

P1-2017-17

Ал. И. Зинченко, В. А. Крамаренко, В. В. Кухтин,
Б. Маринова, Л. А. Меркулов, И. А. Савин,
Н. Д. Топилин

**СОЛЕНОИД ДЛЯ УСТАНОВКИ SPD
КОЛЛАЙДЕРА NICA**

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

Соленоид для установки SPD коллайдера NICA

Рассмотрены требования и сформулированы рекомендации для дальнейшей конструкторской проработки магнита установки SPD. Показано, что для получения однородного в пределах 1 % магнитного поля во всем внутреннем объеме соленоида необходимо использовать дополнительные катушки, которые следует разместить в торцевых частях соленоида. Сверхпроводящий вариант магнита предпочтительнее теплового из-за меньшего веса и объема катушки, а также отсутствия проблемы отвода тепла из проводника.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

The Solenoid for the SPD Set-Up of the NICA Collider

Requirements were considered and recommendations were formulated for the later technical design of the magnet for the SPD set-up. It has been shown that to get magnetic field homogeneity in the 1% limits for the whole inner solenoid volume, one has to use additional coils which must be placed in the end faces of the solenoid. The superconducting magnet is preferred to the warm version due to the lower weight and occupied volume of the coil, and the absence of the heat evacuation problem also.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

1. ТРЕБОВАНИЯ К МАГНИТУ, СЛЕДУЮЩИЕ ИЗ ФИЗИКИ И УСТРОЙСТВА ДЕТЕКТОРА В ЦЕЛОМ

Ускорительный комплекс NICA создается в Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований. Главным элементом проекта является коллайдер, предназначенный для столкновения ускоренных пучков ядер вещества от водорода до золота. Предусматриваются две зоны столкновения встречных пучков, в каждой из которых будет расположена установка, регистрирующая продукты взаимодействия. Для экспериментальной установки первой зоны, именуемой MPD (Multi-Purpose Detector), в качестве главной физической задачи выбран поиск «смешанной» фазы состояния вещества, которая характеризуется совместным существованием свободных кварков и адронов. Второе пересечение предназначается для размещения установки SPD (Spin Physics Detector), на которой будет, в основном, изучаться спиновая структура нуклона. В работе представлены расчеты магнитного поля соленоида, который может быть выбран в качестве магнита SPD, показано, как достичь его однородности во внутреннем объеме соленоида, а также приведен ряд соображений, относящихся собственно к магниту.

Представление о том, что нуклоны являются составными частицами, сформировалось в начале 70-х годов прошлого века на основе экспериментального изучения глубоконеупругого рассеяния электронов [1]. Далее, естественно, возник вопрос: «Как характеристики нуклонов могут быть получены из знания соответствующих параметров его конstituентов?» В частности, интригующей остается до сих пор проблема спина нуклонов. Создание поляризованных мишеней для экспериментальной физики высоких энергий, а также возможность ускорять и использовать пучки поляризованных частиц позволили проводить эксперименты с целью определения спиновых структурных функций нуклона. Много деталей, посвященных исследованию спиновой структуры нуклонов, приведено в [2].

Получить количественные характеристики, без которых не понять природу спина нуклона, можно, изучая теоретически хорошо разработанные реакции взаимодействия поляризованных протонов или дейтронов, в которых образуются либо пары лептонов (механизм Дрелла–Яна), либо прямые γ -кванты [2]. На эффективную регистрацию этих конечных состояний оптимизируется установка. Установка должна идентифицировать заряженные леп-

тоны и определять с требуемыми точностями их импульсы, а также измерять энергию и направление вылета γ -кванта из точки взаимодействия. Импульсы заряженных частиц будут вычисляться по их траекториям, измеренным в магнитном поле, а энергия и направление вылета γ -кванта определится хорошо секционированным электромагнитным калориметром. Из этого следует, что установка SPD должна содержать в своем составе трековые детекторы, помещенные в магнитное поле, и электромагнитный калориметр, причем перед последним количество вещества должно быть минимальным.

