

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
(НИУ «БелГУ»)

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК  
КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙТРОН-ПРОТОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА  
ВНУТРЕННЕМ ПУЧКЕ НУКЛОТРОНА ОИЯИ**

Выпускная квалификационная работа  
обучающегося по направлению подготовки 03.03.02 Физика  
очной формы обучения, группы 07001310  
Волкова Ивана Сергеевича

Научный руководитель  
д. ф.-м. н., профессор  
Сыщенко В. В.

БЕЛГОРОД 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА .....</b>	<b>6</b>
1.1 Общая схема измерения. Нуклотрон .....	6
1.2 Станция внутренней мишени.....	7
<b>2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПУЧКА.....</b>	<b>10</b>
2.1 Выделение $d\text{p}$ -упругих событий.....	10
2.2 Вычисление компонент поляризации пучка дейтронов .....	11
<b>3. АНАЛИЗИРУЮЩИЕ СПОСОБНОСТИ <math>d\text{p}\rightarrow\text{ppn}</math> РЕАКЦИИ ПРИ ЭНЕРГИИ 1000 МЭВ.....</b>	<b>16</b>
3.1 Выделение событий $d\text{p}\rightarrow\text{ppn}$ реакции и вычитание углеродного фона .....	16
3.2 Вычисление анализирующих способностей $d\text{p}\rightarrow\text{ppn}$ реакции .....	18
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>23</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>25</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Дейтрон является простейшим ядром, состоящим только из двух нуклонов: протона и нейтрона, что позволяет ставить задачу точного описания этой структуры при наличии информации о потенциале ядерного взаимодействия. Поэтому описание его структуры и основных характеристик явилась пробным камнем теории ядерных взаимодействий [1-4]. В настоящее время, эта проблема уже решена, но эксперименты с применением дейтронов по-прежнему находятся на переднем крае экспериментальной ядерной физики из-за возможности сравнения результатов измерений и расчётов без использования приближенных методов.

Особую роль занимают измерения с частицами высоких энергий (порядка 1 ГэВ на нуклон и выше), поскольку развернутой и общепринятой релятивистской теории ядерных взаимодействий пока не существует. Тем более что для этих энергий большую роль начинают играть малые расстояния, где можно ожидать проявления мезонных степеней свободы, трёхчастичных взаимодействий и других особенностей [5-7]. Как известно, смотри, например, [8], измерения с вполне определенными поляризационными состояниями с точки зрения сопоставления с теорией обладают существенно большей информативностью, чем измерения на неполяризованном пучке. Именно поэтому исследования на поляризованных пучках привлекают повышенное внимание научной общественности и проводятся, как правило, коллаборациями ученых из разных стран.

В Российской Федерации такие исследования проводятся в нескольких научных центрах, одним из которых является Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна, Московская область), где исследования взаимодействия ускоренных частиц с ядрами имеет более чем полувековую историю. Для исследований в области физики высоких энергий используется сверхпроводящий ускоритель Нуклотрон, заменивший знаменитый синхрофазотрон и обеспечивающий ускорение ядер до 4-5 ГэВ/нуклон.

Нуклотрон является ускорителем с жесткой фокусировкой, поэтому получение интенсивных поляризованных пучков представляет собой сложную техническую задачу, которая была решена сравнительно недавно [9,10].

Решение этой задачи позволило начать экспериментальное исследование зависимости угловых распределений вылета продуктов реакций взаимодействия поляризованных дейтронов с протонами. Одной из таких реакций является реакция  $d p \rightarrow p p n$ , определение асимметрии которой и явилось задачей, поставленной перед нами.

Целью выпускной квалификационной работы является определение тензорной и векторной анализирующих способностей ( $A_y$ ,  $A_{yy}$ ) реакции  $d p \rightarrow p p n$  для энергии дейтрона 1000 МэВ на поляризованном дейтроном пучке Нуклотрона Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Московская область).

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- 1) Принять участие в наборе экспериментальных данных и ознакомиться с основными характеристиками экспериментальной установки.
- 2) Научиться работать с программным пакетом ROOT, позволяющей выбирать необходимые для анализа данные из полного набора полученной в эксперименте информации.
- 3) По результатам измерения асимметрии упругого рассеяния дейтронов на протоне и известной анализирующей способности этого процесса определить поляризацию дейтронного пучка.
- 4) Определить выходы исследуемой реакции в полученном наборе данных для полиэтиленовой мишени, выделив реакции с вылетом протона на углероде, для разных поляризационных состояний пучка Нуклотрона, получить из них значение асимметрии реакции.

- 5) По полученным значениям асимметрии для разных углов вылета в системе центра масс определить зависимость векторной и тензорной анализирующих способностей исследуемой реакции от угла.
- 6) Сравнить полученные значения с предсказаниями известных теоретических моделей расчёта анализирующей способности исследуемой реакции.

# 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

## 1.1 Общая схема измерения. Нуклотрон

Эксперимент по измерению векторной и тензорных анализирующих способностей  $dp \rightarrow ppp$  реакции при энергии 1000 МэВ выполнялся на станции внутренней мишени Нуклотрона (см. рисунок 1). Источник поляризованных ионов атомного типа ПОЛЯРИС обеспечивал поляризованный пучок дейтронов. Далее поляризованные дейтроны поступали в линейный ускоритель LU-20, который использовался в качестве инжектора Нуклотрона. В Нуклотроне пучок дейтронов ускорялся до необходимой энергии. После достижения требуемой энергии рост магнитного поля прекращался. Инициирование реакций взаимодействия ускоренных дейтронов с протонами на станции внутренней мишени осуществлялось путем перекрытия равновесной орбиты Нуклотрона тонкой мишенью, содержащей протоны.

Поляризация пучка определялась по результатам упругого дейтрон-протонного взаимодействия при энергии дейтронов 270 МэВ до и после основного набора данных на 1000 МэВ, с использованием экспериментальных данных по анализирующим способностям  $dp$ -упругого рассеяния, полученных в других экспериментах [11-13].

В ходе эксперимента использовались две мишени: полиэтиленовая пленка и углеродная нить. Мишень из углерода была необходима для оценки фона от углерода, который содержится в полиэтиленовой мишени. Обе мишени использовались только для энергии дейтронов 1000 МэВ. Для энергии 270 МэВ измерения на углеродной мишени не проводились, так как ранние эксперименты показали, что для этой энергии и выбранной кинематике процесса фон от углерода составляет не больше 1% [14].

