



# Поиск криптоэкзотического члена антидекуплета пентакварков $N_{10}^-$

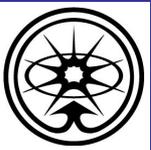
(Предложение ИТЭФ-ПИЯФ)

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



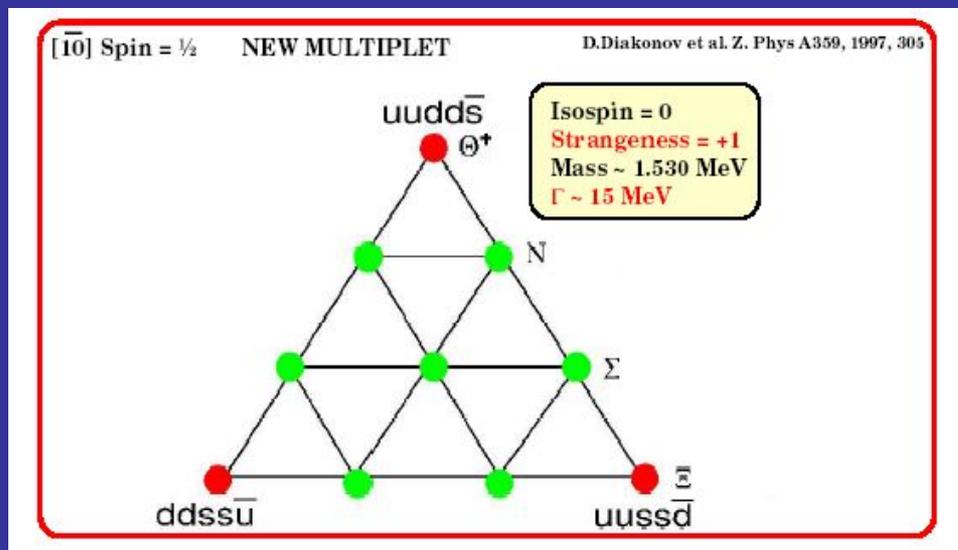
- Знаменательное событие последних лет в физике элементарных частиц - наблюдение экзотического бариона с положительной странностью  $\theta^+$
- В кварковых моделях этот барион должен состоять минимум из 5 кварков -  $uudd\bar{s} \Rightarrow$  пентакварк.
- Особенность: масса 1540 МэВ и узкая ширина  $<15$  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 $\theta^+$

ИТЭФ-2004

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



- Подтверждена наблюдением  $\Xi_{\bar{c}}$  (1860) и  $\Xi_0$  (1860)
- Таблица данных о  $\theta^+$  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  $m$ ,  $\Gamma$ ,  $\Gamma_{el}$ . Сравнивалось  $\chi^2$  описания данных с учетом и без учета резонанса. В двух областях вблизи 1690 и вблизи 1730 МэВ обнаружено уменьшение  $\chi^2$  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:
    - член антидекуплета  $1/2^+$
    - член октета  $1/2^+$  со странностью -2, содержащего Ропер-резонанс
    - член нового октета пентакварков  $1/2^+ N_0(1710)$
    - член 27-плета со спин/четностью  $3/2^+$ , возникающего в результате нарушения SU(3)-симметрии в первом порядке.

$N_0$





## 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  $\Gamma$  определяется экспериментальным разрешением по импульсу пучка (1-2) МэВ/с
- Ожидается низкая упругость, т.е.  $\Gamma_{el} / \Gamma$  резонанса  $\Rightarrow$  необходима высокая чувствительность эксперимента. Теоретические оценки  $\Gamma_{el} = 2$  МэВ,  $\Gamma_{K\Lambda} = 1$  МэВ,  $\Gamma = (10-15)$  МэВ.



