

On the feasibility of Bell Inequality violation at ATLAS experiment with flavor entanglement of B meson pairs from p - p collisions

Tsubasa ICHIKAWA (QIQB, Osaka U)

30th Sept. 2021 @ Flavor Physics Workshop 2021
based on Physical Review D **104**, 056004 (2021) [arXiv:2106.07399]

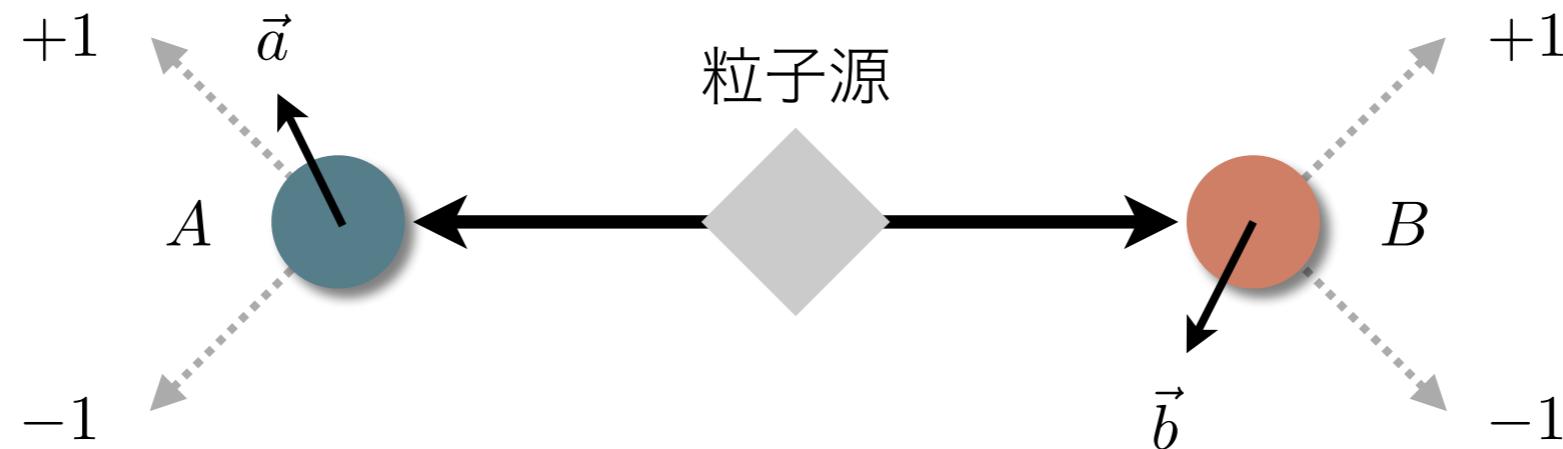
Collaborators: Y. Takubo, S. Higashino, Y. Mori, K. Nagano, I. Tsutsui

実験形而上学 (Experimental Metaphysics)

- 科学哲学者・物理学者A. Shimonyの造語 (1989)
 - 指導教官 : R. Carnap, E. Wigner
- 主に量子力学の基礎的な問題に**実験**でアプローチする分野
 - Einstein, Podolsky, Rosen (EPR) のパラドックス
 - ベル不等式とその実験的検証 など
- 主な実験系は低エネルギー系
 - フォトン
 - 原子分子
 - イオン など

- **本トークでのtake-home message**
 - 高エネルギー系でも実験形而上学が行える見込みがありそう
 - 特にLHCのATLAS実験は実施に有望な実験系である

本トークのターゲット：ベル不等式



- 2準位2体系の測定実験
 - 相関関数を以下で記述できると仮定

隠れた変数（系の**実在**的な記述）の確率分布

$$C(\vec{a}, \vec{b}) = \int d\lambda A(\vec{a}, \lambda)B(\vec{b}, \lambda)P(\lambda).$$

