



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2022–05

А.П. Мещанин¹, А.Н. Васильев^{1,2}, Ю.М. Гончаренко¹,
В.А. Кормилицын¹, Н.Г. Минаев¹, В.В. Мочалов^{1,2}, В.Л. Рыков²,
А.Д. Рябов¹, Т.Д. Рябова¹, А.В. Рязанцев¹, П.А. Семенов^{1,2},
С.А. Сёмин¹, З.Г. Симонова¹

**Магниты эксперимента СПАСЧАРМ
на ускорительном комплексе У-70**

¹НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ

² НИЯУ МИФИ

Протвино 2022

Аннотация

Мещанин А.П. и др. Магниты эксперимента СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» –ИФВЭ 2022–05. – Протвино, 2022. – 17 с., 11 рис., 0 табл., библиогр.: 13.

Описаны четыре магнита, являющиеся частью экспериментальной установки СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70 для исследования спиновых эффектов в адронных взаимодействиях. Уникальный магнит с полем 2,4 Тл и однородностью поля на уровне 10^{-4} в рабочем объеме 60 см^3 служит для накачки и удержания поляризации в поляризованной протонной замороженной мишени. Специальный широкоапертурный магнит является центральной частью спектрометра установки на основе дрейфовых трубок. Для прецизионного наведения пучка на центр мишени были изготовлены и введены в состав установки два небольших корректирующих магнита разработки НИИЭФА им. Д.В. Ефремова.

Abstract

Meschanin A.P. et al. Magnets of the SPASCHARM experiment at the accelerator complex U-70: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2022–05. – Protvino, 2022. – p. 21, fig. 11, tables 0, refs.: 12.

Four magnets, which are part of the SPASCHARM experiment for studying spin effects in hadronic interactions at the U-70 accelerator facility, are described. The unique magnet, operating at the magnetic induction of 2.4 T with the field uniformity at the level of 10^{-4} in the volume of 60 cm^3 , provides the conditions for polarizing protons in the frozen pentanol target and then for keeping the polarization for tens of hours. The special wide-aperture magnet is a central part of the charged particle spectrometer which is based on using drift tubes for tracking. For precise steering the beam onto the center of the target, two small-sized magnets-correctors have been used in the SPASCHARM set-up. They have been manufactured at IHEP, following the original drawing by the developer, D. V. Efremov NIEFA.

Введение

На ускорительном комплексе У-70 в Протвино проводится поляризационный эксперимент СПАСЧАРМ [1] с целью исследования спиновой структуры нуклона и спиновой зависимости сильного взаимодействия при энергиях У-70. Экспериментальная установка СПАСЧАРМ, размещённая на вторичном пучке отрицательных частиц с импульсом $\sim 26,5$ ГэВ/с, показана на Рис. 1.

В комплекс поляризованной протонной мишени эксперимента СПАСЧАРМ входит магнит «Динозавр» с высокой однородностью поля в рабочем объеме мишени 60 см^3 . Он обеспечивает работу критически важной подсистемы эксперимента СПАСЧАРМ – поляризованной мишени.

Передний универсальный широкоапертурный спектрометр имеет цель регистрировать одновременно все вторичные частицы в передней полусфере взаимодействий (по фейнмановской переменной $x_F > 0,3$) до поперечных импульсов 2 ГэВ/с . Отсюда следует, что для пучка с импульсом $26,5 \text{ ГэВ/с}$ угловой аксептанс экспериментальной установки должен быть порядка ± 110 мрад. При этом в спектрометре реализуется полная геометрия по азимутальному углу, что позволяет измерять спиновые асимметрии с предельно низкими систематическими погрешностями. Измерение и сравнение друг с другом поляризационных эффектов для большого набора разных реакций в широком кинематическом диапазоне принципиально важно для раскрытия роли спина в наиболее трудной для понимания непертурбативной области сильных взаимодействий. Спектрометрический магнит СПАСЧАРМ является центральной частью широкоапертурного переднего спектрометра.

Для точного наведения пучка на центр мишени в состав установки были введены два корректирующих магнита, созданных по чертежам НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, которые используются в каналах частиц ускорительного комплекса У-70 [2]. В данной работе подробно описаны эти четыре магнита эксперимента СПАСЧАРМ.

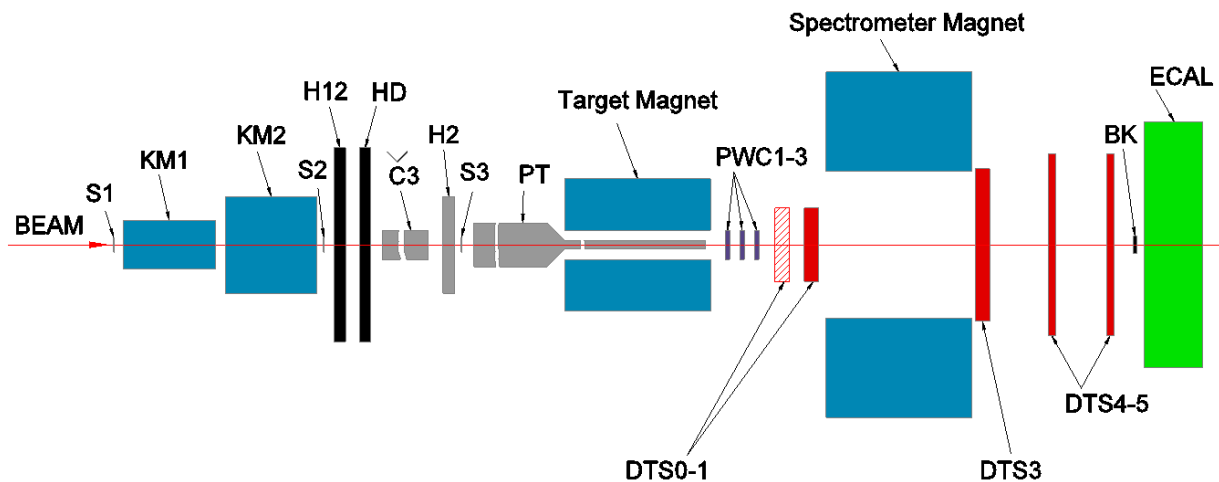


Рис. 1. Схема установки СПАСЧАРМ на канале №14 ускорительного комплекса У-70.

