

ОСНОВА

видавнича група

ОСНОВА ПРОФЕСІЙНОГО ЗРОСТАННЯ



Науково-методичні журнали
<http://journal.osnova.com.ua>



Методична література
<http://book.osnova.com.ua>



Дистанційна Академія
<http://d-academy.com.ua>



Інтернет-марафони
<http://osnova.com.ua/marafon>

НЕ ПРОПУСТИТЬ
найважливішу подію серпня —
БЕЗКОШТОВНИЙ ІНТЕРНЕТ-МАРАФОН!

21-22 серпня
з 10:00 до 16:00

«ГОТУЄМОСЬ ДО НОВОГО
НАВЧАЛЬНОГО РОКУ 2018»

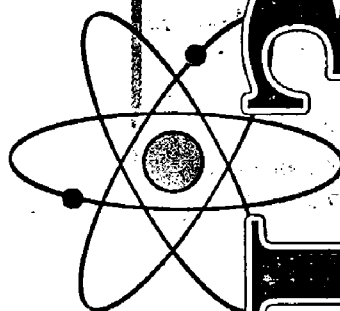
Реєстрація: <https://goo.gl/8QDmco>

СЕРПЕНЬ 2018

МИ З ВАМИ З 2002 РОКУ!

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

НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ ЖУРНАЛ



ІЗІКА

В школах України

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

№ 15-16 (355-356) серпень 2018 р. ■ Заснований у серпні 2003 р. ■ Виходить двічі на місяць ■ Передплатні індекси 08417, 95936, 08418, 37058 ■

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, С. І. Лапта, м. Харків

Електронного мікроскопа принцип дії — принцип, у якому для отримання зображення використовують фокусовані пучки електронів, якими бомбардують поверхню досліджуваного об'єкта. Зображення можна спостерігати різними способами — у променях, які пройшли через об'єкт, у відбитих променях, реєструючи вторинні електрони або рентгенівське випромінювання. Фокусування пучка електронів відбувається за допомогою спеціальних електронних лінз. Електронні мікроскопи можуть збільшувати зображення у 2 млн разів і більше. Висока роздільна здатність електронних мікроскопів досягається за рахунок малої довжини хвилі електрона. При цьому довжина хвилі видимого світла лежить у діапазоні розміром з атом, хоча практично здійснити це важко.

Електронограф — метод вивчення структури речовини, заснований на розсіянні прискорених електронів досліджуванним зразком. Застосовуваний для вивчення атомної структури кристалів, аморфних тіл і рідин, молекул у газах і парах. Фізична основа Е. — дифракція електронів (*див. Дифракція частинок*); під час проходження через речовину електрони, що мають хвилові властивості (*див. Корпускулярно-хвильовий дуалізм*), взаємодіють з атомами, унаслідок чого утворюються окре-

мі дифраговані пучки. Інтенсивності й просторовий розподіл цих пучків перебувають у строгій відповідності з атомною структурою зразка, розмірами й орієнтацією окремих кристалів та іншими структурними параметрами. Розсіювання електронів у речовині визначається електростатичним потенціалом атомів, максимуми якого в кристалі відповідають положенням атомних ядер.

Електронографічне дослідження проводять у спеціальних приладах — електронографах та електронних мікроскопах; в умовах вакууму електрони в них прискорюються електричним полем, фокусуються у вузький світлосильний пучок, а утворені після проходження через зразок пучки або фотографують (електронограми), або реєструють фотоелектричним пристроєм. Залежно від величини електричної напруги, прискорюючи електрони, розрізняють дифракцію швидких електронів (напруга від 30–50 до 1000 кеВ і більше) і дифракцію повільних електронів (напруга від декількох В до сотень В). Е. належить до дифракційних структурних методів (разом із рентгенівським структурним аналізом і нейтронографією) і має низку особливостей. Завдяки незрівнянно сильнішій взаємодії електронів із речовиною, а також можливості створення світлосильного пучка в електронографі експозиція для створення електронограм зазвичай становить близько секунди, що дозволяє досліджувати структурні

Продовження. Початок *див.* у № 3–4 (343–344), 5–6 (345–346), 7–8 (347–348), 9–10 (349–350), 11–12 (351–352) та 13–14 (353–354).

