

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХЕРСОНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Факультет комп'ютерних наук, фізики та математики  
Кафедра фізики та методики її навчання

**ВИМІРЮВАННЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ФІЗИЧНИХ  
КОНСТАНТ: ЗАРЯДУ ТА МАСИ ЕЛЕКТРОНА У ВІРТУАЛЬНІЙ  
ФІЗИЧНИЙ ЛАБОРАТОРІЇ**

**Кваліфікаційна робота**  
**на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»**

Виконала: студентка 4 курсу, групи 15-411  
Спеціальності 014 Середня освіта  
(Фізика)  
Освітньо-професійна (наукова) програма  
Середня освіта (Фізика)  
Височенко Ганна Андріївна

Керівник  
доктор педагогічних наук, кандидат  
фізико-математичних наук, професор  
Кузьменков С. Г.

Рецензент  
кандидат педагогічних наук,  
доцент Растьогін М. С.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>3</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ІСТОРИЧНІ ДОСЛІДИ ВІДКРИТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТАРНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА.....</b>	<b>5</b>
1.1. Історія	відкриття
електрона.....	5
1.2. Дослід Дж. Томсона.....	8
1.3. Експеримент	Р.
Міллікена.....	10
<b>РОЗДІЛ 2. ТЕХНІКА ПРОВЕДЕННЯ ВІРТУАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА ЇХ АНАЛІЗ.....</b>	<b>12</b>
2.1. Методика проведення лабораторних робіт із визначення заряду та маси електрона.....	12
2.2. Техніка проведення експериментів.....	14
2.3. Аналіз результатів експериментів.....	26
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>28</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>30</b>

## ВСТУП

Найважливішим компонентом нової освітньої парадигми є концепція фундаменталізації, яка передбачає істотне підвищення якості освіти. Фундаменталізація освіти є безпосередньою реакцією на зростання потоків інформації у сучасному світі й проблеми адаптації фахівця в умовах, що швидко змінюються.

*Актуальність.* Під час проведення дослідів, які потребують саме власноручної практичної діяльності, але ми не можемо відтворити їх в реальних умовах, переходимо до віртуальної лабораторії. І в умовах дистанційного навчання цей досвід стає перевагою.

*Об'єктом* дослідження виступає вимірювання фундаментальних фізичних констант.

*Предметом* дослідження виступає вимірювання заряду та маси електрона.

*Метою* дослідження роботи є проведення віртуальних фізичних експериментів з вимірювання заряду та маси електрона.

*Завданнями* дослідження є:

1. Проаналізувати особливості вимірювання заряду та маси електрона;
2. Проаналізувати можливості віртуальної лабораторної роботи;
3. Охарактеризувати техніку проведення віртуальних лабораторних експериментів;
4. Проаналізувати техніку проведення віртуальних лабораторних експериментів.

Джерелами інформації є наукова література за обраною темою, підручники для вивчення фізики та література для викладачів фізики.

*Практичне значення* одержаних результатів роботи полягає в тому, що такий матеріал може бути використаний учнями, вчителями та

викладачами вищих навчальних закладів для покращення своїх знань, отримання нової інформації та матеріалу для проведення уроків та покращення своїх навичок та умінь.

*Методами дослідження* є метод порівняння (зібрані експерименти, методи та дослідження порівнюються між собою, описуються позитивні та негативні елементи, відмінності та переваги кожного елемента), метод синтезу та аналізу (проаналізовано методика викладання фізики на основі робіт найкращих фізиків).

*Структура* кваліфікаційної роботи складається з вступу, двох розділів з висновками та загального висновку, списку використаної літератури.

## РОЗДІЛ 1

### ІСТОРИЧНІ ДОСЛІДИ ВІДКРИТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТАРНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА

#### 1.1. Історія відкриття елементарної частинки-електрона

До кінця XIX ст. Електроенергія вже вільно застосовувалась як у виробництві (електродвигуни, генератори, електротехніка), так і в побуті (телеграф, телефон, освітлення). Вершиною науки про електрику і магнетизм була електромагнітна теорія, або електродинаміка, створена Дж. Максвеллом в 1864 році і пояснюючи всі відомі ефекти в цій області. Однак в ньому не було місця електрону [1].

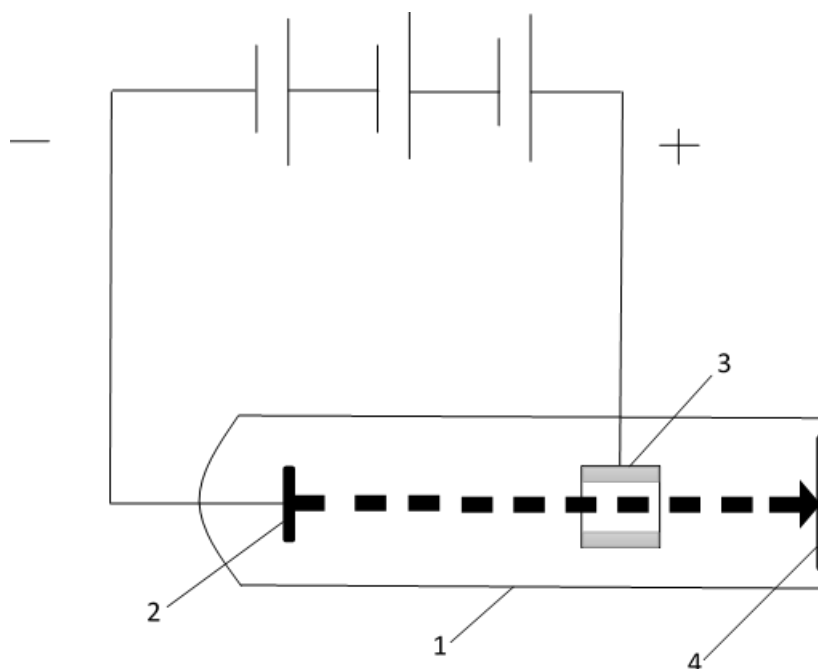
Електродинаміка Максвелла не дала конкретної відповіді на питання, яке мучало всіх фізиків: що таке електричний струм? На той час вже було відомо, що всі речовини склалися з молекул і дуже дрібних частинок – атомів, але яке відношення вони мають до електричного струму, було невідомо. Панували дві головні точки зору :

Електричний струм – це потік частинок речовини з дискретним зарядом (або електричної рідини, як припустив Бенджамін Франклін), що протікає по провіднику. Таку думку висловлювали Густав Фехнер (Gustav Fechner) і Вільгельм Вебер (Wilhelm Weber). Останній говорив: «З кожним вагомим атомом пов'язаний електричний атом» [1].

