрическое)

$$\rho = \rho_0 (1 + \omega(r/c)^2) / [1 + \exp((r^2 - c^2)/a^2)];$$

и) для дейтона: плотности, даваемые формфакторами Хюльтена и Гартенхауза – Моравчика.

Плотности и их производные до пятнадцатой включительно вычисляются по аналитическим выражениям.

к) возможно использование таблично-заданных плотностей, хотя точность численного дифференцирования по таблицам не высока на границах интервала табулирования.

Параметры распределения протонов в ядре в форме а) — ж) вычисляются с использованием литературных данных по зарядовым распределениям. Возможна либо оптимизация этих параметров из условия наименьшего отклонения вычисленного с их использованием зарядового распределения от известного из литературы отдельным небольшим программным модулем (с объемом 420 строк и типичным временем оптимизации в несколько минут на ЕС-1061); либо, для случаев в) и д), оценка единственного параметра этих распределений через среднеквадратичные зарядовые радиусы ядра, протона и нейтрона.

Параметры распределения центров нейтронов в ядре либо полагаются равными протонным, либо берутся из литературы, либо оптимизируются из условия наилучшего (в смысле χ^2) согласия с экспериментальными данными по дифференциальным сечениям упругого рассеяния, полным сечениям и сечениям реакции K^+ - или p - A -взаимодействий в одной или сразу нескольких энергетических точках (их число ≤ 20).

Сведения по нуклонным плотностям для любого ядра могут быть занесены в базу данных без изменения текста основной программы.

За границей ядра производится сшивание полученного решения с кулоновскими функциями, генерируемыми подпрограммой, взятой из [9], и несколько модифицированной. Она вычисляет нерелятивистские кулоновские функции, однако при больших радиусах, при которых производится сшивание, различия релятивистского и нерелятивистского уравнений для кулоновских функций малы. Вычисление кулоновского параметра η производится в приближениях, описанных выше для волнового уравнения. Точка сшивания задается либо по отношению $|U_{ядерн}/U_c|$, либо явно. При сшивании определяются парциальные диагональные элементы S -матрицы и происходит нормирование полученных ПИВФ (асимптотика при $U=0$ $\psi = \exp(i\vec{k}\vec{r})$).

По желанию возможен вывод на печать общих параметров задачи (коэффициенты потенциала, плотности и параметры, задающие режимы работы), поставленных начальных условий, нормировочных коэффициентов и точки сшивания, S -матричных элементов, ПИВФ и их производных, радиальных зависимостей некоторых компонент оптического потенциала.

Блок состоит: из семи подпрограмм.

Общий объем: 1360 строк.

4. Группа подпрограмм вычисления сечений и поляризационных характеристик.

По S -матричным элементам вычисляет интегральное сечение упругого рассеяния и полное сечение xA -взаимодействия; дифференциальные сечения упругого рассеяния: $d\sigma/d\Omega_{cm}$, $d\sigma/d\Omega_{lc}$, $d\sigma/dt$, $d\sigma/d\sigma_{Ruth}$ в точках угла θ , заданных в с.ц.и или л.с., либо по точкам t (таблицей с постоянным либо произвольным шагом).

Для случая спина $1/2$ вычисляются поляризация и некоторые другие поляризационные характеристики. Возможен вывод $d\sigma/d\Omega_{cm}$ ($\mu_x, \mu_A, \mu'_x, \mu'_A$) для всех возможных комбинаций $\mu_x, \mu_A, \mu'_x, \mu'_A$, а также интегральных сечений определенных спиновых конфигураций при любых спинах. Возможен вывод полных амплитуд для данного угла и проинтегрированного от заданного минимального угла с заданной точностью $d\sigma/d\Omega_{cm}$ с учетом кулоновского рассеяния.

Возможно сравнение рассчитанных величин с введенными из базы данных экспериментальными данными с использованием χ^2 -критерия.

Блок состоит: из десяти подпрограмм.

Общий объем: 620 строк.

5. Группа подпрограмм оптимизации.

Осуществляет оптимизацию любых непрерывно-меняющихся физических параметров задачи (не параметров математических методов) из условия наилучшего (в смысле χ^2) согласия с экспериментальными данными по дифференциальным сечениям упругого рассеяния, полным сечениям и сечениям реакции K^+ - или p - A -взаимодействий в одной или сразу нескольких энергетических точках (их число ≤ 20). Используется метод покоординатного спуска с заданным шагом. Размерность оптимизации ≤ 10 .

Блок состоит: из двух подпрограмм.

Общий объем: 135 строк.

6. Подпрограмма выбора режима работы заполняет все значения по умолчанию, определяет параметры математических методов, используемых в ПК, и производит поиск в базе данных и заполнение значений параметров феноменологического потенциала.

Объем: 385 строк.

7. В головной программе производится ввод исходных данных и контрольный вывод, формируются режимы работы групп 1–5, а также может производиться вывод в файл прямого доступа сложной организации в различные подфайлы следующей информации — энергетических зависимостей (таблицы с числом точек ≤ 20): S -матричных элементов;

потенциал; ПИВФ; результата действия ОП на ПИВФ (необходим для вычисления наполовину внемассовых πA -амплитуд, используемых в трехчастичных реакциях). Возможен также вывод инвариантных парциальных πA -амплитуд в отдельный файл прямого доступа.

Объем: 1700 строк.

8. Группа подпрограмм математического обеспечения.

Включает 75 различных подпрограмм, вычисляющие некоторые спец. функции; функции угловых моментов; производящие преобразования пал векторами и матрицами; подпрограммы интерполирования и некоторые другие (в частности подпрограммы построения грубых точечных графиков на АЦПУ ЕС ЭВМ). Используются в группах 1-5.

Общий объем: 1765 строк.

Тестирование блоков программы

Группа 1 тестировалась построением диаграмм Аргана и сравнением их с опубликованными авторами использованных здесь фазовых анализов. Группа 2 не имеет четких тестовых критериев, однако близость ее вычислений к результатам других программ для πA -рассеяния, а также сравнительная простота используемого математического аппарата дают основания считать ее вычисления правильными.

