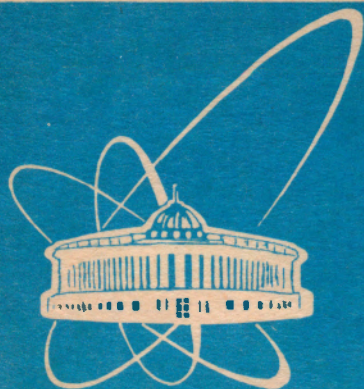


94-515



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P13-94-515

Я.Ружичка¹, Ш.Шаро¹, В.П.Зрелов, П.В.Зрелов,
Э.Д.Лапчик, Г.Гейссел², Г.Ирних², Х.Кожухаров²,
Г.Мюнценберг², Ф.Никкел², Х.Шейденбергер²,
Г.-Й.Шотт², В.Шваб², Т.Штоелкер², А.Магел³, Б.Фосс⁴

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
ПРИМЕНЕНИЯ ЧЕРЕНКОВСКОЙ МЕТОДИКИ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ПУЧКОВ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР $^{197}_{79}\text{Au}$
В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ $0,64 \pm 0,99$ ГэВ/а.е.м.

Направлено в журнал «NIM»

¹ Университет им. Коменского, Братислава, Словакия

² ГСИ, Дармштадт, Германия

³ Университет Гессен, Германия

⁴ ВТУЗ, Дармштадт, Германия

1. Введение

Методика измерения средней энергии коллимированных пучков таких элементарных однозарядных частиц, как протон, по излучению Вавилова - Черенкова (ИВЧ) впервые была применена Мазером [1] в 1951 году. Впоследствии она неоднократно совершенствовалась и видоизменялась [2 - 8]. Достигнутая точность измерений в области энергий протонов ≈ 660 МэВ составила $\sim 0,1\%$.

Однако перенос этой методики на пучки релятивистских ядер с $Z \gg 1$ требует экспериментальной проверки, поскольку такие эффекты, как фрагментация ядер в радиаторе [9], значительные изменения угла испускания ИВЧ из-за их сильного торможения [10] и возможное изменение показателя преломления радиатора вблизи траектории ядер, могут повлиять на результаты измерений. В изложенных ниже исследованиях использовались два черенковских метода на пучках ядер ${}^{197}_{79}\text{Au}$ от фрагмент-сепаратора (FRS) ускорителя SIS (ГСИ, Дармштадт).

2. Измерения средней энергии ядер ${}^{197}_{79}\text{Au}$ от ускорителя SIS по ИВЧ методом "комби"

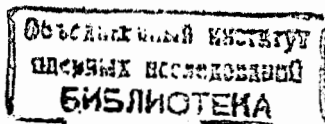
Описание метода

Такой метод использования ИВЧ для подобных измерений (по существу, представляет собой комбинацию так называемого простого метода [5, 7] и ахроматического [4]) был предложен в работе [8].

Схематически его устройство показано на рис. 1. Призма-радиатор 1 была выполнена из плавленного кварца с углами $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$, что обеспечивало условие превышения угла испускания ИВЧ в призме в диапазоне энергий работы прибора $0,95 \leq E \leq 1$ ГэВ/а.е.м.

Угол A ахроматической призмы 2 рассчитывался на основании формул, вытекающих из условий преломления ИВЧ в приборе и имеющих вид

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



где

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{K}{\Delta n_1}\right)^2}}; \sin \gamma_1 = \frac{n_1}{n_3} p; p = \sin(\Theta - \alpha);$$

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

$$\Delta \gamma_1 = \frac{Lp + \Delta \Theta \sqrt{1 - p^2}}{\sqrt{n_3^2 - n_1^2 p^2}} \cdot n_1; \Delta \Theta = \frac{\Delta n_1}{n_1^2 \beta \sin \Theta}.$$

В качестве материала было выбрано стекло марки ТФ-1. Измеренные на контрольных призмах с помощью гониометра ГС-5 показатели преломления n_1 и n_3 призм 1 и 2 представлены в табл.1.

Таблица 1

$\lambda, \text{нм}$	$n_1(\text{SiO}_2)$	$n_3(\text{ТФ-1})$	$n_2(\text{воздух})$
404,7	1,46970	1,68155	1,000275
546,1	1,46022	1,65147	1,000273
579	1,45893	1,64777	1,000272

Точность определения показателей преломления составила $\pm 2 \cdot 10^{-5}$. По формуле (1) и данным по n_1 и n_3 , взятым из каталогов, величина угла A при $\beta = 0,8761$ получилась равной $A_{\text{расч.}} = 25^\circ 42' 29''$, а реально изготовленная призма, использованная в эксперименте, имела угол $A = 25^\circ 42' 34'' \pm 10''$.

