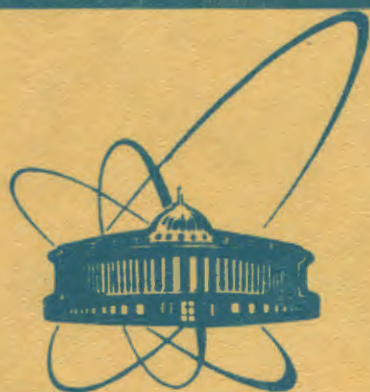


82-236



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

3216/82

12/4-82

1-82-236

+

ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МЮОНОВ С НУКЛОНАМИ
И ЯДРАМИ
В ТЭВНОЙ ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ

1982

1. ВВЕДЕНИЕ

Указанные выше институты и лаборатории * заинтересованы в проведении долгосрочной программы исследований фундаментальных проблем физики элементарных частиц с помощью пучка мюонов УНК в ИФВЭ /к этим организациям возможно присоединение и других институтов/.

В связи с созданием УНК предполагается разработка проекта программы и экспериментальной установки для исследований глубоконеупругих рассеяний /ГНР/ мюонов тэвной энергии /до ~2 ТэВ/ на нуклонах и ядрах с целью изучения структуры элементарных частиц.

Согласно современным представлениям мюон - точечная частица и поэтому является уникальным инструментом для исследования структуры более сложных объектов.

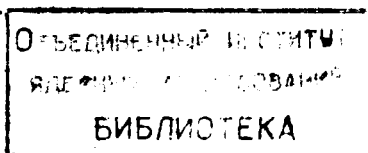
Исторический опыт показывает, что каждый качественный переход в новую область энергий и переданных импульсов (Q^2) всегда сопровождается открытием принципиально новых явлений и обнаружением более тонких структур исследуемых объектов: атомов, ядер, нуклонов и т.д. Есть основания полагать, что в таких экстремальных условиях, которые обеспечит УНК, будут обнаружены новые неизвестные ранее явления, физические закономерности и структурные особенности частиц. При столь больших значениях Q^2 /~2000 ГэВ² и выше/ могут претерпеть изменение и основные понятия современной физики - структурные функции, однофотонный обмен, обмен промежуточным бозоном, предполагающие локальность взаимодействия и точечность кварков.

Если же будут обнаружены проявления фундаментальной длины, то это явится принципиально новым шагом в физике элементарных частиц.

Ясно, что проблемы эти останутся актуальными еще на многие годы, а изучение новых явлений и динамики взаимодействия частиц при сверхвысоких энергиях послужит основой для создания единой физической теории.

Программа исследований ГНР мюонов в тэвной области энергий планируется как естественное продолжение научной программы, осуществляемой в настоящее время в совместном ОИЯИ-ЦЕРН эксперименте НА-4. Разработка проекта будет проводиться в 1982-85 гг.

* См. вторую страницу обложки.



на базе опыта, накопленного в процессе реализации этого, а также других мюонных экспериментов ЦЕРНа (НА-2, НА-9).

Основные физические проблемы, а также методические вопросы, связанные с созданием установки и мюонного пучка для этих исследований, кратко формулируются ниже.

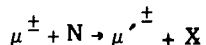
2. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА

Ожидается, что УНК будет иметь мюонный пучок с энергией до 2 ТэВ. На рис.1 показана область импульсов и энергий (Q^2, ν), переданных нуклону, которая может быть достигнута в исследованиях ГНР. Для сравнения показана также соответствующая область, изучаемая в экспериментах на ускорителях ЦЕРНа /СПС/ и ФНАЛа /тэватрон/.

Приведем далеко не полный перечень проблем, рассмотрение которых в этой области представляет большой физический интерес.

2.1. Дальнейшая проверка гипотезы скейлинга Бьеркена

Для этой проблемы открываются новые аспекты. Область кинематических переменных для реакции



/1/

по сравнению с СПС будет расширена на порядок. В одном эксперименте неупругие структурные функции нуклона, например $F_{2,1}(x, Q^2)$, будут измерены на протяжении почти 3 порядков изменения Q^2 , что позволит детально изучить нарушение скейлинга и установить, каким законом - логарифмическим ($-\ln(Q^2/\Lambda^2)$) или степенным ($-(Q^2/\Lambda^2)^\beta$) - оно описывается.