Наилучшим магнитом для SPD с различных точек зрения является соленоид. Для конкретизации геометрических размеров упомянутых устройств и выбора других характеристик было проведено методом Монте-Карло моделирование реакций pp -взаимодействий с образованием лептонов и γ -квантов. Моделирование позволило определить диапазоны импульсов и энергий лептонов и γ -квантов, которые надо измерять с задаваемой требованиями физики точностью, составляющей 2–3%. Рис. 1 и 2 дают представление об этих диапазонах.

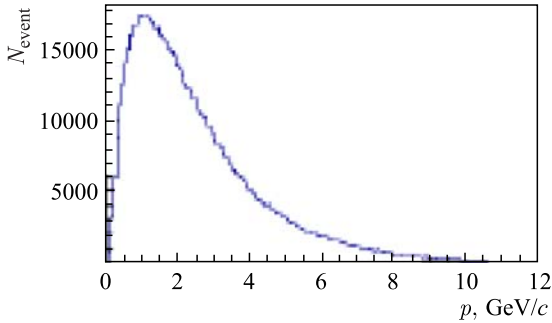


Рис. 1. Распределение по импульсу мюонов для процесса Дрелла-Яна

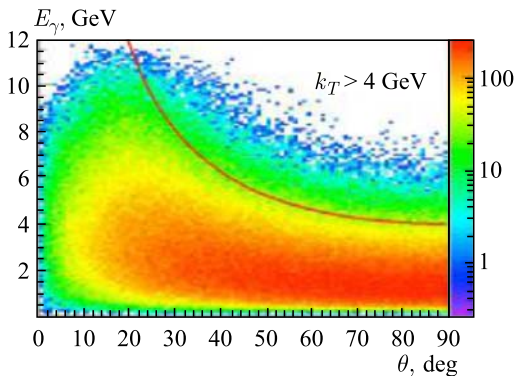


Рис. 2. Распределение энергии γ -кванта в зависимости от угла вылета

Приведенные рисунки показывают, что верхние границы по импульсу мюонов и по энергии γ -квантов составляют около 11–12 ГэВ.

Протяженность электромагнитного гетерогенного калориметра в направлении, перпендикулярном сталкивающимся пучкам, выбирается равной 50 см. Если в качестве структуры вещества калориметра выбрать чередование слоев свинец–сцинтиллятор, то для 12-ГэВ γ -квантов и электронов на длине в 50 см можно набрать до 15 радиационных длин. Размещение электроники на задней стенке калориметра может потребовать еще около 10 см расстояния по радиусу, но сейчас этот размер не является принципиальным, и в дальнейшем рассмотрении он полагается нулевым. Для достижения наибольшей точности в восстановлении энергии γ -кванта и топологии интересующих событий количество вещества между точкой pp -взаимодействия (точкой образования лептонов и γ -квантов) и точкой входа в калориметр должно быть минимальным. Это требование может быть удовлетворено, если калориметр будет находиться внутри соленоида. *Таким образом объем, прилегающий к внутренней поверхности соленоида глубиной около 50 см в направлении перпендикулярном и вдоль движения пучков, должен быть оставлен для размещения электромагнитного калориметра.*

Регистрировать траектории заряженных лептонов можно окружающей зону взаимодействия пучков структурой, состоящей из силиконовых полосок (стрипов) и пикселей в сочетании с тонкостенными дрейфовыми трубками круглого сечения (straw). Этот набор детекторов, с помощью которого по зарегистрированным траекториям вычисляются координаты вершины взаимодействия и импульсы лептонов, помещается в магнитное поле внутри соленоида. В программе Монте-Карло закладывалась 100%-я эффективность регистрации частиц детекторами. Заряженные лептоны проходили пять слоев силиконовых детекторов, окружающих зону взаимодействия и образующих вершинный детектор. Для вершинного детектора задавались следующие параметры: разрешение по азимутальному углу 20 мкм, а разрешение в продольном направлении — 320 мкм. Окружающие вершинный детектор straw-трубки обеспечивали дополнительно 35 точек на трек в центральной области соленоида и 10 точек на трек в направлении к его торцам. Координатное разрешение дрейфовых трубок всюду задавалось одинаковым и равным 170 мкм. Пространственная компоновка детекторов была выбрана по аналогии с такой же в детекторах LHC и схематично представлена на рис. 3 (размеры на рисунке даны в мм) [3]

Для оценки разрешения по импульсу при различных значениях однородного магнитного поля соленоида методом Монте-Карло было проведено моделирование прохождения через внутренний детектор лептонов, образовавшихся в процессе Дрелла–Яна на коллайдере NICA. Результаты моделирования показаны на рис. 4.

