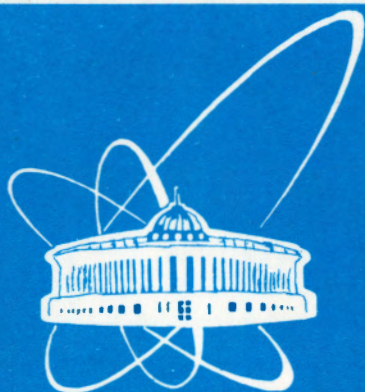


94-180



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P1-94-180

А.Д.Волков, А.В.Восканян, Б.Ж.Залиханов,
А.И.Иваненко, А.Ж.Кетикян, Е.В.Комиссаров,
В.С.Курбатов, С.И.Мисютин, В.З.Сердюк,
В.В.Сидоркин, В.И.Снятков, Ю.Р.Тер-Акопов

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА
УСТАНОВКИ ИСТРА-М

1994

1. Введение

Установка ИСТРА-М создана на канале адронов с энергией ≈ 25 ГэВ на ускорителе У-70 в г.Протвино в соответствии с программой исследования редких распадов π и K -мезонов. На рис.1 схематически показан вид установки.

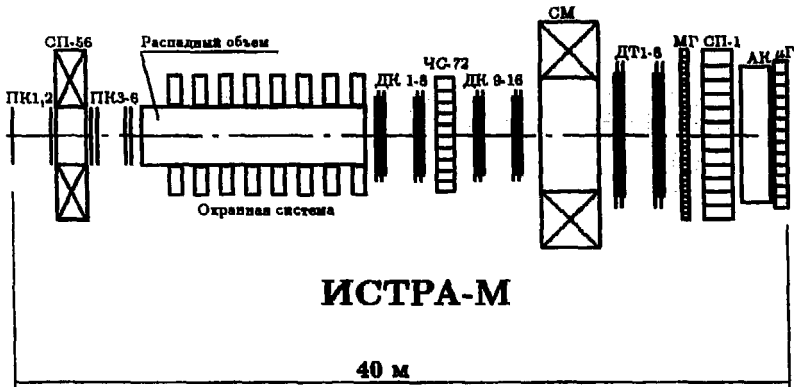


Рис.1. Общий вид экспериментальной установки ИСТРА-М:
ПК - пропорциональные камеры; СП-56 - пучковый магнит;
ДК - дрейфовые камеры; ЧС-72 - черенковский спектрометр;
СМ - спектрометрический магнит; ДТ - дрейфовые трубки;
МГ - матричный годоскоп; СП-1 - черенковский спектрометр;
АК - адронный калориметр; МГ - мюонный годоскоп

Импульс вторичной частицы определяется по степени её отклонения при прохождении через магнитное поле. Чтобы найти зависимость импульса частицы от степени её отклонения, надо знать компоненты магнитного поля в любой точке пространства /1/. Для этого необходимо проводить измерения и составлять подробную карту (т.е. значение поля в узлах пространственной решётки) каждой из компонент магнитного поля. При определении значений компонент поля в произвольной точке используется измеренная карта поля либо аналитические представления компонент, найденные при помощи этой карты.

2. Магнит

Магнитное поле на пути прохождения вторичных частиц создаётся постоянным электромагнитом /2/, общий вид которого приведён на рис.2. Его основные технические характеристики таковы:

1. Габаритные размеры	3800×2580×1200 мм
2. Рабочая область	1300×700×630 мм
3. Размер светового окна	2800×700 мм
4. Сечение магнитопровода	945×500 мм
5. Расчётная потребляемая мощность для $B=0.9$ Т в центре	240 кВт
6. Ток магнита	3 кА
7. Падение напряжения на обмотке	80 В
8. Омическое сопротивление обмотки	0.027 Ом
9. Охлаждение	водяное
10. Удельное сопротивление охлаждающей воды	100 кОм/см
11. Общий расход воды	180 л/мин
12. Общий вес магнита	53 т
13. Вес медной обмотки	8 т
14. Число витков в обмотке	240
15. Средняя длина витка	4.8 м
16. Источник питания КВТМС-3/560	$I=3.3$ кА, $U=160$ В

В конструкцию электромагнита заложены дополнительные возможности, позволяющие расширить диапазон его использования в физическом эксперименте: обмотка возбуждения рассчитана на работу с токами до 6 кА и имеет необходимый резерв по охлаждению; за счёт разборных элементов можно устанавливать его в труднодоступных зонах, а также сравнительно просто трансформировать его конфигурацию при изменении условий эксперимента, например изменять межполюсный зазор от 700 мм до 1200 мм.

