

Б.25

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
Учёный совет Института ядерной физики

Л.М.Барков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ  
ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

01.040 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации, пред-  
ставленной на соискание учёной  
степени доктора физико-матема-  
тических наук

Новосибирск

1972

✓+



Работа выполнена в Институте ядерной физики Сибирского  
отделения АН СССР

Официальные оппоненты:

Член-корреспондент АН СССР ДЖЕЛЕПОВ Венедикт Петрович.  
Член-корреспондент АН СССР СИДОРОВ Вениамин Александрович.  
Член-корреспондент АН СССР НАУМОВ Алексей Александрович.  
Ведущая организация Московский инженерно-физический институт  
(МИФИ, г. Москва).

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " апреля 1972 г.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1972 г.  
на заседании Совета Института ядерной физики Сибирского отде-  
ления АН СССР.

Адрес: г.Новосибирск-80, Академгородок, Институт  
ядерной физики, конференцзал.

С диссертацией можно ознакомиться в ГПНТБ.  
Адрес: Новосибирск, Академгородок, Вычислительный центр.

Учёный секретарь Совета  
доктор физ.-мат.наук

Б.В.ЧИРИКОВ

Работа посвящена использованию сильных магнитных полей  
для изучения свойств элементарных частиц - измерению магнитных  
моментов гиперонов и поискам магнитного монополя Дирака.

В первой главе показаны преимущества и возможности ис-  
пользования импульсных магнитных полей напряженностью  $\approx 200$  кГс  
для измерения магнитных моментов  $\Lambda$ - и  $\Sigma^+$ -гиперонов и для по-  
иска магнитного монополя. Приведены известные и предполагаемые  
свойства этих частиц и результаты проделанных экспериментов.

В настоящее время сделано 7 экспериментальных работ по  
измерению магнитного момента  $\Lambda$ -гиперона, 6 работ по измерению  
магнитного момента  $\Sigma^+$ -гиперона и одна по измерению магнитного  
момента  $\Xi^-$ -гиперона. Во всех работах измерялся угол прецессии  
в магнитном поле спина гиперонов, поляризованных в акте рожде-  
ния, а направление спина в месте распада находилось по асиммет-  
рии вылета продуктов распада гиперона, возникающей из-за не-  
сохранения четности при распаде. Величина магнитного момента  
 $\Xi^-$ -гиперона измерена с плохой точностью  $M_{\Xi^-} = -0,1 \pm 2,1$  я.м.,  
а среднемировые значения магнитных моментов  $\Lambda$ - и  $\Sigma^+$ -гиперо-  
нов  $M_{\Lambda} = -0,67 \pm 0,06$  я.м. и  $M_{\Sigma^+} = 2,59 \pm 0,46$  я.м. не противоречат  
предсказаниям теории унитарной симметрии и уже сейчас помога-  
ют сделать выбор между некоторыми вариантами теоретических  
моделей, учитывающими нарушения унитарной симметрии и пред-  
сказывающими целый спектр значений магнитных моментов гиперо-  
нов от 0 до  $-1,59$  я.м. для  $\Lambda$ -гиперона и от  $1,48$  до  $3,6$  я.м. для  
 $\Sigma^+$ -гиперона. Следует отметить работу по измерению магнитного  
момента  $\Lambda$ -гиперона, выполненную в ЦЕРН'е и опубликованную в  
1971 г., определившую высокую точность среднемирового значе-  
ния  $M_{\Lambda}$ .

Приведенный обзор ожидаемых свойств магнитного монопо-  
ля и имеющихся экспериментальных данных по его поискам пока-  
зывает, что его масса, по-видимому, велика, а сечение рождения  
мало, так что для его обнаружения следует применять методы ре-  
гистрации, позволяющие измерять очень малые сечения. Таким свой-  
ством обладает метод накопления в ферромагнитных ловушках с  
последующим извлечением из них монополей с помощью сильных  
импульсных полей и метод регистрации следов монополей с помо-  
щью твердотельных трековых детекторов. В первом методе ис-  
пользуется свойство магнитных монополей притягиваться к поверх-  
ности ферромагнетика благодаря индуцированию в нем намагничен-  
ности. Использование второго метода оказывается эффективным



для поисков монополей в тех случаях, когда мал фон частиц с большой удельной ионизацией, сравнимой с ионизационными потерями магнитного монополя, составляющими примерно  $8 \text{ Гэв} \cdot \text{см}^2/\text{г}$ , что в  $\sim 5$  тысяч раз превышает потери релятивистского протона. Из-за тяжелых фоновых условий в эксперименте на Серпуховском ускорителе использовался метод ферромагнитных ловушек.