局所的情報のみから測定値が決定

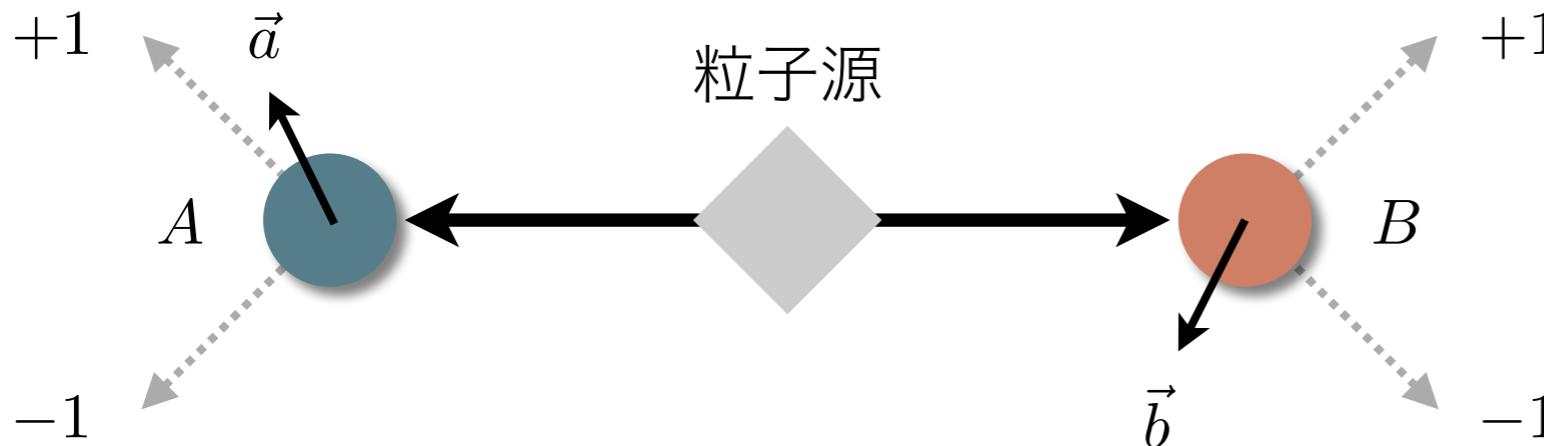
- 測定軸を**自由に選択**して相関関数の組み合わせを計算

$$S = C(\vec{a}, \vec{b}) + C(\vec{a}', \vec{b}) + C(\vec{a}, \vec{b}') - C(\vec{a}', \vec{b}')$$

- ベル不等式

$$|S| \leq 2$$

量子力学はベル不等式を破る

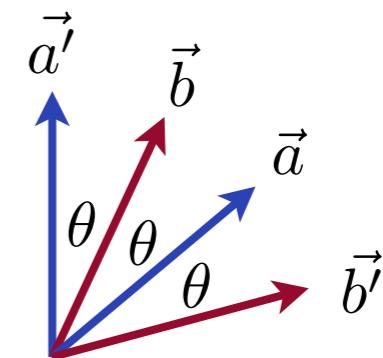
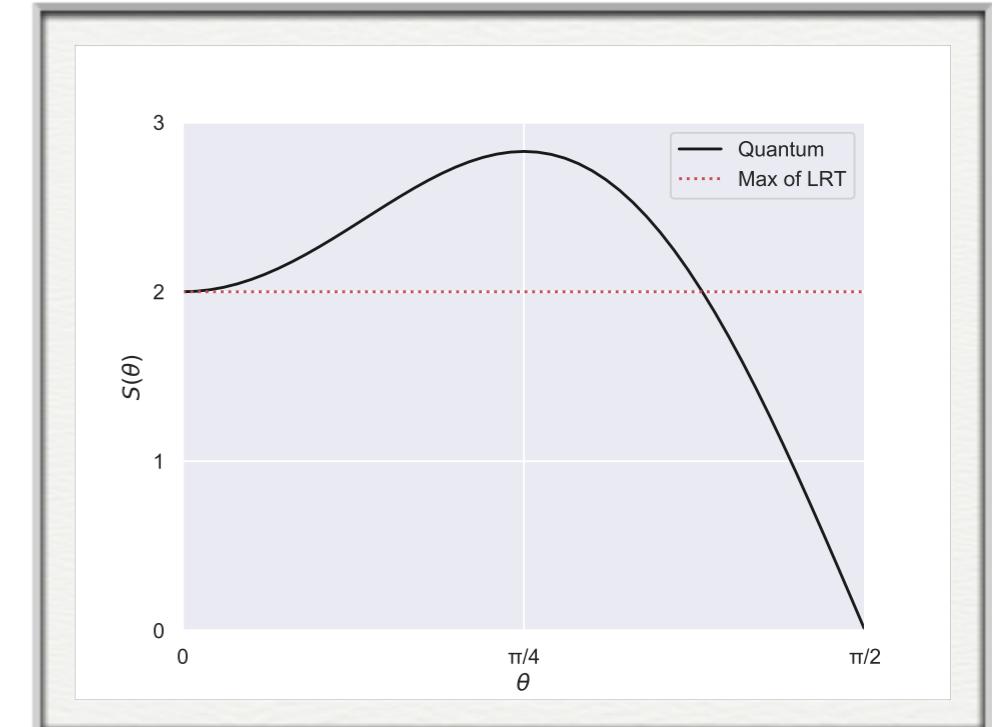


- シングレット状態 : $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle)$
- オブザーバブル : $(\vec{a} \cdot \vec{\sigma}) \otimes (\vec{b} \cdot \vec{\sigma}) \quad |\vec{a}| = |\vec{b}| = 1$

