



КВАНТОВА ТЕОРІЯ ПОЛЯ — квантова теорія релятивістських систем із нескінченно великим числом ступенів вільності (релятивістських полів), яка є теоретичною основою опису мікрочастинок, їх взаємодії та взаємоперетворень. Квантове (квантоване) хвильове поле — фундам. фіз. концепція, в рамках якої формулюється динаміка елементар. частинок і їх взаємодій. Квант. поле є своєрід. синтезом понять класич. поля типу електромагніт. поля Фарадея-Максвелла та поля ймовірностей **квантової механіки**. Згідно із сучас. уявленнями воно є найфундаментальнішою та найуніверсальнішою формою матерії, яка лежить в основі всіх її конкрет. (як хвильових, так і корпускуляр.) проявів. У К. т. п. як поля, так і частинки класич. фізики замінують єдині фіз. об'єкти — квант. поля в 4-вимір. просторі-часі, по одному для кожного сорту частинок чи полів (класичних). Зазвичай квант. поле «отримують» шляхом квантування класичного, у результаті чого польова функція набуває операторного характеру та лінійно виражається через оператори народження та знищення частинок, між якими встановлюються належні переставні співвідношення (комутатори для бозе-частинок і антикомутатори для фермі-частинок). При цьому виникає можливість описувати найважливіші властивості світу мікрочастинок — процеси їхнього взаєм. перетворення. Важливим тех. аспектом процедури квантування полів є представлення чисел заповнення (вторин. квантування). Це представлення найпростіше запроваджується на прикладі квантовомех. осцилятора та широко використовується під час розгляду систем зі змін. числом частинок. Згадану схему квантування полів запропонував 1927 англ. фізик П.-А.-М. Дірак і в подальшому (1932) детально розвинув рос. фізик В. Фок. Ще одну схему квантування, в якій релятивіст. інваріантність зберігається на всіх проміжних етапах, розробив наприкінці 1940-х рр. амер. фізик Дж. Швінгер. Серед перших праць, що заклали основи К. т. п., була також стаття нім. фізика П. Йордана та швейцар. фізика В. Паулі (1928) про квантування вільного електромагніт. поля. Реал. світу взаємодіючих частинок у К. т. п. відповідає система зв'язаних рівнянь для різних полів. Після квантування вирази (лагранжіан чи гамільтоніан взаємодії) описують елементарні акти взаємодії різних частинок. Наочну інтерпретацію такі вирази отримують у правилах відповідності та діаграмах, розроблених 1949 амер. фізиком Р.-Ф. Фейнманом. Того ж року амер. фізик Ф.-Дж. Дайсон довів зв'язок діаграм. техніки Фейнмана з коваріант. формулюванням К. т. п., запропонованим япон. фізиком С. Томонагою (1946) та Дж. Швінгером

(1948). За фундам. внесок у створення сучас. **квантової електродинаміки** — квант. теорії електромагніт. процесів — 1965 Р.-Ф. Фейнману, С. Томоназі та Дж. Швінгеру присуджено Нобелів. премію. Діаграми Фейнмана не тільки дають наочне зображення процесів поширення (лінії) та взаємоперетворення (вершини) частинок, але й дозволяють за допомогою певних матем. правил знаходити матричні елементи матриці розсіяння (або S -матриці) та ймовірності цих процесів. Особливо прості вирази одержують для матрич. елементів будь-якого процесу в нижчому порядку теорії збурень, котрим відповідають т. зв. деревинні діаграми, що не мають замкнених зашморгів (петель). Проте спроби обчислення елементів матриці розсіяння у вищих наближеннях (т. зв. радіац. поправок) наштовхувалися на специфічні труднощі, які на два десятиріччя загальмували розвиток теорії елементар. частинок. Ці труднощі полягають у тому, що вирази для матрич. елементів у вищих наближеннях містять інтеграли, які розбігаються в зоні великих імпульсів віртуал. частинок, тобто в ультрафіолет. зоні. Проблема ультрафіолет. розбіжностей була розв'язана у 2-й пол. 1940-х рр. на підставі ідеї про перенормування. Суть останньої полягає в тому, що нескінченні ефекти квант. флуктуацій, які відповідають замкненим зашморгам (петлям) діаграм Фейнмана, можуть бути виділені у фактори, що мають характер поправок до вихідних характеристик системи. У підсумку маси m та константи зв'язку g змінюються за рахунок взаємодії, тобто перенормовуються й отождожуються з їхніми фіз. значеннями. Клас моделей К. т. п., для яких таку програму можна послідовно провести у всіх порядках теорії збурень і в яких усі без винятку ультрафіолет. розбіжності вдається «зібрати» у фактори перенормування мас та констант зв'язку, називають класом перенормувал. теорій. Уперше можливість усунення ультрафіолет. розбіжностей за допомогою нескінчен. перенормувань довів у своїй праці з нерелятивіст. розрахунку лембів. зсуву $2S_{1/2}$ та $2P_{1/2}$ рівнів атома водню нім. і амер. фізик Г.-А. Бете (1947). У 1949 Дж. Швінгер обчислив радіац. поправку до магніт. моменту електрона. У 1-й пол. 1950-х рр. Ф.-Дж. Дайсон, пакистан. фізик А. Салам та укр. і рос. математик, фізик **М. Боголюбов** розробили заг. теорію перенормувань, для класу т. зв. перенормувал. взаємодій побудували перенормовану теорію збурень. Матем. підґрунтя цієї теорії становить доведена М. Боголюбовим разом з укр. математиком, фізиком **О. Парасюком** теорема про перенормування (теорема Боголюбова-Парасюка). З неї випливає достатньо зруч. спосіб однознач. вилучення розбіжностей з діаграм Фейнмана, формалізований у ви-

