

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



~~1073075848~~

P13 - 7076

В.П.Зрелов

ПРОСТОЙ МЕТОД (МЕТОД ДВОЙНЫХ ОТРАЖЕНИЙ)  
ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ  
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА

**1973**

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

## Ранг публикаций Объединенного института ядерных исследований

Препринты и сообщения Объединенного института ядерных исследований /ОИЯИ/ являются самостоятельными публикациями. Они издаются в соответствии со ст. 4 Устава ОИЯИ. Отличие препринтов от сообщений заключается в том, что текст препринта будет впоследствии воспроизведен в каком-либо научном журнале или аперiodическом сборнике.

## Индексация

Препринты, сообщения и депонированные публикации ОИЯИ имеют единую нарастающую порядковую нумерацию, составляющую последние 4 цифры индекса.

Первый знак индекса - буквенный - может быть представлен в 3 вариантах:

“Р” - издание на русском языке;

“Е” - издание на английском языке;

“Д” - работа публикуется на русском и английском языках.

Препринты и сообщения, которые рассылаются только в страны-участницы ОИЯИ, буквенных индексов не имеют.

Цифра, следующая за буквенным обозначением, определяет тематическую категорию данной публикации. Перечень тематических категорий изданий ОИЯИ периодически рассылается их получателям.

Индексы, описанные выше, проставляются в правом верхнем углу на обложке и титульном листе каждого издания.

## Ссылки

В библиографических ссылках на препринты и сообщения ОИЯИ мы рекомендуем указывать: инициалы и фамилию автора, далее - сокращенное наименование института-издателя, индекс, место и год издания.

Пример библиографической ссылки:

*И.И.Иванов. ОИЯИ, Р2-4985, Дубна, 1971.*

P13 - 7076

В.П.Зрелов

ПРОСТОЙ МЕТОД (МЕТОД ДВОЙНЫХ ОТРАЖЕНИЙ)  
ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ  
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА

*Направлено в Nuclear Instruments  
and Methods*

Зрелов В.П.

P13 - 7076

Простой метод (метод двойных отражений) измерения средней энергии протонов по излучению Вавилова-Черенкова

В работе описан простой способ измерения средней энергии релятивистских частиц по излучению Вавилова-Черенкова, возникающему в трехгранной призме-радиаторе с зеркальными гранями. Приводятся расчетные формулы. Оценена достижимая этим методом точность измерения энергии протонов.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.  
Дубна, 1973

Zrelov V.P.

P13 - 7076

A Simple Method (Double Reflection Method)  
of Measuring the Average Proton Energy  
on Vavilov-Cerenkov Radiation

A simple method is described used for measuring the average energy of relativistic particles on Vavilov-Cerenkov radiation appearing in the trigonal prism-radiator with mirror surfaces. The calculation formulae are presented. The accuracy of the proton energy measurement, achieved by this method, is estimated.

Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.  
Dubna, 1973

В работах /1-5/ предложено и осуществлено несколько методов для точного измерения средней энергии протонов в коллимированных пучках от ускорителей в области энергий  $\approx 1$  Гэв с использованием излучения Вавилова-Черенкова. Однако всем этим методам присущ общий недостаток - их сложность.

В предлагаемом методе сохраняется высокая точность измерения энергии, полученная, например, в /3/, но достигается она более простым путем.

\* \* \*

Пусть коллимированный пучок тяжелых релятивистских частиц падает перпендикулярно грани III трехгранной призмы, имеющей абсолютный показатель преломления  $n_0$  для длины волны  $\lambda_0$  /рис. 1а/. При средней скорости частиц в пучке  $\beta_0 > n_0^{-1}$  в призме возникает конус излучения Вавилова-Черенкова с половиной угла при вершине  $\theta_0 = \arccos (n_0 \beta_0)^{-1}$

Грани призмы I и II образуют с гранью III двугранные углы  $\alpha$  и  $\alpha_1$ , приблизительно равные углу излучения  $\theta_0$ . На эти грани нанесены зеркальные слои так, как показано на рис. 1б /пунктиром на рисунке показан профиль пучка частиц/.

Ход лучей через грань I призмы будет иметь вид, показанный на рис. 1а. Под углом  $\gamma_1$  через эту грань выходит излучение от верхней части пучка без отражения, а под углом  $\gamma_2$  - дважды отраженное последовательно от граней II и III. От нижней части пучка излучение выходит через грань II без отражения под углом  $\gamma_1'$ , а под углом  $\gamma_2'$  - дважды отраженное от граней I и III /на рисунке не показано/.