Електричний струм – це електромагнітний потік енергії, який створюється зарядами, не пов'язаними з матеріальними частинками. Таку думку відстоювали Герман Гельмгольц (Hermann Helmholtz), Генріх Герц (Heinrich Hertz) і Вільгельм Рентген (Wilhelm Röntgen) [1].

Максвелл обійшов це питання, ввівши параметри діелектричної сталої, провідності і магнітної проникності середовища без пояснень, чому різні матеріали мають різні характеристики. Непрямою відповіддю

могли служити відомі на той час фізичні явища – електроліз, електричний розряд в газах, катодні промені [2]. Насправді, перший закон Фарадея для електролізу прямо вказував на відповідне відношення



кількості речовини, перенесеної в гальванічній ванні, з величиною протікаючого заряду.

Рис. 1.1. Трубка Крукса

Німецький фізик Генріх Гейслер (Heinrich Geißler) за допомогою винайденого ним ртутного вакуумного насоса домогся високого вакууму і створив газорозрядні трубки з яскравим світінням (трубки Гейслера) [3]. З його дослідів випливало, що світіння молекул газу може спричинятися тільки їх бомбардуванням якимись частинками, які рухаються між катодом і анодом, і були вони названі катодними променями, а відкрив їх в 1859 р. Німецький професор фізики університету Бонна Юліус Плюккер (Julius Plücker) під час проведення дослідів з трубкою Гейслера [5]. Цей пристрій, поліпшений в 1875 р. Британським вченим Уільямом Круксом (William Crookes), що працював у власній лабораторії, показаний на рис. 1.1, де: 1 – вакуумна трубка, 2 – катод, 3 – анод, 4 – екран, що фосфоресцює[1]. За високої напруги

виникала пляма, яка світилась в центрі екрана. Було визначено, що катод викидав невідомі промені, що рухались прямолінійно і відхилялися сильним електромагнітним полем. Крукс припустив, що відкриті промені – це потік негативно заряджених часток. Але така ідея була спочатку спростована Герцем, який показав, що катодні промені легко проходять через екран із золотої фольги усередині трубки.

Перераховані вище факти наводили вчених на думку про те, що електричний струм, можливо, є потоком деяких найдрібніших негативно заряджених частинок. У 1874 р. Ірландський фізик Джордж Стоней (George Stoney) припустив, що електрика має дискретну структуру. Пізніше, в 1891 році, він назвав цю елементарну частинку – «атомом електрики», або електроном від грецького слова  $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$ , що означає бурштин. Завдяки законам електролізу йому вдалося оцінити величину її негативно електричного заряду, яка становить близько  $10^{-19}$  Кл [3]. Стоней також запропонував першу систему фізичних одиниць, ґрунтовану на цьому елементарному заряді, швидкості світла і гравітаційною сталою Ньютона.

Першим цю гіпотезу використав знаменитий голландський фізик Хендрик Лоренц (Hendrik Lorentz) в 1875 р. У своїй докторській дисертації [8]. Він же визначив величину і напрямок сили, що діє на заряджену частку в магнітному полі (сила Лоренца).

Робота Лоренца була згодом названа першою електронною теорією, і він був удостоєний Нобелівської премії з фізики 1902 р. Пізніше Лоренц разом з німецьким фізиком Паулем Друде (Paul Drude) побудував електронну теорію електропровідності металів, що пояснює, зокрема, закони Ома і Джоуля – Ленца.

Але усі ці теоретичні міркування вимагають експериментальної перевірки, тим більше що не усі фізики схилились до цього часу навіть з атомом, а їм пропонувалася якась ще більш менша частинка.

## 1.2. Дослід Дж. Томсона

У 1897 р. Директор добре обладнаної кавендишської лабораторії Кембріджського університету Джозеф Джон Томсон (Joseph John Thomson) спробував виміряти заряд і масу електрона, який він називав «корпускулою» (corpuscle) [6].

Установка Томсона показана на рис 1.2, де: А, В – аноди, С – катод, D, E – пластини, що відхиляють, F – електромагніт,  $\Phi$  – магнітний потік,  $f$  – електромагнітна сила, прикладена до частинки, що рухається [1]. Проте Томсон досяг зсуву катодних променів в електричному полі. Він роз'яснив помилку досліду Герца, згаданого вище, недостатньо високим вакуумом, внаслідок чого залишковий газ іонізувався катодними променями, утворюючи екран навколо потоку часток, що перешкоджає зовнішньому електричному полю.

Відкачуювши газ протягом декількох днів, Томсон досяг надзвичайно високого вакууму усередині трубки і помічав явні відхилення катодного променя – наприклад, вниз, як показано на рис. 1.2. Це відхилення могло компенсуватися магнітним полем, що зсуває катодний промінь, точно так, як електричної струм, вгору, згідно з правилом лівої руки (правилом Флемінга).