гляді т. зв. R -операції Боголюбова-Парасюка. Фундам. результатом К. т. п. також є відкриття М. Боголюбовим спільно з рос. фізиками А. Логуновим і Д. Ширковим ренормгруп. симетрії як точної властивості перенормувал. квантово-польового розв'язку для функцій Гріна. Воно призвело до побудови методу ренормалізацій. групи, який застосовують у теор. і матем. фізиці. Важливого значення набули інваріант. заряд електрона та поняття біжучої константи зв'язку. Їхнє використання в концепції асимптотич. волі сприяло розвитку неабелевої калібрувал. теорії. Дослідженню низки фундам. проблем К. т. п., зокрема квант. електродинаміки, були присвячені праці всесвітньо відомої харків. наук. школи Л. Ландау (О. Ахієзер, Д. Волков, П. Фомін, Р. Половін, М. Меренков, В. Болдишев, М. Шульга, М. Рекало, С. Пелетминський). Одну з перших у світі монографій з квант. електродинаміки написали О. Ахієзер і В. Берестецький. Цю книгу декілька разів перевидавали та перекладали багатьма мовами світу. Матем. апарат сучас. К. т. п. виник і почав активно розвиватися у 1950-х рр. в рамках т. зв. аксіоматич. підходу. Відразу ж визначилися принаймні 3 напрями. У аксіоматич. підході амер. фізика А.-С. Вайтмана (1956) вихід. фіз. об'єктами слугують найрегулярніші величини — квант. поля у представленні Гайзенберга та вакуумні середні їх звичай. добутоків (функції Вайтмана). Вайтманів. підхід дозволив вивести із осн. принципів релятивіст. К. т. п. (аксіом релятивіст. інваріантності, спектральності, мікропричинності) такі фундам. фіз. результати, як зв'язок спіну частинок з їх статистикою, теореми про СРТ-інваріантність, Гаага і Голдстоуна та ін. У аксіоматич. підході нім. фізиків Г. Лемана, К. Сіманзика та В. Цімермана (1955–57) осн. поняттями є хронологічні (або T -) добутки полів (а також їхні вакуумні середні — функції Гріна) та асимптотична умова. Такий підхід не найекономішій (теорію розсіяння можна розвинути без запровадження заздалегідь поняття T -добутку), проте він практичний і досить зручний та наближає до традиц. методу Лагранжа. В аксіоматич. підході М. Боголюбова та рос. фізиків Б. Медведєва і М. Поліванова (1955) осн. об'єктом є розширена (за масову оболонку) S -матриця, що задовольняє вимоги лоренц-інваріантності, унітарності й причинності. Умова причинності S -матриці, висловлена мовою варіац. похідних, нині відома як умова мікропричинності Боголюбова. 1956 М. Боголюбов подав перше доведення дисперсій. співвідношень для пруж. розсіяння піонів на нуклонах. У зв'язку з доведенням дисперсій. співвідношень він відкрив і довів теорему з теорії функцій багатьох комплекс. змінних (теорема про «вістря клина» Боголюбова), яку широко використовують не лише в К. т. п., але й у багатьох розділах сучас. математики. У систему аксіом усіх трьох аксіоматич. підходів входить чисто матем. припущення про належність вихід. об'єктів цих підходів до класу узагальнених функцій помір. зростання. Таке припущен-