- 相関関数 : $C(\vec{a}, \vec{b}) = -\cos \theta$

$$S = C(\vec{a}, \vec{b}) + C(\vec{a}', \vec{b}) + C(\vec{a}, \vec{b}') - C(\vec{a}', \vec{b}')$$

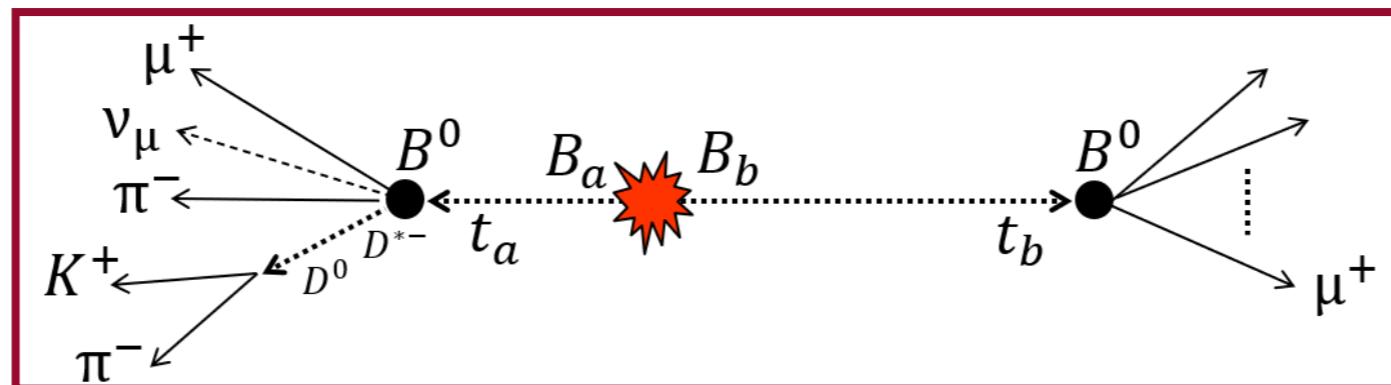
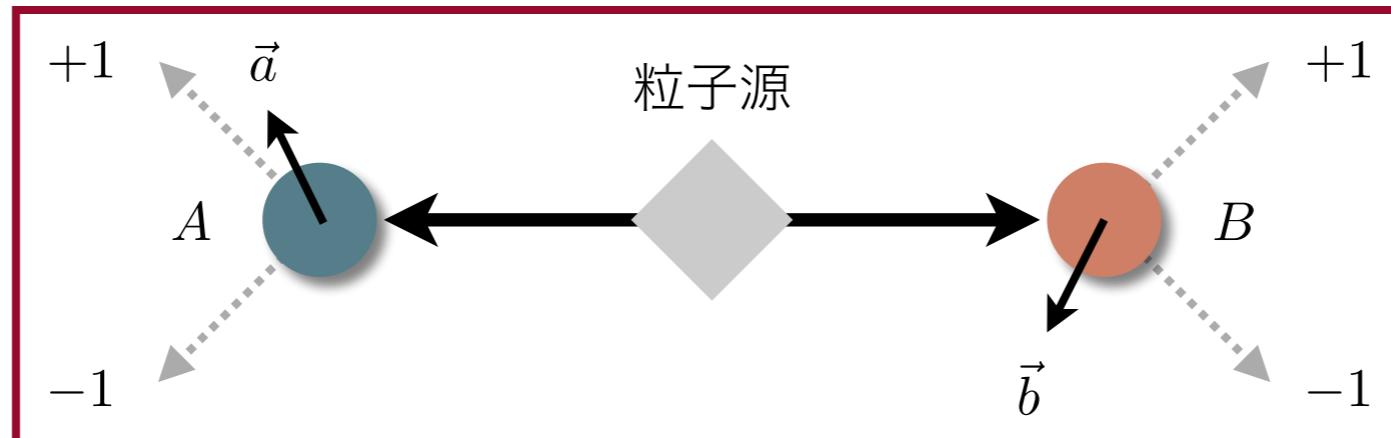
- ベル不等式の破れ \rightarrow 量子力学は実在性・局所性・自由選択を同時には満足しない



