

## Spis treści

Podziękowania ix

Wstęp xi

1 Spin 1

Zegar Kwantowy 6

Pomiary w tym samym kierunku 7

Pomiary w różnych kierunkach 7

Pomiary 9

Przypadkowość 10

Fotony i polaryzacja 11

Wnioski 15

2 Algebra liniowa 17

Liczby zespolone kontra liczby rzeczywiste 18

Wektory 19

Diagramy wektorów 19

Długość wektorów 20

Mnożenie przez skalar 21

Dodawanie wektorów 21

Wektory ortogonalne 23

Mnożenie bra przez ket 23

Bra-ket i długość wektorów 24

Bra-ket i ortogonalność 24

Bazy ortonormalne 25

Wektory jako kombinacje liniowe wektorów bazowych 27

Uporządkowane bazy 29

Długość wektorów 30

Macierze 30

Obliczenia na macierzach 33

Macierze ortogonalne i unitarne 34

Narzędzia algebry liniowej 35

### 3 Spiny i kubity 37

Teoria prawdopodobieństwa 37

Matematyka spinu kwantowego 38

Równoważne wektory stanu 41

Baza powiązana z danym kierunkiem spinu 43

Obrót aparatury pomiarowej o  $60^\circ$  45

Model matematyczny dla polaryzacji fotonu 46

Baza odpowiadająca danemu kierunkowi polaryzacji 47

Eksperymenty z filtrami polaryzacyjnymi 47

Kubity 49

Alicja, Bob i Ewa 50

Amplitudy prawdopodobieństwa i interferencja 53

Alicja, Bob i protokół BB84 54

### 4 Splątanie kwantowe 57

Kubity Alicji i Boba nie są splątane 58

Obliczenia dla kubitów niesplątanych 60

Obliczenia dla kubitów splątanych 61

|                                                             |        |
|-------------------------------------------------------------|--------|
| Komunikacja superluminalna                                  | 63     |
| Baza standardowa dla iloczynów tensorowych                  | 65     |
| Jak się splątuje kubity?                                    | 66     |
| Splątywanie kubitów z użyciem bramki CNOT                   | 68     |
| Splątane zegary kwantowe                                    | 69     |
| <br>5 Nierówność Bella                                      | <br>73 |
| Splątane kubity w różnych bazach                            | 75     |
| Einstein i realizm lokalny                                  | 78     |
| Einstein i zmienne ukryte                                   | 79     |
| Klasyczne wyjaśnienie splątania kwantowego Nierówność Bella | 82     |
| Odpowiedź mechaniki kwantowej                               | 82     |
| Odpowiedź klasyczna                                         | 84     |
| Pomiar                                                      | 87     |
| Protokół Ekerta i kwantowa dystrybucja kluczy               | 89     |
| <br>6 Logika klasyczna. Bramki. Obwody                      | <br>91 |
| Logika                                                      | 92     |
| Negacja                                                     | 92     |
| Koniunkcja                                                  | 93     |
| Alternatywa                                                 | 93     |
| Algebra boolowska                                           | 94     |
| Równoważność logiczna                                       | 95     |
| Operatory funkcjonalnie zupełne                             | 97     |
| Nand                                                        | 99     |
| Bramki logiczne                                             | 101    |

|                                                    |     |
|----------------------------------------------------|-----|
| Bramka NOT                                         | 101 |
| Bramka AND                                         | 102 |
| Bramka OR                                          | 102 |
| Bramka NAND                                        | 103 |
| Obwody                                             | 103 |
| NAND jako bramka uniwersalna                       | 104 |
| Bramki logiczne i obliczenia                       | 105 |
| Pamięć                                             | 107 |
| Obliczenia odwracalne                              | 107 |
| Bramka negacji kontrolowanej                       | 109 |
| Bramka Toffoliego                                  | 111 |
| Bramka Fredkina                                    | 113 |
| Obliczenia prowadzone za pomocą kul bilardowych    | 115 |
| <br>                                               |     |
| 7 Kwantowe bramki logiczne i obwody                | 121 |
| Kubity                                             | 122 |
| Bramka CNOT                                        | 122 |
| Kwantowe bramki logiczne                           | 124 |
| Kwantowe bramki logiczne działające na jeden kubit | 125 |
| Bramki I i Z                                       | 125 |
| Bramki X i Y                                       | 126 |
| Bramka Hadamarda                                   | 126 |
| Czy istnieją uniwersalne bramki kwantowe?          | 127 |
| Twierdzenie o nieklonowaniu                        | 128 |
| Obliczenia kwantowe kontra klasyczne obliczenia    | 130 |

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| Obwód Bella                                       | 131 |
| Kodowanie supergęste                              | 133 |
| Kwantowa teleportacja                             | 136 |
| Korekcja błędu                                    | 140 |
| Kod powtarzany                                    | 141 |
| Kwantowa korekcja odwrócenia bitów                | 142 |
| <br>                                              |     |
| 8      Algorytmy kwantowe                         | 147 |
| Klasy złożoności P i NP                           | 148 |
| Czy algorytmy kwantowe są szybsze od klasycznych? | 150 |
| Złożoność zapytań                                 | 151 |
| Algorytm Deutsch                                  | 152 |
| Iloczyn Kroneckera macierzy Hadamarda             | 156 |
| Algorytm Deutsch-Jozsy                            | 159 |
| Algorytm Simona                                   | 164 |
| Bitowe dodawanie sekwencji modulo 2               | 164 |
| Sformułowanie problemu Simona                     | 165 |
| Iloczyn skalarny i macierz Hadamarda              | 166 |
| Macierze Hadamarda a problem Simona               | 167 |
| Obwód kwantowy dla problemu Simona                | 169 |
| Klasyczna część algorytmu Simona                  | 172 |
| Klasy złożoności obliczeniowej                    | 174 |
| Algorytmy kwantowe                                | 176 |
| <br>                                              |     |
| 9      Znaczenie obliczeń kwantowych              | 179 |
| Algorytm Shora i kryptoanaliza                    | 180 |

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| Szyfrowanie RSA                               | 180 |
| Algorytm Shora                                | 182 |
| Algorytm Grovera i przeszukiwanie danych      | 184 |
| Algorytm Grovera                              | 184 |
| Zastosowania algorytmu Grovera                | 186 |
| Chemia i symulacja                            | 189 |
| Sprzęt                                        | 191 |
| Wyżarzanie kwantowe                           | 193 |
| Supremacja kwantowa i wszechświaty równoległe | 195 |
| Obliczenia                                    | 196 |
| Indeks                                        | 199 |