

У НОМЕРІ:

Новини науки і техніки 2, 41, 43

Олімпіади, конкурси, турніри

Упоряд. Кременський Б. Г.
LV Всеукраїнська учнівська олімпіада з фізики
(м. Суми, 2018 р.) 3

Редакційні матеріали

Подвійний інтернет-марафон. Подвійна сила змін! . . . 20

Шукаємо матеріали до уроку

Борщевський А. І.
Міжнародна система одиниць СІ 22

Фейгін О. О.
Усесвіт, життя, розум 28

Цобенко Я. П.
Якісні задачі професійного спрямування 32

Обмінюємося досвідом

Присяник І. А.
SMART-технології як засіб активізації пізнавальної
діяльності учнів 40

Вишневецька О. О.
Використання цифрової лабораторії
на уроках фізики 42

Куленко І. В.
Про відкриті задачі 44

Гонтарев Ю. Ф., Євстахевич З. М., Познанський Ф. С.
Читання технічної документації 46

Соболева Н. П.
Активізація творчих здібностей учнів
на уроках фізики 52

Проводимо контроль знань

Жолоб В. А.
Тематичне оцінювання. 8 клас 55

Методичний банк. Внесок № 93

Барчук В. С.
Педагогічні прийоми з використанням
програми MS PowerPoint 32-1



Школа для вчителя. Випуск 103

**Александров М. Г., Пугач М. П.,
Сембратович В. С., Шувалов Є. С.**
Тлумачний словник із фізики від «А» до «Я».
Розділ VII. Основи квантової фізики,
фізика атома та атомного ядра 32-4-1

Фаховий сервер № 66

(Електронний додаток на нашому сайті
<http://journal.osnova.com.ua>)

Підвищуємо кваліфікацію

Тернова А. С.
Тестування як ефективний метод визначення рівня
успішності учнів. E-1

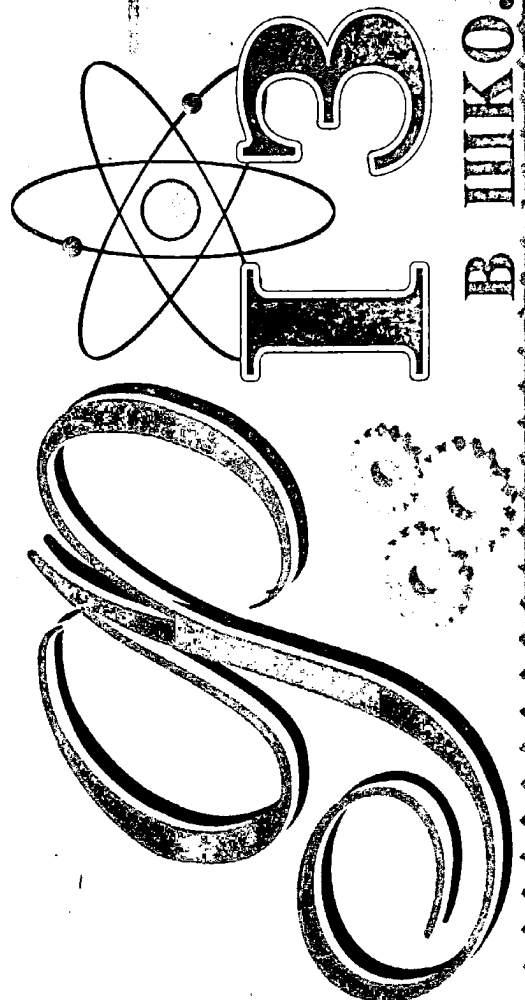
Див. с. 2>>>

Явище, що спостерігається, не потребує доказів.
Р. Хайнлайн

НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ ЖУРНАЛ

ФІЗИКА

В ШКОЛАХ УКРАЇНИ



ЗА СПРІЯННЯ МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ■ Учасник проекту: Фізико-математичний ліцей № 27 м. Харкова ■

№ 9-10 (349-350) травень 2018 р. ■ Заснований у серпні 2003 р. ■ Виходить двічі на місяць ■ 08417.95936, 08418.37058 ■

Передплатні індекси

ТЛУМАЧНИЙ СЛОВНИК ІЗ ФІЗИКИ ВІД «А» ДО «Я» Розділ VII. Основи квантової фізики, фізика атома та атомного ядра*

М. Г. Александров, М. П. Пугач, В. С. Сембратович, Є. С. Шувалов, м. Харків

Борівський радіус — радіус найближчої до ядра орбіти електрона атома водню в моделі атома, яку запропонував Нільс Бор у 1913 р. Є передвісницею квантової механіки. У моделі електрони рухаються по колових орбітах навколо ядра, при цьому орбіти електронів можуть розташовуватися тільки на певних відстанях від ядра залежно від їхньої енергії. Борівський радіус має значення $5,2917720859(36) \cdot 10^{-11}$ м (цифри в дужках указують похибка в останніх значущих цифрах на рівні 1σ, тобто приблизно 53 пм, або 0,53 ангстрема). Це значення може бути обчислене в термінах інших фізичних констант:

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2} = \frac{\hbar}{m_e c \alpha} = \frac{h}{2\pi m_e c \alpha},$$

де ϵ_0 — електрична стала; \hbar — стала Дірака або наведена стала Планка, тобто стала Планка $\frac{h}{2\pi}$; m_e — маса електрона; e — елементарний заряд; c — швидкість світла; α — стала тонкої структури.

