

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Б. П. КОНСТАНТИНОВА

На правах рукописи

НОВИНСКИЙ Дмитрий Валерьевич

УДК 539.126.34, 539.171.111.627

**Исследование параметров вращения спина  
в упругом  $\pi^+$ -р-взаимодействии при импульсе 1.62 ГэВ/с  
и измерение анализирующей способности углерода**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Гатчина  
2002

Работа выполнена в Отделении физики высоких энергий  
Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова  
Российской академии наук.

Научные руководители – доктор физико-математических наук  
В.В. Сумачев,

– кандидат физико-математических наук  
Д.Н. Свирида.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
профессор Ю.А. Мамаев,

доктор физико-математических наук  
профессор Г.А. Петров.

Ведущая организация – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2002 г. в \_\_\_ часов  
на заседании диссертационного совета Д-002.115.01 в  
Петербургском институте ядерной физики им. Б.П.  
Константинова по адресу:  
188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща, ПИЯФ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Петербургского  
института ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2002 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

И.А. Митропольский

## Общая характеристика работы

Диссертация посвящена исследованию пион-нуклонного ( $\pi N$ ) взаимодействия в области промежуточных энергий. С целью однозначного восстановления амплитуды  $\pi N$ -рассеяния были измерены параметры вращения спина  $A$  и  $R$  в упругом  $\pi^+ p$ -взаимодействии при импульсе пиона  $p_\pi = 1.62$  ГэВ/с. Для осуществления этого эксперимента был создан и откалиброван углеродный поляриметр (измерена анализирующая способность протон-углеродного ( $pC$ ) рассеяния в интервале энергий поляризованных протонов  $T_p = 700\text{--}1300$  МэВ). Все экспериментальные данные получены на протонном синхротроне *ИТЭФ* (г. Москва) в 1995 – 1999 гг. Ускоритель *ИТЭФ* позволяет получать пучки  $\pi$ -мезонов в широком диапазоне энергий. На этом же ускорителе могут быть получены пучки поляризованных протонов, необходимые для калибровки поляриметра. Была создана установка, позволяющая получить надежный результат для параметра вращения спина  $A$ . Работа выполнена в рамках основного направления деятельности лаборатории мезонной физики *ПИЯФ РАН* по измерению поляризационных параметров ( $P$ ,  $A$  и  $R$ ) в упругом пион-нуклонном рассеянии.

### Актуальность

Актуальность работы вызвана крайней необходимостью в новых экспериментальных результатах по измерению параметров вращения спина во второй резонансной области упругого  $\pi^+ p$ -рассеяния. Только наличие данных по параметрам  $A$  и  $R$  позволяет отобрать правильное решение парциально-волнового анализа (ПВА), однозначно восстановить амплитуду пион-нуклонного рассеяния и, следовательно, получить неискаженный спектр нестранных барионных резонансов в области инвариантных масс  $\sqrt{s} \approx 1.9\text{--}2.0$  ГэВ. В эксперименте необходимо измерять поляризацию протонов отдачи с помощью углеродного поляриметра. Систематические погрешности при измерении параметров  $A$  и  $R$  в значительной мере определяются точностью в знании анализирующей способности  $A_{pC}$  в соответствующем диапазоне энергий протонов. При изучении и обобщении мировых данных по анализирующей способности выяснилось, что существующей точности в этой величине  $\sim 20\%$  оказалось явно недостаточно для надежного разделения решений различных ПВА. Поэтому было принято решение о проведении на ускорителе *ИТЭФ* новых более точных измерений

анализирующей способности углерода в области энергий поляризованных протонов  $T_p \sim 700 - 1300$  МэВ.

### **Цель работы**

Главной целью диссертационной работы является однозначное восстановление амплитуд пион-нуклонного рассеяния в области инвариантных масс  $\sqrt{s} \approx 1.9-2.0$  ГэВ. Для достижения этой цели:

1. Было проведено планирование эксперимента по измерению параметров вращения спина при импульсе 1.62 ГэВ/с, включая:
  - выбор кинематической области энергии протона отдачи;
  - обзор и изучение литературных данных по анализирующей способности углерода, вычисление значений  $A_{pC}$  в интересующем нас энергетическом интервале на основе изучения механизма различных вкладов в  $pC$ -рассеяние, оценка возможности использования этих данных для измерения параметров  $A$  и  $R$  с необходимой точностью.
2. Был создан углеродный поляриметр и проведено экспериментальное исследование анализирующей способности  $pC$ -рассеяния в зависимости от энергии протонов и толщины углеродного рассеивателя.
3. Была создана установка для измерения параметров вращения спина  $A$  и  $R$  и в рамках сотрудничества *ПНЯФ-ИТЭФ* проведен эксперимент по измерению указанных параметров со статистической погрешностью, позволяющей сделать надежный выбор между предсказаниями ПВА для параметра  $A$  при импульсе 1.62 ГэВ/с.

### **Научная новизна**

1. Впервые в мире реализован эксперимент по измерению параметров вращения спина при импульсе  $\pi^+$ -мезона  $p_\pi = 1.62$  ГэВ/с. Полученные результаты для параметра  $A$  подтвердили правильность ПВА Вирджинского политехнического института.
2. Получены новые высокоточные экспериментальные данные для величины  $A_{pC}(\theta, T_p)$  в интервале энергий  $T_p=700-1300$  МэВ при различных толщинах углеродной мишени-анализатора. На основании полученных в ходе эксперимента результатов выбрана оптимальная толщина углеродной пластины поляриметра, равная  $36.5$  г/см<sup>2</sup>. Этот поляриметр успешно отработал в ходе  $RA$ -эксперимента.

