



Поиск криптоэкзотического члена антидекуплета пентакварков N_{10}^-

(Предложение ИТЭФ-ПИЯФ)

И.Г. Алексеев, В.П. Канавец, Б.В. Морозов, В.В. Рыльцов,
Д.Н. Свирида

- ПЕРВАЯ ЧАСТЬ (В.П. Канавец)
 - Обоснование информации о N_{10}^-
 - Определение квантовых чисел \rightarrow эксперименты “formation” типа
 - чувствительность к N_{10}^-
- ВТОРАЯ ЧАСТЬ (Д.Н. Свирида)
 - Постановка экспериментов



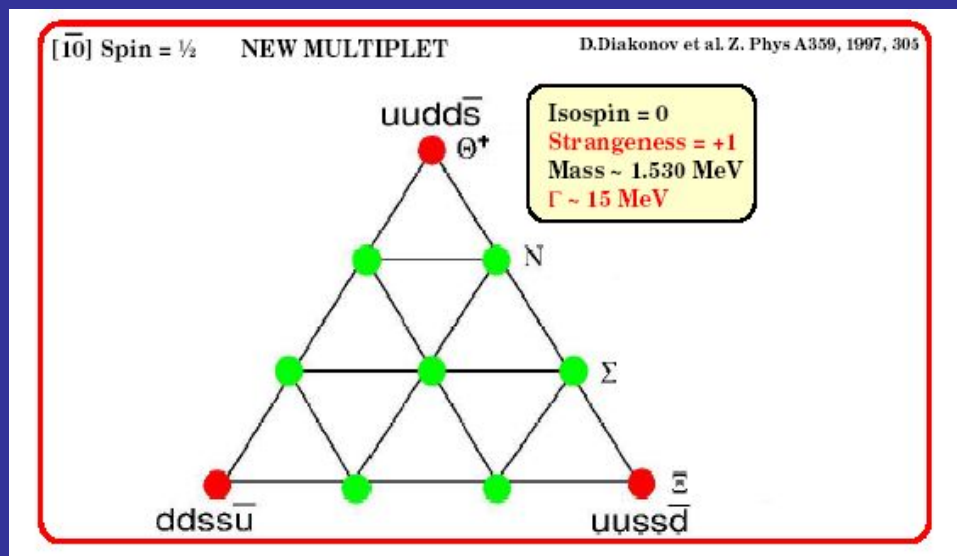
- Знаменательное событие последних лет в физике элементарных частиц - наблюдение экзотического бариона с положительной странностью θ^+
- В кварковых моделях этот барион должен состоять минимум из 5 кварков - $uudd\bar{s} \Rightarrow$ пентакварк.
- Особенность: масса 1540 МэВ и узкая ширина <15 МэВ были предсказаны до экспериментального наблюдения.
- Приятно, что ИТЭФ получил одно из первых подтверждений этой частицы.
- Ожидаемые последствия этого «потенциального открытия» очень серьезны:
 - прогресс в понимании динамики сильного взаимодействия;
 - новая теоретическая барионная спектроскопия;
 - новая экспериментальная барионная спектроскопия ультравысокого разрешения \Rightarrow значительный подъем теоретической и экспериментальной активности на этом поле: много экспериментальных работ на существующем материале с больших установок, предложения новых специальных экспериментов, например на нуклотроне в Дубне.



Свойства θ^+

ИТЭФ-2004

- Что такое θ^+ , каковы квантовые числа?
 - Наиболее популярная модель: принадлежность к экзотическому пентакварковому антидекуплету со спин/четностью $1/2^+$



- Подтверждена наблюдением $\Xi_{-}(1860)$ и $\Xi_{0}(1860)$
- Таблица данных о θ^+ и $\Xi(1860)$
- Нужно найти недостающие члены этого декуплета. **Поиск $N^*(1650)$ это и есть цель нашего предложения.**

$$N^*_{\frac{10}{10}}$$

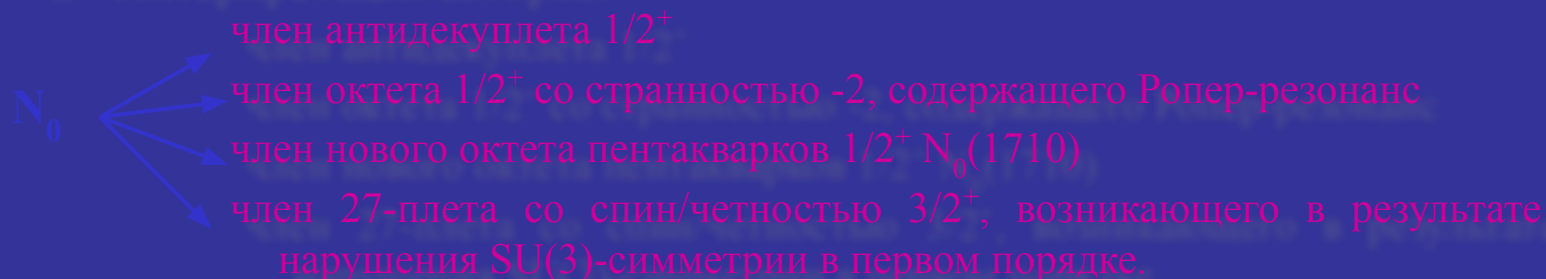


- Парциально-волновой анализ упругого $\pi^+p \rightarrow \pi^+p$ рассеяния. Группа GWU - Arndt et al.
 - В P_{11} -волну вносился резонанс с варьируемыми m , Γ , Γ_{el} . Сравнивалось χ^2 описания данных с учетом и без учета резонанса. В двух областях вблизи 1690 и вблизи 1730 МэВ обнаружено уменьшение χ^2 при включении резонанса $\Gamma_{el} < 0.5$ МэВ, $\Gamma < 30$ МэВ. Здесь резонанс или два узких резонанса могут присутствовать.

- Совсем новая работа из BNL (STAR Collaboration)

- Система $K_S^0 \Lambda$, инвариантная масса 1734, ширина $\Gamma \leq 4.6 \pm 2.4$ МэВ, статистическая значимость $S/\sqrt{B} = 5.15$, для полупериферических событий $S/\sqrt{B} = 19/\sqrt{10.6} = 5.93$

- Интерпретация авторов:





Наше предложение

ИТЭФ-2004

- Очевидный недостаток этих экспериментальных данных – отсутствие информации о квантовых числах резонанса (например, странность равна 0 или -2)
- Мы предлагаем искать N_{10}^- в экспериментах «FORMATION» типа, т.е. В прямом канале реакций:



- Тогда странность равна 0, а квантовые числа обнаруженной нерегулярности могут быть найдены стандартными средствами ПВА анализа.
- Масса резонанса и разрешение по массе определяются величиной начального импульса и его разбросом.
- Область поисков необходимо ограничить с самого начала
- Квантовые числа $1/2^+$ или $3/2^+$
- Диапазон масс 1600 - 1750 МэВ
- Ширина $\Gamma < 30$ МэВ, достижимый минимум Γ определяется экспериментальным разрешением по импульсу пучка (1-2) МэВ/с
- Ожидается низкая упругость, т.е. Γ_{el} / Γ резонанса \Rightarrow необходима высокая чувствительность эксперимента. Теоретические оценки $\Gamma_{el} = 2$ МэВ, $\Gamma_{K\Lambda} = 1$ МэВ, $\Gamma = (10-15)$ МэВ.