- Разложение амплитуды упругого рассеяния по парциальным волнам:

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

$\delta_l$  - фаза l-волны,  $\eta_l$  - 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

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

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

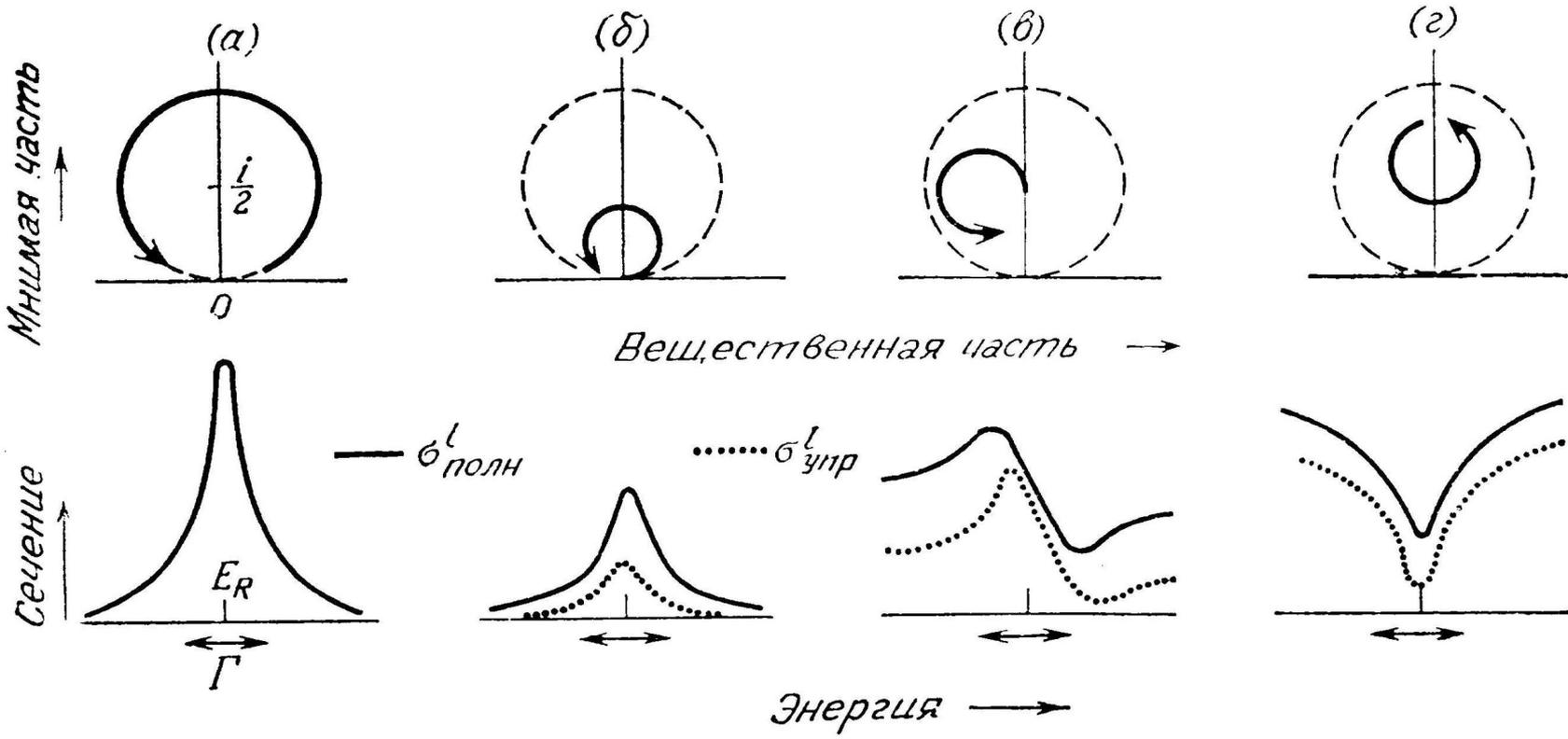
### Реакция $\pi\pi \rightarrow K\Lambda$

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

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



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, $\Gamma_{el}$	$>0.1$ 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 :