Геометрический центр электромагнита геодезически установлен относительно оси канала адронов установки с точностью ± 0.1 мм.

3. Измерительная аппаратура

3.1. Механическая часть

На рис.3 показана схема измерительной штанги. Она установлена на двух горизонтальных балках, укрепленных при помощи уголкового приспособления к магнитопроводу магнита. Измерительная штанга состоит из отдельных прецизионно отфрезерованных брусков, собранных крестообразно. Это позволило собрать штангу длиной 3000 мм с высокой линейностью.

В поперечном направлении (ось X) штанга перемещается на роликах по рельсам с калиброванными отверстиями для фиксации штанги с шагом 10 ± 0.1 мм. На измерительной штанге установлена тележка с датчиками, перемещение которой по оси Z производится автоматически при помощи асинхронного электродвигателя РД09. Вдоль штанги закреплена измерительная линейка с калиброванными прорезями, которые имеют шаг 20 ± 0.15 мм. На тележке установлена пара диодов "приёмник-передатчик" инфракрасного излучения типа АЛ107А для синхронизации движения тележки по шагам вдоль измерительной линейки. С двух сторон тележки установлены "салазки", по которым по шлицам с шагом 20 ± 0.1 мм перемещаются каретки с датчиками Холла. Фиксация кареток осуществляется подпружиненными замками.

С помощью описанной механической системы можно выполнить измерение магнитного поля в объёме шириной 650 мм (X), высотой 860 мм (Y) и длиной 2800 мм (Z), с шагом 10 мм, 20 мм и 20 мм по осям X, Y и Z соответственно.

3.2. Электроника

Измерения магнитного поля проводились с помощью ПЭВМ "Правец-16" и блоков КАМАК, управляемых крейт-контроллером (КК). На рис.4 приведена блок-схема электроники измерений.

Поле измерялось с помощью двух измерительных головок, в каждой из которых ортогонально друг-другу расположены три датчика Холла (ДХ1÷6), так что одновременно измерялись три компоненты

