

Spis treści

Przedmowa Autora	XV
Podziękowania od Autora	XIX
Notatka skierowana do ekspertów fizyki	XXI
1. Fizyka kwantowa	1
Czym jest fizyka kwantowa?	1
W jaki sposób fizyka kwantowa wpływa na życie codzienne?	3
Czym jest teoria fizyki i jaki jest jej plan badań?	4
Dlaczego w fizyce często używamy słowa „model”?	5
Dlaczego rok 2015 był szczególnie dobry dla fizyki kwantowej?	6
Dlaczego niektóre obiekty są dobrze opisane za pomocą klasycznych modeli fizycznych, podczas gdy inne wymagają opisu fizyki klasycznej?	8
Co tworzy świat fizyczny?	9
Czym różni się światło w opisie klasycznym i kwantowym?	11
Co wynika z detekcji pojedynczych cząstek światła?	12
Czy możliwe jest utworzenie i wykrycie dokładnie jednego fotonu?	14
Jak doszło do odkrycia fizyki kwantowej?	16
Czy pola elektromagnetyczne mają naturę kwantową?	18
Dodatkowa lektura	21
Przypisy	21
2. Pomiary kwantowe i ich konsekwencje	23
Czym jest pomiar w fizyce klasycznej?	23

Co to jest polaryzacja światła?	24
Jak określić lub zmierzyć polaryzację światła?	25
Co się dzieje, gdy światło zawiera mieszaninę różnych polaryzacji?	28
Co będzie, gdy światło jest spolaryzowane, ale w innym kierunku niż H i V?	29
Jaka fizyka kryje się za wynikami pomiarów tak spolaryzowanego światła? ..	31
Czym jest spójność (koherencja) i jaką pełni rolę?	32
Czy można zmierzyć polaryzację pojedynczego fotonu?	34
W jaki sposób wytworzyć foton o określonej polaryzacji?	36
Czy pomiar kwantowy pozwala określić polaryzację pojedynczego fotonu? ..	36
Jaka jest różnica pomiędzy klasycznym a kwantowym podejściem do opisu polaryzacji?	36
Jak wyznaczamy prawdopodobieństwa uzyskania danej polaryzacji fotonu?	37
Zmierzyć polaryzację kwantową – co to oznacza?	41
Co oznacza wykonanie pomiaru w sensie kwantowym?	42
Jak to możliwe, że obiekt o skali wielkości człowieka zdaje się mieć określone właściwości, chociaż poszczególne kwantowe składniki tego obiektu ich nie mają?	43
Co powinniśmy rozumieć pod pojęciem „stan danego obiektu”?	44
Co to jest stan kwantowy?	45
Czy Bob może eksperymentalnie określić stan kwantowy wytworzony przez Alicję?	47
Czy Bob może sklonować, to jest wykonać kopię stanu pojedynczego fotonu?	48
Co to jest spójność kwantowa?	49
Jakie są zasady przewodnie mechaniki kwantowej?	50
Co tak naprawdę opisuje mechanika kwantowa?	52
Przypisy	52
3. Kwantowe szyfrowanie danych – zastosowanie fizyki kwantowej ..	53
Czy fizykę kwantową można wykorzystać do stworzenia całkowicie bezpiecznej komunikacji internetowej?	53
W jaki sposób szyfrowanie (kryptografia) zachowuje wiadomość w tajemnicy?	53
Czy większość metod szyfrowania można złamać?	54
Czy istnieje jakaś metoda szyfrowania, której złamać nie można?	56

