



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97-201

P13-97-201

Н.П.Кравчук

ОГРАНИЧЕНИЯ НА КООРДИНАТНУЮ ТОЧНОСТЬ  
ПРОВОЛОЧНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ДЕТЕКТОРОВ  
ПРИ НАКЛОННОМ ПРОХОЖДЕНИИ ТРЕКА

Направлено в журнал «Nuclear Instruments and Methods»

1997

## 1. Введение

Проволочные газоразрядные камеры широко используются в экспериментах в качестве координатных детекторов. Вопросы, связанные с их точностными возможностями, имеют большое практическое значение. В ряде работ [1 - 9] рассмотрено влияние на пространственное разрешение проволочных камер таких факторов, как дискретная структура катодных площадок или полосок; точность, с которой известна форма распределения индуцированного на катоде заряда; смещение анодных проволочек; разная длина участка проволочки, на котором развивается лавина; развитие лавины с одной стороны проволочки; флуктуация ионизационных потерь и др.

Ограничения на точность измерения координат связаны: с механизмом протекания процесса в детекторе, со способом получения информации, а также с геометрическими параметрами, определяющими пространственное расположение трека по отношению к проволочкам детектора. В работах, посвященных исследованию пространственного разрешения проволочных камер, последний вопрос недостаточно изучен, авторы ограничиваются рассмотрением перпендикулярного прохождения трека или меняют только один из углов.

В данной работе показано, что ошибки при определении координат места прохождения наклонным треком камеры имеют значительную величину, и их необходимо учитывать. Особенно это относится к установкам, в которых угол прохождения частицами камер меняется в широком диапазоне.

## 2. Исходные предположения

Газоразрядная проволочная камера состоит из анодных проволочек, расположенных с шагом  $S$ , на расстояниях  $\pm L$  от них размещаются катоды. Электроны, образовавшиеся вдоль трека регистрируемой частицы, в электрическом поле дрейфуют к анодным проволочкам. Вблизи проволочки в области сильного электрического поля развивается электронная лавина. Координаты точки пересечения трека и плоскости анодных проволочек в такой камере определяются, используя координаты места образования лавины.

На рис.1 изображено взаимное расположение трека (прямая  $OK$ ) и плоской камеры. Анодные проволочки камеры расположены в плоскости  $xOy$  (или  $z = 0$ ), параллельно оси  $y$  (прямая  $CA$ ). За начало сферической системы координат принята точка пересечения трека и плоскости  $xOy$ .

Пространственное расположение трека определяется широтой — углом  $\vartheta$ , долготой — углом  $\varphi$  и расстоянием вдоль оси  $x$  до ближайшей проволоочки —  $x_0$ .

В дальнейшем предполагается:

- проволоочки располагаются абсолютно точно;
- эффективность детектора равна 100%;
- трек прямой и один;
- весь отрезок, соединяющий трек и проволочку по кратчайшему расстоянию, лежит в области камеры с радиально расположенными силовыми линиями;
- поперечной диффузией электронов пренебрегаем;
- $y$  — координата центра распределения лавин или одиночной лавины лежит в точке пересечения проволочки и прямой, соединяющей трек и проволочку по кратчайшему расстоянию;
- лавина равномерно охватывает проволочку ( $x$  и  $y$  координаты лавины и проволочки совпадают);
- предыстория (пространственное расположение) трека неизвестна;
- известен момент пролета частицы через детектор.

Отклонение от перечисленных условий влияет на точность определения координат, но в данной работе эти вопросы не рассматриваются.

