

В. И. ГОЛЬДАНСКИЙ и М. И. ПОДГОРЕЦКИЙ

О ВОЗМОЖНОМ ПРИМЕНЕНИИ ФУНКЦИИ КОРРЕЛЯЦИИ К ИССЛЕДОВАНИЮ ЯДЕРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

(Представлено академиком Л. Д. Ландау 9 X 1954)

В последние годы в экспериментальной физике широко используется метод совпадений, основанный на регистрации ядерных частиц, испускаемых в одном акте ядерного превращения или разделенных весьма короткими промежутками времени. В частности, этот метод позволяет сделать ряд выводов о механизме ядерных превращений и определить абсолютное число актов превращений, независимо от эффективности их регистрации (метод $\beta\gamma$ - и $\gamma\gamma$ -совпадений).

Если при распаде какого-либо изотопа испускаются β -частица и γ -квант, то при наличии за все время T опыта N_0 актов распада в отсутствие фона будет зарегистрировано β -счетчиком

$$N_\beta = g_\beta N_0 \quad (1)$$

β -частиц, γ -счетчиком

$$N_\gamma = g_\gamma N_0 \quad (2)$$

γ -квантов, а схемой совпадений (в наиболее интересном практически случае $g_\beta \ll 1$, $g_\gamma \ll 1$)

$$N_{\beta\gamma} = g_\beta g_\gamma N_0 + \frac{2\tau}{T} g_\beta g_\gamma N_0^2 \quad (3)$$

актов совпадений (где g_β и g_γ — неизвестные факторы эффективности регистрации, τ — разрешающее время). Второй член в (3) характеризует счет случайных совпадений, обусловленных самим исследуемым эффектом и несущественных при

$$2 N_0 \tau \ll T, \quad (4)$$

когда

$$N_{\beta\gamma} \cong g_\beta g_\gamma N_0. \quad (5)$$

При этом искомая величина

$$N_0 = N_\beta N_\gamma / N_{\beta\gamma}. \quad (6)$$

В работе (1) приведены также и более сложные примеры, связанные с установлением механизма распада.

Ниже показано, что метод совпадений является лишь частным случаем статистического метода, в котором вместо счета совпадений актов распада l -го и k -го типа регистрируется функция корреляции

$$\Phi_{lk} = \overline{r_l r_k} - \overline{r_l} \overline{r_k}. \quad (7)$$

Экспериментальное осуществление предлагаемого «корреляционного» метода сводится к тому, что вместо регистрации показаний отдельных счетчиков N_l и N_k и счета совпадений N_{lk} за все время длительного опыта, время опыта разделяется на n интервалов, в каждом из которых определяются показания счетчиков r_l и r_k и их произведение $r_l r_k$. Усреднение результатов, полученных в большом числе n интервалов, дает искомую величину функции корреляции. Если распады l -го и k -го типов происходят независимо, то

$$\Phi_{lk} = 0; \quad (8)$$

если эти распады связаны, например, l -й распад обуславливает появление k -го распада, то

$$\Phi_{lk} = g_l g_k \bar{m}_{lk}, \quad (9)$$

где $\bar{m}_{lk}$ — среднее число распадов l -го типа за время одного интервала, за которыми в том же интервале последовали распады k -го типа.

Для простоты рассмотрим случай отсутствия разветвлений между l -м и k -м распадами, используя также условие

$$\sum_{l=1}^k \frac{1}{\lambda_l t} \ll 1, \quad (10)$$

где t — длительность отдельного интервала. Тогда

$$\bar{m}_{lk} = \bar{m}, \quad (11)$$

где $\bar{m}$ — среднее число распадов за время одного интервала любого члена равновесной смеси, начинающейся от постоянного источника излучения или от радиоактивного изотопа, время жизни которого много больше длительности интервала.

Из (8) и (9) следует возможность различения связанных и независимых распадов по величине функции корреляции. Более того, можно определить и абсолютное число актов распада $\bar{m}$ из соотношения

$$\bar{m} = \bar{r}_l \bar{r}_k / \Phi_{lk}, \quad (6')$$

не зная g_l и g_k . Измеряемые значения функций корреляции могут флуктуировать. При разбиении всего времени опыта на n интервалов средние значения функции корреляции равны

$$\bar{\Phi}_{lk} = 0 \quad (8')$$

при независимых распадах и

$$\bar{\Phi}_{lk} = \frac{n-1}{n} g_l g_k \bar{m} \quad (12)$$

при связанных распадах.

При независимых распадах дисперсия функции корреляции

$$D(\Phi_{lk}) = \overline{\Phi_{lk}^2} = \frac{n-1}{n^2} g_l g_k (\bar{m})^2, \quad (13)$$

в случае связанных распадов

$$D(\Phi_{lk}) = \overline{\Phi_{lk}^2} - (\bar{\Phi}_{lk})^2 = \frac{n-1}{n^2} \left[1 + g_l g_k + \frac{n-1}{n\bar{m}} \right] g_l g_k (\bar{m})^2, \quad (14)$$

а относительная ошибка

$$\delta(\Phi_{lk}) = \frac{\sqrt{D(\Phi_{lk})}}{\bar{\Phi}_{lk}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} + \frac{1}{g_l g_k n \bar{m}} + \frac{1}{g_l g_k (n-1)}}. \quad (15)$$

Относительная ошибка в определении $\bar{m}$ по (6') при $n \gg 1$ выражается равенством

$$\delta(\bar{m}) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{2 \left(1 + \frac{1}{m}\right) + \frac{1}{g_l g_k} + \frac{1}{g_l g_k m} + \frac{1}{g_l m} + \frac{1}{g_k m}}. \quad (15')$$

Если $g_l \ll 1, g_k \ll 1$ ($n \gg 1$), выражения (15) и (15') совпадают.

