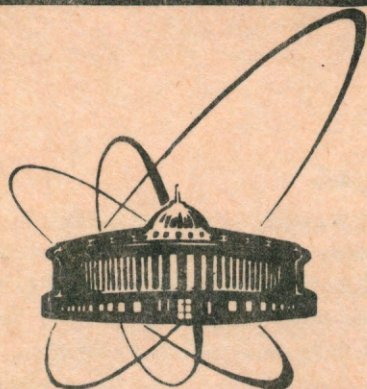


91-363



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P11-91-363

П.Г.Акишин, Ю.К.Гаврилов*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО
СОЛЕНОИДА УСТАНОВКИ "АМПИР"

*Институт ядерных исследований АН СССР, Москва

1991

Введение

В физической программе исследований, планируемой на Московской мезонной фабрике, большое внимание уделено изучению редких пион-ядерных реакций. Это обусловлено основными свойствами пиона как пробной частицы, его квантовыми числами, разнообразием пион-ядерных реакций и характером взаимодействия пиона с нуклонами ядра.

Наиболее интересным представляется изучение реакций, в которых проявляются ненуклонные степени свободы, например, реакция рождения пионов на ядрах, поглощение быстрых пионов с испусканием заряженных частиц и γ -квантов, перезарядка пионов на ядрах.

Однако сечение этих реакций составляет единицы нанобарн, поэтому постановка подобных экспериментов требует достижения высокой статистической точности, наличия информации о полной кинематике реакции и о состоянии системы после взаимодействия.

Для реализации программы исследований пион-ядерных взаимодействий в ИЯИ АН СССР совместно с ИАЭ им. И. В. Курчатова и Ленинградским государственным университетом создается универсальный спектрометр с геометрией, близкой к 4π , "АМПИР" /5/.

В состав установки входит сверхпроводящий магнитный соленоид, дрейфовая камера, вершинный стриповый детектор, детектор нейтральных частиц и γ -квантов. Определение заряда и импульса частиц в спектрометре проводится по траекторным измерениям в магнитном поле соленоида. Для выделения отдельных состояний в легких ядрах необходимо получить импульсное разрешение $- 5 \times 10^{-3}$, т.е. порядка 1-2 МэВ во всем энергетическом диапазоне. Это накладывает жесткие требования на конфигурацию магнитного поля в рабочем объеме соленоида.

Данная работа посвящена вопросам численного моделирования магнитной системы спектрометра "АМПИР".

I. Метод объемных интегральных уравнений

Для численного моделирования магнитной системы использовался метод объемных интегральных уравнений^{/1/}.

Пусть \vec{B} , \vec{H} , \vec{M} есть индукция, напряженность и намагниченность поля. Имеет место следующее интегральное уравнение:

$$\vec{H}(\vec{a}) = \vec{H}^s(\vec{a}) + \frac{\nabla \vec{a}}{4\pi} \int_G (\vec{M}(\vec{x}), \nabla \vec{a} \frac{1}{|\vec{x} - \vec{a}|}) dv_{\vec{x}}, \quad (I)$$

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ

ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

БИБЛИОТЕКА

где G - область, заполненная магнитным материалом, H^S - поле, создаваемое токовыми обмотками. Величины \bar{B} , \bar{H} , \bar{M} связаны нелинейными соотношениями

$$\bar{M} = \frac{\bar{B}}{\mu_0} - H, \quad (2)$$

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu \mu_c(|\bar{B}|)}, \quad (3)$$

где $\mu(|\bar{B}|)$ есть магнитная проницаемость, μ_c - магнитная проницаемость вакуума. Для дискретизации (I) область G разбивается на элементы $\{G_j\}$:

$$G = \bigcup_{j=1}^N G_j.$$

Полагая в пределах G_j постоянными \bar{B} , \bar{H} , \bar{M} и равными соответственно \bar{B}_j , \bar{H}_j , \bar{M}_j , получаем следующую дискретизованную систему уравнений:

$$\bar{H}_j = \bar{H}^S(\bar{a}_j) + \frac{\nabla \bar{a}}{4\pi} \left[\sum_{j=1}^N \int_{G_j} (\bar{M}_j, \nabla_a \frac{1}{|\bar{x} - \bar{a}|}) dV_{\bar{x}} \right]_{\bar{a}=\bar{a}_j}, \quad (4)$$

$$i = \overline{1, N}.$$

Точки наблюдения $\{\bar{a}_j\}$ в (4) являются центроидами $\{G_j\}$.

Решив нелинейную систему (4) и найдя намагниченность $\bar{M}(\bar{x})$, используя (I), можно определить поле в произвольной точке \bar{a} .

