

Józef Spalek

wstęp do fizyki
materii
skondensowanej

 PWN

Spis treści

Słowo wstępne	XIII
Podziękowania	XVI
I Podstawy: układy wielocząstkowe jako gazy kwantowe	1
1. Przedmiot rozważań i podstawowe własności kwantowe	3
1.1. Czym zajmuje się ta dziedzina?	3
1.1.1. Uwaga: emergentność w prawach przyrody	5
1.2. Kwantowa natura gazu bozonów i fermionów	6
1.3. Skąd bierze się gaz idealny? (opis jakościowy)	7
1.4. Elementarna mechanika kwantowa: „wyprowadzenie” równania Schrödingera i kwantowanie stanów w gazie idealnym	9
1.5. Kwantowanie geometryczne wektora falowego (pędu) fal materii i wybór warunków brzegowych	13
1.6. Gęstość stanów jednocząstkowych w gazie idealnym	17
1.7. Podział cząstek na bozony i fermiony	20
1.8. Uwaga: uogólnienie koncepcji symetrii względem przestawień cząstek	22
1.9. Uzupełnienie: gęstość stanów dla d -wymiarowego gazu	23
1.10. Uwaga o koherencji kwantowej nieoddziałujących cząstek i fizycznej realizowalności symetrii względem przestawień pary cząstek	24
1.11. Przypomnienie: skala atomowa	26
2. Gaz idealny fermionów: podstawowe charakterystyki i ograniczenia	28
2.1. Energia Fermiego i podstawowe własności fizyczne	28
2.1.1. Uwaga: mały wkład gazu elektronowego do ciepła właściwego	31
2.2. Granica niezależności cząstek	32
2.3. Kryterium lokalizacji Motta–Wignera	33
2.4. Wpływ ruchów termicznych na własności gazu fermionów – elementarne oszacowania	35
2.4.1. Ciepło właściwe	35
2.4.2. Rozpraszanie elektronów wskutek ich wzajemnego oddziaływania	36
2.5. Spinowa podatność magnetyczna: paramagnetyzm Pauliego	38

2.6.	Uzupełnienie 1: liniowy współczynnik ciepła właściwego dla dowolnej zależności $\epsilon_{\mathbf{k}}$ od masy efektywnej m^*	41
2.7.	Uzupełnienie 2: własności magnetyczne układu niezależnych spinów zlokalizowanych	42
2.8.	Uwaga: granica spinów klasycznych	43
3.	Rozkład statystyczny Fermiego–Diraca dla gazu fermionów w temperaturze $T \geq 0$	45
3.1.	Gęstość stanów i energia układu dla $T = 0$: podejście ogólne	45
3.2.	Rozkład statystyczny Fermiego–Diraca	47
3.3.	Energia wewnętrzna i entropia gazu fermionów	51
3.4.	Gaz Fermiego cząstek dla $T > 0$	52
3.5.	Uzupełnienie 1*: rozwinięcie niskotemperaturowe dla fermionów o dowolnej gęstości stanów	55
3.6.	Uzupełnienie 2*: wyprowadzenie rozkładu Fermiego bez odniesienia się do wzoru Stirlinga	58
3.7.	Uzupełnienie 3*: jednolite wyprowadzenie rozkładów Fermiego–Diraca i Bosego–Einsteina	60
4.	Gazy kwantowe w działaniu: fermiony	63
4.1.	Ciekły ^3He oraz ^4He : kanoniczny przypadek cieczy fermionów i bozonów	63
4.2.	Ciekły ^3He jako gaz kwantowy	65
4.3.	Relatywistyczny gaz fermionów w astrofizyce	67
4.3.1.	Biały karzeł	68
4.3.2.	Pulsar jako kula gazowa neutronów	69
4.3.3.	Jonizacja helu w białym karle jako przejście Motta	69
4.4.	Elektrony w metalu jako gaz idealny fermionów	70
4.5.	Statystyka elektronów i dziur w półprzewodniku samoistnym	70
4.6.	Statystyka elektronów w półprzewodnikach domieszkowanych: korekta rozkładu Fermiego–Diraca	75
4.7.	Korekta rozkładu Fermiego dla podwójnie obsadzonych donorów/akceptorów	78
4.7.1.	Uwaga: donory dwuelektronowe	79
4.7.2.	Statystyka stanów akceptorowych	80
5.	Własności gazu bozonów i kondensacja Bosego–Einsteina	82
5.1.	Statystyka kwantowa cząstek bezmasowych: fotony i fonony – wyprowadzenie kwaziklasyczne w obu przypadkach	82
5.1.1.	Uwaga historyczna	83
5.1.2.	Średnia liczba kwantów w stanie równowagi termodynamicznej	84
5.1.3.	Gęstość stanów energii drgań	86
5.1.4.	Uwaga 1: niestosowalność koncepcji ciągłego rozkładu promieniowania	87
5.1.5.	Własności termodynamiczne gazu bozonów bezmasowych	88
5.2.	Drgania harmoniczne sieci monoatomowej i ich kwantowanie	90
5.2.1.	Uwaga 2: wybór rozwiązania w postaci fal płaskich	92
5.2.2.	Uwaga 3: drgania w przybliżeniu ośrodka ciągłego	92
5.2.3.	Uwaga 4: kwantowanie drgań sieci – fonony (ujęcie jakościowe)	93