Во второй главе рассмотрена постановка и результаты эксперимента по измерению магнитного момента  $\Lambda$ -гиперона /1,2/, выполненного на 7 Гэв'ном протонном синхротроне ИТЭФ. В этом эксперименте измерялся угол прецессии в магнитном поле спина  $\Lambda$ -гиперонов, рождавшихся на водороде в полиэтиленовой мишени под действием отрицательных пионов с импульсом  $1,07 \text{ Гэв}/\text{с}$ . При выбранном импульсе пионов поляризации и сечения рождения  $\Lambda$ -гиперонов максимальны.

На рис.1, показана использовавшаяся в этих опытах катушка импульсного магнитного поля напряженностью  $220 \text{ кГс}$  и объемом  $\sim 0,6$  литра с расположенными в ней полиэтиленовой мишенью и импульсной камерой, изготовленной из стопки 400 мкм эмульсионных слоев высокочувствительной эмульсии типа Бр2. Магнитное импульсное поле в катушке по форме близкое к полупериоду синусоиды с длительностью  $8,7 \text{ мсек}$  по основанию получалось путем разряда конденсаторной батареи. Такая постановка эксперимента отличается большой светосилой из-за использования  $2\pi$ -геометрии и при данной конструкции эмульсионной камеры позволяет исключить ошибку, связанную с зависимостью эффективности поиска от ориентации вилки  $\Lambda$ -распада в эмульсионном слое при условии равномерного просмотра эмульсионной камеры. Для этой работы был создан канал пучка отрицательных пионов, позволяющий получать в месте расположения полиэтиленовой мишени пучок пионов с угловой расходимостью  $< 3^\circ$  и размерами по вертикали и горизонтали равными  $8,5 \text{ мм}$ . Использование тяжелой мишени, сконструированной для этих экспериментов, позволило получить короткий ( $\sim 0,6 \text{ мсек}$ ) сброс и хорошо синхронизовать момент прохождения пионов через полиэтиленовую мишень с максимумом магнитного поля, обеспечив временную неоднородность  $\pm 1,5\%$ .

В эксперименте использовались катушки /3-7/ импульсного магнитного поля, изготовленные в виде однослойной спирали изотлитых под вакуумом заготовок из бериллиевой бронзы. Отвод тепла от катушки производился с помощью припаянных по внешнему

диаметру витков медных трубок, охлаждаемых водой. Расчеты распределения магнитного поля и плотности токов в теле катушки позволили найти механические напряжения, возникающие в катушке под действием магнитного поля и тепловыделение и распределение температур при разных условиях охлаждения и работы катушек. Было получено, что дополнительные механические напряжения из-за неравномерного распределения температуры в витке катушки по радиусу при выбранном варианте охлаждения значительно уменьшают напряжения от сил магнитного давления, максимальных на внутренней поверхности соленоида. Для электропитания катушки использовалась установка /8/, состоящая из конденсаторной батареи емкостью  $0,15 \text{ ф}$ , собранная из тысячи конденсаторов ИМ 5/150, зарядного устройства в виде трехфазного выпрямителя, выполненного на тиратронах ТР1-40/15, и разрядного устройства на игнитронах ИВС-100/15, работающих в форсированном импульсном режиме. Установка позволяет коммутировать токи до  $200 \text{ кА}$  и иметь при напряжении на батарее конденсаторов  $4,5 \text{ кВ}$  запас энергии  $1,5 \text{ МДж}$ . За время эксперимента было проведено облучение четырех эмульсионных камер, причём в каждом облучении через полиэтиленовую мишень было пропущено  $\sim 10^7$  пионов. При обработке экспериментального материала прежде всего проводился поиск вилок  $\Lambda$ -распадов на  $\pi^- + p$  путем просмотра эмульсионных слоев под микроскопом по площади. Затем по плотности ионизации определялись энергия и импульс пиона и протона и вычислялось энерговыделение в предполагаемом распаде

$$Q = M_\Lambda - m_p - m_{\pi^-}$$

где

$$M_\Lambda = \sqrt{(E_p + E_{\pi^-})^2 - (\vec{p}_p + \vec{p}_{\pi^-})^2}$$

Отбор вилок соответствующих распаду  $\Lambda$ -гиперонов, родившихся в реакции



соответствовал выполнению трех критериев отбора:

- 1) траектория  $\Lambda$ -гиперона должна проходить через полиэтиленовую мишень,
- 2) величина  $\chi^2 = (Q - 37,8 \text{ Мэв})^2 / \sigma_Q^2$  должна быть меньше 8,
- 3) разница между квадратом недостающей массы в реакции (1) и



табличным значением квадрата массы каона должна быть меньше  $0,16 \text{ Гэв}^2$ .