ня виключає з розгляду широкий клас неперенормувал. взаємодій, зокрема 4-ферміонну слабку, суттєво нелінійні та нелокальні, нелінійні кіральні та калібрувал.-інваріантні типу Янга-Мілса. Тому укр. фізики Ю. Ломсадзе, В. Лазур, І. Кривський та І. Хіміч аксіоматичну схему Боголюбова-Медведєва-Поліванова та формалізм Вайтмана узагальнили на широкий клас т. зв. локалізов. і нелокалізов. квант. теорій з неполіноміал. зростанням матрич. елементів у імпульс. просторі. В. Лазур та І. Хіміч обґрунтували дисперсійні співвідношення для процесів розсіяння із слабкою взаємодією. Ключовим у всій цій програмі є інтенсивне використання інтеграл. зображення Йоста-Лемана-Дайсона, яке у працях В. Лазура та І. Хіміча було узагальнене на класи розподілів, більш ширших, ніж шварців. простір $S'(R^n)$. Це зображення є ефектив. інструментом дослідж. аналітич. властивостей амплітуд розсіяння в класі т. зв. неперенормувал. квант. теорій передекспоненціал. зростання в p -просторі. У 1960-х рр. виник ще узагальненіший аксіоматич. напрям. Нім. фізики Р. Гаага, Г. Аракі та Д. Кастлер принципи локал. К. т. п. сформулювали мовою алгебраїч. підходу, який започаткували угор. і амер. математик Дж. фон Нейман і амер. математик І. Сігал. За допомогою алгебраїч. підходу можливий опис калібрувал. теорій і спонтан. порушення симетрій. У 1960-х рр. на заг. стан у К. т. п. значно вплинуло відкриття нових теор. фактів, пов'язаних з неабелевими калібрувал. полями. Калібрувал. поля, зокрема й неабелеві поля Янга-Мілса, введені вперше 1954 амер. фізиками Ч. Янгом і Р.-Л. Мілсом, пов'язані з інваріантністю відносно неперерв. групи G локал. калібрувал. перетворень. Найпростішим прикладом калібрувал. поля є електромагнітне поле в квант. електродинаміці, яке пов'язане з абелевою групою першого рангу $U(1)$. В об'єднаній теорії слабких та електромагніт. взаємодій застосовують неабелеву групу $SU(2)$, а в квантовій хромодинаміці — неабелеву групу $SU(3)$. У заг. випадку непорушеної симетрії поля Янга-Мілса мають, як і фотон (квант електромагніт. поля), нульову масу спокою. Вони перетворюються за приєднанням (регуляр.) представленням групи G і підкоряються неліній. рівнянням руху. Їхня взаємодія з полями матерії буде калібрувально інваріантною, якщо її отримувати видовженням похідних у лагранжіані вільного поля. Останнє, як і видима відсутність у реал. світі безмас. вектор. частинок, істотно обмежувало можливості використання калібрувал. полів. У 2-й пол. 1960-х рр. калібрувал. поля вдалося проквантувати методом функціонал. інтегрування та з'ясувати, що як і чисте безмас. поле Янга-Мілса, так і поле, що взаємодіє з ферміонами, перенормувальні. 1964–66 шотланд. фізик П.-В. Гігґс запропонував спосіб «м'якого» введення мас у неабелеві калібрувал. поля за допомогою спонтан. порушення симетрії. Механізм Гігґса дозволяє надати масу квантам полів Янга-Мілса, не

