

Quantumtorsiebalans kan ware aard zwaartekracht blootleggen

Heeft de zwaartekracht quantumeigenschappen? Deze vraag is van groot belang bij het verbinden van de algemene relativiteitstheorie met de quantummechanica. Maar tot nu toe is de zwaartekracht op kleine schaal onmeetbaar, terwijl quantumtoestanden juist op grote schaal onmeetbaar zijn. Een variant op de torsiebalans van Cavendish biedt mogelijk een uitweg uit deze impasse.

Is de zwaartekracht klassiek of quantum? Dat is een cruciale vraag in de zoektocht naar het ultieme doel in de theoretische fysica: een theorie die de algemene relativiteitstheorie verbindt met de quantummechanica. Deze theorieën werken allebei prima, maar zijn niet met elkaar te verenigen. Volgens de algemene relativiteitstheorie kunnen afstanden en tijden bijvoorbeeld oneindig klein worden, zodat twee gebeurtenissen naadloos op elkaar volgen. De ruimtetijd is continu, als een laken waarop sterren en planeten vrijelijk rondtollen. Volgens de quantummechanica kunnen ruimte en tijd daarentegen niet oneindig klein worden. Als je heel ver inzoomt, verliezen deze begrippen hun betekenis. De ruimtetijd is dan

eerder een eierdoos, waarin deeltjes van de ene naar de andere plek springen.

Meestal kunnen beide theorieën prima naast elkaar bestaan. De algemene relativiteitstheorie regeert op grote schaal, de quantummechanica op kleine schaal. Maar er zijn verschijnselen – zoals de oerknal en zwarte gaten – waarbij beide schalen elkaar ontmoeten. Dan heb je een overkoepelende theorie nodig, die de zwaartekracht ook op kleine schaal beschrijft.

De vraag is dan: is dat een gekwantiseerde versie van de algemene relativiteitstheorie, of een gerelativeerde versie van de quantummechanica? Oftewel: moeten we wat deuken maken in het laken of de eierdoos een beetje gladstrijken?

Verstrengeling

In 1957 bedacht de Amerikaanse natuurkundige Richard Feynman dat je hierachter kunt komen door een zwaar object in ruimtelijke superpositie te brengen – een quantumverschijnsel waarbij de exacte positie onbepaald is zolang je die niet meet. Als dat object dan via de zwaartekracht een ander object ook in superpositie brengt, weet je dat de zwaartekracht quantumeffecten overdraagt en dat de algemene relativiteitstheorie dus gekwantiseerd moet worden.

Hoe toon je dit experimenteel aan? Tot dusver gingen natuurkundigen ervan uit dat je daarvoor de zwaartekracht moet dwingen om objecten in een zogeheten gedelokaliseerde quantumtoestand te brengen. Dat

betekent dat ze zich ver uit elkaar bevinden, maar toch met elkaar verstrengeld zijn, zodat ze ondanks hun gescheiden bestaan informatie met elkaar delen.

Objecten waarop de zwaartekracht van invloed is, zijn echter lastig te verstrengelen. Het zwaarste object dat tot nu toe in een gedelokaliseerde quantumtoestand is gebracht, is een molecuul van pakweg $4 \cdot 10^{-23}$ kilogram [2]. Daarentegen weegt het lichtste object waarvan het zwaartekrachtsveld is gemeten zo'n honderd milligram [3] – ruim een triljoen keer zo veel.

Op kleine schaal is de zwaartekracht dus onmeetbaar, en op grote schaal zijn quantumtoestanden onmeetbaar. Daardoor weet je niet of de zwaartekracht kan bijdragen aan het creëren van zo'n quantumtoestand, of dat die zich altijd op klassieke wijze afzijdig houdt. “De zwakste kracht van de natuur, de zwaartekracht, is tevens de wreedste”, schrijven natuurkundige Ludovico Lami (Universiteit van Amsterdam en QuSoft) en zijn coauteurs van de Universiteit van Ulm – toevallig ook de geboorteplaats van Albert Einstein – in een recente publicatie [4]. “De extreme zwakheid van de gravitationele interactie [...] heeft ons in de bittere situatie gebracht dat we haar ultieme aard nog niet kunnen bestuderen.”

Torsiebalans

Om deze impasse te doorbreken, hebben Lami en zijn collega's een nieuwe klasse van experimenten bedacht. De experimenten gebruiken een systeem

van zogeheten eendimensionale quantum-harmonische-oscillatoren, waarin de zwaartekracht de enige kracht van betekenis is. Het grote voordeel ten opzichte van eerder voor- gestelde experimenten is dat hierbij niet-verstrengelde toestanden worden gemeten.

Als voorbeeld beschrijven de natuurkundigen een 'optomechanische torsiebalans'. Dat is een quantumvariant op de torsiebalans waarmee de Engelse natuurkundige Henry Cavendish in 1798 de zwaartekracht tussen loden bollen bepaalde [5]. In de torsiebalans van Lami en zijn collega's wordt met lasers en spiegels de minieme draaiing gemeten die quantumdeeltjes onder invloed van elkaars zwaartekracht ondergaan. De natuurkundigen berekenden de maximale waarden die je in hun experimenten voor bepaalde signalen zou meten als de zwaartekracht klassiek is. Meet je een hogere waarde, dan moeten quantumeffecten bij deze kracht een rol spelen.

