

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトンクス : 3.11 ナノ領域光科学・近接場光学

2025年3月16日(日) 13:00 ~ 14:45 皿 K508 (講義棟)

[16p-K508-1~6] 3.11 ナノ領域光科学・近接場光学

西郷 甲矢人(長浜バイオ大)、岡村 和弥(中部大)

13:00 ~ 13:15

[16p-K508-1]

流れが誘導する平衡から遠い量子構造 V

○坂野 齋¹ (1.山梨大工)

13:15 ~ 13:30

[16p-K508-2]

ミクロ・マクロ双対理論と一般相対論を繋げるドレスト光子場について

○佐久間 弘文¹ (1.ドレスト光子研)

13:30 ~ 13:45

[16p-K508-3]

過程・因果・非可換確率：圏構造からオフシエル科学へ

○西郷 甲矢人¹ (1.長浜バイオ大学)

14:00 ~ 14:15

[16p-K508-4]

ボアの相補性と量子インストルメントについて

○岡村 和弥¹ (1.中部大工)

14:15 ~ 14:30

[16p-K508-5]

ドレスト光子フォノンの移動の明歩道と暗歩道

○大津 元一¹、瀬川 悦生²、結城 謙太³、齋藤 正顕⁴ (1.ドレスト光子研究起点、2.横浜国大、3.Middenii、4.工学院大)

14:30 ~ 14:45

[16p-K508-6]

エネルギー離調によるドレスト光子の停留および散逸制御

○三宮 俊¹ (1.リコー)

流れが誘導する平衡から遠い量子構造 V Current-induced Non-equilibrium Structure V

○坂野 齋 (山梨大院)

○Itsuki Banno (Univ. of Yamanashi)

E-mail: banno@yamanashi.ac.jp

川添, 大津らの開発したフォトンブリーディング (PB) [1] は間接遷移型半導体から高効率発光デバイス作成を可能にする方法で, その発光波長を決めるのは物質のバンドギャップではなくプロセス中の照射光波長である; このような発光波長制御方法は従前の物質選択によるものと全く異なり, 光学のエポックメイキングである.

PB で作成されたデバイスは間接遷移型半導体からの高効率発光だけでなく, 同時に巨大磁気光学効果 [2] や強磁性 [3] を発現する. 現象の強さは大きなコヒーレント長の電子系の存在を, また, 磁気的現象は内在ベクトルポテンシャル (内在 VP) の関与を示唆する. この考えの下, 前回までに内在 VP を原因とする間接遷移型半導体の発光増強, 及び, 巨大磁気光学効果のトイモデルを提案した [4]. 2つのトイモデルは, VP に対する物質の非線形応答を非摂動論的に考慮してマクスウェル方程式を導く変分原理によるもので, 達成される状態は内在 VP が存在する流れがある動的状態; 基底状態から遠く, 摂動論では辿りつけない状態であった.

これらのトイモデル; 非線形マクスウェル方程式を導く変分原理は, 非相対論系の量子電磁力学の作用積分を以下の処方でのち, 簡単化したものである; (1) 4元誘導電流密度を結果, ゲージフリーの電磁ポテンシャルを原因とする線形・非線形感受率を物質の作用の電磁ポテンシャルによる汎関数微分としてハイゼンベルグ演算子の形で求める. この感受率は相反性をもち, 電荷保存則を保証し, ゲージ関数を核とする. (2) 非相対論系において電荷密度 (4元電流密度の第0成分) と VP の2次が結合することを系統的に考慮するため, 電磁ポテンシャルと非線形感受率の変換を導入する. 変換後の非線形感受率演算子は簡単な漸化式を満たす. (3) 線形・非線形感受率により, 電磁ポテンシャルの汎関数として記述された誘導電流密度を電子系を最適化済みものとして変分原理に取り込むために, 電磁ポテンシャルの振幅のパラメータ積分を導入する. (4) 非線形応答のうち, 電荷密度と VP の結合を無限次まで考慮する. (5) 相応しい電子状態で期待値をとる.

この発表では, 主に (5) の電子状態について議論する. 望ましい状態は電子-正孔対が存在する状態で電荷密度演算子に対して再帰的なものである. ハイゼンベルグ表示から相互作用表示に書き直せば, 作用積分の期待値を通常の量子電磁力学の手法で評価できる.

謝辞

大津元一博士が主宰されるドレスト光子研究起点 (RODreP) での研究会のメンバーの方々に感謝いたします. この研究の一部はドレスト光子研究起点からの援助を受けています.