3. Впервые выполнен расчет анализирующей способности на основе моделей протон-ядерного взаимодействия в области энергий до 1.35 ГэВ. При этом для расчета вклада анализирующей способности квазиупругого и частично упругого каналов привлекались данные из фазового анализа **SM95** (программа "SAID") для нуклон-нуклонного ( $NN$ )-рассеяния.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты измерения параметра  $A$  при импульсе положительного пиона  $p_\pi = 1.62$  ГэВ/с, свидетельствующие о правильности ПВА *Вирджинского политехнического института (VPI)* и не подтверждающие ПВА содружеств университетов *Карлсруэ–Хельсинки (KH)* и *Карнеги-Меллон–Беркли (CMB)*.
2. Результаты измерений анализирующей способности в зависимости от толщины углеродной мишени-анализатора и интерполяция полученных данных. Создание углеродного поляриметра для осуществления эксперимента по измерению параметров вращения спина  $A$  и  $R$ .
3. Феноменологический подход к описанию величины анализирующей способности путем представления  $pC$ -рассеяния через три канала взаимодействия протона с ядром углерода. Расчет выполнен в области энергий до 1.35 ГэВ. При этом для описания квазиупругого канала использованы данные парциально-волнового анализа  $NN$ -рассеяния.

### **Практическая и научная ценность диссертации**

Новые данные по параметрам вращения спина принципиально важны, т.к. только они позволяют устранить неоднозначности в результатах фазовых анализов и выбрать из них единственно правильное решение. В итоге данной работы было доказано, что именно ПВА *VPI* дает правильное описание амплитуд пион-нуклонного взаимодействия в области кластера пион-нуклонных резонансов с массой  $\pi^+p$ -системы  $\sim 1.9$ – $2.0$  ГэВ.

Полученные результаты для анализирующей способности используются для определения поляризации протона отдачи в серии *RA*-экспериментов, ведущихся в течение последних нескольких лет на ускорителе *ИТЭФ*. Кроме того, эти же данные для  $A_{pC}$  используются в продолжающемся на ускорителе *ПИЯФ* поляризационном эксперименте по квазиупругому рассеянию протонов на легких ядрах. Расчетные

результаты для анализирующей способности были переданы группе *Saclay* для их использования в эксперименте по измерению спин-зависящих параметров в *pp*-рассеянии. В целом полученные в диссертации экспериментальные и расчетные результаты по анализирующей способности могут быть применимы в поляриметрии для широкого круга экспериментов, в которых измеряется поляризация протонов отдачи с энергиями  $\sim 1$  ГэВ.

### **Апробация**

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на VII Рабочем совещании по спиновым явлениям в физике высоких энергий (1997, Дубна), на XIII и XIV Международных конференциях по спиновой физике высоких энергий (1998, Протвино и 2000, Осака), на Рабочих совещаниях “Negaspin” (DESY, 1999) и “Symmetry and spin” (Прага, 1999), на Конференции Отделения ядерной физики РАН (1998), на XXVII Зимней школе ИТЭФ (1999) и на физических семинарах ОФВЭ ПИЯФ РАН.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений и содержит 119 страниц, 43 рисунка, 6 таблиц и 71 библиографическую ссылку.

### **Содержание работы**

Во введении формулируются цели работы, дается краткое представление о современном состоянии таблиц барионных резонансов в области масс  $M \approx 1900\text{--}1950$  МэВ. Также рассматривается актуальность проблемы – необходимость однозначного восстановления амплитуды пион-нуклонного рассеяния путем измерения параметров вращения спина  $A$  и  $R$  ( $RA$ -эксперимент). Только результаты измерений указанных параметров позволяют устранить присущие парциально-волновым анализам дискретные неоднозначности [1], имеющие место в отсутствие экспериментальных данных по параметрам  $A$  и  $R$ . Для успешного выполнения этой задачи необходимо знать величину анализирующей способности протон-углеродного рассеяния с точностью не хуже 10–12%.

В первой главе рассматривается принципиальная схема эксперимента по измерению параметров вращения спина в упругом пион-нуклонном рассеянии. Рассматривается постановка опыта для измерения

параметра  $A$ , в котором требуется поляризованная протонная мишень с вектором поляризации, лежащим в плоскости  $\pi p$ -рассеяния. Эксперимент основан на измерении поляризации протонов отдачи, вылетающих в результате упругого рассеяния  $\pi$ -мезона на свободных протонах поляризованной мишени. Для определения поляризации протонов отдачи необходимо измерить асимметрию их повторного рассеяния на вещество-анализаторе (углероде), т.е. необходим высокоэффективный поляриметр протонов. Таким образом, принципиальное значение имеет то, насколько точно мы знаем величину анализирующей способности  $A_{pC}$  протон-углеродного рассеяния в интервале энергий протонов, нужном для исследования параметров вращения спина  $A$  и  $R$  при импульсе 1.62 ГэВ/с. Однако существующие мировые данные для величины  $A_{pC}$  не обеспечивают необходимой точности  $\sim 10\text{--}12\%$  в знании анализирующей способности для  $RA$ -эксперимента.

Во второй главе выполнен обзор существующих литературных данных по анализирующей способности углерода. При планировании эксперимента по измерению параметров вращения спина  $A$  и  $R$  было необходимо сначала выяснить возможность использования опубликованных данных по величине  $A_{pC}$  для определения поляризации протонов отдачи. В конце главы кратко сформулированы промежуточные выводы, и главный из них – необходимость калибровки поляриметра для  $RA$ -эксперимента.

В третьей главе приводится метод описания величины анализирующей способности  $pC$ -рассеяния для интервала энергий  $T_p = 700 - 1350$  МэВ. Исследуются вклады различных каналов взаимодействия протона с ядром углерода:

1. Упругий (EL) канал, рассеяние с энергетическими потерями не более 35 МэВ.
2. Квазиупругий (QE) канал, т.е. квазиупругое рассеяние протонов на нуклонах ядра. Для расчета вклада данного канала использовались результаты ПБА **SM95** для  $NN$ -взаимодействия [2].
3. Неупругий (IN) канал, связанный с бо́льшими энергетическими потерями, главным образом, с процессами мезонообразования.