S1, S2, S3 – пучковые сцинтилляционные счетчики; KM1, KM2 – корректирующие магниты типа СП-140; H12 – пучковые годоскопы X и Y; HD – прецизионные пучковые годоскопы X и Y; C3 – третий пороговый черенковский счетчик (первые два, C1 и C2, не показаны на рисунке, они далеко слева); H2 – пучковый годоскоп; PT – поляризованная мишень ЗППМ-200М; Target Magnet – магнит поляризованной мишени «Динозавр»; PWC1-3 – блок пропорциональных камер; DTS0-1 – малогабаритные дрейфовые камеры; Spectrometer Magnet – широкоапертурный магнит СПАСЧАРМ; DTS3, DTS4-5 – большие дрейфовые камеры; BK – пучковый счетчик; ECAL – электромагнитный калориметр ЧСПП-720 на базе свинцовых стекол ТФ1-000.

Компактный электромагнит «Динозавр» для «замороженной» поляризованной протонной мишени

Получение («накачка») поляризации в мишени ЗППМ-200М осуществляется в поперечном к пучку магнитном поле электромагнита «Динозавр» с тёплыми обмотками [3]. Он является дальнейшим развитием оригинального проекта магнита «Джин» [4], который на протяжении многих лет обеспечивал работу поляризованной мишени в экспериментах ПРОЗА [5] и ПРОЗА-М [6]. Общий вид магнита «Динозавр» показан на Рис. 2. Мишень ЗППМ-200М размещается в центре его рабочего зазора. Поле в зазоре

формируется полюсами из пермендюра 49КФ, шириной 164 мм, длиной 1000 мм и толщиной 80 мм. Поток поля замыкается через магнитопроводы, изготовленные из стали марки Ст.3.

Накачка поляризации протонов основана на эффекте возбуждения электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) с поляризацией атомных электронов в магнитном поле и последующей передачей поляризации протонам в результате цепочки атомных переходов [5].

Резонансная частота ЭПР зависит от индукции магнитного поля. Имеющийся в нашем распоряжении СВЧ-генератор покрывает диапазон частот от 66,17 до 67,17 ГГц. Для ЭПР это соответствует величине индукции от 2,365 до 2,401 Тл, необходимой для успешной накачки поляризации протонов в мишени. На этом основании рабочее поле магнита «Динозавр» в режиме накачки поляризации было выбрано равным 2,4 Тл.

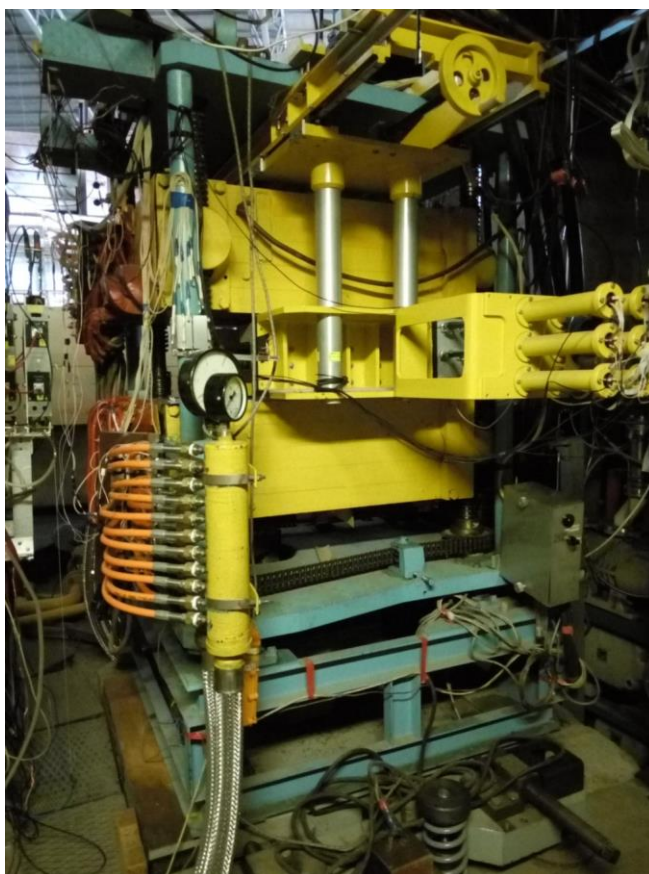


Рис. 2. Общий вид магнита «Динозавр» с введённой в рабочее положение вето системой и рабочими коммуникациями на установке СПАСЧАРМ на канале №14 ускорительного комплекса У-70.

Верхний и нижний магнитопроводы вместе с полюсами и катушками могут симметрично сдвигаться или раздвигаться с помощью силовой системы перемещения, которая состоит из электродвигателя мощностью 5 кВт, двухступенчатого червячного редуктора и цепной передачи. Общий коэффициент передачи силовой системы равен 700. Несущие силовые конструкции состоят из двух стальных плит толщиной 50 мм, скреплённых четырьмя стойками.

В сдвинутом состоянии магнитопроводов высота зазора между полюсами минимальная и равна 75 мм. Номинальный ток питания магнита 1440 А обеспечивает величину поля в его центральной части 2,4 Тл. В этом режиме в течение 4-6 часов осуществляется накачка поляризации протонов в мишени, охлаждённой до температуры порядка 0,2-0,3 К. Затем, после охлаждения мишени ещё на порядок (до ~0,03 К), начинается процедура раздвижки полюсов до максимального расстояния 250 мм. При этом открывается апертура магнита для вторичных частиц, вылетающих из мишени, в пределах ± 300 мрад по горизонтали и ± 250 мрад по вертикали. В начале процедуры раздвижки полюсов поле в рабочем зазоре снижается до 0,65 Тл, чтобы уменьшить более чем на порядок силу притяжения друг к другу двух половинок магнита (равной примерно 40-50 тонн при поле 2,4 Тл), и тем самым не повредить раздвигающий механизм. Далее, в несколько шагов, верхняя и нижняя половинки магнита раздвигаются с одновременным постепенным увеличением тока питания так, чтобы магнитная индукция в зоне мишени никогда не опускалась ниже ~0,4 Тл. По завершению фазы раздвижки, занимающей 10-15 минут, ток питания магнита вновь находится на номинальных 1440 А, а поле в зоне мишени равно примерно 0,4 Тл. В таком поле поляризация мишени удерживается на время набора статистики на пучке в течение 1-2 суток.

