

e
+

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

471/82

1/2-82
Д2-81-675

Я.Ружичка, В.П.Зрелов

К ПЯТИДЕСЯТИЛЕТИЮ ПРОБЛЕМЫ
МОНОПОЛЯ ДИРАКА

Направлено в "Czechoslovak Journal of Physics"

1981

1. ВВЕДЕНИЕ

С момента предсказания Дираком* возможности существования в природе свободных магнитных зарядов прошло уже полвека. История физики, пожалуй, не знает такого примера, когда на подтверждение серьезных и конкретных теоретических предсказаний было потрачено столько человеческих усилий, а проблема осталась неразрешенной.

Авторы в течение более десятка лет, имея для этого хорошие возможности, собирали сведения о работах, относящихся к проблеме магнитного монополя. Эти материалы составили основу полной библиографии /1/, содержащей свыше 1700 указаний и сопровождающейся в большинстве случаев аннотациями оригинальных статей. Эта библиография позволила проследить за историей проблемы магнитного заряда. Ниже, в кратком историческом обзоре обращается внимание на некоторые интересные и порой малоизвестные факты.

2. ИСТОРИЯ ПРОБЛЕМЫ МАГНИТНОГО ЗАРЯДА

Одним из следствий теории монополя Дирака является то, что уравнения Максвелла приобретают симметричную форму:

$$\operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho_e, \quad -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \operatorname{rot} \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}_e,$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 4\pi\rho_m, \quad -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \operatorname{rot} \vec{E} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}_m. \quad //$$

где ρ_m и \vec{j}_m - плотности магнитных зарядов и магнитных токов. Известная, эмпирически установленная симметрия электрических и магнитных явлений делает это следствие теории Дирака весьма привлекательным. Пожалуй, немногим известно, что Хевисайд /2/ еще в 1892 г. привел системы уравнений Максвелла к несколько иной, но также полностью симметричной и динамически завершенной форме:

$$\operatorname{curl}(\vec{H} - \dot{\vec{h}}) = 4\pi k \vec{E} + c \dot{\vec{e}},$$

$$\operatorname{curl}(\dot{\vec{e}} - \vec{E}) = 4\pi g \vec{H} + \mu \dot{\vec{h}}, \quad //$$

* P. A. M. Dirac. Proc. Roy. Soc. A. 1931, v. 133, p. 60.

где, в обозначениях Хевисайда, \vec{H} , \vec{E} — интенсивности магнитного и электрического полей; $\vec{\epsilon}$ — количество энергии, переносимой электромагнитным полем в секунду в единичном объеме, относящееся к единице электрического тока; \vec{H} — аналогичная величина, относящаяся к магнитному току; k — электрическая проводимость; g — магнитная проводимость; c — диэлектрическая постоянная, μ — магнитная постоянная.

И, по-видимому, только фиктивность использованных им понятий /магнитных зарядов и токов/ была причиной того, что эти математически изящные уравнения не стали общепринятыми. Интересным является и то, что два совершенно различных подхода /Дирака и Хевисайда/ приводят к одному и тому же результату — симметризации системы основных уравнений электродинамики.

По нашему мнению, работу Хевисайда следует считать первой опубликованной теоретической работой, имеющей прямое отношение к проблеме магнитного заряда*.

К первой экспериментальной попытке разрешить проблему существования свободного магнетизма, по-видимому, следует отнести работу Пьера Кюри^{/3/}, также почти неизвестную в настоящее время**. Параллелизм электрических и магнитных явлений, как считает Кюри, приводит к естественному вопросу: не является ли эта аналогия более полной. В своей работе он пишет: "Является ли абсурдным предполагать, что существуют также проводники магнетизма, магнитных токов, свободного магнетизма?" И затем, подробно анализируя вопрос, не находятся ли подобные явления в противоречии с принципами энергетики /'Energetique'/ или с условиями симметрии, он приходит к заключению, что: ". . . с точки зрения энергетики и с точки зрения симметрии можно думать, без абсурда, о токах магнетизма и зарядах магнетизма". Эту работу П. Кюри завершает словами: "Было бы смело, конечно, заключить отсюда, что эти явления существуют в действительности. Если, однако, это все же так, они должны будут удовлетворять условиям, о которых мы говорили".

