

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

524.1

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ЖЕЛЕЗА В ФИЗИКЕ  
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ*****Г. Т. Зацепин, Ю. А. Нечин, Г. Б. Христиансен***

В работе <sup>1</sup> Д. В. Скобельцыным впервые была высказана идея использования сплошного намагниченного железа для определения импульса заряженных проникающих частиц высокой энергии \*).

Эта идея заключается в следующем. Согласно электронной теории Лоренца сила, действующая на элементарную частицу заряда  $e$ , движущуюся со скоростью  $v$  в намагниченном железе, равна  $\mathbf{F} = \mu (e/c)[\mathbf{v}\mathbf{H}]$ , где  $\mathbf{H}$  — напряженность магнитного поля,  $c$  — скорость света. Магнитная проницаемость железа  $\mu$  составляет по величине несколько тысяч, так что выигрыш в  $\mathbf{F}$  и, следовательно, в величине отклонения частиц в таком магнитном поле очевиден. Благодаря тому, что увеличивается отклонение заряженной частицы, повышается верхняя граница и точность измерения ее импульса. В то же время железный сердечник магнита используется в качестве поглотителя электронов,  $\gamma$ -квантов и других частиц, сопровождающих проникающую частицу. Следует также отметить, что угловое отклонение проникающей частицы за счет кулоновского рассеяния в железном сердечнике может быть значительно меньше отклонения йод действием намагниченного железа, если продольный размер сердечника  $l$  достаточно велик. Так, угловое отклонение частицы в магнитном поле  $\vartheta \sim l$ , среднеквадратичное же угловое отклонение частицы в железе за счет кулоновского рассеяния  $\langle \vartheta_{sc}^2 \rangle^{1/2} = (E_s/E) (l/l_0)^{1/2} \sim \sim l^{1/2}$ , где  $E$  — энергия частицы в МэВ,  $E_s = 21$  МэВ и  $l_0 \simeq 1,76$  см — радиационная единица в железе. Следовательно, относительное кулоновское рассеяние  $\vartheta_{sc}/\vartheta \sim l^{-1/2}$  уменьшается при увеличении  $l$ .

Развитие техники эксперимента в ядерной физике и в физике космических лучей экспериментально доказало правильность и плодотворность идеи Д. В. Скобельцына. Уже в 1930—1931 гг. на ее основе были созданы устройства, состоящие из блоков намагниченного железа и счетчиков Гейгера — Мюллера, включенных в схему совпадений <sup>2,3</sup>. Эти устройства позволяли определить знак заряда и оценить энергию проникающих частиц космического излучения. В работах <sup>2,3</sup> магнитная индукция  $B = \mu H$  достигала большой величины (около 17 000 Гс).

---

\*) О. Пиччони в сборнике «The Birth of Particle Physics» (Cambridge University Press, 1983, p. 222) писал: «Смелая идея использования сплошного намагниченного железа для исследования высокоэнергичных космических частиц была впервые высказана Дмитрием Скобельцыным (в 1929 г.), хотя в то время предполагалось, что этими частицами являются электроны. Это сообщение было прочитано в США Мотт-Смитом, который изготовил макет из сплошного намагниченного железа и испытал его». Сам Мотт-Смит в статье <sup>36</sup> отмечает, что создание магнита из сплошного намагниченного железа «...осуществимо и удобно для отклонения сильно проникающих частиц, на что впервые указал Скобельцын».

Впоследствии идея отклонения заряженных частиц в ферромагнетике привлекла внимание теоретиков, в частности, К. Ф. Вайцеккера<sup>4</sup>. В его работе было решено уравнение П. А. М. Дирака для рассеяния заряженной частицы в ферромагнетике с использованием представлений квантовомеханической теории ферромагнетизма В. Гейзенберга и было также показано, что ответственной за отклонение заряженной частицы в намагниченном железе является магнитная индукция **B**. Таким образом, идея Д. В. Скобельцына получила дополнительное обоснование на базе квантовой теории<sup>\*</sup>).

На основе этой идеи М. Конверси, Е. Панчини и О. Пиччиони<sup>5</sup> и Г. К. Тичо и М. Шайном<sup>6</sup> в 40-х годах были получены принципиально новые результаты относительно распада и поглощения мюонов космических лучей. Авторы<sup>5</sup> и<sup>6</sup> использовали намагниченное железо в сочетании с группами счетчиков Гейгера — Мюллера, включенными в зависимости от их функции в схемы совпадений, антисовпадений или задержанных совпадений. В этих экспериментах впервые было доказано различие в поведении положительных и отрицательных остановившихся мюонов в веществах с разным *Z*. Было определено время жизни положительного мюона  $\tau_+ \approx 2,1$  мксек и получена зависимость  $\tau_-$  для отрицательных мюонов от *Z* вещества ( $\tau_- \sim Z^{-4}$  для легких элементов).

