

Д13-2005-111

СВОЙСТВА УКРАИНСКОГО
ПЛАСТМАССОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА
НА ОСНОВЕ ПОЛИСТИРОЛА UPS 923A

Направлено в журнал «Nuclear Instruments and Methods»



А. М. Артиков¹, Ю. А. Будагов, М. В. Ляблин, И. Е. Чириков-Зорин, Д. Чохели²
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Дж. Беллеттини, А. Мензине
ИНФН и Пизанский университет, Италия

С. Токар
Университет им. Я. А. Коменского, Братислава, Словакия

Н. Джокарис, А. Манусакис-Кацикакис
Афинский университет, Греция

E-mail addresses: akram@nu.jinr.ru (А. М. Артиков),
julian.boudagov@cern.ch (Ю. А. Будагов),
chirikov@nu.jinr.ru (И. Е. Чириков-Зорин),
chokheli@nu.jinr.ru, (Д. Чохели),
lyablin@nu.jinr.ru (М. В. Ляблин),
bellettini@fnal.gov (Дж. Беллеттини),
menzione@pi.infn.it (А. Мензине),
stanislav.tokar@fmph.uniba.sk (С. Токар),
ngiokar@cc.uoa.gr (Н. Джокарис),
amanous@cc.uoa.gr. (А. Манусакис-Кацикакис)

¹ЯФЛ Самаркандского государственного университета, Узбекистан

²ИФВЭ Тбилисского государственного университета, Грузия

Свойства украинского пластмассового сцинтиллятора
на основе полистирола UPS 923A

Сцинтиллятор на основе полистирола UPS 923A был выбран для развития мюонной системы детектора CDF на тэватроне Фермилаб. Исследованы следующие свойства этого сцинтиллятора: световыход, ослабление света, долговременная стабильность, а также временные характеристики сцинтиллятора и спектро-смещающих волокон. Предложен метод измерения объемной длины ослабления сцинтиллятором собственного излученного света. Проведены сравнительные измерения характеристик UPS 923A и сцинтиллятора NE 114 на основе поливинилтолуола. Обнаружено, что естественное старение NE 114 происходит в два раза быстрее, чем UPS 923A.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Properties of the Ukrainian Polystyrene-Based
Plastic Scintillator UPS 923A

The polystyrene-based scintillator UPS 923A was chosen for upgrading of the muon system for the CDF detector at the Fermilab Tevatron. Properties of this scintillator such as light output, light attenuation, long-term stability and also timing characteristics of scintillator and wavelength shifting fibers were investigated. The method for the Bulk Attenuation Length measurements of the scintillator to its own light emitted was proposed. Comparative measurements of the characteristics of the UPS 923A and the polyvinyltoluene-based scintillator NE 114 are done. It was found that natural aging of the NE 114 was two times faster than that of the UPS 923A.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

ВВЕДЕНИЕ

Пластмассовые сцинтилляционные детекторы частиц сейчас широко применяются и будут использоваться в будущем в экспериментах по физике частиц. Качество сцинтилляционных детекторов в основном определяется качеством используемого сцинтилляционного материала. По результатам исследований сцинтиллятор UPS 923A* был выбран для развития мюонной системы детектора CDF на тэватроне Фермилаб [1]. Материал изготовлен на основе полистирола с добавками 2% РТР и 0,03% РОРОР. Этот сцинтиллятор был использован для создания около 600 мюонных счетчиков длиной вплоть до 320 см с новой техникой сбора света спектросмещающими волокнами [2]. Исследованы свойства сцинтиллятора: световыход, ослабление света и долговременная стабильность. Также измерены временные характеристики сцинтиллятора и спектросмещающих волокон.

1. ОСЛАБЛЕНИЕ СВЕТА

1.1. Техническая длина ослабления. Техническая длина ослабления, называемая TAL**, пластмассовой сцинтилляционной балки определяется как длина, на которой световой сигнал уменьшается в e раз; TAL зависит от объемной длины ослабления, формы, толщины и отражающих способностей поверхностей сцинтиллятора. Мы измерили TAL пластмассовой сцинтилляционной пластины из UPS 923A и сравнили ее с хорошо известным пластмассовым сцинтиллятором NE 114***. Для этой цели были изготовлены два длинных сцинтилляционных счетчика из пластмассового сцинтиллятора UPS 923A и NE 114. Светосбор осуществлялся с торца сцинтилляционной пластины световодом типа «рыбий хвост», соединенным с фотоумножителем ЕМ1 9814В. Сцинтилляционная пластина имела размеры $200 \times 30 \times 2$ см. Световод «рыбий хвост» был приклеен к одному из торцов оптическим клеем NE 581. Второй торец был зачернен для подавления отражения света. Конструкция счетчиков детально описана в [3].