* В работах Кэрригена и др./4,5/ приводится выдержка из "Epistola Petri Peregrini de Maricourt de magnete"(1269), которая, как он считает, может являться самым ранним опубликованным наблюдением, относящимся к этой проблеме: "Procul dubio omnes lineae (magneticae) hujus mundi in duo puncta concurrent sicut omnes orbis meridiani in duo concurrent polos mundi oppositos". /Без сомнения, все такие /магнитные/ линии сходятся в две точки так же, как все меридианы сходятся в два противоположных полюса мира/.

** На работу П. Кюри обратил наше внимание И. М. Франк.

Одновременно П.Кюри предпринимает попытку экспериментально обнаружить магнитную проводимость на основе предложенного им "динамического эффекта". Идея эксперимента состояла в следующем: "...если бы существовала магнитная проводимость, то трансформатор, аналогичный трансформатору с переменным током, но с кольцевым яром, проводящим магнетизм, преобразовал бы один постоянный ток в другой постоянный ток". Он проверял, не наблюдается ли это с яром из мягкого железа, но не получил никакого эффекта.

Из исследований, относящихся к проблеме магнитного заряда и выполненных еще до основополагающих работ Дирака, следует отметить публикации Эренхафта. В библиографии^{/1/} их приведено свыше шестидесяти^{!!}, причем в основном это экспериментальные работы. По количеству работ труд Эренхафта сопоставим с общим числом экспериментальных работ по поиску магнитного монополя, выполненных во всем мире к настоящему времени. В течение более чем 20 лет Эренхафт был убежден, что в своих опытах регистрирует магнитные заряды. Трудно судить сейчас, в чем состояла его ошибка. Фактом остается то, что в настоящее время все эти работы практически забыты.

Дирак^{/8/} в 1931 г., пытаясь объяснить причину, почему электрический заряд наблюдается всегда только кратным заряду электрона "e" и почему величина заряда "e" именно такая, какую мы ее знаем из эксперимента, сделал неожиданное для себя открытие. Он полностью решил поставленную задачу, однако для этого ему пришлось допустить возможность существования в природе изолированных магнитных зарядов. Эта ситуация несколько напоминает попытку Хевисайда, который, приводя уравнения Максвелла к симметричной форме, вынужден был сделать аналогичное предположение. В 1948 г. Дирак развил общую теорию заряженных частиц и полюсов, взаимодействующих друг с другом посредством электромагнитного поля^{/7/}. Следует, однако, подчеркнуть, что в отличие от Хевисайда, который считал магнитный заряд фиктивным, Дирак ввел его как реально существующий в природе и заложил основы теории магнитного заряда.

Первый эксперимент с целью определения верхнего предела сечения рождения монополей Дирака в атмосфере первичными космическими лучами предпринял Малкус в 1952 г.^{/8/}. Результаты этого эксперимента показали, что число монополей, достигающих поверхности Земли, меньше чем $10^{-10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Первый поиск монополей Дирака с помощью ускорителя провели Баднер и Исбелл в 1959 г.^{/9/} на беватроне Массачусетского технологического института с энергией протонов 6,3 ГэВ. При этих энергиях в p-p соударениях могли рождаться монополи с массами в пределах от массы π -мезона до массы протона. Этот

эксперимент позволил установить верхний предел $\sim 10^{-35}$ см² сечения рождения пар монополей с массой, приблизительно равной массе протона.

С этих пор и до настоящего времени было проведено свыше 50 экспериментов по поиску магнитных зарядов. Наглядное представление о всех выполненных экспериментальных поисках монополя Дирака можно получить из рис. 1.

Основой большинства экспериментов является предсказанная Дираком большая величина магнитного заряда $g = 68,5e$. Регистрация частицы с таким зарядом в общем-то не вызывает особых трудностей при современной уровне техники физического эксперимента. В осуществленных опытах "детектирование" монополя производилось по таким эффектам, как характерная ионизация, аномально большая интенсивность излучения Вавилова-Черенкова, аннигиляция монополь-антимонполюльной пары и возбуждение э.д.с. в замкнутом контуре при пролете через него магнитного заряда.

Были проведены также прямые измерения величины магнитного заряда, из которых установлены верхние пределы магнитных зарядов электрона, протона, μ -мезона и других элементарных частиц.