Группа 3 и группа 4 проходили проверки с использованием тестов из [1, 10]. Результаты тестов в депонированных статьях [11, 12].

Группа 5 проходила тестирование путем сравнения путей оптимизации одной и той же задачи, полученных тестируемой и более простой, написанной независимо от тестируемой специально для проверки, подпрограммами.

Головная программа и подпрограмма 6 проходили контроль всех возможных режимов их работы.

Головная программа проходила контроль ввода-вывода в файлы прямого доступа путем просмотра выведенных данных при различных стартовых условиях (различное положение контрольной точки).

Группа 8. Все программы мат. обеспечения проходили тестовые проверки. Для спец. функций — по имеющимся таблицам, для подпрограмм кулоновских функций — по опубликованному тесту. Все простейшие математические подпрограммы, выполняющих операции с векторами, матрицами, интерполирование и другие операции тестировались по задачам с известными результатами.

Все эти тесты позволили сделать заключение об отсутствии в комплексе программ серьезных ошибок, заметно влияющих на конечные результаты проводимых им вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eisenstein R.A., Miller G.A. //Comp. Phys. Comm. 1974, v.8, p.130.
2. Бердников Я.А., Махов А.М., Остроумов В.И. //ЯФ, 1989, т.49, с.995.
3. Бердников Я.А., Махов А.М. //ЯФ, 1990, т.51, с.910.
4. Бердников Я.А., Махов А.М. //ЯФ, 1990, т.52, с.1372.
5. Stricker K. et al. //Phys. Rev., 1979, v.C19, p.992.
6. Cottingham W.B., Holtcamp D.B. //Phys. Rev. Lett., 1980, v.45, p.1828.
7. Gill D.K. et al. //Phys. Rev., 1982, v.C26, p.1306.
8. Perey C.M., Perey F.G. //ADNDT, 1976, v.17, p.1.
9. Barrett //Comp. Phys. Comm., 1974.
10. Eisenstein R.A., Miller G.A. //Comp. Phys. Comm., 1976, v.11, p.95.
11. Бердников Я.А., Махов А.М. Упругое рассеяние K^+ -мезонов на ядрах в оптической модели. Программа расчета. Деп. в ВИНИТИ 2.04.86, N2273-B86. Л., 1986, 36 с.
12. Бердников Я.А., Махов А.М., Остроумов В.И. Неупругое рассеяние положительных каонов промежуточных энергий на ядрах. Программа расчета. Деп. в ВИНИТИ 18.11.86, N7831-B86. Л., 1986, 23 с.

Результаты сравнения расчетов с экспериментом

Некоторые результаты, полученные с использованием версии 3.2 программы SCATTER, сравниваются с экспериментами разных авторов на рисунках 1 - 8.

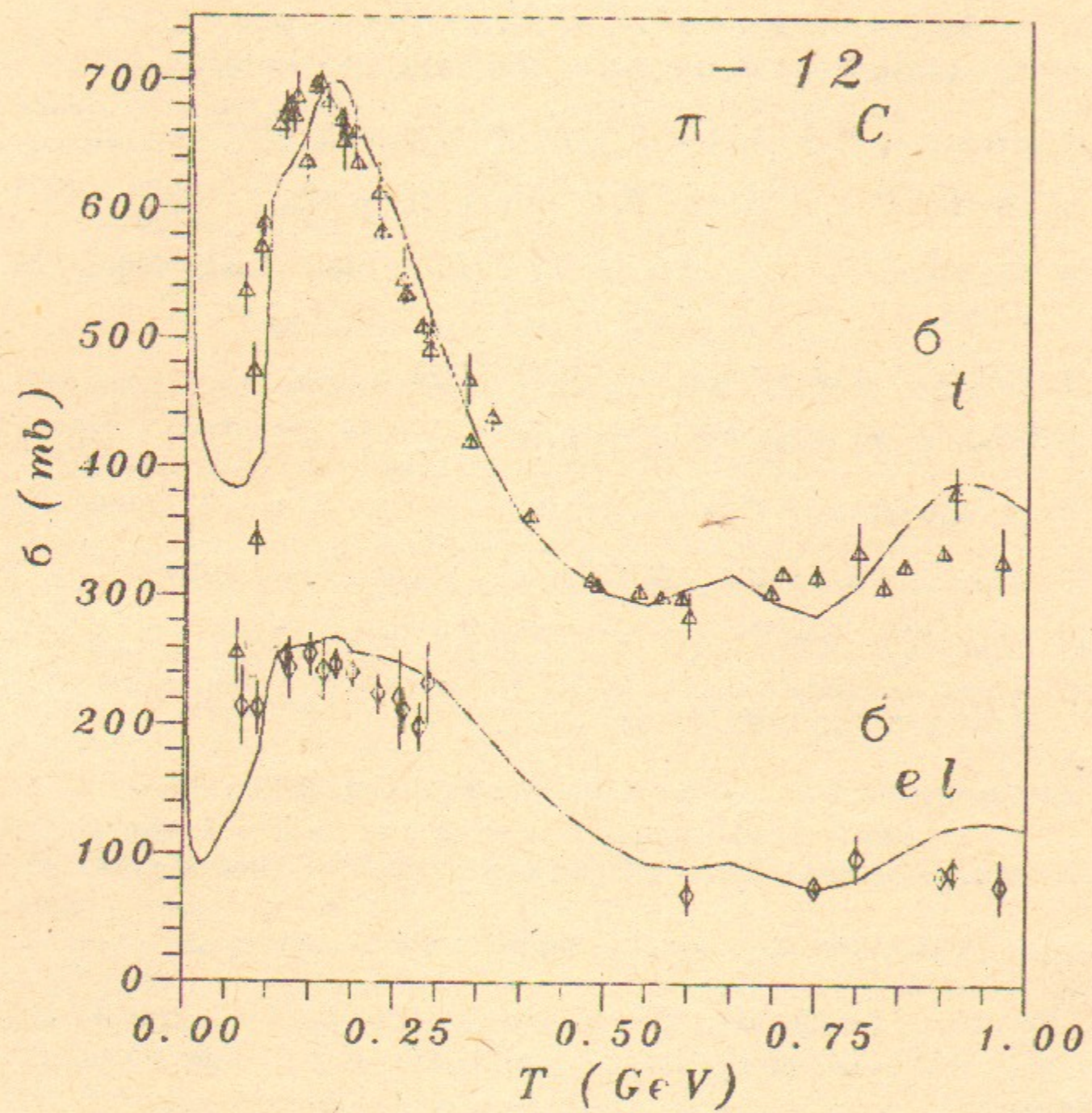


Рис. 1. $\pi^- \quad {}^{12}\text{C}$ -взаимодействие. Δ — σ_t ; \diamond — σ_{el} ; линии — расчет.