Борівський радіус часто використовують в атомній фізиці як атомну одиницю довжини. Визначення борівського радіуса включає не наведену, а звичайну масу електрона, і, таким чином, радіус Бора не точно дорівнює радіусу орбіти елек-

трона в атомі водню. Це зроблено для зручності: Борівський радіус у такому вигляді виникає в рівняннях, що описують і інші атоми, де вираз для наведеної маси відмінний від атома водню. Якби визначення борівського радіуса включало наведену масу водню, то в рівняння, що описують інші атоми, необхідно було б включити більш складний вираз. Парадокс, який не може дозволити модель Бора, полягає в тому, що, відповідно до теорії Максвелла, електрон, що обертається, постійно випромінює енергію і, врешті-решт, повинен впасти на ядро, чого не відбувається насправді. Це протиріччя було згодом пояснене квантовою механікою.

Брега — Вульфа формула — умова підсилення рентгенівського випромінювання за відбиття від кристала: $2d \sin \theta = m\lambda$, де d — стала кристалічної ґратки, θ — кут ковзання хвилі, λ — довжина хвилі рентгенівського випромінювання, m — натуральне число.

Бридер-реактор — реактор-розмножувач, головною задачею якого є виготовлення штучного ядерного палива, найчастіше $^{239}_{94}\text{Pu}$ з основного ізотопу урану $^{238}_{92}\text{U}$ за рахунок поглинання останнім нейтронів. Крім того, використовують реакцію утворення $^{233}_{92}\text{U}$ з $^{232}_{90}\text{Th}$.

Бульбашкова камера або камера Гледзера — прилад для реєстрації треків (слідів) заряджених частинок високої енергії, що використовує ефект закипання перегрітої рідини за температури, що

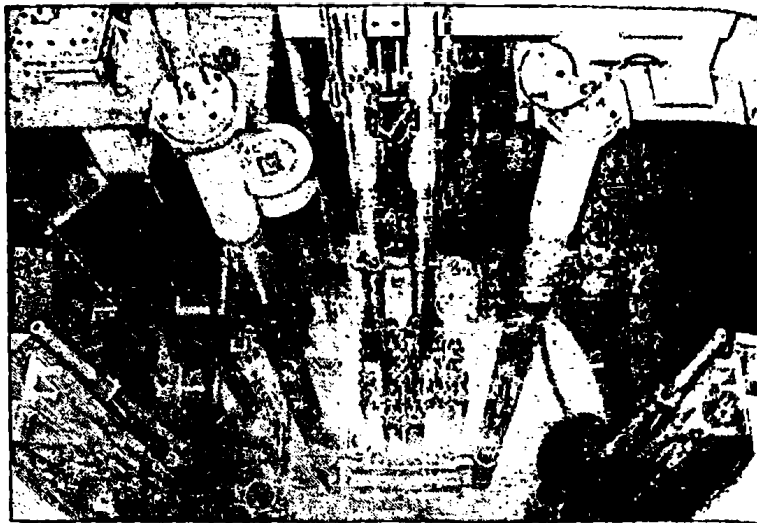
Продовження. Початок див. у № 3–4 (343–344), 5–6 (345–346) та 7–8 (347–348).

переввищує температуру кипіння за проходження такої частинки. Таку рідину можна отримати за швидкого зниження тиску в камері за відсутності центрів пароутворення. Частинка і є таким центром. За її проходження через рідину спостерігають закипання рідини у вигляді ланцюжка бульбашок уздовж траєкторії частинки, який і фотографують. Це прозора камера, заповнена зрідженим газом (бензолом, ефіром, фреоном або пропаном) під тиском. Підвищений тиск у камері до $(3 \div 22) \cdot 10^5$ Па (залежно від рідини) затримує кипіння. Заряджена частинка, пролітаючи через камеру, залишає йонний слід. У разі різкого зниження тиску зріджений газ переходить у стан перегрітий. Після раптового зниження тиску до нормального рідина в камері починає кипіти, і на йонах як центрах кипіння утворюються пухирці пари у вигляді ланцюжка бульбашок уздовж траєкторії частинки. Саме вони дають слід частинки, який за підсвічування можна спостерігати візуально та фотографувати. Бульбашкову камеру, як і камеру Вільсона, можна помістити в магнітне поле. Основна перевага бульбашкової камери полягає у великій гальмівній здатності робочої рідини, що дозволяє отримувати треки. Оскільки густина рідини значна, у ній довжина пробігу досліджуваної частинки значно менша, ніж у газах. Саме тому за допомогою бульбашкової камери можна досліджувати частинки дуже високих енергій.

