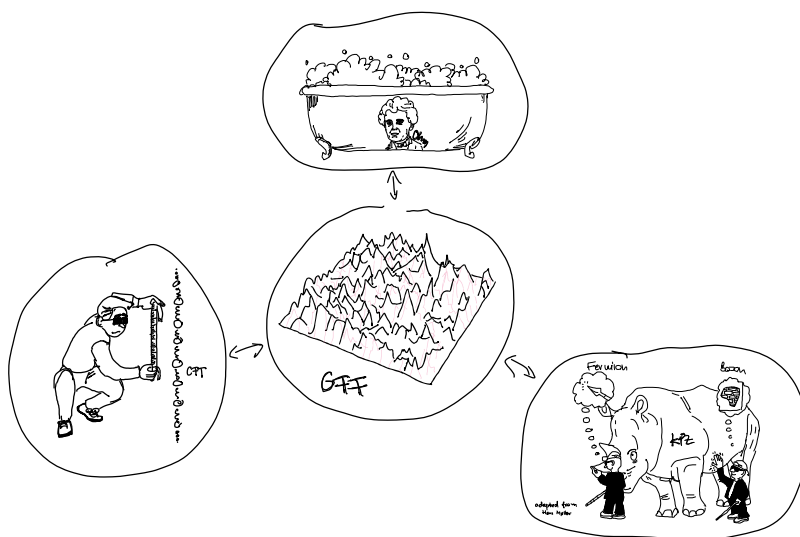


QUANTUM OPTICS, MANY BODY PHYSICS AND THE GAUSSIAN FREE FIELD

YURI MINOGUCHI



ABSTRACT

Modern quantum technologies rely fundamentally on quantum optics, yet the most promising applications—quantum computation and quantum simulation—are inherently many-body phenomena. This thesis explores the interface between quantum optics and many-body physics, employing analytical techniques from statistical physics, condensed matter theory, and quantum field theory to study complex quantum optical systems.

The unifying mathematical framework across all models studied is the Gaussian free field, which emerges as the underlying structure connecting three seemingly disparate research areas.

First, we examine a bosonic impurity model where interactions with an environment simultaneously generate valuable non-Gaussian quantum resources while introducing dissipation. Our analysis reveals conditions under which constructive nonlinear effects can overcome destructive dissipative processes, illuminating alternative pathways for robust quantum resource generation.

Second, we investigate measurement-altered criticality in both free boson conformal field theory and Dirac fermions, demonstrating how continuous measurements deform entanglement properties at criticality. This provides new insights into measurement-induced phase transitions relevant to quantum error correction and fault-tolerant computation.

Third, we examine classical transport phenomena by studying the asymmetric simple inclusion process (ASIP) for bosons and the asymmetric simple exclusion process (ASEP) for fermions. Our analysis reveals that both systems, despite their fundamentally different particle statistics, exhibit universal Kardar-Parisi-Zhang behavior due to their underlying description as fluctuating interface dynamics.

Throughout this work, the Gaussian free field serves as both computational tool and conceptual bridge, connecting three fundamentally different phenomena: the interplay between dissipation and quantum resource generation, the modification of criticality through continuous measurements, and unification of bosonic and fermionic transport beyond conventional bosonization. Our analytically tractable models reveal rich physical phenomena in prototypical quantum optical many-body systems.

ZUSAMMENFASSUNG

Moderne Quantentechnologien basieren grundlegend auf der Quantenoptik, jedoch sind die vielversprechendsten Anwendungen, darunter Quantenrechnung und Quantensimulation, von Natur aus Vielteilchenphänomene. Diese Dissertation untersucht die Schnittstelle zwischen Quantenoptik und Vielteilchenphysik, wobei analytische Techniken aus der statistischen Physik, Festkörpertheorie und Quantenfeldtheorie genutzt werden, um komplexe quantenoptische Systeme zu untersuchen.

Der vereinheitlichende mathematische Rahmen aller untersuchten Modelle ist das Gaußsche freie Feld, das als zugrundeliegende Struktur drei scheinbar unterschiedliche Fragestellungen verbindet.

Im ersten Teil untersuchen wir ein bosonisches Störstellenmodell, bei dem Wechselwirkungen mit einem Bad auf der einen Seite wertvolle nicht-Gaußsche Quantenressourcen erzeugen, aber auf der anderen Seite auch zu Dekohärenz führen kann. Unsere Analyse zeigt dass unter besonderen Bedingungen, die konstruktiven nichtlineare Effekte die destruktive dissipativen Prozesse überwinden können. Dadurch werden alternative Wege für die robuste Erzeugung von Quantenressourcen aufgezeigt.

Im zweiten Teil untersuchen wir zwei Modelle an einem kritischen Punkt, die freie bosonische konforme Feldtheories und Dirac-Fermionen, die kontinuierlich gemessen werden. Diese Messungen verändern die Kritikalität was sich in ihren Verschränkungseigenschaften zeigt. Dies liefert neue Einblicke in mesungsinduzierte Phasenübergänge, die für Quantenfehlerkorrektur und fehler-tolerante Quantenrechnungen relevant sind.

Im dritten Teil führen wir zwei klassische stochastische Transportprozesse, den asymmetrischen simplen Inklusionsprozess (ASIP) für Bosonen und den asymmetrischen simplen Exklusionsprozess (ASEP) für Fermionen, ein. Unsere Studie zeigt dass beide Systeme, trotz ihrer unterschiedlichen Quantenstatistik der zu Grunde liegenden Teilchen, durch eine Kardar-Parisi-Zhang Theorie beschrieben werden können. Der Grund dafür ist, dass die zugrundeliegende Physik in beiden Fällen auf ein stochastischen Grenzflächenwachstumsprozess abgebildet werden kann.

Das Gaußsche freie Feld ist sowohl ein Berechnungswerkzeug als auch eine konzeptuelle Brücke zwischen diesen drei unterschiedlichen Phänomenen: das Wechselspiel zwischen Dissipation und Quantenressourcenerzeugung, die Modifikation eines kritischen Punktes durch kontinuierliche Messungen, und die Vereinheitlichung von bosonischem und fermionischem Transport jenseits von Bosonisierung. Unsere Modelle die sich alle theoretisch analysieren lassen zeigen einen Reichtum an physikalischen Phänomenen in charakteristischen quantenoptischen Vielteilchensystemen.