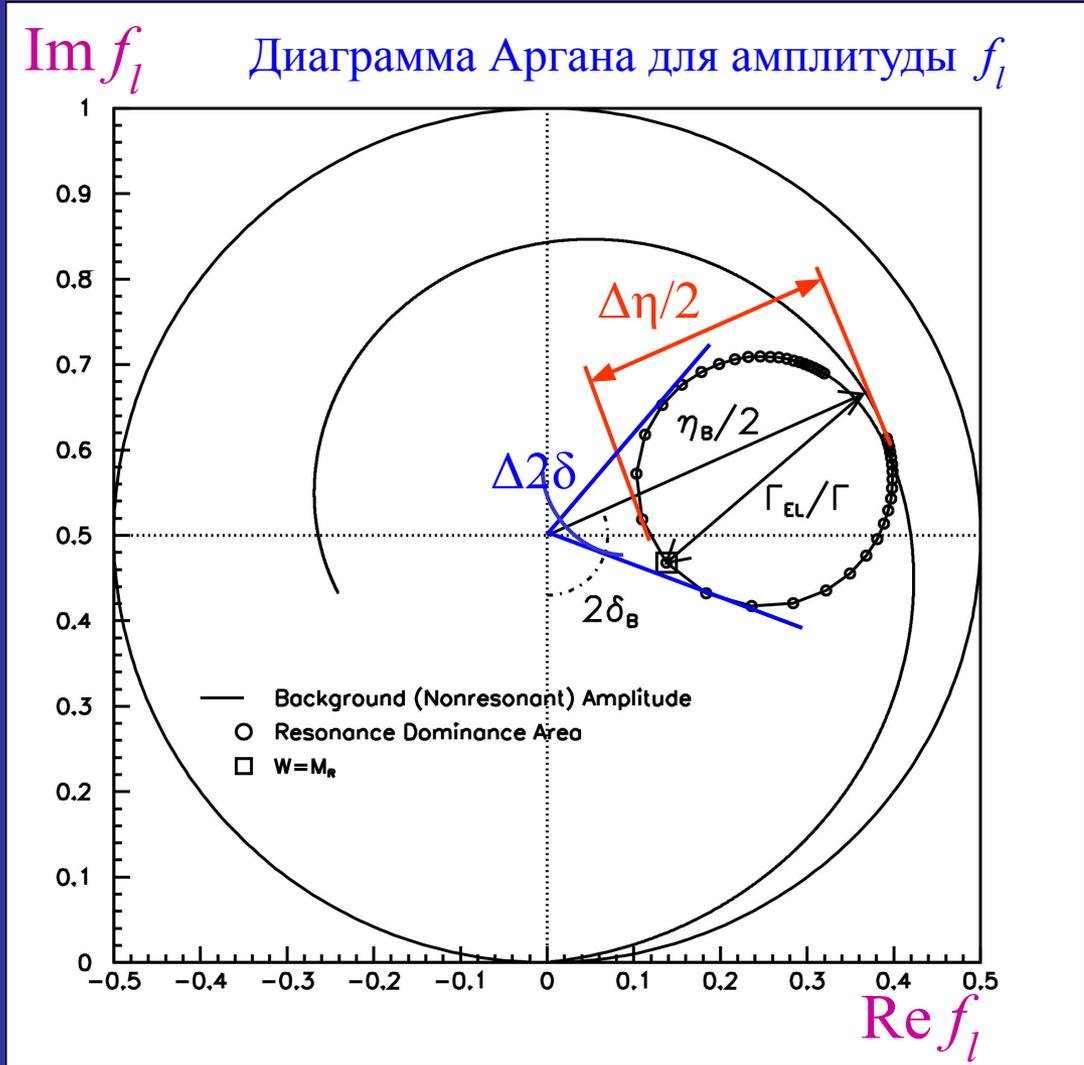
$$f_l = \frac{\eta_l \cdot e^{2i\delta_l} - 1}{2i}$$

