

РЕГИСТРАЦИЯ ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ Пороговой Эффективности

В.М. Гришин, С.К. Котельников

Обсуждается применение метода пороговой эффективности для регистрации рентгеновского переходного излучения в газовых пропорциональных детекторах толщиной ~ 1 см. Обработка экспериментальных данных показывает, что данный метод не уступает по сепарирующей способности традиционным методам полного энергосъема и счета кластеров.

Рентгеновское переходное излучение (РПИ) широко применяется для разделения электронов и адронов в области импульсов частиц $p \lesssim 100$ ГэВ/с, а также для разделения адронов при $p \gtrsim 100$ ГэВ/с /1/. Поскольку РПИ испускается под малыми углами $\sim 1/\gamma$ (γ — лоренц-фактор частицы) относительно направления движения частицы, в практических идентификаторах регистрация РПИ всегда происходит на фоне ионизационных потерь энергии излучающей частицы. В многомодульных идентификаторах (модуль представляет собой совокупность радиатора и детектора) наибольшее распространение получили следующие методы регистрации РПИ: метод полного энергосъема (Q-метод), когда в расположенной за слоистым или пористым радиатором РПИ пропорциональной камере толщиной $l \gtrsim 1$ см анализируется среднее значение полного энергосъема Δ , обусловленное ионизационными потерями излучающей частицы и фотопоглощением РПИ /2/, и метод счета кластеров (N-метод), когда в дрейфовой камере с помощью специальной быстрой электроники измеряется число кластеров (сгустков) ионизации с зарядом, превышающим некоторое пороговое значение /3/. Также используется и более сложный метод максимального правдоподобия (W-метод), учитывающий детали отличия пространственного и энергетического распределений фотопоглощения квантов РПИ и фона ионизационных потерь излучающей частицы /4/. Все эти методы требуют сравнительно дорогой электроники и в ряде случаев (Q- и W-методы) характеризуются низким быстродействием. В настоящей заметке предлагается еще один метод выделения сигнала РПИ на фоне ионизационных потерь энергии, который, на наш взгляд, удачно сочетает простоту аппаратной реализации с высоким быстродействием.

По сравнению со спектром передач энергии в отдельных ионизирующих столкновениях релятивистской заряженной частицы энергетический спектр квантов РПИ является заметно менее интенсивным и, как правило, более жестким. Поэтому фотопоглощение квантов РПИ дает вклад, в основном, в высокоэнергетический "хвост" распределения полного энергосъема $\Phi(l, \Delta, \gamma)$.

Привлекательным с точки зрения измерения параметром, связанным с хвостом распределения $\Phi(l, \Delta, \gamma)$, является его относительная площадь в области выше некоторого порогового энерговыделения Δ_1 — так наз. "пороговая эффективность детектора" $\theta(l, \Delta_1, \gamma)$. Этот параметр рассматривался ранее для идентификации частиц по ионизационным потерям энергии ($\gamma \approx 500$) /5/ и определяется следующим соотношением:

$$\theta(l, \Delta_1, \gamma) = \int_{\Delta_1}^{\infty} \Phi(l, \Delta, \gamma) d\Delta, \quad (\theta(l, 0, \gamma) = 1).$$

В основе метода пороговой эффективности (θ -метод) лежит измерение зависимости $\theta(\gamma)$ при фиксированных l и Δ_1 . В многомодульном детекторе РПИ с числом модулей N экспериментальной оценкой θ служит отношение N_1/N , где N_1 — число детекторов, в которых $\Delta \geq \Delta_1$, причем величина θ подчиняется биномиальному распределению с дисперсией $\sigma^2 = \theta(1 - \theta)/N$. Поскольку с ростом лоренц-фактора в области $\gamma \geq 10^3$ спектр РПИ становится несколько интенсивнее и жестче, следует ожидать релятивистского возрастания пороговой эффективности, и при достаточном числе модулей различие значений θ в единицах стандартных отклонений σ может стать достаточным для надежного разделения частиц с одинаковым импульсом, имеющим разные массы.

