研究室輪講

Quantum interference along satellite-ground channels

Masaki Ando (Univ. of Tokyo)

論文紹介

‘Quantum interference along satellite-ground channels’
Giuseppe Vallone et al.,
http://arxiv.org/abs/1509.07855’

Quantum interference along satellite-ground channels

Giuseppe Vallone,[1] Daniele Dequal,[1] Marco Tomasin,[1] Francesco Vedovato,[1]
Matteo Schiavon,[1] Vincenza Luceri,[2] Giuseppe Bianco,[3] and Paolo Villoresi[1,*]

[1] *Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Padova, Padova, Italy*
[2] *e-GEOS spa, Matera, Italy*
[3] *Matera Laser Ranging Observatory, Agenzia Spaziale Italiana, Matera, Italy*

(Dated: September 28, 2015)

Observing quantum interference by moving terminals in Space is a great challenge as well as a necessary tool for testing Quantum Mechanics in an unexplored scenario. Here we experimentally demonstrate single photon interference due to a superposition of two temporal modes reflected by a rapidly moving satellite thousand kilometers away from the ground station. The relative speed of the satellite induces a varying modulation in the interference pattern. The measurement of the satellite distance in real time by laser ranging allowed us to precisely predict the instantaneous value of the interference phase. We observed the interference patterns with visibility up to 67% with three different satellites. Our results pave the way for Quantum Communications and tests of Quantum Mechanics and General Relativity.

実験手法

(1) 非対称Mach-Zehnder干渉計で, 2つの連続パルスを生成.

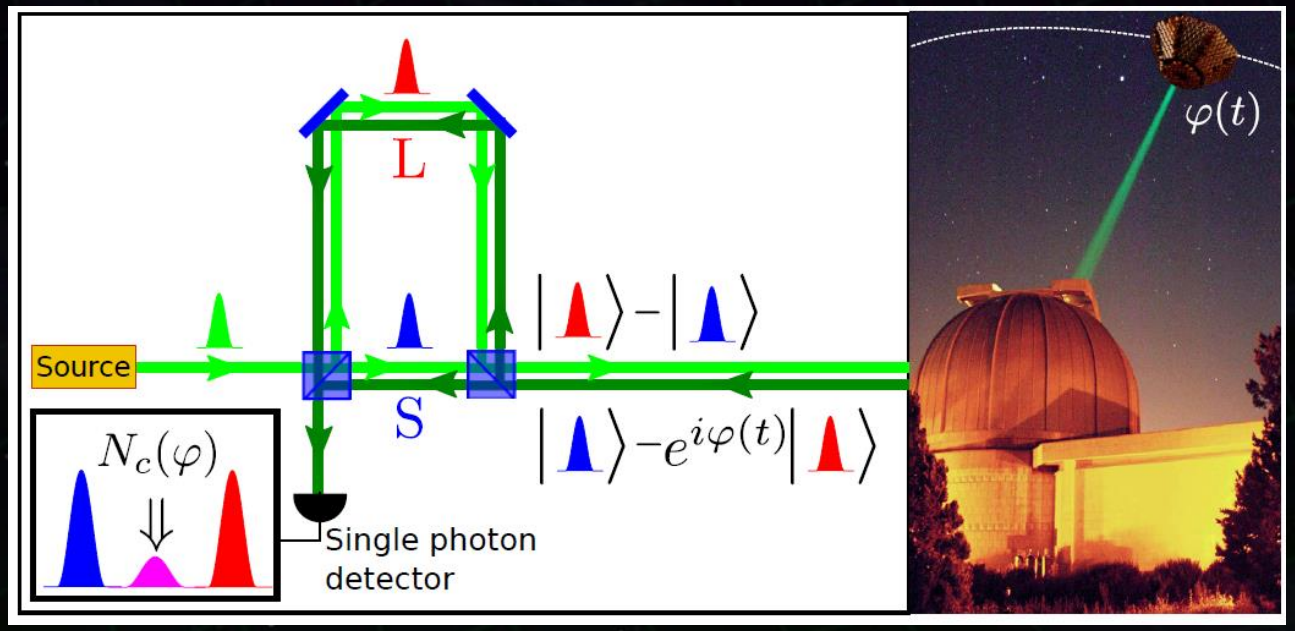
[$\Delta l \cong 1$ m → $\Delta t = 3.4$ nsec , パルス $\tau_c \sim 83$ psec]

(2) 望遠鏡を用いて 衛星へ照射.

