

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЁТЧИКОВ

Сцинтилляционный счётчик представляет собой комбинацию из фосфора, в котором быстрые частицы дают вспышки сцинтилляций, и фотоумножителя, с помощью которого эти вспышки регистрируются.

Использование такой комбинации было предложено независимо и почти одновременно Кальманом¹ и Кольтманом и Маршаллом².

Кольтман и Маршалл предложили использовать неорганические фосфоры типа хлористого цинка для увеличения эффективности умножителя; Кальман установил, что для этой цели больше подходят органические фосфоры, вроде нафталина, прозрачные для собственного излучения. Обзор первых работ по исследованию свойств сцинтилляционных счётчиков содержится в³ (раздел 5).

Подробные исследования свойств различных фосфоров в отношении их эффективности и светоотдачи были произведены Муном⁴ (неорганические фосфоры) и Кальманом⁵ (органические и неорганические).

В настоящее время сцинтилляционные счётчики нашли широкое применение в различных экспериментальных работах по ядерной физике, на которых мы не будем здесь останавливаться.

Было установлено, что в качестве детектора частиц могут применяться также и растворы различных веществ («жидкие счётчики»)⁶, что представляет определённые преимущества, так как отпадает необходимость в приготовлении кристаллов и, кроме того, растворы оказываются более прозрачными для излучения, чем кристаллы больших размеров.

В первых же работах по сцинтилляционным счётчикам было также замечено, что время выгорания органических фосфоров значительно меньше времени выгорания неорганических фосфоров, что открывает заманчивые перспективы в деле измерения малых интервалов времени (при измерении времени жизни короткоживущих элементов и в других опытах).

Время выгорания некоторых фосфоров было измерено в⁷; измерения производились с помощью микроосциллографа⁸ и для трёх испытанных фосфоров дали следующие значения времени выгорания при температуре жидкого азота:

нафталин $(5,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$ сек.,

антрацен $(1,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$ сек.,

фенатрен $(0,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$ сек.,

тогда как время выгорания для неорганических фосфоров — порядка 10^{-7} — 10^{-6} сек.

В последнее время был опубликован ряд заметок^{9,12—14,20—23}, в которых приводятся результаты по исследованию времени выгорания различных органических фосфоров. Эти работы интересны не только полученными в них результатами, но и новой техникой, использованной при исследованиях.

В⁹ измерялась зависимость времени выгорания антрацена от температуры; кроме того, исследовалась зависимость от температуры и величины импульсов.

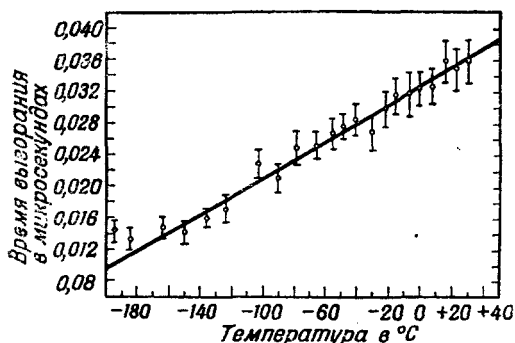
Импульсы поступали на осциллограф с усилителем с распределённым усилением¹⁰ (см. также¹¹), с постоянной времени нарастания $6 \cdot 10^{-9}$ сек., и фотографировались. Время выгорания определялось графически и усреднялось для 20 импульсов при каждой температуре. В двух точках, для контроля метода обработки, все 20 импульсов были графически сложены и время выгорания определено по результирующей графике;

расхождение результатов, полученных этими двумя методами, в обоих случаях не превосходило 2%. Зависимость времени выгорания антрацена от температуры образца приведена на рис. 1.

В этой же работе получены качественные результаты относительно спектрального состава излучения антрацена, которые показывают, что спектр сцинтилляций захватывает области с $\lambda < 3400 \text{ \AA}$ (см. также 24).