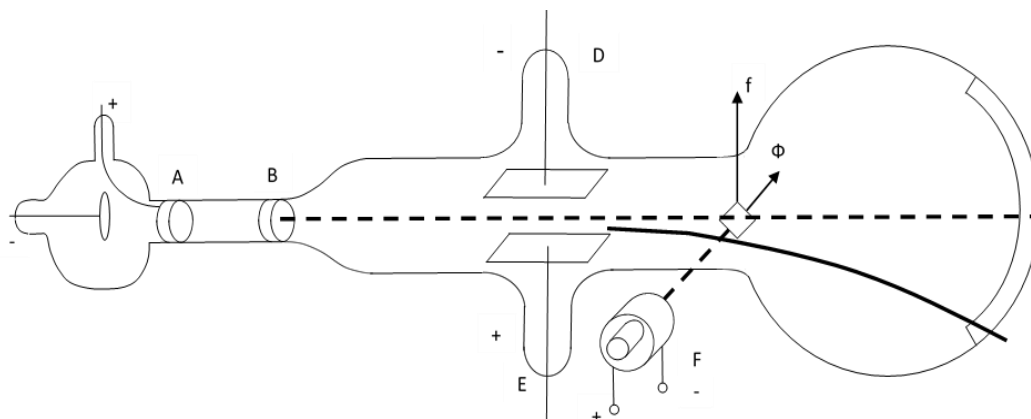


Рис. 1.2. Установка Томсона



Надалі, під час проведення частих дослідів, змінюючи комбінацію потенціалу анодів, напруги на пластинах, що відхиляють струм, Томсон марно прагнув окремо виміряти заряд електрона  $e$  і його масу ( $m$ ). Проте достовірні результати були отримані тільки для їх відношення  $\frac{e}{m}$ , а також швидкості електрона, яка виявилася такою, що дорівнює  $\frac{1}{3}$  швидкості світла, що було доказом проти електромагнітної природи катодних променів. Згодом стало відомо, що величина  $\frac{e}{m}$  не залежить від матеріалу катода, а також газу в трубці і взагалі від виду електронної емісії. Резюмуючи властивості електрона, Томсон писав: «Отже, здається природним розглядати його в якості однієї з цеглинок, з якої побудований атом» [6].

Відтак, атом електрики є фундаментальною і неділимою частинкою. Досліди Томсона з управління потоком електронів були настільки вірними, що 1897 рік вважається роком відкриття електрона. Томсон був нагороджений Нобелівською премією в 1906 р., отримав багато інших цінних нагород і навіть був посвячений в лицарі. Його син та семеро студентів, яких він навчав також стали нобелівськими лауреатами.

### 1.3. Експеримент Р. Міллікена

Для переконливого вимірювання самого заряду електрона потрібна була абсолютно інша ідея. Її запропонував у 1910 р. Професор університету Чикаго (США) Роберт Міллікен (Robert Millikan), асистент професора Альберта Майкельсона (Albert Michelson), що виміряв швидкість світла [4].

Почавши займатися науковими дослідженнями тільки в 40 років, він став нобелівським лауреатом в 1923 р. За вимірювання заряду

електрона і експериментальне підтвердження теорії фотоелектричного ефекту Ейнштейна. Установка Міллікена показана на рис. 1.3.

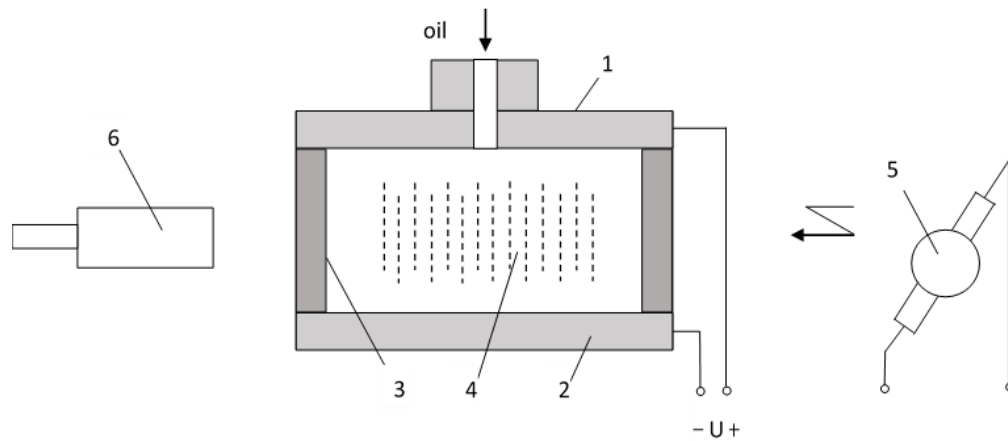


Рис. 1.3. Установка Міллікена

Вона була камерою діаметром 22 см, що містить верхній (1), нижній (2) електроди і скляну стінку (3). Після уприскування олії (oil) усередині камери утворювалася хмара крапельок (4), опромінення яких рентгенівською трубкою (5) заряджало їх негативно. Рух окремої крапельки можна було спостерігати через мікроскоп (6). Швидкість опускання кожної крапельки за відсутності напруги  $U$  давала змогу визначити її масу, а швидкість підйому у разі додавання високої напруги – її заряд. Заряд кожної краплі  $q = N \cdot e$ , де  $N$  – кількість електронів в краплі. Природно, число електронів  $N$  в кожній краплі є невідомим, але можна розрахувати найменше загальне кратне заряду різних крапель –  $e$ , яке і дорівнюватиме заряду одного електрона. Для статистичної достовірності експерименту Міллікена довелось терпляче виконати більше тисячі дослідів за п'ять років. У результаті заряд електрона виявився таким, що дорівнює  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, що за порядком величини збігалось з оцінкою Дж. Стонея. Після цього з відомого відношення Томсона  $\frac{e}{m}$  була знайдена і маса електрона  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, яка опинилася в 1800 разів менше маси атома Гідрогену [1].

Результати Міллікена були підтверджені дослідями учня Рентгена, російського фізика Абрама Федоровича Йоффе, які були проведені в Санкт-петербурзькому політехнічному інституті в 1913 р. [4]. Йоффе використав аналогічну камеру, але замість масляних крапель впорскував найдрібніші частинки цинку, а рентгенівський апарат замінив ультрафіолетовим джерелом, що вибиває з цинку електрони за рахунок фотоэффекту. Йоффе був засновником радянської школи напівпровідникової і ядерної фізики.

Отже, існування нової частинки – електрона, було твердо встановлене. З цим погодився навіть Рентген, що довго її не визнавав. Це відкриття проклало дорогу до створення перших вакуумних електронних приладів на початку ХХ ст.

## РОЗДІЛ 2. ТЕХНІКА ПРОВЕДЕННЯ ВІРТУАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА ЇХ АНАЛІЗ

### 2.1. Методика проведення лабораторних робіт із визначення заряду та маси електрона

Майбутній учитель повинен навчитись грамотно з методичної й технічної точок зору проводити навчальний експеримент, за його допомогою знайомити учнів із методами природничонаукового дослідження, розвивати творчий потенціал їх, мислення [11].