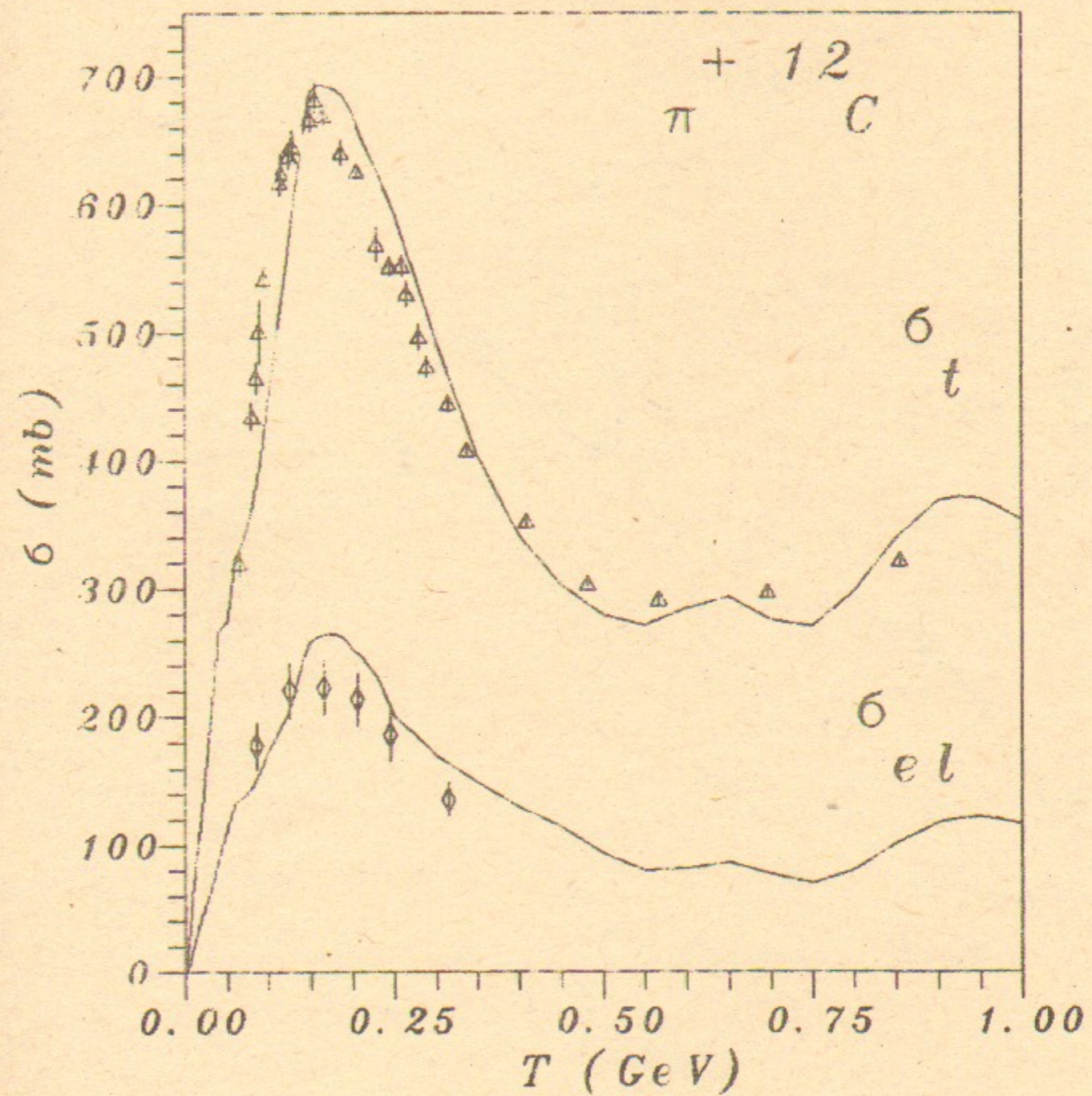


Рис. 2. $\pi^+ \quad {}^{12}\text{C}$ -взаимодействие. Δ — σ_t ; \diamond — σ_{el} ; линии — расчет.