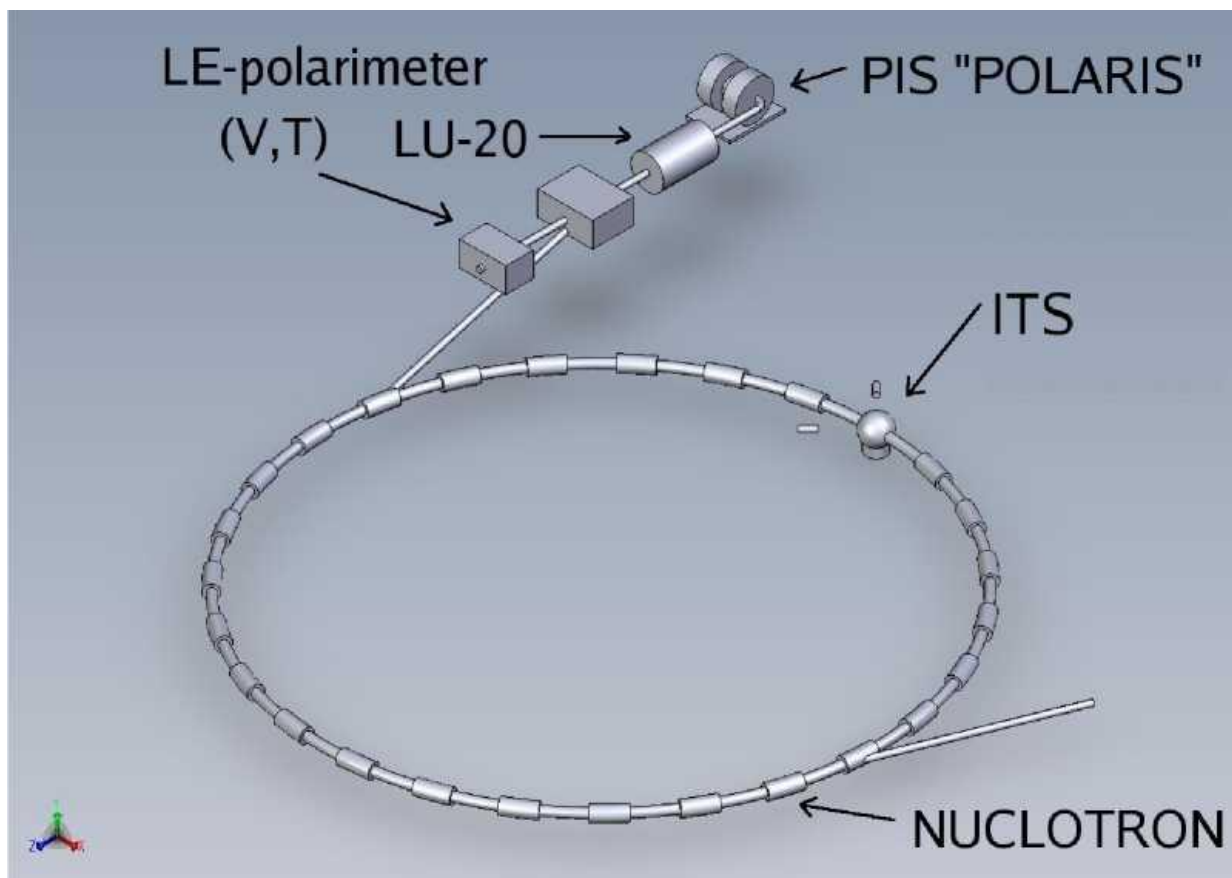


Рисунок 1: Ускорительный комплекс Нуклотрон. PIS – источник поляризованных дейтронов «ПОЛЯРИС», ITS – станция внутренней мишени.

## 1.2 Станция внутренней мишени

Станция внутренней мишени Нуклотрона представляет собой сферический вакуумный корпус, внутри которого закреплен диск с активным материалом мишени ( $\text{CH}_2$ , C, W, Cu и тд.). При достижении необходимой энергии диск плавно поворачивается, и соответствующая мишень плавно перекрывает пучок. В этом случае достигается максимальное использование интенсивности пучка, а вероятность случайных совпадений сигналов со счетчиков, связанная с регистрацией частиц, инициированных взаимодействием с ядрами разных дейтронов, не превышает нескольких процентов.

Продукты реакции попадали в сцинтилляционные детекторы, рассредоточенные в горизонтальной и вертикальной плоскости прямо за

станцией внутренней мишени (см. рисунок 2), и в итоге идентифицировались по ионизационным потерям в счетчиках и времени пролета от мишени, где происходят исследуемые процессы, до детекторов. Детекторы представляют собой сцинтиллятор, соединенный с фотоэлектронным умножителем. В эксперименте использовались 8 детекторов для регистрации протонов слева (LP1-LP8) по направлению пучка дейтронов в ускорителе. Такие же детекторы и в той же геометрии расположены справа (RP1-RP8). Для регистрации дейтронов в реакции  $dp$ -упругого рассеяния использовались 6 дейтронных детекторов, 3 слева (LD2-LD4) и 3 справа (RD2-RD4). Два протонных детектора (LPP, RPP), расположенных симметрично, относительно точки взаимодействия пучка с мишенью, использовались для независимого мониторинга количества взаимодействий ускоренных дейтронов с мишенью путем подсчета событий, обусловленных квазиупругим  $pp$ -рассеянием.

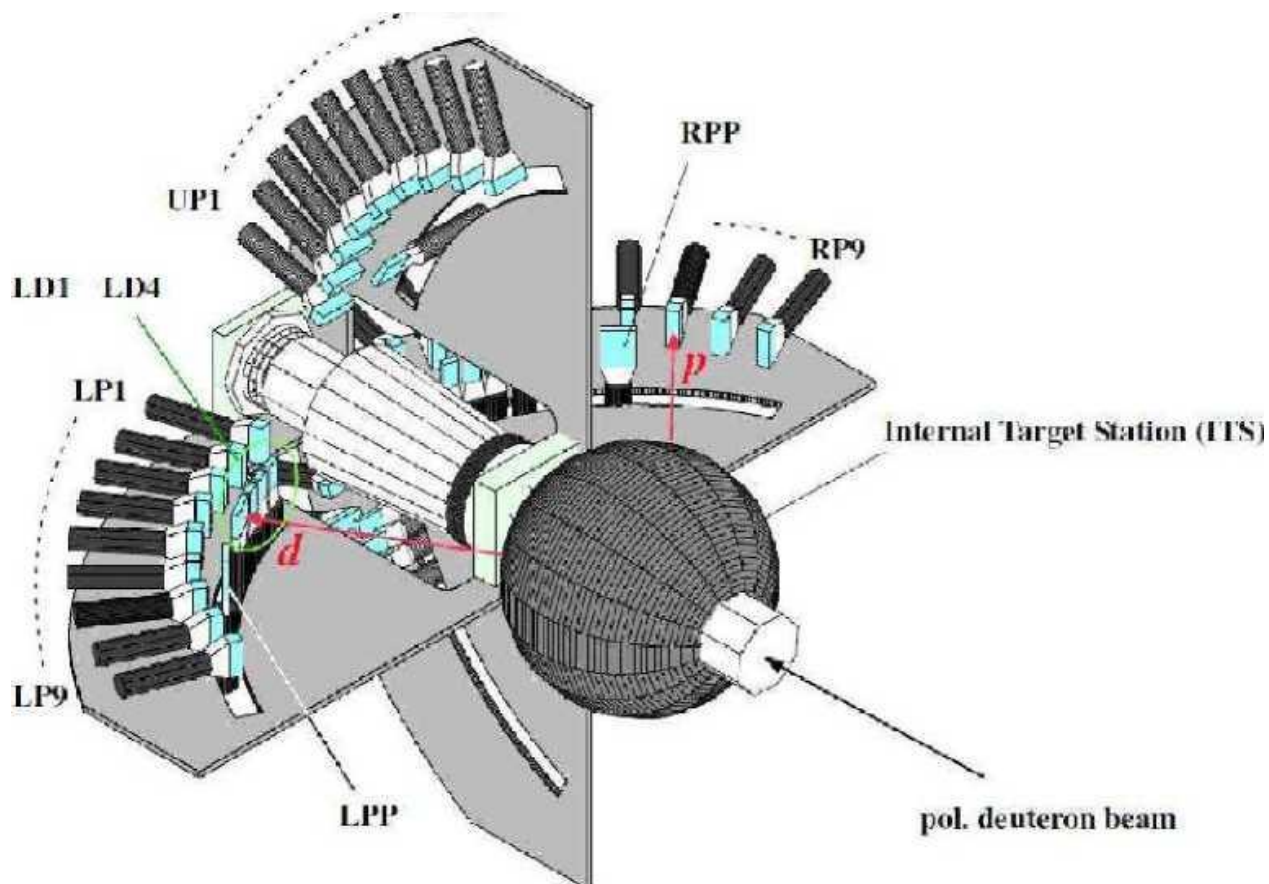


Рисунок 2: Схема расположения сцинтилляционных счетчиков около станции внутренней мишени для измерения асимметрии  $dp \rightarrow ppn$  реакции.



