



# ベルの定理 60 周年記念研究会

Symposium for Celebrating 60 years of Bell's theorem

2024/9/3

芝浦工業大学・豊洲キャンパス（交流棟 501）/Zoom オンライン

Shibaura Institute of Technology/Zoom (Online)

- First session (Japanese): 9:00 - 15:50 (JST)
- Second session (English): 16:00 -19:00 (JST)/07:00 - 10:00 (UTC)

## I 第一部 (First session): 9:00 - 15:50

First part will be held in Japanese.

### I.1 9:00-9:10 開会の挨拶: 北島 雄一郎 (日本大学)

### I.2 9:10-9:50 谷村 省吾 (名古屋大学)

**タイトル:** ベルの不等式とその前後の歴史 (チュートリアル講演)

**概要:** 何をもってベル定理と呼ぶかに関してはいろいろな意見があると思われるが、ここではなるべく広義にとって、「局所性と実在性の仮定から演繹されるが、量子力学の枠組みでは偽となるような命題群」のことをベル定理と呼ぶことにする。平易な言葉で言えば「常識では成り立つはずの関係式がミクロの世界では成り立たないことがある」ことを示すのがベル定理である。この講演では、1964年に発表されたジョン・ベルの論文の前後の歴史を概説したい。

### I.3 9:50-10:30 清水 明 (東京大学)

**タイトル:** マクロ系のエンタングルメント — その後のシュレディンガーの猫

**概要:** 「量子論の記述は不完全だ」と主張するアインシュタイン達の論文 (1935) は大きな議論を巻き起こし、シュレディンガー (1935) は「量子論は確かに不満足な面がある」と「告白」した。ところが、その「不満足な面」こそが量子論の本質であることが Bell(1964) により示され、実験的にも検証された (1972,1982)。しかし、これらは自由度が小さい量子系に限定されていたので、自由度が桁違いに大きいマクロ系についての Bell の定理の拡張やシュレディンガーの「不満足な面」は、その後の多くの研究を待たなければならなかった。それは、マクロ系でも状態の重ね合わせが可能なのか、それがもたらすエンタングルメントにはどのような種類があり、その大小はどのような量で測ればいいのか、そしてそれらがどんな物理的意味を持っており、しいてはどんな応用をもたらすのか、などの研究である。この広大な研究分野を短い時間で全てカバーするのは不可能なので、主に我々のグループが興味を持ってきたこと (2000,2002,2004,2005,2006,2013,2018,2019,2024) を中心に簡単にお話ししようと思う。

### I.4 10:40-11:20 平野 琢也 (学習院大学)

**タイトル:** ベル不等式の実験的検証について

**概要:** ベル定理が証明されたことにより、量子論の基礎的な問題を実験的に検証する道筋が示された。すなわち、局所性と実在性の仮定が正しいのかどうかを実験により決めることができるようになった。但し、局所実在論が正しくないことをきちんと示すには、余分な仮定があってはならないので、厳密な検証のために多くの実験が行われてきた。この講演では、このような抜け道を塞ぐために、どのような実験が行われてきたのかを紹介したい。

### I.5 11:20-12:00 筒井 泉 (日本大学・KEK)

**タイトル:** 高エネルギー物理とベル不等式

**概要:** ベル不等式の検証は 1970 年代以降、主として低エネルギーの光子を用いて行われ、現在では精度の高い実験が行われるようになってきたが、その傍ら、高エネルギーでの大きな質量を持つ粒子を用いた検証実験も試みられており、量子力学の基礎の検証領域の拡大だけでなく、素粒子の物理の観点からも興味深い議論がなされるようになってきている。この講演では、高エネルギー物理でのベル不等式の検証の歴史を振り返るとともに、最近、活発に議論されるようになった多様な粒子系での検証実験に関する進展を概観する。特に、その中で中核的な役割を担うフレーバー空間での B 中間子対の量子もつれに基づく検証と、その CP 対称性の破れとの関連性などに触れ、

高エネルギー物理でのベル不等式の検証の意義と今後の進展への展望を述べたい。

## I.6 13:00-13:40 木村 元 (芝浦工業大学)

**タイトル:** 緩和ベル不等式とその応用

**概要:** ベル不等式の破れは、実在性、局所性、測定独立性（自由選択）などの基礎的な仮定の非両立性を示唆する。しかし、それは各仮定がどの程度量的に破れているかを示しているわけではない。これに対し 2011 年 M. Hall は、各仮定を定量化し、仮定間の定量的なトレードオフ関係（緩和ベル不等式）を示すことに成功した。これはベルの定理に新しい光を当てるものであり、科学哲学の観点だけでなく、量子情報のセキュリティへの応用にとっても重要な貢献である。本講演では、基礎と応用の両面から緩和ベル不等式を紹介し、我々の研究（隠れた変数の定量化）も併せて紹介する。

[1] Gen Kimura, Yugo Susuki, Kei Morisue, Phys. Rev. A 108, 022214 (2023).