перетворення, кристалізацію тощо. В іншого боку, сильна взаємодія електронів із речовиною обмежує допустиму товщину просвічуваних зразків десятими долями мм (за напруги 1000–2000 кВ максимальна товщина — декілька мкм). Її дозволила вивчати атомні структури величезного числа речовин, що існують лише в дрібнокристалічному стані. Вона має також перевагу перед рентгеновським структурним аналізом у визначенні положення легких атомів у присутності важких (методам нейтронографії доступні такі дослідження, але лише для кристалів значно більших розмірів, ніж для досліджуваних в Е.). Вигляд отримуваних електронограм залежить від характеру досліджуваних об'єктів. Електронограми від плівок, що складаються з кристалів із досить точною взаємною орієнтацією або тонких монокристалічних пластинок, утворені крапками або плямами (рефлексами) із правильним взаємним розташуванням. За часткової орієнтації кристалів у плівках за певним законом (текстурі) виходять віддзеркалення у вигляді дуг (рис. 1). Електронограми від зразків, що складаються з безладно розташованих кристалів, утворені аналогічно дебаєграмам рівномірно зачорненими колами, а за зйомки на рухому фотопластину (кінематична зйомка) — паралельними лініями. Перераховані типи електронограм виходять у результаті пружного, переважно однократного розсіювання (без обміну енергією з кристалом). За багатократного непружного розсіювання виникають вторинні дифракційні картини від дифрагованих пучків (рис. 2). Подібні електронограми називаються кікуті-електронограми (названі на честь японського фізика Сейсї Кікуті, який

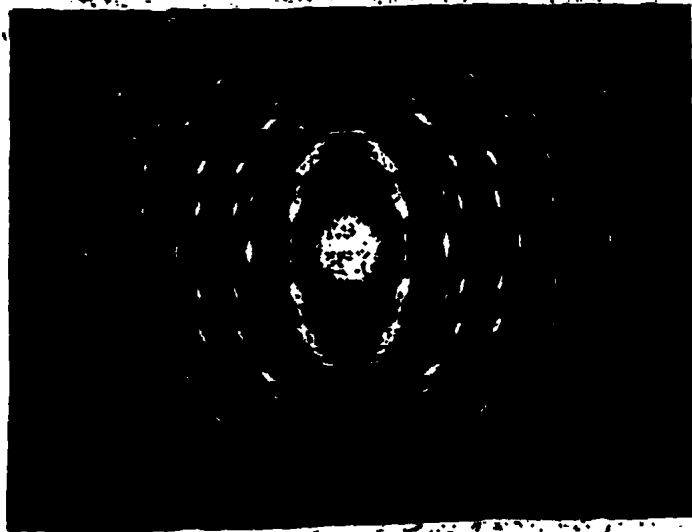


Рис. 1. Електронограма, отримана від текстури

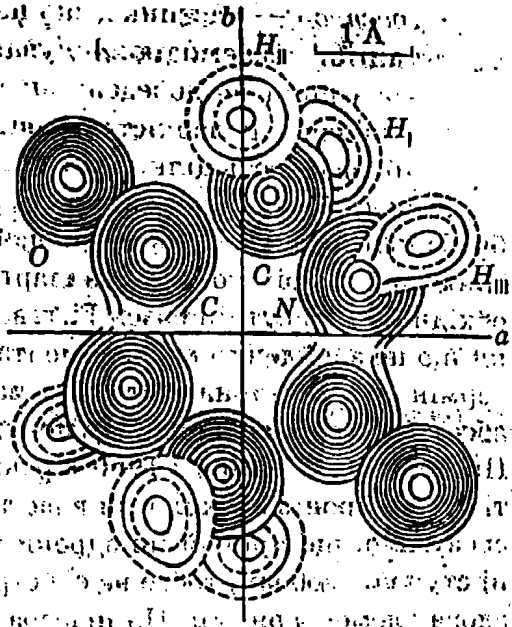


Рис. 2. Кікуті-електронограма, отримана методом «віддзеркалення» (симетрично розташовані темні й світлі кікуті-лінії)

Електронограми від молекул газу містять невелике число дифузних ореолів.

В основі визначення кристалічної структури лежить вимір розташування рефлексів на електронограмах. Міжплощинна відстань d у кристалі визначається зі співвідношення $d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$, де a — відстань від розсіювального зразка до фотопластини, l — де-бройлівська довжина хвилі електрона, визначувана його енергією, h, k, l — відстані від рефлексу до центральної плями, що створюється не розсіяними електронами. Методи розрахунку атомної структури кристалів в Е. аналогічні вживаним у рентгеновському структурному аналізі (змінюються лише деякі коефіцієнти). Вимір інтенсивностей рефлексів дозволяє визначити структурні амплітуди F . Так, формула для розподілу електростатичного потенціалу $V(x, y, z)$ аналогічна формулі розподілу електронної густини $\rho(x, y, z)$ у рентгеновському структурному аналізі. Розрахунок значень, зазвичай, проводиться на ЕОМ (електронна обчислювальна машина), що дозволяє встановити координати x, y, z атомів, відстані між ними тощо (рис. 3). Методами Е. було визначено багато невідомих атомних структур, уточнені і доповнені рентгеноструктурні дані для великої кількості речовин, у тому числі безліч ланцюгових і циклічних вуглеводнів, у яких уперше були локалізовані атоми водню, молекули нітрилу перехідних металів (Fe, Cr, Ni, W), великий клас оксидів ніобію, ванадію й танталу а локалізацією атомів N і O відповідно, а також 2- β -8-компонентних напівпровідникових з'єднань, глинистих мінералів і шаруватих структур. За до-

■ Рис. 3. Електричний потенціал молекули дікетопіперазину в кристалічній структурі, отриманий тривимірним Фур'є-синтезом; а і б — осі симетрії молекули. Згущування ліній відповідає положенням атомів.



