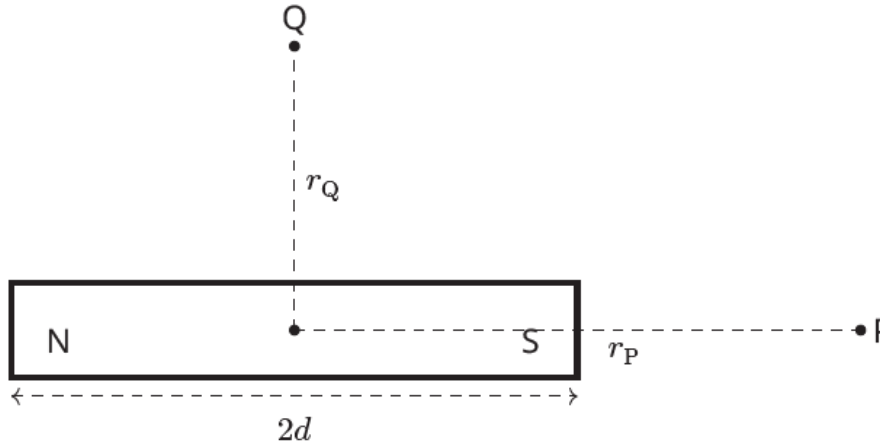


Road to IPhO

Магнитный чёрный ящик

Магнитометры, основанные на эффекте Холла, используются в смартфонах для измерения магнитного поля. Магнитометр измеряет все три компоненты магнитного поля. Магнитометр расположен на печатной плате смартфона и не виден снаружи.

На рисунке 1 показан полосовой магнит с полудлиной d и дипольным моментом M .



Величина магнитного поля полосового магнита в осевом направлении в точке P (B_{axial}) и в точке Q на срединном перпендикуляре ($B_{\text{equatorial}}$) задаётся следующими формулами:

$$B_{\text{axial}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2Mr_P}{(r_P^2 - d^2)^2}, \quad (1)$$

$$B_{\text{equatorial}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{(r_Q^2 + d^2)^{3/2}}. \quad (2)$$

где μ_0 — магнитная постоянная ($\mu_0/4\pi = 10^{-7}$ Н/А²), r_P, r_Q — расстояния между центром магнита и точками наблюдения магнитного поля. В данной задаче будем считать магнит точечным диполем ($d \ll r_P, r_Q$).

В данной задаче магнит считается точечным диполем.

Погрешности оценивать не требуется.

О симуляции

На экране вы видите рабочую область с белым фоном и сеткой. Рабочее поле расположено в вертикальной плоскости, в которой и проводится эксперимент. В рабочей области находятся четыре объекта:

1. смартфон
2. магнит (сине-красный, S-N соответственно)
3. тёмная трубка с однородной толщиной стенок
4. линейка, которая может быть активирована кнопкой «SHOW/HIDE SCALE».

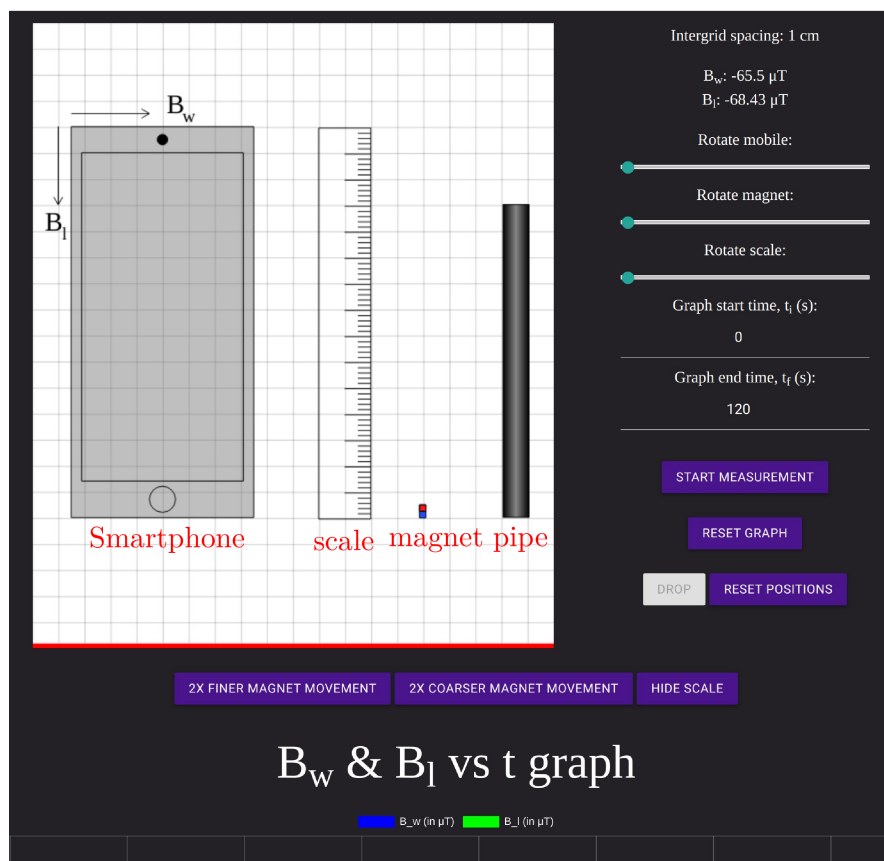
Расстояние между линиями сетки 1 см.

Установка

Объекты можно перемещать мышью. Смартфон, линейку, магнит можно поворачивать в этой плоскости. Поворот контролируется слайдерами в правой части. Чтобы повернуть объект, сдвиньте слайдер мышью. Для более точного контроля нажмите на слайдер и используйте стрелки на клавиатуре для поворота объектов.

