



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
Кафедра «ФИЗИКА»

Виртуальный практикум

Лабораторная работа № 13-В
«Циклотрон Лоуренса»
по дисциплине

«Физика»



Авторы
Жданова Т. П.
Кудря А. П.
Лемешко Г. Ф.
Пруцакова Н. В.

Ростов-на-Дону, 2021

Аннотация

Указания содержат краткое изложение устройства и принципа действия циклотрона Лоуренса, а также описание виртуального эксперимента, позволяющего определять удельный заряд и орбитальное гиромагнитное отношение микрочастицы.

Методические указания предназначены для самостоятельной работы студентов всех форм обучения, изучающих физику, при подготовке и проведении учебного виртуального эксперимента, особенно при дистанционном обучении.

Авторы

к.ф.-м.н., доцент	кафедры	«Физика»
Жданова Т.П.,		
ст. преподаватель	кафедры	«Физика»
Кудря А.П.,		
к.ф.-м.н., профессор	кафедры	«Физика»
Лемешко Г.Ф.,		
к.ф.-м.н., доцент	кафедры	«Физика»
Пруцакова Н.В		

Оглавление

Краткая теория	4
Подготовка к работе	8
Выполнение работы	9
Задание 1. Определение орбитального гироманнитного отношения заряженной частицы	9
Задание 2. Нахождение частицы по ее удельному заряду	11
Контрольные вопросы	12
Список литературы	12

Цель работы: 1) познакомиться с устройством и принципом действия циклотрона; 2) определить орбитальное гироманнитное отношение микрочастицы; 3) определить удельный заряд микрочастицы.

Оборудование: ЭВМ с программой виртуального эксперимента.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Движение заряда в магнитном поле

► На заряд q , движущийся в магнитном поле индукцией \vec{B} со скоростью \vec{v} , действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = q [\vec{v} \vec{B}] \text{ или в скалярном виде } F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha ,$$

где α - угол между векторами \vec{B} и \vec{v} .

Если $\vec{v} \perp \vec{B}$, сила Лоренца будет максимальной: $F = q \cdot v \cdot B$.

Направление силы Лоренца определяется по правилу векторного произведения, т.е. по правилу левой руки для положительного заряда и по правилу правой руки для отрицательного заряда.

Очевидно, что сила Лоренца действует только на движущиеся заряды.

Циклотрон

► В 1931 году американский ученый Е.О. Лоуренс впервые в мире испытал принципиально новый вид ускорителей заряженных частиц – **циклотрон** (рис.1).

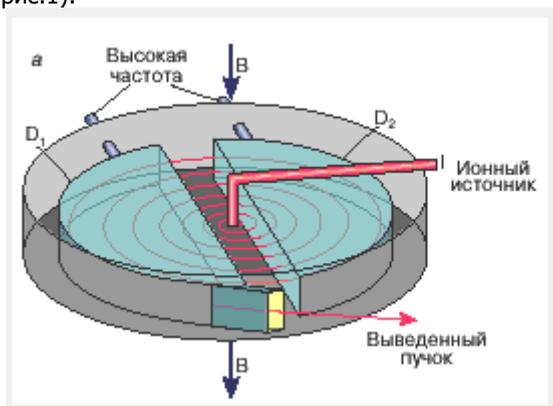


Рис.1

Существенным отличием циклотрона от прежних ускорителей являлось то, что заряженные частицы движутся в однородном магнитном поле по окружности и в течение каждого оборота дважды получают дополнительные порции энергии. Сердце циклотрона – огромный круглый полый диск, разрезанный по диаметру на две половины.

Половинки этой камеры назвали *дуантами* (на рис.1 обозначены D_1 и D_2). Они немного раздвинуты по диаметру друг от друга и помещены в герметичный корпус, в котором создан глубокий вакуум. Дуанты расположены между плоскими полюсами мощного электромагнита. В области, занимаемой дуантами, создается однородное магнитное поле индукцией B , силовые линии которого перпендикулярны плоскости дуантов. Дуанты подключены к высокочастотному генератору, работающему на частоте в несколько миллионов герц (МГц). Частота генератора меняется по гармоническому закону:

$$U = U_m \cos \omega t, \quad (1)$$

где $U_m \ll 10^5 B$ – амплитудное значение напряжения.

В центре дуантов находится источник ионов.

Предположим, что в начальный момент времени $t = 0$ заряженная частица вылетает из источника ионов со скоростью v_0 и попадает в ускоряющее электрическое поле, достигающее максимальной величины U_m (см. уравнение (1)). Между дуантами частица приобретает кинетическую энергию:

$$\frac{mv^2}{2} = qU_m + \frac{mv_0^2}{2}, \quad (2)$$

где q и m – заряд и масса частицы, соответственно.

