

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗУЧ.13
3-895

18/01-7

P13 - 7076

2239/2-73
В.П.Зрелов

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

1973

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P13 - 7076

В.П.Зрелов

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

*Направлено в Nuclear Instruments
and Methods*

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

В работах /1-5/ предложено и осуществлено несколько методов для точного измерения средней энергии протонов в коллимированных пучках от ускорителей в области энергий ≈ 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 λ_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 α и α_1 , приблизительно равные углу излучения θ_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 γ_1 через эту грань выходит излучение от верхней части пучка без отражения, а под углом γ_2 - дважды отраженное последовательно от граней II и III. От нижней части пучка излучение выходит через грань II без отражения под углом γ_1' , а под углом γ_2' - дважды отраженное от граней I и III /на рисунке не показано/.

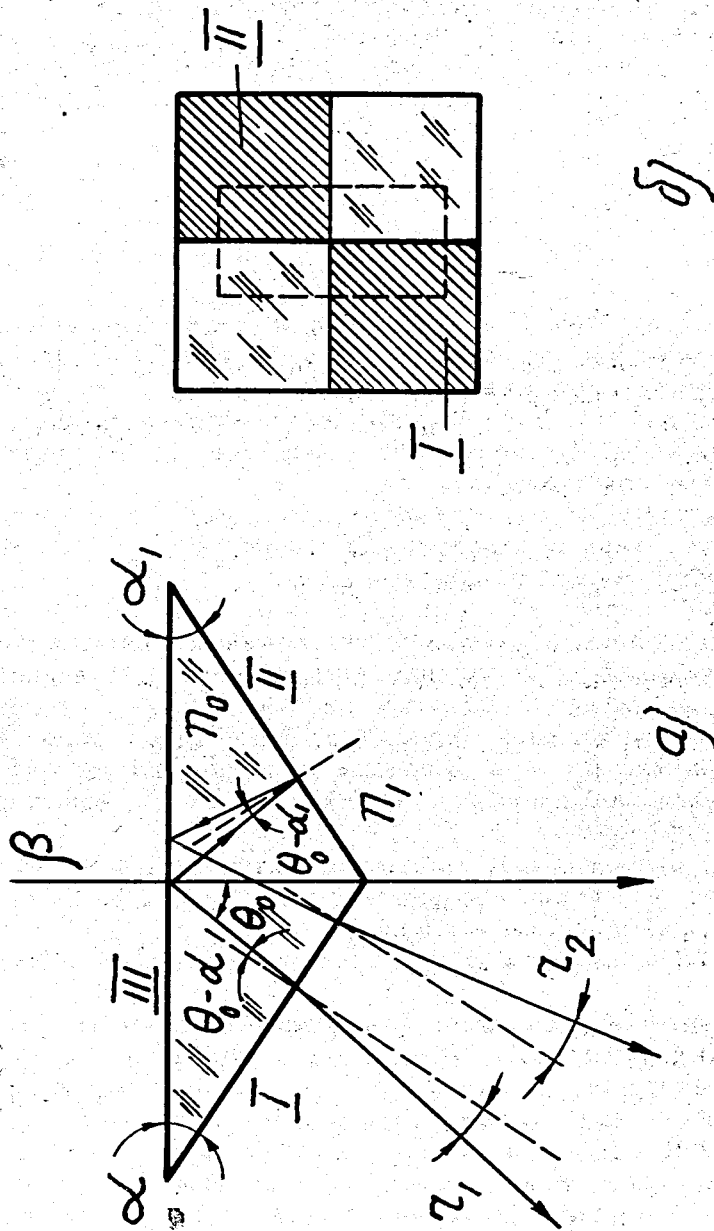


Рис. 1. Ход лучей в призме-радиаторе.

Используя условия преломления излучения на грани I призмы-радиатора и условия отражения на гранях II и III, нетрудно получить основную формулу для определения угла θ_0 испускания излучения Вавилова-Черенкова:

$$\theta_0 = \alpha_1 \pm \arcsin \frac{1}{n'_0} \sqrt{\frac{\sin^2 \frac{r_1 + r_2}{2} - n'^2_0 \operatorname{tg}^2 \frac{r_1 + r_2}{2} \sin^2 (\alpha_1 - \alpha)}{\cos^2 (\alpha_1 - \alpha) - \operatorname{tg}^2 \frac{r_1 + r_2}{2} \sin^2 (\alpha_1 - \alpha)}} \quad /1/$$

где $n'_0 = \frac{n_0}{n_1}$ - относительный показатель преломления 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

$$\theta_0 \approx \alpha_1 \pm \frac{r_1 + r_2}{2n'_0} \quad /2/$$

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

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

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/.