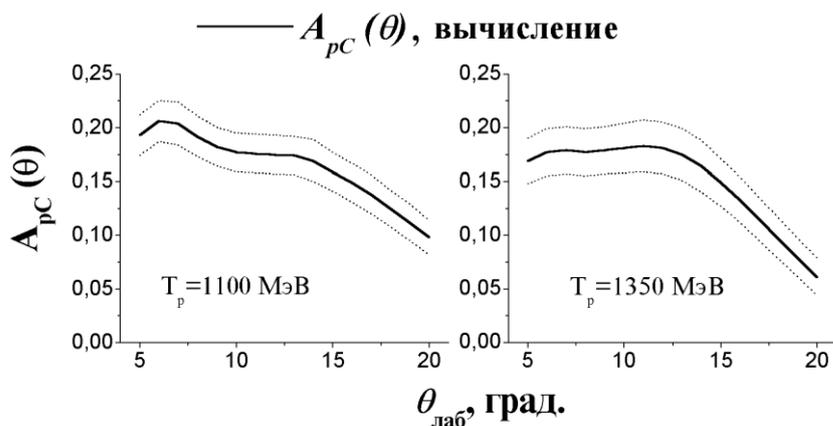
В качестве анализирующей способности ( $A_{pC}$ ) принимается средневзвешенная величина  $A_{pC}$  по каналам взаимодействия:

$$A_{pC}(T_p, \theta) = \frac{\sigma_{EL} \cdot A_{EL} + \sigma_{QE} \cdot A_{QE} + \sigma_{IN} \cdot A_{IN}}{\sigma_{EL} + \sigma_{QE} + \sigma_{IN}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_i(T_p, \theta)$ ,  $A_i(T_p, \theta)$  - соответствующие дифференциальные сечения и анализирующие способности для каждого из этих каналов. На рис. 1

показан результат расчета величины  $A_{pC}(\theta, T_p)$  для энергий протонов  $T_p = 1100$  и  $1350$  МэВ, также указаны ошибки, составляющие величину от 10% для небольших углов до 17%–25% при углах  $\theta \sim 20^\circ$ .

В конце главы кратко сформулированы промежуточные выводы, и основной вывод состоит в том, что полученная в расчетах погрешность превышает требуемые 10%. С другой стороны, эти данные, имеющие погрешность в среднем  $\sim 15\%$ , могут использоваться в других экспериментах, в которых не предъявляется высоких требований к точности измерений поляризации протонов отдачи.



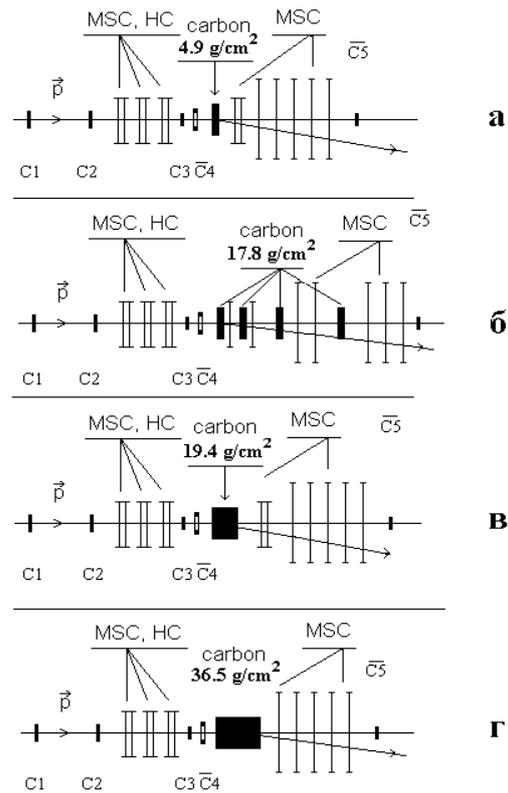
**Рис. 1.** Расчет величины  $A_{pC}(\theta)$  для энергий протона  $T_p = 1100$  и  $1350$  МэВ. Пунктирной линией показан коридор ошибок.

В четвертой главе описываются способ получения пучка поляризованных протонов, экспериментальная установка для измерения анализирующей способности углерода, алгоритм обработки данных и результаты калибровки поляриметра, исследуется зависимость эффективной анализирующей способности поляриметра от толщины мишени-анализатора.

Для создания поляризованного протонного пучка используется метод упругого рассеяния внутреннего пучка протонов, упруго рассеянных на водороде полиэтиленовой ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) мишени. Пучок поляризованных протонов формируется при помощи универсального магнитного канала вторичных частиц (протонов и мезонов) ускорителя ИТЭФ. Диапазон импульсов выводимых в канале частиц обоих знаков составляет  $p=0.9\text{--}2.1$  ГэВ/с. Интенсивность пучка составила  $\sim 2 \cdot 10^4$  протонов на сброс (1 сброс приблизительно за 2 сек.) при работе

ускорителя с энергией  $T_p = 1-2$  ГэВ в основном кольце. Такой интенсивности оказалось достаточно для измерения анализирующей способности. Для определения поляризации использовались данные ПВА **SM95** для нуклон-нуклонного рассеяния [2]. Величина поляризации составила  $\sim 0.3-0.4$  с относительной погрешностью 2-4%. Вклад этой погрешности не превысил 1/3 от ошибок в измерении анализирующей способности.

Варианты установки для измерения анализирующей способности, содержащие двухкоординатные гибридные и магнитострикционные искровые камеры для регистрации заряженных частиц и наборы углеродных блоков различной толщины, представлены на рис. 2. Толщины мишени-анализатора составляли  $4.9 \text{ г/см}^2$  (а),  $17.8 \text{ г/см}^2$  (б),  $19.4 \text{ г/см}^2$  (в),  $36.5 \text{ г/см}^2$  (г), или 3 см, 11 см, 12 см и 23 см, соответственно. Энергии протонов, при которых выполнялись измерения, равнялись  $T_p = 0.72, 0.92, 1.07$  и  $1.28$  ГэВ.



**Рис. 2.** Схема установки по измерению анализирующей способности в ИТЭФ.

Представлены 4 варианта конфигурации углеродной мишени-анализатора.

*HC, MSC* – трековые камеры с магнитострикционным съемом;

*C1, C2, C3, C4, C5* – сцинтилляционные счетчики;

*Carbon* – углеродные фильтры суммарной толщиной 4.9 г/см<sup>2</sup> (а), 17.8 г/см<sup>2</sup> (б), 19.4 г/см<sup>2</sup> (в), 36.5 г/см<sup>2</sup> (г).

