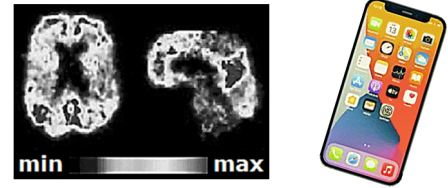


Wat is quantumfysica?

Quantumfysica beschrijft het allerkleinste: de wisselwerking van materie en energie op moleculaire schaal en kleiner. Op dat allerkleinste niveau blijkt de klassieke natuurkunde niet te voldoen. Dat komt door de dualiteit (dubbelzinnigheid) van de natuur: deeltjes kunnen zich ook als golven gedragen en golven ook als deeltjes. Dat leidt op de allerkleinste schaal tot een heel andere natuurkunde: quantumfysica.



Volgens veel natuurkundigen zegt de quantumfysica dat de natuur zich op het allerkleinste niveau statistisch gedraagt, niet causaal. Die opvatting heeft vergaande filosofische consequenties. Het zogeheten correspondentieprincipe eist echter dat bij steeds grotere afmetingen de quantumfysica naadloos overgaat in de klassieke natuurkunde.

Quantumfysica maakte de moderne computertechnologie mogelijk, inclusief medische apparatuur, navigatie, mobiele telefonie, enz. De theorie is buitengewoon succesvol.

Quantisatie ⁽¹⁾

Stralingsenergie is gequantiseerd. Elektromagnetische straling met frequentie f bestaat uit fotonen, energiepakketjes met elk een energie $E_{foton} = h \cdot f$. Fotonen kunnen zich, in wisselwerking met materie, gedragen als deeltjes.

In het atoommodel van Bohr is de energie van het atoom gequantiseerd. Daarmee, en met de quantisatie van stralingsenergie, is het bestaan van lijnspectra te begrijpen.

Dualiteit

Elektromagnetische straling is een golf en bestaat tegelijk uit fotonen, stralingsdeeltjes. Straling heeft dus golf- en deeltjeseigenschappen: straling is dual (dubbelzinnig).

Begin 20e eeuw werd ontdekt dat materie ook dual is: materiedeeltjes gedragen zich soms als golven. Bij elk deeltje met massa m en snelheid v , dus met impuls $p = m \cdot v$, hoort een zogeheten DeBroglie-golflengte. Zie de formule hier linksonder. Verschil is dat materiegolven geen fysische golven zijn. Ze worden opgevat als een wiskundig hulpmiddel om bepaald gedrag van deeltjes mee te beschrijven en begrijpen.

Volgens de quantumfysica bestaat alle straling en alle materie uit zogeheten quantumdeeltjes, die gequantiseerd en dual zijn. Afhankelijk van de situatie heeft een quantumdeeltje meer golfeigenschappen of juist meer deeltjeseigenschappen. Daarom noem je het ook wel een quantumgolf, een golfpakketje of kortweg een quantum.

**DeBroglie -
golflengte:**

$$\lambda = h/p$$

$$= h/(m \cdot v)$$

Golfeigenschap	~	Deeltjeseigenschap	
f : frequentie	~	E : energie	$E = h \cdot f$
λ : golflengte	~	p : impuls ($p = m \cdot v$)	$p = h/\lambda$
A : amplitude	~	P : waarschijnlijkheid (A^2)	

Golffunctie, waarschijnlijkheidsverdeling ⁽²⁾

Een quantumdeeltje beschrijf je met een golffunctie, aangegeven met de Griekse letter ψ (psi). De golffunctie is niet het quantum zelf maar bevat wel alle informatie over het quantum, zie de tabel. Zolang je de plaats van het quantum niet meet, kan de golffunctie een groot gebied beslaan. De informatie over de plaats waar het quantum is, is statistisch: voor elke mogelijke plaats is het kwadraat van de golffunctie ψ op die plaats de kans dat het quantum daar is. Je noemt dat een waarschijnlijkheidsverdeling.