При просмотре примерно 75% эмульсионной камеры по широкому критерию было отобрано 350 двухлучевых вилок, из них 89 событий дали траектории  $\Lambda$ -гиперона пересекающего мишень, из них 52 события дали  $\chi^2 < 9$ , а 49 удовлетворяли всем критериям. По этим 49 событиям методом максимального правдоподобия для функции

$$L(M, \alpha P) = \prod_i \frac{(1 + \alpha P \cos \theta_i)}{2}$$

определялся магнитный момент  $\Lambda$ -гиперона.

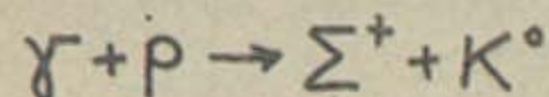
В выражении для функции максимального правдоподобия  $\theta_i$  соответствует углу в системе центра масс  $\Lambda$ -гиперона между направлением пиона распада и вектором поляризации, вычисленном в предположении, что вектор поляризации в месте рождения гиперона направлен по вектору  $[\vec{P}_{\text{пучка}} \times \vec{P}_{\Lambda}]$ , а магнитный момент  $\Lambda$ -гиперона равен  $M$ . Из рис.2, где приведен логарифм функции максимального правдоподобия следует, что

$$M_{\Lambda} = -0,67 \text{ я.м.} \quad \text{и} \quad \alpha P = 0,55 \pm$$

+0,31	0,23
-0,37	0,34

на уровне 68% доверительного интервала. Полная обработка облученного материала даёт возможность примерно вдвое уменьшить ошибку в определении магнитного момента  $\Lambda$ -гиперона.

В третьей главе рассмотрены возможности проведения эксперимента по прецизионному измерению магнитного момента  $\Sigma^+$ -гиперона в Институте ядерной физики СО АН СССР совместно с ИАЭ им.И.В.Курчатова на ускорителе ВЭПП-3, используемом в качестве накопителя электронов /8/. Пучок электронов с энергией  $1,35 \text{ Гэв}$  и интенсивностью  $10^{11} - 10^{12}$ , сформированный в виде хорошо локализованного сгустка, выводится из ускорителя и, попадая на конвертор, превращается в узконаправленный пучок  $\gamma$ -квантов тормозного излучения. Очищенный от электронов с помощью вспомогательного магнитного поля пучок попадает на водородную мишень, находящуюся в мегагауссном магните. Рождающиеся в реакции



поляризованные гипероны проходят в перпендикулярном их импульсу магнитном поле расстояние от мишени до фотоэмульсионного детектора, в котором по угловому распределению протонов распада  $\Sigma^+$ -гиперона определяется угол поворота спина, а отсюда и величина магнитного момента. Высокую в несколько процентов точность измерения магнитного момента  $\Sigma^+$ -гиперона ожидается получить за счет использования импульсных магнитных мегагауссных полей в магнитах одноразового действия. Для получения мегагауссных полей создана установка со взрывомагнитным генератором, предназначенная для получения мегагауссных полей в одновитковых магнитах. На рис.3 приведена конструкция взрывомагнитного генератора.

В четвертой главе описаны постановка и результаты эксперимента по поиску магнитного монополя, выполненного на протонном  $70 \text{ Гэв}$ -ном синхротроне ИФВЭ /10-12/. В этом эксперименте использовался метод ферромагнитных ловушек, которые располагались, как это показано на рис.4, в зазоре между вакуумной камерой ускорителя и полюсами магнита вдоль оси пучка так, что первый образец находился непосредственно под мишенью. Общая длина дорожки из ферромагнитных фольг, покрытых вольфрамовыми и свинцовыми пластинами общей толщиной 3 мм и служащих для торможения рожденных в мишени монополей, выбрана таким образом, чтобы захватить все монополи с массой  $m_B \geq m_p$  и  $g \geq 68,5e$ , отклоненные  $12 \text{ кГс}$  магнитным полем ускорителя в сторону фольг. Подробный анализ поведения магнитных зарядов в ферромагнетиках показал, что использование в эксперименте ферромагнитные фольги являются эффективными ловушками для монополей Дирака даже в присутствии  $12 \text{ кГс}$  внешнего магнитного поля ускорителя.

Всего было проведено четыре серии облучения образцов на ускорителе, причем для увеличения светосилы опыта образцы ставились одновременно под несколько используемых для других экспериментов мишеней ускорителя и облучались в течение нескольких месяцев. В первом облучении в качестве ловушек для монополей использовались пермендюрные фольги, а в последующих облучениях сэндвичи из фольг пермаллоя 50Н, пермаллоя 79НМ и пермендюра.

