



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Hydrodynamics and the quantum butterfly effect in black holes and large $N$ quantum field theories

Scopelliti, V.

### Citation

Scopelliti, V. (2019, October 9). *Hydrodynamics and the quantum butterfly effect in black holes and large  $N$  quantum field theories*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/79256>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/79256>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/79256> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Scopelliti, V.

**Title:** Hydrodynamics and the quantum butterfly effect in black holes and large N quantum field theories

**Issue Date:** 2019-10-09

# Samenvatting

Een van de spannende dingen van onderzoek is dat het nooit zeker is waar en wanneer de volgende belangrijke ontdekkingen plaats zullen vinden. We kunnen ons alleen laten leiden door onze nieuwsgierigheid en ons instinct. Dit proefschrift vat enkele antwoorden op de vele vragen die wij ons de afgelopen vier jaar hebben gesteld, samen. Sommige vragen kwamen tot stand met het oog op de technologische vooruitgang van (hopelijk) de aankomende jaren. Het begrip van hoge-temperatuur supergeleiders en van de mysteries van sterk-gekoppelde systemen, alsmede van de rol van kwantuminformatie, zou ons leven ingrijpend kunnen veranderen. Verder is de motivatie puur theoretisch.

Van een chaotisch systeem is bekend dat een kleine verandering in de beginwaarden dramatische gevolgen kan hebben voor de evolutie van dat systeem (het *vlindereffect*). Deze gevoeligheid voor de beginwaarden is een eigenschap van het systeem op korte tijdsschalen en kleine afstanden. Om de chaos waar te nemen, moeten we daarom inzoomen. Daartegenover staat dat, als we eigenschappen op grote (tijd)schalen willen bestuderen (en dus uitzoomen), het systeem hydrodynamisch kunnen beschrijven. Dat twee eigenschappen die zich op verschillende tijdschalen afspelen aan elkaar gerelateerd zouden kunnen zijn, is een aantrekkelijk idee, wat een nieuwe vorm van symmetrie op zou kunnen leveren. Dit is een van de achterliggende motivaties van dit proefschrift: is het mogelijk dat chaos, die zich zeer vroeg in de ontwikkeling van een systeem manifesteert, invloed heeft op het hydrodynamisch transport in het systeem? Zelfs op klassiek niveau is dit een interessante vraag. Anderzijds is het begrijpen van chaos in veel-deeltjes kwantumsystemen nog intrigerender. Desalniettemin is er de afgelopen jaren op beide thema's vooruitgang geboekt, veelal door gebruik te maken van de AdS/CFT dualiteit.

In dit proefschrift hebben wij deze vragen vanuit twee tegenovergestelde richtingen bestudeerd, zowel vanuit zwakgekoppelde veldentheorieën, waarbij een combinatie van veldtheoretische technieken gebruikt is, als vanuit de AdS/CFT dualiteit. Daarnaast hebben wij een fermionisch en bosonisch kwantum kritisch punt bestudeerd, dit zijn “exotische” aggregatietoestanden waarin kwantuminformatie een belangrijke rol speelt.

De belangrijkste resultaten van dit proefschrift bestaan uit de formuler-

ing van een Boltzmann-achtige vergelijking voor veel-deeltjes chaos, de ontdekking van een nieuwe eigenschap van thermische correlatiefuncties (*pole-skipping*) en de analyse van wat de juiste en zinvolle observabele is om experimenteel kwantumchaos te bestuderen. De techniek die hiervoor gebruikt is, is een specifieke correlatiefunctie, welke uitgebreid bestudeerd is in dit proefschrift, de ongelijke-tijd correlatiefunctie (out-of-time ordered correlator, OTOC).

In hoofdstuk twee schrijven we de kinetische vergelijking voor veel-deeltjes chaos neer. Deze vergelijking, met een structuur à la Boltzmann, brengt een precies, microscopisch begrip met zich mee van wat kwantumchaos in verdunde systemen is, namelijk een bruto uitwisseling van energie. Kwalitatief kan men zich deze kinetische vergelijking zo voorstellen: denk aan een netwerk waar elke knoop in- en uitgaande verbindingen heeft. Het kan een energienetwerk zijn van een land waar de knopen overeenkomen met de plekken waar energie geproduceerd of verbruikt wordt, of een sociaal netwerk waar de knopen de gebruikers zijn en de verbindingen willekeurige, oriënteerbare connecties (tweet/retweet, like/dislike). In dit beeld telt de traditionele Boltzmann transportvergelijking voor transport de tijdsevolutie van de *netto toename* in een knoop (respectievelijk de energie productie ten opzichte van het verbruik, of het aantal tweets min het aantal retweets van één enkel account). De kinetische vergelijking voor kwantumchaos telt daarentegen het totaal van inkomende plus uitgaande bijdragen. Dit is geen constante, en voor kwantumsystemen is het typerend dat dit exponentieel groeit, een signaal van kwantumchaos. Er zijn limieten aan de snelheid van deze exponentiële groei. Onze interpretatie van kwantumchaos in termen van kinetische theorie geeft aan dat, voor sommige soorten netwerken, dit optellen een heel specifiek karakter heeft, namelijk een exponentiële groei. Hierbij is het de vraag waarom, microscopisch gezien, deze grootte begrensd is en of dit soort resultaten uitgebreid kunnen worden naar generieke netwerken, weg van de kwantumsystemen.

In hoofdstuk drie proberen we de algemeenheid van deze kinetische theorie voor chaos te begrijpen. We onderzoeken wat er gebeurt in systemen waar kwantuminformatie en verstrengeling op lange afstanden een rol beginnen te spelen, wat bijvoorbeeld in de buurt van een kwantumkritisch punt gebeurt. We laten zien dat, voor twee paradigmatische theorieën, het bosonische  $O(N)$  vector model en het Gross-Neveu model, in de buurt van het kwantumkritisch punt, chaos nog steeds kan worden beschreven met onze kinetische theorie. In hoofdstuk vier analyseren we sterk-gekoppelde systemen met behulp van de holografische dualiteit. We laten zien dat chaotische eigenschappen van zwarte gaten bestudeerd kunnen worden met een experiment ver uit evenwicht dat overeenkomt met diffusief gedrag in

de buurt van de horizon. Voor systemen die dual zijn aan zwarte gaten, laat chaos een afdruk achter in de correlatiefuncties laat in de tijd, die het hydrodynamisch transport bepalen. Dit fenomeen is uitermate verrassend en heeft de naam *pole-skipping* gekregen.

In het laatste hoofdstuk stellen we een belangrijke vraag aan de orde met betrekking tot de OTOC. De afgelopen jaren is er veel belangstelling geweest om protocollen te bedenken voor experimenten om de OTOC te meten. De discussie is gebaseerd op de stelling, die vaak in de literatuur wordt aangehaald, dat de OTOC niet gevoelig is voor de manier waarop deze geregulariseerd wordt. Wij vechten deze stelling aan en laten zien dat zowel in sterk- als in zwakgekoppelde theorieën, de OTOC sterk afhankelijk is van diens regularisatie. We geven een indicatie van welke regularisatie de “fysische” is en interpreteren dit resultaat zowel in het kader van de kinetische theorie, die in de vorige hoofdstukken afgeleid is, als in het kader van het Loschmidt echo experiment.