

INTERVIEW

Het bubbelbad van de kosmos

Renate Loll maakte anderhalf jaar geleden furore met een nieuwe theorie over de structuur van de ruimtetijd. Haar 'kwantumschuim' kan misschien de Einsteiniaanse ruimte verenigen met de kwantummechanica. Loll: "Op de allerkleinste schaal is iets gewelddadigs aan de hand."

Door Ed Croonenberg & Aschwin Tenfelde

Wie denkt dat natuurkundigen niet verder kijken dan de meest elementaire deeltjes, heeft het mis. Op theoretisch niveau proberen talloze onderzoekers te ontzorgen wat zich afspeelt op een schaal die nóg veel kleiner is dan die van elektronen, muonen of neutrino's. Zodra ze inzoomen tot een schaal van zo'n 10^{-35} meter – oftewel de Planck-schaal – doemen de contouren op van de ruimtetijd. Die ruimtetijd golft en fluctueert – deeltjes ontstaan spontaan, om even abrupt weer in het niets (of in andere dimensies?) te verdwijnen. En naarmate de geleerden verder in de diepte 'kijken', worden de fluctuaties alleen maar heviger. Die turbulentie van de ruimtetijd heet ruimtetijdschuim, maar is beter bekend onder de naam kwantumschuim.

Renate Loll zegde de Heimat vaarwel om in Utrecht een wetenschappelijk model van dat kwantumschuim te ontwikkelen. Sinds september 2004, toen ze een baanbrekend artikel over dit onderwerp publiceerde in *Physical Review Letters*, geldt ze als een rijzende ster in de wereld van de theoretische fysica, en weet ze zich gesteund door een miljoenensubsidie van de Nederlandse overheid. Overigens woont en werkt haar partner, ook fysicus, helemaal in Kopenhagen. "Ver, wat is ver? Het is in ieder geval in dezelfde tijdzone," zo merkt Loll droogjes op.

Lolls model is in zekere zin een tegenhanger van de snaartheorie. Die probeert eveneens te beschrijven hoe het universum op de allerallerkleinste schaal gestructureerd is. Maar terwijl snaartheoretici hun toevlucht nemen tot elf dimensies om hun model kloppend te krijgen, vermijdt Loll het liefst dit soort exotische exercities. Om haar kwantumschuim te beschrijven, heeft ze genoeg aan de gangbare vier 'Einsteiniaanse' dimensies: drie ruimtelijke plus de tijd.

Niettemin geldt het model van Loll als baanbrekend. Haar Ei van Columbus heet causaliteit. Toen zij de wetten van oorzaak en gevolg liet inwerken op het theoretische kwantumschuim, produceerden de computersimulaties op macroschaal datgene wat wij ook daadwerkelijk om ons heen zien: een driedimensionale wereld met tijd. De modellen van 'concurrerende' geleerden hadden tot dan toe slechts geleid tot ofwel 'platte' tweedimensionale universa, ofwel Gordiaanse-knoopuniversa met een oneindig aantal dimensies. Geen wonder dat Lolls onderzoek meteen veel bijval kreeg.

Mevrouw Loll, waarom maakte de natuurkunde op de Planck-schaal eigenlijk niet eerder gebruik van causaliteit?

"Daar was een goede reden voor. Het is bijzonder moeilijk om modellen van de ruimtetijd te bouwen. Door de causaliteit te negeren werd de klus aanzienlijk eenvoudiger."

Een typisch geval van intellectuele luiheid?

"O nee, zeker niet. Door de zaak te versimpelen, kon men ineens berekeningen uitvoeren die voorheen onmogelijk waren. Ook daaruit kunnen heel zinvolle resultaten komen, ook al heb je aannames gedaan die niet helemaal te verantwoorden zijn. Dat is altijd beter dan helemaal niets doen. Uiteraard moet je op een bepaald moment wel terugkijken en je afvragen of die vereenvoudiging nog altijd te rechtvaardigen is."

U vond dat het negeren van causaliteit niet langer te rechtvaardigen was.

"Twijfelen aan causaliteit is uiteindelijk niets anders dan *wishful thinking*. Stephen Hawking is de afgelopen 25 jaar met zijn onderzoek naar de kwantumstructuur van de ruimtetijd dan ook weinig opgeschoten – en dat is niet eens een controversiële uitspraak van me."