Для поиска монополей Дирака испробованы самые разнообразные методики. Во многих из них использовалось сочетание сильных импульсных магнитных полей - своего рода "собирателей", "экстракторов" и "ускорителей" магнитных зарядов - с последующей их регистрацией одним из вышеприведенных способов. Большинство методик предполагает, как правило, существенный разрыв во времени от момента рождения монополей до момента их регистрации, что является неблагоприятным, так как приходится делать много различных предположений о поведении монополей за это время. Некоторые методики, однако, позволяют сократить этот разрыв вплоть до 10^{-10} с /41,48/.

Необходимо также отметить попытки поиска "недираковских" монополей с магнитным зарядом g , который равен "е" и меньше "е" /55/.

По основным направлениям поисков монополей к настоящему времени получены следующие результаты.

Наинишая граница потока "космических" монополей $\sim 10^{-19}$ см⁻² с⁻¹* достигнута в экспериментах Флейчера /15,16/, по мнению которого на этом можно последующие поиски монополей прекратить.

С вводом в строй все более мощных ускорителей отодвигалась и верхняя граница масс, до которой в $p-p$ взаимодействиях маг-

*Меньше чем два монополя на всю поверхность Земли за секунду.

ПОИСКИ МАГНИТНЫХ МОНОПОЛЕЙ

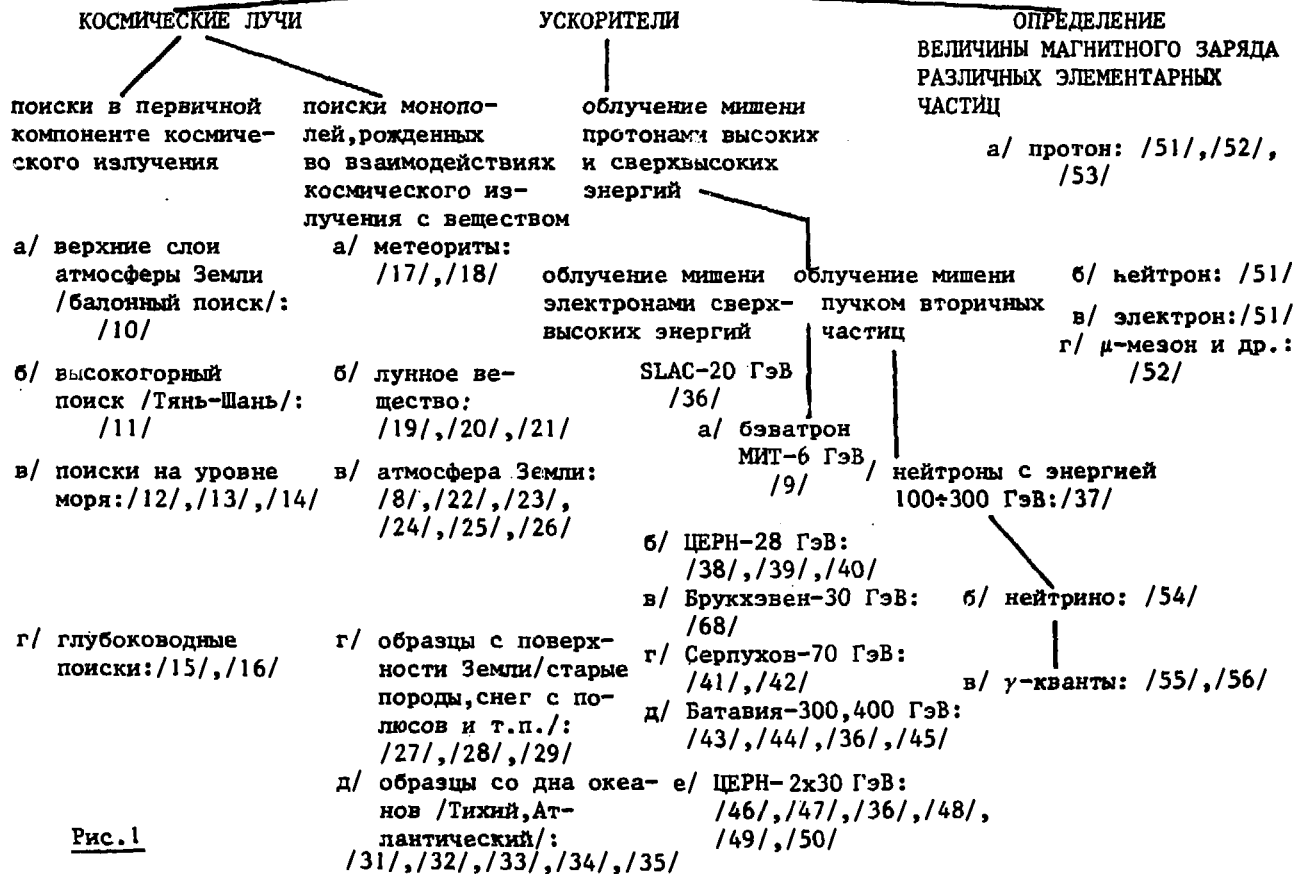


Рис. 1

нитные монополи не были обнаружены. Последовательно был исследован диапазон возможных масс рождаемых монополей с верхним пределом, равным 1; 3; 5,5; 12,14 m_p , при сечении, достигающем в отдельных случаях порядка $10^{-40} 10^{-43} / \text{см}^2$. Последние эксперименты, проведенные на встречных пучках протонов в ЦЕРНе, отодвинули верхний предел исследованных масс монополей до $\sim 30 m_p$, правда, при несколько более высоком сечении их рождения: $\sim 10^{-35} \text{см}^2$.

Была доказана магнитная нейтральность протона, нейтрона, электрона и других элементарных частиц. Предел возможного магнитного заряда нуклона достиг значения $10^{-26} g_0 / g_0$ - величина минимального заряда Дирака/.