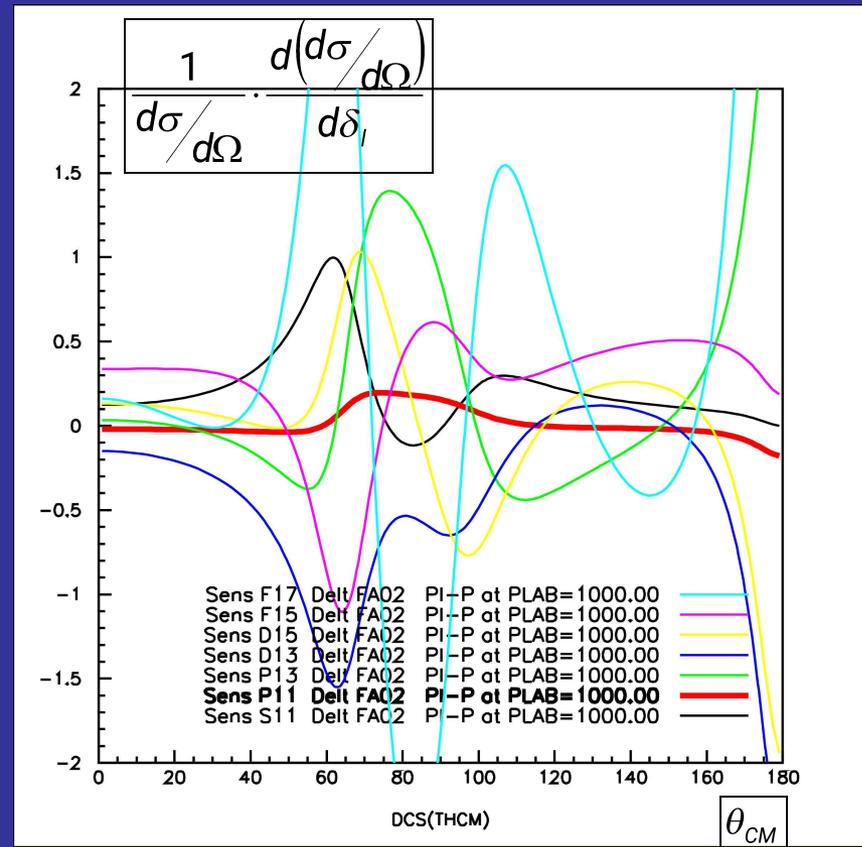
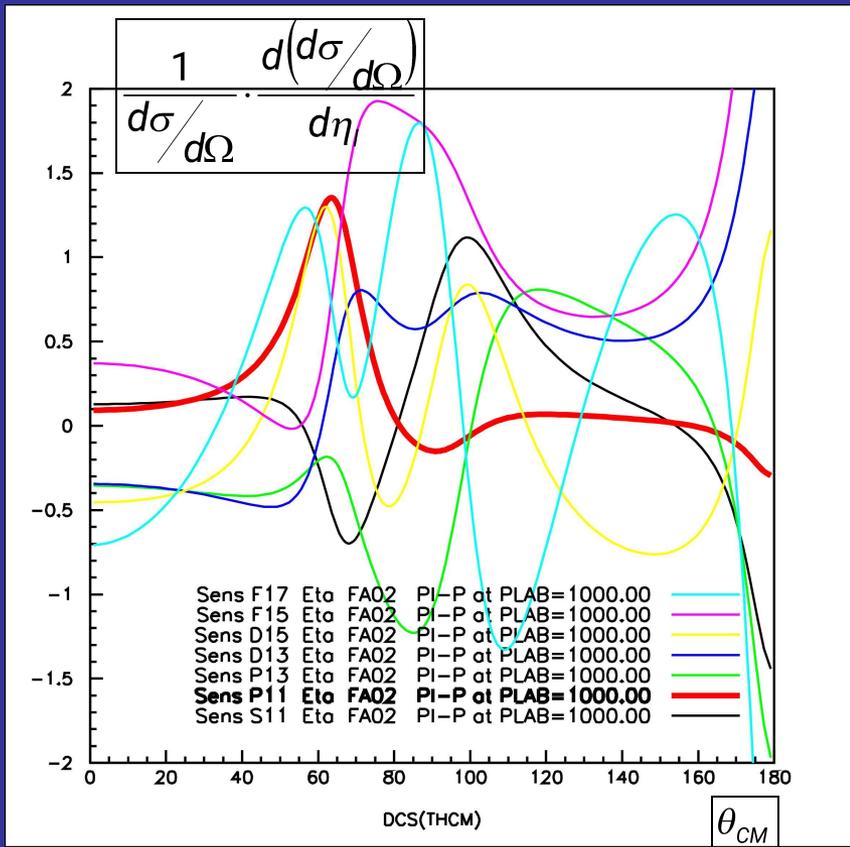
- В предположении  $\Gamma_{EL}/\Gamma \ll 1$
- Изменение упругости  $\eta$  в резонансе :

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

- Изменение фазы  $\delta$  в резонансе :