2. Численное моделирование

Исследования распределения магнитного поля спектрометра проводились с использованием двух программных комплексов из [2,3]. Для проверки качества расчетов была смоделирована магнитная система макета спектрометра (рис.1). Как видно из рис.1, имеет место вращательная симметрия ферромагнетика и токовых обмоток с углом поворота $\frac{\pi}{2}$. Очевидно, этой же симметрией обладает магнитное поле. Для сокращения вычислительных затрат программный комплекс из [2] был модернизирован таким образом, что при проведении численных расчетов появилась возможность учета поворотной симметрии поля. Сравнение численных расчетов с магнитными измерениями для макета приведены на рис.2,3. Был также проведен расчет упрощенного варианта спектрометра (рис.4), состоящего из 12 одинаковых пластин и двух торцевых дисков с круговыми отверстиями. Для упрощенного варианта имеет место вращательная симметрия с углом поворота $\frac{\pi}{6}$. На рис.5,6 приведено сравнение результатов расчетов, полученных авторами для данной конфигурации, с расчетами для той же

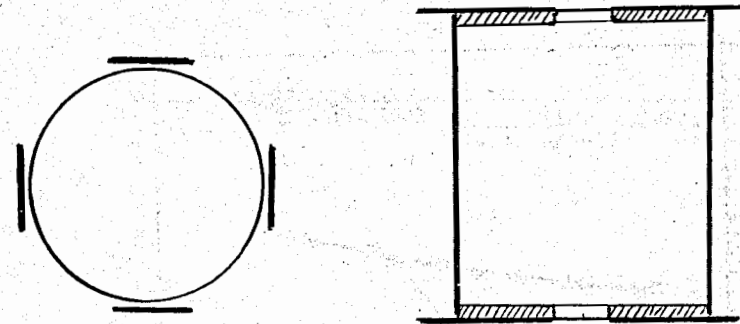


Рис.1. Эскиз макета спектрометра.

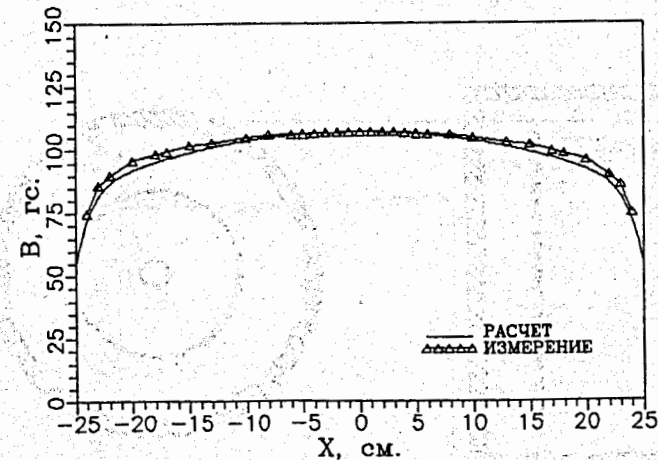


Рис.2. Распределение поля вдоль оси соленоида.

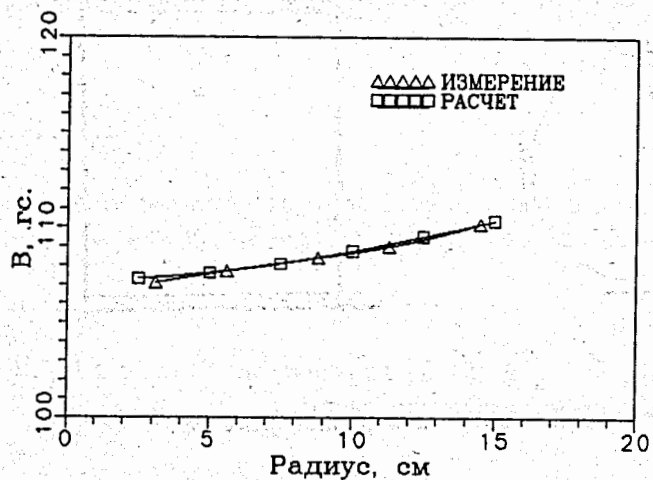


Рис.3. Распределение поля по радиусу.