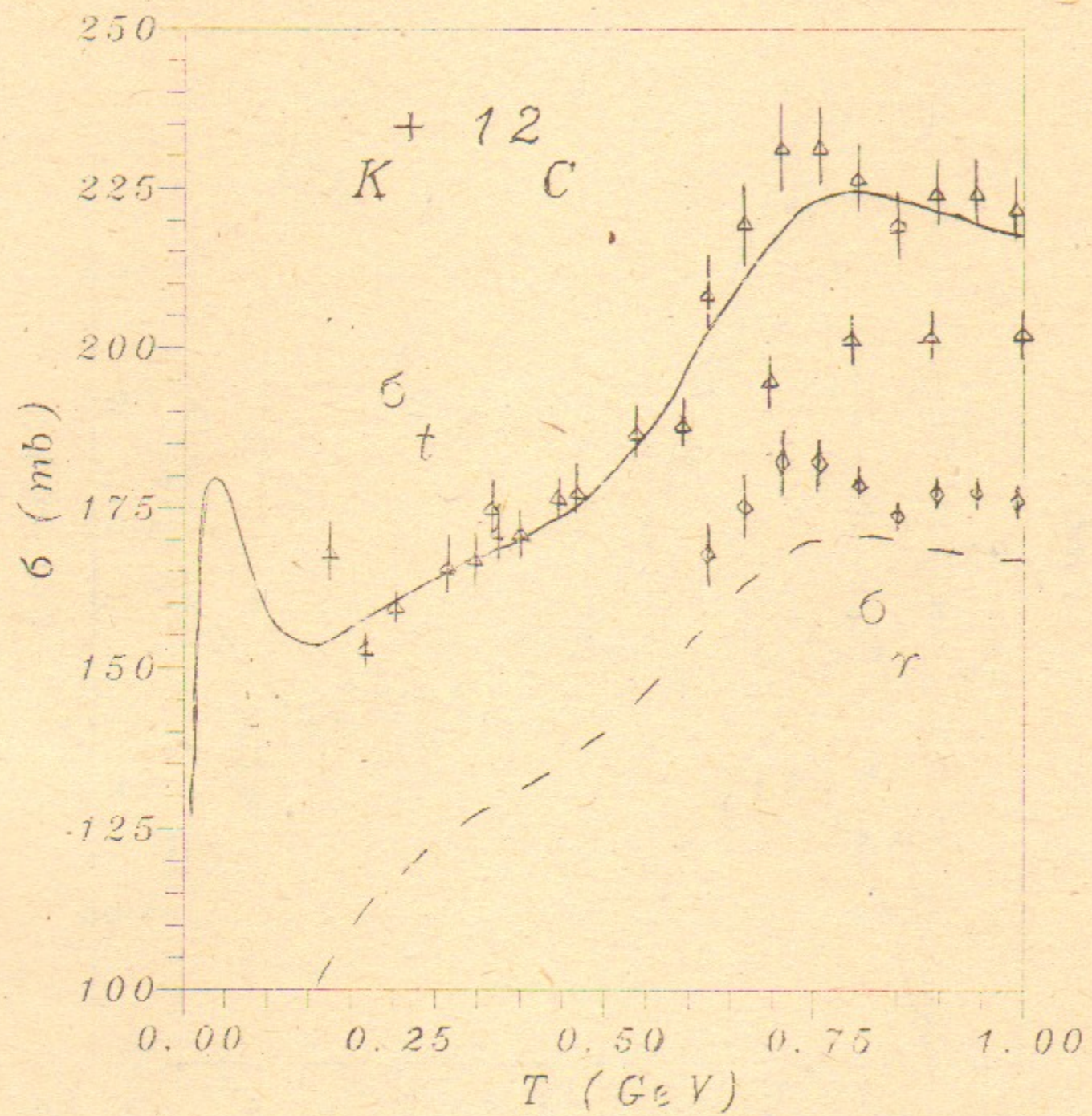


Рис. 3. $K^+ {}^{12}C$ -взаимодействие. $\Delta - \sigma_t$; $\diamond - \sigma_r$ (сумма всех неупругих каналов); линии — расчет.

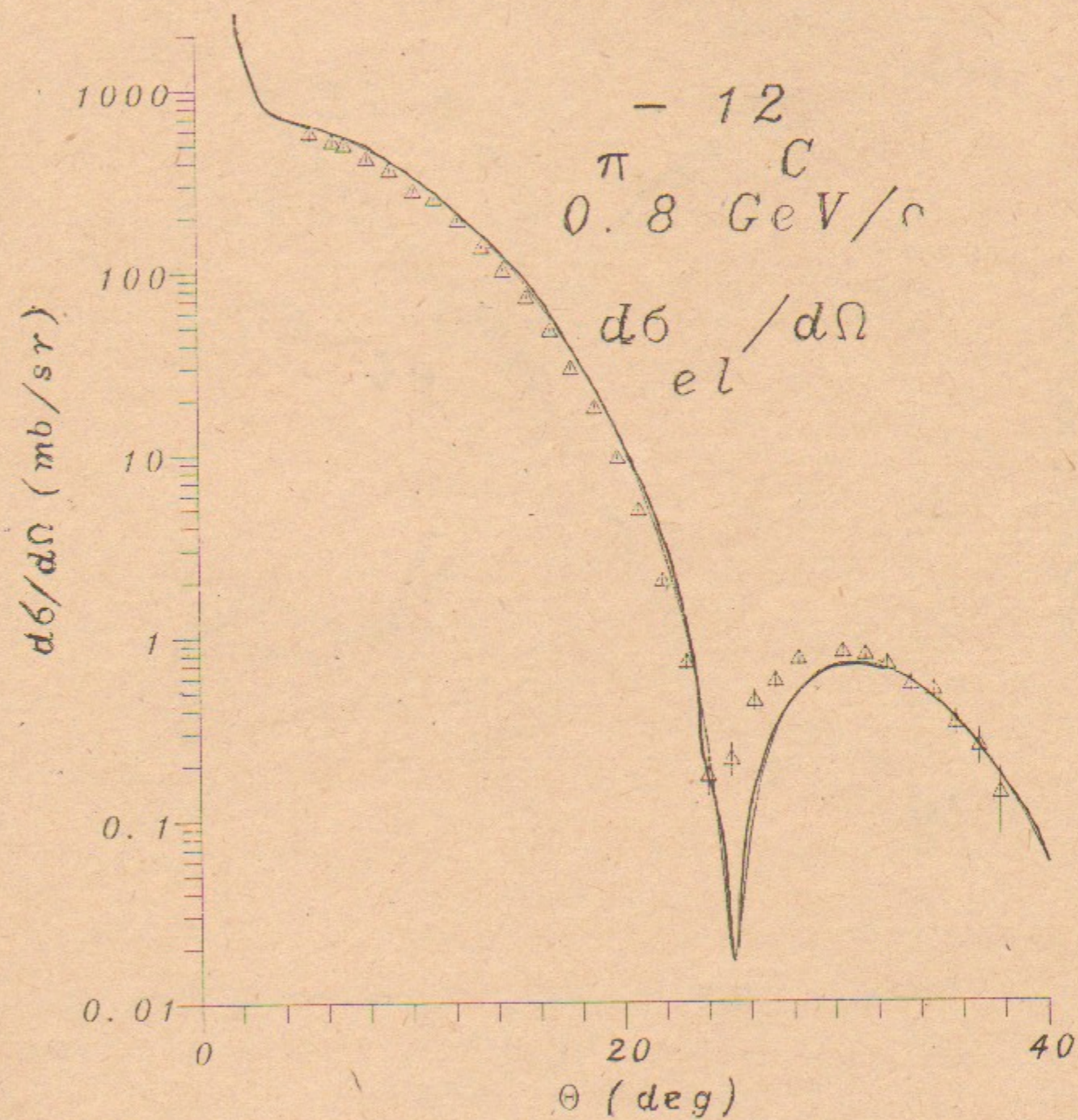


Рис. 4. $\pi^- {}^{12}C$ — упругое рассеяние при импульсе 0,8 ГэВ/с; линия — расчет.