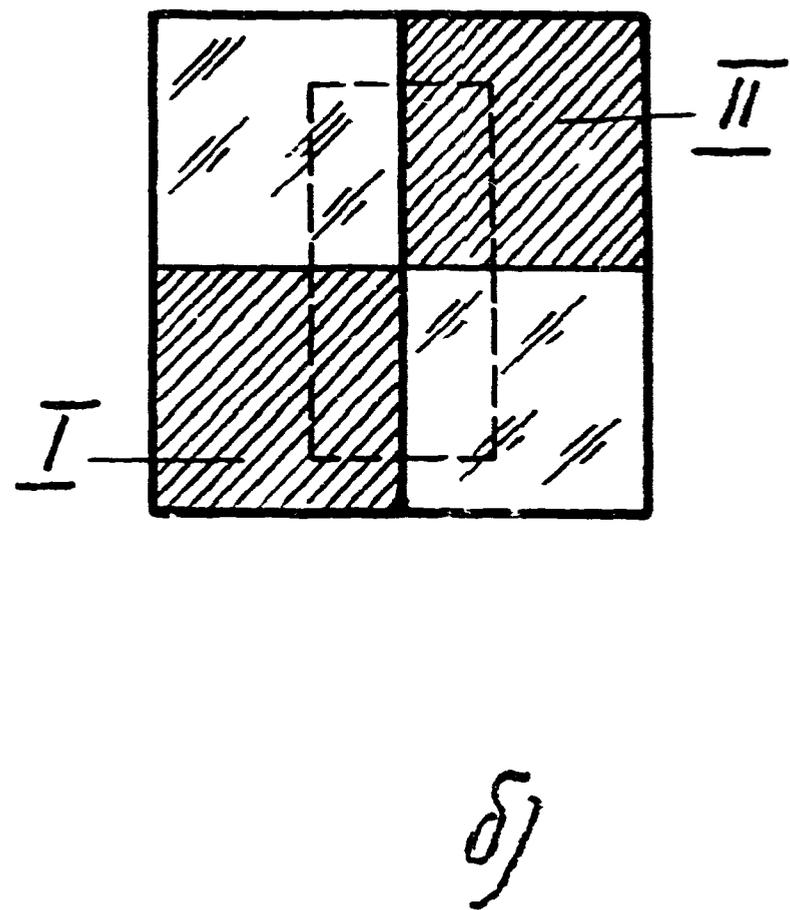
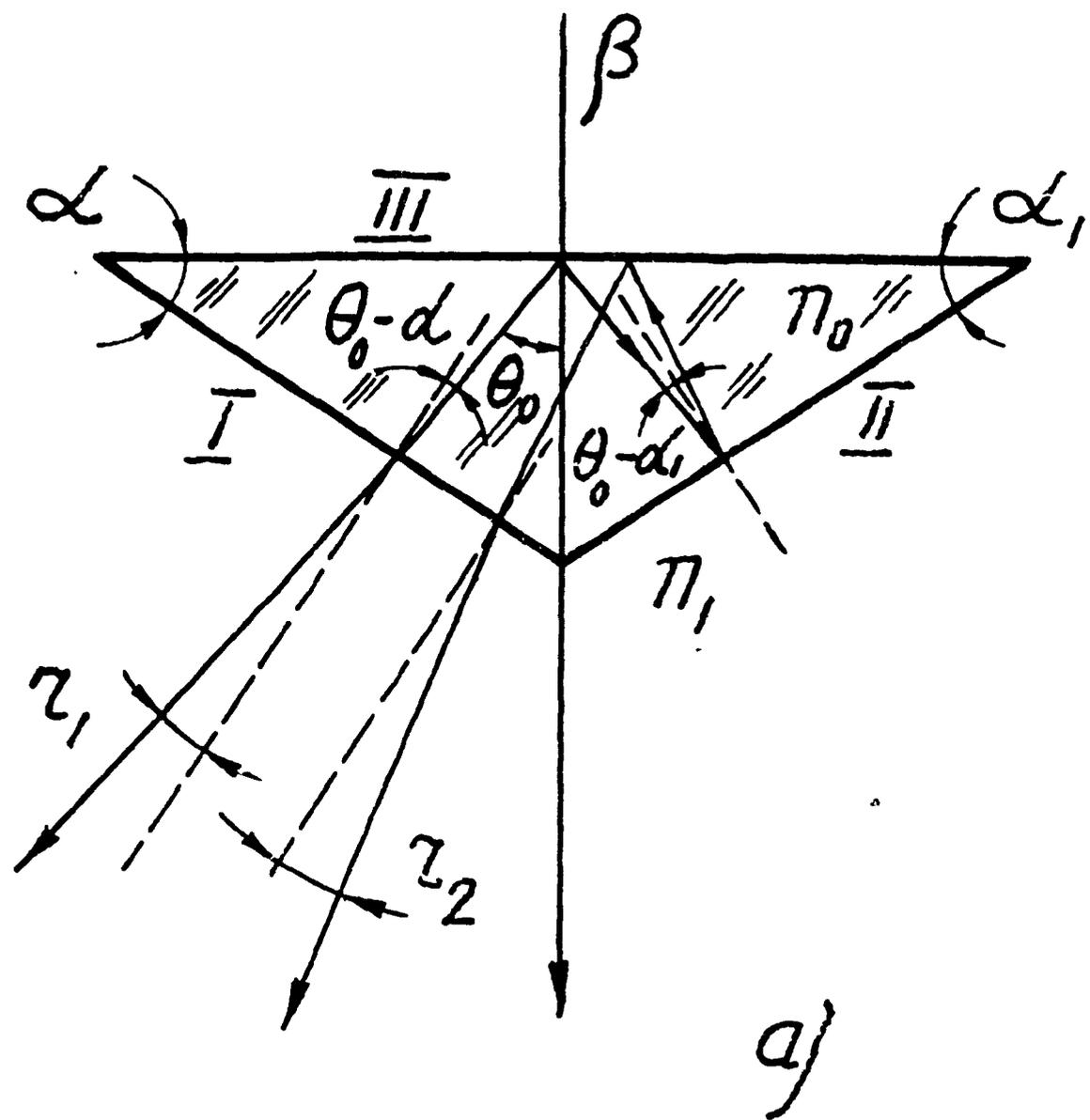