参考文献

- [1] T. Kawazoe and M. A. Mueed and M. Ohtsu, Appl. Phys. B, **104** p.747–754(2011); M. A. Tran, T. Kawazoe, and M. Ohtsu, Appl. Phys. A, **115** p.105-111(2014); M. Ohtsu, "Silicon Light-Emitting Diodes and Lasers" (Springer International Publishing, Switzerland, 2016).
- [2] N. Tate, T. Kawazoe, W. Nomura, and M. Ohtsu, Scientific Reports **5** p.12762-1-7 (2015); M. Ohtsu,
- [3] 門脇 拓也, 川添 忠, 大津 元一, 佐野 雅彦, 向井 孝志. 「ドレスト光子による誘導放出を利用した波長 1.3~1.9 μ m 帯の非冷却型 Si 受光素子」, 応用物理学会 2021 年春季学術講演会, 17p-Z14-8.
- [4] 坂野 齋, 「流れが誘導する平衡から遠い量子構造 III」 2024 年春季学術講演会, 24a-11F-1; 坂野 齋, 「流れが誘導する平衡から遠い量子構造 IV」 2024 年秋季学術講演会, 18p-A33-13.

マイクロ・マクロ双対理論と一般相対論を繋げるドレスト光子場について

On the dressed photon field connecting micro-macro duality and general relativity theories

ドレスト光子研究起点、佐久間弘文

RODreP, Hirofumi Sakuma

E-mail: sakuma@rodrep.or.jp

ドレスト光子 (DP) 研究は、言うまでもなく「光の場」に基づく研究であり、「光の場」は共形不変性 (scale free) を持つ故に、DP 研究から思いがけずに宇宙論に繋がる研究が花開いた事はこれまでも説明を行った。宇宙論は量子物理と古典物理の2分野の知見が必須な膨大な未解明分野であり、その理解には、先端的加速器の実験結果に基づき大きく進展した素粒子論の知見と一般相対論の知見が必須となっている。発表者は、DP に関しての大津等の多くの実験結果と、公理的アプローチに基づく代数的量子場理論である小嶋のマイクロ・マクロ双対理論 (MMD) [1] を組み合わせると、宇宙論において未だ手つかずに残っている「時空の物理」について興味深い知見 (ダークエネルギーやマター等) が得られる事を、これまで段階的に示して来た [2,3]。何故「時空の物理」かと言えば、それは相対論が示す様に、「光の場」と「時空」は密接に関係しているからである。

本発表は、これまで示して来た複数の知見を、MMD の内部構造と一般相対論の内部構造が持つ共通性を重要な手がかりとして、現在、更に発展している研究の現状を簡単に紹介するものである。研究の大局的方針を確かにする為に、素粒子論に関する複雑な数値スキームは横に置いて、MMD により数学的にも裏打ちされた「量子-古典対応」という発見的問題手法により得られつつある興味深い知見の核心的部分を簡単に紹介する。

古典物理としての相対論には“光速の壁”が存在する為に、timelike な時空領域のみが対象となるが、Greenberg-Robinson 定理 [1] が示す様に、量子場理論に於いては、(波動の位相速度が) 超光速となる spacelike な時空も重要な“物理空間”となる。また、その様な拡張された視点から見た timelike な“物理空間”とは如

何なるものかという事は、これまでの一連の研究で明らかにして来た (以下、「新時空モデル」と呼ぶ)。では、「その量子論的構造とは如何なるものか？」が今回のテーマであり、これはもちろん量子重力場と深く関係する先端的なテーマである。

昨年、低温物性物理の分野では chiral graviton [4] と呼ばれるスピン2の粒子の存在が報告されたが、「新時空モデル」では、まず重力を介在する gauge graviton (GG) と呼ぶべき光速のスピン2のボゾン場の存在を容易に示す事ができる。

通常のスピン1の光子と異なる点は、プラズマ粒子が磁力線に絡みついて進む様に、GG は測地線を絡む様に進み、その構造は光渦と同じで軌道角運動量を持つ為、スピン角運動量と併せてそのスピンは2となっている。また、その様な GG に対して、おそらくヒッグス機構に似たメカニズムにより、亜光速のスピン2の粒子が生成され、それがダークマターの様に振る舞う事を示す事ができる。物性物理で示された chiral graviton は、定性的にはこのダークマターに対応する。この様な理論の発展は、DP モデルの更なる深化へと繋がり、DP が介在する磁気光学効果 [5] にも関係すると思われる。

参考文献

- [1] ここからはじまる量子場、大津元一、小嶋泉 (編著) 朝倉書店、2020。
- [2] H. Sakuma and I. Ojima, *Symmetry* **13**, issue 4, (2021).
- [3] H. Sakuma, I. Ojima, H. Saigo and K. Okamura, *Int. J. Mod. Phys. A* **37** No. 22, 2250155 (2022).
- [4] J. Liang et al, *Nature* **628**, 78-83 (2024)
- [5] T. Kadowaki, T. Kawazoe & M. Ohtsu, *Scientific Reports* (2020) 10:12967.