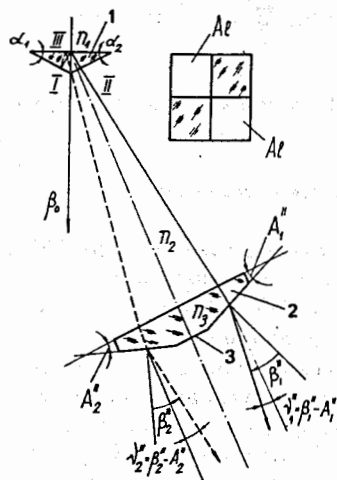


Рис.1. Ход лучей в приборе "комби": 1 — призма-радиатор; 2 — ахроматическая призма; 3 — юстировочная грань

Особенностью этого метода является то, что грань III призмы-радиатора зеркальна полностью, а боковые грани I и II — в шахматном порядке (см. рис.1). Это позволяет выводить через грани I и II как прямое излучение, так и дважды отраженное.

Схема всего прибора "комби" показана на рис.2. Коллимированный пучок 1 ядер ^{197}Au диаметром 5 мм пропускался через призму-радиатор 3, в которой испускалось ИВЧ. Как прямое ИВЧ (сплошная линия), так и дважды отраженное (пунктирная линия) после прохождения ахроматической призмы 4 отводилось плоскими зеркалами 5 в сторону от пучка частиц, где регистрировалось фотоаппаратом с объективом 6, настроенным на бесконечность.

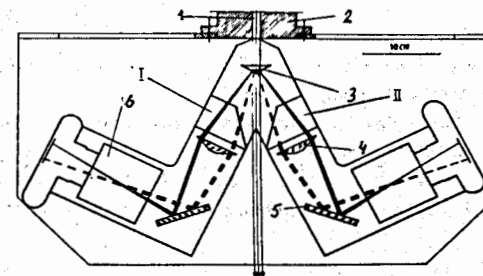


Рис.2. Схема прибора "комби": 1 — пучок; 2 — коллиматор; 3 — призма-радиатор; 4 — ахроматическая призма; 5 — плоское зеркало; 6 — фотоаппарат с объективом "Гелиос-40"

Пример изображений ИВЧ (прямого и дважды отраженного), зарегистрированных на фотопленке, показан на рис.3.

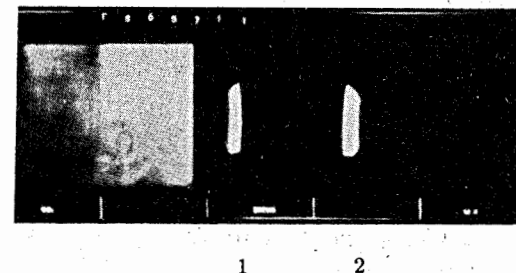


Рис.3. Пример изображений ИВЧ, полученных в одной из экспозиций с прибором "комби": 1 — изображение "прямого" ИВЧ, 2 — изображение ИВЧ дважды отраженного

Минимальное расстояние l_{1-2} между черенковскими пиками 1 и 2 определяет скорость частиц β_0 в пучке в соответствии с формулой [12]:

$$\beta_0^2 = \frac{(2K' + tg^2 2\alpha_1) + \sqrt{tg^2 2\alpha_1 [4K'(1 - K') + tg^2 2\alpha_1]}}{2K'^2 n_1^2}, \quad (2)$$

где

$$K' = \frac{K}{\cos 2\alpha_1}; \quad K = \cos^2 \alpha_1 - \frac{n_3^2}{n_1^2} \sin^2 \gamma_1^1; \quad \sin^2 \gamma_1^1 = 1 - (p + \sqrt{p^2 - M^2})^2;$$

$$p = \frac{n_2}{n_3} \sin \varphi_1 \sin A_1^I; \quad M = \frac{n_2^2}{n_3^2} \sin^2 \varphi_1 - \cos^2 A_1^I; \quad \varphi_1 = \frac{l_1 m_1 + \Delta \varphi}{2} + \bar{A};$$

$$\bar{A} = \frac{A_1^I + A_2^{II}}{2}, \quad \Delta \varphi = \Delta \varphi_{\Delta \alpha} + \Delta \varphi_{\Delta A},$$

а m_1 — калибровочный коэффициент перевода линейного расстояния l_1 на фотопленке в градусы.