*Ukrainian Plastic Scintillator 923A изготовлен Институтом сцинтилляционных материалов, Харьков, Украина.

**Technical Attenuation Length (TAL).

***NE 114 был изготовлен Nuclear Enterprises Ltd. Этот материал эквивалентен BC 416, который сейчас изготавливается Vicron Corp.

Свойства счетчиков исследовались с помощью космических мюонов, которые выделялись телескопом из двух небольших сцинтилляционных счетчиков ($\approx 4 \times 10$ см). Исследуемый счетчик размещался между ними. Передвигая телескоп вдоль оси счетчика, мы измеряли зависимость светосбора от расстояния до торца сцинтилляционной пластины. Спектры сигналов с фотоумножителя измерялись зарядо-цифровым преобразователем LeCroy ADC 2249A. Спектрометрический канал был откалиброван в абсолютных единицах, т. е. в количествах фотоэлектронов, образовавшихся на фотокатоде фотоумножителя. Калибровка была выполнена вспышками света низкой интенсивности с помощью быстрого светодиода. Разработанные нами метод калибровки и методика измерений детально описаны в [3, 4].

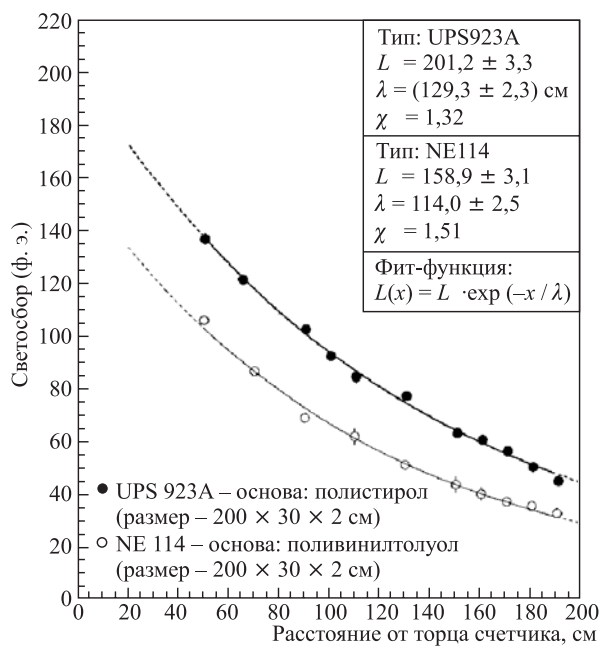


Рис. 1. Светосбор со счетчиков в зависимости от расстояния до переднего торца сцинтилляционной пластины

Результаты измерений представлены на рис. 1. TAL , измеренные для пластин UPS 923A и NE 114, сравнимы и составляют 130 см и 115 см соответственно. Отметим, что светосбор для UPS 923A счетчика приблизительно на 25 % больше, чем для NE 114.

1.2. Объемная длина ослабления. Прозрачность сцинтиляционного материала определяется объемной длиной ослабления, так называемой BAL*; это длина, на которой световой сигнал уменьшается в e раз по закону Бугера–Ламберта. BAL сцинтилятора UPS 923A, измеренная с помощью лазера на парах кадмия на длине волны света 441 нм, составила 260 см**.

Важно подчеркнуть, что основным оптическим параметром сцинтиляционного материала является прозрачность к собственному излучению.

Измерения BAL сцинтилятора к собственному излучению проведены с помощью параллельного пучка света со спектром, очень близким к спектру излучения сцинтилятора (спектр спектросмещающей добавки РОРОР) [6]. В качестве источника света использовалась обычная лампа накаливания, спектр излучения которой был скорректирован с помощью светофильтров СС5 и ФС1 [7]. Спектр параллельного пучка света, полученный таким образом, был проверен с помощью оптического спектроанализатора.

