МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Державний заклад

«Південноукраїнський національний педагогічний університет

імені К. Д. Ушинського»

кафедра фізики

О. Л. Чепок

Фізика як наука про зміст і форми руху матерії

тексти лекцій

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

галузі знань 01 «Освіта / Педагогіка»

спеціальності 014.08 «Середня освіта (Фізика)»

денної та заочної форм навчання

Одеса – 2021

УДК 534
ББК
Рекомендовано до друку Вченою радою Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського» (протокол №12 від 24 червня 2021 року)

Чепок О.Л. Фізика як наука про зміст і форми руху матерії: тексти лекцій [для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти галузі знань 01 «Освіта / Педагогіка» спеціальності 014.08 «Середня освіта (Фізика)» денної та заочної форм навчання]. Одеса, 2021.

Тексти лекцій розроблено відповідно до змістового модуля «Фізика як наука про зміст і форми руху матерії» навчальної дисципліни «Загальна фізика», опанування якої у Державному закладі «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського» передбачено освітньо-професійною програмою «Середня освіта (Фізика)» для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 014.08 Середня освіта (Фізика) протягом перших шести семестрів навчання.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Гоцульський В. Я.**,** доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри загальної фізики і фізики теплоенергетичних та хімічних процесів Одеського національного університету імені І. І. Мечникова;

Тадеуш О.Х., кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського».

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА…… **4**

ВСТУП…… **6**

Навчально-тематичний план та структура навчальної дисципліни…… **7**

Лекція 1. Основні етапи розвитку фізики як науки. Роль та місце фізики у природознавстві…… **8**

Питання та завдання для самоконтролю за змістом лекції 1…….. **26**

Лекція 2. Фундаментальні теорії фізики…… **27**

Питання та завдання для самоконтролю за змістом лекції 2…….. **38**

Лекція 3. Поняття маси…… **39**

Питання та завдання для самоконтролю за змістом лекції 3…….. **47**

Лекція 4. Час…… **48**

Питання та завдання для самоконтролю за змістом лекції 4……..… **52**

Лекція 5. Системи відліку…… **53**

Питання та завдання для самоконтролю за змістом лекції 5…….. **59**

Лекція 6. Закони Всесвітнього тяжіння…….. **60**

Питання та завдання для самоконтролю за змістом лекції 6…….. **66**

Лекція 7. Закони класичної механіки…… **67**

Питання та завдання для самоконтролю за змістом лекції 7…….. **74**

Список використаних і рекомендованих джерел інформації…….. **75**

ПЕРЕДМОВА

ФІЗИКА – наука, що вивчає найпростіші й разом з тим найбільш загальні закономірності явищ природи, властивості й будову матерії, закони її руху. Тому поняття фізики та її закони лежать в основі всього природознавства. Фізика відноситься до точних наук і вивчає кількісні закономірності явищ.

Слово «Фізика» походить від греч. phýsis = природа. Спочатку, в епоху античної культури наука не була розчленована й охоплювала всю сукупність знань про природні явища. Згодом диференціація знань і методів дослідження із загальної науки про природу виділила окремі науки, у тому числі й фізику. Границі, що відокремлюють фізику від інших природничих наук, значною мірою умовні й змінюються з часом.

У своїй основі фізика – експериментальна наука: її закони базуються на фактах, встановлених дослідним шляхом. Ці закони являють собою кількісні співвідношення й формулюються математичною мовою. Розрізняють експериментальну фізику – досліди, проведені для виявлення нових фактів і для перевірки відомих фізичних законів, і теоретичну фізику, ціль якої складається у формулюванні законів природи й у поясненні конкретних явищ на основі цих законів, а також у пророкуванні нових явищ. При вивченні будь-якого явища дослід і теорія рівною мірою необхідні й взаємозалежні.

Відповідно до різноманіття досліджуваних об'єктів і форм руху фізичної матерії фізика підрозділяється на ряд дисциплін (розділів), тією чи іншою мірою зв'язаних один з одним. Розподіл фізики на окремі дисципліни не однозначно, і його можна проводити, керуючись різними критеріями. По досліджуваних об'єктах фізика ділиться на фізику елементарних часток, фізику ядра, фізику атомів і молекул, фізику газів і рідин, фізику твердого тіла, фізику плазми. Інший критерій – досліджувані процеси або форми руху матерії. Розрізняють: механічний рух, теплові процеси, електромагнітні явища, гравітаційні, сильні, слабкі взаємодії; відповідно у фізиці виділяють механікові матеріальних крапок і твердих тіл, механікові суцільних

середовищ (включаючи акустикові), термодинаміку й статистичну механіку, електродинаміку (включаючи оптикові), теорію тяжіння, квантову механіку й квантову теорію поля. Зазначені підрозділи фізики частково перекриваються внаслідок глибокого внутрішнього взаємозв'язку між об'єктами матеріального світу й процесами, у яких вони беруть участь. По цілям дослідження виділяють іноді також прикладну фізику (наприклад, прикладна оптика).

Особливо виділяють у фізиці навчання про коливання й хвилі, що обумовлено спільністю закономірностей коливальних процесів різної фізичної природи й методів їхнього дослідження. Тут розглядаються механічні, акустичні, електричні й оптичні коливання й хвилі з єдиної точки зору.

Сучасна фізика містить невелике число фундаментальних фізичних теорій, що охоплюють всі розділи фізики Ці теорії являють собою квінтесенцію знань про характер фізичних процесів й явищ, наближене, але найбільш повне відображення різних форм руху матерії в природі.

ВСТУП

1. Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета: формування уявлення, що створення узагальнюючих теорій базується на величезному експериментальному матеріалі, який здобувається самовідданою працею вчених, інженерів, винахідників; що методи фізики широко застосовуються в астрономії, хімії, біології, метереології, геології, екології та інших галузях; виховання поваги до науки і до вчених, які створюють фізичну науку; навчання мислити логічно і творчо.

При викладанні матеріалу ураховуються знання з фізики, одержані студентами в середній школі, і знання з вищої математики, одержані в університеті.

Після завершення навчання з розділу «Механіка» студент повинен

знати

- ♦ фізичні явища, ідеї, принципи, що складають основу сучасної фізики;
- ♦ закони коливального руху, хвильових процесів;
- ♦ механіку рідин і газів,
- ♦ хвилі у суцільних середовищах, основи акустики.

уміти

- ♦ вирішувати в інерційних та неінерційних системах відліку пряму та обернену задачі кінематики прямолінійного та обертального рухів матеріальної точки та абсолютно твердого тіла;
- ♦ застосовувати основні рівняння про:
  - ♦ закони коливального руху, хвильових процесів;
  - ♦ механіку рідин і газів,
  - ♦ хвилі у суцільних середовищах, основи акустики.
  - ♦ форми руху, кінематику та динаміку матеріальної точки та системи точок,
  - ♦ деформації і напруження у твердих тілах;
  - ♦ закони збереження в класичній фізиці

♦ застосовувати основні рівняння динаміки точки, рівняння моментів та закони збереження імпульсу, моменти імпульсу та механічної енергії для розв'язання задач в інерціальних системах відліку про:

- рух системи матеріальних точок, зіткнення, реактивний рух, рух матеріальної точки в полі тяжіння;
- обертальний рух абсолютно твердого тіла навколо закріпленої осі, кочення, прецесію у зовнішньому полі.

НАВЧАЛЬНО-ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ТА СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин				
	денна форма				
	усього	у тому числі			
		лц	лб	пр	срс
1	2	3	4	5	6
Змістовий модуль 1. Фізика як наука про зміст та форми руху матерії					
Тема 1. Роль фізики у природознавстві.	6	2	-	-	4
Тема 2. Фундаментальні теорії фізики	6	2	-	-	4
Тема 3. Маса	6	2	-	-	4
Тема 4. Час	8	2	2	-	4
Тема 5. Системи відліку	10	2	-	4	4
Тема 6. Закони Всесвітнього тяжіння	6	2	-		4
Тема 7. Закони класичної механіки	8	2	2		4
Разом за змістовим модулем 1	50	14	4	4	28

Лекція 1.

Тема: **Основні етапи розвитку фізики як науки. Роль та місце фізики у природознавстві**

План

1. Становлення фізики (до 17 в.)
2. Формування фізики як науки (початок 17 ст.– кінець 18 ст.)
3. Класична фізика (19 ст.)
4. Релятивістська й квантова фізика. Фізика атомного ядра й елементарних часток (кінець 19 ст. – 20 ст.)

1. Становлення фізики (до 17 ст.)

Фізичні явища навколишнього світу здавна привертали увагу людей. Спроби причинного пояснення цих явищ передували створенню фізики в сучасному змісті цього слова. У греко-римському світі (6 ст. до н.е. – 2 ст. н.е.) вперше зародилися ідеї про атомну будову речовини (**Демокріт**, **Епікур**, **Лукрецій**), була розроблена геоцентрична система миру (**Птолемей**), установлені найпростіші закони статики (правило важеля), відкритий закон прямолінійного поширення й закон відбиття світла, сформульовані початки гідростатики (закон Архімеда), спостерігалися найпростіші прояви електрики й магнетизму.

Підсумок придбаних знань в 4 ст. до н.е. був підведений **Аристотелем.** Фізика Аристотеля включала окремі вірні положення, але в той же час у ній були відсутні багато прогресивних ідей попередників, зокрема атомна гіпотеза. Визнаючи значення досвіду, Аристотель не вважав його головним критерієм вірогідності знання, віддаючи перевагу умоглядним поданням. У середні століття навчання Аристотеля, канонізоване церквою, надовго загальмувало розвиток науки.

Наука відродилася лише в 15–16 ст. у боротьбі зі схоластизированным навчанням Аристотеля. У середині 16 ст. М. Копернік висунув геліоцентричну систему миру й поклав початок звільненню природознавства

від теології. Потреби виробництва, розвиток ремесел, судноплавства й артилерії стимулювали наукові дослідження, що опираються на досвід. Однак в 15–16 вв. експериментальні дослідження носили в основному випадковий характер. Лише в 17 в. почалося систематичне застосування експериментального методу у Фізика, і це привело до створення першої фундаментальної фізичної теорії = класичної механіки Ньютона.

2. Формування фізики як науки (початок 17 ст. – кінець 18 ст)

Розвиток фізики як науки в сучасному змісті цього слова бере початок із праць Г. Галілея (перша половина 17 ст.), що зрозумів необхідність математичного опису руху. Він показав, що вплив на дане тіло навколишніх тіл визначає не швидкість, як уважалося в механіку Аристотеля, а прискорення тіла. Це твердження являло собою перше формулювання закону інерції. Галілей відкрив принцип відносності в механіку, довів незалежність прискорення вільного падіння тіл від їхньої щільності й маси, обґрунтовував теорію Коперніка. Значні результати були отримані їм й в ін. областях фізики Він побудував зорову трубу з більшим збільшенням і зробив з її допомогою ряд астрономічних відкриттів (гори на Місяці, супутники Юпітера й ін.). Кількісне вивчення теплових явищ почалося після винаходу Галілеєм першого термометра.

В першій половині 17 ст. почалося успішне вивчення газів. Учень Галілея Е. Торрічеллі встановив існування атмосферного тиску й створив перший барометр. Р. Бойль й Е. Маріотт досліджували пружність газів і сформулювали перший газовий закон, що носить їхнє ім'я. В. Снелліус і Р. Декарт відкрили закон переломлення світла. У цей же час був створений мікроскоп. Значний крок уперед у вивченні магнітних явищ був зроблений на самому початку 17 ст. У. Гільбертом. Він довів, що Земля є великим магнітом, і перший строго розмежував електричні й магнітні явища.

Основним досягненням фізики 17 ст. було створення класичної механіки. Розвиваючи ідеї Галілея, Х. Гюйгенса й інших попередників, І.

Ньютон у праці "Математичні початки натуральної філософії" (1687) сформулював всі основні закони цієї науки. При побудові класичної механіки вперше було втілено ідеал наукової теорії, що існує й понині. З появою механіки Ньютона остаточно стало зрозумілим, що завдання науки полягає у відшуканні найбільш загальних законів природи, які мають кількісне формулювання.

Найбільших успіхів механіка Ньютона досягла при поясненні руху небесних тел. Виходячи із законів руху планет, установлених І. Кеплером на підставі спостережень Т. Браге, Ньютон відкрив закон всесвітнього тяжіння. За допомогою цього закону вдалося із чудовою точністю розрахувати рух Місяця, планет і комет Сонячної системи, пояснити припливи й відливи в океані. Ньютон дотримувався концепції далекодії, відповідно до якої взаємодія тіл (частинок) відбувається миттєво безпосередньо через порожнечу; сили взаємодії повинні визначатися експериментально. Ньютон вперше чітко сформулював класичні уявлення про абсолютний простір як вмістище матерії, що не залежить від її властивостей і руху, і абсолютному часі, який плине рівномірно. Аж до створення теорії відносності ці уявлення не перетерпіли ніяких змін.

У цей же час Гюйгенс і Г. Лейбніц сформулювали закон збереження кількості руху; Гюйгенс створив теорію фізичного маятника, побудував годинники з маятником.

Почався розвиток фізичної акустики. М. Мерсенн виміряв число власних коливань струни, яка генерувала звук, і вперше визначив швидкість звуку в повітрі. Ньютон теоретично вивів формулу для швидкості звуку.

У другій половині 17 ст. почала швидко розвиватися геометрична оптика стосовно до конструювання телескопів та інших оптичних приладів, а також були закладені основи фізичної оптики. Гримальді відкрив дифракцію світла, а Ньютон провів фундаментальні дослідження дисперсії світла. Із цих робіт Ньютона бере початок оптична спектроскопія. В 1676 О. К. Рьомер уперше виміряв швидкість світла. Майже одночасно виникли й почали

розвиватися дві різні теорії про фізичну природу світла – корпускулярна й хвильова. Відповідно до корпускулярної теорії Ньютона, світло – це потік часток, що рухаються від джерела в усіх напрямах. Відповідно до хвильової теорії Гюйгенса, світло – це потік хвиль, що поширюються в особливому гіпотетичному середовищі – ефірі, що заповнює весь простір і проникає усередину всіх тіл.

Таким чином, у 17 ст. була в основному побудована класична механіка й початі дослідження в інших областях фізики: оптика, вчення про електричні й магнітні явища, теплоту, акустику.

У 18 ст. тривав розвиток класичної механіки, зокрема небесної механіки. По невеликій аномалії в русі планети Уран вдалося пророчити існування нової планети – Нептун, відкритої в 1846 році. Впевненість у справедливості механіки Ньютона стала загальної. На основі механіки була створена єдина механічна картина світу, відповідно до якої все багатство, все якісне різноманіття світу – результат відмінностей руху частинок (атомів), що складають тіла, та рухів тіл, що підкоряється законам Ньютона. Ця картина багато років впливала на розвиток фізики. Пояснення фізичного явища вважалося науковим і повним, якщо його можна було звести до дії законів механіки.

Важливим стимулом для розвитку механіки послужили запити виробництва, що розвивалося. У роботах Л. Ейлера та інших було розроблено динаміку абсолютно твердого тіла. Паралельно з розвитком механіки частинок і твердих тіл йшов розвиток механіки рідин і газів. Працями Д. Бернуллі, Ейлера, Ж. Лагранжа й інших у першій половині 18 століття були закладені основи гідродинаміки ідеальної рідини – рідини, яка позбавлена в'язкості й теплопровідності, яка не може бути стисненною. В "Аналітичній механіці" Лагранжа (1788) рівняння механіки представлені в настільки узагальненій формі, що надалі їх вдалося застосувати й до немеханічних, зокрема електромагнітних, процесів.

В інших областях фізики відбувалося нагромадження дослідних даних і формулювалися найпростіші експериментальні закони. Ш. Ф. Дюфе відкрив існування двох видів електрики й визначив, що однойменно заряджені тіла відштовхуються, а різнойменно заряджені – притягаються. Б. Франклін установив закон збереження електричного заряду. М. Кавендіш і незалежно Ш. Кулон відкрили основний закон електростатики, що визначає силу взаємодії нерухомих електричних зарядів (Кулона закон). Виникло вчення про атмосферну електрику. Франклін, М. В. Ломоносов і Г. В. Ріхман довели електричну природу блискавки. В оптиці тривало вдосконалювання об'єктивів телескопів. Працями П. Бугера й І. Ламберта почала створюватися фотометрія. Було відкрито інфрачервоні (В. Гершель, англ. вчений У. Волластон) і ультрафіолетові (нем. вчений Н. Ріттер, Волластон) промені.

Помітний прогрес відбувся в дослідженні теплових явищ; після відкриття Дж. Блеком схованої теплоти плавлення й експериментального доказу збереження теплоти в калориметричних дослідах стали відрізняти температуру й кількість теплоти. Було сформульовано поняття теплоємності, почато дослідження теплопровідності й теплового випромінювання. При цьому одночасно затвердилися неправильні погляди на природу тепла: теплоту стали розглядати як особливого роду невагому рідину – теплород (теплоген), який не може зникати, а тільки здатний перетікати від нагрітих тіл до холодних. Теорія теплоти, відповідно до якої теплота – це вид внутрішнього руху частинок, зазнала тимчасової поразки, незважаючи на те що її підтримували й розвивали такі видатні вчені, як Ньютон, Гук, Бойль, Бернуллі, Ломоносов та інші.

3. Класична фізика (19 ст.)

На початку 19 ст. довга конкуренція між корпускулярною й хвильовою теоріями світла завершилася остаточної, здавалося б, перемогою хвильової теорії. Цьому сприяло успішне пояснення Т. Юнгом й О. Ж. Френелем явища інтерференції й дифракції світла за допомогою хвильової теорії. Ці явища властиві винятково хвильовому руху, і пояснити їх за

допомогою корпускулярної теорії представлялося неможливим. У цей же час був отриманий вирішальний доказ поперечності світлових хвиль (Френель, Д. Ф. Араго, Юнг), відкритий ще в 18 ст. Розглядаючи світло як поперечні хвилі в пружному середовищі (ефірі), Френель знайшов кількісний закон, що визначає інтенсивність переломлених і відбитих світлових хвиль при переході світла з одного середовища в інше, а також створив теорію подвійного променезаломлення.

