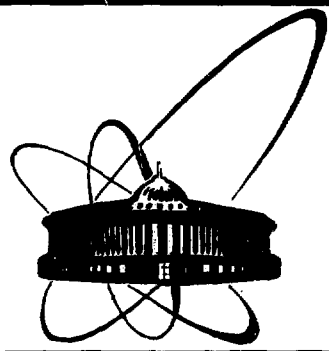


2

SUB109053



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P1 - 12164

В.П.Зрелов

**ДВУХКОНУСНЫЙ И КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОДЫ
ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ЧАСТИЦ
В КОЛЛИМИРОВАННЫХ ПУЧКАХ
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА**

1979

PI - 12164

В.П.Зрелов

**ДВУХКОНУСНЫЙ И КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОДЫ
ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ЧАСТИЦ
В КОЛЛИМИРОВАННЫХ ПУЧКАХ
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА**

Направлено в "Nuclear Instruments and Methods"

Зрелов В.П.

P1 - 12164

Двухконусный и комбинированный методы измерения средней энергии частиц в коллимированных лучках по излучению Вавилова-Черенкова

В работе описаны два возможных метода измерения средней энергии релятивистских частиц в коллимированных пучках. Первый метод есть фактически известный простой метод (или метод двойных отражений), в котором к трехгранной призме-радиатору добавлен плоскопараллельный радиатор. В результате чего из выпускных граней призмы-радиатора выходит по два конуса излучения Вавилова-Черенкова, что позволяет за одну экспозицию произвести четырехкратное измерение средней энергии частиц и увеличить точность простого метода в два раза. Второй метод - комбинированный - также представляет собой по существу так называемый простой метод, в котором в дополнение к трехгранной призме используется ахроматическая система, что позволяет существенно уменьшить необходимый поток частиц и автоматизировать процесс измерения энергии. Приводятся формулы и примеры расчета по ним.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединяемого института ядерных исследований, Дубна 1979

Zrelov V.P.

P1 - 12164

The Double Cone and the Combined Methods for Measuring the Average Particle Energy in the Collimated Beams by Means of Vavilov-Cherenkov Radiation

Two possible methods for measuring the average energy of relativistic particles in the collimated beams are described. The first method is, in fact, a simple conventional method (or the double reflection method) when a trigonal prism-radiator is added to a plane-parallel radiator. As a result, two cones of Vavilov-Cherenkov radiation are emitted from the faces of the prism-radiator. This makes it possible to make a four-fold measurement of the average particle energy and achieve twice as high the accuracy of the simple method during a single exposure. The second method is a combined one. It is, in fact, the so-called simple method (or the double reflection method) added by an achromatic prism. This makes it possible to decrease considerably the required flux of particles and automatize the process of measuring the energy. The formulas and examples of calculations are given.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

1. ОПИСАНИЕ ДВУХКОНУСНОГО МЕТОДА

Этот метод является усовершенствованным методом двойного отражения ^{1,2/}, в котором используется трехгранная призма-радиатор.

Перед входной гранью такой призмы с абсолютным показателем преломления n_2 в оптическом контакте с ней устанавливается плоскопараллельный радиатор с абсолютным показателем преломления n_1 и зеркальной поверхностью III /рис. 1/.

В этом случае при прохождении частицы со скоростью $\beta_0 > n_1^{-1}$ и $\beta_0 > n_2^{-1}$ через такой составной радиатор возникает два конуса излучения Вавилова-Черенкова /с углами раскрытия $2\theta_1$ и $2\theta_2$, где $\cos\theta_1 = 1/n_1\beta_0$ и $\cos\theta_2 = 1/n_2\beta_0$ /, которые будут выходить через грани I и II призмы-радиатора под углами γ_1 и γ_2 /от самой призмы, рис. 1а/ и под углами γ_3 и γ_4 /от плоского радиатора, рис. 1б/, которые связаны с β_0 , n_1 и n_2 формулами

$$\theta_2 = \alpha_2 \pm \arcsin \frac{1}{n_2} \sqrt{\frac{\sin^2 \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2) - n_2'^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2) \sin^2(\alpha_2 - \alpha_1)}{\cos^2(\alpha_2 - \alpha_1) - \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2) \sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)}} \quad /1/$$

$$\gamma_1 = \alpha_2 \pm \arcsin \frac{1}{n_2} \sqrt{\frac{\sin^2 \frac{1}{2}(\gamma_3 + \gamma_4) - n_2'^2 \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2}(\gamma_3 + \gamma_4) \sin^2(\alpha_2 - \alpha_1)}{\cos^2(\alpha_2 - \alpha_1) - \operatorname{tg}^2 \frac{1}{2}(\gamma_3 + \gamma_4) \sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)}} \quad /2/$$