Из (3) мы получаем для среднего числа lk -совпадений в одном интервале длительностью 2τ соотношение

$$S_{lk} = g_l g_k \bar{m} + g_l g_k (\bar{m})^2 \quad (16)$$

или

$$S_{lk} = \Phi_{lk} + \bar{r}_l \bar{r}_k = \overline{r_l r_k}. \quad (17)$$

При выполнении (4)

$$S_{lk} \cong \Phi_{lk}, \quad (18)$$

и метод совпадений тождественен с корреляционным методом. Тогда

$$\delta(\Phi_{lk}) = \frac{1}{\sqrt{g_l g_k n \bar{m}}} = \frac{1}{\sqrt{g_l g_k N_0}}, \quad (19)$$

т. е. равняется относительной ошибке счета совпадений N_{lk} за весь опыт. При $\bar{m} \gg 1$ в методе совпадений приходится тем или иным способом определять второй член в (16) и вычитать его, т. е., по сути дела, определять косвенным образом функцию корреляции. Однако и эта возможность ограничена со стороны больших $\bar{m}$ появлением про-счетов, и при

$$\bar{m} > \frac{1}{\sqrt{g_l g_k}} \quad (20)$$

метод совпадений становится неприменимым. Корреляционный метод свободен от принципиальных ограничений со стороны больших $\bar{m}$. Особый интерес представляет возможность исследования связанных процессов, разделенных большими промежутками времени, когда $\bar{m}$ обычно велико. Ограничение в сторону больших времен определяется лишь общей длительностью опыта и желательной точностью результатов, повышаемой с увеличением числа интервалов согласно (15).

Оценим роль фона. Если фон обоих счетчиков взаимно независим, а также независим от эффекта, то средняя величина функции корреляции не изменяется. Фон влияет, однако, на дисперсию функции корреляции, причем (14) и (15) преобразуется в:

$$D(\Phi_{lk}) = \frac{n-1}{n^2} \left[(1 + \alpha_l)(1 + \alpha_k) + g_l g_k + \frac{n-1}{nm} \right] g_l g_k (\bar{m})^2, \quad (21)$$

$$\delta(\Phi_{lk}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} + \frac{1}{g_l g_k n \bar{m}} + \frac{1}{(n-1) g_l g_k} (1 + \alpha_l)(1 + \alpha_k)}, \quad (22)$$

где α_l и α_k — отношение фоновых и рабочих загрузок счетчиков.

В методе совпадений фон влияет и на среднюю величину S_{lk} , ибо

$$S_{lk} = g_l g_k \bar{m} + g_l g_k (\bar{m})^2 (1 + \alpha_l)(1 + \alpha_k). \quad (23)$$

Уже при $\bar{m} \gg [(1 + \alpha_l)(1 + \alpha_k)]^{-1}$ приходится вводить поправки на случайные совпадения, а при $\bar{m} > [g_l g_k (1 + \alpha_l)(1 + \alpha_k)]^{-1/2}$ метод совпа-

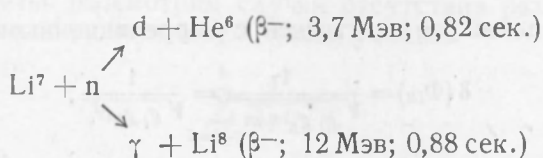
дений перестает быть применимым. При $\bar{m} \ll [(1 + \alpha_l)(1 + \alpha_k)]^{-1}$ точность этого метода совпадает с точностью корреляционного метода (22).

Корреляционный метод способен решать не только все задачи, решаемые методом совпадений, но и задачи по исследованию связанных процессов, разделенных большими промежутками времени.

К типовым примерам таких возможностей метода относятся:

1) Определение сечений ядерных реакций. Например, в реакции $\text{Be}^9(p, \alpha)\text{He}^6 \xrightarrow[\beta^-]{0,82 \text{ сек}} \text{Li}^6$ определение r_α, r_β и $\Phi_{\alpha\beta}$ дает абсолютное число актов образования He^6 , т. е. при известном потоке нейтронов — сечение реакции. Аналогичным путем можно определить при известном сечении поток активирующих частиц. При этом измерения могут производиться при одном произвольном расположении α - и β -счетчиков, безотносительно к виду углового распределения α -частиц и каким-либо конкурирующим реакциям.

2) Идентификация продуктов ядерных реакций. Пример:



Исследуя корреляцию β -частиц разной энергии с d и γ (меняя, например, толщины фильтров перед счетчиками), можно установить, в какой ядерной реакции образуется продукт с тем или иным видом активности. Такая возможность особенно интересна при получении новых изотопов.

3) Определение периодов полураспада без выделения исследуемых изотопов из равновесной смеси. Для этой цели можно воспользоваться соотношением (9), ибо без выполнения (10), для случая, например, соседних распадов:

$$\Phi_{lk} = g_l g_k m \frac{-\lambda_k t - 1 + e^{-\lambda_k t}}{\lambda_k t}. \quad (24)$$

Меняя t в области $\lambda_k t \sim 1$, можно определить λ_k , не зная $\bar{m}$, g_l и g_k .

Число примеров можно умножить, но наша задача сводится сейчас лишь к общей иллюстрации возможностей метода. По этой причине мы не рассматриваем здесь и различных вариантов корреляционного метода, могущих заметно отличаться от изложенного выше.

Авторы благодарны И. Я. Бариту за ценные замечания.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР

Поступило
18 VI 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ A. C. G. Mitchell, Rev. Mod. Phys., 20, 296 (1948).