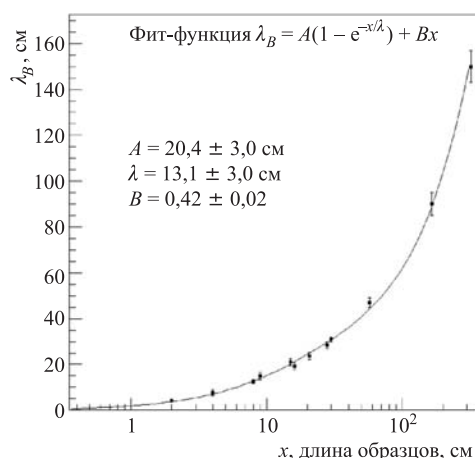


Рис. 2. Зависимость объемной длины ослабления λ_B от пути распространения (длины образцов) света в сцинтиляторе

Спектры излучения и поглощения добавки РОРОР частично перекрываются [6] и поэтому коротковолновая часть излученного света (< 400 нм) очень быстро поглощается в основном вследствие реабсорбции. Таким образом, спектр излучения смещается в длинноволновую область, где влияние процессов поглощения и реабсорбции менее существенно [5, 8]. Поэтому,

*Bulk Attenuation Length (BAL).

**BAL сцинтилятора NE 110 для длины волны 458 нм составляет 204 см [5].

в принципе, ослабление сцинтиляционного света не должно подчиняться экспоненциальной зависимости от пути распространения.

Для исследования самопоглощения мы измерили BAL набора образцов разных длин из сцинтиллятора UPS 923A, которые были сделаны из одного и того же блока сцинтиллятора (рис. 2).

Экспериментальные данные были аппроксимированы функцией

$$\lambda_B = A(1 - e^{x/\lambda}) + B \cdot x. \quad (1)$$

Первый член выражения (1) описывает сильное самопоглощение сцинтиляционного света в области перекрытия спектров излучения и поглощения РОРОР. BAL для света, который проходит меньше чем 30 см, зависит от концентрации и свойств люминесцентной добавки, сместителя спектра* и основы сцинтиллятора. Второй член описывает область (свыше 30 см), где коротковолновое крыло спектра излученного света в основном поглощено и поэтому объемная прозрачность сцинтиляционного материала увеличивается. В этой области BAL становится зависимой от качества (чистоты) основы сцинтиллятора и добавок.

2. ВРЕМЕННЫЕ СВОЙСТВА СЦИНТИЛЛЯТОРА И СПЕКТРОСМЕЩАЮЩИХ ВОЛОКОН

Временное разрешение сцинтиляционного детектора в первую очередь определяется формой светового импульса от возбуждения сцинтиллятора частицей, а также временными свойствами спектросмещающих волокон, используемых в оптических системах съема света. Изучение формы светового импульса выполнено однофотонным методом Боллингера и Томаса [9]. На рис. 3 показана блок-схема оригинального временного спектрометра, который мы создали для измерения времени высвечивания сцинтилляторов. Образцы (S) представляли собой диски диаметром 15 мм и толщиной 1,5 мм с полированными поверхностями. Образцы возбуждались электронами от радиоактивного источника $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$ с максимальной энергией 3,54 МэВ. Для улучшения временного разрешения спектрометра использовался черенковский счетчик, вырабатывающий триггерный сигнал. Черенковский радиатор представлял собой цилиндр диаметром 9 мм и высотой 6 мм, изготовленный из кварца. Радиатор соединен с фотосенсором Hamamatsu H6780-06 (чувствителен в ультрафиолетовой области) оптической смазкой RHODORSIL SI 200. Сигнал черенковского счетчика формируется обычным дискриминатором с

*Сцинтиллятор со сместителем спектра с большим сдвигом Стокса имеет относительно небольшое самопоглощение излученного света [6].



Рис. 3. Установка для измерения времени высвечивания

фиксированным порогом (D), выходной сигнал которого используется для запуска время-цифрового преобразователя (TDC) LeCroy 2228A.