スピン測定とフレーバー測定のアナロジー

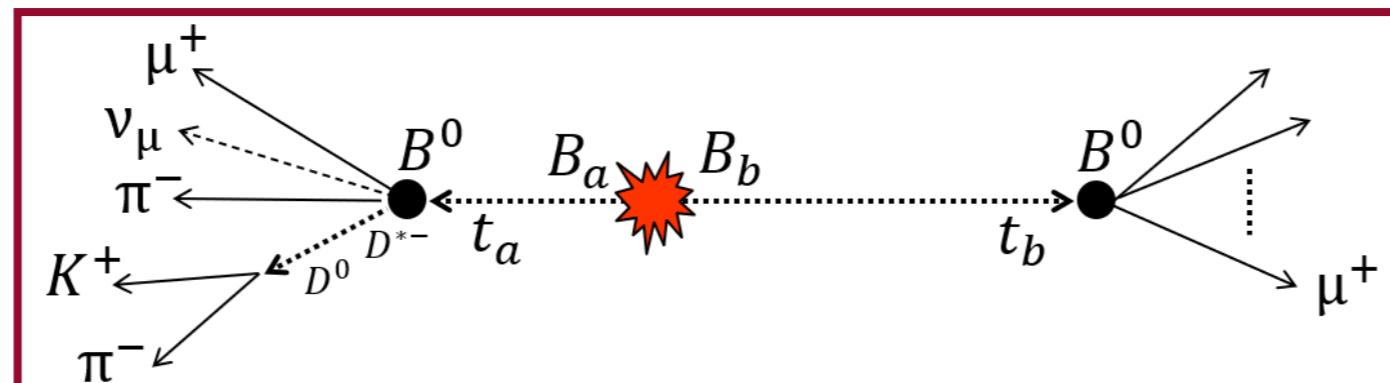
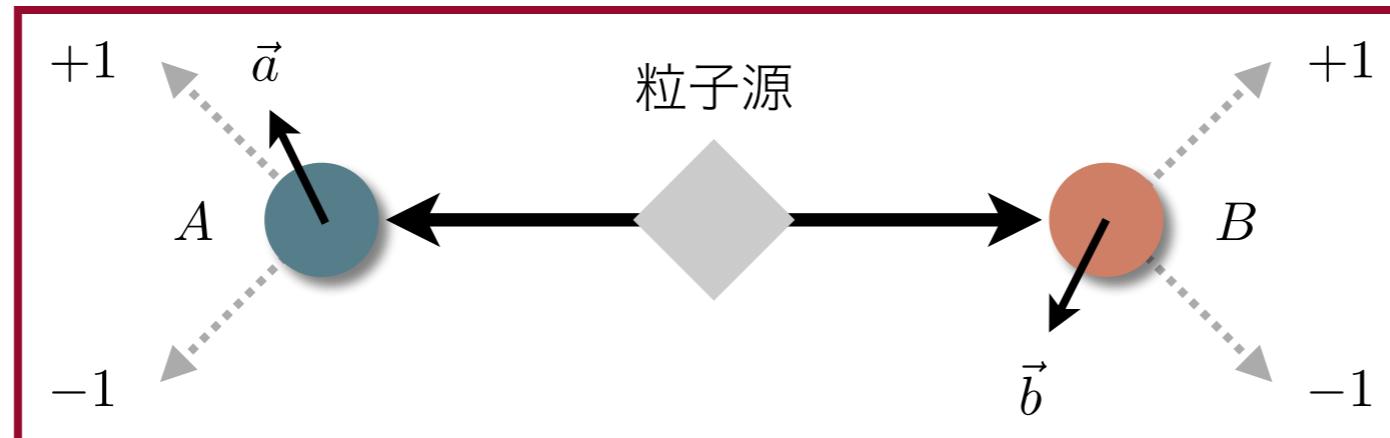
- メソンペア (BB, KK etc) のフレーバーを用いたベル不等式検証
 - 【意義1】既存の実験と異なる物理系での実験
 - 【意義2】ベル不等式を検証したエネルギー規模が拡大
- 【実装のアイデア】スピン測定とフレーバー測定のアナロジー
 - スpinのアップダウンをフレーバーに、測定軸を崩壊時刻に読み替える

Am. J. Phys. **69**, 264 (2001)



アナロジーの不完全な部分

1. 粒子崩壊で状態ベクトルのノルム収縮 \rightarrow 相関が弱まる PLA 332, 355 (2004)
2. 測定軸が固定 \rightarrow **Freewill loophole**
 - 本当に隠れた変数に依存せず、ランダムに測定軸を選べるか
 - 慣習的に量子乱数を用いることで対処



3つのloophole

- 3つの抜け穴 (loophole) を閉じた実験が望ましい

1. Detection loophole

- 低い検出効率 \rightarrow サンプリングの偏り \rightarrow ベル不等式の上限が増加 (>2)
- 検出効率の下限 = $2\sqrt{2} - 2 \approx 0.824$ PRA **57**, 3304 (1998)
- 検出効率が下限より低い場合 \rightarrow fair sampling assumption を課して対処

2. Locality loophole

- 局所性を実験的に担保しないと意味のある実験にならない
- 部分系の測定をspacelikeな2地点で行うことで対処

3. Freewill loophole

- 本当に隠れた変数に依存せず、ランダムに測定軸を選べるか
- 慣習的に量子乱数を用いることで対処

論点は4つ

1. 粒子崩壊による相関の弱まり
2. Freewill loophole
3. Detection loophole
4. Locality loophole

- LHC Run 3の実験セットアップを仮定して以下の方法で検証
 - **理論分析**
 - CPの破れは無視
 - **シミュレーション**
 - 使用ソフトウェア：PYTHIA 8.245
 - ビーム衝突あたりの陽子・陽子反応数が約1の運転(low- μ run)
 - 1fb^{-1} のデータを取得

【参考】既存の素粒子を用いた実験の問題点

9

Previous experiments

B meson (Belle) [[arXiv:0310192 \(2003\)](#)]

- A measurement only for Δt , where (t_a, t_b) was not measured separately.
- $|S|$ has the maximum value of 4 and includes that of QM.