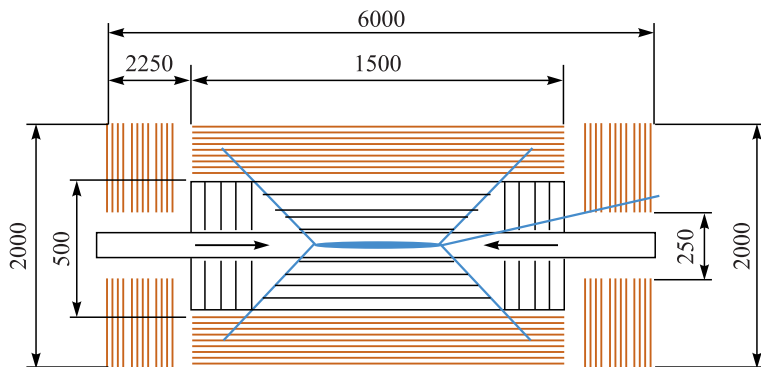


Рис. 3. Схематичное представление внутреннего детектора установки SPD

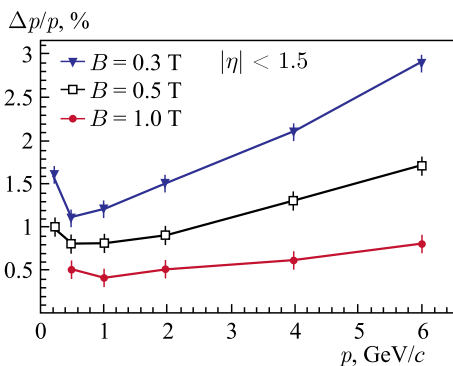


Рис. 4. Разрешение по импульсу лептонов для разных значений магнитного поля соленоида

Рис. 4 демонстрирует, что поле напряженностью в 0,5 Тл обеспечивает возможность с помощью детектора, показанного на рис. 3, иметь разрешение во всем диапазоне импульсов лептонов не хуже 3 %, что вполне соответствует задаче изучения спиновой структуры нуклонов. Отметим еще раз, что эти расчеты проводились в предположении однородности магнитного поля во всем объеме, занимаемом внутренним детектором.

Выводы, следующие из рассмотрения изучаемых физических процессов, показывают, что размеры соленоида для расчета магнитного поля могут быть приняты по длине вдоль пучков около 600 см и по внутреннему радиусу около 150 см. В этом цилиндрическом объеме магнитное поле должно быть постоянным, равным по величине 0,5 Тл и однородным на уровне 1 %.

Различные технические возможности создания магнита в виде соленоида на текущей стадии понимания SPD не препятствуют проведению расчетов магнитного поля с целью добиться его высокой однородности и сделать на основе этих расчетов различные рекомендации для конструирования магнита.

2. РАСЧЕТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА

Магнитное поле внутри соленоида рассчитывалось по программе Poisson Superfish [4]. Известно, что в соленоиде конечной длины продольное магнитное поле неоднородно и на концах обмотки может уменьшаться на величину до 50 % относительно поля в центре соленоида. Цель расчетов состояла в том, чтобы получить однородность магнитного поля во всем внутреннем объеме соленоида на уровне 1 %. Соленоид был описан в программе как однородная непрерывная структура. Коррекция магнитного поля осуществлялась дополнительными торцевыми токовыми катушками.

Оценка начальных значений параметров для программы Poisson Superfish была сделана с помощью хорошо известных формул вычисления магнитного поля соленоида. Из них следует, что магнитное поле в 0,5 Тл может быть создано обмоткой с линейной плотностью тока в 4000 А/см.

