



УДК 539.172.3:539.17.02

**А. Н. ТИХОНОВ, В. Г. ШЕВЧЕНКО, В. Я. ГАЛКИН, Б. И. ГОРЯЧЕВ,
П. Н. ЗАЙКИН, Б. С. ИШХАНОВ, И. М. КАПИТОНОВ**

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СЕЧЕНИЙ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

В статье описана действующая система автоматизации обработки экспериментальных данных для определения сечений фотоядерных реакций на 35 Мэв бетатроне НИИЯФ МГУ. Электронноматематическая система предусматривает полную автоматизацию обработки экспериментальных данных, накопленных в анализаторе вплоть до получения сечения фотоядерной реакции. Приводится ряд конкретных результатов обработки экспериментов на ЭВМ, реализованных по данной системе.

Типичной особенностью современного физического эксперимента является анализ результатов большого количества единичных измерений. В настоящее время достигнуты большие успехи в области автоматизации проведения эксперимента, и это позволяет получить необходимые объемы первичных материалов. Узким местом является обработка этих материалов, которая, как правило, лишь частично автоматизирована.

Возможно создание существенно различных систем обработки наблюдений в зависимости от математических алгоритмов, положенных в основу решения. При этом различные системы могут давать существенно различные точности выходных результатов. Одной из основных проблем теории обработки физических экспериментов является создание таких методов решения обратных задач, которые в качестве результата дают максимум устойчивой информации об изучаемом явлении.

Методика проведения эксперимента. Первичная обработка информации

Схема проведения эксперимента по изучению сечений фотонейтронных реакций приведена на рис. 1. Тормозное γ -излучение, образующееся на мишени бетатрона, пройдя через коллиматор, падает на экспериментальную установку. Нейтроны из исследуемого вещества регистрируются нейтронным детектором. Нейтронный детектор представляет собой сферу, внутри которой радиально расположено 80 BF₃-счетчиков. Замедлителем является парафин.

Измерительная аппаратура работает в полностью автоматическом режиме и подробно описана в [1]. Кривая выхода обычно измерялась с шагом 100 Кэв при 256 фиксированных значениях энергии от 7,5 до 33,0 Мэв. Импульсы со всех нейтронных счетчиков суммируются и накапливаются в памяти амплитудного анализатора.

Поступая в память ЭВМ, числовая информация предварительно подвергается дешифровке с кода анализатора в числовой код машины. Экспериментальные данные в первой части системы обрабатываются методом математической статистики. В первом блоке использование

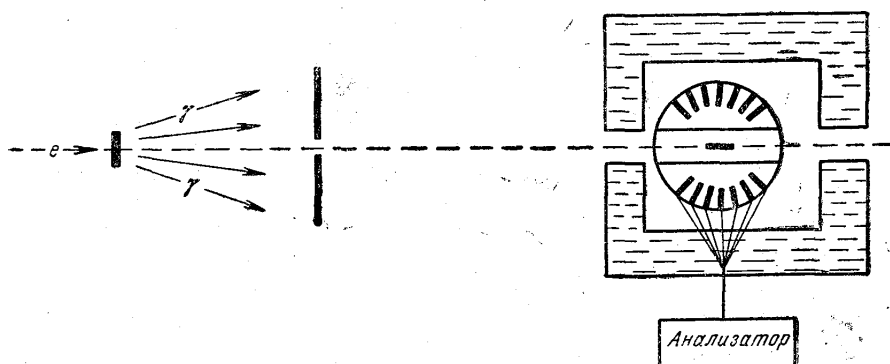


Рис. 1. Схема проведения эксперимента по изучению сечений фотонейтронных реакций

пуассоновского распределения и критерия статистических ошибок β позволяет выявить искажения информации, обусловленные случайными сбоями аппаратуры. Применение затем критерия соответствия f^2 помогает обнаружить и исключить влияние возмущений в выходных данных эксперимента, связанных с дрейфом параметров физической аппаратуры. Следующий блок системы обрабатывает данные эксперимента с целью учета влияния фона, дозирования, типа эксперимента, чувствительности аппаратуры, поправки на толщину мишени и т. д. В первой части системы производится также оценка дисперсии кривой выхода реакции.

