

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Пашковский Александр Сергеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Название курсовой работы

Измерение магнитного поля шарообразного магнита с помощью трехосевого магнитометра

Практикум по физической оптике, 2 курс, группа №18307

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. А. Г. Харламов

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н. А. Г. Харламов

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Оглавление

Введение.....	3
Теоретическая часть.....	4
Измерения.....	6
Результаты.....	8
Вывод.....	10
Приложение:.....	11
Список литературы.....	12

Введение

Электродинамика является сегодня одной из самых точных теорий в физике. Она входит в состав более общей теории, Стандартной Модели. Стандартная Модель же является наиболее успешной теорией физики элементарных частиц в настоящее время. Тем не менее, она несовершенна, так как существует целый ряд необъяснённых экспериментальных наблюдений, для которых СМ не даёт адекватного объяснения. Среди этих явлений:

1. Гравитация;
2. Тёмная материя и энергия;
3. Асимметрия материи и антиматерии;
4. Массы нейтрино.

Рассмотрим 4-ый пункт поподробнее. Согласно СМ нейтрино являются безмассовыми частицами. Тем не менее, эксперименты с нейтринными осцилляциями¹ показали, что нейтрино должны обладать массой порядка 10^{-3} - 10^{-5} эВ. Массовые члены для нейтрино могут быть добавлены к СМ вручную, но это приводит к новым теоретическим проблемам. (Например, массовые члены должны быть чрезвычайно малы). Нейтринные осцилляции - явления превращения нейтрино (мюонного, тауонного или электронного) в нейтрино другого сорта (либо в антинейтрино). Предположительно, такие превращения – следствие наличия у нейтрино массы или несохранения лептонного заряда при высоких энергиях (для превращения нейтрино-антинейтрино).

В общем, такие явления вне Стандартной Модели относят к Новой физике. Чаще всего для поисков Новой физики используются эксперименты на коллайдерах. Но порядок масс нейтрино указывает на то, что нужно искать в диапазоне более низких энергий.

В текущей работе мы попытаемся оценить точность нового метода поиска Новой физики, предложенного моим научным руководителем.

Метод заключается в следующем: предлагается измерять магнитное поле постоянного магнита и сравнивать с предсказаниями СМ. Все поправки к магнитному полю, вызываемые существованием тяжелых частиц, подавлены множителем e^{-mr} , где m — масса частицы, а r — расстояние. На макроскопических расстояниях остаются только поправки с малой массой, например, для нейтрино $\frac{1}{m}$ составляет от 100 мкм до нескольких метров.

Теоретическая часть

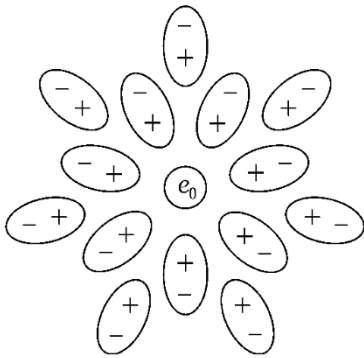
Поле точечного магнитного диполя имеет вид: $\vec{B}(\vec{r}) = 3 \frac{(\vec{M} \cdot \vec{r}) \vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{M}}{r^3}$

Для реального магнита интегрируем магнитный момент по всему объёму:

$$\vec{B}_0(\vec{R}) = \int_V B(\vec{R} - \vec{r}_0) d^3 r_0 = \int_V \left(\frac{3[\vec{M} \times \vec{R} - \vec{r}_0](R - r_0)}{|\vec{R} - \vec{r}_0|^5} - \frac{\vec{M}}{|R - r_0|^3} \right) d^3 r_0, \text{ где: } B_0 \text{ — магнитное поле}$$

точечного диполя; R — радиус-вектор точки, в которой измеряется поле; r_0 — координата точки внутри шара.