Немного формализма

ИТЭФ-2004

- Разложение амплитуды упругого рассеяния по парциальным волнам:

$$f_{el}(\theta, E) = \frac{1}{2ik} \sum_{l=0}^{l_{max}} (2l+1)(\eta_l \cdot e^{2i\delta_l} - 1) P_l(\cos\theta)$$

δ_l - фаза l-волны, η_l - упругость l-волны.

Парциальная амплитуда:

$$f_l = \frac{\eta \cdot e^{2i\delta} - 1}{2ik}$$

вблизи резонанса можно записать $f_l(E) = f_l^B + f_l^r(E)$, где f_l^B слабо зависит от энергии. Парциальное сечение $\sigma_l = 4\pi(2l+1)|f_l^B + f_l^r|^2$

ВW-резонанс:

Упругое

$$f_l^r(E) = -\frac{e^{i\varphi} \Gamma_{el}}{2k[(E - E_r) + i\Gamma/2]}$$

$$f_l^r(E_r) = i \frac{e^{i\varphi} X}{k}, \quad X = \frac{\Gamma_{el}}{\Gamma} \text{ - упругость}$$

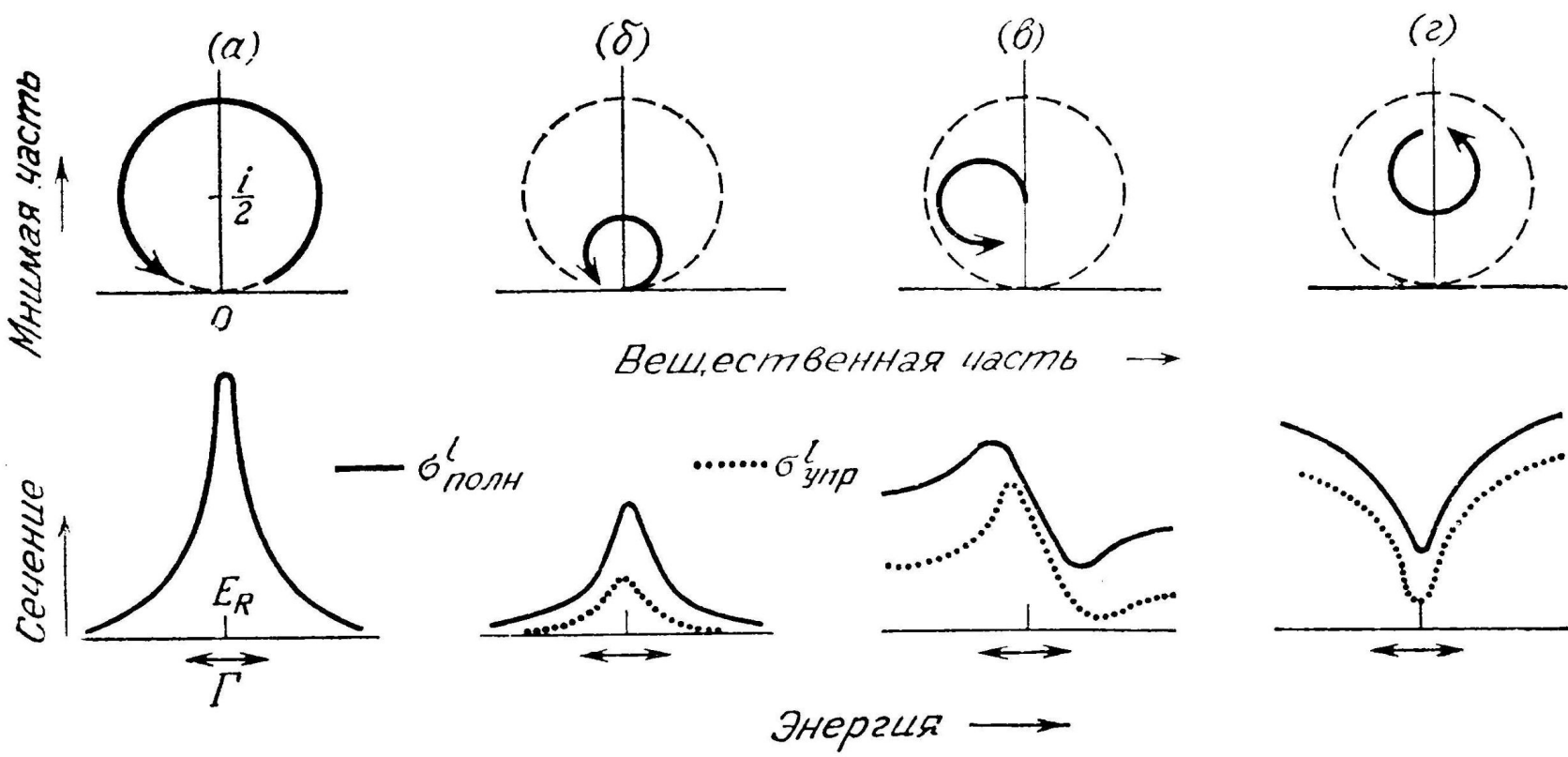
Реакция $\pi\pi \rightarrow K\Lambda$

$$f_l^r(E) = -\frac{e^{i\varphi} \sqrt{\Gamma_{el} \Gamma_{K\Lambda}}}{2\sqrt{kk_{K\Lambda}} [(E - E_r) + i\Gamma/2]}$$

$$f_l^r(E_r) = i \frac{e^{i\varphi} \sqrt{X \cdot BR}}{\sqrt{kk_{K\Lambda}}}, \quad BR = \frac{\Gamma_{K\Lambda}}{\Gamma} \text{ - брэнчинг}$$



Что будет наблюдаться в упругом сечении и сечении реакции?



Фиг. 20.6. Четыре возможных резонанса, каждый из которых соответствует изолированному полюсу в точке $E_R - i\Gamma/2$.

Вверху показано поведение упругих амплитуд; внизу — соответствующие сечения.

Не обязательно пик - могут быть нерегулярности другого типа.