2.2. Структурные функции протона и нейтрона

Измерения $F_{2,1}^p(x, Q^2)$ и $F_{2,1}^n(x, Q^2)$ необходимы для изучения проблем нарушения скейлинга в чистых состояниях, не осложненных ядерными эффектами, особенно в областях $x \rightarrow 0$ и $x \rightarrow 1$. Из этих экспериментов будут получены также функции распределения кварков /и глюонов/ в нуклонах, которые необходимы для интерпретации многих экспериментов и проверки теорий.

2.3. Поляризационные эффекты в ГНР

Дифференциальное сечение реакции /1/ на поляризованных протонах содержит две дополнительные структурные функции, завися-

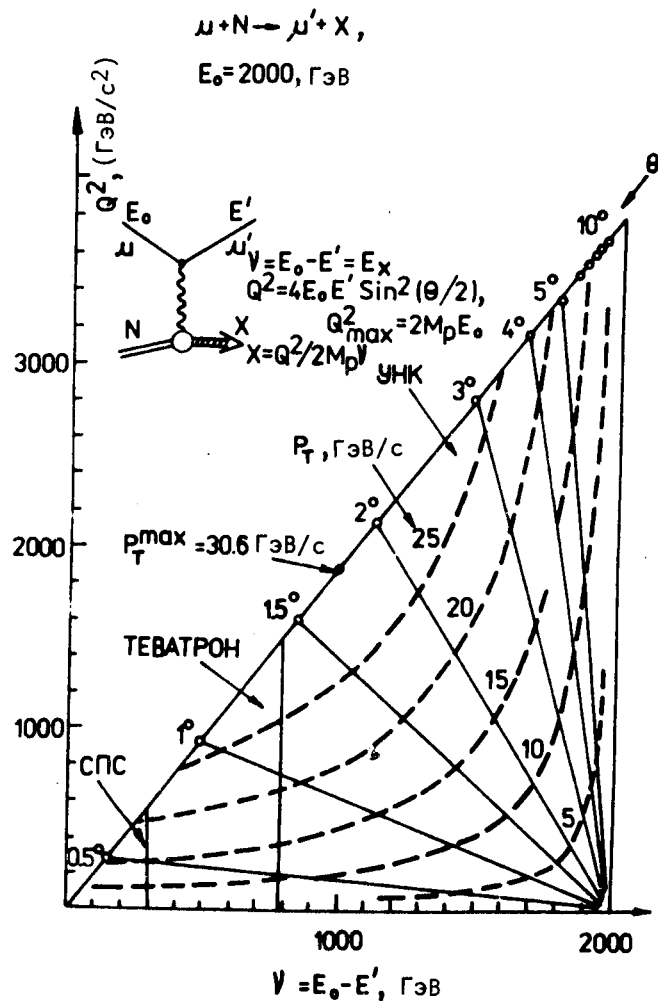


Рис.1. Кинематическая плоскость (Q^2, ν) инклюзивного глубоконеупругого рассеяния мюонов на нуклонах при начальной энергии 2 ТэВ. Сплошными линиями показаны линии постоянного угла рассеяния; пунктиром - линии постоянного значения поперечного импульса рассеянных мюонов; вертикальными линиями - границы области, достижимой на СПС ЦЕРНа и тэватроне ФНАЛа /США/.

щие от спиновых состояний взаимодействующих частиц. Поскольку за спин нуклона ответственны валентные кварки, изучение этих функций позволит разделить вклады в нарушение скейлинга от валентных и морских кварков.