В

Вавилова — Черенкова випромінювання — випромінювання частинок за руху в середовищі за швидкостей, більших за швидкість світла в цьому середовищі, яке використовують для їх реєстрації в спеціальних лічильниках. Його встановили в 1934 р. С. Вавилов та П. Черенков за дослідження проходження гамма-променів радіо через рідину. Теорію розробили І. Тамм та І. Франк. В. — Ч. в. — випромінювання електромагнітних хвиль зарядженою частинкою, яка рухається в середовищі зі швидкістю, більшою за швидкість поширення світла в цьому середовищі. Випромінювання назване на честь П. Черенкова, який отримав за його відкриття Нобелівську премію з фізики в 1958 р. разом із І. Франком та І. Таммом, які дали теоретичне пояснення цього ефекту. Науковий керівник Черенкова С. Вавилов на той час уже помер, тож, хоча його заслуга у відкритті ефекту дуже велика, він не став Нобелівським лауреатом. У науковій літературі черенковське

випромінювання іноді називають випромінюванням Вавилова — Черенкова. Черенковським випромінюванням пояснюється слабеньке блакитнувате світіння радіоактивних речовин.



■ Блакитне світіння черенковського випромінювання в ядерному реакторі

Важка вода (D_2O) — вода, молекула якої складається з двох атомів дейтерію та атома кисню. Молекулу HDO називають напівважкою водою, молекулу H_2O — легкою водою в тих випадках, коли потрібно підкреслити різницю. Молекула важкої води доволі суттєво відрізняється за масою від молекули легкої води, унаслідок чого помітно відрізняються також фізичні властивості. Важка вода має молярну масу приблизно $20 \frac{r}{mole}$ та більший поверхневий натяг, ніж звичайна «легка» вода.

Порівняння фізичних властивостей важкої та легкої води

Властивість	D_2O (важка вода)	H_2O (легка вода)
Температура замерзання ($^{\circ}C$)	3,82	0,0
Температура кипіння ($^{\circ}C$)	101,4	100,0
Густина за нормальних умов $\left(\frac{r}{ml}\right)$	1,1056	0,9982
Температура максимальної густини ($^{\circ}C$)	11,6	4,0
В'язкість (за $20^{\circ}C$, $mPa \cdot s$)	1,25	1,005
Поверхневий натяг (за $25^{\circ}C$, mJ)	7,193	7,197
Теплота плавлення $\left(\frac{cal}{mole}\right)$	1,515	1,436
Теплота випаровування $\left(\frac{cal}{mole}\right)$	10,864	10,515

Властивість	D ₂ O (важка вода)	H ₂ O (легка вода)
pH (за 25 °C)	7,41 (іноді позначається «pD»)	7,00
Показник поглинання (за 20 °C, на довжині хвилі 589,3 нм)	1,32844	1,33335

Важку воду добуто вперше в 1933 р., міститься в атмосферних опадах. Природна вода містить невелику кількість атомів дейтерію в складі молекул напівважкої води HDO. Концентрація атомів дейтерію збільшується за електролізу, оскільки на електродах виділяється відносно вища частка протію. Багаторазовий електроліз є основним методом отримання важкої води. Важка вода використовується як сповільнювач нейтронів у ядерних реакторах. Таке використання зумовлене тим, що, на відміну від легкої води, важка поглинає набагато менше нейтронів.

Вакуум фізичний (у квантовій теорії) — ідеалізоване поняття простору, у якому немає частинок. У квантовій теорії вакуум розглядають як найнижчий енергетичний стан поля, у якому весь час виникають і анігілюють пари віртуальних частинок та античастинок. Ці частинки існують настільки малий час, що не встигають якось проявити себе. Але за появи реальної частинки ці процеси починають впливати на її поведінку. Так, наприклад, стає можливим поява реальної пари «електрон — позитрон» тощо. Експериментально такого стану досягнути неможливо, окремі атоми і йони є навіть у надзвичайно розрідженому міжгалактичному просторі. Абстрактне поняття фізичного вакууму використовується, наприклад, для визначення швидкості світла як швидкості поширення електромагнітної взаємодії в порожнечі без жодних частинок. Навіть якби вдалося вилучити з якоїсь лабораторної посудини всі частинки, простір між стінками залишився б заповненим електромагнітними хвилями хоча б унаслідок теплового випромінювання стінок посудини. Аналогічно в космічному просторі існує рівномірне реліктове випромінювання. Аналогічно не існує способу ізолювати лабораторну установку від гравітаційного поля та його гіпотетичних носіїв гравітонів.

Однак у теоретичних побудовах можна абстрагуватися від перелічених факторів і розглядати властивості порожнього простору. Хоча

може скластися враження, що порожній простір є найпростішою фізичною системою, насправді це не так. Розвиток квантової механіки показав, що вакуум є складним фізичним об'єктом, властивості якого ще не зовсім зрозумілі. По-перше, вакуум, мабуть, заповнений нульовими коливаннями електромагнітного поля. Квантами електромагнітного поля є фотони — частинки, що належать до бозонів. Хвильові функції бозонів у найнижчому стані не дорівнюють нулю. За квантування поля бозонів їх розглядають як гармонічні осцилятори. В основному стані бозони мають не тільки відмінну від нуля хвильову функцію, а й ненульову енергію. Тож вакуум заповнений нульовими коливаннями різних мод електромагнітного та інших бозонних полів з усіма можливими хвильовими векторами, напрямками поширення та поляризаціями. Кожна з цих мод має енергію $\frac{1}{2}\hbar\omega$, де \hbar — зведена стала Планка, а ω — циклічна частота. Це породжує проблему енергії вакууму, оскільки таких мод нескінченно багато й сумарна енергія вакууму має бути нескінченною. Однак фізичні експерименти, зокрема Лембів зсув та ефект Казимира свідчать про те, що нульові коливання електромагнітного поля — реальність і що вони можуть взаємодіяти з іншими фізичними об'єктами.