Вклад резонанса в P_{11} -волне в сечение в его максимуме при $m_r = 1.7$ ГэВ/с

Упругое

$$\sigma_{el}^r = (2l + 1) \cdot \frac{4\pi}{k^2} \cdot X^2$$

$$X = 0.05$$

$$\sigma_{el}^r = 0.12 \text{ mb}, \sigma_{el} \approx 10 \text{ mb}$$

$$\sigma_{el}^r / \sigma_{el} = 1.2\%$$

⇒ чувствительность очень мала

Реакция ($k = 0.56$ ГэВ/с, $k_{K\Lambda} = 0.2$ ГэВ/с)

$$\sigma_{K\Lambda}^r = (2l + 1) \cdot \frac{4\pi}{kk_{K\Lambda}} \cdot X \cdot BR$$

$$X = 0.01, BR = 0.1$$

$$\sigma_{K\Lambda}^r = 0.13 \text{ mb}, \sigma_{K\Lambda} = 0.9 \text{ mb}$$

$$\sigma_{K\Lambda}^r / \sigma_{K\Lambda} = 15\%$$

⇒ превосходная чувствительность

Измерение полного сечения реакции ⇒ хороший способ.

Измерение полного упругого сечения ⇒ плохой способ.

Следовательно, в упругом рассеянии надо измерять дифференциальное сечение. В этом случае резонансный эффект будет определяться интерференцией P_{11} -амплитуды со всеми другими участвующими волнами, т.е. зависеть от X , а не от X^2 . Можно выбрать такие угловые интервалы, где чувствительность к P_{11} -волне велика. Существующие ПВА позволяют получить оценку чувствительности. В избранном нами углом интервале резонанс будет проявляться как

$$\Delta \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) / \frac{d\sigma}{d\Omega} \approx X$$



Ожидаемые результаты

ИТЭФ-2004

Надежно перекрываемый интервал параметров резонанса:

	<i>Упругое рассеяние</i>	<i>Реакция</i>
Ширина	(2-20) МэВ	(2-20) МэВ
Упругая ширина, Γ_{el}	>0.1 МэВ	>0.02 МэВ
Упругость, X	>0.05	>0.01

Перекрываем ожидаемые экспериментально и теоретически параметры.

Важное замечание

Отбор событий в планируемой установке основан на использовании угловых корреляций и геометрии событий. Поэтому предельно важно иметь минимальное многократное рассеяние на пути всех участвующих частиц \Rightarrow легкие камеры из материалов с большой радиационной длиной – залог успеха эксперимента.



Эксперимент по поиску ПЕНТАКварка в Упругом Рассеянии (и Реакции $\pi^- p \rightarrow K_S^0 \Lambda$)

- ✓ Если бы исчезающее погибало, [переходя] в несуществующее, то все вещи были бы уже погибшими...

Эпикур (341--270 до н.э.), из «Письма к Геродоту»

- ✓ Ложь и ошибка всегда лежат в прибавлениях, делаемых мыслью [к чувственному восприятию] относительно того, [что ожидает] подтверждения или неопровержения, но что потом не подтверждается [или опровергается].

Там же, <по поводу пентакварка увиденного на STARe > (Прим. ред.)

- ✓ Куй железо не отходя от кассы

М. Слободской, Я. Костюковский, Л. Гайдай, «Бриллиантовая рука»



- Парциальная амплитуда :

$$f_l = \frac{\eta_l \cdot e^{2i\delta_l} - 1}{2i}$$

- В предположении $\Gamma_{EL}/\Gamma \ll 1$
- Изменение упругости η в резонансе :

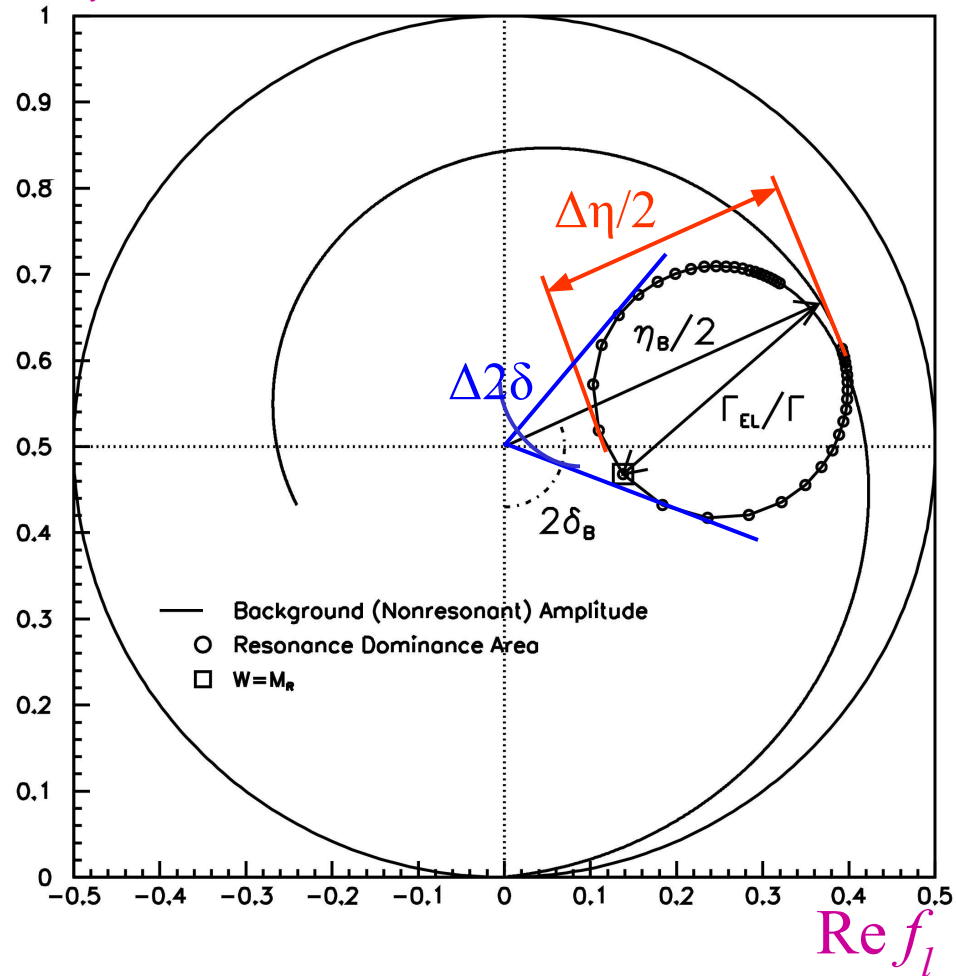
$$\Delta\eta_l \approx 2 \cdot \left(\frac{\Gamma_{EL}}{\Gamma} \right)$$

- Изменение фазы δ в резонансе :