Для проверки этого предположения рассчитаем пороговую эффективность для приведенных в /6/ экспериментальных распределений полного энерговыделения. Детектор РПИ состоит из 100-слойного радиатора (майлар — 12,7 мкм, воздух — 762 мкм) и пропорционального газового детектора толщиной $l = 1,7$ см, наполненного смесью $0,93\text{Ag} + 0,07\text{CH}_4$ (1 атм, 0°C) /6/. На рис. 1а показаны зависимости пороговой эффективности от порога Δ_1 для электронов и пионов с импульсом 3 ГэВ/с ($\gamma_\pi \approx 21,6$, $\gamma_e \approx 5871$). На рис. 1б приведены энергетические зависимости релятивистского роста пороговой эффективности $R = \theta_e/\theta_\pi$, коэффициента сепарации S :

$$S = 2(\theta_e - \theta_\pi)/(\sigma_e + \sigma_\pi),$$

и коэффициента режекции γ :

$$\gamma = \epsilon_\pi/\epsilon_e, \quad \epsilon_i = \int_{\tilde{\theta}}^1 p_i(\theta) d\theta, \quad i = e, \pi \quad (\epsilon_e = 0,9), \quad (1)$$

где p_i — плотность вероятности (биномиальная) величины θ_i , а $\tilde{\theta}$ определяется из условия $\epsilon_e = 0,9$. Значения S и γ рассчитывались для числа модулей $N = 25$ (в этом случае p_i хорошо аппроксимируется гауссовским распределением). Обращает на себя внимание хорошая сепарирующая способность θ -метода: при $\Delta_1 \approx 7$ кэВ (оптимальный порог для данного детектора) $S \sim 4$ и $\gamma \sim 10^{-3}$ (т.е. при эффективности регистрации электрона 0,9 примесь пионов находится на

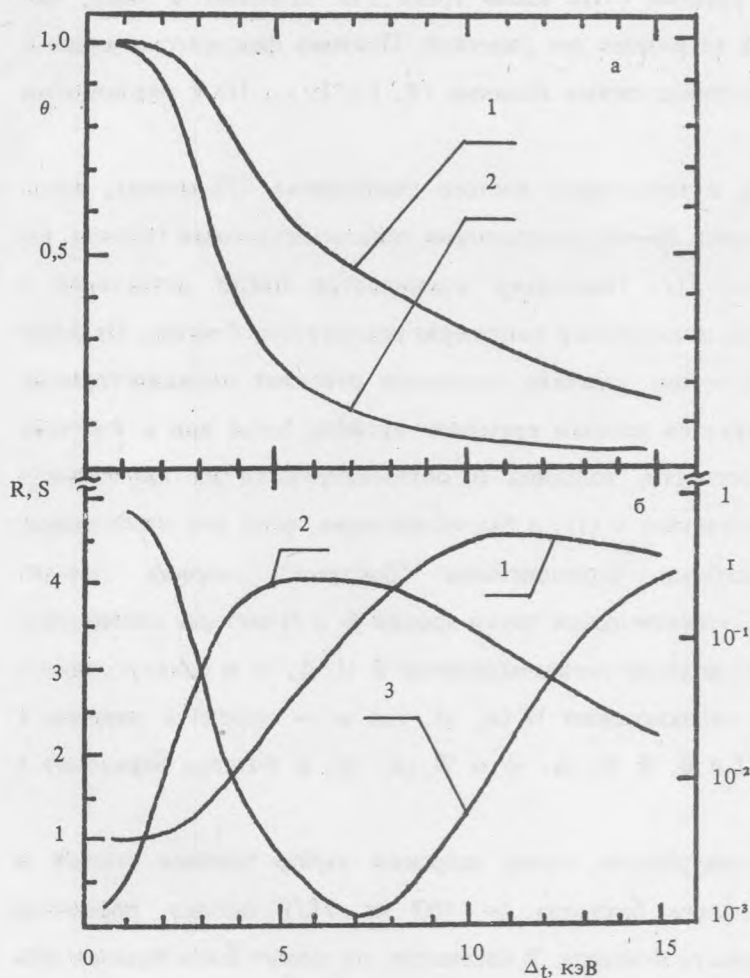


Рис. 1. а) Зависимости пороговой эффективности θ от порогового энерговыделения Δ_t для электронов (1) и пионов (2) с импульсом 3 ГэВ/с. б) Энергетические зависимости отношения пороговых эффективностей (релятивистского роста) R (1), коэффициента сепарации S (2) и коэффициента режекции γ (3) электронов и пионов. Детектор РПИ: радиатор — 100 пленок из майлара (12,7 мкм) с воздушными зазорами (762 мкм); детектор — многопроволочная пропорциональная камера ($l = 1,7$ см, $0,93\text{Ar} + 0,07\text{CH}_4$, 1 атм, 0°C) /6/. Число модулей $N = 25$.

