

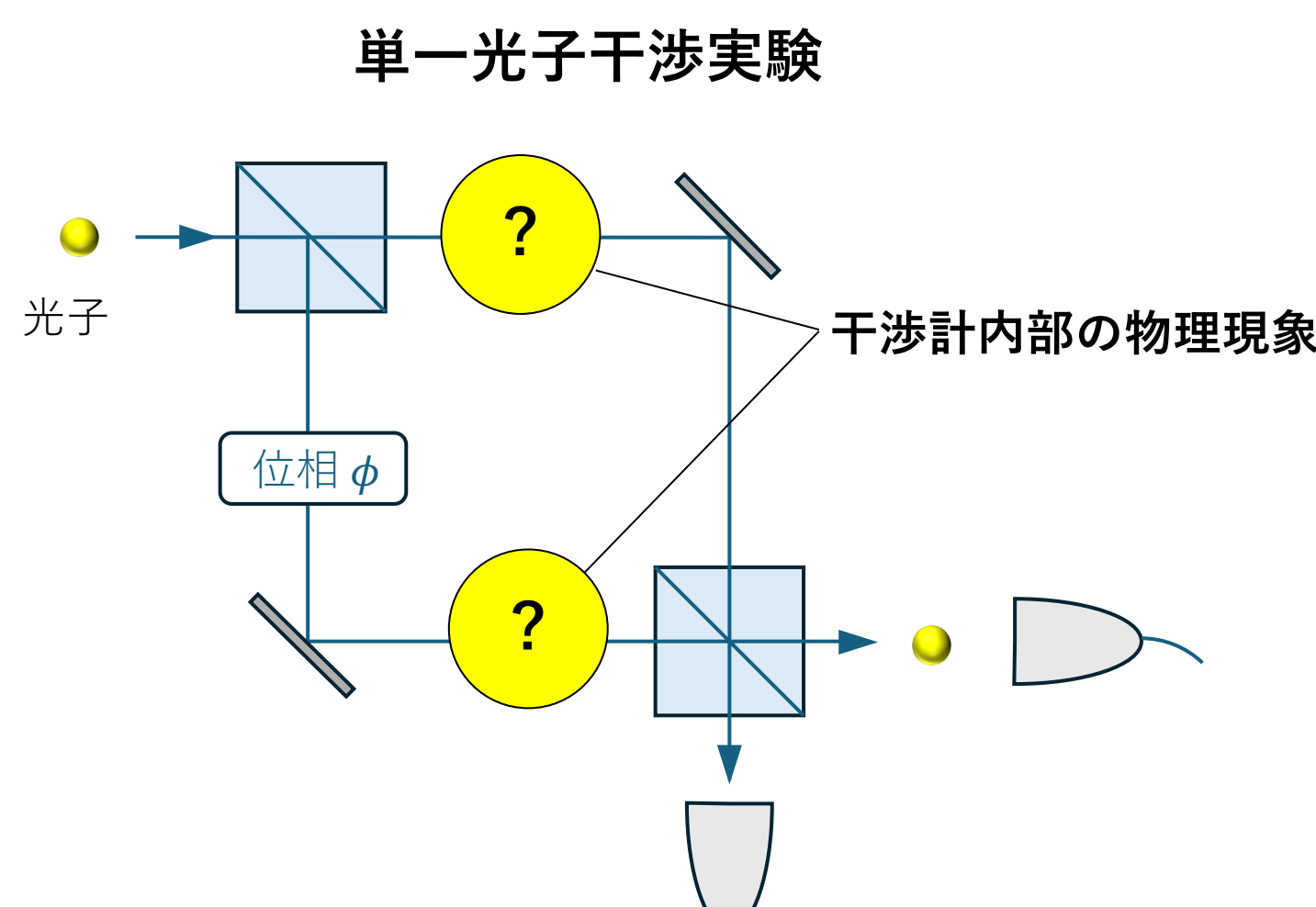
光干渉計内部での単一光子の非局在、局在、超局在の観測



広島大学大学院先進理工系科学研究科

福田 竜也、飯沼 昌隆、松本 侑斗、ホフマン ホルガ

モチベーション



背景 & 目的

先行研究

ホフマンによるフィードバック補償法[1]
固有状態以外の測定で物理量 $\hat{A}$ の
測定値と測定誤差が実験的に評価可能

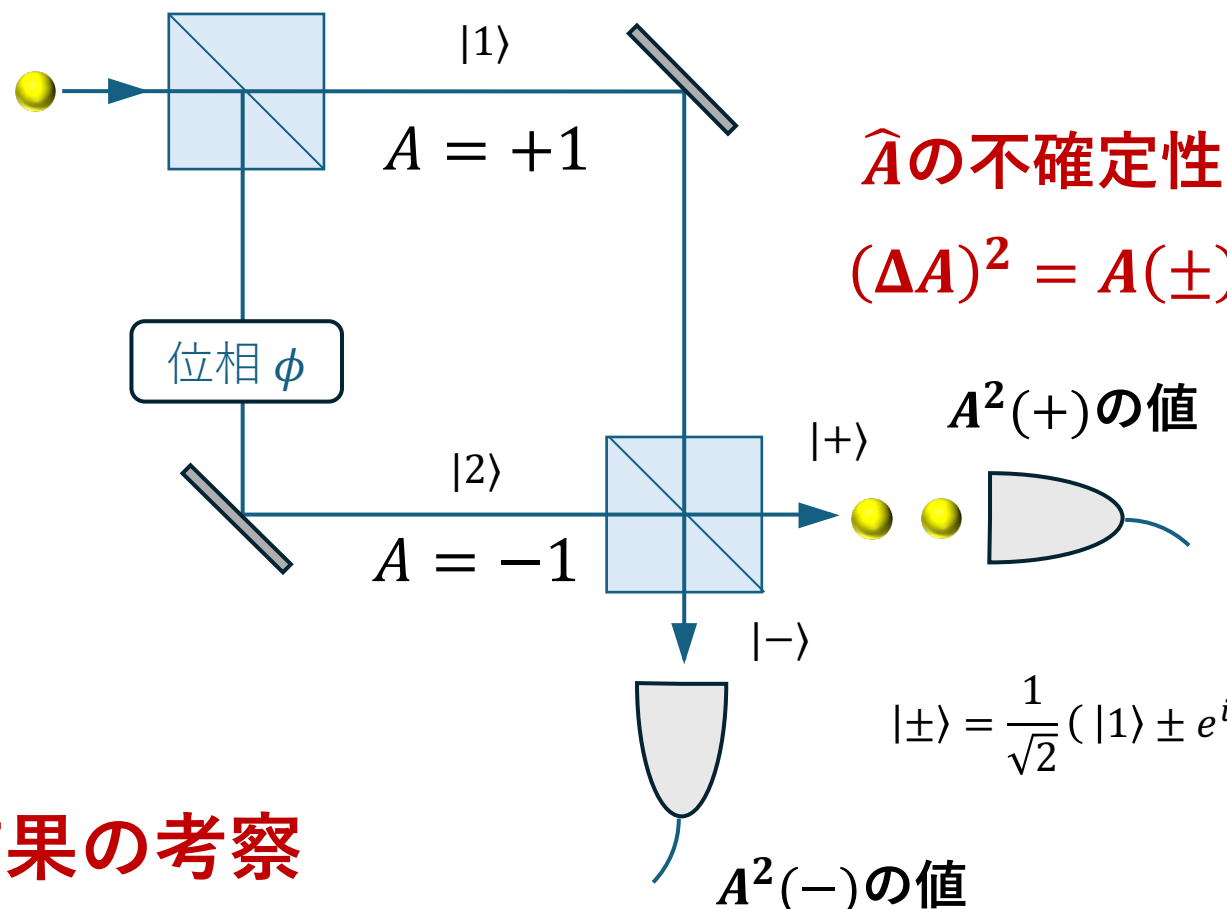
中性子干渉実験[2]
経路の分岐比が4:1の状況下で
測定値 $A(\pm)$ と測定誤差を評価

二重スリット実験の理論的解析[3]
 $A^2(\pm)$ の値が測定可能

研究の目的： $A^2(\pm)$ の値の測定とその結果の考察

今回の研究

$$|\psi_{in}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle + |2\rangle)$$



弱値との関係

$$(\Delta A)^2 = \langle \hat{A}^2 \rangle \quad (\langle \hat{A} \rangle = 0)$$
$$= A(+)^2 P(+) + A(-)^2 P(-) \quad P(\pm): \text{測定確率}$$