помогою Е, можна також вивчати будову дефектних структур. У комплексі з електронною мікроскопією Е дозволяє вивчати міру досконалості структури тонких кристалічних плівок, використовуваних у різних областях сучасної техніки. Для процесів епітаксії істотним є контроль міри досконалості поверхні підкладки до нанесення плівок, який виконується за допомогою кікучі-електронограм: навіть незначні порушення її структури приводять до розмиття кікучі-ліній. На електронограмах, що отримуються від газів, немає чітких рефлексів (тобто об'єкт не володіє строго періодичною структурою), їх інтерпретація здійснюється іншими методами. Інтенсивність кожної точки цих електронограм визначається як молекулою в цілому, так і вхідними в неї атомами. Для структурних досліджень важлива молекулярна складова, атомну ж розглядають як фон і вимірюють відношення молекулярної інтенсивності до загальної інтенсивності в кожній точці електронограм. Ці дані дозволяють визначати структури молекул із числом атомів до 10–20, а також характер їхніх теплових коливань у широкому інтервалі температур. Таким шляхом вивчена будова багатьох органічних молекул, структури молекул галогенідів, оксидів та інших з'єднань. Аналогічним методом проводять аналіз атомної структури ближнього порядку в аморфних тілах, стеклах і рідинах. Під час використання повільних електронів їх дифракція супроводжується ефектом Оже та іншими явищами, що виникають унаслідок сильної взаємодії повільних електронів з атомами. Недостатній розвиток теорії й складність експерименту ускладнюють однозначну інтерпретацію дифрак-

ційних картин. Використання цього методу доцільне в поєднанні з мас-та Оже-спектроскопією для дослідження атомної структури адсорбованих шарів, наприклад газів, і поверхонь кристалів на глибину декількох атомних шарів (на 10–30). Ці дослідження дозволяють вивчати явища адсорбції, початкові стадії кристалізації тощо.

Електрослабка взаємодія — загальна назва взаємодії, що об'єднує слабку й електромагнітну взаємодії за енергій $E \gg 10^2$ Гев. За малих енергій Е, виокремлюється на електромагнітну й слабку, а теорія слабкої взаємодії Глешоу — Вайнберга — Салама переходить у теорію Ферма. Теорією Егві передбачено існування нейтральних слабких струмів, описало слабкі взаємодії адронів через взаємодію їхніх складових кварків, передбачено існування шарівного с-кварка. Усі передбачення цієї теорії підтвердилися на дослідах.

Елементарна частинка — збірний термін, що стосується мікрооб'єктів у суб'ядерному масштабі, які неможливо розщепити на складові частини. Їх будова й поведінка вивчається фізикою елементарних частинок. Поняття елементарних частинок ґрунтується на факті дискретної будови речовини. Низка елементарних частинок має складну внутрішню структуру, проте розділити їх на частини неможливо. Інші елементарні частинки безструктурні й можуть вважатися первинними фундаментальними частинками. Е.ч. — найдрібніші суб'ядерні частинки речовини або фізичного поля. Це дискретні структурні елементи, що можуть існувати в неасоційованому стані. Найхарактернішою особливістю елементарних частинок є їхня здатність до перетворень і взаємодії. При цьому дочірні частинки — це не структурні складові материнських, вони народжуються під час актів перетворення. За властивостями елементарні частинки поділяють на такі групи: фотони, лептони, мезони й баріони (нуклони й гіперони). Майже всі елементарні частинки нестабільні (окрім електрона, протона, нейтрона, нейтрино, фотона). Основні характеристики елементарних частинок: електричний заряд, маса, тривалість життя, спіна, лептонний і баріонний заряди, дивність (квантове число). Починаючи з 1932 року було відкрито понад 400 елементарних частинок, і це число зростає й надалі. Дослідження останніх десятиліть ХХ ст. показали відносність вживання терміна «елементарні» до ряду частинок. Зокрема, виявлено внутрішню структуру протона, нейтрона, інших частинок. Вони складаються з кварків,

пар «кварк — антикварк» та глюонів (кванти поля). Своєю чергою, кварки, можливо, теж мають свою структуру, хоча на сучасному рівні знань вони є фундаментальними складовими адронів. Сучасний нам набір елементарних частинок не був таким протягом усього існування Всесвіту. На самих його початках у момент часу 10^{-33} с після Великого вибуху існували частинки-прабатьки, так звані преони, з енергією понад 10^{15} GeV. Прямими «нащадками» преонів стали кварки, що близько 10^{-6} с після Великого вибуху утворили вже згадані протони й нейтрони. За цими уявленнями через приблизно 3 хв після початку процесу утворилася більша частина ядер гелію, які існують у Всесвіті.

