Stanisław Mrówczyński

ABC KWANTOWEJ TEORII POLA

Wydawnictwo
Uniwersytetu Jana Kochanowskiego
Kielce 2016

Przedmowa

Relatywistyczna teoria kwantów, czyli *kwantowa teoria pola* jest bodaj najlepiej rozwiniętą, najbogatszą teorią fizyczną, orzekającą o własnościach materii i sił, stanowiącą tedy fundamentalne prawa przyrody. Jest teorią najskrupulatniej zweryfikowaną przez doświadczenie, poddawaną wciąż coraz to nowym testom. Bogactwo, fundamentalny charakter i zgodność z doświadczeniem to bynajmniej nie jedyne przymioty kwantowej teorii pola. Piękne są rozliczne elementy jej rozgałęzionej konstrukcji – jednego z najdoskonalszych dzieł ludzkiego umysłu, stworzonego przez kilka pokoleń najświetniejszych fizyków. Metody kwantowej teorii pola zawładnęły ogromnymi obszarami fizyki, często odległymi od dziedziny cząstek elementarnych, gdzie teoria narodziła się i rozwijała. Jak choćby diagramy Feynmana, będące obecnie niemal uniwersalnym językiem opisu wszelkich procesów fizycznych. Teoria pola stymulowała rozwój różnych gałęzi matematyki, wprowadzając na jej grunt wcześniej nieznane obiekty. Dzieje delty Diraca, początkowo odrzuconej przez matematyków i zaakceptowanej jako dystrybucja, są w tym kontekście typowe. Jest więc rzeczą z wielu powodów słuszną i pożądaną, aby każdy, kogo fizyka teoretyczna choćby trochę zajmuje, miał wyobrażenie, czym jest owa kwantowa teoria pola, czemu zawdzięcza swą sławę. Celem tych wykładów jest zarysowanie jej podstawowych idei, ukazanie niektórych metod, które taką żywotnością się wykazały.

Układ i treść prezentowanych wykładów są raczej tradycyjne. Na początek wyjaśniam, dlaczego relatywistycznej teorii kwantów nie można sformułować poprzez prostą modyfikację nierelatywistycznej mechaniki kwantowej i trzeba wypracować istotnie nowe podejście. Później wznoszę powoli gmach kwantowej teorii pola, rozważając podstawowe typy pól. Za każdym razem zaczynam od teorii klasycznej, aby później poddać ją procedurze kanonicznego kwantowania. W końcu przedstawiam elementarne zastosowania teorii. Szczegółowy „Spis treści" najlepiej zdaje sprawę z zawartości prezentowanych wykładów, więc nie będę jej tutaj szczegółowo referował.

Przygotowując wykłady, starałem się przeciwstawić dość rozpowszechnionemu stanowisku głoszącemu, że kwantowa teoria pola jest trudna do pojęcia, więc o ile to tylko możliwe lepiej ograniczać się do stosowania relatywistycznej mechaniki kwantowej, czyli operować równaniami Diraca i Kleina-Gordona podobnie jak nierelatywistycznym równaniem Schrödingera. Podejście takie ma głównie, w moim przekonaniu, historyczne, nie zaś merytoryczne przyczyny, jest skutkiem utrwalonych nawyków. W rzeczywistości bowiem relatywistyczna mechanika kwantowa nie jest, jak dobrze wiadomo, spójną teorią, gdyż rodzi koncepcyjne trudności, które eksponuję w rozdziale 1. Obchodzenie ich, wspieranie argumentacji fizyczną intuicją jest mało satysfakcjonujące z teoretycznego punktu widzenia, szczególnie że owe trudności są dziś dobrze rozumiane. Z tego względu staram się wszystkie zagadnienia fizyczne formułować na gruncie kwantowej teorii pola. Dotyczy to również problemu stanów związanych, który pojawia się dopiero w rozdziale 12, nie zaś, jak to zwykle bywa, jako zastosowanie równania Diraca traktowanego jedynie jako uogólnienie równania Schrödingera.

Przy zachowaniu podstawowego poziomu wykładu, starałem się, aby całość była, jak się mówi po angielsku, *self-contained*, żeby wszystkie stwierdzenia były uzasadnione, formuły wyprowadzone i nie było potrzeby wyszukiwania tego czy owego wzoru w innych podręcznikach. Podzielając powszechne raczej przekonanie, że nadmierna formalizacja pojęć zaciemnia ich treść fizyczną, dążyłem do uproszczenia wszystkich rozumowań. Być może dopuściłem się z tego powodu uproszczeń zbyt daleko idących. Określenie nadmierna formalizacja jest bowiem mocno subiektywne – to, co dla jednego jest już nadmierną formalizacją, dla drugiego jest zupełnym minimum precyzyjnego sformułowania. Zaawansowanie zaś matematyczne podręczników kwantowej teorii pola jest bardzo zróżnicowane.

