

10; 12

© 1990 г.

## ФОКУСИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ИЗ КВАДРУПОЛЬНЫХ ЛИНЗ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НЕЙТРИННЫХ ПУЧКОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С ШИРОКИМ СПЕКТРОМ

*В. И. Гаркуша, В. П. Карташев, В. И. Котов, Ф. Н. Новоскольцев*

Рассмотрена фокусирующая система из квадрупольных линз, не уступающая по формируемому на детектор потоку нейтрино (антинейтрино) аксиально-симметричной системе из литиевых линз. Для очистки пучка от частиц другого знака заряда использована бездисперсная четырехмагнитная система, позволяющая иметь более низкий уровень фона. Проведен детальный расчет фокусирующей системы для нейтринного канала УНК.

1. Для формирования нейтринных пучков с широким энергетическим спектром на ускорителях с энергией ускоренных протонов от нескольких десятков до нескольких сотен ГэВ широко применяются аксиально-симметричные оболочки с током (горны, параболические линзы), которые способны формировать с мишени в направлении детектора пучок  $\pi$ ,  $K$ -мезонов в широком интервале углов и импульсов. При переходе в область энергий несколько тысяч ГэВ, когда средние углы рождения адронов, обратно пропорциональные импульсу частиц, становятся чрезвычайно малыми, необходимы фокусирующие системы на основе новых элементов, например литиевых линз [1-3]. В этой работе обсуждается возможность создания фокусирующей системы из квадрупольных линз и магнитов, не уступающей по оптическим характеристикам системе из литиевых линз.

Оптимизация компактных аксиально-симметричных многолинзовых систем показывает [2], что уже двухлинзовая система с отношением  $a_2/a_1 \sim 10$ , где  $a_1$  — расстояние от мишени до центра первой линзы и  $a_2$  — расстояние между центрами линз, способна обеспечить поток нейтрино на детектор практически предельной интенсивности. Заменяя в такой системе обе линзы «эквивалентными» симметричными триплетами из квадрупольных линз, которые близки по своему действию к аксиально-симметричным линзам, приходим к оптимальной фокусирующей системе из квадрупольных линз. Поскольку объективы из квадрупольных линз в отличие от аксиально-симметричных линз фокусируют частицы обоих знаков заряда, то для очистки формируемого пучка  $\pi, K$ -мезонов от частиц другого знака необходимо использовать бездисперсную четырехмагнитную систему, согласованную по пропускной способности с самой фокусирующей системой. Поглотитель для частиц другого знака располагается в четырехмагнитной системе между средними магнитами, где частицы разного знака пространственно разделены.

Предлагаемая фокусирующая система, построенная на основе классических магнитных элементов, обладает следующими преимуществами: она является линейно-фокусирующей системой с хорошим качеством поля, может работать в квазинепрерывном и непрерывном режимах, требует простых источников питания.

2. Проиллюстрируем возможности обсуждаемой фокусирующей системы на примере нейтринного канала УНК с широким спектром (энергия ускоренного протонного пучка 3000 ГэВ, длина распадной базы 4 км). Схема фокусирующей

шей системы и параметры используемого оборудования приведены на рис. 1. и в табл. 1. Пучок непроваимодействовавших в мишени протонов пропускается через фокусирующую систему в случае формирования пучка нейтрино и гасится в поглотителе в случае формирования пучка антинейтрино.

