

Wstęp	9
1. Wprowadzenie	13
Wymagania wstępne	13
Czym jest QPU?	14
Podejście praktyczne	15
Elementarz QCEngine	15
Natywne instrukcje QPU	17
Ograniczenia symulatorów	20
Ograniczenia sprzętu	20
QPU a GPU: charakterystyka ogólna	20

Część I. Programowanie dla QPU

2. Jeden kubit	25
Krótkie spojrzenie na fizyczny kubit	26
Wprowadzenie notacji kołowej	29
Rozmiar kół	29
Rotacja kół	30
Pierwsze operacje QPU	31
Instrukcja QPU: NOT	32
Instrukcja QPU: HAD	32
Instrukcja QPU: READ	33
Instrukcja QPU: WRITE	33
Czas na praktykę: idealnie losowy bit	34
Instrukcja QPU: PHASE(θ)	37
Instrukcje QPU: ROTX(θ) i ROTY(θ)	38

COPY: brakująca operacja	38
Łączenie operacji QPU	39
Instrukcja QPU: ROOT-of-NOT	39
Czas na praktykę: kwantowy łowca szpiegów	41
Podsumowanie	44
3. Wiele kubitów	45
Notacja kołowa rejestrów multikubitowych	45
Rysowanie rejestru wielokubitowego	48
Operacje jednokubitowe w wielokubitowych rejestrach	48
Czytanie kubitów w wielokubitowym rejestrze	50
Wizualizowanie większej liczby kubitów	51
Instrukcja QPU: CNOT	52
Czas na praktykę: wykorzystanie par Bella w dzielonej losowości	55
Instrukcje QPU: CPHASE i CZ	56
Sztuczka QPU: odbicie fazowe	57
Instrukcja QPU: CCNOT (bramka Toffoliego)	59
Instrukcje QPU: SWAP i CSWAP	60
Test SWAP	61
Tworzenie operacji warunkowej	63
Czas na praktykę: zdalnie kontrolowana losowość	66
Podsumowanie	68
4. Teleportacja kwantowa	69
Czas na praktykę: teleportujemy sobie coś	69
Spacer po programie	74
Krok 1. Utworzenie splątanej pary	75
Krok 2. Przygotowanie ładunku	75
Krok 3.1. Połączenie ładunku ze splątaną parą	76
Krok 3.2. Wprowadź ładunek w superpozycję	76
Krok 3.3. Odczytaj oba kubity Alice	77
Krok 4. Odbierz i przekształć	78
Krok 5. Weryfikacja wyniku	78
Interpretowanie wyników	80
Jak naprawdę używa się teleportacji?	81
Zabawne wypadki przy teleportacji	81

Część II. Prymitywy QPU

5. Kwantowe arytmetyka i logika	85
Dziwnie odmienne	85
Arytmetyka na QPU	87
Czas na praktykę: budowanie operatorów inkrementacji i dekrementacji	87
Dodawanie dwóch kwantowych liczb stałoprzecinkowych	90
Ujemne liczby stałoprzecinkowe	91
Czas na praktykę: bardziej złożona matematyka	92
Prawdziwa kwantowość	93
Wykonanie kwantowo-warunkowe	94
Wyniki kodowane w fazie	95
Odwracalność i kubity skreczowe	96
Odwracanie skutków obliczeń	98
Mapowanie logiki booleanowskiej do operacji QPU	101
Podstawowa logika kwantowa	101
Podsumowanie	103
6. Wzmacnianie amplitudy	105
Czas na praktykę: konwersja między fazą a wielkością	105
Iteracja wzmacniania amplitudy	108
Więcej iteracji?	108
Wiele wejść z flipem	111
Wykorzystanie wzmocnienia amplitudy	116
AA i QFT jako szacowanie sumy	116
Przyspieszanie konwencjonalnych algorytmów za pomocą AA	117
Wewnątrz QPU	117
Intuicja	117
Podsumowanie	119
7. QFT: Kwantowa transformata Fouriera	121
Ukryte wzorce	121
QFT, DFT i FFT	123
Częstotliwości w rejestrze QPU	123
DFT	126
Rzeczywiste i zespolone wejścia DFT	128
DFT dowolnego sygnału	130
Używanie QFT	132
QFT jest szybka	132