где $\sin \gamma_1 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta$; $n'_2 = \frac{n_2}{n_3}$, а n_3 - показатель преломления среды, в которую выходит излучение из призмы-раднатора, γ_1 - угол между направлениями скорости частицы и излучения Вавилова-Черенкова, возникающего в плоскопараллельном раднаторе и прошедшего в призму-раднатор. В формулах /1/, /2/ знак /+/ берется при $\theta_2 > \alpha_2$ и /-/- при $\theta_2 < \alpha_2$.

Формулы /1/ и /2/ написаны для выхода излучений через грань I призмы-раднатора. Для выхода излучения через грань II в аналогичных формулах для углов θ'_2 и γ'_1 углы α_2 заменяют-

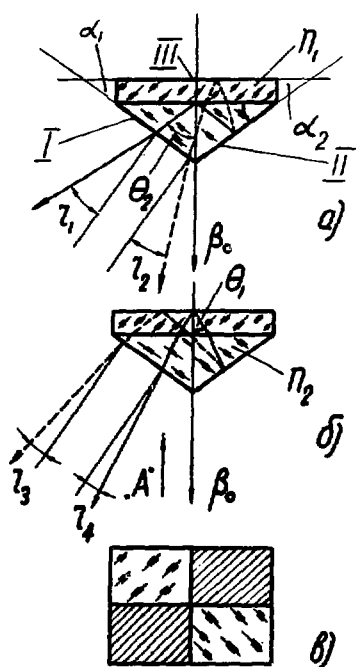


Рис. 1. Ход лучей в составном раднаторе двухконусного черенковского метода измерения энергии частиц: а/ ход лучей от самой призмы-раднатора; б/ ход лучей от плоскопараллельного раднатора; в/ вид на раднатор по стрелке "А" /заштрихованные части - зеркальные/.

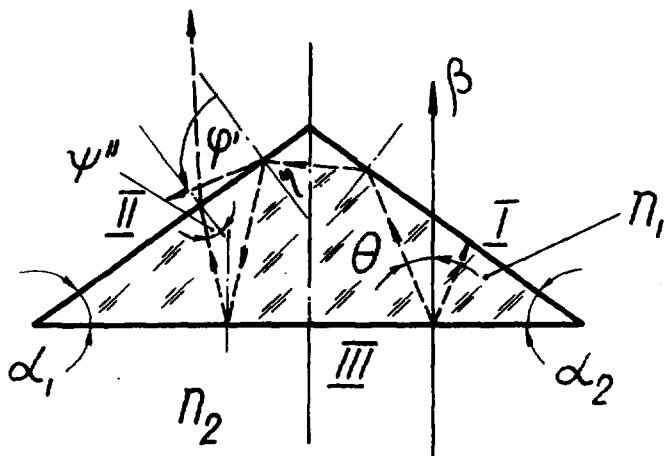


Рис. 2. Ход лучей в призме-радиаторе от внеосевых частиц.

ся на α_1 , а углы γ_1 , γ_2 , γ_3 и γ_4 - на γ'_1 , γ'_2 , γ'_3 и γ'_4 . Заметим, что углы α_1 и α_2 - это углы между выходными гранями призмы I и II и входной гранью плоскопараллельного радиатора, которые могут отличаться от соответствующих углов α'_1 и α'_2 призмы-радиатора из-за отклонений от плоскопараллельности радиатора с показателем преломления n_1 , а также в результате склейки его с призмой.

Кроме этого, при использовании дополнительного радиатора в простом методе важно правильно выбирать угол призмы-радиатора. Дело в том, что при использовании реальных пучков частиц через выпускную грань призмы-радиатора кроме прямо вышедшего луча и дважды отраженного может выходить и трижды отраженное излучение, как это показано на рис. 2. Так, от частицы, прошедшей через правую часть призмы-радиатора, например через грань I, через грань II выйдет излучение, последовательно отраженное от граней I, II и III.