уровне 0,1%). Аналогичные по порядку величины значения γ получаются в Q- и N-методах при близких значениях $N \sim 10\text{--}40$ и длины детектора $\sim 1\text{--}2$ м /1—3/. Следует отметить, что рассмотренная схема далека от оптимальной. Гораздо лучшего разделения можно достичь, применяя, например, радиатор из полипропилена и наполняя детектор газовой смесью на основе ксенона или криптона /1/.

Сделаем несколько замечаний относительно N-метода. Если он реализуется в дрейфовой камере, то, вследствие эффектов конечности пробегов δ - и фотоэлектронов с энергией ≥ 5 кэВ, диффузии за время дрейфа и разрешающего времени электроники оценивается число n случаев, когда полное энерговыделение на длине трека частицы $l \sim 1\text{--}2$ мм превышает порог, т.е. — пороговая эффективность $\theta = n/N$, где $N = L/l$ (L — длина дрейфа). Поскольку $n \leq N$, следует пользоваться биномиальным распределением, а не распределением Пуассона, как это обычно делают в N-методе. Лишь для $\theta \leq 0,1$ (отсутствие РПИ) можно пользоваться распределением

Пуассона как предельным случаем биномиального. Кроме того, процессы переноса и неравномерность точек фотопоглощения квантов РПИ вдоль трека /7/ приводят к тому, что пороговая эффективность будет различной на разных его участках. Поэтому фактически число n представляет собой сумму биномиально распределенных величин $(\theta_i, i = 1, \dots, N)$ с различными средними значениями.

θ -метод наиболее близок к N-методу с геометрией частого считывания (FS-метод), когда радиатор разбивается на секции с числом слоев 20—40, разделенные тонкими газовыми (ксенон, $l \sim 2$ мм) пропорциональными детекторами /1/. Поскольку оценивается число детекторов с кластерами, имеющими заряд выше порога, практически напрямую реализуется θ -метод. Отличие состоит в критериях оптимизации. В N-методе толщина детектора отвечает двухкластерному разрешению ($l \lesssim 2-3$ мм /1/) и лимитируется полным временем дрейфа, тогда как в θ -методе параметры радиатора и детектора (в частности, толщина D) оптимизируются на наименьшее значение коэффициента режекции γ по значению θ (1), а быстродействие, если это необходимо, может быть увеличено другими способами (применением "быстрых" газовых смесей, секционированием детектора /8/ и т.п.). С теоретической точки зрения θ - и N-методы находятся в таком же соотношении, как распределение полного энергосвыделения $\Phi(l, \Delta, \gamma)$ и спектр полного числа (частицы и РПИ) ионизирующих столкновений $W(\omega, \gamma)$, где ω — передача энергии в отдельном столкновении, а именно: при $l \rightarrow 0$, $\Phi(0, \Delta, \gamma) \sim W(\Delta, \gamma)$, и θ -метод переходит в N-метод.

Возможность применения дешевой электроники, более широкий выбор газовых смесей и простая структура сигнала, обеспечивающая быструю (~ 100 нс /8/) оценку пороговой эффективности, указывают на перспективность θ -метода. В частности, он может быть полезен при использовании РПИ-идентификаторов в детекторах большой площади (эксперименты на встречных пучках, космические лучи), или в тех случаях, когда информацию о лоренц-факторе релятивистской заряженной частицы необходимо включать в быстрый триггер.

Авторы благодарят Г.И. Мерзона за полезное обсуждение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dolgoshein B. Nucl. Instr. and Meth., **A252**, 137 (1986).
2. Bauche B. et al. Proc. of the Int. Conf. on Instrumentation for Colliding Beam Physics, SLAC, Stanford, 122 (1982).
3. Ludlam T. et al. Nucl. Instr. and Meth., **180**, 413 (1981).
4. Cherry M.L. et al. Phys. Rev., **D10**, 3594 (1974).
5. Гришин В.М., Ермилова В.К. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 10, 40 (1989).
6. Cobb J.H. Ph. D. Thesis, Oxford (1975).
7. Grishin V.M., Kotelnikov S.K., submitted to Nucl. Instr. and Meth. A.
8. Errede D. et al. Preprint FERMILAB-Pub-91/67-E, submitted to Nucl. Instr. and Meth. A.

Поступила в редакцию 9 октября 1991 г.