Выбор пары детекторов из левого и правого плеч определял угол вылета частиц в системе центра масс. Таблица совпадений счетчиков и вырезаемый каждой парой угол наблюдения приведены в таблицах 1 и 2 для реакций  $dp$  упругого рассеяния и реакции  $dp \rightarrow ppp$ , соответственно.

Таблица 1: Совпадения счетчиков для каждого угла в с.ц.м.

Справа налево			Слева направо		
Угол в с.ц.м.	Имя счетчика, P1	Имя счетчика, P2	Угол в с.ц.м.	Имя счетчика, P1	Имя счетчика, P2
55	RP1	LP8	55	LP1	RP8
65	RP2	LP7	65	LP2	RP7
75	RP3	LP6	75	LP3	RP6
85	RP4	LP5	85	LP4	RP5
95	RP5	LP4	95	LP5	RP4
105	RP6	LP3	105	LP6	RP3
115	RP7	LP2	115	LP7	RP2
125	RP8	LP1	125	LP8	RP1
60	RD2	LD4	60	LD2	RD4
60	RD3	LD4	60	LD3	RD4
120	RD4	LD2+LD3	120	LD4	RD2+RD3
90	RPP	LPP	90	LPP	RPP

Таблица 2: Углы установки детекторов, используемых для регистрации реакций  $dp$  упругого рассеяния и реакции  $dp \rightarrow ppp$

Детекторы	Угол в с.ц.м., °	Угол уст., °	Угол пласт., °	Угол взаим., °
LP1, RP1	55	59,6	59,6	24,8
LP2, RP2	65	54,4	54,4	29,5
LP3, RP3	75	49,2	49,2	34,3
LP4, RP4	85	44,1	44,1	39,2
LP5, RP5	95	39,2	39,2	44,1
LP6, RP6	105	34,3	34,3	49,2
LP7, RP7	115	29,5	29,5	54,4
LP8, RP8	125	24,8	24,8	59,6
LD2, RD2		24,3	26	57-1,3
LD3, RD3	60	29,1	28,4	57+1,3
LD4, RD4	120	57	57	27,2
LPP, RPP	90	41,6	41,6	41,6

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПУЧКА

### 2.1 Выделение dp-упругих событий

Как было отмечено выше, упругие события в реакции взаимодействия дейтрона с протоном выделялись на основе данных о разнице времени прихода сигнала с детекторов рассеянных дейтронов и выбитых из мишени протонов, а так же данных корреляции энергетических потерь. На рисунке 3 представлен график с разницей времени прихода сигналов между двумя соответствующими протонным и дейтронным детекторами.

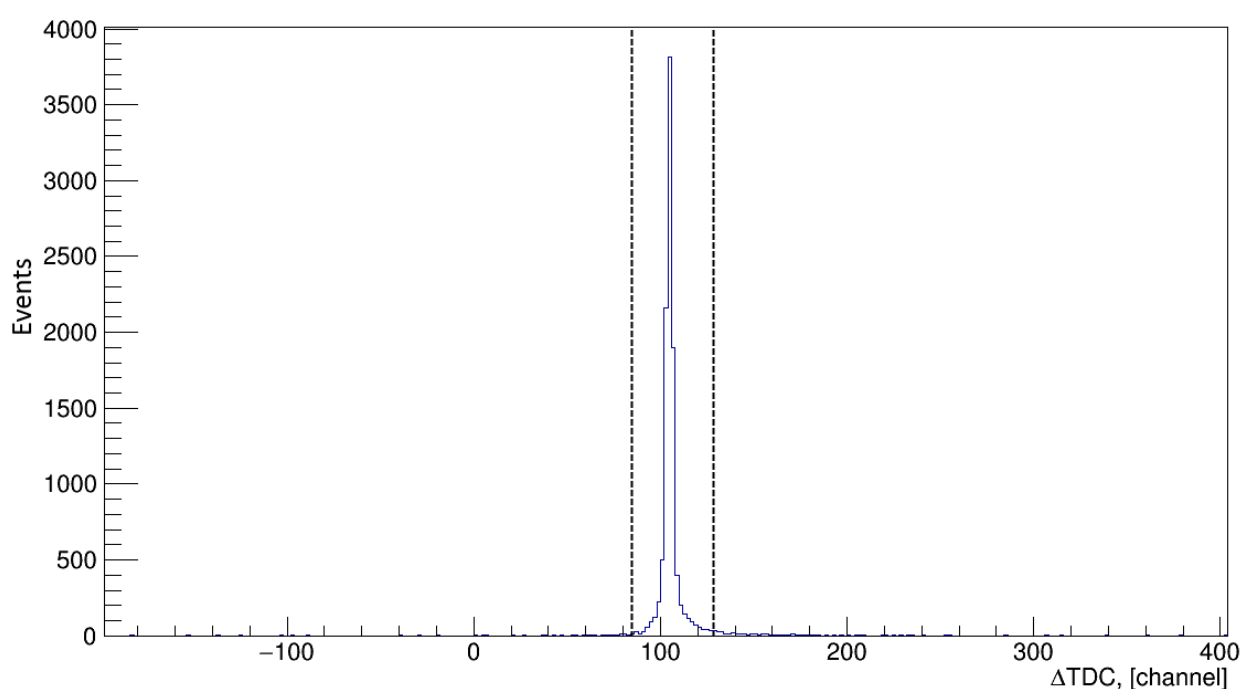


Рисунок 3: Разница времени прихода сигналов с дейтронного и кинематически связанного с ним протонного счетчиков для угла рассеяния 75 градусов в с.ц.м. при энергии пучка дейтронов 270 МэВ. Пунктирной линией обозначен временной коридор для выделения dp-упругих событий.

Дальнейшее выделение dp-упругих событий происходит с использованием корреляции энергетических потерь для протонов и дейтронов, которые после взаимодействия попали в разные детекторы (см. рисунок 4).

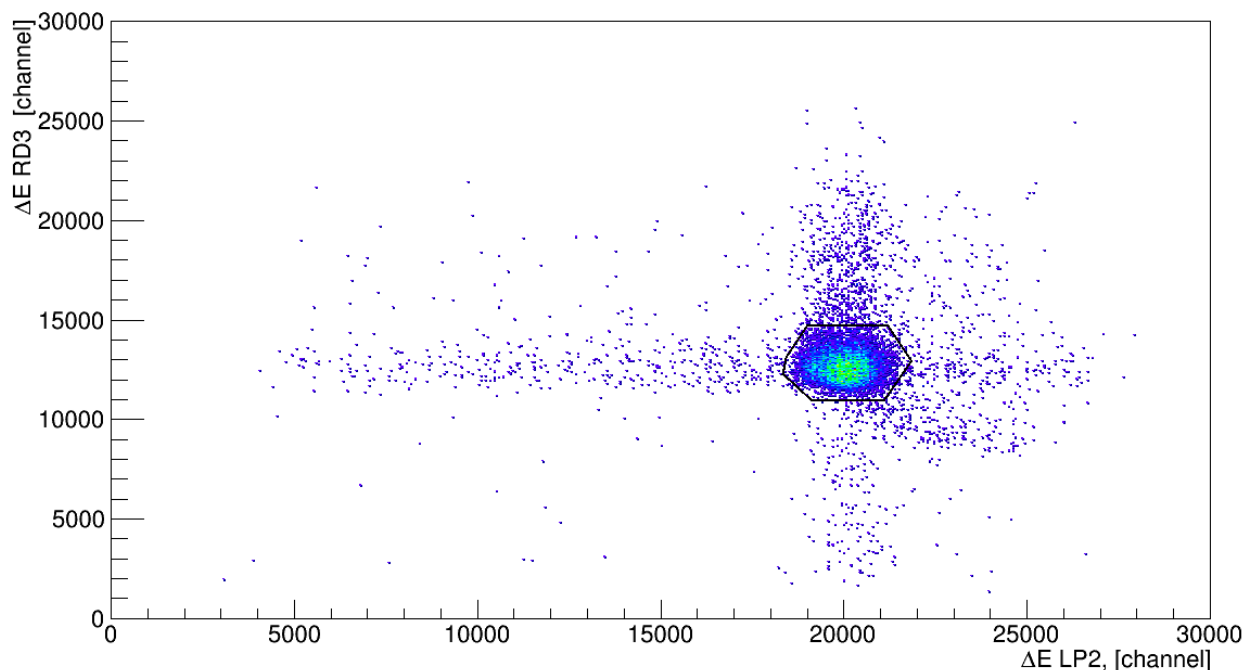


Рисунок 4: Корреляционная зависимость амплитуд сигналов дейтронного и протонного счетчиков для угла 75 градусов в с.с.м. при энергии пучка дейтронов 270 МэВ. Сплошная линия обозначает графический критерий выделения  $d$ - $p$ -упругих событий.