Nou...

"Causaliteit houdt in dat er een verschil is tussen de richting van tijd en die van ruimte. Als je een boek van Hawking openslaat, zie je meteen dat hij in zijn onderzoek naar kwantumzwaartekracht geen gebruik maakt van causaliteit. Wanneer Hawking praat over een vierdimensionale ruimtetijd, is de richting van de tijd niet te onderscheiden van de richting van de ruimte. En dat is natuurlijk bizar, want macroscopisch gezien is tijd iets heel anders dan ruimte. In de ruimte kun je van links naar rechts lopen en weer terug. Maar in de tijd kun je maar één kant op gaan."

Bubbelbad

Waarom hebben we eigenlijk kwantumschuim nodig?

"Ten eerste gelooft iedereen dat ook gravitatiekrachten en de geometrie van de ruimtetijd uiteindelijk onderhevig zijn aan kwantumwetten. Op grond van alles wat we weten van de algemene relativiteit en de kwantumtheorie, zijn we ervan overtuigd dat er iets gebeurt. In een vacuüm, waar zich dus geen materie bevindt, zullen kwantumfluctuaties – gebaseerd op het onzekerheidsprincipe van Heisenberg – de ruimtetijd vervormen. Net zoals ik golven kan maken in dit velletje papier. Als je maar door een microscoop kijkt die sterk genoeg is, zul je de effecten daarvan zien.

"Op almaar kleinere schaal zullen kwantumfluctuaties steeds heviger worden. Sommigen zeggen dat kwantumfluctuaties op een bubbelbad gaan lijken, of zelfs dat ze de ruimtetijd kapot scheuren. Al zijn dat natuurlijk maar metaforen.

"Besef wel dat kwantumschuim een heel vaag begrip is. Het is dan ook geen klassiek natuurkundig fenomeen. We weten dat

“Wanneer Stephen Hawking praat over een vierdimensionale ruimtetijd, is de richting van de tijd niet te onderscheiden van de richting van de ruimte. Dat is natuurlijk bizar, want in de ruimte kun je van links naar rechts lopen en weer terug. In de tijd kun je maar één kant op.

er op de allerkleinste schaal iets gewelddadigs aan de hand is met de ruimtetijd, en dit onbekende fenomeen heeft nu eenmaal de naam kwantumschuim gekregen.”

Is kwantumschuim net zo vaag als donkere energie?

“Nóg vager zelfs! Donkere materie is in feite een voorspelling binnen het model dat men van de kosmos heeft opgesteld. Helaas zijn wij nog niet zo ver, want voor kwantumschuim hebben we nog niet zulke meetgegevens.”

Driehoekjes

U bouwt uw model voor kwantumschuim op uit driehoekjes. Waarom juist die vorm?

“De vorm is eigenlijk niet belangrijk. Het is slechts een handvat om een model van de ruimtetijd te bouwen. Uiteindelijk maakt het niet uit welke bouwsteentjes je gebruikt – driehoekjes, vierkanten of andere vormen. Mijn bouwsteentjes zijn in feite slechts denkbeeldige substructuren en worden dan ook vaak verkeerd geïnterpreteerd. Bedenk wel dat mijn bouwsteentjes nog veel kleiner zijn dan de Planck-schaal.”

Eigenlijk zegt u dat voor het doen van scheikundige proeven ook geen precies model van de structuur van protonen en neutronen vereist is.

“Exact. Bovendien is het kiezen van het soort bouwsteentjes ook niet de moeilijkste opgave. Ik kan bijvoorbeeld van Legosteentjes allerlei bouwsels maken, dat is best eenvoudig. Maar een bewegend bouwwerk maken is een stuk moeilijker. Zo is het ongeveer ook met het bouwen van een model van de ruimte-

tijd. Het bouwen daarvan is één, maar het is veel moeilijker om te achterhalen hoe zo’n structuur kwantumfluctueert. Al met al hebben we goede redenen om aan te nemen dat de dynamiek van zo’n ruimtetijd-model niet al te veel afhangt van het soort bouwsteentje.”