出力+で検出したとき ($P(+) = 1, P(-) = 0$)

$$A(+)^2 = \left| \frac{\langle + | \hat{A} | \psi_{in} \rangle}{\langle + | \psi_{in} \rangle} \right|^2 \quad (= \epsilon_A^2: \text{小澤の測定誤差})$$

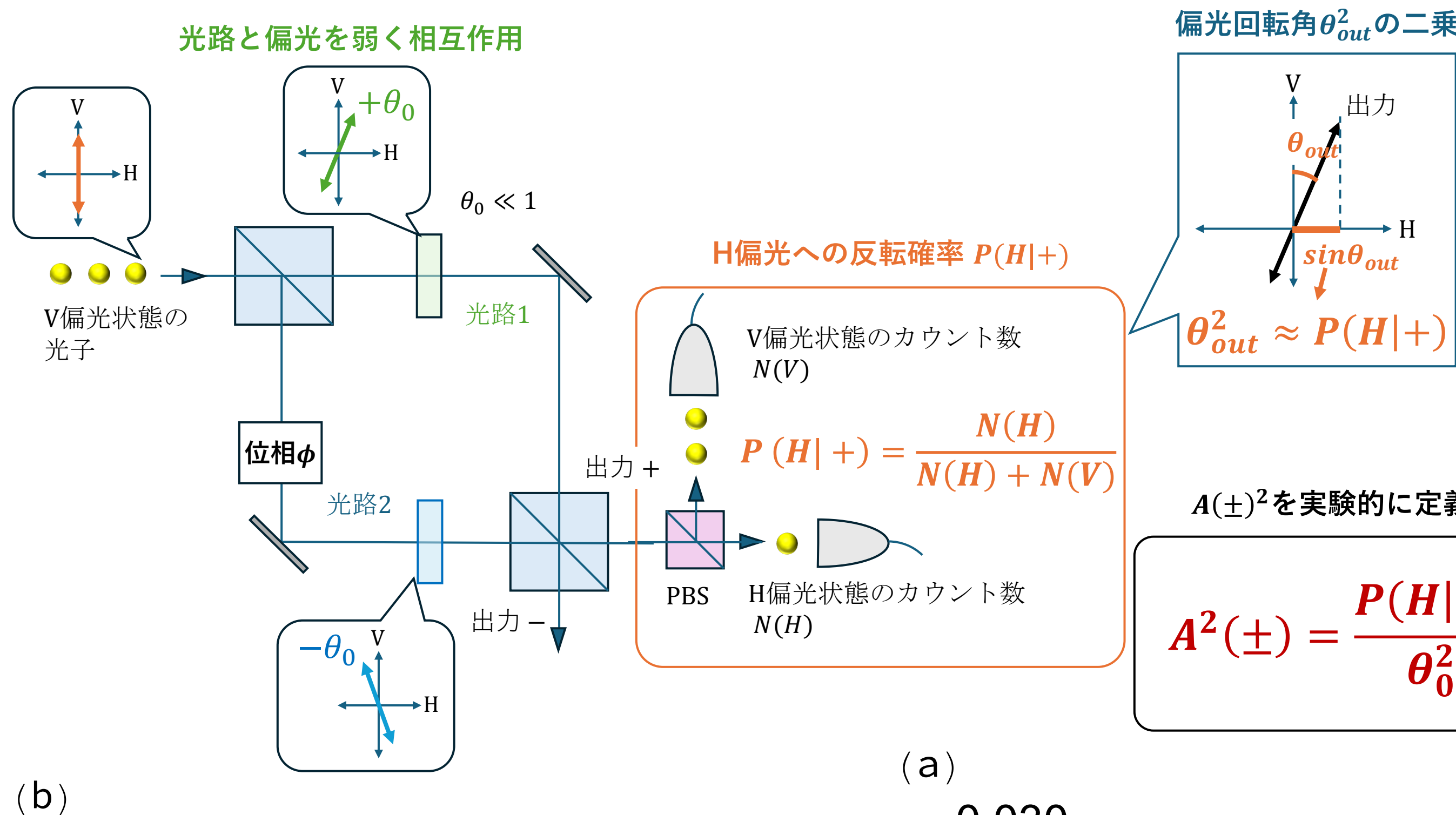
出力-で検出したとき ($P(+) = 0, P(-) = 1$)

$$A(-)^2 = \left| \frac{\langle - | \hat{A} | \psi_{in} \rangle}{\langle - | \psi_{in} \rangle} \right|^2$$

