

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



СЗ44.12

3.895

2827/2-74

В.П.Зрелов

P13 - 7994

СПОСОБ  
ОДНОВРЕМЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
НАПРАВЛЕНИЯ И ЭНЕРГИИ  
РЕЛЯТИВИСТСКИХ КОЛЛИМИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ  
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА

**1974**

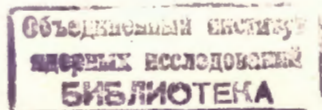
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P13 - 7994

В.П.Зрелов

СПОСОБ  
ОДНОВРЕМЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
НАПРАВЛЕНИЯ И ЭНЕРГИИ  
РЕЛЯТИВИСТСКИХ КОЛЛИМИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ  
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА

*Направлено в Nuclear Instruments  
and Methods*



Зрелов В.П.

P13 - 7994

Способ одновременного определения направления и энергии релятивистских коллимированных частиц по излучению Вавилова-Черенкова

В работе описан способ одновременного определения направления движения частиц и их энергии путем измерения полуразности и полусуммы углов выхода излучения Вавилова-Черенкова из плоскопараллельного радиатора. Приводятся расчетные формулы и оценки точности способа. Дан пример осуществления этого метода для целей транспортировки пучков по заданной трассе от ускорителей частиц.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.  
Дубна, 1974

Zrelov V.P.

P13 - 7994

Method for Simultaneous Determination of the Direction and Energy of Relativistic Collimated Particles by Means of Vavilov-Čerenkov Radiation

The method is described used for a simultaneous determination of the direction and energy of particles by measuring the half-difference and half-sum of the angles at which Vavilov-Čerenkov radiation leaves the plane-parallel radiator. The calculation formulae and estimates of the method accuracy are presented.

An example is given when this method is used to transport the beam along the given path from the particle accelerators.

Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.  
Dubna, 1974

## Введение

При постановке экспериментов по физике частиц высоких энергий на современных ускорителях в десятки и сотни ГэВ часто возникает необходимость транспортировки коллимированных пучков частиц по протяженно-заданной трассе при одновременном контроле средней энергии частиц.

В настоящей работе предлагается способ оперативного определения направления движения пучков релятивистских частиц с высокой точностью при одновременном измерении их энергии.

### 1. Описание способа

Пусть пучок коллимированных частиц направляется под некоторым углом  $\alpha$  на плоскопараллельный радиатор с абсолютным показателем преломления  $n_1$  /рис. 1/. При скорости частиц  $\beta$  в пучке больше  $n_1^{-1}$  в радиаторе возникает излучение Вавилова-Черенкова. Величину  $n_1$  радиатора выбирают такой, чтобы угол излучения Вавилова-Черенкова  $\theta = \arccos(\beta n_1)^{-1}$  был близок к углу полного внутреннего отражения  $\theta^* = \arcsin n_2/n_1$  /где  $n_2$  - показатель преломления среды, окружающей радиатор/, т.е.  $\theta \leq \theta^*$ . В этом случае угол выхода излучения  $\gamma$  из радиатора в среду с  $n_2$  будет значительный: излучение выходит широким веером вдоль выходной грани, причем в плоскости наклона частиц к поверхности радиатора углы выхода излучения  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  по обе стороны от пучка будут различны.