Замыкание потока магнитного поля осуществлялось железным цилиндром, толщина стенки которого составляла около 30 см, а толщина железных торцевых крышек цилиндра — около 40 см. Подчеркнем, что для конечной цели настоящих расчетов толщины железа не существенны, и в стадии конструкторских работ по соленоиду они (толщины) определенно будут изменены.

Далее приведены результаты расчетов для одного квадранта в виде рисунков (рис. 5, *a, б*), которые дают представление о характеристиках магнитного поля полного соленоида.

На рис. 5 показаны магнитные силовые линии во внутреннем объеме соленоида, замыкающиеся вне его железным цилиндром. Соленоид показан пря-

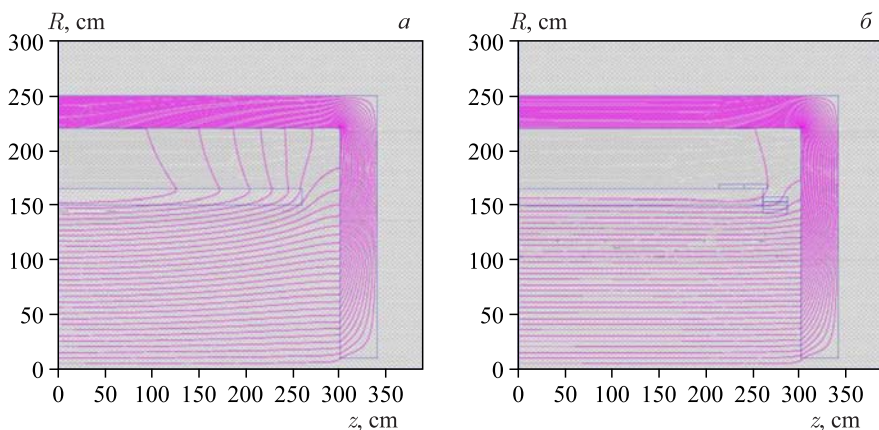


Рис. 5. *a*) Магнитные силовые линии соленоида; *б*) то же, но с дополнительными катушками на концах

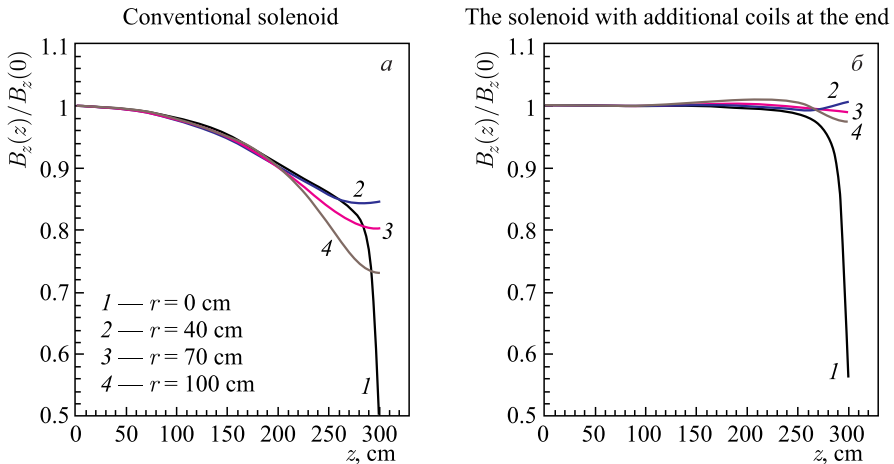


Рис. 6. а) Отношение продольной компоненты магнитного поля соленоида на разных радиусах к полю при $z = 0$; б) то же, но с дополнительными катушками на концах

моугольником, начинающимся на радиусе 150 см, длиной 260 см. Экран, замыкающий силовые линии магнитного поля, начинается на координате 300 см по пучку. Обращает на себя внимание различная плотность силовых линий в разных областях внутри соленоида. Различие возрастает по мере приближения к концам соленоида и удаления от его оси. Рис. 6 (продольная компонента поля) и 7 (поперечная компонента поля) дают количественное представление о магнитном поле.