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



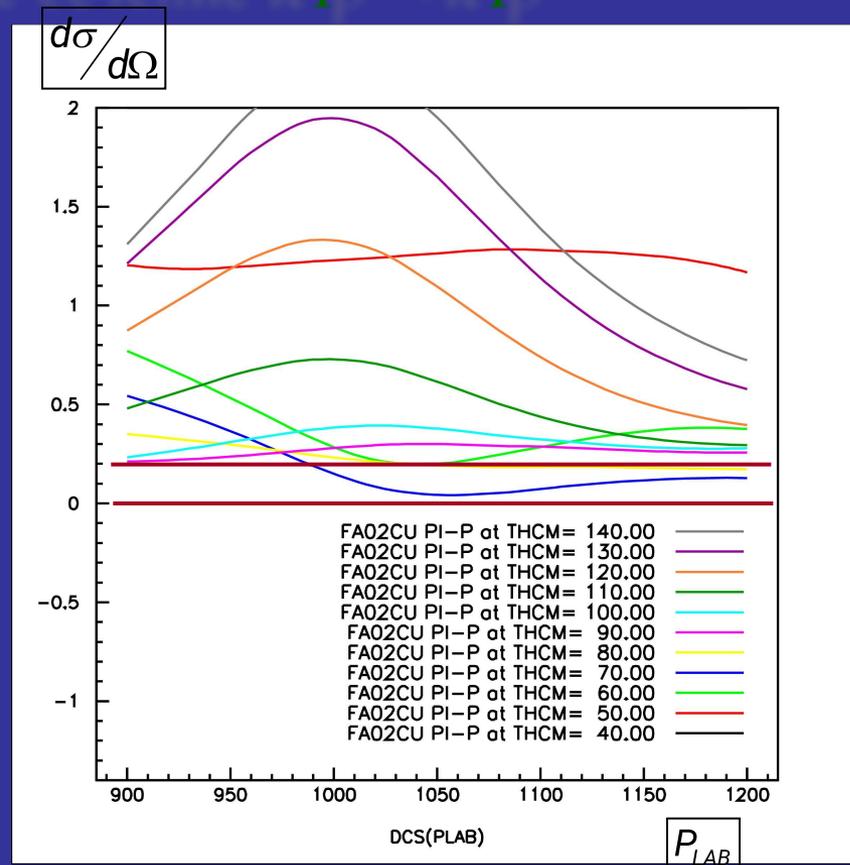
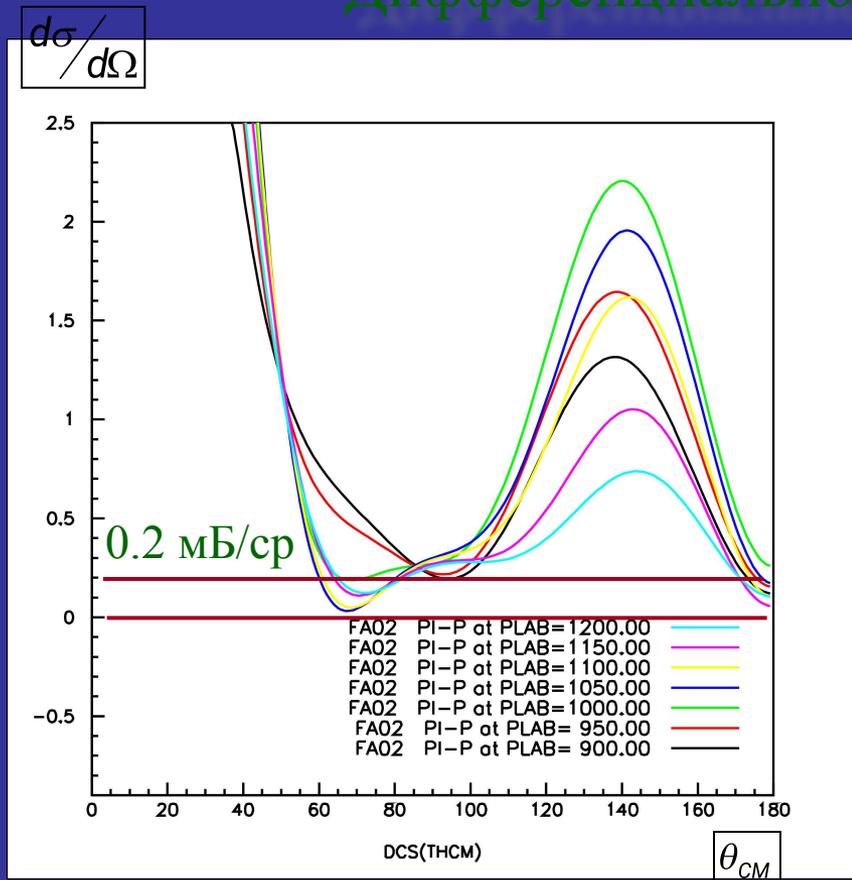