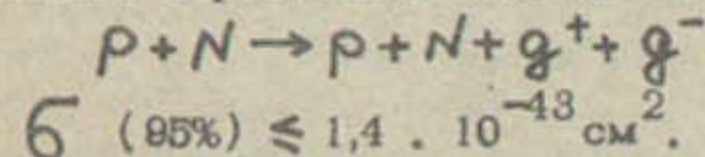
После облучения на ускорителе ферромагнитные фольги первых двух серий облучения помещались в центр импульсного  $220 \text{ кГс}$



магнита с целью извлечения магнитных монополей и регистрации их следов в фотоэмульсионном детекторе, состоящем из двух пар слоев 400 мкм высокочувствительной ядерной фотоэмульсии типа Бр2 с нанесенной на них координатной сеткой и расположенных с обеих сторон от ферромагнитных образцов (рис.5). При извлечении монополей из фольг третьей серии облучения непосредственно за поперечными слоями располагалась эмульсионная камера для возможности более подробного изучения следов сильноионизирующих частиц, если бы они были зарегистрированы в поперечных слоях детектора. В опытах четвертой серии облучения использовался 300 кГс импульсный магнит с несимметричным расположением образцов и детектора.

Для извлечения магнитных монополей из примененных ферромагнитных фольг доста точно приложить поле напряженностью 50 кГс, однако, учитывая возможность аномального взаимодействия монополей с веществом, ферромагнитные фольги первой и второй серии облучения подвергались дополнительному воздействию импульсного магнитного поля напряженностью  $\sim 800$  кГс. Ферромагнитные фольги помещались в виде стопок  $40 \times 20 \times 6,5$  мм<sup>3</sup> в импульсный магнит одноразового действия, в котором поле получалось при разряде батареи конденсаторов с помощью механического разрядника.

При просмотре пар эмульсионных слоев, находившихся вместе только короткое (порядка нескольких минут) время извлечения монополей из образцов, не было найдено ни одного следа, пересекающего оба поперечных слоя и имеющего ионизацию, заметно превышающую ионизацию однократно заряженных релятивистских частиц. Отсюда в предположении полной прозрачности ядра мишени для падающих протонов получена следующая оценка верхнего предела сечения образования монополей в реакции



На рис.6 сравниваются результаты этой работы с последними наиболее точными результатами других авторов. Негативные результаты этого и других экспериментов показывают, что если магнитные монополи и существуют, то их масса не должна превышать  $6 m_p$ . Основные результаты диссертации, изложенные в работах (1 - 4) сводятся к следующему:

1. Предложен и рассчитан вариант эксперимента по измерению магнитного момента  $\Lambda$ -гиперона.

2. Рассчитаны и сконструированы катушки импульсного поля с рабочим объемом  $\sim 0,5$  литра, работающие при полях до 250 кГс.

3. Проведена подготовка эксперимента по измерению магнитного момента  $\Lambda$ -гиперона на ускорителе ИТЭФ и проведено облучение 4-х эмульсионных камер на 1,07 Гэв/с пучке отрицательных пионов в 220 кГс импульсном магните.

4. По материалу от просмотра 75% одной из 4-х облученных камер, определена величина магнитного момента  $\Lambda$ -гиперона

$$M_{\Lambda} = \{-0,67 \pm_{0,37}^{0,31}\} \mu. \text{м.}$$

5. Предложен, рассчитан и подготовлен вариант эксперимента по измерению магнитного момента  $\Sigma^+$ -гиперона на ускорителе ВЭПП-3, использующий взрывомагнитный генератор для получения мегагауссовых полей.

6. Предложен и рассчитан вариант эксперимента на 70 Гэв синхротроне ИФВЭ по поиску монополя Дирака.

7. Выполнен эксперимент по поиску монополя Дирака. Получена оценка верхнего предела сечения рождения монополя с массой 3-5  $m_p$  в нуклон-нуклонных столкновениях

$$\sigma (95\%) \leq 1,4 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2,$$

которая в настоящее время является самой низкой по сравнению с другими экспериментами.



