

# Quarks, gluonen en zwarte gaten

**De meeste mensen zullen denken dat de kleinste elementaire deeltjes weinig te maken hebben met de grootste en zwaarste objecten in ons heelal. Toch lijken ontdekkingen uit de snaartheorie wel in die richting te wijzen. Niet letterlijk misschien, maar zwarte gaten kunnen een erg goed model vormen voor het gedrag van het quark-gluonplasma, zoals dat bij de LHC in Genève geproduceerd wordt.** Wilke van der Schee

**E**xtremer kan het in de natuurkunde bijna niet worden; bij botsingen van loodkernen in de LHC ontstaat voor ongeveer  $10^{-23}$  s een plasma van quarks en gluonen met een temperatuur van  $10^{12}$  K en versnelingen van wel  $10^{31}g$ . Voeg hieraan toe dat dit proces misschien wel het beste te beschrijven is als de vorming van een zwart gat in een vijfdimensionaal universum, waarbij het zwarte gat ongeveer de helft van dit universum inneemt, en het is duidelijk dat het hier om extreme natuurkunde gaat. In dit

artikel wordt de relatie tussen loodkernen en zwarte gaten uitgelegd en wordt gekeken naar hoe we dit in de praktijk kunnen gebruiken.

## Holografie

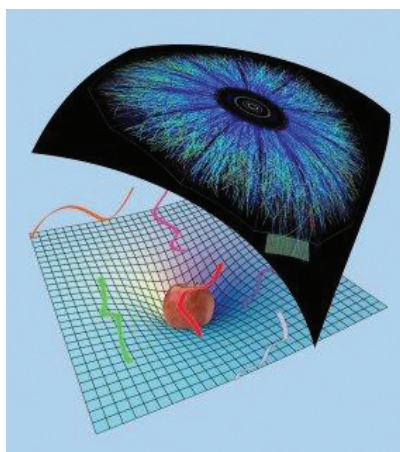
Een oud idee uit 1974 van Gerard 't Hooft [1] is dat de quantumchromodynamica (QCD) die quarks en gluonen beschrijft, equivalent zou kunnen zijn aan een theorie van snaren, waarbij de snaren tussen de quarks spannen. Toen al was duidelijk dat een dergelijke snaartheorie mogelijk kon worden versimpeld, maar de precieze uitwerking hiervan was erg ingewikkeld.

De doorbraak werd uiteindelijk in 1997 door Juan Maldacena gevonden [2], die een precieze snaartheorie vond die overeenkwam met een precieze quantumtheorie. Deze quantumtheorie heeft dan wel supersymmetrie, maar lijkt toch vrij veel op normale niet-supersymmetrische QCD. Achteraf gezien was er in 1974 allereerst veel meer kennis over snaartheorie nodig, maar een ander verrassend aspect was dat de snaartheorie één extra ruimtelijke dimensie heeft: de snaartheorie is 4+1-dimensionaal, in tegenstelling tot de 3+1-dimensionale quantumtheorie. Hierdoor heeft het de naam holografie gekregen. Berekeningen in snaartheorie zijn

ontzettend ingewikkeld, maar in de situatie dat de snaartjes heel klein zijn (puntdeeltjes) reduceert de snaartheorie tot normale natuurkunde, met zwaartekracht en de andere krachten. In deze limiet vinden we een 'normaal' universum met onder andere zwarte gaten terug, maar dan wel met één dimensie meer. In dit simpele geval is de equivalente QCD juist (bijna) onmogelijk op te lossen, zodat een zwart gat echt een versimpeling voor het quark-gluonplasma is!

