

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

坂野 齋

山梨大学工学部 *

(Dated: October 30, 2022)

内在電磁場，ドレスト光子を利用したフォトンブリーディング (PB) [1–3] という手法で間接遷移型半導体から高効率の発光がもたらされています。その発光波長を決めるのは，従前のように物質のバンドギャップではなく，作成プロセス中の照射光波長です。PB は以下のような作成プロセスです：間接遷移型半導体に過剰に不純物をドーピングし，将来発光してほしい波長の光を照射しながらキャリア電流を流してアニールします。不純物が拡散し，たまたま発光に適した配置になると誘導放出によるエネルギー放出で冷却され，その不純物の配置が固定されます。

このように作成された発光デバイス：PB デバイスは巨大磁気光学効果 [4–6] や強磁性 [7] も発現します。磁氣的性質をもつことは内在ベクトルポテンシャルの関与を，現象の強さはコヒーレント長が大きな電子系の関与を示唆します。系内部のこのような事情を考慮するとともに，このデバイスの顕著な現象が，系外部の電流源，光源，検出器と結合した入出力の流れの存在下で実現されることも考慮しないといけません。今回は流れ=外部との結合の効果を含めて概念的に考えてみます。

まず，前に投稿したオフシエルフォーラムの記事「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」の概要を記します。PB デバイスの動作の記述のために参考にしたのは，プリゴジンの散逸構造の理論 [8] です。散逸構造とは，系内のエントロピー生成と系外へのエントロピー散逸の流れの均衡により実現される定常状態であり，熱力学的平衡状態から遠いところに出現します。散逸構造出現の「兆候」に関して，プリゴジンは一般的時間発展基準を提案しました：最大エントロピーの状態からゆらぎ（乱雑さの減少，秩序の萌芽）が生じたときに，元の状態に戻ろうとするエントロピーの2次の微少量の時間変化を過剰エントロピー生成とし，その符号が正の場合，乱雑さが増えて元の状態に向かい，負の場合，秩序が増えて散逸構造へ向かうとしました。

PB デバイスが動作している状態は，内在電磁場と大きな電子系がもたらす非線形性と外部との結合=流れのインタープレイが生み出す「量子的散逸構造」と考え，最大エントロ

*Electronic address: banno@yamanashi.ac.jp

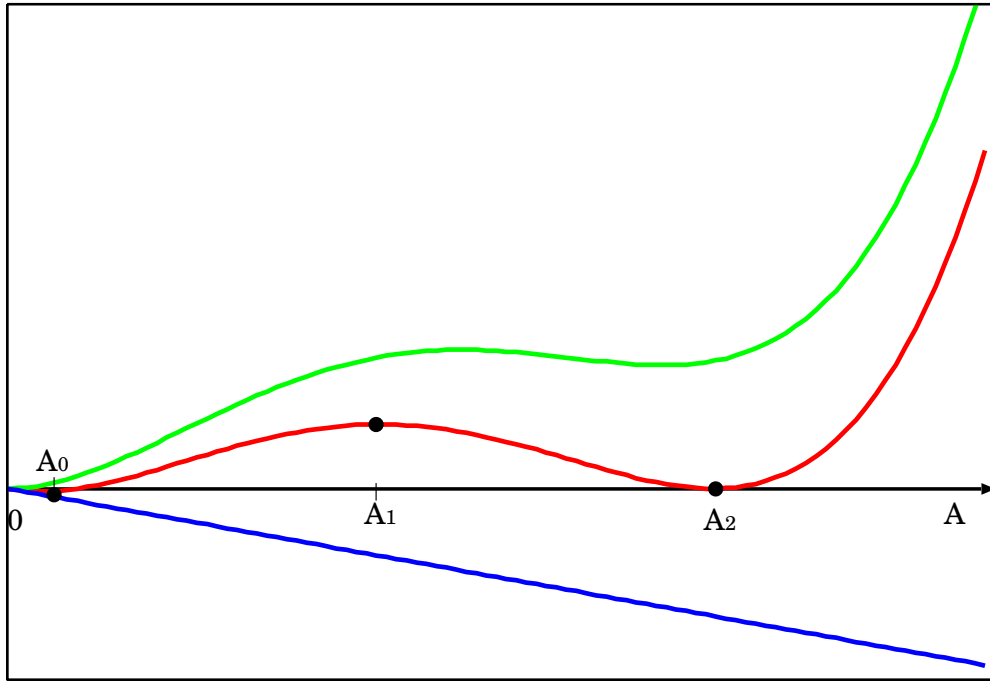


FIG. 1: 緑線 — ; 流れ（外部との結合）がない場合の作用積分. 青線 — ; 秩序変数と流れの結合項. 赤線 — ; 秩序変数と流れの結合項を考慮した全作用積分.

