

# Coherent-field QED の構成方法

瀬戸慧大 / 核融合科学研究所 (NIFS)

我々は、高強度の古典的な背景電磁場が、電磁場のコヒーレント状態の期待値として現れるような量子論的定式化を提示する [1]。本講演ではこの手法を coherent-field QED と呼ぶことにする。本構成は完全に演算子レベルで行われ、基礎理論のゲージ構造を保持しているため、量子場理論における背景場の経験的な代入法に対して、透明かつ第一原理的な基盤を与えるものである。共変 QED の枠組みにおいて、我々は、電磁場のコヒーレント状態を変位演算子で表現することにより、追加の仮定を置くことなく、要求されるゲージ条件を満たす有効な背景場が自然に生成されることを示す [1]。この定式化のもとでは、Furry 描像 [2]、Volkov 解 [3]、および高強度電磁場による散乱振幅 [4] といった広く用いられている構成要素は、外部から導入される仮定ではなく、基礎となる量子力学的ダイナミクスの制御された半古典極限として現れる。本手法は演算子に基づく構成であるため、量子揺らぎ、バックリアクション、レーザー場のデプレッション効果 [5] を、ゲージ対称性と整合した形で体系的に取り込むことが可能である。例えば一般的な散乱振幅を本手法では経路積分の記法で

$$\langle \alpha'_{(\text{out})\text{H}}, \Psi'_{(\text{out})\text{H}} | \alpha_{(\text{in})\text{H}}, \Psi_{(\text{in})\text{H}} \rangle = \int_{\mathcal{A}_{(-\infty)}}^{\mathcal{A}_{(+\infty)}} \mathcal{D}\mathcal{A} \int \mathcal{D}A \int \mathcal{D}\psi \int \mathcal{D}\bar{\psi} \exp \left[ \frac{i}{\hbar c} \int d^4x \mathcal{L}_{\text{QED}}(\psi(x), \bar{\psi}(x), A(x) + \mathcal{A}(x)) \right] \quad (1)$$

と書く [1]。右辺に示すように、本手法では量子化された電磁場  $A$  とレーザーに対応するコヒーレント電磁場  $\mathcal{A}$  の双方について経路積分を行う点に特徴がある。左辺はあるレーザーコヒーレント状態  $\alpha$  が相互作用を経て別のレーザーコヒーレント状態  $\alpha'$  へと遷移する過程を表している。このようなレーザーコヒーレント状態が変化することをバックリアクションやデプレッション効果 [5] という。これに対して  $\alpha' = \alpha$  とした  $\langle \alpha_{(\text{out})\text{H}}, \Psi'_{(\text{out})\text{H}} | \alpha_{(\text{in})\text{H}}, \Psi_{(\text{in})\text{H}} \rangle$  が従来の strong-field QED である [4]。本講演では strong-field QED (あるいは非線形 QED) の文脈で議論するが、その概念的構造は電磁気学に特有のものではなく、古典的背景配置を用いる一般のゲージ場理論に広く適用可能であると期待される。

## 参考文献

- [1] K. Seto, “Quantum origin of classical background fields from coherent states: A first principles formulation in QED,” arXiv:2512.21122 (2025).
- [2] W. H. Furry, “On bound states and scattering in positron theory,” Phys. Rev. **81**, 115 (1951).
- [3] D. M. Volkov (Volkov in English spelling), “Über eine Klasse von Lösungen der Diracschen Gleichung,” Z. Phys. **94**, 250 (1935).
- [4] W. Greiner, B. Müller, and J. Rafelski, Quantum electrodynamics of strong fields (Springer, 1985).
- [5] A. Ilderton, and D. Seipt, “Backreaction on background fields: A coherent state approach,” Phys. Rev. D **97**, 016007 (2018).