### 3. Ограничение на точность определения $x$ координаты

Рассмотрим обычно используемый способ определения  $x$  координаты (координаты в направлении, перпендикулярном проволочкам) в камере, работающей в дрейфовом режиме. В такой камере реально измеряемая величина — это время между моментом прохождения трека через детектор и моментом развития лавины вблизи проволочки. В рамках перечисленных предположений, зная скорость дрейфа электронов в зависимости от места и свойств среды, можно рассчитать кратчайшее расстояние между треком и проволочкой —  $d$ , равное длине отрезка  $KA$  (рис.1). Если отсутствует дополнительная информация, параметр  $d$  принимается

за координату  $x_0$  точки пересечения треком плоскости детектора ( $z = 0$ ). Реальная координата  $x_0$  равна

$$x_0 = \pm(d + \Delta x), \quad (1)$$

где  $\Delta x$  — ошибка определения координаты  $x$ .

Знак  $\pm$  появляется из-за "право-левой" неопределенности положения точки  $K$  относительно проволочки. Далее предполагаем, что этот вопрос решается отдельно.

Кратчайшее расстояние ( $d$ ) между прямыми — есть длина их общего перпендикуляра. Аналитическая геометрия в пространстве дает выражение для кратчайшего расстояния между непараллельными прямыми:

$$d = \frac{|[(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \vec{a}_1 \vec{a}_2]|}{|\vec{a}_1 \times \vec{a}_2|}, \quad (2)$$

где,  $\vec{r}_1 = \{0, 0, 0\}$  и  $\vec{r}_2 = \{x_0, 0, 0\}$  — радиусы-векторы точек  $O$  и  $C$ ;

$\vec{a}_1 = \{\sin \vartheta \cos \varphi, \sin \vartheta \sin \varphi, \cos \vartheta\}$  и  $\vec{a}_2 = \{0, 1, 0\}$  — направляющие векторы трека и оси  $y$ .

Числитель дроби — есть смешанное (векторно-скалярное), а знаменатель — векторное произведение. В сферических координатах для нашего случая выражение (2) имеет вид

$$d = \frac{x_0 \cos \vartheta}{\sqrt{\cos^2 \vartheta + \sin^2 \vartheta \cos^2 \varphi}} = \frac{x_0}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \vartheta \cos^2 \varphi}}. \quad (3)$$

Ошибку измерения  $x$  координаты удобно представить в виде

$$\frac{\Delta x}{x_0} = \frac{(x_0 - d)}{x_0} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \vartheta \cos^2 \varphi}}. \quad (4)$$

С учетом четности и симметрии функции  $d(\vartheta, \varphi)$  на рис.2 приведена зависимость  $\Delta x/x_0$  только для углов ( $0^\circ < \varphi, \vartheta < 75^\circ$ ). При больших углах сильно возрастает количество сработавших проволочек и длина участка вдоль проволочки, на котором возможно развитие лавины.

В условиях равномерной загрузки детектора при одиночном срабатывании проволочки  $|x_0| \leq S/2$  и по теории вероятности стандартное отклонение  $\sigma_{x_0} = S/\sqrt{12}$ .

Срабатывание нескольких проволочек в детекторе дает дополнительную информацию об угле наклона трека ( $\vartheta$ ) и позволяет улучшить точность определения  $x$  координаты, так как  $x_0/d = x_0^2/d^2 = \operatorname{const}$ ,

а информацию с каждой проволоочки ( $i$ ) можно рассматривать как независимое измерение  $x$  координаты. Для случая срабатывания нескольких проволоочек кратчайшее расстояние до  $i$ -й проволоочки ( $d^i$ ) может быть больше  $S/2$ .

Область применимости формулы (4) ограничена условием: трек должен пересекать область около проволоочки с радиальным расположением силовых линий, это соответствует значениям  $d < \min[L, S/2]$ . В противном случае путь дрейфа электронов сильно отличается от кратчайшего расстояния от проволоочки до трека. В многопроволочных пропорциональных камерах обычно  $L > S$ , а в камерах, работающих в дрейфовом режиме,  $L$  может быть в несколько раз меньше  $S$ .