Оскільки вчитель виступає посередником між учнями і навчальним експериментом, від його методичної майстерності і технічної грамотності залежить успіх у засвоєнні навчального предмета. Тому-то лабораторні роботи з методики й техніки навчального фізичного експерименту передбачають експериментальну підготовку майбутнього вчителя як у плані оволодіння технікою та технологією фізичного експерименту, так і в напрямку формування навичок розв'язування конкретних дидактичних завдань, як:

- дотримання певної логічної послідовності в доборі демонстрацій;
- визначення мети, функціонального призначення досліду;
- раціонального розміщення приладів при проведенні демонстрацій;
- надання демонстрації проблемного характеру;
- виявлення методичних переваг однієї демонстрації перед іншою;
- порівняльна методична оцінка варіантів досліду.

Під час виконання лабораторної роботи необхідно проробити самостійно всі досліди, передбачені інструкцією, консультуючись, у разі потреби, із викладачем або лаборантом. При цьому слід пам'ятати, що

мистецтво експериментування не є природним даром, воно виробляється практичним тренуванням. Щоб добре оволодіти фізичним експериментом, потрібні багаторазові й тривалі вправи в його проведенні. Відомий учений О. Ейхенвальд із метою відпрацювання техніки проведення дослідів приїжджав на лекцію з теоретичної фізики за дві години до її початку. Усі досліди проробляв сам. Причому не стільки з'ясовував те, чи виходять досліди (у їх надійності сумнівів не було) скільки дбав про забезпечення доброї видимості і естетичної привабливості: виразність та переконливість дослідів, охайність приладів, розміщення викладача і його рух, доречність дослідів тощо [11].

Важливою методичною вимогою є оволодіння експериментальним методом, що реалізується в лабораторній установці. Не менш важливо знати конструкцію і правила користування приладами, які добираються відповідно до методу дослідження, вміти скласти установку. Під час вимірювань потрібно вміти правильно робити відлік значень вимірюваних величин за показами приладів, оцінювати реальність здобутих результатів. Треба враховувати обґрунтованість висновків, охайність і грамотність оформлення роботи.

При проведенні віртуальних лабораторних робіт треба оволодіти методикою і технікою проведення навчального експерименту з тем: „Визначення заряду електрона”, „Визначення питомого заряду електрона”. Під час виконання необхідно опрацювати наступні завдання:

**Завдання I.** Проробити відповідний навчальний матеріал за шкільними і вузівськими підручниками.

**Завдання II.** Набути умінь та навичок у виконанні віртуальних лабораторних робіт.

**Завдання III.** Виконати лабораторні роботи, додержуючись методичних вимог, що до оформлення їх письмового звіту.

## 2.2. Техніка проведення експериментів

Лабораторні роботи з фізики формують у учнів практичні вміння та навички роботи з фізичними приладами. При роботі на лабораторних установках учні, пізнають закономірності фізичних процесів і явищ. Фізичний експеримент допомагає більш повно представити фізичне явище. Однак, для організації повноцінного, насиченого експериментами, уроку з фізики потрібно досить багато часу і зусиль з боку вчителя і досить велика кількість лабораторного обладнання. При цьому існує ряд фізичних процесів і явищ, коли традиційні методи отримання навчальної інформації або неефективні, або неможливі (наприклад, при вивченні атомної фізики), і тоді нам на допомогу приходять комп'ютерні віртуальні лабораторні роботи. У цьому випадку використання учнями комп'ютера на уроці фізики, з одного боку дозволяє їм використовувати свої навички і вміння роботи з комп'ютером для вивчення фізичних об'єктів і явищ, підвищуючи інтерес до предмету, з іншого боку, комп'ютер стає для них джерелом отримання нової інформації, сприяючи поглибленому розумінню навчального матеріалу. Реалізовані таким чином фізичні експерименти вимагають лише наявності комп'ютера в кабінеті фізики. Але, як відзначають багато авторів, для гармонійного виховання учнів в сучасному кабінеті фізики слід використовувати, як звичайний, так і віртуальний фізичний експеримент. Оскільки нас цікавить використання віртуальних Flash-моделей, то розглянемо Flash-технології на прикладі організації віртуальних лабораторних робіт з тем «Визначення заряду електрона», «Визначення питомого заряду електрона».

## Лабораторна робота

### Визначення заряду електрона

**Мета:** Експериментально продемонструвати концепцію експерименту Міллікена з краплею олії. Знайти заряд на краплі.

**Обладнання:** Маслокрапельний апарат Міллікена, олія, подача постійного струму.



Рис. 2.1. Маслокрапельний апарат Міллікена

### Теоретичні відомості

Спочатку краплям олії дозволяють падати між пластинами у відсутність електричного поля. Через силу тяжіння вони спочатку прискорюються, але поступово сповільнюються із-за опору повітря. Кінцева швидкість  $v_1$  у відсутність електричного поля обчислюється як

$$v_1 = \frac{l_1}{t_1},$$

де  $l_1$  – відстань, пройдена масляною краплею, а  $t_1$  – витрачений час.

Сила опору, що діє на краплю, розраховується за законом Стокса і визначається як

$$F_v = 6\pi\eta r v_1,$$

де  $r$  – радіус масляної краплі,  $\eta$  – в'язкість повітря,  $v_1$  – кінцева швидкість.

Уявна вага (істинна вага мінус тяга вгору) для ідеально сферичного тіла визначається вираженням

$$F_G = \frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho - \rho_{air}),$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\rho$  – густина рідини,  $\rho_{air}$  – густина повітря.

На граничній швидкості крапля олії не прискорюється, тому загальна сила, що діє на неї, має дорівнювати нулю.

$$F_v - F_G = 0.$$

Тобто,

$$F_v = F_G$$

$$r^2 = \frac{9\eta v_1}{2g(\rho - \rho_{air})}.$$

Тепер в нижній камері створюється поле з живлячою напругою. Вибирається ймовірна крапля і утримується в середині поля зору шляхом регулювання напруги.



Якщо електричні сили  $F_e$  урівноважують гравітаційну силу  $F_G$ , крапля зависає в повітрі.