4 Чувствительность дифференциального сечения к  $\Delta\eta (P_{11}) \approx 1.5$ , т.е. при  $\Gamma_{EL}/\Gamma \approx 5\%$  изменение сечения составит 7--15%

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

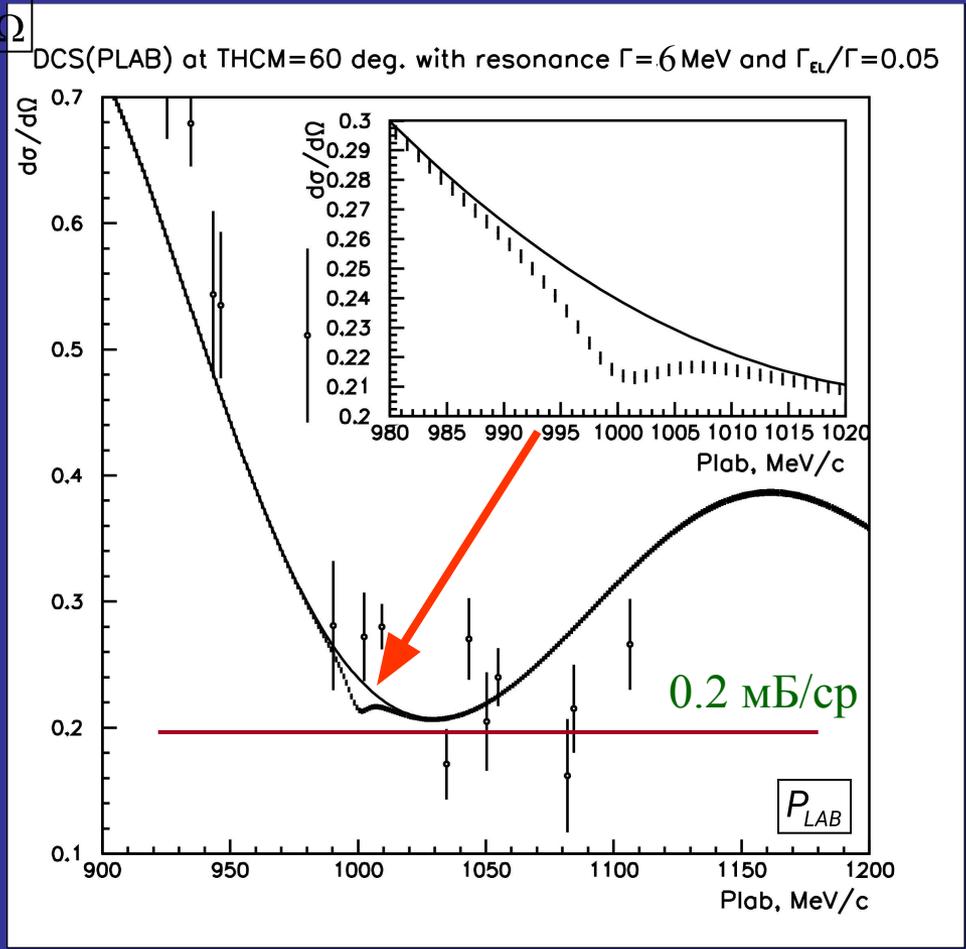


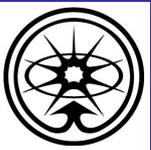
# Ожидаемый эффект

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

- Существующие экспериментальные данные не позволяют выделить узкую структуру
- Предлагается измерить  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  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