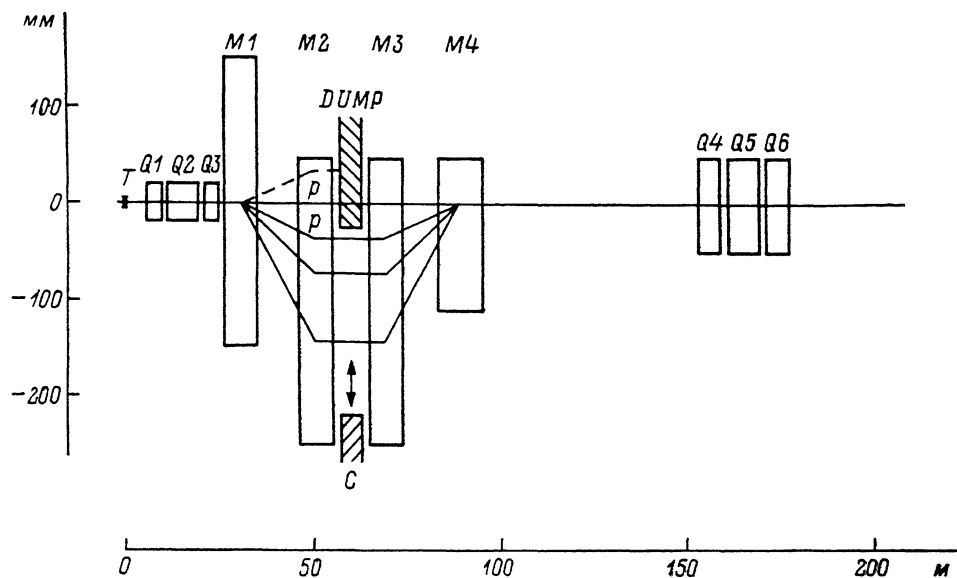


Рис. 1. Схема фокусирующей системы нейтринного канала с широким спектром.

$T$  — мишень,  $Q1-Q6$  — объективы из квадрупольных линз,  $M1-M4$  — четырехмагнитная бездисперсная система,  $DUMP$  — поглотитель непроваимодействовавшего протонного пучка,  $C$  — подвижный коллиматор. Поперечные размеры магнитных элементов соответствуют их полезным апертурам.

Спектры нейтрино и антинейтрино и их интегральные характеристики

$I(p) = \int_p^{3000 \text{ ГэВ/c}} dN/dp \cdot dp$  на детекторе с радиусом  $R = 0.56$  м, расположенном на расстоянии 1,5 км от конца распадной базы, рассчитанные для фокусирующих систем из литиевых и квадрупольных линз по программе SPECTR [4], приведены

Таблица 1  
Параметры двухлинзовой фокусирующей системы из квадрупольных линз

| Обозначение элемента | Размеры полезной апертуры, мм | Расстояние от мишени до центра элемента, м | Длина элемента, м | Поле, кгс; градиент, кгс/см |
|----------------------|-------------------------------|--|-------------------|-----------------------------|
| $Q1$                 | $\varnothing 40$              | 7.5  | 4                 | 5.62                        |
| $Q2$                 | $\varnothing 40$              | 15.0                                       | 8                 | -5.18                       |
| $Q3$                 | $\varnothing 40$              | 22.5                                       | 4                 | 5.62                        |
| $M1$                 | $40 \times 300$               | 30.5                                       | 9                 | 20.00                       |
| $M2$                 | $40 \times 300$               | 50.5                                       | 9                 | -20.00                      |
| $M3$                 | $40 \times 300$               | 69.5                                       | 9                 | -20.00                      |
| $M4$                 | $100 \times 160$              | 89.5                                       | 12                | 15.00                       |
| $Q4$                 | $\varnothing 100$             | 156.0                                      | 6                 | 1.07                        |
| $Q5$                 | $\varnothing 100$             | 165.0                                      | 9                 | -1.42                       |
| $Q6$                 | $\varnothing 100$             | 174.0                                      | 6                 | 1.07                        |

на рис. 2, 3 и в табл. 2, 3. Применение четырехмагнитной системы позволяет иметь низкий уровень фона антинейтрино (нейтрино) в формируемом на детектор пучке нейтрино (антинейтрино). Действительно, если в случае аксиально-симметричной фокусирующей системы из литиевых линз фон в основном создается