2.4. Слабые нейтральные токи

При малых Q^2 основной вклад в реакцию /1/ дают электромагнитные процессы с однофотонным (γ) обменом. По мере роста Q^2 все более важным становится вклад диаграммы с обменом промежуточным бозоном Z^0 , при $Q^2 \approx M_Z^2$ вклад обеих диаграмм становится сравнимым. Если ограничиться учетом членов, линейных по G , то сечение реакции /1/ может быть записано в виде $d\sigma = d\sigma_\gamma + d\sigma_{\gamma Z} + \dots$. Отношение γ - Z интерференционного вклада к однофотонному для мюонов разных знаков с продольной поляризацией λ :

$$d\sigma_{\gamma Z}^{\pm} / d\sigma_{\gamma} = 1 - k [v_{\mu} V \mp a_{\mu} A + \lambda (v_{\mu} A \mp a_{\mu} V)], \quad /2/$$

зависит от функции k , которая пропорциональна отношению констант взаимодействия и характеризует относительный вклад слабого взаимодействия:

$$k = \frac{G}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{2\pi\alpha M^2} \cdot \frac{Q^2 M_Z^2}{M_Z^2 + Q^2} \approx 1,8 \cdot 10^{-4} \frac{Q^2 M_Z^2}{M_Z^2 + Q^2}. \quad /3/$$

При $M_Z = 100$ ГэВ и "среднем" для УНК $Q^2 = 2000$ /ГэВ/с² параметр k достигает уже 30%. Соотношение /2/ содержит векторную (v_{μ}) и аксиальную (a_{μ}) константы связи мюона с Z^0 , а функции $V^{\mu}(x, Q^2)$ и $A(x, Q^2)$ характеризуют относительный вклад интерференции электромагнитной и векторной /аксиальной/ части нейтрального тока. Из /3/ следует, что по мере роста Q^2 в процессах глубокоупругого рассеяния должны все больше и больше проявляться эффекты нарушения четности и зарядовых асимметрий, наиболее характерные из которых определяются следующим образом:

1. Р-нечетная асимметрия /при изменении поляризации пучка без изменения знака заряда частиц пучка/:

$$A^{\pm} = [d\sigma^{\pm}(\lambda_1) - d\sigma^{\pm}(\lambda_2)] / [d\sigma^{\pm}(\lambda_1) + d\sigma^{\pm}(\lambda_2)] = -k\lambda(\pm a_{\mu} V + v_{\mu} A) \quad (\text{при } \lambda = \lambda_1 = -\lambda_2).$$

2. Асимметрия D /при изменении заряда без изменения поляризации частиц пучка/:

$$D = [d\sigma^{+}(\lambda) - d\sigma^{-}(\lambda)] / [d\sigma^{+}(\lambda) + d\sigma^{-}(\lambda)] = -ka_{\mu}(A + \lambda V).$$

3. Асимметрия В /при одновременном изменении на противоположные заряда и поляризации частиц пучка/:

$$B = [d\sigma^{+}(\lambda) - d\sigma^{-}(-\lambda)] / [d\sigma^{+}(\lambda) + d\sigma^{-}(-\lambda)] = -k(a_{\mu} - \lambda v_{\mu})A.$$

Оценки, которые можно сделать в рамках электрослабой теории Вайнберга-Салама, показывают, что при $Q^2 = 2 \cdot 10^3$ /ГэВ/с² асимметрии А и В достигают 12% и 25% соответственно и легко измеряются экспериментально.

Изучение асимметрий позволит получить богатейшую физическую информацию:

а/ измерение величины эффекта в сочетании с известной /к тому времени/ массой Z^0 даст указания на возможное существование других Z бозонов,

б/ исследование количественных соотношений между асимметриями А, В и D позволит проверить новым способом теорию Вайнберга-Салама /или любую другую/; их комбинации однозначно, без привлечения других экспериментов и без предположений о динамике сильных взаимодействий определяют произведения $a_{\mu} A$, $a_{\mu} V$ и $v_{\mu} A$;

в/ измерение асимметрии D в зависимости от λ позволит разделить вклады новых структурных функций $G_2(x, Q^2)$ и $xG_3(x, Q^2)$, из которых первая особенно чувствительна к деталям электро-слабой теории ($\sin^2\theta$);

г/ изучение y -зависимости асимметрий является количественной проверкой V-A структуры нейтральных мюонных токов, поскольку при $y=0$ $A^{\pm} = -A^{\mp}$ и $B=0$ независимо от моделей;

д/ исследование зависимости асимметрии В от λ даст сведения о примеси правых нейтральных токов.

