

2022年度共同利用研究報告書

2022年11月09日

所属・職名 北海道大学大学院工学院応用物理学部門&トポロジー理工学教育研究センター・教授
 丹田 聡

		整理番号	2022a019	
1.研究計画題目	時間・量子測定・準古典近似の理論と実験～古典論と量子論の境界～			
2.新規・継続	新規			
3.種別	一般研究			
4.種目	研究集会(I)			
5.開催方法	対面開催			
6.研究代表者	氏名	丹田 聡		
	所属 部局名	北海道大学大学院工学院応用物理学部門&トポロジー理工学教育研究センター	職 名	教授
7.研究実施期間	2022年07月21日(木曜日)～2022年07月23日(土曜日)			
8.キーワード	時間作用素, 不確定性原理, 小澤の不等式, 正準交換関係, 準古典近似			
9.参加者人数	29人			

10.本研究で得られた成果の概要

<p>1) 既に執筆した論文</p> <p>A. Arai and F.Hiroshima, Annals Henri Poincar'e 18,(2017),2995-3033. K. Nakatsugawa, T. Fujii, and S. Tanda, J. Phys. A in press (2019). K. Nakatsugawa, T. Fujii, and S. Tanda, Phys. Rev. B 96, 094308 (2017).</p> <p>2) 論文出版計画</p> <p>F.Hiroshima and N.Teranishi, Time operators of harmonic oscillator and its representations I, F.Hiroshima and N.Teranishi, Time operators of harmonic oscillator and its representations II, in preparation.</p> <p>3. 本研究計画に至った動機</p> <p>2018年度の日本数学会函数解析分科会で「時間結晶」について講演している実験系の研究者の講演が目にとまった。講演者は北大工学部博士課程3年の中津川さんで、時間作用素を実験で確かめるといった内容の講演だった。2019年9月に北大で開催された科学基礎論の研究会で、時間作用素の階層性について講演する機会を得た。その聴衆の中に中津川さんの指導教員の丹田教授がいて、講演後、「時間作用素を実験で検証したい」という申し出があった。これは絶好の機会だと思い丹田教授と即座に打ち合わせを開始し、本研究会に辿り着いた。</p>

「時間・量子測定・準古典近似の理論と実験 ～古典論と量子論の境界～」の成果報告

丹田 聡

北大大学院工学院応用物理学部門&トポロジー理工学教育研究センター

本研究集会は「時間・量子測定・準古典近似」の理論と実験に関する情報交換・意見交換を目的として実施された。本研究集会は、本来2021年9月開催予定だったが、コロナ禍により2022年3月に延期になり、さらに、2022年7月に再延期になり対面で開催された。総参加者数は28名。講演者数は14名だった。本研究会の開催概要は以下である。

開催概要

開催方法：対面のみ

開催場所：九州大学 伊都キャンパス W1号館 D棟 4階 IMI オーディトリウム (W1-D-413)

主要言語：日本語

主催：九州大学マス・フォア・インダストリ研究所

研究計画題目：時間・量子測定・準古典近似の理論と実験～古典論と量子論の境界～

研究代表者：丹田 聡 (北大大学院工学院&トポロジー理工学教育研究センター)

組織委員：三宮 俊 (株式会社リコー), 廣島文生 (九大大学院数理学研究院)

研究実施期間：2022年7月21日(木)-2022年7月23日(土)

1 目的と期待される成果の概略

本研究会の「目的と期待される成果」として、「量子測定」と「時間」に関するものをあげていた。以下がその概略である。

(1) 量子測定

ハイゼンベルクは1927年不確定性原理を発見し、その衝撃的な帰結は「位置・運動量の同時測定は原理的に不可能」というものであった。しかし、小澤正直は「小澤の不等式」を数学的に導き、ハイゼンベルクの不確定性原理が破れ、位置・運動量の同時測定が可能であることを示した。2012年に長谷川祐司は「小澤の不等式」を実験的に検証し世界中を驚かせた。小澤、長谷川には量子測定理論の理論・実験の最先端の話題を提供してもらおう。

(2) 時間

「時間」と「エネルギー」の不確定性原理も信じられているが、その正確な定式化は未だ確定していない。丹田・中津川らはこの時間の存在の傍証となる「新井・宮本の不等式」を実験的に実証しようと現在試みている。また世界には多くの「時間」の理論的な研究者が存在する。アト秒という凄まじく短い時間を実現できるようになってきた。また、昨今脚光を浴びている量子ウォークでも、それに付随した時間作用素の研究が進んでいる。「時間」に関する実験、理論の専門家に最先端の話題を提供してもらおう。

2 研究成果の概略

(1) 量子測定

小澤正直氏はハイゼンベルクの不確定性原理に代わる小澤の不等式を 2003 年に提唱した。本研究会では、厳密な量子測定の誤差の定義と測定値の観測者の独立性に関する講演を行った。長谷川裕司氏は、小澤の不等式が実際に実験的に検証できることを 2012 年 (Nature Physics 2012 年 1 月 15 日号) に証明し世界に衝撃を与えた。これは、ある意味で、1927 年にハイゼンベルクが提唱した不確定性原理を破ることを意味する。その後、その実験は、世界中で何度も再現され、精密化が大いに進んだ。今回は小澤の不等式の、スピンを使った実験的検証に関する最新結果の紹介を行った。