Фотосенсор Hamamatsu H5783 использовался для детектирования одиночного фотона с торца образцов. Фотонный счетчик был настроен на однофотонный режим с помощью ирисовой диафрагмы (ID), которая уменьшала регистрируемый сигнал до среднего значения приблизительно 0,01 фотоэлектрона. Такое ослабление излучения необходимо для поддержания вероятности ε регистрации двух и более фотоэлектронов от одной световой вспышки на пренебрежительно малом уровне ($\varepsilon < 10^{-4}$). Однофотонный сигнал от H5783 формируется дискриминатором со следящим порогом (CFD), выходной сигнал которого используется как стоп-сигнал TDC.

Временное разрешение системы для одиночного фотоэлектрона измерялось с помощью плексигласового образца, быстрый световой сигнал от которого создается излучением Черенкова. Так как черенковский свет возникает мгновенно, а световыход ограничен одиночным фотоэлектроном, то измеренное временное распределение является, в сущности, прямым измерением отклика системы, т. е. ее аппаратной функции. На рис. 4 показано типичное временное распределение излучения Черенкова от плексигласового образца. Измеренное временное разрешение составляет $\sigma \approx 150$ пс при аппроксимации функцией Гаусса.

Много процессов вносят вклад в излучение света сцинтилятором [10, 11]. Форму импульса света $f(t)$ пластмассового сцинтиллятора можно описать как состоящую из быстрой компоненты, возникшей от двухуровневого сцинтилляционного каскада, и дополнительной медленной компоненты. При

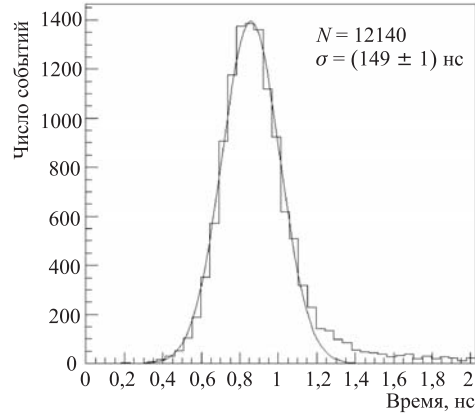


Рис. 4. Аппаратная функция, измеренная при помощи излучения Черенкова

таким предположении $f(t)$ можно выразить в виде

$$f(t) = \frac{N}{1+R} \left[\frac{e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1}}{\tau_2 - \tau_1} + R \frac{e^{-t/\tau_3}}{\tau_3} \right], \quad (2)$$

где N — полное число фотонов; τ_1 — постоянная времени нарастания; τ_2 — постоянная времени высвечивания быстрых сцинтилляционных процессов; τ_3 — постоянная времени высвечивания медленной компоненты и R — это отношение выходов количества фотонов, излученных быстрыми и медленными процессами высвечивания.

На рис. 5 показан временной спектр импульсов света от сцинтиллятора UPS 923A. Измеренное временное распределение описывается интегралом свертки выражения (2) и гауссовой аппаратной функции (рис. 4). Но в нашем случае временное разрешение системы для одиночного фотоэлектрона (FWHM ≈ 350 пс) существенно меньше, чем длительность сцинтилляционного импульса. Поэтому в первом приближении спектр был аппроксимирован формулой (2). Результат аппроксимации и измеренное временное распределение показаны на рис. 5.

Мы исследовали временной отклик спектросмещающих волокон. Для этой цели спектросмещающие волокна были приклеены оптическим клеем к образцам сцинтиллятора UPS 923A. На рис. 6, 7 представлены временные спектры импульсов света от сцинтиллятора UPS 923A со спектросмещающими волокнами. Временные спектры также были аппроксимированы феноменологической формулой (2).

В таблице мы приводим основные полезные временные параметры формы световых импульсов для сцинтиллятора и спектросмещающих волокон: время

