

Quantum Rules!

Tunnelen met licht

Vooraf

Bestudeer quantum tunnelen in je natuurkundeboek. Bestudeer ook de paragraaf over brekingsindex, grenshoek, en totale interne reflectie uit het hoofdstuk optica uit de derde klas. Om deze kennis op te frissen is er een gradenboog-plaat met en een laserpointer aanwezig. De online apps over tunnelen van PhET (colorado.edu) en Quvis (St. Andrews) geven veel inzicht.

Vragen

1. Leg de begrippen brekingsindex en grenshoek uit.
2. Bepaal de grenshoek van de halfcirkelvormige plaat.
3. Noem een voorbeeld waarbij tunnelen een rol speelt.

Theorie

In de lessen bij het onderdeel Quantumwereld komt het model van een deeltje in een doos ter sprake. Deze tweedimensionale doos (fig. 2) wordt begrensd door 2 wanden: potentiaalbarrières. Bij de wanden keert het deeltje (of de golf) weer om.

De onbepaaldheidsrelatie zegt echter dat de plaats van een deeltje met impuls niet helemaal exact is te bepalen. Dat betekent dat een deeltje zich wel eens buiten het doosje kan bevinden. De kans een deeltje aan te treffen buiten het doosje neemt exponentieel af met de afstand voorbij de wand (zie Fig. 2). De kans dat een deeltje de barrière passeert neemt exponentieel af met de breedte van de barrière. Dit effect wordt (quantum)tunnelen genoemd en vindt in tal van systemen plaats:

- radioactief verval (alpha-straling),
- scanning tunneling microscopie (STM)
- halfgeleiders
- chemische reacties
- ladingtransport in de fotosynthese

In al deze reacties zijn deeltjes (elektronen, protonen) betrokken. Wij onderzoeken dit effect met fotonen met dit experiment.

versie 2024-01-28

Je hebt nodig:

- gradenboog-plaat
- laserpen
- meetopstelling met twee prisma's op verstelbare stellage,
- laser, lens, diafragma
- voeding voor de laser
- versterker met voeding
- multimeter
- computer met Excel

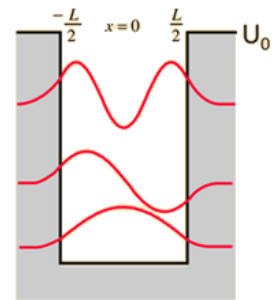


Fig. 1: deeltje in doosje

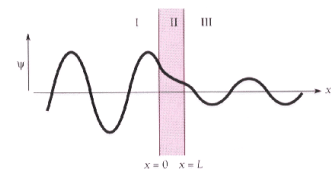
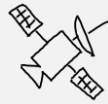


Fig. 2: deeltje door barrière



Quantum Rules!

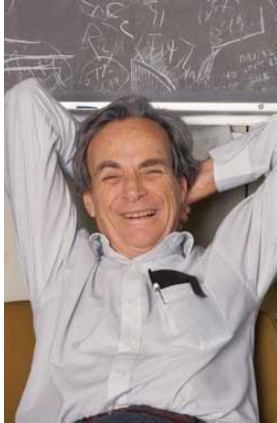


Fig. 3: Richard Feynman

Fotonen en elektronen zijn niet helemaal vergelijkbaar, maar voor dit experiment wel. Zoals Richard Feynman (fig.3) zei:

**“Photons and electrons are the same,
in the sense that they are both quirky.”**

Waarmee hij wilde zeggen: fotonen en deeltjes voldoen hierin aan dezelfde wiskunde.

De opstelling in stapjes verklaard

Een lichtstraal gaat door een blok glas. Als je loodrecht instraalt gaat de lichtstraal mooi rechtdoor, maar als je schuin instraalt, wordt de bundel evenwijdig verschoven. Het maakt niet uit waar de bundel binnentreedt, de verschuiving is overal even groot (zie fig. 4). Als het blok wordt verschoven in plaats van de bundel komt het licht dus op dezelfde plaats het glas uit. Een detector die bundel 'a' opvangt vangt dus ook bundel 'b' op.