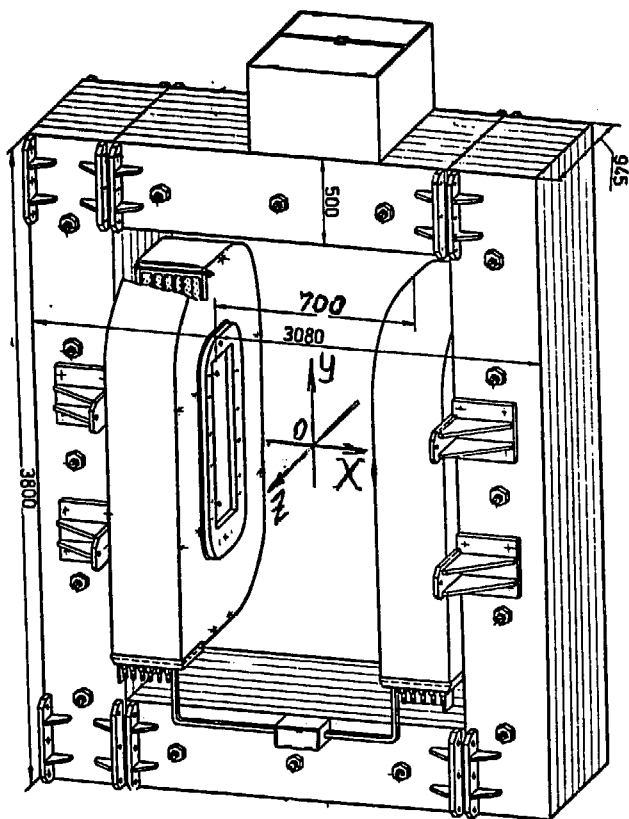


Рис.2. Широкоапертурный магнит установки ИСТРА-М

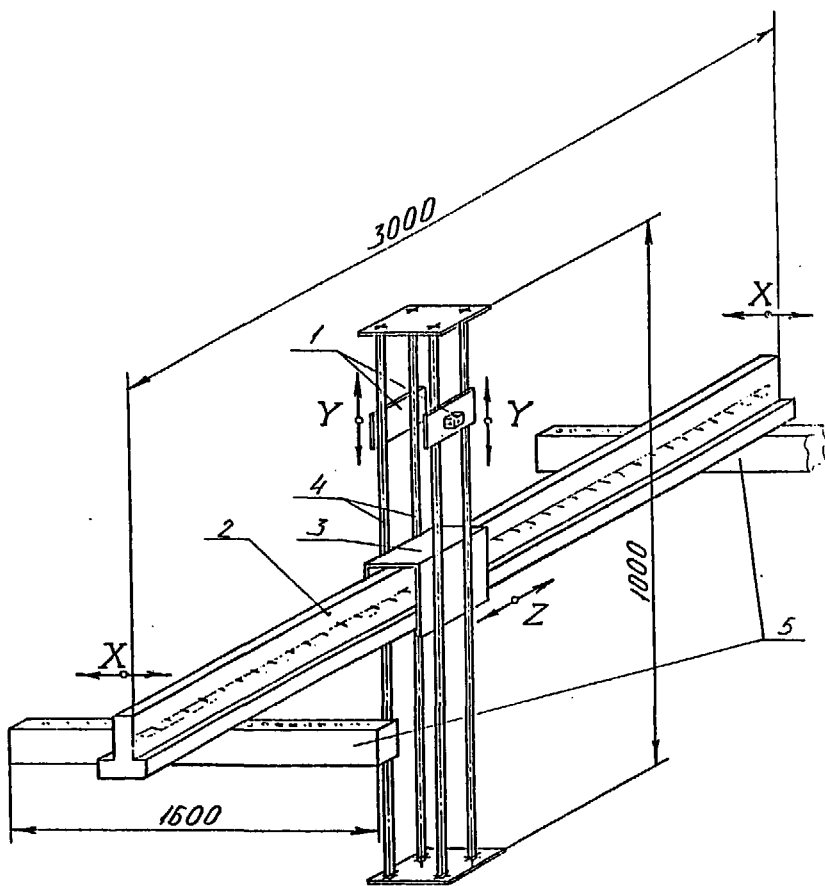


Рис.3. Схема расположения механики измерений

магнитного поля в двух точках плоскости X, находящихся на расстоянии 240 мм друг от друга. Измерительные головки закреплены на каретках, которые можно фиксировать по X, Y и Z под углом порядка 3° для последующей калибровки в магнитном поле. Датчики Холла соединены экранированным кабелем длиной 10 м с входами магнитометров Холла (МХ1 и МХ2) /3/, аналоговые сигналы с которых через аналоговый коммутатор (АК) поступают на 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Перемещение датчиков ДХ1÷6 по оси Z осуществляется по шагам автоматически - по сигналу "старт-стоп" от блока датчиков (БД) реверсивным двигателем РДО9. Сигналы реверса вырабатываются в блоке управления позиционированием (БУП) и через блок реверса (БР) поступают на исполнительный двигатель.