Внутри смартфона находится магнитометр, который измеряет магнитное поле магнита поблизости. Точное расположение магнитометра неизвестно. В зависимости от положения магнитометра, правая панель показывает проекции B_w и B_l магнитного поля вдоль ширины и длины смартфона (рис. 2). Проекция B_w направлена направо от начальной (портретной, вертикальной) ориентации смартфона. Проекция B_l направлена вниз вдоль длины телефона.

Road to IPhO



Измерения

После того как вы нажмёте «START MEASUREMENT», начнут сниматься графики зависимости B_w и B_l от времени. «RESET GRAPH» очистит все значения на графике. При наведении курсора на кривую, показываются значения точек. Можно масштабировать график, указав времена в поля «Graph start time (t_i)» и «Graph end time (t_f)».

Смартфон может повредиться при нахождении в сильном магнитном поле. Для предотвращения этого появляется предупреждение «Maximum Magnetic field exceeded» и останавливаются измерения, когда измеренное значение превышает 6500 мкТл. Измерения восстанавливаются, когда магнит удаляют от телефона на достаточное расстояние.

Дальнейшие указания

Магнит можно перемещать стрелочками клавиатуры. Для этого необходимо кликнуть курсором на рабочее поле. Более плавные/быстрые перемещения можно получить, нажимая на кнопки «2X FINER MAGNET MOVEMENT/2X COARSER MAGNET MOVEMENT» (finer = точные, coarser = грубые). При каждом нажатии на кнопку движения становятся в два раза плавнее/быстрее. Кнопки станут неактивными, когда будет достигнут предел точности регулировки положения.

Ускорение свободного падения направлено вниз экрана. Пол отмечен красной линией. Все объекты находятся в плоскости экрана. Более подробная информация о трубке приведена перед частью В.

Считайте, что магнит удерживается в стационарном положении, когда вы размещаете его в любом месте экрана. Нажатие на кнопку «Drop» отпустит магнит, и он начнет падать. Обратите внимание, что магнит можно бросить только после нажатия кнопки «START MEASUREMENT». Кнопка «RESET POSITION» вернет магнит в положение, из которого он был брошен в последний раз. При необходимости объекты можно перемещать за пределы рабочей области.

Road to IPhO

A1 Определите положение магнитометра в смартфоне. Для упрощения ответа на данный вопрос более точная сетка нарисована на схеме смартфона в листе ответов. Шаг точной сетки 2 мм. Отметьте положение магнитометра в смартфоне символом «⊗». **1.0**

A2 Постройте подходящий линейный график и по нему определите дипольный момент магнита. Занесите использованные данные в таблицу. **2.3**

Полая немагнитная вертикальная трубка однородной толщины показана на экране. Когда вы бросаете магнит, он должен быть ориентирован вдоль оси трубы. Кнопка «DROP» отпускает магнит. Магнит не видно при движении внутри трубы. Считайте, что магнит не наклоняется и не поворачивается при падении. Трубка состоит из трёх частей: деревянной (wood, W), алюминиевой (Al) с проводимостью $= 3.77 \times 10^7 \text{ }^{-1} \cdot \text{ }^{-1}$, и медной (Cu) с проводимостью $= 5.96 \times 10^7 \text{ }^{-1} \cdot \text{ }^{-1}$. Эти три материала могут располагаться в произвольном порядке, не обязательно как указано выше. Если магнит отпустить вертикально (вдоль оси y , направленной вниз), падение магнита описывается уравнением:

$$m\ddot{y} = mg - k\dot{y}$$

где m — масса магнита, g — ускорение свободного падения ($g = 9.8 \text{ } /^2$), k — коэффициент затухания, обусловленный возникающими вихревыми токами в трубке. Коэффициенты затухания для деревянной, алюминиевой, медной частей трубки равны нулю, k_{Al} , и k_{Cu} , соответственно.

Таким образом, чтобы провести эксперимент, выполните следующие шаги:

- Расположите должным образом смартфон, магнит и трубку
- Нажмите кнопку «Start Measurement»
- Нажмите кнопку «DROP»

Магнитометр не измеряет малые магнитные поля, создаваемые вихревыми токами в трубке. При падении магнита в трубке строится график зависимости B_w и B_l от времени.

B1 Используя график зависимости магнитного поля от времени, определите последовательность материалов вдоль трубки. Укажите свой ответ в листе ответов, напишите номер части возле соответствующего материала. Части нумеруются сверху вниз: 1 для верхней части, 2 для средней, 3 для нижней. **0.3**

B2 Определите конечную скорость магнита в алюминиевой части трубки, построив соответствующий линейный график. **2.6**

На листе ответов приведена такая же сетка, как и у рабочей области симуляции. Нарисуйте схематично смартфон, трубку и магнит в том положении и ориентации, которые были в вашем эксперименте. Используйте прямоугольник для указания смартфона.

Заполните таблицу данными, необходимыми для построения графика.

Определите длину алюминиевого участка трубки. Вы можете использовать/не использовать графический метод измерения длины алюминиевой части трубки. Если вы используете график/набор данных для определения длины, воспользуйтесь дополнительными столбцами в таблице для пересчета.

B3 Определите конечную скорость магнита в медной части трубки, построив соответствующий линейный график. **2.2**

Определите длину медного участка трубки. Вы можете использовать/не использовать графический метод измерения длины медной части трубки. Если вы используете график/набор данных для определения длины, воспользуйтесь дополнительными столбцами в таблице для пересчета.

B4 Определите длину деревянного участка трубки. Вы можете использовать/не использовать графический метод измерения длины деревянной части трубки. Если вы используете график/набор данных для определения длины, воспользуйтесь дополнительными столбцами в таблице для пересчета. **1.6**