

Title	光の粒子的性質に現れる非局所性に迫る
Author(s)	
Citation	令和5（2023）年度学部学生による自主研究奨励事業 研究成果報告書．2024
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/95162">https://hdl.handle.net/11094/95162</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 令和5年度大阪大学未来基金「学部学生による自主研究奨励事業」研究成果報告書

ふりがな 氏名	あべ ななみ 安部 七海	学部 学科	理学部 物理学科	学年	2年
ふりがな 共同 研究者氏名	なかむら としき 中村 敏貴	学部 学科	理学部 物理学科	学年	3年
					年
					年
アドバイザー教員 氏名	わたなべ じゅんじ 渡辺 純二	所属	生命機能研究科		
研究課題名	光の粒子的性質に現れる非局所性に迫る				
研究成果の概要	研究目的、研究計画、研究方法、研究経過、研究成果等について記述すること。必要に応じて用紙を追加してもよい。(先行する研究を引用する場合は、「阪大生のためのアカデミックライティング入門」に従い、盗作剽窃にならないように引用部分を明示し文末に参考文献リストをつけること。)				
<p>&lt;研究目的&gt;</p> <p>アインシュタイン選集1を読んでいくうちに、量子力学批判の分野が目に留まり、精読していくうちにEPR理論の面白さに気づいた。より深く調べる中で、アインシュタインの立場である実在論とボーアの立場である量子論のどちらが正しいのかという議論が行われていたことを知った。またベルの不等式はどんな実在論も満たすのに対し、量子論においてはそれが満たされない、つまり破れることがあるということが実験によって示され、これにより実在論では説明できない自然現象が世の中にあることが確認された。よってこのベルの不等式の破れを自分なりに検証できればと思いこの研究に着手することを決めた。</p> <p>&lt;研究計画・方法&gt;</p> <p>① EPR理論を学ぶために原論文を読む。(Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, Phys. Rev. <b>47</b>, 777 (1935).)</p> <p>② ベルの不等式を学ぶために本を読む。(松岡正浩, 『量子光学』, 東京大学出版会 (1996).)</p> <p>③ 生命機能研究科にあるレーザー装置を用いて実験の設計を行う。その後非局所性と呼ばれる性質に関して、ベルの不等式が破れるような現象を検出する。</p> <p>&lt;研究経過・成果&gt;</p> <p>・研究計画①について</p> <p>原論文を読んで以下の内容について学習した。</p> <p>EPR理論では、1つの系の状態を攪乱することなく、物理量を確率1で予言できるならば、その物理量に対応する物理的実在の要素が存在しているということを、物理的実在の定義とした。</p> <p>それを踏まえて相互作用のない2つの粒子に対して以下のような量子力学的記述に基づく波動関数を与えた。</p>					

$$\Psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{\left(\frac{2\pi i}{h}\right)(x_1 - x_2 + x_0)p} dp \quad (x_0: \text{const.})$$

ここで、粒子 1・2 の位置をそれぞれ  $x_1, x_2$ 、運動量をそれぞれ  $p_1, p_2$  とする。測定によって

$$p_1 = p_*$$

と定まったとすると、粒子 1・2 の固有関数は以下のように与えられる。

$$u_{p_*}(x_1) = e^{\left(\frac{2\pi i}{h}\right)p_*x_1}, \varphi_{p_*}(x_2) = e^{-(2\pi i/h)(x_2 - x_0)p_*}$$

ここで、粒子 2 について運動量に対する固有値を計算すると

$$\widehat{p}_2 \varphi_{p_*} = -p_* \varphi_{p_*}$$

とつまり、固有値が確定値であることから、粒子 2 の運動量は測定せずとも確定した値を持つことが分かった。

次に、測定によって

$$x_1 = x_*$$

と定まったとすると、粒子 1・2 の固有関数は以下のように与えられる。

$$v_{x_*}(x_1) = \delta(x_1 - x_*), \mu_{x_*}(x_2) = h\delta(x_* - x_2 + x_0)$$

ここで、粒子 2 について位置に対する固有値を計算すると

$$\widehat{x}_2 \mu_{x_*} = (x_0 + x_*) \mu_{x_*}$$

とつまり、固有値が確定値であることから、粒子 2 の位置は測定せずとも確定した値を持つことが分かった。

つまり、粒子 2 を測定することなく、粒子 1 の測定のみで粒子 2 の運動量と位置が同時に確定したことになる。これは量子力学の原理の 1 つである不確定性原理と自己矛盾を起こしている。よって、EPR 理論では、波動関数によって与えられる実在の量子力学的記述は不完全であると結論付けた。

