

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КУРСОВАЯ РАБОТА

Прецизионное измерение спина нуклона на будущем  
электрон-ионном коллайдере EIC

Студент: Черепанов Степан Сергеевич

Научный руководитель: старший научный сотрудник  
физического факультета МГУ  
Апарин Алексей Андреевич

Учебная группа: № 213

г. Москва  
2022-2023

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>2</b>
1.1	Общая информация о проблеме измерения спина нуклона . . . . .	2
1.2	Почему измерение спина нуклона важно для понимания кварков и глюонов	2
1.3	Роль EIC в изучении спина нуклона . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Теоретические основы измерения спина нуклона</b>	<b>3</b>
2.1	Краткий обзор квантовой хромодинамики и спина нуклона . . . . .	3
2.2	Кварковая структура адронов в глубоконеупругом рассеянии. Структурные функции нуклонов $g_1$ и $g_2$ . . . . .	3
2.3	Спин-зависимые коллинеарные PDF и их характерные масштабы $x$ и $Q^2$	4
<b>3</b>	<b>Исследование спиновой структуры нуклона с использованием Электронного коллайдера</b>	<b>5</b>
3.1	Спиновая структура нуклона и двойная спиновая асимметрия $A_{LL}$ : ограничения и перспективы исследований с EIC . . . . .	5
3.2	Влияние прогнозируемых данных EIC на изучение спиновой структуры нуклона и спин-зависимых коллинеарных PDF . . . . .	5
3.3	Вклад орбитального углового момента в спин протона: роль $EIC$ . . . . .	7
3.4	Вклад морских кварков в спиновое правило . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Детектор EIC</b>	<b>9</b>
4.1	Обзор детектора EIC и основные требования . . . . .	9
4.2	Основные компоненты детектора . . . . .	9
4.3	Измерения спина нуклона на EIC и их вклад в фундаментальные исследования . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Заключение</b>	<b>12</b>

# 1 Введение

## 1.1 Общая информация о проблеме измерения спина нуклона

Спин является внутренним моментом импульса частиц. В классической механике, спин можно представить как вращение частицы вокруг своей оси. В квантовой механике, спин является квантовым числом и может принимать только дискретные значения.

Спин нуклона — это важное свойство, которое помогает понять внутреннюю структуру нуклона и его взаимодействия с другими частицами. Нуклоны состоят из кварков и глюонов, которые взаимодействуют друг с другом с помощью сильного взаимодействия. Спин нуклона является суммой спинов всех составляющих его частиц, включая кварки и глюоны. Однако вопрос о том, как вклады спинов кварков и глюонов объединяются для формирования общего спина нуклона, до сих пор не полностью понятен и изучается в рамках теории квантовой хромодинамики (QCD).

Измерение спина нуклона является сложной задачей, так как спин зависит от различных аспектов нуклонной структуры и взаимодействий кварков и глюонов.

## 1.2 Почему измерение спина нуклона важно для понимания кварков и глюонов

Измерение спина нуклона имеет важное значение для понимания кварков и глюонов, так как оно позволяет углубиться в исследование внутренней структуры нуклона и механизмов сильного взаимодействия. Изучение спиновых структур нуклонов может привести к новым открытиям в области фундаментальной физики, таких как:

- Раскрытие подробностей квантовой хромодинамики, фундаментальной теории сильного взаимодействия, которая описывает взаимодействия кварков и глюонов.
- Определение структуры спинов кварков и глюонов внутри нуклона, что может привести к лучшему пониманию их свойств и взаимодействий.
- Проверка существующих теоретических моделей и предсказаний, связанных со спином нуклона, кварками и глюонами. Это может способствовать развитию новых теоретических подходов для описания этих феноменов и предсказания результатов будущих экспериментов.
- Исследование динамики спина нуклона может также помочь в понимании свойств других адронов (составных частиц, состоящих из кварков и глюонов), а также процессов, происходящих в экзотических состояниях материи, таких как кварк-глюонная плазма.

В целом, измерение спина нуклона является ключевым аспектом современной физики элементарных частиц и ядерной физики. Оно позволяет углубиться в исследование фундаментальных свойств материи и взаимодействий между ее составляющими, что может привести к новым открытиям и развитию нашего понимания Вселенной.

## 1.3 Роль EIC в изучении спина нуклона

Согласно [6], спин нуклона можно разложить на составляющие:

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma(\mu) + \Delta G(\mu) + L(\mu), \quad (1)$$

где  $\Delta\Sigma$ ,  $\Delta G$  и  $L$  обозначают вклады спина кварков и антикварков, спина глюона и углового момента партонно соответственно. Все эти вклады зависят от масштаба перенормировки  $\mu$ . Партонные спиновые вклады можно выразить через распределения спиральности партонно, интегрируя их по  $x$ -диапазону от 0 до 1. Здесь  $x$  представляет собой долю импульса партонно в нуклоне.

Эксперименты показали, что вклады спина кварков и глюонов ( $\Delta\Sigma$  и  $\Delta G$ ) не полностью объясняют спин нуклона. Это указывает на ненулевой вклад орбитального углового момента ( $L$ ). Однако численные значения для  $\Delta\Sigma$  и  $\Delta G$  имеют большие погрешности, особенно для малых значений  $x$  ( $x \leq 0,005$ ).

