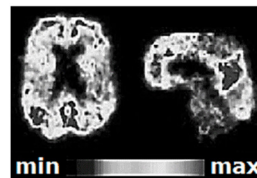


Quantumfysica

Overzicht

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 de quantumfysica gedraagt de natuur zich op het allerkleinste niveau statistisch, niet deterministisch. Dat is in strijd met de alledaagse ervaring en heeft grote filosofische consequenties. De alledaagse wereld is immers wél deterministisch. Daarom eist het correspondentieprincipe dat bij steeds grotere afmetingen de quantumfysica naadloos overgaat in de klassieke, deterministische natuurkunde.

Quantumfysica maakte de moderne computertechnologie mogelijk, inclusief medische apparatuur, navigatie, mobiele telefonie, enz. De theorie is buitengewoon succesvol en al vele malen experimenteel bevestigd.

Elektromagnetische straling – kwantisatie⁽¹⁾, dualiteit

- Elektromagnetische straling bestaat uit twee gekoppelde golven: een golvend elektrisch veld en loodrecht daarop een golvend magnetisch veld. Het geheel breidt zich uit met de lichtsnelheid. Het golfkarakter van de straling is experimenteel aantoonbaar: elektromagnetische straling vertoont interferentie, buiging en diffractie.

Aan een tralie met tralieconstante d interfereert straling met golflengte λ volgens:

$$d \cdot \sin(\alpha_n) = n \cdot \lambda \quad (n = 1, 2, \dots)$$

- De energie van elektromagnetische straling is gequantiseerd. Die wordt overgedragen in de vorm van fotonen, kleine energiepakketjes. Fotonen kunnen zich gedragen als deeltjes. Bijzondere deeltjes, want zonder rustmassa en altijd bewegend met de lichtsnelheid. Ook het deeltjeskarakter van straling is experimenteel aantoonbaar: fotonen kunnen botsen met andere deeltjes en daar impuls bij uitwisselen.

Heeft de straling frequentie f , dan hebben de fotonen elk een energie E :

$$E_{foton} = h \cdot f \quad (h \text{ is de constante van Planck: } 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js})$$

Elektromagnetische straling heeft dus golf- en deeltjeseigenschappen: straling is dual (dubbelzinnig).

Materie – dualiteit. Golf functie, waarschijnlijkheidsverdeling

Begin 20e eeuw werd ontdekt dat materie ook dual is. Onder bepaalde condities vertonen materiedeeltjes interferentie, buiging en diffractie. Golfgedrag dus, goed te begrijpen met de golftheorie. Daarom wordt aan elk materiedeeltje een denkbeeldige golf toegekend. De golflengte van die 'materiegolf' heet de debroglie-golflengte. Zie de formule hier linksonder. De materiegolf beschrijf je met een golf functie, aangegeven met de Griekse letter ψ (*psi*).⁽²⁾

Zolang je de plaats van het deeltje niet meet, kan de golf een groot gebied beslaan. Voor elke mogelijke positie van het deeltje geeft het kwadraat van de amplitude van zijn golf functie de kans dat het deeltje daar is. De golf functie bevat dus statistische informatie over de positie van het deeltje. Je noemt dat een waarschijnlijkheidsverdeling.

Quanta

Volgens de quantumfysica bestaat zowel elektromagnetische straling als materie uit zogeheten quantumdeeltjes, die 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 (meervoud quanta). Golf en bijbehorend deeltje hebben corresponderende eigenschappen, zie de tabel.

Quanta gedragen zich altijd óf als golven, óf als deeltjes. Nooit als allebei tegelijk.

Debroglie-⁽³⁾
golflengte:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$$

	Golfeigenschap	Eigenschap van het deeltje
Elektromagn. golf	Frequentie (f)	Energie: $E_{foton} = h \cdot f$
	Golflengte (λ)	Impuls: $p_{foton} = h/\lambda$ ⁽⁴⁾
Materiegolf	Amplitude (A)	Positie (waarschijnlijkheid, P): $P \sim A^2$
	Golflengte (λ)	Impuls: $p = h/\lambda = h/(m \cdot v)$ Kinetische energie: $E_k = p^2/(2m)$ ⁽⁴⁾

Vrije quanta

Een quantum is vrij als er geen krachten op werken. Een vrij quantum kan zich in principe overal bevinden. De golffunctie beslaat een groot gebied.

