

フォトンブリーディングデバイスの研究における先入観

坂野 斎

山梨大学工学部 *

(Dated: June 25, 2025)

私はフォトンブリーディング (PB) デバイスの動作について量子電磁力学の枠組み内で理論をつくりながら、その時々思いや考えをオフシエル科学フォーラムに書かせていただきました [1]-[9]。理論は最終段階ですが、来し方をふりかえると、光学、電磁気学、量子力学、熱力学の分野で自らの先入観に気づくことが多々ありました。ここでは、いままで書いた記事から個人的誤解にとどまらないと思われる先入観とそれが生じる原因を推察して、ここに記したいと思います。この分野に興味をもたれた方のお役にたてば幸いです。

川添、大津らの開発した PB プロセス [10] は直接遷移型、間接遷移型を問わず、半導体から高効率発光デバイスの作成を可能にします。発光波長を決めるのはプロセス中の照射光波長であり、従前の物質のバンドギャップ選択ではなく、その仕組みの詳細は未解明です。PB デバイスは高効率発光だけでなく、巨大磁気光学効果 [11] や強磁性 [12] を発現し、光学フォノンが関与 [13] している実験的証拠があります。現象の強さとフォノンの関与は大きなコヒーレント長の振電系の存在を、磁氣的現象は内在ベクトルポテンシャル (VP) の関与を示唆します。

格子振動と電子の強い結合をもつ PB デバイスの動作を研究対象にしたのは、発光波長を物質のバンドギャップでなく、製作中に照射するレーザー光波長で決めるという革新性の魅力だけでなく、その動作メカニズムの探求が、格子振動と電子の結合が重要な他の現象；化学反応、超伝導などにも関係するだろうと考えたからでした。この拡張性は、超伝導でマイスナー効果を導く構成方程式を提案したロンドンの先見：「反磁性電流は物質に遍在し、生体では酵素反応に関わっているだろう」という考えにも適うものです [2]。

PB デバイスの動作の理論的記述にあたっては、非平衡熱力学の散逸構造の理論の骨格を抽象して、概念図 Fig.1 のように考えました。横軸は秩序変数として内在 VP の横成分の振幅、縦軸は電子系について最適化済みの作用です。非線形性をもつ作用（緑線）に横光学型格子振動（TO フォノンの古典場）の電流密度と VP の結合の作用（青線）が加わった全作用（赤線）に、 A_2 のような停留点、つまり、VP の振幅が大きな状態が現れるというシナリ

*Electronic address: banno@yamanashi.ac.jp

オです。停留点 A_0, A_1, A_2 は、物質中のマクスウェル方程式の解ですが、これらを変分法で探索します [6], 【関連】 [1, 5, 7, 8].

1. 動的状態を記述するには、エネルギー（ハミルトニアン形式）ではなく作用（ラグランジアン形式）に基づくのが相応しいです。量子論の物質への適用は歴史的に、原子、分子の束縛状態の記述からはじまり、それはエネルギーの最小値原理で成功を納めてきました。そのため、ハミルトニアンに依拠しようとする先入観・習い性があるって、動的状態の扱いに困難をもたらしているように思います [5].
2. 電場、磁場ではなく電磁ポテンシャルこそが電磁場の実体です。特に、近接場、内在場は電場・磁場での記述はできず電磁ポテンシャルでの記述が必須になります。電磁ポテンシャルの重要性が強調されてこなかった理由はいくつかあると思います：電磁ポテンシャルがゲージ変換不変でなく物理量とみなされなかったこと、光学の主な関心の対象が光源から遠い電磁場か、物質の励起と共鳴する電磁場であり、電場、磁場で記述可能だったこと、電磁ポテンシャルは補助的な量と思われてきたこと、量子電磁力学でも、特に VP の必須性が明確に認識できる現象がアハラノフ=ボーム効果とマイスナー効果と少数だったこと、などが原因ではないでしょうか [4].