Следует отметить, что ручная статистическая обработка числового материала, полученного в результате проведения одного эксперимента, занимает 50—70 дней, а реализованная система сокращает время первичной обработки до одного часа. Это показывает, что ЭВМ должна стать неотъемлемой частью физического эксперимента подобного типа. Кроме того, при ручной обработке точность определения кривой выхода, а следовательно и сечения реакции, оказывается ниже той точности, которую позволяют получить машинные методы. И это имеет принципиальное значение.

Устойчивый метод определения сечения фотоядерной реакции

Так как поток γ -квантов является не монохроматическим, а представляет собой тормозное γ -излучение, то в результате эксперимента определяется не непосредственно сечение реакции, а кривая выхода $Y(T)$. Кривая выхода и сечение фотоядерной реакции $\sigma(k)$ связаны между собой соотношением

$$Y(T) = \eta \int_{k_{\text{порог}}}^{k_{\text{макс}}(T)} W(k, T) \sigma(k) dk, \quad (1)$$

где η — нормировочная константа, а ядро интегрального уравнения $W(k, T)$ есть функция, описывающая тормозной спектр γ -квантов.

В приведенных ниже примерах численной реализации по излагаемой системе для функции W использовано приближение, полученное

Шиффом [2]. (Система позволяет применять также приближение для ядра W , заданное таблично.)

Таким образом, для определения сечения фотоядерной реакции необходимо найти решение интегрального уравнения (1). Проблемы, возникающие при этом, приводят к необходимости разработки устойчивых методов решения этой типичной некорректно поставленной задачи.

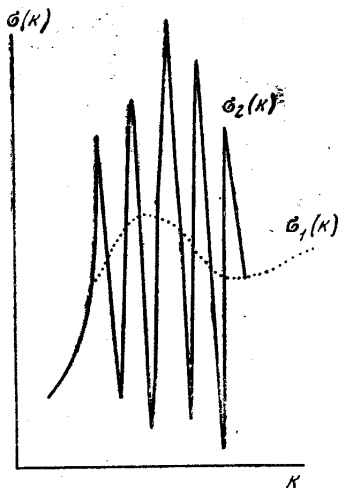


Рис. 2. Неустойчивость прямых методов решения основного интегрального уравнения. $Y(T) = \alpha \int W(k, T) \sigma(k) dk$, $T = \{T_0, T_1, \dots, T_m\}$, $k = \{k_0, k_1, \dots, k_n\}$,

$$Y_i \sim Y(T_i); \sigma_j \sim \sigma(k_j); Y_i = \sum_{j=0}^n a_{ij} \sigma_j;$$

$$(i = 1, \dots, m), a_{ij} = W(k_j T_i) \lambda_j$$

(λ_j — квадратный коэффициент)

Часто возможным путем решения уравнения типа (1) считают простую замену интегрального уравнения системой линейных алгебраических уравнений. Подобная замена лежит в основе всех прямых методов решения (например, метода Пенфолда — Лейсса [3]). Однако такого рода методы дают неустойчивые результаты при сгущении сети $\{\Delta k_i = k_i - k_{i-1}\}$; что ясно из прилагаемого рис. 2. Два сечения $\sigma_1(k)$ и $\sigma_2(k)$ могут как угодно сильно различаться, в то время как результат подстановки их в интегральное уравнение будет давать выходы $Y_1(T)$ и $Y_2(T)$, как угодно мало различающиеся между собой. Отсюда обратная задача — определение сечения по входной информации — будет существенно некорректной. Поэтому в любых прямых методах решения некорректно поставленных задач как угодно малые ошибки во входной информации могут приводить к как угодно большим ошибкам в искомым характеристиках интерпретируемого явления.

Обратимся к устойчивым методам решения основного интегрального уравнения. При приближенном задании левой части уравнения (1), характеризуемой точностью определения выходной кривой, мы получим не одно, а целое семейство возможных решений. Устойчивые методы отбора из этого множества формальных решений определяются при помощи некоторой дополнительной информации о характеристике искомого решения, соответствующей физическому смыслу задачи.