5.2.4.	Przypomnienie: pierwsza strefa Brillouina dla fal sieciowych raz jeszcze	93
5.3.	Drgania sieci dwuatomowej naprzemiennej	94
5.3.1.	Uwaga 5: gęstość stanów fononowych dla łańcucha monoatomowego	96
5.3.2.	Uwaga 6: uogólnienie drgań sieci na trzy wymiary przestrzenne	97
6.	Gazy kwantowe w działaniu: bozony	98
6.1.	Rozkład Bosego–Einsteina dla cząstek materialnych	98
6.2.	Gaz idealny bozonów – termodynamika	100
6.3.	Kondensacja Bosego–Einsteina w gazie idealnym	102
6.4.	Dokładniejsza analiza wzoru (6.23) na liczbę cząstek	106
6.5.	Równanie falowe dla słabo oddziałującego skondensowanego gazu Bosego	107
6.6.	Kondensat atomowy w pułapce atomowej	109
6.7.	Uzupełnienie 1: kwantowanie poziomów energetycznych oscylatora harmonicznego	112
6.8.	Uzupełnienie 2: kwantowanie drgań harmonicznyc sieci atomowej – podejście formalne	115
7.	Dynamika kwaziklasyczna elektronów w gazie: przewodnictwo elektryczne i klasyczny efekt Halla	118
7.1.	Opór elektryczny: definicje, podstawowe własności	118
7.2.	Oporność właściwa: kilka charakterystyk (jakościowych)	120
7.2.1.	Przykład: Cu (1 elektron przewodnictwa na atom)	120
7.3.	Uwagi o oporze elektrycznym	121
7.4.	Dynamika ruchu elektronów w polach \mathbf{E} i \mathbf{B}	121
7.5.	Klasyczny efekt Halla	123
7.5.1.	Interpretacja klasycznego efektu Halla	124
7.6.	Przewodnictwo zależne od częstości	125
7.7.	Uzupełnienie 1: oszacowanie temperaturowej zależności oporności elektrycznej	127
8.	Elektrony w silnym polu magnetycznym	129
8.1.	Kwantowanie Landaua poziomów cząstki w polu magnetycznym	129
8.2.	Gęstość stanów dla poziomów Landaua	133
8.3.	Transport ładunku w gazie dwuwymiarowym – uwagi ogólne	134
8.4.	Kwantowy efekt Halla	137
8.5.	Diamagnetyzm Landaua gazu elektronowego	140
8.6.	Efekt de Haasa–van Alphen dla gazu dwuwymiarowego: granica silnego pola magnetycznego	143
8.7.	Uzupełnienie 1: pęd całkowity cząstki o ładunku q w polu magnetycznym	148
8.8.	Ważna uwaga: niezgodność funkcji falowej dla cząstek w gazie dla $H_a = 0$ ze stanami Landaua dla $H_a \neq 0$	148
8.9.	Uwagi końcowe do części I	149
II	Własności jednocząstkowe na sieci: ciała stałe	151
9.	Funkcje falowe Blocha elektronu w sieci krystalicznej (prostej)	153
9.1.	Twierdzenie Blocha	153