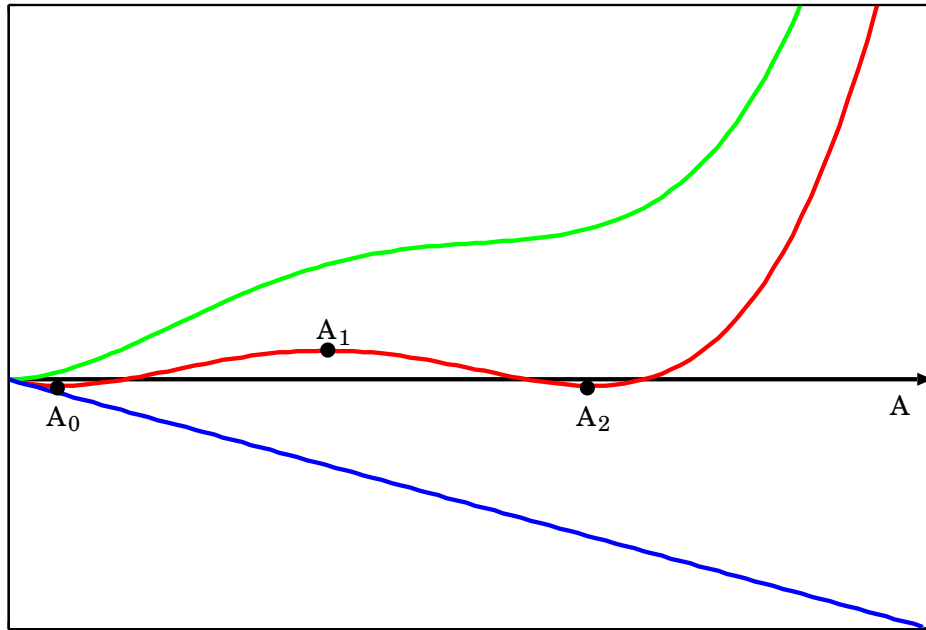


FIG. 1: Ref.[6] の図を少しだけ変更して再掲。縦軸は電子系を最適化済みの作用，横軸は VP の横成分の振幅，緑線：電子系の複雑な作用，青線：横光学型格子振動と VP の結合の作用，赤線：緑線と青線を加えた全作用。停留点 A_0, A_1, A_2 がマクスウェル方程式の解。緑線が単調増加でも青線を加えた赤線では基底状態から遠いところに新たな停留点が現れる。

3. 非相対論系において VP の横成分はゲージ変換不変で物理量、秩序変数としての資格があります（ゲージ変換で変わるのは VP の縦成分です）。量子電磁力学の分野で VP の横成分を物理量と見なさなかった理由は、前項のように電磁ポテンシャル全体はゲージ変換不変でないことその他、量子論の主戦場である素粒子論などの相対論系で、3 元ベクトルの横、縦成分はローレンツ変換で混じり合うので、縦、横の定義の意味を失うことがあります。非相対論系でも、物質中の通常の状態では内在 VP の効果は極めて小さいこともあったと思います。
4. ボルン=オッペンハイマー近似を越える次の近似として、古典場としての格子振動の電荷密度・電流密度と電磁ポテンシャルとの結合を考慮する段階があります。格子振動を担うイオン核は電子に比べて 10^3 以上の質量をもち古典的扱いは合理的です。しかし、この段階を越えて多くの場合、格子振動は量子化してフォノンとして導入されます。その理由は量子化された調和振動子の扱いは簡単で、一定の成功を納めてきた履歴があるからと思われます。
5. 格子振動（フォノン）は、相対論系でフレームをイオン核の平均位置が静止して見えるものに固定した場合のイオン核の余剰の動きです。つまり、ローレンツ変換不変な相対論系から非相対論系への対称性の低下後に意味をもつ概念です [3]。私ははじめから非相対論系を扱ってきたので困難はなかったのですが、挙げさせていただきました。
6. 作用の非線形性を求めるのに、作用の電磁ポテンシャルによる汎関数微分が線形・非線形感受率であることを使います。感受率を求めることは量子電磁力学の作用において電子の自由度の最適化に相当し、逆に、線形・非線形感受率から VP の非線形の依存性を含む作用を構成できます。作用と感受率の関係が使われなかった理由は、量子状態を記述するのに作用を使うことが稀であったためと思われます。
7. 線形・非線形感受率はゲージフリーのハイゼンベルグ演算子として求め、電荷密度保存則とゲージ変換不変性が感受率の属性として組み込まれています。ハイゼンベルグ演算子の感受率が使われてこなかったこと、電荷保存則とゲージ変換不変性が感受率の属性として認識されなかったこと理由は、ハイゼンベルグ描像での実際的計算は手間がかかるとわれてきたこと、特に、非相対論系においてシュレディンガー描像か相互作用描像、また、クーロンゲージに固定する方法が定石になっていることと思われます。
8. ハイゼンベルグ演算子の非線形感受率は、本来、大変複雑な式ですが、適切な変換で線形感受率を初項とする漸化式で系統的に扱えます。非線形感受率を系統的に扱おうとしてこなかった理由は、低次の摂動が主な関心の対象であったこと、非線形応答の無限級数が必要となる状況が稀であったことではないでしょうか。
9. 作用の非線形性を求めるにあたり、横光学型格子振動の横電場による非断熱効果の考慮は必須でした。私もこれになかなか気づきませんでした。その原因は、格子振動をフォノンと

量子化する段階で、前述のように光学型か音響型かという性質が捨象され、格子振動と電子の結合は縦電場（スカラーポテンシャルの勾配）と電子の結合とする定石ができあがっていたことと思われます。