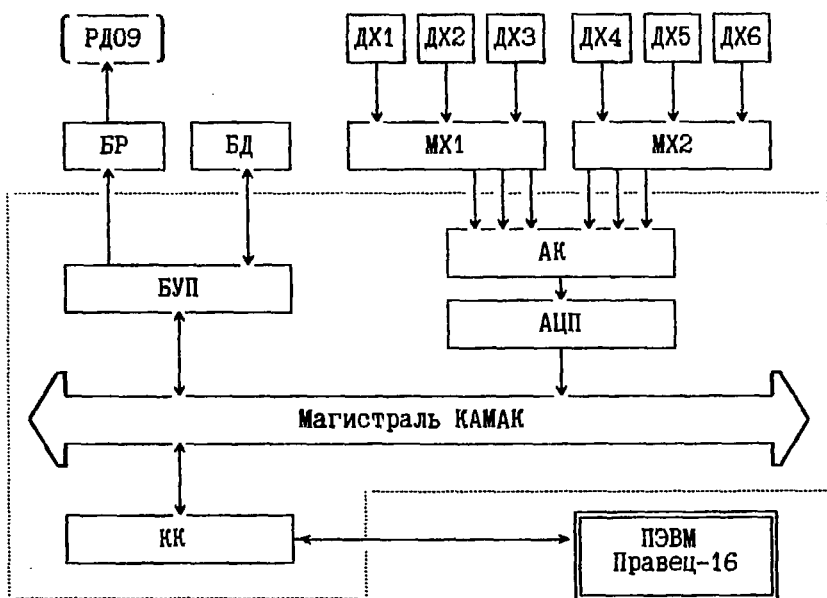


Рис. 4. Блок-схема электроники управления перемещением датчиков Холла, съёма и регистрации информации

Контроль стабильности тока питания магнита, а также калибровка датчиков в процессе измерения периодически проводились при помощи ЯМР-магнитометра. Стабильность источника питания магнита в процессе многодневных измерений была не хуже 10^{-4} .

4. Измерения

Компоненты поля измерялись с шагом 10 мм по X-координате, 20 мм по Y-координате и 20 мм по Z-координате в объёме 640×860×2440 мм приблизительно в 90000 точках. При фиксированном X- и Y- положении измеренные компоненты со всех точек вдоль Z считывались в ПЭВМ и записывались на дискеты в виде отдельных файлов для дальнейшей обработки и анализа. Время перемещения тележки на расстояние 2440 мм составляло около 5 мин.

При чтении данных с АЦП и переводе их в величину напряжения на датчиках Холла, в зависимости от этой величины, автоматически выбиралась шкала измерения АЦП, приводящая к минимальным потерям точности измерения. В каждой точке каждая компонента измерялась два раза и бралось их среднее значение, а при большой разнице между ними измерения в данной точке повторялись. Кроме этого контролировалась продолжительность перемещения тележки с датчиками от точки к точке, а возможность просмотра графиков изменения компонент вдоль измерительной штанги позволяла дополнительно контролировать ход измерений.

Для определения коэффициента C преобразования $B(\text{Гс})=C \cdot V(\text{мВ})$, (V - напряжение на датчике Холла, B - соответствующая величина индукции магнитного поля) было измерено поле ЯМР-магнитометром в 14 разных точках объёма. По значениям напряжения на датчиках и индукции поля в этих точках фитированием определялись коэффициенты a и b линейной зависимости $C=a \cdot V+b$. Такие пары a и b были определены для всех датчиков ДХ1÷6. На рис.5 приведён график этой зависимости для одного из них.

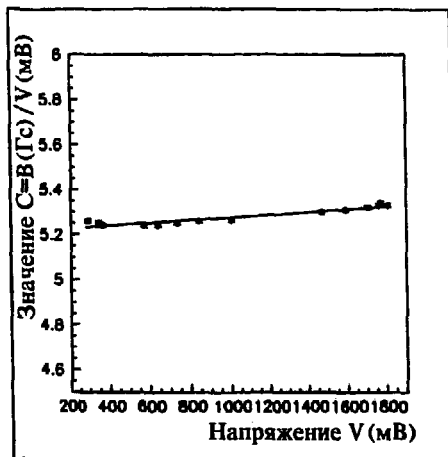
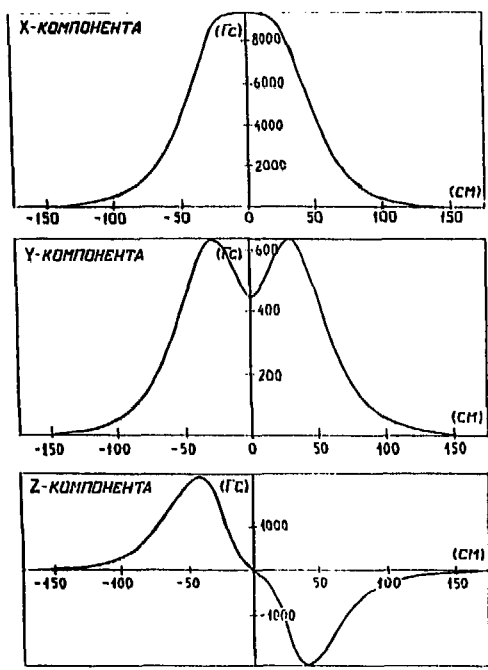


