Transformacje kwantowe zależne od pamięci z fotonicznym memrystorem kwantowym

Karol Bartkiewicz, Patrycja Tulewicz, Adam Miranowicz

Instytut Spintroniki i Informacji Kwantowej
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, PL-61-614 Poznań, Polska

49. Zjazd Fizyków Polskich, Katowice 2025

Plan prezentacji

1. Wprowadzenie
2. Nasze podejście
3. Implementacja
4. Wyniki
5. Porównanie
6. Zastosowania i przyszłość
7. Wnioski

Memrystory klasyczne: Czwarty element

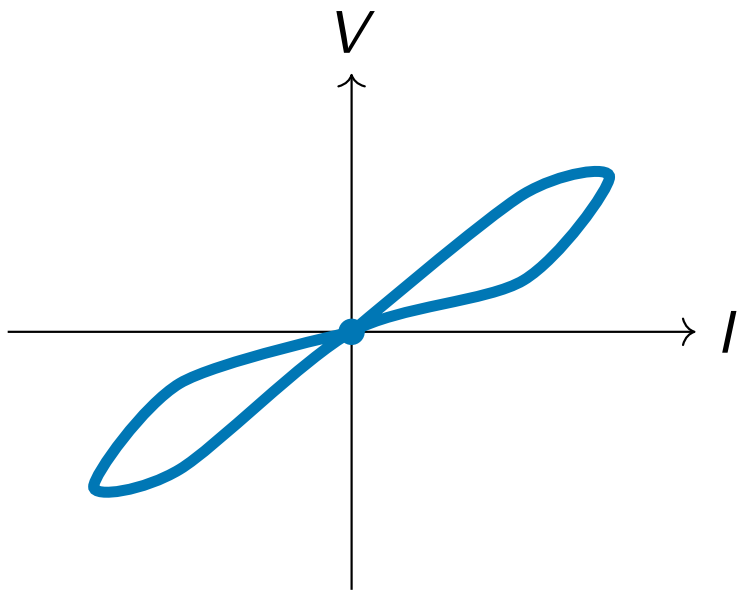
Memrystory klasyczne (Chua 1971):

- Czwarty fundamentalny element obwodu
- Uzupełnia: R, L, C, M
- Rezystancja zależna od pamięci

Równania definiujące:

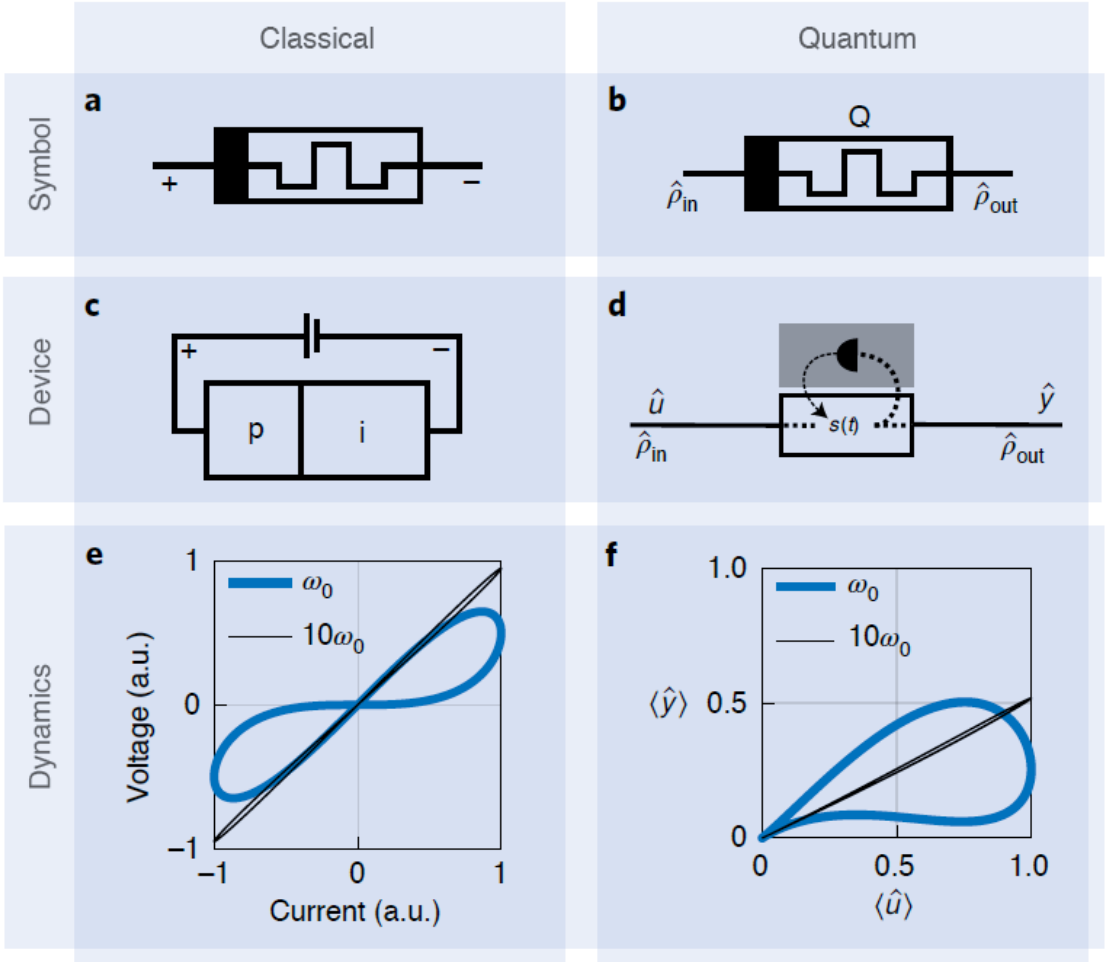
- $v(t) = M(w) \cdot i(t)$
- $\frac{dw}{dt} = f(w, i(t))$
- Stan w zależy od historii

Kluczowa cecha: Ściśnięta pętla histerezy w punkcie początkowym



Ściśnięta w (0,0)

Memrystory kwantowe?



M. Spagnolo i in., "Experimental photonic quantum memristor," Nature Physics **18**, 1056 (2022).

Wyzwanie kwantowe

Fundamentalne pytanie

Czy układy kwantowe mogą wykazywać pamięć zachowując jednocześnie koherencję na poziomie pojedynczych fotonów?

Wyzwania:

- Twierdzenie o nieklonowaniu
- Pomiar niszczy stany kwantowe
- Ewolucja unitarna jest odwracalna
- Dekoherencja od otoczenia

Poprzednie podejścia:

- Nieliniowość materiałowa (stratna)
- Niehermitowskie hamiltoniany
- Obwody nadprzewodzące (mK)
- Sprzężenie zwrotne z pomiarami

Potrzebujemy nowego paradygmatu!

Pamięć oparta na pomiarze

Nasze rozwiązanie

Rozdzielenie dynamiki kwantowej od klasycznej pamięci poprzez sprzężenie zwrotne z pomiaru

Architektura dwupoziomowa:

1. **Poziom kwantowy:** Czysta ewolucja unitarna

$$|\psi_{\text{wyj}}(t)\rangle = \hat{U}(\theta(t))|\psi_{\text{wej}}(t)\rangle$$

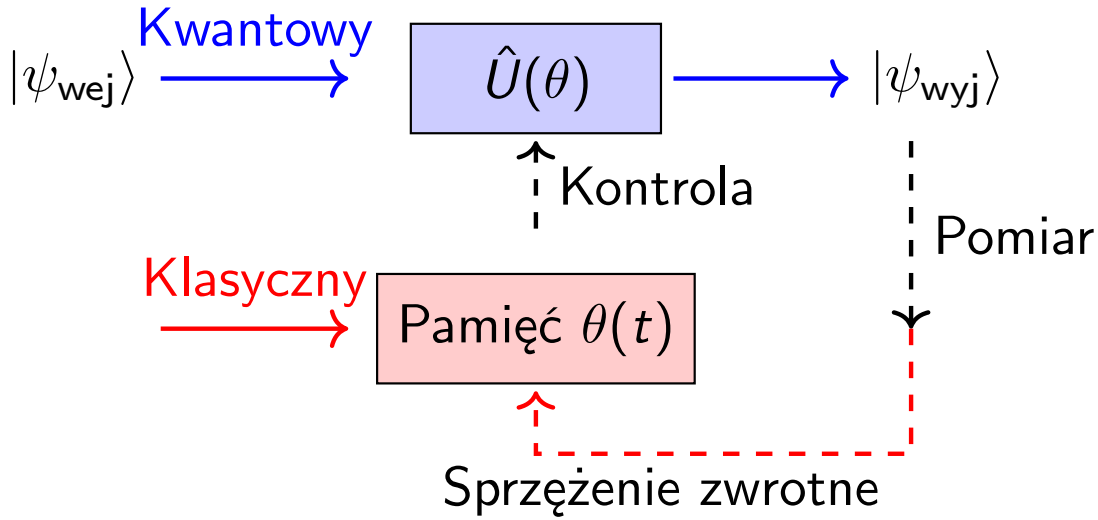
2. **Poziom klasyczny:** Ewolucja parametru pamięci

$$\frac{d\theta}{dt} = \eta N(t) - \gamma(\theta - \theta_0)$$

Gdzie:

- $N(t)$: Zdarzenia detekcji (0 lub 1)
- η: Siła sprzężenia zwrotnego
- γ: Szybkość relaksacji
- θ_0: Kąt równowagowy

Architektura systemu



Pamięć poprzez wyniki pomiarów, nie właściwości materiałowe

Implementacja fotoniczna

Dlaczego fotony?