Изучение нейтральных мюонных токов может стать основной частью программы мюонных экспериментов на УНК.

2.5. Слабые заряженные токи

Слабые заряженные токи могут быть изучены в реакциях

$$\mu^{+} + N \rightarrow \bar{\nu}_{\mu} + X,$$

$$\mu^{-} + N \rightarrow \nu_{\mu} + X,$$

/4/

где X - адронный ливень, энергия и направление которого определяются в эксперименте. Это чисто "слабая" реакция. Сечение ее, как известно, зависит от 3 структурных функций: $F_1(x, Q^2)$,

$F_2(x, Q^2)$ и $x \cdot F_3(x, Q^2)$. Их определение из данного процесса совместно с измерениями, указанными выше, позволит экспериментально разделить вклады в сечения /структурные функции/ от чисто слабых, чисто электромагнитных эффектов, а также от их интерференции.

Аналогично нейтринным экспериментам могут быть проведены исследования, которые позволят детально изучить отношения $R_{\mu+}$ и $R_{\mu-}$ сечений реакций, вызываемых заряженными и нейтральными токами. Кроме того, реакции /4/ могут быть изучены для разных спиральностей /продольных поляризаций/ мюонов, поскольку спиральность мюонов контролируется независимо от знака их заряда. Такая возможность отсутствует в опытах с нейтрино.

2.6. Радиационные поправки /РП/

Правильные вычисления или экспериментальное определение вклада в реакцию /1/ электромагнитных процессов с участием нескольких фотонов - радиационных поправок - определяет успех всей указанной выше программы. До настоящего времени надежно вычислены лишь поправки порядка α к лептонному току. Для значительной части кинематической плоскости /рис.1/ РП превышают величину 3%. Поэтому требуется детальный учет поправок порядка α^2 с тем, чтобы минимизировать теоретические неопределенности РП.

Оценены также РП к адронному току. Вычисления модельно-зависимы, но есть указания, что этот тип РП не зависит от энергии, и поэтому их вклад может быть экспериментально измерен при меньших энергиях, где вклад других эффектов пренебрежимо мал.

Из многих других типов электромагнитных процессов, дающих вклад в РП, наибольшую теоретическую неопределенность имеют оценки вклада электромагнитных взаимодействий адронов в конечных состояниях.

Следует отметить, что изучение РП и, в частности, двухфотонных (2γ) процессов имеет большой самостоятельный интерес. Вклад 2γ -процессов критичен к квантовым числам кварков. Существуют утверждения, что имеющиеся на этот счет данные лучше согласуются с целочисленным, а не дробным зарядом кварка.

2.7. Конечные адронные состояния

Изучение конечных адронных состояний в ГНР мюонов, включая область больших Q^2 , позволит получить весьма важную информацию о кварковой структуре адронов, о свойствах кварков, их зарядах, о величине поперечного импульса кварков в адронах, а так-

же, в сочетании с данными по инклюзивным адрон-адронным столкновениям, информацию о фундаментальном кварк-кварковом взаимодействии.

Определение функций фрагментации для различных адронов /пионов и каонов/ дает возможность проверить ряд соотношений, предсказываемых общей кварк-партоновой схемой структуры нуклонов, а также экспериментально определить ряд комбинаций функций распределений кварков.

2.8. Кумулятивные эффекты

Изучение событий ГНР на ядрах в той области, которая запрещена "нормальной" мюон-нуклонной кинематикой, есть изучение мультикварковых конфигураций в ядрах, кварковой кинетики, изучение взаимодействий цветного заряда с ядерной материей. При столь больших передачах импульса кварк будет проходить большие расстояния в цветозаряженном состоянии /заведомо большие размеры любого ядра/.

2.9. "Экзотические" состояния

Природа может оказаться гораздо богаче в неисследованной области, чем это представляется в настоящее время. Могут быть открыты экзотические частицы, такие, как бозоны Хиггса, масса которых сейчас неизвестна, целозаряженные кварки, магнитные монополи с массой ~ 50 ГэВ и др. Это может отразиться на обрисованной выше программе.