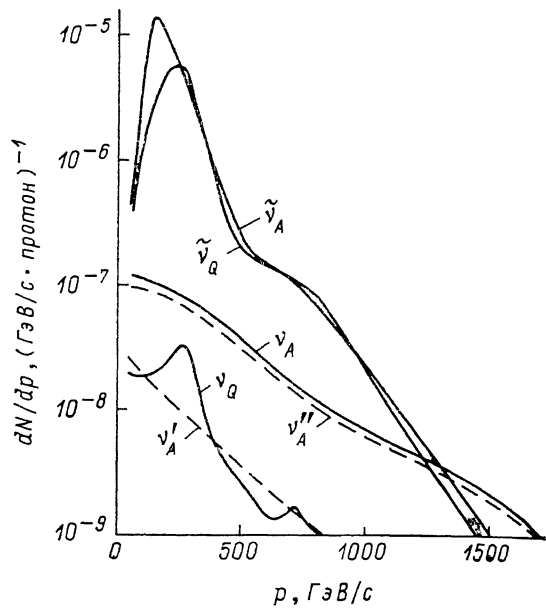
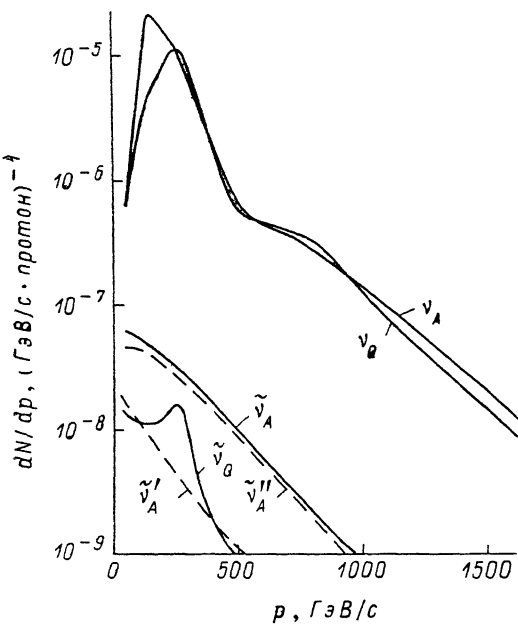


Рис. 2. Спектры нейтрино и фоновых антинейтрино для двухобъективных фокусирующих систем на основе литиевых  $A$  и квадрупольных  $Q$  линз.

$\nu'_A$  и  $\bar{\nu}'_A$  — составляющие фона антинейтрино с участка фокусирующей системы и распадного участка соответственно.

Рис. 3. Спектры антинейтрино и фоновых нейтрино для двухобъективных фокусирующих систем на основе литиевых  $A$  и квадрупольных  $Q$  линз.

$\nu'_A$  и  $\bar{\nu}'_A$  — составляющие фона нейтрино с участка фокусирующей системы и распадного участка соответственно.

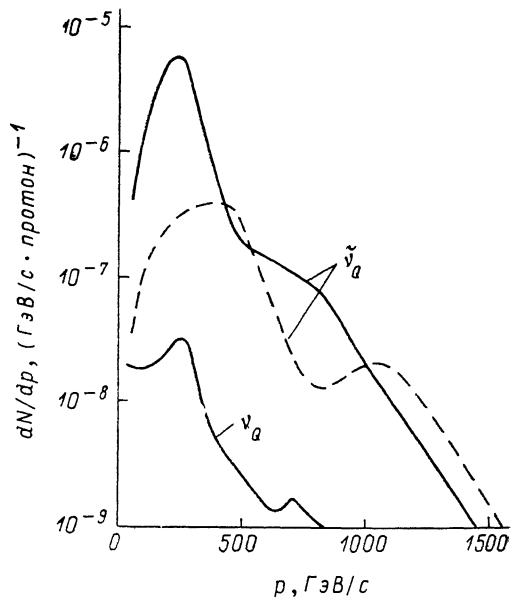
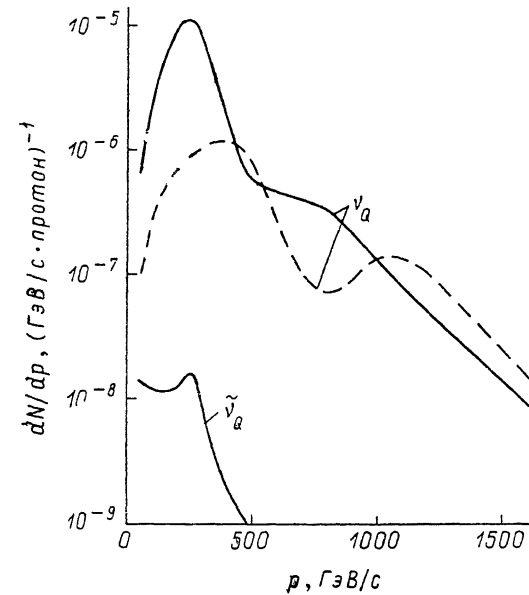


Рис. 4. Спектры нейтрино и фоновых антинейтрино для двухобъективной квадрупольной фокусирующей системы.

Штриховая кривая — спектр нейтрино с подавленной мягкой частью спектра.

Рис. 5. Спектры антинейтрино и фоновых нейтрино для двухобъективной квадрупольной фокусирующей системы.