Выше приведенные рассуждения о точности определения  $x$  координаты относятся к случаю, когда имеется временной триггер, и измеряется время дрейфа первичных электронов в камере. Если регистрируются только номера сработавших проволоочек, то координата  $x$  определяется с ошибкой  $\pm S/2$  и  $\sigma_x = S/\sqrt{12}$ .

#### 4. Ограничение на точность определения $y$ координаты (вдоль проволоочки)

В проволочных газоразрядных детекторах координата вдоль анодной проволоочки обычно определяется:

- (1) — из анализа временной или амплитудной информации с обоих концов проволоочки;
- из анализа амплитуд сигналов, индуцированных на окружающих проволоочку электродах.

Точность измерения в первом случае определяется свойствами проволоочки и возможностями используемой аппаратуры, во втором — параметрами окружающих проволоочку электродов, возможностями аппаратуры и методом обработки информации.

В обоих случаях при наклонном прохождении трека через детектор возникает дополнительная ошибка в измерении координат. Она связана с тем, что вместо координаты точки  $O$  ( $y = 0$ ) измеряется  $y$  координата места развития лавины на проволочке.

Ошибка измерения  $y$  координаты ( $\Delta y$ ) равна длине отрезка  $CA$  на рис.1 и определяется из уравнения, имеющего в сферических координатах вид

$$\Delta y^2(\text{ctg}^2 \vartheta + \cos^2 \varphi) - \Delta y 2x_0 \sin \varphi \cos \varphi + (x_0^2 - d^2) \sin^2 \varphi = 0, \quad (5)$$

где  $d \equiv KA$  — кратчайшее расстояние между треком и проволочкой (3).

Уравнение (5) имеет решение

$$\Delta y = \frac{x_0 \sin \varphi \cos \varphi}{\text{ctg}^2 \vartheta + \cos^2 \varphi}. \quad (6)$$

Из этого выражения видно, что необходимо рассматривать общий случай наклонного прохождения трека через камеру, так как при повороте трека только в одной плоскости  $x = 0$  или  $y = 0$  ( $\varphi = k\pi/2$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ ) центр места развития лавины совпадает с точкой  $C$  на рис.1 и  $\Delta y = 0$ .

Ошибка измерения  $y$  координаты может принимать значения  $\pm |\Delta y|$  из-за нечетности функции  $\Delta y(\varphi, \vartheta)$  по углу  $\varphi$ . Предполагая, что вопрос неопределенности угла  $\varphi$  решается отдельно, на рис.3 показана зависимость  $\Delta y(\varphi, \vartheta)$  в единицах  $x_0$  только для углов, представляющих практический интерес.

Срабатывание нескольких проволоочек. В отличие от ситуации с  $x$  координатой, описанной в разделе (3), множественное срабатывание проволоочек при использовании только информации, получаемой с катодных поверхностей или с концов проволоочек, не позволяет улучшить точность определения  $y$  координаты. Так как для разных проволоочек  $i$  (рис.4) имеем разные значения  $y^i$ , а истинная координата места пересечения трека и плоскости  $z = 0$  не равна усредненному значению  $y^i$ .

Точность можно улучшить, используя дополнительную информацию об  $x$  координате и тот факт, что точка  $O$  лежит на прямой, соединяющей центры мест развития лавин на проволочках. При этом ошибка определения  $y$  координаты равна

$$\Delta y = \Delta x \text{tg} \psi = \Delta x (y^i - y^{i+1})/S, \quad (7)$$

где  $\Delta x$  определяется выражением (4).