Wewnątrz QPU	139
Zrozumienie zasad	140
Operacja po operacji	141
Wnioski	145
8. Szacowanie fazy kwantowej	147
Uczymy się o operacjach QPU	147
Fazy własne uczą nas czegoś użytecznego	148
Co robi szacowanie fazy	149
Jak korzystać z szacowania fazy	150
Wejścia	150
Wyjścia	152
Drobnym drukiem	153
Dobór rozmiaru rejestru wyjściowego	153
Złożoność	154
Operacje warunkowe	154
Szacowanie fazy w praktyce	154
Wewnątrz QPU	155
Jak to działa?	156
Operacja po operacji	157
Podsumowanie	159

Część III. Zastosowania QPU

9. Prawdziwe dane	163
Dane liczbowe	163
QRAM	165
Kodowanie wektorów	168
Ograniczenia kodowania amplitudy	171
Kodowanie amplitudy i notacja kołowa	172
Kodowanie macierzy	173
Jak operacja QPU może reprezentować macierz?	173
Symulacja kwantowa	174
10. Kwantowe wyszukiwanie	179
Logika fazowa	180
Budowanie podstawowych operacji logiki fazowej	182
Budowanie złożonych zdań logiki fazowej	182

Rozwiązywanie łamigłówek logicznych	185
O kotkach i tygrysach	185
Ogólny przepis na rozwiązanie problemu spełnialności formuły logicznej	189
Czas na praktykę: rozwiązujemy formułę boolowską 3-SAT	190
Czas na praktykę: problem 3-SAT niespełniający kryteriów	192
Przyspieszanie konwencjonalnych algorytmów	194
11. Kwantowy supersampling	197
Co QPU może zrobić dla grafiki komputerowej?	197
Zwykły supersampling	198
Czas na praktykę: obliczanie obrazów kodowanych fazą	199
Kwantowy shader pikseli	200
Wykorzystanie PHASE do rysowania	201
Rysowanie krzywych	203
Próbkowanie obrazów kodowanych fazowo	204
Ciekawszy obrazek	205
Supersampling	208
QSS a konwencjonalny sampling Monte Carlo	208
Jak działa QSS	209
Dodawanie koloru	214
Podsumowanie	216
12. Algorytm faktoryzacji Shora	217
Czas na praktykę: wykorzystanie algorytmu faktoryzacji Shora na QPU	218
Jak właściwie działa algorytm Shora?	219
Czy w ogóle potrzebujemy QPU?	220
Podejście kwantowe	222
Krok po kroku: faktoryzacja liczby 15	223
Krok 1. Inicjalizacja rejestrów QPU	224
Krok 2. Rozszerzenie do superpozycji kwantowej	224
Krok 3. Warunkowe mnożenie przez 2	227
Krok 4. Warunkowe mnożenie przez 4	228
Krok 5. Kwantowa transformata Fouriera	229
Krok 6. Odczytanie kwantowego wyniku	231
Krok 7. Logika cyfrowa	231
Krok 8. Sprawdzenie wyniku	234

Drobnym drukiem	235
Obliczanie reszty z dzielenia	235
Czas a przestrzeń	236
Kopierwsze inne niż 2	236

13. Kwantowe uczenie maszynowe 237

Rozwiązywanie układów równań liniowych	238
Opisywanie i rozwiązywanie układów równań liniowych	238
Rozwiązywanie układu równań liniowych za pomocą QPU	240
Kwantowa analiza głównych składowych	249
Standardowa analiza składowych głównych	249
PCA z QPU	250
Kwantowa maszyna wektorów podtrzymujących	254
Standardowe maszyny wektorów podtrzymujących	254
SVM z QPU	257
Inne aplikacje uczenia maszynowego	260

Część IV. Perspektywy

14. Bądź na bieżąco: przewodnik po literaturze 265

Od notacji kołowej po wektory zespolone	265
Subtelności i uwagi na temat terminologii	267
Podstawy miary	268
Rozkład bramki i kompilacja	269
Teleportacja bramek	271
Galeria sław	271
Wyścig: komputery kwantowe a klasyczne	272
Uwaga na temat algorytmów opartych na wyroczni kwantowej	273
Algorytm Deutsch-Jozsy	273
Algorytm Bernsteina-Vaziraniego	273
Algorytm Simona	274
Języki programowania kwantowego	274
Obietnica kwantowej symulacji	275
Korekcja błędów i urządzenia NISQ	276
Co dalej?	276
Książki	276
Notatki z wykładów	277
Zasoby online	277