

## СИЛЬНОФОКУСИРУЮЩИЙ МАГНИТНЫЙ АНАЛИЗАТОР ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА 700 МЭВ/С

Б. Н. КАЛИНИН, Г. А. САРУЕВ, В. М. КУЗНЕЦОВ

(Представлена научно-техническим семинаром лаборатории  
высоких энергий НИИ ЯФ)

Разработанный магнитный анализатор с двойной фокусировкой будет использован для анализа энергетического и углового распределения в реакциях фотообразования мезонов и протонов на синхротроне НИИ ЯФ. Применяемые в настоящее время сцинтилляционные счетчики и искровые камеры не позволяют отделять фон и имеют ограниченный регистрируемый импульс. При разработке магнитного анализатора были приняты во внимание следующие соображения:

- 1) максимальный анализируемый импульс до 700 МэВ/с;
- 2) обеспечить возможно максимальный телесный угол;
- 3) обеспечить минимальное расстояние между мишенью и детектором;
- 4) использовать имеющийся электромагнит СП-57;
- 5) конструкция электромагнита должна позволять проводить измерения в возможно большем диапазоне углов;
- 6) разрешение по импульсам не более 2—3%  $1/\text{см}$ .

В анализаторах с однородным полем фокусировка по углам вылета заряженных частиц из мишени осуществляется выбором соответствующих границ входа и выхода. В связи с тем, что фокусирующие силы действуют на относительно малых участках траектории мишень-детектор (рассеянные поля на входе и выходе анализатора), фокусные расстояния получаются достаточно большими, а телесный угол малым. Так, например, анализатор ФТИ АН УССР на 500 МэВ/с [1] с однородным полем имеет расстояние мишень-детектор 430 см, телесный угол  $2,9 \cdot 10^{-3}$  стерад.

Анализаторы с неоднородным полем используют принцип сильной фокусировки, суть которой заключается в том, что последовательное расположение двух или более секторов с  $n > 1$  и  $n < 0$  приводит при определенных условиях к результирующему эффекту фокусировки в горизонтальном и вертикальном направлениях. Поскольку в этом случае фокусирующие силы действуют на всем участке траектории, находящейся в магнитном поле, то фокусные расстояния получаются значительно меньше и увеличивается телесный угол по сравнению с анализатором с однородным полем. Например, анализатор во Фраскати (Италия) [2] с сильной фокусировкой на 900 МэВ/с имеет расстояние мишень-детектор 280 см и телесный угол  $5,6 \cdot 10^{-3}$  стерад. Ввиду малой площади экспериментального зала синхротрона НИИ ЯФ и желания получить максимальный телесный угол при минимальных затратах был выбран магнитный анализатор с сильной фокусировкой на основе серий-

ного электромагнита СП-57 весом 45 тонн. В связи с тем, что электромагнит СП-57 имеет Ш-образную конструкцию, измерения углового распределения продуктов реакций возможно под углами к направлению пучка фотонов от  $0^\circ$  до  $27^\circ$ , от  $80^\circ$  до  $100^\circ$  и от  $153^\circ$  до  $180^\circ$ . Для остальных углов на пути тормозного пучка будут находиться стойки электромагнита. Для расширения диапазона углов было решено модернизировать электромагнит из Ш-образной конструкции в С-образную. Такая модернизация позволяет регистрировать продукты реакций под углами  $0^\circ$ — $27^\circ$ ,  $37^\circ$ — $143^\circ$  и  $152^\circ$ — $180^\circ$ . Для формирования сильнофокусирующего поля в воздушном зазоре (высотой 380 мм) электромагнита СП-57 установлены две пары специальных полюсных наконечников (рис. 1).