Зависимость световой отдачи от температуры образца для антрацена, нафталина и стилбена изучалась также в 19, 19а; для антрацена и нафталина зависимость от температуры невелика (световотдача падает в два-три раза при изменении температуры от 120 до 310° К), для стилбена изменения световой отдачи с температурой вообще замечено не было.

Рис. 1. Затухание вспышек сцинтилляций в антрацене. Чёрточки на графике указывают интервал, в который попадает 95% измеренных значений.



С результатами работы 9 относительно времени выгорания согласуются и данные, опубликованные в 20, где были получены следующие значения для времени выгорания антрацена в интервале температур от 4 до 290° К:

Температура в °К	4	78	290
Время выгорания в 10^{-9} сек.	6	14	32

Если экстраполировать прямую рис. 1 к 0° К, то получим $\tau_{0\text{K}} \approx 0$. Попытка проверить это обстоятельство в широком интервале температур для антрацена и стилбена была предпринята в 21.

Измерения в этой работе производились с помощью следующего устройства: фосфор монтировался на конце кварцевого стержня длиной около 20 см и помещался в охлаждающую ванну. У другого конца стержня находился фотоумножитель 931-А. Измерения времени выгорания производились в интервале температур от 4 до 298° К для антрацена и от 78 до 298° К для стилбена с помощью аппаратуры с закороченной линией (подробности относительно устройства измерительной схемы опубликованы не были); облучение производилось радиевым источником в 10^4 С.

Результаты, полученные в этой работе, отличаются от данных, полученных в 9 и в 20. Так, для антрацена при понижении температуры время выгорания стремилось к конечному пределу (при 4° К $\tau \approx 16 \cdot 10^{-9}$ сек.), для стилбена же оно оставалось почти постоянным, меняясь от $9 \cdot 10^{-9}$ сек. при 78° К до $10 \cdot 10^{-9}$ сек. при 195° К и $12 \cdot 10^{-9}$ сек. при 298° К. Возможно, что наблюдаемое стремление к пределу вызвано несовершенством измерительной аппаратуры, тем более, что полученное в этой работе значение времени выгорания для стилбена существенно больше значений, полученных в последующих работах.

В 12–13 для исследования времени выгорания применялся следующий метод: на умножители 931-А подавались импульсы напряжения до

5 киловольт длительностью до 2,5 микросекунды; при этом в ряде экземпляров умножителей никаких пробоев не наблюдалось. Импульсы на выходе умножителя от стилбена, облучаемого γ -лучами от Ag^{110} , достигали 80 вольт. Через коаксиальный кабель, нагруженный на волновое сопротивление в 100 ом, импульсы поступали непосредственно на отклоняющие пластины высоковольтной электронно-лучевой трубки типа 5RP11A. Для гашения свободных колебаний на выходе кабеля между кабелем и вводами в трубку включались гасящие сопротивления по 100 ом. Анализ формы кривых производился как графически (для отдельного импульса), так и обрезанием импульсов короткой короткозамкнутой линией. Авторы считают, что наблюдаемое на экране трубки время нарастания импульсов, возможно, заметно увеличено вследствие индуктивности вводов пластин внутри трубки.

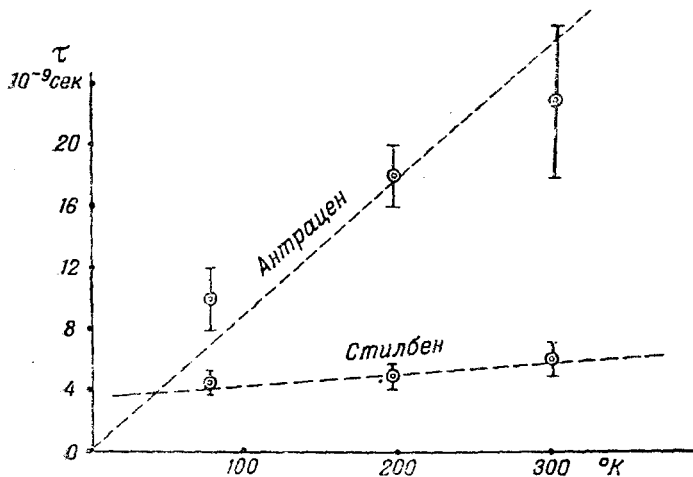


Рис. 2.

