



# QUANTUMFYSICA

## QUANTUMTOESTANDEN

**Naam:**

**Klas:**

**Datum:**

## QUANTUMTOESTANDEN

### ERIK VERLINDE

Erik Verlinde is een theoretisch fysicus. Dat betekent dat hij aan de hand van eerder gedane experimenten met behulp van wiskundige methoden probeert om nieuwe manieren te vinden waarop de wereld verklaard kan worden. Erik Verlinde is voornamelijk bekend vanwege zijn nieuwe zwaartekrachtstheorie en zijn werk binnen de snaartheorie. Deze beide onderwerpen binnen het moderne natuurkundige onderzoek maken gebruik van voorspellingen en verschijnselen uit de quantummechanica.

1. Ga met elkaar in discussie over hoe quantummechanica en zwaartekracht met elkaar zouden kunnen samenhangen.

Bekijk voor je verder gaat het filmpje van Erik Verlinde met de titel Quantumtoestanden op <http://www.quantumuniverse.nl/filmpjes>.

Quantummechanica is overal. De gevolgen van quantummechanica zijn niet alleen merkbaar op het allerkleinste niveau; ook verschijnselen en technologie uit ons dagelijks leven hebben hun oorsprong in de quantummechanica. Doordat er op dit moment veel onderzoek wordt gedaan naar quantummechanica zal dit in de toekomst alleen maar toenemen.

2. Bedenk bij elk van de volgende verschijnselen een mogelijke toepassing in de techniek.

Quantumtoestand

.....

Quantumtunneleffect

.....

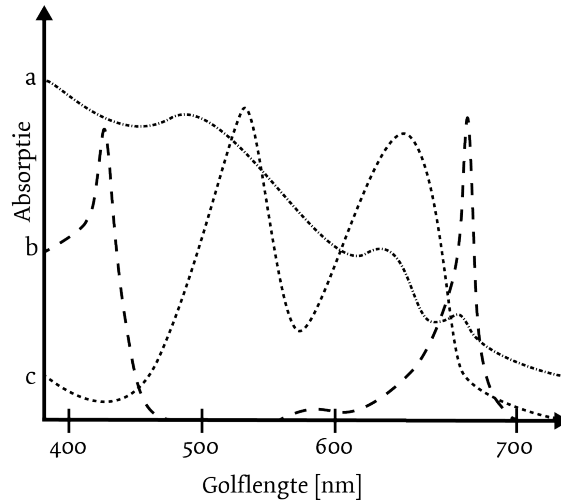
### BLADGROENKORRELS

Alle planten en een groot aantal bacteriën gebruiken zonlicht om koolstofdioxide en water om te zetten in zuurstof en chemische energie, bijvoorbeeld in de vorm van suiker. Dankzij dit proces hebben wij genoeg zuurstof om te ademen, kunnen we een lekkere zoete appel eten en kunnen we ons huis warm houden met aardgas. Dit proces heet fotosynthese. In planten vindt het plaats in de bladeren, met behulp van chlorofylmoleculen in bladgroenkorrels. De eerste stap van dit proces lijkt veel op de manier waarop waterstofatomen energie kunnen opnemen: de chlorofylmoleculen slaan de energie op door in een aangeslagen toestand te geraken.

3.

A. Bepaal welke van de onderstaande grafieken het absorptiespectrum van een chlorofylmolecuul uit een boomblad weergeeft. Motiveer je antwoord.

.....



.....

B. Bereken op basis van je antwoord bij 3A wat de energie is van de aangeslagen toestand(en) van dit chlorofylmolecuul.

.....

.....

.....

.....

C. Toon aan met een berekening dat de de Broglie-golflengte van een foton gelijk is aan de klassieke golflengte van het foton. Hint: zoek in Binas tabel 35 E2 op wat de impuls van een foton is.

.....

.....

.....

.....

Je doet in het laboratorium onderzoek naar de interactie tussen elektronen en dit chlorofylmolecuul. Je wilt chlorofylmoleculen in de aangeslagen toestand brengen door ze te beschieten met elektronen.

- D.** Bereken de de Broglie-golflengte van een elektron dat het chlorofylmolecuul in de minst energetische aangeslagen toestand kan brengen. Leg uit of dit de maximale of minimale golflengte is. Als je bij opdracht 3A geen antwoord hebt gevonden, ga dan uit van foto-nabsorptie bij 800 nm.