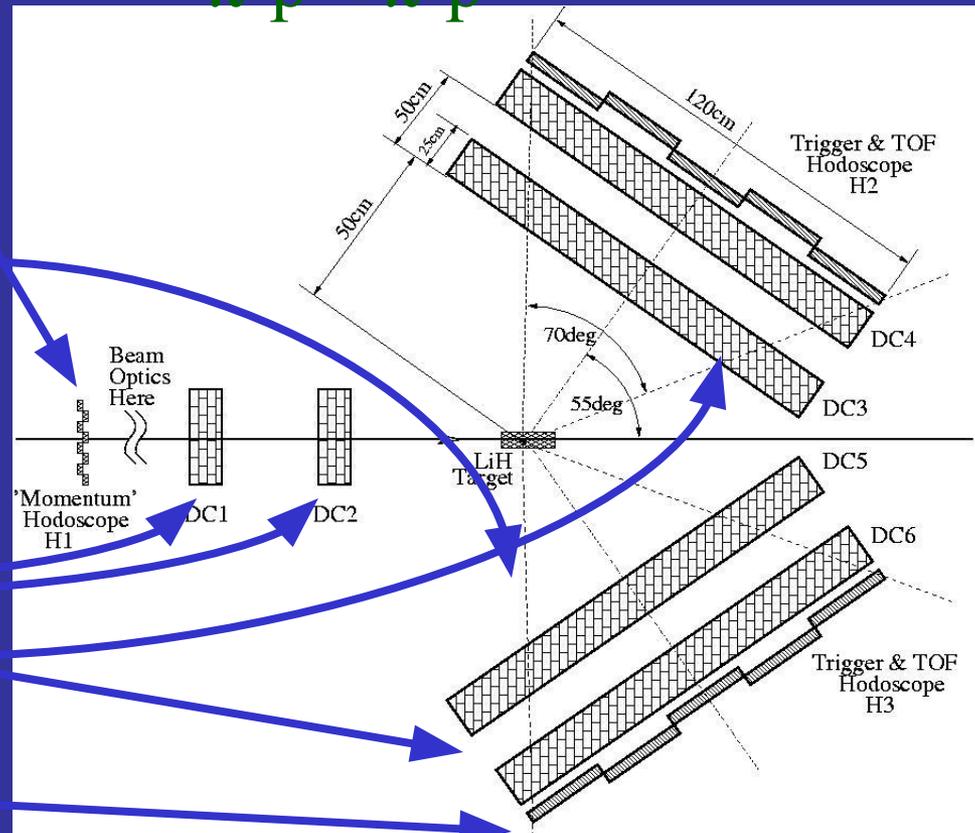
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}$$





- 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  $\leq 1$  МэВ
  - Статистическая обеспеченность результата, достаточная для регистрации резонанса с упругостью  $\leq 5\%$  и относительным бранчингом  $\leq 10\%$  для КЛ распада:
    - Пионный пучок  $\geq 200$  тыс. за сброс
    - Большой акцептанс 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 мм<sup>2</sup>, 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 ( $\sim 0.9$  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

