

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

12163

P1 - 12163

В.П.Зрелов

РАЗНОСТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ
СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ЧАСТИЦ
В КОЛЛИМИРОВАННЫХ ПУЧКАХ
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА

1979

P1 - 12163

В.П.Зрелов

РАЗНОСТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ
СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ЧАСТИЦ
В КОЛЛИМИРОВАННЫХ ПУЧКАХ
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА

Направлено в "Nuclear Instruments and Methods"



Зрелов В.П.

PI - 12163

Разностный метод измерения средней энергии частиц
в коллимированных пучках по излучению Вавилова-Черенкова

В работе излагается разностный метод измерения средней энергии релятивистских коллимированных частиц по излучению Вавилова-Черенкова. Суть метода заключается в том, что энергия частиц определяется по разности углов испускания излучения Вавилова-Черенкова, возникающего при их прохождении через два плоскопараллельных радиатора, находящихся в оптическом контакте. Приводятся расчетные формулы для определения средней энергии частиц и ошибок ее измерения. Дается пример расчета зависимости величины ошибок определения скорости частиц $\delta\beta$ от ошибок измерения разности углов $\delta(\Delta\theta)$. Достижимая точность метода, например для протонов с $\beta = 0,875$, может составить $\sim 1,2$ МэВ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

Zrelov V.P.

PI - 12163

The Difference Method for Measuring the Average
Particle Energy in Collimated Beams by Means
of Vavilov-Cherenkov Radiation

The difference method for measuring the average energy of relativistic collimated particles by means of Vavilov-Cherenkov radiation arising when particles pass through two plane-parallel radiators being in the optical contact is described. The calculation formulas for determining the average particle energy and the measurement errors are given. An example of calculating the dependence of the determination errors of particle velocity $\delta\beta$ upon the measurement errors of the angle difference $\delta(\Delta\theta)$ is presented. The attainable accuracy of the method, e.g., for protons with $\beta = 0,875$ can be about 1,2 MeV.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

1. ВВЕДЕНИЕ

Во всех предшествующих методах ^{1-4/} измерения средней энергии частиц в коллимированных пучках посредством излучения Вавилова-Черенкова используется один плоскопараллельный радиатор.

Использование второго радиатора излучения позволяет достаточно точно определить энергию частиц, замеряя лишь разность углов излучения на выходе из радиаторов, т.е. не прибегая к абсолютным их измерениям.

Такой метод может быть предпочтительнее монохроматического, например, при незначительных углах выхода излучения, когда отсчет углов от выпускной грани в методе ^{1/} затруднителен.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА *

Пусть частица со скоростью β пересекает по нормали два плоскопараллельных радиатора с абсолютными показателями преломления n_1 и n_2 , находящимися в оптическом контакте, причем β превышает порог возникновения излучения Вавилова-Черенкова в обоих радиаторах, т.е. $\beta > \frac{1}{n_1}$ и $\beta > \frac{1}{n_2}$. Однако скорость частицы не должна превышать критической величины

$\beta_0 < \frac{1}{n_2^2 - n_3^2}$, определяемой на основании условия, что угол

*Ниже везде при изложении метода будет говориться об измерении скорости частицы, хотя сам метод предназначен для измерения средней энергии релятивистских частиц в коллимированных пучках.

излучения Вавилова-Черенкова не должен превышать угла полного внутреннего отражения $\theta_{1,2} = \arcsin \frac{n_3}{n_{1,2}}$ / n_3 - показатель преломления среды, в которую выходит излучение/.

Излучение Вавилова-Черенкова, возникшее в обоих радиаторах, выходит в среду с n_3 через плоскую границу радиатора с показателем преломления n_2 под углами γ_1 и γ_2 /рис. 1/, вычисляемыми с учетом закона преломления:

$$\gamma_1 = \arcsin \frac{\sqrt{n_1^2 \beta^2 - 1}}{n_3 \beta}, \quad /1/$$

$$\gamma_2 = \arcsin \frac{\sqrt{n_2^2 \beta^2 - 1}}{n_3 \beta}.$$

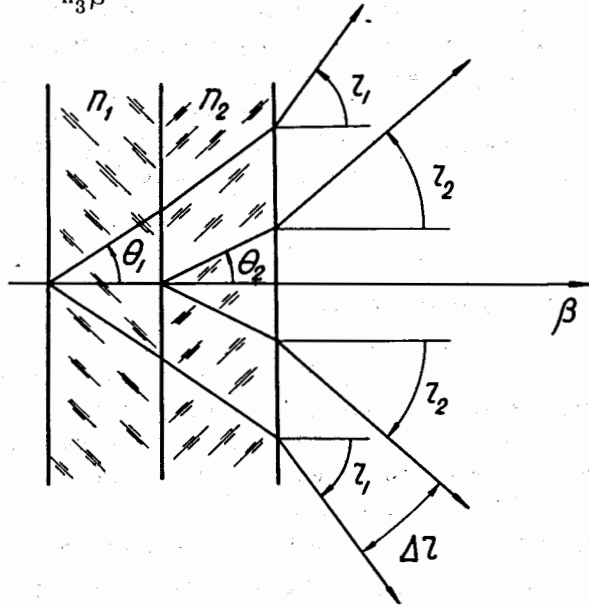


Рис. 1. Ход лучей в составном радиаторе.