Met een plaatsmeting lokaliseer je het quantum. De golffunctie verandert dan zó, dat de waarschijnlijkheid dat het quantum op het tijdstip van meting op de gemeten plaats is, groot wordt. Je zegt dat de golffunctie wordt gereduceerd of 'instort'.

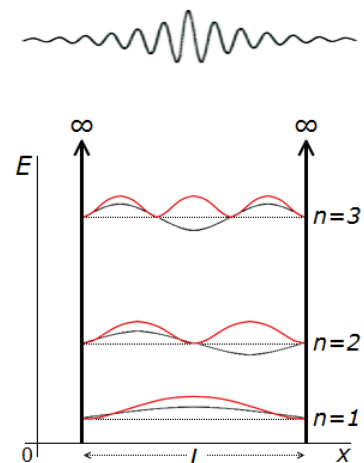
De opvatting dat de gekwadrateerde golffunctie een waarschijnlijkheidsverdeling geeft en dat de golffunctie na meting instort, heeft op dit moment veel aanhang en staat bekend als de Kopenhaagse interpretatie.

- De golffunctie van een vrij quantum kan een groot gebied beslaan.
- De golffunctie van een gebonden quantum, dat is: een quantum gevangen in een 'energieput', beslaat een beperkt gebied.

In een energieput met lengte L en oneindig hoge wanden is de energie E_n van een quantum met massa m gequantiseerd volgens:

$$E_n = n^2 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2} \quad \text{met: } n = 1, 2, \dots$$

(grondtoestand en aangeslagen toestanden)



Wanneer quantumfysica, wanneer klassieke fysica?

Alleen als een quantum iets tegenkomt dat niet veel groter is dan de grootte-orde van zijn eigen golflengte (λ), heb je quantumfysica nodig om de interactie te beschrijven. Bij grotere afmetingen volstaat de klassieke natuurkunde.

Onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg

De positie van een quantum beschrijf je altijd met een waarschijnlijkheidsverdeling. Ook na een plaatsmeting, als de golf functie is gereduceerd, blijft er een waarschijnlijkheidsverdeling over, alleen nu sterk gelokaliseerd. De plaats van een quantum kun je nooit exact bepalen, zoals in de klassieke fysica. Dat geldt ook voor de impuls p van het quantum. De onbepaaldheden van x en p hangen samen: een quantum met een golf functie die een redelijk exacte plaatsbepaling mogelijk maakt, heeft juist een grote onbepaaldheid van zijn impuls, en andersom. Dus x en p tegelijk nauwkeurig bepalen kan niet. Daarom noem je x en p complementaire grootheden.

Met Δx de onbepaaldheid van x en Δp die van p , geldt volgens Heisenberg:

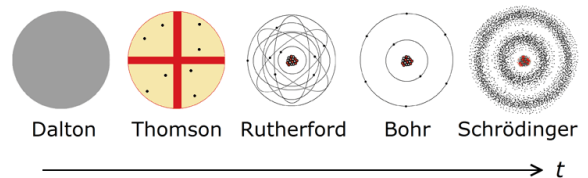
$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi} \quad (\text{en ook: } \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi})$$

Verwar dit niet met meetonzekerheid. Die komt voort uit de (on)nauwkeurigheid van meetapparatuur. Onbepaaldheid is een eigenschap van de natuur zelf en komt voort uit het golfkarakter van quanta.

Ook een gebonden quantum heeft, zelfs bij de laagste temperatuur (0 K), altijd nog een Δp , een onbepaaldheid van zijn impuls. Wel zit het bij 0 K in het laagst mogelijke energieniveau. De kleinst mogelijke energie van een gebonden quantum of quantumstelsel noem je de nulpuntsenergie.