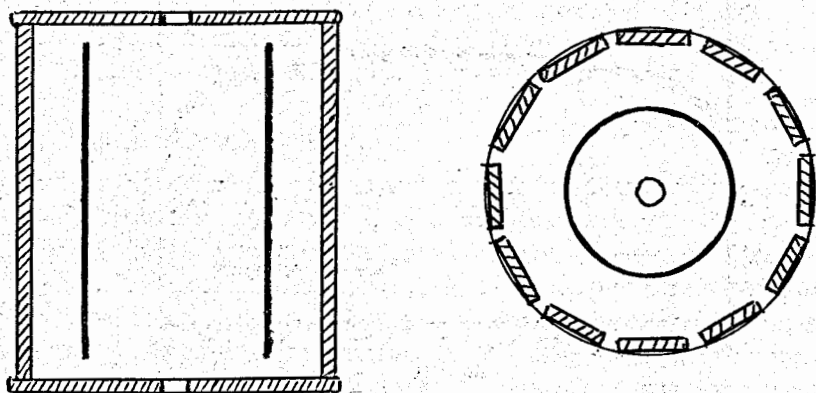


Рис.4. Упрощенный вариант спектрометра установки "АМГИР".

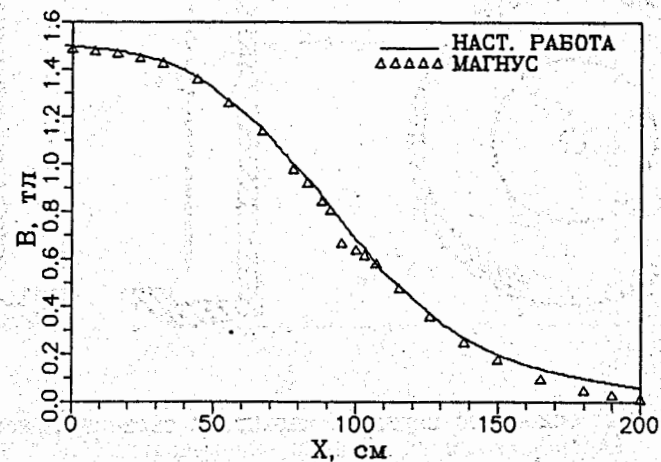


Рис.5. Распределение поля вдоль оси соленоида.

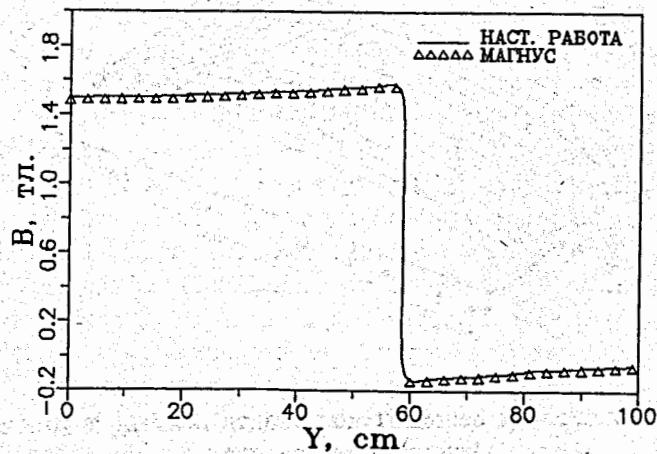


Рис.6. Распределение поля по радиусу в центре соленоида.

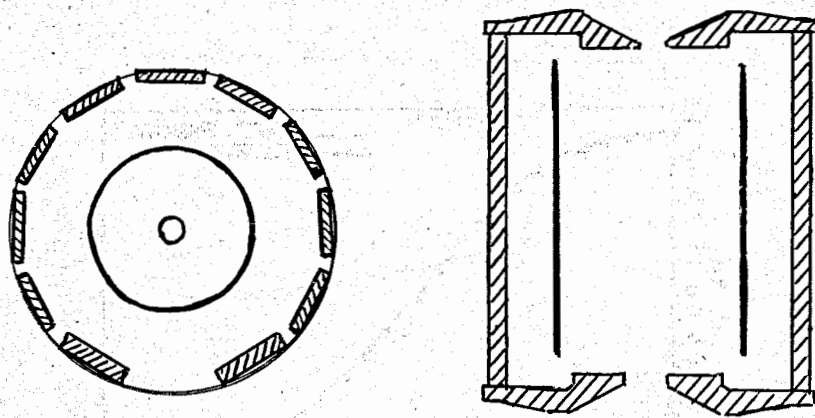


Рис.7. Эскиз основного варианта магнитной системы спектрометра.

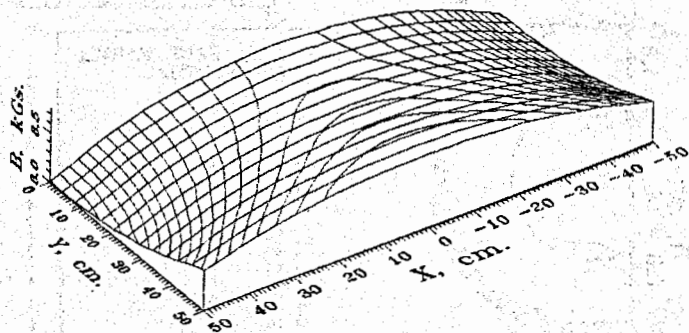


Рис.8. Топография основной компоненты поля B_x в рабочей области спектрометра.