Область применимости. В многопроволочных пропорциональных камерах обычно  $S < L$ , и наклонный трек может пересекать зоны чувствительности нескольких проволоочек. Формулу (6) можно применять только для проволоочек, когда трек прошел на расстоянии  $< S/2$  от проволоочки (в зоне с радиальными силовыми линиями). При не выполнении этого условия путь дрейфа первичных электронов вдоль силовых линий может сильно отличаться от кратчайшего расстояния между треком и проволочкой. В этом случае место развития лавин приближается к точкам пересечения проекции трека на плоскость  $z = 0$  и проволоочек (точки

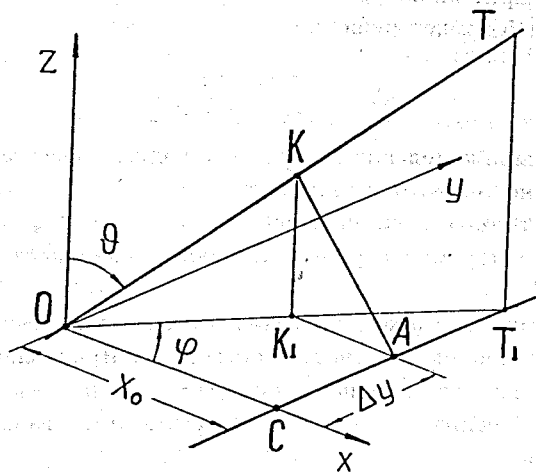


Рис.1. Пространственное расположение детектора и трека.  
 $x, y, z$  — декартова система координат,  $r, \varphi, \vartheta$  — сферическая система координат,  $OK$  — трек,  $CA$  — анодная проволочка,  $O$  — начало координат

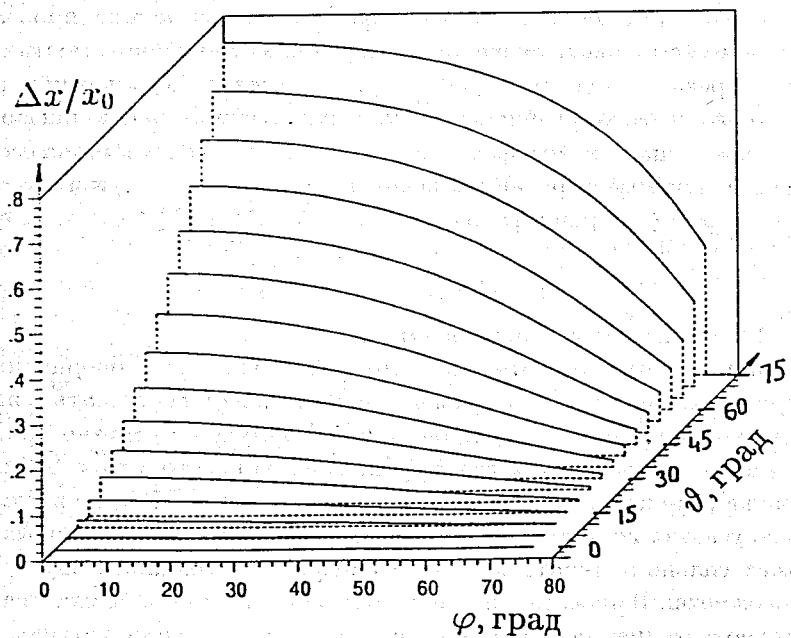


Рис.2. Зависимость ошибки измерения координаты  $x$  от широты и долготы ( $\varphi, \vartheta$ ) трека, пересекающего детектор (в единицах  $x_0$ )