Далее учитывается поправка к векторному потенциалу магнитного поля, связанная с



поляризацией

вакуума:

$$\delta V(r) = \frac{-2}{\pi} \frac{\alpha}{r} \int_{2m}^{\infty} \frac{e^{-qr}}{q} \frac{\alpha}{3} \sqrt{1 - \frac{4m^2}{q^2}} \left(1 + \frac{2m^2}{q} \right) dq \quad \text{На больших}$$

расстояниях данная поправка записывается в упрощенном виде и называется потенциалом Юлинга: $\frac{e^{-2mr}}{\sqrt{r}}$. Она понимается как результат экранирования. Эффект экранирования и является процессом поляризации вакуума.

На $r > \frac{1}{m}$ виртуальные пары $e^+ e^-$ превращают вакуум в

диэлектрическую среду. На расстояниях порядка и меньше $\frac{1}{m}$, $e^+ e^-$ -пары являются диполями

длиной $\sim \frac{1}{m}$, которые экранируют голый заряд электрона. Это явление и носит название поляризация вакуума².

Данный эффект наблюдается только на очень малых расстояниях или очень больших энергиях взаимодействия $\sim m_e$ для электронов, что составляет 0,5 МэВ. Но нейтрино имеет значительно меньшую массу, чем электрон $\sim 10^{-3} - 10^{-5}$ эВ, что соответствует расстояниям от 100 мкм до нескольких метров. Эффект поляризации вакуума для нейтрино наблюдается на расстояниях $\sim \frac{1}{m_e}$. Измерение этого эффекта для нейтрино позволяет измерить массу нейтрино.

В итоге, Формула с учётом данной поправки примет вид:

$$B(\vec{r}) = \int_V B_0(\vec{R} - \vec{r}_0) \left(1 + A \frac{e^{-2m|\vec{R} - \vec{r}_0|}}{\sqrt[3]{|\vec{R} - \vec{r}_0|}} \right) d^3 r_0$$

Где $A = \frac{\alpha}{4\sqrt[3]{m}\sqrt{\pi}}$, α — постоянная тонкой структуры, $\alpha = 7,3 \cdot 10^{-3}$

Описание установки

Установка представляет собой следующую конструкцию: на столе прочно закрепляется штангенциркуль (точность: 0,1 мм) и исследуемый магнит (шарик $r = 1,4$ мм). На подвижной части штангенциркуля закрепляется трёхосевой магнитометр, позволяющие измерять слабые магнитные поля. Выдвигая штангенциркуль, мы приближаем или отдаляем датчик от магнита. Датчик позволяют производить измерения магнитного поля по трём осям x, y, z .

В работе используется микросхема HMC5883L представляющая собой монолитную интегральную схему, где на одном кристалле объединены 3 магниторезистивных датчика, линейный усилитель. В микросхеме реализована система автоматической коррекции напряжения смещения и фильтрация сигнала после линейного усилителя, это позволяет увеличить производительность и стабилизировать чувствительности к температуре, его выходной сигнал пропорционален магнитному потоку через датчик.

Для получения измерений вывод SDA чипа подключаем к выводу SDA платы Arduino, а вывод SCL чипа соответственно к выводу SCL. На Arduino Mega это 20 и 21 пины, питание 3.3В и общий GND. В плане ПО используется специальная библиотека, собранная из исходников⁵.

Измерения

Данные представляют собой файлы в формате «.csv». Каждое измерение магнитного поля состоит из $\sim 10^6$ отдельных измерений напряжения на датчиках для каждого значения расстояния.

