

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

537.611.2

МАГНИТНЫЙ МОНОПОЛЬ ПОСЛЕ ЮБИЛЕЯ

А. Д. Долгов

50 лет — довольно преклонный возраст для физической теории, лишенной экспериментальной поддержки. А между тем переживший свой юбилей монополь Дирака никогда еще не пользовался столь большим вниманием со стороны физиков различных специальностей, как в последние несколько лет. Магнитный монополь стал одним из центральных объектов исследования в физике элементарных частиц, ему посвящены десятки экспериментальных и теоретических работ. Вероятно, причина этого внимания в том, что модели Великого Объединения, указав на необходимость существования монополей как реальных физических объектов, одновременно объяснили, почему такие объекты до сих пор не были обнаружены: предсказываемая этими моделями масса монополя выходит далеко за рамки привычных масштабов физики элементарных частиц, она должна быть порядка 10^{16} ГэВ. Вместе с тем прогресс экспериментальной техники, в первую очередь создание новых приборов, использующих сверхпроводящие элементы, и гигантских детекторов, предназначенных для исследования космических нейтрино, а также для проверки другого предсказания теории Великого Объединения — нестабильности ядерной материи, позволили если и не получить указание на реальность монополей, то по крайней мере значительно продвинуться в установлении верхнего предела на их существование в природе, прежде всего — в космических лучах.

Цель этой статьи — привести указания на полученные в настоящее время экспериментальные данные и дать представление о некоторых наиболее интересных теоретических идеях, развитых после написания Коулменом обзора, перевод которого публикуется теперь в УФН.

Очевидно, что наиболее ясное и недвусмысленное указание на существование монополя дало бы обнаружение связанного с ним магнитного потока (см. обсуждение этого вопроса в указанном обзоре¹, раздел 2, а)). Существенно, что такой эффект не зависит от массы и скорости монополя, которые не известны заранее. Обнаружить изменение магнитного потока можно по явлению электромагнитной индукции. Пусть магнитный заряд величины ng_0 , где $g_0 = \hbar c/2e$ — элементарный магнитный заряд, e — электрический заряд электрона, проходит сквозь контур с током. Тогда поток магнитного поля, охватываемый контуром, меняется на величину $4\pi ng_0 = 4\pi n\hbar c/2e = 2n\phi_0$, где $\phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-7}$ Гс·см² — квант магнитного потока в сверхпроводящем контуре. Соответственно изменится ток в контуре, и при достаточно низком уровне фона это изменение может быть замечено прибором. В начале 70-х годов группа Л. Альвареса в Калифорнии приступила к исследованию возможности применить этот эффект к поиску монополей, используя SQUID — сверхпроводящий квантовый интерферометр. В феврале 1982 г. в Стэнфорде

Б. Кабрера² зафиксировал скачок показаний прибора в своей установке, построенной на этом принципе, и интерпретировал это явление как след монополя, прошедшего сквозь прибор. Сверхпроводящий контур представлял собой петлю из ниобиевой проволоки, диаметр петли — 5 см. Особым достоинством прибора был исключительно низкий уровень внешнего магнитного поля на петле, менее 10^{-7} Гс, который был достигнут с помощью сверхпроводящего экрана. Для того чтобы защитить прибор от различных вариаций внешнего магнитного поля, он был, кроме того, окружен экраном из магнитного сплава. В результате уровень фона не превышал 1% уровня сигнала, зарегистрированного в установке. Дальнейшие наблюдения на этом приборе, а также на усовершенствованной установке с повышенной эффективностью, в которой использовалась тройная сверхпроводящая петля большего, чем прежде, диаметра («трехосный детектор»), не обнаружили новых сигналов³. Это привело к выводу, что поток монополей ограничен значением порядка 10^{-11} см⁻² с⁻¹ ср⁻¹. Хотя конкретных недостатков в опыте Кабрера до сих пор замечено не было, единственное событие не может рассматриваться как убедительное доказательство существования монополя. Отметим, что в прошлом была лишь одна серьезная работа, претендовавшая на открытие монополя⁴; речь идет о специфическом треке в слюде, который был обнаружен на установке, поднятой на высотном воздушном шаре. Вероятно, этот трек был сделан тяжелым ядром⁵.