Рис.5. График зависимости коэффициента C от величины напряжения V

На рис.6 приведены одномерные графики компонент магнитного поля вдоль оси пучка и двумерный график главной компоненты поля



X-КОМПОНЕНТА

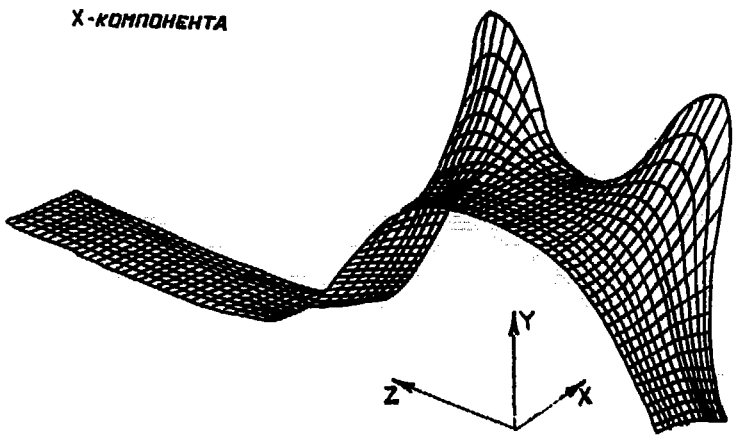


Рис.6. Графики компонент магнитного поля

вдоль горизонтальной плоскости в центре рабочего объёма. Индукция поля по главной компоненте в этой области составляет около 10/кГс, неоднородность поля в пределах межполюсного зазора 10-15 %.

5. Обработка измерений

Перед тем как использовать данные измерения, проводилась их фильтрация, которая в основном заключалась в контроле плавности изменения величины магнитного поля при переходе от точки к точке и в контроле его качественного поведения.

Для аналитического представления компонент магнитного поля была выбрана полиномиальная модель, описанная в работе /4/. Метод заключается в том, что в любом объёме пространства, например в кубе, каждую из трёх компонент магнитного поля можно представить в виде специального полинома некоторой степени, так чтобы выполнялись уравнения $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ и $\nabla \times \mathbf{B} = 0$. При этом для всех трёх компонент методом наименьших квадратов находится один и тот же набор коэффициентов, которые в представлениях разных компонент являются множителями при разных комбинациях степеней X-, Y- и Z-координат точки. Была выбрана полиномиальная модель неполной шестой степени с 50 коэффициентами. При этом для повышения точности представления весь измеренный объём делили на более мелкие кубы. Они выбирались так, чтобы при минимальном их количестве была достигнута достаточная точность представления компонент поля (а, в конечном счёте, точность восстановления импульса).

Весь измеренный объём был разделён на 150 кубов, т.е. общее число коэффициентов составило 7500. Фитирование коэффициентов проводилось программой FUMILI. Точность аналитического представления компонент магнитного поля оценивалась по разнице между измеренным и вычисленным (с помощью полинома) значениями компоненты в точке измерения. Средняя погрешность представления основной компоненты во всём измеренном объёме составила 0.5 %, а в кубах центрального межполюсного зазора, где значения компоненты максимальны, погрешность меньше чем 0.1 %.

6. Заключение

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам СНЭО за помощь в организации магнитных измерений и участие в сеансах, а также нашим коллегам из ИЯИ (г.Троицк) по работе на установке ИСТРА-М.

Литература

1. A.D.Volkov et al.- Method for the calculation of charged particle momentum in magnetic spectrometers, NIM, A306(1991), p.278.
2. А.И.Григорьев и др.- Материалы 8-го Рабочего Совещания по Нейтринному Детектору ИФВЭ-ОИЯИ, Д1,2,13-88-90, Дубна, с.94.
3. А.И.Иваненко, К.Шпиринг.- ПТЭ, №3, 1987, с.203.
4. H.Wind.- Processing Magnetic Field Data, Journal of Computational Physics, vol.2, No.3, 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 мая 1994 года.