- Działanie w temperaturze pokojowej
- Długie czasy koherencji
- Dojrzała technologia
- Łatwa kontrola polaryzacji

Kodowanie:

- $|0\rangle \equiv |H\rangle$ (pozioma)
- $|1\rangle \equiv |V\rangle$ (pionowa)
- Możliwe stany superpozycji

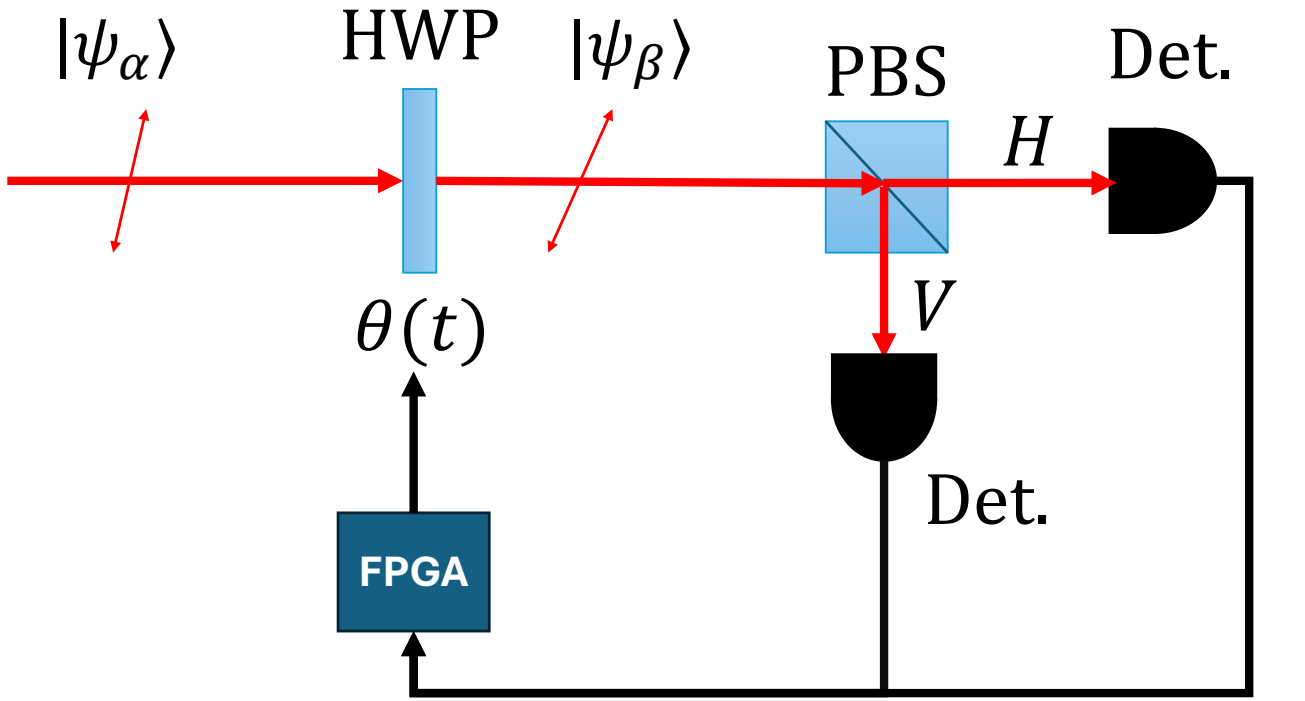
Kluczowe komponenty:

- Źródło pojedynczych fotonów
- Płytka półfalowa (HWP)
- Detektor polaryzacji
- Szybka elektronika sprzężenia zwrotnego

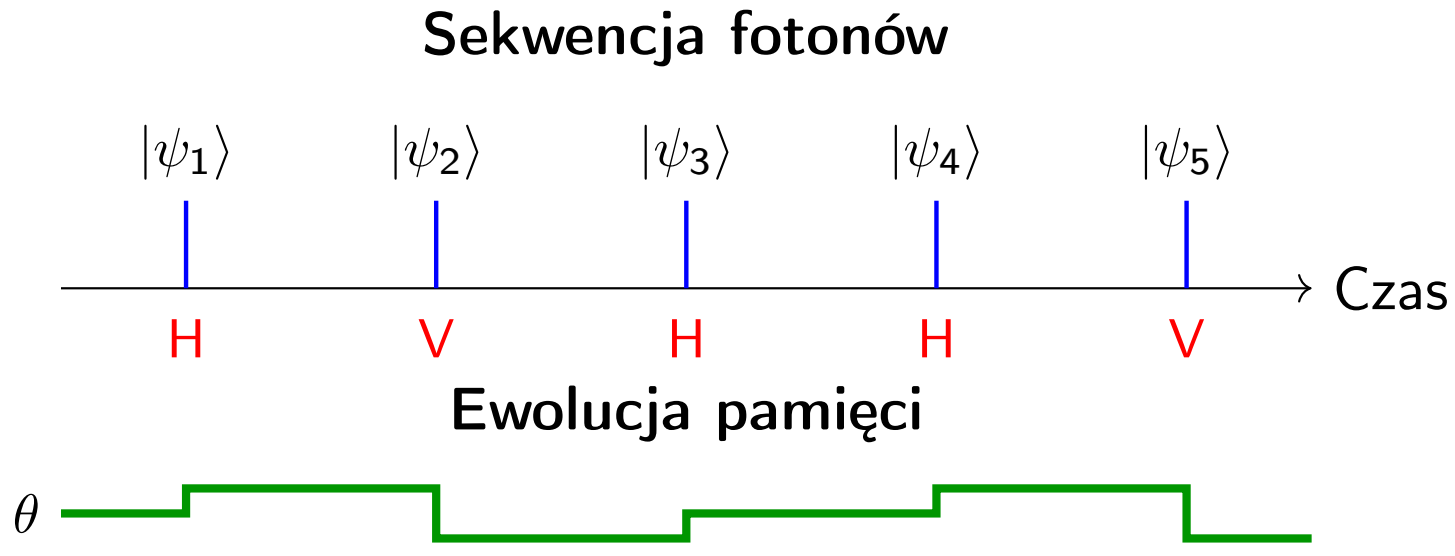
Transformacja HWP:

$$\hat{U}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \sin(2\theta) \\ \sin(2\theta) & -\cos(2\theta) \end{bmatrix}$$

Schemat implementacji (pojedyncza trajektoria kwantowa)



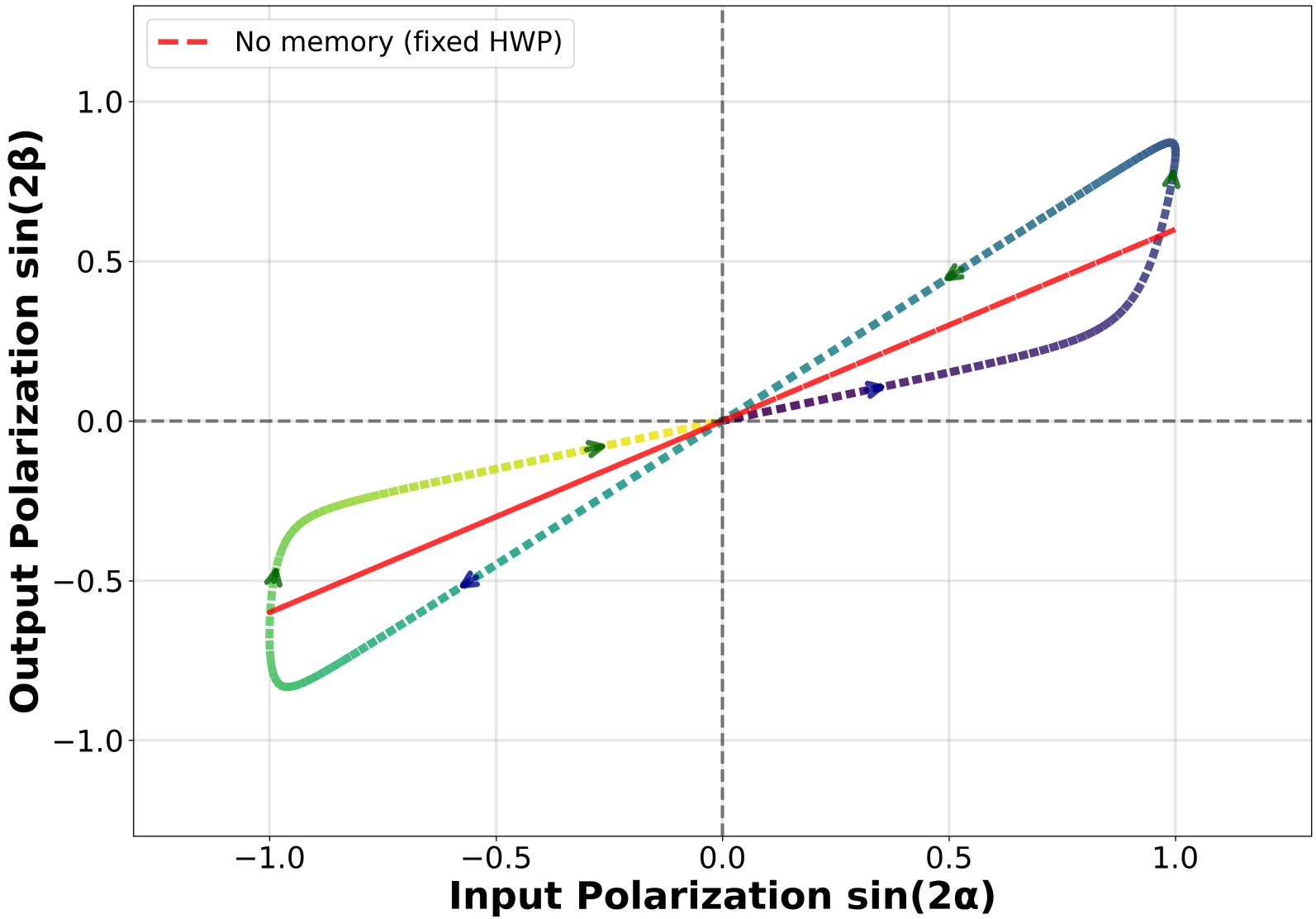
Mechanizm sprzężenia zwrotnego



H wykryta: $\theta \rightarrow \theta + \eta\Delta t$

V wykryta: $\theta \rightarrow \theta - \gamma(\theta - \theta_0)\Delta t$

Histereza kwantowa



Kluczowe cechy memrystora kwantowego

Cechy memrystora:

- Zero w punkcie początkowym
- Asymetryczne ścieżki
- Współczynnik pamięci
- Zależność od częstotliwości

Zachowane cechy kwantowe:

- Koherentne stany superpozycji
- Działanie na fotonach
- Ewolucja unitarna (na foton)
- Wysoka wierność ($> 90\%$)

Dynamika pamięci:

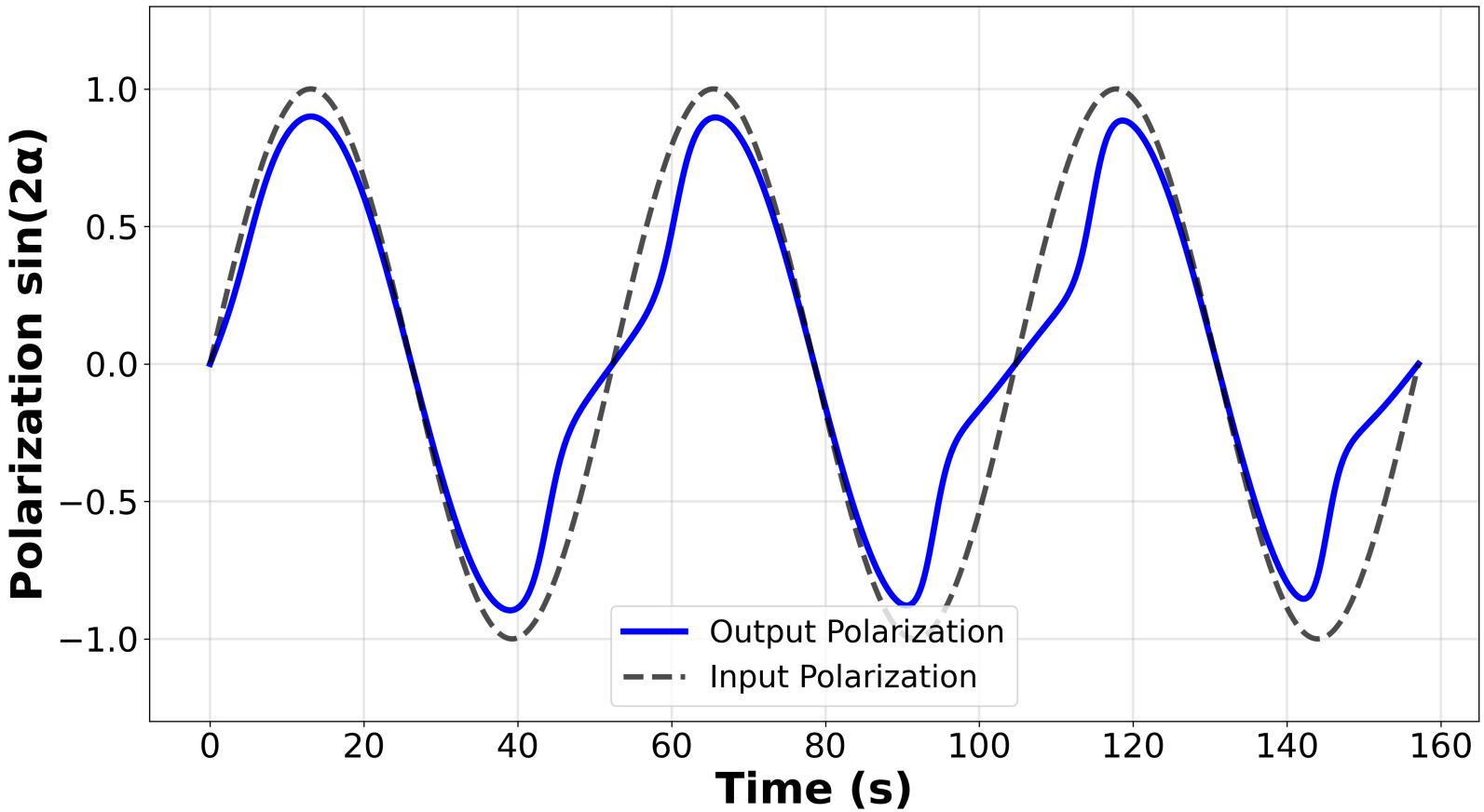
$$\theta(t) = \theta_0 + (\theta(0) - \theta_0)e^{-\gamma t}$$

$$+\eta \int_0^t e^{-\gamma(t-t')} N(t')dt'$$

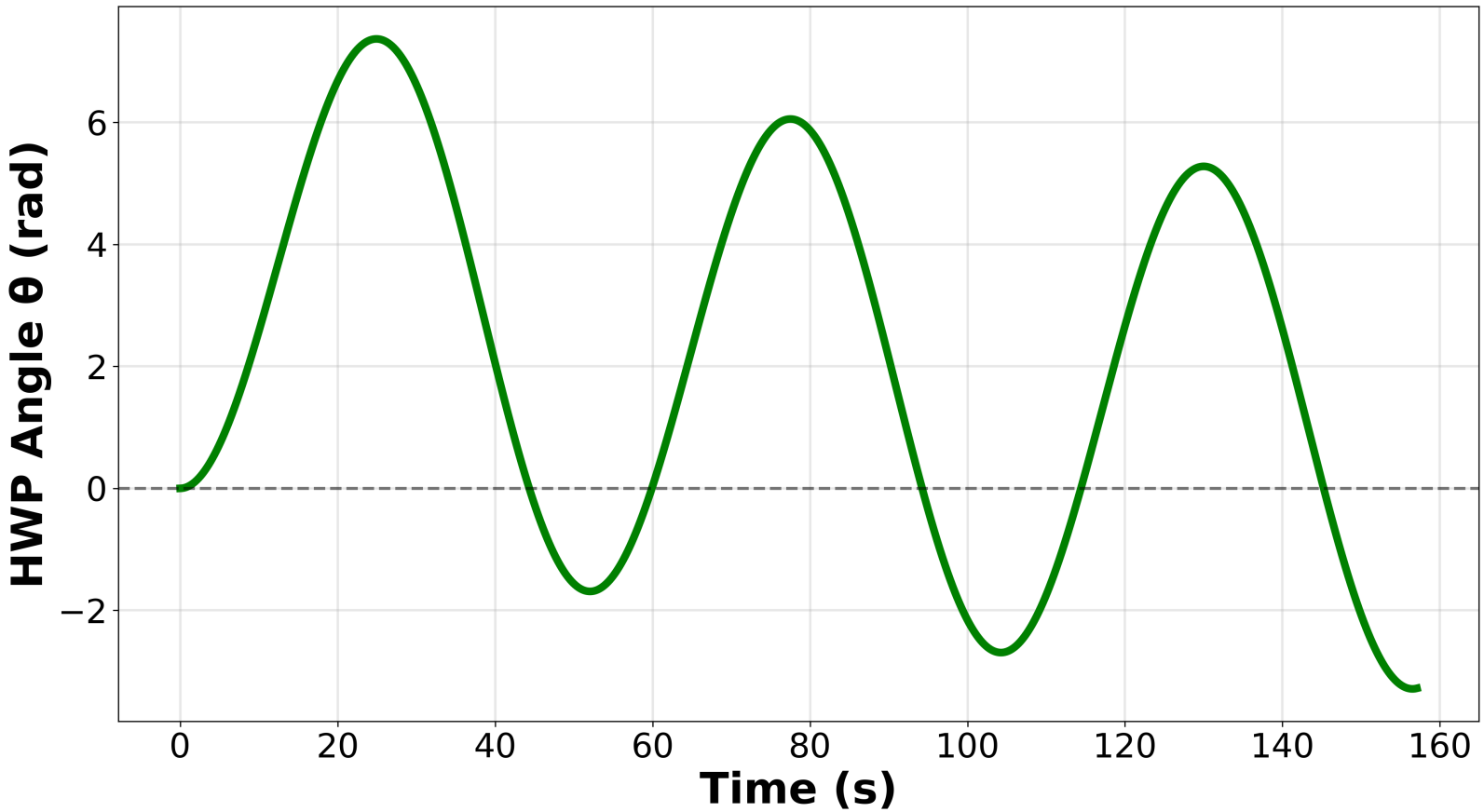
Histereza w stanie stacjonarnym:

- Powierzchnia pętli: $A \propto \frac{\eta\gamma}{\gamma^2+\omega^2}$
- Maleje z częstotliwością
- Częstotliwość charakterystyczna: $f_c = \gamma/2\pi$