Измерения на EIC позволят значительно уменьшить эти погрешности. Это в свою очередь позволит лучше ограничить вклады угловых моментов партонно.

Для получения информации об  $\Delta\Sigma$  и  $\Delta G$  в EIC необходимо измерять поляризованное глубоко неупругое рассеяние (DIS) с продольно поляризованными электронами и продольно поляризованными протонами в большом диапазоне значений  $x$  и  $Q^2$ . Это потребует использования сложного детекторного оборудования, включая прецизионные калориметрические измерения энергии рассеянных электронов и разделение электронов и адронов.

## 2 Теоретические основы измерения спина нуклона

### 2.1 Краткий обзор квантовой хромодинамики и спина нуклона

Квантовая хромодинамика является теорией сильного взаимодействия и основной составляющей Стандартной модели частиц. QCD описывает взаимодействия между кварками и глюонами, несущими сильное взаимодействие, которое обеспечивает связь между кварками в адронах, таких как протоны и нейтроны.

1. Краткое введение в квантовую хромодинамику:

QCD базируется на концепции хромодинамического заряда, называемого "цветом". В отличие от электрического заряда, который может принимать две формы (положительный и отрицательный), цвет представлен тремя вариантами: красный, синий и зеленый. Кварки являются фундаментальными частицами, несущими цветной заряд, и глюоны, которые также имеют цветной заряд, служат средством передачи сильного взаимодействия между кварками.

Основными объектами изучения в QCD являются адроны - составные частицы, образованные кварками и глюонами, связанными сильным взаимодействием. Протоны и нейтроны - наиболее известные примеры адронов.

2. Спин нуклона и его связь с QCD:

Теория QCD предсказывает, что общий спин нуклона равен сумме спинов кварков, глюонов и орбитальных моментов импульса кварков и глюонов.

Однако, первоначальные эксперименты, проведенные в 1980-х годах, показали, что кварки вкладывают только небольшую часть своего спина в спин нуклона. Этот результат, известный как проблема спина нуклона, стимулировал дополнительные исследования, чтобы определить вклады глюонов и орбитальных моментов импульса в спин нуклона.

### 2.2 Кварковой структура адронов в глубоконеупругом рассеянии. Структурные функции нуклонов $g_1$ и $g_2$

Структурные функции  $g_1$  и  $g_2$  играют ключевую роль в изучении спиновой структуры нуклона и распределения спина кварков и глюонов внутри него. Они обычно изучаются

с использованием глубоко неупругого рассеяния поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах.

Структурная функция  $g_1(x, Q^2)$  описывает спин-спин корреляцию между падающим лептоном (обычно электроном или мюоном) и кварком внутри нуклона (протона или нейтрона). Спин-спин корреляция означает взаимосвязь между спинами этих двух частиц, и в контексте глубоко неупругого рассеяния это относится к взаимодействию их спинов. Когда спины лептона и кварка параллельны друг другу, вероятность рассеяния может быть отличной от случая, когда их спины антипараллельны. Изучение этой корреляции позволяет получить информацию о спиновой структуре нуклона и распределении спина между кварками и глюонами внутри нуклона.

Структурная функция  $g_2(x, Q^2)$  связана с корреляциями спина и орбитального углового момента кварков. Эти структурные функции  $g_1$  и  $g_2$  связаны с асимметриями поляризованного глубоко неупругого рассеяния, такими как асимметрии  $A_1$  и  $A_2$ .

Асимметрии  $A_1$  и  $A_2$  определяются как разность вероятностей рассеяния поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах с различными направлениями спина. Вероятности рассеяния зависят от структурных функций  $g_1$  и  $g_2$ . Используя экспериментальные данные об асимметриях, можно извлечь значения структурных функций.

### 2.3 Спин-зависимые коллинеарные PDF и их характерные масштабы $x$ и $Q^2$

Спин-зависимые коллинеарные функции распределения партонов (PDF) отражают вероятность нахождения кварка или глюона с определенным продольным импульсом  $x$  и спином внутри адрона. Они предоставляют ключевую информацию о спиновой структуре адронов и взаимодействиях между их составляющими. Величины  $x$  и  $Q^2$  являются характерными масштабами для изучения спин-зависимых коллинеарных функций распределения партонов (PDF).

Переменная Бюркена  $x$ , определяемая как  $x = -\frac{q^2}{2M\nu}$ , является безразмерным параметром, используемым для описания глубоко неупругого рассеяния лептонов на нуклонах. Величины, входящие в это выражение, имеют следующий смысл:

- $q^2$ : Квадрат переданного импульса  $q$  является мерой энергии, передаваемой между падающим лептоном и нуклоном в процессе глубоко неупругого рассеяния.
- $M$ : Масса нуклона (протона или нейтрона).
- $\nu$ : Энергия, передаваемая между лептоном и нуклоном в процессе глубоко неупругого рассеяния. Эта величина также является важным параметром, определяющим энергетическую шкалу взаимодействия.

Переменная Бюркена  $x$  используется для характеристики доли импульса, переносимого кварком внутри нуклона. Она принимает значения от 0 до 1.