過程・因果・非可換確率：圏構造からオフシェル科学へ

Process, Causality and Noncommutative Probability: From Categorical Structures to Off-shell Sciences

○西郷 甲矢人 (長浜バイオ大学)

○Hayato Saigo (Nagahama Institute of Bio-Science and Technology)

E-mail: h.saigoh@nagahama-i-bio.ac.jp

これまでの本学会における講演では、[2, 3]に基づき、量子場とその状態を「(部分的な) 対合構造をもつ圏上の圏代数とその上の状態」として定義することにより、圏構造としての相対論的構造と非可換確率構造としての量子論的構造を直接に統合できることを示し、代数的量子場理論や位相的量子場理論などの先行するアプローチとの概念的関係についても論じた。またこれらを踏まえてオンシェル・オフシェルの概念を見直し、時空を「(構造づけられた) 点集合」としてではなく「圏」—より詳細に言えば「(部分的な) 対合構造を持つ因果的圏」[3]—として見直すことが、ドレスト光子研究 [1] に端を発するオフシェル科学にとって核心的であるという見方を提示した。

本講演においては、これまで抽象的に扱われてきたこの「因果的圏」として物理学的にどのようなものを考えるべきか明らかにする。

出発点は系、環境、それらの合成系、その合成系の環境＝「メタ環境」といった基本概念を踏まえて、「可能な過程のなす圏」を考えることである。この圏からは「因果性の圏」が定まる。因果性の圏は、「これがないとき、これがない」という関係性を、「因果的条件」とでもいうべき「媒介」をなす過程の集まりを通して定式化した「因果性」を射とする圏である。一般に圏は、「ダガー圏」とよばれる対合構造を持つ圏の部分圏として考えられ、この「因果性の圏」とそれをつつむダガー圏の対は「因果的圏」となる。このような因果的圏を、オフシェル科学にとっての時空として捉えることを提案したい。

Acknowledgments

本研究は (社) ドレスト光子研究起点の助成を得た。

参考文献

- [1] M. Ohtsu: *Dressed Photons* (Springer, Berlin Heidelberg 2014)
- [2] Saigo, H. Category Algebras and States on Categories. *Symmetry* **2021**, *13* 7, 1172. <https://doi.org/10.3390/sym13071172>
- [3] Saigo, H. Quantum Fields as Category Algebras. *Symmetry* **2021**, *13* 9, 1727. <https://doi.org/10.3390/sym13091727>

ボーアの相補性と量子インストルメントについて

On Bohr's complementarity and quantum instrument

中部大工¹, ○岡村 和弥¹

Chubu Univ.¹, ○Kauzya Okamura¹

E-mail: k.okamura.renormalizable@gmail.com

実験結果の解析および理解に不可欠な、ボーアの相補性と量子インストルメントについて講演する。量子系に対する実験結果の説明には測定対象と測定装置の間の区別および相互作用が不可欠であり且つ古典物理学の用語で行われなければならないという制約を認め、そして、異なる実験設定相互の排他関係がありながらもそれらがつながる**全体性** (wholeness) を量子系は有しているとする「科学的な分析と総合のあり方の更新・革新」が、ボーアの**相補性原理** (complementarity principle) である。1920年代後半に提唱されアインシュタインとの論争の中で洗練されてきた経緯がある [1, 2]。

現在がボーアの時代と大きく異なる点は、**代数的量子論**により概念が洗練され、**量子インストルメント**に基づく量子測定理論が確立していることである [3, 4, 5]。代数的量子論とは、ある $*$ -代数 (行列の随伴の一般化にあたる対合 $A \mapsto A^*$ をもつ代数) X の自己共役元を物理量とし、 X 上の期待値汎関数 $\omega : X \rightarrow \mathbb{C}$ として状態を定め、これらに基づいて量子系を記述する体系である。そして、量子インストルメントは物理的に実現可能な測定に対応しており、測定装置の出力のなす確率分布およびそれに従う系の状態変化を記述するために用いられる。厳密には、 C^* - L^1 空間の間の完全正値写像に値を取る確率測度を量子インストルメントと呼ぶ。小澤の不等式などの、測定誤差と擾乱の間の不確定性関係の導出は量子インストルメントの理論に基づいている。