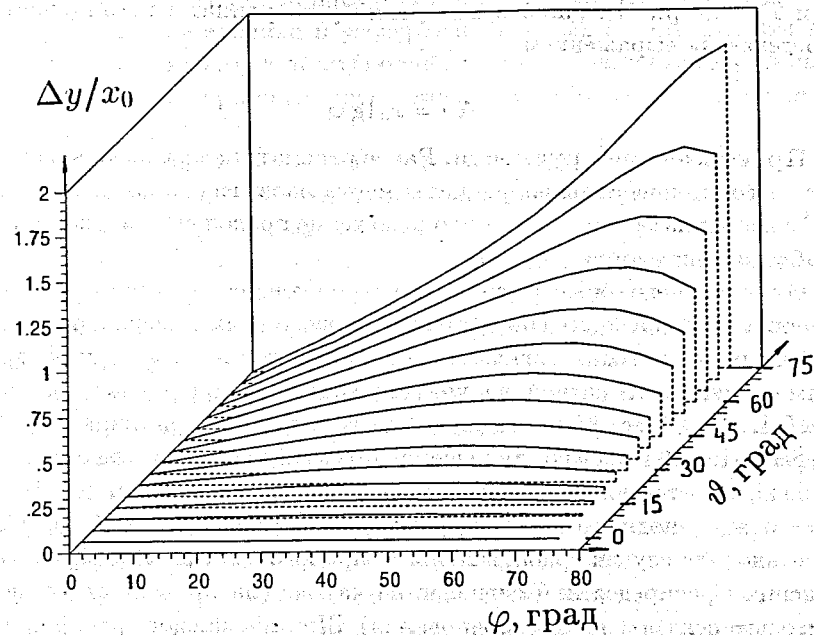


Рис.3. Зависимость ошибки измерения координаты  $y$  от широты и долготы ( $\varphi, \vartheta$ ) трека, пересекающего детектор (в единицах  $x_0$ )

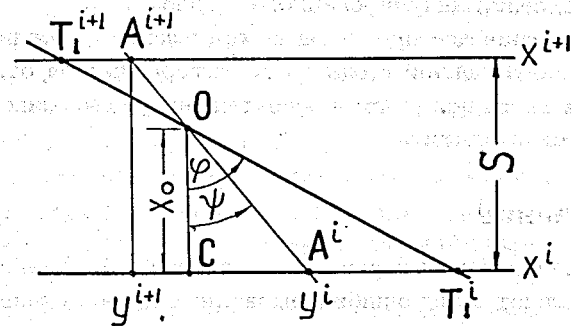


Рис.4. Проекция трека на плоскость анодных проволочек ( $z = 0$ ) для случая срабатывания двух проволочек.  $x^i$  — координата  $i$ -й анодной проволочки,  $y^i$  — координата места развития лавины на  $i$ -й проволочке,  $OT_i^i$  — проекция трека

$T_1^i$  и  $T_1^{i+1}$  на рис.4), ошибка измерения  $y$  координаты увеличивается и определяется выражением

$$\Delta y = x_0 \operatorname{tg} \varphi. \quad (8)$$

**Практические трудности.** Ранее рассматривался идеальный вариант — точно известны координаты места развития лавины. В реальности  $x$  координата известна — это положение проволочки, а  $y$  координату необходимо измерять.

Отметим некоторые трудности, встречающиеся на практике при измерении координат треков частиц в проволочных камерах по индуцированным на катодах сигналам. Одиночная лавина на анодной проволочке индуцирует сигнал на участке катода с поперечным размером  $\sim 2L$  [1, 2]. Расстояние от анода до катода ( $L$ ) в типичных камерах 2 — 8мм. Дальнейшее его уменьшение приводит к потере эффективности из-за недостаточного количества центров первичной ионизации. Расстояние между анодными проволочками ( $S$ ) в камерах 0,3 — 10мм. Следовательно, для случая срабатывания  $N$  проволочек имеем не менее  $N$  наложенных распределений сигналов на катоде (на проволочке возможно несколько центров лавинообразования). Ширина каждого распределения больше расстояния между ними, кроме этого величина заряда лавин, и следовательно, сигнала, индуцированного на катодах, может отличаться в несколько раз [7, 10]. Все это затрудняет определение координат центров распределений индуцированного сигнала.

Но даже решив все проблемы с определением координат лавин, по информации, полученной с одного детектора, нельзя отличить случай прохождения трека под углом и срабатывание нескольких проволочек от многотрекового события.

## 5. Заключение

В полную ошибку измерения координат в газоразрядных проволочных камерах дают вклад ошибки, вызванные принципиальными и техническими причинами.