Такое количество неудачных попыток обнаружить магнитный монополь вызывает некоторый скептицизм, в том числе и у автора теории магнитного заряда. В своей работе, опубликованной в 1973 году^{57/} Дирак пишет*: "Другой идеей, которая у меня появилась в свое время и которая следовала из математики, было то, что было бы возможным иметь единичные магнитные полюсы, монополи. Есть в этом некоторая красивая математика, связанная с монополями. Однако монополи никогда не были найдены, хотя экспериментаторы искали их, и я начинаю сомневаться, является ли это математическое построение правильным. Есть основания для сомнений, так как теория электронов, взаимодействующих с электрическим и магнитным полем все еще не является удовлетворительной. Есть основательные трудности, которые показывают, что необходимо произвести некоторые очень глубокие изменения. Я не хочу обсуждать эти трудности, но мне просто хочется сказать, что они в самом деле наводят сомнения на это построение и может случиться так, что, когда мы получим улучшенную теорию в будущем, в ней не будет места для магнитных монополей".

В связи с этим интересная ситуация возникла в 1975 г., когда американские физики Прайс и др.^{10/} заявили, что в своем твердотельном детекторе, облучаемом в верхних слоях атмосферы Земли в течение 2,6 суток первичным космическим излучением, они обнаружили след очень тяжелой и сильно ионизирующей частицы, который с большой вероятностью мог быть следом магнитного монополя с зарядом $g = 137e$ и массой $\geq 200 m_p$. Широкое обсуждение, возникшее на основе опубликованных данных, выявило вскоре и ряд других, более прозаических интерпретаций зарегистрированного случая, и авторам пришлось вскоре отказаться от открытия магнитного монополя^{58/}. Хотя сенсационное открытие и не состоялось, по бурной реакции, с какой научная и мировая общественность восприняла это сообщение, можно судить о важ-

* На эту работу обратил наше внимание С. Дубничка.