Рис. 1. Ход лучей в призме-радиаторе.

Используя условия преломления излучения на грани I призмы-радиатора и условия отражения на гранях II и III, нетрудно получить основную формулу для определения угла  $\theta_0$  испускания излучения Вавилова-Черенкова:

$$\theta_0 = \alpha_1 \pm \arcsin \frac{1}{n_0'} \sqrt{\frac{\sin^2 \frac{r_1 + r_2}{2} - n_0'^2 \operatorname{tg}^2 \frac{r_1 + r_2}{2} \sin^2 (\alpha_1 - \alpha)}{\cos^2 (\alpha_1 - \alpha) - \operatorname{tg}^2 \frac{r_1 + r_2}{2} \sin^2 (\alpha_1 - \alpha)}}, \quad /1/$$

где  $n' = \frac{n_0}{n_1}$  - относительный показатель преломле-

ния призмы, углы  $r_1$  и  $r_2$  в формуле /1/ отсчитываются от нормали к грани I, а знак перед корнем берется /+/, если  $\theta_0 > \alpha_1$ , и знак /-/, если  $\theta_0 < \alpha_1$ . Различить эти два случая можно легко по виду и относительному расположению изображений излучения Вавилова-Черенкова, полученных фотографическим способом. При  $\theta_0 > \alpha_1$  изображения прямого и дважды отраженного излучения имеют вид "собирающей" линзы, а при  $\theta_0 < \alpha_1$  - "рассеивающей", как это показано на рис. 2 для случая регистрации правой /если смотреть по направлению движения частиц/ части конуса излучения.

При малых величинах углов  $(r_1 + r_2)$ ,  $(\alpha_1 - \alpha)$  и  $(\theta_0 - \alpha_1)$  формула /1/ принимает вид, удобный для оценок

$$\theta_0 \cong \alpha_1 \pm \frac{r_1 + r_2}{2n_0'}. \quad /2/$$

Для того, чтобы прямое и дважды отраженное излучения не перекрывались, должно выполняться условие

$$(r_1 + r_2) \approx (3 \div 4) \left\{ \sum_i \Delta \theta_i^2 \right\}^{1/2}, \quad /3/$$

где  $\Delta \theta_i$  - угловые расходимости конуса излучения за счет различных факторов /угловая расходимость частиц

в пучке, энергетическая неоднородность пучка, многократное рассеяние и замедление частиц в призме, дисперсия радиатора/.