$Q^2$ , квадрат передачи импульса, является инвариантом энергии и импульса, связанным с передачей виртуального фотона между рассеянным лептоном и адроном.  $Q^2$  характеризует разрешение, с которым экспериментатор может "вглядываться" в структуру адрона. При более высоких значениях  $Q^2$  измеряется структура адрона на меньших расстояниях, то есть с большей детализацией.

## 3 Исследование спиновой структуры нуклона с использованием Электрон-ионного коллайдера

### 3.1 Спиновая структура нуклона и двойная спиновая асимметрия $A_{LL}$ : ограничения и перспективы исследований с ЕИС

Двойная спиновая асимметрия  $A_{LL}$  - это асимметрия, измеряемая при столкновении поляризованных частиц протонов с антипротонами или другими протонами, при условии, что их спины параллельны или антипараллельны направлению движения. В случае глубоко неупругого рассеяния  $A_{LL}$  определяется следующим образом:

$$A_{LL} = \frac{\sigma_{\uparrow\uparrow} - \sigma_{\uparrow\downarrow}}{\sigma_{\uparrow\uparrow} + \sigma_{\uparrow\downarrow}},$$

где  $\sigma_{\uparrow\uparrow}$  и  $\sigma_{\uparrow\downarrow}$  - это сечения рассеяния для параллельной и антипараллельной поляризации спинов адронов.

При изучении спиновой структуры нуклона двойная спиновая асимметрия  $A_{LL}$  обеспечивала большую часть ограничений на спин-зависимые коллинеарные функции распределения. Существующие данные по двойной спиновой асимметрии  $A_{LL}$  имеют ограниченное кинематическое покрытие, с долей продольного импульса  $x$  порядка 0.01. Это означает, что текущие экспериментальные данные могут предоставить информацию о спин-зависимых PDF только для определенного диапазона  $x$ .

Вследствие этого ограничения ученые не могут исследовать спиновую структуру нуклона в широком диапазоне продольных импульсов и энергий передачи, что затрудняет изучение детальной спиновой динамики кварков и глюонов. ЕИС будет использоваться для исследования неизведанных областей спиновой физики, что позволит получить новые ограничения на спин-зависимые коллинеарные PDF. Проект ЕИС предоставит возможность изучить нарушения масштабирования в структурной функции  $g_1$ , что позволит значительно сузить неопределенности в спин-зависимых коллинеарных PDF. Это демонстрируется картами корреляции и картами чувствительности:

Формула корреляции:

$$\rho[f_i, O] = \frac{\langle O \cdot f_i \rangle - \langle O \rangle \langle f_i \rangle}{\Delta O \Delta f_i}$$

Формула чувствительности:

$$S[f_i, O] = \frac{\langle O \cdot f_i \rangle - \langle O \rangle \langle f_i \rangle}{\delta O \Delta f_i}$$

Здесь:

- $f_i$  - некоторый параметр (например, физическая величина или переменная модели);
- $O$  - другой параметр, с которым мы хотим сравнить  $f_i$ ;

где  $\Delta$  представляет собой неопределенности, возникающие из неопределенности PDF, в то время как  $\delta O(x)$  - смоделированная неопределенность наблюдаемого значения. Карты корреляции и карты чувствительности являются визуализациями, которые показывают, насколько сильно различные величины связаны друг с другом и насколько одна переменная чувствительна к изменениям другой переменной.

### 3.2 Влияние прогнозируемых данных ЕИС на изучение спиновой структуры нуклона и спин-зависимых коллинеарных PDF

На рисунке 1 показана связь и чувствительность между распределением глюонов  $\Delta g(x, Q^2)$  и двойной спиновой асимметрией (фотон-нуклон)  $A_1$ , а также между кварко-

вым распределением  $\Delta\Sigma(x, Q^2)$  и  $A_1$  в зависимости от  $x, Q^2$ . Светло-синие и темно-синие круги представляют значения корреляции (чувствительности) для  $\sqrt{s} = 45$  ГэВ и 140 ГэВ соответственно. Во всех случаях размер кругов пропорционален значению коэффициента корреляции (чувствительности).

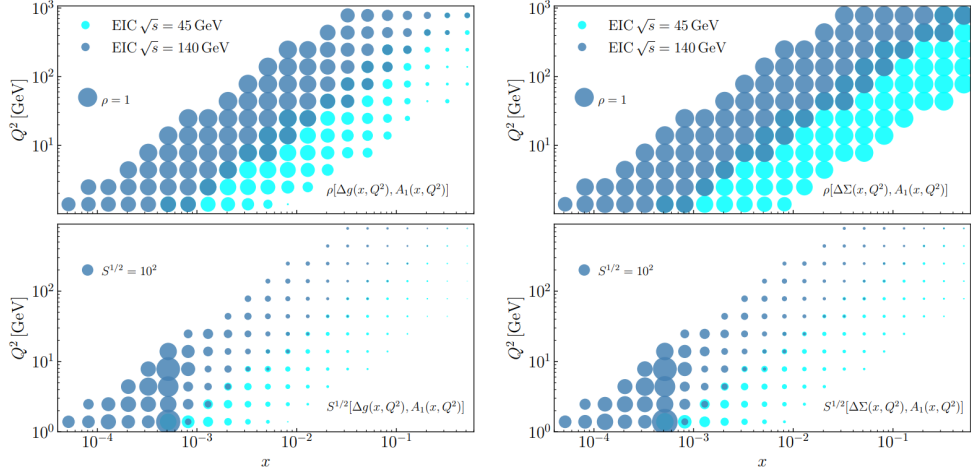


Рис. 1: Коэффициенты корреляции (верхняя панель) и чувствительности (нижняя панель).