9.2.	Warunki brzegowe dla funkcji Blocha: kwantowanie \mathbf{k} i jego interpretacja . . .	157
9.2.1.	Interpretacja 1: $\hbar\mathbf{k}$ jako kwazipęd	158
9.2.2.	Interpretacja 2: liczba stanów w strefie Brillouina i w paśmie	159
9.3.	Uzupełnienie 1: sumy sieciowe	160
9.4.	Uzupełnienie 2: sieć odwrotna formalnie	161
9.5.	Równanie falowe Blocha w przestrzeni odwrotnej	163
10.	Funkcje Wanniera i przybliżenie ciasnego wiązania	164
10.1.	Funkcje Wanniera	164
10.2.	Uzupełnienie 1: przejście do bazy Wanniera jako transformacja unitarna i jej komplementarność do bazy Blocha	165
10.3.	Przybliżenie ciasnego wiązania dla pojedynczego pasma	166
10.4.	Uwaga: intuicyjna konstrukcja funkcji Blocha i Wanniera	168
10.5.	Konkretny przykład 1: stany typu $1s$ w kryształach na sieci kwadratowej	172
10.6.	Uwaga 1: wybór poziomu odniesienia liczenia energii cząstek w pasmach oraz asymptotyczne zachowanie parametrów	174
10.7.	Konkretny przykład 2: topologia powierzchni Fermiego dla sieci kwadratowej	175
10.8.	Cząstki i dziury	176
10.9.	Ogólna postać funkcji Wanniera dla pojedynczego pasma	177
11.	Model Kroniga–Penneya i studnie kwantowe	179
11.1.	Równanie falowe i warunki brzegowe	180
11.2.	Analiza rozwiązania modelu	182
11.2.1.	Zadanie	184
11.3.	Interpretacja modelu Kroniga–Penneya: studnie potencjału	186
11.4.	Uzupełnienie: równanie Mathieu	187
12.	Ogólne własności pasmowych stanów jednocząstkowych i sieci atomowych	188
12.1.	Masa efektywna jako tensor	188
12.2.	Symetria względem inwersji przestrzennej	189
12.3.	Symetria względem odwrócenia w czasie	190
12.4.	Hamiltonian z oddziaływaniem spin–orbita w pierwszym przybliżeniu: równanie Pauliego	190
12.5.	Ogólny hamiltonian pojedynczego elektronu w ciele stałym	191
12.5.1.	Uwaga 1: oddziaływanie spin–orbita typu Rashby	191
12.5.2.	Uwaga 2: nietrywialna postać sfery Fermiego dla cząstek z oddziaływaniem Rashby	192
12.6.	Klasyfikacja ciał stałych i typy wiązań chemicznych (dyskusja jakościowa)	193
12.7.	Sieć i struktura krystaliczna: symetria struktur	200
12.7.1.	Sieci Bravais’go	200
12.7.2.	Do czego potrzebna jest symetria sieci?	203
13.	Grafen jako przykład układu dwuwymiarowego	205
13.1.	Struktura elektronowa grafenu: charakterystyki ogólne	206
13.2.	Relacja dyspersji w przybliżeniu ciasnego wiązania	208
13.3.	Relacja dyspersji dla sieci plastra miodu w pobliżu punktów Diraca	211
13.4.	Uwagi końcowe do części II	213