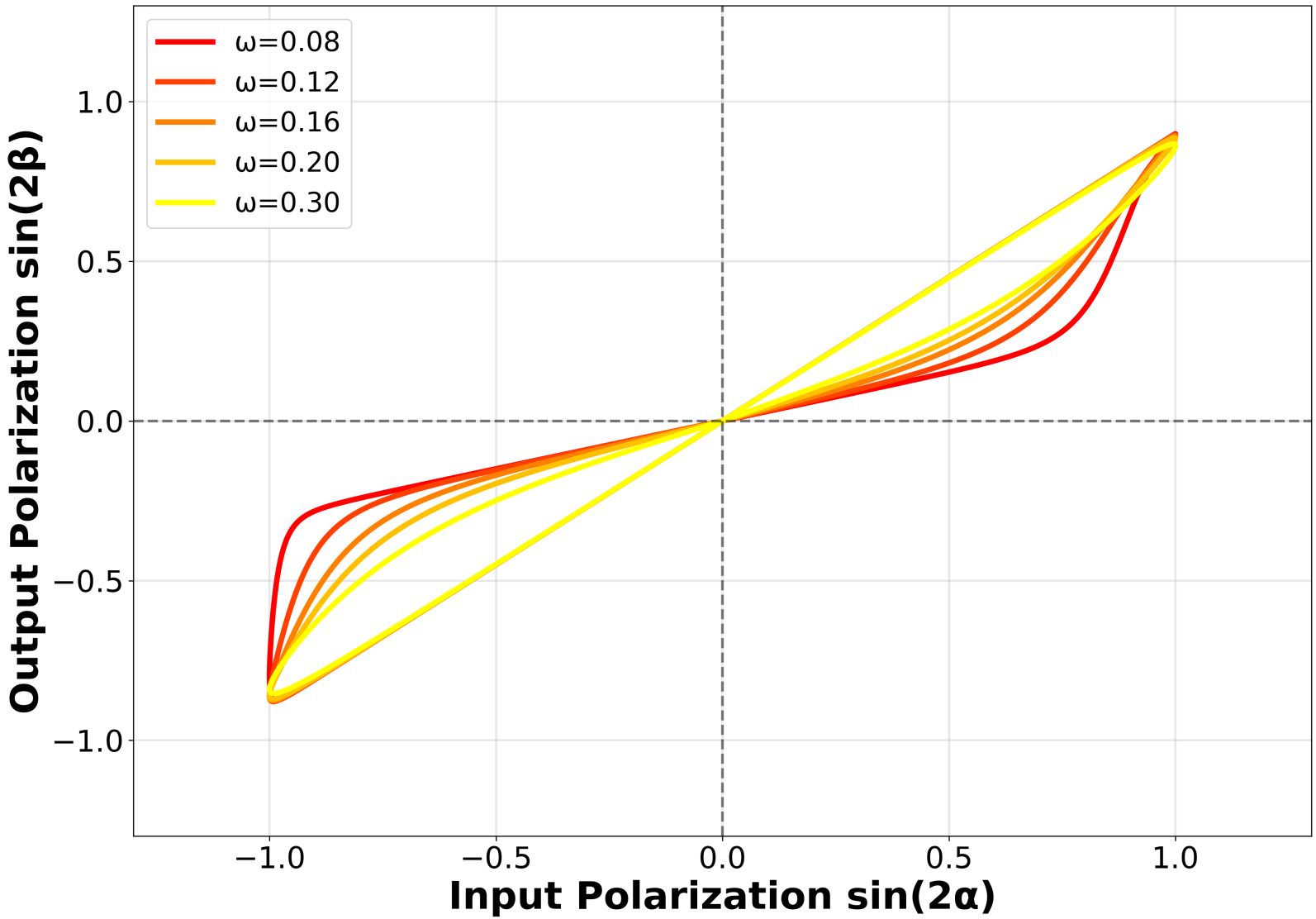
Ewolucja czasowa



Ewolucja parametru pamięci



Zależność od częstotliwości



Porównanie z innymi podejściami

Podejście	**Platforma**	**Typ pamięci**	**Kluczowe cechy**
Salmilehto	Nadprzew.	Kwantyzacja strumienia	Temperatura mK
Spagnolo	Fotoniczna	Sprzężenie zwrotne z pomiaru	BRAK ściśniętej histerezy
Di Micco	Fotoniczna	Sprzężenie zwrotne z pomiaru	BRAK ściśniętej histerezy
Ta praca	Fotoniczna	Sprzężenie zwrotne z bramki programowalnej	Programowalne, bezstratne

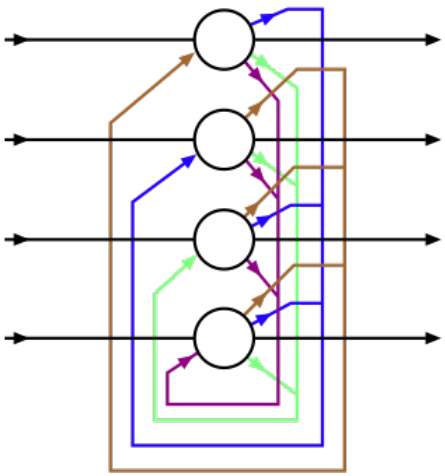
Nasze zalety:

- Brak wymagań materiałowych
- Programowalna dynamika
- Temperatura pokojowa
- Bezstratne
- Optyka kwantowa

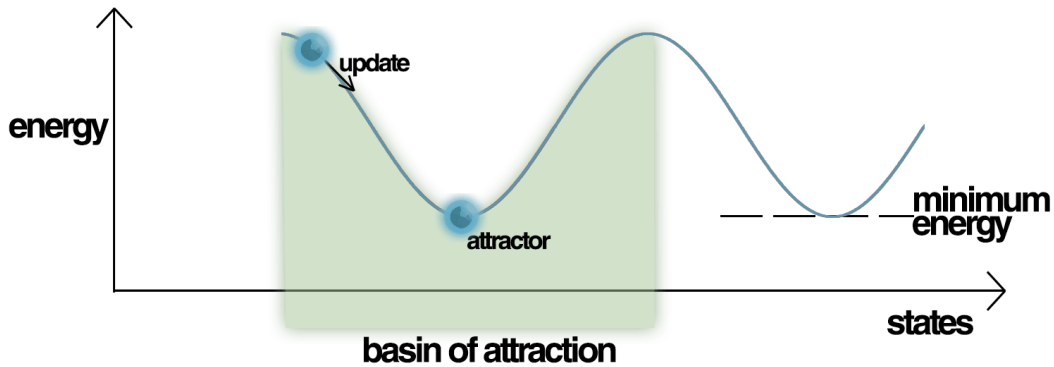
Ograniczenia:

- Szybkie sprzężene zwrotne
- Ograniczenia czasowe pojedynczych fotonów
- Pamięć klasyczna (albo kwantowa)
- Przetwarzanie sekwencyjne

Klasyczna sieć Hopfielda dla neuronów z histerezą

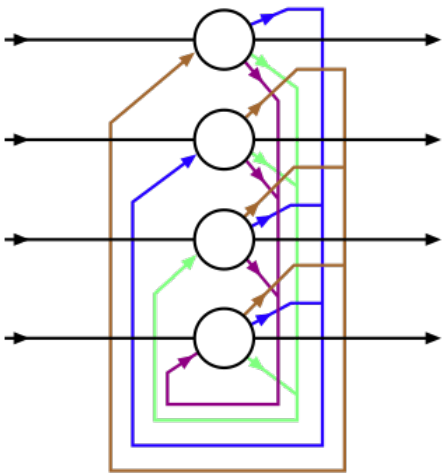


By Zawersh - Own work, CC BY-SA 3.0

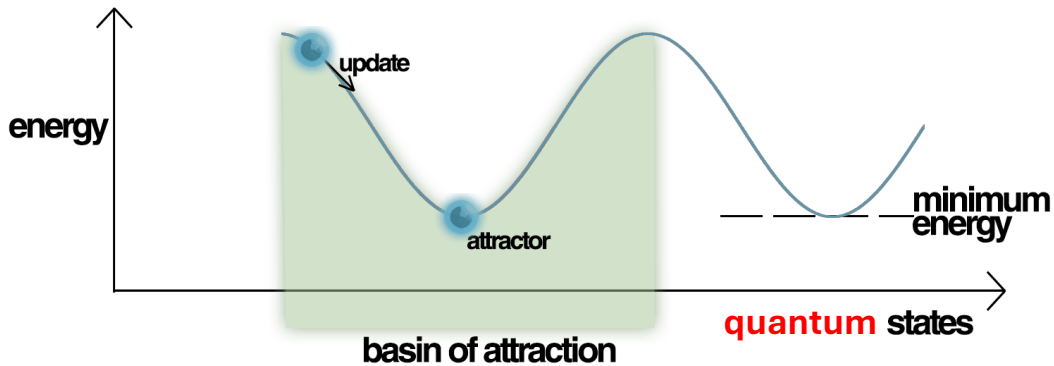


By Mrazvan22 - Own work, CC BY-SA 3.0,

Kwantowa sieć Hopfielda dla neuronów z histerezą



By Zawersh - Own work, CC BY-SA 3.0

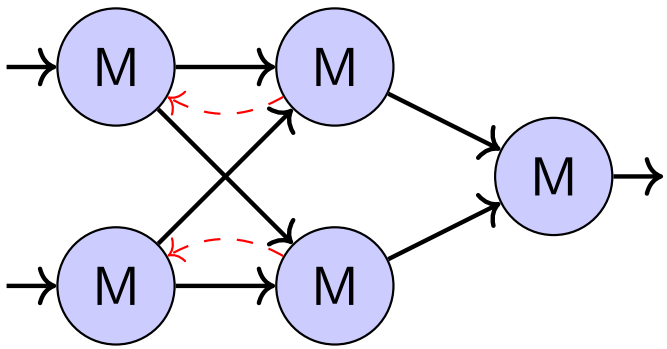


By Mrazvan22 - Own work, CC BY-SA 3.0,

Zastosowania w technologii kwantowej

Zastosowania krótkoterminowe:

- **Adaptacyjne bramki kwantowe**
  - Samokalibrujące się operacje
  - Łagodzenie błędów przez uczenie
- **Kwantowe obliczenia rezerwuarowe**
  - Kwantowe dane czasowe
  - Szeregi czasowe
- **Detekcja wspomagana pamięcią**
  - Adaptacyjne strategie pomiarowe
  - Czułość wzmocniona sprzężeniem zwrotnym



Sieć kwantowa

Wizja długoterminowa:

- Neuromorficzne obliczenia kwantowe
- Uczące się systemy kwantowe
- Architektury inspirowane mózgiem