Метод определения анализирующей способности углерода основан на измерении азимутальной асимметрии рассеяния поляризованных протонов. В ходе обработки для отобранных одотрековых событий определялись координаты ( $x, y, z$ ) точки взаимодействия в углероде, полярный  $\theta$  и азимутальный  $\varphi$  углы рассеяния, а также точность сопряжения треков налетающего протона и рассеянной заряженной частицы ( $\sigma_x, \sigma_y \approx 2$  мм).

Для отобранных в результате обработки событий получались распределения числа событий по азимутальному углу  $\varphi$  для фиксированных интервалов  $\Delta\theta$ . Эти распределения фитировались функцией:

$$N = N_0 \cdot (1 + \varepsilon \cdot \sin(\varphi + \varphi_0)), \quad (2)$$

где  $N_0$  – нормировочный параметр,  $\varepsilon$  – асимметрия рассеяния на углеродной мишени ( $\varepsilon = A_{pC} \cdot P$ ),  $\varphi_0$  – угол отклонения спина протона относительно вертикального направления. Ложная асимметрия оценивалась по результатам обработки событий рассеяния  $\pi$ -мезонов на углероде  $\varepsilon_{лож} = 0.0026 \pm 0.0014$ , что приводит к систематической ошибке в определении анализирующей способности  $\delta A_{pC} = 0.0026 / P \approx 0.007$ .

Результаты измерений анализирующей способности при четырех значениях энергии поляризованных протонов представлены на рис. 3. Полученные данные на толщинах 19.4 и 36.5 г/см<sup>2</sup> в пределах ошибок измерений согласуются с данными *Saclay* на поляриметре *POMME* при толщине 53 г/см<sup>2</sup> [3]. Было выполнено совместное фитирование результатов данной работы и работы *Saclay* [3] по формуле, аналогичной формулам из [3,4,5]:

$$A(\theta, p_C) = \frac{ar}{1 + br^2 + cr^4} + dp \sin(5\theta), \quad (3)$$

где  $r = p_C \cdot \sin(\theta_{лаб})$ ,  $p_C$  – импульс протона в середине углеродной мишени,

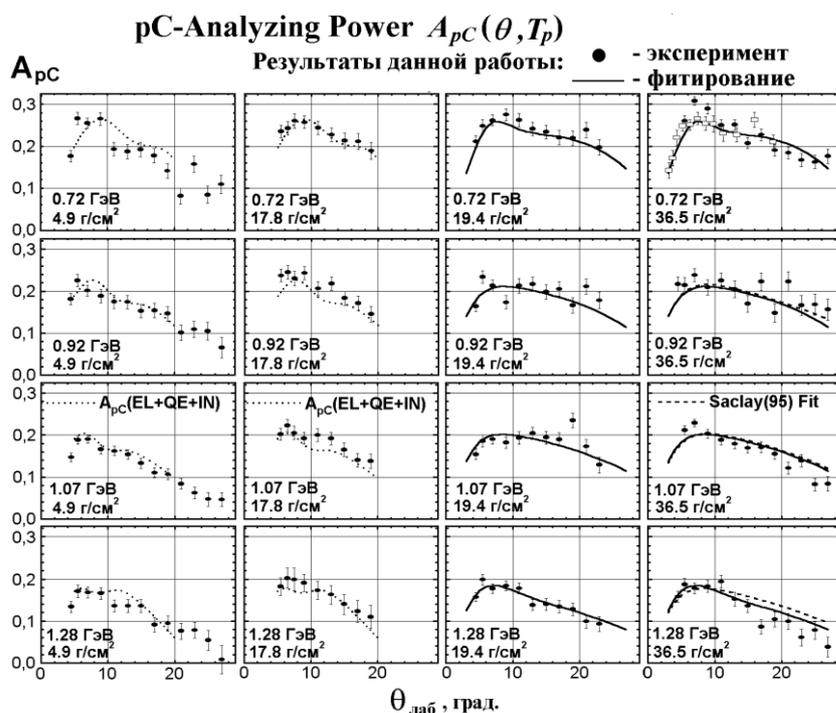
$$\begin{aligned} a &= a_0 + a_1 p' + a_2 p'^2 + a_3 p'^3, \\ b &= b_0 + b_1 p' + b_2 p'^2 + b_3 p'^3, \\ c &= c_0 + c_1 p' + c_2 p'^2 + c_3 p'^3, \\ d &= d_0 + d_1 p' + d_2 p'^2 + d_3 p'^3; \end{aligned}$$

$$p' = p_c - 1.7 \text{ ГэВ}/c;$$

16 параметров представлены в таблице 1:

**Таблица 1.** Величины параметров для описания зависимости анализирующей способности углерода от импульса и угла рассеяния

1.4 ГэВ/c ≤ p <sub>c</sub> ≤ 2.0 ГэВ/c, N (число точек) = 188, χ <sup>2</sup> = 264				
	0	1	2	3
a	1.5158±0.0871	0.5304±0.7422	-4.0212±1.0722	-6.1475±7.2129
b	26.115±3.2324	-14.539±32.834	-237.54±43.083	462.32±310.53
c	48.273±19.528	-761.87±190.07	3519.2±374.4	-2287.3±2012.5
d	0.0629±0.00695	-0.2803±0.0300	0.3273±0.0574	1.2765±0.2734



**Рис 3.** Результаты измерений анализирующей способности pC-рассеяния  $A_{pC}$ :

- — эксперимент ПИЯФ-ИТЭФ ( $T_p = 0.72, 0.92, 1.07, 1.28$  ГэВ),  
приведены только статистические ошибки;
- — эксперимент LAMPF [4] ( $T_p = 0.707$  ГэВ) [3].

Сплошная линия – результат совместного фитирования данных ПИЯФ-ИТЭФ для толщин 19.4 и 36.5 г/см<sup>2</sup> и данных Saclay-1995 [3]. Приведен также результат параметризации экспериментов Saclay-1995 [3] и расчет по формуле (1), приведенный совместно с полученными данными для толщин анализатора 4.9 и 17.8 г/см<sup>2</sup>.