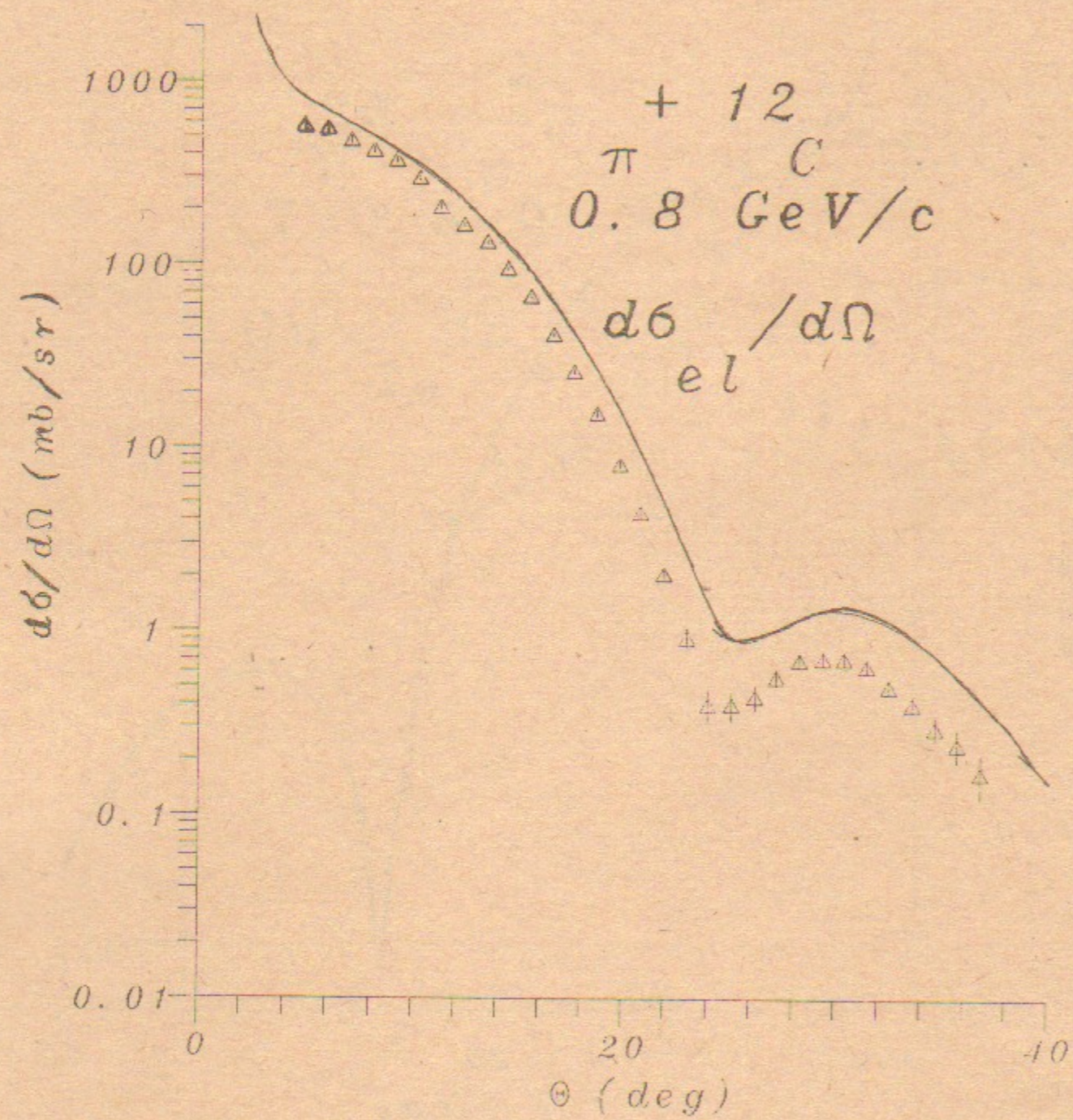


Рис. 5. $\pi^+ {}^{12}C$ — упругое рассеяние при импульсе 0,8 ГэВ/с; линия — расчет.