.....

.....

.....

.....

- E.** Bereken de breedte van de potentiaalput waarin dit elektron in het laagste energieniveau gevangen zou kunnen worden. Wat valt je op als je je antwoord met dat van opdracht 3D vergelijkt?

.....

.....

.....

.....

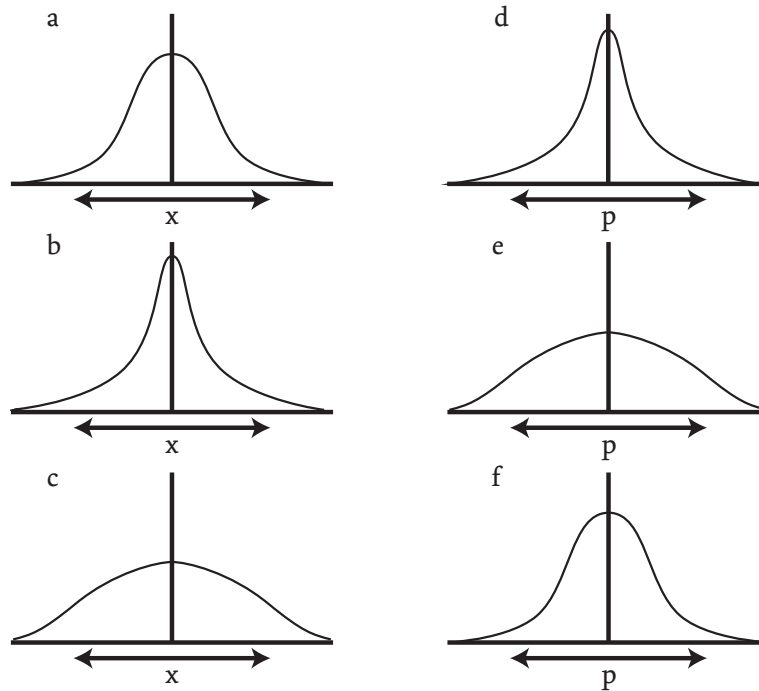
In bladgroenkorrels liggen chlorofylmoleculen in grote structuren opgesloten. Ze kunnen de energie die zit opgeslagen in hun aangeslagen toestand aan elkaar doorgeven zodat deze uiteindelijk in het zogenaamde reactiecentrum terechtkomt. In het reactiecentrum wordt deze energie gebruikt voor de fotosynthesereactie, het produceren van zuurstof. Bij het doorgeven van deze energie speelt de quantummechanica een belangrijke rol.

- 4.** Brainstorm met elkaar over hoe je zou kunnen aantonen dat quantummechanische processen een rol spelen bij het doorgeven van de energie door chlorofylmoleculen.

**WAT EEN TOESTAND!**

Chlorofylmoleculen kunnen hun energie doorgeven aan elkaar omdat ze zo dicht bij elkaar zitten dat hun golffuncties overlappen. Hierdoor worden de golffuncties afhankelijk van elkaar. We noemen dat ook wel verstrengeld. Dit is een eigenschap die niet alleen bij fotosynthese een rol speelt, maar bij heel veel processen met alle mogelijke soorten deeltjes die klein genoeg zijn. Ook elektronen kunnen bijvoorbeeld met elkaar verstrengeld zijn. In de volgende opdracht kijken we eerst naar verschillende waarschijnlijkheidsverdelingen van één elektron zodat we later de samenhang van waarschijnlijkheidsverdelingen, de verstrengeling, van twee elektronen beter kunnen begrijpen.

5. Hieronder staan waarschijnlijkheidsverdelingen voor de impuls en de positie van verschillende elektronen schematisch weergegeven. Verbind de waarschijnlijkheidsverdelingen met elkaar die bij hetzelfde elektron horen.



- B. Bereken wat de totale oppervlakte is onder grafiek a. Hoe zit dat bij grafiek d? Leg uit.

.....

.....

.....

.....

We verrichten nu een meting naar de positie van het elektron uit grafiek c. We vinden het elektron op ongeveer een halve nanometer links van  $x = 0$ . De waarschijnlijkheidsverdeling verandert door onze meting.