Как видим, на корреляционной зависимости двух кинематически связанных счетчиков присутствует ярко выраженная область, обведенная ломаной линией. События, которые не попали в критерий для выделения, вероятнее всего являются случайными и не имеющими отношения к реакции  $d$ - $p$ -упругого рассеяния.

## 2.2 Вычисление компонент поляризации пучка дейтронов

Для определения поляризации пучка дейтронов использовались данные по асимметрии выхода дейтрон-протонного рассеяния и данные по анализирующим способностям реакции  $d$ - $p$ -упругого рассеяния при энергии 270 МэВ. В ходе измерений записывались данные о текущем режиме работы источника поляризованных дейтронов, так, чтобы можно было узнать выходы при любой моде поляризации. Для получения ядерной поляризации использовалась высокочастотная камера, в которой индуцируются переходы из 2-го состояния в 6-е, либо из 3-го в 5-е (см. рисунок 5). Максимальные

значения поляризации пучка ( $P_z$ ,  $P_{zz}$ ) для спиновых мод «2-6» и «3-5» равны соответственно  $(1/3, 1)$  и  $(1/3, -1)$ .

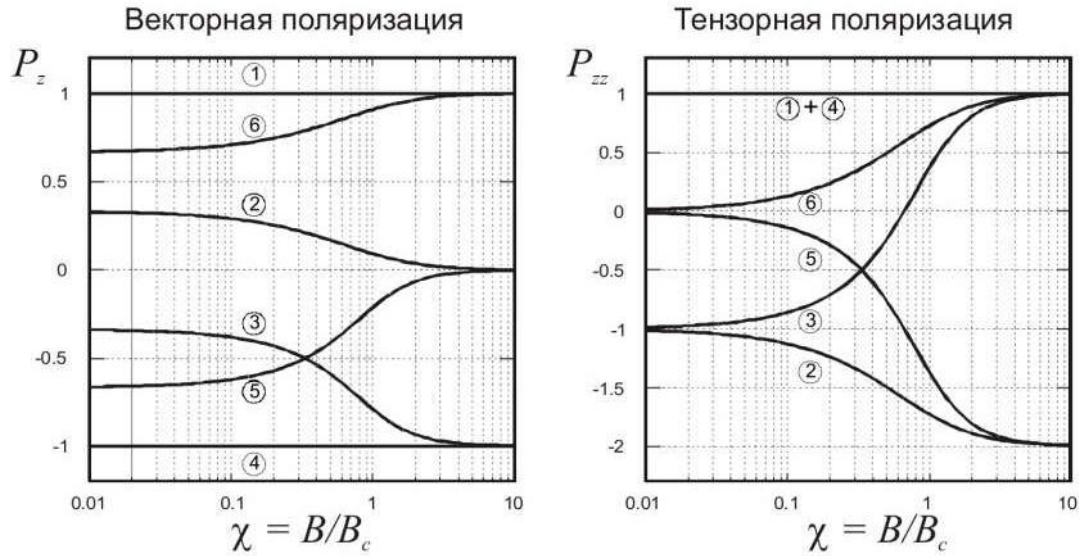


Рисунок 5: Ядерная поляризация уровней сверхтонкого расщепления атома дейтерия как функция внешнего магнитного поля.

Для вычисления поляризации пучка использовались формулы (1-4).

Векторная и тензорная поляризации для спиновой моды «2-6»

$$P_{z+} = \frac{\frac{N_{l+}}{N_{l0}} - \frac{N_{r+}}{N_{r0}}}{3A_y} \quad (1)$$

$$P_{zz+} = \frac{\frac{N_{l+}}{N_{l0}} + \frac{N_{r+}}{N_{r0}} - 2}{A_{yy}} \quad (2)$$

Векторная и тензорная поляризации для спиновой моды «3-5»

$$P_{z-} = \frac{\frac{N_{l-}}{N_{l0}} - \frac{N_{r-}}{N_{r0}}}{3A_y} \quad (3)$$

$$P_{zz-} = \frac{\frac{N_{l-}}{N_{l0}} + \frac{N_{r-}}{N_{r0}} - 2}{A_{yy}} \quad (4)$$

где  $N_{l+}$  ( $N_{r+}$ ) – количество событий, зарегистрированных левой (правой) парой детекторов с учетом корреляции при спиновой моде «2-6», поделенное на количество событий, зарегистрированных контрольными протонными детекторами.  $N_l$  ( $N_r$ ) – аналогичные значения для спиновой моды «3-5».  $N_{l0}$  ( $N_{r0}$ ) – количество событий, зарегистрированных левой (правой) парой детекторов при отсутствии поляризации пучка.

Анализирующие способности  $A_y$ ,  $A_{yy}$ , используемые при определении поляризации пучка, приведены в работе [15], где они были получены путем интерполяции результатов экспериментов [11-13]. Используемые анализирующие способности показаны в таблице 3.

Таблица 3: Векторные  $A_y$  и тензорные  $A_{yy}$  анализирующие способности при энергии 270 МэВ, используемые в определении поляризации пучка дейтронов, и соответствующие им ошибки  $\Delta A_y$ ,  $\Delta A_{yy}$ .

$\Theta_{\text{сцм}}, ^\circ$	$A_y$	$\Delta A_y$	$A_{yy}$	$\Delta A_{yy}$
65	-0.133	0.004	0.323	0.012
75	-0.277	0.004	0.375	0.016
86.5	-0.392	0.012	0.445	0.013
95	-0.410	0.009	0.526	0.014
105	-0.382	0.004	0.605	0.017
115	-0.367	0.012	0.629	0.019
126.3	-0.216	0.007	0.604	0.011
135	-0.084	0.005	0.570	0.016

Используя эти данные в соответствии с формулами (1-4) можно определить поляризацию пучка. Для более точного определения поляризации пучка, данные по поляризации, полученные для каждого угла, усреднялись по всем углам. Для этого использовались формулы для нахождения взвешенного среднего [16], вывод которых представлен ниже.

Предположим, что мы имеем несколько вариантов измерения физической величины:

$$x = x_1 \pm \sigma_1$$

$$x = x_2 \pm \sigma_2$$

где  $\sigma$  – соответствующая погрешность измерения.