K meson (CPLEAR) [[PLB422, 339-348](#)]

A measurement only for $C^Q(t_a, t_b)$ and is not Bell test.

Both experiments

Most of 2 mesons are not space-like and the locality is not ensured.

The previous experiments were not enough for Bell test on the flavor entanglement.

[[PLA373 \(2008\) 39-44](#)]

|S| in QM and HVT only with Δt measurement

HVT

QM

Fraction of space-like events of 2 B mesons in Belle

Lower limit for $|S| \leq 2\sqrt{2}$

Belle

$\beta = 0.39$ —

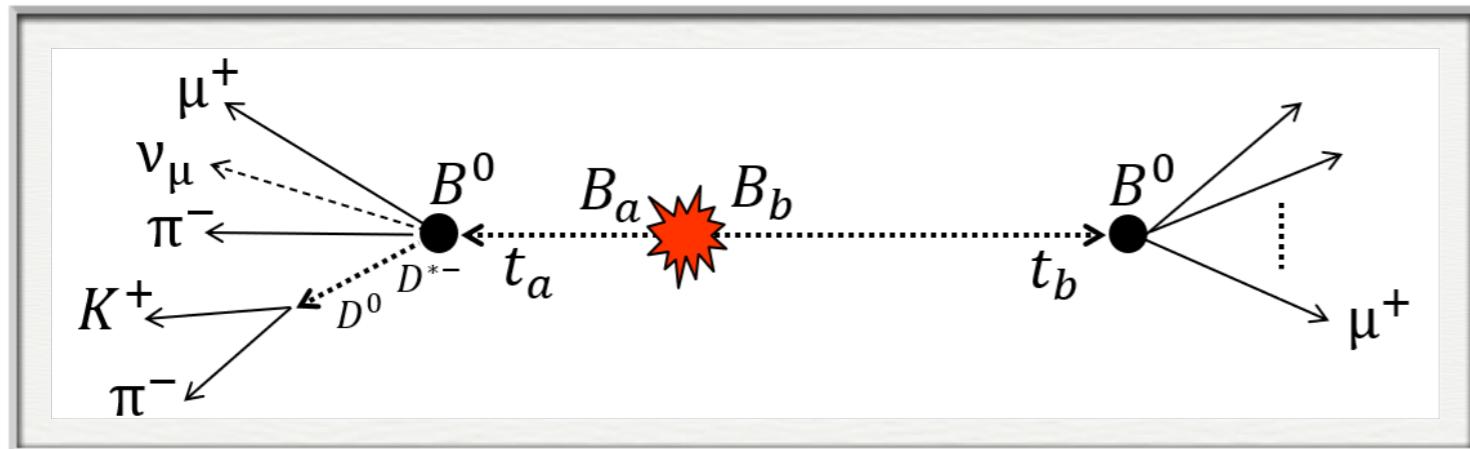
$\beta = 0.59$ - - -

$\beta = 0.99$

- ATLASは個々の崩壊時刻を特定できるため、上記問題は解決できている

検討 1：粒子崩壊による相関の弱まり

- 【回答】崩壊時刻に関する条件付き確率を使って相関関数を再定義することで補正



Γ : 崩壊幅

ΔM : mass eigenstateの質量差

$$\Delta t = t_a - t_b$$

- 【量子力学側】 Am. J. Phys. **69**, 264 (2001) & PRD **104**, 056004 (2021)

- 時刻 t_a, t_b でフレーバーが B^0, \bar{B}^0 である確率

$$P(B^0, \bar{B}^0, t_a, t_b) = \frac{e^{-\Gamma(t_a+t_b)}}{4} (1 - \cos(\Delta M \Delta t))$$