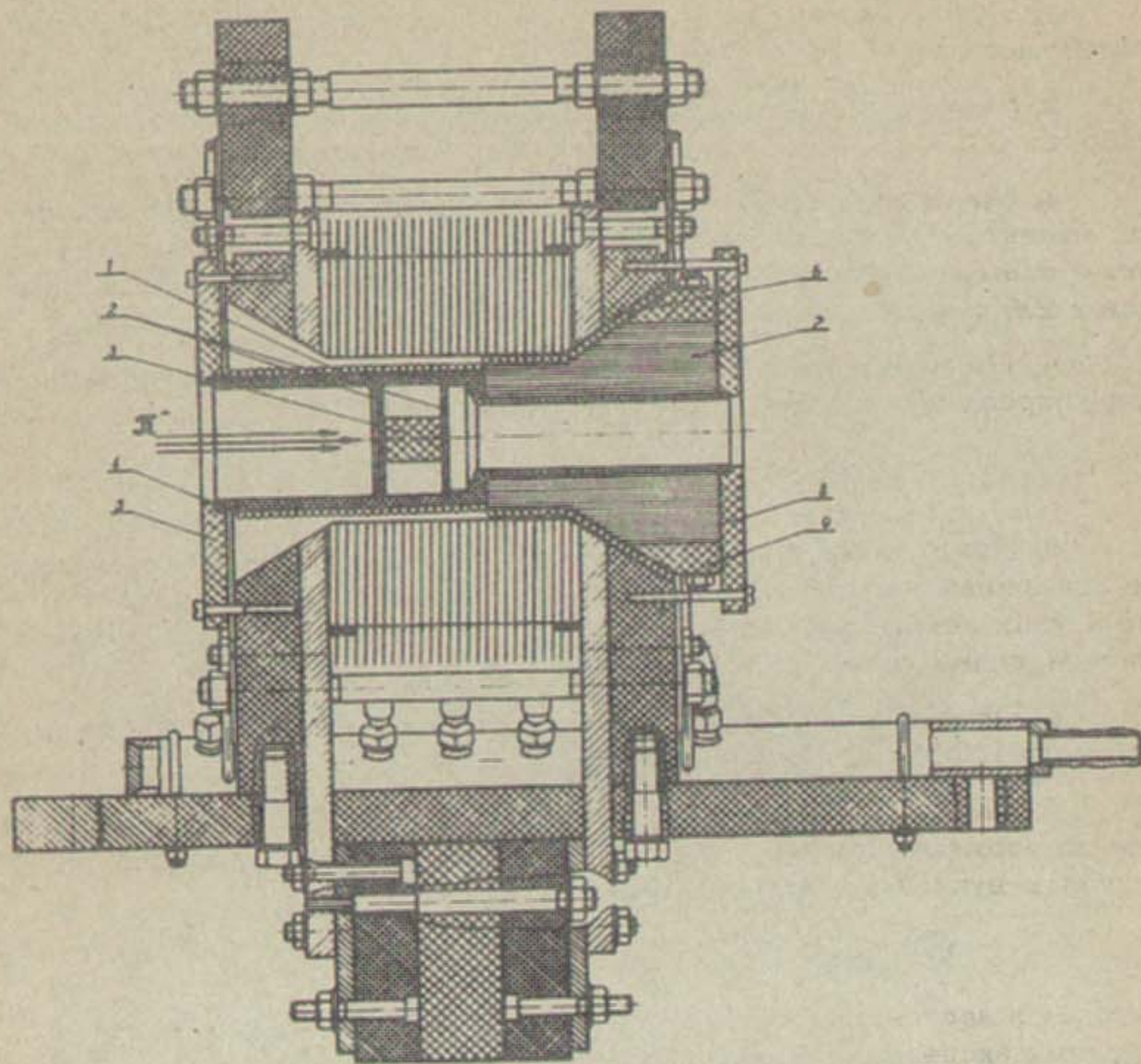


Рис.1. Расположение эмульсионной камеры и мишени в импульсном магните. 1,2 - крепление мишени; 3 - полиэтиленовая мишень; 4 - центрирующая труба; 5,8 - фланцы; 7 - эмульсионная камера; 8 - щетки, стягивающие эмульсионную стопку.