W jaki sposób tekst reprezentowany jest za pomocą symboli binarnych (dwójek)?	57
W jaki sposób wiadomość tekstowa jest szyfrowana i deszyfrowana za pomocą klucza binarnego?	57
Jak można wykorzystać polaryzację fotonów do tworzenia bezpiecznych kluczy szyfrujących?	58
Jakie zasady fizyki leżą u podstaw kwantowej dystrybucji klucza?	59
Jak działa kwantowa dystrybucja klucza?	61
Co się stanie, jeśli jest podsłuch?	64
Jak Alicja i Bob mogą wykryć obecność Ewy?	65
A co jeśli Ewa jest zawsze obecna?	66
Czy Ewa mogłaby obmyślić inne, lepsze sposoby podsłuchiwania?	68
Jaki jest aktualny stan możliwości dystrybucji klucza kwantowego?	69
Dodatkowa lektura	69
Przypisy	69
4. Zachowanie kwantowe i jego opis	71
Jak zachowują się obiekty kwantowe przy braku pomiaru?	71
Czym różni się zachowanie elektronów i kulek do gry flipper?	72
Dlaczego elektron zawsze kieruje się w stronę kozy?	73
Co się stanie, jeśli zmodyfikujemy konfigurację układu?	75
A co stanie się, jeśli zablokujemy jedną ścieżkę?	76
Co możemy stwierdzić do tej pory?	76
Czy możemy prześledzić drogę, którą przemieszcza się elektron?	77
Dlaczego to samo rozumowanie nie może być stosowane w odniesieniu do kulki flippera?	79
Co to jest proces unitarny?	79
Jakie inne przykłady procesów unitarnych ilustrują główne punkty?	81
Jakie są dodatkowe konsekwencje tego, że proces jest unitarny?	82
Czy materia może zachowywać się tak samo jak fotony w eksperymencie dwuścieżkowym?	84
Czy foton może niekiedy zachowywać się zgodnie z klasycznym prawdopodobieństwem?	86
Jak zebrać poprzednie rozważania w zasadę fizyki?	87
Czym jest pomiar w fizyce kwantowej?	88
Czy obiekt kwantowy może istnieć w dwóch miejscach jednocześnie?	88

W jaki sposób kwantowa dystrybucja klucza wykorzystuje procesy unitarne?	89
W jaki sposób teoria kwantowa opisuje stany, dla których możliwe są tylko dwie możliwości?	90
W jaki sposób teoria kwantowa opisuje elektron realizujący dwie możliwe ścieżki?	90
Czy stan dla obiektów makroskopowych można przedstawić za pomocą strzałek?	92
Jak wynik prawdopodobieństwa nawiązuje do możliwości?	93
W jaki sposób elektron może zrealizować dwie ścieżki?	94
Jak użyć strzałki stanu do wyznaczania prawdopodobieństw, gdy występuje interferencja ścieżki?	95
Co się stanie, jeśli zmienimy jedną ze ścieżek?	97
Jak możemy zebrać przedstawione idee w Zasadę Przewodnią?	97
Co się wydarzy, jeśli jeszcze bardziej zmienimy długość ścieżki?	98
Czy z tego eksperymentu wynika jakaś ogólna zasada?	101
Jakie są najważniejsze przestania z tego rozdziału?	103
Przypisy	105
5. Pomiar grawitacji za pomocą opisów interferencji kwantowej – zastosowanie fizyki kwantowej	107
Na czym polega technologia sensorów?	107
Dlaczego pomiar siły grawitacji jest potrzebny?	108
Jak można wykorzystać fizykę kwantową do pomiaru grawitacji?	109
Czym ten interferometr różni się od omawianego w poprzednim rozdziale?	112
Czy ten sensor jest użyteczny do pomiaru grawitacji?	112
6. Możliwości kwantowe i fale	113
Jak pojęcie fal znalazło się w teorii kwantowej?	113
Czym są fale?	114
Co to jest interferencja fal?	116
Czym są kwantowe fale możliwości?	117
W jaki sposób fala psi śledzi swój wewnętrzny czas?	118
Co wyznacza czas cyklu lub częstotliwość tykania wewnętrznego zegara cząstki?	119
Jak możemy zebrać przedstawione idee w kolejną zasadę przewodnią?	121
Czym jest pęd i co może go zmienić?	122

