

ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

РОЛЬ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ В ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

М. В. Коржик

Явление сцинтилляций как способ обнаружения и измерения параметров ионизирующего излучения сыграло выдающуюся роль в развитии современной физики. Визуальное наблюдение сцинтилляций в ZnS позволило Резерфорду наблюдать α -частицы, излучаемые ядрами атомов, что, по существу, стало отправной точкой в экспериментальной ядерной физике и предопределило ее развитие. С развитием экспериментальной техники и, в частности, с появлением фотоэлектронных умножителей было установлено, что явление сцинтилляций предоставляет уникальную возможность для регистрации отдельных частиц и их параметров [1–3]. В относительно короткий период времени 1947–1951 гг. было установлено, что сцинтилляции могут наблюдаться в различных органических и неорганических кристаллических соединениях [4–7], жидкостях [8–11], газах [12–13] и полимерных соединениях [14]. Среди многообразия детекторов ионизирующих излучений сцинтилляционные детекторы на основе неорганических кристаллов обладают рядом неоспоримых преимуществ. Отметим основные из них.

1. Высокая плотность. Сцинтилляционные неорганические материалы, особенно синтетические кристаллические соединения на основе сложноструктурных оксидов, могут достигать плотности $\rho > 8 \text{ г/см}^3$. Это делает высокой их тормозную способность к различным видам ионизирующих излучений и обуславливает тем самым компактность детекторных систем, созданных на их основе. Высокая тормозная способность является особенно принципиальной в ячеистых (многодетекторных) системах.

Современная медицинская диагностика, основанная на изучении распределения специфических изотопов, вводимых в тело человека и животных, эксперименты по физике частиц и высоких энергий являются основными сферами применения таких систем. Действительно, в быстро прогрессирующих диагностических методах, основанных на позитронной эмиссионной томографии, высокое разрешение $\Gamma \sim 2 \text{ мм}$ в реконструкции изображения распределения изотопов удастся получить лишь при применении матричных детекторов на основе элементов из сцинтилляционных кристаллов тригерманата висмута (BGO) с плотностью $7,12 \text{ г/см}^3$ [15]. Высокая плотность вещества детектора, как у кристаллов BGO, позволяет снижать в первую очередь поперечные размеры детекторных ячеек d , поскольку $\Gamma \sim d/2\Theta a$, где a – константа, обусловленная спецификой регистрации γ -квантов, образующихся при аннигиляции позитронов.

В физике частиц измерение параметров частиц через электромагнитную компоненту распадов является наиболее широко используемым в настоящее время [16]. Это обусловлено тем, что сечение распада по электромагнитному

каналу исследуемых частиц на современных ускорителях [17] значительно превосходит сечения других каналов распада. Действительно, разрешение по массам частиц, регистрируемых через, например, двухфотонный распад с помощью детекторов полного поглощения (электромагнитных калориметров), зависит от энергетического разрешения и углового расхождения θ [рад] двух фотонов с энергиями $E_{\gamma 1}, E_{\gamma 2}$ [ГэВ] как

$$\frac{\delta M}{M} = \frac{1}{2} \left[\frac{\delta E_{\gamma 1}}{E_{\gamma 1}} \oplus \frac{\delta E_{\gamma 2}}{E_{\gamma 2}} \oplus \frac{\delta \theta}{\tan(\theta/2)} \right], \quad (1)$$

при этом

$$\left(\frac{\delta E_{\gamma}}{E_{\gamma}} \right)^2 = \left(\frac{a}{\sqrt{E_{\gamma}}} \right)^2 + \left(\frac{b}{E} \right)^2 + c^2, \quad (2)$$

где E – энергия γ -квантов, a – стохастическая компонента, b – энергетический эквивалент шума, c – систематическая компонента [18]. Стохастическая компонента зависит от продольных и поперечных флуктуаций энергии, выделившейся в электромагнитном ливне, в то время как в систематическую компоненту существенный вклад вносят утечки энергии ливня через боковые и торцевые поверхности кристалла. Таким образом, увеличивая плотность сцинтилляционной среды и уменьшая тем самым радиационную длину X_0 и радиус Мольера R_M , характеризующие геометрические параметры электромагнитного ливня в среде при прохождении через нее частиц и γ -квантов высоких энергий [21], удается достичь высоких значений энергетического разрешения, поскольку $a \sim \sqrt{X_0}$, а параметр c также по определенному закону уменьшается с уменьшением X_0 и R_M [16, 19].

