

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



26/8-

3-895

P1-7996

В.П.Зрелов, Л.Колларова, Д.Коллар, В.П.Лупильцев,
П.Павлович, Я.Ружичка, В.И.Сидорова,
М.Ф.Шабашов, Р.Яник

3338/2-74

ПОИСК МОНОПОЛЯ ДИРАКА
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА
НА ПРОТОННОМ СИНХРОТРОНЕ 70 ГЭВ ИФВЭ

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

Дисциплина Дирака 19702
автор: колл. - сборник статей
издана на русском языке, по инициативе
Физического института им. Л.Д.Ландау

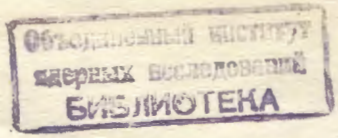
P1-7996

В.П.Зрелов, Л.Колларова,*Д.Коллар,* В.П.Лупилецев,
П.Павлович,* Я.Ружичка,* В.И.Сидорова,
М.Ф.Шабашов, Р.Яник*

ПОИСК МОНОПОЛЯ ДИРАКА
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА
НА ПРОТОННОМ СИНХРОТРОНЕ 70 ГЭВ ИФВЭ

Направлено в "ЯФ" и "Чехословацкий физический журнал"

* Кафедра ядерной физики Университета им. Я.А.Коменского, Братислава, ЧССР.



S U M M A R Y

At the proton energy of 70 GeV on the internal target of the IHEP proton synchrotron the search was made for magnetic charges over the Vavilov-Čerenkov radiation and characteristic polarization. Eight Čerenkov counters of a special construction served as detectors. Possible events were recorded with two fast five-ray oscillographs triggered by 6-fold coincidences. The efficiency of the magnetic charge recording was about 10%.

The proton beam of $6.4 \cdot 10^{16}$ intensity traversed the target-radiator; and not a single case of the production of the Dirac monopole with the magnetic charge from minimal one of about $2/3 g_D$ ($g_D = 68.5 e$) up to $2g_D$ was recorded. This means that in the conditions of our experiment the upper boundary of the cross section of the Dirac monopole production by 70 GeV protons per nucleon of Si and O nuclei for magnetic charges of masses from 3 up to $5 \cdot 5 m_p$ was found to be $\sigma(95\%) \lesssim 10^{-40} \text{cm}^2$.

1. Введение

Дирак ^{/1,2/} впервые указал на возможность существования в природе магнитного заряда и предсказал необычные его свойства: аномально большую величину,

$$g_D = \left(\frac{e^2}{\hbar c}\right)^{-1} e \frac{n}{2} \quad (g_D = 3,29 \cdot 10^{-8} \text{ эрстед.см}^2),$$

а также кратность элементарному электрическому заряду.

Многочисленные отрицательные результаты поисков гипотетических магнитных зарядов ^{/3,4,5,6,7/} и нетривиальные причины неудачных попыток их обнаружения ^{/8,9,10/}, а также важность фундаментальных теоретических предположений о роли магнитных зарядов в строении материи ^{/11,12,13,14,15/}, побуждают экспериментаторов искать магнитные заряды все более разнообразной методикой.

Основная идея настоящего эксперимента и его предварительные результаты изложены в работе ^{/16/}. Здесь приводятся подробные сведения по методике опыта и окончательные результаты.

2. Методика поиска магнитных зарядов по излучению Вавилова-Черенкова

При энергии налетающих протонов 70 ГэВ в реакции $p + N \rightarrow p' + N' + g + \bar{g}$ могут рождаться пары монополю-антимонополь (g, \bar{g}), каждая из компонент которой будет обладать скоростями, превышающими порог возникновения излучения Вавилова-Черенкова в среде с показателем преломления $n = 1,5$. На рис. 1 показан статистический импульсный спектр монополей с массами $m_g = 4m_p$, испущенных в лабора-

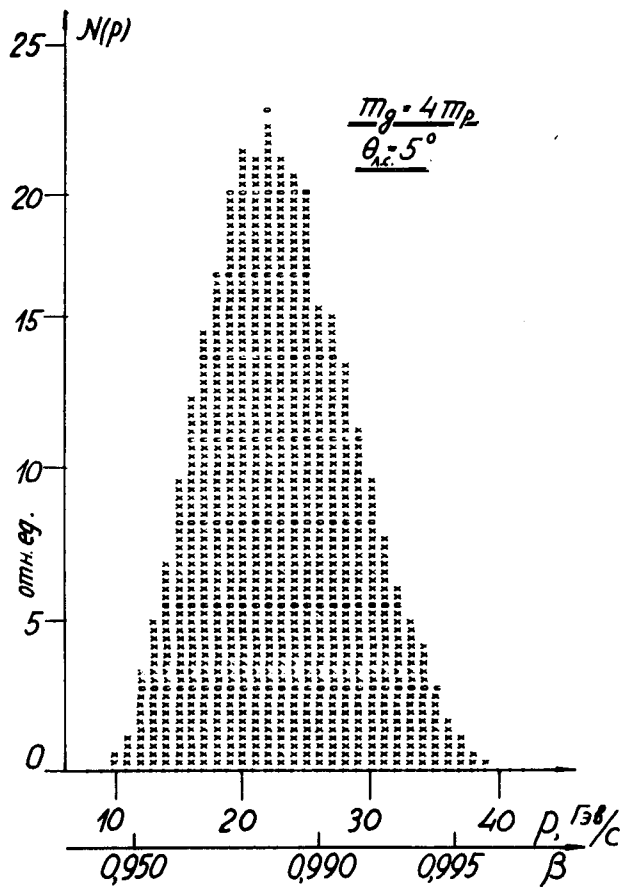


Рис. 1. Статистический спектр импульсов магнитных зарядов, возникающих в реакции $p + N \rightarrow p' + N' + g + \bar{g}$ при энергии 70 ГэВ, рассчитанный по методу Монте-Карло для масс монополей $m_g = 4m_p$, вылетающих под углом 5° в л.с. координат.