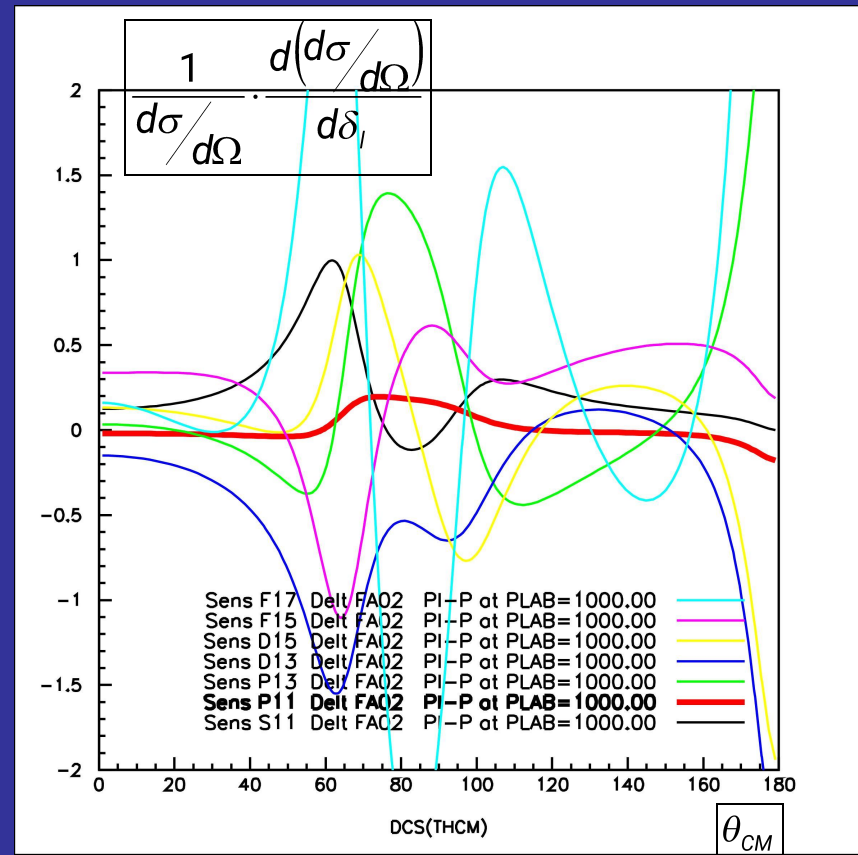
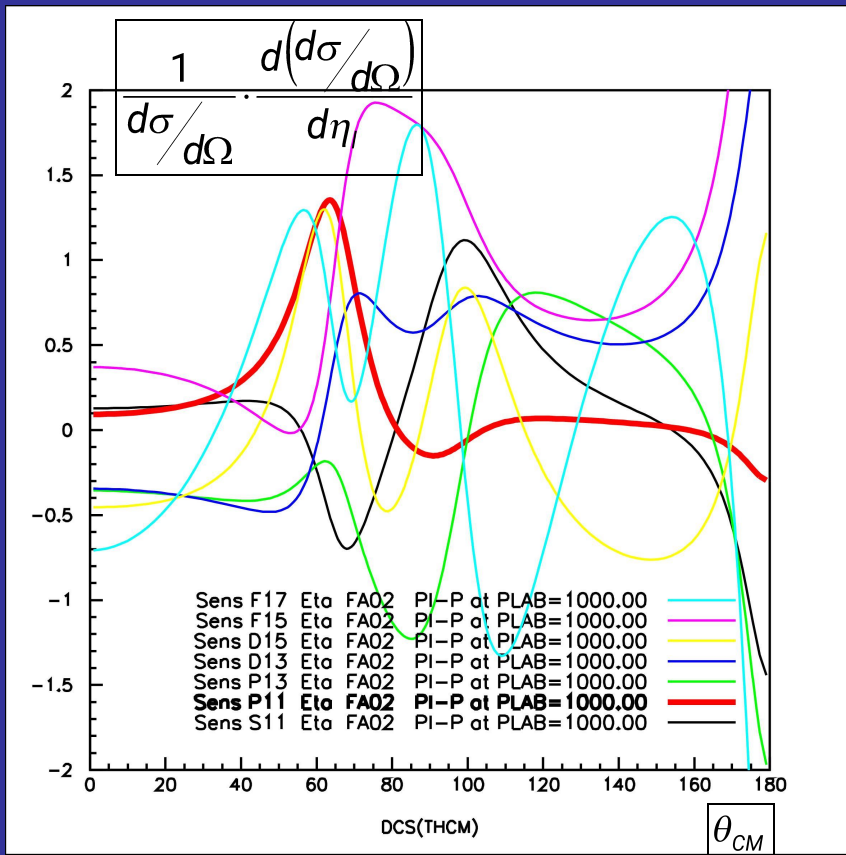
$$\Delta\delta_l \approx \frac{1}{\eta_{IB}} \cdot \left(\frac{\Gamma_{EL}}{\Gamma} \right)$$