Велике значення для розвитку фізики мало відкриття Л. Гальвані й А. Вольта електричного струму. Створення потужних джерел постійного струму – гальванічних батарей – дало можливість виявити й вивчити різноманітні дії струму. Була досліджена хімічна дія струму (Г. Дэви, М. Фарадей). В. В. Петров одержав електричну дугу. Відкриття Х. К. Ерстедом (1820) дії електричного струму на магнітну стрілку довело зв'язок між електрикою й магнетизмом. Ґрунтуючись на єдності електричних і магнітних явищ, А. Ампер прийшла до висновку, що всі магнітні явища обумовлені зарядженими частками, що рухаються (електричним струмом. Слідом за цим Ампер експериментально встановив закон, що визначає силу взаємодії електричних струмів (Ампера закон).

В 1831 Фарадей відкрив явище електромагнітної індукції. При спробах пояснення цього явища за допомогою концепції дальнодействия зустрілися значні утруднення. Фарадей висловив гіпотезу (ще до відкриття електромагнітної індукції), відповідно до якої електромагнітні взаємодії здійснюються за допомогою проміжного агента – електромагнітного поля (концепція близькодії). Це послужило початком формування нової науки про властивості й закони поводження особливої форми матерії – електромагнітного поля.

На початку 19 в. Дж. Дальтон увів у науку (1803) подання про атоми як дрібних (неподільних) частках речовини – носіях хімічної індивідуальності елементів.

У першої чверті 19 ст. закладено фундамент фізики твердого тіла. Протягом 17–18 і початку 19 вв. відбувалося нагромадження даних про макроскопічні властивості твердих тіл (металів, технічних матеріалів, мінералів і т.п.) і встановлення емпіричних законів поводження твердого тіла під впливом зовнішніх впливів (механічних сил, нагрівання, електричних і магнітних полів, світла й т.д.). Дослідження пружних властивостей привело до відкриття Гука закону (1660), дослідження електропровідності металів – до встановлення Ома закону (1826), теплових властивостей – закону теплоёмкостей Дюлонга й Пти (1819). Були відкриті основні магнітні властивості твердих тел. У цей же час була побудована загальна теорія пружних властивостей твердих тіл (Л. М. А. Навье1819–26, О. Л. Коші, 1830). Майже для всіх цих результатів характерне трактування твердого тіла як суцільного середовища, хоча вже значною частиною вчених було визнано, що тверді тіла, що є здебільшого кристалами, мають внутрішню мікроскопічну структуру.

Найважливіше значення для фізики й усього природознавства мало відкриття закону збереження енергії, що зв’язали воєдино всі явища природи. У середині 19 в. досвідченим шляхом була доведена еквівалентність кількості теплоти й роботи й таким чином установлено, що теплота являє собою не якусь гіпотетичну невагому субстанцію – теплород, а особливу форму енергії. В 40-х р. 19 в. Ю. Р. Майер, Дж. Джоуль і Г. Гельмгольц незалежно відкрили закон збереження й перетворення енергії. Закон збереження енергії став основним законом теорії теплових явищ (термодинаміки), одержавши назву першого початку термодинаміки.

Ще до відкриття цього закону С. Карно в праці "Міркування про рушійну силу вогню й про машини, здатних розвивати цю силу" (1824) одержав результати, що послужили основою для ін. фундаментального закону теорії теплоти – другого початку термодинаміки. Цей закон сформульований у роботах Р. Клаузиуса (1850) і У. Томсона (1851). Він є

узагальненням досвідчених даних, що свідчать про необоротність теплових процесів у природі, і визначає напрямок можливих енергетичних процесів.

Значну роль у побудові термодинаміки зіграли дослідження Ж. Л. Гей-Люссака, на основі яких Б. Клапейроном було знайдене рівняння стану ідеального газу, узагальнене надалі Д. И. Менделєєвим. Одночасно з розвитком термодинаміки розвивалася молекулярно-кінетична теорія теплових процесів. Це дозволило включити теплові процеси в рамки механічної картини миру й привело до відкриття нового типу законів = статистичних, у яких всі зв'язки між фізичними величинами носять ймовірнісний характер.

На першому етапі розвитку кінетичної теорії найбільш простого середовища – газу – Джоуль, Клаузиус й ін. обчислили середні значення різних фізичних величин: швидкості молекул, числа їхніх зіткнень у секунду, довжини вільного пробігу й т.д. Була отримана залежність тиску газу від числа молекул в одиниці об'єму й середній кинетической енергії поступального руху молекул. Це дозволило розкрити фізичний зміст температури як міри середньої кінетичної енергії молекул.

Другий етап розвитку молекулярно-кінетичної теорії почався з робіт Дж. К. Максвелла. В 1859, увівши вперше у фізику поняття ймовірності, він знайшов закон розподілу молекул по швидкостях. Після цього можливості молекулярно-кінетичної теорії надзвичайно розширилися *й* привели надалі до створення статистичної механіки. Л. Больцман побудував кінетичну теорію газів і дав статистичне обґрунтування законів термодинаміки. Основна проблема, що у значній мірі вдалося вирішити Больцману, полягала в узгодженні оборотного в часі характеру руху окремих молекул з очевидною необоротністю макроскопічних процесів. Термодинамічній рівновазі системи, по Больцману, відповідає максимум імовірності даного стану. Необоротність процесів зв'язана із прагненням систем до найбільш імовірного стану. Велике значення мала доведена їм теорема про рівномірний розподіл середньої кінетичної енергії по ступенях волі.

Класична статистична механіка була завершена в роботах Дж. У. Гиббса (1902), що создали метод розрахунку функцій розподілу для будь-яких систем (а не тільки газів) у стані термодинамічної рівноваги. Загальне визнання статистична механіка одержала в 20 в. після створення А. Эйнштейном і М. Смолуховским (1905–06) на основі молекулярно-кінетичної теорії кількісної теорії броуновского руху, підтвердженої в дослідах Ж.Б. Перрена.

У другій половині 19 в. тривалий процес вивчення електромагнітних явищ був завершений Максвеллом. У своїй основній роботі "Трактат про електрику й магнетизм" (1873) він установив рівняння для електромагнітного поля (носящие його ім'я), які пояснювали всі відомі в той час факти з єдиної точки зору й дозволяли пророкувати нові явища. Електромагнітну індукцію Максвелл інтерпретував як процес породження змінним магнітним полем вихрового електричного поля. Слідом за цим він пророчив зворотний ефект – породження магнітного поля змінним електричним полем. Найважливішим результатом теорії Максвелла був висновок про кінцівці швидкості поширення електромагнітних взаємодій, рівної швидкості світла. Експериментальне виявлення електромагнітних хвиль Г. Р. Герцом (1886–89) підтвердило справедливість цього висновку. З теорії Максвелла випливало, що світло має електромагнітну природу. Тим самим оптика стала одним з розділів електродинаміки. У самому кінці 19 в. П. Н. Лебедєв виявив на досвіді й виміряв тиск світла, передвіщене теорією Максвелла, а А. С. Попов уперше використав електромагнітні хвилі для бездротового зв'язку.

В 19 в. Г. Кирхгоф і Р. Бунзен заклали основи спектрального аналізу (1859). Тривав також розвиток механіки суцільних середовищ. В акустику була розроблена теорія пружних коливань і хвиль (Гельмгольц, Дж. У. Рэлей й ін.). Виникла техніка одержання низьких температур. Були отримані в рідкому стані всі гази, крім гелію, а на початку 20 ст. Х. Камерлинг-Оннес (1998) ожижив гелій.

До кінця 19 в. Фізика представлялася сучасникам майже завершеної. Здавалося, що всі фізичні явища можна звести до механіки молекул (або атомів) і ефіру. Ефір розглядалося як механічне середовище, у якій розігруються електромагнітні явища. Один з найбільших фізиків 19 ст. – У. Томсон звертав увагу лише на два непояснених факти: негативний результат Майкельсона досвіду по виявленню руху Землі щодо ефіру й незрозумілу з погляду молекулярно-кінетичної теорії залежність теплоємності газів від температури. Однак саме ці факти з'явилися першою вказівкою на необхідність перегляду основних подань фізики 19 в. Для пояснення цих і безлічі ін. фактів, відкритих згодом, знадобилося створення теорії відносності й квантової механіки.

4. Релятивістська й квантова фізика.

Фізика атомного ядра й елементарних часток

(кінець 19 ст. - 20 ст.)

Настання нової епохи у фізиці було підготовлено відкриттям електрона Дж. Томсоном в 1897. З'ясувалося, що атоми не елементарні, а являють собою складні системи, до складу яких входять електрони. Важливу роль у цьому відкритті зіграло дослідження електричних розрядів у газах.

Наприкінці 19 – початку 20 вв. Х. Лоренц заклав основи електронної теорії. На початку 20 в. стало ясно, що електродинаміка вимагає корінного перегляду подань про простір і час, що лежать в основі класичної механіки Ньютона. В 1905 Эйнштейн створив приватну (спеціальну) теорію відносності – нове навчання про простір і час. Ця теорія історично була підготовлена працями Лоренца й А. Пуанкаре.

Досвід показував, що сформульований Галилеем принцип відносності, відповідно до якого механічні явища протікають однаково у всіх инерциальных системах відліку, справедливий і для електромагнітних явищ. Тому рівняння Максвелла не повинні змінювати свою форму (повинні бути інваріантними) при переході від однієї инерциальной системи відліку до іншої. Однак виявилося, що це справедливо лише в тому випадку, якщо

перетворення координат і часу при такому переході відмінні від перетворень Галилея, справедливих у механіку Ньютона. Лоренц знайшов ці перетворення (Лоренца перетворення), але не зміг дати їм правильну інтерпретацію. Це було зроблено Эйнштейном у його приватній теорії відносності.

Відкриття приватної теорії відносності показало обмеженість механічної картини миру. Спроби звести електромагнітні процеси до механічних процесів у гіпотетичному середовищі – ефірі виявилися неспроможними. Стало ясно, що електромагнітне поле являє собою особливу форму матерії, поводження якої не підкоряється законам механіки.
В 1916 Эйнштейн побудував загальну теорію відносності – фізичну теорію простору, часу й тяжіння. Ця теорія ознаменувала новий етап у розвитку теорії тяжіння.

На рубежі 19(20 ст.), ще до створення спеціальної теорії відносності, був покладений початок найбільшої революції в області фізики, пов'язаної з виникненням і розвитком квантової теорії.

Наприкінці 19 ст. з'ясувалося, що розподіл енергії теплового випромінювання по спектрі, виведене із закону класичної статистичної фізики про рівномірний розподіл енергії по ступенях волі, суперечить досвіду. З теорії випливало, що речовина повинне випромінювати електромагнітні хвилі при будь-якій температурі, губити енергію й прохолоджуватися до абсолютного нуля, тобто що теплова рівновага між речовиною й випромінюванням неможливо. Однак повсякденний досвід суперечив цьому висновку. Вихід був знайдений в 1900 М. Планком, що показали, що результати теорії погодяться з досвідом, якщо припустити, у суперечності із класичною електродинамікою, що атоми випускають електромагнітну енергію не безупинно, а окремими порціями – квантами. Енергія кожного такого кванта прямо пропорційна частоті, а коефіцієнт пропорційності є квант дії $h = 6{,}6\times10^{-27}$ *ерг×сек,* що одержав згодом назву постійної Планка.

В 1905 Эйнштейн розширив гіпотезу Планка, припустивши, що випромінювана порція електромагнітної енергії поширюється й поглинається також тільки цілком, т.с. ведет себе подібно частці (пізніше вона була названа фотоном). На основі цієї гіпотези Эйнштейн пояснив закономірності фотоефекта, що не укладаються в рамки класичної електродинаміки.

Таким чином, на новому якісному рівні була відроджена корпускулярна теорія світла. Світло поводиться подібно потоку часток (корпускул); однак одночасно йому властиві й хвильові властивості, які проявляються, зокрема, у дифракції й інтерференції світла. Отже, несумісні з погляду класичної Фізика хвильові й корпускулярні властивості властиві світла рівною мірою (дуалізм світла). "Квантування" випромінювання приводило до висновку, що енергія внутрішньоатомних рухів також може мінятися тільки стрибкоподібно. Такий висновок був зроблений Н. Бором в 1913.

До цього часу Э. Резерфорд (1911) на основі експериментів по розсіюванню альфа-частинок речовиною відкрив атомне ядро й побудував планетарну модель атома. В атомі Резерфорда електрони рухаються навколо ядра подібно тому, як планети рухаються навколо Сонця. Однак, відповідно до електродинаміки Максвелла, такий атом нестійкий: електрони, рухаючись по круговим (або еліптичним) орбітах, випробовують прискорення, а отже, повинні безупинно випромінювати електромагнітні хвилі, губити енергію й, поступово наближаючись до ядра, зрештою (як показували розрахунки, за час порядку 10^{-8}*сек*) упасти на нього. Таким чином, стійкість атомів й їхніх лінійчатих спектрів виявилися непоясненими в рамках законів класичної Фізика Бор знайшов вихід із цих труднощів. Він постулировал, що в атомах є особливі стаціонарні стани, у яких електрони не випромінюють. Випромінювання відбувається при переході з одного стаціонарного стану в інше. Дискретність енергії атома була підтверджена досвідами Дж. Франка й Г. Герца (1913–14) по вивченню зіткнень із атомами електронів, прискорених електричним полем. Для найпростішого атома (атома водню) Бор побудував кількісну теорію спектра випромінювання, що погодиться з досвідом.

У той же період (кінець 19 ст.– початок 20 ст.) початку формуватися фізика твердого тіла в її сучасному розумінні як фізика конденсованих систем з величезного числа часток (~ 10^{22}). До 1925 її розвиток відбувався по двох напрямках: фізика кристалічних ґрат і фізика електронів у кристалах, насамперед у металах. Надалі ці напрямки зімкнулися на базі квантової теорії.

Подання про кристал як про сукупності атомів, упорядоченно розташованих у просторі й утримуваних у положенні рівноваги силами взаємодії, пройшло тривалий шлях розвитку й остаточно сформувалося на початку 20 ст. Розробка цієї моделі почалася з роботи Ньютона (1686) за розрахунками швидкості звуку в ланцюжку пружно зв'язаних часток і тривала ін. ученими: Д. й И. Бернуллі (1727), Коші (1830), У. Томсоном (1881) і ін.

Наприкінці 19 ст. Е. С. Федоров роботами за структурою й симетрією кристалів заклав основи теоретичної кристалографії; в 1890–91 він довів можливість існування 230 просторових груп симетрії кристалів – видів упорядкованого розташування часток у кристалічних ґратах(т.зв. федоровских груп). М. Лауэ (1912) зі співробітниками відкрив дифракцію рентгенівських променів на кристалах, остаточно затвердивши подання про кристал як упорядкованій атомній структурі. На основі цього відкриття був розроблений метод експериментального визначення розташування атомів у кристалах і виміру межатомных відстаней, що поклало початок рентгенівському структурному аналізу [У. Л. Брэгг н У. Г. Брэгг (1913), Г. В. Вульф (1913)]. У ці ж роки (1907–1914) була розроблена динамічна теорія кристалічних ґрат, що вже істотно враховує квантові подання. Эйнштейн (1907) на моделі кристала як сукупності квантових гармонійних осцилляторов однакової частоти пояснив спостережуване падіння теплоємності твердих тіл при зниженні температури – факт, що перебуває в різкому протиріччі із законом Дюлонга й Пти. Більше зроблена динамічна теорія кристалічних ґрат як сукупності зв'язаних квантових осцилляторов

різних частот була побудована П. Дебаем (1912), М. Борному й Т. Кишенею (1913), Э. Шрёдингером (1914) у формі, близької до сучасного. Новий важливий її етап почався після створення квантової механіки. Другий напрямок (фізика системи електронів у кристалі) початок розвиватися відразу після відкриття електрона як електронна теорія металів й ін. твердих тел. У цій теорії електрони в металі розглядалися як заповнює кристалічні ґрати газ вільних електронів, подібний звичайного розрідженого молекулярного газу, що підкоряється класичної. статистиці Больцмана. Електронна теорія дозволила дати пояснення законів Ома й Видемана – Франца (П. Друде), заклала основи теорії дисперсії світла в кристалах й ін. Однак не всі факти укладалися в рамки класичної електронної теорії. Так, не одержала пояснення залежність питомого опору металів від температури, залишався неясним, чому електронний газ не вносить помітного внеску в теплоємність металів і т.д. Вихід із труднощів, що створилися, був знайдений лише після побудови квантової механіки.

Створений Бором перший варіант квантової теорії був внутрішньо суперечливим: використовуючи для руху електронів закони механіки Ньютона, Бор у той же час штучно накладав на можливі рухи електронів квантові обмеження, далекі класичній фізиці.

Достовірно встановлена дискретність дії і її кількісна міра – постійна Планка h – універсальна світова постійна, граюча роль природного масштабу явищ природи, вимагали радикальної перебудови як законів механіки, так і законів електродинаміки. Класичні закони справедливі лише при розгляді руху об'єктів досить великої маси, коли величини розмірності дії великі в порівнянні з h и дискретністю дії можна зневажити.

В 20-і р. 20 ст. була створена найглибша й всеосяжна із сучасних фізичних теорій – квантова, або хвильова, механіка – послідовна, логічно завершена нерелятивістська теорія руху мікрочастинок, що дозволила також пояснити багато властивостей макроскопічних тіл й явища, що відбуваються в них. В основу квантової механіки лягли ідея квантування Планка –

Эйнштейна – Бора й висунута Л. де Бройлем гіпотеза (1924), що двоїста корпускулярно-хвильова природа властива не тільки електромагнітному випромінюванню (фотонам), але й кожним ін. видам матерії. Всі мікрочастинки (електрони, протони, атоми й т.д.) володіють поряд з корпускулярними й хвильовими властивостями: кожної з них можна поставити у відповідність хвилю (довжина якої дорівнює відношенню постійної Планка *h* до імпульсу частки, а частота – відношенню енергії частки до *h*). Хвилі де Бройля описують вільні частки. В 1927 р. уперше спостерігалася дифракція електронів, що експериментально підтвердила наявність у них хвильових властивостей. Пізніше дифракція спостерігалася й в ін. мікрочастинок, включаючи молекули.