ドレスト光子は「電子をまとった光子」という概念であるが、通常の光学であるオンシェル科学に対して、オフシェル科学と称されることがある。IMI 共同利用でも「解析から設計に向けたオフシェル数理科学」という研究計画題目で 2021 年度に研究会が開催されている。ドレスト光子の産業界への応用として、物質表面平坦化研磨技術やハイパワー発光素子が挙げられる。これらの一部は特許にもなっている。ハイパワー発光素子は、一般に発光しないとされている物質 (Si, SiC) を発光させるもので、その仕組みにドレスト光子なるものが介在していると考えられているが、その理論的な枠組みは未解明である。三宮俊氏は、数値シミュレーションによって、ドレスト光子が介在する物理現象の存在について講演を行った。

丹田聡氏はトポロジカル工学の創始者で、2002 年に世界で初めてメビウスの帯を結晶で作ることに成功し、Nature 誌上 (2002 年 5 月 23 日号) でセンセーションを巻き起こした。今回は、トポロジーと量子観測にまつわる刺激的でサジェスティブな講演を行った。メビウスの帯が実際に結晶として構成できるので、メビウスの帯の結晶上に磁場をかけるなど、物理現象としても、純粋数学の理論としても非常に興味深い問題提起も行った。

筒井泉氏は日本を代表する素粒子論の実験施設である高エネルギー加速器研究機構からの講演であった。B 中間子崩壊に関する最先端の話題を講演した。

2022 年度のノーベル物理学賞は「量子もつれ」の研究者に授与された。また、近年は量子コンピューターの実装がかなり現実味を帯びてきた。廣川真男氏は開発の視点から見た量子コンピューティング、センシング、シミュレーションに関する講演を行った。

(2) 時間

アインシュタインの一般相対論によれば、時間の観測は重力の影響を受けることが知られている。現在、その精度は驚くべき精密さに到達している。例えば、スカイツリーの頂上と地面の高低差の重力の違いを、時間の遅れで観測することができる。「光格子時計」によって、地上 450m の東京スカイツリー展望台と地上の標高差を利用して、一般相対性理論による時間の流れの違いを検証することに成功した。高本将男氏は世界を代表する「光格子時計」の研究者の一人であり、時間測定最先端の話題を講演した。

ハミルトニアン H に付随した時間作用素 T の存在から

$$|(f, e^{-itH}g)| \leq \frac{C_n}{t^n}$$

なる不等式「新井・宮本の不等式」を導くことができる。中津川啓治氏は、シミュレーションにより、現実の物理現象を再現し、「新井・宮本の不等式」の存在の傍証を示した。また、物理的には、調和振動子に付随した様々な時間作用素の存在が知られている。しかし、数学的に厳密な理論や分類理論は存在しない。廣島文生氏は、角作用素に焦点をあてて時間作用素の解析の入門を講演した。寺西功哲氏は、 L をシフト作用素として、

$$\frac{i}{m} \log(\omega + L^m), \quad \omega \in \mathbb{C}, m \in \mathbb{N}^\times$$

の形の調和振動子に付随した時間作用素の分類に関する講演をした。

量子力学の数学的な設定はフォン・ノイマンによってなされた。約 90 年が経過し、その理論は現在、純粋な数学理論へと発展している。岡村和弥氏は量子力学のダイナミクスを純粋数学理論の枠組みで講演した。

ノーベル賞受賞者である F・ウィルチェックにより時間結晶の概念が提出された。しかし、その理論的な存在は確定していない。守屋創氏は作用素環論による手法で、量子平衡系の時間対称性の破れの非存在の厳密な結果を紹介し、時間結晶の概念に一石を投じた。

量子ウォークはシュレディンガー作用素のアナロジー的な側面が発見され、近年、大進展を見せている。量子観測などへの関連性も発見されている。和田和幸氏は、1次元スプリットステップ量子ウォークに現れる Witten 指数についての講演を行い、佐々木格氏は、量子ウォークに付随した強時間作用素のスペクトル解析に関する講演を行った。

3 プログラム

7月21日（木）

- 14:00-14:50 小澤 正直 (中部大学・名古屋大学)
量子測定とは何を測定するのか：測定誤差の定義と測定値の観測者独立性
- 15:00-15:50 和田 和幸 (八戸工業高等専門学校)
1次元スプリットステップ量子ウォークの Witten 指数
- 16:00-16:50 三宮 俊 (株式会社リコー)
量子密度行列を用いた数値シミュレーションによるドレスト光子介在物理現象の記述
- 17:00-17:50 長谷川 裕司 (北海道大学・ウィーン工科大学)
中性子光学実験による基礎量子物理学の探究

7月22日（金）

- 10:30-11:20 廣島 文生 (九州大学)
調和振動子に付随した時間作用素
- 11:30-12:20 寺西 功哲 (北海道大学)
 $\ell^2(N)$ における調和振動子の時間作用素
- 14:00-14:50 中津川 啓治 (物質・材料研究機構)
量子結晶を用いた「新井・宮本の不等式」の実証へ向けて
- 15:00-15:50 丹田 聡 (北海道大学)
Quantum Topological Science and Technology:Real-space and K-space Topological Control
- 16:00-16:50 筒井 泉 (高エネルギー加速器研究機構)
B中間子崩壊に見る素粒子物理と量子力学の基礎との交流
- 17:00-17:50 高本 将男 (理化学研究所)
光格子時計がもたらす新たな時間計測とその応用

7月23日（土）

- 10:30-11:20 岡村 和弥 (名古屋大学)
C*-代数的量子論におけるシュレディンガー描写
- 11:30-12:20 守屋 創 (金沢大学)
量子平衡系の時間対称性の破れの非存在に関する厳密な結果の紹介
- 14:00-14:50 佐々木 格 (信州大学)
量子ウォークの時間作用素について
- 15:00-15:50 廣川 真男 (九州大学)
開発の視点から見た量子コンピューティング、センシング、シミュレーション