- 条件付き確率

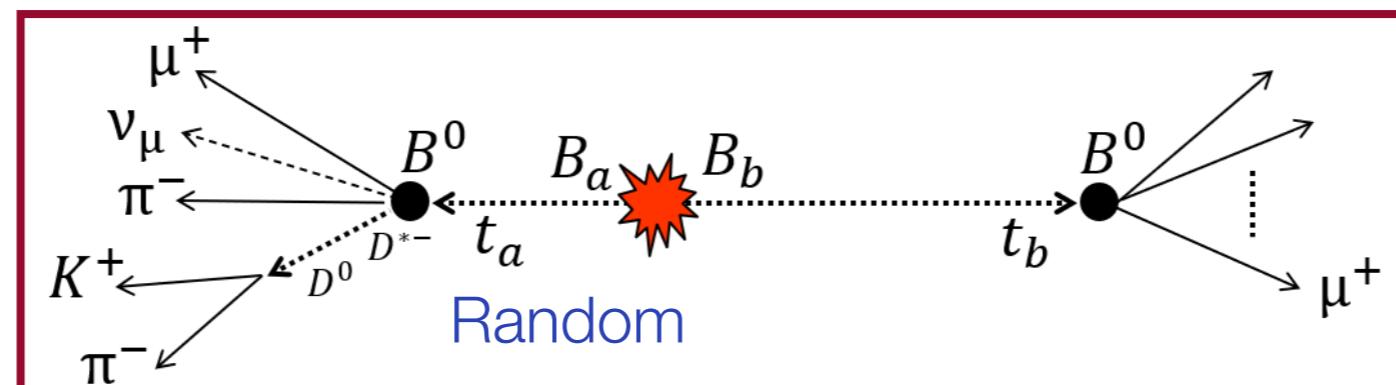
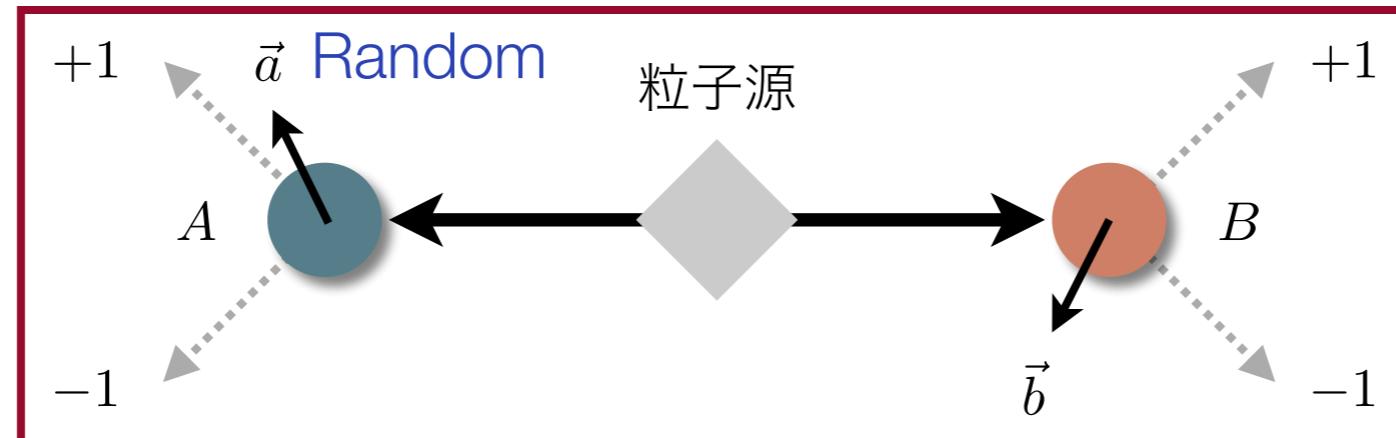
$$P(B^0, \bar{B}^0 | t_a, t_b) = \frac{1}{4} (1 - \cos(\Delta M \Delta t))$$

- 【隠れた変数側】 PLA **373**, 39 (2008) & PRD **104**, 056004 (2021)

- スピン測定とフレーバー測定のアナロジーが成立 \rightarrow ベル不等式は導出可
 - アナロジーが不成立 \rightarrow 仮定を追加すればベル不等式は導出可

検討 2 : Freewill loophole

- 【回答】既存の実験の慣習に従う PRD **104**, 056004 (2021)
 - 既存の実験の慣習：量子乱数を用いて測定軸選択
 - 粒子崩壊：量子力学的なランダムな現象 \Rightarrow 慣習に合致
- 【メリット】スピン測定とフレーバー測定のアナロジーがランダム性を含めて成立



検討 3 : Detection loophole

- 【回答】 検出効率**2%** → fair sampling assumptionを課して対処
- (検出効率) = (イベント再構成効率) × (トリガー効率) × (イベント選択効率)

PRD **104**, 056004 (2021)