Шрёдингер (1926), намагаючись одержати дискретні значення енергії атома з рівняння хвильового типу, сформулював основне рівняння квантової механіки, назване його ім'ям. В. Гейзенберг і Борн (1925) побудували квантову механіку в ін. математичній формі – т. зв. матричну механіку.

В 1925 р. Дж. Ю. Уленбек і С. А. Гаудсмит на підставі експериментальних (спектроскопічних) даних відкрили існування в електрона власного моменту кількості руху – спина (а отже, і пов'язаного з ним власного, спінового, магнітного моменту), рівного $^{1/2}$. (Величина спина звичайно виражається в одиницях – *h*/2р, що, як й *h*, називається постійної Планка; у цих одиницях спин електрона дорівнює $^{1/2}$. В. Паули записав рівняння руху нерелятивістського електрона в зовнішнім електромагнітному полі з урахуванням взаємодії спінового магнітного моменту електрона з магнітним полем. В 1925 У. Паули сформулював т.зв. принцип заборони, відповідно до якого в одному квантовому стані не може перебувати більше одного електрона. Цей принцип зіграв найважливішу роль у побудові квантової теорії систем багатьох часток, зокрема пояснив закономірності заповнення електронами оболонок і шарів у многоэлектронных атомах і таким чином дав теоретичне обґрунтування періодичній системі елементів Менделєєва.

П. А. М. Дирак (1928) одержав квантове релятивістське рівняння руху електрона, з якого природно випливала наявність в електрона спина. На підставі цього рівняння Дирак (1931) пророчив існування позитрона (першої античастинки), в 1932 р. відкритого К. Д. Андерсоном у космічних променях. [Античастинки інших структурних одиниць речовини (протона й нейтрона) – антипротон й антинейтрон були експериментально відкриті відповідно в 1955 й 1956.]

Паралельно з розвитком квантової механіки йшло розвиток квантової статистики = квантової теорії поводження фізичних систем (зокрема, макроскопічних тіл), що складаються з величезного числа мікрочастинок. Ш. Бозе (1924), застосувавши принципи квантової статистики до фотонів – часткам зі спином 1, вивів формулу Планка розподілу енергії в спектрі рівноважного випромінювання, а Эйнштейн одержав формулу розподілу енергії для ідеального газу молекул (Бозе – Эйнштейна статистика). П. А. М. Дирак й Э. Ферми (1926) показали, що сукупність електронів (і ін. однакових часток зі спином $^{1/2}$), для яких справедливий принцип Паули, підкоряється ін. статистиці – Ферми – Дирака статистиці. Паули (1940) встановив зв'язок спина зі статистикою.

Квантова статистика зіграла найважливішу роль у розвитку фізики конденсованих середовищ й у першу чергу в побудові фізики твердого тіла. Квантовою мовою теплові коливання атомів кристала можна розглядати як сукупність свого роду "часток", точніше квазічастиць, – фононів (уведені И. Е. Таммом в 1929). Такий підхід пояснив, зокрема, спад теплоємності металів (за законом T^3) с зниженням температури T у області низьких температур, а також показав, що причина електричного опору металів – розсіювання електронів не на іонах, а в основному на фононах. Пізніше були уведені ін. квазічастиці. Метод квазічастиць виявився досить ефективним для дослідження властивостей складних макроскопічних систем у конденсованому стані.

В 1928 А. Зоммерфельд застосував функцію розподілу Ферми – Дирака для опису процесів переносу в металах. Це дозволило ряд труднощів класичної теорії й створило основу для подальшого розвитку квантової теорії кінетичних явищ (электро- і теплопровідності, термоелектричних, гальваномагнітних й ін. ефектів) у твердих тілах, особливо в металах і напівпровідниках.

Відповідно до принципу Паули, енергія всієї сукупності вільних електронів металу навіть при абсолютному нулі відмінна від нуля. У незбудженому стані всі рівні енергії, починаючи з нульового й кінчаючи деяким максимальним рівнем (рівнем Ферми), виявляються зайнятими електронами. Ця картина дозволила Зоммерфельду пояснити малість внеску електронів у теплоємність металів: при нагріванні збуджуються тільки електрони поблизу рівня Ферми.

У роботах Фізика Блоха, Х. А. Беті й Л. Бриллюэна (1928–34) була розроблена теорія зонної енергетичної структури кристалів, що дала природне пояснення розходженням в електричних властивостях діелектриків і металів. Описаний підхід, що одержав назву одноелектронного наближення, мав подальший розвиток і широке застосування, особливо у фізику напівпровідників.

Я. И. Френкель і Гейзенберг (1928) показали, що в основі феромагнетизму лежить квантова обмінна взаємодія (яка на прикладі атома гелію було в 1926 р. розглянута Гейзенбергом); в 1932–33 Л. Неялина й незалежно Л. Д. Ландау пророчили антиферомагнетизм.

Відкриття надпровідності Камерлинг-Оннесом (1911) і надтекучості рідкого гелію П. Л. Капицей (1938) стимулювали розвиток нових методів у квантовій статистиці. Феноменологія. теорія надтекучості була побудована Ландау (1941); подальшим кроком з'явилася феноменологія, теорія надпровідності Ландау й В. Л. Гинзбурга (1950).

В 50-х рр. були розвинені нові потужні методи розрахунків у

статистичній квантовій теорії багаточасткових систем, одним з найбільш яскравих досягнень яких з'явилося створення Дж. Бардином, Л. Купером, Дж. Шриффером (США) і Н. Н. Боголюбовым (СРСР) мікроскопічної теорії надпровідності.

Спроби побудови послідовної квантової теорії випромінювання світла атомами привели до нового етапу розвитку квантової теорії = створенню квантової електродинаміки (Дирак, 1929).

У другій чверті 20 ст. відбувалося подальше революційне перетворення Фізика, пов'язане з пізнанням структури атомного ядра й процесів, що відбуваються в ньому, і зі створенням Фізика елементарних часток. Згадане вище відкриття Резерфордом атомного ядра було підготовлено відкриттям радіоактивності й радіоактивних перетворень важких атомів ще наприкінці 19 в. (А. Беккерель, П. і М. Кюрі). На початку 20 в. були відкриті ізотопи. Перші спроби безпосереднього дослідження будови атомного ядра ставляться до 1919, коли Резерфорд шляхом обстрілу стабільних ядер азоту а-частками домігся їхнього штучного перетворення в ядра кисню. Відкриття нейтрона в 1932 Дж. Чедвиком привело до створення сучасної протонно-нейтронної моделі ядра (Д. Д. Іваненко, Гейзенберг). В 1934 чоловік і жінка И. і Ф. Жоліо-Кюрі відкрили штучну радіоактивність.

Створення прискорювачів заряджених часток дозволило вивчати різні ядерні реакції. Найважливішим результатом цього етапу Фізика з'явилося відкриття розподілу атомного ядра.

В 1939-45 була вперше звільнена ядерна енергія за допомогою ланцюгової реакції розподілу ^{235}U і створена атомна бомба. Заслуга використання керованої ядерної реакції розподілу ^{235}U у мирних, промислових цілях належить СРСР. В 1954 у СРСР була побудована перша атомна електростанція (м. Обнинськ). Пізніше рентабельні атомні електростанції були створені в багатьох країнах.

В 1952 була здійснена реакція термоядерного синтезу (висаджений ядерний пристрій), і в 1953 створена воднева бомба.

Одночасно з фізикою атомного ядра в 20 ст. початку швидко розвиватися фізика елементарних часток. Перші більші успіхи в цій області пов'язані з дослідженням космічних променів. Були відкриті мюони, пі-мезони, до-мезони, перші гіперони. Після створення прискорювачів заряджених часток на високі енергії почалося планомірне вивчення елементарних часток, їхніх властивостей і взаємодій; було експериментально доведене існування двох типів нейтрино й відкрито багато нових елементарних часток, у тому числі вкрай нестабільні частки = резонанси, середній час життя яких становить усього 10^{-22}–10^{-24} сек. Виявлене універсальне взаїмоперетворення елементарних часток указувало на те, що ці частки не елементарні в абсолютному змісті цього слова, а мають складну внутрішню структуру, що ще має бути відкрити. Теорія елементарних часток й їхніх взаємодій (сильних, електромагнітних і слабких) становить предмет квантової теорії поля = теорії, ще далекої від завершення.

Питання та завдання для самоконтролю за змістом лекції 1

1. Охарактеризуйте становлення фізики до 17 століття н.е.
2. Вкажіть етапи формування фізики як науки
3. Охарактеризуйте зміст конкуренції між корпускулярною й хвильовою теоріями світла.
4. Вкажіть основні відкриття фізики 19 століття.
5. Охарактеризуйте поняття «класична фізика».
6. Охарактеризуйте основні відкриття фізики 20 століття.

Лекція 2

Тема: **Фундаментальні теорії фізики**

План

1. Класична механіка Ньютона.
2. Механіка суцільних середовищ.
3. Термодинаміка
4. Рівняння Клаперона
5. Статична фізика
6. Електродинаміка
7. Спеціальна теорія відносності. Релятивістська механіка.
8. Загальна теорія відносності (теорія тяжіння).
9. Квантовая механіка
10. Квантова статистика.
11. Квантова теорія поля (ктп)

1. Класична механіка Ньютона

Фундаментальне значення для всієї Фізика мало введення Ньютоном поняття стану. Спочатку воно було сформульовано для найпростішої механічної системи – системи **матеріальних точок**. Саме для матеріальних крапок безпосередньо справедливі закони Ньютона. У всіх наступних фізичних теоріях поняття стану було одним з основних. Стан механічної системи повністю визначається координатами й імпульсами всіх утворюючу систему тел. Якщо відомі сили взаємодії тіл, що визначають їхні прискорення, то за значеннями координат й імпульсів у початковий момент часу рівняння руху механіки Ньютона (другий закон Ньютона) дозволяють однозначно встановити значення координат й імпульсів у будь-який наступний момент часу. Координати й імпульси = основні величини в класичній механіці; знаючи їх, можна обчислити значення кожної ін. механічної величини: енергії, моменту кількості руху й ін. Хоча пізніше з'ясувалося, що ньютоновская механіка має обмежену область застосування,

вона була й залишається тим фундаментом, без якого побудова всього будинку сучасної Фізика бути б неможливим.

2. Механіка суцільних середовищ

Гази, рідини й тверді тіла в механіку суцільних середовищ розглядаються як безперервні однорідні середовища. Замість координат й імпульсів часток стан системи однозначно характеризується наступними функцияциями координат (x, в, *z*) і часу (*t*): щільністю *p* (*x, в, z, t*), тиском *P* (*x, в, z, t*) і гідродинамічною швидкістю *v* (*x, в, z, t*), з якої переноситься маса. Рівняння механіки суцільних середовищ дозволяють установити значення цих функцій у будь-який наступний момент часу, якщо відомі їхні значення в початковий момент і граничні умови.

Эйлера рівняння, що зв'язує швидкість плину рідини з тиском, разом з **нерозривності рівнянням**, що виражає збереження речовини, дозволяють вирішувати будь-які завдання динаміки ідеальної рідини. У гідродинаміці грузлої рідини враховується дія сил тертя й вплив теплопровідності, які приводять до диссипации механічної енергії, і механіка суцільних середовищ перестає бути "чистою механікою": стають істотними теплові процеси. Лише після створення термодинаміки була сформульована повна система рівнянь, що описує механічні процеси в реальних газоподібних, рідких і твердих тілах. Рух электропровідних рідин і газів досліджується в **магнітній гідродинаміці**. Коливання пружного середовища й поширення в ній хвиль вивчаються в **акустику.**

3. Термодинамика

Весь зміст термодинаміки є в основному наслідком двох почав: першого початку = закону збереження енергії, і другого початку, з якого треба необоротність макроскопічних процесів. Ці початки дозволяють увести однозначні функції стану: **внутрішню енергію** й **ентропію**. У замкнутих системах внутрішня енергія залишається незмінної, а ентропія зберігається тільки при рівноважних (оборотних) процесах. При необоротних процесах ентропія зростає, і її ріст найбільше повно відбиває певну спрямованість макроскопічних процесів у природі. У термодинаміку основними величинами, що задають стан системи, = термодинамічними параметрами = є

в найпростішому випадку тиск, обсяг і температура. Зв'язок між ними дається термічним рівнянням стану (а залежність енергії від обсягу й температури (калорическим рівнянням стану). Найпростіше термічне рівняння стану - рівняння стану ідеального газу.

4. Клапейрона рівняння

У класичній термодинаміці вивчають стану теплової рівноваги й рівноважні (щопротікають нескінченно повільно) процеси. Час не входить в основні рівняння. Згодом (починаючи з 30-х р. 20 в.) була створена термодинаміка нерівновагих процесів. У цій теорії стан визначається через щільність, тиск, температуру, ентропію й ін. величини (локальні термодинамічні параметри), розглянуті як функції координат і часу. Для них записуються рівняння переносу маси, енергії, імпульсу, що описують еволюцію стану системи із часом (рівняння **дифузії** й **теплопровідності, Навье – Стокса рівняння**). Ці рівняння виражають локальні (тобто справедливі для даного нескінченно малого елемента обсягу) закони збереження зазначених фізичних величин.

5. Статистична фізика (статистична механіка)

У класичній статистичній механіці замість завдання координат r_i, і імпульсів p_i часток системи задається функція розподілу часток по координатах й імпульсам, f (r_i, p_i,..., r, p, t), *що* має зміст щільності ймовірності виявлення спостережуваних значень координат й імпульсів у певних малих інтервалах у цей момент часу t (N = число часток у системі). Функція розподілу f задовольняє рівнянню руху (рівнянню Лиувилля), що має вид рівняння безперервності в просторі всіх r, і p_i (тобто у **фазовому просторі**). Рівняння Лиувилля однозначно визначає f у будь-який наступний момент часу по заданому її значенню в початковий момент, якщо відомо енергію взаємодії між частками системи. Функція розподілу дозволяє обчислити середні значення плотностей речовини, енергії, імпульсу і їхніх потоків, а також відхилення їх від середніх значень = **флуктуації**. Рівняння, що описує

еволюцію функції розподілу для газу, було вперше отримане Больцманом (1872) і називалося **кінетичним рівнянням Больцмана.** Гиббс одержав вираження для функції розподілу довільної системи, що перебуває в рівновазі з термостатом (канонічне **Гиббса розподіл**). Ця функція розподілу дозволяє по відомому вираженню енергії як функції координат й імпульсів часток (функції Гамильтона) обчислити всі **потенціали термодинамічні**, що є предметом статистичної термодинаміки.

Процеси, що виникають у системах, виведених зі стану термодинамічної рівноваги, необоротні й вивчаються в статистичній теорії нерівновагих процесів (ця теорія разом з термодинамікою нерівновагих процесів утворить **кінетику фізичну**). У принципі, якщо функція розподілу відома, можна визначити будь-які макроскопічні величини, що характеризують систему в нерівновагому стані, і простежити за їхньою зміною в просторі із часом.

Для обчислення фізичних величин, що характеризують систему (середні щільності числа часток, енергії й імпульсу), не потрібно знання повної функції розподілу. Досить більше простих функцій розподілу: одночасткових, що дають середнє число часток з даними значеннями координат й імпульсів, і двухчастичных, що визначають взаємний вплив (кореляцію) двох часток. Загальний метод одержання рівнянь для таких функцій був розроблений (в 40-х р. 20 в.) Боголюбовым, Борному, Г. Гріном (англ. фізик) і ін. Рівняння для одночасткової функції розподілу, побудова яких можливо для газів малої щільності, називаються кінетичними. До їхнього числа ставиться кінетичне рівняння Больцмана. Різновиду рівняння Больцмана для ионизованного газу (**плазми**) = кінетичні рівняння Ландау й А. А. **Власова** (30–40-і р. 20 в.).

В останні десятиліття все більшого значення набуває дослідження плазми. У цьому середовищі основну роль грають **електромагнітні взаємодії** заряджених часток, і лише статистична теорія, як правило, здатна дати відповідь на різні питання, пов'язані з поводженням плазми. Зокрема, вона дозволяє досліджувати стійкість високотемпературної плазми в зовнішнім

електромагнітному полі. Це завдання надзвичайно актуальне у зв'язку із проблемою **керованого термоядерного синтезу**.

6. Електродинаміка

Стан електромагнітного поля в теорії Максвелла характеризується двома основними векторами: напруженістю електричного поля *E* и магнітною індукцією *B, що* є функціями координат і часу. Електромагнітні властивості речовини задаються трьома величинами: **діелектричною проникністю** e, **магнітною проникністю** (і питомою **електропровідністю** s, які повинні бути визначені експериментально. Для векторів *E* и *B* і пов'язаних з ними допоміжних векторів електричної індукції *D* і напруженості магнітного поля *H* записується система лінійних диференціальних рівнянь із частками похідними – **Максвелла рівняння**. Ці рівняння описують еволюцію електромагнітного поля. За значеннями характеристик поля в початковий момент часу усередині деякого обсягу й по граничних умовах на поверхні цього обсягу можна знайти *E* и *B* у будь-який наступний момент часу. Ці вектори визначають силу, що діє на заряджену частку, що рухається з певною швидкістю в електромагнітному полі (**Лоренца силу**).

Засновник електронної теорії Лоренц сформулював рівняння, що описують елементарні електромагнітні процеси. Ці рівняння, називані **Лоренца – Максвелла рівняннями**, зв'язують рух окремих заряджених часток зі створюваним ними електромагнітним полем.

Опираючись на подання про дискретність електричних зарядів і рівняння для елементарних електромагнітних процесів, можна поширити методи статистичної механіки на дозволила розкрити фізичний зміст електромагнітних характеристик речовини e, m, s і дала можливість розраховувати значення цих величин залежно від частоти, температури, тиску й т.д.