(3) 反射光を同じMZ干渉計に通して出力光を測定.

→ 行き 短腕 + 帰り 長腕

行き 長腕 + 帰り 短腕 の2つのパスで干渉.



干渉出力

・中央部ピークの光量 (光子の検出確率)：

$$P_c\,(t) = \frac{1}{2}\,[1 - \mathcal{V}\cos\varphi(t)]$$

ここで，位相：　$\varphi(t) = \frac{2\beta(t)}{1+\beta(t)}\frac{2\pi c}{\lambda}\,\Delta t$

ビジビリティ：　$\mathcal{V}(t) = e^{-2\pi\left(\frac{\Delta t}{\tau_c}\,\frac{\beta(t)}{1+\beta(t)}\right)^2} \cong 1$.

ただし，　$\beta(t) = v_r(t)/c \;\leq 3\times 10^{-5}$

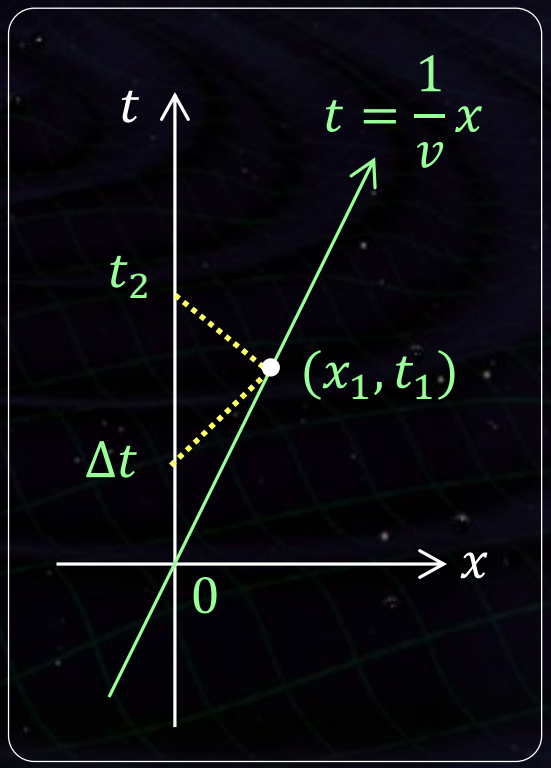
位相変化量の導出

- 時空図で考えるとき, 反射板が光源から速さ v で遠ざかっている場合.
  - 反射板の世界線：$t = \frac{1}{v}x$.
  - 時刻 Δt に発射された光子の世界線：

$$t = \frac{1}{c}x + \Delta t.$$

→ 反射光が戻ってくる時刻 $t_2 = \frac{1+\beta}{1-\beta}\Delta t.$

→ 往復時間 :$\Delta\tau = t_2 - \Delta t = \frac{2\beta}{1-\beta}\Delta t$



- ドップラー効果による反射光の周波数変化: $\omega = \frac{1-\beta}{1+\beta}\omega_0$
- 反射光の位相変化：$\varphi(t) = \omega\,\Delta\tau = \frac{2\beta(t)}{1+\beta(t)}\frac{2\pi c}{\lambda}\,\Delta t$