Przytaczam w wykładach dużo szczegółów rachunkowych, aby ułatwić śledzenie wywodów, żeby ukazać metody obliczeniowe. Wszak obliczenia są jądrem fizyki teoretycznej, stanowią pomost między światem zjawisk i ilościowym ich opisem. W tekście pojawiają się liczne „Ćwiczenia", które nie są wymyślonymi problemami, lecz brakującymi fragmentami prezentowanych rozumowań. Wykonywanie ich ma przygotować do samodzielnych studiów, pogłębić zrozumienie omawianych kwestii. Nic bowiem lepiej nie sprzyja wniknięciu w materię problemu, niż borykanie się z nim na własną rękę.

Choć tytuł wykładów dobitnie to eksponuje, jeszcze raz podkreślę, że wznosząc gmach kwantowej teorii pola, dotarłem ledwie do parteru, a i fundamentom, czyli matematycznym podstawom teorii, mało uwagi poświęciłem. W końcowym rozdziale krótko przedstawiam architekturę wyższych pięter, akcentując ich rozległość i znaczenie poznawcze. Mam nadzieję, że mimo wszystkich ograniczeń prezentowane wykłady stwarzają wyobrażenie o kwantowej teorii pola, stanowią elementarne do niej wprowadzenie. Zachęcając do ich lektury, czynię to nie bez wątpliwości. Chociaż jako autorowi zdaje mi się, że pewne problemy bardzo zgrabnie przedstawiłem, mam świadomość, że jest wiele tekstów, które jaśniej i głębiej owe problemy objaśniają, są przy tym daleko kompletniejsze. Zachęcam tedy do sięgnięcia po znane podręczniki.

W literaturze światowej jest moc znakomitych książek poświęconych kwantowej teorii pola. Choć niewiele z nich ukazało się po polsku, są wśród tych w Polsce wydanych pozycje wybitne. Przetłumaczono więc klasyczny dwutomowy podręcznik Bjorkena i Drella [1], który mamy, niestety, w jednym nieporęcznym tomie. Książka Bjorkena i Drella, choć w pewnych partiach zestarzała się, jest wciąż niedościgła, gdy idzie o tłumaczenie zawiłych kwestii na podstawie prostych fizycznych argumentów. Podręcznikiem dużo nowocześniejszym, jasno napisanym jest książka Adama Bechlera [2], którego starannie przygotowanych wykładów słuchałem przed laty na Uniwersytecie Warszawskim. Chyba największą wadą tego podręcznika jest ogromna liczba błędów drukarskich. Pewnie byłyby one wyeliminowane w kolejnych wydaniach, jednak książka się ich nie doczekała. Warto też wymienić i zarekomendować dwa tomy ze świetnego kursu fizyki teoretycznej Landaua i Lifszyca poświęcone relatywistycznej teorii kwantów [3, 4]. Książki te, podobnie jak podręcznik Bjorkena i Drella, są nieco przestarzałe, jednak wciąż są bardzo użyteczne, szczególnie gdy chcemy się dowiedzieć, jak to czy inne zjawisko lub proces teoretycznie opisano. Wspomnę też oryginalny, lecz trudny podręcznik państwa Białynickich [5], gdzie można znaleźć omówienie kwestii zignorowanych w innych książkach. W ostatnich latach ukazała się po polsku trzytomowa *Teoria pól kwantowych* Stevena Weinberga [6]. Dzieło zaiste monumentalne, lecz, jak myślę, zbyt trudne dla osób zaczynających ledwie zgłębiać relatywistyczną teorię kwantów. Do Weinberga warto sięgnąć, gdy już coś niecoś wiemy, gdy zawiodą nas inne podręczniki lub gdy chcemy wyjaśnić jakąś szczególnie złożoną kwestię. Wtedy dopiero walory tego dzieła możemy docenić.

Chciałbym też odnieść się do pytania, przed którym trudno się uchylić – dlaczego po polsku? Jest rzeczą pożyteczną, w moim przekonaniu, wydanie podręcznika kwantowej teorii pola w języku polskim z dwóch ważnych powodów. Pierwszy jest zupełnie oczywisty. Mimo coraz lepszej znajomości angielskiego wśród studentów, możność poznawania trudnego przedmiotu w języku ojczystym jest dla wielu istotnym ułatwieniem. Mając więc do wyboru podręcznik polski i angielski, zdecydowana większość sięga po ten pierwszy.