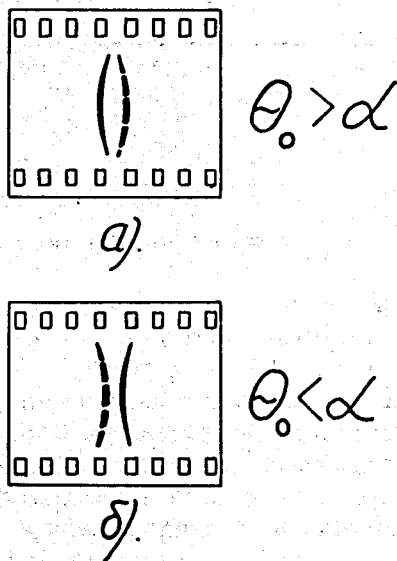


Рис. 2. Вид изображений излучения Вавилова-Черенкова /пунктиром показано дважды отраженное излучение, как более слабое/. а/ для случая $\theta_0 > \alpha$; б/ для случая $\theta_0 < \alpha$.

* * *

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 θ_0 .

Как показывают расчеты, основная погрешность метода связана с ошибкой измерения углового смещения изображений $\Delta(r_1 + r_2)$. Суммарная ошибка измерения θ_0 /без учета ошибки измерения n_0 (λ_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:

$$\Delta \beta = \frac{n_1 \beta^2}{2} \sin \left(\alpha_1 \pm \frac{r_1 + r_2}{2n_0'} \right) \Delta(r_1 + r_2), \quad /5/$$

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 $\Delta E = 0,205 \text{ Мэв}$. Для уменьшения ошибки измерения угла θ_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 $|r_{\theta_1 \theta_2}| < 1$, σ_{θ_1} и σ_{θ_2} - стандартные ошибки измерения углов θ_1 и θ_2 . В силу линейной зависимости θ_1 и θ_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 θ_0 из измерений θ_1 и θ_2 будет $\Delta \theta_0 \cong \sqrt{2/2} \Delta \theta_1 = 0,71 \Delta \theta_1$.

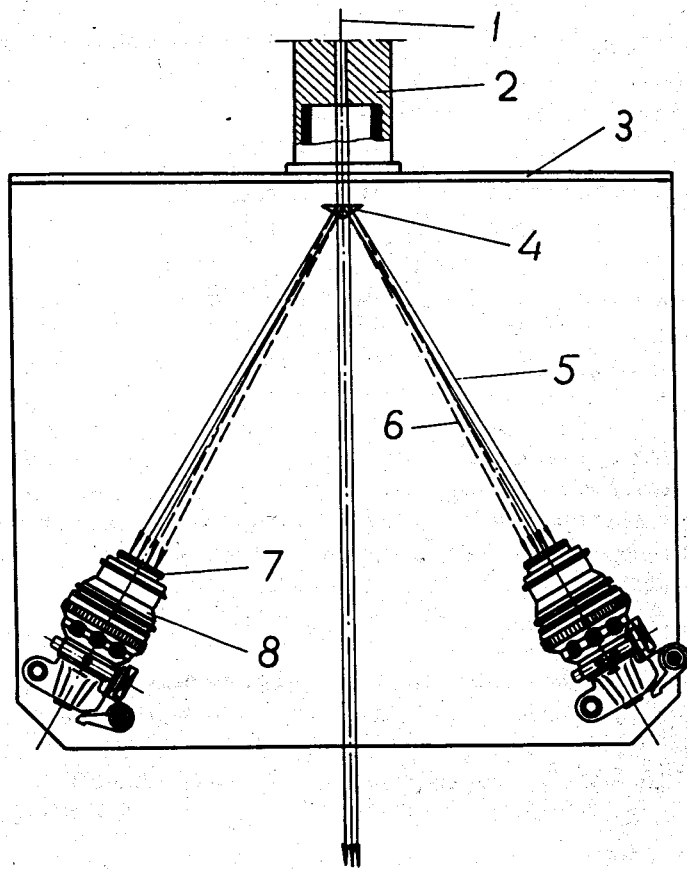


Рис. 3. Схема опыта для измерения энергии двумя фото-аппаратами: 1 - пучок; 2 - коллиматор; 3 - опорная плита; 4 - призма-радиатор; 5 - излучение Вавилова-Черенкова "прямое"; 6 - излучение дважды отраженное; 7 - интерференционный фильтр; 8 - объектив, настроенный на бесконечность.

* * *
 Независимое определение угла излучения θ_0 при использовании призмы-радиатора может быть осуществлено путем измерения углов ψ_1 и ψ_2 / ψ'_1 и ψ'_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/.