Полученные в нашем эксперименте ошибки в измерении величины  $A_{pC}$  при углах рассеяния  $\theta \leq 20^\circ$  не превысили верхнего ограничения на величину этой погрешности 10%. Для каждого варианта установки было получено значение усредненной в интервале полярного угла  $\theta = 5^\circ \div 20^\circ$  анализирующей способности  $\bar{A}_{pC}$ . В конце главы кратко сформулированы промежуточные выводы, в частности, основной вывод о том, что полученные данные могут быть использованы в нашем RA-эксперименте.

В пятой главе обоснован выбор поляриметра для RA-эксперимента и приведена схема установки, предназначенной для измерений параметров вращения спина, и результаты этих измерений.

Обычно в поляриметрии для оценки эффективности поляриметра вводится понятие «фактора качества»  $F^2$ :

$$F^2 = \int_{\theta(\min)}^{\theta(\max)} \frac{n(\theta)}{N_0} A_{pC}^2(\theta) d\theta, \quad (4)$$

где  $N_0$  – число протонов, налетающих на углеродную мишень,  $n(\theta)$  – число протонов, испытавших анализирующее рассеяние в область углов  $(\theta + d\theta)$ ,  $\theta_{\min}$  и  $\theta_{\max}$  – угловой захват поляриметра. Для указанных вариантов поляриметра величина «фактора качества» составила:  $F^2(4.9 \text{ г/см}^2) \approx 0.0035$ ,  $F^2(17.8 \text{ г/см}^2) \approx 0.007$ ,  $F^2(19.4 \text{ г/см}^2) \approx 0.008$ ,  $F^2(36.5 \text{ г/см}^2) \approx 0.012$ . С учетом этого, для использования в RA-эксперименте нами был выбран поляриметр с толщиной углерода 36.5 г/см<sup>2</sup> (23 см), при которой  $F^2 = 0.12$ . Требования к конструкции поляриметра включают в себя следующие моменты:

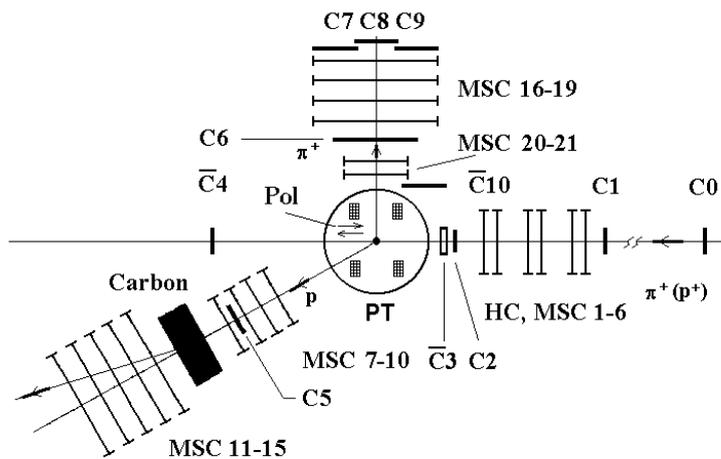
1. максимально высокая вероятность протон-углеродного рассеяния;
2. необходимость регистрировать углы pC-рассеяния в нужном угловом диапазоне  $\theta$  для полного интервала азимутальных углов  $\varphi$  (т.е.  $\Delta\varphi = 360^\circ$ ).

Основными элементами установки для измерения параметров  $A$  и  $R$  (рис.4) являются:

- протонная поляризованная мишень в сверхпроводящем соленоиде, величина поляризации мишени составляет  $\sim 0.7$  с ошибкой  $\pm 0.02$ .

- углеродный поляриметр, блоки проволочных координатных детекторов для определения траекторий падающих и рассеянных пионов и протонов отдачи, а также триггерная система и система измерения времени пролета для идентификации частиц пучка (протонов и мезонов).

Установка расположена на универсальном двухступенчатом магнитооптическом канале ускорителя *ИТЭФ*, обеспечивающем вывод пионов обоих знаков и протонов в интервале импульсов (0.9–2.1) ГэВ/с с разрешением  $\Delta p/p(\text{HWHM}) = \pm 1.8\%$ . Интенсивность пионного пучка с импульсом 1.62 ГэВ/с составила  $\sim 4 \cdot 10^5$   $\pi^\pm$ -мезонов на сброс (1 сброс приблизительно за 4 сек.) при работе ускорителя с энергией  $T_p = 8$  ГэВ в основном кольце. В районе расположения поляризованной мишени горизонтальный и вертикальный размеры пучка (FWHM) составляют около 30 мм. В ходе эксперимента по измерению параметров вращения спина  $A$  и  $R$  за время работы ускорителя  $\sim 400$  часов на пучке  $\pi^\pm$ -мезонов было набрано и записано  $\sim 1.4 \cdot 10^6$  случаев рассеяния на мишени.



**Рис. 4.** Экспериментальная установка для измерения параметров вращения спина при импульсе пионного пучка  $p_\pi = 1.62$  ГэВ/с.

Условными обозначениями показаны:

- PT* – поляризованная протонная мишень, *C0-C10* – сцинтилляционные счетчики,  
*HC, MSC* – пучковые трековые и магнитострикционные искровые камеры,  
*Carbon* – углеродный анализатор толщиной 36.5 г/см<sup>2</sup>, или 23 см.

Обработка накопленной информации включает следующие этапы:

1. Выделение случаев упругого  $\pi^+p$ -взаимодействия в рабочей области мишени по критериям компланарности и угловым корреляциям рассеянного пиона и протона отдачи. Оценка доли фоновых событий.
2. Отбор однотрековых событий в поляриметре с углами рассеяния протонов  $\theta > 3^\circ$ . При этом отбирались такие события для углов  $\theta$ , при которых азимутальные углы во всем диапазоне  $\varphi = 0^\circ - 360^\circ$  не выходили за допустимую геометрию камер. Применялись те же критерии отбора, что и при обработке данных по анализирующей способности. Для определения поляризации протонов отдачи использовалась параметризация анализирующей способности  $A_{pC}(\theta, p_C)$  (формула 3).
3. Всего отобрано  $\sim 16.5 \cdot 10^3$  полезных событий. Статистика разбивалась на четыре угловых интервала, и параметры вращения спина определялись методом максимального правдоподобия [5]. При этом одновременно вычислялись параметры  $P$ ,  $A$  и  $|R|$ .