В экспериментах, которые проводились до начала 80-х годов, можно было бы обнаружить монополи, если бы они удовлетворяли одному из следующих трех условий:

1. Масса монополя не слишком велика, так что на существующих ускорителях могут рождаться пары монополь — антимонополь. Эксперименты такого рода проводились неоднократно. Наиболее точные измерения были выполнены в ЦЕРН⁶ на встречных pp-пучках с энергией 540 ГэВ. Полученное ограничение на рождение монопольных пар, естественно, зависит от заряда и массы монополя; утверждается, что сечение рождения меньше 10^{-32} — 10^{-31} см² для монополей с зарядом g_0 и массой $M < 140$ ГэВ.

2. Монополи эффективно захватываются обычной материей и удерживаются в ней магнитными силами. Тогда, приложив достаточно сильное внешнее магнитное поле, можно было бы извлечь монополь и направить его в детектор. Искали монополи в метеоритах⁷, и было установлено, что в их веществе имеется менее одного монополя на 10^{27} нуклонов (в предположении, что масса M не превосходит $5 \cdot 10^{14}$ ГэВ). Естественно попытаться искать монополи в магнитных минералах, в которых имеются весьма сильные внутренние магнитные поля. Выдвигалось предложение⁸ установить приборы, улавливающие и регистрирующие монополи, на обогатительной фабрике, обрабатывающей железную руду.

3. Монополи движутся достаточно быстро; при этом они ионизуют материал существенно сильнее, чем обычные заряженные частицы. Именно на этом принципе были построены детекторы монополей старого образца, в первую очередь те, которые были рассчитаны на поиск монополей в космических лучах.

Отметим, что определение ионизационной способности монополя, если он не является ультрарелятивистским, — довольно сложная теоретическая задача. В последнее время появилось несколько работ⁹⁻¹¹, посвященных вычислению ионизационных потерь монополей, однако вопрос еще не выяснен до конца, так как результаты разных авторов существенно расходятся. Было выдвинуто предложение использовать для обнаружения монополей термоакустический эффект, связанный с ионизацией, однако отношение сигнала к шуму, вызванному тепловыми флуктуациями, недостаточно велико в этом случае для надежного обнаружения эффекта¹².

Ни одно из указанных условий не подходит для сверхтяжелых монополей в моделях Великого Объединения. Такие частицы могли бы быть ускоре-

ны галактическими магнитными полями до скоростей, не превышающих 10^{-2} от скорости света c . При скоростях порядка 10^{-4} c монополи захватываются Солнечной системой, но наиболее вероятные скорости порядка скорости движения Солнца в Галактике, т. е. $\beta = v/c \approx 10^{-3}$. Сверхтяжелые монополи, даже не очень быстрые, обладают слишком большой инерцией и потому не могут быть задержаны атомными магнитными полями; таким образом, эти частицы должны иметь весьма высокую проникающую способность.

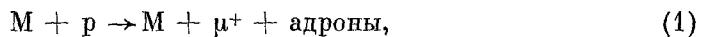
Для поиска сверхтяжелых монополей были использованы гигантские подземные детекторы, сооруженные в последние годы для исследования космических нейтрино, а также для проверки наиболее яркого предсказания теории Великого Объединения, — в надежде обнаружить распад протона. Было поставлено несколько экспериментов¹³⁻¹⁹ для обнаружения монополей, которые могли бы присутствовать в космических лучах. Огромные массы детектирующего вещества при сравнительно низком уровне фона позволили существенно понизить верхние границы на потоки космических монополей с высокой проникающей способностью. Наилучшее экспериментальное ограничение было получено на Баксанском нейтринном детекторе¹⁹: $F < 5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ср}^{-1}$ при $\beta \approx 5 \cdot 10^{-4} - 0,2$. На порядок более высокие границы были установлены¹⁷ в области $\beta \approx 10^{-3} - 10^{-2}$ с помощью детектора Soudan-1, предназначенног для обнаружения распада протона. Эксперимент¹⁵, использующий пластиковые сцинтилляционные счетчики, на подземном детекторе космических лучей в штате Юта (США) дал ограничение $F < 5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ср}^{-1}$ при $10^{-4} < \beta < 3 \cdot 10^{-2}$. Того же порядка и ограничения, полученные другими группами на детекторах протонного распада.