Поскольку в данном приборе использовались призмы-радиаторы и ахроматические призмы, изготовленные с высокой точностью $\Delta \alpha = 2(\alpha_1 - \alpha_2) = \pm 20''$ и $\Delta A = A_1^{I,II} - A_2^{I,II} = \pm 10''$, то в расчетах полагалось $\Delta \phi = 0$, а ошибки $\Delta \alpha$ и ΔA учитывались при определении энергии (см. ниже табл.3).

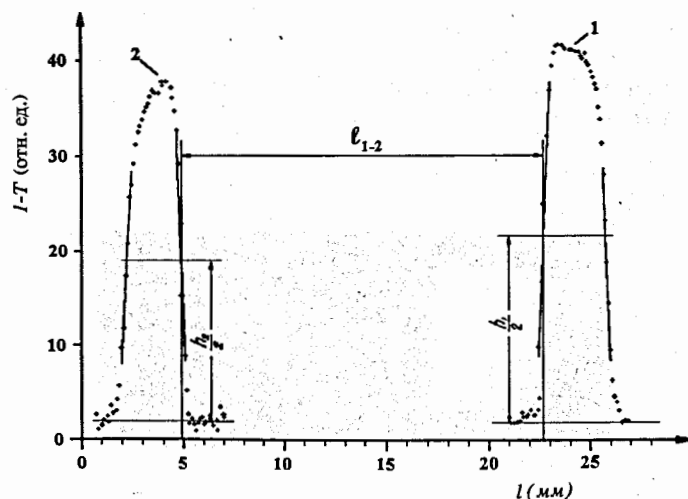


Рис.4. Фотометрическая кривая изображений ИВЧ, показанных на рис.3: 1 — пик (1) — прямое ИВЧ; 2 — пик (2) — дважды отраженное ИВЧ; l_{1-2} — минимальное расстояние между пиками (1) и (2) на их полувысотах $h_{I/2}$ и $h_{II/2}$

Результаты измерений

Фотометрическая кривая негативного изображения ИВЧ (см. рис.3) приведена на рис.4. Как видно из рисунка, основная проблема определения энергии методом "комби" для пучка тяжелых ядер заключается в том, что пики ИВЧ имеют более сложный (негауссовский) вид по сравнению с тем, что имеет место для пучков протонов. Такая форма черенковских пиков, по нашему мнению, обусловлена большими ионизационными потерями ядер ^{79}Au в самом радиаторе, а также фрагментацией (максимальная толщина призмы-радиатора из SiO_2 $t = 6,05$ мм).

Поэтому определение среднего расстояния, а следовательно, и средней энергии в центре радиатора (по центру максимума), становится затруднительным.

В связи с этим нами была принята процедура определения средней энергии пучка не в центре радиатора, а на входе в него исходя из минимального расстояния между пиками на их полувысотах $h_{I/2}^I$ и $h_{II/2}^I$.

Минимальные расстояния l_{1-2} и соответствующие им энергии E_{ch} , вычисленные по такой процедуре, полученные с помощью автоматического сканирования на автомате АЛТ-2/130 [13], приведены в табл.2.

Ошибка измерений данным методом составляет $\pm 1,4$ МэВ/а.е.м. при 960 МэВ/а.е.м. и складывается из отдельных факторов, приведенных в табл.3.

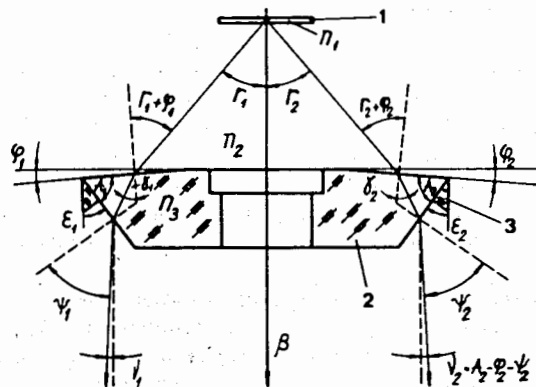
Таблица 2

Номер экспозиции	Минимальное расстояние l_{1-2} , мм	E_{ch} , МэВ/а.е.м.	$E_{\Delta E}^*$, МэВ/а.е.м.
1	$15.684 \pm_{-0.068}^{0.094}$	991.52	987.38
2	$17.665 \pm_{-0.061}^{0.065}$	956.72	958.1
3	$19.577 \pm_{-0.107}^{0.035}$	926.27	928.0

3. Измерения средней энергии пучка ядер ^{197}Au по ИВЧ ахроматическим методом

Поскольку методика "комби" с данной ахроматической призмой ограничена диапазоном энергий 900 МэВ/а.е.м. $\leq E \leq 1000$ МэВ/а.е.м., для более низких энергий ~ 660 МэВ/а.е.м. измерения проводились другим черенковским прибором — $(E - \alpha)$, использовавшимся ранее [11] на протонах с энергией 660 МэВ.