**C.** Beschrijf hoe hoog en hoe breed de piek in grafiek c nu is geworden.

.....

.....

.....

**D.** Beschrijf hoe de grafiek die de kansverdeling van de impuls van het elektron beschrijft er nu uitziet.

.....

.....

.....

**VERSTRENGELING**

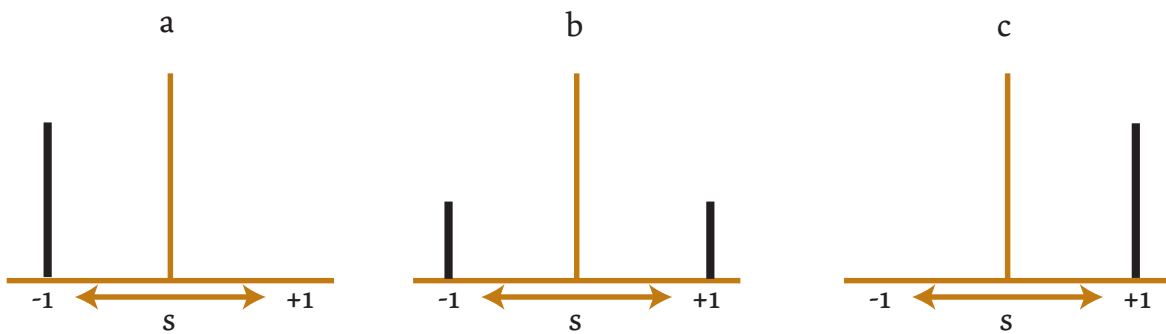
Elektronen die dicht bij elkaar in de buurt komen oefenen invloed op elkaar uit. Naast positie en impuls hebben elektronen ook een eigenschap die vergelijkbaar is met impulsmoment (hoe veel ze draaien) die we ook wel spin noemen. Net als de energieniveaus in het waterstofatoom is ook deze spin gequantiseerd. Voor elektronen houdt dat in dat ze bij een meting in een bepaalde richting een spintoestand van +1 of -1 hebben, ofwel met de rotatie-as omhoog of naar beneden. Geen enkele andere toestand is mogelijk. We noteren deze toestanden met  $|\uparrow\rangle$  (+1 of omhoog) en  $|\downarrow\rangle$  (-1 of omlaag). Ook deze toestanden zijn onderhevig aan de onzekerheidswetten van de quantummechanica, dus kun je er een waarschijnlijkheidsverdeling van maken.

6.

A. Hieronder zie je drie spintoestanden weergegeven. De spin  $s$  staat op de horizontale as en de kans op de spin  $p$  in procent staat op de verticale as. Bepaal voor elk van de onderstaande elektronspintoestanden hoe groot de kans is dat een meting van de spin een resultaat van  $+1$  geeft. Bepaal vervolgens voor elk elektron wat de kans is dat je bij een meting een spin van  $-1$  vindt.

a: .....

b: .....



c: .....