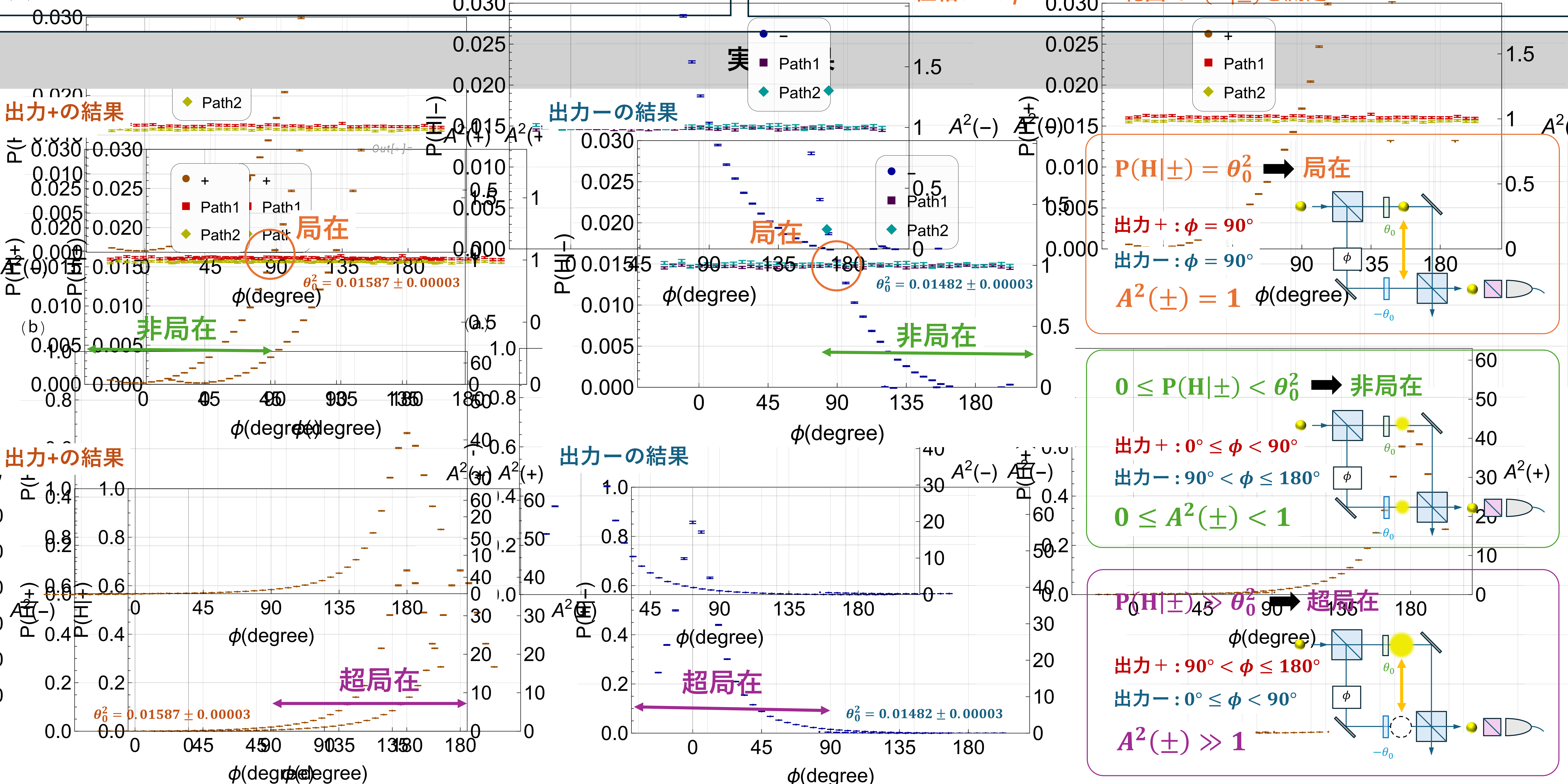