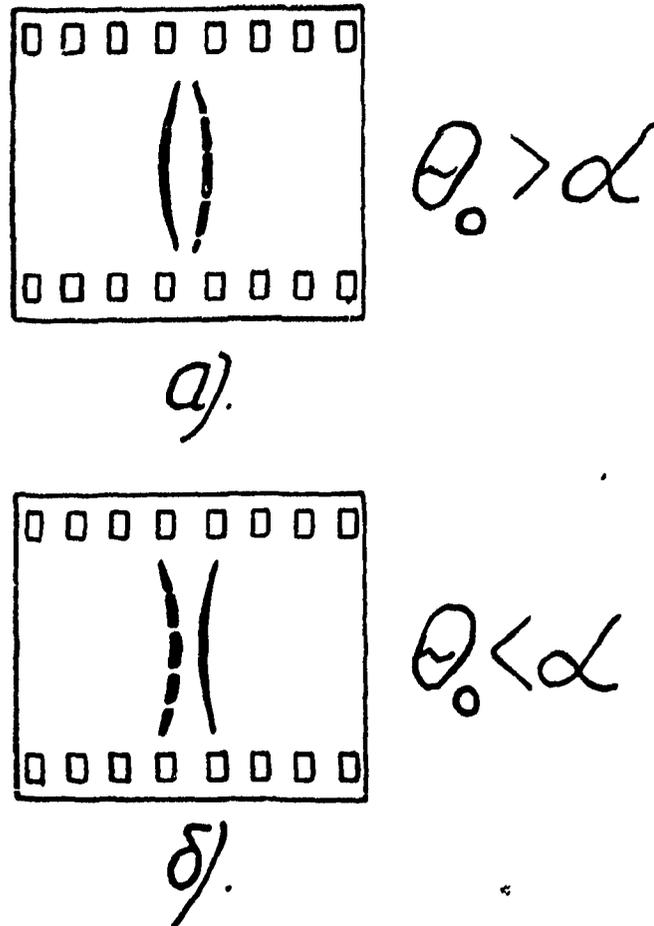


Рис. 2. Вид изображений излучения Вавилова-Черенкова /пунктиром показано дважды отраженное излучение, как более слабое/. а/ для случая  $\theta_0 > \alpha$ ; б/ для случая  $\theta_0 < \alpha$ .

\* \* \*

Одной из особенностей данного метода измерения энергии частиц является также и то, что неперпендикулярность направления частиц к грани III призмы-радиатора не вносит ошибку в определение угла  $\theta_0$ .

Как показывают расчеты, основная погрешность метода связана с ошибкой измерения углового смещения изображений  $\Delta(r_1 + r_2)$ . Суммарная ошибка измерения  $\theta_0$  /без учета ошибки измерения  $n_0(\lambda_0)$  / равна.

$$\Delta \theta_0 = [(\Delta \alpha_1)^2 + \left\{ \frac{\Delta(r_1 + r_2)}{2n'_0} \right\}^2]^{1/2}. \quad /4/$$

При  $\Delta \alpha \ll \frac{\Delta(r_1 + r_2)}{2n'_0}$  соответствующая ошибка измерения скорости частиц составит:

$$\Delta \beta = \frac{n_1 \beta^2}{2} \sin \left( \alpha_1 \pm \frac{r_1 + r_2}{2n'_0} \right) \Delta(r_1 + r_2),$$

/5/

где знак  $/\pm/$  соответственно берется в зависимости от того,  $\theta_0 > \alpha_1$ , или  $\theta_0 < \alpha_1$  /см. выше/.

Если  $n'_0 = 1,50$ ,  $\Delta \alpha = 5'$ , а  $\Delta(r_1 + r_2)$  определена с точностью в одну минуту, то ошибка в скорости при  $\beta = 0,811$  составит  $\Delta \beta = 5,44 \cdot 10^{-6}$ . Такому  $\Delta \beta$  соответствует ошибка определения энергии протонов  $\Delta E = 0,205$  Мэв. Для уменьшения ошибки измерения угла  $\theta_0$  вследствие дисперсии материала радиатора излучение необходимо регистрировать в узком диапазоне длин волн  $\Delta \lambda_0$ , например, используя для этих целей интерференционные фильтры.

\* \* \*

Регистрация излучения, выходящего также и через грань II призмы-радиатора /как это показано на рис.3/ позволяет уменьшить ошибку измерения скорости в  $\sqrt{2}$  раз. Действительно, в этом случае измеряется угол  $2\theta_0 = \theta_1 + \theta_2$ , поэтому ошибки  $\Delta \theta_1$  и  $\Delta \theta_2$  связаны равенством

$$\Delta \theta_1 = \Delta \theta_2 + 2r_{\theta_1 \theta_2} \sigma_{\theta_1} \sigma_{\theta_2}, \quad /6/$$

где  $r_{\theta_1 \theta_2}$  - коэффициент корреляции  $|r_{\theta_1 \theta_2}| < 1$ ,  $\sigma_{\theta_1}$  и  $\sigma_{\theta_2}$  - стандартные ошибки измерения углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$ . В силу линейной зависимости  $\theta_1$  и  $\theta_2$  коэффициент  $r_{\theta_1 \theta_2} = -1$ , поэтому второй член формулы можно не учитывать и считать /без опасения завышения ошибок измерений/, что  $\Delta \theta_1 \cong \Delta \theta_2$ , а суммарная ошибка определения угла  $\theta_0$  из измерений  $\theta_1$  и  $\theta_2$  будет  $\Delta \theta_0 \cong \sqrt{2}/2 \Delta \theta_1 = 0,71 \Delta \theta_1$ .