торной системе координат под углом 5° , рассчитанный без учета сильного взаимодействия между g и \bar{g} . Из этого рисунка видно, что средний импульс $\bar{p}_g(5^\circ) \approx 22$ ГэВ/с, а минимальный импульс спектра $p_{\min} \approx 10$ ГэВ/с. Для монополей с массами от $m_g = 2m_p$ и до предельной массы в нашем эксперименте $m_g = 5,5m_p$ все магнитные заряды будут обладать скоростями $\beta > 0,9$, что существ-

венно превышает порог возникновения излучения Вавилова-Черенкова для кварца $\beta_{\text{пор.}} = 0,68$.

Энергия излучения Вавилова-Черенкова от магнитного заряда g движущегося со скоростью β на единице пути, согласно работе Франка^{/17/} определяется формулой

$$\frac{dW^g}{dl} = \frac{n^2(\omega) g^2}{c^2} \int_{n(\omega)\beta > 1} \left(1 - \frac{1}{n^2(\omega)\beta^2}\right) \omega d\omega, \quad /1/$$

где $n(\omega)$ - показатель преломления среды, ω - круговая частота излучения.

Отношение энергий излучения от магнитного заряда (g) и электрического (e) при одинаковых их скоростях β определяется равенством $W^g/W^e = n^2(\omega) g^2/e^2$. Для монополя Дирака с зарядом $g = 68,5e$, движущимся в среде с $n(\omega) = 1,5$, $W^g \approx 10^4 W^e$.

Как было отмечено Франком^{/18/}, поляризации излучения Вавилова-Черенкова от магнитного и электрического зарядов различаются поворотом электрического вектора на 90° .

Ожидаемая от магнитного заряда большая вспышка излучения Вавилова-Черенкова с характерной поляризацией облегчает поиск магнитных зарядов на фоновом излучении от электрически заряженных частиц.

К одной из особенностей постановки данного опыта следует отнести также и то, что радиатор излучения Вавилова-Черенкова и мишень были совмещены. Это принципиально позволяло регистрировать монополи Дирака в момент их рождения, т.е. регистрировать не только стабильные магнитные заряды, но и нестабильные современем жизни $\tau_g \gg 3 \cdot 10^{-11}$ сек.

3. Крайное описание установки по поиску монополя Дирака /УПМД/

Установка по поиску монополя Дирака размещалась в 46-ом прямолинейном промежутке кольца протонного синхротрона 70 ГэВ ИФВЭ /рис. 2/. Общий вид УПМД

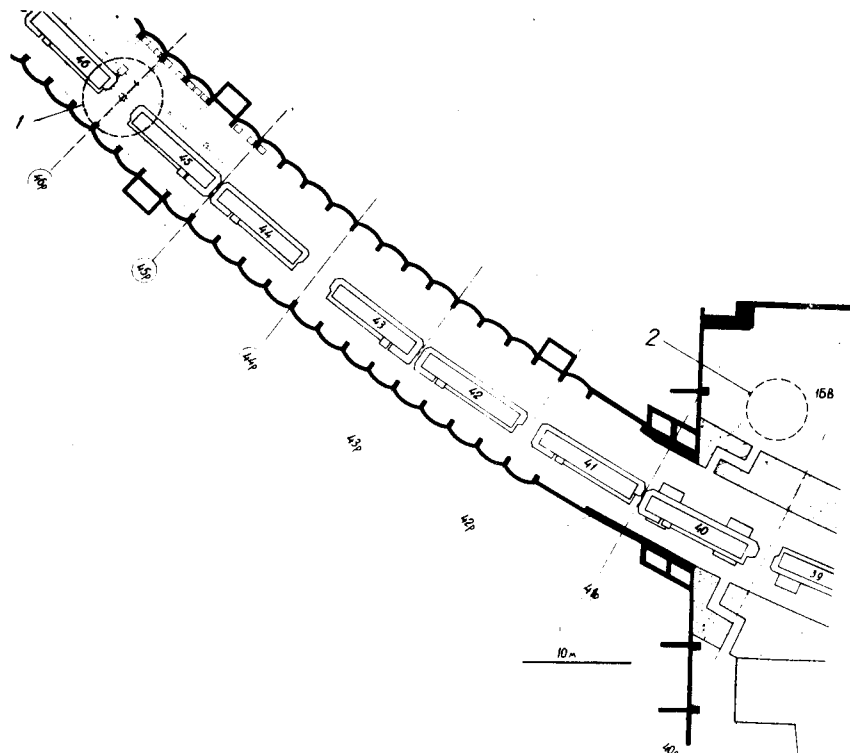


Рис. 2. Расположение УПМД в кольце ускорителя ИФВЭ /район 46-ой оси кольца ускорителя/: 1 - УПМД; 2 - место расположения аппаратуры.

показан на рис. 3 /вид против пучка протонов/. Основными элементами УПМД служили вакуумная камера, одновременно выполняющая роль вакуумной секции кольца ускорителя, и восемь одинаковых оптических устройств /которые могут быть условно названы счетчиками Черенкова/, расположенных по азимутальному углу ϕ через 18° с наружной стороны кольца ускорителя, как показано на рис. 3. В вакуумную камеру через специальный шлюз синхронно с циклом ускорения вводилась мишень-радиатор специальной формы /рис. 4/. Камера имела восемь прозрачных окон трапецидальной формы из плексигласа толщиной 15 мм для выпуска излучения, исходящего из мишени-радиатора. К каждому из 8 окон камеры

подсоединялся счетчик Черенкова, устройство которого показано на рис. 5.