Например, среди множества U формальных решений, т. е. функций $\sigma(k)$, удовлетворяющих уравнению с заданной точностью:

$$U = \{\sigma(k) : \int [Y^\sigma(T) - Y(T)]^2 dT\} \ll \delta^2,$$

где $Y^\sigma(T)$ и $\sigma(k)$ связаны уравнением (1), в качестве искомого приближения, или «нормального» решения задачи, будем выбирать такую функцию $\sigma^\alpha(k)$, которая минимизирует функционал

$$\Omega[\sigma] = \int_{k_{\text{порог}}}^{k_{\text{макс}}(T)} [k_0 \sigma^2(k) + k_1 \sigma'(k)] dk, \quad (k_0 > 0, k_1 > 0).$$

Другими словами, в качестве приближения мы выбираем формальное решение задачи, несущее минимум тонкой структуры. Используя мето-

ды вариационного исчисления, эту задачу можно свести к задаче отыскания минимума сглаживающих функционалов M^α .

$$M^\alpha [\sigma, Y] = \int_{k_{\text{порог}}}^{k_{\text{макс}}(T)} \left[\eta \int_{k_{\text{порог}}}^{k(T)} W(k, T) \sigma(k) dk - Y(T) \right]^2 dT + \alpha \Omega [\sigma],$$

где Ω — регуляризирующий функционал, определенный выше, и α — положительный числовой параметр. При этом любой алгоритм нахождения минимизирующего элемента α для функционала M^α и будет являться регуляризирующим. Параметричность такого алгоритма позволяет, проводя соответствующее согласование точности входных данных и этого параметра α , достичь желаемой сходимости выбираемых приближений к исходному решению задачи. Выбор параметра в соответствии с точностью задания входных данных задачи в системе полностью автоматизирован.

Сходимость приближенных решений и устойчивость предлагаемого метода в общем случае детально обоснованы и изложены в работах [4—7].

Близкий подход к только что изложенному был использован также Куком для расчета сечений фотоядерных реакций [8].

Следует отметить, что получаемые таким образом приближения отражают лишь минимальную тонкую структуру сечения, которую можно надежно определить при имеющейся точности входных данных и данной априорной качественной информации о самом сечении. Реализованный метод — метод регуляризации решения неустойчивых задач — позволяет учитывать любую дополнительную информацию о решении, что зачастую существенно повышает точность получаемых результатов.

Результаты эксперимента

С помощью описанной системы были измерены и обработаны сечения (γ, n) реакции на ядрах V^{51} , Co^{59} , Ni^{58} , Ni^{60} . Полное машинное

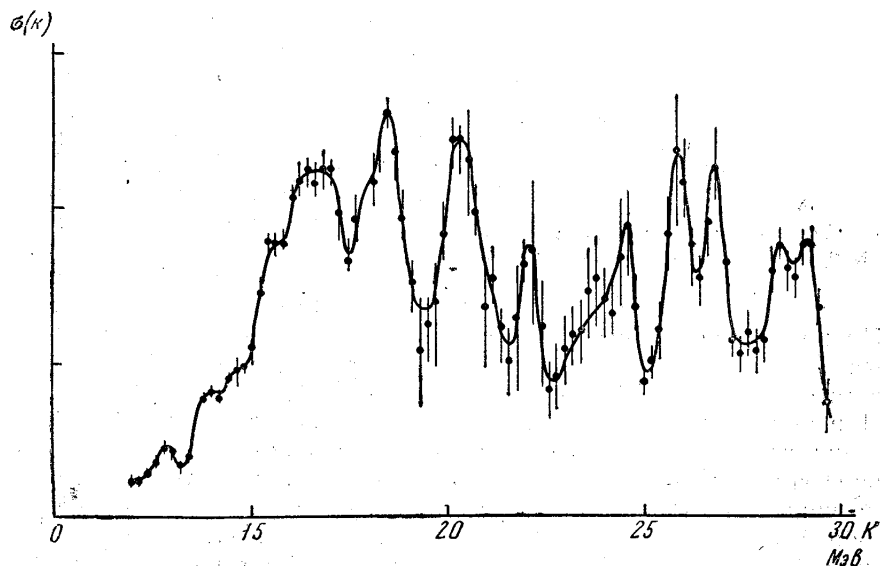


Рис. 3. Сечение фотонейтронной реакции на Ni^{60} , полученное в результате автоматической обработки экспериментальных данных

время работы всех блоков программы, обрабатывающей результаты одного физического эксперимента вплоть до получения сечения, составляет около двух часов. Окончательный результат автоматической обработки для одного из экспериментов — сечение реакции $Ni^{60}(\gamma, n)$ приводится на рис. 3. Эта кривая представляет наиболее гладкую функцию, удовлетворяющую уравнению (1) с точностью экспериментальной кривой выхода δ .