В связи с этим в этом разделе приводится только краткое описание метода и результаты измерений. Схема метода показана на рис.5. Устройство помещалось за сепаратором FRS. Пучок ядер ^{179}Au , с энергией около 670 МэВ/а.е.м., после прохождения нескольких мишеней и коллимирования (длина коллиматора



$A_1 - 60^\circ 44' 57''$ $A_2 - 60^\circ 47' 22''$
 $\varphi_1 - 6^\circ 35' 04''$ $\varphi_2 - 6^\circ 37' 17''$
 $\varepsilon_1 - 35^\circ 00' 09''$ $\varepsilon_2 - 35^\circ 00' 53''$

Рис.5. Ахроматическое черенковское устройство (ход лучей): 1 — радиатор; 2 — ахроматическая призма; 3 — реперная призма

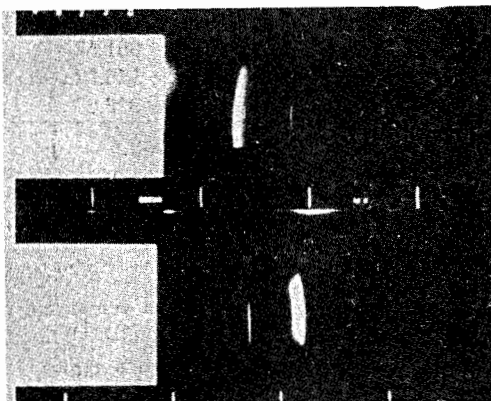


Рис.6. Фотографические изображения двух частей черенковского конуса и реперные метки, зарегистрированные фотоаппаратами слева и справа от пучка частиц

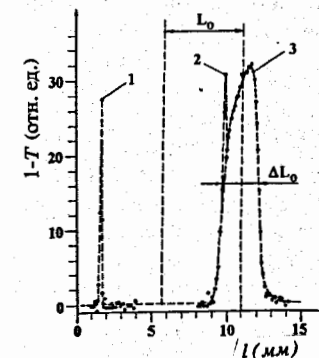
Таблица 3

Характеристика	Ошибка измерений	ΔE , МэВ/а.е.м.
Показатель преломления призмы-радиатора	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,08$
Угол призмы-радиатора	$\pm 20''$	$\pm 0,41$
Угол ахроматической призмы, ΔA	$\pm 10''$	$\pm 0,1$
Показатель преломления ахроматической призмы, Δn_A	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,025$
Остаточная дисперсия	$\pm 50''$	$\pm 0,68$
Расстояние l_{1-2} между "пиками" ИВЧ Δl_{1-2} , мм	$\pm 0,075$	$\pm 1,16$
Среднеквадратичная ошибка	$E = \pm 1,41$ МэВ/а.е.м.	

600 мм, диаметр 5 мм) попадал на плоскопараллельный радиатор 1 из LiF толщиной 1,5 мм. Часть конуса ИВЧ, испускаемого в радиаторе, проходила через ахроматическую призму 2 и после этого отклонялась зеркалом к объективу фотоаппарата, настроенного на бесконечность.

На рис.6 приведены фотографические изображения части черенковского кольца слева и справа от пучка частиц. На рис.7 показаны результаты фотометрирования одного из черенковских изображений (рис.6). Вблизи черенковского пика 3 видны узкие реперные метки 1 и 2, которые служат для определения абсолютного угла черенковского конуса внутри радиатора. Используя соответствующее соотношение для направленности ИВЧ $\cos \Theta = 1/n\beta$, путем подстановки в него измеренного угла Θ и известного показателя преломления n можно определить абсолютное значение скорости частиц β .