Результаты измерений представлены в таблице 2:

**Таблица 2.** Значения поляризационных параметров при импульсе 1.62 ГэВ/с. Приведены только статистические ошибки

$\theta_{CM}$ , град.		$P$	$A$	$ R $
интервал	среднее значение			
118–123.5	121.7	$0.24 \pm 0.12$	$0.27 \pm 0.18$	$0.93 \pm 0.06$
123.5–127	125.2	$0.30 \pm 0.12$	$0.36 \pm 0.20$	$0.88 \pm 0.09$
127–131	128.8	$0.40 \pm 0.13$	$-0.32 \pm 0.20$	$0.86 \pm 0.10$
131–140	133.6	$0.29 \pm 0.13$	$-0.40 \pm 0.21$	$0.87 \pm 0.11$

Вклад в систематическую погрешность измерений вносят:

1. неопределенность в анализирующей способности  $A_{pC}(\theta, p_C)$ , составившая не более 5–7%, что заведомо меньше допустимой величины  $\sim 10$ –12%;
2. приборная асимметрия установки; ее вклад подавлялся на порядок путем периодического реверсирования (смены знака) поляризации мишени и сбалансированного набора статистики для обоих знаков;
3. неопределенность в оценке поляризации фона квазиупругого рассеяния; для выявления указанной неопределенности обрабатывались события с заведомо заниженной (нулевой) и завышенной поляризацией (равной таковой для протона отдачи в

упругом  $\pi$ -рассеянии); согласно оценке, вклад этой неопределенности в величину  $P$  составил  $1/3$  от статистической ошибки, соответственно, в величины  $A$  и  $R$  – еще меньше;

4. неопределенность измерения величины поляризации мишени, относительная ошибка не превышает 3%.

Для общей оценки систематической погрешности экспериментальных результатов, одновременно измеренные данные для параметра  $P$  сравниваются с результатами других работ [6, 7] и с предсказаниями ПВА VPI (SM90 [8], SM99 [9]), KH80 [10] и CMB [11] (рис. 5). Видно, что результаты наших измерений для параметра  $P$  в пределах ошибок согласуются с результатами других работ. Это указывает на то, что систематические ошибки для параметра  $P$  невелики. Так как параметры  $A$  и  $P$  вычисляются одновременно на одной и той же статистике, при определении параметра  $P$  отсутствует компенсация, связанная со сменой знака поляризованной мишени, а также неопределенность в анализирующей способности вносит одинаковый вклад в погрешности для  $P$  и  $A$ , то можно утверждать, что систематические ошибки при измерении параметра  $A$  значительно меньше статистических погрешностей.

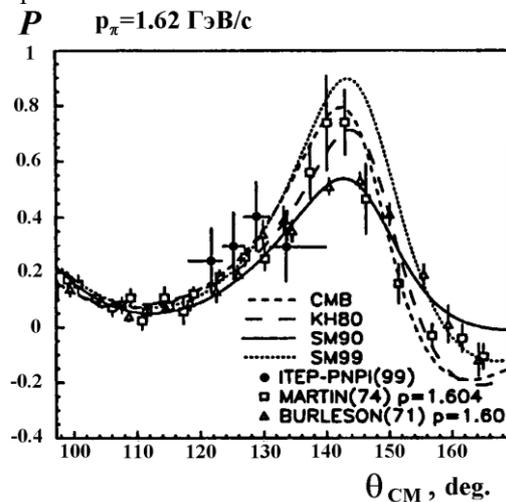
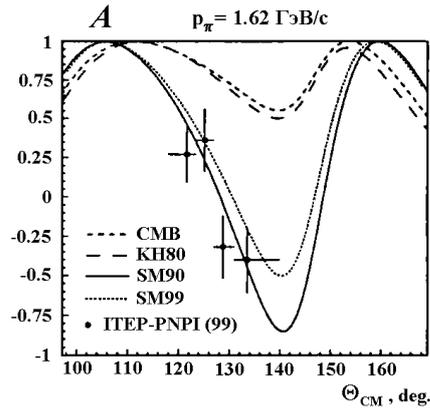


Рис.5. Результаты измерения поляризации  $P$  в упругом  $\pi^+p$ -рассеянии при импульсе  $p \sim 1.6$  ГэВ/с.

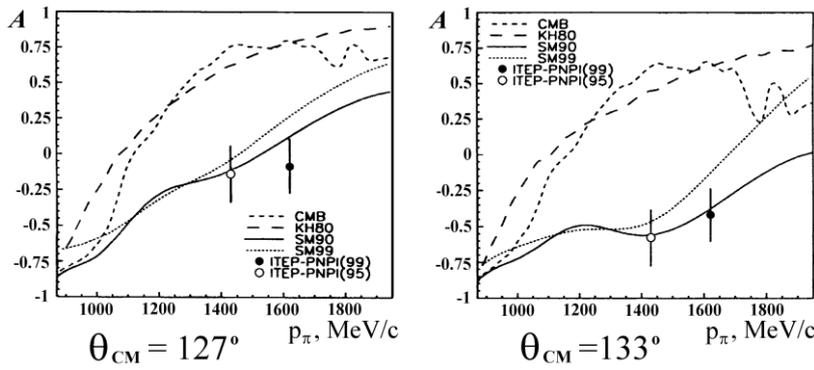
На рис. 6. показаны результаты измерений для параметра  $A$  при импульсе 1.62 ГэВ/с при четырех значениях угла в СЦМ. Видно, что вновь полученные новые данные для параметра  $A$  в пределах ошибок

измерений совпадают с предсказаниями фазового анализа Вирджинского политехнического института (**SM90** и **SM99**), причем эксперимент хорошо подтверждает угловую зависимость, предсказываемую ПВА **SM90** и **SM99**.