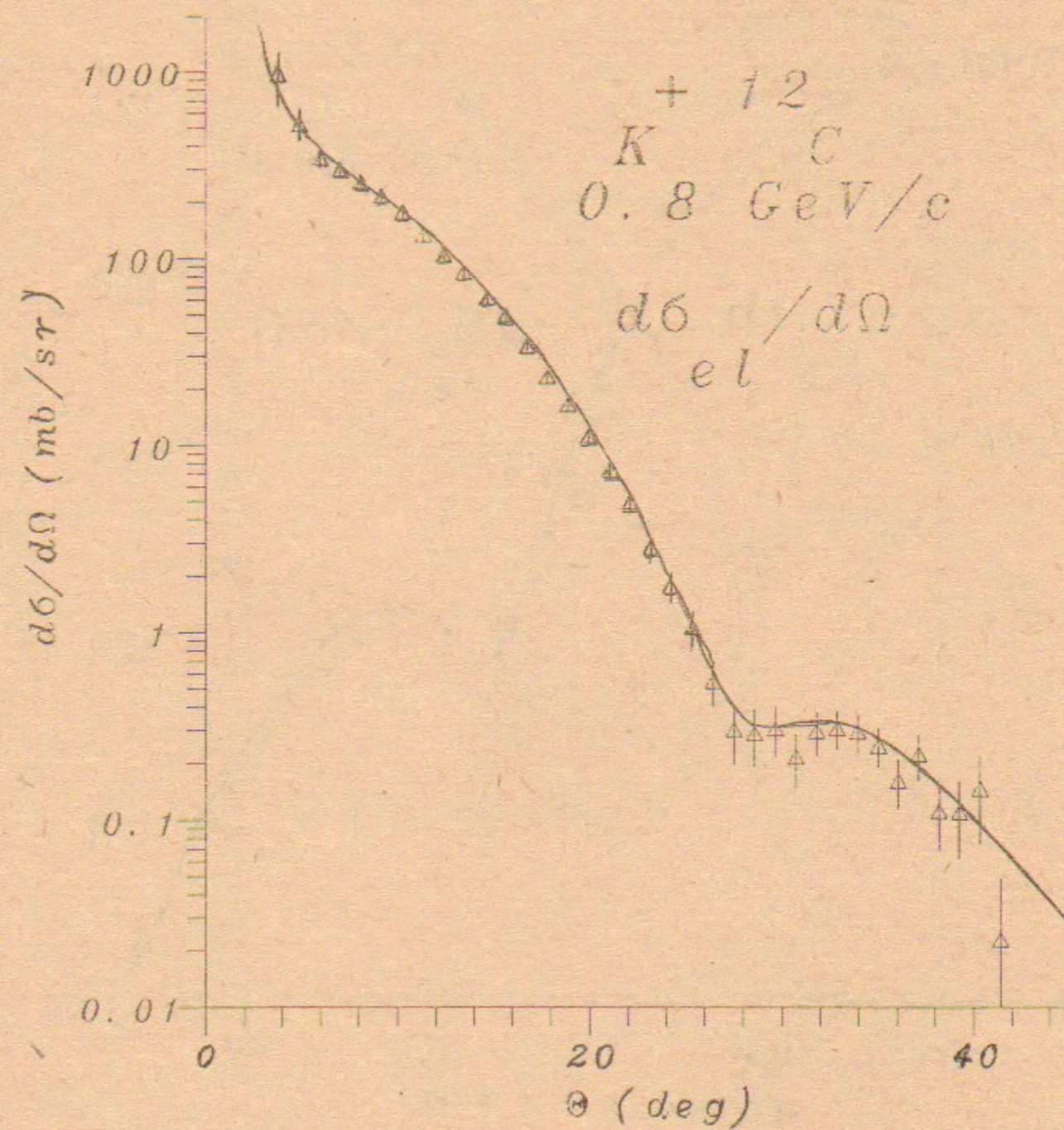


Рис. 6. $K^+ {}^{12}C$ — упругое рассеяние при импульсе 0,8 ГэВ/с; линия — расчет.

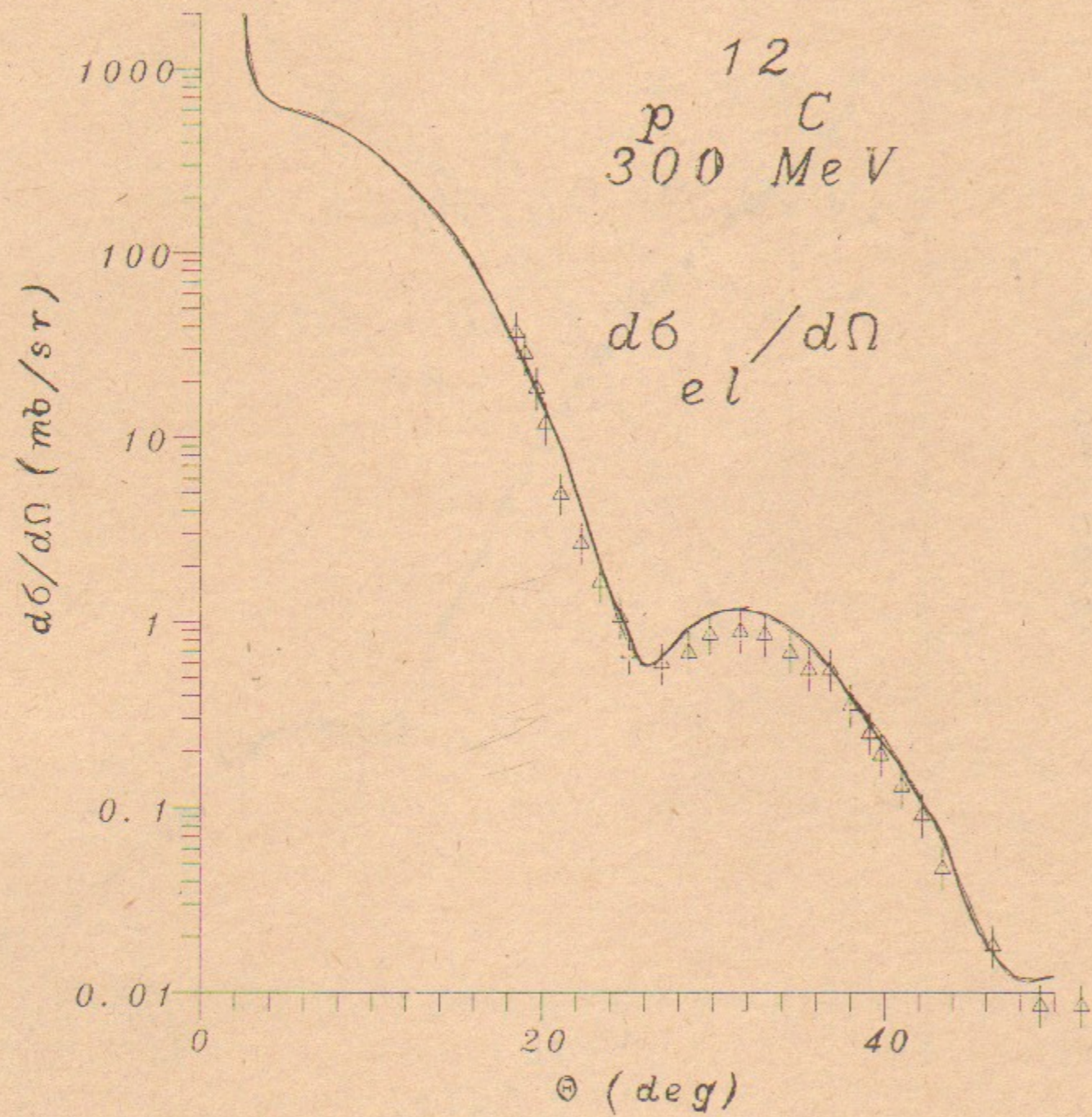


Рис. 7. p ^{12}C — упругое рассеяние при кин. энергии p 300 МэВ; линия — расчет.