За величиною спіну всі елементарні частинки поділяють на два класи:

- **ферміони** — частинки з напівцілим спіном (наприклад, електрон, протон, нейтрон, нейтрино);
- **бозони** — частинки з цілим спіном (наприклад, фотон).

За видами взаємодій елементарні частинки поділяють на такі групи:

- **адрони** — частинки, що беруть участь у всіх видах фундаментальних взаємодій; вони складаються з кварків і поділяються, своєю чергою, на:
 - **мезони** (адрони з цілим спіном, тобто бозони);
 - **баріони** (адрони з напівцілим спіном, тобто ферміони); до них, зокрема, належать частинки, що становлять ядро атома, — протон і нейтрон;
- **лептони** — ферміони, які мають вид точкових частинок (тобто такі, що не складаються ні з чого) аж до масштабів порядку 10^{-18} м. Не беруть участі в сильних взаємодіях. Участь в електромагнітних взаємодіях експериментально спостерігали тільки для заряджених лептонів (електрони, мюони, тау-лептони) і не спостерігали для нейтрино. Відомі 6 типів лептонів;
- **кварки** — дробовозаряджені частинки, що входять до складу адронів. У вільному стані їх не спостерігали. Як і лептони, діляться на 6 типів і є безструктурними, проте, на відміну від лептонів, беруть участь у сильній взаємодії;
- **калібрувальні бозони** — частинки, за допомогою обміну якими здійснюються взаємодії:
 - **фотон** — частинка, що переносить електромагнітну взаємодію;
 - **вісім глюонів** — частинки, що переносять сильну взаємодію;
 - **три проміжні векторні бозони**, W^+ , W^- та Z^0 , що переносять слабку взаємодію;

- **гравітон** — частинка, що переносить гравітаційну взаємодію. Існування гравітонів, хоча поки не доведено експериментально, у зв'язку зі слабкістю гравітаційної взаємодії вважають цілком імовірним.

Адрони й лептони утворюють речовину. Калібрувальні бозони — це кванти різних видів випромінювання. Крім того, у Стандартній моделі з необхідності присутній бозон Гіггса, який, утім, поки що не знайдений експериментально. Спочатку термін «елементарна частинка» мав на увазі щось абсолютно елементарне, першопочаткову матерію. Проте, коли в 1950-х і 1960-х роках були відкриті сотні адронів зі схожими властивостями, стало зрозуміло, що принаймні адрони мають внутрішні ступені свободи, тобто не є в строгому значенні слова елементарними. Ця підозра надалі підтвердилася, коли з'ясували, що адрони складаються з кварків. Таким чином, наука просунулася ще трошки вглиб будови речовини: найелементарнішими, точковими частинами речовини зараз вважають лептони й кварки. Саме щодо них (разом із калібрувальними бозонами) застосовують термін «фундаментальні частинки».

У таблиці 1 подано характеристики різних типів взаємодій між Е. ч.

Таблиця 1

| Взаємодія | Константа взаємодії | Радіус взаємодії, м | Характерний час взаємодії, с |
|-----------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| Сильна | 1 | 10^{-15} | 10^{-23} |
| Електромагнітна | 1/137 | Необмежений | 10^{-21} |
| Слабка | 10^{-14} | 10^{-18} | 10^{-9} |
| Гравітаційна | 10^{-39} | Необмежений | 10^{-8} років |

Таблиця 2. Характеристики елементарних частинок

| Назва частинки й античастинки | Символ | Маса спокою | Спін \hbar | Електричний заряд | Лептонний заряд | Баріонний заряд | Час життя (середній) у с |
|-------------------------------|---------------------|-------------|---------------|-------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|
| Фотон | γ | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | Стабільний |
| Лептони | | | | | | | |
| Нейтрино | ν | 0 | $\frac{1}{2}$ | 0 | 0 | 0 | Стабільний |
| електронні | e^- / \bar{e}^+ | 0 | $\frac{1}{2}$ | 0 | +1 / -1 | 0 | Стабільний |