Для успешной накачки поляризации протонов по всему рабочему объёму мишени необходимо, чтобы неоднородность магнитного поля внутри этого объема не превышала естественной ширины линии поглощения сигнала ядерного магнитного резонанса. Эта ширина обусловлена диполь-дипольным взаимодействием протонов в веществе мишени и его структурой [7]. В пентаноле ($C_5H_{12}O$) с добавкой радикала ГЕМПО, используемом в настоящее время в качестве рабочего вещества, относительная ширина линии поглощения в поле 2,4 Тл составляет величину порядка $1,65 \times 10^{-4}$. Построить тёплый магнит с ферромагнитными полюсами, обеспечивающий столь высокую одно-

родность поля при его величине, близкой к насыщению полюсов, является непростой задачей. На стадии проектирования магнита были проведены многочисленные расчёты [8] с целью оптимизации его параметров.

Была выбрана конструкция с двумя основными и двумя формирующими катушками. Встроенные в магнитопроводы две основные катушки, каждая из которых состоит из 7 секций (5×7 витков), изготовлены из медной трубки квадратного сечения $8 \times 8 \text{ мм}^2$ с внутренним диаметром 4,5 мм под обессоленную воду. Формирующие катушки, частично заполняющие межполюсное пространство и оставляющие свободной апертуру шириной 80 мм, состоят из 4-х секций (5×4 витков) и изготовлены из того же провода, что и основные катушки. Полное число витков в обмотке равно 110. Электрически все секции соединены последовательно, а по воде – параллельно. Для формирования поля с хорошей однородностью потребовалось также размещение в углах апертуры треугольных стальных шимм по всей длине полюсов, которые были приклеены к полюсам эпоксидной смолой.

В результате в центральной части магнита в цилиндрической области диаметром 20 мм и длиной 200 мм было получено однородное поле с индукцией 2,4 Тл с максимальной относительной вариацией от минимума к максимуму 13×10^{-4} и среднеквадратичным отклонением от константы по объёму $4,3 \times 10^{-4}$. Графически топография относительных отклонений полученного поля на поверхности мишени от его средней величины по объёму, $\langle B \rangle$, показана на Рис. 3 слева.

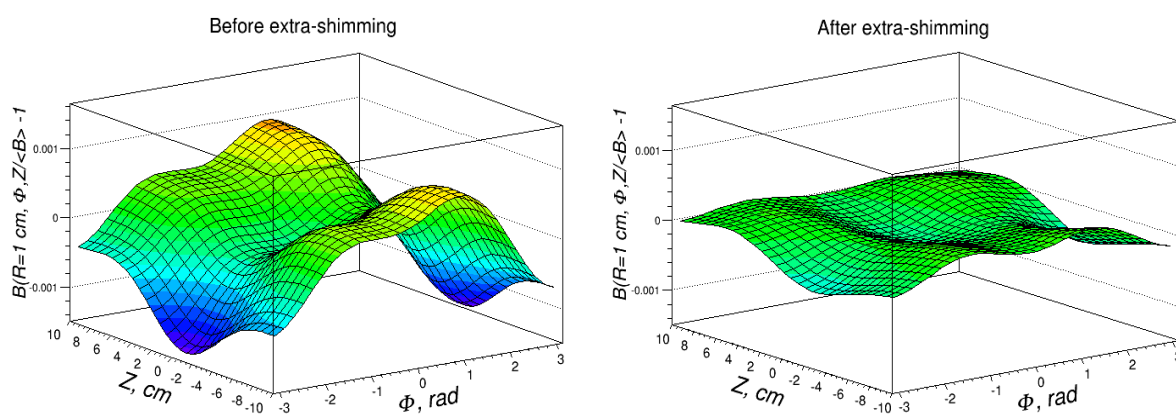


Рис. 3. Относительные вариации магнитного поля на поверхности цилиндра диаметром 20 мм и длиной 200 мм. Слева – до проведения дополнительного шиммирования; справа – после.

Однако такие отклонения от однородности были всё ещё слишком велики для работы с поляризованной мишенью. Причиной тому является не только конечная точность механического изготовления деталей магнита и их сборки. Серьёзной проблемой в режиме насыщения является неопределённость в магнитных характеристиках используемых ферромагнитных материалов и в их вариации от образца к образцу и даже в пределах одного элемента конструкции. С целью улучшения качества поля было принято дополнительное шиммирование в апертуре магнита. Результатом этой работы стало заметное улучшение картины поля, которая представлена справа на Рис. 3. В ней максимальная относительная вариация составляет $\sim \pm 4 \times 10^{-4}$, а среднеквадратичное отклонение от константы по объёму $\sim \pm 1,3 \times 10^{-4}$, что уже вполне вписывается в допустимую неоднородность $\sim \pm 1,65 \times 10^{-4}$ (см. выше). Свидетельством успешности шиммирования является то, что в таком поле была получена устойчивая поляризация протонов в пентаноловой мишени до 75%, и на такой поляризации был успешно проведен сеанс по набору статистики на пучке.

В заключение перечислим некоторые технические характеристики магнита «Динозавр», которые не были упомянуты выше в тексте:

- Электрическое напряжение на обмотке при номинальном токе 1440 А равно 207 В.
- Система охлаждения магнита рассчитана на обессоленную воду при перепаде давления 20 атм. Температура воды на входе должна быть не выше 30°C. Общий расход воды при указанных условиях составляет 8 м³/час.

Для питания электромагнита используется тиристорный источник питания 28ТП2 ($U_{\text{ном}} = 215$ В, $I_{\text{ном}} = 1500$ А). Тиристорный преобразователь выполнен по 3-х фазной симметричной мостовой схеме Ларионова. Для подавления пульсаций выпрямленного напряжения применён пассивный Г-образный LC фильтр.

Исходя из специфического характера действующих на систему возмущений, которые можно условно разделить на высокочастотные и низкочастотные колебания питающей сети, структура системы управления тиристорным преобразователем выбрана двухконтурной. Она состоит из быстродействующего контура стабилизации напряжения и контура медленного действия, что позволяет получить высокую степень стабилизации при сравнительно простой коррекции.