Теоретические прогнозы для спина нуклона основаны на экстраполяции текущих данных до области малых значений  $x$ . Однако такая экстраполяция может вносить дополнительные неопределенности в результаты анализа. Рисунок 2 демонстрирует влияние псевдоданных EIC  $A_{LL}$  на распределения поляризации глюонов (левая панель) и поляризации кварков (правая панель) в зависимости от  $x$  при  $Q^2 = 10$  ГэВ<sup>2</sup>. На рисунке показаны оценки DSSV14[3, 4] (светло-синий цвет), полосы неопределенности после включения ожидаемых данных DIS на  $\sqrt{s} = 45$  ГэВ (синий цвет) и после перевесовки с  $\sqrt{s} = 140$  ГэВ (темно-синий цвет).

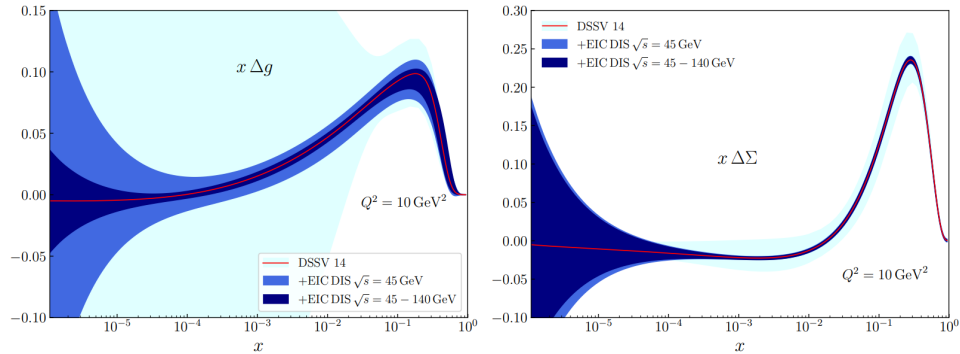


Рис. 2: Влияние псевдоданных EIC ALL на распределение поляризации глюонов (левая панель) и поляризации кварков (правая панель) в зависимости от  $x$  при  $Q^2 = 10$  ГэВ<sup>2</sup>. Показаны оценка DSSV14 (светло-синяя), а также полосы неопределенности от соответствующих псевдоданных DIS с  $\sqrt{s} = 45$  ГэВ (синяя) и последующего перевзвешивания с  $\sqrt{s} = 140$  ГэВ (темно-синяя).

Рисунок 3 иллюстрирует влияние прогнозируемых данных  $A_{LL}^p$  на  $g_1^p$  (левая панель) относительно глобального анализа  $QCD$  JAM (желтая полоса), принимая  $+1\sigma$  ("high  $g_1$  красная полоса),  $-1\sigma$  ("low  $g_1$  зеленая полоса) и центральные ("mid  $g_1$  синяя полоса) неопределенности  $A_{LL}^p$ .

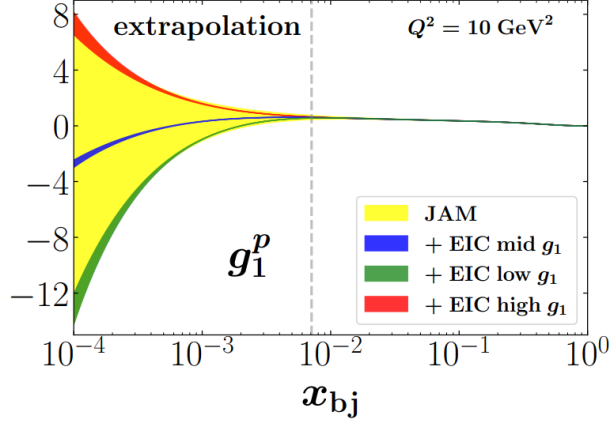


Рис. 3: Воздействие прогнозируемых данных  $A_{LL}^p$  в кинематике  $EIC$  на  $g_1^p$ , относительно глобального анализа  $QCD$   $JAM$  (желтая полоса), принимая  $+1\sigma$  («высокий  $g_1$ », красная полоса),  $-1\sigma$  («низкий  $g_1$ », зеленая полоса) и центральные («средний  $g_1$ », синяя полоса) неопределенности  $A_{LL}^p$ .

В целом, теоретические прогнозы и ограничения для измерения спина нуклона являются активной и важной областью исследования. Эксперименты на  $EIC$  позволят значительно улучшить понимание спиновой структуры нуклона и уточнить границы гелицевых распределений кварков и глюонов. Исследование нарушений масштабирования в структурной функции  $g_1$  дополнительно сузит неопределенности и повысит точность измерений спина нуклона, что приведет к более глубокому пониманию квантовой хромодинамики и структуры адронов.