## Botsingen van loodkernen

Eén maand per jaar botsen er in de Large Hadron Collider (LHC) loodkernen op elkaar. De rest van het jaar laten men protonen botsen, die het meest

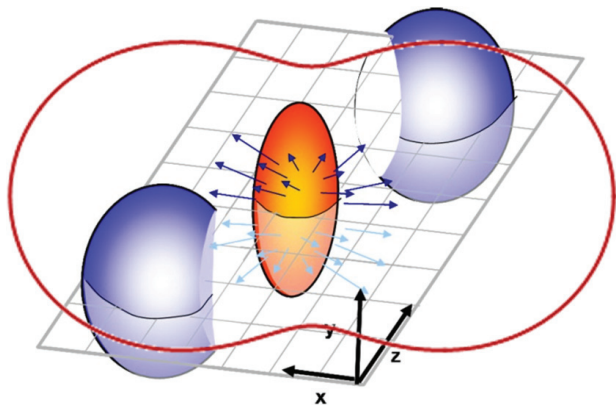


**Figuur 1** Een illustratie van holografie. Botsingen van quarks en gluonen in een 3+1-dimensionale quantumtheorie (boven) kunnen tot op zekere hoogte beschreven worden door de formatie van een zwart gat in een 4+1-dimensionale snaartheorie (onder).

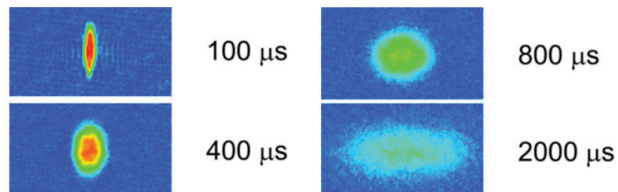
Wilke van der Schee (1987) is in 2010 afgestudeerd in de theoretische natuurkunde aan de Universiteit Utrecht. Hierna begon hij daar zijn promotie als gedeelde aio bij het Instituut voor Theoretische Natuurkunde en het Instituut voor Subatomaire Deeltjesfysica, onder begeleiding van Gleb Arutyunov en Thomas Peitzmann, met als doel de resultaten van holografie dichter bij experimentele resultaten te brengen.



W.vanderSchee@uu.nl



**Figuur 2** Botsing van twee loodkernen. De loodkernen bewegen zich in tegengestelde richting op de z-as. In de regio waar de kernen overlappen ontstaat een heet quark-gluonplasma, dat ongeveer ellipsvormig is. In de detector worden meer deeltjes gevonden in de richting van de korte (x)-as, wat geïllustreerd wordt door de rode lijn en in figuur 3.



**Figuur 3** De expansie van het quark-gluonplasma zal nooit gefotografeerd worden, maar het lijkt veel op dit plaatje. Dit zijn momentopnames van bepaalde expanderende zeer koude atomen [3]. Het leuke hiervan is dat deze atomen net als het plasma door een moeilijke quantumtheorie worden beschreven. Het idee is dan ook dat ook hier zwarte gaten een model vormen voor deze vloeistof met zeer lage viscositeit. In zekere zin zijn de koudste en warmste vloeistoffen op aarde dus erg vergelijkbaar!

bruikbaar zijn voor het vinden van het higgsboson. Loodkernen zijn echter veel zwaarder dan protonen, en aangezien de snelheid gelijk is, geeft deze botsing veel meer energie vrij.

Met een paar honderd botsende energetische protonen en neutronen zou je kunnen verwachten dat alle deeltjes een paar keer botsen en in een betrekkelijk willekeurige richting in de detector belanden. Dit is echter niet wat in de LHC gevonden wordt; de deeltjes bewegen voornamelijk in de richting van de korte kant van de overlapellipsoïde, zoals in figuur 2 is geïllustreerd. Deze zogenaemde *elliptic flow* toont aan dat er veel interacties zijn die de deeltjes in de richting van de x-as duwen.

Hoewel er nu veel experimentele data zijn, blijven nog veel vragen open over het quark-gluonplasma. Allereerst is het experimenteel een gigantische taak om aan het quark-gluonplasma te meten. Het plasma zelf bestaat daar namelijk veel te kort voor, en experimenteel zijn dus alleen de wegvliegende deeltjes lang na de botsing te detecteren. Hier zit echter een schat aan informatie in, zoals bijvoorbeeld de vorm van de distributie die in figuur 2 is afgebeeld. Maar ook het type van de verschillende deeltjes, de snelheid, de verdeling in de botsingsrichting en andere eigenschappen kunnen allemaal nauwkeurig gemeten worden.