Первые ошибки неустраняемы, они имеют случайный характер и возникают:

- из-за статистической флуктуации количества и расположения мест первичной ионизации на треке;
- из-за поперечной диффузии электронов при прохождении ими расстояния до проволочки;

— из-за пробега первичных электронов ( $\delta$ —электронов).

С развитием методики и усовершенствованием аппаратуры вклад технических факторов в общую ошибку измерения постоянно уменьшается. Технические причины чаще приводят к систематическим ошибкам, связанным:

- с точностью изготовления детекторов;
- с точностью, с которой известна топология электрического поля или скорость дрейфа электронов;
- с точностью аппаратуры, используемой для измерения времени и амплитуды;
- с возможностями используемых средств и методов обработки информации.

К перечисленным ошибкам необходимо добавить рассмотренные в данной работе ошибки за счет геометрического фактора — наклонного прохождения трека. Это ошибки систематического типа, они неустраняемы, если использовать информацию только с одной камеры, но их можно учесть или уменьшить, имея пространственную и временную информацию о треке из других источников. Например, для случая, описанного в разделе 3, зная углы прохождения трека через детектор и измерив время дрейфа электронов, можно рассчитать поправку  $\Delta \alpha$ , или, например, при определении координаты вдоль проволочки (раздел 4) примерное знание  $x$  координаты позволяет значительно улучшить точность определения  $y$  координаты.

При использовании систем из нескольких слоев проволочных камер улучшить точность определения параметров трека можно, выполнив несколько циклов вычислений. Первоначально "грубо" находятся  $x$  и  $y$  координаты трека в каждом детекторе и по ним определяются угловые параметры трека. На втором этапе с учетом пространственного расположения трека уточняются его координаты в каждом детекторе и рассчитываются уточненные угловые параметры. Количество циклов определяется требованием к точности определения пространственного положения трека.

Хорошие результаты при обработке информации с нескольких координатных детекторов дает использование метода нейронных сетей [11, 12], когда одновременно со значениями координат в каждом детекторе указывается и направляющий вектор трека, позволяющий точнее определять координаты трека в соседних детекторах.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований в рамках проекта 97-02-17346.

## Литература

- [1] Charpak G., Melchart G. and Sauli F., Nucl. Instr. and meth. A167 (1979) 455.
- [2] Bondar A.E., Onuchin A.P., Panin V.S. and Telnov V.I., Nucl. Instr. and Meth. 207 (1983) 379.
- [3] Thompson J.R., Gordon J.S. and Mathieson E., Nucl. Instr. and Meth. A234 (1985) 505.
- [4] Kobayashi M., Kurokawa S., Fujitani T. et al., Nucl. Instr. and Meth. A245 (1986) 51.
- [5] Cindro V., Kolanoski H., Lange D. et al., Nucl. Instr. and Meth. A309 (1991) 441.
- [6] Bonushkin Yu.Ye., Korytov A.V and Malyshev V.L., Nucl. Instr. and Meth. A300 (1991) 268.
- [7] Deiters K., Donat A., Friebel W. et al., Nucl. Instr. and Meth. A323 (1992) 162.
- [8] Khovansky N., Malyshev V., Tokmenin V. et al., Nucl. Instr. and Meth. A351 (1994) 317.
- [9] Lau K. and Pyrlík J., Nucl. Instr. and Meth. A366 (1995) 298.
- [10] Karpukhin V.V., Kisel I.V., Korenchenko A.S. et al. JINR Preprint, E13-95-547, Dubna, 1995.
- [11] Кисель И.В., Нескоромный В.Н. и Ососков Г.А., Физика эл. частиц и атом. ядра. 1993 Т.24 вып.6. С.1551.
- [12] Baginyan S., Glazov A., Kisel I. et al., Comput. Phys. Commun. 79 (1994) 165.

Рукопись поступила в издательский отдел

24 июня 1997 года.