Рис.7. Фотометрическая кривая одного из черенковских изображений, показанных на рис.6. Расстояние L_0 между центрами реперных меток (1) и (2) и центром пика (3) черенковского конуса определяет энергию частиц в центре радиатора LiF



Определенное расстояние $\bar{L}_0 = 5,0 \pm 0,1$ мм соответствует средней энергии ядер ^{197}Au $\bar{E} = 641,1 \pm 0,9$ МэВ/а.е.м. в центре радиатора. Расчетная зависимость энергии E от расстояния L_0 приведена на рис. 8. Оптические постоянные устройства определены очень точно ($\Delta n = \pm 2 \cdot 10^{-5}$, а углы A, ϕ, ϵ с точностью $\pm 5''$), а поскольку и остаточная дисперсия после ахроматической призмы была также мала, то основную ошибку в определении \bar{E} вносит ошибка измерения \bar{L}_0 .

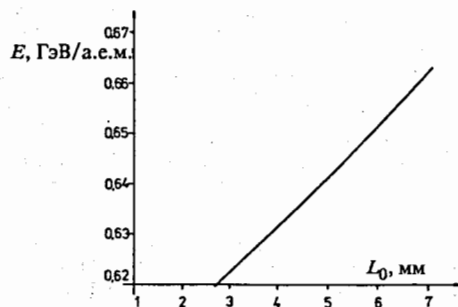


Рис.8. Зависимость энергии E_{Au} от расстояния L_0 , рассчитанная для данного прибора

Энергия пучка ядер Au определялась также исходя из данных ускорителя SIS с учетом потерь энергии на всем пути частиц до местонахождения черенковского устройства, и в центре радиатора LiF она получилась равной 638,8 МэВ/а.е.м. Разница между двумя методами составляет 2,3 МэВ/а.е.м. Беря в расчет точность определения энергии SIS около 0,8 МэВ/а.е.м., величину ошибки черенковской методики $\sim 0,9$ МэВ/а.е.м., а также неопределенность в толщинах материалов 1-2% (соответствующие 1-2 МэВ/а.е.м.), мы видим, что полученные результаты демонстрируют хорошее согласие между двумя методами.

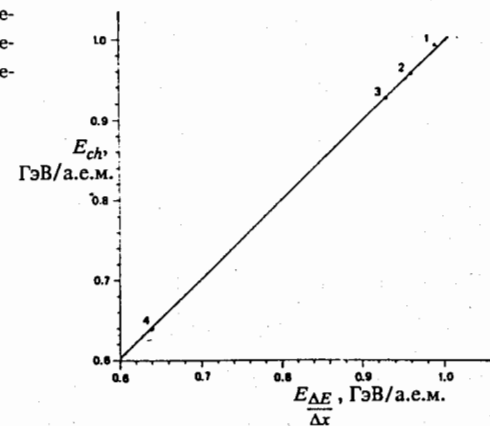
4. Проверка точности выполнения черенковского соотношения направленности для пучка ядер ^{197}Au в области энергий $0,64 \pm 1,0$ ГэВ/а.е.м.

В настоящей работе энергия ядер в пучке наряду с черенковской методикой определялась исходя из энергии ядер от ускорителя SIS $E_1 = 1060$ МэВ/а.е.м. (для первого метода) и $E_2 = 750$ МэВ/а.е.м. (для измерений вторым черенковским методом) с учетом ионизационных потерь энергии по тракту до месторасположения черенковских приборов (точнее, до входа в радиатор).

Сопоставление результатов измерений этими методами иллюстрируется рис. 9, из которого следует, что измерения хорошо согласуются между собой.

В связи с этим возникает возможность проверки соотношения $\cos \Theta = 1/n\beta$, так как черенковские методики позволяют измерить угол $\Theta_{\text{ch}}^{\text{экс}}$ испускания ИВЧ в радиаторе с известным показателем преломления, а методика, условно названная нами "ΔE", дает энергию ядер E_{Au} (а следовательно, и β), что позволяет рассчитать черенковский угол $\Theta_{\text{ch}}^{\text{расч}}$.

Рис.9. График сопоставления результатов измерений энергии тяжелых ядер ^{197}Au методикой "ΔE" и черенковскими способами



В табл. 4 приведены расчетные данные по углу ИВЧ $\Theta_{\text{ch}}^{\text{расч}}$ по β , измеренному методикой "ΔE", совместно с углами $\Theta_{\text{ch}}^{\text{экс}}$, измеренными экспериментально с помощью черенковских приборов.