### 3.3 Вклад орбитального углового момента в спин протона: роль $EIC$

Улучшенное определение спина кварков и глюонов дает возможность исследовать вклад орбитального углового момента частиц в спин протона. Демонстрирует, как  $EIC$  может помочь в изучении этого вклада, который определяется разницей между спинами кварков, глюонов и спином протона, равным  $1/2$ .

Горизонтальная ось показывает разницу между  $1/2$  и вкладами спинов кварков и глюонов для доли импульса до  $x = 0.001$ . Оставшиеся вклады могут быть связаны с орбитального углового момента частиц, если вклад спина частиц с меньшими долями импульса очень мал или даже равен нулю. Однако этот вклад может быть ненулевым и в настоящее время неопределен, поэтому на вертикальной оси отображается его потенциальный вклад в спин протона.

Цветные области на графике показывают ограничения на эти значения, основанные на существующих данных и ожидаемых данных от предполагаемых измерений  $EIC$ . Диагональные линии представляют комбинации вкладов с разными долями импульса, для которых полученный орбитального углового момента будет таким же большим, как спин протона и параллельным ему, исчезающим или точно противоположным. Данные  $EIC$  позволят опровергнуть хотя бы один из этих крайних сценариев, а возможно, и два из них.

Таким образом, Рисунок 4 иллюстрирует, как  $EIC$  может помочь уточнить понимание вклада орбитального углового момента в спин протона, сравнивая текущие данные с ожидаемыми результатами экспериментов.

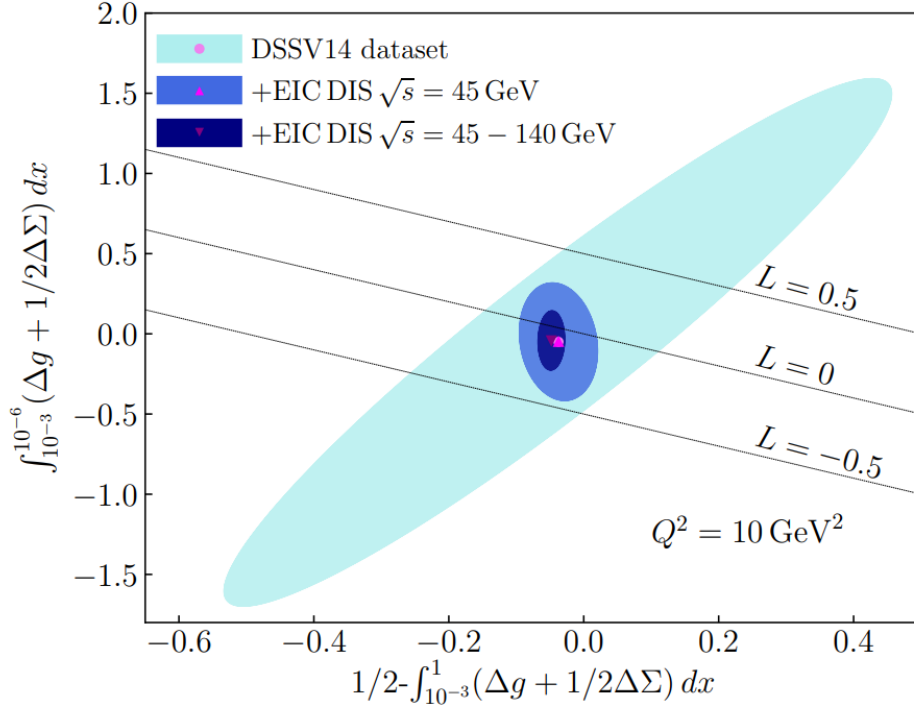


Рис. 4: Пространство для потенциальных вкладов орбитального углового момента в спин протона при  $Q^2 = 10 \text{ ГэВ}^2$ ,

### 3.4 Вклад морских кварков в спиновое правило

Используя полувключающие глубоко неупругие рассеяния (SIDIS), можно получить лучше понимание структуры спина нуклона, в частности, спинов морских кварков. SIDIS-эксперименты на EIC позволят значительно улучшить результаты, сравнительно с данными, полученными только из инклюзивных DIS-измерений, благодаря обнаружению пионов и каонов вместе с рассеянными лептонами.

Благодаря ожидаемым данным от EIC, уровень неопределенности по спинам всех трех морских кварков ( $\Delta\bar{u}$ ,  $\Delta\bar{d}$ ,  $\Delta s$ ) значительно уменьшится. Самое сильное влияние на низких значениях  $x$  будет наблюдаться для данных с наибольшими энергиями столкновений, в то время как на средних и высоких значениях  $x$  большие улучшения будут видны уже на более низких энергиях столкновений.

Одним из ключевых вопросов, на который смогут ответить данные по спинам морских кварков, является их вклад существенным в спиновое суммарное правило. В частности, текущие подгонки заставляют поляризацию странного морского кварка принимать отрицательные значения на нижних значениях  $x$ . Данные EIC SIDIS позволят окончательно определить, существует ли ненулевая странная поляризация при  $x > 0.5 \times 10^{-5}$ .