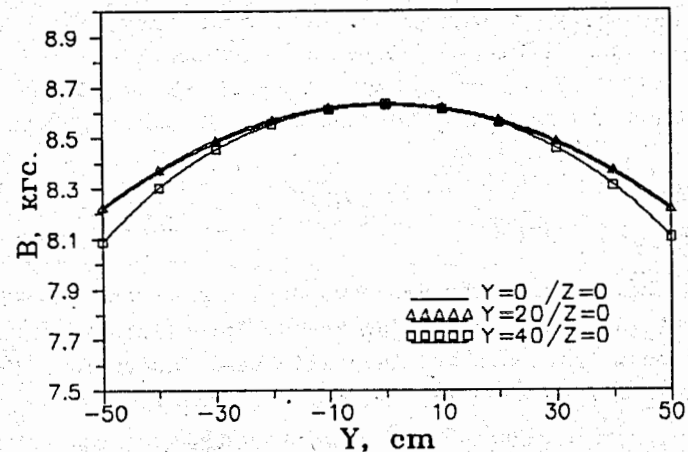


Рис.9. Распределение поля вдоль оси соленоида при разных значениях радиуса.

конфигурации, полученными по программе **MAGNUS** /4/. На рис.7 изображен основной вариант магнитной системы спектрометра. В сравнении с упрощенным вариантом отсутствует одна из 12 пластин и две другие имеют большее сечение. Значительные изменения претерпели также торцевые диски. Результатом всего этого является утрата вращательной симметрии, что существенно усложняет вычисления. Для расчетов использовалась методика, изложенная в /3/. Расчетная область G погружалась в большую область \tilde{G} , имеющую вращательную симметрию. В области $\tilde{G} \setminus G$ намагниченность M полагалась тождественно равной нулю, а для области G использовались быстрые алгоритмы из /3/. Расчетная область разбивалась на 1680 фиктивных элементов (гексаэдров), что соответствовало 1248 реальным элементам и нелинейной дискретизованной системе с 3744 неизвестными. Суммарное время центрального процессора ЕС-1066 на вычисление коэффициентов полностью заполненной матрицы дискретизованной системы уравнений, 600 шагов итерационного процесса и пересчет поля в 2340 точек составило около 16 часов.

На рис.8,9 приведены результаты расчетов.

В заключение авторы выражают благодарность **Dr.C.Sanelly** за проведенные расчеты по программе **MAGNUS**.

Литература

1. Newman M.J., Trowbridge C.W., Turner L.R. GFUN: An interactive program as an aid to magnet design // Proc. 4th Internat. Conf. Magnet. Technol. Brookhaven, 1972. p.617-626.
2. Акишин П.Г., Жидков Е.П., Кравцов В.Д. Об одном параллельном алгоритме решения трехмерных интегральных уравнений магнитостатики. ОИЯИ, PII-88-918, Дубна, 1988.
3. Акишин П.Г. Об одном методе расчета магнитных полей в системах с осесимметричной конфигурацией ферромагнетика. ЕВМ и МД, 1989, т.29, с.1168-1174.
4. Pissanetzky S. Solution of Three-Dimensional Anisotropic Non-Linear Problems of Magnetostatics using Two Scalar Potentials and Finite and Infinite Multipolar Elements and Automatic Mesh Generation. IEEE Trans. on Magnetics v. MAG - 18, p.346-350 (1982).
5. Труды Всесоюзного семинара "Программа экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР". Москва, 1986, с.201.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 июля 1991 года.

Акишин П.Г., Гаврилов Ю.К.
Математическое моделирование магнитного
поля сверхпроводящего соленоида установки
"АМПИР"

P11-91-363

Приведены результаты численного моделирования магнитной системы установки "АМПИР". На основе метода объемных интегральных уравнений получено распределение магнитного поля в рабочей области спектрометра. Сравниваются численные расчеты макетов магнитной системы спектрометра с результатами измерений и с расчетами по программе MAGNUS.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1991

Перевод авторов

Akishin P.G., Gavrilov Yu.K.
Simulation of the Magnetic Field
of the Set-Up AMPIR Superconducting
Solenoid

P11-91-363

The results of the numerical analysis of the magnetic system for the spectrometer AMPIR are presented. Using the method of volume integral equations the three-dimensional distribution of the magnetic field in the aperture of the spectrometer magnet is obtained. The comparison of the numerical analysis of the magnet model with the results of the measurements and calculations with MAGNUS program is presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1991