

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

C 345

X-162

На правах рукописи

С.Х.Хакимов

ПОЛУЧЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОЙ  
НАПРЯЖЕННОСТИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ  
СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
кандидат физико-математических  
наук Л.М.Барков

1965

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

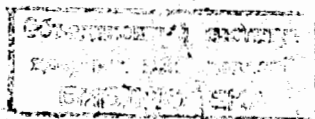
На правах рукописи

С.Х.Хакимов

ПОЛУЧЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОЙ  
НАПРЯЖЕННОСТИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ  
СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
кандидат физико-математических  
наук М.М.Барков



1965

Работа выполнена в Институте атомной энергии им. И.В.Курчатова

В настоящей работе рассмотрены вопросы получения импульсных магнитных полей высокой напряженности для опытов по измерению коэффициента асимметрии позитронов  $\mu^+ \rightarrow e^+$ -распада и магнитных моментов гиперонов. Для этих экспериментов необходимо иметь катушки импульсного магнитного поля с рабочим объемом около  $600\text{см}^3$ , способные работать с магнитными полями напряженностью до 200 кГс. Экспериментальные исследования и расчеты, выполненные по этой теме, представляют содержание данной диссертации.

Эксперименты по измерению коэффициента асимметрии позитронов  $\mu^+ \rightarrow e^+$ -распада проведены на синхротроне лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Опыты по измерению магнитных моментов гиперонов планируется провести на ускорителе ИТЭФ.

Первая глава диссертации посвящена обзору методов получения сильных магнитных полей и их применения в физических исследованиях. Рассмотрены различные конструкции безжелезных магнитов, которые по способу получения в них магнитных полей разделены на три группы:

- 1) установки импульсных магнитных полей,
- 2) мощные соленоиды постоянного тока,
- 3) магниты со сверхпроводящими обмотками.

Наиболее подробно обсуждены импульсные установки, которые позволяют создавать предельно большие магнитные поля. В таблице I приведены методы получения импульсных полей на этих установках, их рабочий объем и достигнутые величины амплитуд и длительностей

магнитного поля.

В этой же главе сделан обзор по расчетам катушек импульсного магнитного поля, из которого видно, что выполненные расчеты не обладают достаточной строгостью и полнотой.

Таблица I

№ п/п	Методы получения импульсных магнитных полей	Величина магнитного поля, Н кгс	Длительность импульса, T/2 мксек	Рабочий объем, см <sup>3</sup>
1.	Катушки проволочного и ленточного типа (техника П.Л.Капицы) [1]	500	3000	0,005
2.	Разрядка батареи конденсаторов на катушку биттеровского типа [2]	750	120	0,1
3.	Магнитные концентраторы [3]	280	1500	10
4.	Использование инерции материала [4] катушки	1600	20	-
5.	Метод кумулятивного взрыва [5]	14300	3,5	-

Глава II посвящена описанию катушек импульсного магнитного поля, которые были разработаны для проведения опытов на ускорителях частиц высоких энергий. Условия проведения физических экспериментов накладывают определенные требования на конструкции и параметры катушек:

- 1) рабочий объем катушки должен быть не менее 0,6литра,
- 2) напряженность магнитного поля в рабочем объеме катушек должна составлять 150 + 200 кгс,
- 3) длительность импульса магнитного поля должна быть достаточно большой (не менее нескольких миллисекунд),
- 4) катушки обязаны иметь достаточно большой срок службы с тем, чтобы обеспечить возможность проведения физических исследований с одной или двумя катушками.

Исходя из этих условий, были сконструированы и изготовлены катушки из бериллиевой бронзы, основные параметры которых приведены в таблице 2. Катушка I использовалась в экспериментах по измерению коэффициента асимметрии позитронов  $\mathcal{N}^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$  -распада [6]. Эксплуатация двух катушек данного типа показала, что они выдерживают около 40000 включений поля напряженностью 150кгс при частоте циклов включения поля 5 + 12 сек. Катушка II прошла успешно испытания при магнитных полях напряженностью 200 кгс и затем длительное время эксплуатировалась с магнитным полем 150 кгс [7].