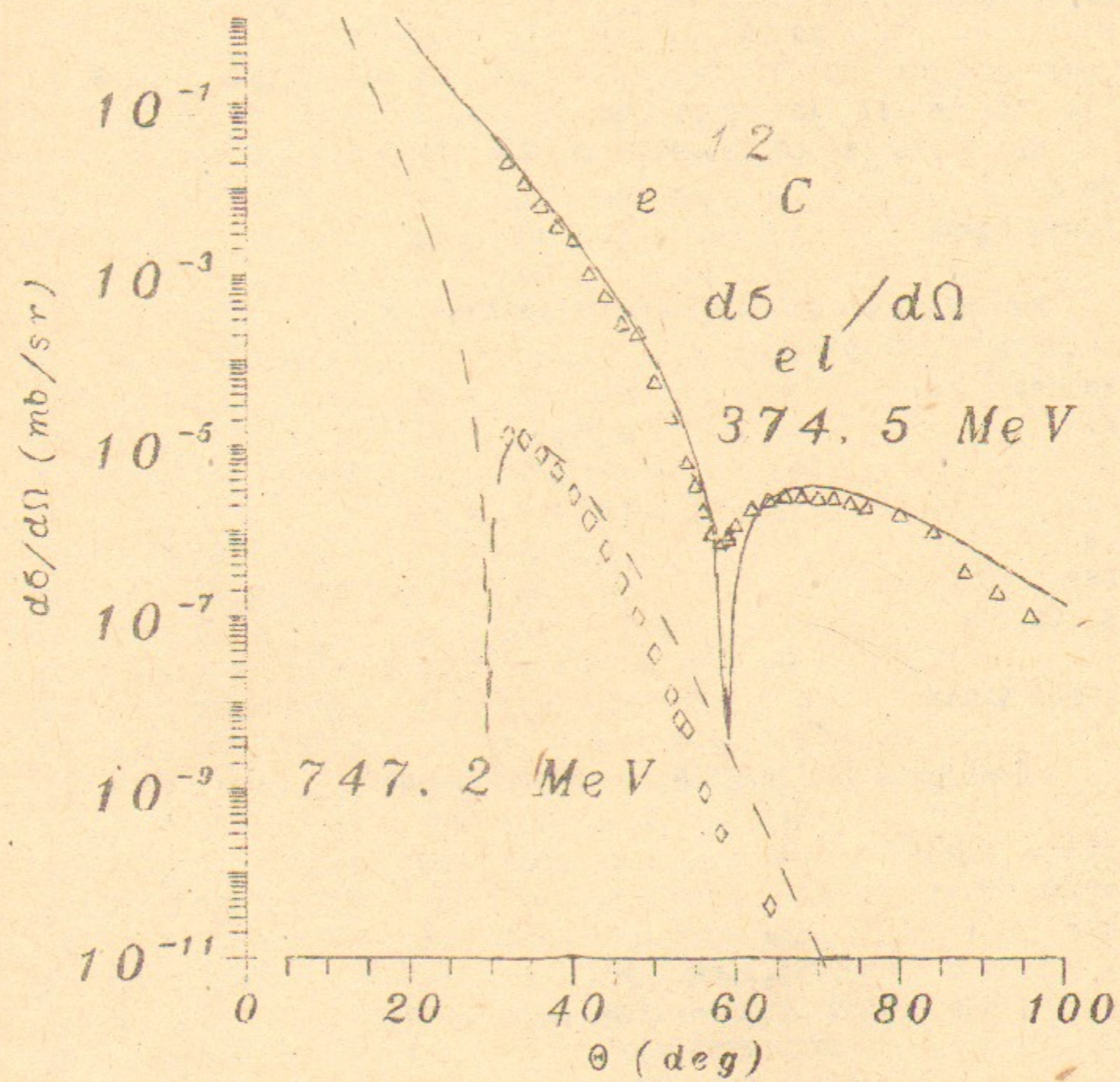


Рис. 8. Упругое рассеяние e^- на ^{12}C . Точки — эксперимент; линия — расчет.

Приложение

Вид входного файла пакетного режима для расчета кривых
рис.3:

Начало файла K+
C ! 12 T42
.001 .005 .01 .02 .03 .04 .05 .06 .07 .08 .09 .1 .11 .12 .13
.14 .15 .16 .17 .18 .19 .2 .21 .23 .25 .3 .35 .4 .45 .5 .55
.6 .65 .7 .75 .8 .85 .9 .925 .95 .975 .9999 ST
SE &
Конец файла

Вид входного файла пакетного режима для
расчета кривой рис.6:

Начало файла
K+
C ! 12
1
.8
DSE -201
E .25 .25
&
Конец файла

Примерный вид файла базы данных канала 4:

Начало файла
NZPOL 134<
RO! ! ! ! ! ! ! ! ! !
H 9 9 .9382723.2396.2396 1.07
H 1 9 9 .9382723.2396.2396 1.07
P1 9 9 .9382723.2396.2396 1.07
P1 1 9 9 .9382723.2396.2396 1.07
NO 9 9 .9395656.2396.2396 1.07
NO 1 9 9 .9395656.2396.2396 1.07
D 1111 1.875628 .4643.46373.8023.798 2.05 2.5 1.59
D 21111 1.875628 .4643.46373.8023.798 2.05 2.5 1.59
HE 4 3 3 3.727410 .327 .327 1.01 1.01 1.8 .445 .445
HE 3 3 .327 .327 1.01 1.01 1.8 .445 .445
BE 9-1-1 8.392818 1.39 1.38 2.72