W pełni kwantowa pamięć

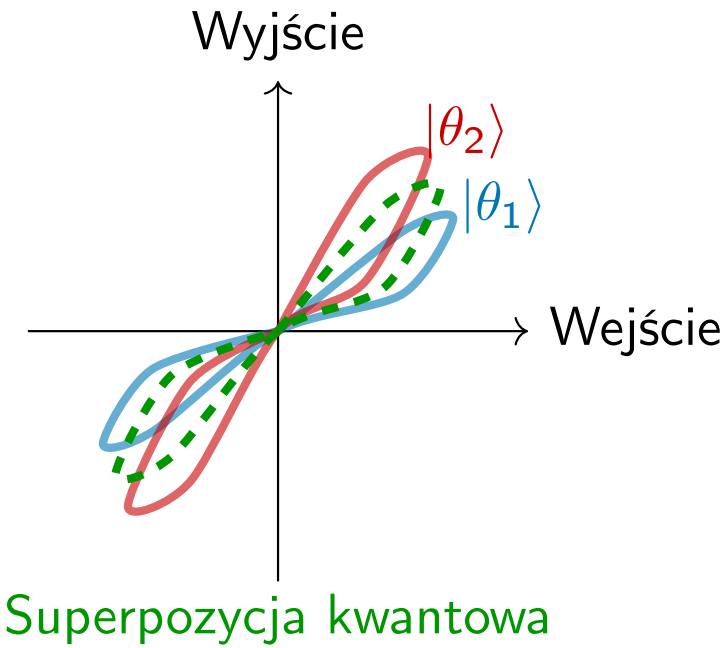
Obecne podejście: Klasyczne θ

- Prosta implementacja
- Odporność na dekoherencję
- Udowodniona wykonalność

Przyszłość: Kwantowe $|\theta\rangle$

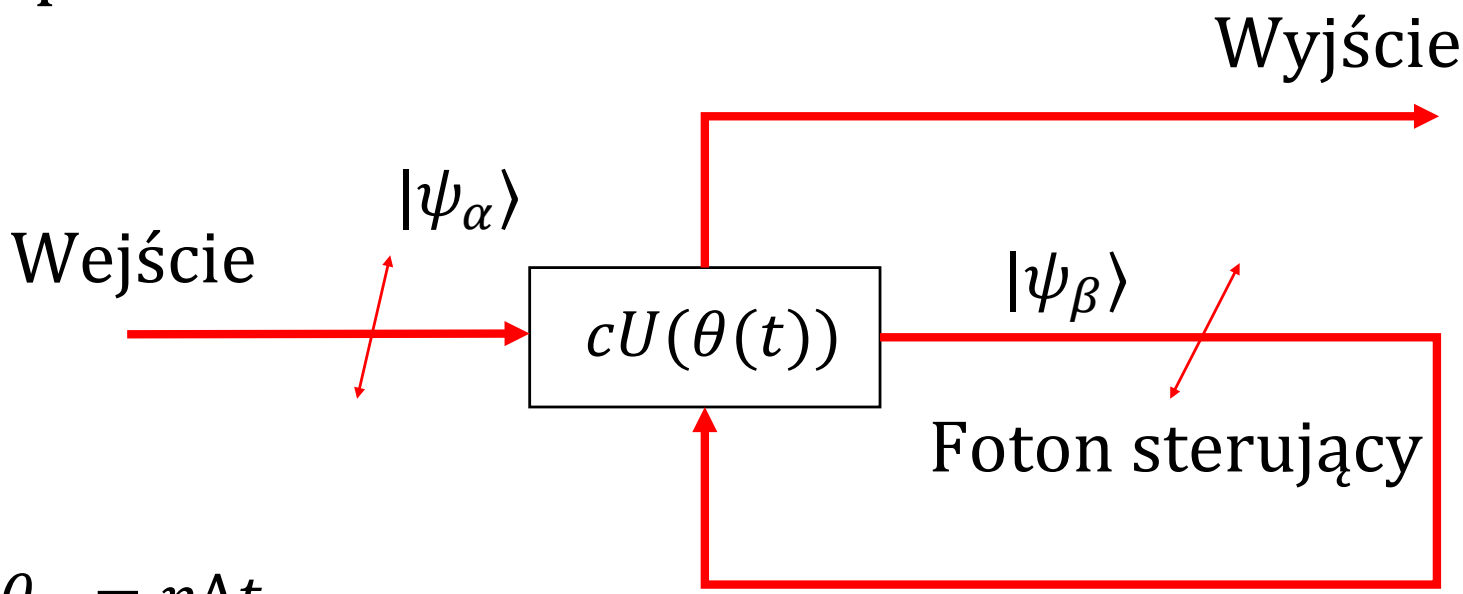
$$|\Theta\rangle = \alpha|\theta_1\rangle + \beta|\theta_2\rangle$$

- Superpozycja pamięci!
- Równoległość kwantowa
- Splątana pamięć-sygnał
- Wykładnicza przestrzeń stanów



Schemat implementacji – bez pomiaru

Odpowiedź liniowa



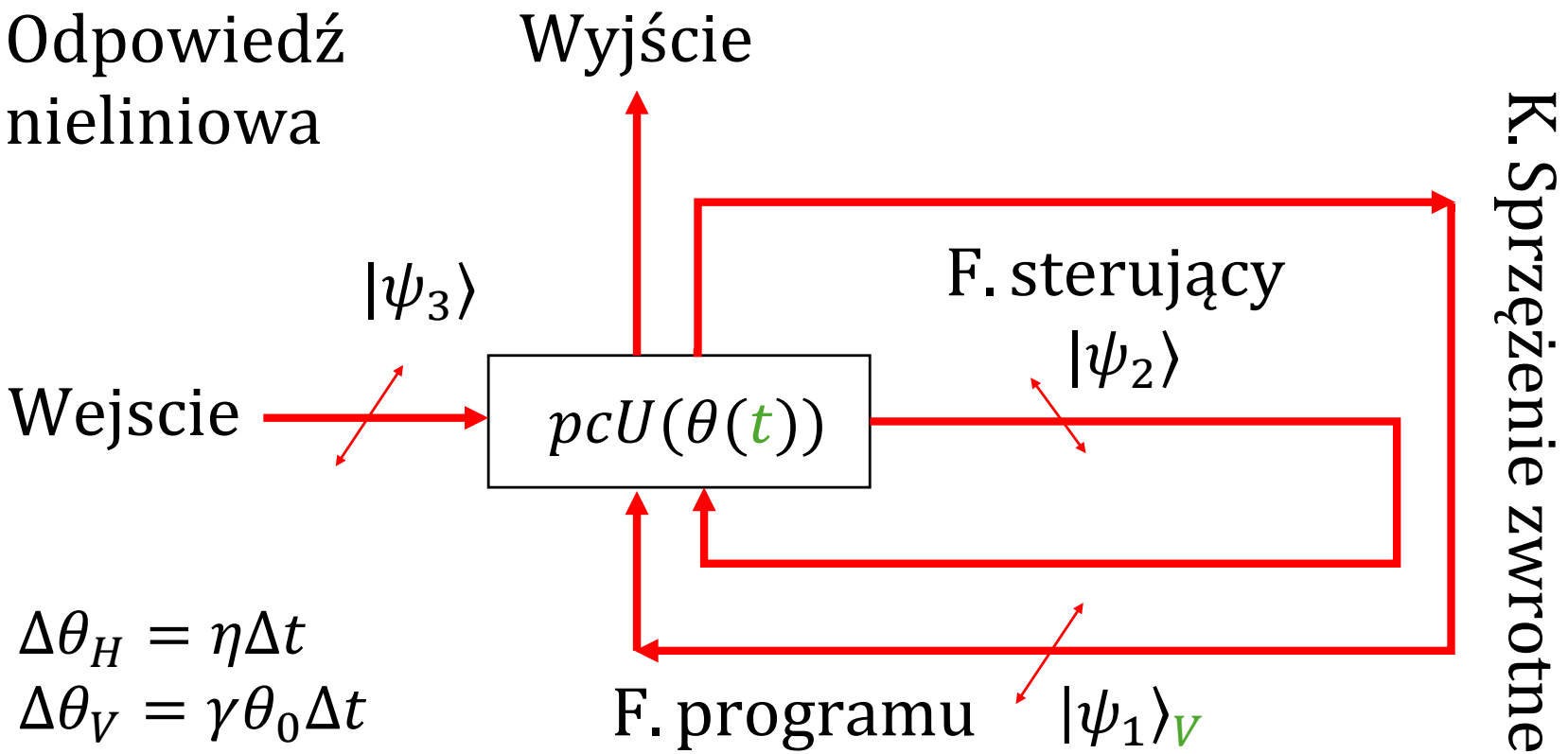
$\Delta\theta_H = \eta\Delta t$
$\Delta\theta_V = \gamma\theta_0\Delta t$

Kwantowe sprzężenie zwrotne

$\theta(1) = \Delta\theta_H$ lub $\Delta\theta_V$

K. Lemr, K. Bartkiewicz, A. Černoch, M.Dušek, J. Soubusta, *Phys. Rev. Lett.*, **114**, 153602, (2015)

Schemat implementacji – bez pomiaru

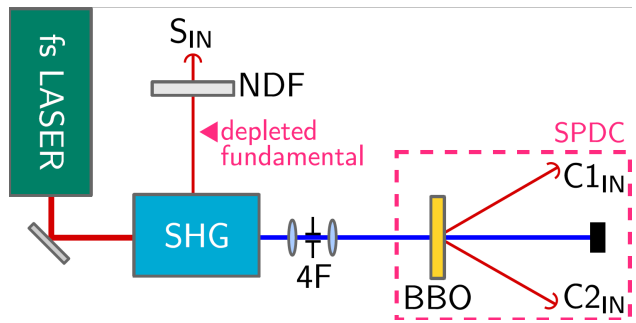


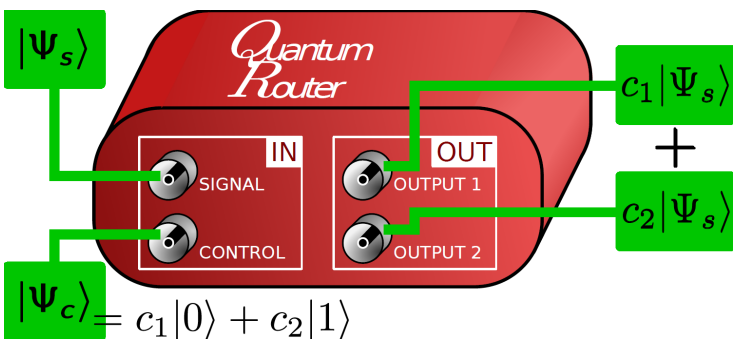
$\theta(0) = \Delta\theta_H$ lub $\Delta\theta_V$

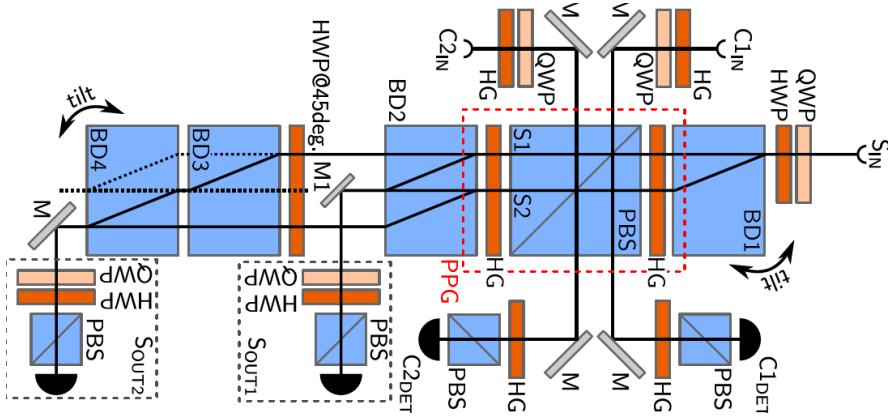
$\theta(\Delta t) \to \theta(0) - \gamma\Delta t\theta(0)$

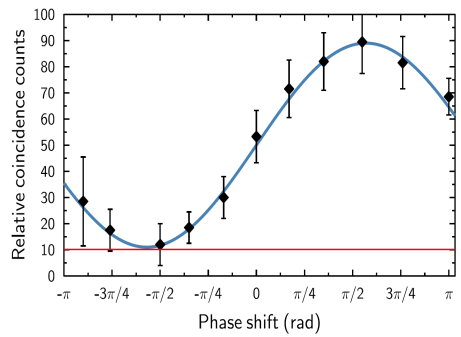
Związek z routerami kwantowymi

Router kwantowy









K. Bartkiewicz, A. Černoch, K. Lemr, *Implementation of an efficient linear-optical quantum router, Sci. Rep.*, **8**, 13480, (2018).