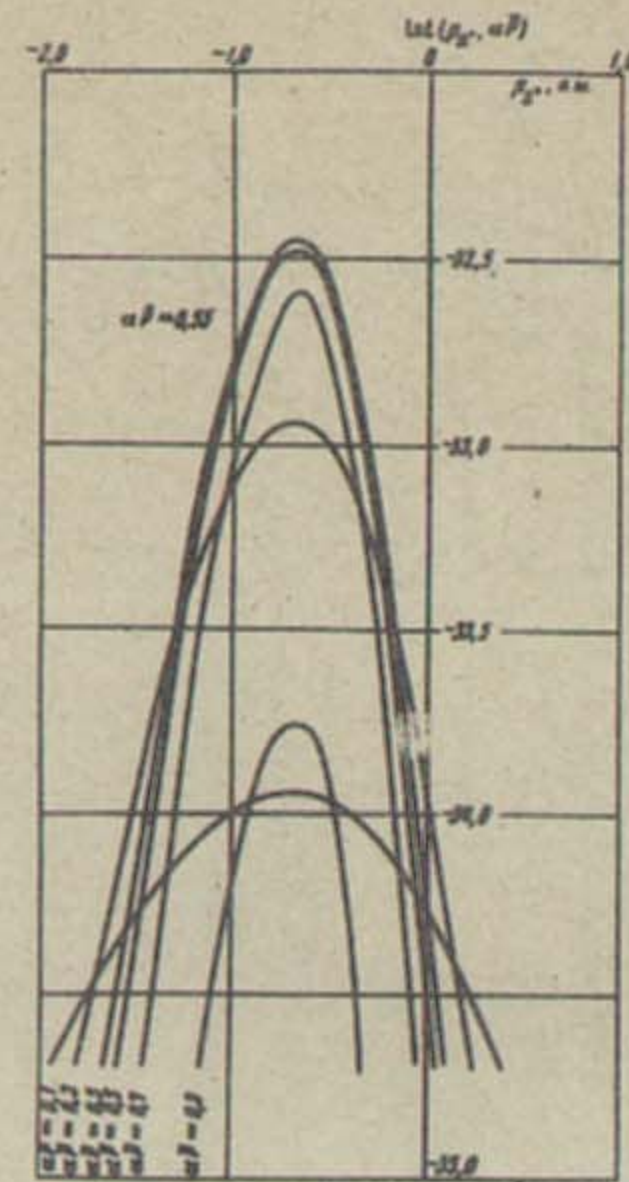


Рис.2. Логарифм функции максимального правдоподобия.



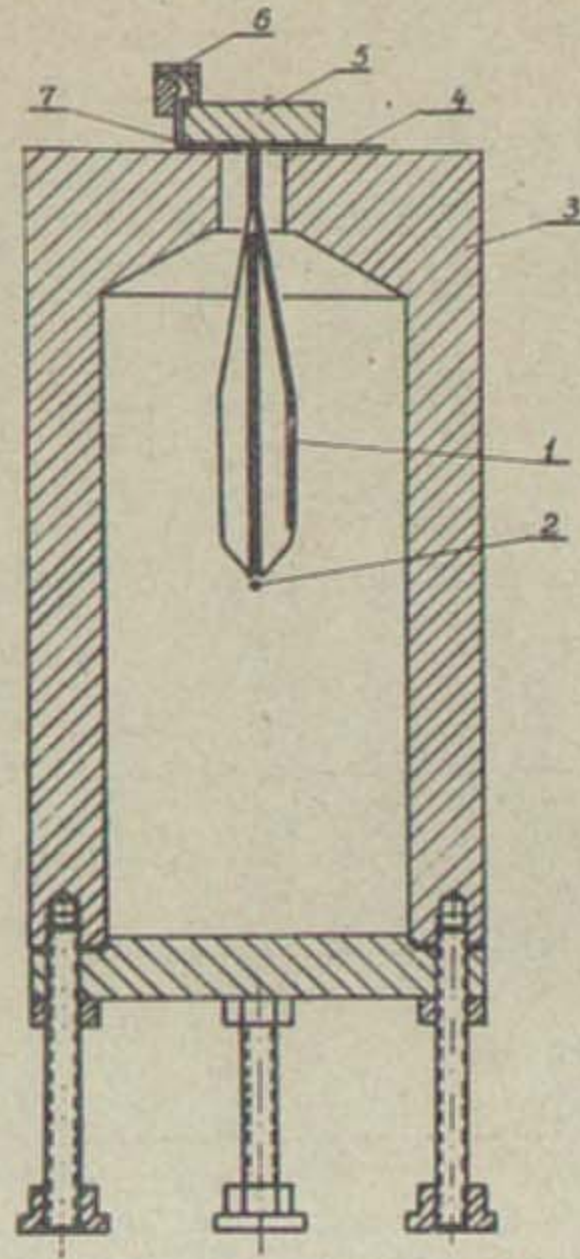


Рис. 3. Конструкция взрывомагнитного генератора.  
 1 - взрывомагнитный генератор, 2 - детонатор,  
 3 - корпус взрывной камеры, 4 - подвод запи-  
 точного тока к генератору, 5 - крышка взрывной  
 камеры, 6 - импульсный магнит, 7 - подвод тока  
 к импульсному магниту.