Угол падения ψ'' излучения Вавилова-Черенкова от такой частицы на грань II будет равен

$$\psi'' = (\alpha_1 + 2\alpha_2 + \theta) - 90^\circ,$$

/3/

а при прохождении частицы через грань II угол падения черенковского излучения на грань I равен:

$$\psi' = (a_2 + 2a_1 + \theta) - 90^\circ. \quad /4/$$

Посмотрим, когда трижды отраженное излучение совпадет с углом падения излучения на выходную грань II призмы без отражения. Подставив в /4/ условие $\psi'' = \theta - \alpha$, где $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$, получим, что это произойдет при $\alpha = 22,5^\circ$. Такого угла α при проектировании призмы-раднатора следует избегать.

Заметим также, что через грань II призмы-раднатора излучение может выйти в среду с n_2 под углом $\phi' = \arcsin \frac{n_1}{n_2} \sin \eta$ и при втором отражении /см. рис. 2/, если угол падения излучения на эту грань меньше угла полного внутреннего отражения $\eta^* = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$.

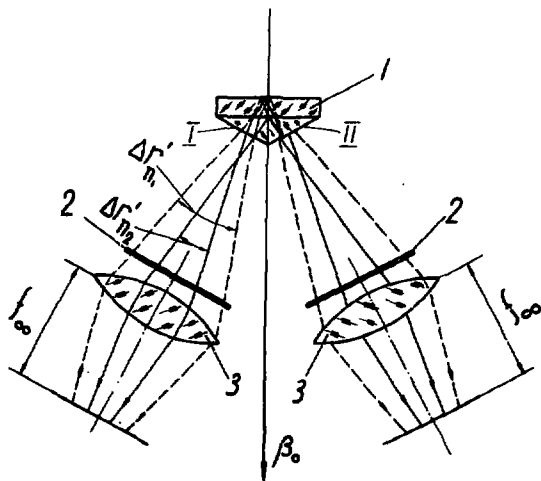


Рис. 3. Схема прибора для измерения энергии частиц двухконтусным методом: 1 - комбинированный раднатор; 2 - интерференционные фильтры; 3 - фокамеры с фокусным расстоянием f_∞ .

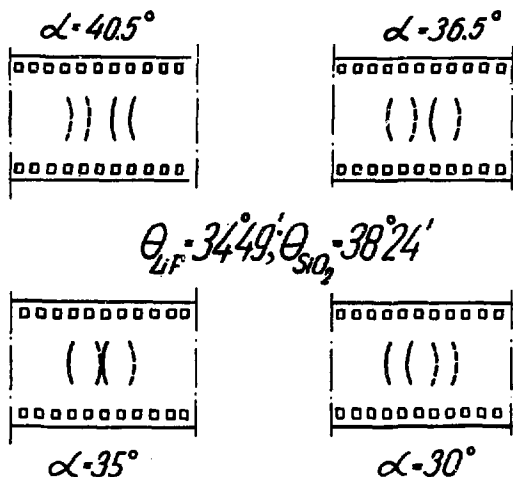


Рис. 4. Примерный вид изображений конусов излучения Вавилова-Черенкова, которые могут получиться при экспонировании прибора, приведенного на рис. 3, в пучке протонов с энергией 1 ГэВ / $\beta = 0,875$ / и при регистрации излучения фотокамерой, изображенной в левой части рис. 3.

Схема прибора для измерения энергии частиц этим методом приведена на рис. 3, а примерный вид изображений конусов излучения Вавилова-Черенкова /от двух конусов излучений при энергии протонов 1 ГэВ/ в фокальной плоскости оптического устройства с фокусным расстоянием f_{∞} для плоскопараллельного радиатора с $n_{LiF}^D = 1,39204$, призмы-радиатора из расплавленного кварца $n_{SiO_2}^D = 1,4586$ и различных углов α призм-радиаторов показан на рис. 4 /выход излучения через грань I призмы/.

Если простой метод ^{1/1} измерения энергии с использованием только призмы-радиатора позволяет за одну экспозицию произвести два независимых определения энергии пучка частиц, то настоящим методом энергия частиц измеряется четырьмя.

При усреднении результатов измерений энергии частиц таким методом необходимо к средним энергиям, полученным путем измерения угла конуса излучения, вступившего в призму, добавить ионизационные потери частиц на половине толщины плоскопараллельного радиатора и половине эффективной толщины призмы-радиатора.

2. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД

Схема этого метода приведена на рис. 5, из которого видно, что к трехгранной призме, используемой в известном простом методе ^{1/}, добавлена ахроматическая призма.

Пучок частиц с $\beta > 1/n_1$ проходит через трехгранную призму-радиатор с показателем преломления n_1 и с углами α_1 и α_2 . Излучение Вавилова-Черенкова, испущенное в призме, выпускается через грани I и II /каждая из которых наполовину зеркальная/, причем через каждую грань выходит излучение как прямое, так и дважды отраженное от противоположной грани.

Углы призмы α_1 и α_2 в этом методе должны выбираться такими, чтобы θ /угол черенковского излучения/ в призме был больше α ($\theta > \alpha$). Только в этом случае двойные ахроматические призмы будут работать правильно.

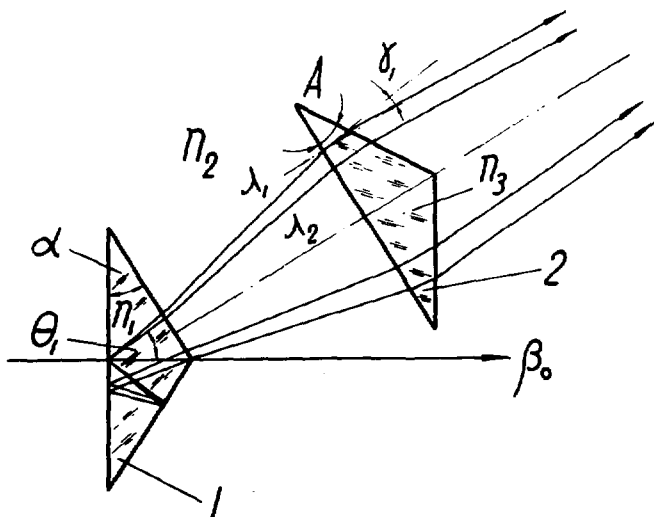


Рис. 5. Расположение призмы-радиатора и двоянной ахроматической призмы в комбинированном методе.

Ахроматические призмы располагаются так, чтобы ось их симметрии была направлена перпендикулярно к выпускным граням трехгранной призмы-радиатора, а входная грань ахроматической призмы должна быть параллельна выходной грани призмы-радиатора.

В этом случае преломляющий угол ахроматической призмы A получается путем учета зависимости угла испускания излучения Вавилова-Черенкова в призме-радиаторе от скорости β и показателя преломления $n_1(\cos\theta = 1/n_1\beta)$, условий преломления на всех гранях оптической системы

$$\left. \begin{aligned} n_1 \sin(\theta - \alpha) &= n_2 \sin \gamma, \\ n_2 \sin \gamma &= n_3 \sin \gamma_1, \\ n_3 \sin(A - \gamma_1) &= n_2 \sin(A - \nu). \end{aligned} \right\} /5/$$

и условия ахроматизации $\Delta n_{\lambda_1}, \lambda_2 = 0$.

Конечный результат имеет вид

$$\cos A = -\xi \sin \gamma_1 + \cos \gamma_1 \sqrt{1 - \xi^2}, \quad /6/$$

где

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{k}{\Delta \gamma_1}\right)^2}};$$

$$\sin \gamma_1 = \frac{n_1}{n_3} P; \quad P = \sin(\theta - \alpha);$$

$$k = \frac{\Delta n_3}{n_3} - \frac{\Delta n_2}{n_2}; \quad L = \frac{\Delta n_1}{n_1} - \frac{\Delta n_3}{n_3};$$

$$\Delta \gamma_1^* = n_1 \frac{LP + \Delta \theta \sqrt{1 - P^2}}{\sqrt{n_3^2 - n_1^2 P^2}}; \quad \Delta \theta = \frac{\Delta n_1}{\sin \theta n_1^2 \beta}.$$

* В выражении для $\Delta \gamma$, приведенном в препринте ОИЯИ, Р13-5868, Дубна, 1971, с.8, формула /14/ должна иметь вид

$$(\Delta \gamma)^2 = \frac{(S - UR)^2}{(2Q - R)R}.$$

В формуле /6/ перед корнем берется знак плюс.