III Układy oddziałujących cząstek: cieczy kwantowe, spontaniczne złamanie symetrii, przejścia fazowe i własności kolektywne	215
14. Koncepcja kwazicząstki i wzbudzenia kolektywnego: teoria Landaua cieczy Fermiego	217
14.1. Pojęcie kwazicząstki	217
14.2. Teoria fenomenologiczna Landaua cieczy fermionów	220
14.3. Własności fizyczne cieczy Fermiego — podsumowanie	222
15. Magnetyzm jako stan kolektywny spinów atomowych	225
15.1. Elementarne podsumowanie	225
15.2. Oddziaływanie wymienne według Diraca	226
15.2.1. Uwaga 1: Oddziaływanie wymiany a pole efektywne (molekularne)	230
15.2.2. Uwaga 2: Spontaniczne złamanie symetrii a fluktuacje kwantowe	230
15.2.3. Uwaga 3: Proste oszacowanie temperatury krytycznej dla spinów Isinga	231
15.3. Równanie dynamiczne momentu magnetycznego i fale spinowe	232
15.3.1. Ciekawa interpretacja	235
15.4. Fale spinowe w izolatorze ferromagnetycznym: podejście kwantowe*	236
15.5. Fale spinowe w izolatorze antyferromagnetycznym	242
15.6. Magnetyzm spinowy: przybliżenie pola średniego i teoria Landaua	249
15.6.1. Koncepcja pola wymiennego i równanie na magnetyzację	249
15.6.2. Niejednorodne pole wymienne i fluktuacje: przybliżenie ośrodka ciężkiego	252
15.6.3. Formalna równoważność rozwinięcia Landaua i przybliżenia średniego pola dla $T \rightarrow T_C$	254
15.6.4. Teoria Landaua ferromagnetycznych przejść fazowych	257
15.6.5. Teoria pola średniego dla dwóch podsieci antyferromagnetycznych	259
15.6.6. Ważna uwaga końcowa	261
16. Magnetyzm zdelokalizowanych elektronów: model Hubbarda	262
16.1. Model Hubbarda: omówienie jakościowe	263
16.2. Uzupełnienie*: Formalne wyprowadzenie modelu Hubbarda w reprezentacji II kwantowania	268
16.3. Wydzielenie części atomowej energii w modelu Hubbarda	272
16.4. Trzy podstawowe obszary fizyczne	272
16.5. Energia pasmowa cząstek: stan paramagnetyczny	274
16.6. Energia całkowita w przybliżeniu niezależnych cząstek: kryterium lokalizacji Motta–Hubarda jakościowo	277
16.7. Kryterium dynamiczne lokalizacji w obrazie niezależnych cząstek (jakościowo)	279
16.8. Moment magnetyczny średni i lokalny	280
16.9. Kryterium Stonera i stan ferromagnetyczny jako stan o spontanicznie złamanej symetrii	281
17. Nadprzewodnictwo: teoria BCS	286
17.1. Pojedyncza para Coopera (1956)	287
17.1.1. Uwaga 1: Funkcja falowa pary Coopera	290
17.1.2. Uwaga 2: Para Coopera w reprezentacji II kwantowania	291
17.1.3. Uwaga 3: Oszacowanie rozmiaru pary Coopera	292