В режиме накачки поляризации в мишени существуют ограничения на пульсации поля того же порядка, что и требования к однородности поля: не более $\sim \pm 1,5 \times 10^{-4}$. Во всех режимах допустимая величина пульсаций поля ограничивается также тепловой нагрузкой от токов Фуко на камеру растворения рефрижератора. При рабочих температурах 30 мК она не должна превышать 100 мкВт. Оценки показывают, что на частоте 300 Гц, которая является основной в спектре 6-пульсных тиристорных преобразователей, это соответствует ограничению на амплитуду пульсаций поля не выше 0,25 мТл в режиме удержания поляризации.

На Рис. 4 представлена экспериментальная зависимость индукции $B(I)$ от тока питания I в центре магнита «Динозавр» в режиме накачки поляризации, т.е. при сомкнутом ярме.

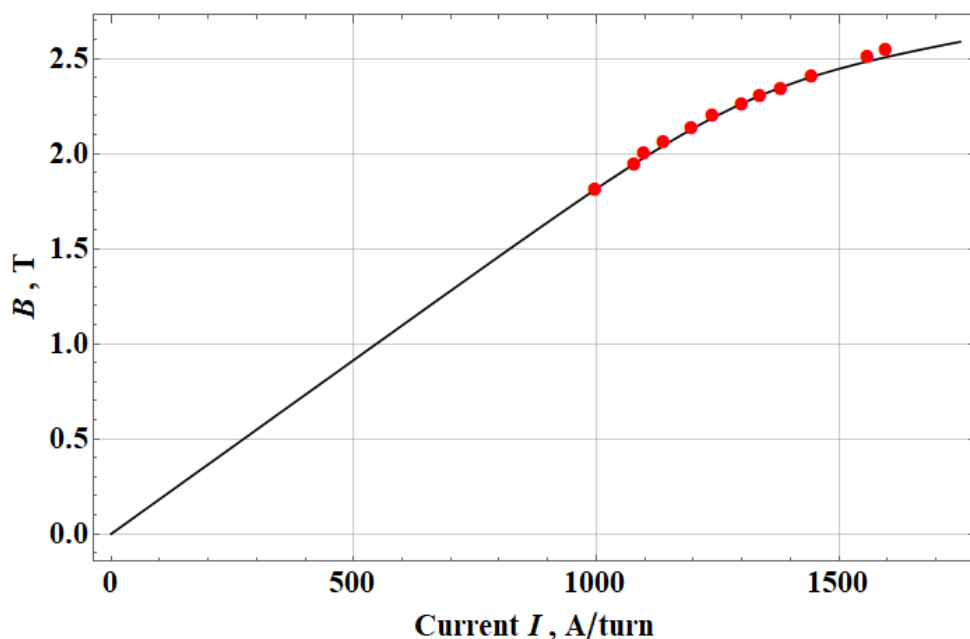


Рис. 4. Зависимость индукции $B(I)$ в центре магнита «Динозавр» от тока питания при сомкнутом ярме.

Широкоапертурный спектрометрический магнит СПАСЧАРМ

Для целей импульсного анализа заряженных частиц в эксперименте СПАСЧАРМ используется большой магнит (см. Рис. 5) с апертурой $X \times Y = 2,3 \times 1$ м², достаточной для регистрации всех вторичных частиц системой всех трековых детекторов в угловом диапазоне до $\sim \pm 110$ мрад по вертикали и, потенциально, до $\sim \pm 240$ мрад по горизонтали,

что уверенно перекрывает требования к угловому акцептансу спектрометра, вытекающие из целей физической программы эксперимента.

Этот магнит – существенная переработка спектрометрического магнита НЕПТУН [9], который был построен в середине 1980-х годов для эксперимента на коллайдере УНК [10]. Для работы в составе эксперимента СПАСЧАРМ магнит НЕПТУН был заметно модернизирован, а именно: ярмо, изначально С-образное, было переделано в Ш-образное с использованием 30% предыдущего ярма, внесены изменения в обмотку магнита, а также были изготовлены новые экраны для защиты трековых детекторов от рассеянного магнитного поля. Для оптимизации геометрии, включая расположение защитных экранов, выбора оптимальных режимов питания магнита и т.д. были проведены детальные численные расчёты магнитного поля для большого количества вариантов с помощью универсального вычислительного комплекса ANSYS [11]. Были также сделаны прецизионные измерения топографии поля в рабочей апертуре магнита с точностью $\sim (0,1-0,3) \%$.

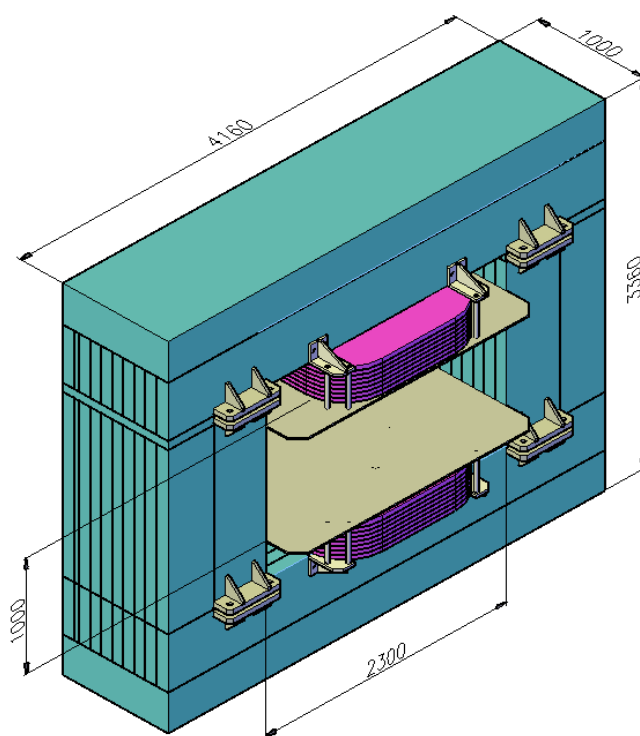


Рис. 5. Общий вид спектрометрического магнита СПАСЧАРМ (защитные экраны не показаны).

