

Резюме семинара-совещания от 12.11.2025:

«Поляриметрия на ускорительном комплексе Nuclotron/NICA»

1. Поляриметрия до инжекции в нуклотрон:

- *Lamb-shift поляриметр для SPI* – в первую очередь, необходимо сосредоточиться на разработке технического проекта для работы с поляризованным пучком дейтронов на выходе из источника SPI. Также необходимо согласовать окончательный список требуемого оборудования и приборов будущей установки, что позволит определиться с финансовыми расходами в том числе со стороны ОИЯИ.

- *Поляриметр низких энергий протонов на основе реакции*

${}^6\text{Li}(p, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$ и дейтронов на основе реакции $d\uparrow(d,p)t$ –

есть конкретные планы по завершению разработки данного устройства перед линейным ускорителем за спин-ротатором установки SPI. Требуется изготовить мишени из LiF и дейтерированного полиэтилена и узел крепления кремниевых детекторов. Необходима разработка программного обеспечения для регистрации вторичных частиц.

- *${}^3\text{He}$ -поляриметр для 5 МэВ/нукл пучков протонов и дейтронов* –

ведётся разработка электроники и требуется общая координация с имплементацией поляриметра в структуру на выходе линейного ускорителя.

В качестве анализирующих реакций предлагается использовать реакцию $d\uparrow({}^3\text{He}, p){}^4\text{He}$ и $p\uparrow{}^3\text{He}$ - упругое рассеяние для измерения поляризации пучков дейтронов и протонов соответственно. Для ${}^3\text{He}$ -мишени будут использованы мишени с входными термостойкими окнами из $(\text{SiN})_n$ толщиной 100-200 нм при давлении ${}^3\text{He}$ до трёх атмосфер. В зависимости от расстояния между окнами можно увеличивать телесный угол захвата для регистрации вторичных частиц кремниевыми детекторами. Амплитуда сигнала от вторичных частиц будет измеряться тоже кремниевыми детекторами (PIN диодами).

Необходимо также сохранить детектор, расположенный под нулевым углом и продумать систему мониторингования интенсивности пучка. Кроме того возможно использование детектирующей системы со сферической ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ мишенью на первом работ с 5 МэВ/нукл поляриметром.

2. Поляриметрия в Нуклотроне:

- *internal target polarimeters at Nuclotron* – поляриметрия на базе установки на внутренней мишени DSS эксперимента.

В настоящее время поляриметрия дейтронов на внутренней мишени осуществляется с использованием dp - упругого рассеяния при энергии

270 МэВ, где существуют высокоточные экспериментальные данные, по дейтронным анализирующим способностям, полученные в RIKEN. Энергетический диапазон поляриметра дейтронов может быть расширен вплоть до энергии 1300 МэВ (650 МэВ/нуклон). Показано, что поляриметрия пучка протонов может выполняться с использованием *pp*- упругого рассеяния до энергии 650 МэВ. Для расширения энергетического диапазона поляриметра (1000 МэВ и выше) ведётся разработка новых детекторов, будут увеличены число детекторов и угол захвата для детектируемых протонов. Ведётся проработка создания абсолютного поляриметра для протонов с энергией 200 МэВ с использованием реакции pC - упругого рассеяния. Обсуждаются первые эксперименты по управлению спином протона вблизи целочисленного резонанса $\gamma G=3$ с использованием поляриметра на внутренней мишени.

3. *Поляриметрия выведенного из Нуклотрона пучка:*

- *Nuclotron external beam vector polarimeter at focus F3 of Nuclotron extract beams* – проведённые в 2017 г. измерения показали работоспособность выбранной схемы, есть план модернизации старого поляриметра с изготовлением новых счётчиков. Обсуждение показало, что есть насущная необходимость в измерении направления вектора поляризации пучка протонов, например, за счёт расположения дополнительных детекторов в вертикальной плоскости.

4. *Поляриметрия на коллайдере NICA:*

- *collider NICA Absolute Polarimeter (Apol)*

Поляриметр использует реакцию упругого рассеяния поляризованных протонов и дейтронов на пучках поляризованных атомов водорода и дейтерия из струйной поляризованной мишени установки Apol.

Предлагаемая детектирующая система состоит из сцинтилляционных и straw детекторов. Использование straw детекторов обосновывается необходимостью иметь большой угловой захват для детектируемых частиц. Проводятся работы по оптимизации работы и улучшению параметров работы отдельных элементов Apol, таких как – сопло, ячейки радиочастотных (РЧ) переходов, системы управления источником поляризованного атомного пучка (PABS) и др. В планах ускорить разработку и провести тестирование детектирующих систем. Обсуждение показало необходимость проработки оптимальных типов и изготовителей детекторных систем. Группа разработчиков Apol считает возможным использовать место пересечения пучков (IP) в районе размещения детектора SPD для отработки режимов работы всех систем

поляриметра и проверки соответствия всех технических параметров заявленным. Т.к. имеется принципиальное отличие в работе в области IP и на других участках коллайдера, где пучки разнесены на 32 см, то необходимо учесть отличие режимов работы в этих двух местах. Однако, в первую очередь требуется провести оценки времени набора статистики для получения ошибки величины поляризации на уровне 2-5% для реалистичных светимостей для пучка протонов на начальном этапе.