Доля конуса излучения Вавилова-Черенкова, возникшего в мишени /1/ и попадающего в каждый счетчик Черенкова /1-8/, составляла по азимутальному углу $\Delta\phi = \pm 3,5^\circ$. На входе в каждый счетчик излучение фокусировалось линзой /3/ с $f = 150$ см и анализировалось

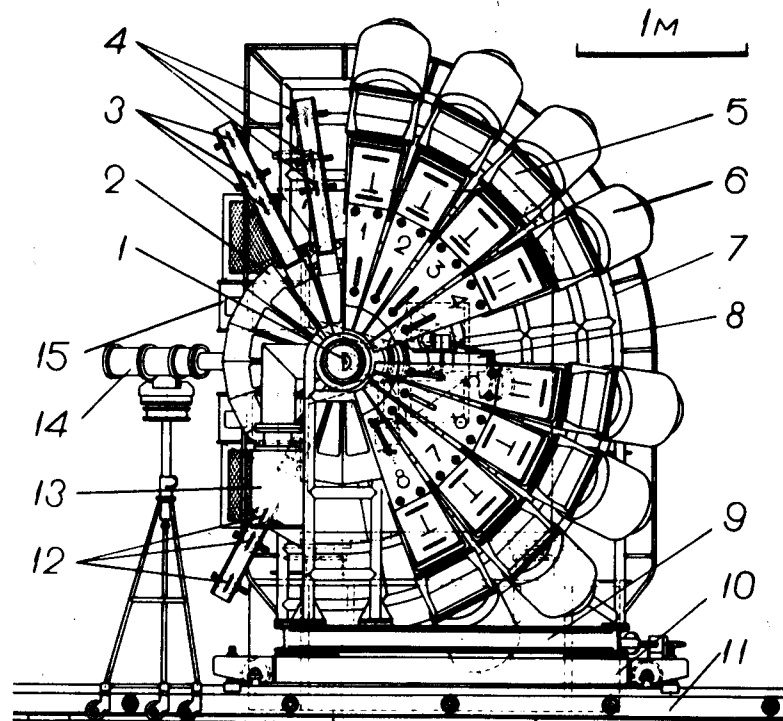


Рис. 3. Общий вид установки для поиска монополя Дирака по излучению Вавилова-Черенкова /вид против пучка протонов 70 ГэВ/: 1 - мишень-радиатор; 2 - вакуумная камера; 3,4,12 - мониторные счетчики для контроля интенсивности протонов и счетчики обратной связи; 5 - счетчик Черенкова /всего восемь/; 6 - свинцовая защита; 7 - ферма-опора; 8 - механизм ввода; 9 - юстировочная поворотная плита; 10 - опорная плита; 11 - рельсы; 13 - дополнительный титановый насос; 14 - телевизионная камера ПТУ-101; 15 - 45-й магнит кольца протонного синхротрона ИФВЭ.

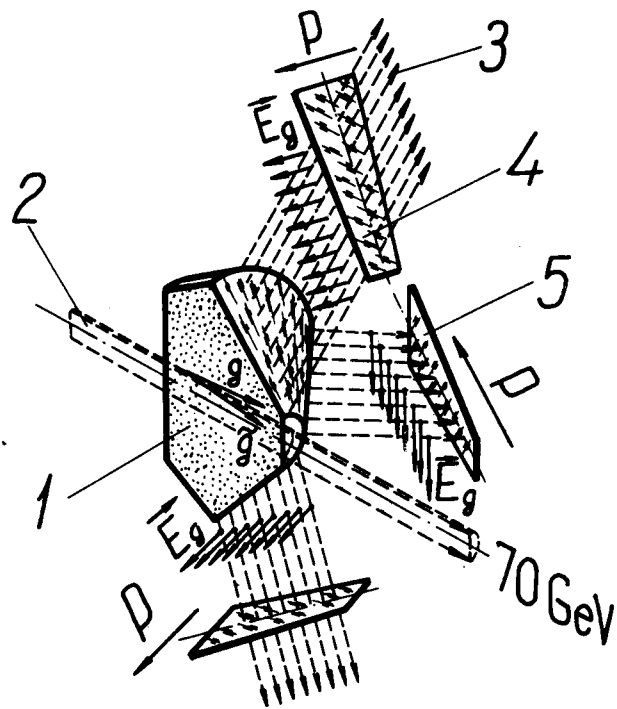


Рис. 4. Мишень-радиатор и схемы анализа излучения с помощью поляроидов. 1 - мишень из кварца; 2 - пучок протонов 70 ГэВ; 3 - ход излучения Вавилова-Черенкова от магнитного заряда; 4 - \perp - поляроид; 5 - \parallel - поляроид.

по поляризации с помощью поляроидов /4/. После отражения от набора плоских зеркал /5/, напыленных алюминием, развернутых друг относительно друга на угол $3^{\circ}49'$, излучение с помощью конических зеркал /9/ собиралось на фотокатоды фотоумножителей /10/ типа 58 AVP с рабочим диаметром фотокатода 100 мм. В фокальной плоскости линзы счетчика устанавливалась подвижная непрозрачная шторка /7,8/ шириной 65 мм и дистанционным управлением для поглощения излучения Вавилова-Черенкова, возникшего в мишени от первичного пучка протонов 70 ГэВ.