17.1.4.	Uwaga 4: Zgrubne oszacowanie rozmiaru pary Cooper dla nadprzewodnika wysokotemperaturowego	292
17.2.	Teoria Bardeena–Coopera–Schrieffera (BCS)	293
17.2.1.	Hamiltonian modelu z przyciągającym oddziaływaniem parującym	293
17.2.2.	Kwazicząstki Bogoliubowa i równanie samouzgodnione na przerwę nadprzewodzącą $\Delta_{\mathbf{k}}$	296
17.2.3.	Równanie samouzgodnione na przerwę izotropową Δ	299
17.2.4.	Korekta rozkładu wyjściowego Fermiego–Diraca w stanie nadprzewodzącym	300
17.2.5.	Energia stanu skondensowanego i inne charakterystyki dla $T = 0$ — oszacowania analityczne	302
17.2.6.	Oszacowanie przerwy Δ dla temperatur $T = 0$ oraz $T = T_c$	303
17.2.7.	Temperaturowa zależność przerwy i rozwinięcie Landaua	304
17.2.8.	Gęstość stanów kwazicząstkowych	306
17.2.9.	Energia swobodna i ciepło właściwe przy $T \rightarrow T_s - 0$	308
17.2.10.	Krytyczne spojrzenie na teorię BCS	310
18.	Makroskopowa funkcja falowa: teoria Ginzburga–Landaua	310
18.1.	Krótkie podsumowanie	310
18.2.	Makroskopowa funkcja falowa jako parametr porządku	311
18.3.	Minimalizacja funkcji $\partial \mathcal{F}_s \{ \Psi(\mathbf{r}), \mathbf{A}(\mathbf{r}); T \}$	312
18.3.1.	Równanie Ginzburga–Landaua	313
18.4.	Elementarna dyskusja równania Ginzburga–Landaua	315
18.4.1.	Wnikanie pola magnetycznego do nadprzewodnika	315
18.4.2.	Przestrzenie jednorodnie rozwiązane dla parametru porządku	317
18.4.3.	Przestrzenie niejednorodny profil parametru porządku i długości koherencji	317
18.4.4.	Kwantowanie strumienia w pierścieniach nadprzewodzących	319
18.4.5.	Efekt Meissnera–Ochsenfelda (1935): przybliżony obraz makro	321
18.4.6.	Interpretacja mikroskopowa makroskopowej funkcji falowej	322
19.	Model Hubbarda II: lokalizacja Motta–Hubbarda i prawie zlokalizowana ciecz Fermiego	325
19.1.	Lokalizacja Motta–Hubbarda: dyskusja elementarna dla $T = 0$	325
19.2.	Interpretacja stanów skorelowanych w kategoriach stanów kwazicząstkowych (1986-7)	329
19.3.	Termodynamiczne własności prawie zlokalizowanych fermionów i przejście Motta–Hubbarda dla niezerowej temperatury (1987)	332
19.4.	Rozwinięcie niskotemperaturowe w najniższym rzędzie dla prawie zlokalizowanej cieczy Fermiego	333
19.5.	Przejście nieciągłe Motta–Hubbarda dla niezerowej temperatury i punkty krytyczne	335
19.6.	Efekty fizyczne w polu magnetycznym: podatność magnetyczna, spinowo-zależne masy, metamagnetyzm	338
19.6.1.	Podatność magnetyczna blisko lokalizacji: $n = 1$	338
19.6.2.	Spinowo-rozszczipione masy (1990 r.): $n \neq 1$	340
19.6.3.	Interpretacja mas zależnych od kierunku spinu	343
19.7.	Znaczenie koncepcyjne i doświadczalne przejścia Motta–Hubbarda (metal-izolator) dla fizyki	345