| Назва частинки й античастинки | Символ | Маса спокою | Спін \hbar | Електричний заряд | Лейтонний заряд | Баріонний заряд | Час життя (середній) у с |
|-------------------------------|--|-------------|---------------|-------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|
| мюонні | $\begin{cases} \nu_{\mu} \\ \bar{\nu}_{\mu} \end{cases}$ | 0 | $\frac{1}{2}$ | 0 | +1 | 0 | Стабільний |
| Електрони: | | | | | | | |
| електрон | e^{-} | 1 | $\frac{1}{2}$ | -1 | +1 | 0 | Стабільний |
| позитрон | e^{+} | 1 | $\frac{1}{2}$ | +1 | -1 | 0 | Стабільний |
| Міони: | | | | | | | |
| μ^{+} -мезон | μ^{+} | $207m_e$ | $\frac{1}{2}$ | +1 | +1 | 0 | $2,2 \cdot 10^{-8}$ |
| μ^{-} -мезон | μ^{-} | $207m_e$ | $\frac{1}{2}$ | -1 | -1 | 0 | $2,2 \cdot 10^{-8}$ |
| Мезони | | | | | | | |
| Піони | | | | | | | |
| π^{+} -мезон | π^{+} | $273m_e$ | 0 | +1 | 0 | 0 | $2,5 \cdot 10^{-8}$ |
| π^{-} -мезон | π^{-} | $273m_e$ | 0 | -1 | 0 | 0 | $2,5 \cdot 10^{-8}$ |
| π^0 -мезон | π^0 | $264m_e$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $1,8 \cdot 10^{-8}$ |
| Каони: | | | | | | | |
| K^{+} -мезон | K^{+} | $966m_e$ | 0 | +1 | 0 | 0 | $1,3 \cdot 10^{-8}$ |
| K^{-} -мезон | K^{-} | $966m_e$ | 0 | -1 | 0 | 0 | $0,9 \cdot 10^{-8}$ |
| K^0 -мезон | K^0 | $975m_e$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $5,6 \cdot 10^{-8}$ |
| анти- K^0 -мезон | \bar{K}^0 | $975m_e$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $5,6 \cdot 10^{-8}$ |
| Баріони | | | | | | | |
| Нуклони: | | | | | | | |
| протон | p | $1836m_e$ | $\frac{1}{2}$ | +1 | 0 | +1 | Стабільний |
| антипротон | \bar{p} | $1836m_e$ | $\frac{1}{2}$ | -1 | 0 | -1 | Стабільний |
| нейтрон | n | $1839m_e$ | $\frac{1}{2}$ | 0 | 0 | +1 | 1000 |
| антинейтрон | \bar{n} | $1839m_e$ | $\frac{1}{2}$ | 0 | 0 | -1 | β^{+} -активний |
| Гперони: | | | | | | | |
| ламбда | Λ^0 | $2182m_e$ | $\frac{1}{2}$ | 0 | 0 | +1 | $2,6 \cdot 10^{-10}$ |
| сігма-плюс | Σ^{+} | $2331m_e$ | $\frac{1}{2}$ | +1 | 0 | +1 | $0,8 \cdot 10^{-10}$ |

| Назва частинки й античастинки | Символ | Маса спокою | Спін \hbar | Електричний заряд | Лейтонний заряд | Баріонний заряд | Час життя (середній) у с |
|-------------------------------|--------------|-------------|---------------|-------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|
| сігма-мінус | Σ^{-} | $2347m_e$ | $\frac{1}{2}$ | -1 | 0 | +1 | $1,5 \cdot 10^{-10}$ |
| сігма-нуль | Σ^0 | $2337m_e$ | $\frac{1}{2}$ | 0 | 0 | +1 | $< 1,0 \cdot 10^{-11}$ |
| кси-нуль | Ξ^0 | $2576m_e$ | $\frac{1}{2}$ | 0 | 0 | +1 | $2,9 \cdot 10^{-10}$ |
| кси-мінус | Ξ^{-} | $2590m_e$ | $\frac{1}{2}$ | -1 | 0 | +1 | $1,6 \cdot 10^{-10}$ |

Елементарний електричний заряд — фізична константа, яка характеризує силу електромагнітної взаємодії, абсолютне значення заряду електрона.

Елементарний заряд позначається літерою e . Оскільки електрон негативно заряджений, його заряд дорівнює $-e$.

У СІ $e = 1,602176487(40) \cdot 10^{-19}$ Кл.

Елементарний електричний заряд є також фізичною одиницею, у якій вимірюють заряди частинок чи часткові заряди на атомах хімічних сполук. Проведені наприкінці XIX століття експерименти з відхилення анодних і катодних променів в електронно-променевої трубі (Джозеф Джон Томсон) та вимірювання заряду олійних краплинок (Роберт Мілікен) довели, що електричний заряд може приймати значення, кратні певному елементарному заряду. На основі цих експериментів була запропонована гіпотеза існування негативно зарядженої частинки, яка була б носієм заряду. Цю частинку назвали електроном. За теорією кварків ці елементарні частинки мають дробовий заряд, який становить $\frac{1}{3}$ або $\frac{2}{3}$ заряду електрона. Проте кварки існують лише в складі частинок із цілочисельним зарядом.