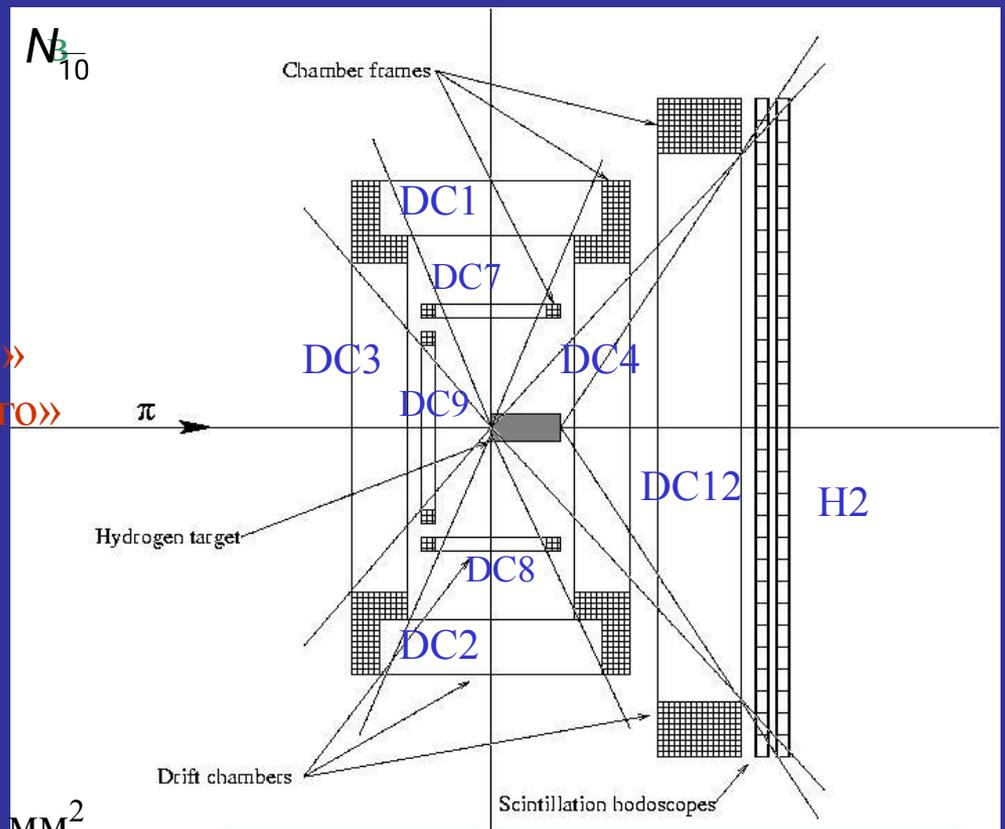
- ◆ Необходимо регистрировать 4 заряженные частицы в конечном состоянии ( $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ ,  $\Lambda \rightarrow \pi^- p$ ).
- ◆ В большинстве случаев реакции протон и пион от распада  $\Lambda$  вылетают в переднюю полусферу, однако углы вылета пиона могут быть большими относительно импульса 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%

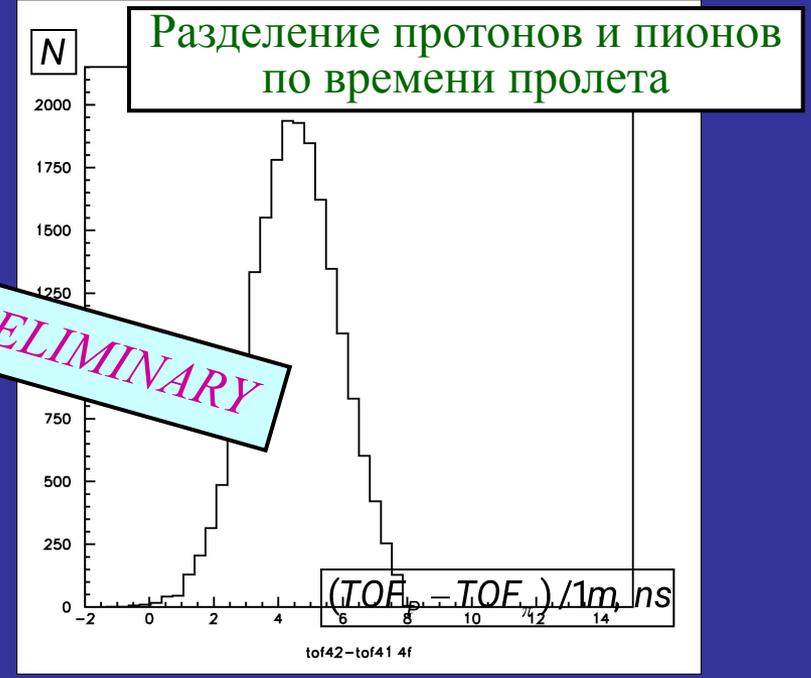


- Основные типы событий:
- 4 частицы вперед
  - протон и 2 пиона вперед, один пион вбок или вверх (вниз).



# 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%,  $10\sigma$  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  $18.7 \text{ с}^{-1}$  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%,  $10\sigma$  для эффекта 10% в таком же количестве импульсных интервалов

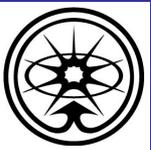
⇒ Необходимая статистика  $(160/0.56) \times 10^4 \approx 2.9 \cdot 10^6$

❑ 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.