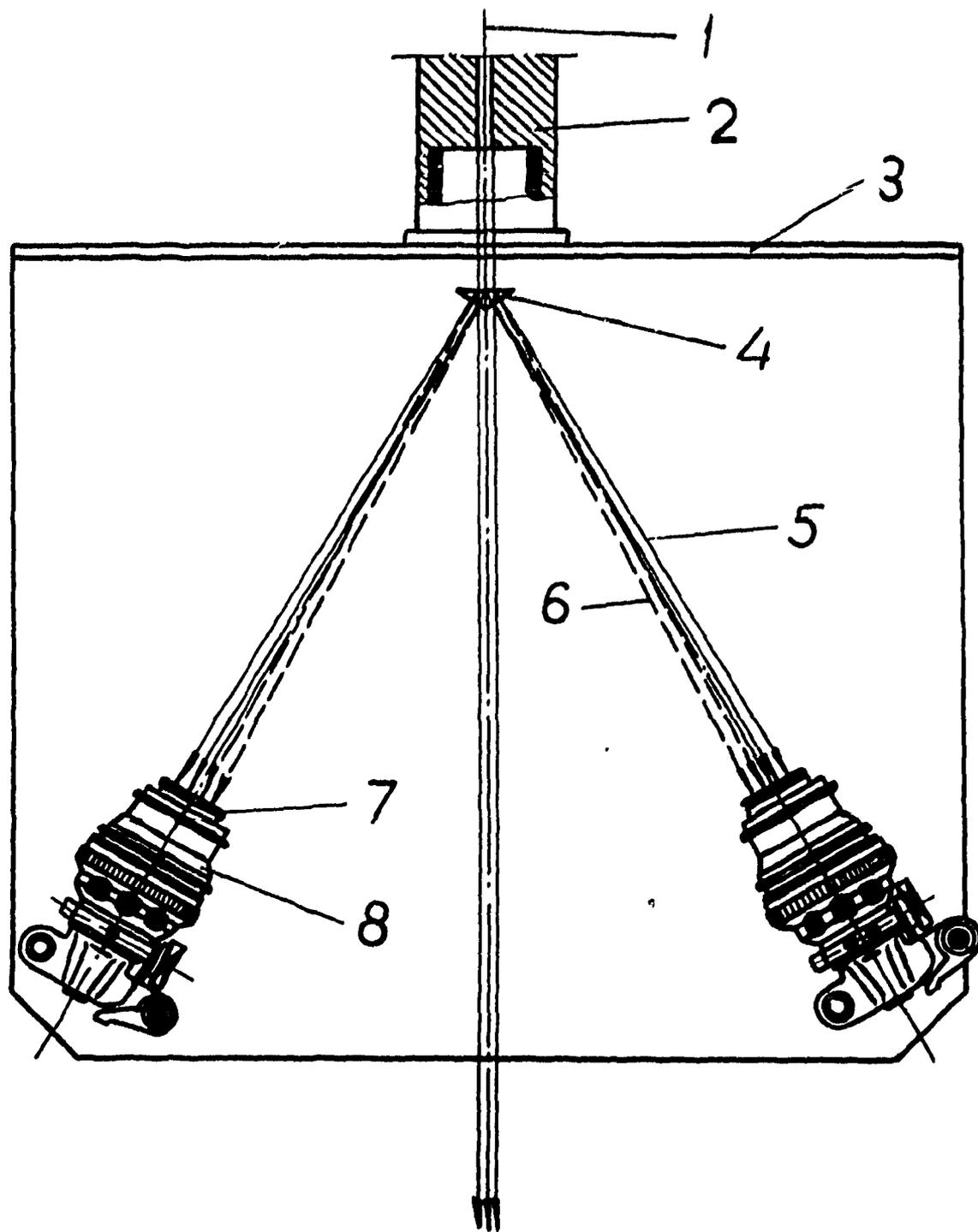


Рис. 3. Схема опыта для измерения энергии двумя фото-аппаратами: 1 - пучок; 2 - коллиматор; 3 - опорная плита; 4 - призма-радиатор; 5 - излучение Вавилова-Черенкова "прямое"; 6 - излучение дважды отраженное; 7 - интерференционный фильтр; 8 - объектив, настроенный на бесконечность.

\* \* \*

Независимое определение угла излучения  $\theta_0$  при использовании призмы-радиатора может быть осуществлено путем измерения углов  $\psi_1$  и  $\psi_2$  /  $\psi'_1$  и  $\psi'_2$  / между направлением излучения, вышедшего через грани I, II /как прямого, так и дважды отраженного/ и отсчитываемых соответственно от граней II и I /рис.4/.