Еман — застаріла одиниця концентрації радіоактивних нуклідів у рідинах або газах. Наприклад, концентрація радону у воді. Застосовують тільки для альфа-активних нуклідів.

Енергія зв'язку атома — це та мінімальна енергія, яку треба витратити, щоб роз'єднати ядро на окремі нуклони, що входять до його складу. Точні вимірювання мас атомних ядер показали, що $m_A < Zm_p + Nm_n$.

Причина виникнення дефекту має полягати в тому, що для утворення ядра з вільних протонів і нейтронів потрібно виконати роботу, яка чисельно дорівнює енергії зв'язку m_0 .

Енергія зв'язку електрона — величина, яка дорівнює роботі, яку необхідно здійснити для видалення електрона з атома. Мінімальна Е. з. е. називається енергією йонізації атома. Одиниця Е. з. е. в СІ є джоуль (Дж).

Енергія зв'язку нуклона в ядрі — величина, яка дорівнює роботі, яку потрібно здійснити, щоб видалити нуклон із ядра без надання йому кінетичної енергії. Е. з. н. в я. залежить від числа нуклонів, причому зв'язок проявляє певну періодичність, тому найбільшу енергію зв'язку нуклона мають магічні ядра. Одиницею Е. з. н. в я. у СІ є джоуль (Дж), однак частіше використовують електрон-вольт (еВ).

Енергія зв'язку ядра — величина, що дорівнює роботі, яку необхідно здійснити, щоб розділити ядро на складові нуклони без надання їм кінетичної енергії.

Енергія спокою частинки — фізична величина, яка характеризує релятивістську енергію тіла в тій інерціальній системі відліку, у якій тіло є нерухомим, і дорівнює

$$E_0 = m_0 c^2$$

де m_0 — маса спокою, c — швидкість світла у вакуумі. Одиниця Е. с. ч. у СІ — джоуль (Дж); для частинок — електрон-вольт (еВ).

Ефективна маса — величина, яка характеризує інерціальні властивості квазічастинок за параболічним законом дисперсії. Ефективна маса здебільшого позначається латинською літерою m з астериском: m^* . До цього позначення додають нижній індекс, який указує, до якої з квазічастинок це позначення стосується. Використовують індекс «e» для електронів, «h» для дірок, «ex» для екситонів тощо. Ефективна маса вимірюється здебільшого в одиницях маси вільного електрона. Ефективна маса використовується у напівкласичному описі кінетичних явищ в твердих тілах. Рух квазічастинки, наприклад електрона провідності, дірки чи екситона, у зовнішніх полях у багатьох випадках аналогічний руху вільної частинки у вакуумі, проте з іншою масою.

Ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів — кількість нейтронів, які спричиняють нову реакцію поділу, на один акт поділу ядра. Позначається здебільшого літерою k . За кожного поді-

лу ядра утворюється певна кількість нейтронів, зазвичай 2–3, з енергіями в широкому діапазоні. Частина з цих нейтронів може поглинутися іншим ядром і зумовити нову реакцію поділу. Інша частина втрачається для ланцюгової реакції — поглинається ядрами, неспроможними до поділу, вилітає за межі реактора, розпадається. Ефективний коефіцієнт розмноження кількісно характеризує хід ланцюгової реакції. Якщо $k > 1$, то реакція набирає ходу, ядра діляться дедалі частіше, за $k < 1$ реакція загасає, за $k = 1$ підтримується стабільний режим.

Коефіцієнт розмноження можна оцінити за формулою

$$k = \nu \epsilon p f \frac{\sigma_f}{\sigma_a}$$

де ν — кількість швидких нейтронів, які утворюються в середньому за акту поділу, ϵ — фактор, що описує додаткове утворення швидких нейтронів під час реакцій поділу, ініційованих швидкими нейтронами, p — імовірність того, що нейтрон сповільниться, уникнувши поглинання, f — коефіцієнт використання теплових нейтронів,

$\frac{\sigma_f}{\sigma_a}$ — відношення перерізу реакції поділу до повного перерізу реакції для захопленого нейтрона. Наприклад, для реактора на природному урані з графітовим сповільнювачем ці фактори можна оцінити, як $\nu = 2,47$, $\epsilon = 1,02$, $p = 0,89$, $f = 0,88$, $\frac{\sigma_f}{\sigma_a} = 0,54$, що приводить до величини $k = 1,07$ для реактора необмежених розмірів. Обмежені розміри реактора зменшують значення k . Додатково k можна зменшити до 1, вводячи в реактор стрижні з поглиначем.