Інша ідея, яка ще більше ускладнює розуміння вакууму, пов'язана з рівнянням Дірака, що описує релятивістську квантову частинку, зокрема електрон. Рівняння Дірака для вільного електрона має чотири розв'язки, два з них — із від'ємною енергією. Поль Дірак показав, що за допомогою операції зарядового спряження ці розв'язки можна трактувати як розв'язки з додатною енергією, але для частинки з протилежним, позитивним, зарядом, тобто античастинки електрона. Така античастинка була виявлена експериментально й дістала назву «позитрон». Трактування Дірака схоже на теорію напівпровідників. Частинки, електрони, аналогічні електронам провідності, тоді як античастинки, позитрони, аналогічні дірками. в основному стані, що відповідає вакууму, усі енергетичні стани з від'ємною енергією заповнені, а позитрон відповідає незаповненому стану. За розгляду взаємодій між частинками у квантовій електродинаміці часто необхідно враховувати можливість утворення з вакууму віртуальних електронів.

Валентна зона — сукупність дуже близьких значень енергії, дозволених валентним електронам, у металах валентна зона перетинається із

зоною провідності, у діелектриках та напівпровідниках — межує із забороненою зоною.

Валентність — здатність атома утворювати хімічні зв'язки з іншими атомами чи групами атомів.

Векторна модель атома — специфічна модель атома, заснована на інтерпретації квантових чисел, як векторних величин. Застосовувана за розшифрування спектрів багатоелектронних атомів.

Велике об'єднання — теоретичний розгляд єдиної природи слабкої, електромагнітної та сильної взаємодії. Основою В. о. є калібрувальна природа всіх цих взаємодій, кварк-лептонна симетрія, збіг констант взаємодій за великих енергій.

Великого об'єднання теорія — загальна назва для спроби побудови єдиної теорії трьох із чотирьох фундаментальних взаємодій: слабкої, електромагнітної та сильної. Теоретичні побудови, які включають ще й четверту взаємодію — гравітаційну, — називають іншими термінами: єдиною теорією поля або теорією усього. Спроби побудови єдиної теорії аргументовані вірою в те, що природа за своєю сутністю єдина й чотирьох окремих першопричин для неї занадто багато. Якщо у звичних для людей умовах чотири типи фундаментальних взаємодій проявляються по-різному, то, мабуть, існують умови, за яких розрізнити взаємодії стає неможливо: усі вони є окремими випадками однієї, досі ще не відомої, гіпотетичної взаємодії. Успіхом на цьому шляху можна вважати теорію електро-слабкої взаємодії, яку створили С. Вайберг, А. Салам та Ш. Глешоу наприкінці 1960-х років. У цій теорії слабка та електромагнітна взаємодії розглядають як різні прояви одної взаємодії. Теорія передбачає розпад протона, який є абсолютно стабільним у класичній теорії елементарних частинок (див. *Баріонне число (заряд)*). У перспективі вважають можливим створення єдиної теорії всіх взаємодій, зокрема гравітаційної, — єдиної теорії поля. Загальним недоліком усіх теорій великого об'єднання й теорії усього є те, що умови, за яких стирається різниця між відомими типами взаємодій, дуже далекі від умов реального фізичного експерименту.

Наприклад, щодо теорій великого об'єднання припускають, що відмінність між окремими типами відомих взаємодій починає стиратися за енергій частинок понад 10^{14} ГеВ, що набагато перевищує енергії, досяжні в найбільших прискорювачах. Побудований Великий адронний колайдер дозволяє досягнути енергій 10^4 ГеВ. Неможливість передбачити результат, який можна було б перевірити експериментально на сучасному етапі розвитку

фізичного обладнання, створює ситуацію, коли теорії великого об'єднання є цікавою математичною фантазією. Інтерес до цих найфундаментальніших проблем фізики, мабуть, завжди залишатиметься великим, оскільки цікавість — один із основних мотивів діяльності людства; водночас фізика загалом є наукою перш за все природничою, тобто вона намагається знайти пояснення тим фактам і явищам, які можна спостерігати.