19.7.1. Trójtlenek wanadu: $(V_{1-x}Cr_x)_2O_3$	345
19.7.2. Lokalizacja Motta w innych układach fizycznych	347
19.7.3. Bozony w sieci optycznej	349
19.7.4. Metamagnetyzm prawie zlokalizowanych fermionów	350
19.8. Wnioski	351
20. Silnie skorelowane fermiony: oddziaływanie kinetycznej wymiany i nadprzewodnictwo wysoko-temperaturowe	353
20.1. Rola oddziaływania wymiennego: uwagi ogólne	353
20.2. Oddziaływanie kinetycznej wymiany dla izolatorów Motta–Hubbarda	354
20.3. Kinetyczna wymiana i model $t-J$ w przypadku ogólnym (1976)	356
20.3.1. Uogólnienie: rozszerzony model Hubbarda	360
20.4. Model $t-J$: parowanie w przestrzeni rzeczywistej	361
20.4.1. Ogólne własności parowania w przestrzeni rzeczywistej	362
20.4.2. Interpretacja parowania w modelu $t-J$	365
20.5. Nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe: model $t-J$	367
20.5.1. Charakterystyki ogólne nadprzewodników wysokotemperaturowych	367
20.5.2. Model $t-J$ II: Od teorii do eksperymentu (omówienie)	371
20.5.3. Interpretacja wyników teoretycznych otrzymanych w przybliżeniu SGA	373
20.5.4. Model $t-J$ III: wyjście poza przybliżenie pola średniego (RMFT, SGA)	380
20.6. Czego brakuje w opisie niekonwencjonalnego nadprzewodnictwa?	382
21. Epilog	384
A. Drugie kwantowanie dla fermionów – podsumowanie	387
A.1. Reprezentacja liczb obsadzeń	387
A. Reprezentacja liczb obsadzeń	387
A.2. Operatory i elementy macierzowe w reprezentacji II kwantowania	391
A.3. Spinorowa reprezentacja operatorów pola	393
A.4. Przykłady operatorów w reprezentacji II kwantowania	394
A.4.1. Operator liczby cząstek	394
A.4.2. Operator gęstości cząstek	394
A.4.3. Operator spinu I pierwszy przykład nietrywialnego zastosowania reprezentacji spinorowej	395
A.4.4. Operator kwadratu długości operatora spinu	396
A.5. Dynamika i ogólne własności operatorów pola	397
A.5.1. Równanie Heisenberga i interpretacja operatora pola	397
A.6. Lokalna oś kwantowania spinu	400
A.7. Stany dwucząstkowe: singlet i tryplet spinowy – ćwiczenia	401
A.8. Przykłady wzorów na wielkości fizyczne	402
A.8.1. Operator pędu układu N cząstek	403
A.8.2. Hamiltonian nieoddziałujących cząstek	403
B. Modele w reprezentacji II kwantowania	406
B.1. Generalna postać hamiltonianu w II kwantowaniu	406
B.2. Model orbitalnie zdegenerowanych fermionów	410
B.3. Model sieci Andersona i granica sieci Kondo (model $s-d$)	412

C. Zasadnicze elementy fizyki statystycznej wykorzystane w tekście – uwagi głównie metodologiczne	414
C.1. Uwaga o rozkładzie Boltzmana	414
C.2. Rozkład kanoniczny (Gibbsa)	415
C.3. Duży rozkład kanoniczny	417
C.4. Założenia teorii Landaua przejść fazowych	418
D. Transformacja modelu Hubbarda w model t-J metodą transformacji kanonicznej	421

Słowo wstępne

Niniejsza książka w części I i II dotyczy elementarnych (często jakościowych) podstaw opisu układów wielu cząstek kwantowych, takich jak elektrony, atomy czy gazy kwantowe. Powstała ona na podstawie notatek do semestralnego wykładu *Podstawy fizyki materii skondensowanej*, który prowadziłem dla studentów III roku fizyki UJ, a także na podstawie wcześniejszych wykładów w AGH i na UW. Wydaje mi się, że może ona stanowić wstępny podręcznik dla studentów III roku i lat wyższych. Jego elementy mogą także stanowić część standardowego kursu z fizyki ciała stałego dla kierunków zorientowanych bardziej na inżynierię materiałową lub fizykę techniczną.