Значения энергетического разрешения, достигнутые в детекторах полного поглощения (электромагнитных калориметрах) различных экспериментов, с помощью которых проводились измерения в течение последних 20 лет в различных лабораториях мира [20], приведены на рис. 1. Очевидным фактом является то, что лучшее энергетическое разрешение достигается в однородных калориметрах при использовании тяжелых сцинтилляционных кристаллов. Кроме того, электромагнитные калориметры на основе тяжелых неорганических сцинтилляционных кристаллов являются более предпочтительными для создания 4 π -детекторов, поскольку обеспечивают лучшее электрон-адронное разрешение, лучшие возможности для выделения π^0 мезонов в реконструкции событий, компактность детекторов на пространственно ограниченных экспериментальных подземных площадках. Эти неоспоримые преимущества предопределили использование в двух (из четырех) экспериментах, CMS и ALICE, на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРНе однородных калориметров на основе тяжелых неорганических сцинтилляторов [18, 21].

Наряду с высоким энергетическим разрешением высокая плотность сцинтилляционного детектора, особенно в физике частиц, позволяет улучшить пространственное разрешение событий, поскольку вследствие уменьшения флуктуаций

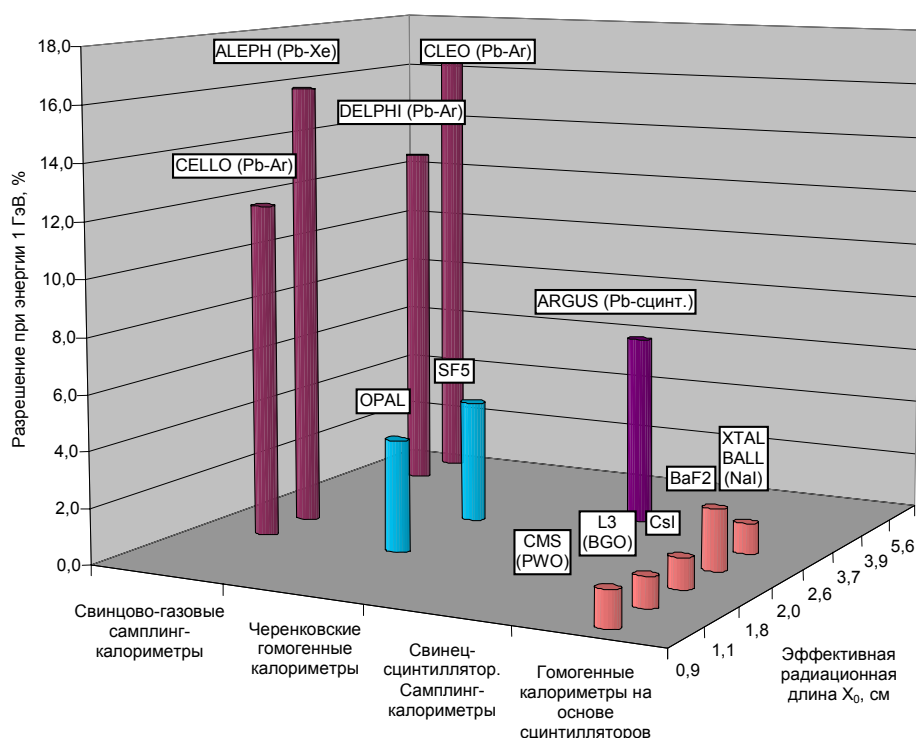


Рис. 1. Значения энергетического разрешения в детекторах полного поглощения (электромагнитных калориметрах) различных экспериментов

электромагнитного ливня возрастает точность определения выделенной им энергии в каждом кристалле детектора. Это, в свою очередь, также улучшает разрешение по массам частиц за счет уменьшения $\delta\theta$, как следует из выражения (1).