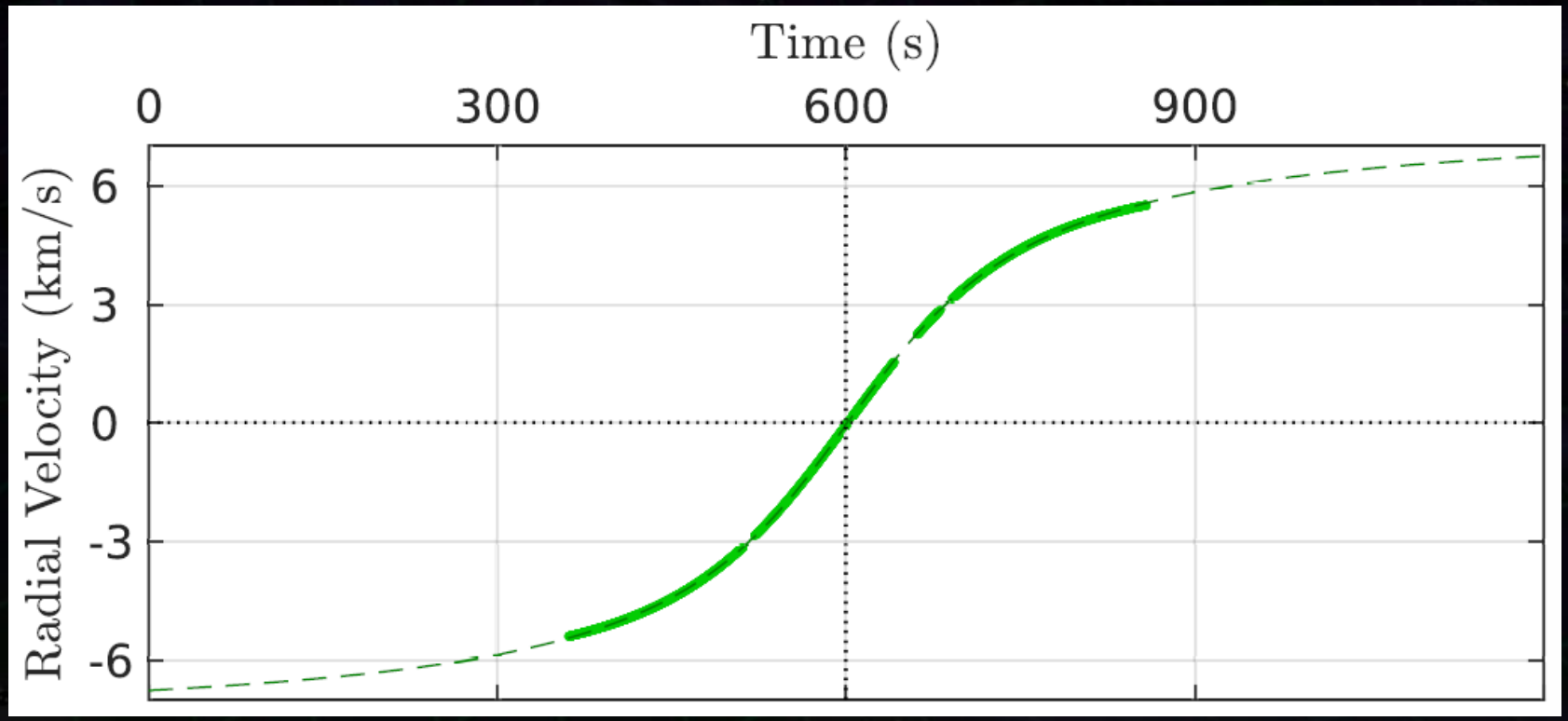
装置

- 光源: Nd:YVO_4 モードロックレーザー
  繰り返し周波数 100 MHz,
  波長 1064nm.
  PPLN結晶で 532 nmに変換.
- 望遠鏡: Matera Laser Ranging Observatory (MLRO)
  の1.5m 望遠鏡.
- 衛星: 3つの衛星を用いた.
  Beacon-C, Stella, Ajisai .