Начиная с 50-х годов многие группы физиков используют для исследования процессов генерации мюонов космических лучей магнитные спектрометры, основным элементом которых является магнит (или магниты) с железным сердечником. Такие приборы отличаются большим предельно регистрируемым импульсом мюонов и большой светосилой при экономичном потреблении тока в обмотке магнита. Метод отклонения мюонов в сильных магнитных полях получил в настоящее время большое распространение в экспериментах по исследованию космических лучей. Основное его достоинство заключается в том, что он является методом прямого измерения импульсов мюонов, в отличие от других, косвенных методов, применяющихся при исследовании космических лучей (например, метод кривой поглощения мюонов в грунте и др.).

Определение импульса мюона методом магнитного спектрометра основано на известном соотношении, связывающем импульс мюона  $p_\mu$  с угловым отклонением мюона  $\vartheta$  (радиан) и с линейным интегралом индукции магнитного поля  $\int_0^L \dot{B}(l) dl$  (Гс·см):

$$p_\mu = 300 \vartheta^{-1} \int_0^L B(l) dl \text{ (эВ/c)},$$

где *l* — координата в продольном направлении магнита, *L* — продольный размер магнита.

Спектр импульсов и угловое распределение мюонов космических лучей, измеренные на уровне моря, являются характеристиками, весьма чувствительными к процессам генерации мюонов в верхних слоях атмосферы, как это было показано в теоретических расчетах<sup>7, 8</sup>.

До последнего времени хорошо были изучены спектр и угловое распределение мюонов в области  $p_\mu \lesssim 10^3$  ГэВ/с, в которой экспериментальные данные, полученные разными методами, совпадают. Сравнение эксперимента с теорией<sup>7, 8</sup> показывает, что в этой области импульсов мюоны генерируются при распаде  $\pi^\pm$  мезонов, возникающих в верхних слоях атмосферы в резуль-

<sup>\*</sup>) В настоящее время существует и чисто экспериментальное доказательство справедливости этой идеи. Согласование результатов исследования энергетического спектра мюонов космических лучей различными методами возможно лишь при условии, что сила, действующая на элементарную частицу заряда *e* в намагниченном железе, равна  $\mu (e/c) \times [vH]$ .

тате взаимодействия первичного космического излучения с ядрами атомов воздуха.

Для выяснения характера генерации мюонов в области больших импульсов  $p_\mu > 10^3$  ГэВ/с в настоящее время созданы большие магнитные спектрометры с большой светосилой  $\Omega$  и с большими максимально измеряемыми импульсами  $p_m$ . В первую очередь следует упомянуть спектрометр MARS<sup>9</sup> ( $p_m = 5000$  ГэВ/с,  $\Omega = 800$  см<sup>2</sup>ср), регистрирующий мюоны в направлении, близком к вертикали, и спектрометры MUTRON<sup>10</sup> ( $p_m = 17000$  ГэВ/с,  $\Omega = 1100$  см<sup>2</sup>ср) и DEIS<sup>11</sup> ( $p_m = 6000$  ГэВ/с,  $\Omega = 1100$  см<sup>2</sup>ср), регистрирующие горизонтальные мюоны.

Авторы работ<sup>10,11</sup> на основе анализа своих экспериментальных результатов приходят к выводу о генерации мюонов в процессах  $\pi \rightarrow \mu$  и  $K \rightarrow \mu$  распада при отношении числа распавшихся каонов и пионов  $N_K/N_\pi \approx 0,15$  для интервала  $E_\mu = 1-10$  ТэВ.

Данные об энергетическом спектре мюонов несут также важную информацию о процессе генерации пионов. Как показано впервые в<sup>12</sup>, энергетический спектр генерируемых пионов в области энергий до  $\sim 100$  ГэВ имеет скейлинговый характер, во всяком случае при больших фейнмановских  $x > 0,2$ . Этот вывод, как ясно из экспериментальных данных о спектре мюонов в области более высоких энергий<sup>9,10,11</sup>, остается справедливым вплоть до энергий пионов  $\sim 10$  ТэВ. Для дальнейшего исследования генерации пионов и каонов таким методом необходимо, в первую очередь, дальнейшее совершенствование магнитных спектрометров путем увеличения их светосилы, а также путем повышения точности измерения отклонения мюонов в магните детектирующими устройствами.