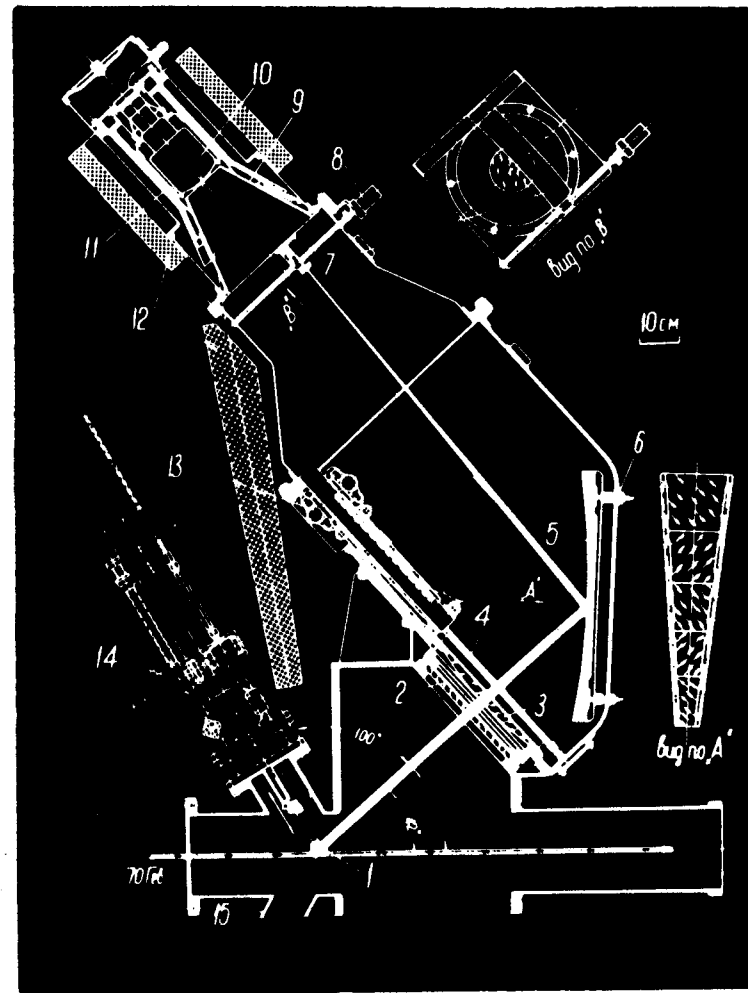


Рис. 5. Устройство одного из счетчиков Черенкова. 1 - мишень-радиатор; 2 - выпускное окно вакуумной камеры; 3 - фокусирующая линза; 4 - поляроиды \parallel и \perp ; 5 - наборное плоское зеркало; 6 - регулировочный винт; 7,8 - шторка с дистанционным управлением; 9 - коническое зеркало; 10 - ФЭУ 58 AVP; 11 - магнитная защита ФЭУ; 12 - свинцовая защита; 13 - механизм перемещения поляроидов; 14 - механизм ввода мишени.

Установка блока плоских зеркал /5/ в расчетное положение производилась с помощью специального оптического устройства и регулировочных винтов /6/. В рабочих условиях поляриды в счетчиках 1, 2, 3 и 6, 7, 8 занимали положение для пропускания излучения от магнитных зарядов / \perp -поляриды/, а в счетчиках 4 и 5 поляриды пропускали излучение от заряженных частиц / \parallel -поляриды/.

Фотокатоды фотоумножителей относительно центра мишени располагались на расстоянии 165 см под углом $\vartheta=100^\circ$ к направлению пучка протонов для уменьшения фона от заряженных частиц, летящих преимущественно вперед. От прямого попадания частиц из мишени на фотокатоды последние защищались пирамидальными свинцовыми блоками /12/ толщиной 70 см каждый.

Мишень-радиатор /1/ была выполнена из радиационностойкого плавленного кварца типа "Herasil - I" и имела форму половины усеченного конуса с углом при вершине $2\alpha = 96^\circ$ и толщиной в направлении пучка 40 мм. Наведение пучка протонов на мишень осуществлялось по центру плоской грани /рис. 4/.

Мониторирование протонов первичного пучка производилось двумя телескопами M_1 и M_2 /3 и 12 на рис. 3/, состоящими из трех сцинтилляционных счетчиков каждый. Размеры кристаллов счетчиков были 5,0 x 0,8 x 0,8 см³. Абсолютная привязка относительных показаний мониторов к интенсивности пучка протонов в кольце выполнялась группой эксплуатации ускорителя ИФВЭ путем измерений тока с помощью пикап-электродов. Многократная "привязка" показаний мониторов при разных уровнях интенсивности в кольце показала, что отклонения не превосходили $\pm 15\%$.

4. Условия эксперимента

Средний пробег монополей в кварце / $\rho = 2,25$ г/см³/ для импульсного спектра, изображенного на рис. 1, составляет примерно 1,3 см. На этой длине монополю

с зарядом $g = 68,5 e$ в диапазоне длин волн, соответствующем чувствительности фотокатода с обычным входным окном /от $\lambda_1 = 3000 \text{ \AA}$ до $\lambda_2 = 6500 \text{ \AA}$ /, испустит около $2,6 \cdot 10^6$ фотонов. Если все эти фотоны попадут на один фотокатод, то они выбьют около $2 \cdot 10^5$ фотоэлектронов. В отдельный счетчик Черенкова, захватывающий только часть конуса излучения в пределах $\Delta\phi \approx 7^\circ$, попадает излучения значительно меньше.