Проектирование новой установки для "ожидаемой" физики всегда связано с риском пройти мимо новых и важных явлений. Единственная возможность уменьшить этот риск заключается в том, чтобы создать детектор, нацеленный на измерение "ожидаемого" и достаточно универсальный, чтобы не упустить "неожиданное".

При планировании "неожиданного" следует иметь в виду прежде всего:

- а/ возможность изучения упругих μp - и μd -рассеяний;
- б/ возможное появление новых векторных состояний тяжелых пар кварк-антикварк;
- в/ существование тяжелых лептонов, регистрируемых через мультимюонные состояния;
- г/ эффекты, связанные с проявлением фундаментальной длины и структуры лептонов.

Если окажется, что лептоны имеют внутреннюю структуру или существует фундаментальная длина, кладущая естественный предел локальным взаимодействиям, то исследования реакций с большими передачами импульса в пространственно-подобной области могут привести к новой революции в физике.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка для мюонных экспериментов на УНК должна синтезировать основные идеи крупнейших установок ЦЕРНа - НА-2, НА-9 и НА-4 - и состоять из нескольких независимых элементов, которые могут использоваться вместе, а могут частично изменяться от эксперимента к эксперименту. Модульная структура позволяет заменить некоторые элементы установки, если в дальнейшем будут найдены новые или более удобные варианты.

Установка должна содержать следующие основные узлы /см. рис.2/:

1. Передний спектрометр-калориметр для обеспечения изучения ГНР в области малых x и Q^2 , поляризационных эффектов, конечных адронных состояний, заряженных токов;
2. Тороидальный спектрометр для изучения ГНР в области больших Q^2 , асимметрий, мультимюонов и др.;
3. Оконечный детектор для таггирования энергии виртуальных фотонов, изучения области сверхмалых Q^2 /упругие рассеяния/, заряженных токов и др.;
4. Мишени / H_2 , D_2 , $C...$, поляризованная H_2 / и систему их обеспечения;
5. Вспомогательные детекторы /счетчики защиты от гало, пучковые годоскопы, счетчики систем запуска спектрометров/, систему измерения продольной поляризации пучка и др.;
6. Вычислительные машины /ЭВМ/.

Из перечисленных узлов особенно тщательно должен быть спроектирован передний спектрометр-калориметр, к которому предъявляются особые требования: высокая разрешающая способность по пространственным координатам, по кинематическим переменным, по многотрековости, способность идентифицировать тип вторичных частиц и пр.

Тороидальный спектрометр в конфигурации НА-4 обеспечивает эффективность регистрации 70-80% для рассеянных мюонов с $Q^2 > 50$ /ГэВ/с² и может быть полностью использован в экспериментах на УНК. Для расширения его возможностей целесообразно добавить несколько супермодулей в сверхпроводящем варианте.

Оконечный детектор должен идентифицировать и определять параметры /импульс, угол/ мюонов, рассеявшихся на малые углы. Для этого в его состав должен входить достаточно сильный магнит / $B \ell \geq 30$ Тм/ и координатные детекторы.

Все детекторы установки должны быть спроектированы так, чтобы использовать максимальную интенсивность пучка. Масштаб установки указан на рис.2. Для ее расположения требуется специальный экспериментальный зал, размеры которого не менее 200 м в длину, 30 м в ширину и 20 м в высоту. Зал должен быть

оборудован для работ с жидким водородом, иметь 2-3 крана для подъема грузов весом до 60-80 т и пол под нагрузку не менее 20-30 т/м².