Таблица 2

Катушки	Внутренний диаметр, мм	Внешний диаметр, мм	1) $\Delta$ мм	2) $\phi$ мм	Толщина витка, мм	Число витков	Индуктивность, мкгенри	Длительность поля, мсек	Н кгс
I	80	180	-	-	3	37,5	51,0	10	150
II	88	200	-	-	5	19,5	17,5	2,3	200
III	80	200	-	-	5	20	18,3	6,25	230
IV	80	200	40	30	4	2x18	28,6	9,15	160

1)  $\Delta$  - зазор между секциями

2)  $\phi$  - диаметр отверстия для ввода пучка частиц.

Катушка III предназначена для опытов по измерению магнитных моментов гиперонов с полями напряженностью не менее 200 кгс. Испытания показали, что подобные катушки могут надежно работать с магнитными полями напряженностью 200 + 230 кгс при частоте повторности циклов включения поля около 15 сек.

Двухсекционная катушка IV, изготовленная для опытов по физике твердого тела, прошла испытания при напряженности поля в центре катушки 160 кгс (180 кгс в центре каждой секции). В качестве материала катушки была выбрана бериллиевая бронза марки БрБ2, обладающая высоким пределом механической прочности и большим сопротивлением усталости. Охлаждение катушек производилось водой, протекающей по медным трубкам, напаянным по внешнему ди-

аметру витков катушки. Межвитковой изоляцией в катушках служил листовой гетенакс толщиной 0,5 мм. Эксперименты с катушками показали, что при выбранной системе охлаждения межвитковые гетенаксовые прокладки могут применяться при магнитных полях напряженностью 150 кгс с частотой циклов включения поля  $5 + 12$  сек и при  $H = 200$  кгс с частотой циклов включения поля около 15 сек. В работе подробно обсуждаются детали и конструкции катушек импульсного магнитного поля и результаты их испытания.

Пространственное распределение магнитного поля в рабочем объеме катушки снималось при ее питании от звукового генератора с помощью многовитковой пробной катушки. Эксперименты показали, что в пределах ошибок измерений распределения магнитного поля в рабочем объеме не зависят от частоты питания импульсной катушки в пределах от 50 гц до 500 гц и совпадают с распределениями, снятыми при импульсном ее питании. В работе обсуждаются возможные погрешности, которые могут возникнуть при измерении распределений магнитного поля с помощью пробных катушек. Измерение амплитуды и формы импульса магнитного поля в катушках производилось с помощью точно изготовленной пробной катушки, сигнал с которой через интегрирующую RC-цепочку подавался на осциллограф и фотографировался. В работе приводится метод приближенной оценки оптимальности выбранных из условий физического эксперимента минимальных размеров катушки.

В качестве источников питания катушек использовались установки с батареей конденсаторов [8,9].

Для изготовления цельноточенных катушек импульсного магнитного поля диаметром 200 мм была создана вакуумная печь, которая позволяла переплавлять 80-миллиметровые прутки промышленного изготовления в отливки диаметром 210 мм. В настоящее время изготовлена более совершенная вакуумная печь мощностью 60 квт и с рабочим объемом около 125 литров. Эта печь позволит переплавлять отливки диаметром до 400 мм.

Глава III посвящена вопросам расчетов катушек импульсного магнитного поля. Из решения уравнений Максвелла были найдены распределения магнитного поля и плотности тока в центральных витках катушки при генерации на ее внутренней поверхности как гармонического  $H = H_0 \sin \omega t$   $-\infty < t < +\infty$ , так и импульсного магнитного

поля  $H = H_0 \sin \omega t$   $0 \leq t \leq T/2 = 10$  мсек. Результаты вычислений импульсных задач обобщены на случай генерации на внутренней поверхности катушки импульса магнитного поля произвольной формы. Из сравнения результатов решений импульсных задач и гармонических следует, что для приближенной количественной оценки величин магнитного поля и токов, возникающих в теле катушки при ее импульсном питании, можно воспользоваться решениями гармонических задач.