Преимущественно вертикальное магнитное поле формируется в апертуре спектрометрического магнита СПАСЧАРМ двумя стальными полюсами с размерами $X \times Z = 800 \times 1000$ мм². Магнитный поток замыкается через две симметричные ветви стального ярма с сечением 850×1000 мм² каждая. Обмотка магнита состоит из двух катушек, в каждой из которых по 256 витков. Магнит имеет следующие рабочие параметры:

- максимальный ток возбуждения – 2000 А;
- проводник – это медная трубка с квадратным сечением $16,5 \times 16,5$ мм² и внутренним отверстием под охлаждающую воду диаметром 10 мм;
- сопротивление одной катушки 0,105 Ом;
- ограничение на удельное сопротивление охлаждающей воды – не менее 10000 Ом·см;
- перепад давления охлаждающей воды на обмотке 20 атм;
- вес магнита 150 тонн.

Для питания магнита используется генератор №1ГП-550-750 ($U_{\text{ном}}=150$ В, $I_{\text{ном}}=3670$ А) электромашинного преобразовательного агрегата 10АП. Стабилизация тока через нагрузку осуществляется цепью обратной связи по току, воздействующей на систему управления маломощного тиристорного преобразователя возбуждения генератора ($U_{\text{возб.мах}}=250$ В, $I_{\text{возб.мах}}=13,2$ А).

Расчётная зависимость индукции поля в центре магнита от тока питания показана на Рис. 6.

В настоящее время из-за ограничений по источнику питания магнит эксплуатируется при пониженном токе 1 кА/виток. Для отвода тепла, выделяемого при работе магнита, через обмотку прокачивается обессоленная холодная вода с температурой на входе не выше 30°C под давлением 11 атмосфер. При этом на выходе из магнита температура воды не превышает 50°C.

Магнит позиционирован так, что его центр находится на расстоянии 3,26 м ниже по пучку от центра поляризованной мишени. При этом остаётся около 1,5 м для размещения трековых детекторов между магнитами Динозавр и СПАСЧАРМ в области ослабленного магнитного поля. На расстоянии ~0,85 м вверх по пучку от центра магни-

та размещён стальной экран толщиной 100 мм, с окном размерами $X \times Y = 2,3 \times 0,7$ м² для защиты трековых детекторов от рассеянного магнитного поля. Для тех же целей ниже по пучку на расстоянии $\sim 1,7$ м от центра магнита установлен сдвоенный экран из двух листов железа, толщиной 50 мм каждый, со значительно бóльшим окном: $X \times Y = 2,3 \times 1,5$ м².

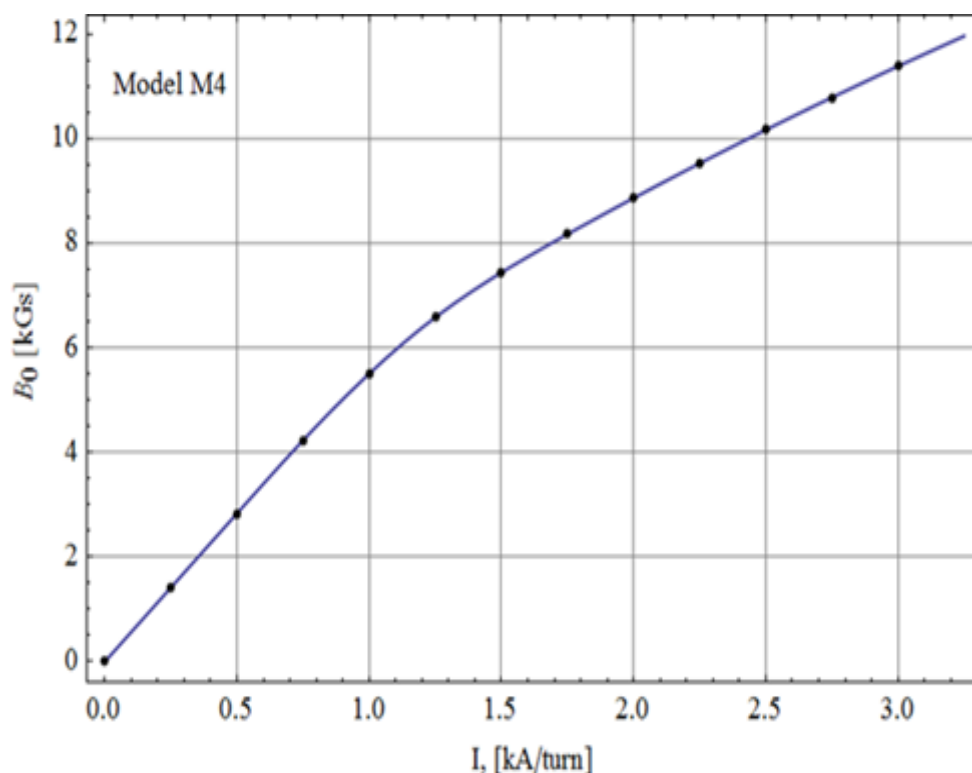


Рис. 6. Расчётная зависимость магнитной индукции в центре магнита от тока питания.

Магнитное поле в магните с такой геометрией, очевидно, далеко от однородного, что иллюстрируется некоторыми распределениями, показанными на Рис. 7. Для целей использования магнита в трекинге заряженных частиц были проведены детальные измерения топографии поля системой датчиков Холла [12] в объёме, размерами $X \times Y \times Z = 1,24 \times 0,84 \times 1,96$ м³. Измерения всех трёх компонент поля были сделаны в 34 496 точках на решётке с шагом 4 см по каждой из координат. Датчики Холла были прокалиброваны в диапазоне индукций $\pm 0,8$ Тл при помощи ЯМР-магнитометра [13] с точностью $\sim (0,4-0,6)$ мТл. Во время измерений топографии поля, полный цикл которых занял ~ 10 часов, дрейф тока питания и поля в магните не превышали $\pm 0.01\%$. Изменения отслеживались по монитору тока и двум датчикам ЯМР, зафиксированным на полюсах.