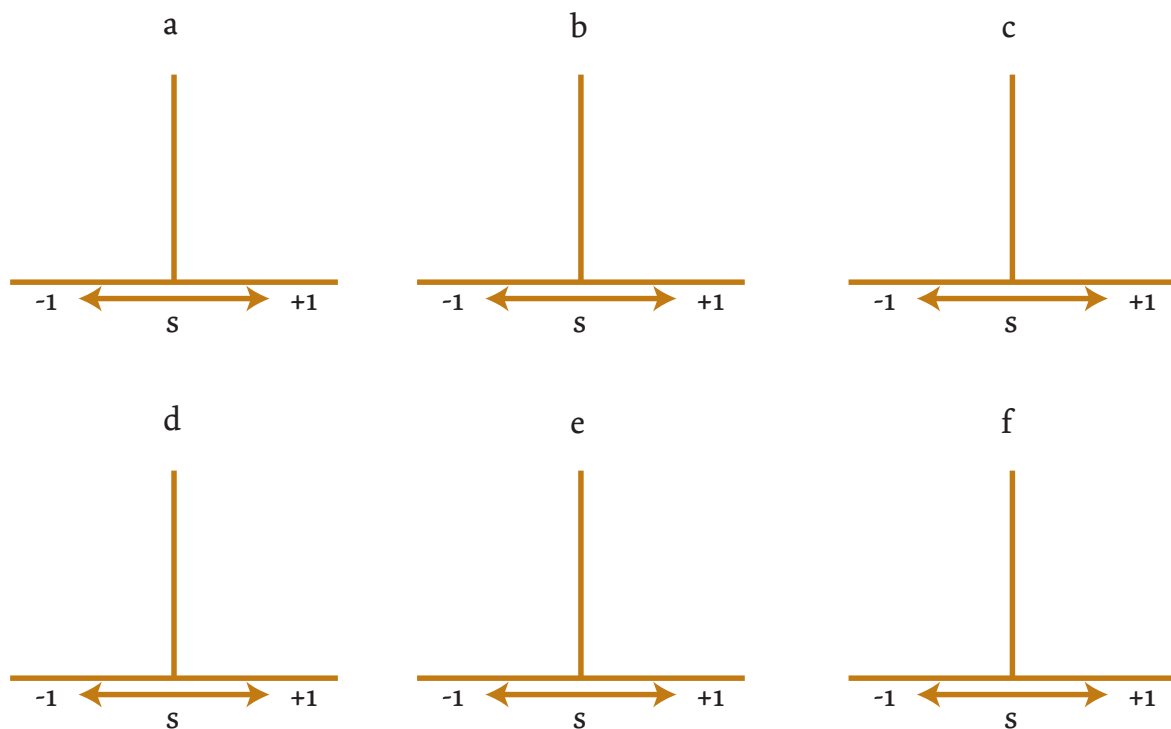
De toestand van elektron a en elektron c is eenduidig. Deze deeltjes hebben respectievelijk een spintoestand van  $-1$  en  $+1$ . Voor elektron b geldt echter dat we bij een meting beide uitkomsten zouden kunnen vinden. We noemen dit een superpositie van toestanden. Net als voor de positie, waarbij geldt dat een elektron “op twee plaatsen tegelijk kan zijn”, kan het deeltje zich dus ook in twee spintoestanden tegelijk bevinden. Omdat het zich feitelijk half in de ene en half in de andere toestand bevindt noteren we deze toestand als volgt:

$$|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle.$$

Pas op het moment dat er een meting wordt verricht, wordt het elektron gedwongen zich te veranderen in elektron a of c, en dus te kiezen voor  $|\uparrow\rangle$  of  $|\downarrow\rangle$ .

**B.** Bepaal de volledige spintoestand van de volgende deeltjes en teken hun waarschijnlijkheidsverdeling in onderstaande figuur:

- a: 25 % kans op  $|\uparrow\rangle$
- b:  $1/3$  kans op  $+1$
- c: 80 % kans op  $|\downarrow\rangle$
- d: 75 % kans op  $+1$
- e:  $1/5$  kans op  $|\downarrow\rangle$
- f: 33 % kans op  $|\downarrow\rangle$



De spintoestanden van verschillende deeltjes kunnen met elkaar verstrengeld zijn. Dit gebeurt bijvoorbeeld als een elektron en een positron ontstaan in een vacuüm. Een positron is een deeltje met dezelfde eigenschappen als een elektron, alleen is de lading tegengesteld. Deze deeltjes kunnen ontstaan door spontane fluctuaties in het vacuüm. Omdat we nog wel met behoudswetten te maken hebben, moet de totale energie en spin echter hetzelfde zijn als vóór het ontstaan.

**C.** Bereken hoe de volgende eigenschappen van de twee ontstane deeltjes met elkaar samenhangen.

Positie: .....

.....

Snelheid: .....



.....

Spin: .....

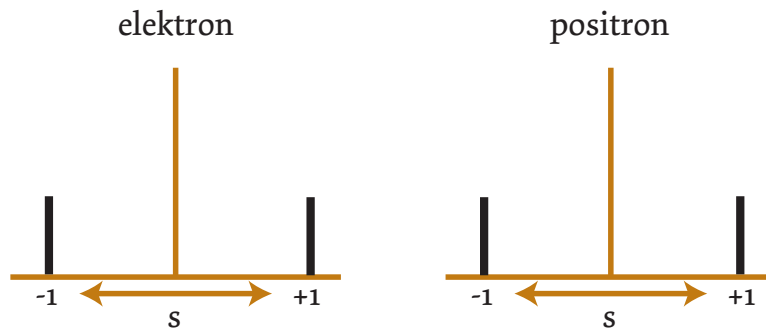
.....