Теперь необходимо объединить эти результаты наилучшим образом. Если предположить, что результаты обоих измерений подчиняются распределению Гаусса, то вероятность получить первое частное значение истинной величины  $X$  равна

$$P_X(x_1) \sim \frac{1}{\sigma_1} e^{-(x_1 - X)^2 / 2\sigma_1^2} \quad (5)$$

и аналогично для второго частного значения

$$P_X(x_2) \sim \frac{1}{\sigma_2} e^{-(x_2 - X)^2 / 2\sigma_2^2} \quad (6)$$

Эти вероятности зависят от неизвестного истинного значения. Теперь вероятность, что будут получены оба значения, равна произведению вероятностей

$$P_X(x_1, x_2) = P_X(x_1)P_X(x_2) \sim \frac{1}{\sigma_1\sigma_2} e^{-\mu^2/2} \quad (7)$$

где

$$\mu^2 = \left(\frac{x_1 - X}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{x_2 - X}{\sigma_2}\right)^2 \quad (8)$$

Эта величина представляет собой сумму квадратов отклонений от  $X$  результатов двух измерений, деленных на погрешности. Таким образом, наилучшей оценкой для  $X$  будет значение, при котором вероятность максимальна, или же показатель  $\mu^2$  минимален. Чтобы определить минимальное значение  $\mu^2$ , продифференцируем его и приравняем производную нулю

$$2 \frac{x_1 - X}{\sigma_1^2} + 2 \frac{x_2 - X}{\sigma_2^2} = 0 \quad (9)$$

Тогда решение относительно  $X$  будет наилучшей оценкой значения  $x$ .  
Она равна:

$$X = \frac{\left(\frac{x_1}{\sigma_1^2} + \frac{x_2}{\sigma_2^2}\right)}{\left(\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}\right)} \quad (10)$$

Этот результат можно переписать через определение веса:

$$w_1 = \frac{1}{\sigma_1^2} \quad \text{и} \quad w_2 = \frac{1}{\sigma_2^2} \quad (11)$$

В итоге получим:

$$X = \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2}{w_1 + w_2} \quad (12)$$

Это выражение можно расширить для  $N$  измерений одной величины

$$X = \frac{\sum_{i=1}^N w_i x_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (13)$$

где  $w_i = 1/\sigma_i^2$ .

При использовании формулы (13), любое измерение, в котором погрешность выше, чем в остальных, внесет меньший вклад в конечный результат вычисления, называемый взвешенным средним.

Таким образом, по данным вычисления поляризации для каждого угла, были получены средневзвешенные значения поляризации. Результаты определения поляризации пучка представлены в таблице 4.

Таблица 4: Усредненные по всем углам значения векторной  $P_z$  и тензорной  $P_{zz}$  поляризации пучка дейтронов.  $\Delta P_z$ ,  $\Delta P_{zz}$  – соответствующие ошибки вычисления поляризации.

Спиновая мода	$P_z$	$\Delta P_z$	$P_{zz}$	$\Delta P_{zz}$
“2-6”	-0.232	0.018	0.595	0.013
“3-5”	-0.243	0.013	-0.736	0.011

### 3. АНАЛИЗИРУЮЩИЕ СПОСОБНОСТИ $dp \rightarrow ppn$ РЕАКЦИИ ПРИ ЭНЕРГИИ 1000 МЭВ

#### 3.1 Выделение событий $dp \rightarrow ppn$ реакции и вычитание углеродного фона

Так как нас интересуют данные по  $dp \rightarrow ppn$  реакции необходимо выделить  $pp$ -квазиупругие события с учетом углеродного фона. Для этого сначала был выделен критерий для данных по рассеянию дейтронов на углеродной мишени, который показан на рисунке 6.

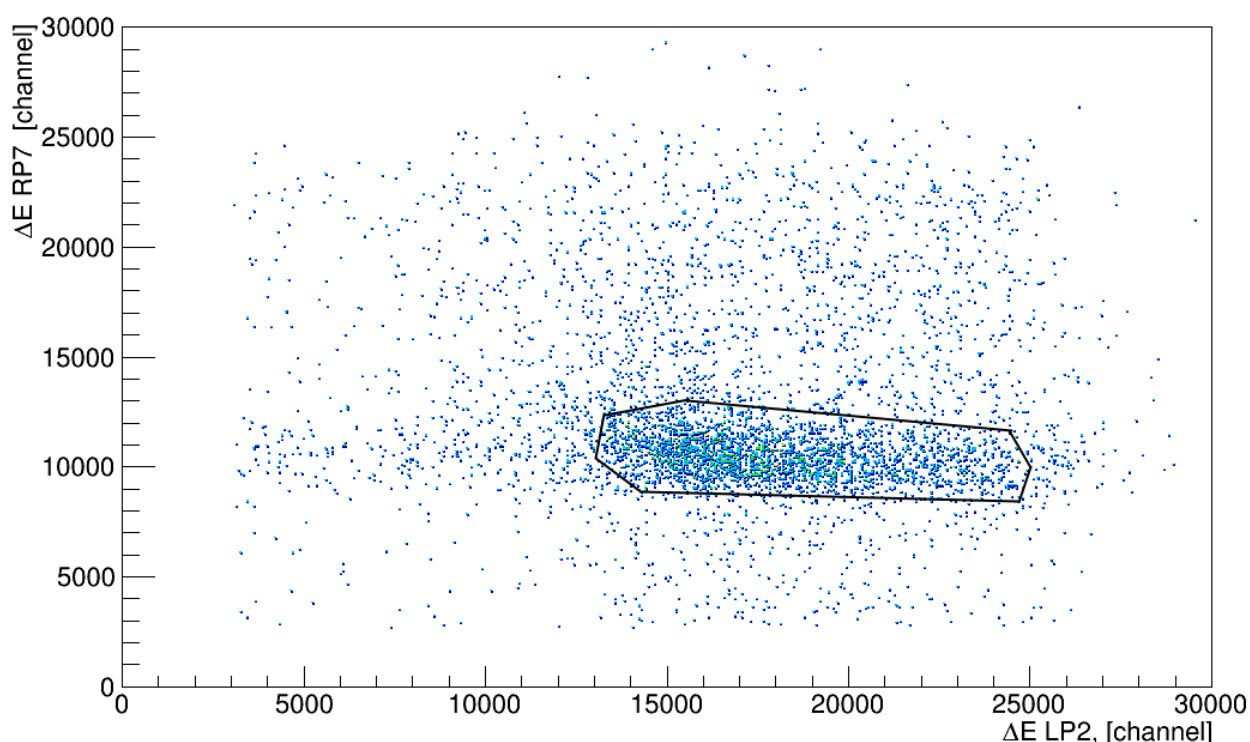


Рисунок 6: Корреляционная зависимость амплитуд сигналов двух кинематически сопряженных протонных счетчиков для угла 65 градусов в ссм при энергии пучка дейтронов 1000 МэВ с использованием углеродной мишени. Сплошной линией обозначен графический критерий для выделения событий, связанных с рассеянием на углероде.

Затем, после графического выделения данных для рассеяния на углеродной мишени, тот же критерий был использован для выделения  $dp \rightarrow ppn$  событий для полиэтилена, применение которого показано на рисунке 7.