Потім,

$$F_e = F_G$$

$$qE = mg$$

$$\frac{qV}{d} = mg$$

де  $V$  – балансуєчий потенціал,  $d$  – відстань між пластинами.

Якщо прикладена електрична сила  $F_e$  більше, ніж сили, спрямовані вниз, деякі з крапель (заряджені) почнуть підніматися. Тепер електрична сила діятиме вгору, сила тяжіння і сили в'язкості – вниз. Відповідна кінцева швидкість  $v_2$  розраховується як

$$v_2 = \frac{l_2}{t_2}$$

де  $l_2$  – відстань, пройдена масляною краплею, а  $t_2$  – витрачений час.

Тепер загальна сила, що діє на краплю, рівна  $F_e - F'_v - F_G = 0$ .

$$F_e = F'_v + F_G$$

$F'_v$  - нова в'язка сила під дією електричного поля.

$$qE = 6\pi\eta r v_2 + 6\pi\eta r v_1$$

$$\frac{qV}{d} = 6\pi\eta r (v_1 + v_2)$$

Отримаємо розрахункову формулу для визначення заряду електрона:

$$q = 6\pi\eta r (v_1 + v_2) \frac{d}{V}$$

### *Опис лабораторної установки*

Апарат складається з розпилювача, який допомагає розпилити крихітні краплі. Краплі можна побачити за допомогою телескопа з короткою фокусною відстанню. Є дві пластини, одна позитивна, а інша негативна, над і під нижньою камерою. До пластин прикріплено джерело постійного струму. Деякі краплі олії падають через отвір у верхній пластині. За допомогою рентгенівських променів нижня камера освітлюється, викликаючи іонізацію повітря. Коли краплі проходять через повітря, електрони накопичуються над краплями і набувають негативного заряду.

За допомогою джерела постійного струму подається напруга. Швидкість його руху можна контролювати, змінюючи напругу, прикладену до пластин. Регулюючи прикладену напругу, падіння можна призупинити в повітрі. Міллікен спостерігав одне падіння за іншим, змінюючи напругу і відмічаючи ефект. Після багатьох повторень він дійшов висновку, що заряд може набувати тільки певних фіксованих значень.

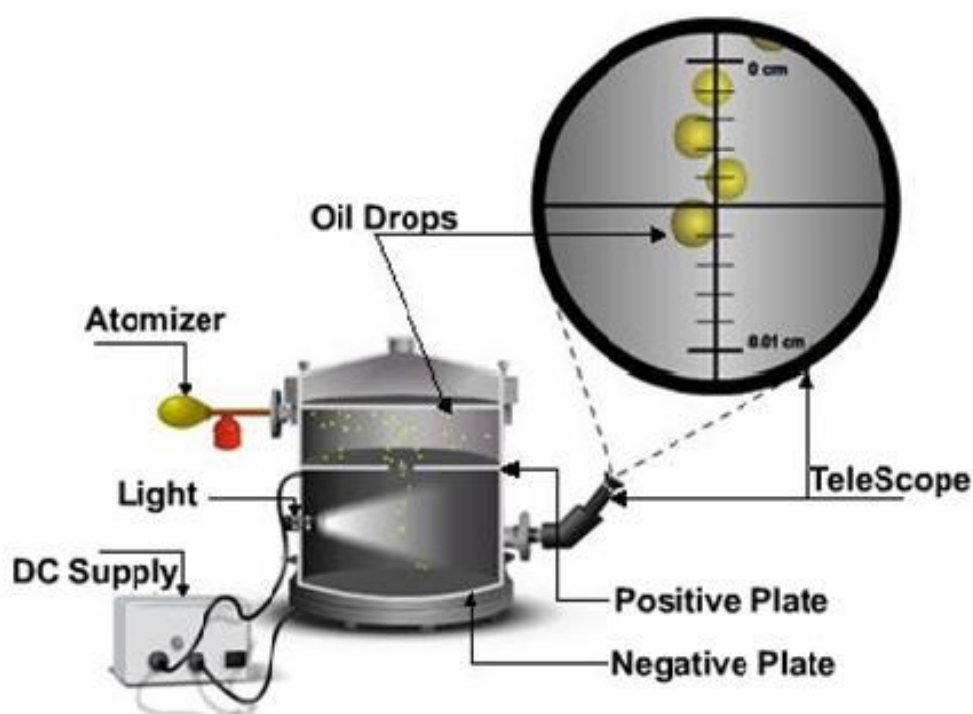


Рис. 2.2. Склад лабораторної установки

*Хід роботи*

1. Натиснути кнопку “СТАРТ”.
2. Натиснути на поле зі списком, щоб вибрати олію.
3. Двічі натиснути кнопку «ПУСК» секундоміра і звернути увагу на якийсь час, витрачене  $t_1$  на падіння, щоб пройти відстань  $l_1$  між будь-якими двома точками.