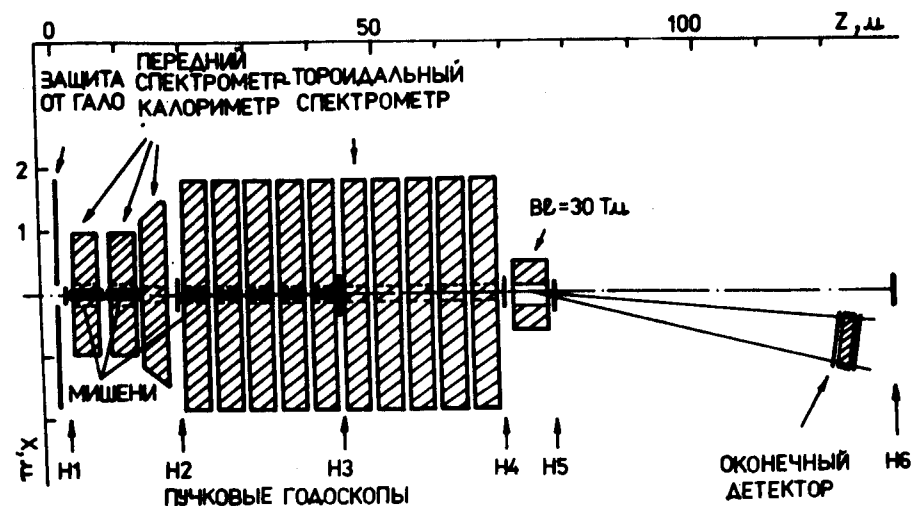


Рис.2. Общая схема установки для мюонных экспериментов на УНК.

4. ПУЧОК МЮОНОВ И КАНАЛ

Для выполнения предложенной выше программы необходим пучок мюонов, обладающий очень хорошими характеристиками. Основные из них следующие:

1. Интенсивность пучка - не менее 10^9 /с при энергии 2 ТэВ. Оценки показывают, что такую интенсивность можно получить, если за основу схемы пучка взять пучок M_2 в ЦЕРНе, где для фокусировки родительских частиц и дочерних мюонов используются квадруполь по схеме FODO.
2. Отношение интенсивности частиц в гало пучка к интенсивности пучка. $I_H/I_B \leq 1 \pm 5\%$. Необходимо иметь систему дистанционно управляемых магнитных скреперов для оптимизации этого отношения.
3. Энергетический разброс $\Delta E/E \approx \pm 5\%$. Контроль и поддержание стабильности среднего значения не хуже 0,1%.
4. Точность измерения импульса индивидуального мюона должна быть около 0,1% /не хуже 0,2%/.
5. Профиль пучка в сечении - окружность / $\sigma_x \approx \sigma_y \leq 3$ см/.
6. Расходимость пучка - минимальная, но не хуже 0,1 мрад в обеих плоскостях.

Канал должен обеспечивать возможность:

1. Независимого выбора энергии распадающихся пионов и каонов и распадных мюонов.
 2. Частого /несколько раз в сутки/ изменения продольной поляризации μ^+ и μ^- .
 3. Контроля и измерения поляризации пучка мюонов.
 4. Контроля и изменения режима работы элементов, формирующих пучок с помощью ЭВМ /дисплей и печать/ с пульта управления экспериментом.
 5. Дистанционного контроля и измерения профилей и интенсивности пучка в наиболее критичных местах вдоль его трассы. Вывод этой информации через ЭВМ на дисплей и печать с пульта управления экспериментом. Запись части информации на магнитные ленты вместе с экспериментальными данными.
- Необходимо отметить, что канал, удовлетворяющий перечисленным требованиям, легко может перестраиваться для транспортировки интенсивного пучка адронов, включая антипротоны.

5. ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЕНИЙ

Оценки времени, требуемого для проведения некоторых из перечисленных экспериментов, сделаны в предположениях, что:

- а/ интенсивность пучка при энергиях 0,9; 1,5 и 2,1 ТэВ равна соответственно $3 \cdot 10^{10}$; $1,5 \cdot 10^{10}$ и $1,5 \cdot 10^9$ /с;
- б/ аксептанс установки близок к 1;
- в/ светимость установки $L / \text{см}^{-2} \text{ день}^{-1} /$ с использованием разных мишеней равна:

Е, ТэВ	1 МН ₂	10 М·Н ₂	10 М·Fe
0,9	$6 \cdot 10^{38}$	$6 \cdot 10^{39}$	$6 \cdot 10^{41}$
1,5	$3 \cdot 10^{38}$	$3 \cdot 10^{39}$	$3 \cdot 10^{41}$
2,1	$0,3 \cdot 10^{38}$	$0,3 \cdot 10^{39}$	$0,3 \cdot 10^{41}$

5.1. Статистика для изучения структурных функций

На рис.3 показаны области кинематической плоскости, внутри которых за 500 часов набора данных при энергии пучка 2,1 ТэВ может быть достигнута статистическая точность лучше чем 1% или лучше чем 10% для соответствующей мишени. При меньших энергиях набор данных с той же точностью потребует меньше времени.