Включення в загальну схему гравітаційної взаємодії — набагато складніша задача. Для її розв'язання потрібно перш за все побудувати послідовну квантову теорію гравітації. Досі фізики не зуміли цього зробити. Проблема нагтовхується на принципові складнощі, перш за все через неможливість перенормування квантової теорії гравітаційного поля в її сучасній інтерпретації. Тому теорії великого об'єднання пробують знайти єдиний підхід до трьох інших типів взаємодій, розглядаючи це як етап у побудові теорії всього. У середині XIX століття була побудована теорія електромагнетизму — класична електродинаміка. Вона знайшла зв'язок і об'єднала електрику й магнетизм. На той час була відома тільки одна інша фундаментальна взаємодія — гравітація. Об'єднання класичної електродинаміки з теорією гравітації здійснив Альберт Ейнштейн у рамках загальної теорії відносності. Однак незабаром були відкриті нуклоні й стало зрозумілим, що взаємодія нуклонів між собою, а також з електронами й електромагнітним полем не описується відомими взаємодіями: вона зовсім інша. Більше того, процеси в атомному ядрі та за зіткнення нуклонів іноді відбуваються швидко, що свідчить про велику взаємодію, а іноді — повільно, що свідчить про дуже малу взаємодію. Тому для опису ядерних процесів довелося ввести два різні типи фундаментальної взаємодії, які назвали просто — «сильна взаємодія» і «слабка взаємодія».

Фізика розвинулася також в іншому напрямку: стало зрозумілим, що рух частинок у мікросвіті не описуваний класичною механікою. Була побудована квантова механіка, а згодом — квантова електродинаміка. Однак побудова квантової теорії гравітації забарилася. У 1960-х роках була побудована квантова хромодинаміка — теорія сильної взаємодії. 1979 року нобелівською премією з фізики була відзначена праця Шелдона Лі Глешоу, Абдуса Салама та Стівена Вайнберга над об'єднаною теорією слабких та електромагнітних взаємодій, електрослабкої взаємодії, між елементарними

частинками, зокрема передбачення слабких нейтральних струмів, які незабаром були виявлені експериментально. Таким чином, перед теоріями великого об'єднання стоїть задача створення математичної побудови, яка об'єднувала б сильну та електрослабку взаємодію. За малих енергій, в умовах, близьких до умов реального фізичного експерименту, ця об'єднана взаємодія повинна мати два різні прояви, що відповідали б відомим взаємодіям, а за високих енергій відмінності між цими двома проявами повинні стиратися.

Станом на 2010 рік у фізиці елементарних частинок прийнятою є так звана Стандартна модель, яка, проте, має ще деякі нерозв'язані питання, зокрема проблему нейтринних осциляцій. Таким чином, спільною вимогою до теорій великого об'єднання є редукування до Стандартної моделі за малих енергій. Теорії великого об'єднання будуються на звичному у квантовій теорії поля підході: постулюють існування певного поля з певною структурою, записують функцію Лагранжа для цього поля, варіація якої дає рівняння руху. Такий підхід успішно працює у квантовій електродинаміці та квантовій хромодинаміці. Постульоване поле — складний математичний об'єкт, який повинен задовольняти певні фізичні принципи, наприклад принцип загальної коваріантності, тобто отримані рівняння руху повинні бути однаковими в усіх системах відліку. Крім того, постульоване поле повинне мати певну внутрішню симетрію, бути інваріантним відносно калібрувальних перетворень. Такі математичні об'єкти вивчають у теорії груп. Для побудови теорій великого об'єднання використовують групи $SU(n)$, тобто групи матриць з одиничними визначниками. З квантової хромодинаміки відомо, що сильна взаємодія описується з використанням групи $SU(3)$, теорія електрослабкої взаємодії оперує групою $SU(2)$. Тому група, яку використовує теорія великого об'єднання, повинна за малих енергій розпадатися на ці дві групи, тобто редукуватися до $SU(3) \times SU(2)$. Найменшою з таких груп є група $SU(5)$, однак це не єдиний варіант, тому теорій великого об'єднання багато. Вибір між ними слід здійснювати на основі експериментальної перевірки, що складно.

В

Взаємодія нейтронів із речовиною — проникнення нейтронів у речовину. Оскільки нейтрони не мають електричного заряду, а магнітна взаємодія

слабка, то швидкі нейтрони можуть проникати в речовину на значну глибину. Єдиним типом взаємодії є пряме зіткнення з ядрами речовини, імовірність якого невисока з огляду на малі розміри ядер. Енергія, яку нейтрон втрачає за зіткнення, передаючи його ядру, з яким зіткнувся, залежить від співвідношення мас нейтрона й ядра й тим більша, чим ближчі між собою ці маси. Тому нейтрони краще гальмуються речовинами, у яких багато водню: водою, вуглеводами тощо. Саме речовини з малими масами ядер використовують для сповільнення нейтронів у ядерних реакторах. У камерах Вільсона чи бульбашкових камерах нейтрон не залишає треку, проте вибите з атома заряджене ядро залишає трек, тож можна прослідкувати, у якій точці відбулося зіткнення. Деякі ядра атомів поглинають нейтрони. За поглинання спочатку один ізотоп хімічного елемента перетворюється на інший, але такі ізотопи часто нестабільні. За поглинання, наприклад, нейтрона $^{235}_{92}\text{U}$ новий ізотоп Урану розпадається.