На рис. 4 для сравнения показывается сечение той же реакции, полученное методом Пенфолда — Лейсса с тем же энергетическим разрешением. Как уже говорилось, в силу неустойчивости такого «прямого» метода и, следовательно, «лавинного» нарастания ошибок о выявлении какой-либо гарантированной тонкой структуры сечения не приходится и говорить. Можно, конечно, выявлять определенную тонкую структуру, если проводить необходимое согласование точности решения обратной задачи (варьированием шага как параметра в этом случае) с точностью задания входных данных (точностью измеренной кривой выхода δ). Однако указать выбор оптимального шага для такого согласования в этом случае затруднительно.

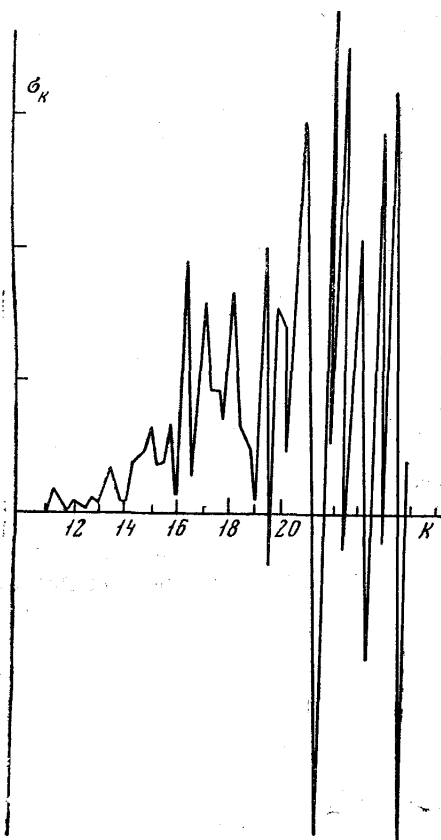


Рис. 4. Сечение фотонейтронной реакции на Ni^{60} , полученное методом Пенфолда — Лейсса

На рис. 5 приведено сечение реакции $Si^{28}(\gamma, n)$. Из рис. 5 видна устойчивость восстановления основных экстремумов на кривой, что показывает эффективность метода регуляризации. Принимая полученное приближение истинного сечения за «точное» решение задачи и проинтегрировав основное уравнение, получим соответствующее «точное» значение кривой выхода. Возмутим случайным образом в пределах статистической ошибки кривую выхода Y и опять получим приближенное решение задачи, изображенное на рисунке точками.

На последующем рис. 6 приведено сечение реакции $Ca^{40}(\gamma, n)$. Ширина зачернения представляет дисперсию полученного приближения, соответствующую дисперсии кривой выхода $Y(T)$.

При практической реализации задачи дисперсию получаемого приближения часто оценивают одним из следующих способов. Решают основное уравнение, причем входными данными при этом являются дисперсии кривой выхода. Или входные данные задачи возмущают случайным образом в пределах заданной точности кривой выхода и для каждой кривой из рассматриваемого набора случайных возмущений определяют сечение реакции. Далее для этого множества сечений обычным образом определяется математическое ожидание и дисперсия.

Нами были исследованы оба этих подхода с учетом указанного выше устойчивого алгоритма решения существенно некорректных задач. Полученные дисперсии при этом практически одинаковы. Заметим, что оценки дисперсии производятся при дополнительном условии отыскания наиболее гладкого решения, удовлетворяющего основному уравнению с заданной степенью точности.