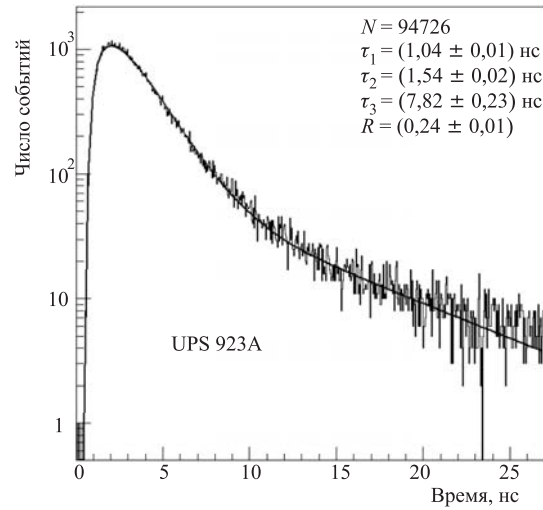


Рис. 5. Временной спектр импульсов света от образца сцинтиллятора UPS 923A

нарастания (уровень 0,1–0,9), время спада (уровень 0,9–0,1) полная ширина импульса на половине максимума (ПШПМ) (уровень 0,5–0,5) и длительность импульса (уровень 0,1–0,1). Параметры импульса света излучения Черенкова от плексигласового образца также приведены в таблице. Важно отметить, что нарастание импульса света от сцинтиллятора UPS 923A со спектросмещающими волокнами — быстрое (≈ 2 нс), поэтому счетчики со съемом света спектросмещающими волокнами могут быть использованы в быстрых системах совпадений и для времяпролетных измерений.

Измеренные временные параметры формы импульсов света

Материал	Время нарастания, нс (уровень 0,1–0,1)	Время спада, нс (уровень 0,9–0,1)	ПШПМ, нс (уровень 0,5–0,5)	Длительность импульса, нс (уровень 0,1–0,1)
UPS 923A	0,8	5,3	3	7,2
UPS 923A + K27	1,7	17,3	7,8	19,1
UPS 923A + Y11	2,2	18	8,8	22,4
Плексиглас	0,23	0,23	0,33	0,65

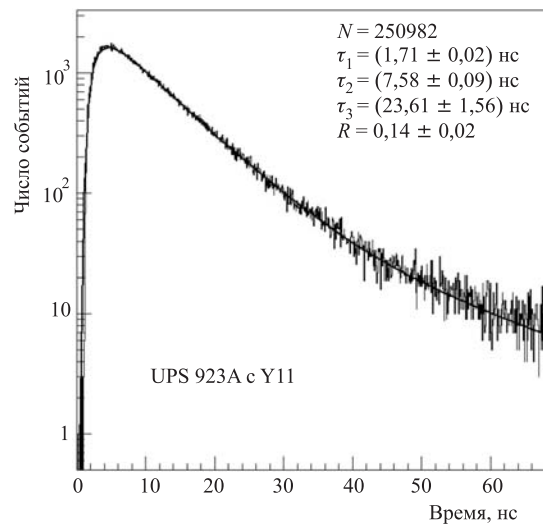


Рис. 6. Временной спектр импульсов света от образца сцинтиллятора UPS 923A со спектросмещающими волокнами Y 11(250)

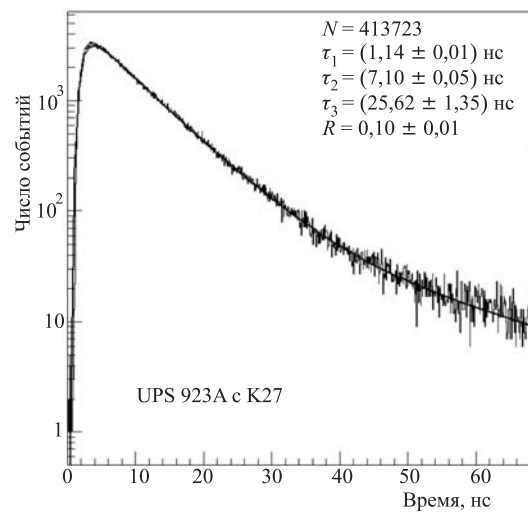


Рис. 7. Временной спектр импульсов света от образца сцинтиллятора UPS 923A со спектросмещающими волокнами K 27(200)

3. ДОЛГОВРЕМЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

Естественное старение сцинтиллятора зависит от использованных компонентов. Мы исследовали естественное старение пластмассового сцинтиллятора UPS 923A на основе полистирола (PS) и сравнили его с хорошо известным материалом NE 114 на основе поливинилтолуола (PVT). Для этих исследований были изготовлены два длинных счетчика из сцинтилляторов UPS 923A и NE 114. Конструкция счетчиков и методика измерений описаны в разд. 1.1.