Wykładany materiał podzieliłem na trzy części: część pierwsza obejmuje materiał zapożyczony z mechaniki kwantowej i elementarnej fizyki statystycznej, jako że w fizyce materii skondensowanej krzyżują się te dwa aspekty opisu fizycznego. Część druga dotyczy głównie stanów jednocząstkowych oraz, w dużo mniejszym stopniu, sieci krystalicznej. Część trzecia to bardziej zaawansowane, wybrane zagadnienia fizyki układów oddziałujących cząstek kwantowych i obserwowanych w nich przejść fazowych. Pierwsze dwie części stanowią trzon wykładu semestralnego. W części trzeciej omawiane są zagadnienia dotyczące zjawisk kolektywnych i pomyślane są jako zagadnienia do wyboru dla wykładowcy. Mogą one również stanowić materiał na seminaria na studiach magisterskich. Dodałem także kilka bardziej zaawansowanych zagadnień, które należą do współczesnego nurtu, z myślą o osobach szczególnie zainteresowanych tą dziedziną fizyki, aby pokazać, że fizyka materii skorelowanej to opis układu N -cząstkowego, którego własności nie są sumą własności N części.

Zasadniczym celem tego wykładu w ramach całości studiów było zdefiniowanie zarówno podstawowych koncepcji fizycznych dotyczących stanów kwantowych, statystyki oraz transportu mikrocząstek (zwłaszcza elektronów), jak i przedstawienie podstawowych koncepcji dotyczących natury stanów kolektywnych i przemian fazowych (zwłaszcza tych o naturze kwantowej). Określamy też dość ogólnie granice stosowalności prostego opisu kwantowego w zastosowaniu do układów od-

działających cząstek. Metody chemii kwantowej pomijamy, gdyż stanowią one osobną wielką dziedzinę.

Drugim celem tego wykładu było stworzenie wspólnego **fundamentu** (także dla wykładowcy) pod bardziej zaawansowane wykłady obejmujące w pełni ilościowe metody eksperymentalne fizyki ciała stałego, teorie mikroskopowe układów wielu ciał, kwantowych przemian fazowych, skorelowanych układów fermionowych i bozonowych, obejmujące uporządkowanie magnetyczne, nadprzewodzące, nadciekłe i przejścia Motta. Dopiero po tych ostatnich wykładach, uwzględniających m.in. solidny wykład zastosowań metody drugiego kwantowania, możemy mówić, że student został wykształcony w pełni w dziedzinie **fizyki materii skondensowanej**, niezależnie od tego, czy zajmuje się fizyką ciała stałego, kwantową inżynierią materiałową, elektroniką kwantową, astrofizyką czy plazmą kwarkowo-gluonową. Z tego względu materiał zawarty w części III powinien być wykładany w zasadzie osobno, na przykład jako wykład specjalistyczny. Na tym etapie bardzo ważne jest jednak dojrzałe podejście ze strony studenta i samodzielne wyszukiwanie dodatkowego materiału. Osobną dziedzinę stanowią niedyskutowane tutaj obliczenia numeryczne w połączeniu z zaawansowanymi metodami analitycznymi, na przykład obliczenia realnej struktury elektronowej materiałów lub ich własności sieciowych, zwłaszcza dla układu skorelowanych cząstek (problem do dziś nierozwiązany).

Po trzecie, wykład elementarny postanowiłem przepleść kilkoma współczesnymi przykładami, a to dlatego, że studenci powinni przekonać się o żywotności tej dziedziny. Brak odniesienia do tego, co się robi obecnie, stanowi zasadniczy dylemat „co wybrać” dla rozpoczynających samodzielną pracę naukową młodych badaczy (doktorantów). Jest zadziwiające, że taki prosty opis układów wielu cząstek stanowi podstawę szczegółowego opisu konkretnych układów elektronicznych, magnetycznych (spintronicznych) czy nanofizycznych. W tym wypadku nasuwa się oczywiste pytanie, czy potrzebne jest takie studiowanie aspektów ogólnych, swojego rodzaju „sztuki dla sztuki”, czy nie lepiej od razu studiować zagadnienia szczegółowe? Uważam, że studiowanie takiego wstępu ma sens, jeśli nie chce się być tylko wąskim specjalistą. Ogólniejsze dobre wykształcenie lepiej pracuje dla nas na dłuższą metę. Czy nas na to stać? To już kwestia indywidualnego wyboru.