Podsumowanie i perspektywy

Kluczowe osiągnięcia

- Teoretyczna propozycja fotonicznego memrystora kwantowego
- Wszystkie cechy memrystora przy zachowaniu koherencji kwantowej
- Programowalna dynamika pamięci

Następne kroki:

- Realizacja eksperymentalna
- Rozszerzenie wielofotonowe
- Demonstracje sieciowe

Wpływ:

- Kwantowe systemy uczące się
- Neuromorficzna technologia kwantowa
- Fundamentalny wgląd w pamięć kwantową

Układy kwantowe MOGĄ mieć pamięć!

Bibliografia

- L. Chua, "Memristor–The missing circuit element," IEEE Trans. Circuit Theory **18**, 507 (1971).
- S. Di Micco i in., "Quantum memristor with vacuum–one-photon qubits," arXiv:2503.02466 [quant-ph]
- J. Salmilehto i in., "Quantum memristors with superconducting circuits," Sci. Rep. **7**, 42044 (2017).
- M. Spagnolo i in., "Experimental photonic quantum memristor," Nature Physics **18**, 1056 (2022).
- P. Pfeiffer i in., "Quantum memristors," Sci. Rep. **6**, 29507 (2016).
- K. Lemr i in., "Experimental implementation of optimal linear-optical controlled-unitary gates," Phys. Rev. Lett. **114**, 153602 (2015).
- K. Bartkiewicz i in., "Implementation of an efficient linear-optical quantum router," Sci. Rep., **8**, 13480, (2018).

Dziękuję za uwagę!

Kontakt: bark@amu.edu.pl

Szczegóły matematyczne

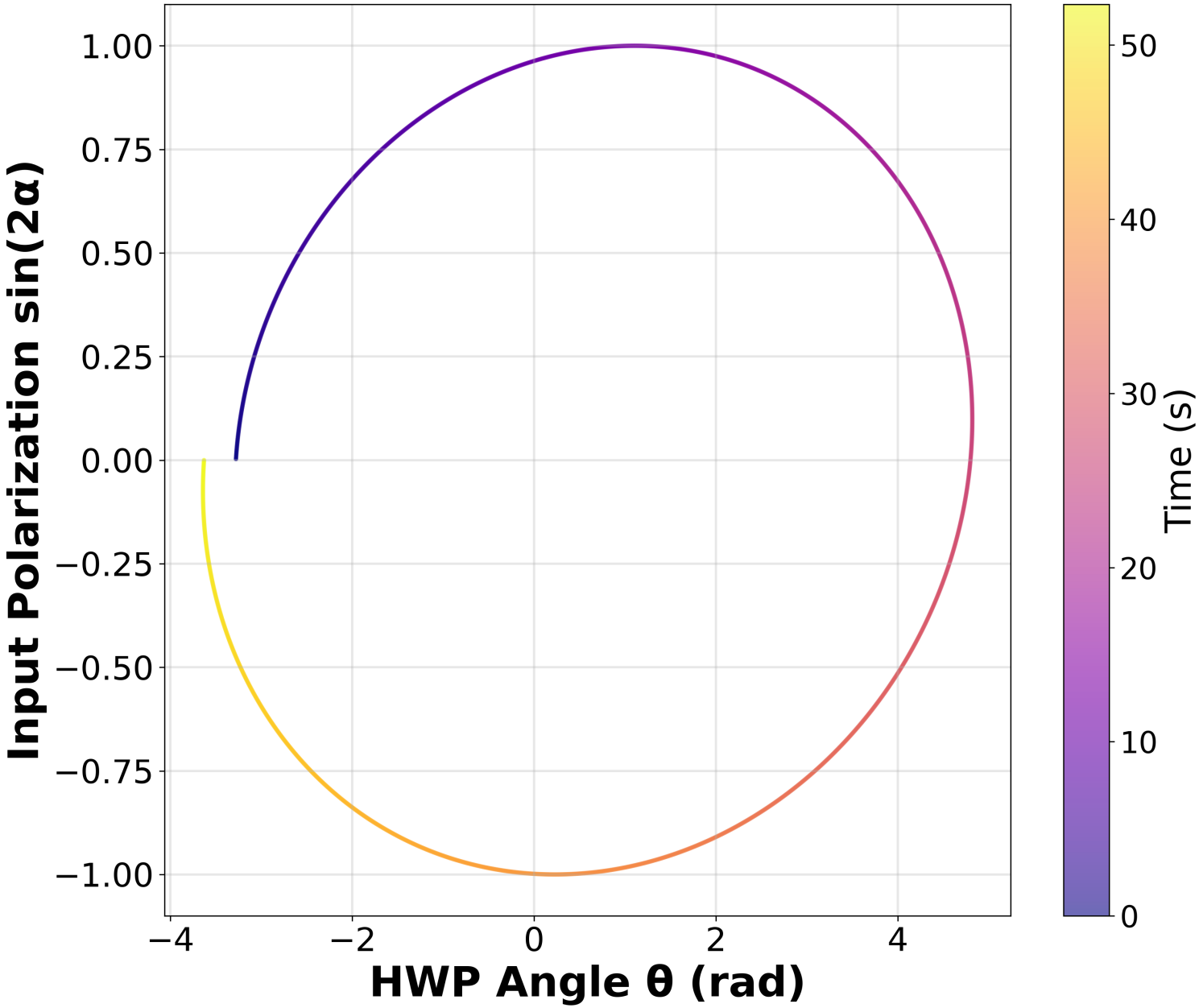
Rozwiązanie dynamiki pamięci:

$$\theta(t) = \theta_0 + (\theta(0) - \theta_0)e^{-\gamma t} + \eta \int_0^t e^{-\gamma(t-t')} N(t')dt'$$

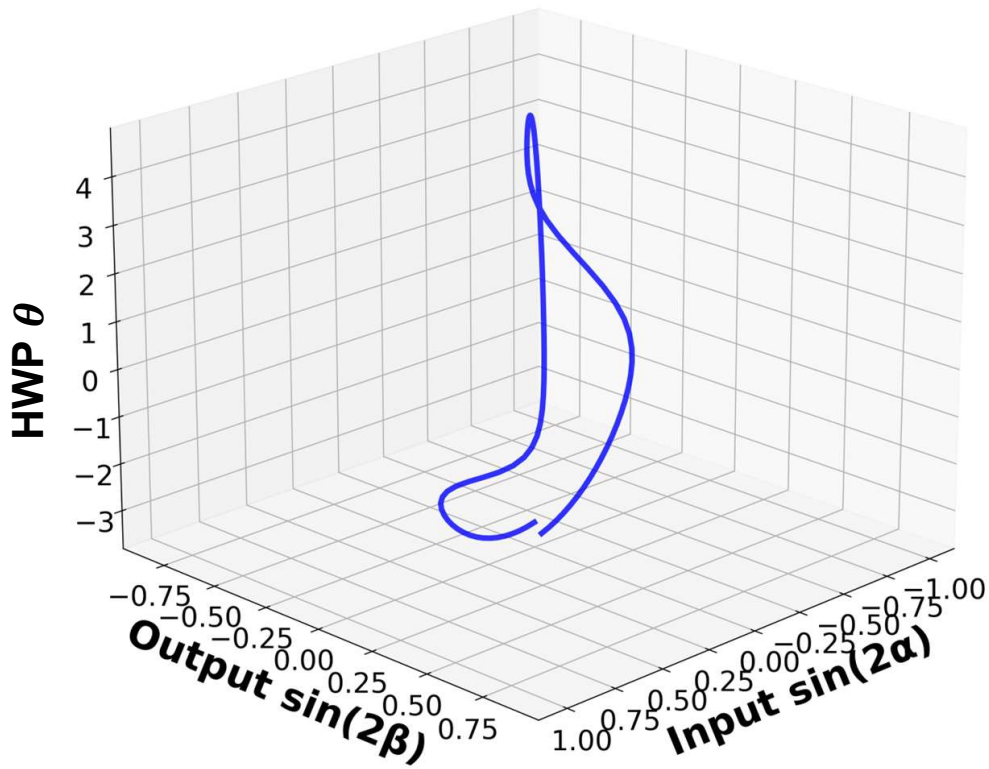
Dla okresowego wejścia $N(t) = N_0(1 + \sin(\omega t))$**:**

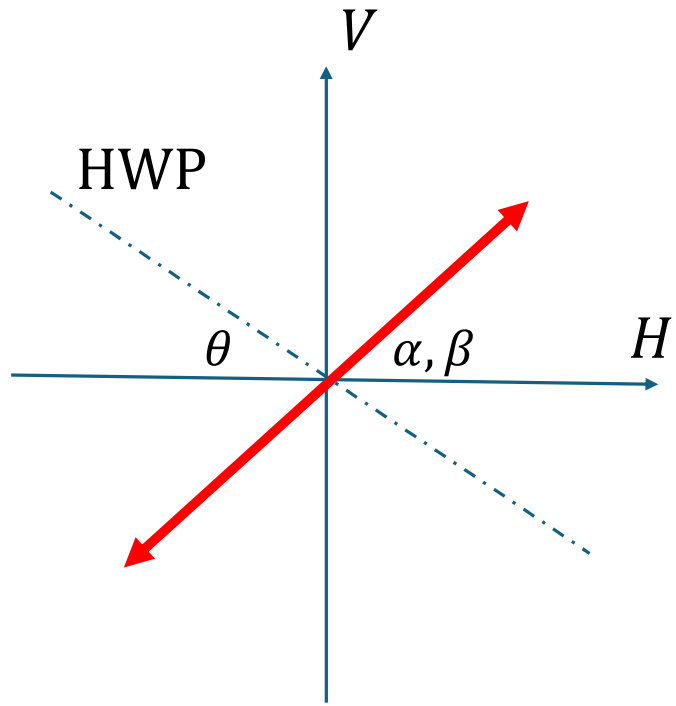
- Stan stacjonarny: $\theta(t) = \theta_{DC} + \theta_{AC} \sin(\omega t - \phi)$
- Składowa DC: $\theta_{DC} = \theta_0 + \frac{\eta N_0}{\gamma}$
- Amplituda AC: $\theta_{AC} = \frac{\eta N_0}{\sqrt{\gamma^2+\omega^2}}$
- Opóźnienie fazowe: $\phi = \text{arc tg}(\omega/\gamma)$