7. Спеціальна теорія відносності. Релятивістська механіка

В основі приватної теорії відносності – фізичної теорії про простір і час при відсутності полів тяжіння – лежать два постулати: принцип відносності й незалежність швидкості світла від руху джерела. Відповідно до принципу відносності Эйнштейна, будь-які фізичні явища – механічні, оптичні, теплові й т.д. – у всіх инерциальных системах відліку при однакових умовах протікають однаково. Це означає, що рівномірний і прямолінійний рух системи не впливає на хід процесів у ній. Всі инерциальные системи відліку рівноправні (не існує виділеної, "абсолютно спочиваючої" системи відліку, як не існує абсолютні простори й часу). Тому швидкість світла у вакуумі у всіх инерциальных системах відліку однакова. Із цих двох постулатів випливають перетворення координат і часу при переході від однієї инерциальной системи до іншої – Лоренца перетворення. З перетворень Лоренца виходять основні ефекти приватної теорії відносності: існування граничної швидкості, що збігає зі швидкістю світла у вакуумі *з* (будь-яке тіло не може рухатися зі швидкістю, що перевищує *з,* і *з* є максимальною швидкістю передачі будь-яких взаємодій); відносність одночасності (події, одночасні в одній инерциальной системі відліку, у загальному випадку не одночасні в іншій); уповільнення перебігу часу й скорочення поздовжніх – у напрямку руху = розмірів тіла (всі фізичні процеси в тілі, що рухається зі швидкістю *v* щодо деякої инерциальной системи відліку, протікають в ?раз повільніше, ніж ті ж процеси в даної инерциальной системі, і в стільки ж раз зменшуються поздовжні розміри тіла). З рівноправності всіх инерциальных систем відліку треба, що ефекти вповільнення часу й скорочення розмірів тіл є не абсолютними, а відносними, залежними від системи відліку.

Закони механіки Ньютона перестають бути справедливими при більших (порівнянних зі швидкістю світла) швидкостях руху. Відразу ж після створення теорії відносності були знайдені релятивістські рівняння руху, що узагальнюють рівняння руху механіки Ньютона. Ці рівняння придатні для опису руху часток зі швидкостями, близькими до швидкості світла.

Виняткове важливе значення для Фізика одержали два наслідки релятивістської механіки: залежність маси частки від швидкості й універсальний зв'язок між енергією й масою

При більших швидкостях руху будь-яка фізична теорія повинна задовольняти вимогам теорії відносності, тобто бути релятивістськи-інваріантної. Закони теорії відносності визначають перетворення при переході від однієї инерциальной системи відліку до інший не тільки координат і часу, але й будь-якої фізичної величини. Ця теорія випливає із принципів інваріантості, або симетрії у фізиці

8. Загальна теорія відносності (теорія тяжіння)

З чотирьох типів фундаментальних взаємодій – гравітаційн, електромагнітних, сильної й слабких – першими були відкриті гравітаційні взаємодії, або сили тяжіння. Протягом більше двохсот років ніяких змін в основи теорії гравітації, сформульованої Ньютоном, внесено не було. Майже всі наслідки теорії перебували в повній згоді з дослідом.

В 2-м десятилітті 20 ст. класична теорія тяжіння була революційним образом перетворена Эйнштейном. Теорія тяжіння Эйнштейна, на відміну від всіх інших теорій, була створена без стимулюючої ролі нових експериментів, шляхом логічного розвитку принципу відносності стосовно до гравітаційних взаємодій, і одержала назву загальної теорії відносності. Эйнштейн по-новому інтерпретував установлений ще Галилеем факт рівності гравітаційної й інертної мас (див. Маса). Ця рівність означає, що тяжіння однаковим образом викривляє шляхи всіх тел. Тому тяжіння можна розглядати як скривлення самого простору-часу. Теорія Эйнштейна розкрила глибокий зв'язок між геометрією простору-часу й розподілом і рухом мас. Компоненти т.зв. метричного тензора, що характеризують метрику простору-часу, одночасно є потенціалами гравітаційного поля, тобто визначають стан гравітаційного поля. Гравітаційне поле описується нелінійними рівняннями Эйнштейна. У наближенні слабких полів з них випливає існування гравітаційних хвиль, поки не виявлених експериментально

Гравітаційні сили – самі слабкі з фундаментальних сил у природі. Для протонів вони приблизно в 10^{36} разів слабкіше електромагнітних. У сучасній теорії елементарних часток гравітаційні сили не враховуються, тому що думають, що вони не грають помітної ролі. Роль гравітаційних сил стає вирішальної при взаємодіях тіл космічних розмірів; вони визначають також структуру й еволюцію Всесвіту.

Теорія тяжіння Эйнштейна привела до нових подань про еволюції Всесвіту. У середині 20-х рр. А. А. Фридман знайшов нестаціонарне рішення рівнянь гравітаційного поля, що відповідає Всесвіту, що розширюється. Цей висновок був підтверджений спостереженнями Э. Хаббла, що відкрило закон червоного зсуву для галактик (означаючий, що відстані між будь-якими галактиками збільшуються із часом). Ін. приклад пророкування теорії = можливість необмеженого стиску зірок досить великої маси (більше 2–3 сонячних мас) з утворенням т.зв. "чорних дір". Є певні вказівки (спостереження за подвійними зірками = дискретними джерелами рентгенівських променів) на існування подібних об'єктів. Загальна теорія відносності, як н квантова механіка, – великі теорії 20 в. Всі попередні теорії, включаючи спеціальну теорію відносності, звичайно відносять до класичної фізики (іноді класичною фізикою називають всю неквантову фізику).

9. Квантовая механика

Стан мікрооб'єкта у квантовій механіці характеризується хвильовою функцією у. Хвильова функція має статистичний сенс (Борн, 1926): вона являє собою амплітуду ймовірності, тобто квадрат її модуля, $\hat{e}y\hat{e}^2$, є щільність імовірності знаходження частки в даному стані. У координатному поданні y = y(*x, в, z, t*) і величина $\hat{e}y\hat{e}^2 Dx Dy Dz$ визначає ймовірність того, що координати частки в момент часу *t* лежать усередині малого обсягу $Dx Dy Dz$ біля крапки з координатами *x, в, z*. Еволюція стану квантової системи однозначно визначається за допомогою Шрьодингера рівняння.

Хвильова функція дає повну характеристику стану. Знаючи у, можна обчислити ймовірність певного значення будь-який стосовної до частки (або системі часток) фізичні величини й середні значення всіх цих фізичних величин. Статистичні розподіли по координатах й імпульсам не є незалежними, із чого треба, що координата й імпульс частки не можуть мати одночасно точних значень (принцип невизначеності Гейзенберга); їх разбросы зв'язані невизначеностей співвідношенням. Співвідношення невизначеностей має місце також для енергії й часу.

У квантовій механіці момент імпульсу, його проекція, а також енергія при русі в обмеженій області простору можуть приймати лише ряд дискретних значень. Можливі значення фізичних величин є власними значеннями операторів, які у квантовій механіці ставляться у відповідність кожній фізичній величині. Фізична величина приймає певне значення з імовірністю, рівній одиниці, лише в тому випадку, якщо система перебуває в стані, зображуваному власною функцією відповідного оператора.

Квантова механіка Шредингера (Гейзенберга) не задовольняє вимогам теорії відносності, тобто є нерелятивістською. Вона застосовна для опису руху елементарних часток й їхніх систем, що складають, зі швидкостями, багато меншими швидкості світла.

С допомогою квантової механіки була побудована теорія атомів, пояснена хімічний зв’язок, у тому числі зрозуміла природа ковалентного хімічного зв'язку; при цьому було відкрите існування специфічної обмінної взаємодії – чисто квантового ефекту, що не має аналога в класичній фізиці. Обмінна енергія відіграє головну роль в утворенні ковалентного зв'язку як у молекулах, так й у кристалах, а також у явищах феромагнетизму й антиферомагнетизму. Ця енергія має важливе значення у внутрішньоядерних взаємодіях.

Такі ядерні процеси, як а-розпад, удалося пояснити тільки за допомогою квантового ефекту проходження часток крізь потенційний бар'єр.

Була побудована квантова теорія розсіювання, *що* приводить до істотно інших результатів, чим класична теорія розсіювання. Зокрема, виявилося, що при зіткненнях повільних нейтронів з ядрами поперечний переріз взаємодії в сотні разів перевищує поперечні розміри часток, що зіштовхуються. Це має винятково важливе значення для ядерної енергетики.

На основі квантової механіки була побудована зонна теорія твердого тіла.

З квантової теорії змушеного випромінювання, створеної Ейнштейном ще в 1917 р., в 50-х рр. виник новий розділ радіофізики: були здійснені генерація й посилення електромагнітних хвиль за допомогою квантових систем. М. Г. Басов, А. М. Прохоров і незалежно Ч. Таунс створили мікрохвильовий квантовий генератор (мазер), у якому використалося змушене випромінювання збуджених молекул. В 60-х рр. був створений лазер – квантовий генератор електромагнітних хвиль у видимому діапазоні довжин хвиль.

10. Квантова статистика

Подібно тому, як на основі класичних законів руху окремих часток була побудована теорія поводження великої їхньої сукупності = класична статистика, на основі квантових законів руху часток була побудована квантова статистика. Остання описує поводження макроскопічних об'єктів у тому випадку, коли класична механіка незастосовна для опису руху їхніх часток, що складають. У цьому випадку квантові властивості мікрооб'єктів чітко проявляються у властивостях макроскопічних тел.

Математичний апарат квантової статистики істотно відрізняється від апарата класичної статистики, тому що, як говорилося вище, деякі фізичні величини у квантовій механіці можуть приймати дискретні значення. Але зміст самої статистичної теорії рівноважних станів не перетерпіло глибоких змін. У квантовій статистиці, як і взагалі у квантовій теорії систем багатьох часток, важливу роль грає принцип тотожності однакових часток. У класичній статистиці приймається, що перестановка двох однакових (тотожних) часток

міняє стан. У квантовій статистиці стан системи не міняється при такій перестановці. Якщо частки (або квазичастицы) мають цілий спин (вони називаються бозонами), то в тому самому квантовому стані може перебувати будь-яке число часток. Системи таких часток описуються Бозе – Эйнштейна статистикою. Для будь-яких часток (квазичастиц) з напівцілим спином (ферміонів) справедливий принцип Паули, і системи цих часток описуються Ферми = Дирака статистикою.

Квантова статистика дозволила обґрунтувати теорему Нернста (третій початок термодинаміки) – прагнення ентропії до нуля при абсолютній температурі $T = 0$.

Квантова статистична теорія рівноважних процесів побудована в настільки ж закінченій формі, як і класична. Закладені також основи квантової статистичної теорії нерівновагих процесів. Рівняння, що описує нерівновагі процеси у квантовій системі й називане основним кінетичним рівнянням, дозволяє в принципі простежити за зміною в часі ймовірності розподілу по квантових станах системи.

11. Квантова теорія поля (ктп)

Наступний етап у розвитку квантової теорії – поширення квантових принципів на системи с. нескінченним числом ступенів волі (**поля фізичні**) і опис процесів народження й перетворення часток – привів до КТП, що найбільше повно відбиває фундаментальну властивість природи – корпускулярно-хвильовий дуалізм.

У КТП частки описуються за допомогою квантованих полів, що представляють собою сукупність операторів народження й поглинання часток у різних квантових станах. Взаємодія квантованих полів приводить до різних процесів випущення, поглинання й перетворення часток. Любою процес у КТП розглядається як знищення одних часток у певних станах і поява інших у нових станах.

Спочатку КТП була побудована стосовно до взаємодії електронів, позитронів і фотонів (квантова електродинаміка). Взаємодія між зарядженими частинками, відповідно до квантової електродинаміки, здійснюється шляхом обміну фотонами, причому електричний заряд *e* частинки представляє константу, що характеризує зв'язок поля заряджених часток з електромагнітним полем (полем фотонів).

Питання та завдання для самоконтролю за змістом лекції 2

1. Вкажіть основні фундаментальні теорії у фізиці.
2. Охарактеризуйте класичну та статистичну механіку.
3. Охарактеризуйте квантові теорії.

Лекція 3

Тема. **Маса**

План

1. Маса як міра інертності.
2. Маса у законах І. Ньютона.
3. Зважування та похибки зважування.

Матерія утворює Всесвіт, складає об'єктивну реальність, яку люди пізнають через різноманітні властивості реальності. У науці поняття матерії вводиться як фізичне поняття. Поняття матерії широко використовується, наприклад, у фізиці, філософії тощо. У другій половині 17 століття І. Ньютон вперше ввів поняття **маса** як шматок (кусок, комок) матерії, що спростило пізнання властивостей матерії, у першу чергу, таких як інертність, гравітаційна взаємодія та енергоємність матеріальних об'єктів (фізичних тіл, у подальшому, тіл).

Інерція - явище, яке спостерігається в інерціальних системах відліку, тобто в системах відліку, які рухаються без прискорення. Явище інерції складає основу 1-ого закону класичної фізики І. Ньютона і проявляється у збереженні стану руху (величини і напрямку швидкості) тіл.

Інертність (в'ялість, млявість) - властивість тіла відкликатися на дію на нього збоку іншого тіла (зовнішньої сили $\vec{F}$) і відповідним чином змінювати стан свого руху. Ця властивість тіл складає основу 2-ого закону Ньютона:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m \cdot \vec{a}, \qquad (1)$$

де m – маса, $\vec{a}$ – прискорення, $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ – імпульс тіла. У виразі (1) маса m - міра інертності тіла, коефіцієнт пропорційності між величиною зовнішньої дії на це тіло і величиною зміни стану руху (зміни швидкості) самого тіла. Як видно з виразу (1), дія однієї і тієї ж сили на різні тіла з різними масами проявиться різними значеннями прискорення; при цьому різні тіла проявлять свої різні міри інертності, тобто маси. У той же час одне і

те ж тіло під дією різних сил по-різному буде змінювати свою швидкість, але завжди пропорційно величині діючої на нього сили.

Як відомо, закони класичної механіки Ньютона справедливі при малих швидкостях руху тіл відносно швидкості світла у вакуумі (с = $3\cdot10^8$ м/с), яка є найбільшою швидкістю передачі інформації. Згідно з законами релятивістської механіки А.Ейнштейна, маса тіла нелінійно зростає з підвищенням швидкості руху v цього тіла:

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad , \qquad (2)$$

де m_o – маса тіла при $v = 0$ *або* $v/c \approx 0$. Зростання маси тіла згідно (2) пояснюється ростом енергії цього тіла за рахунок енергії зовнішніх сил по відношенню до цього тіла на величину

$$(m - m_o)c^2 = mc^2 - m_oc^2 = E - E_o = \Delta W \quad , \qquad (3)$$

де $E_o = m_oc^2$ – енергія покою тіла.

Як видно з (3), маса є мірою енергії тіла. Ця властивість маси проявляється при перетвореннях в ядрах атомів, при взаємодії елементарних частинок, у космосі.

Тіла як матеріальні об’єкти взаємодіють не тільки у безпосередньому контакті (тобто на відстанях між їх центрами, рівних розмірам цих об’єктів), але й на деякій відстані один від одного. Кожне тіло масою m_1 навколо себе викликає (в польовій формі матерії) такий стан навколишнього середовища, який дозволяє даному тілу притягувати до себе інше тіло масою m_2 згідно з законом всесвітнього тяжіння І.Ньютона

$$\vec{F} = -G\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}\vec{e}_r = \vec{g}_1 \cdot m_2 \quad , \qquad (4)$$

де $G = 6{,}672\cdot10^{-11}$ *Н·м²/кг²* - гравітаційна стала, r - відстань між тілами m_1 и m_2, які при цьому вважаються матеріальними точками, $\vec{e}_r$ - одиничний вектор, орт радіуса-вектора $\vec{r}$, точка прикладення якого зв’язана з тілом масою m_1,

$$\vec{g}_1 = -G\frac{m_1}{r^2}\vec{e}_r \qquad (5)$$

– напруженість гравітаційного поля навколо першого тіла у точці простору, де знаходиться друге тіло.

Як видно з (4), сила гравітаційної взаємодії тіла масою m_1 з іншим тілом пропорційна інертній масі m_2 цього (другого) тіла. І.Ньютон (у 17 столітті) спеціальними дослідами доводив, що маса тіла, яка приймає участь у гравітаційній взаємодії, співпадає з відносною точністю у $1{,}6\cdot10^{-5}$ з інертною масою того ж тіла. Точність такого співпадання значно вища у дослідах на сучасних приладах і складає $1\cdot10^{-12}$. На цей час немає фактів, які не підтвердили б такої пропорційності інертної і гравітаційної мас будь-якого тіла в межах класичної фізики. У релятивістській фізиці відсутні поняття інертної і гравітаційної мас тіла.

В результаті взаємодії тіл друге тіло (масою m_2) змінить свою швидкість і буде рухатись з прискоренням g_1 у напрямку сили F. Таке прискорення називається прискоренням вільного падіння одного тіла на поверхню другого тіла, оскільки немає інших причин для зміни швидкості тіла, яке ми вивчаємо. Це прискорення співпадає за величиною і за напрямком з напруженістю поля гравітації в даній точці цього поля.

На підставі досліду і 2-ого закону Ньютона маса є а)скалярною величиною, тобто величина маси не залежить від напрямку; б)адитивною величиною, тобто величина маси тіла є алгебраїчною сумою мас його частин:

$$m = \sum_{i=1}^{N} m_i \,, \qquad (6)$$

де m_i - маса i-ої частини тіла.

Знання маси тіла дуже плідне у всіх сферах діяльності людини. Для вимірювання маси у системі фізичних одиниць *SI* введена одиниця маси — кілограм – як одна з основних одиниць. За еталон маси вибрана маса циліндра із сплаву *Pt-Ir* діаметром 39 мм і такої ж висоти.

Визначити невідому масу можливо, порівнючи масу тіла, яке нас цікавить, з еталоном маси (або з його копією, якою є гирька до терезів) шляхом порівняння сил притягування до Землі (ваги) досліджуваного тіла і еталона: $m_m\vec{g} = m_{em}\vec{g}$. (7)

Порівняти ваги двох і більше тіл можливо з допомогою пружинних терезів. Як відомо, вага тіла - це сила пружності, яка виникає в іншому тілі (наприклад, підставці) при одновісній деформації останнього в результаті статичної дії на нього досліджуваного тіла. У пружинних терезів є суттєві недоліки: а)значна нестабільність їх пружних властивостей; б)малий діапазон пропорційності між величини абсолютної деформації і зовнішнім навантаженням.

Для визначення маси тіла зручніше використати важільні терези, які дають більш точне визначення маси, стабільне і у значному діапазоні величин. Важільні терези можуть бути рівноплечі і різноплечі, і в той же час можуть бути аналітичні або технічні. Аналітичні рівноплечі терези найбільш точні і прості у використанні (Мал. 1).