Drugi powód wydawania zaawansowanych tekstów w języku polskim zdawać się może nieco abstrakcyjny. Współczesna fizyka coraz mniej stwarza okazji do używania polszczyzny w mowie i piśmie. Wszystkie ważne periodyki naukowe wydawane są po angielsku, w tym języku mówi się na konferencjach. Seminaria w polskich instytucjach odbywają się coraz częściej po angielsku ze względu na dosyć powszechną obecność cudzoziemców. Byłoby niedorzecznością przeciwstawiać się tym, wszak korzystnym dla rozwoju nauki, tendencjom. A jednak obecność polskich podręczników zdaje się ważna i cenna. Odgrywają one bowiem istotną rolę kulturotwórczą. Ich zanik sprawi, że o pewnych sprawach nie będziemy umieli mówić w naszym języku. Jak wówczas upowszechniać wiedzę, wydawać książki popularnonaukowe? Gdyby nie determinacja polskich matematyków, nie byłoby całek, różniczek i macierzy, tylko integrały, dyferencjały i matryce. Czyż nie bylibyśmy ubożsi?

Na zakończenie tych wstępnych uwag chciałbym podziękować wszystkim tym, którzy przyczynili się do powstania tej książki w jej obecnym kształcie. W pierwszej kolejności moim studentom, z myślą o których podjąłem się tego przedsięwzięcia, a szczególnie Alinie Czajce, dzięki której usunięta została duża liczba małych i większych błędów oraz różnych niejasności. Bardzo też jestem wdzięczny prof. Leszkowi Hadaszowi za uważną lekturę całości oraz liczne uwagi i sugestie, które pozwoliły mój tekst znacząco ulepszyć.

Jednostki

W całości wykładów stosuję naturalny układ jednostek, w którym stała Plancka $\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}$ i prędkość światła c są równe jedności ($\hbar = c = 1$). Wszystkie więc wielkości mają wymiar odpowiedniej potęgi masy lub długości. Masa zaś jest wymiaru odwrotnej długości. Działanie dla przykładu jest bezwymiarowe, a energia i pęd mają wymiar masy lub odwrotnej długości. Aby wrócić do zwykłych jednostek, trzeba daną wielkość pomnożyć przez odpowiednie potęgi $\hbar$ i c.

Wielkości elektrodynamiczne zapisywane są w typowym dla kwantowej teorii pola układzie jednostek Heaviside'a-Lorentza, w którym charakterystyczne czynniki 4π nie pojawiają się w równaniach Maxwella, natomiast stała struktury subtelnej wynosi $\alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi}$.

Notacja

Starałem się stosować najbardziej rozpowszechnioną, standardową notację, unikając w tym względzie wszelkiej oryginalności.

Indeksy greckie ze środka alfabetu $\mu, \nu, \rho \ldots$ numerują składowe czterowektorów i tensorów. Czterowektor położenia zapisywany jest w formie $x^\mu \equiv (x^0, x^1, x^2, x^3)$. Jak wyjaśnia dodatek A, mamy do czynienia z wektorem kontrawariantnym, gdy indeks jest u góry, i kowariantnym, kiedy indeks jest u dołu. Iloczyny skalarne czterowektorów to $x^\mu p_\mu$ lub $x \cdot p$, a kwadraty czterowektorów notuję jako $x^\mu x_\mu$ lub x^2. Stosowana jest konwencja sumacyjna, która wymaga sumowania po powtarzających się indeksach, a więc $x^\mu p_\mu = x^0 p_0 + x^1 p_1 + x^2 p_2 + x^3 p_3$. Tensor metryczny ma sygnaturę $(+, -, -, -)$, co oznacza, że np. kwadrat czterowektora położenia wynosi $x^2 = x_0^2 - x_1^2 - x_2^2 - x_3^2$, nie zaś $x^2 = -x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2$, jak bywa nieraz określany.

Trójwektory są wytłuszczone, jak np. $\mathbf{p}$, a ich składowe numerowane są łacińskimi literami ze środka alfabetu $i, j, k \ldots$. Iloczyn skalarny piszemy jako $\mathbf{p} \cdot \mathbf{x} = p^i x^i = p^1 x^1 + p^2 x^2 + p^3 x^3$. Nie są rozróżniane w wypadku trójwektorów indeksy górne i dolne.

Indeksy greckie z początku alfabetu $\alpha, \beta, \gamma \ldots$ numerują składowe spinorów, przy czym nie rozróżniam tutaj indeksów górnych i dolnych.