Een theoretische beschrijving

De uitdaging is uiteraard om al deze data theoretisch te verklaren. Dit lukt heel aardig, maar er zijn wat cruci-

ale aannames en waardes die moeilijk theoretisch te onderbouwen zijn. Het typische model is nu dat de individuele quarks en gluonen zich heel erg snel als een vloeistof gaan gedragen; daarna expandeert het plasma volgens relativistische hydrodynamica, met de kleinste viscositeit ooit gemeten (zie ook figuur 3). Het plasma wordt daarom ook wel de meest perfecte vloeistof genoemd. Op een gegeven moment is de energiedichtheid zo laag dat zo'n 30.000 deeltjes ontstaan, die dan nog weer veel later in de detector worden gemeten.

Het is met name erg moeilijk te beantwoorden waarom en hoe de deeltjes zo snel een vloeistof vormen. Ook de lage viscositeit is niet uit te rekenen binnen QCD. Holografie, echter, geeft op een heel natuurlijke wijze een lage viscositeit [4], aangezien in zekere zin ook de horizon van een zwart gat zich gedraagt als een perfecte vloeistof. Het hieronder gepresenteerde onderzoek probeert een (holografisch) beeld te vormen van de allereerste evolutie, nog voor de deeltjes een echte vloeistof vormen.

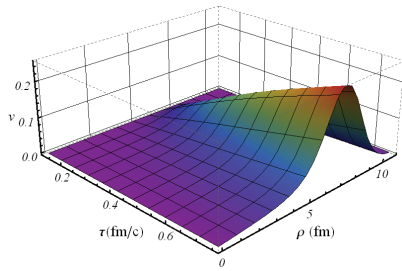
### De formatie van zwarte gaten

Zoals eerder al beschreven is het erg moeilijk om met QCD precieze berekeningen te maken, in het bijzonder in de chaotische botsing van twee atoomkernen. Dit komt doordat QCD de sterke kracht beschrijft, die zo sterk is dat hij zich moeilijk laat benaderen. Het mooie (en soms lastige) van holografie is dat als de quantummecha-

nische deeltjestheorie moeilijk is, de snaartheorie juist makkelijk is (en vice versa). In dit geval versimpelt snaartheorie naar klassieke zwaartekracht met eventueel andere krachten. Deze zwaartekracht, beschreven door Einsteins algemene relativiteitstheorie, zou dus een model kunnen vormen voor een moeilijke quantumtheorie!

Het uitgangspunt in deze berekening is dat het quark-gluonplasma op een bepaalde manier goed beschreven kan worden door eigenschappen van de horizon van een zwart gat. De botsing zelf is dan equivalent aan de vorming van een zwart gat. Op een gegeven moment zal de horizon van dit zwarte gat goed worden beschreven door hydrodynamica en de grote vraag is hoe het plasma er op dat moment uitziet. Het gaat hierbij dan met name om wanneer hydrodynamica werkt en wat het snelheidsprofiel van de vloeistof op dat moment is.

Berekeningen in algemene relativiteitstheorie zijn een vakgebied op zichzelf en het heeft daarom ook een tijd geduurd om de formatie van een zwart gat te beschrijven. Zo was er tot voor kort alleen een model voor oneindig grote kernen. Die hadden triviaal gedrag in het vlak loodrecht op de botsing en het snelheidsprofiel in dit vlak was hierbij altijd nul. Mijn resultaten presenteren nu voor het eerst een model dat in dit vlak radieel expandeert (zie figuur 4) [5]. Hoewel dit dus nog steeds rotatie-symmetrisch is, is dit toch al erg nuttig voor be-



**Figuur 4** Radiële snelheid als fractie van de lichtsnelheid, geplote als functie van de tijd  $\tau$  en de afstand  $\rho$  tot het middelpunt van de botsing 5. Direct na de botsing zal de snelheid loodrecht op de botsingsrichting 0 zijn, maar deze figuur laat duidelijk zien dat het plasma daarna snel radieel naar buiten stroomt, in overeenstemming met figuur 3. Hoewel dit model een aantal onzekerheden kent, is het een belangrijke stap naar een completer model voor het ontstaan van het quark-gluonplasma.

staande hydrodynamische modellen.