We kunnen al niet rechtstreeks bekijken wat er gebeurt op de Planck-schaal. Kunnen we kwantumschuim dan wel experimenteel aantonen?

“Op dit moment niet, want de effecten van kwantumschuim zijn gewoon te klein om te meten. Maar we denken wel na over hoe je onmeetbare fenomenen op de Planck-schaal toch kunt waarnemen op veel grotere schaal. Misschien kun je de effecten van kwantumschuim wél meten als je heel veel van die effecten bij elkaar optelt.

“Als zo’n schuimachtige structuur werkelijk bestaat, moet het heelal ermee vol zitten. We kunnen bijvoorbeeld kijken naar licht dat ons bereikt vanaf de rand van het heelal, bijvoorbeeld van een *gamma-ray-burst* die heel ver van ons verwijderd is. Dat licht is al die tijd, dus vanaf de rand van het heelal tot het moment dat het de aarde bereikt, onderhevig geweest aan kwantumschuim. Het opgetelde effect is dan wellicht wél meetbaar. Misschien is er een verschil te meten in de manier waarop dat licht verstrooid is.

“Helaas is het probleem met de astrofysica dat er talloze andere verklaringen kunnen zijn voor het effect dat je ziet. Daarom zijn astrofysische observaties niet meteen geschikt als experiment. Bovendien zijn die ‘experimenten’ ook niet goed te herhalen. Je kunt niet even gaan kijken bij zo’n *gamma-ray-burst* om te zien wat er nu echt gebeurt.”

Balletjes

Hoe berekent u zo’n model van kwantumschuim?

“We doen geen rechttoe rechtaan berekening, maar gebruiken het principe van superpositie. Stel je voor dat je wilt weten hoe een bijzonder klein deeltje beweegt – een deeltje dat zo klein is dat kwantumeffecten een rol gaan spelen. Je kunt er niet vanuit gaan dat een deeltje zich in een keurig rechte lijn van A naar B beweegt. We moeten die beweging juist beschrijven als een heel scala van mogelijke routes die zo’n deeltje kan afleggen – zeg maar een soort waarschijnlijkheidswolk van beweging. De som van al die paden geeft je uiteindelijk een goede kwantumbeschrijving van dat deeltje. Met de ruimtetijd doen we eigenlijk hetzelfde. We nemen dus een grote som van alle mogelijke ruimtetijden. Maar uiteraard is ruimtetijd wel veel gecompliceerder dan de beweging van één deeltje.

“Onze computers hebben maar een beperkte rekenkracht, dus de ruimtetijd die we willen berekenen kan niet oneindig groot

Renate Loll

Renate Loll werd in 1962 geboren te Aken, West-Duitsland. Ze studeerde in Freiburg im Breisgau. In 1989 promoveerde ze aan het Imperial College in Londen. Na aanstellingen in Italië en de VS, verhuisde Loll naar het Max Planck-Instituut voor Gravitatiefysica in Golm. Sinds 2001 is ze verbonden aan de Universiteit Utrecht (sinds 2005 als hoogleraar) en ze is stafid van het Spinoza Instituut.

In 2004 publiceerde Loll samen met J. Ambjørn en J. Jurkiewicz in *Physical Review Letters* nr. 93 het artikel *Emergence of a 4D World from Causal Quantum Gravity*. In december van dat jaar ontving ze van de EU 2,93 miljoen euro voor het opzetten van het European Research and Training Network ENRAGE, een Europees samenwerkingsverband van dertien topinstituten die onderzoek doen aan de kwantumstructuur van de ruimtetijd. Kort daarop ontving ze van het NWO 1,25 miljoen euro voor het opzetten van een eigen onderzoeksgroep.

Loll heeft een zoon.



zijn. We rekenen daarom gewoonlijk met een ruimtetijd die is opgebouwd uit ongeveer een half miljoen bouwsteentjes.”

Hoe ziet de uitkomst van zo'n berekening er in godsnaam uit?

“Je moet je inderdaad vooraf heel goed afvragen wat voor vragen je stelt, wat je nu eigenlijk wilt gaan berekenen. En dat is bepaald geen eenvoudige opgave.