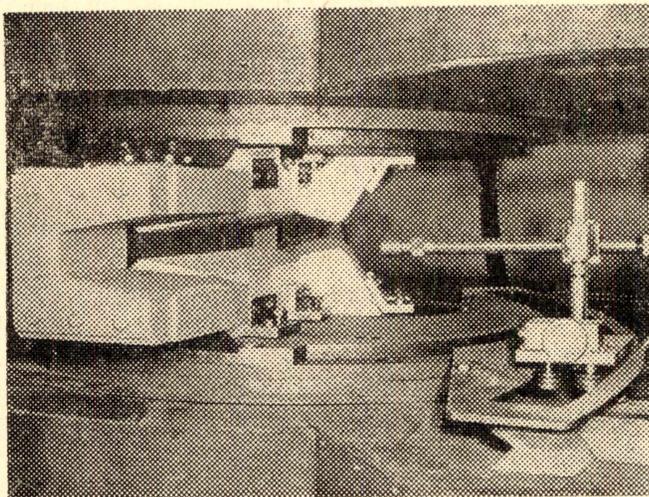


Рис. 1. Полюсные наконечники магнитного анализатора и механизм для перемещения датчика Холла.

### Выбор сильнофокусирующего поля

Принцип сильной фокусировки позволяет получить фокусировку одновременно в горизонтальной и вертикальной плоскостях, применяя систему магнитных секторов со знакопеременными показателями спада магнитного поля  $n$ . В нашем случае использованы два магнитных сектора, в первом из них  $n \gg 1$ , а во втором  $-n \ll 0$ .

Магнитный анализатор характеризуется следующими параметрами:

- 1) энергетическим разрешением,
- 2) входным фокусным расстоянием,
- 3) выходным фокусным расстоянием,
- 4) горизонтальным коэффициентом усиления,
- 5) вертикальным коэффициентом усиления,
- 6) коэффициентом продольного усиления для горизонтальной плоскости,
- 7) коэффициентом продольного усиления для вертикальной плоскости,
- 8) телесным углом,
- 9) интервалом регистрируемых энергий.

Для расчета оптических характеристик анализатора введены следующие обозначения:  $n_1$  и  $n_2$  — показатели спадания поля в первом и втором секторах,  $R_1 = R_2 = R_0$  — радиус равновесной орбиты,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — углы поворота в эффективном магнитном поле секторов,  $s$  — угол меж-

ду главной траекторией и перпендикуляром к входной границе магнитного поля,  $t$  — угол между главной траекторией и перпендикуляром к выходной границе магнитного поля,  $S$  — входное фокусное расстояние,  $T$  — выходное фокусное расстояние. Приведем основные расчетные соотношения для определения оптических характеристик анализатора [3]:

Условие вертикальной фокусировки:

$$(S^D_{b_1} + U_{b_1})(T_{b_2} + U_{b_2}) = I_b, \quad (1)$$

где

$$S^D_{b_1} = \frac{\sqrt{n_1} \cdot S'_{b_1}}{1 - S'_{b_1} \operatorname{tg} s}; \quad T^D_{b_2} = \frac{\sqrt{|n_2|} \cdot T'_{b_2}}{1 - T'_{b_2} \operatorname{tg} t};$$

$$U_{b_1} = -\Phi_{b_1} - C_b(\Phi^2_{b_1} + 1)/q^2_b; \quad U_{b_2} = \Psi_{b_2} - (\Psi^2_{b_2} - 1)/q_b;$$

$$I_b = C_b(\Phi^2_{b_1} + 1)/q^2_b; \quad C_b = \sqrt{\frac{|n_2|}{n_1}}; \quad q_b = -\Phi_{b_1} C_b + \Psi_{b_2};$$

$$\Phi_{b_1} = \operatorname{ctg} \sqrt{n_1} \varphi_1; \quad \Psi_{b_2} = \operatorname{cth} \sqrt{|n_2|} \varphi_2;$$

$$S'_{b_1} = S_{b_1}/R_0; \quad T'_{b_2} = T_{b_2}/R_0,$$

Условие горизонтальной фокусировки:

$$(S^D_{r_1} + U_{r_1})(T^D_{r_2} + U_{r_2}) = I_r, \quad (2)$$

где

$$S^D_{r_1} = \frac{\sqrt{n_1 - 1} \cdot S'_{r_1}}{1 + S'_{r_1} \operatorname{tg} s}; \quad T^D_{r_2} = \frac{\sqrt{|1 - n_2|}}{1 + T'_{r_2} \operatorname{tg} t} T'_{r_2};$$

$$U_{r_1} = \Psi_{r_1} - C_r(\Psi^2_{r_1} - 1)/q_r; \quad U_{r_2} = -\Phi_{r_2} - (\Phi^2_{r_2} + 1)/q_r;$$

$$I_r = C_r(\Psi^2_{r_1} - 1)(\Phi_{r_2} + 1)/q^2_r; \quad C_r = \sqrt{\frac{|1 - n_2|}{n_1 - 1}};$$

$$q_r = C_r \Psi_{r_1} - \Phi_{r_2}; \quad \Psi_{r_1} = \operatorname{cth} \sqrt{n_1 - 1} \varphi_1;$$

$$\Phi_{r_2} = \operatorname{ctg} \sqrt{|1 - n_2|} \varphi_2; \quad S'_{r_1} = S_{r_1}/R_0; \quad T'_{r_2} = T_{r_2}/R_0$$

При условии двойной фокусировки

$$S_{b_1} = S_{r_1} = S \quad \text{и} \quad T_{r_2} = T_{b_2} = T.$$

Решая систему (1) и (2), можно получить входное фокусное расстояние системы.

Выходное фокусное расстояние системы равно

$$T = \frac{\Phi_{r_2} \Psi_{r_1} S' \cdot \sqrt{|1 - n_2|} (n_1 - 1) + \left[ \Psi_{r_1} \cdot S' \cdot \sqrt{(n_1 - 1) |1 - n_2|} + \Phi_{r_2} \sqrt{|1 - n_2|} + S' (U_1 - 1) + \Psi_{r_1} \sqrt{n_1 - 1} \right]}{\left[ \sqrt{|1 - n_2|} - \Phi_{r_2} S' (n_1 - 1) - \Phi_{r_2} \Phi_{r_1} (n_1 - 1) \right]} \quad (3)$$

Коэффициент горизонтального усиления системы

$$x_{r_{12}} = x_{r_1} \cdot x_{r_2}, \quad (4)$$

где  $x_{r_1}$  и  $x_{r_2}$  — коэффициенты горизонтального усиления соответственно секторов 1 и 2:

$$x_{r_1} = \frac{1}{\operatorname{ch} \delta^D_m} \left\{ \operatorname{ch} \left[ \sqrt{n_1 - 1} \varphi_1 + \delta^D_m \right] + \sqrt{n_1 - 1} \cdot T'_{r_1} \operatorname{sh} \left[ \sqrt{n_1 - 1} \varphi_1 + \delta^D_m \right] \right\}, \quad (5)$$

$$x_{r_2} = \left\{ \cos \left[ \sqrt{|1 - n_2|} \varphi_2 + \delta_m^D \right] - \sqrt{|1 - n_2|} \times \right. \\ \left. \times T' \sin \left[ \sqrt{|1 - n_2|} \varphi_2 + \delta_m^D \right] \right\}, \quad (6)$$

где

$$\delta_m^D = \operatorname{arctg} \left( \frac{\operatorname{tg} s}{\sqrt{n_1 - 1}} \right);$$

$$T'_{r_1} = \frac{S' \Psi_{r_1} \cdot \sqrt{n_1 - 1} + 1 + S' \operatorname{tg} s}{(n_1 - 1) S' + \Psi_{r_1} \sqrt{n_1 - 1} (1 - S' \operatorname{tg} s)} \quad (7)$$

выходное фокусное расстояние для первого сектора. Коэффициент вертикального усиления системы  $x_{b_{12}} = x_{b_1} \cdot x_{b_2}$ ,