На рис. 7 приведено сравнение результатов с предсказаниями ПВА для углов  $\theta_{CM} = 127^\circ$  и  $133^\circ$  во всей резонансной области  $p_\pi \sim 1-2$  ГэВ/с. Там же показаны результаты предыдущих измерений *ПИЯФ-ИТЭФ* при импульсе  $p_\pi = 1.43$  ГэВ/с [12]. Из рисунка видно, что для двух указанных значений угла характерное различие предсказаний анализов **SM90** и **SM99**, с одной стороны, и **КН80** и **СМВ**, с другой, сохраняется для импульсов в широком импульсном интервале 1.2–1.7 ГэВ/с, что соответствует массе  $\pi^+p$ -системы  $M_{\pi p} = \sqrt{s} \approx 1.78-2.03$  ГэВ.



**Рис. 6.** Значения параметра  $A$  при импульсе 1.62 ГэВ/с для значений угла  $\theta_{CM} = 121.7^\circ, 125.2^\circ, 128.8^\circ$  и  $133.6^\circ$  и предсказания ПВА [8–11].



**Рис. 7.** Результаты измерений параметра  $A$  при импульсе 1.62 ГэВ/с и углах  $127^\circ$  и  $133^\circ$  (закрашенные кружки  $\square$ ). Также приводятся результаты измерений при импульсе 1.43 ГэВ/с (незакрашенные кружки  $\square$ ) и предсказания ПВА [8–11].

Таким образом, поскольку таблицы характеристик барионных резонансов [13] основаны на ПВА **КН80** и **СМВ**, то результаты настоящего эксперимента указывают на необходимость корректировки этих таблиц в области масс  $M_{\pi p} = 1.9\text{--}2.0$  ГэВ. Таблица 3 иллюстрирует ситуацию для  $7\Delta$ -резонансов в указанной энергетической области, и видно, что, например, резонансы  $S_{31}(1900)$  и  $P_{33}(1920)$ , имеющие относительно высокий рейтинг, не обнаружены в анализе  $VPI$ , который подтвердился в настоящем эксперименте. Таким образом, целесообразна корректировка указанной таблицы в сторону снижения рейтинга резонансов  $S_{31}(1900)$  и  $P_{33}(1920)$ .

**Таблица 3.** Характеристики [массы и ширины (указаны в скобках)] резонансов с изоспином  $I=3/2$  по результатам предсказаний ПВА **КН80** [10], **СМВ80** [11] и **СМ95** [9].

Название резонанса	$L_{3,2J}$	Статус	КН80	СМВ80	СМ95
$\Delta(1900)$	$S_{31}$	**	1908(140)	1890(170)	Нет
$\Delta(1905)$	$F_{35}$	****	1905(260)	1910(400)	1850(294)
$\Delta(1910)$	$P_{31}$	****	1888(280)	1910(225)	2152(760)
$\Delta(1920)$	$P_{33}$	***	1868(220)	1920(300)	Нет
$\Delta(1930)$	$D_{35}$	***	1901(195)	1940(320)	2056(590)
$\Delta(1940)$	$D_{33}$	*	Нет	1940(200)	Нет
$\Delta(1950)$	$F_{37}$	****	1923(224)	1950(320)	1921(232)

В заключении перечислены основные результаты диссертации.

В приложениях приведены таблицы коэффициентов, полученных для расчета величины анализирующей способности в третьей главе.

### Основные результаты диссертации

1. Впервые измерен параметр вращения спина  $A$  при импульсе  $p(\pi^\pm)=1.62$  ГэВ/с.
2. Из сравнения результатов измерений параметра  $A$  с предсказаниями парциально-волновых анализов следует, что имеется хорошее согласие с фазовыми анализами **SM90** и **SM99** и противоречие **KN80** и **СМВ**. При этом параметр нормальной поляризации  $P$  в пределах ошибок совпадает с опубликованными мировыми данными.
3. Величина анализирующей способности измерена с точностью не хуже 10% в области энергий протонов  $T_p = 0.7-1.3$  ГэВ для нескольких толщин углеродных мишеней-анализаторов. Выполнена параметризация результатов измерений в совокупности с экспериментальными данными, полученными в *Saclay*. Полученная зависимость находится в хорошем согласии с другими экспериментами там, где области измерений перекрываются.
4. На основании полученных данных по анализирующей способности создан однослойный поляриметр с толщиной углерода  $36.5$  г/см<sup>2</sup>, который успешно отработал в серии экспериментов по измерению параметров вращения спина при импульсе пиона  $p_\pi = 1.62$  ГэВ/с.
5. Погрешности в измерениях анализирующей способности не внесли существенный вклад в ошибки параметра  $A$ . Дальнейшие измерения величины анализирующей способности с лучшей точностью не могут повлиять на вывод о справедливости ПВА Вирджинского политехнического института.
6. Выполнен расчет величины анализирующей способности протон-углеродного рассеяния в область энергий протонов до 1350 МэВ, исходя из описания  $A_{pC}$  с учетом механизма вклада упругих, квазиупругих и неупругих процессов. Расчет хорошо описывает существующие экспериментальные данные, что позволит использовать такой подход для оценки анализирующей

способности в тех областях, где измерения в настоящий момент отсутствуют.

7. Из полученных результатов по параметрам вращения спина вытекает необходимость корректировки таблиц барионных резонансов с массами  $M(\pi^+p) \sim 1.9\text{--}2.0$  ГэВ, в основном представленных в *Particle Data Group* на основе анализов **КН80** и **СМВ**.