Ефективний переріз ядерної реакції σ — інтенсивність взаємодій різних частинок із ядрами. Величина має розмірність площі й характеризує вихід реакції на одну частинку, яка опромінює ядро:

$$\sigma = \frac{dn_0}{n_0 N_0 dx}$$

У цьому визначенні йдеться про те, що за одиницю часу на одиницю площі поперечного перерізу речовини, що містить N_0 ядер в одиниці об'єму, падає плоскопаралельний потік, що містить n_0 частинок; dn_0 — кількість цих частинок, що зазнали ядерної реакції в шарі товщиною dx . Він залежить від розмірів ядер-мішені й від типу ядерної реакції, має розмірність площі, що

припадає на одну частинку. Ефективний переріз у СІ вимірюється у квадратних метрах. Раніше вживана одиниця барн дорівнює 10^{-28} м^2 . Наприклад, у дослідях Резерфорда для реакцій α -частинок із ядрами азоту $\sigma = 0,055 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$.

Ефект Мессбауера — фізичне явище резонансного поглинання гамма-випромінювання атомів у твердому тілі. Ефект названо на честь Рудольфа Мессбауера, який 1957 року розробив метод спостереження резонансного поглинання. Використовуваний для вивчення енергетичних рівнів атомного ядра, проте з іншою масою.

кож квантування теорії. 1967 року Салам і Вайнберг створили теорію електрослабкої взаємодії, що об'єднала електромагнетизм і слабкі взаємодії. Пізніше, 1973 року, була запропонована теорія сильної взаємодії (квантова хромодинаміка). На їх основі була побудована Стандартна модель елементарних частинок, що описує електромагнітну, слабку й сильну взаємодії. Експериментальна перевірка Стандартної моделі полягає у виявленні передбачених нею частинок та їхніх властивостей. Зараз відкриті всі елементарні частинки Стандартної моделі. Таким чином, у наш час фундаментальні взаємодії описують двома загальноприйнятими теоріями: загальною теорією відносності й Стандартною моделлю. Їх об'єднання поки досягти не вдалося через труднощі створення квантової теорії гравітації. Для подальшого об'єднання фундаментальних взаємодій використовують різні підходи: теорії струн, петльова квантова гравітація, теорії бран, а також перспективна М-теорія.

Єдина теорія поля — фундаментальна теорія, створення якої дало б можливість пояснити всі закони взаємодії частинок та їхні властивості, звести їх до малої кількості універсальних принципів. Це стратегічний напрямок розвитку фізики елементарних частинок, метою якого є розкриття єдності всіх видів взаємодій, єдності в побудові всіх елементарних частинок, пояснення розмаїття їхніх властивостей. Початкові спроби здійснили ще Ейнштейн, Гейзенберг та ін. Першим успіхом на цьому шляху прийнято вважати теорію електрослабкої взаємодії Вайнберга — Глешоу — Салама. Але до повного успіху ще далеко.

Єдина теорія фундаментальних взаємодій — теорія об'єднання електричних і магнітних явищ. Першою з теорій взаємодій стала теорія електромагнетизму, яку створив Максвелл 1863 року. Потім, 1915 року, Ейнштейн сформулював загальну теорію відносності, що описує гравітаційне поле. З'явилася ідея побудови єдиної теорії фундаментальних взаємодій (яких на той момент було відомо тільки дві), подібно до того, як Максвеллу вдалося створити загальний опис електричних і магнітних явищ. Така єдина теорія об'єднала б гравітацію й електромагнетизм, як часткові прояви певної єдиної взаємодії. Протягом першої половини ХХ століття ряд фізиків зробили численні спроби створення такої теорії, проте жодної повністю задовільної моделі висунуто не було. Це, зокрема, пов'язано з тим, що загальна теорія відносності й теорія електромагнетизму різні за своєю сутністю. Тяжіння описане викривленням простору часу, і в цьому значенні гравітаційне поле нематеріальне, тоді як електромагнітне поле є матерією.

У другій половині ХХ століття завдання побудови єдиної теорії ускладнилося необхідністю внесення в неї слабкої й сильної взаємодій, а та-

Жорстке випромінювання — те саме, що й променеве випромінювання.

G-парність (η_c) — квантове число, застосовуване у фізиці елементарних частинок для опису мультиплетів, узагальнення зарядової парності.

Наприклад, піони — це триплет частинок π^+ , π^0 , π^- . З них тільки нейтральний піон π^0 має зарядову парність. Однак для сильної взаємодії заряд частинки неважливий. Тому в процесах тільки із сильною взаємодією весь триплет можна характеризувати одним квантовим числом η_c , що зберігається в цих процесах.

За слабкої та електромагнітної взаємодії G-парність не зберігається.