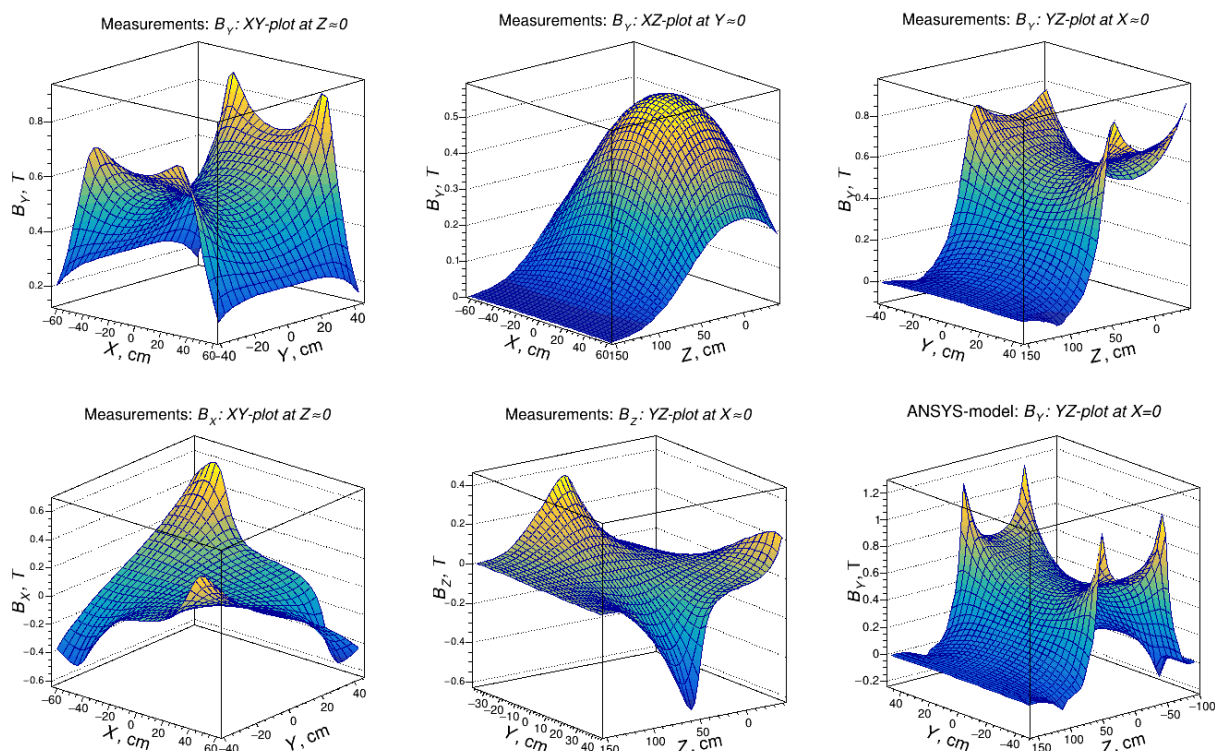


Рис. 7. Некоторые распределения поля в апертуре магнита в плоскостях, проходящих через его центр. Пять из 6-ти распределений взяты из измерений, а 6-е (в правом нижнем углу) – результат численного моделирования с использованием программы ANSYS.

Измерениями была покрыта значительная часть рабочего объёма магнита, но, к сожалению, не весь объём. Из-за конструктивных особенностей магнита и ограничений системы перемещения датчиков Холла [12] не удалось сделать измерения на расстояниях, удалённых более чем на 0,4 м от центра магнита вверх по пучку, а также вблизи границ апертуры. Поэтому в настоящее время в анализе данных для трассировки заряженных частиц в магните используется расчётная картина поля, сверенная с магнитными измерениями. Среднеквадратичное отклонение (*RMS*) расчётов и измерений по всем 101 920 измеренным значениям всех трёх компонент поля было найдено равным $\pm 1,9$ мТл, что составляет $\pm 0,35\%$ от поля в центре магнита.

Значительный вклад в отклонения по всему объёму вносит ошибка позиционирования датчиков вблизи рёбер и углов полюсов, где градиенты индукции очень велики и достигают ~ 5 мТл/мм. Если ограничиться только областью вдали от полюсов магнита ($|Y| < 30$ см), то здесь $RMS = \pm 0,95$ мТл, что составляет $\pm 0,18\%$ от поля в центре магни-

та. По абсолютной нормировке, в среднем по объёму, расчётная и измеренная магнитные индукции практически совпали: разница составляет $\sim 0,13\%$ при ошибке процедуры сравнения, оцененной в $\pm 0,15\%$.

Некоторые иллюстрации к сравнению расчётов и измерений представлены на Рис. 8 в терминах интегралов поля вдоль оси Z . Показаны только две поперечные компоненты, которые вносят доминирующий вклад в отклонение в магните заряженных частиц, летящих под малыми углами к оси Z . По среднеквадратичным отклонениям от нуля для всей показанной X - Y -плоскости имеет место согласие в пределах $\sim \pm 0,3\%$ для интеграла от B_X и $\sim \pm 0,18\%$ – для интеграла от B_Y . Вдали от полюсов (при $|Y| < 30$ см) согласие не хуже, чем $\sim \pm 0,14\%$ для обеих компонент.