Co to jest energia?	123
Jak równanie Schrödingera opisuje obiekty kwantowe poruszające się w przestrzeni?	125
Jaki jest związek pomiędzy falą kwantową i prawdopodobieństwem?	126
Jaki jest przykład równania Schrödingera w działaniu?	127
W jaki sposób cząstka kwantowa przechodzi przez miejsca określone zerowym prawdopodobieństwem?	129
Na czym polega zasada nieoznaczoności Heisenberga?	130
Czy poprawne jest stwierdzenie, że elektron jest zarówno cząstką, jak i falą? ..	132
Przypisy	133
7. Kamienie milowe i dalsze rozdroża	135
Jakie aspekty fizyki kwantowej poznaliśmy do tej pory i jakie tematy powinniśmy omówić jako następne?	135
Jakie kamienie milowe już osiągnęliśmy?	136
Przypisy	141
8. Testy Bella i załamanie lokalnego realizmu	143
Czy eksperymenty mogą zbadać istotę realności?	143
Czym jest korelacja i co nam mówi?	144
Jaki jest przykład skorelowanych właściwości?	145
Jaki jest przykład skorelowanych zachowań?	146
Jak można ilościowo określić korelacje?	147
Jaka jest różnica między korelacją klasyczną a korelacją kwantową?	151
Czym jest realizm i jak możemy go przetestować eksperymentalnie?	152
Przygotowanie do eksperymentalnych testów nad realizmem	153
Co jeśli możemy dokonać tylko częściowych pomiarów?	156
Co uniemożliwia komunikację pomiędzy obiema stronami eksperymentu? ..	159
Co to jest realizm lokalny?	161
Jakiego rodzaju eksperymenty mogą położyć kres lokalnemu realizmowi? ...	161
Czy wszystkie stany światła emitowane przez atomy dadzą ten sam rezultat? ..	168
Czy w naszej argumentacji mogą być wady lub luki?	169
Jakie eksperymenty przezwyciężyły potencjalne wady?	170
Jak możemy mieć pewność, że ustawienia w pomiarze są niezależne?	171
Co John Bell sądził o wynikach takich eksperymentów?	172
Czy załamanie lokalnego realizmu oznacza, że musimy całkowicie porzucić klasyczną intuicję i klasyczną fizykę?	173

Czy powinniśmy odrzucić koncepcję lokalnej przyczynowości, lokalnego realizmu, a może jedno i drugie?	174
Przypisy	174
9. Splątanie kwantowe i teleportacja	177
Co to jest splątanie kwantowe?	177
Jak opisujemy stan obiektu złożonego?	178
Jak opisujemy stan splątany pary fotonów?	180
Jak możemy stworzyć stan Bella dla pary fotonów?	181
W jaki sposób splątany stan Bella narusza lokalny realizm?	183
Co możemy wiedzieć o składnikach złożonego obiektu kwantowego?	184
Co oznacza w praktyce „wiedzieć wszystko, co tylko można” o złożonym obiekcie kwantowym?	185
Co możemy osiągnąć dzięki splątaniu, a czego nie moglibyśmy osiągnąć bez niego?	187
W jaki sposób splątanie umożliwia teleportację stanu kwantowego?	188
Czy to, co dzieje się po stronie Alicji, wpływa na to, co dzieje się po stronie Boba?	191
Czy teleportacja kwantowa jest natychmiastowa?	192
Czy można teleportować człowieka?	192
Do czego przydaje się teleportacja w stanie kwantowym?	193
Przypisy	194
10. Zastosowanie obliczeń kwantowych	195
Czy informacja jest fizyczna?	195
Czym jest komputer?	196
Jak działają komputery?	197
Jak mała może być pojedyncza bramka logiczna?	200
Czy możemy stworzyć komputery, które wykorzystają kwantowe właściwości?	201
Co to jest kubit?	202
Jakie zasady fizyczne wyróżniają komputery klasyczne i kwantowe?	203
Jakich bramek logicznych używałyby komputery kwantowe?	204
Jak miałyby działać komputery kwantowe?	208
Dlaczego rozkład liczb na czynniki pierwsze (faktoryzacja) jest trudny?	210
W jaki sposób komputery kwantowe mogłyby rozwiązać problem faktoryzacji?	213