“Je kunt je bijvoorbeeld afvragen hoe je het aantal dimensies van het te berekenen object kunt bepalen. Daar zijn verschillende manieren voor. Wij stoppen er bijvoorbeeld extra bouwsteentjes in, om te kijken hoe ze zich verspreiden over de ruimtelijke richtingen, maar ook in de tijdsrichting. De dimensionaliteit van het berekende object bepaalt hoe die verspreiding verloopt.”

Verklaar u nader...

“Stel dat ik duizend kleine balletjes in een ronde vorm op tafel leg. Dan heb ik als het ware een tweedimensionaal object. Daarvan kan ik bekijken hoe de diameter verandert als ik extra balletjes toevoeg. Maar stel nu dat ik diezelfde balletjes pak en

er een driedimensionale bal van maak. Dan zou de diameter veel kleiner zijn, en ook minder snel groeien als ik balletjes toevoeg. Op een vergelijkbare manier konden wij berekenen dat ons object vierdimensionaal was.”

Gezond verstand

U werkt dus met vier dimensies. Maar snaartheoretici werken met wel elf dimensies. Is er enig verband tussen uw model en de snaartheorie?

“Het uitgangspunt van de snaartheorie is totaal verschillend. Het is in beginsel gewoon een postulaat dat er op kwantumniveau snaren bestaan. Alles wat we zien zou slechts het resultaat zijn van de manier waarop kwantumsnaren trillen in meerdere dimensies. Snaartheoretici moeten wel in elf dimensies kijken, anders werkt hun theorie niet.

“Of de snaartheorie klopt of niet, daar moesten we het maar niet over hebben. Er zijn immers geen experimenten die iets kunnen aantonen. Mijn werk bevindt zich overigens in dezelfde situatie.”

Maar gelooft u dat er elf dimensies zouden kunnen bestaan?

“Fenomenen op de Planck-schaal gaan onze intuïtie ver te boven. Soms werkt ons gezond verstand zelfs al niet bij de klassieke natuurkunde. Feit is dat er al heel lang gewerkt wordt met hypothesen die uitgaan van meerdere dimensies. Ik verwacht dat er ooit wel iets uit zal komen.”

De snaartheorie heeft in ieder geval een duidelijke notie van wat deeltjes eigenlijk zijn. Dat kunt u nog niet zeggen.

“Dat klopt. Maar ze weten niet waaruit een deeltje bestaat als je op nog kleinere schaal gaat kijken. Sommige snaartheoretici vermoeden dat er aan de basis van snaren nog iets fundamenteelers staat. Het is onduidelijk of het nog zinvol is om op dit niveau over deeltjes te praten.”

Bestaat ruimtetijd op zijn beurt ook uit deeltjes?

“Veel natuurkundigen vragen zich af wat de elementaire bouwstenen van ruimtetijd zijn. Naar mijn idee is het echter hoogst onwaarschijnlijk dat achter ruimtetijd iets als een deeltje schuilgaat. Ons begrip van ‘een deeltje’ is namelijk onlosmakelijk verbonden met het idee dat er al een ruimtetijd bestaat. Maar het gaat hier over de structuur van de ruimtetijd zelf.”

Wat is energie in uw theorie? De ruimte barst immers van de energie.

“Als we dat zouden weten, hadden we vast al een oplossing gevonden voor het probleem van donkere energie. We weten alleen dat we het absoluut niet begrijpen.”

Maar dat is toch vreemd? U merkt op dat Hawking geen causaliteit gebruikt. Maar u negeert een van de elementaire fenomenen in het universum: energie.

“Dat is niet waar. Ik noém het alleen niet specifiek. Want wat is het juiste begrip van dat fenomeen? Wat de energie van de ruimtetijd zelf is, en hoe die bijdraagt tot donkere energie, kan ik niet zeggen. Wist ik het maar.

“Maar hoe concreter mijn model wordt, en hoe meer aspecten daarvan juist blijken te zijn, des te beter zal ik zulke vragen kunnen beantwoorden. En in het verlegde daarvan zouden we misschien zelfs donkere energie kunnen berekenen. Zover zijn we nog lang niet, maar ik ben ervan overtuigd dat het met elkaar verbonden is.”