Измерения светосбора со счетчиков были выполнены в декабре 1992 г. и ноябре 1996 г. Результаты суммированы в следующих рисунках. На рис. 8, 9 мы приводим светосбор как функцию расстояния от переднего торца счетчиков UPS 923A и NE 114 соответственно. Для сравнения мы аппроксимировали экспериментальные данные одиночной экспоненциальной функцией ($L = L_0 e^{-x/\lambda}$). Из рис. 8, 9 видно, что за четыре года светосбор со сцинтиллятора UPS 923A уменьшился на $\approx 30\%$ ($\approx 7,5\%$ /год), в то время как светосбор для сцинтиллятора NE 114 уменьшился на $\approx 70\%$ ($\approx 18\%$ /год).

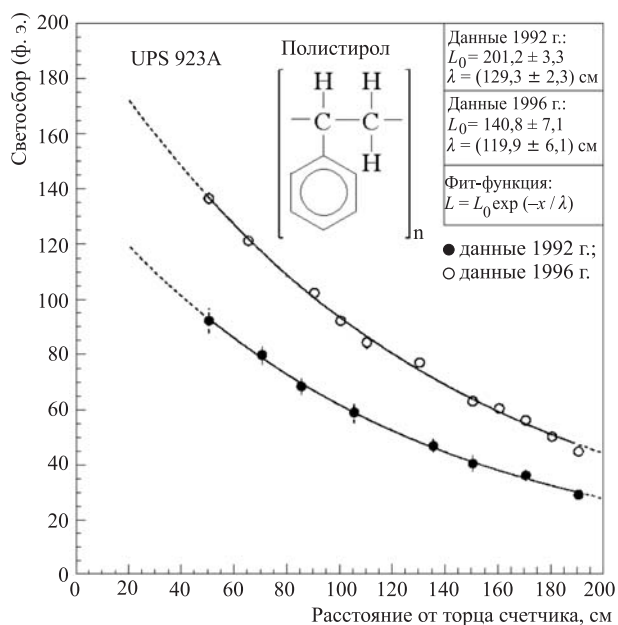


Рис. 8. Зависимость светосбора сцинтилляционного счетчика на основе полистирола (UPS 923A) от расстояния до переднего торца пластины. Измерения выполнены в 1992 и 1996 гг.

Таким образом, естественная деградация сцинтиллятора NE 114 идет более чем два раза быстрее, чем сцинтиллятора UPS 923A.

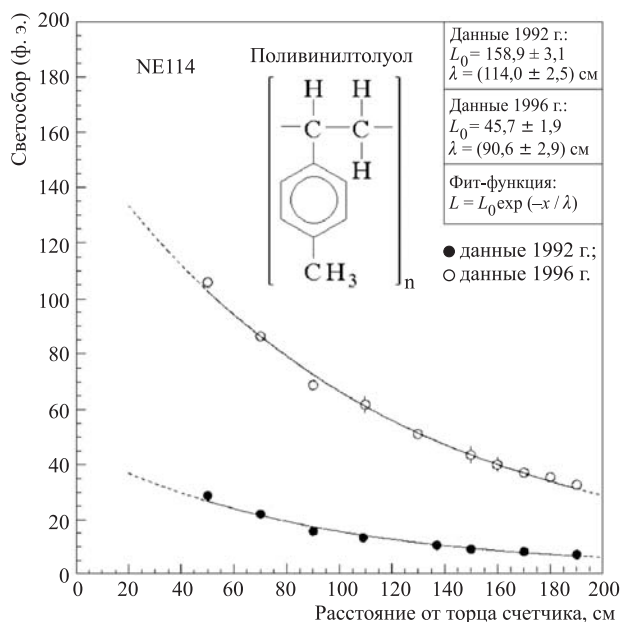


Рис. 9. Зависимость светосбора сцинтилляционного счетчика на основе поливинилтолуола (NE 114) от расстояния до переднего торца пластины. Измерения выполнены в 1992 и 1996 гг.

При визуальном осмотре сцинтилляторов обнаружено, что сцинтиллятор NE 114 приобрел желто-зеленый цвет в отличие от сцинтиллятора USP 923A, который остался почти голубым. Авторы работы [12] обнаружили, что за восьмилетний период сцинтиллятор NE 114 деградировал до такой степени, что при освещении дневным светом испущенный сцинтиллятором свет явно сместился в зеленую область и измерения показали, что коэффициент пропускания действительно уменьшился на 1 % на сантиметр в области 400–500 нм, где излучение сцинтиллятора наиболее интенсивное.