本講演では、相補性原理の数学的表現が量子確率論および量子インストルメントによって与えられることを示す。ハルボソンとクリフトンは、考察する状況において値をもつ物理量の集まりに対応する**存在可能量代数** (beable subalgebra) [6] を定めた。彼らはこれを用い考察する状況における古典物理学での用語が通用する範囲を定め、アインシュタイン・ボーア論争でのボーアの返答を再考した [7]。今回、量子インストルメントを用いて存在可能量代数を定め、これにより先行研究よりも整合的な相補性原理の数学的表現が得られることをみる。

参考文献

- [1] N. Bohr, Phys. Rev. **48** (1935), 696–702.
- [2] N. Bohr, Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics. In: *The Philosophical Writings of Niels Bohr*, Vol. II, (Ox Bow Press, 1987). [Originally published at *Albert Einstein: Philosopher-Scientist. The Library of Living Philosophers*, Vol. VII, edited by P.A. Schilpp, (Northwestern Univ., Evanston, 1949).]
- [3] M. Ozawa, J. Math. Phys. **25** (1984), 79–87.
- [4] K. Okamura and M. Ozawa, J. Math. Phys. **57** (2016), 015209.
- [5] K. Okamura, Symmetry **13** (2021), 1183.
- [6] H. Halvorson and R. Clifton, Int. J. Theor. Phys. **38** (1999), 2441–2484.
- [7] H. Halvorson and R. Clifton, Reconsidering Bohr's reply to EPR. In: *Non-locality and Modality*, edited by T. Placek and J. Butterfield, pp. 3–18, (Kluwer, Dordrecht, 2002).

ドレスト光子フォノンの移動の明歩道と暗歩道

Bright and dark walks for dressed-photon-phonon transfer

ドレスト光子¹, 横浜国大², Middenii³, 工学院大⁴○大津元一¹, 瀬川悦生², 結城謙太^{3,4}, 齋藤正顕⁴Res. Origin Dressed Photon¹, Yokohama Ntnl. Univ², Middenii³, Kogakuin Univ.⁴○Motoichi Ohtsu¹, Etsuo Segawa², Kenta Yuki^{3,4}, Seiken Saito⁴

E-mail: ohtsu@rodrep.or.jp

【まえがき】ドレスト光子フォノン (DPP) のエネルギーは入力端子としての複数の小型ナノ寸法粒子 (NP:NP_I) から、それらの中心に設置された出力端子としての大型 NP (NP₀) へと移動する [1]。この現象に関し、本講演では量子ウォーク (QW) モデルに基づく数値計算により明歩道と暗歩道があることを指摘する。

【方法】QW モデルに沿側閉歩道の概念を導入する [2]。解析モデルとして5つの NP_I が配列された五角形の中心に NP₀ を設置する。五角形の全スポークが連結された場合 (図 1(a))、いくつかのスポークが切断された場合 (図 1(b)) を考える。各 NP_I に入力信号を注入し DPP エネルギーが五角形外周の経路とスポークを移動して NP₀ に達し、エネルギー散逸・放出の結果生成する出力の信号強度を数値計算で求める。

【結果】スポーク切断後に残る連結スポーク数 n_{con} と出力信号強度との関係を図 1(c) に示す。この関係の特性は次の二要件によって決まる。(1) n_{con} が奇数 (=1, 3) の場合、全スポークが連結される場合 ($n_{con}=5$) と等しい出力信号を生ずる。これらは三重縮退した明歩道である。(2) n_{con} が偶数 (=2, 4) の場合、エネルギー移動経路は明歩道と暗歩道とに分かれる。明歩道に注入された入力信号は出力端子に到達し出力信号を生ずる。しかしそれに寄与する入力信号の数は $n_{con}=5$ の場合に比べ少ないので、出

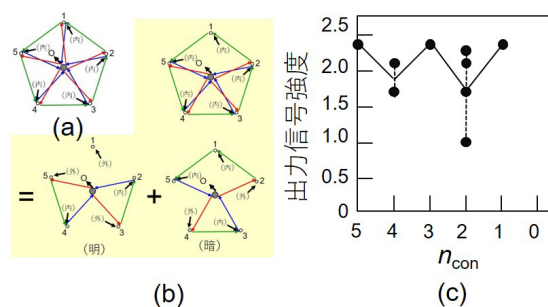


図 1 連結スポーク数 n_{con} と出力値との関係。

(a) 全スポークが連結。(b) スポーク 1 が切断。明歩道と暗歩道。(c) 数値計算結果。

力信号は減少する。一方、暗歩道に注入された入力信号はその中に閉じ込められ出力信号を生じない。両歩道は分子中の電子エネルギーの明状態、暗状態に相当する。上記の特性は多角形の角数には依らず、 n_{con} のみに依存する。

【まとめ】DPP エネルギー移動は連結スポーク数に依存し、明歩道のみを取る場合、及び明歩道と暗歩道からなる場合があることを見出した。前者は縮退し、スポークのいくつかが切断していても出力信号は減少しない。後者では一部が暗歩道に閉じ込められる。これらは実験結果、予備的解析結果と整合した。

【文献】 [1] Naruse, et al, *Nano Commun. Networks* **2**, (2011) pp.189-195.