Если бы монополи обнаружились в космических лучах на столь высоком уровне, это было бы удивительно с точки зрения астрофизики. При наличии в Галактике свободных монополей они ускорялись бы крупномасштабными магнитными полями, о существовании которых хорошо известно. Домогадский и Железных²⁰ указали, что в присутствии достаточно большого количества монополей в космическом пространстве энергия галактического магнитного поля была бы потрачена на создание магнитных токов, и поля не могли бы существовать. Это соображение было использовано Паркером и другими авторами²¹⁻²⁶ для оценки максимально допустимых в этом смысле потоков монополей. Результаты содержат неопределенность, но едва ли ожидаемый поток может превосходить $10^{-16} - 10^{-15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ср}^{-1}$ при $\beta \sim 10^{-3}$. Правда, существует еще возможность, что поток космических монополей вблизи Земли намного превосходит средние потоки в Галактике, например из-за влияния Солнца²⁶. Только в этом случае остается надежда, что космические монополи будут открыты.

Вопрос о монополях, возникающих как сложные полевые системы в калибровочных теориях со спонтанным нарушением симметрии, — один из замечательных примеров взаимообогащающей связи физики элементарных частиц с космологией, связи, важность которой стала очевидной в последние годы²⁷. Дело в том, что сверхтяжелые монополи могли бы рождаться естественным образом только на ранней стадии развития Вселенной, вблизи фазового перехода, нарушающего симметрию Великого Объединения, которая существовала в мире при сверхвысоких температурах сразу после Большого Взрыва. При фазовом переходе возникает ненулевое среднее по вакууму у хиггсовских полей, и если этот процесс происходит как капельная конденсация пара, независимо в различных областях пространства, то в возникающем горячем хаосе создаются условия для образования локализованных полевых конфигураций с нетривиальной топологией — монополей. При этом оказалось, однако, что в обычной модели Большого Взрыва плотность монополей во Вселенной, которые могли бы сохраняться до наших дней, катастрофически велика^{28,29}. Были выдвинуты различные соображения, чтобы обойти эту трудность (см. обзоры, посвященные связи теории элемен-

тарных частиц с космологией^{27,30,31}). По-видимому, наиболее разумное решение проблемы монополей получается в инфляционной модели³²⁻³⁴, которая кажется привлекательной и с других точек зрения. В этой модели фазовый переход происходит в процессе экспоненциального расширения, обусловленного огромным запасом энергии, заключенным в симметричном относительно группы Великого Объединения вакууме. В период расширения, следующий за фазовым переходом, область несимметричной фазы раздувается до размеров всей видимой Вселенной. При таком развитии событий можно объяснить однородность Вселенной и ее почти плоскую геометрию, а также и тот факт, что реликтовых монополей в пространстве нет, так как при фазовом переходе они могли бы образовываться лишь на границах между фазами с по-разному нарушенной симметрией. В принципе, монополи могли бы также рождаться парами при столкновениях частиц, например кварков или фотонов, которые генерируются при взрывной конденсации вакуума. Однако грубая оценка этого эффекта³⁵ дает верхний предел, на много порядков более низкий, чем граница, полученная из существования галактических магнитных полей. Таким образом, не исключено, что сверхтяжелый монополь надолго останется экзотическим объектом, исчерпывающе изученным в теории, но не доступным экспериментальному обнаружению, так как его невозможно создать искусственно, а в природе он если и встречается, то неизмеримо редко. Этот вывод приносит тем большее разочарование, что с монополем, возможно, связано интереснейшее явление, недавно предсказанное теоретически.