Фізичною основою визначення маси з допомогою важільних терезів є рівність моментів сил

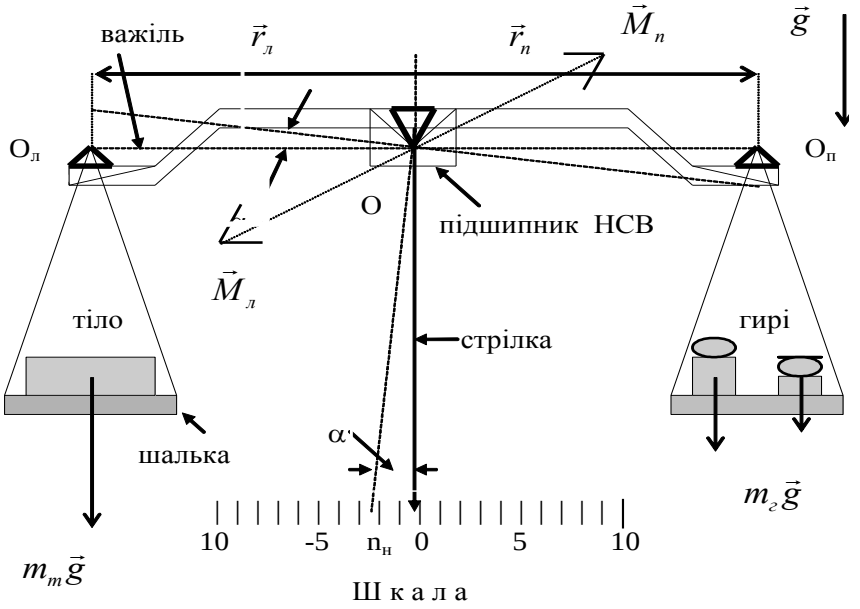
$$\vec{M}_л = -\vec{M}_п \quad \Rightarrow \quad \vec{M} = \vec{M}_л + \vec{M}_п = 0, \qquad (8)$$

які діють на праве ($OO_п$) і на ліве ($OO_л$) плечі важіля $O_лOO_п$. Важілем терезів вважається відрізок прямої лінії, який з'єднує вершини трьох призм: центральної О, навколо якої може обертатися важіль, і кінцевих $O_л$ та $O_п$ (обидві повернуті вверх), навколо котрих можуть обертатися шальки терезів.

Момент сили - фізична величина, яка дорівнює вектору

$$\vec{M} = \left[\vec{r} \cdot \vec{F}\right], \qquad (9)$$

де $\vec{r}$ - радіус-вектор точки прикладення вектора сили $\vec{F}$. Напрямок дії $\vec{F}$ перпендикулярний векторові $\vec{r}$. Напрямок моменту сили визначається за 'правилом свердлика правого'.



Мал. 1. Рівноплечі важільні терези

Величина (модуль) моменту сили залежить від модулів векторів і визначається як

$$M = r \cdot F \cdot \sin\alpha\,, \qquad (10)$$

де $\alpha = (\vec{r}, \vec{F})$ - кут між векторами $\vec{r}$ і $\vec{F}$. Оскільки ці вектори взаємно перпендикулярні, вираз (10) запишемо як

$$M = r \cdot F\,. \qquad (10а)$$

Одна і та ж сила дає різне значення моменту сили $\vec{M}$ у залежності від величини радіуса-вектора $\vec{r}$ (довжини плеча цієї сили або її проекції на перпендикуляр до $\vec{r}$). У рівноплечого важіля

$$\vec{r}_л = -\vec{r}_п \qquad (11)$$

(за визначенням). Сила, що діє на ліве плече важіля, є силою тяжіння досліджуваного тіла:

$$\vec{F}_л = m_m \cdot \vec{g}\,, \qquad (12а)$$

а сила, що діє на праве плече цього ж важіля, є теж силою тяжіння, але ж силою тяжіння гирь (важків): $\vec{F}_п = m_г \cdot \vec{g}$. (12б)

Тоді рівність моментів (1) запишемо як

$$\left[\vec{r}_л \cdot m_m \cdot \vec{g}\right] = -\left[\vec{r}_п \cdot m_г \cdot \vec{g}\right] \;\Rightarrow\; m_m\left[\vec{r}_л \cdot \vec{g}\right] = -\,m_г\left[\vec{r}_п \cdot \vec{g}\right] \quad . \qquad (13)$$

Оскільки в одній і тій же точці поверхні Землі напруженість поля гравітації $\vec{g}$ одна й та і для досліджуваного тіла, і для еталона (важків), а також враховуючи вираз (11), вираз (13) вироджується у рівність :

$$m_m = m_г \qquad (14)$$

Як випливає з виразу (14), при виконанні умов ‘горизонтальної’ рівноваги рівноплечого важіля ($\vec{r}_л \perp \vec{g}$ або $\vec{r}_п \perp \vec{g}$, $F_m = F_г$, $M_л = M_п$) маса, яку ми визначаємо, дорівнює масі важків на правій шальці терезів:

$$r_л / r_п = m_п / m_л = 1 \qquad (15)$$

Стрілка терезів (завжди перпендикулярна до лінії важіля) вказує на ‘технічний нуль’ шкали терезів і за напрямленням співпадає з напрямком вектора напруженості поля гравітації $\vec{g}$. Центр мас важіля разом з досліджуваним тілом і важками співпадає з геометричним центром важіля і проектується в вершину О центральної призми. З боку підшипника нерухомої системи відліку (стойки терезів) на важіль протидіє сила пружності, яка дорівнює силі ваги означеному центру мас. Важіль може бути і у положенні ‘негоризонтальної’ рівноваги. Важіль відхилиться на кут α від лінії горизонту і займе стабільне положення негоризонтальної рівноваги. Стрілка терезів теж відхилиться від вертикалі на той же кут α і зупиниться біля поділки шкали $n_н$. Співвідношення (15) теж справедливе, приймає інше значення:

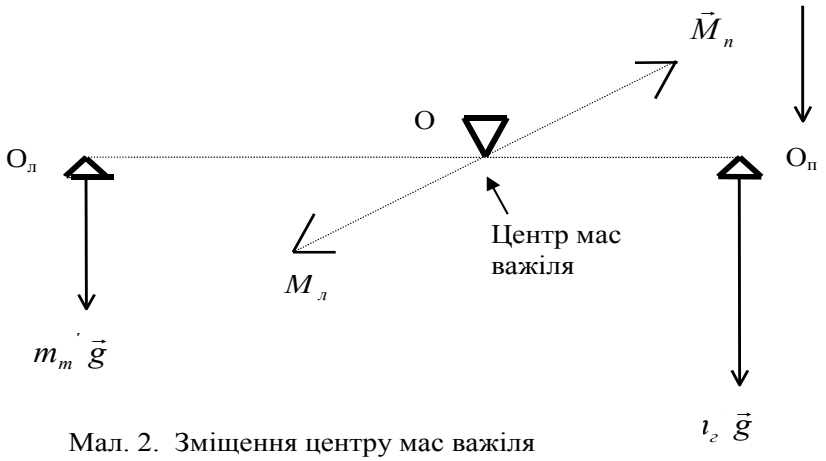
$$r_л' / r_п' = m_п' / m_л', \neq 1 \qquad (16)$$

При $m_г' \succ m_m'$ співвідношення (16) стало більше одиниці, тобто $r_л' \succ r_п'$. Це означає, що центр мас важіля перемістився вправо від призми О, важіль став нерівноплечим, довжина плеча сили $\vec{F}_л$ збільшилася на стільки, щоб знову виконувались умови рівноваги (13) при порушенні рівності мас (14) завжди(Мал. 2).

Для визначення маси тіла m_m по масі важків згідно (14) зменшуємо масу важків до умов, при яких виконується співвідношення (15). Для пошуку

‘горизонтальної’ рівноваги треба багато часу. Щоб зменшити витрати часу на пошук умов (15), використовують шкалу терезів і так звану ціну найменшої поділки шкали. В цьому випадку масу досліджуваного тіла знаходять як

$$m_m = m_г + \Delta m \ , \qquad (17)$$



Мал. 2. Зміщення центру мас важіля у бік більшої маси при ‘негоризонтальній’ рівновазі

де Δm - маса важків, які ми з лишком або з недостачею поклали на праву шальку терезів і визначаємо з допомогою шкали терезів обчисленням, $m_г$ - маса важків на правій шальці терезів, які підраховують при зніманні важків з шальки.

До комплекту аналітичних терезів входять важки частіше всього 100 г, 50 г, 20 г і 20 г, 10 г, 5 г, 2 г і 2 г, 1 г, 500 мг, 200 мг , 100 мг, 50 мг, 20 мг, 10 мг. Якщо потрібні важки дрібніші 10 мг, яких немає у комплекті терезів, використовують так званий рейтер - важок з тонкого дроту у вигляді петлі, а також шкалу терезів. Рейтер кладуть на засічку плеча важіля, на яке діє менша сила. Зміна положення рейтера на одну засічку в бік центральної призми О або в бік кінцевої призми (напр., $O_л$) еквівалентна зміні навантаження на відповідне плече важіля на 0,2 мг. Так, за допомогою рейтера можливо змінювати навантаження на важіль в межах $(0\cdots10)$ *мг* через кожні 0,2 *мг*.

Шкала терезів використовується як координатна вісь з відомою масштабною одиницею - ціною найменшої поділки шкали, яка визначається так:

$$b_o = {m_в}/{\Delta k} = \frac{m_в}{|n_в - n_{нн}|} \quad \frac{мг}{под\text{і}л}, \qquad (18)$$

де $\Delta k = |n_н - n_{нн}|$ - кількість поділок шкали, на яку відхилилася стрілка в результаті навантаження однієї з шальок важком відомої маси $m_в$; $n_{нн}, n_в$ - так звана нульова точка терезів, поділка шкали, проти якої зупинилась стрілка в стані рівноваги важіля з ненавантаженими шальками, а потім з важком відомої маси. Величина $m_в$ повинна бути такою, щоб вона змогла відхилити стрілку в межах $(1 \prec \Delta k \prec 10)$ поділок шкали терезів. Ціна найменшої поділки шкали терезів – маса такого важка, дія якого на шальку терезів привела до відхилення стрілки на одну поділку шкали. Величина, обернена до ціни поділки,

$${1}/{b_o} = c \quad \frac{под\text{і}л}{мг} \qquad (19)$$

називається чутливістю терезів і визначається кількістю поділок шкали, на які відхилиться стрілка під дією важка масою 1 мг на будь-яку шальку. Чутливість терезів зменшується при зростанні навантаження на шальки і зношуванні вершини призми О. На терезах визначають масу в зазначених на них межах. В перервах між зважуваннями (а це складає більшість часу роботи з терезами) важіль з шальками кладуть на спеціальні підставки, тобто терези в неробочому стані необхідно аретирувати, щоб зменшити зношування призм.

Точність визначення маси зв’язана з ціною поділки шкали. Аналітичні терези дозволяють визначати масу тіл з точністю до 0,1 мг, мають малий коефіцієнт затухання важіля, що значно збільшує час проведення досліду. Точність зважування може зменшитись через те, що плечі важіля відрізняються довжиною (хоча б і незначно). Для підвищення точності зважування з цієї причини використовують а)метод подвійного зважування

Гаусса спочатку на одній шальці, потім на другій; б)метод тарування Борда на одній і тій же шальці з допомогою дрібного піску і т.п.; в)метод сталого навантаження Менделєєва тощо. Кожного зважування визначають нульову точку терезів як фізичний нуль, тому що постійно відбуваються зміни технічних умов зважування. Технічний нуль шкали терезів є орієнтиром для визначення фізичного нуля. Для скорочення часу зважування декілька (5··7) початкових максимальних зміщень стрілки записують у таблицю, а потім з допомогою такої таблиці визначають фізичний нуль терезів.

Питання та завдання для самоконтролю за змістом лекції 3

1. Охарактеризуйте поняття «маса» та «інертність» за І.Ньютоном.
2. Вкажіть властивості маси.
3. Вкажіть умови зміни маси
4. Охарактеризуйте процес та теоретичні підстави зважування тіл.

Лекція 4

***Тема*: Час**

План

1. Поняття часу та життя матеріального об’єкту.
2. Способи та прилади для виміру часу. Одиниці виміру часу.
3. Поняття про подію та її характеристики

Усі матеріальні об'єкти постійно змінюються, що характеризується властивістю, названою *ч а с о м.* Кожен МО (у т.ч. і фотон), що існує поруч із іншими МО, відчуває на собі вплив (дію) цих МО. Така дія характеризується властивістю сили й проявляється а) для ЕЧ у зближенні з іншими МО чи віддаленні від цих МО, б) для складних МО в переміщенні одних структурних частинок цих МО по відношенню до інших структурних частинок усередині цих же МО (що викликає напруженість всередині таких МО) і можливому переміщенні самого МО як цілого.

Час – властивість матерії, обумовлена послідовністю явищ МО стосовно інших МО або однієї частини МО стосовно іншої частини даного МО. **Життя** матеріального об'єкта – проміжок часу як сукупність послідовних явищ МО, в результаті яких даний МО зберігає біля третини своїх початкових властивостей (характеристик). Сам МО не може визначити змін своїх властивостей. Зміни властивостей даного МО може виявити інший, сторонній МО, явища якого може спостерігати у свою чергу даний МО, або в результаті черги змін усередині цього ж МО.

Для кількісного визначення життя МО було обрано еталон (одиниця) часу – секунда. Поняття секунди виходить від слова лат. «secunda» у змісті, що кожна інша, наступна мить точно така ж як і попередня (тобто перша). Еталон – прийнята за одиничне значення якась властивість МО й придатна для будь-яких МО однієї природи з еталоном.

Спочатку чисельне значення секунди як одиниці проміжку часу визначалося тривалістю одного удару серця «усередненої» людини. У фізиці

тривалість секунди обрано об'єктивно, для всіх МО однакова, заснована на повторюваному (періодичному) процесі. Розрізняють: а) атомну секунду, відтворену цезієвими еталонами частоти й рівну 9 293 631 770 періодам випромінювання під час відповідного енергетичного переходу між двома рівнями надтонкої структури основного стану атома цезію $_{55}Cs^{133}$ (прийнято в 1967 році), і б) ефемерідну секунду, розмір якої пов'язаний з періодом обігу Землі навколо Сонця й дорівнює $\frac{1}{31556\,925{,}9747}$ тропічного року. Тропічний рік – проміжок часу між двома послідовними проходженнями Сонця через стан весняного рівнодення, що дорівнює 365,242 середньої сонячної доби або 31 556 925,9747 секунд. І. Ньютон відзначав: 'Природна сонячна доба, яку ми вважаємо завжди однаковою, у дійсності не є однакова'

Оцінки атомної й ефемерідної секунд збігаються з точністю $2\cdot10^{-9}$ при відносній точності атомних годин $\pm\ 1\cdot10^{-11}$.

І.Ньютон ввів поняття абсолютного й відносного часу: а)'абсолютний, математичний, щирий час саме по собі й по самій своїй сутності без усякого відношення до чого-небудь протікає рівномірно...'; б) 'час відносний, повсякденний вимірюється приладами'. Згідно сучасній фізиці, заснованій на релятивістській теорії, є лише відносний час.

Прилад, що дозволяє визначати проміжки часу між подіями, називається годинником. Годинник як зовнішній пристрій стосовно даного МО потрібен для координації (погодженості) дій двох і більше МО, явища яких можна взаємно спостерігати цими МО (тобто ці явища одночасні). Годинник потрібен суспільству (громаді), щоб упорядкувати енергетичні можливості окремого громадянина (і суспільства в цілому) згідно законам збереження.

Годинники можуть бути природні (напр., видимий добовий рух Сонця, розпад радіоактивної речовини) і штучні (напр., рух маятника, заряд-розряд конденсатора). У класичній механіці транспортування годинників не впливає на їхні показання в порівнянні з нерухомими годинниками, оскільки існує

нескінченно швидкий сигнал (який передає точний час), за допомогою якого всі годинники у просторі автоматично встановлюють однакові показання.

Подія – сукупність місця в 3-мірному просторі (*x,y,z*) і часу (*t*), світова крапка в чотирьох-мірному просторі-часі. Світова точка – локальний у просторі й часі фізичний процес (акт) будь-якої фізичної природи з єдиною характеристикою (*x,y,z,t*) та інваріантістю як факт для всіх інерційних систем відліку (ІСВ).

У роботі годинників використано періодичний процес – строго й багаторазово повторювана послідовність явищ МО, у результаті якої МО повертається у початкове положення в обраній системі координат (ОСК). Тривалість такого процесу (середня тривалість однієї такої послідовності явищ у просторі) названа періодом *T*. Період може бути дольним або кратним одній секунді. Періодичний процес характерний обертальному й коливальному рухам, при яких траєкторія тіла замкнута й обмежена у просторі.

Послідовність явищ МО стосовно до інших МО (наприклад, траєкторію руху МО) можна строго повторити, але не можна повторити (повернути) явища усередині самого МО. Повтор послідовності явищ даного МО пов'язане з відновленням характеристик (властивостей) цього МО за рахунок інших МО або частинок даного МО. Даний МО за рахунок своїх ресурсів може відтворити тільки зовнішні умови свого життя, але не самого себе, не може відновити своє життя. Це й визначає односпрямованість послідовності явищ МО, часу, життя МО.

Вважається, що існують не менш двох МО, які один у одного є свідками послідовності явищ кожної МО. Послідовність явищ кожного МО можна представити відповідною безліччю таких явищ. МО живуть одночасно якусь (однакову для всіх) послідовність явищ, тобто безлічі явищ всіх МО перетинаються й утворюють підмножину загальних для них явищ.

Кожен МО одержує інформацію про послідовності явищ (про життя) іншого МО за допомогою носія інформації, що з величезною та кінцевою

швидкістю в порівнянні зі швидкістю переходу одного явища МО в інше досліджуваного МО переміщається між МО. У результаті взаємного обміну інформацією ці речовинні МО утворюють новий, складний МО. Таким носієм інформації може бути фотон, цуг електромагнітної хвилі як суб'єкт польової форми матерії (ПФМ). Кінцівка швидкості фотона усередині тієї частини ПФМ, що заповнює складний МО, викликана кінцевим значенням швидкості ’народження’ й ’поглинання’ фотона. Різним за складністю МО відповідає різна швидкість розповсюдження носія інформації. Якщо прийняти швидкість поширення фотона у вакуумі близької $3 \cdot 10^8$ м/с, то в склі швидкість фотона зменшується в $n = 1.5$ разів, що відповідає показнику заломлення світла в склі.