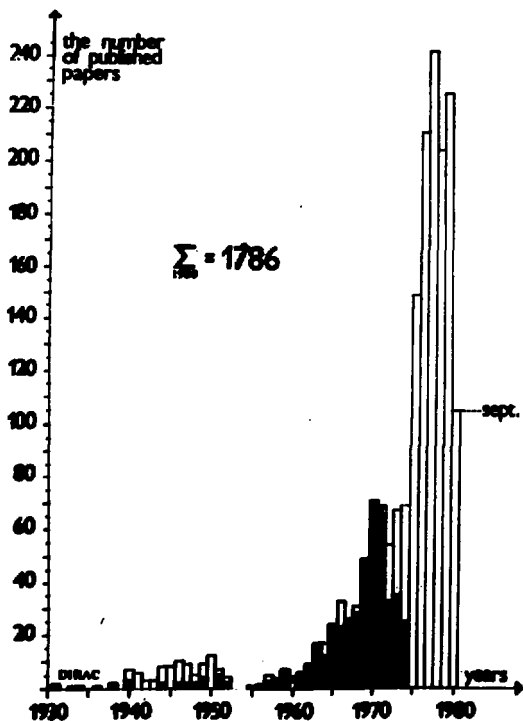


Рис. 2

ности проблемы. Послужило ли это толчком к дальнейшим исследованиям или сыграли роль и другие факторы, неизвестно, но фактом остается то, что после 1975 года отмечается стремительный рост количества публикаций по этой тематике /см. рис.2/. Заштрихованная часть на этом рисунке построена по данным, имеющимся у авторов в 1975 г. Из рисунка видно, что тенденция к быстрому увеличению количества публикаций имела место и ранее, на что еще в 1973 г. указывал академик Вонсовский /59/. Однако обращает на себя внимание, что ежегодное число работ, вышедших после 1975 г., составляет уже свыше 200 и общее количество работ, опубликованных за 50 лет существования проблемы, превысило 1700.

Часть этих работ развивает теорию Дирака, устраняя в ней имевшие место ранее трудности. В других - появилось множество различных оригинальных подходов к проблеме магнитного заряда. Не вдаваясь в подробности, проиллюстрируем их хотя бы списком встречающихся названий магнитного монополя. Кроме монополя Дирака, в настоящее время известны: дионы Лвингера, монополь /дион/ Зоммерфельда-Прасада, монополь Хуфта-Полякова, монополь Ву-Янга, монополь Янга-Мильса-Хиггса, монополь БПС /Богомольный-Прасад-Зоммерфельд/, Абелеев монополь, не-Абелеев магнитный монополь, SU(3) -магнитный монополь, цветной магнитный монополь, топологический монополь, тахионный монополь, гравитационный магнитный монополь и др.

Теория Дирака не дает конкретных предсказаний о массе магнитного монополя *, и если не принимать во внимание и такую

* Согласно теориям Полякова и Хуфта масса магнитного заряда

$$M_g \sim \frac{M_W}{\alpha}. \text{ При массе } W\text{-бозона } M_W = 80 \text{ ГэВ масса } M_g \sim 11 \text{ ТэВ.}$$

альтернативу, что он не существует, то все отрицательные результаты поиска монополей на ускорителях находят свое естественное объяснение в том, что масса монополя существенно выше, чем предел, достигнутый с помощью современных ускорителей. Поэтому поиск магнитных монополей ведется систематически с вводом в строй более мощных ускорителей. В настоящее время предполагается искать магнитные заряды на ускорителях LEP^{/60/}, VBA^{/61/} и на встречных пучках pp^{/62/}.

Авторы не считают себя достаточно компетентными систематизировать все теоретические работы, относящиеся к проблеме магнитного заряда. Однако в целом можно уверенно заключить, что проблема магнитного заряда становится одним из возможных направлений на пути к разрешению вопроса о структуре элементарных частиц.

В этой связи интересны работы Лвингера^{/63/}, Савады^{/64/}, Барута^{/65/}, Фрайбергера^{/66/} и многих других. Заметим также, что один из авторов настоящей статьи^{/67/} обратил внимание на простое соотношение, связывающее магнитный момент электрона μ и магнитный заряд Дирака g , которое оставалось незамеченным до сих пор: $\mu = eh/2mc = e/2\alpha \cdot r_e = g \cdot r_e$, где r_e - классический радиус электрона. Если выразить также и электрический заряд через магнитный $e = g \cdot 2\alpha$, то получается, что две основные характеристики элементарной частицы (μ, e) оказываются непосредственно связанными с магнитным зарядом. Не указывает ли это неявно на то, что магнитный заряд должен быть величиной, характеризующей не саму частицу, а скорее, составные части ее внутренней структуры?