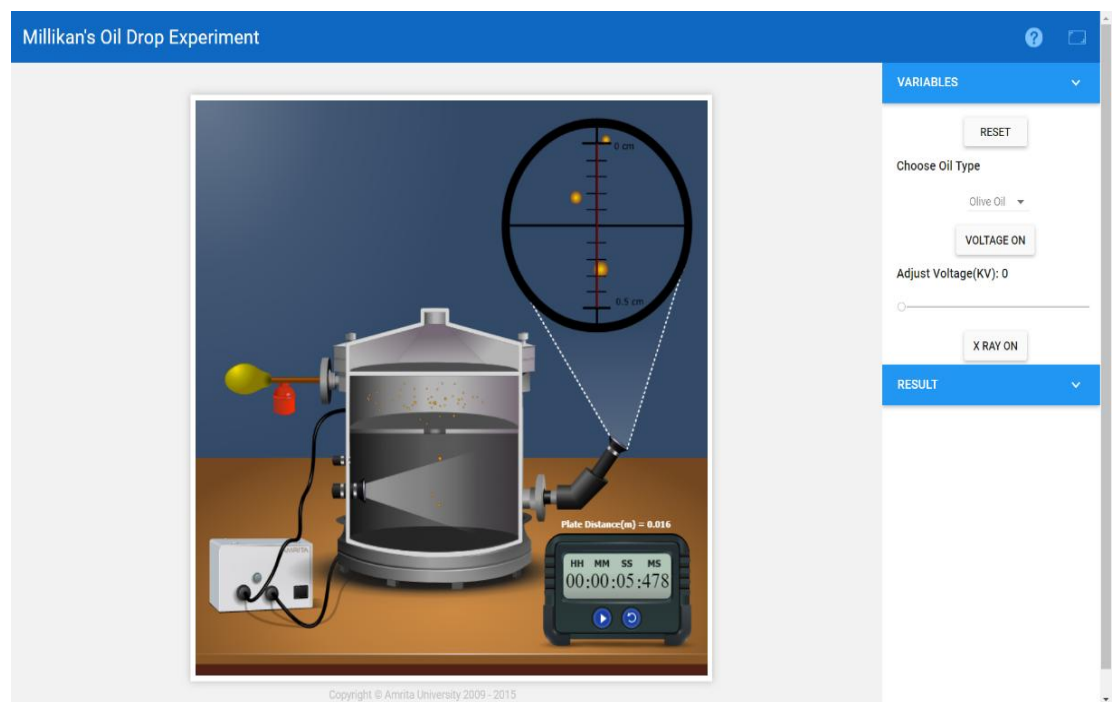


Рис. 2.3. Лабораторна установка у ході експерименту

4. Натиснути “Voltage On”, щоб призупинити те ж саме падіння олії в повітрі, яке є балансуною напругою  $V$ .
5. Натиснути кнопку “X Ray ON” і звернути увагу на якийсь час, витрачене  $t_2$  на те ж падіння, щоб пройти відстань  $l_2$  між будь-якими двома точками.
6. Виміряні значення занести до таблиці 2.1.
7. Розрахувати заряд краплі за формулою  $q = \frac{6\pi\eta r (v_1 + v_2)d}{V}$ .

8. Повторити експеримент тричі.

Таблиця 2.1

$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$v_1, \frac{\text{ м}}{\text{ с}}$	$v_2, \frac{\text{ м}}{\text{ с}}$	$V, \text{ В}$	$q, \text{ Кл}$
$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	3,2	1,9	0,00156	0,00263	500	$1,7 \cdot 10^{-19}$
$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	2,8	1,6	0,00178	0,00312		$1,81 \cdot 10^{-19}$
$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	3,1	1,8	0,00161	0,00277		$1,78 \cdot 10^{-19}$
$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	3,03	1,76	0,00165	0,00284		$1,76 \cdot 10^{-19}$

$$e = (1,76 \pm 0,14) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

*Лабораторна робота*

### **Визначення питомого заряду електрона**

**Мета роботи:** навчитися визначати питомий заряд електрона дослідним шляхом.

**Обладнання:** електронно-променева трубка з джерелом живлення і вузлами управління, кіловольтметр, котушки Гельмгольца, амперметр.

### Теоретичні відомості

Аналіз руху електрона в електричному і магнітному полях дозволяє визначити відношення його заряду до маси  $\left(\frac{e}{m}\right)$  - питомий заряд електрона з наступних міркувань. При русі електрона із швидкістю  $v$  в магнітному полі з індукцією  $B$  на нього діє сила Лоренца :

$$F = e[v \cdot B] \quad (1)$$

Ця сила перпендикулярна як до руху частинок, так і до напрямку магнітного поля. Якщо  $v \perp B$ , то траєкторія руху представляє собою коло (рис. 2.4), оскільки сила Лоренца виступає як доцентрова сила:

$$\frac{mv^2}{r} = evB \quad (2)$$

де  $r$  – радіус кола.

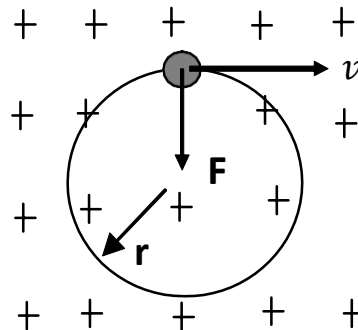


Рис. 2.4. Аналіз руху електрона в магнітному полі

До швидкості  $v$  електрони розганяються в електричному полі, пройшовши різницю потенціалів  $U$ . Кінетична енергія частинок в прискорюючому електричному полі дорівнює:

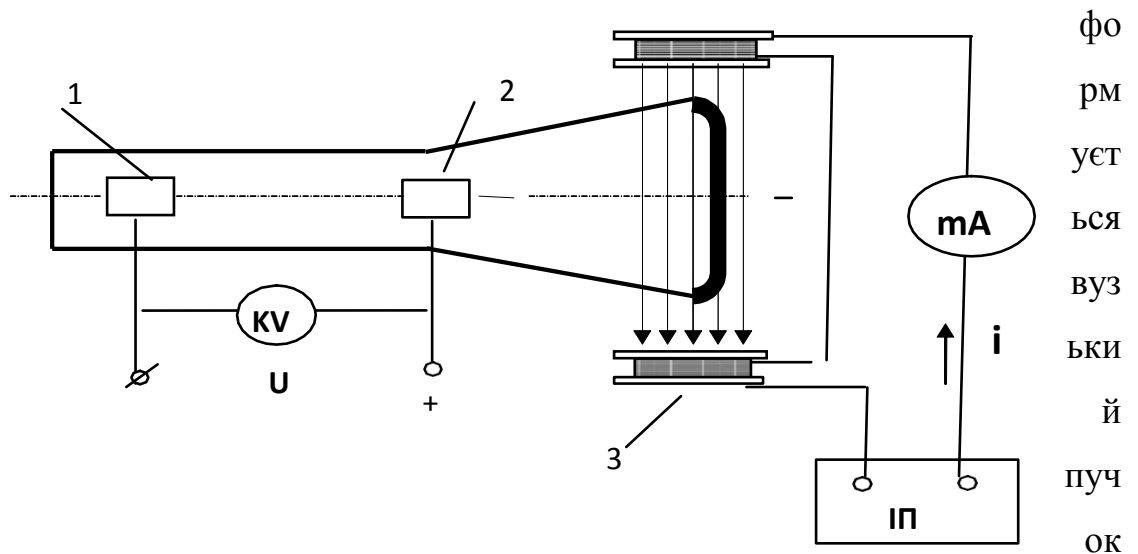
$$\frac{mv^2}{2} = eU \quad (3)$$

З (2) і (3) випливає, що питомий заряд електрона можна визначити з вираження:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{r^2 B^2} \quad (4)$$

де параметри  $U$ ,  $B$  і  $r$  знаходяться експериментально.