Вакуум – речовинна порожнеча, область простору, утвореного речовинними МО, в якій немає речовинних об'єктів. У вакуумі є матерія в польовій формі дуже малої щільності, у вигляді електромагнітного поля. Як у речовинній формі, так й у польовій формі матерія безупинно змінюється, що приводить до так званого флуктуаційного (випадкового) народження різного роду віртуальних частинок, які не можуть довгостроково існувати поза зв'язком з польовою формою. Флуктуації – випадкові відхилення фізичних величин від їхніх середніх значень.

Величина – одне з основних понять, введене Євклідом (Греція, 3-й вік до н.е.), що є узагальненням більш конкретних понять (довжина, площа й т.п.). Кожен конкретний рід величин пов'язаний з певним способом порівняння (виміру) фізичних об'єктів.

Фізична величина – поняття, що відбиває яку-небудь характеристику МО кількісно, тобто в порівнянні з еталоном.

Фізичне тіло – узагальнене поняття МО незалежно від розмірів і складу, розглядається як матеріальна точка.

Матеріальна точка – МО, розмірами якого знехтуємо в умовах даного розгляду, даного завдання в порівнянні з відстанню до цього об'єкта від початку обраної системи координат.

Випадкова величина – деяка змінна величина, що має (приймає) те або інше числове значення (серед величезної безлічі) залежно від випадку як набору неконтрольованих початкових умов, що визначають явище МО. Повторення того самого числового значення для даного МО свідчить про повторення набору цих неконтрольованих початкових умов серед безлічі інших наборів умов. Це дозволяє говорити про ймовірність явища з початковими умовами, які переходять у ранг певних, відомих.

Якщо між даним МО й іншим МО може помістится ще один (третій) МО, то перші два МО вилучені один від одного на розмір (довжину) третього МО. Прийнявши розмір цього третього МО за еталон (масштабну одиницю) довжини, можна довідатися про величину видалення одного МО від іншого в одиницях еталона.

Виміряти – порівняти досліджувану величину з еталоном тієї ж природи, знайти ту кількість еталонів, яку треба мати, щоб цією кількістю еталонів замінити досліджувану величину.

За еталон довжини прийнята довжина МО або віддалення між МО, названа метр і рівна $\frac{1}{40000000}$ довжини земного меридіана, що проходить через місто Париж.

Питання та завдання для самоконтролю за змістом лекції 4

1. Охарактеризуйте поняття часу в фізиці (абсолютний та відносний час).
2. Дайте означення вакууму, величини , фізичної величини та випадкової величини.
3. Дайте означення процесу вимірювання.
4. Вкажіть одиниці вимірювання та прилади для виміру часу.

Лекція 5.

***Тема*: Системи відліку**

План

1. Поняття про механічний рух та систему відліку у просторі
2. Прямокутна декартова система координат у просторі.
3. Косокутна та полярна системи координат на площині.
4. Сферична система координат у просторі.

Механіка вивчає рух макроскопічних об'єктів – матеріальної точки, системи матеріальних точок (твердого тіла, елементів рідин і газів). Кожен об'єкт може робити рухи, що розрізняються А) по виду траєкторії: а) поступальний, б) обертальний, в) коливальний (хвильовий для пружного суцільного середовища) або г) їхню суперпозицію; Б) за значеннями кінематичних параметрів: а) рівномірний, б) рівнозмінний, в) нерівнозмінний або г) їхню суперпозицію.

Механічний рух – зміна положення даного МО (тіла) у просторі інших МО шляхом лінійного (кутового) переміщення у ВСВ.

Система відліку – сукупність системи координат і синхронізованого годинника (Рис.1)

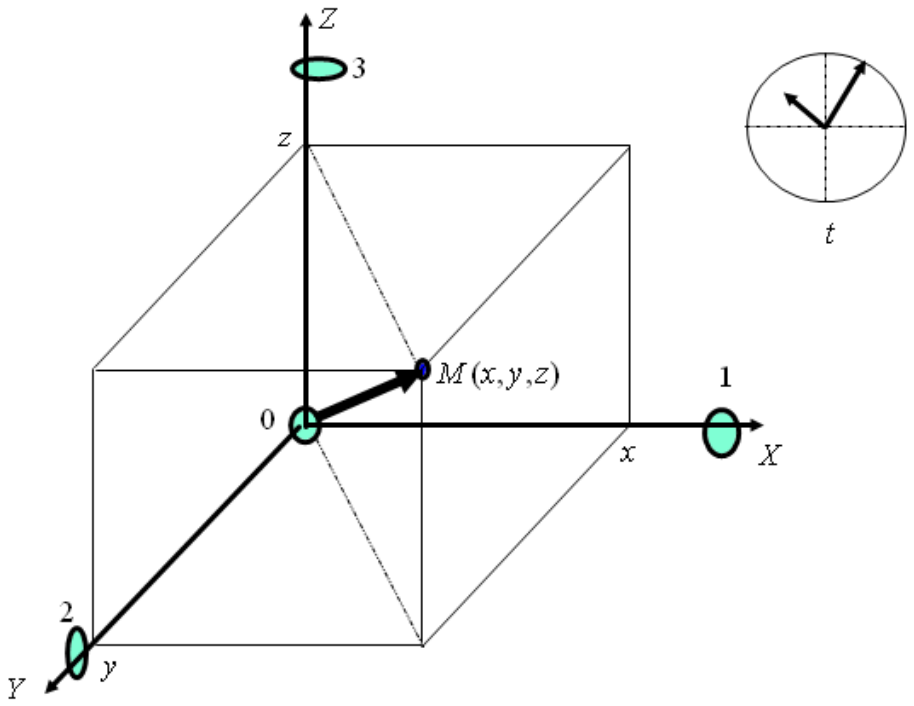


Рис. 1. Система відліку – тривимірні система координат і годинник

Система координат – сукупність (2...4) взаємозв'язаних МО (тіл), розташування яких не змінюється протягом усього часу роботи з цими тілами; сукупність просторових масштабів (ліній, кутів), за допомогою яких однозначно (у класичній механіці) визначається положення МО в будь-який момент часу в просторі, обмеженому ВСК .

Системи відліку (СВ) можуть бути нерухомими ('спочиваючими') і рухомими щодо якоїсь (абсолютної – реперної (РСВ). Рухома СВ рухається з ненульовою швидкістю щодо реперної (напр., геоСВ, геліоСВ). СВ, що рухається рівномірно й прямолінійно, називають інерційною (ІСВ). ІСВ може рухатися й з нульовою швидкістю. ІСВ фізично повністю еквівалентна первинній, реперній.

Рухома СВ може бути неінерційною (НІСВ), якщо вона рухається з прискоренням щодо реперної СВ (напр., ліфт). Будь-яка обертальна СВ (напр., геоСВ, геліоСВ) є НІСВ.

Прямолінійна система координат в евклідовому просторі є загальна система координат Декарта Р. (1637), аффінна система координат, задається початком координат O і впорядкованою трійкою прикладених до нього (початку) не колінеарних базисних (одиничних) векторів $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$. Прямі, що проходять через початок координат у напряму базисних векторів, називаються осями координат. Перша вісь, обумовлена одиничним вектором $\vec{e}_1 = \vec{e}_x$, називається віссю абсцис ('відрізана'); друга вісь, обумовлена одиничним вектором $\vec{e}_2 = \vec{e}_y$, називається віссю ординат ('розташована в порядку'); третя вісь, обумовлена одиничним вектором $\vec{e}_3 = \vec{e}_z$, називається віссю аппліката ('прикладена') (Рис.2). Декартова система координат вважається прямокутною, якщо базисні вектори $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ взаємно (попарно) перпендикулярні (ортонормовані) і за довжиною дорівнюють одиниці.

Серед кінематичних параметрів (характеристик) механічного руху МО у ВСВ можна виділити основні (переміщення, шлях) і похідні (швидкість, прискорення). Переміщення – вектор, що зв'язує положення МО в

початковий і кінцевий моменти часу його руху, що відтворює зміну радіуса-вектора МО. Вектор $\vec{a}$ – відрізок прямої, а)один кінець якого прийнято за початок, точку прикладення, б) другий кінець

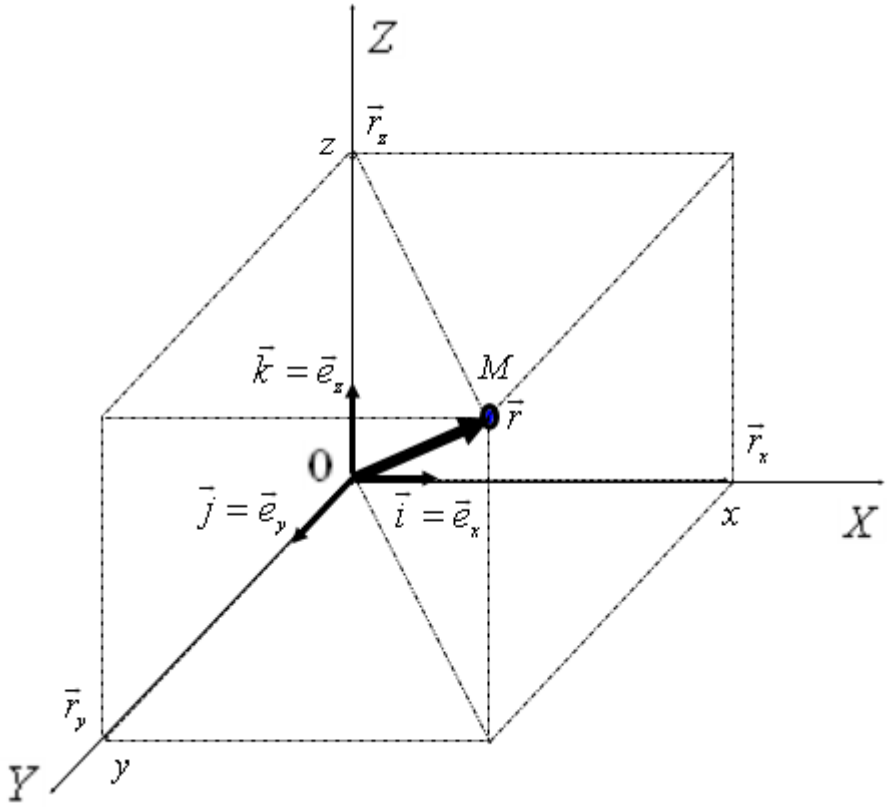


Рис.2. Радіус-вектор $\vec{r}$ матеріального об'єкта М

вказує напрям фізичної величини у просторі (напр., місця розташування МО), в) довжина *a* якого визначається в одиницях обраного масштабу $\vec{e}_a$: $\vec{a} = a \cdot \vec{e}_a$. Тут $\vec{e}_a = \frac{\vec{a}}{|\vec{a}|} = \frac{\vec{a}}{a}$ – орт, базисний вектор, масштабний вектор, колінеарний заданому вектору ($\vec{e}_a \uparrow\uparrow \vec{a}$), одиничний вектор з модулем, рівним одиниці: $|\vec{e}_a| = 1$. Поняття вектора (‘той, що несе’) увів У.Гамільтон (1845) як математичну абстракцію об'єктів, що характеризуються величиною й напрямом, напр., переміщення, швидкість, прискорення, напруженість поля сил тощо.

Скаляром (інваріантом) є число, задане в одній СК і незмінне при переносі початку СК або при повороті її осей. Напр, маса, час, електричний заряд, довжина вектора або його квадрат і т.п. Абсциса *x* нерухомої точки не є скаляром, тому що чисельне значення *x* у різних СК різне.

Дж.Максвелл (1873) ввів поняття “права” й “ліва” СК у фізиці. Правої ДСК вважається СК, якщо поворот від осі *Ox* до осі *Oy* відбувається в напряму, протилежному годинниковій стрілці, якщо дивитися на площину *Oxy* з якої-небудь точки позитивної півосі *Oz* (Рис.3).

Скаляр залишається незмінним у всіх СК, як правих, так і лівих. У фізиці застосовується майже винятково права система координат.

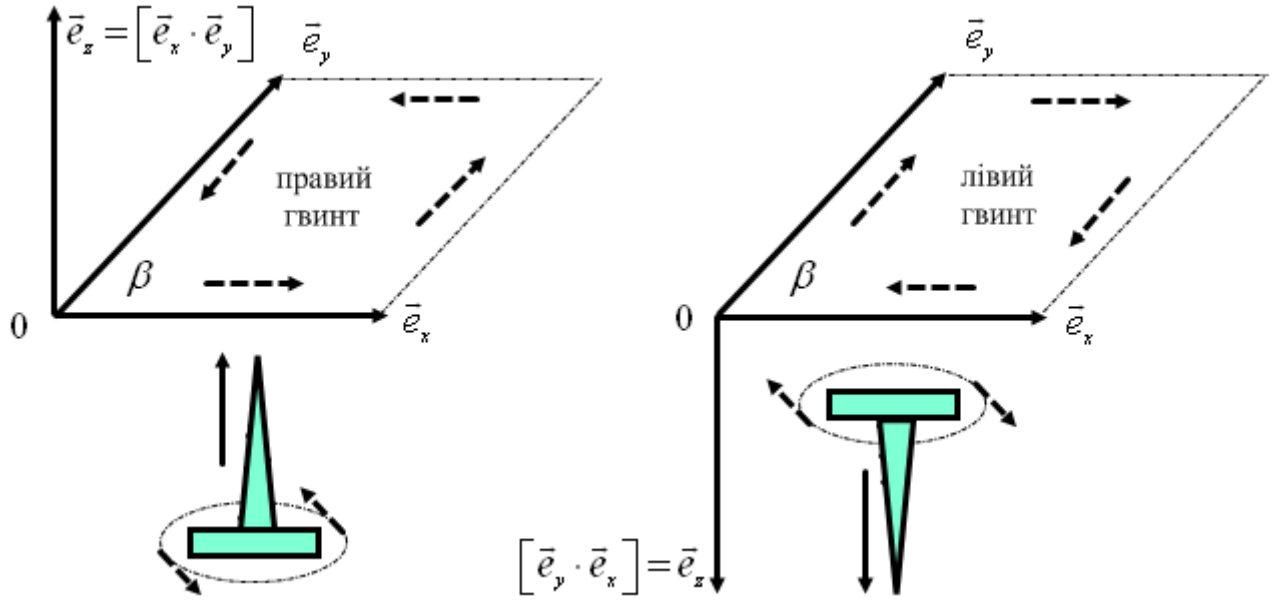


Рис.3. Векторний добуток двох векторів є вектор $\vec{e}_z$,
модуль якого є площина або поверхня величиною $e_z = e_x \cdot e_y \cdot \sin\beta$

Крім прямокутної ДСК, використовується а) косокутна СК, у якої кут між одиничними базисними векторами не є прямим; б) полярна СК (Рис.4), у якій положення точки визначається полярним радіусом $0 \le \rho < \infty$ і полярним кутом $0 \le \varphi < 2\pi$, пов'язаними із плоскої прямокутної СК формулами $x = \rho \cdot \cos\varphi$ і $y = \rho \cdot \sin\varphi$; в) сферична ортогональна СК,

у якій положення точки визначається сферичним радіусом $0 \le \rho < \infty$ і сферичними кутами $0 \le \vartheta < \pi$ і $0 \le \varphi < 2\pi$, зв'язаними з прямокутними координатами формулами $x = \rho \cdot \cos\varphi \cdot \sin\vartheta$, $y = \rho \cdot \sin\varphi \cdot \cos\vartheta$, $z = \rho \cdot \cos\vartheta$.

Радіус-вектор $\vec{r}$ матеріального об'єкта М визначається як зв'язаний вектор, точка прикладання якого завжди фіксована в початку вибраної системи відліку, вільний кінець кого пов'язаний з досліджуваною МТ чи з центром мас досліджуваного об'єкта.

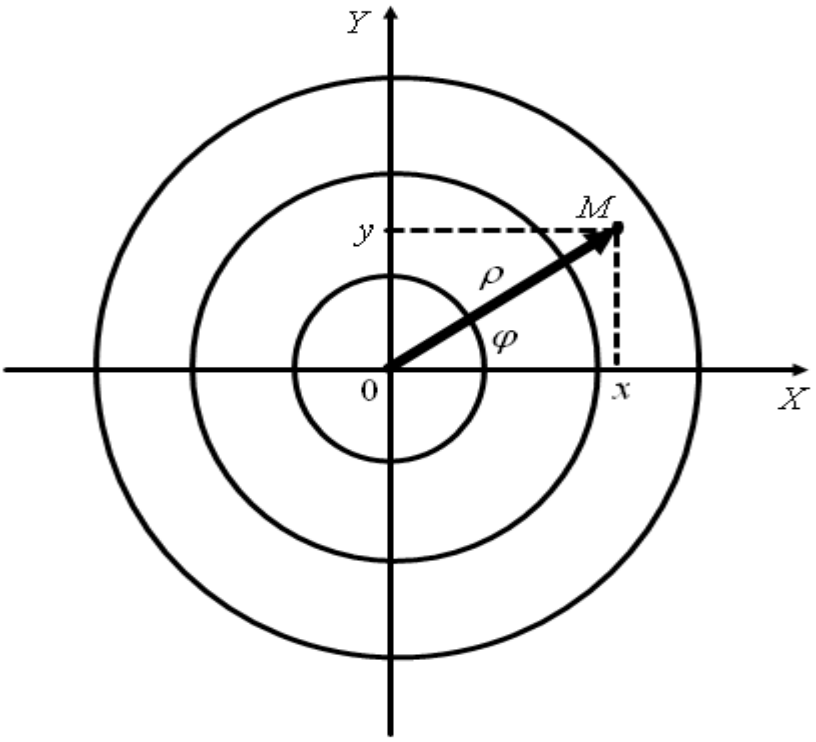


Рис.4. Полярна система координат

Радіус-вектор $\vec{r}$ у 3-хмірному просторі є сума трьох векторів, колінеарних координатним осям і пов'язаних з початком СВ, визначається впорядкованою трійкою чисел (*x, y, z*), які є коефіцієнтами розкладання вектора $\overrightarrow{OM} = \vec{r}$:

$$\vec{r} = \vec{r}_x + \vec{r}_y + \vec{r}_z = r_x \cdot \vec{e}_x + r_y \cdot \vec{e}_y + r_z \cdot \vec{e}_z =$$
$$= r_x \cdot \vec{i} + r_y \cdot \vec{j} + r_z \cdot \vec{k} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k},$$

де $\vec{i} = \vec{e}_x$, $\vec{j} = \vec{e}_y$, $\vec{k} = \vec{e}_z$ – базисні вектори, орти.