BE -1-1 1.39 1.38 2.72
C 12 0 011.174953 .73 2.41 1.45 1.53 2.81
C 13 1 112.109580 1.5921.592 2.90
C 0 0 .73 2.41 1.45 1.53 2.81
O 16131314.895201 .0 .0 1.7261.726 3.3
O 16 1 114.895201 .0 .0 1.7261.726 3.3
O 1 1 .0 .0 1.7261.726 3.3
NA 23141421.409386 1.2311.2311.8051.805 3.7
NA 1414 1.2311.2311.8051.805 3.7
AL 27141425.126705 .7003.70031.7891.789 3.9
AL 1414 .7003.70031.7891.789 3.9
CA 40 2 237.214996 .43 .48 3.48 3.58 4.12
CA 2 2 .49 . 3.59
TI 2 2 .52 . 3.77
FE 54 2 250.231552 .5 .5 4.204 4.01 4.77
FE 56 2 252.090202 .56 .564.032 3.97 4.88
FE 57 2 253.022129 .56 .564.096 3.97 4.88
FE 58 2 253.951660 .54 .544.221 4.03 4.88
FE 2 2 .51 .514.237 4.05 4.83
CU 63 2 258.604206 .55 . 4.23
CU 65 2 260.465523 .56 . 4.26
CU 2 2 .47 . 4.01
GE 70 4 465.118195 2.5522.5524.4304.4305.110
KR 78 2 272.564583 .499 .4995.0514.6075.274
KR 80 2 274.423836 .501 .5015.0984.6495.313
KR 82 2 276.284142 .502 .5025.1454.6915.35
KR 83 2 277.216255 .502 .5025.1684.7115.369
KR 84 2 278.145309 .503 .5035.1914.7325.387
KR 86 2 280.007469 .504 .5045.2374.7725.423
KR 2 2 .503 .5035.1894.7305.385
ZR 90 2 283.725937 .37 .375.7364.95 5.355
ZR 90 4 483.725937 2.5282.5284.4344.4345.355 .35 .35
ZR 2 2
I 127 2 2118.184639 .48 .486.204 5.636.134
I 2 2 .48 .486.204 5.636.134
CS 133 2 2123.773521 .48 .486.328 5.716.205
CS 2 2 .48 .486.328 5.716.205
PB 204 2 2189.895465 .49 .497.474 6.637.020
PB 206 2 2191.758876 .49 .497.449 6.657.037
PB 207 2 2192.691071 .48 .487.536 6.667.037

PB 208 2 2193.622759	.50	.507.510	6.657.046
PB 2 2	.46	.467.565	6.707.054
OP			
P C 12			
OP .0121			
57.8	-32.6		-26.
1.3			
.248	.223	.248	
1.25	1.4	1.25	
OP .0216			
47.6	5.76		-30.4
1.3			
.517	.7	.5	
1.2	1.4	1.05	
OP .040			
39.3	6.23		-21.5
1.3			
.61	.69	.65	
1.2	1.4	1.0	
OP .0614			
32.8	7.54		-22.5
1.3			
.62	.67	.5	
1.2	1.4	.9	
OP .096			
23.	9.		-23.3
1.3			
.635	.655	.5	
1.2	1.35	.9	
OP .122			
18.3	10.6		-18.3
1.3			
.65	.64	.5	
1.2	1.3	.9	
OP .135			
16.2	11.1		-17.8
1.3			
.66	.63	.5	
1.2	1.28	.9	
OP .183			

12.5	13.1	-16.4
1.3		
.68	.61	.47
1.2	1.2	.9
ALFA C 12		
OP .00876		
144.5	.03	
1.7		
.38	.38	
1.74	1.74	
OP .0121		
150.	1.5	
1.4		
.5	.5	
2.07	2.07	
OP .018		
159.	6.16	
1.2		
.709	.709	
1.54	1.54	
OP .041		
199.1	42.17	
1.25		
.65	.65	
1.262	1.262	
OP .056		
151.9	28.05	
1.4		
.665	.64	
1.24	1.24	
OP .104		
74.21	30.23	
1.43		
.692	.692	
1.433	1.433	
OP .166		
85.	17.7	
1.3		
.7	.52	
1.34	1.77	

&

конец файла

В приведенном файле по формату (A2) вводится признак начала данных по нуклонной плотности "RO" и признак начала данных по оптическим потенциалам "OP". Данные по нуклонной плотности вводятся по формату (A2, I4, 2I2, F10, 8F5). Данные по оптическим потенциалам начинаются с ввода символов частицы, ядра и массового числа (A4, A2, I3), затем следует кинетическая энергия частиц в ГэВ ("OP", F10), далее феноменологические параметры по формату (5F10).

Порядок следования данных по распределениям ядерной плотности: символ элемента (общепринятый, но все буквы заглавные), массовое число, помера распределения плотности ρ_n, ρ_p . Масса ядра в ГэВ, параметры: $a_n, a_p, c_n, c_p, R_c, \omega_n, \omega_p$. Соответствие номера распределения плотности и видами радиальной зависимости, описанными ниже и помеченными буквами следующее: порядок следования параметров оптического потенциала (3): $V, W_v, W_s, V_{LS}, W_{ILS}; R_c$ — радиус кулоновского потенциала в форме равномерно-заряженного шара; $a_v, a_s, a_{LS}, a_{ILS}; c_v, c_s, c_{LS}, c_{ILS}$.

А.М. Махов

SCATTER — программа вычисления сечений взаимодействия адронов и лептонов с ядрами

ИЯФ 92-66

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 3 сентября 1992 г.

Подписано в печать 04.09.1992 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2,2 печ.л., 1,8 уч.-изд.л.

Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ N 66

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.