Из рис. 6 ясно следует, что продольная компонента поля на оси соленоида начинает становиться заметно меньше желаемой (0,5 Тл) уже при отступлении от центра соленоида вдоль оси на 50 см (линия 1), на расстоянии в 100 см уменьшение составляет около 3 %, и наконец, при отступлении на 260 см уменьшение составляет почти 14 %. Характер поведения магнитного поля по мере приближения к обмотке соленоида не меняется, только величина изменения вдоль пучков при разных радиусах другая, например, на радиусе в 100 см вблизи конца соленоида она составляет 20 %.

Рис. 7 показывает поперечную компоненту магнитного поля на трех радиусах от оси соленоида. Поперечная компонента магнитного поля увеличивается по мере смещения от центра соленоида и увеличения радиуса, достигая наибольших ($\sim 12\%$) величин при больших значениях радиуса.

Результаты расчетов показали большую неоднородность магнитного поля соленоида. В такой ситуации для восстановления импульса заряженных частиц, зарегистрированных внутренним детектором, необходимо использовать

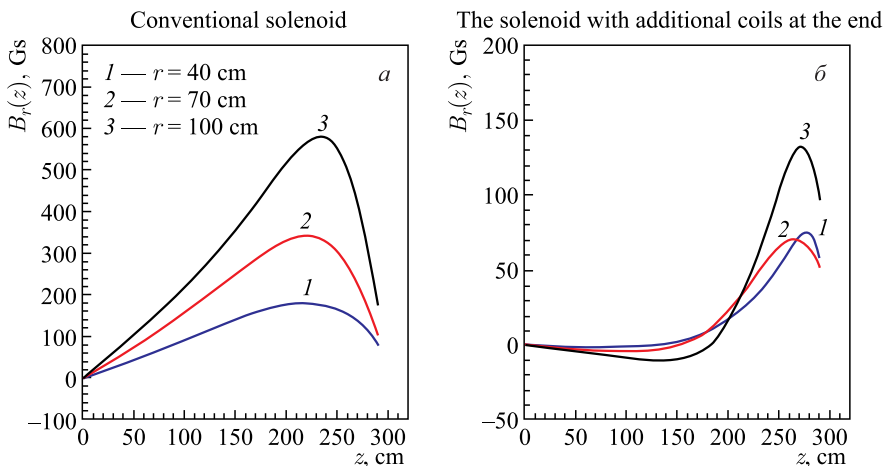


Рис. 7. Поперечная компонента магнитного поля соленоида (а) на разных радиусах; б) с дополнительными катушками на концах на разных радиусах

карту магнитного поля и применить существенно более сложный алгоритм восстановления импульса. Добиться однородности магнитного поля можно разными способами. Нами был выбран путь введения на торцах соленоида дополнительных катушек с током. Размеры и линейная плотность тока в них подбирались так, чтобы добиться высокой однородности поля на концах основной обмотки. В итоге продольная длина была выбрана ~ 25 см, линейная плотность тока ~ 1000 А/см.

На рис. 5, б схематично показано размещение этих дополнительных обмоток: две дополнительные обмотки помещены в конце и над основной обмоткой, и четыре — в торце основной обмотки соленоида. Следует отметить, что выбранное размещение дополнительных обмоток не уменьшает объема внутри основной обмотки соленоида, предназначенного для размещения детектора трассировки заряженных частиц и электромагнитного калориметра.

Результаты расчетов магнитного поля соленоида с дополнительными обмотками показаны на рис. 5, б, 6, б и 7, б. Магнитные силовые линии (рис. 5, б) демонстрируют существенно лучшую однородность поля. Продольная компонента магнитного поля (рис. 6, б) остается постоянной в пределах 1–2% вплоть до самого конца основной обмотки, а поперечная компонента (рис. 7, б) сохраняется на уровне 1% от номинального поля. Таким образом введенные в программу для корректировки магнитного поля дополнительные обмотки улучшают однородность магнитного поля соленоида до желаемого уровня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ К КОНСТРУИРОВАНИЮ

В настоящее время, чтобы изготовить магнит, можно среди нескольких технологий и номенклатуры материалов выбрать те, которые наиболее соответствуют предъявляемым к магниту SPD требованиям. Исторически первыми создавались магниты, работающие при комнатных температурах, так называемые теплые магниты. Открытие явления сверхпроводимости материалов при температуре жидкого гелия и стимулированное им развитие техники привело к созданию сверхпроводящих магнитов с полями большой напряженности. Приведем кратко различные факторы, характеризующие теплые и холодные магниты.