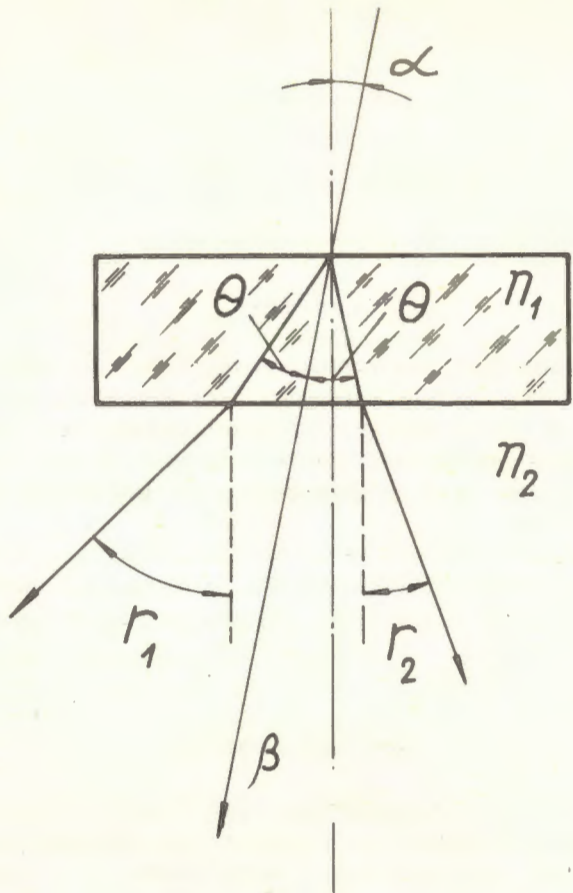


Рис. 1. Ход лучей в радиаторе.

Связь между  $\beta$  и  $\alpha$  с углом  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  получается из решения системы из двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} n_1 \sin(\theta + \alpha) &= n_2 \sin \gamma_1, \\ n_1 \sin(\theta - \alpha) &= n_2 \sin \gamma_2. \end{aligned} \right\} /1/$$

Откуда скорость  $\beta$  определяется так:

$$\beta^{-2} = \frac{n_2^2 (n_1'^2 + \sin^2 \gamma_2 - \sin^2 \gamma_1)}{2} \quad /2/$$

$$- \frac{n_1^2}{2} \sqrt{\frac{(\sin^2 \gamma_1 - \sin^2 \gamma_2)}{(n_1')^4} - 2 \frac{\sin^2 \gamma_1}{(n_1')^2} + 1},$$

а угол  $\alpha = \arcsin n_2 \beta \cos \gamma_1 \cos \gamma_2$ ,

где  $\gamma_1 = \frac{r_1 + r_2}{2}$ ,  $\gamma_2 = \frac{r_1 - r_2}{2}$ ,  $n_1' = \frac{n_1}{n_2}$ . /3/

Если  $\gamma_2 > 0$ , то  $r_1 > r_2$ , а следовательно, частица проходит радиатор под углом  $\alpha > 0$  /при отсчете по часовой стрелке относительно нормали к выходной грани радиатора/. При  $\gamma_2 < 0$  наклон частиц - в противоположную сторону от нормали.

Таким образом, полусумма и полуразность углов  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  полностью определяют скорость частиц  $\beta$  и их отклонение  $\alpha$  от нормали к радиатору.

Максимальный угол наклона частиц  $\alpha_{\max}$ , который может быть измерен этим способом, ограничен явлением полного внутреннего отражения излучения Вавилова-Черенкова, т.е. условием

$$\alpha_{\max} \leq \arcsin \frac{n_2}{n_1} - \theta, \quad /4/$$

где

$$\theta = \arcsin (n_1 \beta).$$

## 2. Оценка точности способа

Ошибка измерения уклонов частиц  $\alpha$  приближенно определяется ошибкой  $\Delta \gamma_2$  согласно формуле

$$\Delta\alpha = \frac{n_2 \beta}{\cos \alpha} (\cos \gamma_1 \cos \gamma_2 \Delta\gamma_2 - \sin \gamma_1 \cdot \sin \gamma_2 \Delta\gamma_1) \cdot /5/$$

Для  $\Delta\gamma_1 = \Delta\gamma_2 = \Delta\gamma$  формула /5/ принимает вид

$$\Delta\alpha = \frac{n_2 \beta}{\cos \alpha} \cos \gamma_1 \Delta\gamma, \quad /6/$$

где  $\Delta\gamma = 0,71 \Delta\gamma_1$  при  $\Delta\gamma_1 = \Delta\gamma_2 = \Delta\gamma$ , а  $\Delta\gamma_2 = 0,71 \Delta\gamma_1$ .  
В конкретном случае  $\Delta\gamma = 2,9 \cdot 10^{-4}$  рад,  $\gamma_1 = 75^\circ$ ,  $\beta = 0,81$ ,  $\Delta\alpha \approx 4,3 \cdot 10^{-5}$  рад, т.е. при ошибке  $\Delta\gamma_1$  в одну минуту угол наклона  $\alpha$  измеряется с точностью в 9 секунд, что значительно превосходит точность методов /1/ и /2/.