2. Высокое быстродействие. Кристаллические сцинтилляционные материалы имеют широкий спектр времени высвечивания сцинтилляций, причем могут излучать весьма короткие импульсы света с постоянной времени высвечивания $\tau = 600$ пс, как, например, BaF_2 [22]. Это позволяет использовать их для регистрации γ -квантов при высоких нагрузках, а также в системах, где требуется высокое временное разрешение. Это особенно актуально для определения коротких интервалов времени и для работы в быстрых схемах совпадений, поскольку точность временных измерений сцинтилляционных детекторов пропорциональна $\sqrt{\tau}$.

Таким образом, комбинация высокой плотности и быстрого времени отклика детектора за счет быстрого высвечивания сцинтилляций, которые могут быть реализованы одновременно лишь в кристаллических сцинтилляторах, предоставляет уникальную возможность регистрировать редкие события в физике частиц за счет увеличения светимости ускорителей. Такая возможность реализуется на современных ускорителях коллайдерного типа. Высокое временное разрешение кристаллических сцинтилляционных материалов позволяет создать диагно-

стическое медицинское оборудование, основанное на дополнительном измерении времени пролета γ -квантов [15], что приводит к дополнительному увеличению контраста получаемого изображения распределения вводимого в тело радиоактивного изотопа.

В нейтронно-активационном методе исследования свойств пород в скважинах сочетание высокой тормозной способности к гамма-излучению, высоких временного и амплитудного разрешений является принципиальным в случае увеличения экспрессности измерений, что достигается лишь при использовании детекторов на основе тяжелых кристаллических сцинтилляционных материалов.

3. Световыход. Неорганические кристаллические сцинтилляторы позволяют достичь наибольшего значения световыхода Y по сравнению с другими сцинтилляционными материалами. По выходу сцинтилляций в единицу времени $S_\tau = Y/\tau$ кристаллические сцинтилляторы на основе соединений редкоземельных элементов при комнатной температуре превосходят жидкий ксенон [23]. Поскольку точность временных измерений сцинтилляционными детекторами пропорциональна $1/\sqrt{S_\tau}$, а энергетическое разрешение, измеренное в заданном временном интервале, пропорционально $\sqrt{Y}$, то кристаллические сцинтилляторы позволяют достичь наилучшего сочетания энергетического и временного разрешения в широком диапазоне энергий γ -квантов.

4. Идентификация частиц. Ввиду уникальной линейности между амплитудой сцинтилляций и энергией γ -квантов и частиц, поглощенных в веществе сцинтиллятора, а также различия наклона этих зависимостей для частиц, ионов и γ -квантов [24] неорганические кристаллические сцинтилляторы широко используются для идентификации частиц и пространственно-временного распределения их смешанных полей.

5. Объем. Уровень современной технологии производства кристаллических сцинтилляторов позволяет создавать детекторы с объемом до нескольких кубических метров. Это делает возможным детектирование не только редких событий при взаимодействии частиц на ускорителях, но и высокоэнергетических космических лучей. В сравнении с черенковскими и сцинтилляционными детекторами на основе сжиженных газов кристаллические сцинтилляторы обладают несравненно большими значениями удельного выхода сцинтилляций за единицу времени $\left[\frac{\text{фот}}{\text{MeV} \cdot \text{см}^3 \cdot \text{нс}} \right]$, что делает их весьма привлекательными для космических экспериментов. С другой стороны, это же позволяет создавать на основе сцинтилляционных кристаллов миниатюрные детекторы для внутривенной и пероральной диагностики, обеспечивающие высокую экспрессность измерений.