## Discussie

De dynamica van quarks en gluonen kan in bovenstaande omstandigheden dus beschreven worden met behulp van zwaartekracht en zwarte gaten. Eén van de leuke dingen hiervan is dat zwaartekracht in het algemeen ‘moeilijke’ quantumtheorieën beschrijft, zoals het quark-gluonplasma, maar ook bijvoorbeeld bepaalde koude atomen (figuur 3). Doordat beide syste-

men door zwarte gaten beschreven kunnen worden, gedragen ze zich erg vergelijkbaar – iets verrassends voor de heetste en koudste vloeistoffen op aarde.

Holografie is essentieel gebleken om experimentele data van het quark-gluonplasma te verklaren. Een beschrijving in termen van zwarte gaten geeft hierbij een natuurlijke verklaring waarom het plasma zich zo snel als vloeistof gedraagt en waarom de viscositeit zo laag is. Met holografie is het nu ook mogelijk de allereerste momenten van de botsing te simuleren, als het plasma zich nog niet als een vloeistof gedraagt. Eén van de belangrijkste successen daarvan is een realistisch snelheidsprofiel als functie van de tijd en de afstand tot het middelpunt van de botsing (figuur 4).

Een heel ander recent succes is een model van zwarte gaten met supergeleiding [6]. In dit geval zijn het meer ingewikkelde zwarte gaten met scalaire en elektrische velden. Deze extra’s leveren een ingewikkelder fase-diagram op waar ook een supergeleidende fase in blijkt te zitten. Hoewel het niet geheel duidelijk is welke precieze quantumtheorie zulke zwarte gaten zou moeten beschrijven, is er natuurlijk de hoop dat het iets te maken heeft met hoge-temperatuursupergeleiders. Deze zijn nog erg slecht begrepen, ook weer omdat het

een moeilijke quantumtheorie betreft. Het is tenslotte leuk om op te merken dat holografie helemaal niet ontdekt is met oog op dit soort toepassingen vanuit de snaartheorie. Onderzoekers waren veelal geïnteresseerd in het vinden van een ‘theorie van alles’. Hoewel holografie hier zeker aan bijdraagt, zal het misschien nog wel veel nuttiger blijken voor het begrijpen van ingewikkelde quantumsystemen. En wie weet begrijpen we uiteindelijk QCD, zwarte gaten of het mechanisme achter supergeleiding bij hoge temperatuur.

## Referenties

- 1 G. 't Hooft, *A planar diagram theory for strong interactions*, *Nucl. Phys.* **B 72** (461-473), 1974.
- 2 J. Maldacena, *The Large-N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity*, *Adv. Theor. Math. Phys.* **2**, (231-252), 1998.
- 3 K. M. O'Hara, S. L. Hemmer, M. E. Gehm, S. R. Granade en J. E. Thomas, *Observation of a Strongly-Interacting Degenerate Fermi Gas of Atoms*, *Science* **298** (2179-2182), 2002.
- 4 G. Policastro, D. T. Son en A. O. Starinets, *Shear Viscosity of Strongly Coupled  $N=4$  Supersymmetric Yang-Mills Plasma*, *Phys. Rev. Lett.* **87**, (081601), 2001.
- 5 W. van der Schee, *Holographic thermalization with radial flow*, arXiv:hep-th/1211.2218, 2012.
- 6 S. A. Hartnoll, C. P. Herzog en G. T. Horowitz, *Building a Holographic Superconductor*, *Phys. Rev. Lett.* **101** (031601), 2008.