У цій лабораторній роботі безпосереднє вимірювання радіусу траєкторії неможливе, оскільки рух електронів відбувається в електронно-променевої трубі (ЕПТ), що є вакуумованою скляною посудиною (рис. 2.5), де за допомогою електронної гармати (1)



електронів, який прискорюється високою напругою ( $U \sim 1000$  В), яка прикладена між електронною гарматою і анодом (2).

Рис. 2.5. ЕПТ

Плоскі котушки Гельмгольца, розташовані на корпусі ЕПТ (3), створюють вертикальне магнітне поле, індукція якого в дослідах змінюється за допомогою електричного струму, що протікає через котушки.

Радіус траєкторії руху електронів в цьому випадку знаходиться за величиною відхилення електронного променя  $x$  (рис. 2.6) від поздовжньої осі ЕПТ (вісь  $Y$ ) і відстані від анода до екрану  $L$ . З трикутника  $ACB$  видно, що:

$$r^2 = (r - x)^2 + L^2 \quad (5)$$

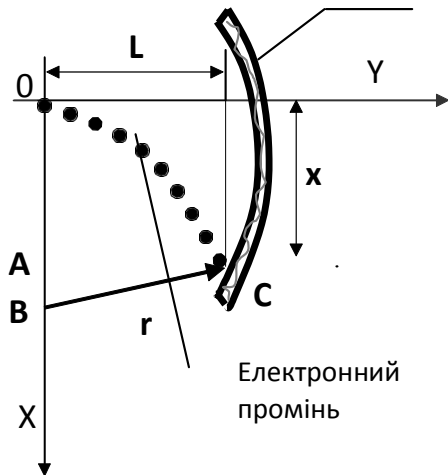


Рис. 2.6.

Тут початок координат поєднаний з анодом, а напрям осі Y співпадає з траєкторією невідхиленого електронного пучка до входу останнього в магнітне поле.

З (5) отримаємо вираження для радіусу:

$$r = \frac{x^2 + L^2}{2x} \quad (6)$$

Враховуючи, що магнітна індукція, яка створюється котушками Гельмгольца, дорівнює:

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{2\sqrt{2}R}, \quad \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}},$$

де  $i$  - сила струму, що протікає в котушках. Після підстановки (6) в (4), отримаємо розрахункову формулу для визначення питомого заряду електрона в остаточному вигляді:

$$\frac{e}{m} = \frac{64UR^2}{\mu_0^2 N^2 L^4} \cdot \frac{x^2}{i^2 \left(1 + \frac{x^2}{L^2}\right)^2} = C \cdot f. \quad (7)$$

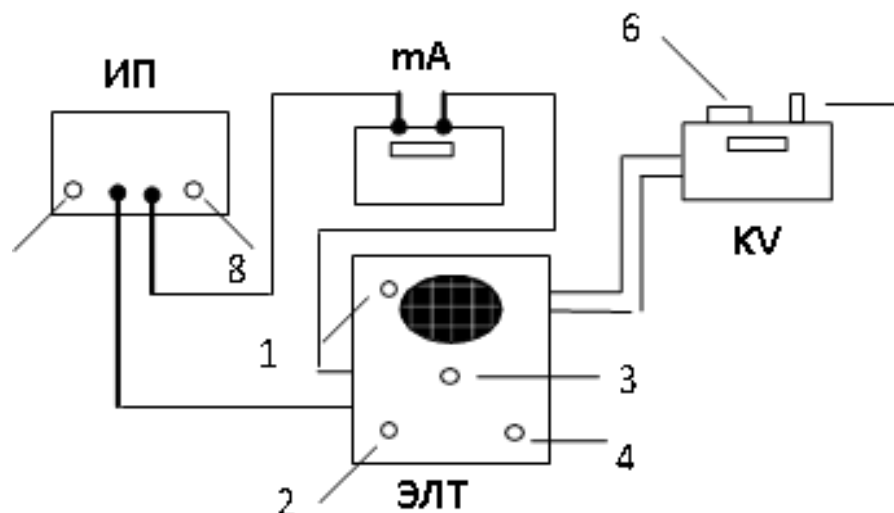
Тут  $N$  і  $R$  - відповідно кількість витків і радіус котушок;  $i$  - сила струму, що протікає в котушках;  $C$  і  $f$  - позначення постійної і змінної частин розрахункової формули.

### **Опис лабораторної установки**

Установка складається з джерел живлення низької (рис. 2.7, III) і високої напруги (змонтований в одному блоці з ЕПТ), власне ЕПТ, міліамперметра (mA) і кіловольтметра (kV).

На панелі корпусу ЕПТ розташовані ручки управління : 1 - вимикач; 2 – регулювання яскравості; 3 – регулювання зміщення по X; 4 – фокусування електронного променя.

Вказаними регуляторами забезпечується мінімальний розмір і



потрібна яскравість світлової плями.

Рис. 2.7. Склад лабораторної установки

5

### *Хід роботи*

1. Підготувати kV до роботи: кнопкою (5) ввімкнути прилад. Якщо зміщений нуль вольтметра, то регулятором (6) привести світловий показчик на початок шкали.





Рис. 2.8. Лабораторна установка перед початком досліду

2. Тумблером (1) ввімкнути живлення ЕПТ, ручками управління (2, 3, 4) відрегулювати яскравість і фокус світлової плями, перемістити його в центр екрану.
3. Виміряти величину прискорюючої напруги за допомогою kV і занести в таблицю 2.2. *Вимкнути живлення вольтметра.*
4. Тумблером (7) ввімкнути ІІІ. Регулятором (8) встановити перше з 5-ти довільних значень сили струму в діапазоні від 5 до 50 mA і занести в таблицю.
5. Виміряти зміщення електронного променя за допомогою міліметрової сітки екрану і занести в таблицю.



Рис. 2.9. Лабораторна установка у ході експерименту

6. Провести аналогічні вимірювання по п. 4 та 5 для 4-х інших значень сили струму.
7. Після проведення дослідів зменшити струм регулятором ІІІ до нуля, вимкнути живлення усіх приладів.