6. Радиационная стойкость. Сцинтилляционные неорганические кристаллические материалы сохраняют свою работоспособность и долговременную стабильность параметров в интенсивных радиационных полях, что является принципиальным для измерительных систем, используемых в космическом пространстве, при исследовании недр методом гамма-каротажа, в физике высоких

энергий с использованием пучков с высокой светимостью. Высокая стойкость к изменению параметров кристаллов под действием ионизирующего излучения обусловлена высоким уровнем технологии их производства, обеспечивающей выпуск кристаллов с низким уровнем неконтролируемых структурных дефектов.

7. Долговечность эксплуатационных параметров. Подобно другим материалам, обладающим высоким структурным совершенством, кристаллы сохраняют свои физико-химические параметры в течение длительного времени. По этой причине большинство планируемых экспериментов в физике частиц и высоких энергий, время проведения которых от проектирования до анализа данных занимает 15–20 лет, ориентируются на применение во многих детекторных подсистемах кристаллических сцинтилляторов.

Литература

1. Broser V. I., Kallmann H. // Z. Naturforschg. 1947. Vol. 2a. P. 439–440.
2. Marshall F. H., Coltman J. W. // Phys. Rev. 1947. Vol. 72. P. 528.
3. Coltman J. W., Marshall F. H. // Phys. Rev. 1947. Vol. 72. P. 528.
4. Moon R. J. // Phys. Rev. 1948. Vol. 73. P. 1210.
5. Kallmann H. // Phys. Rev. 1949. Vol. 75, № 4.
6. Collins G. B., Hoyt R. C. // Phys. Rev. 1948. Vol. 73. P. 1259.
7. Bell P. R. // Phys. Rev. 1948. Vol. 73. P. 1405.
8. Kallmann H. // Proc. Phys. Soc. (London), Letters to the Editor. 1950. P. 621.
9. Kallmann H., Furst M. // Phys. Rev. 1950. Vol. 79, № 5. P. 857.
10. Kallmann H., Furst M. // Phys. Rev. 1951. Vol. 81, № 5. P. 853.
11. Furst M., Kallmann H. // Phys. Rev. 1951. Vol. 85, № 5. P. 1951.
12. Reynolds G. T. // Nucleonics. 1950. Vol. 6, № 5. P. 488.
13. Swank R. K. // Nucleonics. 1954. Vol. 12, № 3. P. 14.
14. Schorr M. G., Torney F. L. // Proc. Phys. Soc. (London), Letters to the Editor. 1950. P. 474.
15. Derenzo S. E., Moses W. W., Huesman R. H., Budinger T. F. // Quantification of Brain Function: Tracer Kinetics and Image Analysis in Brain PET. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1993. P. 27.
16. Virdee T. Performance and limitations of electromagnetic calorimeters in Calorimetry in High Energy Physics / Ed. Antonio Ereditato. World Scientific. 1992. P. 5.
17. Newman H. // Heavy Scintillators for Scientific and Industrial Applications. Frontiers, 1993. P. 5.
18. ECAL CMS Technical Design Report «Electromagnetic Calorimeter» CERN/LHCC 97. December, 1997.
19. Amaldi H. // Physica Scripta. 1981. № 23. P. 409.
20. Lorenz E. // Nucl. Instr. Meth. 1984. Vol. 225. P. 500.
21. ALICE Technical Proposal, CERN/LHCC 95-71, 15 December, 1995.
22. «Scintillation Detectors». Crismatec, Saint Gobain. Catalog, 1992.
23. Nortrop I. A., Nobles R. A. // Nucleonics. 1956. Vol. 14, № 4. P. 36.
24. Birks J. B. // Proc. Phys. Soc. (London), Letters to the Editor. 1951. P. 364.

THE ROLE OF SCINTILLATION DETECTORS IN NUCLEAR-PHYSICS MEASUREMENTS

M. V. Korzhik

Scintillation detectors on a base of inorganic crystals have a significant importance in various branches of modern science and technology. They are widely applied in high energy physics experiments, medical diagnostics and biological research. The crucial characteristics and advantages of scintillation materials over other types of detectors are discussed.