Взаємодія сильна — один із видів взаємодій елементарних частинок, яка характеризується найбільшою інтенсивністю. В. с. пов'язує разом кварки, а також пов'язує протони і нейтрони в ядрі атома. Частинами-носіями сильної ядерної взаємодії за сучасними уявленнями є глюони. Їх всього 8 типів, кожен з яких має нульову масу і нульовий заряд. На відміну від обмінних частинок інших взаємодій, глюони можуть взаємодіяти один з одним через інший глюон. Частинки, що складаються з кварків і які можуть взаємодіяти сильно, називаються адронами. Процеси, у яких проявляється В. с., називають повільними. Час їх проходження становить від 10^{-8} до 10^{-10} с. В. с. є короткодійною, і її радіус — порядку 10^{-15} м.

Взаємодія у квантовій механіці — взаємодія тіл або частинок між собою, яка спричиняється до зміни стану.

Для існування речовини, яка нас оточує, необхідні не тільки частинки, які входять до його структури, такі як електрони, протони, нейтрони, але й частинки, які склеюють поля. Бозон, глюон, фотон і гравітон — це безмасові віртуальні частинки-переносники В. у к. м. Частинок-переносників, якими обмінюються частинки речовини, називаються віртуальними, тому що, на відміну від «реальних», їх не можна безпосередньо зареєструвати за допомогою детектора частинок.

Існують два типи ядерної взаємодії — сильна й слабка.

Сильною ядерною взаємодією є взаємодія, пов'язує разом кварки, а також пов'язує протони і нейтрони в ядрі атома. Частинками-носіями сильної ядерної взаємодії за сучасними уявленнями є глюони. Їх всього 8 типів, кожен з яких має нульову масу і нульовий заряд. На відміну від обмінних частинок інших взаємодій, глюони можуть взаємодіяти один з одним через інший глюон. Частинки, що складаються з кварків, і які можуть взаємодіяти сильно називаються адронами. Сила ядерної взаємодії виявляється великою на відстані близько 10^{-15} м. Цим визначається типовий розмір атомного ядра — 10^{-15} м за порядком величини. Наприклад, у ядрі урану 92 протони. З погляду електродинаміки важко утримати настільки велике число протонів у такому маленькому обсязі, як обсяг атомного ядра, з урахуванням відштовхування між протонами. Сила ядерної взаємодії виявляється великою на відстані близько 10^{-15} м.

Слабка взаємодія відповідає за бета-розпад, K -захоплення (електронне захоплення), за більшість розпадів елементарних частинок, а також за всі процеси взаємодії нейтрино з речовиною. Бозон-частинка — переносник слабкої взаємодії (існують 3 такі частинки W^+ , W^- , Z^0).

Найбільш слабкою взаємодією є гравітаційна. У мікросвіті вона губиться на тлі інших сил. Наприклад, сила електростатичного відштовхування електронів у 10^{40} разів більша від сили їх гравітаційного притягання. Однак гравітаційна взаємодія в мікросвіті порівнюється з іншими за високої густини речовини $10^{94} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ (густина Планка), коли настає гравітаційний колапс. Гравітаційні сили діють на великих відстанях і завжди є силами притягання. Частинка-переносник гравітаційної взаємодії називається гравітоном.

Електромагнітна взаємодія створюється електромагнітними силами, які діють між електрично зарядженими частинками. Електромагнітні сили можуть бути як силами відштовхування, так і силами тяжіння. У великих тілах (наприклад, Сонце або Земля) кількість позитивних і негативних зарядів майже однакова, тому сили майже компенсуються. У малих масштабах атомів і молекул електромагнітні сили домінують. Завдяки електромагнітним зв'язкам виникають атоми, молекули й макроскопічні тіла. Усі хімічні реакції є електромагнітні взаємодії. Частинками-переносниками цієї взаємодії є фотони.

Використання гамма-випромінювання — застосування γ -квантів у машинобудуванні, наукових дослідженнях та інших галузях народного господарства.

Приклад 1. Визначення зношування деталей, що зазнають тертя. Потрібно, наприклад, визначити строк служби поршневого кільця. Донедавна такі дослідження проводили прямим чином, тобто ретельно вимірювали розміри, запускали двигун на тривалий час і після цього знову вимірювали розміри кільця. Очевидно, що такі дослідження обходяться дорого, оскільки потрібні великі витрати палива, мастильних матеріалів (особливо за дослідження авіаційних двигунів) і цілодобова робота обслуговувального персоналу. Зовсім інша справа з використанням радіоактивних ізотопів. Поршневе кільце опромінюють повільними нейтронами, унаслідок чого в ньому утворюється радіоактивне залізо, яке є джерелом γ -квантів. Під час роботи двигуна поршневе кільце поступово зношується, при цьому радіоактивне залізо потрапляє в шар мастила на стінці циліндра й поступово стікає чи зливається в картер. Беручи періодично проби мастила з картера, можемо за радіоактивністю визначити зношування кільця в мг за годину. Це найточніший і найчутливіший метод визначення зношування деталей із наявних.