$\text{Im } f_l$

Диаграмма Аргана для амплитуды f_l



$\text{Re } f_l$

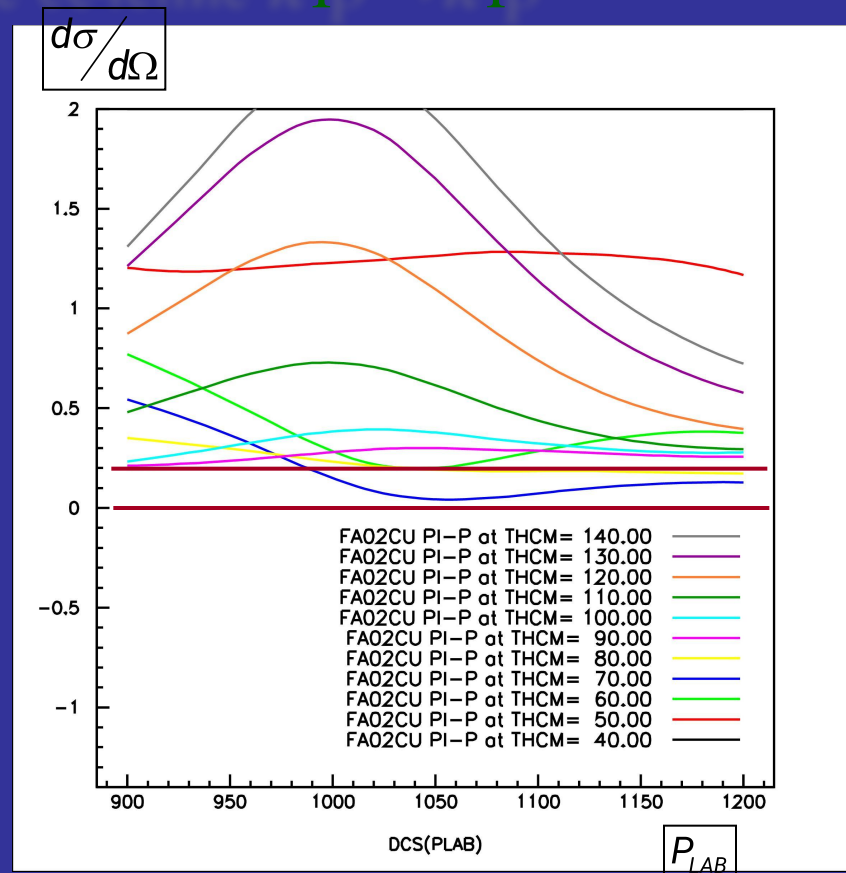
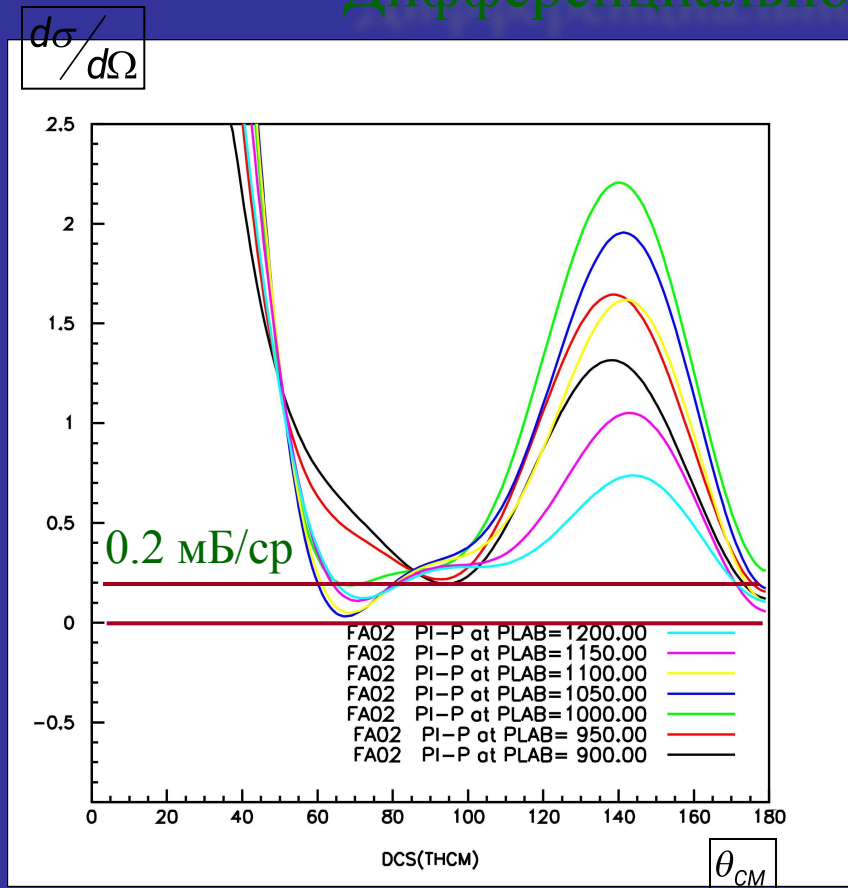


4 Чувствительность дифференциального сечения к $\Delta\eta (P_{11}) \approx 1.5$, т.е. при $\Gamma_{EL}/\Gamma \approx 5\%$ изменение сечения составит 7--15%

4 Чувствительность к $\Delta\delta (P_{11}) \approx 0.2$, т.е. каким бы ни было изменение фазы в резонансе, его влияние на сечение мало



Дифференциальное сечение $\pi^-p \rightarrow \pi^-p$



- ✓ Величина сечения, на которую производился расчет статистики -- 0.2 мБ/ср
- ✓ Зависимость сечения от импульса плавная по сравнению с размером ожидаемой структуры в несколько МэВ/с

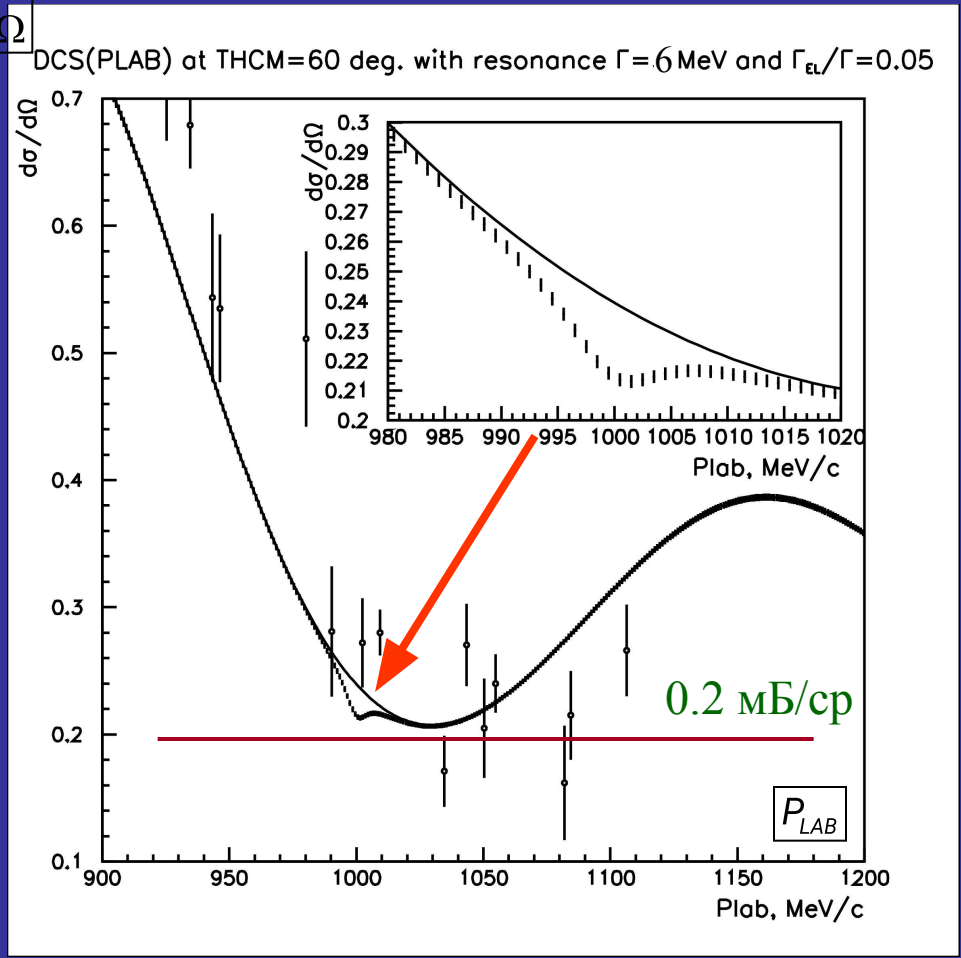


Ожидаемый эффект

Дифференциальное сечение $\pi^- p \rightarrow \pi^- p$

- Существующие экспериментальные данные не позволяют выделить узкую структуру
- Предлагается измерить $d\sigma/d\Omega$ со статистической точностью 0.5% и шагом по массе 0.5 МэВ в диапазоне углов 40--120° с.ц.м. и в диапазоне импульсов 900--1200 МэВ/с ($M_R = 1610--1770$ МэВ)
- При фиксированной настройке импульса пучка можно охватить интервал шириной 20 МэВ по массе, затем смещать импульс шагами по 10 МэВ