Ширина импульсов от одиночных электронов, вылетающих из фотожатода (импульсы фона), равнялась примерно $5 \cdot 10^{-10}$ сек. в согласии с вычислениями Сарда¹⁵.

С помощью описанной методики исследовались очень чистые кристаллы транс-стилбена (1,2-дифенилэтилен) и для сравнения с предыдущими работами⁷ и⁹ — кристалл антрацена неизвестной чистоты. Полученные результаты приведены в нижеследующей таблице (в 10^{-9} сек.):

Температура образца	—196	—78	—27° С.
Транс-стилбен	$4,4 \pm 0,5$	$4,9 \pm 0,6$	6 ± 1
Антрацен	10 ± 2	18 ± 2	23 ± 5

Результаты для антрацена при температуре жидкого азота находятся в согласии с результатами, полученными в⁷ и в⁹. Однако при комнатной температуре в этой работе время выгорания для антрацена получилось существенно меньше, чем в⁹ (рис. 2).

Величина времени затухания определялась путём сравнения сглаженных фотографий импульсов с начерченными экспонентами, причём

авторы отмечают, что при комнатной температуре ход затухания импульсов от антрацена оказывается очень неровным, с заметными скачками, так что экспоненту приходится проводить очень условно; возможно, что в этом — причина разногласий с⁹; в то же время импульсы от стилбена — достаточно гладкие при всех температурах (возможно, конечно, что они сглаживаются самой схемой в большей степени, чем импульсы от антрацена, ввиду большей крутизны спада).

В²⁸ (тем же методом, что и в¹²⁻¹³) исследовалось время затухания (и эффективность) насыщенного раствора терфенила (*p*-дифенилбензола) в толуоле; для τ было получено значение: $\tau \approx 2,2 \cdot 10^{-9}$ сек.; при обработке данных не учитывалось время нарастания импульсов; наблюдаемое время нарастания импульсов от 10 до 90% в различных случаях лежало в пределах от 0,6 до $1,0 \cdot 10^{-9}$ сек. Аналогичные результаты были получены и для раствора терфенила в ксилоле (смесь орто-, пара- и метамодификаций).

В³² измерения крутизны фронта импульсов умножителя и времени выгорания фосфоров производились следующим образом: фотоумножители 1P21 работали при напряжении 1500—1800 вольт; при этом импульсы от радиового источника на выходе катодного повторителя (лампа 6АГ7), присоединённого непосредственно к умножителю, составляли 25 вольт. К выходу повторителя был присоединён закороченный коаксиальный кабель с волновым сопротивлением в 100 ом, длину которого можно было менять. Затем импульсы поступали на дискриминатор на германиевых диодах и на пересчётную схему; длина кабеля и смещение на дискриминаторе подстраивались до получения постоянной скорости счёта для данного источника.

Для ширины импульсов получены следующие значения (в 10^{-9} сек.):

Импульсы шумов	5—6	О-фенилфенол	9±4
Стилбен	8,5±0,5	P-фенилфенол	20±4
Антрацен	21±2	5-sec-бутил-2-гидро-	
Фенатрен	10±1	окси-7 ¹² 8-ксилендиол	16±4

(стилбен и антрацен — в виде бесцветных монокристаллов, остальные вещества — в виде микрокристаллов); температура образцов, при которой производились измерения, не указана. Обращает на себя внимание чрезмерная ширина импульсов фона (на порядок больше, чем в¹³, и в несколько раз больше, чем в¹⁴, где применялись такие же умножители 1P21, работавшие в нормальном режиме, — см. ниже).