Полимерные основы PVT и PS сцинтилляторов имеют различную химическую структуру. В структуре PVT, в отличие от PS, в бензольном кольце один атом водорода замещен метильной группой ($-\text{CH}_3$) (рис. 8, 9).

Со временем в полимерной основе происходят процессы, сопровождающиеся деградацией ее химической и физической структуры. Это выражается в образовании на поверхности и в объеме сцинтиллятора точечных дефектов, микропор, трещин типа «серебра» и микротрещин.

Первоначально под действием внешних дестабилизирующих факторов таких, как температура, ультрафиолетовое излучение, кислород, влажность и внешняя радиоактивность, в PVT возможно образование трех типов свободных радикалов:

- 1) третичный метилбензильный радикал образуется при отрыве третичного атома водорода;
- 2) первичный бензильный радикал образуется при отрыве атома водорода от метильной группы;
- 3) бензильный радикал образуется при отрыве метильной группы.

В PS первоначально образуется всего один тип свободного радикала — третичный бензильный радикал при отрыве третичного атома водорода.

Каждый из образованных свободных радикалов, как известно, под действием кислорода и других внешних факторов может стать инициатором процесса деградации полимера, в частности, цепного процесса окисления. Отсюда следует, что вероятность начала процессов деградации и скорость их протекания в PVT будет в несколько раз больше, чем у PS, и это отличие было впервые наблюдаемо нами, как описано выше.

Мы также исследовали деградацию счетчика из сцинтиллятора USP 923A длиной 320 см со съемом света с помощью спектросмещающих волокон за период 2000–2004 гг. [2]. Изменение светосбора, выраженного в единицах фотоэлектронов от минимально ионизирующей частицы, во времени представлено на рис. 10. Сигнал измерялся на расстоянии 30 см от переднего торца сцинтилляционного счетчика. Для прогнозирования деградации светосбора со счетчика полученные данные аппроксимировались линейной функцией от времени:

$$L = L_0(1 - \alpha t), \quad (3)$$

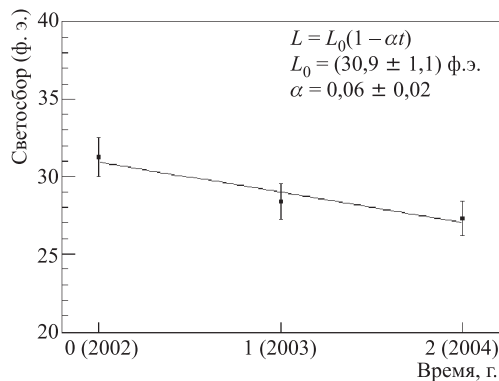


Рис. 10. Зависимость светосбора для счетчика длиной 320 см от времени

где L_0 — параметр, который соответствует светосбору на время первого измерения; α — скорость изменения наблюдаемого светосбора. Изменение светосбора составляло приблизительно 6 % в год.

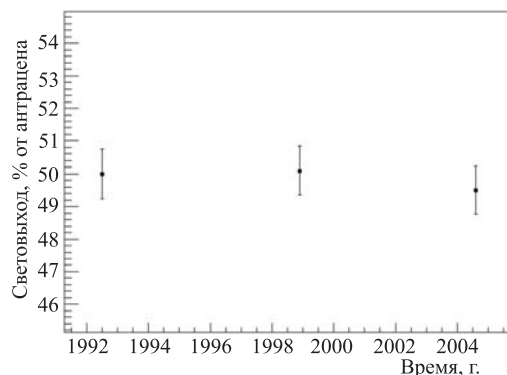


Рис. 11. Зависимость световыхода небольшого образца сцинтиллятора UPS 923A в процентах к антрацену от времени

Для оценки естественной деградации световыхода сцинтиллятора UPS 923A мы одновременно проводили измерения светосбора с небольшого образца в течение 12 лет. Образец — диск диаметром 16 мм и толщиной 10 мм с полированными поверхностями — хранился в темном месте в течение всего периода исследований. Измерения светосбора осуществлялись с помощью радиоактивного источника ^{137}Cs , которым возбуждался сцинтиллятор. Образец помещался непосредственно (без использования оптической смазки) в центр фотокатода фотоумножителя ЕМІ 9814В и измерялся амплитудный спектр электронов конверсии ^{137}Cs ($E_e = 624$ кэВ). Светосбор определялся по отношению к эталонному образцу, световыход которого был откалиброван в процентах от антрацена. На рис. 11 представлены результаты наших исследований. Мы не обнаружили естественной деградации световыхода сцинтиллятора UPS 923A за двенадцатилетний период.