где  $x_{b_1}, x_{b_2}$  — коэффициенты вертикального усиления соответственно секторов 1 и 2:

$$x_{b_1} = \frac{1}{\cos \delta_m} \left[ \cos (\sqrt{n_1} \varphi_1 + \delta_m) - T'_{b_1} \sqrt{n_1} \sin (\sqrt{n_1} \varphi_1 + \delta_m) \right], \quad (8)$$

$$x_{b_2} = \operatorname{ch} \sqrt{|n_2|} \cdot \varphi_2 + T' \sqrt{|n_2|} \cdot \operatorname{sh} \sqrt{|n_2|} \cdot \varphi_2. \quad (9)$$

где

$$\delta_m = \operatorname{arctg} \left( \frac{\operatorname{tg} s}{\sqrt{n_1}} \right); \quad T'_{b_1} = \frac{\Phi_{b_1} \cdot \sqrt{n_1} S' + 1 - S' \operatorname{tg} s}{n_1 \cdot S' - \Phi_{b_1} \sqrt{n_1} (1 - S' \operatorname{tg} s)}$$

фокусное расстояние для первого сектора,  $T'$  — расстояние от выходной границы магнитного поля до детектора. Энергетическое разрешение анализатора находится из выражения

$$\xi = \frac{1}{R_0 \left\{ \frac{1 - x_{r_2}}{|1 - n_2|} - \frac{1 - x_{r_1}}{n_1 - 1} \cdot x_{r_2} \right\}} \text{ л/см.} \quad (10)$$

Для вычисления телесного угла анализатора необходимо определить горизонтальные и вертикальные углы захвата ( $\alpha_0, \gamma_0$ )

$$\Omega = 4\alpha_0 \gamma_0. \quad (11)$$

Эти углы можно получить, исходя из уравнений движения заряженных частиц в неоднородном магнитном поле:

$$\frac{d^2 r}{d\varphi^2} + (1 + n)r = 0 \text{ для горизонтальной плоскости,} \quad (12)$$

$$\frac{d^2 z}{d\varphi^2} + nz = 0 \text{ для вертикальной плоскости.} \quad (13)$$

Уравнения для определения углов  $\alpha_0$  и  $\gamma_0$  имеют вид:

$$\alpha_0^2 \left\{ |1 - n_2| \left[ S' \Psi_{r_1} + \frac{1 + S' \operatorname{tg} s}{\sqrt{n_1 - 1}} \right]^2 + \left[ S' \sqrt{n_1 - 1} + \Psi_{r_1} (1 + S' \operatorname{tg} s) \right]^2 \right\} + \\ + \alpha_0 \cdot 2z'_m \left\{ (1 + S' \operatorname{tg} s) \left( \frac{|1 - n_2|}{\sqrt{n_1 - 1}} \Psi_{r_1} + \frac{|1 - n_2|}{n_1 - 1} \operatorname{tg} s + \right. \right. \\ \left. \left. + \Psi_{r_1} \sqrt{n_1 - 1} + \Psi_{r_1}^2 \operatorname{tg} s \right) + S' \left[ |1 - n_2| \Psi_{r_1}^2 + \frac{|1 - n_2|}{\sqrt{n_1 - 1}} \Psi_{r_1} \operatorname{tg} s + \right. \right. \\ \left. \left. + (n_1 - 1) + \Psi_{r_1} \sqrt{n_1 - 1} \operatorname{tg} s \right] \right\} + r'_m{}^2 \left\{ |1 - n_2| \times \right. \\ \left. \times \left( \Psi_{r_1} + \frac{\operatorname{tg} s}{\sqrt{n_1 - 1}} \right)^2 + \left( \sqrt{n_1 - 1} + \Psi_{r_1} \operatorname{tg} s \right)^2 \right\} - \\ - r_0'^2 \frac{|1 - n_2|}{\operatorname{sh}^2 \sqrt{n_1 - 1} \varphi_1} = 0, \quad (14)$$