В заключение этого короткого исторического обзора авторы хотят выразить надежду, что при том интересе, который наблюдается в последнее время, проблема магнитного заряда найдет скоро свое окончательное разрешение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ružička J., Zrelov V.P. Fifty Years of Dirac Monopole: Complete Bibliography (1786 references with abstracts), JINR, 61-2-80-850, Dubna, 1981.
2. Heaviside O. In: Electrical Papers, Macmillan and Co.Ed., London and New York, vol.1,11, 1892.
3. Curie P. Seances Soc.Phys., Paris, 1894, pp.76-77.
4. Carrigan R.A., Jr., Nezrick F.A., National Accel.Lab., NAL-44, Batavia, Illinois, 1970.
5. Carrigan R.A., Jr., Nezrick F.A., Strauss B.P. National Accelerator Lab., NAL-Pub-73/51, Batavia, Illinois, 1973.

6. Dirac P.A.M. Proc.Roy.Soc., London, 1931, Ser.A., vol.133, p.60.
7. Dirac P.A.M. Phys.Rev., 1948, vol.74, p.817.
8. Malkus W.V.R. Phys.Rev., 1951, vol.83, pp.899-905.
9. Bradner H., Isbell W.M. Phys.Rev., 1959, vol.114, pp.603-604.
10. Price P.B. et al. Phys.Rev.Lett., 1975, vol.35, No.8, pp.487-490.
11. Yerlykin A.D., Yakovlev V.I. Zh.Eksp. i Teor. Fiz. (Russ.), 1969, vol.56, No.6, pp.1849-1850.
12. Fleischer R.L., Price P.B., Woods R.T. Phys.Rev., 1969, vol.184, pp.1398-1401.
13. Bartlett D.F., Soo D., White M.G. Phys.Rev., 1978, vol.D18, No.7, pp.2253-2261.
14. Green P.J., Tompkins D.R., Williams R.E. Bull.Am.Phys.Soc., 1967, ser.11, vol.12, No.2, p.190.
15. Fleischer R.L. et al. Phys.Rev., 1969, vol.184, p.1393.
16. Fleischer R.L. et al. Phys.Rev., 1969, vol.177, No.5, p.2029.
17. Petukhov V.A., Yakimenko M.N. Nucl.Phys., 1963, vol.49, p.87.
18. Ofgonsuren O. et al. Astrophys.J., 1976, vol.210, No.1, pp.258-266.
19. Alvarez L.W. et al. Science, 1970, vol.167, No.3918, p.701.
20. Eberhard P.H. et al. Phys.Rev., 1971, vol.D4, No.11, pp.3260-3272.
21. Ross R.R. et al. Phys.Rev., 1973, vol.D8, No.3, pp.698-702.
22. Fitz H.C. et al. Phys.Rev., 1958, vol.111, p.1406.
23. Cavithers W.C., Stefanski R., Adair R.K. Phys.Rev., 1966, vol.149, p.1070.
24. Fleischer R.L. et al. Phys.Rev., 1971, vol.D4, No.1, pp.24-27.
25. Karlsson L. Nucl.Instr.& Meth., 1974, vol.116, pp.275-281.
26. Carrigan R.A., Jr., Nezirick F.A., Strauss B.P. FERMILAB-Pub-75/83-Exp, Batavia, 1975.
27. Goto E., Kolm H.H., Ford K.W. Phys.Rev., 1963, vol.132, pp.387-396.
28. Hague M.B. J.Nat.Sci.Math., 1966, vol.6, p.41.
29. Kolm H.H. Science J., 1968, vol.4, No.9, pp.60-66.
30. Cabrera B. In: Low Temperature Physics, M.Krusins and M.Vurio Eds., North-Holland, 1975, vol.IV, pp.270-273.
31. Kolm H.H. Phys.Today, 1967, vol.20, No.10, p.69.
32. Fleischer R.L. et al. Radiat.Eff., 1970, vol.3, No.1-2, pp.137-138.