[2] Ryo Takakura, Kei Morisue, Issei Watanabe, Gen Kimura, arXiv:2208.13634 [quant-ph].

[3] Rei Shibata, Gen Kimura (in prep.)

## I.7 13:40-14:20 杉尾 一 (上智大学)

**タイトル:** It from Bit: 実在から”実在”へ

**概要:** 量子論の誕生以来、物理的実在に関する問題は、哲学において重要なテーマとして議論されてきた。その中でも、ベルの不等式の破れは、物理的実在に関する問題に大きな影響を与えたといえる。しかし、一連の「哲学的問題」を冷静に再考すると、量子論の帰結は従来の哲学の枠組みに収まりきらなかっただけではないだろうか。

哲学は、認識論や存在論・形而上学といった領域を含むが、これらは量子論が登場する以前の思考の枠組みを基礎としている。伝統的な思考の枠組みに固執する者にとっては、量子論の帰結には哲学的な問題が内在しているように見えるが、そうでない者にとっては、量子論の結論は受け入れるべき科学的事実である。

このように考えると、我々が取り組むべき課題は、旧来の哲学の枠組みから脱却し、現代物理学の成果を踏まえた新たな世界像を描くことである。そして、その過程において、物理学が認める“実在”を検討すべきであろう。

この新たなアプローチや新しい言葉遣いに対して、従来の哲学に固執する“哲学者”からは「誤謬と混乱に満ちている」との誹りを受けるかもしれない。しかし、そのようなドグマティックな批判は、批判に値しない。むしろ、伝統的な哲学の枠組みから物理学を解放し、物理学のための哲学、そして物理学に基づく新たな認識論的世界像を構築することが重要である。

以上のような問題意識を背景に、本発表では、John Wheeler の It from Bit に特に焦点を当て、量子論と新たな哲学の接点を探りたい。

## I.8 14:30-15:10 北島 雄一郎 (日本大学)

**タイトル:** 科学的理解とコッヘン・シュペッカーの定理

**概要:** 科学的理解は科学哲学のトピックとしてはこれまで重視されてこなかったが、最近ではその重要性が注目されるようになってきた。de Regt は、「科学理論 T が (文脈 C において) 科学者にとって理解可能であるのは、科学者が正確な計算を行わずに理論 T の定性的な特徴的帰結を認識できる場合である」と考えている。定性的な特徴的帰結を認識するための概念的ツールとして、視覚化可能性、因果性、統一性、アナロジーなどが挙げられる。本発表では、特に視覚化可能性に焦点を当てる。

コッヘン・シュペッカー (KS) は、単位ベクトルの直交関係を示すグラフを用いて、射影作用素で表される観測命題すべての真偽が確定しているわけではないことを示した。しかし、この定理は実験的に検証可能な形では提示されていない。一方、KCBS 不等式はベルの不等式と同様に実験的に検証可能な不等式であり、グラフから導かれる。本発表では、KS が使用したグラフからも KCBS 不等式とは異なる式が導出できることを指摘する。このように、KS の定理に関する議論ではグラフが用いられ、視覚化可能性が重要な役割を果たしている。

## I.9 15:10-15:50 森田 紘平 (神戸大学)

**タイトル:** 理解できないものが実在できるか？

**概要:** 眼に見えない科学的な事象の実在、例えば電子の実在を、どうすれば認めることができるのだろうか？この問いに対して科学哲学者たちは、特に科学的事実論というテーマで取り組んできた。伝統的な事実論論争の枠組みでは、手放して事実論を擁護するのは困難であるということは標準的な見解だろう。そこで、もし実在が認められるのだとしたら、どのような条件のときなのかという観点から、事実論を再構成する方向性がある。その中に、事象の「理解」が事実論の擁護に本質的な役割を果たしているという指摘がある。確かに、理解していない事象について、その実在性を訴えるのは困難であるように思える。しかし、理解というのは人間の側の問題 (認識論) であって、それが電子の実在 (存在論) を保証するのだろうか。この理解と実在を結びつける科学哲学の議論は、局所事実論を否定するというベルの定理の分析に何をもちたらすのか。また逆に、ベルの定理の含意はこの議論に何をもちたらすのか。この発表では、科学哲学の観点から、これらの問いにアプローチする。

## II 第二部 (Second Session): 16:00 - 19:00

The second session will be held in English.