Atoommodellen

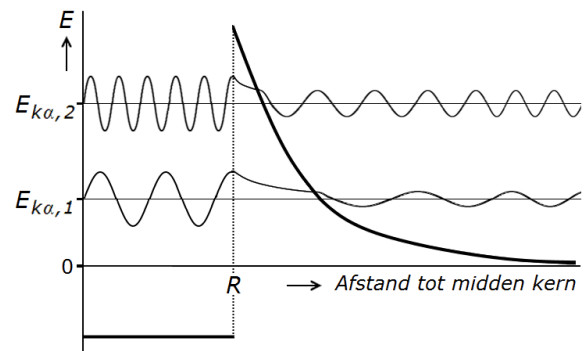
De figuur hiernaast geeft een indruk van de ontwikkeling van het atoommodel.



Tunnelen

Een krachtveld, bijvoorbeeld een elektrisch veld, kan voor een quantum een energiebarrière zijn. De elektrische kracht stoot het quantum af of trekt het terug, kinetische energie wordt omgezet in elektrische energie. Zie de figuur hiernaast: de hoogte van de barrière geeft de sterkte van het veld aan, de breedte van de barrière de uitgebreidheid van het veld.

In zo'n barrière daalt ψ exponentieel maar wordt nooit nul. Een quantum, gebonden door zo'n barrière, heeft dus een (kleine) kans de barrière te doorbreken. Dat heet 'tunnelen'. Hoe hoger de barrière, hoe breder de barrière en hoe groter de massa van het quantum, hoe kleiner de tunnelkans. Alfaverval is alleen op basis van tunneling te verklaren (zie de figuur). De Scanning Tunneling Microscope, die op nanoschaal oppervlakten kan aftasten, is er op gebaseerd.



(1) Niet alleen stralingsenergie is gequantiseerd

Elektrische lading is ook gequantiseerd. Het elementaire ladingsquantum (e) van $1,60 \cdot 10^{-19}$ C is de kleinste hoeveelheid lading die je kunt isoleren. (Quarks, met hun 'gebroken' lading van $\frac{1}{3}e$ of $\frac{2}{3}e$, komen niet afzonderlijk voor, alleen in gebonden twee- of drietallen met een totale lading van nul of e). Ook massa is gequantiseerd. Elk voorwerp bestaat immers uit een eindig aantal deeltjes (moleculen, atomen, enz.). De hele natuur is gequantiseerd en dual.

(2) Hoe kom je aan de golf functie van een quantumdeeltje? De schrödingervergelijking (Geen examenstof)

Golf functies vind je met de schrödingervergelijking, gevonden door Erwin Schrödinger. Hieronder staan twee versies van de schrödingervergelijking. Links de tijdsafhankelijke versie, rechts de tijdsafhankelijke, beide eendimensionaal.

Het zijn zogeheten differentiaalvergelijkingen. De oplossing daarvan is niet een getal (of een aantal getallen) maar een functie.

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \cdot \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + E_p(x) \cdot \psi(x) = E_k \cdot \psi(x) \qquad -\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \cdot \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} + E_p(x) \cdot \psi(x,t) = i \frac{\hbar}{2\pi} \cdot \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t}$$

ψ is de golf functie die je voor het quantumdeeltje zoekt, m is de massa van het deeltje, $E_p(x)$ is de potentiële energie van het deeltje, E_k is de kinetische energie en i is een imaginair getal waarvoor geldt: $i^2 = -1$.

Voor een bepaald quantumdeeltje in bepaalde omstandigheden vind je ψ door eerst m en $E_p(x)$ in te vullen (en in de linker ook E_k) en daarna de vergelijking op te lossen. Voor een eendimensionale 'energieput' met oneindig hoge wanden en lengte L bijvoorbeeld is $E_p(x)$ binnen de put nul en oneindig op de rand en daarbuiten.

De schrödingervergelijking is de centrale vergelijking in de quantumfysica, vergelijkbaar met $F_R = ma$ (eigenlijk $F_R = dp/dt$) in de klassieke mechanica. Door in $F_R = dp/dt$ de juiste F_R en m in te vullen kun je van elk voorwerp de beweging beschrijven. Door in de schrödingervergelijking de juiste m en $E_p(x)$ in te vullen kun je van elk quantumdeeltje de golf functie vinden.