Для определения эффективности УПМД к регистрации магнитных зарядов при различных уровнях дискриминации амплитуд импульсов от фотоумножителей по методу Монте-Карло производился расчет числа фотонов излучения Вавилова-Черенкова, попадающих в каждый из 6 счетчиков Черенкова /1, 2, 3, 6, 7, 8/, с учетом: кинематики процесса $p + N \rightarrow p' + N' + g + \bar{g}$; внутриядерного движения нуклонов в ядрах мишени из SiO_2 с граничным импульсом ферми 0,22 ГэВ/с; профиля пучка протонов 70 ГэВ, наведенного на мишень; поглощения излучения в выпускных окнах вакуумной камеры и линзах /при учете их потемнения под воздействием излучения/; отражения на плоских и конических зеркалах; конструктивных особенностей установки; формы радиатора; выбывания протонов из пучка за счет ядерного поглощения; замедления монополей, а также спектральной и абсолютной чувствительностей фотоумножителей 58 АВП.

Следует отметить, что в расчете замедления монополей учитывались только ионизационные потери и пренебрегалось потерями энергии монополю на тормозное излучение. Это связано с тем, что радиационная длина λ_g для магнитных зарядов величиной от g_D до $2g_D$ превышает средний их пробег в радиаторе-мишени.

Результаты расчета приведены в табл. 1 для порогов дискриминации, соответствующих $N_{\text{ф.эл.}} \geq 250$ и $N \geq 400$ фотоэлектронов, массам магнитных зарядов m_g , равных 3, 4, 5 и 5,5 m_p , а также различных магнитных зарядов в единицах минимального дираковского $g_D = 68,5 e$.

Возможность выделения магнитных зарядов на значительном фоне заряженных частиц основывалось на следующих оценках. При максимальной интенсивности

Таблица 1

Масса монополя, m_p	η , эффективность УПМД при $N \geq 250$ ф.эл.			η , эффективность УПМД при $N \geq 400$ ф.эл.	
	$1/2 g D$	$1 g D$	$2 g D$	$1 g D$	$2 g D$
3,0	-	$0,19 \pm 0,07^{x/}$	-	$0,064 \pm 0,043$	
4,0	-	$0,20 \pm 0,07$	-	$0,083 \pm 0,045$	
5,0	$0,04 \pm 0,08$	$0,25 \pm 0,07$	$0,19 \pm 0,07$	$0,133 \pm 0,058$	$0,164 \pm 0,064$
5,5	-	$0,25 \pm 0,07$	-	$0,154 \pm 0,061$	

x/ Здесь приведены статистические ошибки расчета с достоверностью 3σ .

протонов внутри кольца ускорителя в 2.10^{12} протонов и равномерной их растяжке в 1 сек за разрешающее время шестикратных совпадений $\tau = 10$ нсек через мишень-радиатор пройдет 2.10^4 протонов.

Источниками фонового излучения Вавилова-Черенкова в кварцевом радиаторе-мишени являются все заряженные частицы, летящие под углом к направлению первичного пучка не более чем $\vartheta < 10^\circ$ и обладающие скоростями β , превышающими порог возникновения излучения Вавилова-Черенкова.

Таковыми частицами могли быть: 1/ протоны первичного пучка с энергией 70 ГэВ; 2/ вторичные ядерные частицы, главным образом пионы, каоны, протоны; 3/ электроны и позитроны, возникшие от γ -квантов, связанных с распадом π^0 -мезонов, генерируемых в мишени; 4/ δ -электроны, выбиваемые первичными протонами; вторичными заряженными частицами, а также самим монополем.

Вклад этих частиц в фоновое излучение показан в табл. 2.

Если не учитывать протоны первичного пучка, излучение от которых поглощается шторкой, то для среднего числа фоновых однозарядных частиц, возникающих одновременно в кварцевом радиаторе, получается оценка в $1,1.10^4$. Эти частицы дадут такое же излучение, как и монополь с $g = 68,5 e$, но оно будет ослабляться поляридом приблизительно в 100 раз /поляризующая способность использованных в опыте поляридов составляла $99,0 \div 98,5\%$ в диапазоне длин волн от 3500 до 7000 А по данным завода-изготовителя/.

Однако следует учесть еще три обстоятельства: 1/ вторичные /фонные/ заряженные частицы могут иметь пробег в радиаторе приблизительно в два раза превышающий средний пробег магнитного заряда с $g = 68,5 e$; 2/ кратность прохождения протонов К через мишень-радиатор увеличивает вклад в фоновое излучение от δ -электронов в К раз; 3/ в одном акте соударения рождается пара монополь-антимонполь с приблизительно одинаковым пробегом. В итоге получается, что амплитуда фонового сигнала A_ϕ по отношению к сигналу от монополя составляет $A_\phi/A_g \sim 1,2 \cdot 10^{-2}$.

Таблица 2

Фоновое излучение от частиц	Число однозарядных частиц	Число δ -электронов
Протоны первичного пучка 70 ГэВ	$\approx 2 \cdot 10^4$	$\approx 2,4 \cdot 10^2$
Вторичные ядерные частицы (мезоны, протоны, каоны)	$\approx 6,4 \cdot 10^3$	$\approx 1,1 \cdot 10^2$
Электронно-позитронные пары от π^0 -мезонов	$\approx 4 \cdot 10^3$	-
Монополю с $g = 68,5 e$	-	$\approx 10^2$

5. Блок-схема электроники

Импульсы с анодов ФЭУ счетчиков Черенкова 1, 2, 3, 6, 7, 8 /рис. 6/ через дискриминаторы $d_1 \div d_8$ и линии задержек $DL_1 \div DL_8$ подавались на две схемы тройных совпадений CC_1 и CC_2 с разрешающим временем $\tau = 5$ нсек. От этих схем импульсы совпадений подавались на схему двойных совпадений CC_3 с $\tau = 10$ нсек. Импульсы шестикратных совпадений запускали развертки двух пятилучевых осциллографов, которые регистрировали импульсы, поступающие с последних динодов восьми фотоумножителей 58 AVP предварительно усиленные широкополосными усилителями УЗ-11.