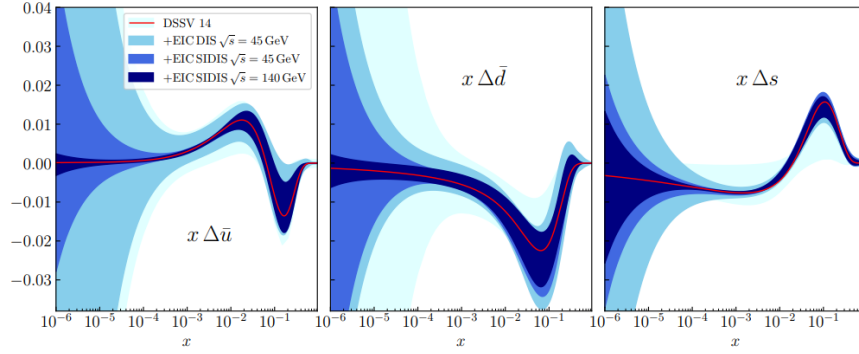


Рис. 5: Влияние измерений SIDIS на EIC на спиновые состояния морских кварков  $x\Delta\bar{u}$ ,  $x\Delta\bar{d}$  и  $x\Delta s$  в зависимости от  $x$  при  $Q^2 = 10 \text{ ГэВ}^2$

## 4 Детектор EIC

### 4.1 Обзор детектора EIC и основные требования

Детектор EIC создается для изучения фундаментальных процессов взаимодействия элементарных частиц на микроскопическом уровне. Основные требования к аппаратуре связаны с исследуемыми процессами и необходимостью широкого кинематического охвата, точного определения рассеянных частиц и высокой эффективности регистрации.

Исследуемые процессы и связанные с ними требования включают:

1. Инклюзивное рассеяние - требует точного определения рассеянного электрона и чрезвычайно точного разрешения измерения его угла и энергии. Для этого используются центральный магнит и система слежения, необходимые для измерения импульса и полного охвата быстроты с электромагнитной и адронной калориметрией.
2. Полуинклюзивное рассеяние - требует отличного определения адронов в широком диапазоне импульса и быстроты, полного покрытия  $2\pi$  для слежения и анализа импульса.
3. Эксклюзивные реакции - требуют точной реконструкции всех частиц в событии. Это достигается с использованием трекера с отличным разрешением точки в пространстве и определением импульса, электромагнитной калориметрии с отличным разрешением энергии, адронной калориметрии в концевых частях и полной герметичности установки.

Для соответствия этим требованиям, основной детектор EIC предполагает разработку и внедрение передовых технологий детекторов, таких как гибридные пиксельные детекторы, магниты с высоким полем, сцинтилляционные детекторы и инновационные решения для калориметрии. Эти технологии обеспечивают максимальную эффективность регистрации частиц и минимальные потери сигнала, что позволяет точно изучать указанные процессы и проводить научные исследования на высоком уровне.

В целом, детектор EIC специально разрабатывается для изучения различных процессов, связанных с взаимодействием элементарных частиц. Основные требования к аппаратуре направлены на обеспечение точности и эффективности регистрации, что позволяет проводить качественные исследования и расширять наши знания о структуре и свойствах элементарных частиц.

### 4.2 Основные компоненты детектора

1. Адронный калориметр торцевой части (Hadron Calorimeter Endcap):

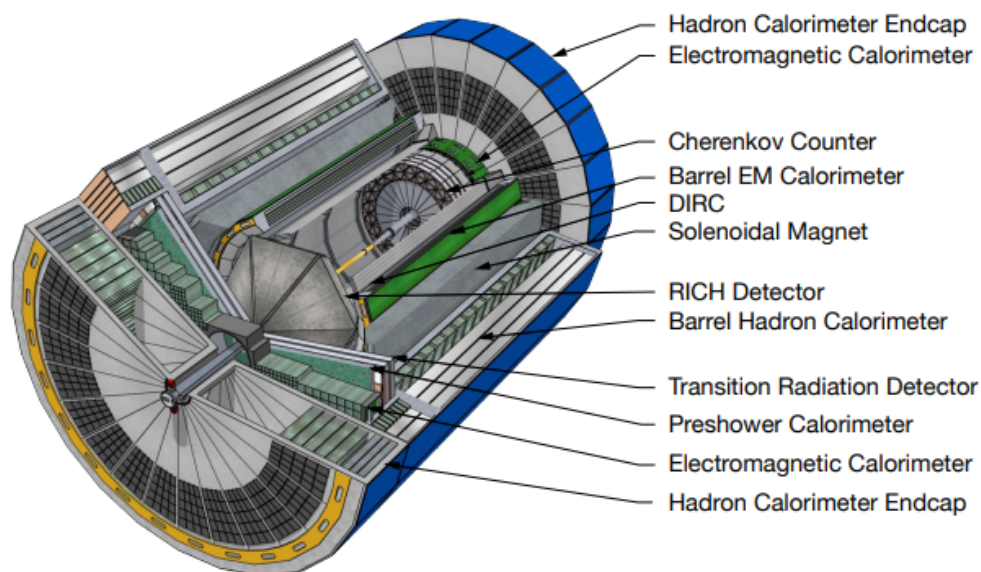


Рис. 6: Изображение детектора EIC в разрезе

Адронный калориметр измеряет энергию адронов после их столкновения в реакции. Адронные калориметры обычно состоят из чередующихся слоев активного материала (детектирующего) и поглотителя. Когда адроны проходят через поглотитель, они взаимодействуют с атомами поглотителя и создают ливни частиц, состоящие из множества вторичных частиц.