Координата – модуль проекції радіуса-вектора МО на одну з осей СК. Незалежна координата – ступінь свободи об'єкта – координата, зміна якої протягом деякого проміжку часу може відбуватися незалежно від зміни інших координат.

Годограф – лінія, що описує вільний кінець якого-небудь зв'язаного вектора при зміні його аргументу. Траєкторія – годограф радіуса-вектора МО; слід (трек), що згодом залишає об'єкт у ВСВ; сукупність послідовних положень об'єкта у ВСВ, безперервна лінія.

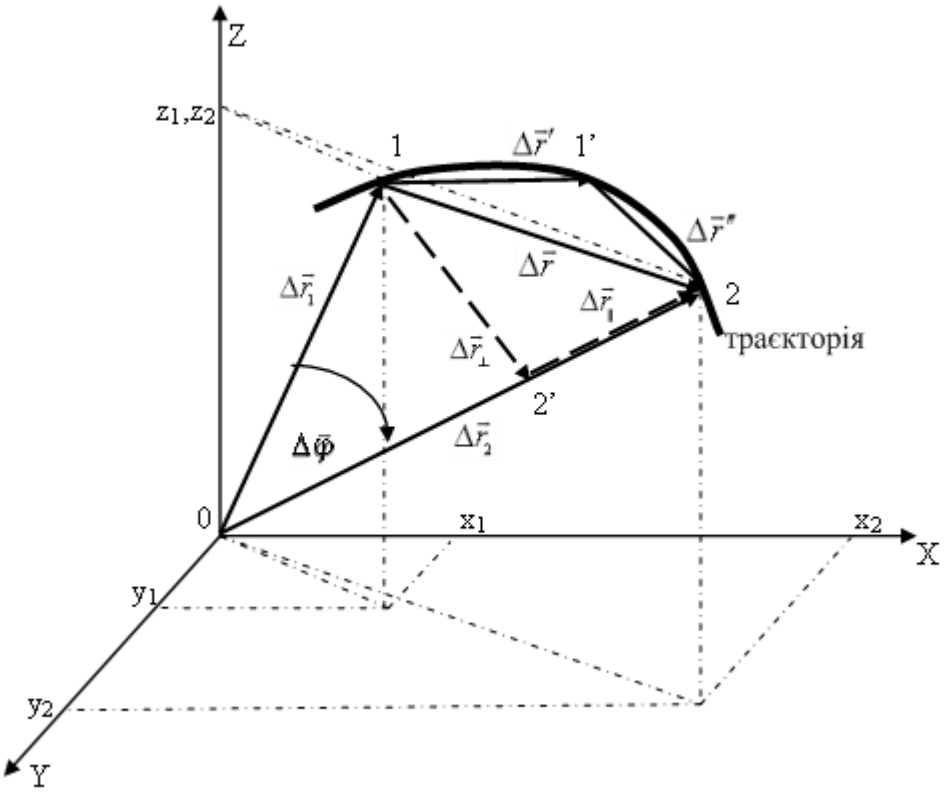


Рис.5. Переміщення радіуса-вектора МО

У момент часу t_1 МО перебував у положенні 1 з радіусом-вектором $\vec{r}_1$ (Рис.5). У момент часу $t_2 = t_1 + \Delta t$ МО вже перебував у положенні 2 з радіусом-вектором $\vec{r}_2 = \vec{r}_1 + \Delta\vec{r}$, де $\Delta\vec{r} = \Delta\vec{r}_\perp + \Delta\vec{r}_\parallel = \Delta\vec{r}' + \Delta\vec{r}''$ – лінійне переміщення МО, $\Delta\vec{\varphi}$ – кутове переміщення, виконане радіусом-вектором МО за той же проміжок часу Δt.

Питання та завдання для самоконтролю за змістом лекції 5

1. Охарактеризуйте поняття системи відліку та її складових частин.
2. Охарактеризуйте прямокутну декартову систему координат у просторі
3. Радіус-вектор матеріального об’єкта
4. Полярна та косокутна системи координат на площині.
5. Охарактеризуйте сферичну систему координат у просторі

Лекція 6.

***Тема*: Всесвітнє тяжіння**

План

1. Закони кінематики руху планет навколо Сонця.
2. Закон Всесвітнього тяжіння.
3. Спадщина І. Ньютона та його послідовників щодо вивчення взаємодії небесних тіл.

Датський астроном Тихо Браге (1546-1601) вирішив дати відповідь на запитання: як рухаються небесні тіла, зокрема Сонце, Земля, Місяць та інші. На власному острові поблизу Копенгагена за допомогою телескопа, побудованого за власні кошти, Тихо Браге дуже уважно стежив за тим, де на небі з'являються планети, точно все записував, щоб отримані у такий спосіб відомості змогли послужити підставою для теоретичного тлумачення. Це і стало початком сучасної науки.

Німецький астроном і математик Іоганн Кеплер (1571-1630), помічник Т. Браге) методом проб і помилок обробив точні спостереження Браге й встановив:

1. Планети рухаються навколо Сонця по замкнутих траєкторіях – еліпсах, в одному з фокусів яких перебуває Сонце (Рис.1).

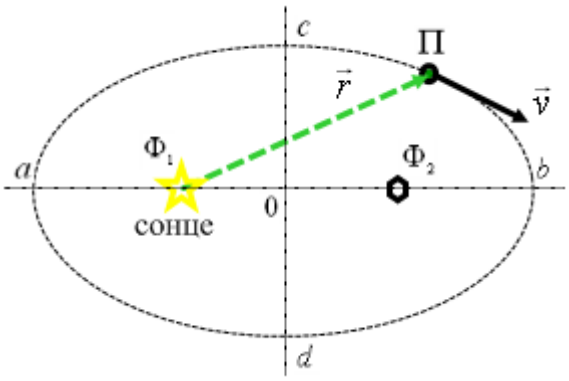


Рис.1.

2. За будь-які рівні проміжки часу радіус-вектор $\vec{r}$ планети П описує сектори рівних площ у різних точках траєкторії планети (Рис.2).

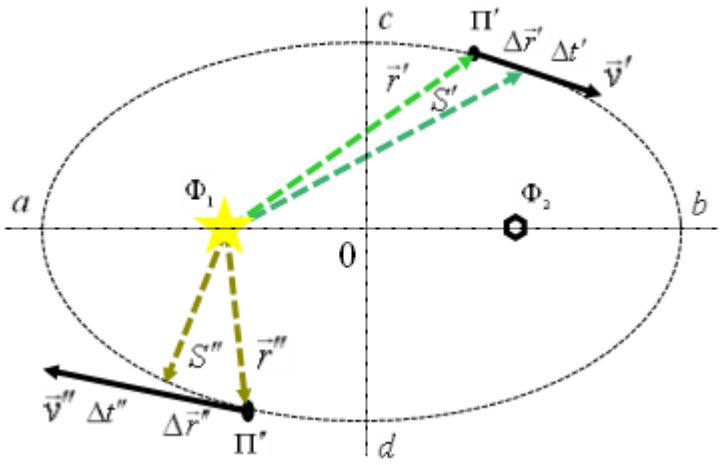


Рис.2

3. Квадрат періоду обігу T планети навколо Сонця пропорційний кубу більшої півосі орбіти планети: $T^2 \sim R^3$ (Рис.3).

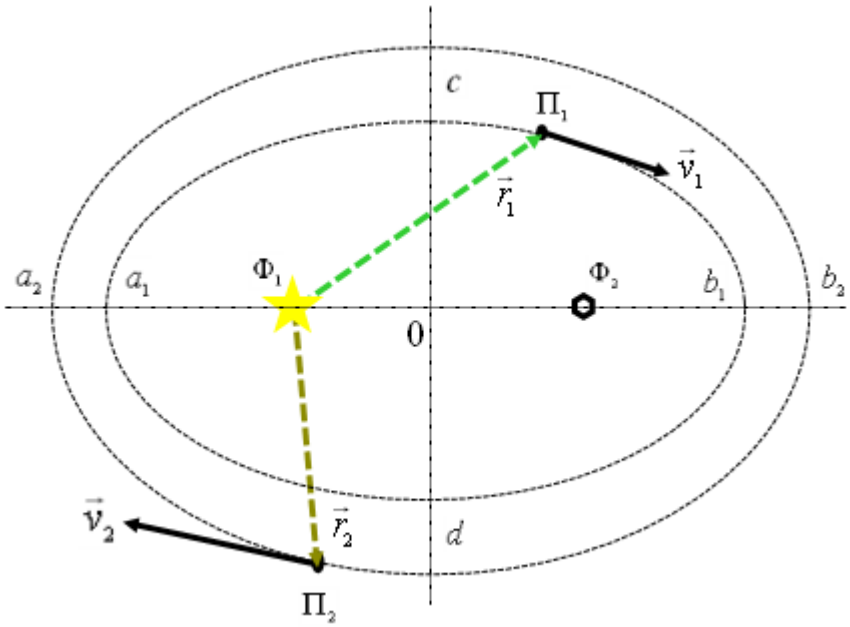


Рис.3.

Ці три закони повністю описують кінематику руху планет навколо Сонця.

Спостереження Т.Браге і математичні висновки І.Кеплера довели кожна з планет, рухаючись навколо Сонця, описує еліптичну орбіту зі своїм ексцентриситетом. Ексцентриситет еліпса визначимо відношенням міжфокусної відстані до довжини найбільшої осі (Рис.1)

$$e = \frac{\Phi_1 \Phi_2}{ab}. \qquad (1)$$

Планети, найближчі до Сонця, мають орбіти з невеликим ексцентриситетом. Наприклад, орбіта планети Земля має ексцентриситет $e \approx 0,03$. Половина осі ab називають найбільший радіус орбіти планети

$$R = \frac{1}{2} ab \ . \qquad (2)$$

Секторіальна швидкість визначається як похідна з часом площі сектора, описаного радіусом-вектором планети за цей час: $\dot{S} = \frac{dS}{dt}$. Площу сектора визначаємо як площу рівнобедреного трикутника, висота якого співпадає з бічною при $\Delta t \Rightarrow dt$:

$$d\vec{S} = \frac{1}{2}\left[\vec{r} \cdot d\vec{r}\right] = \frac{1}{2}\left[\vec{r} \cdot \vec{v}\right] \cdot dt \Rightarrow \Delta\vec{S} \approx \frac{1}{2}\left[\vec{r} \cdot \Delta\vec{r}\right] = \frac{1}{2}\left[\vec{r} \cdot \vec{v}\right] \cdot \Delta t \qquad (3)$$

За рівні проміжки часу $\Delta t' = \Delta t''$ радіус-вектор $\vec{r}$ планети Π описує сектори рівних площ $S' = S''$ (рис.2) у різних точках траєкторії планети. Секторіальна швидкість – векторна величина – є сталою для даної планети як за модулем, так і за направленням

$$\dot{\vec{S}} = \frac{1}{2}\left[\vec{r} \cdot \vec{v}\right] = const: \qquad (4)$$

а) при віддаленні від Сонця ($\left|\vec{r}\right|$ зростає) швидкість планети на орбіті зменшується і навпаки; б) вектор секторіальної швидкості весь час є нормальним до площини орбіти, зберігаючи орієнтацію орбіти у космосі.

Згідно третьому закону Кеплера (Рис.3) для двох і більше планет, які обертаються навколо загального центра (у даному разі – Сонця) можна записати

$$\frac{T_1^2}{R_1^3} = \frac{T_2^2}{R_2^3} = ... = \frac{T_n^2}{R_n^3} = const \qquad (5)$$

Що змушує планети саме в такий спосіб рухатися навколо Сонця? І. Ньютон мислив так. Щоб рухатися навколо Сонця планеті сила не потрібна. Якби ніяка сила не діяла на планету, планета летіла б по дотичній до траєкторії (еліпса), що і спостерігається. Оскільки планета щомиті наближається до Сонця на стільки, щоб збереглася сталої секторіальна швидкість $\dot{\vec{S}} = const$, на планету з боку Сонця діє сила, притягаючи планету до Сонця. Ця сила спрямована до Сонця й послабляється з віддаленням від Сонця пропорційно квадрату відстані між планетою і Сонцем. Все це треба із законів І. Кеплера.

Секторіальна швидкість $\dot{\vec{S}}$ визначає величину площі, описувану радіусом-вектором планети за одиницю часу (напр., за 1 секунду). Рух супутників Юпітера довкола нього, Місяця навколо Землі підлягає тим же законам, що й рух Землі та інших планет навколо Сонця. Ньютон припустив, що Місяць на орбіті втримують ті ж сили, які притягують будь-які предмети до Землі. Знаючи період обертання Місяця навколо Землі, відстань між Землею і Місяцем, можна розрахувати, що за 1 с Місяць наближається до Землі на 1,25 мм. Ще Галілей розрахував, кидаючи тіла з Пізанської вежі, що на Землі за 1 с тіла пролітають 5 м. Це відповідає тому, що на Землі сила притягання предметів до Землі в $\frac{R_{зл}}{R_р} \approx 60$ раз повинна бути більше, ніж сила притягання Місяця до Землі.

На підставі еліптичності орбіт планет, установлених експериментально Т.Браге і математично І.Кеплером, І.Ньютон припустив, що кожну планету Сонце притягує з силою, яка обернено пропорційна квадрату відстані Сонце-планета $F \sim \frac{1}{r^2}$. Це припущення І.Ньютона співпадало з припущенням Роберта Гука про дію пружних сил та з висновком Андре Кулона про взаємодію нерухомих електричних зарядів: протягування та відштовхування.

Теорія І. Ньютона дозволила пояснити: а)добову періодичність припливів (два рази на добу через 12 годин): приплив води на Землі відбувається в результаті притягання води Місяцем на найближчій стороні Землі до нього й на діаметрально вилученій стороні (за рахунок ніби 'відтягування' Землі від води); б) Земля (Місяць, Сонце й інші небесні об'єкти) мають округлу форму через те, що всі їх частини притягали один одного; в) Земля виявилася приплющеної уздовж осі її добового обертання: при обертанні зовнішні частини Землі зміщуються сильніше, ніж внутрішні; г) оскільки планети притягають одна одну (зокрема планета Уран відхилялася від траєкторії, що пророкована їй по закону Ньютона), Адамсу (1819-1892, англ. математику й астроному) і незалежно Леверьє (1811-1877, франц.астроному) вдалося пророчити нову планету, що потім і відкрили – планету Нептун.

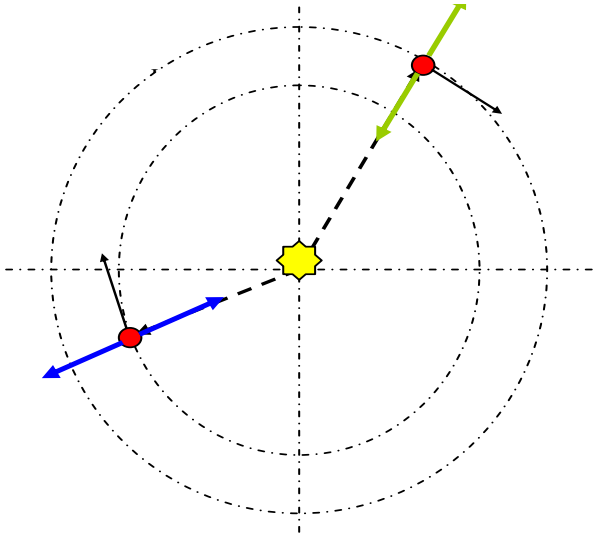
На початку XX століття Альберт Ейнштейн зробив уточнення законів класичної механіки Ньютона на прикладі руху планети Меркурій.

Нещодавно у відкритому доступі викладено оригінал історії про яблуко, що надихнуло Ісаака Ньютона на відкриття закону всесвітнього тяжіння. Документ, у якому описано процес міркувань вченого, датований 1752 роком. Автором манускрипту є Вільям Стаклі — друг і біограф І. Ньютона. Знаменитий момент падіння яблука Стаклі описує у такий спосіб: «Після обіду встановилася тепла погода, ми вийшли в сад і пили чай у тіні яблунь. Він (Ньютон) сказав мені, що перебуває там же, де й колись, і гравітація займає його думки. Він перебував у споглядальному настрої, коли зненацька з гілки впало яблуко. "Чому яблука завжди падають перпендикулярно землі?", — подумав він».

Історики вважають розповідь про падіння яблука анекдотом (згідно багатьох переказів яблуко падає не поруч з Ньютоном, а безпосередньо йому на голову), що вчений навмисно «просував». Популярною ця історія стала завдяки Вольтеру. Дотепер замітки про Ньютона, де вперше згадується знаменитий фрукт, зберігалися в архіві Королівського суспільства й були

доступні тільки фахівцям. Рішення зробити ці документи доступними для широкого загалу було присвячено до 350-річчя суспільства.

Генрі Пембертон (другий біограф І. Ньютона) приводить більш наукове міркування Ньютона (без згадування про яблуко): «порівнюючи періоди декількох планет й їхні відстані до Сонця, Ньютон прийшов до висновку, що сила взаємодії повинна знижуватися у квадратичній пропорційності зі збільшенням відстані». Інакше кажучи, з третього закону І.Кеплера (5), згідно якого періоди обертання планет зв'язані з відстанню до Сонця, І.Ньютон використав саме «формулу зворотних квадратів» для доведення закону тяжіння (у наближенні орбіт планет до кругових).



Остаточне формулювання закону всесвітнього тяжіння, що ввійшло до підручників, І.Ньютон виписав пізніше, після того, як йому вдалося більш чітко сформулювати закони механіки.