	Efficiency	Comment
Track reconstruction (ε_{reco})	0.483	From 「 $D^{*+}\mu^-X$ 」 analysis
Trigger ($\varepsilon_{trigger}$)	0.429	$(0.819 \times 0.8)^2$ was assumed. <ul style="list-style-type: none">• 0.819 is efficiency for single-μ trigger with $pT > 6\text{GeV}$.
Selection criteria ($\varepsilon_{selection}$)	Total eff.	Comment
$pT > 1\text{ GeV}$ for π^+/K^- in D^0 candidates	0.510	
$pT > 250\text{ MeV}$ for π^+ from D^{*+}	0.452	
<ul style="list-style-type: none">• $m(K^-\pi^+) - m(D^0) < 64\text{ MeV}$ ($pT(K^-\pi^+) > 12\text{ GeV}$, $\eta(K^-\pi^+\pi^+) > 1.3$)• $m(K^-\pi^+) - m(D^0) < 40\text{ MeV}$ elsewhere	0.209	Assume σ^2 cut (0.46)
$2.5\text{ GeV} < m(D^{*+}\mu^-) < 5.4\text{ GeV}$	0.097	Assume σ^2 cut (0.46)

検討 4 : Locality loophole

- 【回答】 ATLASではLocality loopholeは閉じている

PRD **104**, 056004 (2021)