где

$$r'_m = r_m/R_0, \quad r'_0 = r_0/R_0,$$

$r_m$  — радиальная координата точки вылета заряженной частицы из мишени,

$r_0$  — полуразмер радиальной рабочей области в первом секторе

$$\gamma_0^2 [n_1 S'^2 + (1 - S' \operatorname{tg} s)^2] + \gamma_0 2z'_m [n_1 S' - (1 - S' \operatorname{tg} s) \operatorname{tg} s] - \\ - n_1 (z_0'^2 - z'_m{}^2) + z'_m{}^2 \operatorname{tg}^2 s = 0, \quad (15)$$

где

$$z'_0 = z_0/R_0; \quad z'_m = z_m/R_0,$$

$z_0$  — полуразмер воздушного зазора,

$z_m$  — вертикальная координата точки вылета заряженной частицы из мишени.

Для предварительно выбранных значений  $n_1 = +21,3$  и  $n_2 = -16,2$  были рассчитаны профили полюсов по методике [4], которая предполагает, что 1) магнитная проницаемость материала полюсов бесконечна и 2) нет рассеяния полюсов. Поэтому был произведен экспериментальный подбор профиля полюсов на плоской модели. Плоская модель запитывалась переменным током. Измерения поля проводились индукционной катушкой. На плоской модели были получены области линейного изменения поля по радиусу для первого сектора  $n_1 = +21,3$  ( $R_0 + 3$  см)  $\div$  ( $R_0 - 5,5$  см), а для второго сектора  $n_2 = -16,2$  ( $R_0 + 6$  см)  $\div$  ( $R_0 - 4,5$  см). Относительно небольшая область линейного поля в сторону увеличения воздушного зазора объясняется влиянием поля круглых полюсов, между которыми установлены профильные полюсные наконечники.

В связи с тем, что рассеянное поле электромагнита СП-57 из-за большого воздушного зазора между круглыми полюсами довольно протяженное, на входе и выходе анализатора установлены магнитные экраны, которые позволяют формировать поля рассеяния на небольшом участке траектории и произвести расчет оптических характеристик анализатора.

Расстояние от материальной границы полюса до эффективной границы магнитного поля при наличии экранов определяется выражением [1]

$$\xi = \frac{\delta}{2} - \frac{\delta}{\pi} \operatorname{arc} \sin \frac{\delta}{2g \sqrt{1 + \frac{\delta^2}{4g^2}}} + \frac{g}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{\delta^2}{4g^2} \right), \quad (16)$$

где  $\delta$  — расстояние между экраном и полюсом,

$g$  — полувысота воздушного зазора в полюсе.

Выражение (16) аналитически не разрешается относительно « $\delta$ ». Введя обозначения  $x = \xi/g$  и  $\delta/2g = y$ , перепишем (16)

$$x = y - \frac{2y}{\pi} \operatorname{arc} \sin \frac{y}{\sqrt{1 + y^2}} + \frac{1}{\pi} \ln(1 + y^2). \quad (17)$$

Далее из графика функции (17) для возможных значений  $y$  можно при  $\xi = \text{const}$ , определить « $\delta$ » для каждого  $g$ .

Расстояние между экраном и полюсом выбирается из следующих соображений:

1. Магнитная индукция в экране должна быть не больше индукции в части полюса, обращенной к экрану.

2. Расстояние между входным экраном и входным фокусом должно быть достаточным для размещения водородной мишени.

Исходя из этих требований, было выбрано  $\delta_0 = 6,3$  см на радиусе равновесной орбиты.

## Результаты измерения магнитного поля анализатора

Программа магнитных измерений включала в себя:

1) Измерение радиального распределения магнитного поля для определения  $n$ .

2) Измерение азимутального распределения поля для определения эффективных магнитных углов и проверки качества сборки.