Случаю рождения монополя Дирака должно было сопутствовать появление больших импульсов / $N \geq 250$ ф.эл./

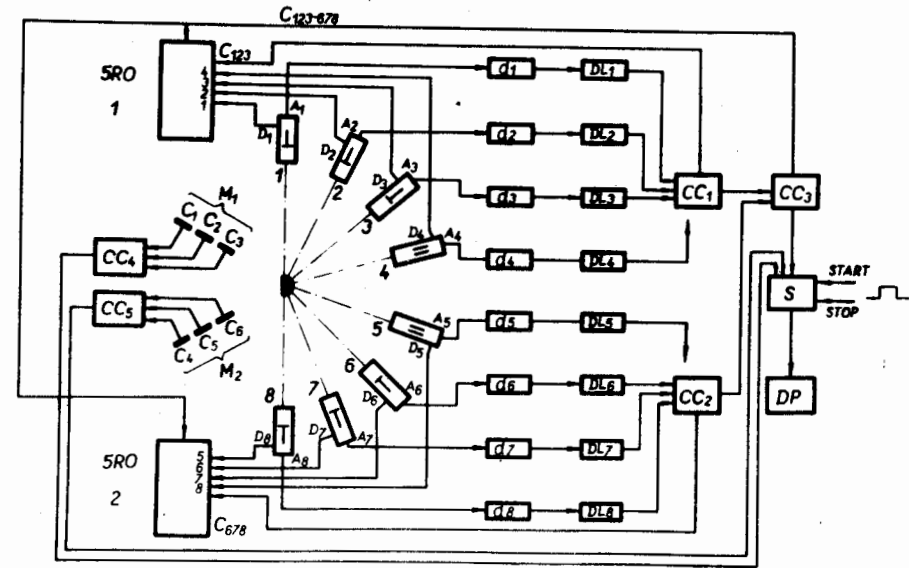


Рис. 6. $A_1 D_1 \div A_8 D_8$ - аноды и диноды фотоумножителей 58 AVP; $d_1 \div d_8$ - дискриминаторы; $DL_1 \div DL_8$ - линии задержек; $CC_1 \div CC_5$ - схемы совпадений /с $\tau = 5$ нсек, и $\tau = 10$ нсек/; 5RO - пятилучевые осциллографы; S - пересчетные блоки; DP - цифрпечать; M_1 и M_2 - мониторы.

одновременно в счетчиках 1, 2, 3, 6, 7, 8 и отсутствие таковых в 4 и 5 счетчиках.

Контроль интенсивности протонов, падающих на мишень, производился двумя мониторами, M_1 и M_2 .

УПМД работала синхронно с циклом ускорения длительностью ~ 8 сек. Спустя ~ 1 сек после инжекции протонов с энергией 100 МэВ в кольцо с помощью пульта управления УПМД давался стартовый импульс на ввод мишени-радиатора, которая по мере ускорения протонов в 30 сгустках длительностью по ~ 25 нсек и сжатия пучка протонов в шнур до диаметра $7 \div 10$ мм, приближалась к центру вакуумной камеры. За $200 \div 300$ мсек до конца цикла ускорения плоская грань мишени занимала рабочее положение $+5^\circ$, т.е. не доходила до центра камеры с внешней стороны кольца на 5 мм. После снятия высокой частоты внутренний пучок "разбанчировался" и с помощью специального "бампа" в режиме "стола" работы ускорителя равномерно в течение $1 \div 1,4$ сек наводился на мишень-радиатор. Равномерность наведения обеспечивалась специальной "обратной связью", работавшей от одиночного сцинтилляционного счетчика на ФЭУ-29.

Электроника установки запускалась временными воротами, открывавшимися спустя $200-300$ мсек от начала режима "стола". Длительность временных ворот определялась качеством равномерности растяжки и колебалась от $0,5$ до 1 сек. Вся информация после каждого цикла работы ускорителя и наведения протонов 70 ГэВ на мишень-радиатор фиксировалась с пятилучевых осциллографов кинокамерами РФК-5, а со счетчиков - блоком пересчетов с выходом на цифropечать ЦПМ-1.

Калибровка амплитуд импульсов с фотоумножителей 58 AVP в числе фотоэлектронов производилась стандартной методикой по отношению ширины амплитудного распределения к его амплитуде в максимуме, измеренного с помощью анализатора "NTA-512" и импульсных световых источников. Точность такой калибровки амплитуд фотоумножителей по нашим оценкам составляет $\pm 20\%$.

6. Выбор оптимальных условий работы

Подбор линий задержек $DL_1 \div DL_8$ для получения шестикратных совпадений при любой попарной комбинации счетчиков 1-8 производился как с помощью генератора импульсов "Cossor" с двойным выходом импульсов, так и при работе ускорителя в режиме "банчей", имеющих длительность ≈ 25 нсек. В пределах нескольких нсек оба метода давали совпадающие результаты.

Фотоумножители 58 AVP работали при напряжении ≈ 2 кВ с подпиткой 4 последних диодов. Напряжение на всех счетчиках /1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8/ постоянно контролировалось. Шторка, перекрывающая излучение Вавилова-Черенкова от первичного пучка протонов 70 ГэВ в фокальной плоскости каждого счетчика Черенкова, выставлялась по минимуму счета 3-кратных совпадений счетчиков 1, 2, 3 и 6, 7, 8. При этом для исключения возможности попадания фотонов, минуя шторку, плоская грань мишени, обращенная к пучку, зачернялась, чтобы устранить отраженное излучение.