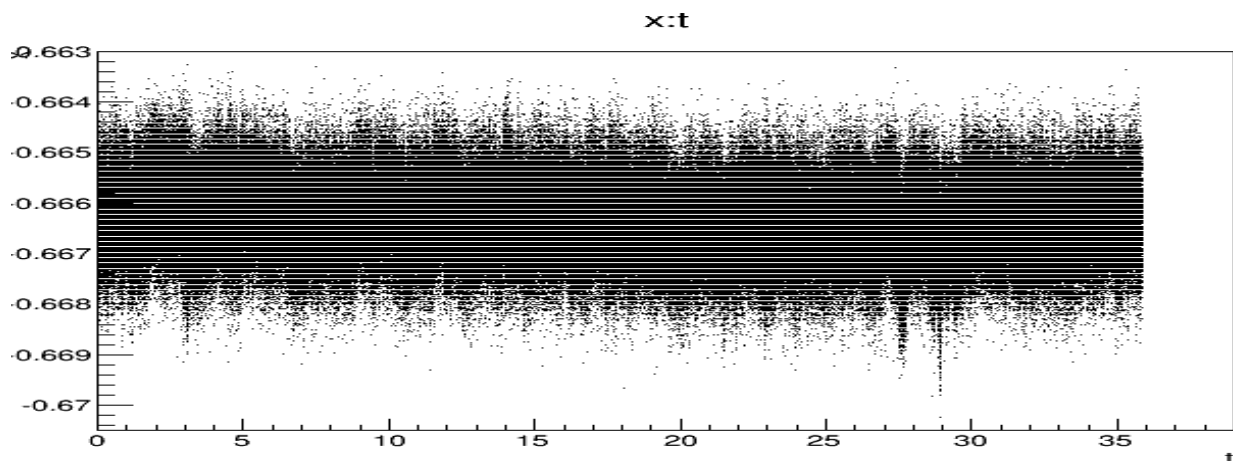
После завершения замеров производится первичная обработка полученных данных. Строится график распределения по точкам. Далее производится аппроксимация Гауссом. При получении χ^2 порядка единицы записывается среднее значение и среднеквадратичное отклонение.

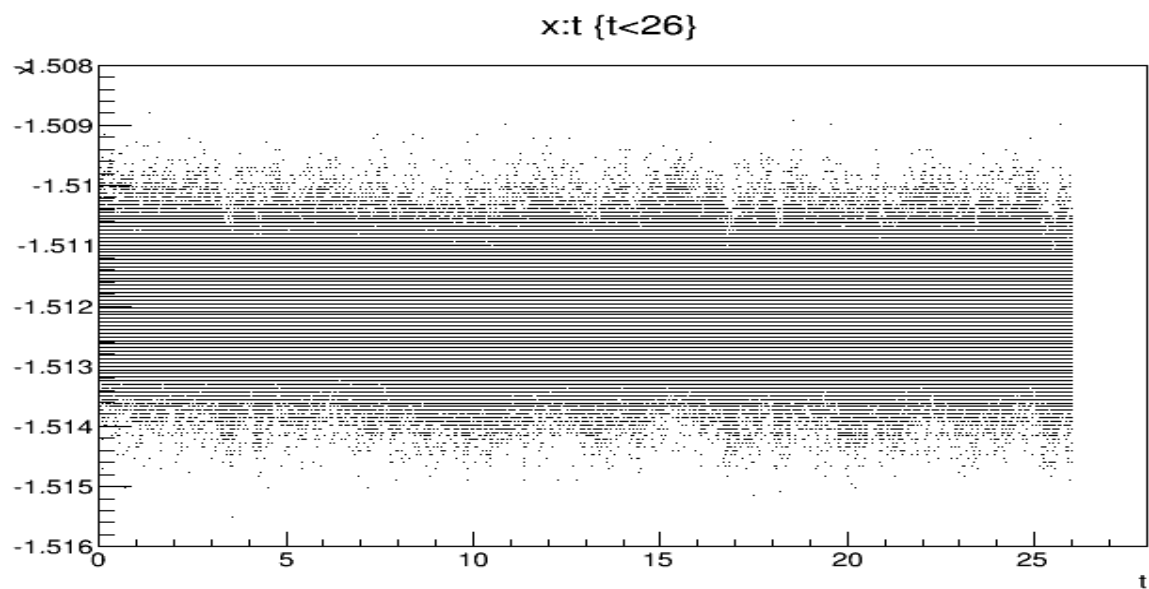
Для измерения в $x = 1,4$ mm, B_x :