[2] M. Ohtsu, et al., *Off-shell Archive* (July,2024) Offshell: 2407O.001.v1. DOI 10.14939/2407O.001.v1

https://rodrep.or.jp/en/off-shell/original_2407O.001.v1.html

エネルギー離調によるドレスト光子の停留および散逸制御

Retention and Dissipation Control of Dressed Photons by Energy Detuning

(株)リコー ◯三宮 俊

Ricoh Co., Ltd., ◯Suguru Sangu

E-mail: suguru.sangu@jp.ricoh.com

1. はじめに

ドレスト光子のエネルギー移動の特性理解および制御について、これまで量子密度行列を用いた数値シミュレーションによる検討を進めてきた。本シミュレーションは、ドレスト光子を(格子振動まで含めた)物質系と光子場が混成した離散ノードの束縛状態と見なすことで、局在性や弾性的なエネルギー移動といったドレスト光子の特徴を定性的によく説明している。前回の応用物理学会では、空間的に自由に配置した複数ノードにおけるドレスト光子の集団励起状態を調べ、複数ノードの凝集にともない特定の高励起状態が選択的に励起されることを確認した一方で、系外へのエネルギー取出しに高励起状態を援用できるかといった問いには解を得ていない[1]。

上述内容を受け、本研究では物質系内のドレスト光子の状態を制御し、効率的に外部へエネルギーを取り出す(散逸させる)機構を導き出すことを目的とし、そのためにエネルギー散逸機構としてエネルギー移動に選択制をもたせる意味でノード対を配置し、ノード対のエネルギー離調がもたらす効果について数値解析を行った。なお、エネルギー離調に注目した背景には、少数ノードの空間対称性を起源とするドレスト光子の機能動作の先行知見がある[2]。

2. 数値シミュレーション例

Fig. 1 に、本稿に例示する数値シミュレーションモデルを示す。4 個の対称配置されたノード(二準位系)と、その中央に配置したノード対(出力)による構成を考え、ノード対のエネルギーを正負に調整し、数値シミュレーションを実施した。Fig. 2(a)および(b)は、各ノードにおけるドレスト光子占有の有無を基底状態とした占有確率であり、それぞれ離調量 0 と 1(隣接ノード間結合強さに対する相対値)の場合を示している。図中の数値列(「;」はノード対とその他ノードの分離記号)は基底状態の一部を示し、適切な正離調が出力ノード対へのエネルギー流入を抑制する様子を確認できる。

発表では、ドレスト光子の高励起状態を絡めたエネルギー散逸経路や散逸効率への影響についての議論を行う予定である。

参考文献

- [1] 三宮, 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集(2024) 18p-A33-19.
 [2] M. Ohtsu (Ed.), Progress in Nano-Electro-Optics V (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006) 1-62.

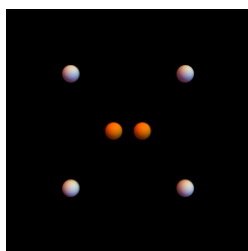


Fig. 1: 数値シミュレーションモデル

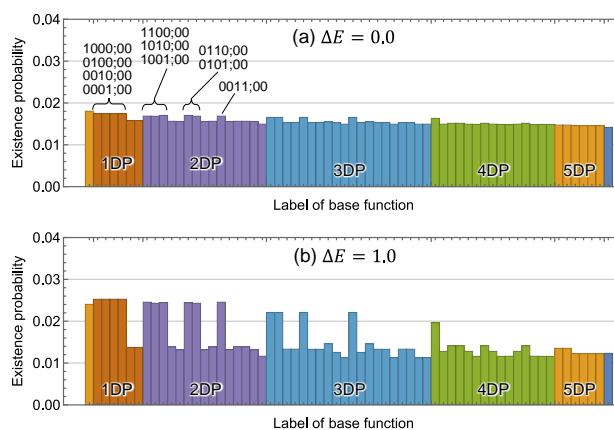


Fig. 2: 基底状態の占有確率; (a)離調ゼロ, (b)正離調