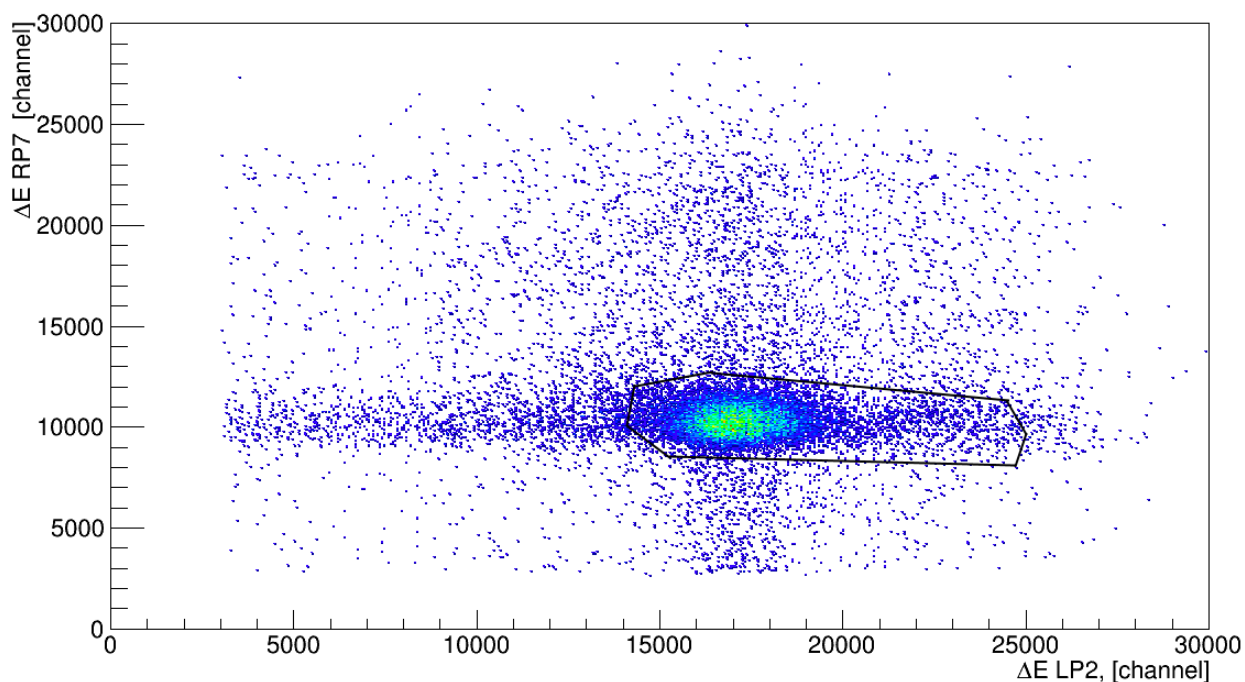


Рисунок 7: Корреляционная зависимость амплитуд сигналов двух кинематически сопряженных протонных счетчиков для угла 65 градусов в с.ц.м. при энергии пучка дейтронов 1000 МэВ с использованием полиэтиленовой мишени. Сплошной линией обозначен графический критерий для выделения событий, связанных с рассеянием на протонах с учетом углеродного фона.

Далее выбирался один из детекторов, для которого можно было бы наиболее адекватно отделить события  $dp \rightarrow ppp$  реакции от углеродного фона (см. рисунок 8). Из рисунка видно, что спектр, зарегистрированный счетчиком при использовании полиэтиленовой мишени (сплошная зависимость) существенно более узкий, чем спектр для углеродной мишени (пунктирная зависимость). В тоже время, в спектре полиэтилена есть более широкая компонента, обусловленная вкладом процессов на углероде. Для её выделения спектр протонов, полученный на углероде, масштабировался так, что разность квадратов числа событий для участков спектра вдали от его центра (за пределами штрихпунктирных линий) была минимальна. Сравнение кривых, полученных на полиэтиленовой мишени и углеродной, а также результат вычитания углеродного фона показаны на рисунке 7.

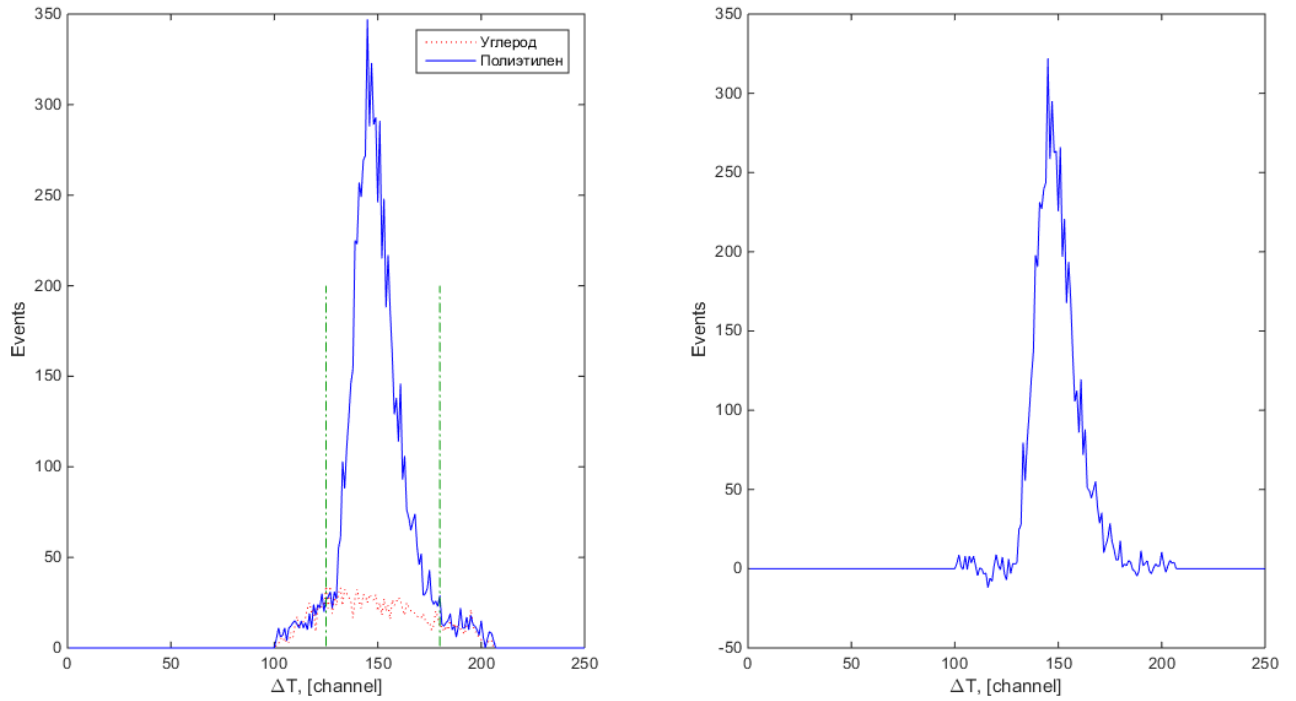


Рисунок 8: Спектр амплитуд одного из детекторов при энергии пучка дейтронов 1000 МэВ и мишени из полиэтилена (сплошная зависимость). Штрихпунктирная линия показывает границы подгонки углеродного фона (пунктирная зависимость) к данным на полиэтилене. Справа показана зависимость, полученная в итоге вычитания углеродного фона из данных по полиэтилену.

### 3.2 Вычисление анализирующих способностей $dp \rightarrow prp$ реакции

Полагая, что поляризация пучка определяется исключительно источником поляризованных ядер и поэтому остается неизменной при изменении энергии частиц в процессе ускорения, можно вычислить анализирующие способности процесса  $dp \rightarrow prp$ , которые определялись в соответствии с выражениями (14-17) для каждого угла в отдельности:

Анализирующие способности для левого плеча

$$A_{yl} = \frac{2 \left[ P_{zz-} \left( \frac{N_{l+}}{N_{l0}} - 1 \right) - P_{zz+} \left( \frac{N_{l-}}{N_{l0}} - 1 \right) \right]}{3(P_{zz-}P_{z+} - P_{zz+}P_{z-})} \quad (14)$$

$$A_{yy_l} = \frac{2 \left[ P_{z+} \left( \frac{N_{l-}}{N_{l0}} - 1 \right) - P_{z-} \left( \frac{N_{l+}}{N_{l0}} - 1 \right) \right]}{P_{zz-} P_{z+} - P_{zz+} P_{z-}} \quad (15)$$

и аналогично для правого плеча

$$A_{yr} = \frac{2 \left[ P_{zz-} \left( \frac{N_{r+}}{N_{l0}} - 1 \right) - P_{zz+} \left( \frac{N_{r-}}{N_{l0}} - 1 \right) \right]}{3(-P_{zz-} P_{z+} + P_{zz+} P_{z-})} \quad (16)$$

$$A_{yy_r} = \frac{2 \left[ P_{z-} \left( \frac{N_{r-}}{N_{l0}} - 1 \right) + P_{z+} \left( \frac{N_{r+}}{N_{l0}} - 1 \right) \right]}{-P_{zz-} P_{z+} + P_{zz+} P_{z-}} \quad (17)$$

Где  $N_{l+}$  ( $N_{r+}$ ) – количество событий, зарегистрированных левой (правой) парой детекторов с учетом корреляции при спиновой моде «2-6», поделенное на количество событий, зарегистрированных контрольными протонными детекторами.  $N_{l-}$  ( $N_{r-}$ ) – аналогичные значения для спиновой моды «3-5».  $N_{l0}$  ( $N_{r0}$ ) – количество событий, зарегистрированных левой (правой) парой детекторов при отсутствии поляризации пучка.  $P_{z+}$  ( $P_{zz+}$ ) векторная (тензорная) поляризация при спиновой моде «2-6».  $P_{z-}$  ( $P_{zz-}$ ) векторная (тензорная) поляризация при спиновой моде «3-5».