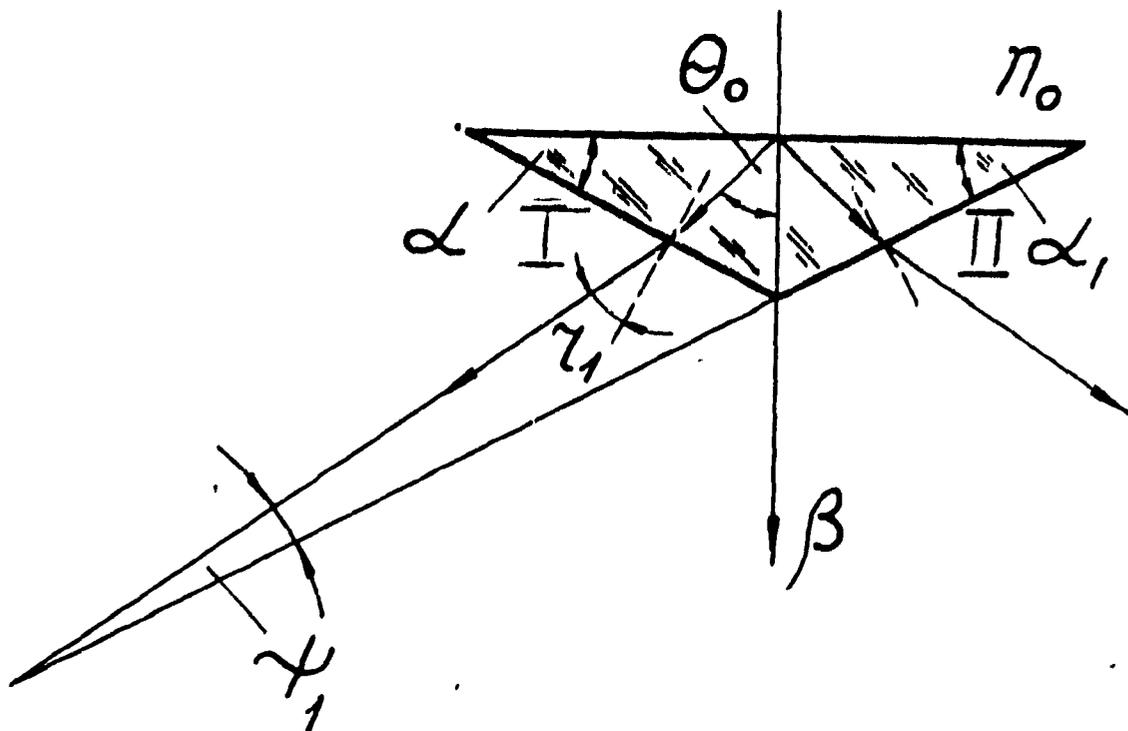


Рис. 4. Схема измерения углов  $\psi_1$  и  $\psi_2$ .

При этом углы  $r_1$  и  $r_2$ , входящие в формулу /1/, связаны с углами  $\psi_1$  и  $\psi_2$  соотношениями /для  $\theta_0 > \alpha_1$  /:

$$\psi_1 = \frac{\pi}{2} - (r_1 + \alpha + \alpha_1); \quad \psi_2 = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \alpha_1 - r_2).$$

/для  $\theta_0 < \alpha_1$  знаки  $r_1$  и  $r_2$  - обратные/.

Для проведения таких измерений необходимо дополнительно использовать две оптические системы нанесения реперных рисок, определяющих положение граней I и II призмы, подобно тому, как это было применено в монохроматическом методе /3/ /рис. 5/.

В заключение следует отметить, что, по существу, основная идея предложенного выше метода использовалась частично ранее в так называемом монохроматическом способе /3/ измерения энергии протонов по излуче-

