

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 работе¹ 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 μ 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, γ -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 $\langle \vartheta_{sc}^2 \rangle^{1/2} = (E_s/E)(l/l_0)^{1/2} \sim l^{1/2}$, 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^{2,3}. Эти устройства позволяли определить знак заряда и оценить энергию проникающих частиц космического излучения. В работах^{2,3} 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, р. 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 статье³⁶ 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. Вайцзеккера⁴. 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 **В**. Таким образом, идея Д. В. Скобельцына получила дополнительное обоснование на базе квантовой теории *).

На основе этой идеи М. Конверси, Е. Панчини и О. Пиччиони⁵ и Г. К. Тичо и М. Шайном⁶ в 40-х годах были получены принципиально новые результаты относительно распада и поглощения мюонов космических лучей. Авторы⁵ и⁶ 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 $\tau_+ \approx 2,1$ мкеск и получена зависимость τ_- 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_μ с угловым отклонением мюона ϑ (радиан) и с линейным интегралом индукции магнит-

ного 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^{7, 8}.

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^{7, 8} показывает, что в этой области импульсов мюоны генерируются при распаде π^\pm мезонов, возникающих в верхних слоях атмосферы в резуль-

*) 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 $\mu (e/c) \times \times [\mathbf{vH}]$.

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 Ω и с большими максимально измеряемыми импульсами p_m . В первую очередь следует упомянуть спектрометр MARS⁹ ($p_m = 5000$ ГэВ/с, $\Omega = 800$ см²ср), регистрирующий мюоны в направлении, близком к вертикали, и спектрометры MUTRON¹⁰ ($p_m = 17000$ ГэВ/с, $\Omega = 1100$ см²ср) и DEIS¹¹ ($p_m = 6000$ ГэВ/с, $\Omega = 1100$ см²ср), регистрирующие горизонтальные мюоны.

Авторы работ^{10,11} 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 в¹², энергетический спектр генерируемых пионов в области энергий до ~ 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^{9,10,11}, остается справедливым вплоть до энергий пионов ~ 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)^{13,14}. Так, в работе¹³ с помощью большого подземного магнитного спектрометра с максимально регистрируемым импульсом $p_m = 10^3$ ГэВ/с и $\Omega = 1400$ см²стер 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 HERA¹⁵. 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)².

Научно-исследовательский институт
ядерной физики МГУ (НИИЯФ)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skobel'tsyn 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. Auger 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.