порушуючи перенормувальності калібрувал. моделі. Скалярне (зі спіном 0) поле, яке забезпечує не-стабільність осн. енергетич. стану та призводить до спонтан. порушення симетрії, прийнято називати полем Гіґґса, а його кванти — бозонами Гіґґса. На цій основі наприкінці 1960-х рр. А. Салам та амер. фізики С. Вайнберг і Ш.-Л. Глешоу побудували єдину перенормувал. теорію слабкої та електромагніт. взаємодії (модель Глешоу-Салам-Вайнберг), в якій переносниками слабкої взаємодії є важкі (з масами $M_Z = 80,4$ Гев і $M_W = 91,18$ Гев) кванти вектор. калібрувал. полів групи електрослабкої симетрії. Проміжні векторні бозони Z^0 і $W^\pm$ були експериментально виявлені 1983 на колайдері у Європ. центрі ядер. досліджень побл. Женеви (Швейцарія). 4 липня 2012 дослідники цього центру, які працюють на детекторах ATLAS і CMS Великого гадрон. колайдера, повідомили про виявлення нової частинки з масою 125 Гев, яку можна інтерпретувати як бозон Гіґґса. Проте станом на поч. вересня 2012 немає детал. інформації про це відкриття, як і немає експериментал. підтвердження використовуваного в моделі Глешоу-Салам-Вайнберг механізму спонтан. порушення симетрії та виникнення мас. Загальновизнано, що вся сукупність спостережуваних властивостей взаємодій частинок і полів у мікросвіті описується т. зв. Стандарт. моделлю, яка є об'єднанням електрослабкої моделі Глешоу-Салам-Вайнберг та квант. хромодинаміки. Групи фундам. частинок Стандарт. моделі: ферміони (лептоли та кварки) — кванти полів матерії; векторні мезони — переносники калібрувал. взаємодій. До останніх долучають і бозони Гіґґса. Лептони та кварки об'єднують у покоління. Повний електрич. заряд частинок, що утворюють покоління, дорівнює нулю. До першого покоління належать найлегші ферміони: електрон, електронне нейтрино, а також u - і d -кварки. Друге покоління утворене мюоном, мюон. нейтрино, s - і c -кварками. Третє покоління складається з найважчих частинок: t -лептона, t -нейтрино, b - і t -кварків. Калібрувал. група Стандарт. моделі є прямим добутком $U(1) \otimes SU(2) \otimes SU_c(3)$. Теза Стандарт. моделі «симетрія зумовлює динаміку» стала актуальною для всіх трьох фундам. взаємодій: електромагніт., слабкої і сильної. Кванти відповід. калібрувал. полів — це фотон γ , масивні векторні мезони $W^\pm$, Z^0 та глюони g — кванти калібрувал. поля групи $SU_c(3)$. Серед здобутків Стандарт. моделі — з'ясування форми взаємодії Фермі; передбачення існування слабого нейтрал. струму; передбачення існування та мас важких проміж. мезонів $W^\pm$ і Z^0 електрослабкого сектора; передбачення існування s -кварка; висока точність корельованого опису всіх явищ мікросвіту на малих відстанях від 10^{-14} до 10^{-16} см. Її недоліки: величезна кількість параметрів (21 параметр при безмас. нейтрино); нез'ясованість причини порушення парності лише у електрослабкому секторі; проблема походження мас ферміонів, що розрізняються за величиною принаймні на 5-6 порядків (ієрархія мас);

походження та число поколінь, а також природа змішування Каббібо-Кобаяші-Маскава; невловимість бозона Гіґґса, можливе значення маси m_H якого за найсучаснішим оцінюванням складає 115,5-127,0 Гев; відсутність методів непертурбатив. обчислень у зоні сильного зв'язку, необхідних для розрахунку характеристик процесів гадронізації та явища конфайнмента кварків і глюонів. До того ж досить незначним є зв'язок між електрослабким і квант. хромодинамічним секторами Стандарт. моделі. Обидва сектори скріплені лише одним, по суті феноменологічним, елементом — представленням про покоління. Останнім часом почали з'являтися експеримент. результати, які мають суттєві розходження з прогнозами Стандарт. моделі. Тому цілком зрозумілі численні спроби її узагальнення. З цієї метою виникла гіпотетична модель т. зв. Великого об'єднання, в основі якої лежить припущення про те, що при достатньо високих енергіях природа може володіти більш високим ступенем симетрії. У цій високоенергетич. зоні усі частинки зв'язані єдиною універсал. взаємодією. При переході до менших енергій ступінь симетрії в організації матерії знижується, а єдина взаємодія «розщеплюється» на 3 «гілки» (сильну, слабку та електромагнітну), які виявляють різні («низько-енергетичні») властивості. Відправ. точкою для моделі Великого об'єднання слугує поведінка ефектив. взаємодій у Стандарт. моделі, зокрема той факт, що в зоні енергій порядку $M_x \approx 10^{15}$ Гев інтенсивності усіх трьох взаємодій стають приблизно рівними. Це дає змогу припустити, що фіз. природа сильної та слабкої взаємодій одна й та ж, і на відстанях, менших 10^{-29} см, може існувати єдина універсал. взаємодія з одною константою зв'язку. Розвиток сучас. К. т. п. пов'язаний також із суперсиметрією, тобто з симетрією відносно перетворень, які «переплутують» між собою бозонні та ферміонні поля. Ці перетворення утворюють групу, що є розширенням групи Пуанкаре. Суперсиметрію можна розглядати як нетривіал. об'єднання групи Пуанкаре з внутр. симетріями. Досить цікавими є суперсиметричні моделі, що містять в якості складових неабелеві калібрувал. векторні поля. У таких суперкалібрувал. моделях спостерігається скорочення ультрафіолет. розбіжностей. Серед результатів світ. рівня, отриманих укр. вченими, — відкриття суперсиметрії та супергравітації (Д. Волков, [В. Акулов](#), [В. Сорока](#)). Вагомий внесок у розвиток уявлень про фіз. та геом. властивості суперсиметрич. теорій зробили укр. науковці у таких галузях, як дослідж. квант. груп і алгебр ([В. Акулов](#), [А. Климик](#), [О. Гаврилик](#), [І. Качурик](#), [П. Голод](#)), побудова нових дій суперсиметрич. частинок і струн у звичай. та розширеному суперпросторах ([І. Бандос](#), [Д. Волков](#), [О. Желтухін](#), [Д. Сорокін](#), [А. Пашнєв](#), [В. Ткач](#)), коваріантне квантування частинок та супербран ([І. Бандос](#), [Д. Сорокін](#)), теорія полів вищого спіну ([В. Фушич](#), [А. Нікітін](#), [І. Бандос](#), [Д. Сорокін](#), [А. Пашнєв](#)), дослідж. прихов.