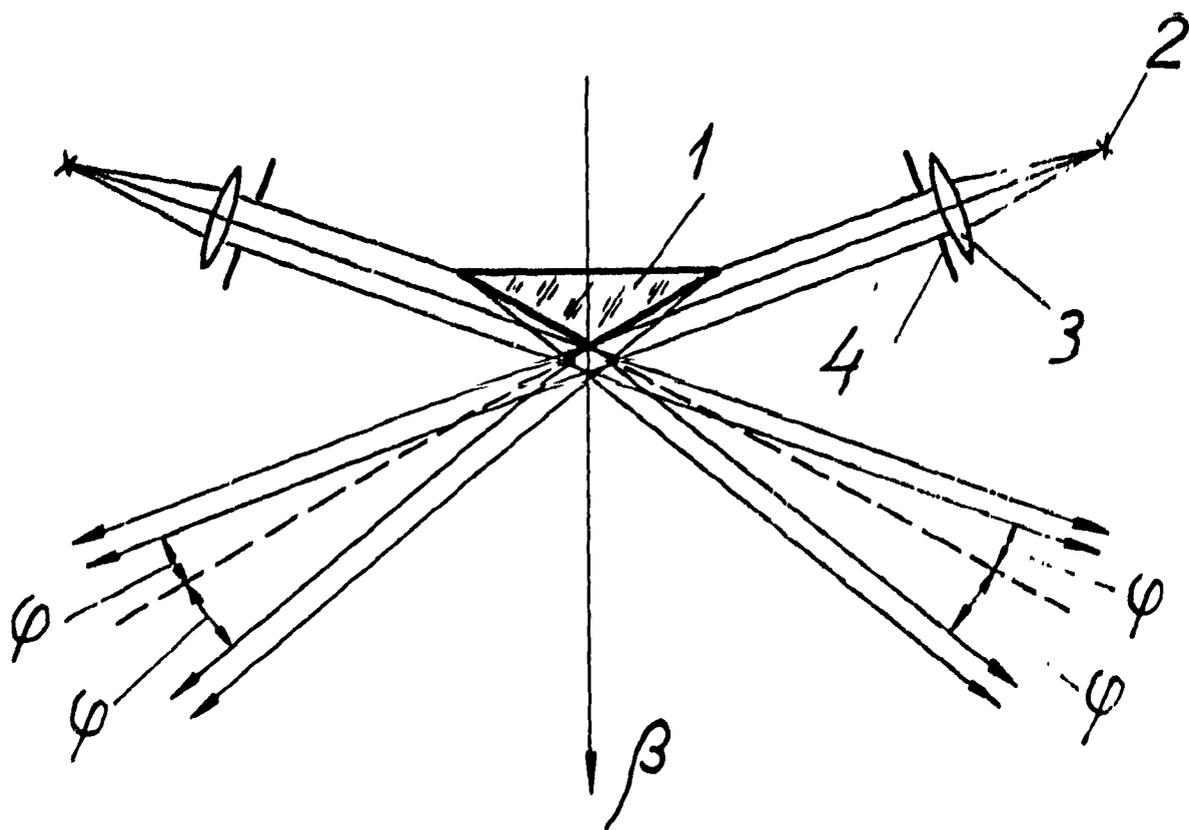


Рис. 5. Схема нанесения реперных рисок для определения положения граней призмы-радиатора: 1 - призма-радиатор; 2 - источник света; 3 - объектив; 4 - щель.

нию Вавилова-Черенкова. Только там отражение излучения использовалось для вспомогательной цели - определения угла между поверхностью интерференционных фильтров и плоскопараллельным радиатором /рис. 6/. Если же угол  $\alpha$  точно измерить заранее, то это позволит повысить точность измерения угла выхода излучения из радиатора.

Из рис. 6 следует, что угол между направлением излучения Вавилова-Черенкова, вышедшим из радиатора /1/ прямо, и направлением излучения /4/, испытавшего отражение от зеркала /2/, связан с углами  $\gamma$  и  $\alpha$  простым соотношением

$$\bar{\gamma} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} = \alpha - \frac{\gamma}{2}. \quad /6/$$

При ошибке  $\Delta \alpha \ll \Delta \gamma$  ошибка  $\Delta \bar{\gamma} \approx 1/2 \Delta \gamma$ , что позволяет уменьшить ошибку определения угла  $\gamma$  даже при использовании одного фотоаппарата примерно вдвое.