Монополь Великого Объединения было бы легко обнаружить благодаря разрушительному действию, которое он производит в ядерной материи. Рубаков³⁶ заметил (позднее к тому же выводу пришли Каллан³⁷ и Вильчек³⁸), что монополь должен катализировать распад нуклона, который предсказывают модели Великого Объединения, из-за наличия переходов кварков в лептоны. Речь идет о реакции типа



которая, согласно предсказаниям Рубакова, должна идти с большим сечением, возможно, достигающим 10^{-26} см^2 . При наличии значительных потоков космических монополей эффективное время жизни протона было бы существенно понижено по сравнению с величиной, полученной на основе оценки вероятности спонтанного распада^{39,40}. Особенно чувствительны к потокам монополей нейтронные звезды, так как они создают мощные гравитационные поля и обладают высокой плотностью ядерной материи. Попадая в нейтронные звезды, монополи должны вызывать распад нейтронов, что привело бы к интенсивному излучению в рентгеновской и ультрафиолетовой областях, которое можно было бы зарегистрировать на Земле^{41,42}.

Разумеется, все количественные оценки существенно зависят от полного сечения всех процессов вида (1). Каллан⁴³ предложил следующее качественное объяснение того, почему этот процесс должен идти с большим сечением. Рассмотрим рассеяние электрического заряда на магнитном полюсе. Как известно (см., например, обзор Коулмена¹; раздел г) гл. 2), угловой момент системы включает обусловленный полем член $eg\mathbf{n}$, где \mathbf{n} — единичный вектор, указывающий направление от монополя к заряду. Для рассеяния заряда со спином $1/2$ (в отличие от скалярной частицы) в состоянии с наименьшим моментом нет центробежного барьера, и ничто не мешает частицам сблизиться. Однако при рассеянии вперед в лобовом столкновении вектор \mathbf{n} должен изменить знак, а это разрешено сохранением момента, только если одновременно меняет знак произведение eg , т. е. происходит перезарядка. Таким образом, в непосредственной близости от центра монополя процесс перехода кварка в антикварк вытесняет упругое рассеяние. Сохранение цвета и электрического заряда не позволило бы антикварку выйти из области пространства, занятой монополем, однако в сердцевине монополя имеется предсказываемое теорией Великого Объединения тяжелое бозонное поле, цветное

и заряженное, конверсия которого в другой антикварк и лептон (например, положительный мюон) обеспечивает сохранение цвета и заряда для процесса в целом. Барионный заряд при этом не сохраняется. Можно ожидать, что распад протона произойдет, если один из заключенных в нем кварков столкнется с монополем, поэтому кажется естественным, что сечение процесса катализа распада протона должно быть порядка его геометрического сечения, 10^{-26} см 2 . Усиление перезарядки в S-волне подтверждается также аккуратным исследованием, основанным на уравнении Дирака, релятивистского рассеяния заряда на монополе⁴⁴⁻⁴⁶. Дополнительное усиление эффекта предсказывается⁴⁷ на основании анализа радиационного захвата монополя атомом, по аналогии с усилением μ -захвата. Роль атомных эффектов обсуждалась и в других работах^{48a}. Однако главный вопрос остается пока не вполне выясненным^{48b}: как корректно описать взаимодействие кварка с квантованными бозонными полями внутри монополя? Взаимодействие это происходит на таких малых расстояниях, какие недоступны для исследования в других процессах.

Предсказание эффекта Рубакова и опыт Кабреры явились дополнительными стимулами к исследованию монополей. Регулярно собираются конференции для обсуждения новых идей в этой области; такая конференция состоялась в Орсе⁴⁹ осенью 1983 г. Был представлен ряд новых проектов экспериментальных установок по поиску монополей, которые позволят довести верхнюю границу на поток монополей из космоса до уровня, разрешенного астрофизическими соображениями.