Wykład ten nie jest ujęciem historycznym problemu. Jednak również nie wszystko jest ujęte dedukcyjnie, jak w prostej teorii matematycznej. Poznawanie koncepcji fizycznych to wielokrotnie poznawanie szczegółów na przykładach doświadczalnych, a następnie powracanie do koncepcji początkowych. Fizyka jest w swojej istocie nauką indukcyjną (od szczegółu do ogółu), ale też jednocześnie wzorem nauki doświadczalnej. Nie ujmuję także całości problematyki. Na przykład nie poruszam ciekawej tematyki magnetoelektryków (ferroików). Zatem nie ma tutaj głębszego powiązania z elektrodynamiką materiałów. Pomijam także powiązanie z nanofizyką i spintroniką. Być może będzie jeszcze okazja wrócić do tego później.

Na koniec uwaga dla studentów. Każdy doświadczony wykładowca wie, jak mało można wyłożyć porządnie w ciągu semestralnego kursu. Dlatego też podstawą wiedzy powinno być przestudiowanie podręcznika, a nie wyłącznie notatek z wykładu. Niniejszy podręcznik zawiera i tak już okrojony materiał, żeby nie zniechęcać ogromem wiedzy szczegółowej. Studiuj więc i myśl krytycznie, jeśli myślisz o zajęciu się tą dziedziną. Zamiarem było napisanie wstępu z punktu widzenia samouka, bo tak poznaje się naprawdę.

Proszę o uwagi

Józef Spałek
ufspalek@if.uj.edu.pl
Kraków, 2009–2014



Podziękowania

Wiele osób przyczyniło się do powstania tego podręcznika. Chciałbym najpierw podziękować doktorowi Robertowi Podsiadłemu za sporządzenie notatek z mojego wykładu wygłaszanego na UJ (treść wykładów często znacznie odstępowała od sporządzonych przeze mnie wcześniej notatek!). Doktor Podsiadły sporządził także pierwszą komputerową wersję wykładów, którą mogłem następnie redagować. Niniejszy tekst, pod względem technicznym, do postaci końcowej doprowadzili mgr Marcin Abram z Instytutu Fizyki UJ, uzupełniając go nietrywialnymi uwagami, a także dr Danuta Goc-Jaęło, która dopracowała moje szkice lub wstępne rysunki.

Chciałbym podziękować przede wszystkim moim współpracownikom i doktorantom z Zakładu Teorii Materii Skondensowanej i Nanofizyki Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego. W szczególności zaś doktorom: Adamowi Rycerzowi, Edwardowi M. Görlichowi, Janowi Bale oraz mgr. Zygmuntovi Starypanowi, którzy zwrócili mi uwagę na ciekawe zadania do tego wykładu. Dziękuję również prof. Krzysztofowi Byczukowi z Instytutu Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego, który był bardzo pomocny, gdy powstawały pierwsze notatki do tego podręcznika. W końcu chciałbym nadmienić, że moja wcześniejsza praca i wykłady w AGH ukształtowały moje poglądy na fizykę jako naukę przede wszystkim doświadczalną. W późniejszym czasie moje poglądy trochę się zmieniły – zwłaszcza pod wpływem rozwoju teorii opartych na koncepcji spontanicznego złamania symetrii i emergentności zjawisk w przyrodzie, ale pierwsze poczucie samodzielności jest ważne, jeśli nie najważniejsze.

Dziękuję Pani Redaktor Izabeli Mice z Wydawnictwa Naukowego PWN S.A. za cierpliwość, wyrozumiałość i uwagi. Dziękuję doktorantom za krytyczne przeczytanie części lub całości pierwszej wersji.

Dzięki serdeczne wszystkim!

Józef Spałek
ufspalek@if.uj.edu.pl