Jakie inne problemy informatyczne mógłby rozwiązać komputer kwantowy?	215
Jakie problemy z fizyki i chemii mógłby rozwiązać komputer kwantowy? ...	216
Dlaczego komputery kwantowe są tak trudne do wyprodukowania?	219
Jakie są perspektywy budowy komputerów kwantowych?	221
Jakie są obiecujące podejścia do budowania komputerów kwantowych?	221
Przydatna literatura	223
Przypisy	223
11. Kwantyzacja energii i atomy	225
Czym jest kwantyzacja energii w mechanice kwantowej?	225
Dlaczego energia jest skwantowana, gdy cząstka jest uwięziona?	226
Jak jest skwantowana energia elektronu w atomie?	228
Dlaczego elektron nie spoczywa w najniższym punkcie doliny energii?	230
Jak atom absorbuje światło?	231
Jak atom emituje światło?	234
Co stało się z klasyczną ideą fizyki, w której elektron w atomie krąży wokół jądra?	235
Jak w trzech wymiarach wyglądają fale psi opisujące elektrony?	236
Przypisy	237
12. Zastosowanie technologii kwantowej: definiowanie czasu, wykrywanie ruchu i grawitacji	239
Czym są technologie wykrywania oparte na fizyce kwantowej?	239
Jaka jest naukowa definicja czasu?	240
Co to jest zegar?	241
Jak możemy sprawić, by zegary były identyczne?	242
Dlaczego elementarne obiekty kwantowe tworzą najdoskonalsze zegary? ..	243
Dlaczego dobre zegary są ważne technologicznie?	243
Jak dokładne są współczesne zegary atomowe?	244
Jak działają podstawowe zegary atomowe?	245
Jak działają najbardziej zaawansowane zegary atomowe?	247
Czym są czujniki inercyjne?	250
Co to jest akcelerometr?	250
Jak działają typowe akcelerometry?	251

Do czego służą akcelerometry?	252
Co to są grawimetry i do czego służą?	253
Jak działają typowe grawimetry?	253
Jak działa podstawowy grawimetr kwantowy?	254
Jak działają zaawansowane grawimetry kwantowe?	255
Czy interferometry atomowe mogą wykryć fale grawitacyjne?	258
Przypisy	260
13. Pola kwantowe i ich wzbudzenia	261
Czym są klasyczne cząstki i klasyczne pola?	261
Jaka zasada fizyki kwantowej łączy pojęcia cząstek i pól?	263
Co się stanie, jeśli zmierzmy pole kwantowe?	265
Jak stosować do światła kwantową teorię sieci?	267
Czym jest pole kwantowe?	268
Czym jest foton?	269
Czy cząstki i pola to dwa aspekty jednego pojęcia?	270
Czy unifikacja pól i cząstek dotyczy także elektronów?	270
Dlaczego nie widzimy pojawiania się i znikania zwykłych obiektów?	272
Z czego zbudowany jest wszechświat?	272
Czym jest próżnia kwantowa?	273
Jak cząstki elementarne uzyskały swoją masę?	275
Jakie jeszcze fakty przemawiają za istnieniem pól kwantowych?	276
Czy wiedza o teorii pól kwantowych pozwala zrozumieć tajemnicze korelacje Bella?	278
Czy wiedza o teorii pól kwantowych pozwala zrozumieć tajemnicę pomiarów kwantowych?	279
Dlaczego dyskusję na temat pól kwantowych przełożono na koniec tej książki?	280
Przypisy	280
14. Przyszłe kierunki i pozostałe pytania dotyczące teorii kwantowej	281
Co jest potrzebne, aby osiągnąć dalszy postęp?	281
Czego nie wiemy o technologii kwantowej?	283
Czego nie wiemy o fizyce kwantowej?	284
Co wiemy o kwantowych aspektach natury?	284

Czym różni się klasyczny i kwantowy opis natury?	286
Jakie wyzwania pozostają, by zrozumieć teorię kwantową?	286
Na czym polega kwantowy problem z pomiarem?	287
Jak można zresetować stan splątany?	289
Czy pogląd Heisenberga rozwiązuje problem pomiaru?	291
Jak dekoherencja może pomóc?	294
Czy dekoherencja jest wystarczająca?	295
Czy prawdopodobieństwo kwantowe jest sprawą ludzkiego mózgu?	296
Czy to wszystko jest w mojej głowie?	299
Koherencja na zawsze?	301
Dlaczego występują korelacje Bella?	305
Przypisy	307