### II.1 16:00-16:10 Opening Remarks for the second part: Gen Kimura (Shibaura Institute of Technology)

### II.2 16:10-16:50 Michael J. W. Hall (Australian National University)

**Title:** Bell inequalities from two minimal physical assumptions

**Abstract:** A general form of the CHSH Bell inequality, for arbitrary numbers of outcomes, is derived from two natural minimal assumptions for two distant observers Alice and Bob. The first assumption is that Bob cannot signal to Alice via his choice of measurement. This “no-signaling” assumption has the virtues of being experimentally verified and of being equivalent to the existence of joint probability distributions for Bob’s observables that are compatible with the measured correlations. The second assumption has a similar flavour, requiring that there is at least one such joint distribution that is invariant with respect to Alice’s choice of measurement. This “joint invariance” assumption leads directly to the CHSH Bell inequality, and its failure immediately follows from the experimental violation of this inequality. Unlike other derivations, no assumptions such as hidden variables, determinism, parameter independence, free will, existence of a formal joint distribution for all observables, or counterfactual definiteness are required. Moreover, it follows that there are just three possible physical mechanisms underlying Bell inequality violation: action-at-a-distance (superluminality); unavoidable common factors linking measurement choice and distant properties (conspiracy); and intrinsically incompatible physical quantities (complementarity).

[1] M. J. W. Hall, Phys. Rev. A 110 (2024) 022209.

### II.3 16:50-17:30 Nicolas Gisin (University of Geneva)

**Title:** “Impossible” measurements in quantum field theory are possible but not ideal

**Abstract:** Naive attempts to put together relativity and quantum measurements lead to signalling between space-like separated regions. In QFT, these are known as impossible measurements. We show that the same problem arises in non-relativistic quantum physics, where joint nonlocal measurements (i.e., between systems kept spatially separated) in general lead to signalling. We recall how to measure non-local variables without signalling by exploiting

entanglement as a resource, recovering thus the Born rule, but not the projection postulate. We propose to use these findings to classify all joint quantum measurements from the simplest to the more complex ones, based on the required amount of entanglement necessary to measure them.

Nicolas Gisin, Flavio Del Santo, Jef Pauwels and Alejandro Pozas Kerstjens

Group of Applied Physics, University of Geneva, 1211 Geneva, Switzerland and Constructor University, Geneva, Switzerland

#### **II.4 17:30-18:10 Valerio Scarani (National University of Singapore)**

**Title:** The applied side of Bell inequalities: device-independent certification

**Abstract:** In this talk, I shall describe the convoluted story of the discovery of device-independent certification. You will learn how the Bell element in the Ekert 1991 QKD protocol was shut down by Bennett, Brassard and Mermin because “entanglement should be enough”; how Mayers and Yao had the idea of device-independent QKD but ended up inventing a form of “self-testing” (not the most natural one, which had been described by Tsirelson, Werner and Popescu-Rohrlich a few years earlier); how some people tried to prove that cryptography can be secure even against a “no-signaling adversary”, before coming back to quantum and finally defining “device-independent QKD”; and how only then it was noticed that, if one can guarantee shared randomness (QKD), one can also guarantee just randomness. I shall conclude explaining quickly why experiments in DIQKD are still challenging, even if loophole-free Bell test and the corresponding randomness certifications have been demonstrated almost a decade ago.

#### **II.5 18:10-18:50 Francesco Buscemi (Nagoya University)**

**Title:** Semiquantum Tests: Closing the “Nonlocality Gap” in Space and the “Clumsiness Loophole” in Time

**Abstract:** In this presentation, I will discuss my proposal to extend nonlocal games to a semiquantum (or “measurement device-independent”) framework. In this setting, questions are encoded in quantum states rather than being directly communicated to the players. I will demonstrate how this modification achieves two key objectives: 1. Bridging the gap between entanglement and nonlocality in games involving space-like separated parties. 2. Addressing

the "clumsiness loophole" that affects all Leggett-Garg-type tests conducted between time-like separated parties.

**18:50-19:00 Closing Remarks: Izumi Tsutsui (KEK)**