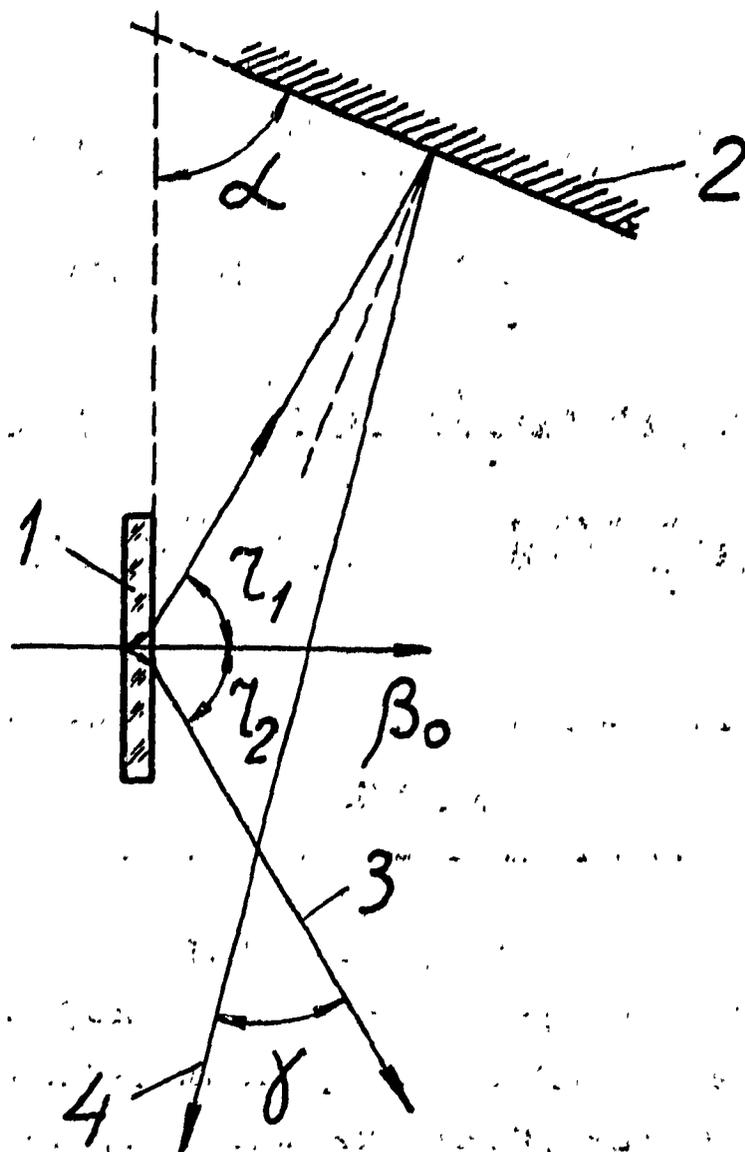


Рис. 6. Ход лучей в монохроматическом методе: 1 - плоско-параллельный радиатор; 2 - зеркало; 3 - "прямое" излучение; 4 - "отраженное" излучение.

#### Литература

1. R.L.Mather. *Phys.Rev.*, 84, 181, 1951.
2. В.П.Зрелов. *ПТЭ*, №3, 100 /1965/.
3. V.P.Zrelov, M.A.Musin, P.Pavlovič, P.Šulek, R.Janik. *Nucl.Instr.Meth.*, v. 103, 261, 1972..
4. V.P.Zrelov, P.Pavlovič, P.Šulek. *Nucl.Instr.Meth.*, v. 105, 109, 1972.
5. В.П.Зрелов, П.Павлович, П.Шулек. *Препринт ОИЯИ, P13-5866, Дубна, 1971. Nucl.Instr.Meth.*, v. 107, 279, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 апреля 1973 года.

# Тематические категории публикаций Объединенного института ядерных исследований

**Индекс**

**Тематика**

1. Экспериментальная физика высоких энергий
2. Теоретическая физика высоких энергий
3. Экспериментальная нейтронная физика
4. Теоретическая физика низких энергий
5. Математика
6. Ядерная спектроскопия и радиохимия
7. Физика тяжелых ионов
8. Криогеника
9. Ускорители
10. Автоматизация обработки экспериментальных данных
11. Вычислительная математика и техника
12. Химия
13. Техника физического эксперимента
14. Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15. Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16. Дозиметрия и физика защиты

## Условия обмена

Препринты и сообщения ОИЯИ рассылаются бесплатно, на основе взаимного обмена, университетам, институтам, лабораториям, библиотекам, научным группам и отдельным ученым более 50 стран.

Мы ожидаем, что получатели изданий ОИЯИ будут сами проявлять инициативу в бесплатной посылке публикаций в Дубну. В порядке обмена принимаются научные книги, журналы, препринты и иного вида публикации по тематике ОИЯИ.

Единственный вид публикаций, который нам присылать не следует, - это репринты /оттиски статей, уже опубликованных в научных журналах/.

В ряде случаев мы сами обращаемся к получателям наших изданий с просьбой бесплатно прислать нам какие-либо книги или выписать для нашей библиотеки научные журналы, издающиеся в их странах.

## Отдельные запросы

Издательский отдел ежегодно выполняет около 3 000 отдельных запросов на высылку препринтов и сообщений ОИЯИ. В таких запросах следует обязательно указывать индекс запрашиваемого издания.

## Адреса

Письма по всем вопросам обмена публикациями, а также запросы на отдельные издания следует направлять по адресу:

*101000 Москва,  
Главный почтамт, п/я 79.  
Издательский отдел  
Объединенного института  
ядерных исследований.*

Адрес для посылки всех публикаций в порядке обмена, а также для бесплатной подписки на научные журналы:

*101000 Москва,  
Главный почтамт, п/я 79.  
• Научно-техническая библиотека  
Объединенного института  
ядерных исследований.*

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.  
Заказ 16224. Тираж 488. Уч.-изд.листов 0,58.  
Редактор Б.Б.Колесова. Подписано к печати 14/У-73 г.