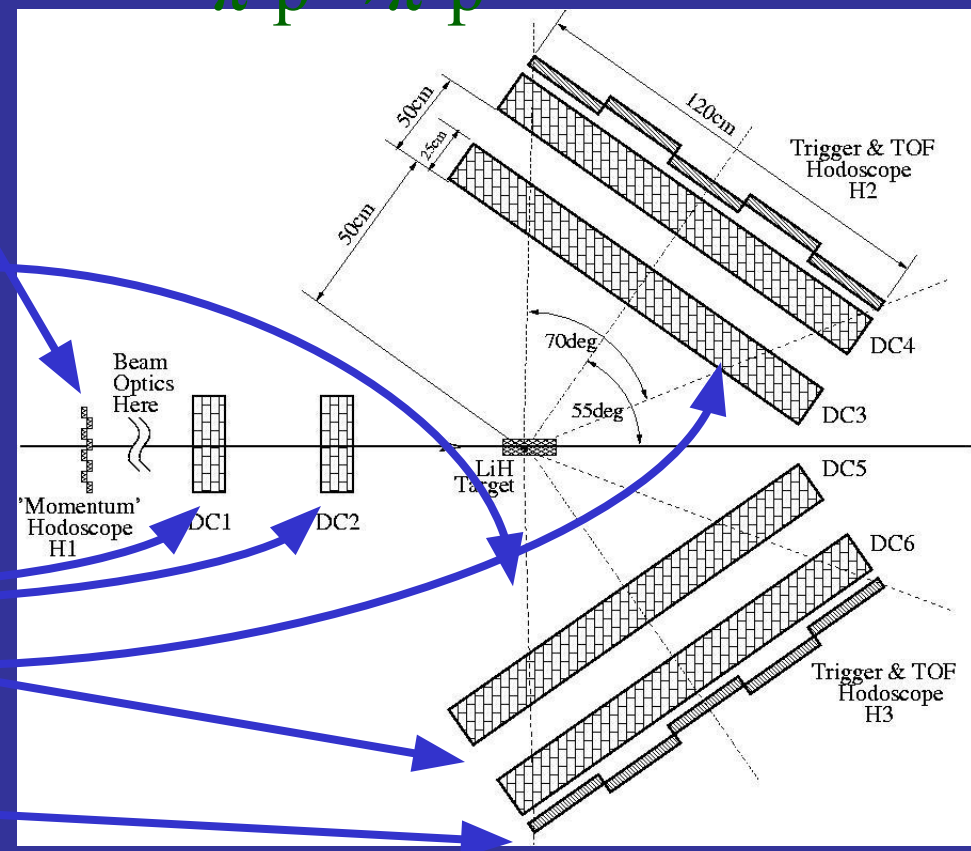
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}$$





- Пионный пучок ускорителя У-10 ИТЭФ с большим углом поворота (321, 313 или 211), нитевая или сепараторная мишень в кольце
- «Импульсный» годоскоп Н1 в первом фокусе пучка, разрешение по импульсу пучка $\pm 0.1\%$, полная ширина $\pm 2\%$
- Жидководородная мишень толщиной 25 см (В.В.Куликов) или 16 см (ПИЯФ)
- Пучковые пропорциональные или дрейфовые камеры DC1, DC2 для трекинга налетающих пионов
- Система дрейфовых камер DC3--DC6 для регистрации рассеянных частиц
- Система триггерных сцинтилляционных счетчиков Н2, Н3 с возможностью измерения времени пролета (идентификация протона отдачи)
- Измерение полей поворотных магнитов с точностью лучше 0.1% (ЯМР)

$\pi^- p \rightarrow \pi^- p$





- Перекрытие интервала инвариантных масс 1610--1770 МэВ с разрешением ≤ 1 МэВ
 - Статистическая обеспеченность результата, достаточная для регистрации резонанса с упругостью $\leq 5\%$ и относительным бранчингом $\leq 10\%$ для КЛ распада:
 - Пионный пучок ≥ 200 тыс. за сброс
 - Большой аксептанс установки (захват 1.7 ср для $\pi^-p \rightarrow \pi^-p$)
 - Водородная мишень большой толщины
 - Долговременная стабильность аппаратуры (с точностью $\sim 1\%$)
 - Высокая приборная эффективность ($\geq 99\%$)
 - Измерение полей поворотных магнитов + TOF контроль импульса пучка
 - Возможность внутреннего контроля результатов (crosscheck) \Rightarrow симметричная установка, измерения в областях низкой чувствительности
 - Надежное выделение искомой реакции и подавление фона посторонних процессов
 - Высокая координатная точность трековых детекторов (не хуже 0.15 мм)
 - Минимальное количество вещества на пути как первичных, так и вторичных частиц (потери энергии и многократное рассеяние)
- \Rightarrow Основной элемент трековой системы -- дрейфовые камеры с проволочными потенциальными плоскостями, размер рабочей зоны 800x1200 мм², расстояние дрейфа 10 мм, 3 или 6 плоскостей в блоке (X-, Y- и стереоплоскость)**



Реакция $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$

ИТЭФ-2004

Преимущества реакции - чрезвычайная привлекательность для поиска $N_{\bar{10}}$

- ❖ Чистое изотопическое состояние 1/2
- ❖ Заметный порог рождения $K\Lambda$, облегчающий изучение резонансов с небольшим спином и большой массой, высокая чувствительность сечения к резонансам
- ❖ Большое полное сечение (~ 0.9 мБарн) в рассматриваемом интервале энергий.
- ❖ Доля заряженной моды составляет 22% от полного сечения процесса
- ❖ Более низкий порог рождения $K^0\Lambda$, чем в конкурирующем процессе с $K^0\Sigma^0$
- ❖ Высокая анализирующая способность $\Lambda \rightarrow \pi^- p$, асимметрия слабого распада $\alpha=0.642 \Rightarrow$ можно измерять нормальную поляризацию P в том же эксперименте