Активные слои, расположенные между слоями поглотителя, обнаруживают и регистрируют эти вторичные частицы, предоставляя информацию об их энергии и положении. Затем эта информация анализируется и используется для определения энергии первичных адронных частиц.

Торцевые адронные калориметры располагаются на концах детектора и предназначены для измерения энергии адронов, движущихся под большими углами к оси пучка.

### 2. Электромагнитный калориметр (Electromagnetic Calorimeter):

Электромагнитный калориметр предназначен для измерения энергии электромагнитных частиц, таких как фотоны, электроны и позитроны, путем регистрации электромагнитных ливней, вызванных взаимодействием этих частиц с материалом калориметра.

Электромагнитные калориметры обычно состоят из активного детектирующего материала, в котором происходят электромагнитные ливни, и поглотителя, который поглощает часть энергии и способствует развитию ливней. Активный детектирующий материал преобразует энергию ливней в свет или заряд, который затем регистрируется.

### 3. Черенковский счетчик (Cherenkov Counter):

Черенковские счетчики - это тип детекторов частиц, использующих эффект излучения Черенкова для обнаружения заряженных частиц. Принцип работы черенковских счетчиков основан на регистрации излучения, открытого П.А. Черенковым в 1934 году. Это излучение возникает при движении заряженной частицы в прозрачной среде со скоростью  $v$ , большей скорости света  $c$  в этой среде. Условие возникновения черенковского излучения имеет вид  $v > c/n$ , где  $c$  - скорость света в вакууме, а  $n$  - показатель преломления среды.

Черенковское свечение является когерентным излучением диполей, образующихся в результате поляризации среды пролетающей заряженной частицей, и возникает при возвращении этих диполей (поляризованных атомов) в исходное неполяризованное состояние. При движении частицы со "сверхсветовой" скоростью за счёт запаздывающей

реакции диполей они преимущественно ориентируются в направлении движения частицы, что приводит к нескомпенсированному излучению.

При прохождении заряженной частицы через среду с "сверхсветовой" скоростью возникает конусообразное излучение. Это излучение собирается и детектируется.

Черенковские счетчики способны идентифицировать и разделять различные виды частиц на основе различий в их скоростях и, следовательно, в угле излучения Черенкова. Этот угол зависит от скорости частицы и показателя преломления среды, через которую она проходит. Таким образом, анализируя углы и интенсивность черенковского излучения, можно определить характеристики заряженных частиц, такие как их скорость, импульс и массу.

#### 4. Баррельный электромагнитный калориметр (Barrel EM Calorimeter):

Баррельный электромагнитный калориметр - это центральная часть электромагнитного калориметра, обеспечивающая покрытие событий, происходящих под малыми углами к оси пучка.

#### 5. DIRC (Detection of Internally Reflected Cherenkov light):

DIRC-детекторы (Detection of Internally Reflected Cherenkov light) представляют собой разновидность RICH-детекторов, использующих оптический материал радиатора одновременно как черенковский радиатор и светопровод. Это позволяет повысить точность определения черенковского угла и провести коррекцию хроматической аберрации.

В DIRC-детекторах радиатор имеет прямоугольную форму. Фотоны черенковского излучения, испущенные под углом  $\theta$ , распространяются вдоль пластины радиатора за счет полного внутреннего отражения, сохраняя этот угол до самого торца пластины. Там располагается позиционно-чувствительный фотоприемник, который регистрирует свет.

За счет разницы в черенковских углах разных частиц (например, пионов и каонов), длины и времени прохождения света по радиатору также отличаются. Это позволяет событию отображаться в трех измерениях: двух пространственных и временном, что улучшает разделение частиц и их идентификацию.

#### 6. Соленоидальный магнит (Solenoidal Magnet):

Соленоидальный магнит создает однородное магнитное поле внутри детектора, что влияет на траектории заряженных частиц. Заряженные частицы движутся по спиральным траекториям в магнитном поле, и измерение радиуса их кривизны позволяет определить заряд и импульс частицы.

#### 7. RICH Detector (Ring Imaging Cherenkov Detector):

RICH-детекторы используют принцип регистрации кольцевых изображений черенковского излучения для идентификации и измерения заряженных частиц. Они обеспечивают высокую разделительную способность для идентификации разных видов частиц, таких как пионы, каоны и протоны.

Когда частица движется через радиатор (радиатор представляет собой прозрачный материал, через который проходят заряженные частицы. Этот материал имеет определенный показатель преломления, который влияет на возникновение и свойства черенковского излучения.), она возбуждает молекулы среды, которые затем испускают свет при возвращении в основное состояние. Из-за сверхсветовой скорости частицы, испускаемый свет формирует конус, а на фотонных детекторах, расположенных на некотором расстоянии от радиатора, проекция этого конуса имеет вид кольца.