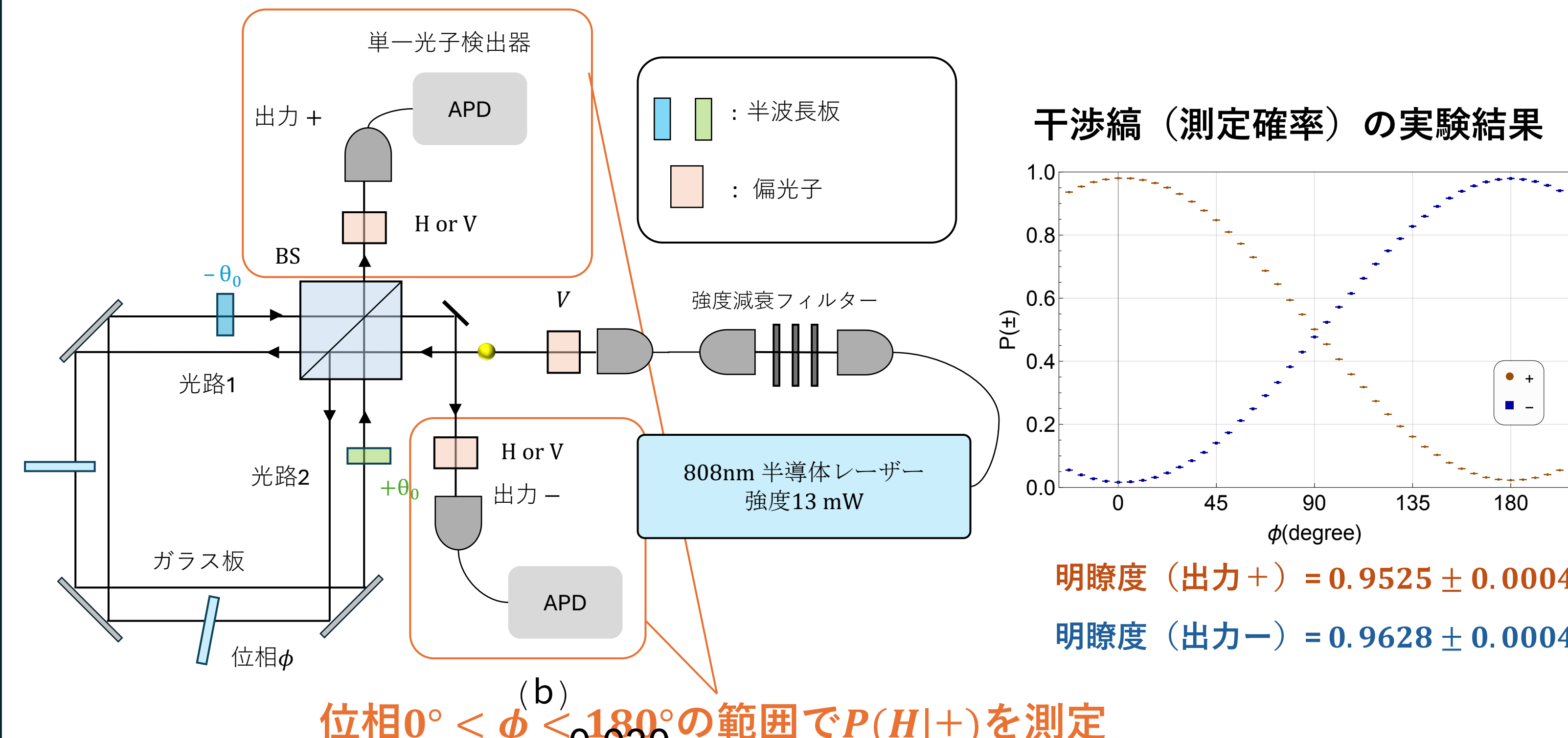
※値 $A(\pm)^2$ は測定値の二乗ではない