Получив порцию энергии, частица влетает внутрь одного из дуантов со скоростью \vec{v} , перпендикулярной индукции \vec{B} . Пространство внутри дуанта является эквипотенциальным, следовательно, частица в нем будет находиться под воздействием только магнитного поля. На частицу действует сила Лоренца

$$F = q \cdot B \cdot v \quad . \quad (3)$$

Поскольку $\vec{F} \perp \vec{v}$, эта сила является центростремительной

$$q \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{R} \quad . \quad (4)$$

Из (3) и (4) следует, что частица в дуанте описывает половину окружности радиусом

$$R = \frac{v}{B \cdot q/m}, \quad (5)$$

где q/m – удельный заряд микрочастицы.

Выйдя из дуанта, частица вновь попадает в электрическое поле, напряженность которого через половину периода поменяет направление

и достигнет амплитудного значения. Частица будет снова ускорена и влетит во второй дуант с энергией большей, чем та, с которой она двигалась в первом дуанте. Обладая большей скоростью, частица будет двигаться во втором дуанте по окружности большего радиуса (см. (5)). Высокочастотное электрическое поле синхронизируют таким образом, что как только частица попадает в зазор между дуантами, поле разгоняет ее до большей скорости. В результате траектория частицы внутри дуантов образует некоторую раскручивающуюся спираль.

Ускоренное движение частицы продолжается до некоторого максимального радиуса траектории. После этого частицу с помощью отклоняющего электрода выводят из циклотрона и направляют на мишень.

Из связи линейной и угловой скоростей следует, что период обращения нерелятивистской частицы не зависит от скорости:

$$T = \frac{2\pi m}{qB} . \quad (6)$$

Движение частицы в циклотроне обуславливает перенос заряда Q вдоль траектории и, следовательно, протекание электрического тока

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{qN}{t} = \frac{q}{T} , \quad (7)$$

где N – число оборотов частицы в циклотроне за время t .

При каждом обороте частицы ее *орбитальный магнитный момент* $P_m = I\langle S \rangle = I\pi\langle R \rangle^2$, где $\langle S \rangle = \pi\langle R \rangle^2$ – средняя площадь, ограниченная траекторией частицы.

С учетом (6) и (7) орбитальный магнитный момент частицы

$$P_m = \frac{q^2 B}{2m} \langle R \rangle^2 , \quad (8)$$

где $\langle R \rangle = \frac{R_1 + R_2}{2}$ – средний радиус траектории частицы в первом и втором дуантах (см. рис.2).

Кроме того, частица в циклотроне обладает *орбитальным механическим моментом*, который можно определить для одного полного оборота по формуле

$$L = m\langle v \rangle \langle R \rangle , \quad (9)$$

где $\langle v \rangle$ и $\langle R \rangle$ – средние значения скорости частицы и ее радиуса траектории за один полный оборот.

Гиромангнитное (магнитомеханическое) отношение частицы при ее вращении определяется формулой

$$g = \frac{P_m}{L}. \quad (10)$$

► С помощью циклотрона можно разогнать протоны до энергий порядка 25 МэВ. При более высоких энергиях проявляются релятивистские эффекты - масса частицы увеличивается

$$\left(m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} \right), \text{ начинает сказываться зависимость периода}$$

обращения частицы от скорости, и синхронизм между движением частиц и изменениями ускоряющего поля нарушается.

Чтобы предотвратить нарушение синхронизма, используют два подхода:

1) при постоянном магнитном поле уменьшают частоту напряжения, питающего дуанты;

2) при постоянной частоте напряжения увеличивают индукцию магнитного поля.

► Первый способ реализуется в *фазотронах*, а второй – в *синхротронах*. В ускорителе, называемом синхрофазотроном, изменяются и частота ускоряющего напряжения, и индукция магнитного поля. Ускоряемые частицы движутся в синхрофазотроне не по спирали, а по круговой траектории. Конструктивно синхрофазотрон отличается от циклотрона, но последний стал прародителем целого семейства ускорителей, отличающихся от него в деталях, но сходных в главном. В них используется синхронизированное (согласованное по фазе) высокочастотное электромагнитное поле. Такие ускорители дают пучки заряженных частиц с энергией в десятки миллиардов электронвольт. Фундаментальная работа Лоуренса была отмечена Нобелевской премией.

► Циклотроны оказались идеальными экспериментальными приборами. Пучок частиц, выводимых из циклотрона, является однонаправленным, их энергию можно регулировать, а интенсивность потока несравненно выше, чем от любого радиоактивного источника.