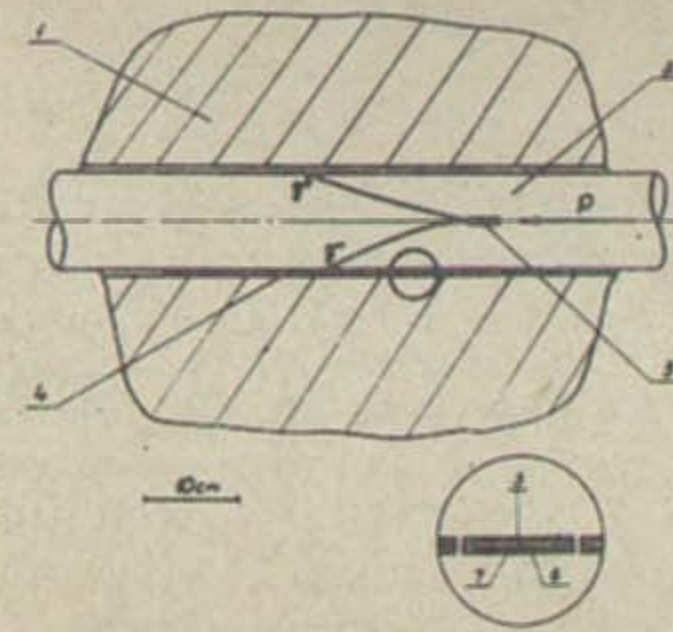


Рис. 4. Схема опыта на 70 ГэВ'ном протонном  
 синхротроне. 1-магнит ускорителя, 2-ва-  
 куумная камера ускорителя, 3-алюминие-  
 вая мишень, 4-образцы из вольфрамовых  
 пластин и ферромагнитных ловушек, 5-воль-  
 фрамовая пластинка, 6-ферромагнитная ло-  
 вушка, 7-полетиленовая пленка.

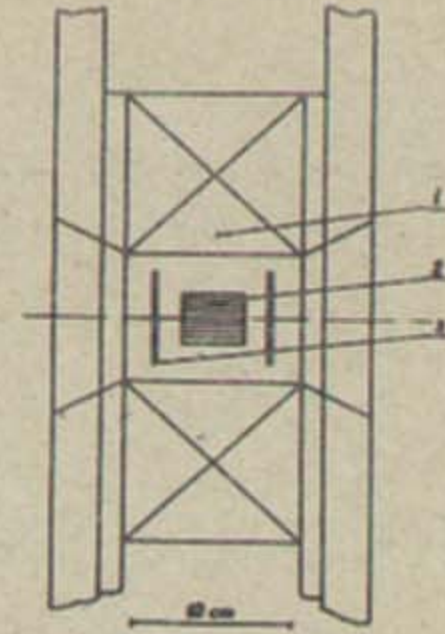


Рис. 5. Схема детектирования мо-  
 нополей.  
 1-импульсный магнит,  
 2-пакет образцов, 3-слой  
 ядерной фотомульсии.