Точность определения скорости частиц и их энергии находится по формулам

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = n_2^2 \beta \sin \gamma_1 \cos \gamma_1 \Delta\gamma_1, \quad /7/$$

$$\frac{\Delta E}{E} = (\gamma^2 - 1) \frac{\Delta\beta}{\beta},$$

где  $E$  - полная энергия частиц, а  $\gamma$  - лоренц-фактор. Для тех же условий, при которых производилась выше оценка  $\Delta\alpha$ , ошибка  $\Delta E/E = 1,1 \cdot 10^{-4}$ , а  $\Delta E = 0,21$  МэВ /для протонов/.

Чувствительность настоящего способа определения энергии и направления частиц легко варьируется согласно /6/ и /7/ путем выбора угла  $\gamma$  /подбором  $n_1$  радиатора/.

### 3. Вариант осуществления данного способа /рис. 2/

Мононаправленный пучок частиц /1/ падает почти перпендикулярно к грани плоскопараллельного радиатора /2/. Излучение Вавилова-Черенкова /3/, вышедшее из радиатора по обе стороны от пучка, проходит интерференционные фильтры /5/, фокусирующие оптические системы /5/, настроенные на бесконечность. В фокальной плоскости каждой системы /5/ находятся координатные фотоумножители /6/, работающие по времяпролетному принципу /3/ и позволяющие определять место попадания излучения на фотокатод.

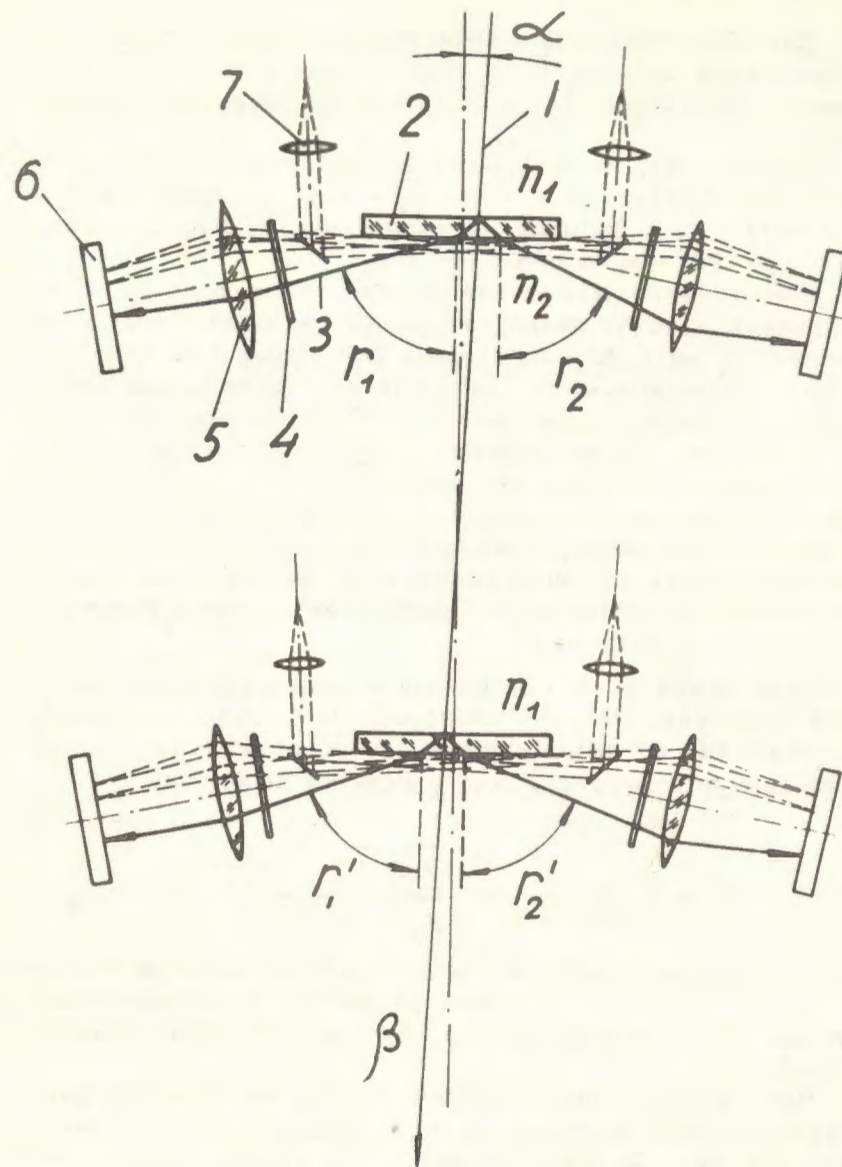


Рис. 2. Пример устройства для определения направления пучка частиц вдоль его трассы.