К книгам, содержащим «старую» теорию монополей⁵⁰⁻⁵², за последнее время добавился целый ряд обзоров и сборников статей^{1, 53-57}, в которых обсуждаются новейшие достижения теории и эксперимента.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Coleman S. The Magnetic Monopole Fifty Years Later: Preprint.— Cambridge: Harvard University, 1981; перевод: УФН, 1984, т. 144, с. 277 (в данном выпуске).
2. Cabrerera B.— Phys. Rev. Lett., 1982, v. 48, p. 1378.
3. Cabrerera B., Taber M., Gardner B., Bourg. J.— Ibid., 1983, v. 51, p. 1933.
4. Price P. B., Shirk E. K., Osborne W. Z., Pinsky L. S.— Ibid., 1975, v. 35, p. 487; Phys. rev. Ser. D, 1978, v. 18, p. 1382.
5. Kinoshita K., Price P. B.— Ibid., 1981, v. 24, p. 1707.
6. Aubert B., Musset P., Price M., Vialle J. P.— Phys. Lett. Ser. B, 1983, v. 120, p. 465.
7. Eberhard P. H., Ross R. R., Alvarez L. W., Watt R. D.— Phys. Rev. Ser. D, 1971, v. 4, p. 3260.
8. Cline D.— In: Magnetic Monopoles/Ed. R. A. Carrigan, W. P. Trower.— N. Y.: Plenum Press, 1983.
9. Ahlen S. P., Kinoshita K.— Phys. Rev. Ser. D, 1982, v. 26, p. 2347.
10. Ahlen S. P., Tarlé G.— Ibid., 1983, v. 27, p. 688.
11. Drell S. D., Kroll N. M., Mueller M. T., Parke S. J., Ruderman M. A.— Phys. Rev. Lett., 1983, v. 50, p. 644.
12. Akerlof C. W.— Phys. Rev. Ser. D, 1982, v. 26, p. 1116; 1983, v. 27, p. 1675.
13. Ullman J. D.— Phys. Rev. Lett., 1981, v. 47, p. 289.
14. Bonarelli R., Capiluppi P., D'Antone I., Giacomelli G. et al.— Phys. Lett. Ser. B, 1982, v. 112; p. 100; 1983, v. 126, p. 137.
15. Groom D. E., Loh E. C., Nelson H. R., Ritson D. M.— Phys. Rev. Lett., 1983, v. 50, p. 573; v. 51, p. 941.
16. Sokolowski J. K., Sulak L. R.— In: Proc. of the XXI Intern. Conference on High Energy Physics.— Paris, 1982.
17. Bartelt J. et al.— Phys. Rev. Lett., 1983, v. 50, p. 655.
18. Tarlé G., Ahlen S. P., Lics T. M.— Ibid., 1984, v. 52, p. 90.
19. Алексеев Е. Н., Валиев М. М., Чудаков А. Е. и др. Препринт ИЯИ АН СССР № ПО268.— Москва, 1983; Lett. Nuovo Cimento, 1982, v. 35, p. 413.
20. Домогацкий Г. В., Железных И. М.— ЯФ, 1969, т. 10, с. 1238.
21. Parker E. N.— Astrophys. J., 1970, v. 160, p. 383.
22. Lazarides G., Shafiq Q., Walsh T. F.— Phys. Lett. Ser. D, 1982, v. 26, p. 1296.