Droomhuwelijk

De experimenten kunnen helaas niet meteen in het lab worden opgetuigd. Er is nog enige technologische vooruitgang nodig om onder meer een voldoende lage omgevingstemperatuur te creëren en ervoor te zorgen dat de verplaatsing door de zwaartekracht lang genoeg in stand blijft. Volgens de natuurkundigen zijn dat echter geen onoverkomelijke horden. Ze stellen dat hun onderzoek de deur opent naar een nieuwe klasse van experimenten, waarmee de fundamentele vraag naar de quantumaard van de zwaartekracht hopelijk veel eerder dan verwacht beantwoord kan worden.

Misschien komen we dan eindelijk in de buurt van het natuurkundige droomhuwelijk dat Lami en zijn collega's in [4] bloemrijk beschrijven: "Het gewicht van de moderne natuurkunde rust op twee uitvoerig geteste, maar niet goed bij elkaar passende zuilen: de algemene relativiteitstheorie en de quantummechanica. Hoewel al vanaf hun geboorte aan het begin van de twintigste eeuw wordt gestreefd naar

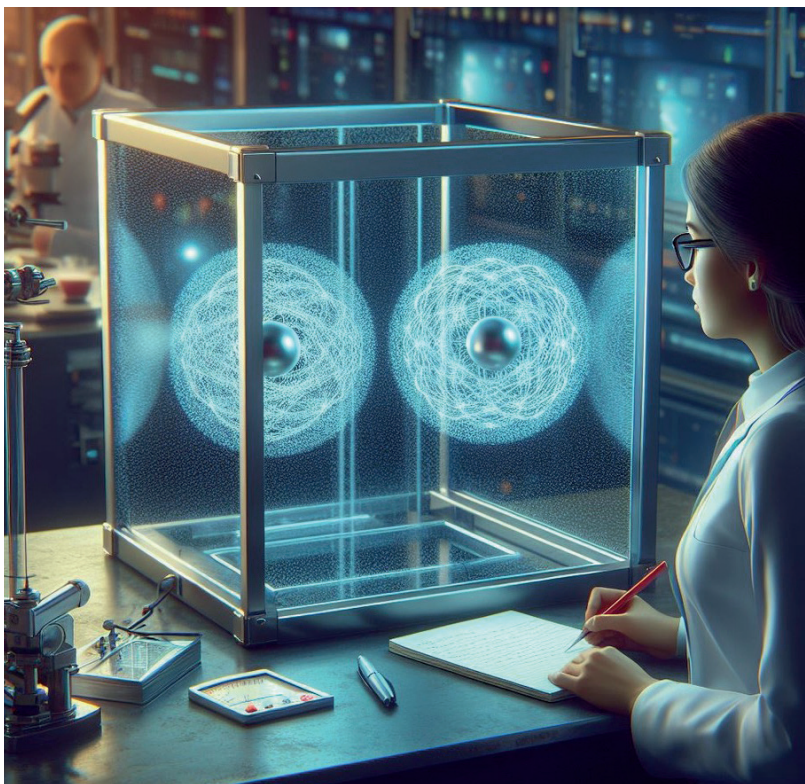
een huwelijk tussen deze twee, wachten natuurkundigen nog altijd op een uitnodiging voor de bruiloft."

REFERENTIES

- 1 R. Feynman, in *The Role of Gravitation in Physics: Report from the 1957 Chapel Hill Conference*, redactie C.M. DeWitt en D. Rickles (1957).
- 2 Y. Y. Fein, P. Geyer, P. Zwick, F. Kialka, S. Pedalino, M. Mayor, S. Gerlich en M. Arndt, *Quantum*

superposition of molecules beyond 25 kDa, *Nat. Phys.* **15**, 1242 (2019).

- 3 T. Westphal, H. Hepach, J. Pfaff en M. Aspelmeyer, Measurement of gravitational coupling between millimetre-sized masses, *Nature* **591**, 225 (2021).
- 4 L. Lami, J. S. Pedernales en M. B. Plenio, Testing the Quantumness of Gravity without Entanglement, *Phys. Rev. X* **14**, 021022 (2024).
- 5 H. Cavendish, Experiments to determine the Density of the Earth, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London (part II)* **88**, 469-526 (1798).
- 6 D. Schenk, Wat gebeurt er als de zwaartekracht de wereld van het allerkleinste betreedt, *NRC*, 3 juli (2024).



Met kunstmatige intelligentie gegenereerde afbeelding van quantumzwaartekracht-experimenten in het lab.

LEIDEN EN GRONINGEN

Ook elders in Nederland proberen natuurkundigen de quantumaard van zwaartekracht bloot te leggen [6]. Zo laat Tjerk Oosterkamp met zijn collega's aan de Universiteit Leiden in een experiment bij -273 graden Celsius een magneetje zweven. Daaronder draait een wiel met drie blokjes van slechts een paar milligram, die door hun zwaartekracht het magneetje beurtelings een klein beetje omlaagtrekken. Uiteindelijk willen de natuurkundigen op deze manier de zwaartekracht meten tussen objecten die klein genoeg zijn om in superpositie te brengen.

Aan de Rijksuniversiteit Groningen werkt Anupam Mazumdar met zijn collega's aan een experiment met twee diamantjes die op zo'n vijftig micrometer van elkaar worden geplaatst. De diamantjes, die slechts een picogram wegen, kunnen in een bepaald punt met elkaar worden verstrengeld. De natuurkundigen willen achterhalen of de zwaartekracht deze verstrengeling tot stand kan brengen. Beide groepen verwachten nog enkele decennia nodig te hebben voordat ze eventuele quantumkenmerken van zwaartekracht kunnen meten.