Высокие энергии частиц, достигнутые Лоуренсом и его сотрудниками, открыли перед физиками обширное новое поле для исследований. Так, например, бомбардировка атомов многих элементов позволила расщепить их ядра на фрагменты, которые оказались изотопами, часто радиоактивными. В продуктах некоторых ядерных реакций встречались новые элементы, не существующие на Земле в естественных условиях. Полученные результаты показали, что с помощью циклотрона можно осуществить практически любую ядерную реакцию. Циклотрон использовался и для измерения энергии связи многих ядер, и для проверки соотношения Эйнштейна между массой и энергией. С помощью циклотрона Лоуренс получил радиоактивные изотопы, которые с успехом стали применяться в биомедицинской практике.

О программе

Программа знакомит с устройством циклотрона и позволяет продемонстрировать движение заряженных частиц в нем.

Разработана выпускником кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Мызниковым Алексеем.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

Последовательно открыть папки «Cyclotron», «Cyclotron1» и файл «Cyclotron.exe». На экран монитора выводится панель для знакомства с основными узлами циклотрона (рис.2).

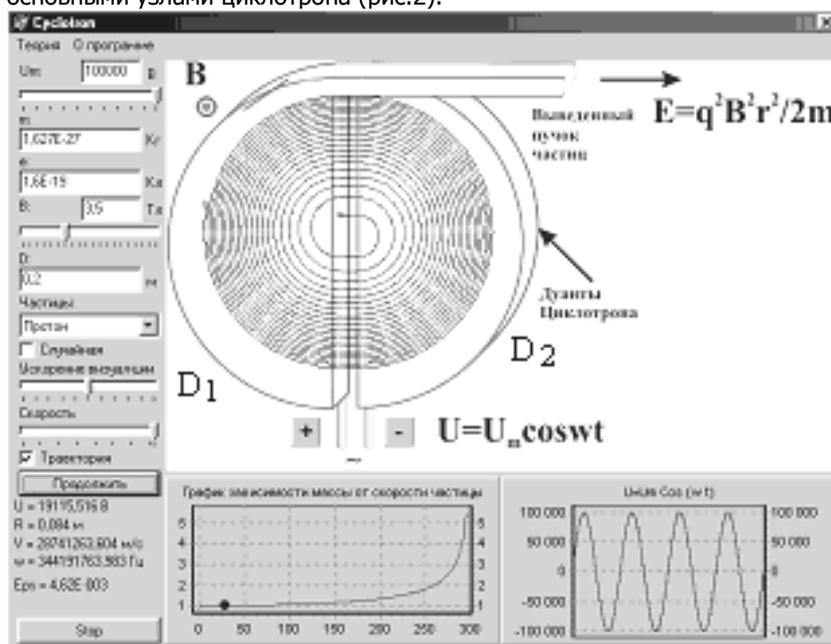


Рис.2

Нажатие на клавишу «Ок» приводит к выводу на экран монитора панель, с помощью которой осуществляют демонстрационный эксперимент. В левой части панели расположены «органы управления» циклотроном. Регулятором « U_m » устанавливают амплитуду напряжения высокочастотных колебаний, а регулятором « B » - величину индукции магнитного поля. Значения установленных амплитуды напряжения и магнитной индукции иницируются в окошках, расположенных над регуляторами.

На усмотрение экспериментатора можно изменять величину

диаметра дуантов (по умолчанию $D = 0,144$ м).

Предусмотрено введение в циклотрон различных микрочастиц (из окошка «Частицы»).

Запуск циклотрона производится клавишей «Go». В процессе движения частицы на панель выводится информация о текущем значении приложенного к дуантам напряжения и циклической частоте напряжения. После каждого пол-оборота вычисляется радиус траектории частицы, ее скорость и относительная погрешность, связанная с изменением массы частицы в процессе ее движения. Кроме того, в нижней части панели приводится график зависимости массы частицы от ее скорости, а справа этого графика - график гармонических колебаний напряжения $U = U_m \cos \omega t$, с помощью которого можно оценить в любой момент времени величину и полярность подведенного к дуантам напряжения. Кратковременная остановка работы циклотрона осуществляется клавишей «Пауза», а продолжение работы – клавишей «Продолжить».

Изображение траектории частицы в циклотроне достигается установкой флажка в окошке «Траектория».

Если остановить работу циклотрона клавишей «Stop», то последующий его запуск приведет к потере всей информации о механических характеристиках частицы.

Перед выполнением работы познакомьтесь с дополнительной информацией, предварительно открыв закладку «Теория».