Приклад 2. Визначення руйнування вогнетривкого шару в доменних печах. Вогнетривка цегла в доменних печах руйнується внаслідок дії дуже високих температур, і вогнетривкий шар доменних печей стає все більш тонким. Радіоактивний кобальт, який є джерелом γ -квантів, замурують у стінку доменної печі й періодично вимірюють інтенсивність — випромінювання із зовнішнього боку стінки. Коли вогнетривка цегла руйнується до неприпустимої межі, кобальт частково чи повністю потрапляє в розплавлений чавун, що моментально проявляється в зменшенні чи зникненні потоку γ -квантів. Цей метод дозволяє постійно контролювати швидкість руйнування вогнетривкого шару й вибирати найбільш доцільний момент зупинки домни для періодичного ремонту.

Приклад 3. Стерилізація харчових продуктів і медичних інструментів. Недоліком гарячої стерилізації є зміна смаку деяких продуктів харчування, втрата низки цінних якостей (вітамінності, калорійності та ін.), а також значне збільшення вартості. Усі ці недоліки відсутні за стерилізації гамма-випромінюванням. Гамма-випромінювання може повністю знищити всі мікроорганізми, не

спричинивши при цьому практично ніяких змін клітин. Тому випромінювання широко використовують для холодної стерилізації харчових продуктів і медичних інструментів.

Приклад 4. Виявлення вибухових речовин. До недавня прихована зброя та вибухові пристрої намагалися виявляти за допомогою детекторів, що реагували на металеві предмети. Проте останнім часом вибухові пристрої стали виготовляти з пластиків. Застосовуючи метод радіоактивності, можуть безпосередньо виявляти самі вибухові речовини. Як відомо, сучасні вибухові речовини містять багатоатомні сполуки азоту й кисню (нітрогліцерин). Для виявлення вибухових речовин використовують слабке інтенсивне джерело нейтронів. Під дією нейтронів відбувається реакція з ядрами атомів Нітрогену-15, під час якої випромінюються γ -кванти. За випромінюванням γ -квантів з енергією 10,824 МеВ високої інтенсивності реєструють вибухову речовину. Час реєстрації — 2–3 с. Для природних радіоактивних елементів енергія квантів не перевищує 3 МеВ.

Вимушене випромінювання — випромінювання світла збудженими атомами чи молекулами під дією зовнішнього випромінювання. Має ті самі поляризацію, фазу та напрямок, що й початкове випромінювання.

Вироджений газ — газ, властивості якого істотно відрізняються від властивостей класичного ідеального газу унаслідок квантово-механічного впливу однакових частинок одна на одну. Цей взаємний вплив частинок обумовлений не силовими взаємодіями, відсутніми в ідеального газу, а тотожністю (нерозрізненістю) однакових частинок у квантовій механіці (див. *Тотожності принцип*). У результаті такого впливу заповнення частинками можливих рівнів енергії навіть в ідеальному газі залежить від наявності на цьому рівні інших частинок. Тому теплоємність і тиск такого газу інакше залежать від температури, ніж в ідеальному; по-іншому виражаються ентропія, вільна енергія тощо. Виродження газу настає за зниження його температури до деякого значення, названого температурою виродження. Повне виродження настає за абсолютного нуля температури. Вплив тотожності частинок позначається тим істотніше, чим менша середня відстань між частинками r порівняно з довжиною хвилі де

Бройля частинок, яка дорівнює $\frac{h}{mv}$ (де m — маса частинки, v — її швидкість, h — стала Планка). Це пояснюють тим, що класична механіка засто-

совна до руху частинок газу лише за умови $r \gg \lambda$. Оскільки швидкість частинок газу пов'язана з температурою (чим більша швидкість, тим вища температура), то температура В. г., що визначає межу застосовності класичної теорії, тим вища, чим менша маса частинок газу й чим більша його густина (тобто чим менша середня відстань між частинками. Тому температура В. г. особливо велика для електронного газу в металах: маса електронів дуже мала ($\sim 10^{-30}$ кг), а їхня щільність у металах дуже велика (10^{22} електронів в 1 см^3). Електронний газ у металах вироджений за всіх температур, за яких метал залишається у твердому стані. Для звичайних атомних і молекулярних газів температура виродження близька до абсолютного нуля, тож такий газ практично завжди поводить, як класичний (за таких низьких температур усі речовини перебувають у твердому стані, окрім гелію, що є квантовою рідиною за скільки завгодно близьких до абсолютного нуля температур). Оскільки характер несилового впливу тотожних частинок один на одного різний для частинок із цілим (бозони) і напівцілим (ферміони) спіном, то поведінка газу з ферміонів (фермі-газу) і з бозонів (бозе-газу) також буде різною за виродження. У фермі-газу (до якого належить електронний газ в металі) за повного виродження (за $T = 0 \text{ К}$) заповнені всі нижні енергетичні рівні аж до деякого максимального, званого рівнем Фермі, а всі подальші залишаються порожніми. Підвищення температури лише трохи змінює такий розподіл електронів металу за рівнями: мала частка електронів, що перебувають на рівнях, близьких до рівня Фермі, переходить на порожні рівні з більшою енергією, звільняючи таким чином рівні нижче від фермієвського, з яких був здійснений перехід. За виродження газу бозонів, які складаються з частинок із відмінною від нуля масою (такими бозонами можуть бути атоми й молекули), деяка частка частинок системи повинна переходити в стан із нульовим імпульсом; це явище називається конденсацією Бозе — Ейнштейна. Чим ближча температура до абсолютного нуля, тим більше частинок повинні виявитися в цьому стані. Явище конденсації Бозе — Ейнштейна в рідкому гелії, який можна розглядати як неідеальний газ із так званих квазічастинок, що призводить до появи надплинності. Для газу з бозонів нульової маси, до яких належать фотони (спін 1), температура виродження дорівнює нескінченності; тому фотонний газ — завжди вироджений і класична статистика до нього не застосовна ні за яких умов.