Получение аналитического выражения для напряженности магнитного поля  $H(z, r, t)$  внутри произвольного витка катушки является очень сложной задачей. Поэтому распределения магнитного поля внутри тела катушки были получены из непосредственных измерений напряженности магнитного поля между витками катушки, на которую подавалось синусоидальное напряжение с частотой 50 гц. Измеренные распределения магнитного поля для центральных витков с большой степенью точности совпадают с расчетными. В работе показано, как используя экспериментальные распределения полей, полученные при питании катушки гармоническим током, и используя решение импульсных задач для бесконечно длинной катушки, можно определить значения магнитных полей  $H(z, r, t)$  и токов  $j(z, r, t)$  в произвольной точке тела катушки при ее импульсном питании. Найденные значения  $H(z, r, t)$  и  $j(z, r, t)$  позволяют вычислить усилия, действующие на межвитковую изоляцию, в импульсном режиме работы катушки. В момент максимума магнитного поля ( $t = T/4$ ) в катушке при  $H = 150$  кгс наибольшая величина аксиального напряжения, возникающая у внутренней поверхности катушки, в межвитковых прокладках составляет около  $1000 \text{ кг/см}^2$ .

Распределение температуры в теле катушки (нагревание за время действия импульса поля и охлаждение после прохождения импульса поля) было найдено из неоднородного уравнения теплопроводности при заданной плотности тока. Из расчетов при  $H=150$  кгс и частоте повторяемости циклов включения поля 5 сек следует, что температура на внутренней поверхности катушки после одного цикла повышается почти на  $100^\circ\text{C}$ , а за бесконечное число циклов непосредственно после прохождения очередного импульса поля достигает около  $250^\circ\text{C}$ . Из расчетов также следует, что для приближенной (точность  $\sim 20\%$ ) количественной оценки величины тепловы-



деления в теле катушки, когда во внутренней ее полости генерируется одиночный импульс магнитного поля, можно использовать выражения для плотности тока из решений гармонических задач.

По известным распределениям магнитного поля и плотности тока были вычислены механические напряжения, возникающие под действием сил магнитного давления, в центральных витках катушки. Также были вычислены механические напряжения в центральных витках, появляющиеся из-за наличия неравномерного распределения температуры в теле катушки. Из расчетов следует, что тангенциальные напряжения в обоих случаях существенно превышают радиальные напряжения. При этом тангенциальная составляющая напряжения от сил магнитного давления достигает максимальной величины на внутренней поверхности катушки и является напряжением растяжения. Тангенциальная составляющая напряжения, возникающая от градиента температуры, соответствует сжатию у внутренней поверхности и растяжению у внешней поверхности катушки. Расчеты показывают, что напряжения от сил магнитного давления могут быть достаточно сильно выравнены температурными напряжениями. Так, если выбрать частоту циклов включения поля равной  $15 + 17$  сек, то максимальная величина напряжения от сил магнитного давления, возникающая на внутренней поверхности катушки, компенсируется вдвое и распределение результирующего напряжения по радиусу катушки будет равномерным (при  $H = 150$  кгс около  $1200$  кг/см<sup>2</sup>).

Приведенные расчеты распределений магнитного поля, нагревания и охлаждения катушки, а также возникающих в ней механических усилий согласуются с результатами проведенных экспериментов с катушками импульсных магнитных полей.

Глава IV посвящена вопросам применения импульсных магнитных полей высокой напряженности для изучения свойств элементарных частиц. В первом разделе этой главы описывается эксперимент по измерению коэффициента асимметрии позитронов  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ -распада в импульсном магнитном поле напряженностью около 150 кгс. Использование магнитного поля напряженностью 150 кгс практически полностью исключает деполяризацию  $\mu^+$ -мезонов, что было показано в работе [10]. Эксперимент проводился на ускорителе ЛЯП ОЯИ. Источником продольно поляризованных  $\mu^+$ -мезонов служили  $\pi^+$ -мезоны, останавливавшиеся в объеме эмульсионной камеры.

Камера помещалась в рабочем объеме катушки импульсного магнитного поля. Согласованная работа синхроциклотрона и установки импульсного магнитного поля осуществлялась системой контроля и синхронизации, которая была опробована в контрольном эксперименте по измерению коэффициента асимметрии  $\mu^+ \rightarrow e^+$ -распада в импульсном магнитном поле  $H = 27$  кгс. Сравнение измеренной величины коэффициента асимметрии с ранее полученными в экспериментах с постоянными магнитными полями показало, что система контроля и синхронизации работала надежно. Рабочий объем эмульсионной камеры был выбран равным  $60 \times 30 \times 28$  мм<sup>3</sup> с тем, чтобы влияние неоднородности магнитного поля на измеряемую величину коэффициента асимметрии "а" было много меньше ожидаемой ошибки в "а".