Ewolucja w przestrzeni fazowej



Trajektoria 3D





Wykonalność eksperymentalna

Analiza czasowa:

- Detekcja fotonu: 50 ns
- Przetwarzanie FPGA: 100 ns
- Aktuacja piezo: 500 ns
- Razem: 650 ns
- Czas bufora: 350 ns
- Czas koherencji: $> 5\mu s$

Prawdopodobieństwo sukcesu:

- Wydajność detekcji: 95%
- Wierność HWP: 99%
- Niezawodność sprzężenia zwrotnego: 98%
- Całkowita: $> 90\%$

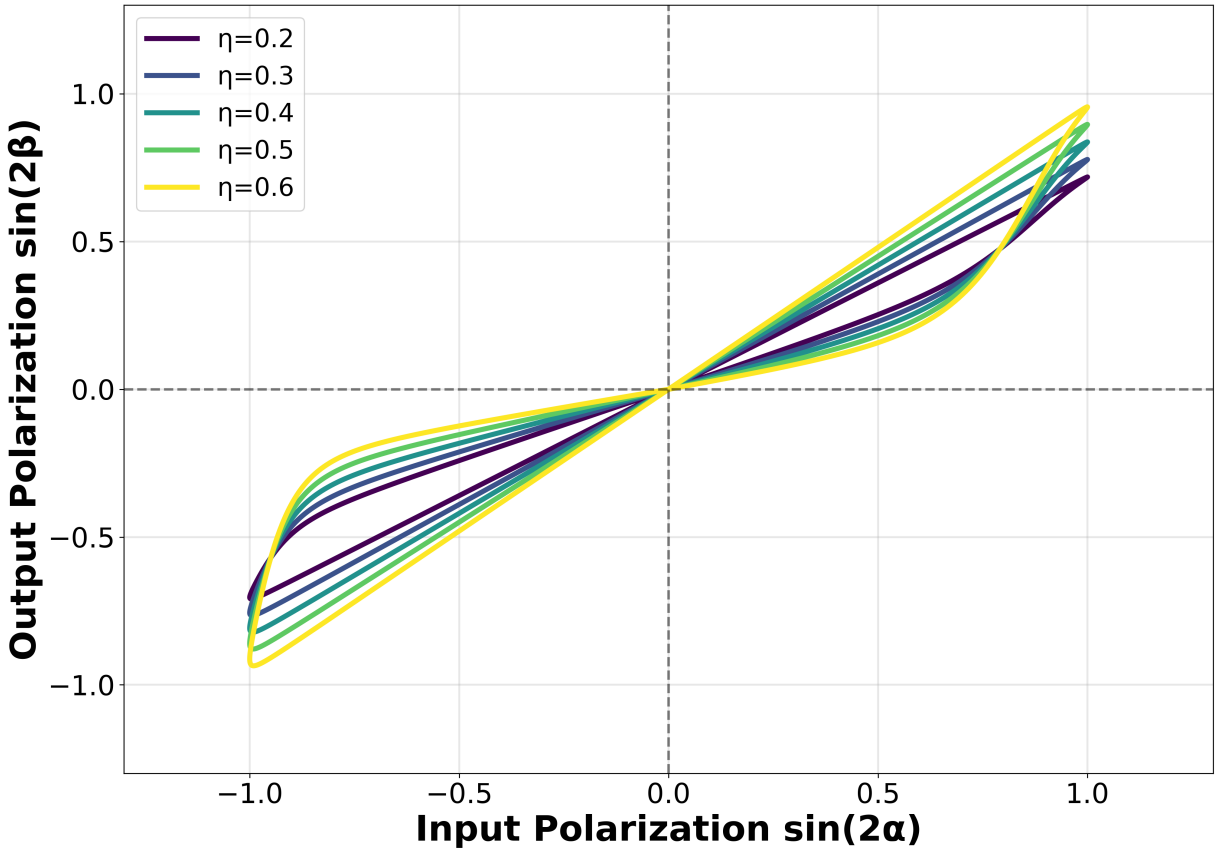
Wymagane komponenty:

- **Źródło:** SPDC lub kropki kwantowe
- **Detektory:** SNSPDs (komercyjne)
- **HWP:** Zmotoryzowana lub ciekłokrystaliczna
- **FPGA:** Wystarczający zegar 100 MHz

Wykonalność

Wszystkie komponenty są dostępne komercyjnie - brak fundamentalnych barier dla implementacji!

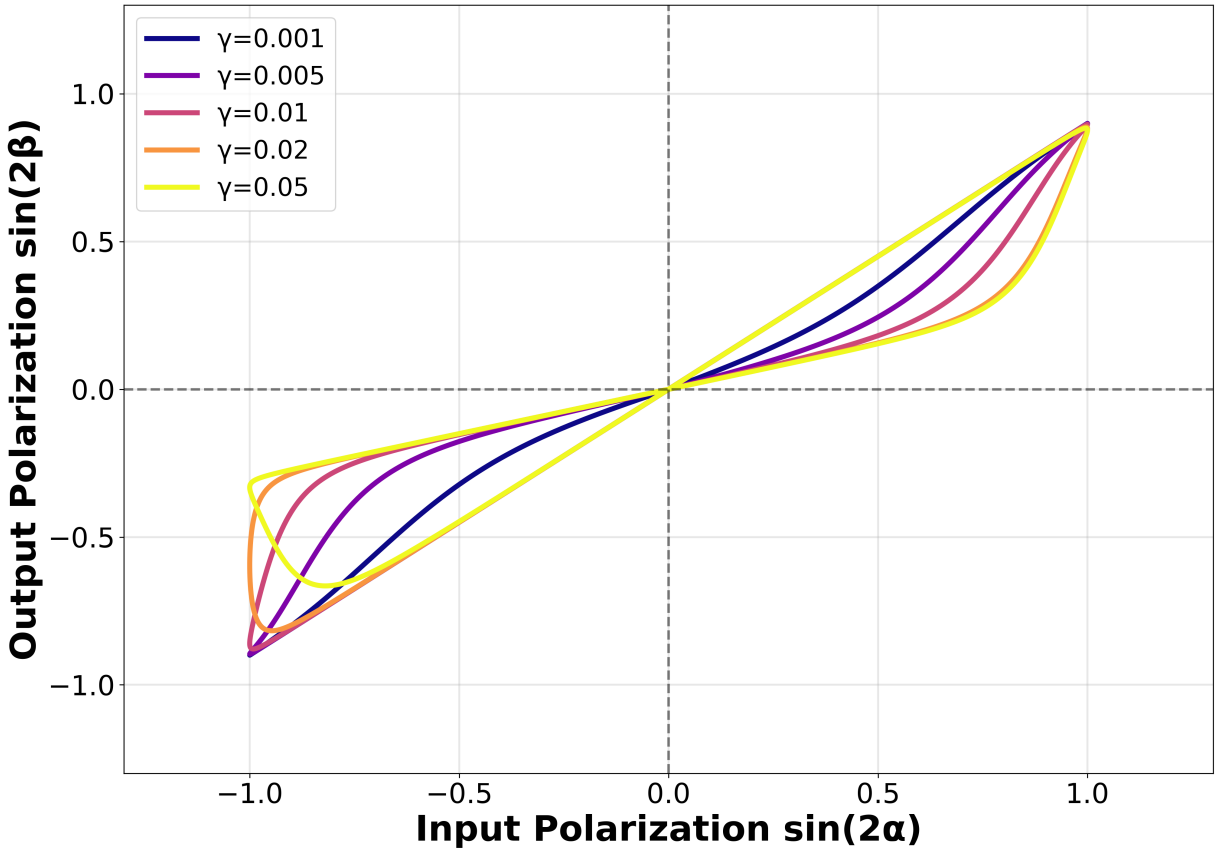
Wpływ parametrów



Optymalizacja parametrów:

- **Większe $\eta \rightarrow$ Szersze pętle (silniejsza pamięć)**
- Mniejsze $\gamma \rightarrow$ Bardziej trwała pamięć
- Kompromis między siłą pamięci a czasem odpowiedzi

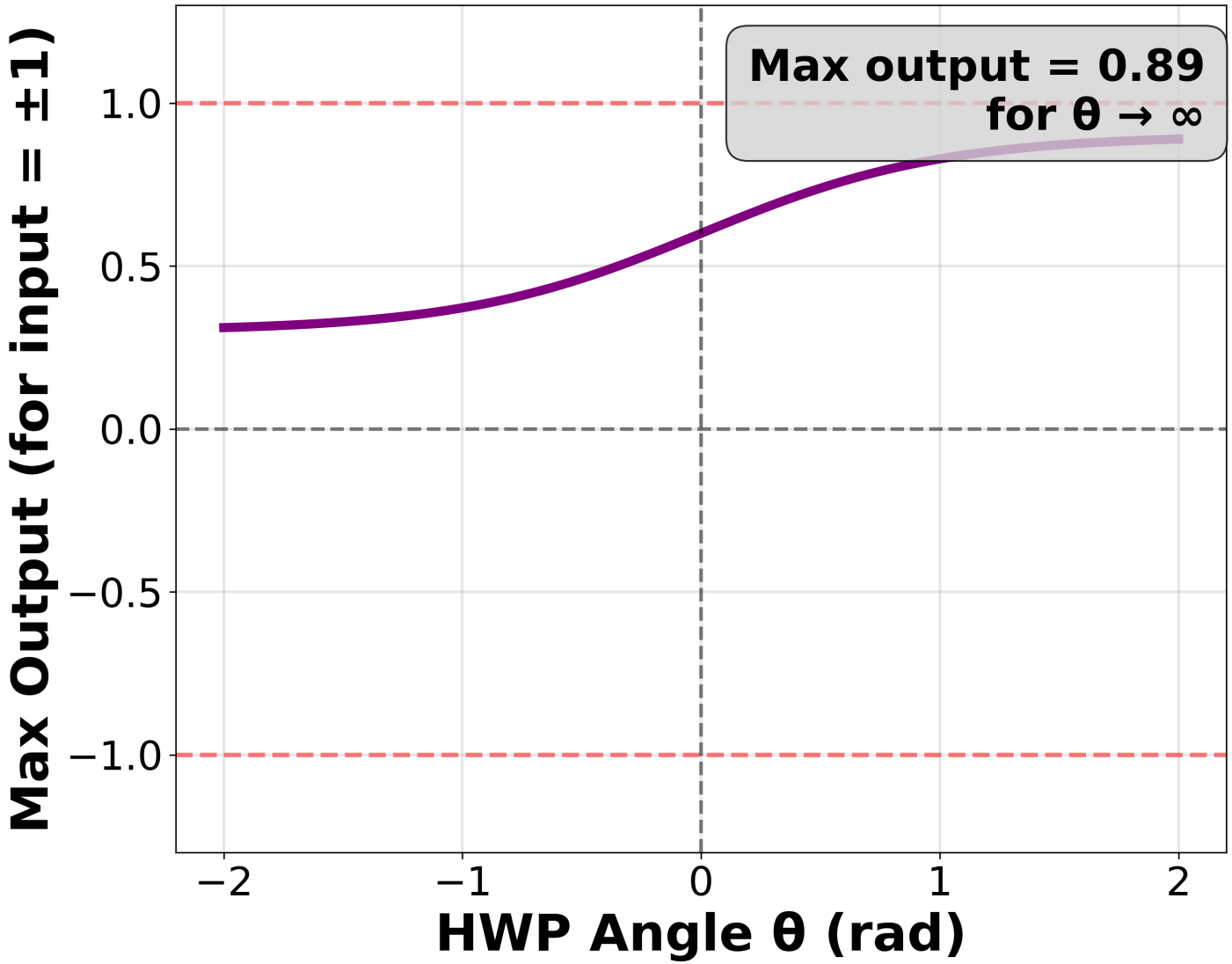
Wpływ parametrów



Optymalizacja parametrów:

- Większe $\eta \rightarrow$ Szersze pętle (silniejsza pamięć)
- **Mniejsze $\gamma \rightarrow$ Bardziej trwała pamięć**
- Kompromis między siłą pamięci a czasem odpowiedzi

Funkcja odpowiedzi



θ_0 vs $\theta(0)$ - Ważne rozróżnienie

θ_0 (Kąt równowagowy):

- Parametr projektowy do wyboru
- Wartość, do której relaksuje θ
- Ustawia 0 dla ściśniętej histerezy
- Określa środek pętli

$\theta(0)$ (Warunek początkowy):

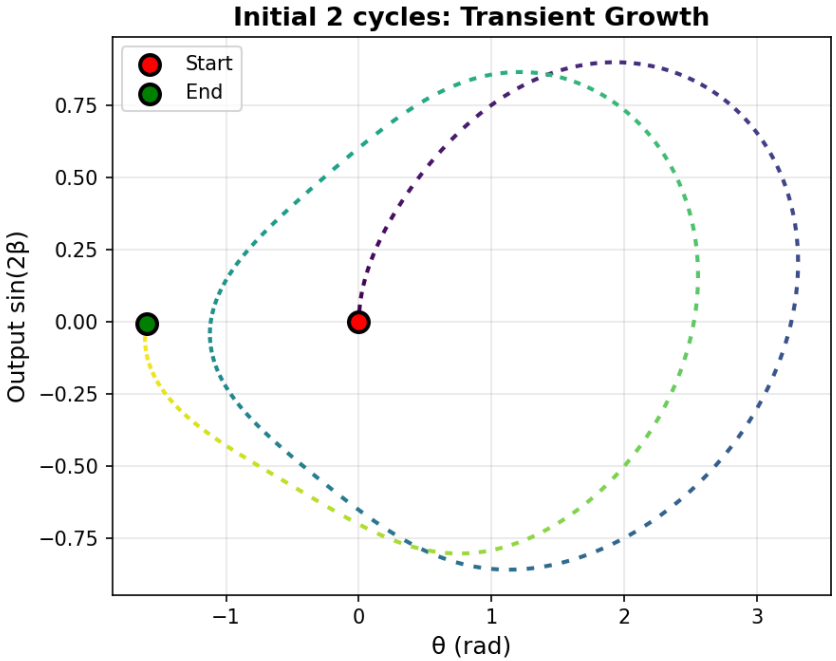
- Wartość startowa eksperymentu
- Może być dowolną wartością
- Zachowanie przejściowe
- Zanika wykładniczo

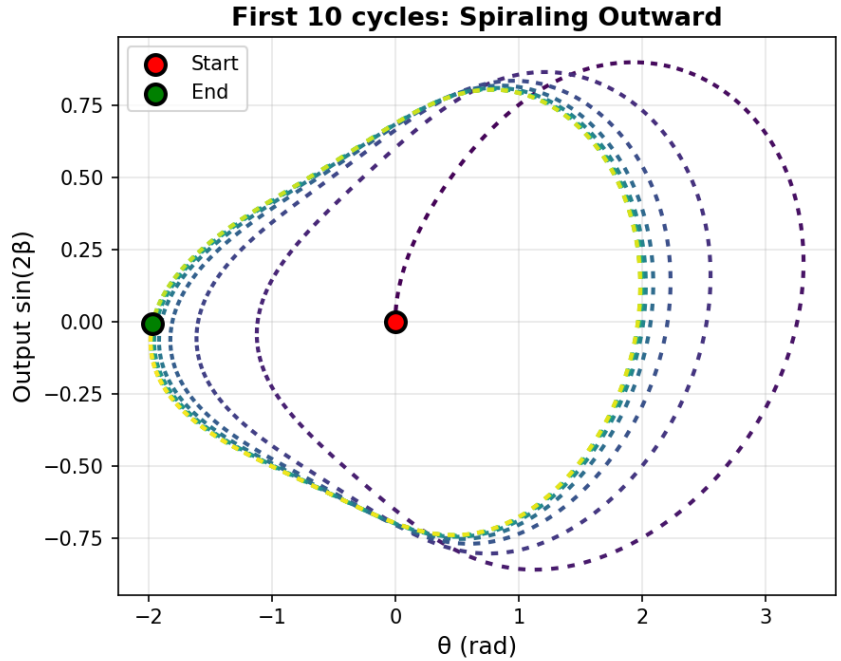
W rozwiązaniu:

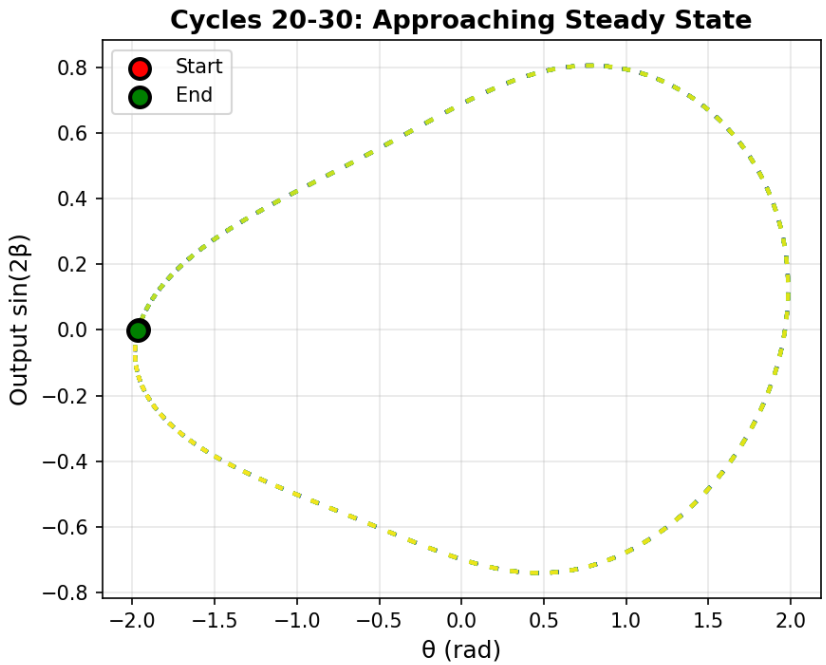
$$\theta(t) = \underbrace{\theta_0}_{\text{równowaga}} + \underbrace{(\theta(0) - \theta_0)e^{-\gamma t}}_{\text{człon przejściowy}} + \underbrace{\eta \int_0^t e^{-\gamma(t-t')} N(t')dt'}_{\text{historia detekcji}}$$

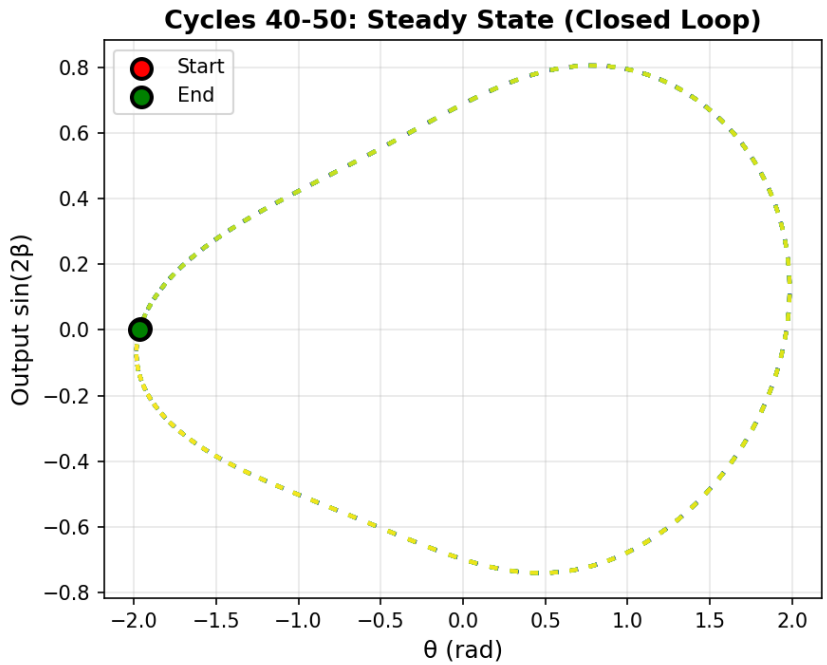
- Gdy $t \to \infty$: człon przejściowy $\to 0$, więc $\theta \to \theta_0$ + efekty detekcji
- Jeśli $\theta(0) = \theta_0$: brak stanu przejściowego, start z równowagi
- $\theta_0 = 0$: zapewnia ściśniętą histerezę w punkcie początkowym

Dynamika


Initial 2 cycles: Transient Growth
Start
End
Output sin(2β)
θ (rad)


First 10 cycles: Spiraling Outward
Start
End
Output sin(2β)
θ (rad)


Cycles 20-30: Approaching Steady State
Start
End
Output sin(2β)
θ (rad)


Cycles 40-50: Steady State (Closed Loop)
Start
End
Output sin(2β)
θ (rad)