Деградация сцинтилляционной эффективности (световыхода) в первую очередь определяется степенью повреждения люминесцентных добавок. В сцинтилляторе UPS 923A используются люминесцентные добавки РТР и РОРОР, которые в гораздо меньшей степени имеют склонность к термической и термоокислительной деструкции, чем полистирольная основа [13].

В заключение отметим, что естественное старение сцинтиллятора в основном определяется деструкцией полимерной основы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали характеристики украинского сцинтиллятора UPS 923A на основе полистирола и сравнили существенные из них со сцинтиллятором NE 114 на основе поливинилтолуола. Величины TAL UPS 923A и NE 114 сцинтилляционных пластин с размерами $200 \times 30 \times 20$ см сравнимы. В соответствии с законом Бугер–Ламберта величина BAL сцинтиллятора UPS 923A для длины волны света 441 нм равна ~ 260 см.

Предложен метод измерения объемной длины ослабления сцинтиллятором собственного излучения света. Было найдено, что объемная длина ослабления к собственному излучению не является постоянной величиной и строго зависит от пути распространения света в сцинтилляторе из-за эффекта реабсорции.

Время нарастания импульса света сцинтиллятора UPS 923A меньше 0,8 нс, а время нарастания импульса света от системы «сцинтиллятор UPS 923A со спектросмещающими волокнами» около 2 нс. Следовательно, счетчики со съемом света спектросмещающими волокнами могут быть использованы в быстрых системах совпадений для наблюдения редких частиц при наличии большого фона от других событий и для времяпролетных измерений.

Мы обнаружили, что естественная деградация сцинтиллятора NE 114 на основе поливинилтолуола идет более чем два раза быстрее, чем сцинтиллятора UPS 923A на основе полистирола.

Существенно, что за двенадцатилетний период не замечено естественной деградации световыхода украинского сцинтиллятора UPS 923A.

ЛИТЕРАТУРА

1. *The CDF II collaboration*. The CDF-II Detector Technical Design Report. Fermilab-Pub-96/390-E. 1996, Ch. 10.
2. *Artikov A. et al.* Design and construction of new central and forward muon counters for CDF II // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 538. P. 358–371.
3. *Bellamy E. H. et al.* Test of Long Scintillation Counters for Large Supercollider Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 343. P. 484–488.
4. *Bellamy E. H. et al.* Absolute calibration and monitoring of a spectrometric channel using a photomultiplier // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 339. P. 468–476.
5. *Kettenring G.* Measurement of the Reflectivities and Absorption Lengths at Different Wavelengths of Plastic Scintillator and Acrylglass // Nucl. Instr. Meth. 1975. V. 131. P. 451–456.
6. *Destruel P. et al.* A New Plastic Scintillator with Large Stokes Shift // Nucl. Instr. Meth. A. 1989. V. 276. P. 69–77.

7. *Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И.* Техника и практика спектроскопии // Физика и техника спектрального анализа. (Библиотека инженера). М.: Наука, 1976.
8. *Kirkby J.* Today and tomorrow for scintillating fibre (SCIFI) detectors. CERN-EP/87-60, 1987.
9. *Bollinger L. M., Thomas G. E.* Measurement of the time dependence of scintillation intensity by a delayed-coincidence method // Rev. Sci. Instr. 1961. V. 32. P. 1044.
10. *Birks J. B.* Fluorescence response functions and scintillation pulse shapes // J. Phys. B. 1968. V. 1. P. 946.
11. *Matveeva E. N. et al.* Measurements of timing properties of the fluorescence fast component from plastic scintillator // Nucl. Instr. Meth. 1981. V. 179. P. 277.
12. *Cabrera S. et al.* Making the Most of Aging Scintillator // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 453. P. 245
13. *Сенчишин В. Г., Везуб Н. В., Лавриенко С. Н.* Технология производства полимерных оптических изделий. Киев: Техника, 1992. С. 68.

Получено 15 августа 2005 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 29.09.2005.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,07. Тираж 255 экз. Заказ № 55035.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/