ピーの原理の代わりに、最小作用の原理を用いて平行な議論ができるだろう、との見通しを述べました。最小作用の原理を拠り所にするのは、量子論でよく使われる最小エネルギーの原理を基にした基底状態からの摂動論では、基底状態から遠くの、流れがある状態は記述できないだろうということからです。

今回は、前回に続き、最小作用の原理に基づき、流れの効果に注目して、「兆候」に止まらない大域的な考察をしてみます。作用積分が1つの秩序変数 A で決まる簡単な状況を考えます。図1の緑線 — のように、流れ=外部との結合がない状況で、作用積分は秩序変数に対して非線形性をもち、最小作用の原理で実現されている $A = 0$ の状態の他に、場合によっては $A \neq 0$ で極大、極小となる（現実化しない）状態があるとします。 A の関数としての作用積分の1階微分が0ということは、 A を決めるオイラー方程式が成立し、現実化される必要条件を満たします¹。

ここに、秩序変数（の1次）と外部の結合項：図1の青線 — を導入します。その全作用積

¹ あまりに単純化しているので、1変数関数の微分=0としたオイラー方程式は A_i ($i = 0, 1, 2$) を求める方程式になりますが、作用積分が場の量でかかっている場合、オイラー方程式は場が従うべき方程式；ハイゼンベルグ方程式やマクスウェル方程式になります。

分は図1の赤線—のようになり、3箇所オイラー方程式が成立することになります。 A_0 は流れ0で実現されていた状態から連続的に到達できる状態です。 A_1 はオイラー方程式は成立するものの、極大で不安定です。 A_2 はまだ、この図では最小になっていませんが、流れ=外部との結合（図の直線の傾きの大きさに相当）をもう少し強くすれば、 A_0 の状態を凌駕し現実化されるものです。そのとき、 A_0 から A_2 への転移は不連続に起こります。この A_2 の状態は一種の散逸構造ではないでしょうか？

いくつか気づいたことを挙げてみます：

- 流れがない場合の作用積分，図1の緑線—は、 $A \neq 0$ で極大、極小をもつ必要はありません。ショルダーピークがあれば流れの導入により、図1の赤線—のような構造の出現が可能です。
- 散逸構造出現の要件は、非線形性と流れ（散逸）といわれていますが、図1にそのシナリオが集約されています：緑線—にピークやショルダーピークがあることは、非線形性に対応し、そこに流れを導入することで赤線—のような最小作用の原理に従う新しい状態が導かれます。
- 図1の緑線—や赤線—に現れる非線形性に基づく関数形にプリゴジンの一般的時間発展基準が内包されていると考えられます。
- 流れと表現してきたものは、外部自由度の結合として一般化できます。注目している系と空間的に離れているものと結合する必要はなく、たとえば、電子-電磁場系なら格子自由度との結合でもよいです。

作用積分はオイラー方程式の導出，対称性から保存量の導出という1階微分量を使った原理的な議論の場面で多く使われてきました。オイラー方程式が一義的なものであり、最小作用の原理などの変分原理は便宜である、という考え方もあります。でも、作用積分の物質部分の2階以上の微分量は線形、非線形の感受率であり[9]、上記の議論の鍵の一つが作用積分の秩序変数への非線形な依存性でもあるので、作用積分自体も具体的な系の解析に役立つように思います。

現実の作用積分はここでの概念的な話のように1変数で決まることはなく複雑です。でも、簡単な考えほど汎用性が大きいことを信じて、これを案内役として内在電磁場、ドレスト光子に関わる現象を解析していきたいと思います。

[1] Minh Anh Tran, Tadashi Kawazoe, and Motoichi Ohtsu. Fabrication of a bulk silicon p-n homojunction-structured light-emitting diode showing visible electroluminescence at room

- temperature. *Appl. Phys. A*, 115:105–111, 2014. DOI 10.1007/s00339-013-7907-9.
- [2] T. Kawazoe, M. A. Mueed, and M. Ohtsu. Highly efficient and broadband Si homojunction structured near-infrared light emitting diodes based on the phonon-assisted optical near-field process. *Appl. Phys. B*, 104:747–754, 2011.
- [3] M. Ohtsu. *Silicon Light-Emitting Diodes and Lasers*. Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
- [4] N. Tate, T. Kawazoe, W. Nomura, and M. Ohtsu. Current-induced giant polarization rotation using a zno single crystal doped with nitrogen ions. *Scientific Reports*, 5:12762–1–7, 2015.
- [5] N. Tate, T. Kawazoe, S. Nakashima, W. Nomura, and M. Ohtsu. Speckle reduction by using transmissive zno device based on dressed-photon-assisted optical modulation. In *Abstracts of the 22nd International Display Workshops*, Otsu, Japan, Dec. 9-11 2015. PRJ3-1.
- [6] M. Ohtsu. Gigantic ferromagnetic magneto-optical effect in a SiC light-emitting diode fabricated by dressed-photon–phonon-assisted annealing, 2018. in Off-shell archive (<http://offshell.rodrep.org>), DOI: 10.14939/1809R.001.v1.
- [7] 門脇 拓也, 川添 忠, 大津 元一, 佐野 雅彦, and 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, 2021. 応用物理学会 2021 年春期学術講演会, 17p-Z14-8.
- [8] G. ニコリス and I. プリゴジーン. 散逸構造 – 自己秩序形成の物理学的基礎. 岩波書店, 1980.
- [9] I. Banno. Theory of single susceptibility for near-field optics equally associated with scalar and vector potentials, 2018. <https://arxiv.org/abs/1807.10992v3>, (also in Off-shell archive, <http://offshell.rodrep.org>, DOI: 10.14939/1809O.002.v1).