Еще одним важным приложением идеи Д. В. Скобельцына является использование магнитных спектрометров для исследования мюонной компоненты широкого атмосферного ливня (ШАЛ)<sup>13,14</sup>. Так, в работе<sup>13</sup> с помощью большого подземного магнитного спектрометра с максимально регистрируемым импульсом  $p_m = 10^3$  ГэВ/с и ср светосилой  $1400$  см<sup>2</sup>ср исследовались мюоны в широком интервале энергий  $E_\mu = 10-500$  ГэВ в ШАЛ с полным числом частиц  $N_e = 10^5-10^6$ . Полученные в этом эксперименте пространственное распределение мюонов и их энергетический спектр позволили сделать вывод о нарушении скейлинга Фейнмана, о справедливости экстраполяции на область энергий  $10^{15}-10^{16}$  эВ тех моделей адрон-адронных взаимодействий, которые справедливы при энергиях, достигнутых на ускорителях ( $10^{14}$  эВ), и об отсутствии аномально большой передачи энергии в мюоны при взаимодействии космических лучей с энергией  $10^{15}-10^{16}$  эВ.

Таким образом, реализация идеи применения магнитов с железным сердечником уже дала много важных результатов в ядерной физике и в физике космических лучей высоких энергий. Несомненно, что дальнейшее совершенствование техники эксперимента на основе этой плодотворной идеи приведет к получению новых научных результатов. В этой связи можно отметить использование идеи Д. В. Скобельцына для исследований взаимодействия встречных пучков электронов (30 ГэВ) и протонов (820 ГэВ) в новейшем эксперименте HERA<sup>15</sup>. В этом эксперименте предполагается исследование неупругого  $ep$  рассеяния в области значений четырехмерных передаваемых импульсов, в десятки раз больших, чем достигнутые до последнего времени  $Q^2 \sim 10^4$  (ГэВ/с)<sup>2</sup>.

Научно-исследовательский институт  
ядерной физики МГУ (НИИЯФ)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skobeltzyn D. // Zs. Phys. 1929. Bd 54. S. 686.
2. Rossi B. // Phys. Rev. 1930. V. 36. P. 606; Nature. 1931. V. 128. P. 300.
3. Mott-Smith L. M. // Phys. Rev. a) 1931. V. 37. P. 1001; б) 1932, V. 39. P. 403.

4. Weizsäcker C. F.//Ann. d. Phys. 1933. Bd 17. S. 869.
5. Conversi M., Pancini E., Piccioni O.//Phys. Rev. 1945. V. 68. P. 232; 1947. V. 71. P. 209.
6. Ticho H. K., Schein M.//Ibidem. 1948. V. 73, P. 81.  
Ticho H. K.//Ibidem. V. 74. P. 1337.
7. Зацепин Г. Т., Кузьмин В. А.//ЖЭТФ. 1960. Т. 39. С. 1677.
8. Волкова Л. В., Зацепин Г. Т., Кузьмичев Л. А.//ЯФ. 1979. Т. 29. С. 1252.
9. Ayre C. A., Baxendale J. W., Hume C. J. et al.//J. Phys. Ser. G. 1975. V. 1. P. 584.  
Thompson M. G., Thornley R., Whalley M. R., Wolfendale A. W. //Proc. of the 15th Intern. Cosmic Ray, Conference. — Plovdiv, 1977. — V. 6. P. 21.
10. Kawashima Y., Kitamura T., Matsuno S. et al.//Proc. of the 17th Intern. Cosmic Ray Conference. — Paris, 1981. — V. 7. P. 16.
11. Allkofer O. C., Carstensen K., Bella G. et al.//Ibidem. V. 10. P. 321.
12. Зацепин Г. Т.//ДАН СССР. 1949. Т. 67. С. 993; Автореферат диссертации... доктора физ.-мат. наук. — М.: ФИАН СССР, 1954.
13. Bashutov Yu. N., Ermakov G. G., Fomin Yu. A. et al.//Proc. of the 19th Intern. Cosmic Ray. Conference. — La Jolla, 1985. — V. 7. P. 151.
14. Earnshaw J. C., Orford K. J., Rochester G. D. et al.//Proc. Phys. Soc. 1967. V. 90. P. 91.
15. H1 Collaboration. Letter of Intent for an Experiment at HERA: Preprint. — Aachen, FRG a.o., June 23, 1985.