Разность углов $\Delta \gamma = \gamma_1 - \gamma_2$ /при $n_1 > n_2$ / связана с β , n_1 , n_2 и n_3 уравнением

$$\sin \Delta \gamma = \frac{\sqrt{(n_1^2 \beta^2 - 1)(n_3^2 \beta^2 - n_2^2 \beta^2 + 1)}}{n_3^2 \beta^2} - \frac{\sqrt{(n_2^2 \beta^2 - 1)(n_3^2 \beta^2 - n_1^2 \beta^2 + 1)}}{n_3^2 \beta^2}. \quad /2/$$

Решая его относительно β^2 , получим

$$\beta_{1,2}^2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 + 4a}}{2a}, \quad /3/$$

где

$$b = n_1^2 + n_2^2 - n_3^2.$$

$$a = (n_2^2 n_3^2 - n_1^2 n_2^2) - \frac{(n_2^2 - n_1^2 + n_3^2 \sin^2 \Delta \gamma)^2}{4 \sin^2 \Delta \gamma}.$$

В /3/ перед корнем берется знак минус.

3. ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Дифференцируя уравнение /2/ по β , можно получить связь $\delta \beta$ и $\delta(\Delta \gamma)$ в виде

$$\delta \beta = \frac{\delta(\Delta \gamma) n_3^2 \beta^3 \cos \Delta \gamma}{[2 - \beta^2 (n_1^2 + n_2^2 - n_3^2)]} \left\{ \frac{\sqrt{(n_1^2 \beta^2 - 1)(n_3^2 \beta^2 - n_2^2 \beta^2 + 1)}}{1 - \sqrt{\frac{(n_1^2 \beta^2 - 1)(n_3^2 \beta^2 - n_2^2 \beta^2 + 1)}{(n_2^2 \beta^2 - 1)(n_3^2 \beta^2 - n_1^2 \beta^2 + 1)}}} \right\} \quad /4/$$

Зависимость $\delta \beta$ от скорости при $n_1/n_3 = 1,4800$, $n_2/n_3 = 1,39037$ и $\delta(\Delta \gamma) = 2,909 \cdot 10^{-4}$ приведена на рис. 2, из которого видно, что ошибка $\delta \beta$ сильно возрастает при $\beta \approx 0,80$. Это происходит потому, что для этих n_1 и n_2 /при этом β / разность углов $\Delta \gamma$ практически не изменяется с β .

Величину скорости β_0 , при которой $\delta \beta$ сильно возрастает, можно определить, исходя из условия обращения в нуль первой скобки в знаменателе формулы /4/:

$$\beta_0^2 = \frac{2}{n_1^2 + n_2^2 - n_3^2}. \quad /5/$$

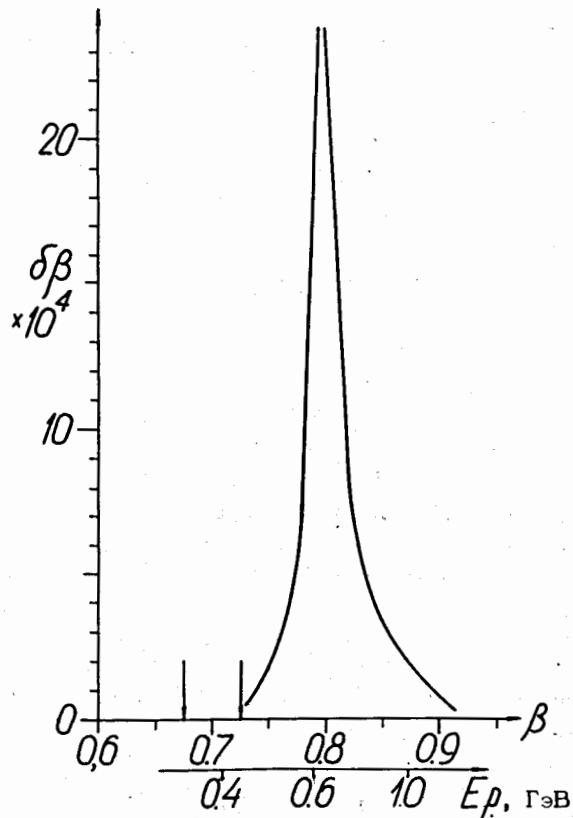


Рис. 2. Зависимость $\delta\beta$ от β для разностного метода $(n_1/n_3 = 1,4800, n_2/n_3 = 1,39037)$ при $\delta(\Delta\tau) = 2,9 \cdot 10^{-4}$ рад. /Под шкалой β показаны несколько значений кинетической энергии протонов E_p , а стрелки указывают пороги излучения в радиаторах/.

Из /5/ видно, что изменением показателей преломления n_1 и n_2 можно перемещать значение β_0 в область β , удаленную от измеряемой скорости частицы. Изменение знаменателя $n_1^2 + n_2^2 - n_3^2 = K$ в формуле /5/ на величину ΔK приводит к смещению $\Delta\beta_0$, равному

$$\Delta\beta_0 = -\frac{\Delta K}{\beta_0 K^2} \quad /6/$$

Ошибка измерения энергии протонов с $\beta = 0,875$ / $E_p = 1$ ГэВ/ согласно рис. 2 составляет $\delta(\beta) = 1,7 \cdot 10^{-4}$, а $\Delta E_p = 1,23$ МэВ.

При $\beta = 0,75$ точность измерения скорости лучше $|\delta\beta| = 0,53 \cdot 10^{-4}$, а ошибка определения энергии протонов уменьшается до $\Delta E_p = 0,11$ МэВ. Таким образом, достижимая точность измерения разностным методом не хуже точности других черенковских методов.

В заключение отметим, что определение β по формуле /3/ справедливо, если частица падает перпендикулярно к поверхности радиаторов. В случае наклонного падения частиц необходимо измерять разность углов излучения $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$, т.е. по обе стороны от пучка частиц /рис. 3/, а действительную скорость определять как среднюю $\bar{\beta} = \frac{1}{2}[\beta_1(\Delta\tau_1) + \beta_2(\Delta\tau_2)]$, где $\beta_1(\Delta\tau_1)$ - скорость, вычисленная по формуле /3/, в которой $\Delta\tau$ заменено на $\Delta\tau_1$, а β_2 соответствует разности углов $\Delta\tau_2$.

Кроме этого, формула /3/ справедлива, если изменением скорости за счет ионизационных потерь частиц в радиаторах можно пренебречь. В противном случае $\bar{\beta}$ в первом приближении можно считать равной скорости частицы на границе раздела радиаторов.

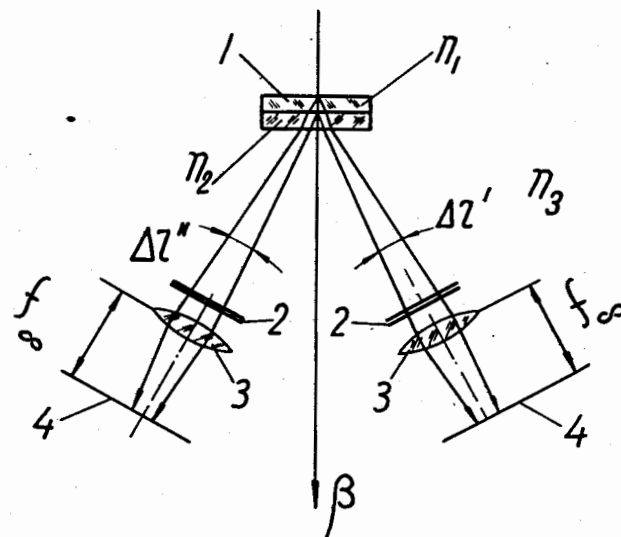


Рис. 3. Схема прибора для разностного метода измерения энергии по излучению Вавилова-Черенкова: 1 - двоянный плоскопараллельный радиатор; 2 - интерференционный фильтр; 3 - фотокамера с фокусным расстоянием f ; 4 - фотопленка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zrelou V.P. e.a. Nucl.Instr. and Meth., 1972, v.103, p.261-269.
2. Zrelou V.P., Pavlovič P., Šulék P. Nucl.Instr. and Meth., 1972, v.105, p.109-106.
3. Zrelou V.P., Pavlovič P., Šulék P. Nucl. Instr. and Meth., 1973, v.107, p.279-284.
4. Zrelou V.P. Nucl.Instr. and Meth., 1974, v.115, p.457-459.

*Рукопись поступила в издательский отдел
9 января 1979 года.*