І. Ньютон на цей час знав...

Напис на могилі Ньютона говорить: «Тут спочиває сер Исаак Ньютон, дворянин, що майже божественним розумом перший довів зі смолоскипом математики рух планет, шляхи комет і припливи океанів. Він досліджував розходження світлових променів й, що з'являються при цьому різні властивості квітів, чого раніше ніхто не підозрював. Старанний, мудрий

і вірний толмач природи, стародавності й Св. писання, він затверджував своєю філософією велич Всемогутнього Бога, а вдачею виражав євангельську простоту. Нехай смертні радуються, що існувала така прикраса роду людського».

На статуї, спорудженої Ньютону в 1755 р. у Тріністі-коледжі, висічені вірші з Лукреція: Qui genus humanum ingenio superavit («Розумом він перевершував рід людський»).

Закони Ньютона діють у всьому Всесвіті: подвійні зірки, скупчення зірок, скупчення галактик... Притягування Землі ніде не кінчається, переплітаючись з більш сильними полями тяжіння інших небесних утворень.

Генрі Кавендиш (1731-1810, англійський фізик і хімік) за допомогою приладу (на тонкій кварцовій нитці підвішений горизонтально стрижень із двома кулями) поставив досвід по притягуванню земних предметів - свинцевих куль. Сила притягування куль дорівнює силі пружності закрученої нитки. Знаючи параметри досліду, Г. Кавендиш визначив гравітаційну сталу G у законі Ньютона, що дозволило визначати масу Землі, планет, Сонця, зірок ....

Питання та завдання для самоконтролю за змістом лекції 6

1. Сформулюйте закони взаємодії небесних тіл, сформульовані Т.Браге і І.Кеплером.
2. Охарактеризуйте теорію І. Ньютона та сформулюйте остаточний варіант закону Всесвітнього тяжіння.

Лекція 7

Тема : **Закони класичної механіки**

План

1. Перший закон класичної механіки (принцип інерції)
2. Другий закон класичної механіки (закон зміни стану руху)
3. Третій закон класичної механіки (закон взаємодії)

Динаміка вивчає причини і наслідки зміни стану руху тіл, виражені в рівняннях рухів тіл у вибраній системі відліку (ВСВ).

П е р ш и й з а к о н
(принцип інерції)

Відкритий Галілео Галілеєм і сформульований Ісааком Ньютоном (1642...1727) 1-й закон механіки, як початковий (найпростіший) закон, визначає характер руху тіла (матеріального об'єкта) зі сталою швидкістю як руху рівномірного:

В обраній системі відліку відокремлене тіло масою m ***рухається нескінченно довго з*** $\vec{v} = const$.

Досліджуване тіло може мати швидкість, яка дорівнює нулю, тобто тіло може бути нерухомим у ВСО. Якщо $v \neq 0$, тіло рухається рівномірно й прямолінійно. Вибрана система відліку існує незалежно від даного тіла й ніяким чином не впливає на досліджуване тіло. Тіло продовжує рухатися у ВСВ за інерцією з $\vec{v} = const$ (з прискоренням $a = 0$).

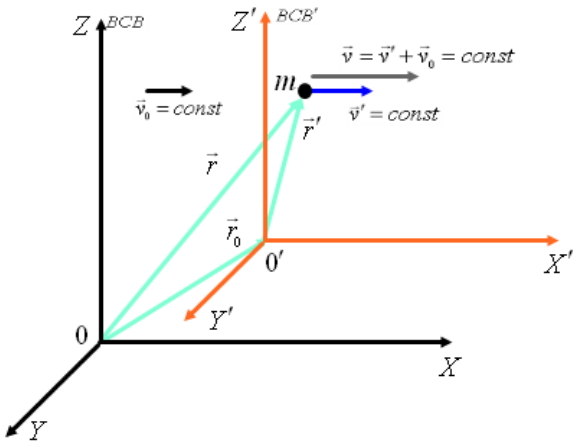


Рис. 1.

Числове значення й напрямок швидкості тіла залежать від вибору СВ. Дана швидкість тіла $\vec{v}' = \vec{v}_0 = const$ є початковою і єдиною швидкістю досліджуваного тіла з нескінченної безлічі можливих значень швидкостей. Час існування досліджуваного значення швидкості даного тіла, тобто тривалість рівномірного руху тіла, залежить від а)наявності ще одного тіла в обраній СВ, б)відстані між цими тілами й відносної швидкості їхнього зближення.

Існування BCB', відносно якої рівномірно рухається тіло масою *m*, вимагає обов'язкового існування ще однієї (зовнішньої) BCB, відносно якої обрана й рівномірно рухається BCB'. Тоді існує ще одна зовнішня BCB''. І таких зовнішніх $BCB^{(n)}$ існує нескінченна безліч. Всі $BCB^{(n)}$ рухаються необов'язково рівномірно одна відносно одної.

Д р у г и й з а к о н

(зміни стану руху)

Наявність у вибраній системі відліку двох тіл з масами m_1 й m_2 супроводжується їхньою взаємною дією одне на одного. Переміщення одного тіла у ВСВ буде залежати від дії на нього іншого тіла і навпаки. Це пов'язано з проявом однієї з властивостей маси – властивості взаємодіяти, а саме - властивості притягування.

Для опису властивості притягування (як і відштовхування) тіл введена фізична величина, названа силою *F*. С и л а – векторна величина $\vec{F}$, оскільки взаємодія тіл масами m_1 і m_2 спрямована від одного тіла до другого і навпаки.

Якщо тіло m_1 притягає (відштовхує) тіло m_2, то досліджувані тіла взаємно зближуються (віддаляються) уздовж прямої, що з'єднує ці тіла (їхні центри). Зближення (віддалення) тіл приводить до зміни відстані між цими тілами на величину $\Delta\vec{r} = \vec{v}' \cdot \Delta t$, де $\vec{v}'$ – відносна швидкість тіл вздовж прямій, що з'єднує ці тіла. Якщо початкові значення швидкостей

досліджуваних тіл у напряму один до одного дорівнюють нулю, то через час Δt відносна швидкість тіл прийняла значення $\vec{v}' = \vec{a}' \cdot \Delta t$, де $\vec{a}' = \vec{a}_1 - \vec{a}_2$ – відносне прискорення тіл вздовж прямої, що з'єднує ці тіла.

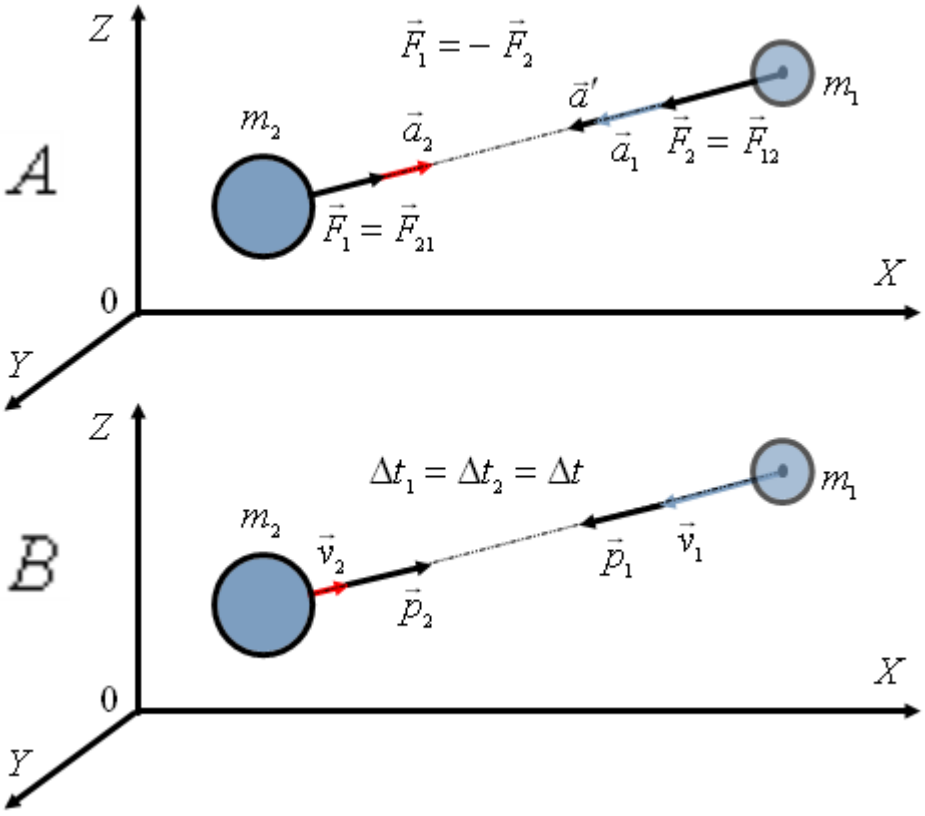


Рис.2

Прискорення $\vec{a}'$ як ознака зміни швидкості матеріального об'єкта виникло завдяки взаємодії тіл – 'володарів' мас m_1 і m_2 (Рис.2).

Для простоти будемо вважати, що перше тіло m_1 в результаті притягування його другим тілом m_2 рухається в напряму до другого тіла з прискоренням $\vec{a}_1$. Використовуючи поняття сили $\vec{F}$, можна записати

$$\vec{F}_2 = m_1 \cdot \vec{a}_1 \qquad (1)$$

Тут m_1 – коефіцієнт пропорційності між силою $\vec{F}_1$ як величиною впливу другого тіла m_2 на перше тіло m_1 і прискоренням $\vec{a}_1$ першого тіла m_1 як величиною зміни швидкості цього тіла. Співвідношення (1) є математичним записом 2-ого закону, відображає зв'язок причини $\vec{F}_1$ і наслідку $\vec{a}_1$.

Оскільки співвідношення (1) відображає результат взаємодії двох досліджуваних тіл, то перше тіло m_1 з таким же зусиллям діє на друге тіло m_2:

$$\vec{F}_1 = m_2 \cdot \vec{a}_2 \qquad (2)$$

Тут $\vec{a}_2$ – прискорення другого тіла m_2, спрямоване до першого тіла m_1. Відповідно до рівняння (2) у ту ж сторону (до тіла m_1) спрямована й сила $\vec{F}_1$. Сила $\vec{F}_1$ виникає й існує одночасно з силою $\vec{F}_2$. Сила $\vec{F}_1$ виникає як результат впливу тіла m_2 на тіло m_1 й може бути позначена як $\vec{F}_1$ або $\vec{F}_{12}$. Сила $\vec{F}_2$ виникає як результат впливу тіла m_1 на тіло m_2 й може бути позначена як $\vec{F}_2$ або $\vec{F}_{21}$. Позначення з одним індексом зручно використати при вивченні взаємодії тільки двох тел. Джерела цих сил різні, оскільки різні й самі тіла m_1 і m_2 як джерела відповідних сил.

Т р е т і й з а к о н

(принцип взаємодії)

Сила $\vec{F}_1$ дорівнює силі $\vec{F}_2$ по модулю, але протилежна їй за напрямом (Рис. 2):

$$\vec{F}_2 = -\vec{F}_1 \qquad (3)\,.$$

Ці сили прикладені до різних тіл m_1 і m_2: $\vec{F}$ прикладена до маси m_2; $\vec{F}_2$ прикладена до маси m_1, що відповідає 3-му закону:

Взаємодія матеріальних об'єктів,
що володіють властивостями однієї природи,
а) виникає одночасно,
б) попарно протилежна за напрямом,
в) однакова за величиною,
г) не залежить від природи властивостей.

Взаємодія відокремлених матеріальних об'єктів (фізичних тіл) призводить до зміни імпульсів цих тіл, тобто до зміни відносної швидкості тіл, до появи прискорення у відповідності з виразами (1) і (2). Підставивши у (3) значення сил (1) і (2), отримаємо

$$m_1\vec{a}_1 = -m_2\vec{a}_2 \Rightarrow \left|\frac{\vec{a}_1}{\vec{a}_2}\right| = \frac{m_2}{m_1}, \qquad (4)$$

тобто прискорення тіл як відгук тіл на дію однакових сил обернено пропорційно їх масам.

Оскільки прискорення визначається як

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}, \qquad (5)$$

то для будь-якого тіла, що володіє в обраній СВ швидкістю $\vec{v}$, модуль якої значно менше швидкості поширення світла у даному середовищі, можна записати при $m = const$

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(m \cdot \vec{v})}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt}, \qquad (6)$$

де $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ – імпульс тіла як стан руху тіла у ВСВ. Рівняння (6) відповідає запису 2-ого закону механіки (згідно особистому визначенню І. Ньютона):

Сила дорівнює зміні імпульсу тіла з часом.

Запис рівняння (6) у вигляді

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \qquad (6а)$$

справедливий як у класичній механіці Галілея-Ньютона, так і у релятивістській механіці Лоренца-Ейнштейна.

Як треба з рівняння (6а), кожна сила за модулем змінює з часом імпульс даного тіла: більша сила викликає значну зміну імпульсу за якийсь час; мала сила за те ж час викличе меншу зміну імпульсу цього тіла або та ж зміна імпульсу за більший час.

Похідна імпульсу за часом (за І. Ньютоном) визначає силу як фізичну величину, що діє ззовні на досліджуване тіло й обов'язково змінює стан руху цього тіла. У рівнянні (6а) природа сили байдужа, як і байдуже тіло, яке зміною стану свого руху проявляє дію джерела сили. Поняття « *сила* » описує взаємну дію (вплив) матеріальних об'єктів, які володіють однаковими за природою властивостями: масою, зарядом тощо.

У Міжнародній системі одиниць фізичних величин *SI* на честь І.Ньютона за одиницю сили прийнято «*ньютон*»:

$$1\,Н = \frac{1\,кг \cdot 1м}{1\,с^2} .$$

Оскільки всі тіла мають властивість «маса» (по І. Ньютону, тіло – це сукупність геометричних точок, наділених масою), тіла притягаються одне до одного як матеріальні об'єкти. У результаті тіла будуть зближатися. Цьому зближенню може сприяти або протидіяти додаткова й одночасна взаємодія цих тіл і як власників інших властивостей, напр., ще й

властивості електричного заряду q. Наявність у тіла масою m властивості електричного заряду q не змінює (помітно) величину маси m як властивості інерції цього тіла, а змінює величину прискорення цього тіла згідно (1)-(2). Отже, змінюється і $\vec{F}$ як прояв додавання результатів взаємодій цих тіл, кожен з яких одночасно володіють і властивістю заряду $\vec{F}_q$ і властивістю маси $\vec{F}_m$ як носія заряду q:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{ðåç}} = \vec{F}_m + \vec{F}_q \qquad (7)$$

Співвідношення (7) – запис властивості адитивності (додавання) сил як векторних величин, що діють одночасно на дане тіло. Якщо модуль одного з доданків на стільки малий, що ним можна знехтувати у порівнянні з модулем другого доданка, то ефективність дії результуючої сили дорівнює ефективності дії більшої сили (звичайно $\vec{F}_q >>> \vec{F}_m$). Для електронейтральних тіл справедливо $\vec{F}_m >>> \vec{F}_q$.

Взаємодія закріплених у ВСВ пружних матеріальних об’єктів (фізичних тіл) призводить до наявності механічної (електричної тощо) напруженості, тобто до виникнення потенціальної енергії пружної деформації цих тіл.

У реальних умовах на неізольоване досліджуване тіло завжди діє ще і сила тертя (опору) $\vec{F}_{опору}$ як результат взаємодії даного тіла з іншими, другорядними тілами у даному дослідженні. Сила тертя – сила, дія якої зменшує ефект дії основної (досліджуваної) сили. Сила тертя $\vec{F}_{\text{î ï î ðó}}$ зменшує швидкість руху досліджуваного тіла, якщо початкова швидкість цього тіла у ВСВ була більше нуля.

Рівняння руху фізичного тіла

$$\vec{F}_{рез} = m\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} + \vec{F}_{опору} \Rightarrow \vec{a} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{\vec{F}_{рез} - \vec{F}_{опору}}{m} \ . \qquad (8)$$

Питання та завдання для самоконтролю за змістом лекції 7

1. Сформулюйте перший закон класичної механіки (принцип інерції). Наведіть приклади.
2. Сформулюйте другий закон класичної механіки (закон зміни стану руху). Наведіть приклади.
3. Сформулюйте третій закон класичної механіки (закон взаємодії). Наведіть приклади.

Список використаних і рекомендованих джерел інформації

Базова література

1 Чолпан П.П. **Фізика:** Підручник / П.П. Чолпан. Київ: нац. ун-т ім. Т. Шевченка. 3-тє вид., переробл. і доповн. К. : Знання, 2015. 663 с.

2 Е.М.Геншерзон, М.О.Малов. Курс загальної фізики. Механіка. Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. 2-е изд., перераб. Москва: Просвещение, 1987. 304 с.: ил.

3 М.М.Архангельський. Курс фізики. Механіка. Москва: Просвещение, . 3-е изд., перераб., 1975. 424с

4 Д.В. Сивухин. Курс общей физики. Механика. Москва : Наука, 1989. 576 с

5 Г.Ф.Бушок, В.В.Левандовський, Г.Ф.Півень. Курс фізики: Навч. посібник: У 2 кн. Кн. 1. Фізичні основи механіки. Київ: Либідь, 1997. 448 с.

Додаткова література

1 Матвеев А. Н. Механика и теория относительности. Издание 2-е, переработанное. Москва: Высш. шк., 1986. С. 137-138. 320 с

2 І.В.Савельєв. Курс загальної фізики. том 1. Механіка. Молекулярная физика. Москва: Наука, 1989. – 352 с.

3 Иродов И.Е. Основные законы механики. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: 1985. 248 с.

4 Волькенштейн В.С. Збірник задач з загального курсу фізики. Санкт-Петербург: Профессия. 2003

5 Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Том 1. Механика, молекулярная физика, колебания и волны Москва: Наука 6-е изд., переработанное, 1974. 336

Інформаційні ресурси

1. http://bookwu.net/book_zagalna-fizika_1092/
   https://www.lektorium.tv/course/22785
2. http://old.pskgu.ru/ebooks/okphyzikc.html
   https://mipt.ru/education/chair/physics/S_III/
3. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B1%D1%89%D0%B0%D1%8F_%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0