ここで重要な解釈の違いとして、アインシュタインは遠く離れた部分系は互いに影響を及ぼさないという局所性を支持したのに対し、量子論では、遠く離れた系も互いに影響しあうという非局所性を前提としていた。EPR 理論では、思考実験の設定として相互作用のない粒子 1・2 を仮定したが、そもそもこの仮定が量子力学の記述を満たしていないのである。しかしながら、EPR 理論が提唱された当時は、まだこの局所性と非局所性のどちらが正しいのかを決定づける理論や実験結果はなかった。その解決に大きな影響を与えたのがベルの不等式であることが分かった。

#### ・研究計画②について

松岡正浩、『量子光学』，東京大学出版会（1996）を読み、以下のことを学習した。

量子もつれを起こした光子対、光子 1 と光子 2 を地面に対してそれぞれ  $\theta_1$  と  $\theta_2$  と方向の偏光板を通し、さらにそれらを地面に対して水平方向 (x 偏光) と鉛直方向 (y 偏光) ごとにわけて計測する。このときの同時計数  $\langle I_{i,j} I_{k,l} \rangle$  ( $i, k=1, 2, j, l=x, y$ ) を用いて相関係数 E を計算し、そこから得られる値 S を次のように表す。

$$S = E(\theta_1, \theta_2) - E(\theta_1, \theta'_2) + E(\theta'_1, \theta'_2) + E(\theta'_1, \theta_2)$$

局所性を仮定すると S の絶対値は 2 を超えることはないがこれが破れる場合があり、そのことをベル

の不等式の破れという。

・研究計画③について

研究計画③では量子もつれを起こしている光子対の同時計数を測定できるようになる必要がある。そのための測定手順を以下にまとめる。

- ① レーザー (800nm) を SHG 結晶に入射させ、400nm の光に変換する。
- ② 400nm の光を非線形結晶に入射させ、量子もつれを起こしている光子対を生成する。  
(この際、光子対は入射方向に対して左右に  $5^\circ$  広がって放出される。)
- ③ 光子対の進行方向にコリメータを用意し、光子を捉えて、光電子増倍管で電気信号に変換する。
- ④ 電気信号を TAC、MCA に通して光子対の到達した時間差を測定する。

以下に上記の実験に用いた装置の全体図を示す。

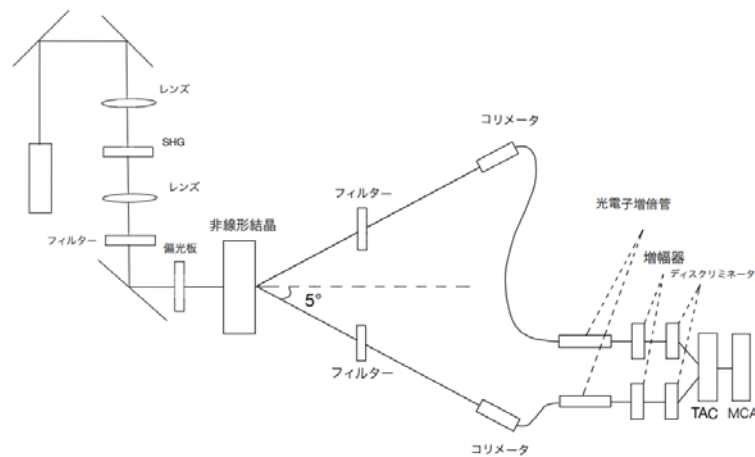


図1 実験に使用した装置

上図で示した装置を用い、レーザーを約1時間放出し得られたMCAの分布を以下に示す。

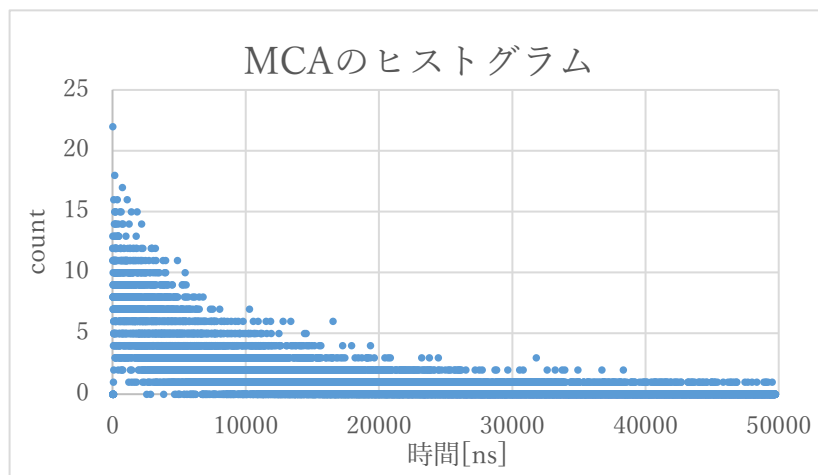


図2 1時間の測定で得られたMCAのヒストグラム

以上の結果から時間差が大きくなると指数関数的に Count 数が減少していく様子がうかがえる。

ここで光子対の TAC に到達する時間差を  $t[\text{ns}]$  として、 $t$  における Count 数を  $N(t)$  と置く。  
レーザーのパルスが届いた時の非線形結晶が光子対を生成する効率を  $P$ 、TAC の stop 出力に繋いでいる光電子増倍管の検出確率を  $Q$  とすると  $N(t)$  は以下の式で表される。