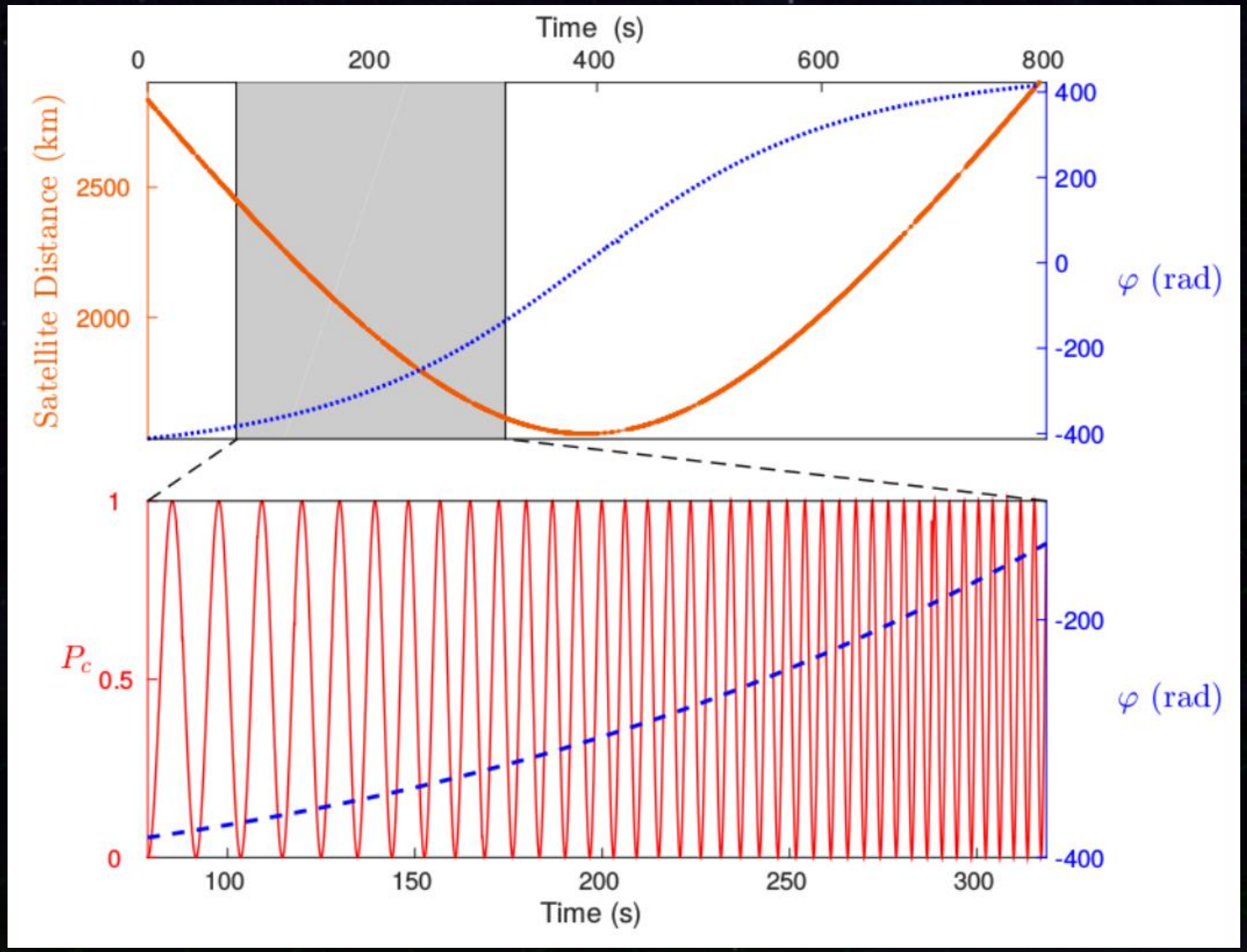
衛星測地実験衛星「あじさい」(EGS)
H-Iロケット試験機1号機で 1986年打ち上げ.
高度 1,500km 円軌道, 質量 685kg.

衛星の視線方向速度

・衛星軌道：同時に ‘Ranging’ により計測.
100 msec 間隔の2つのパルスから
視線方向速度 $v_r(t)$ を算出.



位相差の理論値


Time (s)
0
200
400
600
800
Satellite Distance (km)
2500
2000
400
200
0
-200
-400
φ (rad)
1
P_c
0.5
0
-200
-400
φ (rad)
100
150
200
250
300
Time (s)

実験結果: 時間分解

- Beacon-C衛星での実験結果.

(A) 強め合う場合:

$$\varphi \bmod 2\pi \in \left[\frac{4}{5}\pi, \frac{6}{5}\pi\right]$$

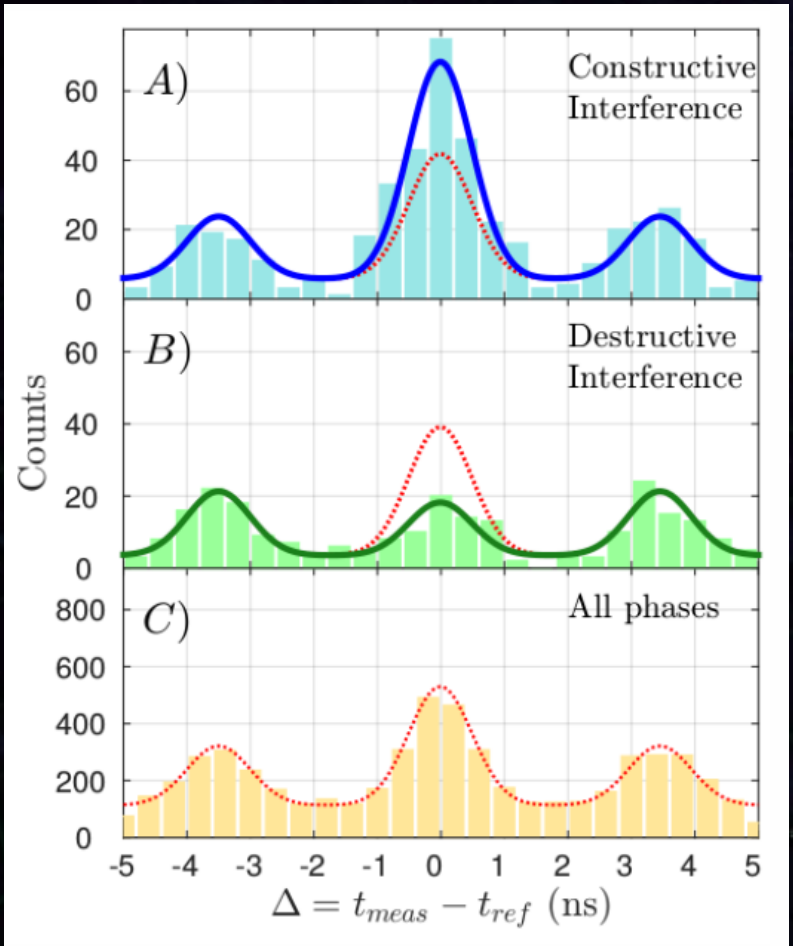
$$\rightarrow P_c^{(\mathrm{exp})} \equiv \frac{N_c}{2N_l} = 0.87 \pm 0.10.$$

(B) 弱めあう場合:

$$\varphi \bmod 2\pi \in \left[-\frac{1}{5}\pi, \frac{1}{5}\pi\right]$$

$$\rightarrow P_c^{(\mathrm{exp})} \equiv \frac{N_c}{2N_l} = 0.20 \pm 0.03.$$

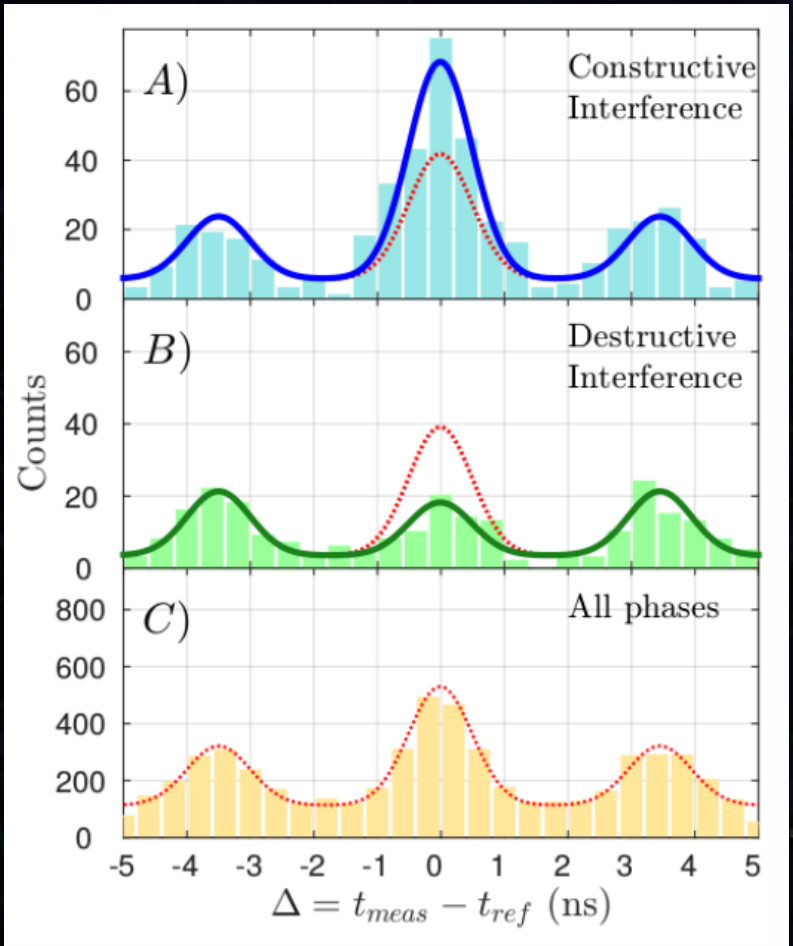
(C) φによるデータ選別をしない場合.