Таблица 4

	$\Theta_{\text{Ch}}^{\text{calc}}$	$\Theta_{\text{Ch}}^{\text{exp}}$	Примечание
1	38°27'17"	38°30'9"	Методика
2	38°06'12"	38°05'10"	"комби"
3	37°42'57"	37°41'34"	
4	26°55'	27°00'	Методика (E, α)

Авторы благодарят за помощь в осуществлении эксперимента профессора П.Кинли (ГСИ), профессора Ц.Д.Вылова (ОИЯИ), а также В.И. Сидорову, В.Г.Сазонова, Н.Н. Лебедева, Г.В.Горбунову, А.Брунле, Г.Отто и Р.Яника за техническую помощь при проектировании, изготовлении и эксплуатации установки.

Литература

- [1] Mather R.L.- Phys.Rev., v.84 (1951), p.181.
- [2] Zrelov V.P. et al.- NIM, v.103 (1972), p.261.
- [3] Zrelov V.P. et al.- NIM, v.105 (1972), p.109.
- [4] Zrelov V.P. et al.- NIM, v.107 (1973), p.279.
- [5] Zrelov V.P.- NIM, v.115 (1974), p.457.
- [6] Zrelov V.P. et al.- NIM, v.136 (1976), p.285.
- [7] Zrelov V.P. et al.- NIM, v.134 (1976), p.437.
- [8] Zrelov V.P.- NIM, v.166 (1979), p.207.
- [9] Hubele J. et al.- Preprint GSI-92-17, 1992.
- [10] Кузьмин Е.С., Тарасов А.В.- "Краткие сообщения ОИЯИ", 4(61), 1993.
- [11] Budyashova S.Yu. et al.- NIM in Phys.Res., A277 (1989), 304-312.
- [12] Зрелов В.П. и др.- ПТЭ, 1 (1990), стр.72.
- [13] Burov A.S. et al.- Oxford Conference on Computer Scanning, England, v.1., (1974), p.111.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 декабря 1994 года.

Исследование возможностей применения черенковской методики для измерения средней энергии пучков релятивистских ядер ^{197}Au в области энергий $0,64 \pm 0,99$ ГэВ/а.е.м.

В работе исследовалась возможность применения черенковской методики для измерения средней энергии коллимированных пучков релятивистских ядер ^{197}Au , поскольку такие пучки при их специфическом взаимодействии с радиатором (сильное торможение, фрагментация) оказывают значительное влияние на размытие черенковского конуса. Для этих целей использовались два черенковских метода: 1 — ахроматический (E, α); 2 — комбинированный («комби»). При энергии ~ 1 ГэВ/а.е.м. точность измерений методом «комби» составила $\pm 1,4$ МэВ/а.е.м., а метод (E, α) при энергии $E_{\text{Au}} \approx 640$ МэВ/а.е.м. дал точность $\pm 0,9$ МэВ/а.е.м.

Эти результаты оказались в хорошем согласии с исходными данными по E_{Au} ускорителя SIS с учетом потерь энергии по тракту (максимальное расхождение $\leq 0,4\%$). На основе совокупности этих данных проверено условие направленности для ИВЧ от тяжелых ядер. Показано, что оно выполняется с точностью не хуже $\pm 5^\circ$ в области углов $27^\circ < \Theta_{\text{ch}} < 38,5^\circ$.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1994

Перевод авторов

Investigation of Possible Applications of Cherenkov Technique to Measure Average Energy of Beams of Relativistic ^{197}Au Nuclei in Energy Range 0.64 ± 0.99 GeV/a.m.u.

A possibility of using the Cherenkov technique to measure the average energy of collimated relativistic nuclear Au beams is investigated in the paper for specific beam-radiator interaction (strong deceleration, fragmentation) produces a considerable effect of the spreading of the Cherenkov cone. Two Cherenkov methods — achromatic (E, α) and combined («combi») — were employed for this purpose. At an energy of about 1 GeV/a.m.u. the accuracy of measurement by the «combi» method was ± 1.4 MeV/a.m.u. The accuracy of measurement by the (E, α) method was ± 0.9 MeV/a.m.u. at the energy $E_{\text{Au}} \approx 640$ MeV/a.m.u.

These results turned out to be in good agreement with initial E_{Au} data from the SIS accelerator with allowances made for energy losses over the beam line (the maximum discrepancy was $\leq 0.4\%$). With all the set of these data, the directivity condition was checked for VChR from heavy nuclei. It is shown to be fulfilled to an accuracy above $\pm 5^\circ$ in the angle range $27^\circ < \Theta_{\text{ch}} < 38.5^\circ$.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1994