Для теплых магнитов промышленность предлагает широкую номенклатуру проводников. Соленоид, изготовленный из алюминия, будет иметь существенно меньший вес, чем изготовленный из медного проводника, и нагрузка на пол здания, в котором будет размещена установка SPD, также будет меньше. Конечное омическое сопротивление проводника стимулирует его нагрев, что требует специально предусмотреть отвод тепла из катушки соленоида.

Сверхпроводимость дает возможность иметь высокую плотность тока в витке соленоида. Сверхпроводящий соленоид экономит объем, занимаемый магнитом, и тем самым увеличивает объем для экспериментальной аппаратуры (детекторов) при фиксированных размерах помещения. Проблемы нагрева проводника не существует.

Целесообразно упомянуть о высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП). В ВТСП сверхпроводимость возникает уже при температуре жидкого азота, получение и применение которого стоит существенно меньше, чем жидкого гелия. Полный вес соленоида из ВТСП будет меньше, чем вес магнита на жидком гелии.

Соленоид, выполненный из сверхпроводника, будет существенно более компактным по объему и легче «теплого» магнита не менее, как показывают оценки, чем на 100 т.

Рассуждения о технических возможностях создания магнита в виде соленоида не мешают производить оценочные расчеты и формулировать принципиальные рекомендации для конструирования магнита.

Отдельного изучения требует идея введения в центральную область установки SPD около зоны столкновения пучков сверхпроводящего экрана для того, чтобы исключить влияние магнитного поля соленоида на поляризацию пучков в зоне их столкновения.

Таким образом, наше рассмотрение можно завершить следующими выводами:

1. Расчетами показано, что однородность магнитного поля во внутреннем объеме соленоида в 1% для установки SPD вполне достижима и технически реализуема.

2. Магнит должен содержать дополнительные токовые катушки, размещенные на концах и в торцах основной обмотки соленоида.

3. Теплый вариант соленоида тяжелее сверхпроводящего соленоида при требуемых размерах магнита более чем на 100 т.

4. Сверхпроводящий магнит предпочтительнее, а выбор между жидким гелием или азотом требует дополнительного изучения.

5. Необходима дальнейшая работа с целью оптимизации геометрии и характеристик соленоида, экрана для рассеянного магнитного поля и детекторов внутри соленоида. Она даст возможность более точно удовлетворить различным требованиям, исходящим из физических задач, в частности, в области малых углов вылета частиц относительно направления пучков, а также получить наилучшее соотношение между стоимостью оборудования и его физическими характеристиками.

Нам приятно поблагодарить С. Б. Ворожцова за консультации по вопросам магнитных систем и программ их расчета, В. М. Дробина за очень полезные обсуждения вопросов сверхпроводящих магнитов и сверхпроводящего экрана, И. П. Юдина за интерес к магниту SPD.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hofstadter R. et al.* Elastic Electron Scattering from Tritium and Helium-3* // Proc. of the 12th Intern. Conf. on High Energy Physics (ICHEP 64), 5–15 Aug 1964. Dubna, CNUM: C64-08-05. P. 944–952.
2. http://nica.jinr.ru/files/SPIN_program/NICA-SPD2013/index.html
http://nica.jinr.ru/files/SPIN_program/SPIN-Praha-2013/index.html
<http://theor.jinr.ru/~spin/2013/>
3. ATLAS Technical Proposal, CERN/LHCC/94-43, 15 December 1994.
4. http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml

Получено 12 апреля 2017 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 30.05.2017.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,89. Тираж 255 экз. Заказ № 59126.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/