$$N(0)=N_0 \quad (t=0)$$

$$N(t)=N_0(1-Q)(1-PQ)^{\frac{N-12}{12}} \quad (t \geq 12)$$

上式から時間差が増加するにつれて Count 数が指数関数的に減少していくことがわかる。また今回の実験ではフィルターを用いてレーザーからの光を取り除いているため、実験で得られたデータは光子対由来のデータであると期待できる。

<今後について>

研究計画③にて行った実験では以下のような問題点が挙げられる。

- (i) TAC から出力される信号が MCA のどの値に対応しているかわからず、実験計画③でも時間差 0 でのピークがでると予想されるがみられなかったこと。
- (ii) 光子対からの信号によるものであると期待されるがレーザー由来の可能性も考えられること。

上記の (i) と (ii) の課題に対して、以下の実験を行う。

(i) について

以下の図に示す実験装置を作成する。

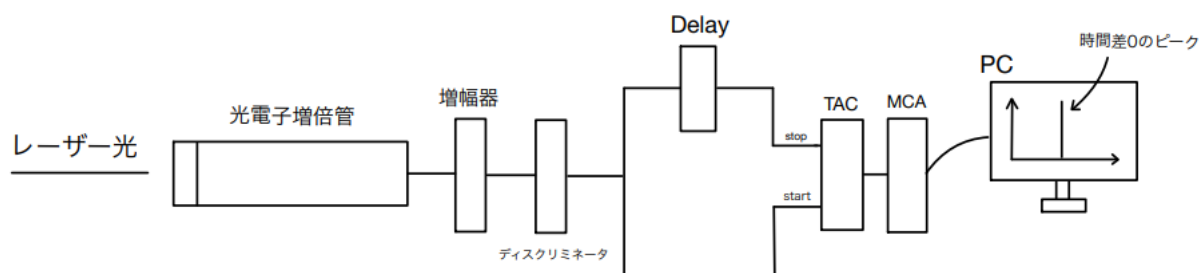


図3 遅延回路を組み込んだ実験装置

1つの光電子増倍管からの信号を2つに分け、TACのstopに続く回路にのみ遅延回路を入れる。ここで遅延の時間とTACのスケールを適切に調整することでMCAからの時間差0における信号の大きさを調節、既知とすることができ、実験計画③での問題点(i)を解決できる。

(ii) について

以下の図に示す実験装置を作成する。

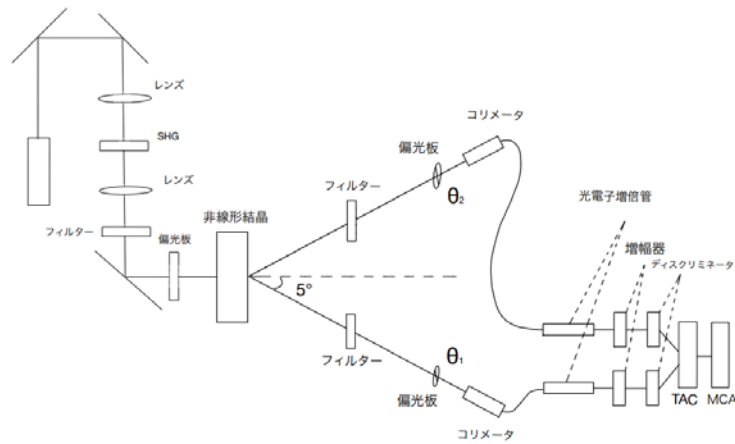


図4 量子もつれを確認するための実験装置

上図のように光子対の進行方向に地面に対して $\theta_1$ と $\theta_2$ となるように偏光板を置き、さらにその光のうち地面に対して水平方向の偏光をもつ光の同時計数を求める。松岡正浩, 『量子光学』, 東京大学出版会 (1996)によると、測定される光が量子もつれを起こしている光子対であれば同時計数  $N$  は  $\sin^2(\theta_1 - \theta_2)$  に比例する値となる。これにより光子対のデータであるかが確認することができ、問題点(ii)を解決できる。

以上の実験終了後、研究計画②において学んだ  $S$  について計測し、ベルの不等式の検証実験を引き続き行いたいと考えている。

<参考文献>

1. *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
2. 松岡正浩, 『量子光学』, 東京大学出版会 (1996).