23. Turner M. S., Parker E. N., Bogdan T. J.—Phys. Rev. Ser. D, 1982, v. 26, p. 1296.
24. Arons J., Blanford R.—Phys. Rev. Lett., 1983, v. 50, p. 544.
25. a) Raphaeli Y., Turner M. S.—Phys. Lett. Ser. B, 1983, v. 121, p. 115.
б) Stein-Schabes J., Barrow J. D.—Ibid., v. 122, p. 31.
26. Dimopoulos S., Preskill J. P., Wilczek F.—Ibid., 1982, v. 119, p. 320.
27. Долгов А. Д., Зельдович Я. Б.—УФН, 1980, т. 130, с. 559; Rev. Mod. Phys., 1981, v. 51, p. 1.
28. Zeldovich Ya. B., Khlopov M. Yu.—Phys. Lett. Ser. B., 1978, v. 79, p. 239.
29. Preskill J. R.—Phys. Rev. Lett., 1979, v. 43, p. 1365.
30. Barrow J. D.—Fund. Cosmic Phys., 1983, v. 8, p. 83.
31. Dolgov A. D. Progress in Particle Physics and Modern Cosmology: Preprint ITEP.—Moscow, 1983.
32. Guth A.—Phys. Rev. Ser. D, 1981, v. 23, p. 347.
33. Linde A. D.—Phys. Lett. Ser. B, 1982, v. 108, p. 389.
34. Albrecht A., Steinhardt P.—Phys. Rev. Lett., 1982, v. 48, p. 1220.
35. Turner M. S.—Phys. Lett. Ser. B, 1982, v. 115, p. 95.
36. Рубаков В. А.—Письма ЖЭТФ, 1981, т. 33, с. 658; Препринт ИЯИ АН СССР Р-0204.—Москва, 1981; Nucl. Phys. Ser. B, 1982, v. 203, p. 311.
37. Callan C. G.—Phys. Rev. Ser. D, 1982, v. 25, p. 2141; v. 26, p. 2058.
38. Wilczek F.—Phys. Rev. Lett., 1982, v. 48, p. 1146.
39. Ellis J., Nanopoulos D. V., Olive K. A.—Phys. Lett. Ser. B, 1982, v. 116, p. 127.
40. Bais F. A., Ellis J., Nanopoulos D. V., Olive K. A.—Nucl. Phys. Ser. B, 1983, v. 219, p. 189.
41. Kolb E. W., Colgate S. A., Harvey J. A.—Phys. Rev. Lett., 1982, v. 49, p. 1373.
42. Dimopoulos S., Preskill J., Wilczek F.—Phys. Lett. Ser. B, 1982, v. 119, p. 320.
43. Callan C. G.—Nucl. Phys. Ser. B, 1983, v. 212, p. 391.
44. Blaer A., Christ N., Tang J.—Phys. Rev. Lett., 1981, v. 47, p. 1364; Phys. Rev. Ser. D, 1982, v. 25, p. 2128.
45. Nair V. P.—Phys. Rev. Lett., 1983, v. 51, p. 631.
46. Callan C. G., Das S. R.—Ibid., p. 1155.
47. Bracci L., Fiorentini G.—Phys. Lett. Ser. B, 1983, v. 124, p. 29; Nucl. Phys. Ser. B, 1984, v. 232, p. 236.
48. a) Aragune J., Fukugita M.—Phys. Rev. Lett., 1983, v. 50, p. 1901.
б) Walsh T. F., Weisz P., Wu T. T.—Nucl. Phys. Ser. B, 1984, v. 232, p. 349.
49. CERN Courier, 1983, v. 23, p. 318.
50. Монополь Дирака: Сб. статей/Под ред. В. М. Болотовского, Ю. Д. Усачева.—М.: Мир, 1970.
51. Весовский С. В. Магнетизм микрочастиц.—М.: Наука, 1973.
52. Стражев В. И., Томильчик Л. М. Электродинамика с магнитным зарядом.—Минск: Наука и техника, 1975.
53. Monopoles in Quantum Field Theory/ Ed. N. S. Craigie, P. Goddard, W. Nahm.—Singapore: World Sci. Publ., 1982.
54. Carrigan R. A., Trower W. P.—Sci. American, 1982, v. 246, No. 2, p. 91; перевод: УФН, 1983, т. 139, с. 333.
55. Cabrera B., Trower W. P.—Found. Phys., 1983, v. 13, p. 195.
56. Magnetic Monopoles/Ed. R. A. Carrigan, W. P. Trower.—N. Y.: Plenum Press, 1983.
57. Carrigan R. A., Trower W. P.—Nature, 1983, v. 305, No. 5936, p. 673.