Als je het quantum met een plaatsmeting lokaliseert, moet het daarna met een

nieuwe golffunctie worden beschreven. Immers, de waarschijnlijkheid dat het op het tijdstip van meting op de gemeten plaats is, is nu veel groter dan vóór de meting. Je zegt dat de oude golffunctie 'wordt gereduceerd' of 'instort'.



Gebonden quanta, energieput. Waterstof

Een quantum is gebonden als het in zijn bewegingsvrijheid wordt beperkt door een extern krachtveld. Bijvoorbeeld een elektron in de wolk om een atoomkern. Omdat het elektron energie nodig heeft om aan het krachtveld van de kern te ontsnappen, zeg je dat het gevangen is in een energieput.

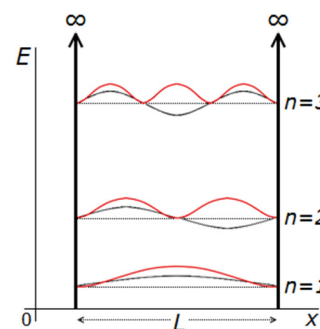
Een gebonden quantum beschrijf je met een staande golf. Die beslaat een beperkt gebied.

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

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

- Voor gebonden elektronen in atomen voldoet het bovenstaande model voor de energieput niet. Met een beter model geeft de schrödingervergelijking⁽²⁾ voor de energieniveaus E_n van het elektron in het waterstofatoom:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (eV)} \quad n = 1, 2, \dots : \text{ het hoofdquantumgetal}$$

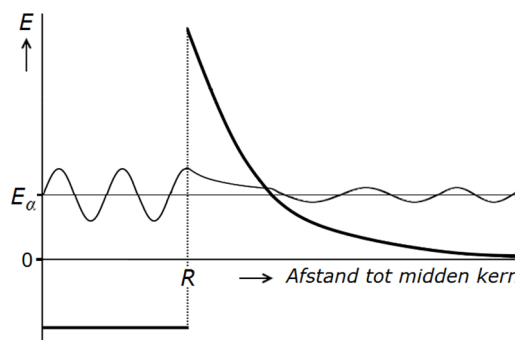


Tunnelen

De figuur hiernaast toont de energie E_α van een α -deeltje in de energieput van een atoomkern van een α -straler. Je ziet dat het α -deeltje volgens de klassieke fysica te weinig energie heeft om aan de kern te ontsnappen.

De golffunctie⁽²⁾ van het α -deeltje daalt in de energiebarrière exponentieel maar wordt niet nul, en loopt buiten de barrière door, met een veel kleinere amplitude. Quantumfysisch heeft het α -deeltje dus wél een kleine kans te ontsnappen.

Dat typisch quantumfysische verschijnsel heet tunnelen: een quantum passeert een energiebarrière die klassiek gezien te hoog is. Hoe hoger en breder de barrière, en hoe groter de massa van het quantum, hoe kleiner de tunnelkans.



Elektronspin, quantumtoestand

De laatste formule hierboven zegt dat de energie van een gebonden elektron in een waterstofatoom wordt bepaald door een discreet getal, het hoofdquantumgetal n . In het atoommodel van Bohr geeft n behalve de energie ook de schil aan waarin een gebonden elektron zit: $n = 1$ voor de K-schil, $n = 2$ voor de L-schil, enz.

In het quantumfysische atoommodel zijn deze hoofd-energieniveaus onderverdeeld in subniveaus, elk met een iets andere energie. Voor een volledig quantumfysisch atoommodel zijn vier discrete quantumgetallen nodig: naast n nog het 2e of nevenquantumgetal (l), het 3e of magnetisch quantumgetal (m) en het 4e of spinquantumgetal (m_s).⁽⁵⁾

Het spinquantumgetal beschrijft de elektronspin, een quantumfysische, magnetische eigenschap van elektronen. Er zijn voor het spinquantumgetal van elektronen twee waarden: $+1/2$ (spin up) en $-1/2$ (spin down).

Een set van vier quantumgetallen n , l , m en m_s heet een quantumtoestand.⁽⁶⁾

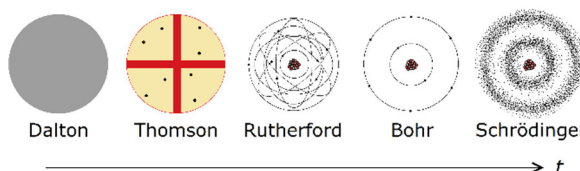
Uitsluitingsprincipe van Pauli

Volgens het uitsluitingsprincipe van Pauli (meestal het pauliverbod genoemd) is het niet mogelijk dat in één systeem twee gebonden quanta dezelfde quantumtoestand hebben.