симетрій М-теорії (І. Бандос, Д. Сорокін). Світ. визнання отримали праці харків. вчених А. Пашнєва та В. Березового з розширеної суперсиметрич. квант. механіки у просторах різних розмірностей. Значну кількість відомих фізиків і математиків об'єднують діючі наук. школи з теор. фізики, які створили свого часу М. Боголюбов і О. Парасюк у Києві (Д. Петрина, В. Фушич, А. Климик, О. Гаврилик, А. Нікітін, **В. Гачок**), Львові (І. Юхновський, **І. Вакарчук**, **Л. Блажівський**), Ужгороді (Ю. Ломсадзе, В. Лазур, І. Кривський, **В. Лендєл**, І. Хіміч) і Чернівцях (М. Ткач) та Л. Ландау й О. Ахієзер у Харкові (Д. Волков, С. Пелетминський, Я. Файнберг, **О. Бакай**, М. Шульга, К. Степанов) і Києві (В. Бар'яхтар, О. Ситенко, П. Фомін, **А. Загородній**). Підготовку фахівців з К. т. п. здійснюють університети Києва, Харкова, Дніпропетровська, Донецька, Львова, Ужгорода, Чернівців, Одеси.

Рекомендована література

1. P. A. M. Dirac. The quantum theory of the emission and absorption of radiation // *Proceedings of the Royal Society A*. 1927. Vol. 114;
2. P. Jordan, W. Pauli. Zur Quantenelektrodynamik ladungsfreier Felder // *Zeitschrift für Physik*. 1928. Bd. 47;
3. V. Fock. Konfigurationsraum und zweite Quantelung // Там само. 1932. Bd. 75;
4. J. Schwinger. Quantum electrodynamics. II. Vacuum polarization and self energy // *Phys. Rev.* 1949. Vol. 75;
5. Боголюбов Н. Н., Парасюк О. С. К теории умножения причинных сингулярных функций // *Докл. АН СССР*. 1955. Т. 100, № 3;
6. Вони ж. О вычислительном формализме при умножении причинных функций // Там само;
7. Лазур В. Ю., Хіміч І. В. Функціональне формулювання аксіоматичної схеми Боголюбова–Медведева–Поліванова для локалізованих теорій поля // *УФЖ*. 1976. Т. 21, № 8;
8. Вони ж. Аналітичність та поведінка амплітуди розсіяння при високих енергіях в локалізованій квантовій теорії поля // Там само. 1977. Т. 22, № 7;
9. Вони ж. Доведення інтегрального представлення Йоста–Лемана–Дайсона для причинного комутатора у рамках локалізованих теорій // *УМЖ*. 1977. Т. 29, № 5;
10. Вони ж. Слабое взаимодействие и дисперсионные соотношения // *ТМФ*. 1981. Т. 48, № 2;
11. Ахиезер А. И., Берестецкий В. Б. Квантовая электродинамика. 4-е изд. Москва, 1981;
12. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантованных полей. 4-е изд. Москва, 1984;
13. Боголюбов Н. Н., Логунов А. А., Оксак А. И., Тодоров И. Т. Общие принципы квантовой теории поля. Москва, 1987.

В. Ю. Лазур

Бібліографічний опис:

Квантова теорія поля / В. Ю. Лазур // *Енциклопедія Сучасної України* [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. — К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2012. — Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-11531>

2001-2025 © Ця енциклопедична стаття захищена авторським правом згідно з чинним законодавством України ([докладніше](#)).