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Задание 1. Определение орбитального гироманнитного отношения заряженной частицы

1. Выбрать в окне «Частица» протон (дейтрон, тритий или α – частицу) и записать в таблицу 1 его массу покоя и заряд. Установить диаметр дуантов – из интервала 0,1- 0,4 м.
2. Подбирая ускоряющее напряжение и индукцию магнитного поля после запуска циклотрона добиться минимум десяти оборотов частицы. Записать значения магнитной индукции и амплитуды ускоряющего напряжения в таблицу 1.
3. Запустить циклотрон в работу клавишей «Go». После каждого пол-оборота частицы останавливать циклотрон нажатием клавиши «Пауза» и записывать значения скорости частицы и радиуса ее траектории в таблицу 1. (**Замечание:** записывать данные в виде стандартной записи числа и округлять до третьего знака после запятой. Например, скорость на панели $v = 7995081,463 \text{ м/с} \approx 7,995 \cdot 10^6 \text{ м/с}$). Рекомендуется останавливать работу циклотрона, когда частица находится в первом или во втором дуантах. Продолжение работы циклотрона возможно после нажатия клавиши «Продолжить».

ФИЗИКА

4. Для каждого полного оборота N вычислить средние значения скорости $\langle v \rangle = \frac{v_1 + v_2}{2}$ и радиуса $\langle R \rangle = \frac{R_1 + R_2}{2}$.
5. По формулам (8) и (9) вычислить орбитальный магнитный P_m и механический L моменты для каждого оборота, а по формуле (10) – гиромагнитное (магнитомеханическое) отношение частицы g .
6. Вычислить среднее значение гиромагнитного отношения $\langle g \rangle$, абсолютную погрешность каждого измерения Δg , среднюю абсолютную погрешность $\langle \Delta g \rangle$ и относительную погрешность $\delta g = \frac{\langle \Delta g \rangle}{\langle g \rangle} 100\%$.
7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.
8. Построить графики зависимостей $P_m(N)$ и $L(N)$.

Таблица 1

$m =$		$q =$					$B =$		$U_m =$			
N	v_1	v_2	$\langle v \rangle$	R_1	R_2	$\langle R \rangle$	P_m	L	g	Δg	δg	
	м/с	м/с	м/с	м	м	м	А·м ²	кг·м ² /с	Ас/кг	Ас/кг	%	
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
С Р Е Д Н И Е									З Н А Ч Е Н И Я			
$v_{\max} =$	$\omega =$	$E =$	$E_0 =$	$T =$	$t =$							

9. После прохождения частицей циклотрона (при вылете частицы) записать максимальную скорость U_{\max} , циклическую частоту ω , подаваемого на дуанты напряжения, а также величину энергии E вылетевшей из циклотрона частицы.

10. Вычислить энергию частицы, вылетающей из источника, по формуле:

$$E_0 = \frac{m v_{\max}^2}{2} - E.$$

11. Определить период обращения ($T = \frac{2\pi}{\omega}$) и время прохождения частицей дуантов циклотрона ($t = T \cdot N$).

12. Записать закон изменения напряжения, подаваемого на дуанты циклотрона.

Задание 2. Нахождение частицы по ее удельному заряду

1. По табличным значениям заряда и массы вычислить удельные заряды $(q/m)_{\text{теор.}}$ протона (1_1H), дейтрона (2_1H), трития (3_1H) и α -частицы (4_2He). Занести в таблицу 2.

Таблица 2

Частица	Протон	Дейтрон	Тритий	α -частица
q	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
m	$1,627 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$	$3,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$	$5,066 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$	$6,646 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
$(q/m)_{\text{теор.}}$				
$(q/m)_{\text{эксп.}}$				
$v_{\max} =$	$R_{\max} =$	$B =$		

2. Установить флажок в окошке «Случайная» и запустить программу в работу нажатием клавиши «Go».

3. При выходе из циклотрона неизвестной частицы записать ее максимальную скорость, максимальный радиус и индукцию магнитного поля.

4. По формуле $(q/m)_{\text{эксп.}} = \frac{v}{R \cdot B}$, полученной из выражения (5),

вычислить удельный заряд $(q/m)_{\text{эксп.}}$, занести в таблицу 2 и установить, что это за частица.

5. Оценить погрешности измерений по отношению к табличному

значению удельного заряда $(q/m)_{теор.}$ установленной частицы по

формуле: $\delta = \frac{|(q/m)_{эксп.} - (q/m)_{теор.}|}{(q/m)_{теор.}} 100\%$. Сделать вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Написать выражения для силы Лоренца в векторном и скалярном виде.
2. Как определяется направление силы Лоренца? Зависит ли направление движения частицы от знака заряда?
3. Что такое циклотрон?
4. Каково назначение основных узлов циклотрона?
5. Каковы физические основы работы циклотрона?
6. Как влияют релятивистские эффекты на синхронизм электромагнитного поля? Каким образом предотвращают нарушение синхронизма?
7. Что называется орбитальным магнитным моментом?
8. Что называется орбитальным механическим моментом?
9. Что называется орбитальным гиромагнитным отношением?
10. Как с помощью кинематических характеристик частицы, ускоренной циклотроном, определить ее удельный заряд?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И.В. Курс физики. Т 2. М.: Наука. 2008. §§44,50.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа. 2010 § 116,131.