**D.** Bij opdracht 6B heb je 6 kansverdelingen van deeltjes getekend. Dit zijn 3 paren van verstrengelde deeltjes. Bepaal welke deeltjesparen zouden kunnen zijn ontstaan zoals hierboven is omschreven. Motiveer je antwoord.

.....

.....

.....



**E.** Hierboven is de waarschijnlijkheidsverdeling weergegeven van een in het vacuüm ontstaan positron en elektron. Teken in een andere kleur wat er gebeurt met de bovenstaande kansverdelingen als je een meting verricht aan de spin van het positron en vindt dat die +1 is. Leg uit.

.....

.....

.....

- F.** Denk je het proces uit opdracht 6E alleen plaatsvindt als de deeltjes bij elkaar in de buurt zijn of zou het ook plaatsvinden als ze ver weg zijn van elkaar?

.....

.....

.....

In 1935 vroeg Albert Einstein zich samen met enkele collega's af wat er precies gebeurt in de situatie van opdracht 6F. Hij was van mening dat de voorspelling van de quantummechanica dat deeltjes over een grote afstand invloed op elkaar kunnen uitoefenen zonder dat dat tijd kost in tegenspraak was met zijn relativiteitstheorie. De relativiteitstheorie voorspelt onder andere dat reizen of informatie versturen niet sneller kan dan met de lichtsnelheid.

- 7.** Beredeneer hoe deze theorieën volgens Einstein met elkaar in tegenspraak zouden kunnen zijn.

.....

.....

.....

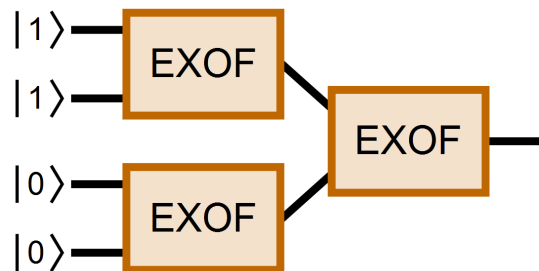
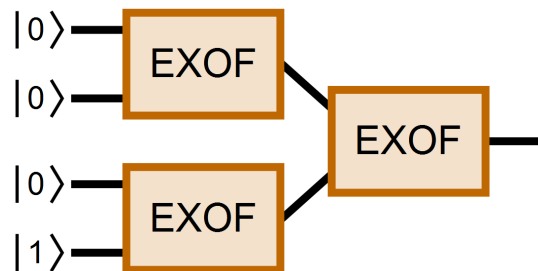
## QUANTUMCOMPUTING

De onzekerheid die inherent is aan quantummechanische processen kun je op verschillende manieren benutten. Een van die manieren is het maken van efficiëntere computers, de zogeheten quantumcomputers. Gewone computers rekenen door het manipuleren van bits. Dit zijn meestal condensatoren die geladen of ongeladen zijn. Zij stellen eentjes en nulletjes voor, die samen getallen, letters, woorden, zinnen en programma's voorstellen. Berekeningen worden binnen een computer gedaan door deze eentjes en nulletjes met zogenaamde logische poorten te bewerken. Een voorbeeld daarvan is de EXOF poort (in het Engelse ook bekend als XOR), waarbij de uitgaande bit een  $|0\rangle$  is als de twee ingaande bits hetzelfde zijn. Als de twee ingaande bits verschillend zijn is de uitgaande bit een  $|1\rangle$ . Hieronder is een EXOF poort schematisch weergegeven.



8.

A. Vul in wat de output is van onderstaande poorten en circuits.



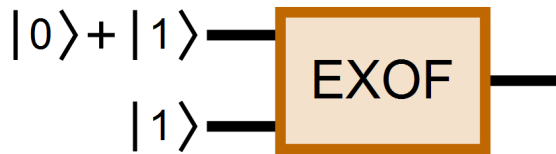
- B.** Bereken wat de output is als een van de ingaande bits van de EXOF-poort bestaat uit een superpositie van een nul en een één en de ander niet.

.....

.....

.....