В работе¹⁴ измерялось время выгорания некоторых новых органических фосфоров с помощью следующего устройства: исследуемые кристаллы помещались между двумя умножителями типа 1P21 и облучались γ -лучами от радиоактивного препарата. Импульсы снимались с 9-го диода умножителей и через коаксиальные кабели с волновым сопротивлением в 100 ом, используемые для внесения задержки, поступали на усилители с распределённым усилением (см.¹⁰ и¹¹) со временем нарастания в $2,6 \cdot 10^{-9}$ сек. После усиления импульсы поступали на схему совпадений с германиевыми диодами. Кривые выгорания можно было получить, изменяя длину коаксиального кабеля в одном из каналов. Меняя величину смещения на дискриминаторе совпадений, можно было отбирать случаи, соответствующие попаданию на фотокатод умножителя (в канале без задержки одновременно одного, двух, трёх и т. д. фотонов.

Для запаздываний, превышающих ширину импульсов на входе схемы совпадений (имеется в виду ширина, обусловленная умножителем и уси-

лителями), число регистрируемых совпадений определяется выражением

$$N = \Sigma A_n \exp(-n t_3 / \tau),$$

где t_3 — время задержки импульсов в одном из каналов относительно другого, τ — время выгорания фосфора, n — число фотонов, попадающих одновременно на фотокатод умножителя в канале без задержки, A_n — постоянная, не зависящая от t_3 .

В описываемых опытах отбирались лишь те совпадения, которые соответствовали одновременному попаданию (в канале без задержки) не менее трёх фотонов. Таким образом, можно было надёжнее отделить истинные совпадения от ложных с большими одиночными импульсами; кроме того, этот метод даёт лучшее разрешение в смысле определения времени выгорания. Изменением смещения на дискриминаторе измерялись также совпадения, вызываемые одновременным попаданием двух и более и четырёх и более фотонов в канале без задержки. На рис. 3 представлены кривые, соответствующие члену $\exp(-3 t_3 / \tau)$.

Кристаллы и умножители работали без охлаждения при комнатной температуре ($+24^\circ \text{C}$).

Для того чтобы оценить ширину импульсов от одного электрона, вылетающего из фотокатода, измерялись также самосовпадения от импульсов тепловых шумов одного умножителя (кривая F на рис. 3); в другом опыте для той же цели между умножителями помещался сильный источник γ -лучей от Co^{60} .

Среднее время выгорания возбуждённых кристаллов в три раза больше величины, соответствующей наклону прямых на графике рис. 3 (см. формулу), и указано в нижеследующей таблице:

1,4-дифенилбутадиев	$4,2 \cdot 10^{-9}$ сек.
р-терфенил	$4,2 \cdot 10^{-9}$ сек.
м-стилбен	$5,7 \cdot 10^{-9}$ сек.
Антрацен	$24 \cdot 10^{-9}$ сек.
Нафталин	$60 \cdot 10^{-9}$ сек.

Время выгорания для стилбена и антрацена согласуется со значениями, полученными в ¹².

Ширина импульсов от одиночных электронов, определённая на основании кривой F (рис. 3), обуславливается временем нарастания импуль-

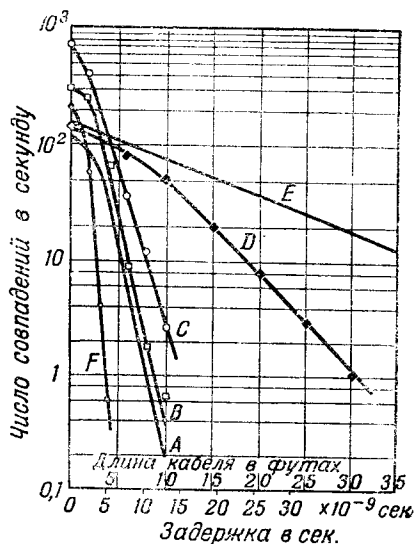


Рис. 3. Кривые затухания $\exp(-3 t_3 / \tau)$ для следующих веществ: A — 1,4 дифенолбутадиев; B — p -терфенил; C — m -стилбен; D — антрацен; E — нафталин; F — импульсы шумов. Ординаты кривой E умножены на 10^3 ; эта кривая проходит также через точку с координатами: 55 футов ($\approx 7 \cdot 10^8$ сек.), $0,004 \pm 0,001$ совпадения в секунду.