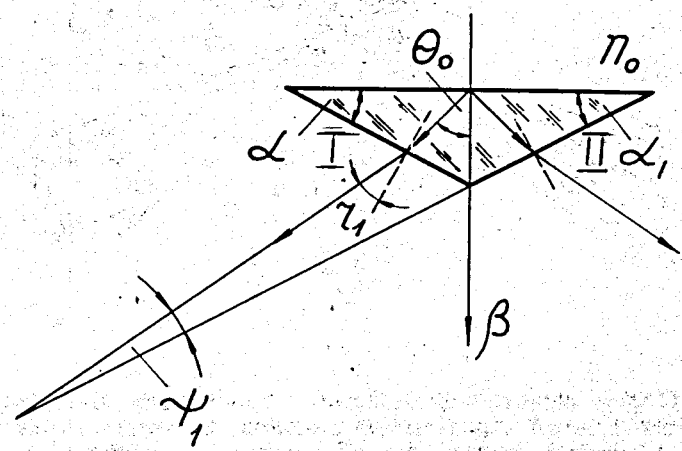


Рис. 4. Схема измерения углов ψ_1 и ψ_2 .

При этом углы r_1 и r_2 , входящие в формулу /1/, связаны с углами ψ_1 и ψ_2 соотношениями /для $\theta_0 > a_1$ /:

$$\psi_1 = \frac{\pi}{2} - (r_1 + a + a_1); \quad \psi_2 = \frac{\pi}{2} - (a + a_1 - r_2).$$

/для $\theta_0 < a_1$ 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-

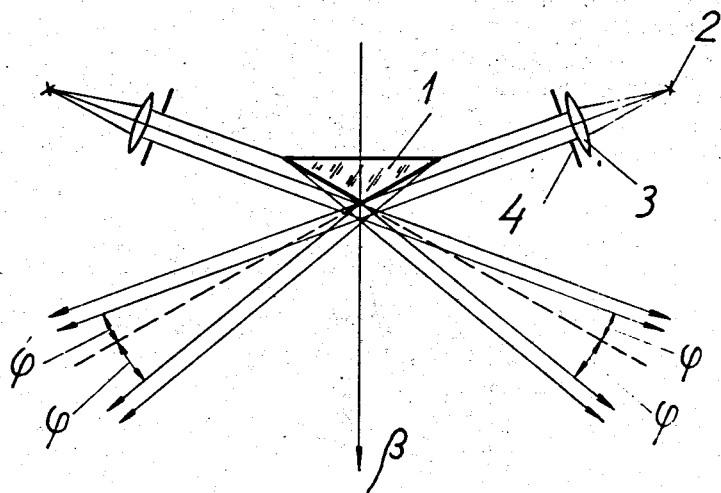


Рис. 5. Схема нанесения реперных рисок для определения положения граней призмы-радиатора: 1 - призма-радиатор; 2 - источник света; 3 - объектив; 4 - щель.

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 α 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 γ и α простым соотношением

$$\bar{r} = \frac{r_1 + r_2}{2} = \alpha - \frac{\gamma}{2}. \quad /6/$$

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

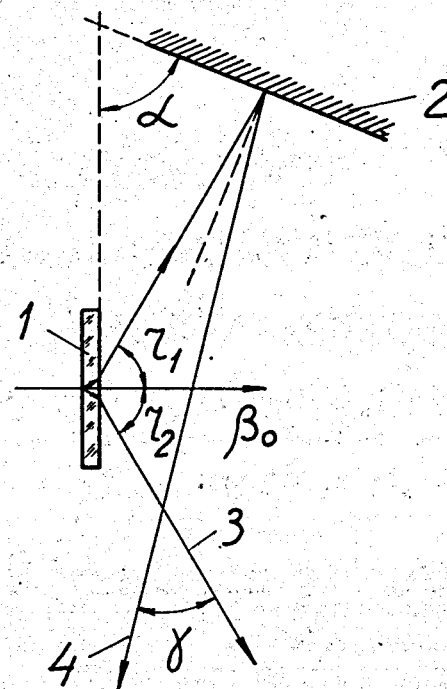


Рис. 6. Ход лучей в монохроматическом методе: 1 - плоско-параллельный радиатор; 2 - зеркало; 3 - "прямое" излучение; 4 - "отраженное" излучение.

Литература

1. R.L.Mather. *Phys.Rev.*, 84, 181, 1951.
2. В.П.Зрелов. *ПТЭ*, № 3, 100 /1965/.
3. V.P.Zrellov, M.A.Musin, P.Pavlovič, P.Šulek, R.Janik. *Nucl.Instr.Meth.*, v. 103, 261, 1972.
4. V.P.Zrellov, 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.