Для нанесения положения выходной грани радиатора в фокальной плоскости оптической системы /5/ используются проекторы /7/, работающие по принципу, описанному в работе /4/.

Информация, поступающая с координатных ФЭУ /7/, далее преобразуется в углы  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , которые связаны с углами  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , входящими в формулы /2/ и /3/, условием:  $\psi_1 = 90^\circ - \gamma_1$ , а  $\psi_2 = 90^\circ - \gamma_2$ .

Для точного измерения углов  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  расходимость излучения за счет дисперсии радиатора необходимо либо уменьшить интерференционными фильтрами, как это сделано в /4/ либо использовать для этой цели ахроматическую /5/ или апохроматическую /6/ оптические системы.

В первом случае ширина полосы используемого интерференционного фильтра зависит от соотношения вкладов в полную ширину углового распределения излучения Вавилова-Черенкова таких факторов, как энергетическая неоднородность частиц в пучке, их угловая расходимость, замедление и многократное рассеяние частиц в радиаторе, дифракция излучения.

Если принять, что размытие конуса излучения Вавилова-Черенкова за счет дисперсии не должно превышать его уширения из-за многократного рассеяния, то условие на ширину интерференционного фильтра имеет вид

$$\Delta\lambda = n_1 n_2 \sin \gamma \frac{7,5 \bar{\lambda}^3 \sqrt{t}}{c E_0 \sqrt{\gamma^2 - 1}}, \quad /8/$$

где  $\bar{\lambda}$  - средняя длина волны пропускания фильтра /выбор  $\bar{\lambda}$  см. в /4/ /;  $t$  - толщина радиатора в радиационных длинах;  $\gamma$  - лоренц-фактор,  $E_0$  - масса покоя частиц в МэВ.

При транспортировке пучка частиц на большие расстояния второй радиатор /и последующие/, как это показано на рис. 2, располагается по трассе следования пучка и устанавливается параллельно первому радиатору с помощью автоколлимационного устройства.

Определение пространственного положения пучка может быть произведено системой регистрации, аналогич-

ной изображенной на рис. 2, и другой, такой же, но расположенной перпендикулярно по отношению к плоскости рис. 2.

В связи с тем, что в подобного рода устройствах желательно использовать в качестве регистратора излучения годоскопический фотоумножитель, обладающий конечным разрешением по координате  $\Delta x_{\min}$ , возникают ограничения по фокусное расстояние  $f$  оптической системы /5/:

$$f \geq \frac{\Delta x_{\min} \beta \cos^3 \gamma}{\Delta \alpha}, \quad /9/$$

где  $\Delta \alpha$  - точность определения угла наклона частиц. Так, для годоскопических фотоумножителей типа /3/  $\Delta x_{\min} = 0,35$  мм. Тогда согласно /9/ при  $\Delta \alpha = 4,3 \cdot 10^{-5}$  рад,  $\beta = 0,81$ ,  $\gamma = 75^\circ$  фокусное расстояние должно быть  $f \geq 115$  мм.

#### Литература

1. M.Oda. Preprint INSJ-32, Tokyo, Japan, 1960.
2. P.Iredal, G.W.Hinder, A.C.Parham, D.J.Riden. IEEE Trans.Nucl.Sci., VNS-13, 339, 1966.
3. Н.К.Вишневский и др. Международная конференция по аппаратуре в физике высоких энергий /Дубна, 8-12 сентября 1970 г./, Д-5805, ч. 1, стр. 105, Дубна, 1971.
4. V.P.Zrelov, M.A.Musin, P.Pavlovič, P.Šulek, R.Janik. Nucl.Instr.Meth., 103, 261 (1972).
5. V.P.Zrelov, P.Pavlovič, P.Šulek. Nucl.Instr.Meth., 107, 279-284 (1973).
6. V.P.Zrelov, P.Pavlovič, P.Šulek. Nucl.Instr.Meth., 105, 109 (1972).

Рукопись поступила в издательский отдел  
31 мая 1974 года.