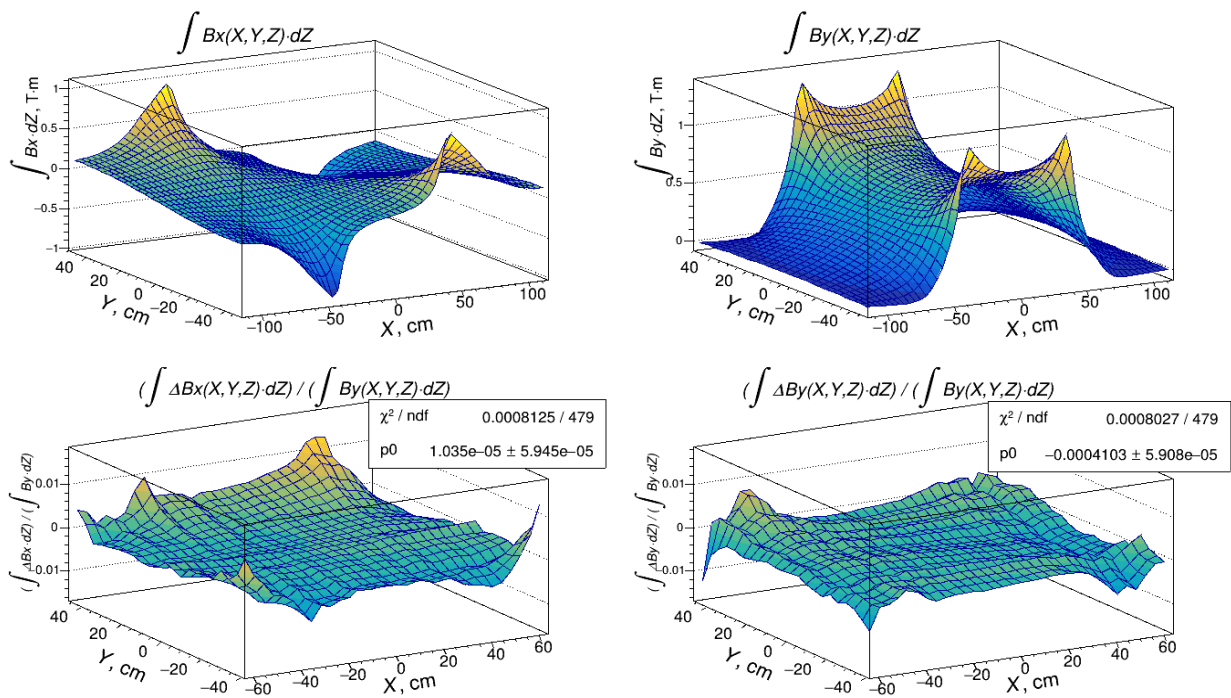


Рис. 8. Иллюстрация к степени согласия расчётов и измерений по интегралам вдоль оси Z (параллельно пучку) от поперечных компонент поля B_X и B_Y . Верхняя строка: расчётные распределения интегралов в поперечной плоскости X - Y для всего рабочего объёма магнита. Нижняя строка: относительные разности между расчётными и измеренными интегралами, нормированные на интегралы от основной компоненты B_Y , для части рабочего объёма, где были сделаны измерения. Обозначение: $\Delta B(X, Y, Z) = B_{\text{расчёт}}(X, Y, Z) - B_{\text{измерения}}(X, Y, Z)$. В нижней строке числа в стат-боксах соответствуют фитированию константой с единичными ошибками 2D-распределений в полосе $|Y| < 30$ см.

Измеренная индукция в центре магнита равна $0,5398 \pm 0,0004$ Тл, а интеграл поля вдоль оси магнита равен $0,703 \pm 0,001$ Тл·м. Отсюда следует оценка эффективной длины по полю вдоль пучка ~ 1.3 м. Максимальная расчётная величина рассеянного поля в зоне ближайшего трекового детектора выше по пучку достигает примерно 15-17 мТл, а в зоне ближайшего детектора ниже по пучку – 0,2 мТл.

Корректирующие пучковые магниты КМ1 и КМ2

Электромагниты-корректоры СП-140 спроектированы в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова в 1968 году (чертёж №ОА502738). В производственных условиях НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ по этому чертежу для установки СПАСЧАРМ было изготовлено два идентичных магнита (см. Рис. 9) для прецизионного наведения пучка на центр поляризованной мишени.



Рис. 9. Общий вид расположения корректирующих магнитов КМ1 и КМ2 на канале № 14 У-70. Стрелка указывает направление движения протонного пучка в канале.

Габариты магнита $662 \times 630 \times 310$ мм³, вес 380 кг. При рабочем токе магнита 9 А в его рабочей апертуре высотой 100 мм и шириной 200 мм магнитное поле достигает 0,1 Тл. Размеры апертуры были выбраны так, чтобы в неё полностью укладывался пучок в зоне размещения магнитов-корректоров. Длина магнита по железным полюсам 500 мм. Изменением тока возбуждения обмоток можно добиться наведения центра пучка частиц на центр поляризованной мишени ЗППМ-200М с точностью не хуже, чем 0,3 мм. Размер пучка (полная ширина на полувысоте) в мишени диаметром 20 мм составляет 7 мм.

Обмотка магнита СП-140 состоит из четырёх катушек, включённых последовательно. Число витков в обмотке 2240, средняя длина витка 1,3 м, проводник – провод ПСД. Сопротивление обмотки при 15°С равно 8,4 Ом, индуктивность электромагнита в сборе 4,4 Гн, охлаждение обмотки естественное воздушное, максимальный перегрев меди обмотки 65°С.

На Рис. 10 и 11 представлены некоторые результаты измерения магнитного поля магнита СП-140 при помощи датчика Холла. Видно, что поле линейно по току вплоть до величины тока 12,5 А и однородно по длине вплоть до 200 мм от центра магнита.

В настоящее время в качестве источников питания магнитов используются выпрямители типа ВУ-110/24А, которые при напряжении в сети 220/380 В дают на выходе выпрямленное напряжение 110 В и ток 24 А. Вес выпрямителя 60 кг.

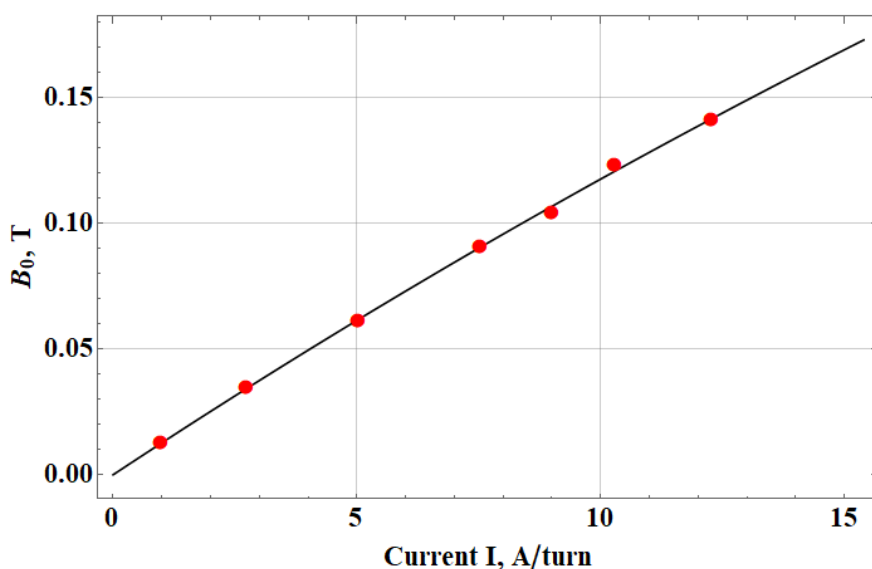


Рис. 10. Зависимость индукции $B_y(I)$ в центре магнита СП-140 от тока питания I .