сов в усилителях; это объяснение подтверждается также и опытами без усилителей перед схемой совпадений: в этом случае ширина импульсов получалась меньше 10^{-9} сек., что в общем согласуется с расчётной величиной¹⁵ и с экспериментальным значением, полученным в¹³.

Загиб кривых рис. 3 у оси ординат вызывается насыщением в умножителях и наложением импульсов от нескольких фотонов.

Кристаллы с временем выгорания (в 3—4)· 10^{-9} сек. могут позволить измерять малые промежутки времени с точностью до (5—10)· 10^{-10} сек. Это позволяет использовать их не только для измерения времени жизни короткоживущих элементов, но также и для непосредственного измерения скорости быстрых частиц: при $\beta = 0,7$ и длине пути в 2 м время пролёта составит 10^{-8} сек. и может быть измерено с точностью до 5—10%. Непосредственные измерения скорости частиц позволили бы определить прямым путём — по скорости и импульсу — массу частиц без того, чтобы обращаться к различным теоретическим формулам, связывающим пробег частицы с её энергией или ионизирующую способность частицы с её скоростью. Кроме того, подобные измерения позволили бы подвергнуть эти теоретические формулы экспериментальной проверке для быстрых частиц, отличных от электронов.

Исследование некоторых других свойств органических фосфоров ароматического ряда можно найти в следующих работах:¹⁶ (разные вещества, в том числе стилбен и фенатрен),¹⁷ [1,2-дифенилэтан (дибензил), 1,2-дифенилэтилен (стилбен) и дифенилацетат],¹⁸ [антрацен, стилбен, *p*-дифенилбензол (терфенил) и дифенилэтан (дибензил).]

В. Х.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. H. Kalman, *Nature und Technick*, July (1947).
2. J. W. Koltman and F. H. Marshall, *Phys. Rev.* **72**, 528 (1947).
3. В. Харитонов, *УФН* **39**, 402 (1949).
4. R. T. Moon, *Phys. Rev.* **73**, 210 (1948).
5. H. Kalman, *Phys. Rev.* **75**, 623 (1949).
6. G. T. Reynolds, F. B. Harrison and G. Salvini, *Phys. Rev.* **78**, 488 (1950) (испытаны при облучении γ -лучами от Co^{60} : нафталин в бензоле; нафталин + антрацен в бензоле; терфенил в бензоле и ксилоле; жидкий дибензил с положительными результатами).
7. H. Kalman, *Phys. Rev.* **73**, 621 (1950) (антрацен, фенатрен и другие вещества в разных растворителях). M. Ageno, M. Chiozzotto and R. Qverzoli, *Phys. Rev.* **79**, 720 (1950) (подробные данные о растворе нафталина в ксилоле и дискуссия).
8. G. B. Collins, *Phys. Rev.* **74**, 1543 (1948).
9. G. M. Lee, *Proc. I. R. E.* **34**, 121 (1946).
10. G. G. Kelley and M. Goodrich, *Phys. Rev.* **77**, 138 (1950).
11. G. G. Kelley, *Rev. Sc. Instr.* **21**, 71 (1950).
12. Ginzton, Hewlett, Tasberg and Noe, *Proc. I. R. E.* **36**, № 8 (1948).
13. R. F. Post and N. S. Shiren, *Phys. Rev.* **73**, 80 (1950).
14. R. F. Post and N. S. Shiren, *Phys. Rev.* **78**, 81 (1950).
15. A. Lanby, *Phys. Rev.* **80**, 477 (1950).
16. R. D. Sard, *J. Appl. Phys.* **17**, 768 (1946).
17. H. T. Gittings, R. F. Taschek, A. R. Ronzio, E. Jones and W. J. Mazilun, *Phys. Rev.* **75**, 205 (1949).
18. W. S. Koski and C. O. Thomas, *Phys. Rev.*, **78**, 308 (1949).
19. R. Hofstadter, S. H. Liebson and J. O. Elliot, *Phys. Rev.* **78**, 81 (1950).