Размер и форма этого кольца зависят от угла черенковского излучения, который, в свою очередь, зависит от скорости частицы и показателя преломления радиатора. Таким образом, измеряя размер и форму кольца, можно определить скорость частицы и, в сочетании с другими измерениями, такими как импульс, идентифицировать тип частицы.

#### 8. Barrel Hadron Calorimeter:

Баррельные адронные калориметры расположены вдоль центральной части детектора и обеспечивают измерение энергии адронов, движущихся вблизи оси пучка.

#### 9. Transition Radiation Detector (TRD):

TRD используется для идентификации электронов и разделения их от других заряженных частиц, таких как пионы. Он обнаруживает излучение перехода, которое возникает, когда заряженная частица пересекает границу между двумя средами с разными показателями преломления.

#### 10. Preshower Calorimeter:

Этот калориметр расположен перед электромагнитным калориметром и предназначен для улучшения идентификации электронов и фотонов, а также измерения их энергии. Он состоит из тонких слоев поглотителя и активного детектирующего материала.

### 4.3 Измерения спина нуклона на EIC и их вклад в фундаментальные исследования

В экспериментах на Электрон-ионном коллайдере поляризованные пучки электронов и протонов (или других ядер) сталкиваются друг с другом с высокими энергиями.

Когда эти поляризованные пучки сталкиваются, электроны взаимодействуют с протонами или другими ядрами через обмен фотонами или другими бозонами, в зависимости от сценария столкновения. В результате этих взаимодействий образуются рассеянные частицы, такие как адроны (протоны, нейтроны, пионы и др.), фотоны, электроны, позитроны, мюоны и др.

Образование рассеянных частиц происходит при различных углах и энергиях, и эти параметры зависят от спина нуклона и его взаимодействия с электронами. Например, структура спина протона может повлиять на асимметрию рассеяния, то есть разницу между количеством частиц, рассеянных в одном направлении, и количеством частиц, рассеянных в противоположном направлении. Анализ данных, собранных этими детекторами, позволяет извлечь информацию об асимметрии. Изучая асимметрию рассеяния и корреляции между спинами сталкивающихся частиц, ученые могут выявить важные закономерности, связанные со спином нуклона, и лучше понять его взаимодействия с другими частицами. EIC предоставляет уникальные возможности для фундаментальных исследований в области ядерной и физики элементарных частиц. Измерение спина нуклона на EIC позволяет ученым получить более глубокое понимание взаимодействий и структуры нуклона. Это также может способствовать развитию теоретических моделей и привести к новым открытиям в области квантовой хромодинамики.

## 5 Заключение

В данной работе мы рассмотрели перспективы измерения спина нуклона на будущем Электрон-ионном коллайдере. Обсуждались технологические аспекты и основные требования к детектору EIC, которые обеспечивают точное измерение спина нуклона и других параметров. Были изучены важные моменты, связанные с прогнозируемыми вкладами спинов кварков и глюонов, а также возможной вклад орбитального момента в спиновое правило. В заключение, можно утверждать, что будущий Электрон-ионный коллайдер обещает принести значительные прорывы в понимании структуры спина нуклона и его взаимодействий на квантовом уровне, что сможет значительно продвинуть науку в области квантовой хромодинамики.

## Список литературы

- [1] A Airapetian и др. “Quark helicity distributions in the nucleon for up, down, and strange quarks from semi-inclusive deep-inelastic scattering”. В: *Physical Review D* 71.1 (2005), с. 012003.
- [2] MG Alekseev и др. “Quark helicity distributions from longitudinal spin asymmetries in muon–proton and muon–deuteron scattering”. В: *Physics Letters B* 693.3 (2010), с. 227–235.
- [3] Ignacio Borsa и др. “Revisiting helicity parton distributions at a future electron-ion collider”. В: *Physical Review D* 102.9 (2020), с. 094018.
- [4] Daniel De Florian и др. “Monte Carlo sampling variant of the DSSV14 set of helicity parton densities”. В: *Physical Review D* 100.11 (2019), с. 114027.
- [5] Markus Diehl. “Generalized parton distributions”. В: *Physics Reports* 388.2-4 (2003), с. 41–277.
- [6] R L Jaffe и A V Manohar. *The  $g_1$  problem: fact and fantasy on the spin of the proton*. Тех. отч. Cambridge, MA: MIT. Cent. Theor. Phys., 1989. URL: <https://cds.cern.ch/record/197368>.
- [7] R Abdul Khalek и др. “Science requirements and detector concepts for the electron-ion collider: EIC yellow report”. В: *Nuclear Physics A* 1026 (2022), с. 122447.
- [8] Elliot Leader и Cédric Lorcé. “The angular momentum controversy: What’s it all about and does it matter?” В: *Physics Reports* 541.3 (2014), с. 163–248.
- [9] Emanuele R Nocera. “Impact of recent RHIC data on helicity-dependent parton distribution functions”. В: *arXiv preprint arXiv:1702.05077* (2017).
- [10] Emanuele R Nocera и др. “A first unbiased global determination of polarized PDFs and their uncertainties”. В: *Nuclear Physics B* 887 (2014), с. 276–308.