33. Kolm N.N. et al. *J.of Appl.Phys.*, 1970, vol.41, p.958.
34. Carrigan R.A., Jr., Nezrick F.A. *Phys.Rev.*, 1971, vol.D3, p.56.
35. Kolm H.H., Villa F., Odian A. *Phys.Rev.*, 1971, vol.D4, No.5, pp.1285-1296.
36. Eberhard P.H. et al. *Phys.Rev.*, 1975, vol.D11, No.11, p.3099-3104.
37. Burke D.L. et al. *Phys.Lett.*, 1975, vol.B60, p.113.
38. Amaldi E. et al. *Proc. Aix-en-Provence Conf.*, 1961, p.155.
39. Fidecaro M., Finocchiaro G., Giacomelli G. *Nuovo Cim.*, 1961, vol.22, p.657.
40. Amaldi E. et al. *Nuovo Cim.*, 1963, vol.28, No.4, pp.773-793.
41. Zrelov V.P. et al. *JINR*, P1-7996, Dubna, 1974.
42. Gurevich I.I. et al. *Phys.Lett.*, 1970, vol.31B, No.6, pp.394-396.
43. Carrigan R.A., Jr., Nezrick F.A., Strauss B.P. *Phys.Rev.*, 1973, vol.D8, No.11, pp.3717-3720.
44. Carrigan R.A., Jr., Nezrick F.A., Strauss B.P. *Phys.Rev.*, 1974, vol.D10, No.11, pp.3867-3868.
45. Stevens D.M. et al. *Phys.Rev.*, 1976, vol.D14, No.9, pp.2207-2218.
46. Yuan L.C.L. et al. *CERN-ISRC 170-19*, Geneva, 1970.
47. Yuan L.C.L. et al. In: *AIP Conf.Proc.*, *Experiments on High Energy Particle Collisions-1973*, R.S.Penvini Ed., 1973, pp.194-198.
48. Giacomelli G. et al. *Nuovo Cim.*, 1975, vol.28A, No.1, pp.21-28.
49. Carrigan R.A., Jr., Strauss B.P., Giacomelli G. *Phys.Rev.*, 1978, vol.D17, No.7, pp.1754-1757.
50. Hoffmann H. et al. *Lett.Nuovo Cim.*, 1978, vol.23, Ser.2, No.10, pp.357-360.
51. Vant-Hull L.L. *Phys.Rev.*, 1968, vol.173, pp.1412-1413.
52. Biza Yu.S., Tomil'chik L.M. *Vestsi Akad. Nauk Bel.SSR, Ser.Fiz.-mat.nauk*, 1975, vol.2, pp.110-113.
53. Broderick J.J. et al. *Phys.Rev.*, 1979, vol.19, No.4, pp.1048-1050.
54. Carrigan R.A., Jr., Nezrick F.A. *Nucl.Phys.*, 1975, vol.891, No.2, pp.279-288.
55. Blagov M.I. et al. *XV-th Int.Conf.on High Energy Phys.*, Kiev 1970, vol.1, p.314.
56. Bartlett D.F., Lahona M.D. *Phys.Rev.*, 1972, vol.D6, pp.1817-1823.
57. Dirac P.A.M. *Fundamental Interactions in Physics*, CTS Bulletin VI-6, Center for Theoretical Studies University of Miami, Coral Gables, Florida, 1973, pp.1-17.

58. Price P.B. In: New Pathways in High Energy Physics. Proc. of Orbis Scientiae held by the Center for Theoretical Studies, Univ. of Miami, Ed. A.Perlmutter, New York, 1976, vol.1, pp.167-214.
59. Vonsovski S.V. In: Magnetism of Microparticles. "Nauka", Moscow, 1973, pp.182-208.
60. Barbiellini G. et al. Deutsches Elektronen-Synchrotron, DESY, 8/42, Hamburg, 1980.
61. Prokoshkin Yu.D. et al. IHEP, 80-3, Serpukhov, 1980.
62. Aubert B. et al. Experiment UA3, SPSC/78-15, SPSC/P96 (pp-coll.).
63. Schwinger J. Science, 1969, vol.165, No.3895, pp.757-764.
64. Sawada T. Prog.Theor.Phys., 1980, vol.63, No.6, pp.2016-2031.
65. Barut A.O. In: Topics in Modern Physics. Attribute to F.U.Condon, ed. by W.E.Brittin and Halis Odabasi, Univ. of Colorado, Boulder, Colorado, 1971, pp.15-45.
66. Fryberger D. Stanford Accelerator Center, SLAC-PUB-2497, Stanford, California, 1980.
67. Ružička J. JINR, P2-11338, Dubna, 1978.
68. Purcell E.M. et al. Phys.Rev., 1963, vol.129, No.5, p.2326.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 октября 1981 года.