На рисунке 9 показана векторная анализирующая способность в зависимости от угла рассеяния в системе центра масс. Для того чтобы минимизировать приборные погрешности, анализирующие способности вычислялись отдельно для правого плеча детекторов и аналогично для левого. Полученные данные затем усреднялись с помощью формулы (13).

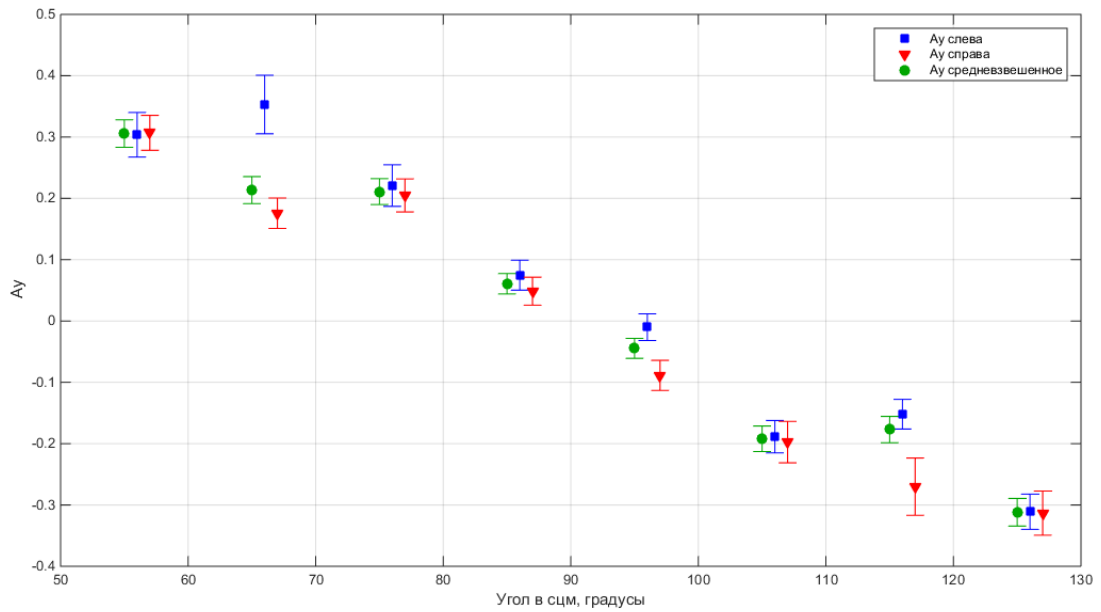


Рисунок 9: Векторные анализирующие способности  $A_y$   $dp \rightarrow rpp$  реакции при энергии 1000 МэВ в зависимости от угла рассеяния в с.ц.м.. Средневзвешенные значения анализирующей способности были получены усреднением данных справа и слева.

Так как данные по тензорным анализирующим способностям  $A_{yy}$  получились неоднозначными, поскольку предполагалось, что они должны быть равны нулю, было принято решение не вычислять среднее значение, а привести полученные значения  $A_{yy}$  по отдельности для правого и левого плеч экспериментальной установки (смотри рисунок 10).

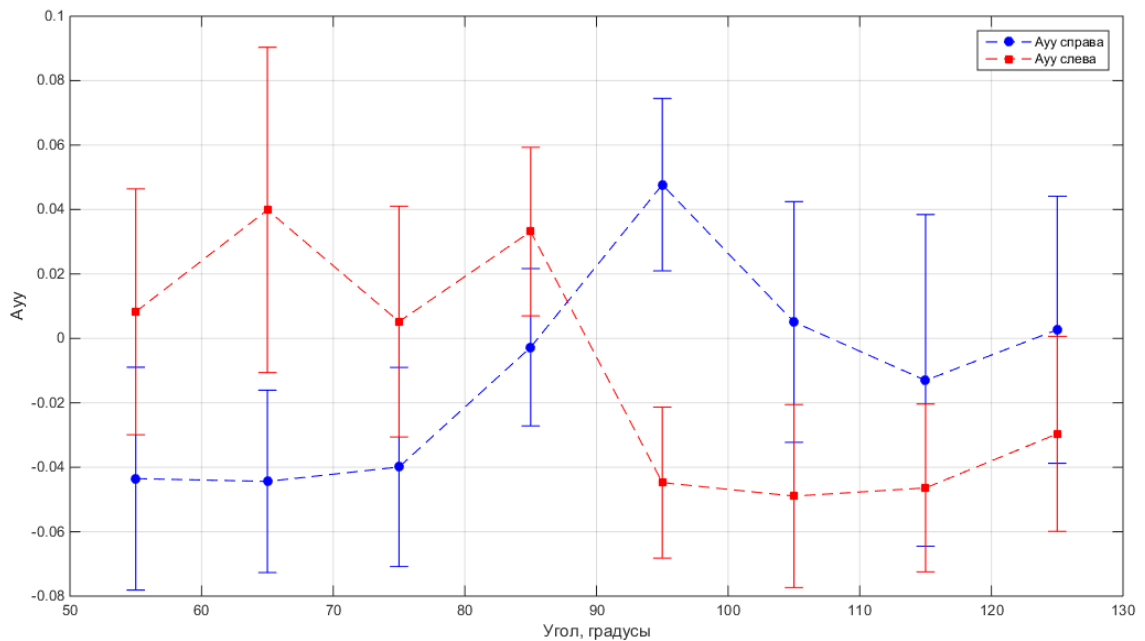


Рисунок 10: Тензорные анализирующие способности  $A_{yy}$   $dp \rightarrow rpp$  рассеяния при энергии 1000 МэВ в зависимости от угла рассеяния в с.ц.м..

Все итоговые результаты вычисления анализирующих способностей  $dp \rightarrow ppp$  реакции в зависимости от угла в системе центра масс при энергии пучка дейтронов 1000 МэВ показаны в таблице 5.

Таблица 5: Результаты вычисления векторной  $A_y$  и тензорной  $A_{yy}$  анализирующих способностей  $dp \rightarrow ppp$  реакции при энергии пучка дейтронов 1000 МэВ в зависимости от угла рассеяния в с.ц.м..  $\Delta A_y$ ,  $\Delta A_{yy}$  - соответствующие ошибки вычислений.