Загальна теорія відносності, релятивістська теорія гравітації — сучасна теорія простору, часу й тяжіння. Остаточнo її сформулював у 1915 р. А. Ейнштейн. В основі ЗТВ лежить експериментальний факт рівності інертної маси (яка входить в основний закон динаміки Ньютона) і гравітаційної маси (яка входить до закону всесвітнього тяжіння Ньютона), який Ейнштейн узагальнив у вигляді принципу еквівалентності інертної й гравітаційної мас. Це дозволяє трактувати тяжіння як викривлення просторово-часового континуума. У рамках ЗТВ властивості руху в неінерціальній системі відліку ті ж, що і в інерційній

системі відліку за наявності гравітаційного поля. Ейнштейн отримав рівняння гравітаційного поля, які пов'язують кривину простору-часу з просторовим розподілом джерел тяжіння. Рівняння ЗТВ відзначаються складністю й досі не вивчені в повному обсязі. Однак деякі передбачення цих рівнянь, зокрема про викривлення простору-часу й уповільнення ходу часу в сильних гравітаційних полях, уже знайшли експериментальне підтвердження.

Закон збереження дивності — за сильних та електромагнітних взаємодій алгебраїчна сума дивностей усіх частинок в ізольованій системі залишається незмінною.

Закон збереження ізотопічного спіну — закон, який формулюється таким чином: повний ізотопічний спін усіх частинок ізольованої системи залишається постійним лише за перетворень, спричинених сильними взаємодіями, але змінюється за всіх інших видів взаємодій. Проекція ізотопічного спіну зберігається як за сильної, так і за електромагнітних взаємодій.

Закон збереження лептонного заряду — процеси за участю лептонів відбуваються так, що алгебраїчна сума лептонних зарядів залишається незмінною.

Закони збереження — фундаментальні закони природи, згідно з якими числові значення деяких фізичних величин залишаються незмінними в часі й будь-яких процесах або в певному класі процесів. Найбільш фундаментальними з них і справедливими для будь-яких ізольованих систем є 3. з імпульсу, енергії, моменту імпульсу (моменту кількості руху), об'єднаний 3. з маси і енергії, 3. з електричного заряду. Близькі до них по універсальності нерелятивістські закони 3. з маси, механічної енергії. Установлена група 3. з. в фізиці елементарних частинок.

3. з. поділяються на точні та обмежені. До перших належать, наприклад, закон збереження електричного заряду, баріонного та лептонного заряду. Обмежені — це закони, справедливі для певного кола явищ, наприклад закони збереження парності, дивності, чарівності, привабливості, які можуть порушуватися за слабкої взаємодії, але не порушуються за сильної. На основі цих законів можна робити певні передбачення відносно можливості певних реакцій, властивостей деяких частинок.

Закони збереження енергії, заряду та імпульсу для ядерних реакцій — закони, у яких виконують-

ся закони збереження енергії, заряду та імпульсу частинок ядра. Запишемо баланс енергії в реакції:

враховуючи, що повна енергія ядра й частинок дорівнює сумі їхніх енергій спокою mc^2 і кінетичної енергії E :

$$m_x c^2 + m_a c^2 + E_x + E_a = m_y c^2 + m_b c^2 + E_y + E_b$$

З цього рівняння можна визначити енергію ядерної реакції (або тепловий ефект Q) як зміну кінетичної енергії в процесі реакції:

$$Q = (E_y + E_b) - (E_x + E_a) = [(m_x + m_a) - (m_y + m_b)]c^2 = \Delta mc^2$$

Якщо масу вимірювати в а. о. м., то $Q = 931 \Delta m$ MeV.

Маси спокою для поданого набору ядер і частинок мають цілком певне значення, тому Q набуває характерного значення для кожної ядерної реакції.

За радіоактивного розпаду справджується закон збереження енергії, згідно з яким повна енергія материнського ядра дорівнює повній енергії продуктів розпаду:

$$m_x c^2 = (m_y + m_a) c^2 + E_p$$

де E_p — повна енергія розпаду, яка дорівнює зміні енергії спокою материнського ядра, що перетворюється на кінетичну енергію дочірнього ядра, частинки й γ -квантів, що вилітає.

За радіоактивного розпаду ядер виконується закон збереження зарядових чисел:

$$Z_x = \sum Z_i$$

де Z_x — зарядове число ядра, яке зазнало розпаду, Z_i — зарядові числа ядер і частинок, що виникли внаслідок розпаду.

Крім того, виконується правило збереження масових чисел:

$$A_x = \sum A_i$$

Ці співвідношення за радіоактивного розпаду формулюють у вигляді правил зміщення, які дають змогу встановити, яке ядро виникає внаслідок розпаду певного материнського ядра. При цьому розрізняють правила зміщення для випадків можливого α - або β -розпаду:

- за α -розпаду: ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$,
- за β -розпаду: ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e$.

Далі буде. ☼