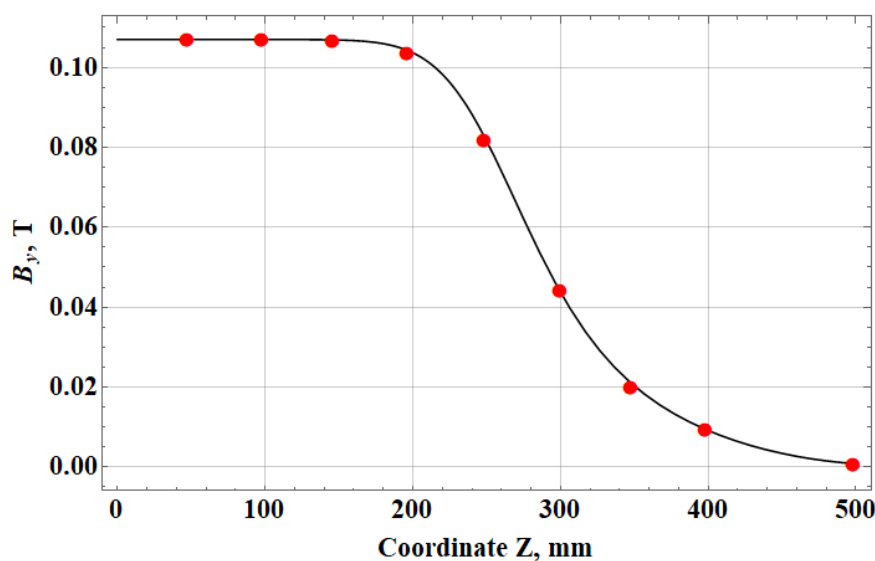


Рис. 11. Зависимость индукции $B_y(I)$ в центре магнита СП-140 вдоль центральной оси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в настоящей работе электромагниты эксперимента СПАСЧАРМ являются органической частью физической установки и выполняют в ней следующие функции:

- магнит «Динозавр» с индукцией 2,4 Тл при однородности магнитного поля $\sim \pm 0,013\%$ в рабочем объеме мишени 60 см^3 обеспечивает накачку поляризации протонов до 75% с последующим удержанием поляризации в течение 1-2 суток;
- широкоапертурный спектрометрический магнит СПАСЧАРМ обеспечивает одновременное измерение импульсов с точностью (потенциально) до $\sim \pm(0,1-0,3)\%$ для всех заряженных вторичных частиц в передней полусфере взаимодействий (по фейнмановской переменной $x_F > 0,3$) до поперечных импульсов 2 ГэВ/с при непрерывном 2π -покрытии по азимутальному углу в пределах акцептанса установки, что минимизирует систематические ошибки в измерениях спиновых эффектов;
- прецизионное наведение пучка частиц в канале на центр поляризованной мишени выполняется корректирующими магнитами КМ1 и КМ2.

В течение ряда сеансов работы на пучке описанные здесь магниты показали хорошую надёжность функционирования и стабильность параметров. На последующее десятилетие планируется дальнейшее их использование в программе эксперимента СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70.

Работа выполнена в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 22-12-00164).

Работа выполнена в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ при частичной финансовой поддержке Министерства Высшего Образования и Науки (программа Приоритет-2030 в НИЯУ МИФИ).

Список литературы

- [1] В.В. Абрамов и др. Концептуальный проект эксперимента СПАСЧАРМ. Препринт ИФВЭ 2019-12, 2019, Протвино, 144 стр.
- [2] Е.Д. Бондаренко и др. Система питания корректирующих магнитов каналов пучков с дистанционным управлением от ЭВМ. Препринт ИФВЭ 90-58, 1990, Протвино.
- [3] О.А. Грачёв и др. Компактный электромагнит для «замороженной» протонной поляризованной мишени. ПТЭ, №3, 1993, стр. 189.
- [4] М.М. Бурхин и др. ПТЭ, №1, 1981, стр. 30.
- [5] И.А. Аввакумов и др. Установка ПРОЗА для исследования поляризационных эффектов в зарядовообменных процессах. Препринт ИФВЭ 81-15, Серпухов, 1981.
- [6] В.Д. Апокин и др. Установка ПРОЗА-М для исследования односпиновых асимметрий в инклюзивном образовании нейтральных мезонов на ускорительном комплексе ИФВЭ. ПТЭ, №4, 1998, стр.23.
- [7] В.Н. Алферов и др. Система измерения магнитного поля установки СВД-2. ПТЭ, № 3, 2019, стр. 157.
- [8] А.Г. Дайковский, Ю.И. Португалов. Пакет программ для решения двумерных задач магнитостатики методом конечных элементов. Препринт ИФВЭ, ОМВТ 78-68, 1978, Серпухов.

- [9] Solovianov V.L. // Proceedings of Workshop on the Experimental Program at UNK, Protvino, 1988, p. 191.
- [10] The proton Accelerating and Storage Complex on energy 3000 GeV. IHEP preprint 93–27, Protvino, 1993.
- [11] ANSYS. www.ansys.com
- [12] А. Абрагам. Ядерный магнетизм. Москва, ИЛ, 1963. Гл. IV.
- [13] Г. В. Карпов и др. Прецизионные магнитометры на основе ЯМР в стандарте VME. Препринт ИЯФ СО РАН 2004-55, Новосибирск, 2004.

Рукопись поступила 24 июня 2022 г.

Мещанин А.П. и др.

Магниты эксперимента СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70

Препринт отпечатан с оригинал-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 11.02.2022 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ. л. 0, 75. Уч.– изд.л. 0,6. Тираж 80. Заказ 169. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт»–ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, дом 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2022-05,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2022