Штриховая кривая — спектр антинейтрино с подавленной мягкой частью спектра.

распадами  $\pi, K$ -мезонов другого знака с большими импульсами, которые проходят с небольшими отклонениями через фокусирующую систему в окрестности оптической оси, где поле в линзах мало, то в рассматриваемой системе фон создается только на участке от мишени до поглотителя, где присутствуют  $\pi, K$ -мезоны обоих знаков.<sup>1</sup>

3. В рассматриваемой фокусирующей системе гораздо проще, чем в аксиально симметричной фокусирующей системе из литиевых линз (без перекомпановки), получается спектр нейтрино с подавленной мягкой частью. Помимо перестройки

Т а б л и ц а 2

Интегральные характеристики спектров, приведенных на рис. 2

|                     | $I(100)$             | $I(200)$             | $I(600)$             | $I(1000)$            |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\nu_A$             | $3.32 \cdot 10^{-3}$ | $1.75 \cdot 10^{-3}$ | $1.46 \cdot 10^{-4}$ | $3.48 \cdot 10^{-5}$ |
| $\bar{\nu}_A/\nu_A$ | 0.39 %               | 0.48 %               | 0.82 %               | 0.57 %               |
| $\nu_Q$             | $2.18 \cdot 10^{-3}$ | $1.60 \cdot 10^{-3}$ | $1.44 \cdot 10^{-4}$ | $2.70 \cdot 10^{-5}$ |
| $\bar{\nu}_Q/\nu_Q$ | 0.16 %               | 0.14 %               | 0.082 %              | 0.050 %              |

режимов объективов для фокусировки более жестких частиц, можно изменять нижнюю границу интервала импульсов  $\pi, K$ -мезонов, проходящих через фокусирующую систему, используя подвижный коллиматор, расположенный между магнитами  $M2$  и  $M3$  (рис. 1).

Т а б л и ц а 3

Интегральные характеристики спектров, приведенных на рис. 3

|                     | $I(100)$             | $I(200)$             | $I(600)$             | $I(1000)$            |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\bar{\nu}_A$       | $1.86 \cdot 10^{-3}$ | $8.34 \cdot 10^{-4}$ | $3.32 \cdot 10^{-5}$ | $3.76 \cdot 10^{-6}$ |
| $\nu_A/\bar{\nu}_A$ | 2.1 %                | 3.5 %                | 23 %                 | 69 %                 |
| $\bar{\nu}_Q$       | $1.02 \cdot 10^{-3}$ | $7.22 \cdot 10^{-4}$ | $3.41 \cdot 10^{-5}$ | $2.98 \cdot 10^{-6}$ |
| $\nu_Q/\bar{\nu}_Q$ | 0.70 %               | 0.70 %               | 1.7 %                | 4.7 %                |

На рис. 4 представлен один из возможных вариантов спектра нейтрино с подавленной мягкой частью, полученный при усилении режима второго объектива ( $G_{Q4}, G_{Q5} = 1.66$  кгс/см,  $G_{Q5} = -2.21$  кгс/см) и положении подвижного коллиматора 122 мм. Полный поток нейтрино на детектор равен  $4.9 \cdot 10^{-4}$  частиц/протон, что составляет 22 % потока в случае широкого спектра, однако доля частиц с импульсами  $p > 1000$  ГэВ/с в общем потоке возрастает с 1 до 10 %. Фон антинейтрино, не изменяясь по абсолютной величине, возрастает до 0.7 % в полном потоке нейтрино, составляя при этом только 0.03 % в жесткой части спектра ( $p > 1000$  ГэВ/с):

Для этого же режима фокусирующей системы поток антинейтрино (рис. 5) на детектор равен  $1.5 \cdot 10^{-4}$  частиц/протон при 3.5%-ной доле частиц с импульсом  $p > 1000$  ГэВ/с. Фон нейтрино составляет 4.7 %, а в жесткой части спектра ( $p > 1000$  ГэВ/с) 2.7 % от потока антинейтрино.

4. Все приведенные выше спектры нейтрино и антинейтрино и их интегральные характеристики рассчитаны для точечного протонного пучка на мишени. Влияние размеров протонного пучка на полный поток нейтрино на детектор для двух вариантов фокусирующей системы нейтринного канала УНК представлено на рис. 6. Видно, что предлагаемая в данной работе фокусирующая система

<sup>1</sup> Для формирования нейтринного пучка на ускорителе FNAL (энергия ускоренного протонного пучка 1000 ГэВ) используется фокусирующая система, состоящая из триплета квадрупольных линз и двух отклоняющих магнитов [5].