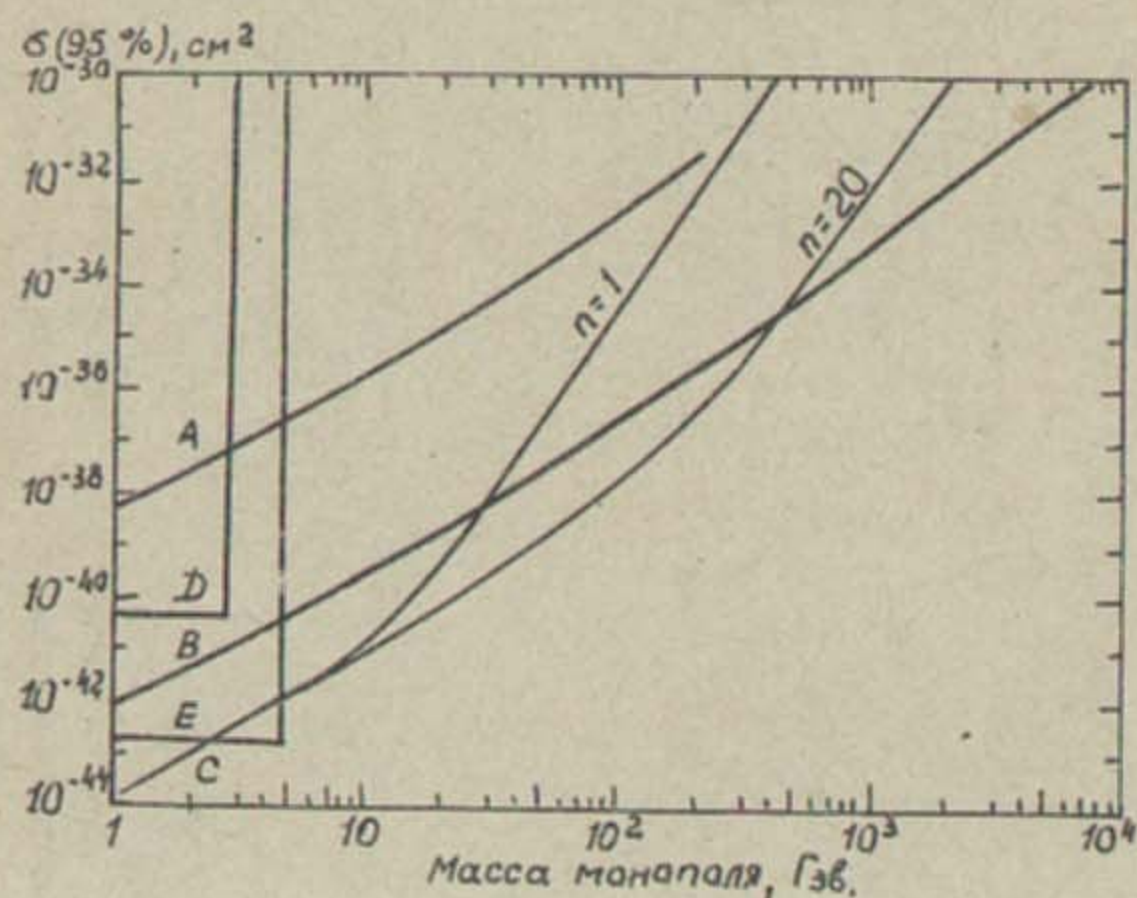


Рис.6. Зависимость верхних пределов сечения рождения монополей в нуклон-нуклонных взаимодействиях от массы.  
 А - поиск монополя в атмосфере Земли, В-поиск монополя в магнитных минералах Океана, С- поиск монополя в лунном веществе, Д -эксперименты на 30Гэв ускорителях, Е - результаты данной работы.

## Л и т е р а т у р а

1. I.I.Gurevich, S.Kh.Khakimov, L.A.Makarjina, V.P.Martemianov, A.P.Mishakova, V.V.Ogurtzov, L.V.Surkova, V.G.Tarasenkov, L.A.Chernyshova, S.A.Chyeva, L.M.Barkov, XV Intern. Conf. on High En. Phys., Kiev, 1970.
2. Л.М.Барков, И.И.Гуревич, Л.А.Макарьина, В.П.Мартемьянов, А.П.Мишакова, В.В.Огурцов, Л.В.Суркова, В.Г.Тарасенков, С.Х.Хакимов, Л.А.Чернышева, С.А.Чуева. Письма ЖЭТФ, 14, 93, 1971.
3. Л.М.Барков, В.В.Огурцов, С.Х.Хакимов. Межд.Конф. по Физ.Выс.Энергий, Дубна, p.473, 1964.
4. В.В.Ахманов, Л.М.Барков, Р.С.Бобовников, Ю.П.Добрецов, Б.И.Замолотчиков, Б.А.Никольский, Б.В.Соколов, С.Х.Хакимов, В.Д.Шестаков. ПТЭ, 4, 182, 1965.
5. Л.М.Барков, В.В.Огурцов, С.Х.Хакимов. Препринт ИАЭ-744, 1965.
6. Л.М.Барков, В.В.Огурцов, С.Х.Хакимов. ПТЭ, 2, 137, 1966.
7. L.M.Barkov, S.Kh.Khakimov, V.V.Ogurtzov. Les champs magnetiques intenses, Grenoble, p.409, 1966.



8. Л.М.Барков, В.П.Мартемьянов, В.В.Огурцов,  
В.Г.Тарасенков, С.Х.Хакимов. ПТЭ, 4, 182, 1965.
9. Л.М.Барков, М.С.Золотарев, В.С.Охалкин. Межд.  
Конф. по Аппаратуре в Физ.Выс.Энергий, Дубна,  
1970, стр.603.
10. I.I.Gurevich, S.Kh.Khakimov, V.P.Martemianov,  
A.P.Mishakova, V.V.Ogurtzov, V.G.Tarasenkov,  
L.M.Barkov, N.M.Tarakanov. Phys. Lett., 31B,  
394, 1970.
11. I.I.Gurevich, S.Kh.Khakimov, V.P.Martemianov,  
A.P.Mishakova, V.V.Ogurtzov, V.G.Tarasenkov,  
L.M.Barkov, N.M.Tarakanov. XV Intern. Conf.  
on High En. Phys., Kiev, 1970.
12. Л.М.Барков, И.И.Гуревич, М.С.Золотарев, Л.А.Ма-  
каркина, В.П.Мартемьянов, А.П.Мишакова, В.В.Огур-  
цов, В.С.Охалкин, Н.М.Тараканов, В.Г.Тарасенков,  
С.Х.Хакимов, Л.А.Чернышева. ЖЭТФ, 61, 1721, 1971.

---

Ответственный за выпуск Л.М.Барков  
Подписано к печати 30/Ш-72г., № МН 10218  
Усл. 0,7 печ.л., тираж 200 экз.  
Заказ № 24 . Бесплатно

---

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР, нв.