測定値を $M_f = \text{Re} \left[\frac{\langle f | \hat{A} | \psi \rangle}{\langle f | \psi \rangle} \right]$ とした時、 $A(\pm)^2 \neq (M_f)^2$

$A^2(\pm)$ の値の測定方法

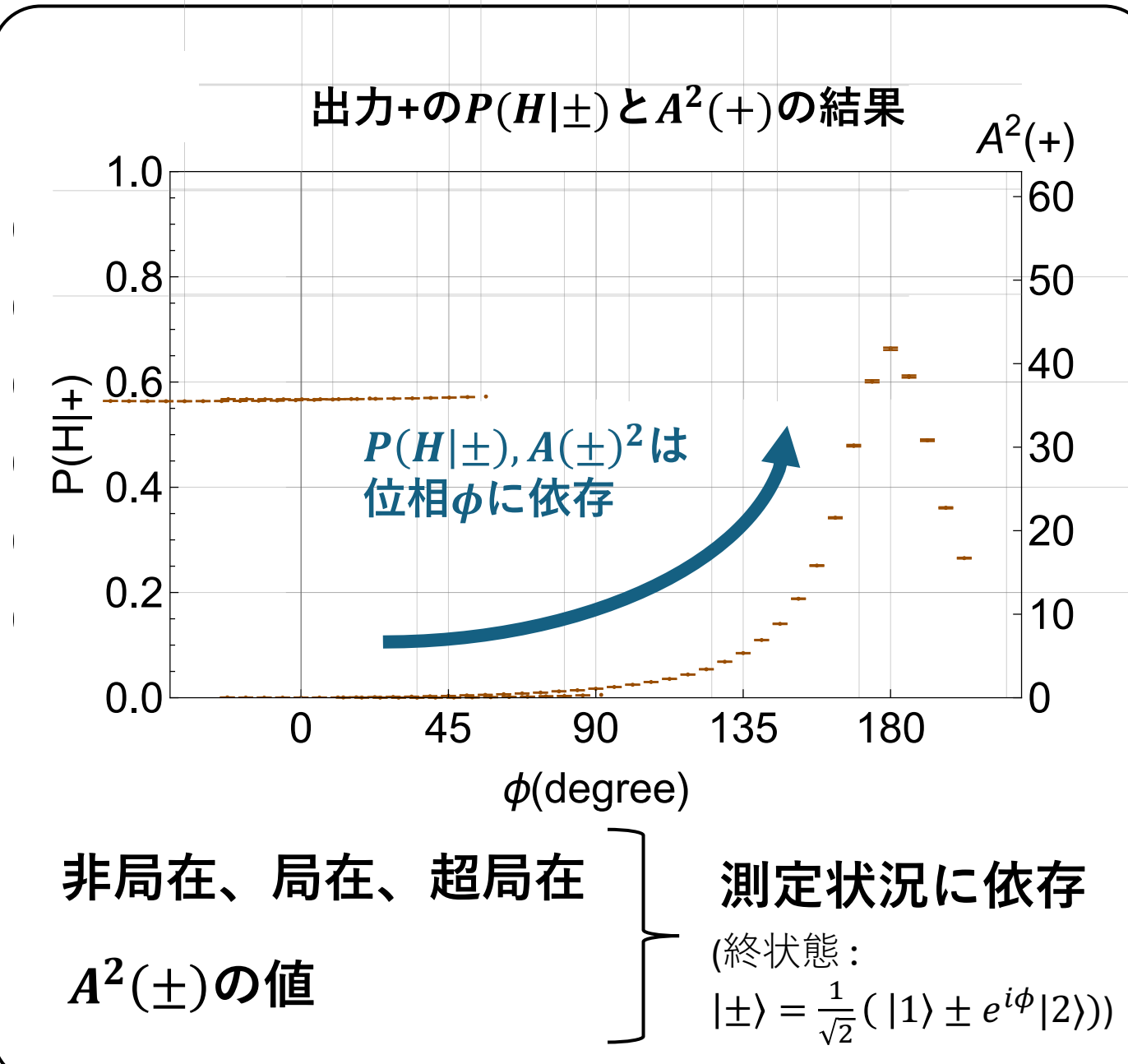


実験セットアップ

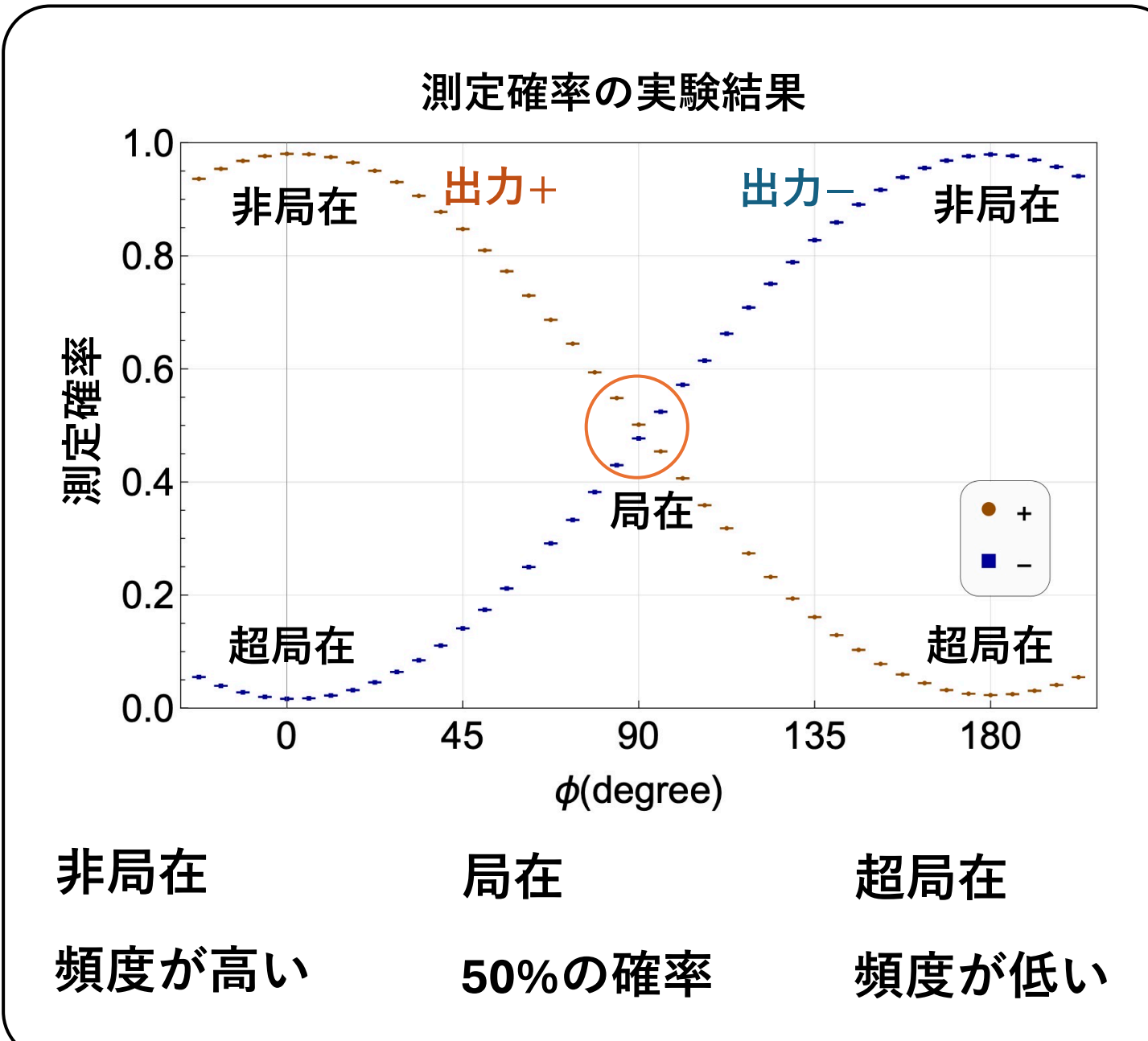


議論

測定状況依存性



測定確率との関係



結論

偏光と光路の弱い相互作用を介して、 $P(H|\pm)$ を測定し、 $A^2(\pm)$ の値を評価した。
その結果、局在、非局在、超局在が観測され、対応する $A^2(\pm)$ の値は
 $A^2(\pm) = 1, 0 \leq A^2(\pm) < 1, A^2(\pm) > 1$ であることが分かった。

位相 ϕ 依存性から、局在、非局在、超局在、および $A^2(\pm)$ の値が
測定状況に依存して決まることが分かった。
また、局在、非局在、超局在の光子と測定確率には相関があることも分かった。

参考文献

- [1] H. F. Hofmann "Direct evaluation of measurement uncertainties by feedback compensation of decoherence" Phys. Rev. Res. 3, L012011 (2021).
- [2] H. F. Hofmann, et al. "A possible solution to the which-way problem of quantum interference" Quantum Stud.: Math. Found. 10, 429-437, (2023).
- [3] H. Lemmel, N. Geerits, A. Danner, H.F. Hofmann, and S. Spöner, et al., "Quantifying the presence of a neutron in the paths of an interferometer" Phys. Rev. Res. 4, 023075 (2022).
- [4] Ryuya Fukuda, Masataka Iinuma, Yuto Matsumoto, Holger F. Hofmann, "Experimental evidence for the physical delocalization of individual photons in the interferometer", arXiv, 2505.00336v1, 2025