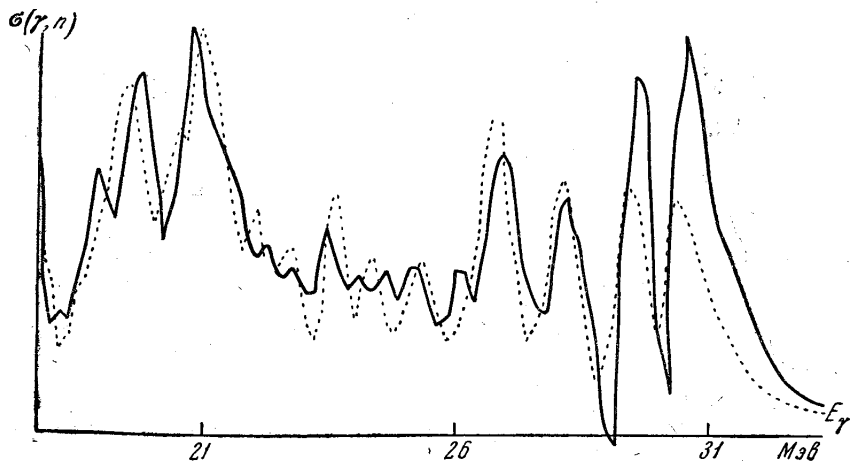


Рис. 5. Устойчивость восстановления основных экстремумов в кривой сечения реакции $\text{Si}^{28}(\gamma, n)$, полученной методом регуляризации

В результате совместной работы экспериментальной группы бетатрона НИИЯФ МГУ и группы автоматической обработки результатов наблюдений Вычислительного центра МГУ создана устойчивая система

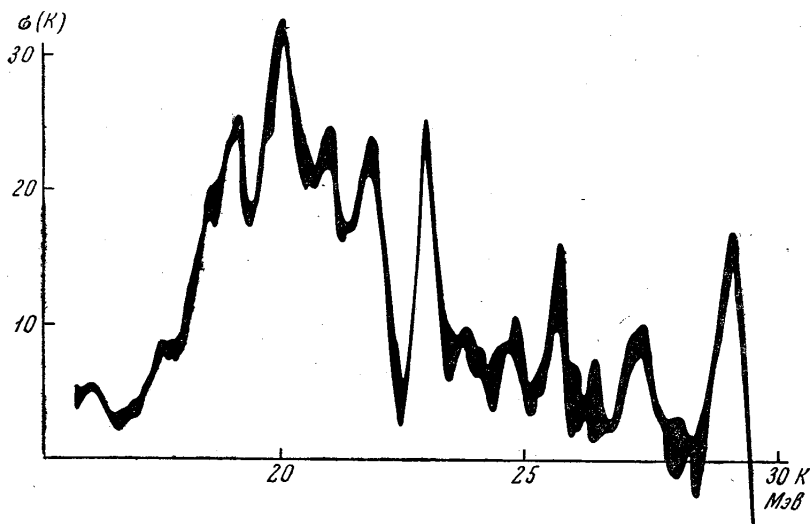


Рис. 6. Сечение реакции $\text{Ca}^{40}(\gamma, n)$, полученное методом регуляризации. Ширина зачернения представляет дисперсию полученного приближения, соответствующую дисперсии кривой выхода

автоматизации обработки эксперимента для определения сечений фото-ядерных взаимодействий. Эта система опробована и работает для определения сечения реакции (γ, n) и (γ, p) .

В настоящее время ведется работа по планированию эксперимента, целью которого является получение сечений с заданной точностью при минимальных наборах статистики. Работа системы обработки в режиме времени проведения эксперимента особенно важна для решения этой задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горячев Б. И., Ишханов Б. С., Селиверстова Ж. М., Капитонов И. М., Шевченко В. Г., Юрьев Б. А. «Ядерная физика», 4, вып. 4, 505, 1966.
2. Schiff L. Phys. Rev., 83, 252, 1951.
3. Penfold A. S., Leiss J. E. Phys. Rev., 114, 1332, 1959.
4. Тихонов А. Н. ДАН СССР, 151, 501—504, 1963.
5. Тихонов А. Н. ДАН СССР, 153, 49—52, 1963.
6. Тихонов А. Н. ДАН СССР, 161, 1023—1026, 1965.
7. Тихонов А. Н. В сб. «Вычислительные методы и программирование», вып. 8. Изд-во МГУ, 1967, стр. 3—33.
8. Cook B. S. Nucl. Instr. Meth., 24, 256—268, 1963.

Поступила в редакцию
14.3 1969 г.

НИИЯФ