10. 内在電磁場への電子系の応答において、どのような因果律が支配しているかという未解決の問題があります。「原因が結果に先行する」という通常の因果律を内在電磁場への電子の応答に適用するのは、マクロの世界で認められたものを推認によってミクロの世界に適用していて実証主義に則っていないと私には思えます。そうになってしまう理由は人間の脳新皮質の本来的な使命によるものではないかということを [9] で述べました。

かつて、ピアニストの方から、「芸術はみな生まれてからすべてを自分で培わねばならない」とお聞きしたことがあります。その意味では理学、工学の学問は、先人の積み上げた論理や経験を世代を越えて継承、利用でき一人では不可能な大きな発展をもたらします。一方、効率主義的側面から、基本を自分で納得するまで考える余裕があたえられない場合もあり、時々、先入観に駆動されてしまいます。量子電磁力学の既存の枠組みの中で研究を進めるにあたって、新しいことをするより、自分が中途半端に知って先入観になっていることを排除する手間が大きいことを実感しました。気づいた自分の先入観を明らかにすることが何かの役立つかもしいないと思ひ、ここに書かせていただいた次第です。

以上が本文ですが、少し個人的な思いを書かせていただこうと思います。PB デバイスの動作に特化して研究をしてきたのは、私が化学出身だったからかもしれません。

化学に関する特別の思いは、小学校の理科の先生が企画してくれた実験で、釘を水のなかに吊して錆びていく現象を観察することから生じました。何が面白かったのかを言葉にするのは難しいのですが、その後、中学・高校では触媒反応に魅力を感じ、それはいまでも続いています。大学では、3年生以降化学を専攻しましたが、午前は講義、午後はすべて学生実験という環境でした。恩師の無機化学の授業では、周期律表を前におき、「化学では規則というものは周期律表ぐらいしかないからねえ」といって、「酸素属の水素化物は H_2O , H_2S , H_2Se , H_2Te と下に行くほど臭いんだ」と教えてくれたりしました。いかにも毒が強そうな H_2Se 以降を本当に嗅いだのか？と思ひながら聞いていました。唯一の拠り所とされた周期律表ですら、原子番号 43 に突然、放射性元素テクネチウムが現れたり、原子番号 80 という周期律表の下のように液体金属の水銀があったりしてとても不思議です。ここまで、演繹に力がない学問も珍しいようにおもいますが、私は実験が大好きでしたので、化学は楽しい学問でした。

物質の多様性を面白いという感覚、わかる部分は現実の一部しかないという諦観を化学で身につけたと思います。後に大津先生の下で出会った川添忠博士は多様な実験を披露される博覧強記の方で、そのお話はちょうど無機化学の恩師のお話を聞くような魅力的なもので

した. PB デバイスを試金石として研究をしたくなかったのは自然なことでした. 定年までの後 2 年弱の間に, 先入観を排除しながらこの仕事を仕上げ, その先の超伝導や化学反応の景色が垣間見えたら, 大津先生をはじめとしてお世話になった諸先生方への恩返しにもなり嬉しく思います.

-
- [1] 坂野 斎, オフシエル科学フォーラム「人間の都合とオフシエル科学」(2019/04/26).
 - [2] 坂野 斎, オフシエル科学フォーラム「化学反応とドレスト光子～フリッツロンドンの先見とオフシエル電磁場の量子化～」(2019/12/24).
 - [3] 坂野 斎, オフシエル科学フォーラム「ローレンツ対称性の破れとドレスト光子」(2020/08/26).
 - [4] 坂野 斎, オフシエル科学フォーラム「電磁ポテンシャルとドレスト光子～電場・磁場での記述の破綻が現れるとき～」(2021/04/28).
 - [5] 坂野 斎, オフシエル科学フォーラム「ドレスト光子が関わる量子的散逸構造～最小作用の原理 vs. 最小エネルギーの原理～」(2022/02/23).
 - [6] 坂野 斎, オフシエル科学フォーラム「流れを考慮した最小作用の原理による量子的散逸構造の探索」(2022/10/30).
 - [7] 坂野 斎, オフシエル科学フォーラム「エネルギー非共鳴過程の作用積分～間接遷移型半導体の発光と触媒反応～」(2023/06/28).
 - [8] 坂野 斎, オフシエル科学フォーラム「オフシエル電磁場系の作用と散逸構造系のエントロピー」(2024/03/04).
 - [9] 坂野 斎, オフシエル科学フォーラム「逆因果律と内在電磁場」(2024/10/28).
 - [10] 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).
 - [11] N. Tate, T. Kawazoe, W. Nomura, and M. Ohtsu, Scientific Reports **5** p.12762–1–7 (2015); M. Ohtsu,
 - [12] 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 μm 帯の非冷却型 Si 受光素子」, 応用物理学会 2021 年春期学術講演会, 17p-Z14-8.
 - [13] N. Wada, M. A. Tran, T. Kawazoe, M. Ohtsu, Appl Phys A**115** p.113–118(2014).