### Основное содержание диссертации опубликовано в работах

1. *N.G. Kozlenko, D.V. Novinsky, V.V. Sumachev*. The Proton-Carbon Scattering Analyzing Power. // Preprint PNPI № **2145**, 26 p. (1997).
2. *N.G. Kozlenko, D.V. Novinsky, V.V. Sumachev*. The Contribution of the Processes of Elastic, Quasielastic and Inelastic Scattering into the Proton-Carbon Scattering Analyzing Power. // Proceedings of the VII Workshop on High Energy Spin Physics (**SPIN97**, July 7-12, 1997, Dubna, Russia, 1997), p. 251 (1998).
3. *I.G. Alekseev, P.E. Budkovsky, ... D.V. Novinsky et al.* Measurement of the pC Analyzing Power in the Momentum Range 1.35 – 2.02 GeV/c. // Nucl. Instr. and Meth. **A 434**, pp. 254 – 260 (1999).
4. *S.P. Kruglov, N.G. Kozlenko, ... D.V. Novinsky, et al.* The Contribution of the Processes of Elastic, Quasielastic and Inelastic Interactions into Analyzing Scattering of Polarized Proton with Energy 700 – 1600 MeV on Carbon. Proceedings of the XIII International Conference on High Energy Spin Physics (**SPIN98**, September 8-12, 1998, Protvino, Russia), p. 379 (1999).
5. *И.Г. Алексеев, П.Е. Будковский, ... Д.В. Новинский и др.* Измерение анализирующей способности углерода для фильтров различной толщины в интервале импульсов 1.35 – 2.02 ГэВ/с. Ядерная физика, т. **63**, с. 2194 (2000).
6. *S.P. Kruglov, N.G. Kozlenko, ... D.V. Novinsky, et al.* Semiempirical approach to pC-Analyzing Power description in the proton energy region  $T_p = 400 - 1600$  MeV. // Доклад на XXVII Зимней школе физики ИТЭФ, февраль 1999, опубликовано: *Surveys in High Energy Physics*, v. **15**, pp. 247-252 (2000).
7. *И.Г. Алексеев, П.Е. Будковский, ... Д.В. Новинский и др.* Измерение анализирующей способности углерода для фильтров различной толщины в интервале импульсов 1.35 – 2.02 ГэВ/с. // Препринт ИТЭФ №7-1999, 8 стр. (1999).

8. Yu.A. Beloglazov, S.P. Kruglov, ... D.V. Novinsky et al. pC-processes at low energy. // Proceedings of Workshop "Polarized proton beams at high energies – accelerator challenges and physics opportunities" (DESY, May 17-20, 1999), p. 386 (2000).
9. Yu.A. Beloglazov, S.P. Kruglov, ... D.V. Novinsky et al. Semiempirical approach to p<sup>12</sup>C-analyzing power description in the proton energy region T<sub>p</sub> = 400 – 1600 MeV. // Proceedings of Workshop "Polarized proton beams at high energies – accelerator challenges and physics opportunities" (DESY, May 17-20, 1999), p. 477 (2000).
10. Yu.A. Beloglazov, S.P. Kruglov, ... D.V. Novinsky et al. Semiempirical approach to p<sup>12</sup>C-analyzing power description above T<sub>p</sub> = 1 GeV. // Proc. the Int. Workshop "Symmetry and spin" (September 5 –12, 1999, Prague, Czech Republic), in Czech. J. Phys., №50, Supplement S1, 321 (2000).
11. I.G. Alekseev, P.E. Budkovsky, ... D.V. Novinsky et al. Measurement of spin rotation parameter A in pion-proton elastic scattering at 1.62 GeV/c. // Phys. Lett., **B 485**, p. 32 (2000).
12. I.G. Alekseev, P.E. Budkovsky, ... D.V. Novinsky et al. Measurement of spin rotation parameter A in pion-proton elastic scattering at 1.62 GeV/c. // Preprint ITEP № 22-00, Moscow, 9 p, (2000).
13. I.G. Alekseev, D.N. Svirida, ... D.V. Novinsky et al. Uncertainties of partial-wave analysis and experimental data on spin rotation parameters in the elastic πp-scattering. // Abstract Book of 14<sup>th</sup> International Spin Physics Symposium (SPIN-2000, October 16-21, 2000, Osaka, Japan), p. 214 (2000).
14. I.G. Alekseev, D.N. Svirida, ... D.V. Novinsky et al. Measurement of Analyzing Power of pC-scattering and Proton Polarization in Quasi-Elastic Scattering on Carbon. // Abstract Book of 14<sup>th</sup> International Spin Physics Symposium (SPIN-2000, October 16-21, 2000, Osaka, Japan), p. 288 (2000).
15. I.G. Alekseev, P.E. Budkovsky, ..., D.V. Novinsky et al. Measurement of spin rotation parameter A in pion-proton elastic scattering at 1.62 GeV/c. PNPI Research Report 1998-1999, p. 66 (2000).
16. И.Г. Алексеев, П.Е. Будковский, ... Д.В. Новинский и др. Поляризационные эксперименты на установке СПИН синхротрона ИТЭФ. // Ядерная Физика, т. 65, №2, с. 1-9 (2002).

### Список цитируемой литературы

- [1] E. Baretlet. Nuovo Cim., **8A**, 331 (1972).  
 [2] R.A.Arndt et al., Phys.Rev. **C50**, 2731 (1994).

- [3] *N.E.Cheung et al.*, Nucl.Instr. and Meth. **A363**, 561, (1995).
- [4] *M.W.McNaughton et al.* Nucl.Instr. and Meth. **A241**, 435, (1985).
- [5] *R. Amblard*. Thèses de l'Université de Paris (1971).
- [6] *J.E.Martin et al.*, Nucl. Phys. **B89**, 253 (1975).
- [7] *G.Burleson et al.* Phys. Rev. Lett. V. **26**, 338 (1971).
- [8] *R.A.Arndt et al.* Phys. Rev. **D43**, 2131 (1991).
- [9] *R.A.Arndt et al.*, Phys.Rev. **C52**, 2120 (1995).  
*R.A.Arndt et al.*, nucl-th / 9807087; telnet said.phys.vt.edu, user: said
- [10] *G.Höhler*. Handbook of Pion-Nucleon Scattering. Physics Data, № **12-1**, (Fachinformationzentrum, Karlsruhe, 1979).
- [11] *R.E.Cutkosky et al.*, Phys.Rev. **D20**, 2839 (1979).
- [12] *I.G. Alekseev et al.* Phys. Lett. **B 351**, 585 (1995).
- [13] *Particle Data Group*. Review of Particle Data. // Eur. Phys. Journ. **C 15**, №1 (2000).