Все измерения поля были выполнены магнитометром Холла Е11-3 при полях  $B_0=900, 3000, 5900, 8000, 8800, 10400, 11400, 13000$  Гс. Погрешность измерений составляла  $\pm 1,5\%$ . Для перемещения датчика Холла в радиальном направлении был сконструирован специальный механизм (рис. 1).

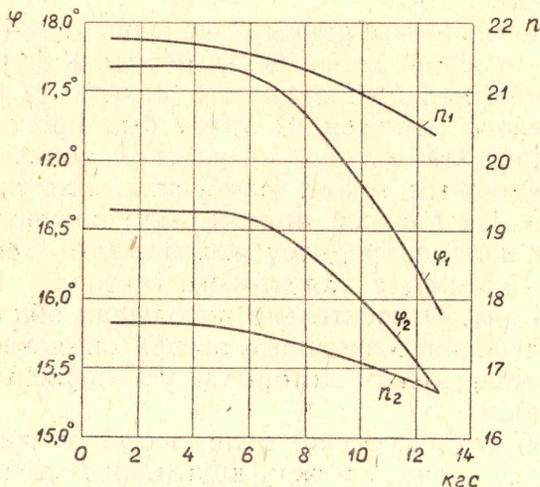


Рис. 2. Зависимость показателя спада магнитного поля и эффективных углов секторов от значений магнитного поля на равновесной орбите.

На рис. 2 представлены зависимости показателя поля и эффективных углов секторов от магнитного поля на равновесной орбите.

При  $B_0 > 6$  кГс начинают проявляться эффекты насыщения полюсов анализатора и фокусные расстояния увеличиваются. Однако, учитывая достаточно большие продольные размеры мишени (3—5 см), можно считать, что фокусные расстояния не изменяются до полей 10 кГс. Выше 10 кГс необходима корректировка положений мишени и детекторов. Результаты измерения показали, что до полей 13 кГс радиальные области в обоих секторах остаются постоянными с погрешностью не более 2%.

По результатам магнитных измерений были определены основные параметры анализатора:

- 1) анализируемый импульс —  $43 \div 700$  МэВ/с,
- 2) магнитное поле на равновесной орбите — 740—13000 Гс,
- 3) радиус равновесной орбиты — 200 см,
- 4) высота воздушного зазора — 9,05 см,
- 5) показатель поля первого сектора — +21,7,
- 6) показатель поля второго сектора — 17,6,
- 7) эффективный угол первого сектора —  $17^\circ 40'$ ,
- 8) эффективный угол второго сектора —  $16^\circ 30'$ ,
- 9) входной фокус — 40,5 см,
- 10) выходной фокус — 103 см,
- 11) разрешение по импульсу —  $(2,32 \pm 0,2)\%$ /см,

12) телесный угол —  $5 \cdot 10^{-3}$  стеррад,

13) интервал захвата по импульсам —  $\pm 0,16$ .

В заключение можно сказать, что в НИИ ЯФ на базе стандартного электромагнита СП-57 разработан сильнофокусирующий магнитный анализатор заряженных частиц с максимальным импульсом 700 МэВ/с для проведения экспериментов по фотообразованию мезонов на синхротроне НИИ ЯФ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Г. Афанасьев. Рассеяние электронов высокой энергии на легких и тяжелых ядрах. Диссертация, ФТИ АН УССР, Харьков, 1967.
2. Sacerdoti and Tau. Спектрометр заряженных частиц. Nucl. Instr., **16**, 139 (1962).
3. R. M. Sternheimer. Двойная фокусировка заряженных частиц системой из 2-х магнитов с неоднородным полем. Rev. Sci. Instrum., **24** № 8, 873, (1953).
4. С. С. Плесси. Идеальный профиль для мягко, сильно и FFAG-фокусирующих ускорителей и других ядерных приборов, Instrum. and Methods, **21**, 145—154, (1963).