нее чувствительна к увеличению размеров протонного пучка, чем аксиально-симметричная система из литиевых линз, что упрощает теплодинамические проблемы при взаимодействии протонного пучка с мишенью.

5. В заключение рассмотрим зависимость длины фокусирующей системы из квадрупольных линз от энергии первичных протонов. Угловой акцептанс канала, например, в горизонтальной плоскости определяется соотношением

$$x'_{0 \max} = \min_{0 \leq z \leq Z} \frac{A(z)}{m_{12}(z)}, \quad (1)$$

где  $A$  — апертура,  $m_{12}$  — матричный коэффициент,  $Z$  — длина канала.

При подобном преобразовании системы, когда сохраняются длины  $l_i$  и параметры фокусировки

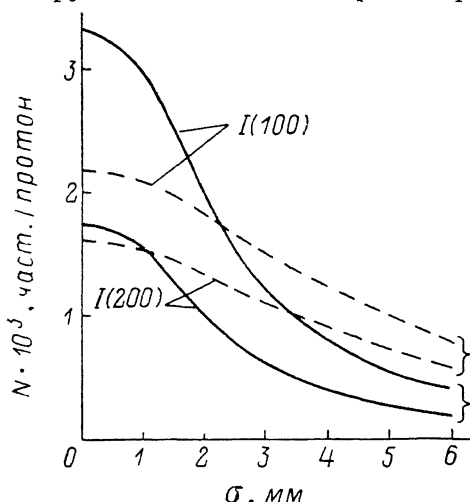


Рис. 6. Зависимости интегральных характеристик спектров нейтрино (рис. 2, табл. 2) от размеров протонного пучка на мишени (круговое нормальное распределение) для двух вариантов фокусирующей системы нейтринного канала УНК.

$A$  — на основе литиевых линз,  $Q$  — на основе квадрупольных.

$$k_i = \frac{eB_i}{A_i p} \quad (2)$$

квадрупольных линз, где  $B_i$  — магнитная индукция на полюсе линзы;  $e$ ,  $p$  — заряд и импульс вторичных частиц, матрицы преобразования отдельных линз и произвольных участков фокусирующей системы не меняются.

Магнитную индукцию в соотношении (2) можно считать постоянной величиной, тогда из него следует зависимость  $A_i \sim 1/p$ . С учетом этого из соотношения (1) получаем зависимость от импульса углового акцептанса  $x'_{0 \max} \sim 1/p$ , что совпадает с зависимостью от импульса среднего угла рождения вторичных частиц  $\langle \theta \rangle \sim 1/p$ . Это означает, что при подобном преобразовании оптимальная с точки зрения фокусировки  $\pi, K$ -мезонов в широком интервале импульсов фокусирующая система переходит в оптимальную, причем минимальная длина оптимальной фокусирующей системы не зависит от энергии первичных протонов.

Таким образом, при уменьшении энергии первичных протонов ухудшается соотношение между длиной оптимальной фокусирующей системы и длиной распадного участка канала, обычно составляющей несколько процентов от распадной длины  $\pi$ -мезонов  $\lambda_\pi [\text{м}] = 56 \cdot p_\pi [\text{ГэВ}/c]$ , что ограничивает применение фокусирующей системы из квадрупольных линз при низких энергиях.

### Список литературы

- [1] Гаркуша В. И., Карташев В. П., Котов В. И. и др. Препринт ИФВЭ. № 78-7. Серпухов, 1978.
- [2] Гаркуша В. И., Карташев В. П., Новоскольцев Ф. Н. Препринт ИФВЭ. № 85-82. Серпухов, 1985.
- [3] Болдырев Е. М., Рзаев Р. А., Сахаров В. П. // Матер. VII Рабочего совещания по нейтринному детектору ИФВЭ. Дубна, 1986.
- [4] Гаркуша В. И., Карташев В. П. Препринт ИФВЭ. № 80-166. Серпухов, 1980.
- [5] Stutte L. Fermilab Report. N TM-1305. Batavia, 1985.

Поступило в Редакцию  
2 марта 1989 г.