- Число измерений: $N = 439457$;
- $\frac{\sigma}{\sqrt{N}} = 1,1742 \cdot 10^{-6}$ ошибка среднего;
- Статистическая точность измерения: $4,7 \cdot 10^{-6}$ Гс
- B_x магнита: 0,336287 Гс

Такая статистическая точность позволяет измерять слабые поправки

При плохом χ^2 строится зависимость от времени. В ней хорошо видно, в какие интервалы времени, происходили сбои/ошибки/помехи. Их можно исключить из интервала для считывания в программе. Для оставшегося интервала всё делается по той же схеме, после аппроксимации записываем среднее и среднеквадратичное отклонение.

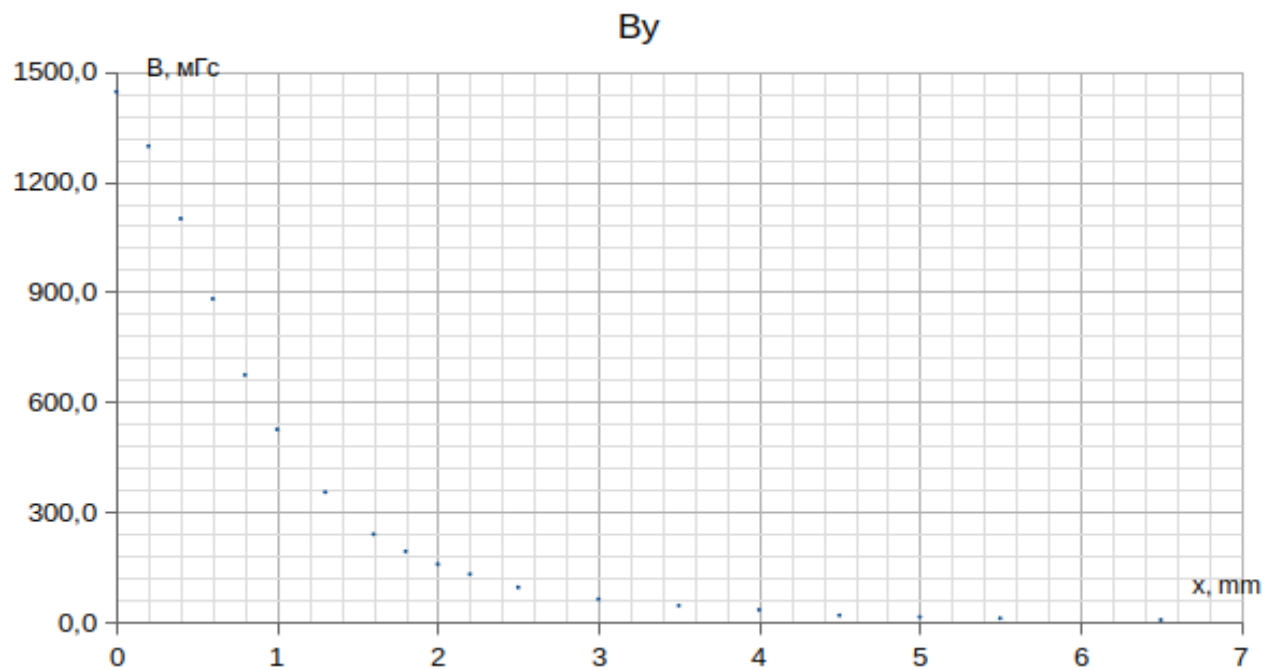
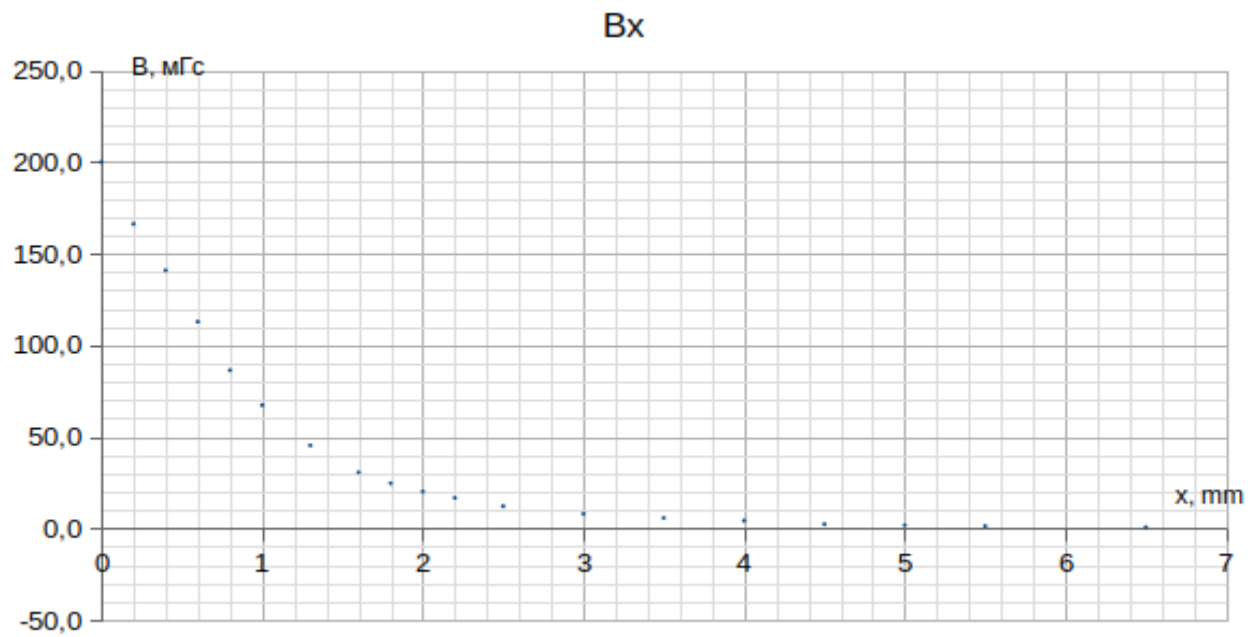