19. S. H. Liebson and J. W. Keller, *Phys. Rev.* **78**, 305 (1950).
- 19a. S. H. Liebson and R. T. Farrar, *Phys. Rev.* **79**, 733 (1950)
(относительная светоотдача и температурная зависимость светоотдачи для нафталина и антрацена и для нафталина с различным содержанием примеси антрацена).
20. S. H. Liebson and J. O. Elliot, *Phys. Rev.* **78**, 65 (1950).
21. J. O. Elliot, S. H. Liebson and C. F. Ravillious, *Phys. Rev.* **79**, 393 (1950).
22. O. Martinson, P. Isaak, H. Brown and Rudernau, *Phys. Rev.* **79**, 178 (1950).
23. R. F. Post, *Phys. Rev.* **79**, 735 (1950).
24. F. B. Harrison and G. T. Reynolds, *Phys. Rev.* **79**, 732 (1950)
(изучение спектрального состава излучения терфенила и антрацена).

ГАММА-СПЕКТРОСКОПИЯ С ПОМОЩЬЮ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЁТЧИКОВ

С момента открытия радиоактивности и до настоящего времени гамма-спектроскопия является одним из наиболее важных и точных методов исследования строения ядер. Известно, что измерение энергии γ -квантов, испускаемых ядрами, а также изучение γ - γ - и γ - β -совпадений позволяет установить энергетические уровни ядра, а исследование угловой корреляции между γ -квантами, последовательно испускаемыми возбуждённым ядром, даёт сведения об электрическом моменте ядра. К сожалению, до недавнего времени возможности гамма-спектроскопии были ограничены недостаточной эффективностью счётчиков Гейгера-Мюллера к γ -квантам (эффективность счётчика Гейгера-Мюллера к γ -квантам лежит в пределах от десятых процента до нескольких процентов в зависимости от энергии γ -квантов и материала цилиндра счётчика). Развитие метода счёта ядерных частиц и γ -квантов с помощью сцинтилляционных счётчиков из плотных кристаллов, дающих большой выход световых квантов на поглощённую частицу или поглощённый γ -квант, открывает новые возможности для гамма-спектроскопии. В этом кратком обзоре будет рассмотрено несколько работ, в которых детектирование и измерение энергии γ -квантов, испускаемых радиоактивными веществами, производилось с помощью сцинтилляционных счётчиков. Преимущества этого нового и весьма быстро развивающегося метода детектирования γ -квантов связано в первую очередь с тем, что эффективность сцинтилляционных счётчиков по отношению к γ -излучению в десятки раз превосходит эффективность счётчиков Гейгера-Мюллера. Кроме того доказано, что сцинтилляционный счётчик в соединении с фотоумножителем является линейным прибором, в котором импульс на выходе фотоумножителя пропорционален энергии электрона, образованного γ -квантом в веществе сцинтилляционного счётчика. Именно это качество сцинтилляционного счётчика делает возможным измерение энергии поглотившихся в нём γ -квантов. Сцинтилляционный счётчик обладает также всеми преимуществами быстрого счётчика, практическое мёртвое время которого в сотни раз меньше мёртвого времени счётчиков Гейгера-Мюллера. При измерении с помощью сцинтилляционного счётчика γ - γ - и β - γ -совпадений разрешающее время может быть значительно уменьшено по сравнению со счётчиками Гейгера-Мюллера, что сильно увеличивает отношение измеряемого эффекта к фону случайных совпадений. Механизм работы сцинтилляционного счётчика, облучаемого γ -квантами, заключается в том