Фотонний газ є єдиним виродженням ідеальним бозе-газом стабільних частинок. Проте конденсація Бозе — Ейнштейна в газі не відбувається, оскільки не існує фотонів із нульовим імпульсом (фотони завжди рухаються зі швидкістю світла). За нульової абсолютної температури фотонний газ перестає існувати.

Вироджений електронний газ — ідеальний електронний газ, у якому електрони не взаємодіють між собою, проте він не підпорядковується законам класичної статистичної фізики внаслідок особливостей розподілу Фермі — Дірака.

Вироджений енергетичний рівень — енергетичний рівень, якому відповідають кілька різних станів, що відрізняються значеннями інших фізичних величин. Наприклад, якщо в атомі два електрони з протилежними орієнтаціями спіну перебувають (або можуть перебувати) на одному енергетичному рівні, то цей рівень двічі вироджений за орієнтацією спіну електрона (за магнітним спіновим квантовим числом); якщо в атомі на одному енергетичному рівні (який визначається двома квантовими числами: головним n і орбітальним l) перебувають (або можуть перебувати) електрони з різними значеннями магнітного квантового числа m_l , то кажуть, що цей рівень вироджений за магнітним квантовим числом.

Вироджений напівпровідник — напівпровідник, у якому внаслідок високої концентрації домішок концентрація вільних носіїв заряду настільки велика, що він втрачає свої напівпровідникові властивості й поводить себе, як метал.

Вироджений стан — див. *Вироджений енергетичний рівень*.

Виродження рівнів — існування рівнів енергії з однаковим значенням енергії, але з різними значеннями квантових чисел.

Виродження (у квантовій механіці) —

1) специфічне явище, яке полягає в тому, що мікросистема з тим самим значенням енергії може перебувати в різних станах. Кількість таких станів є кратністю B . Так, кратність B енергетичного рівня електрона в атомі водню, якому відповідає головне квантове число n (за різних орбітальних квантових чисел l і магнітних m), дорівнює n^2 . B пов'язане з фізичною симетрією системи. Якщо частинка перебуває в зовнішньому полі, то B залежить від структури й симетрії поля. Наприклад, у сферично-симетричному полі ядра атома водню напрями орбітального моменту й спіну електрона не впливають на значення енер-

гії атома: вона вироджена. Якщо ж атом водню перебуває в зовнішньому магнітному полі, то різним орієнтаціям магнітного моменту електрона відповідають різні значення енергії атома: B енергії зникає. (Див. *Земана явище*). Зняття B веде до зниження симетрії системи;

2) тотожність частинок, що належать одному зарядовому мультиплету, за відсутності електромагнітної (і слабкої) взаємодії між відповідними адронами. Так, протон і нейтрон не розрізнялися б між собою (було б B нуклона) за умови що сильна взаємодія між ними єдина;

3) стан системи бозонів або системи ферміонів за температури, нижчої від температури, нижчої від температури B цих систем. При цьому B зумовлене квантомеханічним взаємовпливом тотожних частинок і виявляється в тому, що властивості таких систем відмінні від властивостей ідеального класичного газу. Прикладом B системи є електрони провідності металів, фотонний газ. B настає тим легше, чим більша концентрація частинок і чим менша їхня маса (тобто чим менша середня відстань між частинками порівняно з довжиною хвилі де Бройля окремої частинки).

Вироджені електронні рівні — рівні, які мають однакову енергію, хоча можуть відповідати дуже різним станам системи. Кількість рівнів з однаковою енергією називається кратністю виродження. Наприклад, у сферично-симетричній квантомеханічній системі, як ізольований атом, рівні з різними магнітними квантовими числами але з однаковим орбітальним квантовим числом l вироджені з кратністю $2l+1$.

Високотемпературний реактор — енергетичний ядерний реактор, розрахований на роботу при температурі порядку 600°C і вище. Висока температура дає змогу досягти високих термічних ККД атомних станцій.

Від'ємна температура абсолютна — характеристика розподілу частинок за енергіями в деяких не-рівноважних фізичних системах. Прикладом такої системи може бути робоча речовина лазера, нагріта зовнішнім джерелом енергії так, що в ній у збудженому стані перебуває більше атомів або молекул, ніж в основному стані. Від'ємна температура не є звичайною температурою, яка визначається як характеристика рівноважної термодинамічної системи. Без зовнішнього джерела енергії фізична система спонтанно переходить до стану, який характеризується звичайною температурою.

Далі буде... ☞