In één atoom kunnen twee elektronen dus niet dezelfde quantumtoestand hebben. Zijn n , l en m hetzelfde, dan moet het ene elektron dus $m_s = +1/2$ hebben en het andere elektron $m_s = -1/2$.

Atoommodellen

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



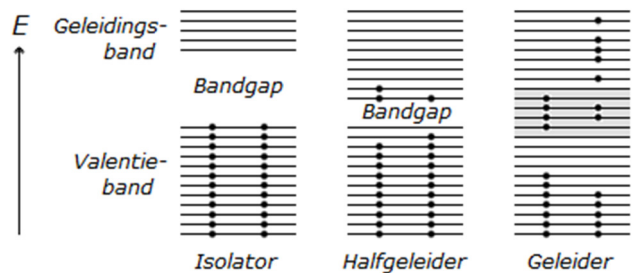
Vastestoffysica, bandentheorie

In een vaste stof zitten de atomen zo dicht opeen dat de hoogste discrete energieniveaus (buitenste schillen) van naburige atomen overlappen. Dat geeft een wisselwerking die, vanwege het Pauliverbod, een klein verschil oplevert tussen het hoogste energieniveau van het ene atoom en dat van het andere atoom. Dit geldt voor elk tweetal atomen. Daardoor worden de hoogste energieniveaus van alle atomen samen een gemeenschappelijke energieband: een vrijwel continue energieverdeling tussen een minimum- en een maximumwaarde. Omdat de lagere energieniveaus veel minder overlappen blijven die nagenoeg discreet, of ontstaan er smallere energiebanden. In deze lagere energieniveaus zitten de elektronen die voor de binding tussen de atomen zorgen.

De energieband met het hoogste energieniveau heet de geleidingsband. Elektronen met genoeg energie om in deze band terecht te komen, kunnen voor elektrische geleiding zorgen. De band direct daaronder heet de valentieband. Het energieverschil tussen het hoogste valentieniveau en het laagste geleidingsniveau heet de bandgap.

Met deze bandentheorie is het verschil tussen isolators, halfgeleiders en geleiders goed te begrijpen.

- Een isolator heeft een valentieband waarin alle energieniveaus bezet zijn door elektronen. De bandgap is te groot om te overbruggen.
- Een halfgeleider lijkt op een isolator. Alleen is hier de bandgap klein, niet veel groter dan de thermische energie van de elektronen. Sommige elektronen kunnen hun eigen thermische energie benutten om de overstap naar de geleidingsband te maken. Aanvoer van extra thermische energie of stralingsenergie stimuleert de overstap.
- Een geleider heeft een valentieband en een geleidingsband die elkaar deels overlappen. Er zijn dus altijd energieniveaus in de geleidingsband bezet door elektronen, waardoor er altijd elektrische geleiding mogelijk is.



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.

(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 $\frac{1}{3} \cdot e$ of $\frac{2}{3} \cdot e$, 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? De schrödingervergelijking (Geen CE-stof)

Golf functies vind je met de schrödingervergelijking, genoemd naar zijn ontdekker, Erwin Schrödinger. Hieronder staan er twee versies van. 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.

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

ψ is de golf functie die je zoekt, m is de massa, $E_p(x)$ is de potentiële energie en E_k is de kinetische energie van het deeltje. \hbar (spreek uit: h-streep) is de constante van Dirac en gelijk aan $h/(2\pi)$; i is een imaginair getal waarvoor geldt: $i^2 = -1$.

Voor een bepaald deeltje 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 lengte L en oneindig hoge, rechte wanden 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 deeltje de golf functie vinden.

(3) De impuls van een foton bereken je met $p_{foton} = h/\lambda$, een formule uit de speciale relativiteitstheorie (geen CE-stof). Op deze formule baseerde Louis de Broglie later zijn formule voor de golflengte van een materiedeeltje, $\lambda = h/p$.

(4) Geen CE-stof.

(5) l en m zijn geen CE-stof. (n en m_s wél!)

(6) Met de woorden 'schil' en 'spin' proberen we van de submicroscopische wereld een klassiek beeld te maken. Dat beeld is echter onjuist. De submicroscopische wereld is fundamenteel anders. Het enige wat we weten is dat die wereld gequantiseerd en dual is.