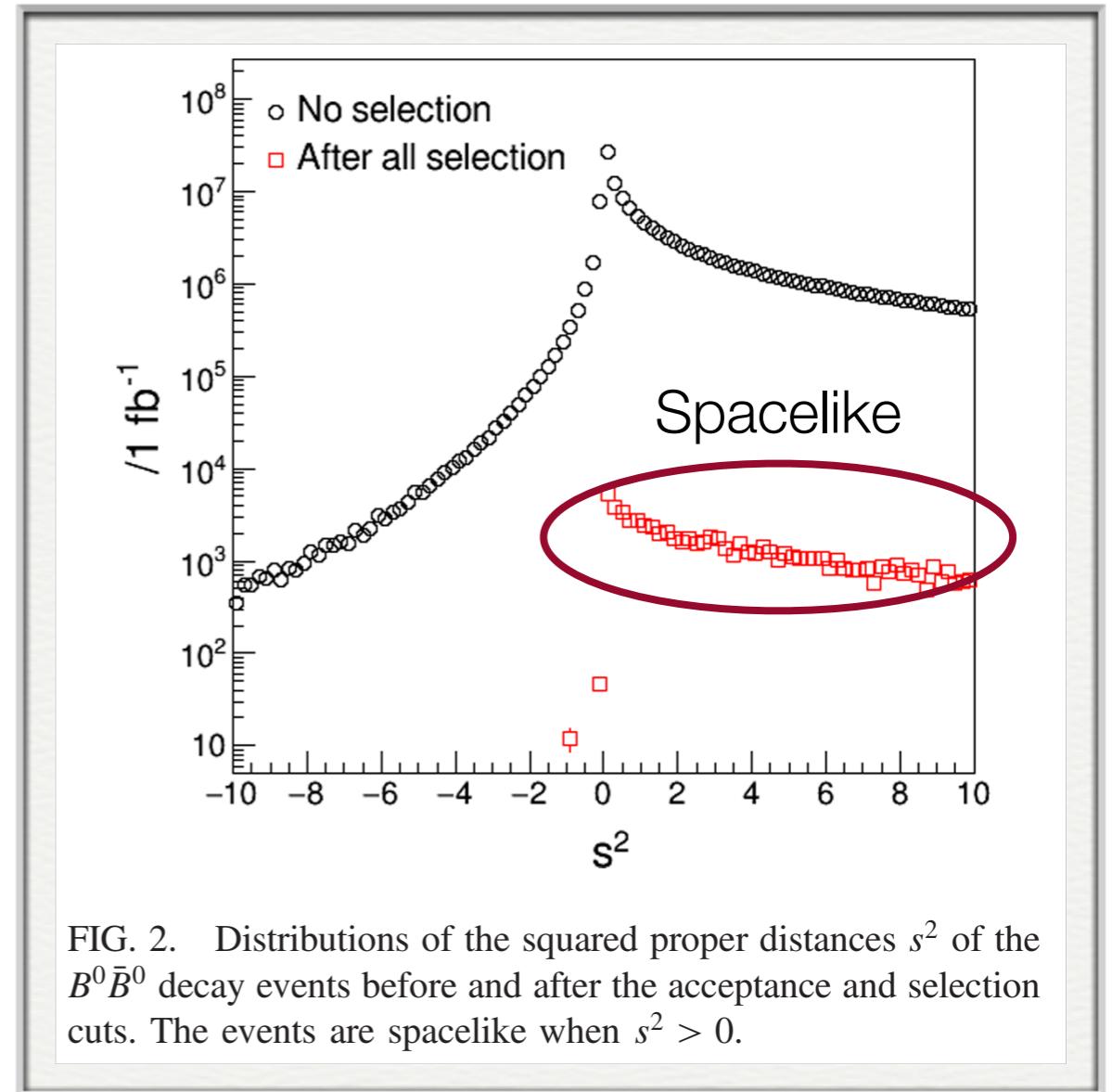
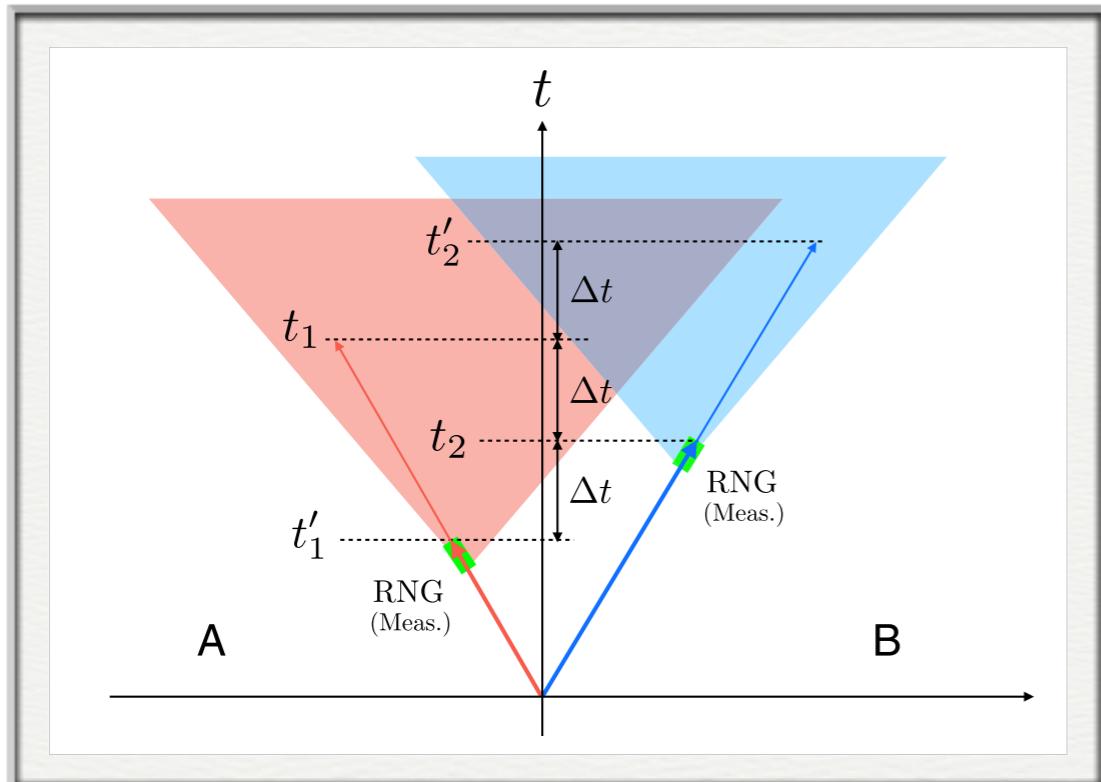
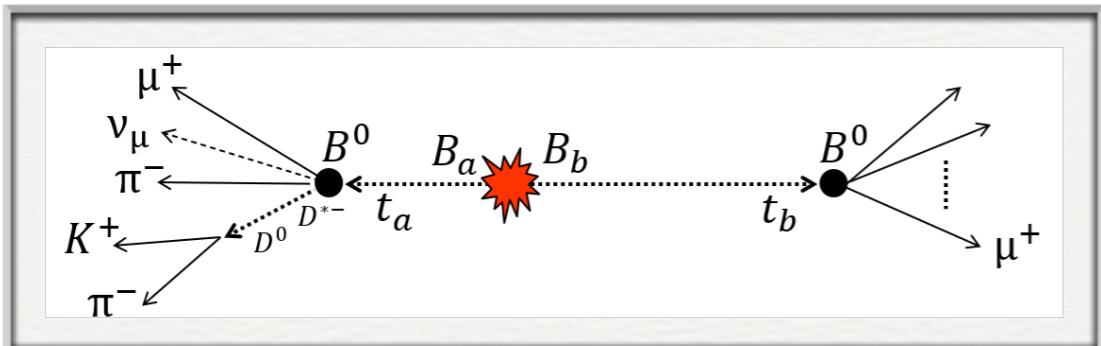


FIG. 2. Distributions of the squared proper distances s^2 of the $B^0 \bar{B}^0$ decay events before and after the acceptance and selection cuts. The events are spacelike when $s^2 > 0$.

結論

- LHC Run 3でATLAS検出器を使えば、ベル不等式の破れは**検証できる**
- 3つのloopholeのうち、freewill loopholeとlocality loopholeを閉じた実験
- 最高エネルギー規模での実験 ($\sim 14\text{TeV}$)
- 素粒子実験で**最初の**ベル不等式検証実験