- **поляриметрия на коллайдере NICA с использованием реакции pC – упругого рассеяния в области кулон-ядерной интерференции CNI-поляриметр** - предлагается использовать опыт разработки CNI-поляриметров на RHIC. CNI-поляриметр используется на RHIC в качестве относительного поляриметра. В качестве мишени использовалась тонкая плёнка (ribbon) углерода. Ядра углерода, в области отдачи под углом 90° в лабораторной системе координат, идентифицируются по углу вылета, времени пролёта и энергии с использованием стриповых кремниевых детекторов отдачи. Режимы работы коллайдера NICA позволяют использовать практически аналогичную конструкцию CNI-поляриметра, как и на коллайдере RHIC.

- **Кластерная внутренняя мишень для поляриметрии на NICA –**

Разработка водородной кластерной мишени (СТ), при возможности работы и с другими газами, позволит увеличить плотность пучка на 2-3 порядка, чем в струйных поляризованных мишенях при светимости сравнимой с CNI-поляриметрами и является актуальной задачей. При этом детектирующая система такого поляриметра должна иметь возможность работать с реакциями упругого рассеяния pp , dp и pC .

Измерение поляризации ускоренных поляризованных пучков в коллайдере NICA с помощью кластерной мишени в тандеме с абсолютным поляриметром Aro1 существенно расширит возможности поляризационных исследований по спиновой физике высоких энергий.

5. Локальная поляриметрия на установке SPD:

- **локальная поляриметрия с BBC на SPD** – сцинтилляционные детекторы расположены в торцах SPD на расстоянии ± 1.7 м от IP. Детекторы BBC регистрируют заряженные частицы, вылетающие в интервале полярных углов от 1.5 до 27.5 градусов. Диски BBC детекторов состоят из 16-ти азимутальных секторов, каждый из

которых состоит из 24 сцинтилляционных трапецевидных пластин различной площади. Сигнал с каждой из сцинтилляционных пластин, толщиной 10 мм, снимается оптоволоком, расположенным по периметру пластины и регистрируется SiPM. Представлены МК оценки возможности поляриметрии для pp-столкновений, с регистрацией пионов и протонов, для энергий $\sqrt{s} = 6, 10$ и 27 ГэВ. Показано, что основной вклад в анализирующую способность для всего диапазона энергий даёт асимметрия протонов. Причём, для $\sqrt{s} < 10$ ГэВ основной вклад от канала упругого pp-рассеяния, при больших энергиях определяющими являются неупругие взаимодействия. Важно, что прототип BBC, состоящий из 5-ти внутренних слоёв, позволит, в рамках первой фазы создания SPD, проводить поляриметрию.

- **локальная поляриметрия с ZDC на SPD** - прототипы ZDC детекторов установлены с двух сторон на расстоянии 13 м от точки взаимодействия пучков, в месте расположения установки SPD. Гранулярная трехмерная структура детектора позволяет проводить измерение азимутальной анизотропии вылета нейтронов при столкновении поляризованных протонов. Такая анизотропия вылета нейтронов была обнаружена на коллайдере RHIC и позволила проводить локальную поляриметрию пучков протонов с анализирующей способностью в несколько процентов. К сожалению, отсутствует теоретическая модель, которая позволила бы сделать надёжные оценки анализирующей способности для энергий коллайдера NICA. В ЛФВЭ существуют установки, которые при небольшой модификации и наличии поляризованного пучка протонов, позволяющие провести экспериментальные измерения анализирующей способности. Основной проблемой является получение пучка поляризованных протонов максимальной энергии, где ожидается максимальное значение анализирующей способности в инклюзивном рождении нейтронов. Половинную энергию протонов можно получить из стриппинга дейтронов.

6. **Результаты обсуждения с дирекцией ЛФВЭ и УО ЛФВЭ.**

Одной из возможных опций расположения Aro1, CNI и CJT поляриметров является линейный участок после демонтажа системы стохастического охлаждения коллайдера (на время проведения экспериментов с протонами и легкими ядрами). В этом случае появляется дополнительное пространство для размещения детектирующей аппаратуры. С другой стороны, это накладывает серьезные ограничения на время монтажа и отладки поляриметров. На первый взгляд, детекторы всех трех поляриметров могут быть унифицированы в плане возможного измерения асимметрий как в ядерной, так и в CNI областях.

Также обсуждался вопрос создания CNI поляриметра на внутреннем пучке Нуклотрона. Это возможно и желательно реализовать при модернизации Нуклотрона.