$\Theta_{\text{ц.м.}}, ^\circ$	$A_y$	$\Delta A_y$	$A_{yy}$ лево	$\Delta A_{yy}$ лево	$A_{yy}$ право	$\Delta A_{yy}$ право
55	0.306	0.022	0.008	0.038	-0.043	0.035
65	0.213	0.022	0.040	0.050	-0.044	0.028
75	0.211	0.021	0.005	0.036	-0.040	0.031
85	0.061	0.017	0.033	0.026	-0.003	0.024
95	-0.045	0.016	-0.045	0.023	0.048	0.027
105	-0.192	0.021	-0.049	0.028	0.005	0.037
115	-0.177	0.021	-0.046	0.026	-0.013	0.051
125	-0.312	0.022	-0.030	0.030	0.003	0.041

На рисунке 11 приведены результаты сопоставления полученной зависимости векторной анализирующей способности реакции  $dp \rightarrow ppp$  с предсказаниями парциально-волнового анализа SAID.

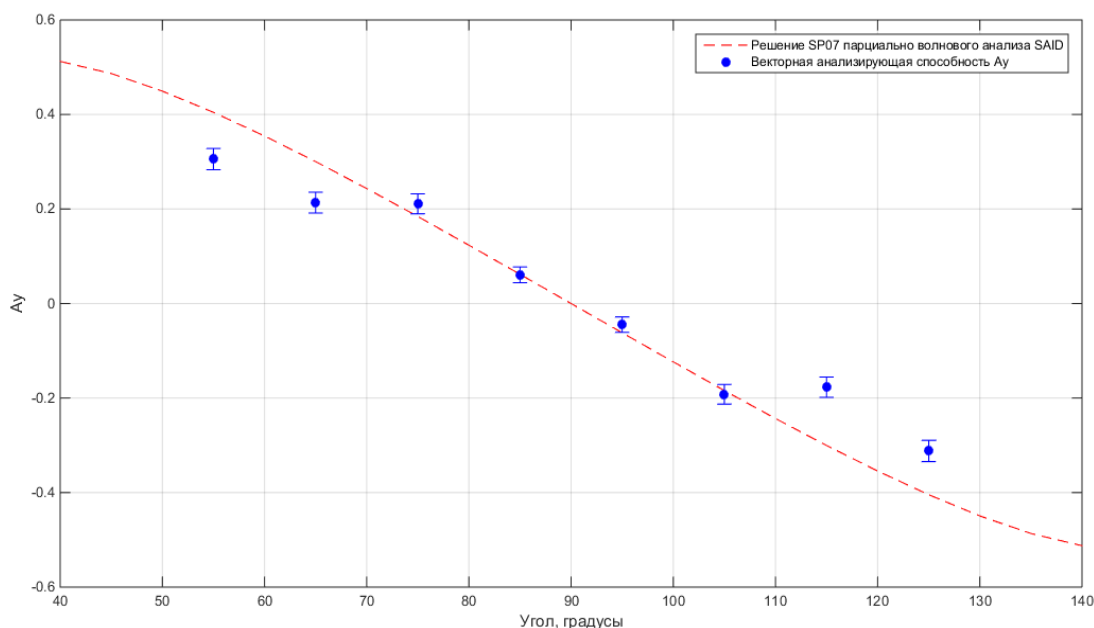


Рисунок 11: Векторная анализирующая способность  $A_y$   $dp \rightarrow ppp$  реакции при энергии 1000 МэВ в сравнении с решением SP07 парциально волнового анализа SAID.

Как видно из рисунка 11, полученные значения векторной анализирующей способности хорошо удовлетворяют решению SP07 парциально-волнового анализа SAID на углах  $65^{\circ}$ - $105^{\circ}$ . Тем не менее, наблюдается расхождение с теорией на малых и больших углах. Модуль анализирующей способности  $A_y$  на малых и больших углах меньше, чем предсказывается теорией. Это может быть связано с некорректностью учета вклада углеродного фона, или с несоответствием теории результатам измерений. Для получения более точного ответа на этот необходимо проведение дополнительных измерений и расчётов, что выходит за рамки задачи, поставленной перед выполнением выпускной квалификационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные в процессе выполнения выпускной квалификационной работы, можно сформулировать следующим образом:

- 1) В составе экспериментальной группы сотрудников ОИЯИ на ускорителе Нуклотрон с помощью процесса упругого  $dp$  рассеяния проведены измерения поляризации дейтронного пучка, на котором выполнено исследование угловой зависимости асимметрии реакции  $dp \rightarrow ppp$  с регистрацией двух протонов.
- 2) Изучен программный пакет ROOT, который используется для анализа экспериментальных данных в физике частиц.
- 3) По результатам измерения асимметрии выхода упругого  $dp$  рассеяния для энергии дейтронов 270 МэВ и известной анализирующей способности процесса определена поляризация дейтронного пучка.
- 4) Из полного набора данных для измерений с полиэтиленовой мишенью путем вычитания вклада реакции  $C(dp)p$  + все остальное выделен вклад реакции  $dp \rightarrow ppp$  и определена угловая зависимость её асимметрии в диапазоне углов  $65^\circ - 125^\circ$  в системе центра масс для энергии дейтронов 1000 МэВ.
- 5) Исходя из измеренного значения поляризации дейтронного пучка Нуклотрона и вычисленных значений асимметрии, определена угловая зависимость векторной анализирующей способности реакции  $dp \rightarrow ppp$  при энергии дейтронов 1000т МэВ.
- 6) Сопоставление полученных значений анализирующей способности с предсказаниями решения SP07 парциально волнового анализа SAID показало хорошее согласие результатов измерений и расчётов в диапазоне углов  $75^\circ - 105^\circ$ . Вне этого диапазона измеренное значение асимметрии меньше предсказаний теории. Причинами зарегистрированного разногласия могут являться как несимметрия

плеч экспериментальной установки относительно точки взаимодействия дейтронного пучка с полиэтиленовой мишенью, что частично подтверждается ненулевым значением тензорной анализирующей способности, полученной в результате измерений, так и неадекватность использованной теории. Для ответа на этот вопрос необходимо проведение дополнительных исследований.



## Список литературы

- [1] К. Н. Мухин, Экспериментальная ядерная физика в 3т. Т.1. Физика атомного ядра. СПб.: Лань, 2009. – 384 с.
- [2] К. Н. Мухин, Экспериментальная ядерная физика в 3т. Т.2. Физика ядерных реакций. СПб.: Лань, 2009. – 319 с.
- [3] К. Н. Мухин, Экспериментальная ядерная физика в 3т. Т.3. Физика элементарных частиц. СПб.: Лань, 2009. – 309 с.
- [4] И. М. Капитонов, Введение в физику ядра и частиц. Едиториал УРСС, 2004.
- [5] Carlson C.E., Hiller J.R., Holt R.J., Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 47 395 (1997)
- [6] Gar con M., Van Orden J.W., Adv. Nucl. Phys. 26 293 (2001)
- [7] Gilman R., Gross F. nucl-th/0111015. (2001)
- [8] А.П. Потылицын, Поляризованные фотонные пучки высокой энергии, М.: Энергоатомиздат, 1987, 120с.
- [9] V. V. Fimushkin et al., Status of the Polarized Ions Source for the JINR Accelerator Complex, Physics of Particles and Nuclei, Vol. 45, No.1, ISSN 1063-7796 (2014)
- [10] V. V. Fimushkin et al., Status of thr SPI for the JINR Accelerator Complex, International Journal of Modern Physics: Conference Series, Vol. 40, 1660103, (2016)
- [11] K.Sekiguchi et al., Phys.Rev.C65, 034003 (2002)
- [12] K.Sekiguchi et al., Phys.Rev.C70, 014001 (2004)
- [13] K.Suda, et al., Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A572 (2007) 745

[14] N. Sakamoto et al., Phys.Lett. B 367 60-64 (1996)

[15] П. К. Курилкин, Изучение угловой зависимости анализирующих способностей реакции  $d\alpha$  упругого рассеяния при энергиях дейтрона 880 и 2000 МэВ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Дубна (2010)

[16] Дж. Тейлор, Введение в теорию ошибок. Москва, Мир (1985)