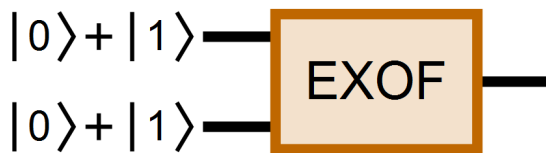
- C.** Bepaal voor onderstaande situatie wat de output is van de EXOF-poort. Leg uit.



.....

.....

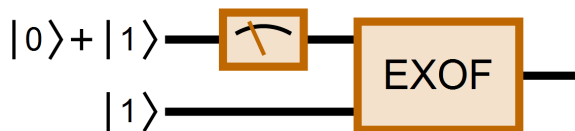
- D.** Bepaal ook voor deze situatie wat de output is. Schrijf daartoe alle mogelijke uitkomsten uit en reken uit wat de kans is om ze te vinden. Leg vervolgens uit of er een verschil is tussen deze situatie en die in opdracht 8C.



.....

.....

- E.** Beschrijf voor onderstaande situatie wat de output is. Het nieuwe symbool is een spinmeter, waarmee je de toestand van deze bit uitleest. Leg uit wat het verschil is tussen deze situatie en de situatie in opdracht 8C.

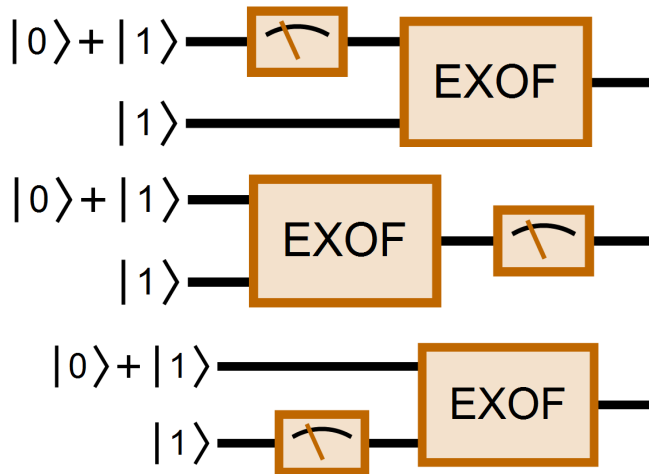


.....

.....

F. Geef aan in welke van de onderstaande situaties de output equivalent is met de situatie in opdracht 8C. Motiveer je antwoord.

.....  
 .....  
 .....



Kijk het filmpje “How does a quantum computer work” over de werking van een quantum-computer op <http://www.quantumuniverse.nl/filmpjes>.

Zoals de wetenschapper in het filmpje zegt, is de uitdaging om operaties te verzinnen waarmee je de superpositie van deeltjes kunt uitbuiten. In zijn onderzoek gebruikt hij de buitenste elektronen in een fosforatoom om mee te rekenen. De bits die in quantumcomputers gebruikt worden om mee te rekenen noemen we ook wel qubits.

9. Brainstorm over welke systemen je nog meer als qubits zou kunnen gebruiken. Schrijf hieronder de 5 meest haalbare resultaten op.

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

- 10. In het filmpje zien we dat het aantal berekeningen dat een quantumcomputer tegelijk kan maken groeit evenredig met  $2^N$ , waarbij N het aantal qubits is. Zoek op internet op wat de snelste klassieke computer op dit moment is en bereken hoeveel qubits je nodig hebt om in een seconde grofweg evenveel berekeningen te kunnen maken. Ga ervan uit dat een rekenstap voor een qubit ongeveer een seconde duurt.

.....

.....

.....

**ERIK VERLINDE**

Erik Verlinde is op dit moment bezig om een theorie te bedenken over wat er gebeurt met de quantuminformatie als er een deeltjespaar ontstaat op de rand van een zwart gat. Als het ene deeltje het zwarte gat in valt, en het andere deeltje naar buiten gaat, zou je eventueel informatie uit het zwarte gat kunnen halen. Dit is eigenlijk theoretisch uitgesloten en Erik denkt na over wat voor gevolgen dit zou kunnen hebben voor ons beeld van zwarte gaten en zwaartekracht.

- 11. Zoek op internet op hoe het op dit moment staat met het onderzoek van Erik Verlinde en zijn collega's naar het verdwijnen van quantuminformatie in zwarte gaten en discussieer kort over hoe je denkt dat het verder zou moeten gaan.

.....

.....

.....