Основным препятствием для нормальной работы УПМД являлась тонкая структура внутреннего пучка протонов, обусловленная "квазибанчировкой" протонов в режиме "растяжки" работы ускорителя. Длительность "квазибанчей" составляла $\tau_{кв.б.} \sim 180$ нсек, а частота $f \approx 2,6$ МГц. После внедрения на ускорителе ИФВЭ системы подавления "квазибанчировки" через мишень-радиатор УПМД было пропущено $\sim 7,7 \cdot 10^{15}$ протонов и было зарегистрировано 120 шестикратных совпадений при пороге дискриминации $N \geq 250$ ф. эл. При этом оказалось, что для 96 событий отношение средних амплитуд импульсов, зарегистрированных на осциллографах, $\bar{A}_\perp / \bar{A}_\parallel \sim 1/3$, где \bar{A}_\perp и \bar{A}_\parallel - средние амплитуды импульсов в счетчиках Черенкова с \perp и \parallel - поляроидами соответственно. Эти случаи совпадений не могли быть вызваны монополями, так как для них в любом случае должно было быть $\bar{A}_\perp > \bar{A}_\parallel$. Первоначально мы интерпретировали их как совпадения от излучения вторичных частиц с поляризацией $p \sim 50\%$. Однако проведенные фоновые опыты с перекрещенными поляроидами ($\perp + \parallel$) в счетчиках 1, 2, 3 и 6, 7, 8 и парал-

лельными в 4 и 5 счетчиках и кварцевой мишенью показали, что в этом случае также имеются шестикратные совпадения, причем отношение средних амплитуд импульсов в любом из счетчиков с перекрещенными поляроидами к средним амплитудам импульсов в счетчиках 4 и 5 /с параллельными поляроидами/ $\bar{A}_{\parallel+\perp} / \bar{A}_{\parallel} \sim 1/3$, т.е. получилось таким же, как и в случае экспозиции "ожидание монополя".

В опыте, проведенном с углеродной мишенью при ориентации поляроидов такой же, как и при "ожидании монополя", также наблюдались совпадения, а средняя амплитуда импульсов по осциллограммам совпадала со средними амплитудами фонового опыта (при мишени из SO_2) в счетчиках 1, 2, 3, 6, 7, 8.

На основании фоновых опытов все 96 шестикратных совпадений были интерпретированы нами как совпадения, обязанные выбиванию фотозлектронов с фотокатодов ФЭУ группами вторичных частиц, обусловленных "тонкой структурой" внутреннего пучка протонов.

Это позволило нам при анализе шестикратных совпадений установить жесткий критерий случая "монополь": в счетчиках 1, 2, 3, 6, 7 и 8 амплитуды импульсов должны быть больше 250 ф.эл., а в 4 и 5 счетчиках импульсы должны отсутствовать. Этому критерию не удовлетворял ни один случай шестикратных совпадений. Вероятность наложения случая "монополь" и случая "тонкая структура" оценена нами как $\approx 10^{-10}$. Оставшиеся 24 события, имевшие место в режиме "ожидания" интерпретировались как "сброс на стенки" камеры ускорителя, поскольку осциллограммы были аналогичны осциллограммам, полученным в дополнительном фоновом опыте с убранной мишенью-радиатором. В этих случаях на всех лучах осциллограмм от счетчиков 1, 2, 3, 6, 7, 8 и 4 и 5 было зарегистрировано значительное число приблизительно одинаковых импульсов с амплитудами $N \geq 250$ ф. эл. Кроме этого, вид этих осциллограмм не отличался от вида осциллограмм с 6-кратными совпадениями при работе с углеродной мишенью.

Загрузки всех счетчиков Черенкова при выбранных порогах дискриминаторов $d_1 \div d_8$ не превосходили 10^6 ,

а ФЭУ работали в линейном режиме по сумме медленно и быстро меняющейся компонент тока.

7. Поправки и результаты эксперимента

В связи с тем, что эксперимент проводился в тяжелых радиационных условиях, необходимо было проводить калибровку амплитуд импульсов от фотоумножителей перед каждым сеансом. Калибровка, проведенная после последнего сеанса работы УПМД, показала, что максимальное падение абсолютной чувствительности фотокатодов фотоумножителей 58 AVP составило $\approx 30\%$.

Кроме этого, в эксперименте использовались шесть образцов мишеней-радиаторов, изготовленных из различных радиационностойких кварцев, в различной степени приобретающих окраску под воздействием облучения протонами 70 ГэВ.

Учет этого обстоятельства показал, что амплитуда импульса за счет поглощения излучения в мишени-радиаторе уменьшилась на 28%.

Результатирующее уменьшение импульса от этих двух факторов составило 58%. Это привело к тому, что действительный порог соответствовал $N \geq 400$ ф.эл., а эффективность установки уменьшилась до значений, приведенных в табл. 1.

Исходя из полного потока протонов в $7,7 \cdot 10^{15}$ протонов, пропущенных через мишень-радиатор, эффективной толщины мишени $l_{эф}$, η - эффективности установки к регистрации излучения Вавилова-Черенкова от пар монополь-антимонгополь при заданном пороге дискриминации импульсов, кратности прохождения K протонов 70 ГэВ через мишень-радиатор была определена верхняя граница сечения рождения монополей протонами 70 ГэВ на нуклон ядер мишени в реакции $p + N \rightarrow p' + N' + g + \bar{g}$ по формуле

$$\sigma(95\%) < \frac{3}{I_p N_n \eta K} \quad /2/$$

где N_n - число нуклонов на $см^2$ мишени с $l_{эф} = 3$ см.