実験結果: 時間分解

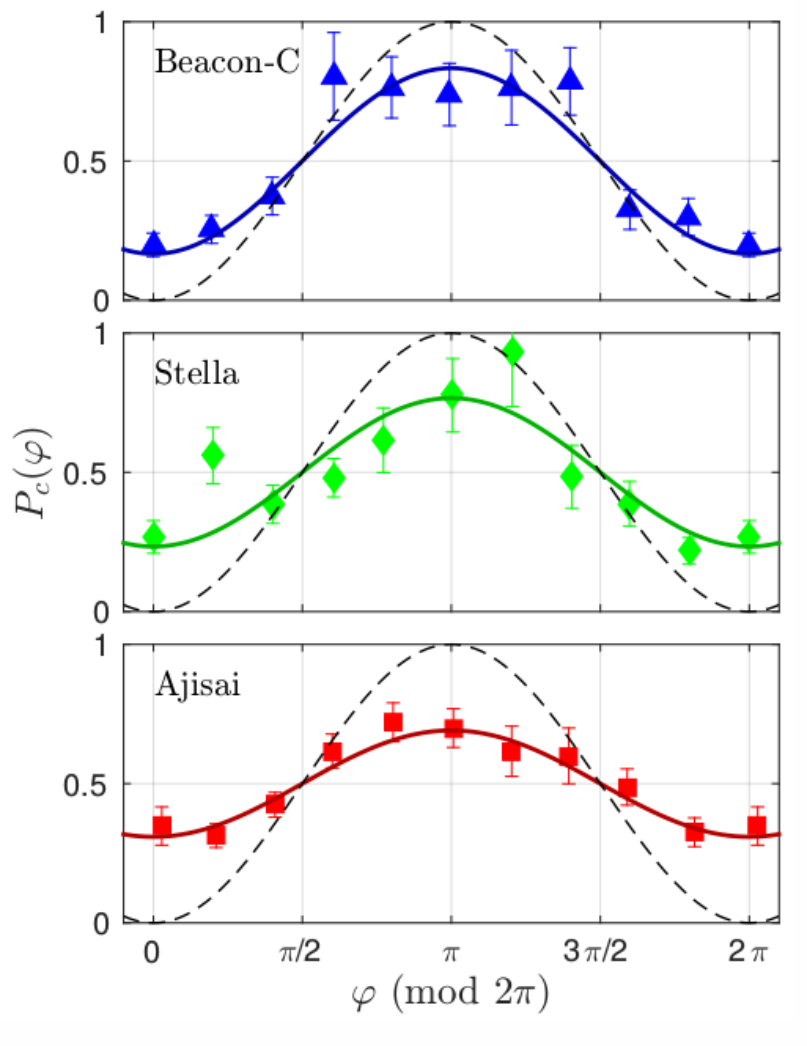
- 受け取られた平均光子数:
  検出レートと光学ロスから見積もる.
  - Beacon-C： $\mu \sim 7 \times 10^{-4}$
  - Stella： $\mu \sim 9 \times 10^{-4}$
  - Ajisai： $\mu \sim 2 \times 10^{-3}$

→ 今回の実験が
1光子レベルでの干渉
を見ていることを示している.



実験結果：位相依存性

- 各位相に分解したヒストグラム.
  この結果を $P_c(t) = \frac{1}{2}[1 - \mathcal{V}\cos\varphi(t)]$
  でフィッティング.
  → $\mathcal{V}_{\mathrm{exp}} = 67 \pm 11\ \%$ (Beacon-C)
  $\mathcal{V}_{\mathrm{exp}} = 53 \pm 13\ \%$ (Stella)
  $\mathcal{V}_{\mathrm{exp}} = 38 \pm 4\ \%$ (Ajisai)
  長基線長でも
  十分な干渉が実現できた.



まとめ

・長基線長, 高速移動している反射板を用いた,
　1光子の量子干渉が観測された.