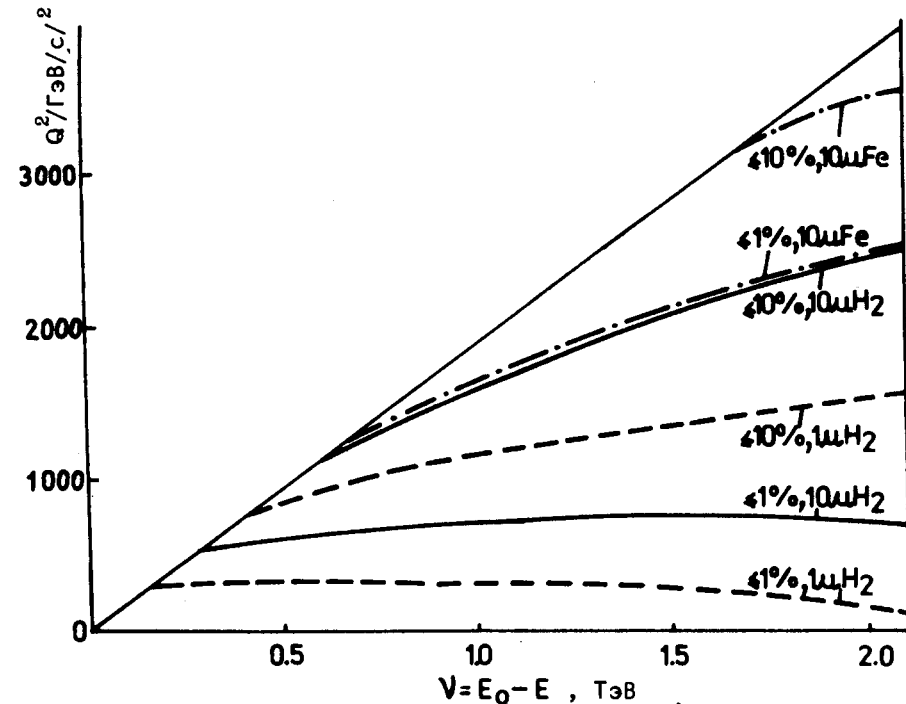


Рис.3. Оценка статистической точности измерений сечений /структурных функций/ при начальной энергии 2 ТэВ за 500 часов набора данных с разными мишенями.

5.2. Статистика для изучения нейтральных токов

Требуется обеспечить статистическую точность измерения разности сечений не хуже 1-2%. Как показывает опыт НА-4, при экстраполяции в область УНК для этого потребуется около 1000 ч для измерения каждой из асимметрий. Измерения необходимо проводить с тяжелой мишенью /углерод или более тяжелый элемент/. При этом поведение асимметрий и интерференционных функций в зависимости от кинематических переменных будет изучено до $Q^2 \geq \geq 1000 / \text{ГэВ} / \text{с}^2$.

5.3. Статистика для изучения заряженных токов

Оценки показывают, что за 500 часов набора данных для изучения каждой из реакций /4/ можно обеспечить 1-10%-ную точ-

ность измерений сечений для большей части кинематической плоскости.

Таким образом, проделанные оценки показывают, что выполнение намеченной программы возможно в разумные сроки. Более детальные оценки времени проведения эксперимента требуют учета конкретного расположения аппаратуры и моделирования условий набора данных на ЭВМ. Они, несомненно, могут и будут выполнены в ближайшем будущем.

В заключение следует отметить, что, имея в виду богатство и важность научной информации, получаемой в результате выполнения намеченной программы исследований, целесообразно включить мюонные эксперименты на УНК в число первоочередных и готовить их одновременно со строительством ускорителя.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 марта 1982 года.