Угол выхода излучения из призмы

$$\nu = A - \arcsin \frac{n_3}{n_2} \xi. \quad /7/$$

Следует отметить, что при использовании радиатора в виде призмы имеется возможность несколько изменить угол ν выхода излучения из ахроматической призмы путем выбора разности $(\theta - \alpha)$, не изменяя марки стекол оптической системы. Такой возможности ахроматическая система /3/ не дает.

Заметим также, что при подстановке в формулу /6/ выражения P при $\alpha = 0$ получающаяся формула для определения угла A не совпадает с тем, что было получено ранее в работе /4/, однако результаты расчетов по обеим формулам одинаковы.

В расчетах по формулам /6/ и /6'/, во-первых, все показатели преломления абсолютные. Во-вторых, величины Δn_1 ,

Таблица

Энергия протонов, ГэВ	Угол призмы-радиатора из SiO_2 , α	Угол излучения Вавилова-Черенкова для $\lambda = 6563 \text{ \AA}$, θ	Угол A ахроматической призмы	Угол выхода излучения из ахроматической призмы, ν^*
0,637	23°	$31^\circ 16,5'$	$22^\circ 12'$ стекло ТФ-5 $n_D = 1,7550$	$-5^\circ 17'$
1,0	30°	$38^\circ 19'$	$25^\circ 28'$ стекло ТФ-1 $n_D = 1,6475$	$-5,12'$

* - угол ν считается от нормали к выпускной грани призмы /знак минус означает отсчет по часовой стрелке при ахроматизации прямого излучения/.

Δn_2 , Δn_3 и $\Delta \theta$ берутся либо для верхней границы диапазона $\Delta \lambda(\lambda_1)$, либо для нижней (λ_2).

Результаты расчетов по формулам /6/ и /6' / преломляющих углов ахроматических призм для призмы-радиатора из плавленного кварца и двух энергий протонов 0,687 ГэВ и 1 ГэВ, приведены в таблице.

Компенсация расходимости конуса излучения Вавилова-Черенкова вследствие дисперсии радиатора с помощью двойных ахроматических призм в простом методе позволяет использовать весь спектр излучения, что повышает чувствительность метода и в принципе позволяет осуществлять его автоматизацию.

Схема прибора, основанного на комбинированном методе, показана на рис. 6.

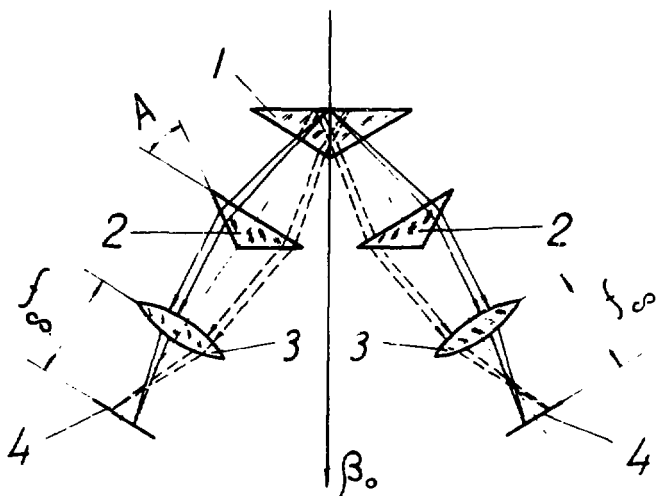


Рис. 6. Схема прибора, основанного на комбинированном черенковском методе измерения энергии коллимированных частиц: 1 - призма-радиатор с показателем преломления n_1 ; 2 - двойная ахроматическая призма; 3 - объектив с фокусным расстоянием f /настроенный на бесконечность/; 4 - фотопленка или высокочувствительный детектор, позволяющий измерять место попадания фотона с достаточной точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zrelow V.P. Nucl. Instr. and Meth., 1974, v.115, p.457-459.
2. Зрелов В.П., Лупильцев В.П., Шабашов М.Ф. ОИЯИ, Р13-9202, Дубна, 1975; Nucl. Instr. and Meth., 1976, v.134, p.437-440.
3. Зрелов В.П., Павлович П., Шулек П. ОИЯИ, Р13-5866, Дубна, 1971.
4. Зрелов В.П., Шулекова Г., Шулек П. ОИЯИ, Р13-5868, Дубна, 1971.

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

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.
Заказ 26013. Тираж 630. Уч.-изд. листов 0,74.
Редактор Н.Н.Зрелова. Подписано к печати 31.1.79 г.
Корректор Р.Д.Фомина.