Специфика кинематики реакции

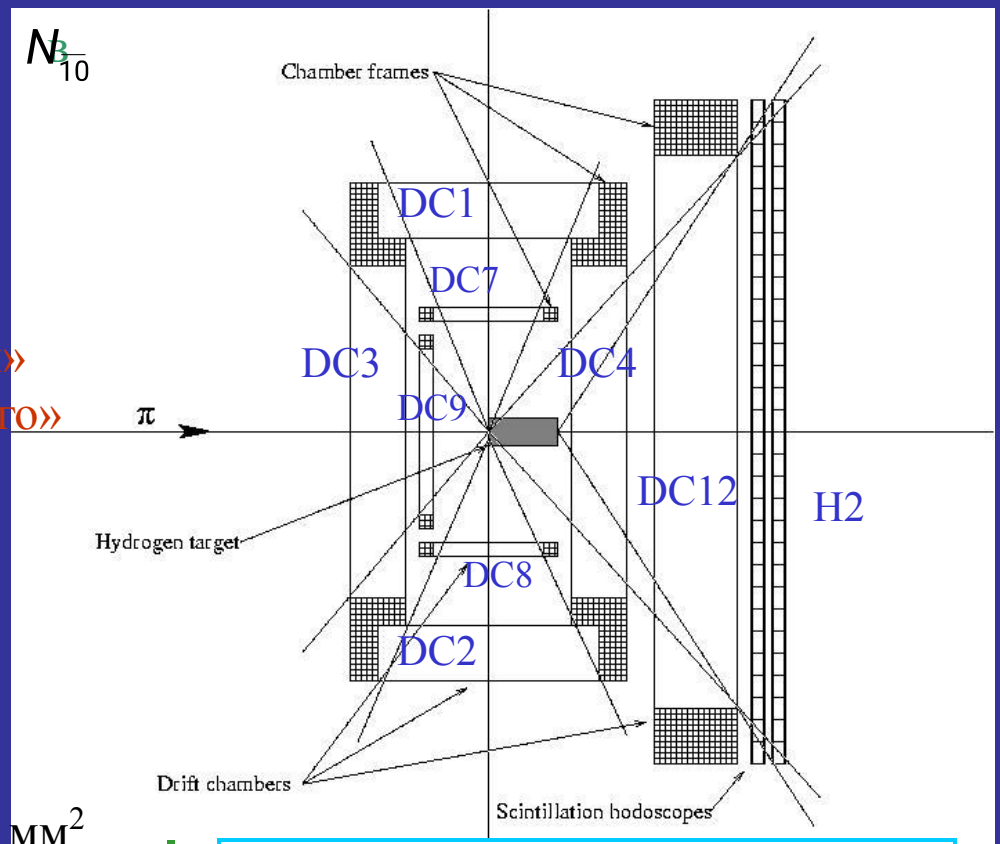
- ◆ Необходимо регистрировать 4 заряженные частицы в конечном состоянии ($K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $\Lambda \rightarrow \pi^- p$).
- ◆ В большинстве случаев реакции протон и пион от распада Λ вылетают в переднюю полусферу, однако углы вылета пиона могут быть большими относительно импульса падающей частицы
- ◆ Пионы от распада K^0 имеют длинные хвосты угловых распределений в область углов вбок и назад.
- ◆ Идентификация единственного протона существенно необходима для выделения реакции и подавления фона других неупругих реакций



Установка для $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$

ИТЭФ-2004

- Расширение установки для поиска упругом рассеянии.
- Та же пучковая часть и мишень
- Те же базовые трековые камеры DC1--DC6 $800 \times 1200 \text{ мм}^2$
- Необходимость почти «герметичной» установки для достижения «разумного» акцептанса 20-30%
- Внутренние камеры DC7--DC11 ($500 \times 700 \text{ мм}^2$) и широкоформатная DC12 ($1400 \times 2000 \text{ мм}^2$)
- Двухкоординатный триггерный и времяпролетный годоскоп H2, необходимая гранулярность $100 \times 100 \text{ мм}^2$ (в центральной области $1000 \times 1000 \text{ мм}^2$)
- Возможна оптимизация количества и расположения детекторов. Так, удаление DC3 и DC9 уменьшает акцептанс на 15%

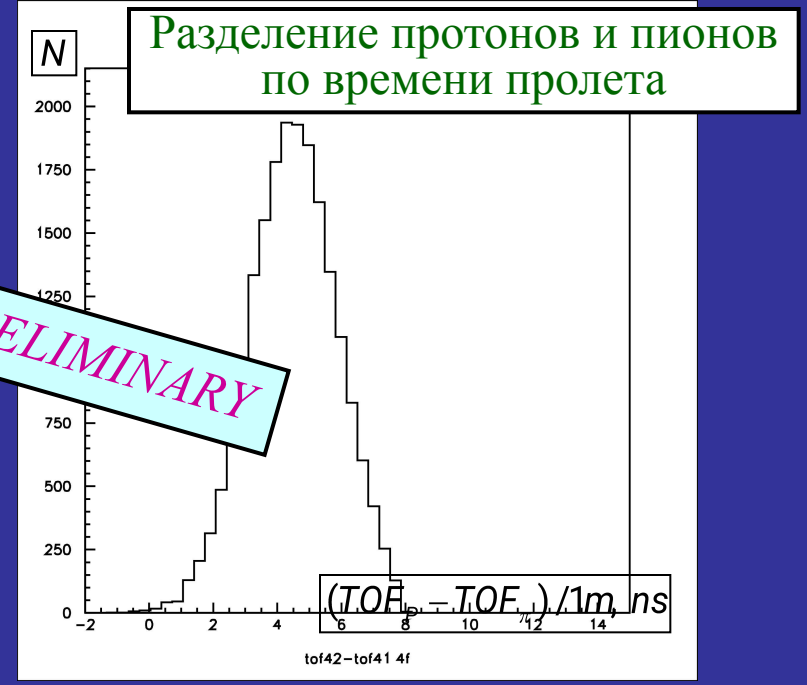
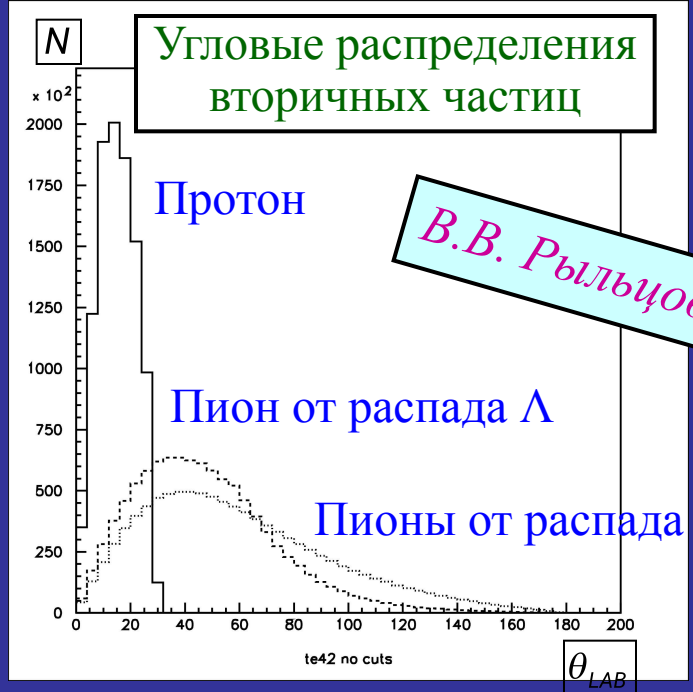


- Основные типы событий:
- 4 частицы вперед
 - протон и 2 пиона вперед, один пион вбок или вверх (вниз).