В результате обработки экспериментального материала было отобрано 66039 случаев  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ -распада. При просмотре эмульсионных слоев отбирались только такие случаи  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ -распада, когда проекционный угол (на плоскость фотоэмульсии) между направлением вылета  $\mu^+$ -мезона и направлением магнитного поля лежал в пределах  $0^\circ + 30^\circ$  и  $150^\circ + 180^\circ$ . Для отобранных случаев  $\pi^+ \rightarrow \mu^+$ -распада "непараллельность" спина  $\mu^+$ -мезона направлению магнитного поля изменяет угловое распределение позитронов  $\mu^+ \rightarrow e^+$ -распада и приводит к уменьшению экспериментально измеряемого коэффициента асимметрии

$$a_{\text{экс.}} = a \langle \cos \vartheta_{\mu} \rangle.$$

Для отобранных случаев  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ -распада было построено угловое распределение  $\mu^+$ -мезона из  $\pi^+ \rightarrow \mu^+$ -распада и позитронов  $\mu^+ \rightarrow e^+$ -распада относительно направления магнитного поля и найдено, что

$$a \langle \cos \vartheta_{\mu} \rangle = 0.299 \pm 0.008,$$

$$\langle \cos \vartheta_{\mu} \rangle = 0.922 \pm 0.010.$$

Таким образом, коэффициент асимметрии позитронов  $\mu^+ \rightarrow e^+$ -распада, как следует из этого эксперимента, равен

$$a = 0.325 \pm 0.010,$$

что находится в хорошем согласии с величиной  $a = 1/3$ , предсказываемой теорией универсального "V-A"-взаимодействия.

Во втором разделе этой главы рассмотрены возможные варианты опыта по измерению магнитного момента  $\Lambda^0$ -гиперона  $\mu_{\Lambda}$  в реак-

ции  $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$  с начальным импульсом  $\pi^-$  - мезона  $P_{\pi^-} = 1,07$  Бэв/с. Первоначально предполагалось провести измерение  $\mu_{\Lambda^0}$  с точностью  $\Delta\mu_{\Lambda^0} = 0,2$  ядерного магнетона (ЯМ). Схема опыта следующая: между мишенью, в которой рождаются  $\Lambda^0$ , и детектором, в котором распадаются  $\Lambda^0$ , располагается катушка импульсного магнитного поля. Поскольку оптимальная длина пролетного расстояния  $\Lambda^0$  -гиперона до распада составляет 10 см и угол разлета  $\Lambda^0$  -гиперона относительно направления пучка  $\pi^-$ -мезонов составляет  $21,5^\circ$ , то были изготовлены катушки длиной 10 см и внутренним диаметром 8 см. Эти катушки успешно работали при  $H = 200$  кГс. Получение большей точности, по крайней мере, 0,1 ЯМ в измерении  $\mu_{\Lambda^0}$  с использованием данных катушек сопряжено с преодолением больших трудностей. Поэтому в настоящее время проектируются катушки с большим рабочим объемом (около 2 литров), способные работать при магнитных полях напряженностью 200 кГс. Достаточно большой внутренний диаметр (12 см) катушек позволяет поместить детектор внутрь катушки и тем самым, как следует из расчетов, в несколько раз снизить число необходимых рождений гиперонов в мишени при заданной точности  $\Delta\mu_{\Lambda^0}$ . В такой постановке опыта для измерения магнитного момента  $\Lambda^0$  -гиперона с точностью  $\Delta\mu_{\Lambda^0} = 0,1$  ЯМ потребуется пропустить через полиэтиленовую мишень толщиной 4 см интегральный поток  $\pi^-$ -мезонов  $N_{\pi^-} = 3 \cdot 10^7$ . Количество фоновых частиц составит около 850 частиц/см<sup>2</sup>. В качестве детектора предполагается использовать ядерную фотоэмульсию.