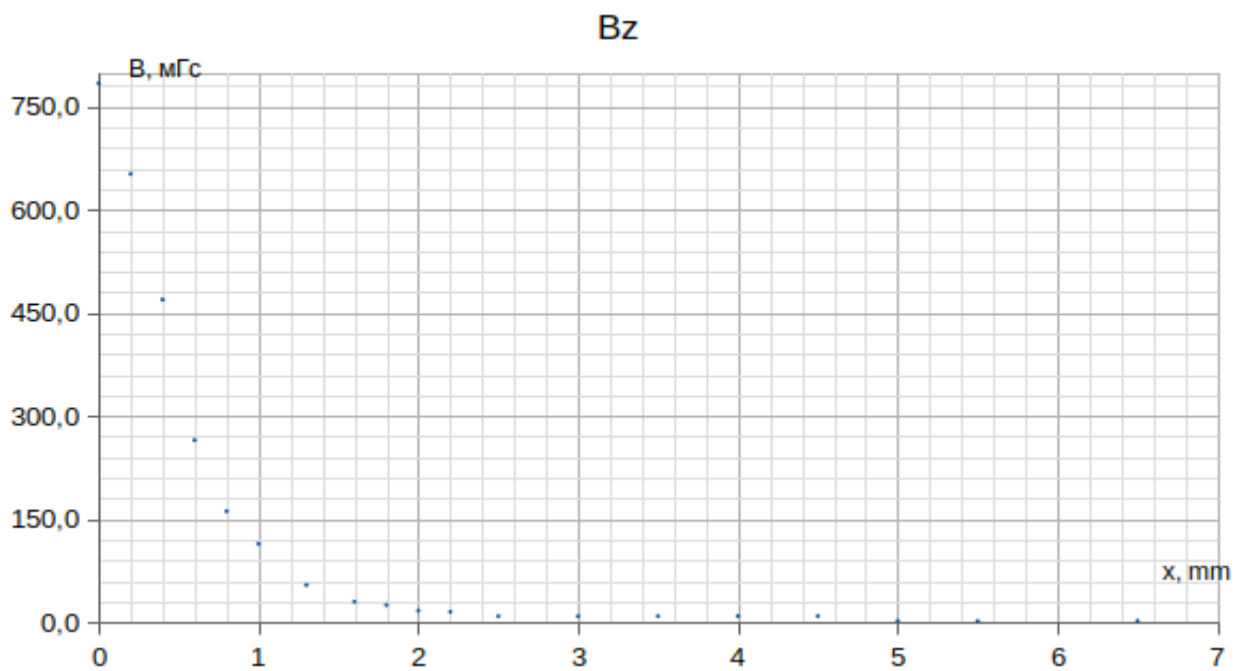


На графике исключены измерения после 26-ой секунды. Также, чтобы исключить сторонние поля из вычислений, делается одиночное измерение поля, но уже без магнита (также строится график распределения, производится аппроксимация, считается среднее значение и отклонение). Полученное среднее значение, впоследствии, отнимается от всех измерений.

Результаты

После того как проведены измерения на всех необходимых расстояниях (от нуля до малых полей), строится зависимость от расстояния:





$$\frac{\delta B}{B} = 1,95 \cdot 10^{-5}$$

В полученной зависимости поправка к классическому значению ~ 2 погрешности, что даёт оценку снизу на массу нейтрино: $m = 3,65 \cdot 10^{-3}$ мэВ.

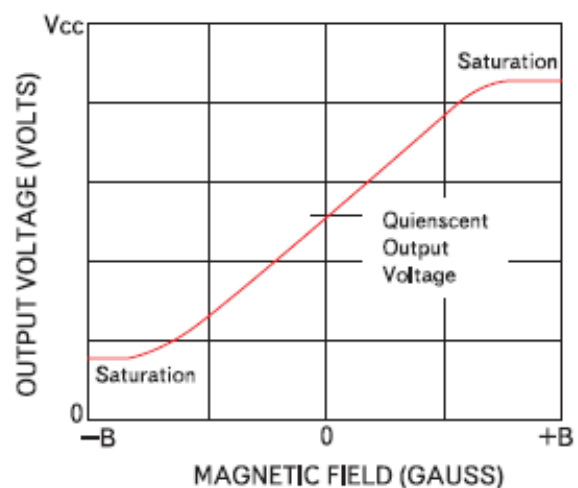
Вывод

1. Была собрана установка для измерения магнитного поля с высокой точностью.
2. Статистическая точность измерений достигает $\sim 10^{-5}$
3. Для улучшения точности требуется так же учесть форму магнита, шар не идеально круглый, что ощущается тактильно при перекачивании его между 2мя плоскостями.
4. Результат, полученный в работе может быть следствием причины из пункта 3, или неравномерной намагниченности шара. Для уточнения таких деталей требуются более точные измерительные приборы, в первую очередь — расстояния, тогда возможно будет оценить соответствует ли поправка потенциалу Юлинга.

Приложение:

Паспортные данные датчика

Тип чувствительности к полю	биполярный
Ток питания (макс.), мА	30
Выходной ток (макс.), мА	1
Чувствительность, мВ/Г	25 ± 5
Диапазон измерений, мТ (Г)	[-10;10] ([-100;100])
Время нарастания сигнала, мкс	3
Рабочая температура, °C	[-40;125]
Температурная ошибка, %/°C	± 0.02
Мин напряжение питания, В	6,6
Макс напряжение питания, В	12,6



Список литературы

1. М.Е Пескин, Д.В Шрёдер «Введение в Квантовую теорию поля»
2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц «Теоретическая физика: Теория поля»
3. В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников «Физика полупроводников»
4. https://ru.wikipedia.org/wiki/Закон_Кулона
5. <http://goo.gl/ULpp5>