Предварительное моделирование

ИТЭФ-2004



В.В. Рыльцов, PRELIMINARY

- ◉ Возможна эффективная регистрация $\pi^- p \rightarrow K^0_S \Lambda$ при $-1 < \cos\theta_{CM} < +1$ на одной и той же установке без изменения ее геометрии в исследуемом энергетическом диапазоне.
- ◉ Имеется существенное различие в кинематике вторичных частиц для реакций с рождением $K^0 \Lambda$ и $K^0 \Sigma^0$ и ($\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma \rightarrow \pi^- p \gamma$), что позволяет эффективно использовать вероятностные методы оценки гипотез и разделения событий.
- ◉ Ограниченное пространственное и угловое распределение вторичных протонов (в направлении вперед) и их импульсный диапазон позволит эффективно отделять их от почти релятивистских пионов, используя времяпролетную методику.



Упругое $\pi^-p \rightarrow \pi^-p$ рассеяние

❖ 2 угловых интервала в области чувствительности (всего -- 4-5), 285 импульсных интервалов по 1 МэВ/с (0.56 МэВ по массе в диапазоне (1610–1770) МэВ)

❖ статистическая точность 0.5%, 10σ для эффекта 5%

⇒ Необходимая статистика $4 \cdot 10^4 \times 570 \approx 23 \cdot 10^6$

❖ дифференциальное сечение 0.2 мБарн/ср, телесный угол захвата установки 1.7 ср

❖ толщина мишени $0.071 \text{ г/см}^3 \times 25 \text{ см} = 1.78 \text{ г/см}^2$

❖ интенсивность пучка $50 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ ($200 \cdot 10^3$ за цикл У-10, 15 ц/мин),

❖ эффективность (ускоритель + установка) 0.7

⇒ Скорость счета упругих событий 18.7 с^{-1} или 75 за цикл ускорителя.

⇒ Время набора: $23 \cdot 10^6 / (18.7 \times 0.7) = 1.75 \cdot 10^6 \text{ с}$ или 20 суток, т.е. 2 10-дневных сеанса.

В случае обнаружения узкого резонансного эффекта потребуется еще один сеанс такой же продолжительности для получения подробной угловой зависимости сечения для определения квантовых чисел резонанса.

Реакция $\pi^-p \rightarrow \text{КЛ}$

❑ статистическая точность 1%, 10σ для эффекта 10% в таком же количестве импульсных интервалов

⇒ Необходимая статистика $(160/0.56) \times 10^4 \approx 2.9 \cdot 10^6$

❑ полное сечение реакции 0.9 мБарн, доля заряженной моды 22%

❑ акцептанс для событий распадов в заряженной моде 20%

⇒ Скорость счета 125 тыс. событий $\pi^-p \rightarrow \text{КЛ}$ в сутки

⇒ Время набора: 23 дня или 2 двенадцатидневных сеанса



Трехлетний план

ИТЭФ-2004

Приблизительный временной график с момента начала финансирования

	...→	Год 1	Год 2	Год 3	Далее
Планирование эксперимента, обсуждение, создание коллаборации, разработка технического проекта, получение финансирования	▨				
Создание установки для поиска N_{70} в упругом рассеянии, изготовление первых 4 блоков дрейфовых камер и разработка электроники для них, настройка пучка, восстановление водородной мишени, изготовление триггерных годоскопов		▨			
Набор статистики по упругому рассеянию, начало обработки данных			▨		
Изготовление дополнительных дрейфовых камер, необходимых для расширения установки для исследования реакции $\pi^- p \rightarrow K \Lambda$, двухкоординатного сцинтилляционного годоскопа			▨		
Обработка и публикация данных упругого рассеяния				▨	
Набор статистики по реакции $\pi^- p \rightarrow K \Lambda$, начало обработки данных				▨	
Обработка и публикация данных $\pi^- p \rightarrow K \Lambda$					▨

Пятилетку -- в три года !!!



- ❑ Мировое научное сообщество проявляет большой интерес к недавно открытым экзотическим частицам.
- ❑ В результате, многочисленные теоретические модели получили мощный толчок для развития, требуя экспериментального подтверждения или опровержения.
- ❑ Пионные пучки ИТЭФ идеально подходят для экспериментального поиска нестранного криптоэкзотического члена антидекуплета.
- ❑ На настоящий момент в мире отсутствуют пучки, на которых можно было бы поставить аналогичный эксперимент.
- ❑ Экспериментальные условия чрезвычайно благоприятны для постановки предлагаемого эксперимента: большие сечения и чувствительности к эффекту, малые затраты ускорительного времени.
- ❑ В случае обнаружения резонансного состояния можно определить не только его массу, но и ширину (или дать оценку на нее на порядок лучшую, чем для всех уже открытых членов антидекуплета), а также квантовые числа (не сделано ни для одного из “пентакварков”) и соотношение мод распада по упругому каналу и каналу КЛ.
- ❑ Если резонансный эффект не будет обнаружен ни в одном из двух каналов реакции, предлагаемых для исследования, то такой отрицательный результат также чрезвычайно важен для проверок и построения теоретических моделей.



- Данные по дифференциальному сечению в обоих процессах и нормальной поляризации в $\pi^-p \rightarrow K\Lambda$ имеют большую самостоятельную ценность для ПВА, поскольку предполагаемая точность на порядок превосходит все имеющиеся экспериментальные данные, а шаг по импульсу налетающего пиона в 20 раз меньше, чем в уже выполненных работах.
- Предварительное обсуждение идеи эксперимента с некоторыми теоретиками показало большую заинтересованность в его результатах, а также обоснованность самой идеи. Среди различных экспериментальных групп ИТЭФ и ПИЯФ также был проявлен оживленный интерес к предлагаемому проекту, и выражена готовность участия в нем как существующим оборудованием, так и персоналом.
- Коллаборация ИТЭФ-ПИЯФ, завершающая в настоящее время цикл исследований на установке СПИН в ИТЭФ, имеет многолетний опыт постановки экспериментов подобного рода, обработки и анализа получаемых в них данных. Коллектив этой группы мог бы стать основой для формирования новой коллаборации для выполнения предлагаемого проекта.
- Предлагаемый эксперимент настолько прост и недорог (по мировым меркам), а интерес к проблеме настолько велик, что, в случае публикации идеи его постановки, наверняка найдется иностранная коллаборация, готовая выполнить его в такие же или более сжатые сроки. Таким образом, для успешного выполнения эксперимента необходима его постановка за минимальное время, что требует существенной концентрации финансовых затрат и людских ресурсов.