Кратность прохождения протонов 70 ГэВ через мишень УПМД рассчитывалась на основе формул, приведенных в работе^{/3/} с учетом особенностей протонного синхротрона ИФВЭ^{/19/} / $K_{\text{расч}} = 8,4/$. Величина K также определялась экспериментально путем облучения тонкой /20 микрон/ углеродосодержащей пленки, помещенной по торцу мишени-радиатора со стороны влета протонов в мишень, и использования реакции ${}^{12}_6\text{C}(p, pn){}^{11}_6\text{C} \xrightarrow{\beta^+} {}^{11}_5\text{B}$.

/Сечение этой реакции при 70 ГэВ, полученное путем грубой экстраполяции данных, взятых из работы^{/20/}, при энергии протонов 28 ГэВ, принималось равным 30 мбарн/. Экспериментальная величина получилась равной $K_{\text{эксп}} = 8,3$, что согласуется с расчетной величиной.

При $I_p = 7,7 \cdot 10^{15}$, $N_n = 4,07 \cdot 10^{24}$, $K = 8,3$ и эффективностях УПМД для регистрации монополей разных масс, приведенных в табл. 1, значение верхней границы сечения, усредненное по диапазону масс монополей от $m_g = 3m_p$ до $m_g = 5,5m_p$, на основании формулы /2/ получилось равным $\sigma / 95\% / \lesssim 10^{-40} \text{ см}^2$. Эти данные относятся к области магнитных зарядов от $-2/3 g_D$ до $-2 g_D$ со временем жизни $\tau_R \gtrsim 3 \cdot 10^{-11}$ сек.

Отрицательные результаты поиска магнитных зарядов во всех опытах, в том числе при 70 ГэВ и 300 ГэВ, по-видимому, могут быть объяснены с точки зрения запрещающего принципа на существование в природе свободных магнитных зарядов, выдвинутого в работе Курсуноглу^{/21/} на основе следствий, полученных из обобщенной теории гравитации. Дальнейшее развитие этой теории и эксперименты на ускорителях с еще большей энергией позволят установить, является ли этот запрет абсолютным.

Авторы глубоко благодарны дирекции Лаборатории ядерных проблем за всестороннюю поддержку и постоянную помощь в работе и особенно - члену-корреспонденту АН СССР В.П.Джелепову, проф. А.А.Тяпкину и проф. Л.И.Лапидусу, дирекциям ОИЯИ и ИФВЭ за предоставленную возможность выполнить эту работу, всему отделу эксплуатации ускорителя ИФВЭ и в особенности члену-корреспонденту АН СССР А.А.Наумову, Ю.М.Адо, А.А.Журав-

леву, В.Г.Рогозинскому, О.Д.Пронину, М.Н.Булгакову, В.И.Зайцеву, А.Г.Невскому, В.Л.Бруку, Ю.Н.Орлову, К.П.Мызникову, В.П.Гридакову, Б.А.Зеленову, А.Васюхи-ну, а также Е.Ф.Соколову и В.Е.Бородину.

Мы благодарны В.М.Сидорову, Ю.А.Батусову, В.П.Перельгину за обсуждение первоначального проекта опыта, Ю.К.Акимову /соавтору проекта/ и А.Ф.Дунайцеву за содействие и ценные советы, П.Шулеку /соавтору проекта/ за расчет эффективности установки ПМД, В.Г.Зинову, А.Н.Синаеву и Ю.Г.Будяшову за обеспечение эксперимента стандартной электроникой, А.Т.Василенко, проф. М.И.Соловьеву, Ю.Г.Баше за постоянную помощь, а также Ю.Н.Ефимову, В.В.Ермакову, П.Луптаку, В.Н.Сошникову, Т.И.Козловой и Л.И.Варгановой за большую работу по всестороннему обеспечению эксперимента.

Литература

1. P.A.M.Dirac. Proc. Roy. Soc., A133, 60 (1931).
2. P.A.M.Dirac. Phys.Rev., 74, 817 (1948).
3. E.Arnaldi et al. Preprint CERN, Report 63-13, 1963.
4. E.Arnaldi. Old and New Problems in Elementary Particles. Acad. Press., New York and London, 1968, p. 20-61.
5. P.H.Eberhard, R.R.Ross and L.W.Alvarez. Phys.Rev., D4, 3260 (1971).
6. I.I.Gurevich et al. Phys.Lett., 38B, 549 (1972).
7. R.A.Carrigan, Jr., F.A.Nezrick and B.P.Strauss. Preprint NAL-Pub., 73/51-exp., 7100-076, 1973.
8. D.Sivers. Lawrence Rad.Lab. Univ. California, Berkeley, UCRL-19794, 1970.
9. J.L.Newmeyer and J.S.Trefil. Phys.Rev.Lett., 26, 1509 (1971).
10. J.L.Newmeyer and J.S.Trefil. Phys.Lett., 38B, 524 (1972).
11. J.Schwinger. Phys.Rev., 144, 1087 (1966).
12. J.Schwinger. Science, 165, 757 (1969).
13. A.O.Barut. Phys.Rev., D3, 1747 (1971); Phys.Lett., 38B, 97 (1972).
14. K.T.Mahanthappa. Phys.Rev., D7, 1028 (1973).
15. T.Sawada. TUETP-73-II, Tokyo University of Education, Tokyo, 1973.
16. V.P.Zrelov et al. Preprint JINR, E1-6946, Dubna, 1973.
17. И.М.Франк. Памяти С.И.Вавилова. Изд-во АН СССР, Москва, 1952, 172.
18. П.А.Черенков, И.Е.Тамм, И.М.Франк. "Нобелевские лекции", Физматгиз, Москва, 1960.
19. К.Ф.Герцев и др. Препринт ИФВЭ, СКУ-70-86, 1970.
20. J.B.Cumming et al. Phys.Rev., 125, 2078 (1962).
21. B.Kursunoglu. CTS-HE-73-2, University of Miami, USA, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 июня 1974 года.