Рассмотрены возможные варианты опыта по измерению магнитного момента  $\Sigma^+$ -гиперона  $\mu_{\Sigma^+}$  в реакции  $\pi^+ + p \rightarrow \Sigma^+ + K^+$  с начальным импульсом  $\pi^+$ -мезона  $P_{\pi^+} = 1,15$  Бэв/с. Эти эксперименты проектируются на базе имеющихся катушек импульсного магнитного поля, способных работать при магнитных полях напряженностью 200 кГс. Оптимальная длина пролетного расстояния  $\Sigma^+$ -гиперона до распада в магнитном поле 200 кГс составляет (2+5) см. Поэтому в рассматриваемых вариантах опыта детектор (ядерная фотоэмульсия) располагается в непосредственной близости от мишени. Расчеты показывают, что в опытах с использованием полиэтиленовой мишени толщиной 2 см при  $\Delta\mu_{\Sigma^+} = 0,4$  ЯМ поток фоновых частиц в детектор составит около  $10^4$  частиц/см<sup>2</sup>. Подобные фоновые усло-

вия, по существу, ограничивают возможность проведения указанного эксперимента. В связи с этим вариант опыта с жидководородной мишенью является более перспективным: для получения  $\Delta\mu_{\Sigma^+} = 0,4$  ЯМ при  $H = 200$  кГс необходимо пропустить через жидководородную мишень толщиной 5 см интегральный поток сепарированных  $\pi^+$ -мезонов  $N_{\pi^+} = 10^8$ ; количество фоновых частиц составит около  $10^3$  частиц/см<sup>2</sup>.

Таким образом, в данной работе сделано следующее:

1. Выполнены расчеты катушек импульсного магнитного поля, которые позволили выбрать конструкцию и оптимальный режим эксплуатации катушек.

2. Сконструированы и изготовлены катушки импульсного магнитного поля из бериллиевой бронзы с рабочим объемом около 600 см<sup>3</sup>, способные работать с магнитными полями напряженностью до 200 кГс; срок службы этих катушек исчисляется многими тысячами включений магнитного поля при достаточно большой частоте циклов.

3. Измерено значение коэффициента асимметрии позитронов  $\mu^+ \rightarrow e^+$  -распада в импульсных магнитных полях напряженностью около 150 кГс. Найденная величина  $\alpha = 0,325 \pm 0,010$  находится в хорошем согласии с  $\alpha = 1/3$ , предсказываемой теорией "V-A" -взаимодействия.

4. Рассмотрены возможные варианты опытов по измерению магнитного момента  $\Lambda^0$  -гиперона с точностью 0,1 ядерного магнетона и  $\Sigma^+$ -гиперона с точностью 0,4 ядерного магнетона с использованием имеющихся и проектируемых катушек импульсного магнитного поля.

Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в работах [6,8,11,12].

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Kapitza P.L. , Proc. Roy. Soc. A 105, 691 (1924)
2. Foner S., Kolm H.H., Rev. Sci. Inst. 28, 799 (1957)
3. Hoffmann L., Morpurgo M., Nucl. Inst. and Methods 20, 500 (1963).
4. Furth H.P., Levine M.A., Waniew R.W., Rev. Sci. Inst. 28, 949 (1957).
5. Fowler C.M., Garn W.B., Caird R.S., J. Appl. Phys., 31, 588 (1960).
6. Gurevich I.I., Makaryna L.A., Nicol'sky B.A., Sokolov B.V., Sutzkova L.V., Khakimov S.Kh., Shestakov V.D., Dobretsov Yu.P., Akhmanov V.V., Phys. Lett., 11, 185 (1964).
7. Николаев И.Н. ЖЭТФ, 45, 1678 (1963).
8. Ахманов В.В., Барков Л.М., Бобовиков Р.С., Добрецов Д.П., Замолодчиков Б.И., Никольский Б.А., Соколов Б.В., Хакимов С.Х., Шестаков В.Д. ПТЭ, № 4, 201 (1965).
9. Макарьин В.К., Мартемьянов В.П. "Установка импульсные магнитные поля", ПТЭ (1966).
10. Носов В.Г., Яковлева И.В., ЖЭТФ, 43, 1750 (1962).
11. Барков Л.М., Огурцов В.В., Хакимов С.Х. "Расчеты катушек импульсного магнитного поля", ПТЭ (1966).
12. Барков Л.М., Огурцов В.В., Хакимов С.Х. "Получение импульсных магнитных полей высокой напряженности". Международная конференция по физике высоких энергий, г.Дубна (1964).

Л-140422. ИАЭ-1018. Зак. 3499. Тир. 200. 10, 12, 65г.  
Отв. за выпуск Хакимов С.Х.