Таблиця 2.2

$i$ $\times 10^{-3}, A$	$x$ $\times 10^{-3}, m$	$f = \frac{x^2}{i^2(1 + \frac{x^2}{L^2})^2}$	$\varepsilon, \%$	Постійні для установки
5	0,3	$6,1 \cdot 10^{-4}$	1,7	$R = (4 \pm 0,10) \times 10^{-2}, m$
10	0,5	$9,6 \cdot 10^{-4}$		
15	0,7	$5,35 \cdot 10^{-4}$		$L = 0,1 \pm 0,001 m$
20	1	$3,5 \cdot 10^{-4}$		$N = 920$ витків
25	1,2	$2,5 \cdot 10^{-4}$		$U = 1000 V$
Середнє значення		$5,4 \cdot 10^{-4}$		$C = 306 \cdot 10^{-10}$

$$\frac{e}{m} = (1,65 \pm 0,09) \cdot 10^{-11} \frac{Кл}{кг}$$

### 2.3. Аналіз результатів експериментів.

В результаті роботи з визначення заряду електрона:

- ознайомилися з пристроєм і принципом роботи маслокрапельного апарату Міллікена;
- визначили радіус масляної краплі;
- ознайомилися з методикою розрахунку і розраховали заряд електрона:

$$e = (1,76 \pm 0,14) \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Отримане значення збігається з табличним  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, але присутня невелика похибка. Експеримент виконано вдало. Недоліком виконання цього дослідів є безконтрольність температури.

В результаті роботи з визначення питомого заряду електрона визначили відношення Томсона

$$\frac{e}{m} = (1,65 \pm 0,09) \cdot 10^{-11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}},$$

з якого можемо знайти масу електрона. Отримаємо таке значення

$$m_e = (9,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$$

Отримане значення майже збігається з табличним  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг. Причина виникнення похибки зумовлена послабленням уваги спростерігача.

## ВИСНОВКИ

Століття тому ультрасучасний пристрій для уловлювання заряду представляв собою краплю годинникової олії. Експеримент Роберта Міллікена з краплею олії дав перше чітке вимірювання фундаментального електричного заряду  $e$ , отже, допоміг зміцнити уявлення про те, що природа є «зернистою» на найменшому рівні. Серед фундаментальних констант, маса електрона грає важливу роль, оскільки вона відповідає за структуру і властивості атомів і молекул.

Електронно-променева трубка Томсона продемонструвала, що атоми містять невеликі негативно заряджені частинки, звані електронами. Міллікен виявив, що існує фундаментальний електричний заряд - заряд електрона. Завдяки роботам Томсона, Міллікена і інших стали відомі заряд і маса негативних субатомних частинок – електронів.

Під час проведення дослідів у віртуальній фізичній лабораторії ми виділили найголовнішу їх перевагу: можливість демонстрації експериментів, які неможливо проводити, використовуючи традиційне шкільне обладнання.

В результаті лабораторних робіт з визначення заряду електрона та питомого заряду електрона було отримано такі значення:

$$e = (1,76 \pm 0,14) \cdot 10^{-19} \text{ Кл},$$

$$\frac{e}{m} = (1,65 \pm 0,09) \cdot 10^{-11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

Знаючи заряд та питомий заряд електрона, отримали значення маси електрона:

$$m_e = (9,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-31} \text{ кг}.$$

Отримані значення майже збігаються з табличними  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мікеров А. Г., Вейнмейстер А. В. Історія науки і техніки в галузі управління і технічних систем. СПб: СПбГЕТУ «ЛЕТІ». 2016.
2. Спаський Б. І. Історія фізики. Ч. 2. М.: Вища школа. 1977.
3. Кудрявцев П. С. Курс історії фізики. М.: Просвітництво. 1974.
4. Ліпсон Г. Великі експерименти у фізиці. М.: Світ. 1972.
5. Thomson J. J. Discovery of the Electron. Nobel Lecture 1906 // Nobel Lectures. Physics. 1901–1921. Amsterdam: Elsevier Publishing Company. 1967.
6. Lorentz H. A., Zeeman P. The Theory of Electrons and the Propagation of Light. Nobel Lecture 1902 // Nobel Lectures. Physics. 1901-1921. Amsterdam: Elsevier Publishing Company. 1967.
7. Дірак П.А.М. Релятивістське хвильове рівняння електрона. УФН. Т. 129, вип. 4. с. 691. 1979.
8. Фейнман Р. Фейнмановські лекції з фізики. т. 5, гл. 1, Електромагнетизм. М.: Наука. 1987.
9. Нікольський Г.Ю. Парадигма електрона. Атомна Стратегія. Вересень 2018.
10. Штермер Х. Дробний квантовий ефект Холла. УФН. Т. 170, в. 3. 2000.
11. Валантен Л. субатомних фізика: ядра і частинки. Т. 2. Подальший розвиток. М.: Світ. 1986.
12. Зевальский Ф. С. Маса і її вимір. Гл. 23, Маса електрона. М.: Атомиздат., 1974. стор.116
13. Борн М. Фізика в житті мого покоління. М., 1963.
14. Schweber S.S. Physics, community and the crisis in physical theory // physics today. 1993. November. P. 34–40.

15. Исаев П.С. Замечание о спектре масс элементарных частиц // Препринт ОИЯИ, Д-824. Дубна, 1961.
16. Златев И.С., Исаев П.С. О массе, электрическом заряде и осциляциях нейтрино. Сообщения ОИЯИ, Д-2-81-287. 1981.
17. Джеммер М. Понятие массы в классической и современной физике / Пер, и комментарии Н.Ф. Овчинникова
18. Feynman R.//Phys. Rev. 1949. V. 76. P. 749, 769; переводы://Новейшее развитие квантовой электродинамики /Пер. А. М. Бродского под ред. Д. Д. Иван
19. Капра Ф. Дао физики. Изд. Яна-Принт. 1994.
20. Вишневський І.М. Актуальні проблеми ядерної фізики //Тези доповідей Всеукраїнського з'їзду „Фізика в Україні.” – Одеса - 2005.- С.19.
21. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике // М: Наука. – 1977. –944с.