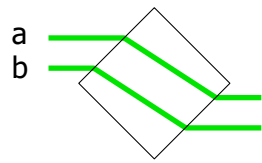
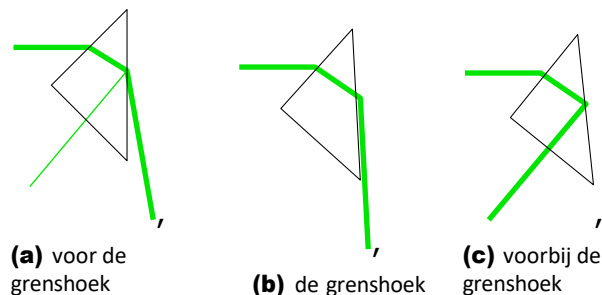


Fig. 4: evenwijdige verschuiving

We hakken het blok nu over de diagonaal in tweeën. Er ontstaan dan twee prisma's. Het rechter prisma halen we even weg. Een lichtstraal die van links binnen komt verlaat het prisma zoals in fig. 5(a). Een deel van de bundel wordt gereflecteerd.



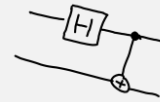
(a) voor de grenshoek

(b) de grenshoek

(c) voorbij de grenshoek

Fig. 5: general caption

De gereflecteerde bundel is voor ons niet van belang (maar is wel een ander quantum-effect: blijktbaar reflecteren sommige fotonen wel en anderen niet – Waarom? Hoe? TIP: denk aan kans).De reflecterende straal is daarom weggelaten in (b) en (c).



Quantum Rules!

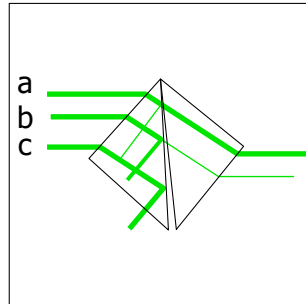


Fig. 6: De drie lichtstralen **a**, **b**, en **c** komen op verschillende hoogte het prisma binnen. Straal **a** komt de kleinste barrière tegen, **c** de grootste. In de figuur geeft de dikte van de straal schematisch aan welk gedeelte van de lichtstraal door de barrière komt. In het experiment verplaatst het prisma, niet de laser.

Belangrijk! Weerkaatste lichtstralen komen naar je toe.

Kijk niet in de bundel.

Vergelijk de twee situaties: enerzijds het blok glas, a.h.w. twee prisma's tegen elkaar. De lichtstraal gaat min of meer rechtdoor. Anderzijds het blok in tweeën gehakt, de twee prisma's ver van elkaar verwijderd. De lichtstraal gaat volledig een andere kant op. Opmerkelijk: Als het rechter prisma niet aanwezig is wordt in het licht het binnenvlak van het linker prisma gereflecteerd.

Hoe kan je de overgang van de ene situatie naar de andere onderzoeken? Door de prisma's heel dicht bij elkaar te brengen en te kijken wat er gebeurt. Dat is wat we gaan doen.

De meetopstelling

De prisma's

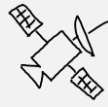
Het hart van de opstelling bestaat uit twee prisma's die tegen elkaar staan geklemd. Aan een kant zit een klein stukje plastic (vuilniszak, dikte $6,0 \mu\text{m}$) waardoor een wigvormige luchtspleet tussen de prisma's ontstaat. Zie figuur 6 hierboven.

De lengte van de rechte zijde is $20,0 \text{ mm}$. In de opstelling kan het blok met een translatietafel met micrometerschroef van je af en naar je toe verplaatst worden. Dit (t) noemen we de y -richting.

De tafel verplaatst $500 \mu\text{m}$ ofwel een halve millimeter als je een hele slag aan de schroef draait.



Fig. 7: pas op: laser!



Quantum Rules!

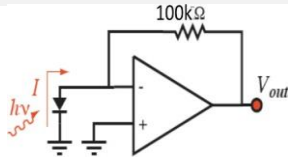


Fig. 8: foto-versterker

De detector

We meten de intensiteit van de lichtbundel (het licht heeft maar één golf- lengte, we meten het aantal fotonen dat per seconde de detector raakt) met een fotodiode. De diode genereert een stroom evenredig met de de intensiteit van het opgevallen licht. Met een stroom-spanningsconvector (fig. 8, in het blikken kastje) naar een spanning omgevormd. Het signaal meet je met een voltmeter en is een directe maat voor de fotostroom. We gebruiken een groene laser in dit experiment. Voor de detector zit een zeer scherp groen filter ingebouwd zodat we ons experiment gewoon bij daglicht kunnen uitvoeren. De sensor ziet alleen groen licht.



Fig. 9:
micrometerschroef

De micrometerschroef

In fig. 9 zie je de micrometerschroef van de translatietafel. Op de as staan twee schaalverdelingen in mm, links en rechts van de streep. Deze schalen staan een halve millimeter van elkaar verschoven. De schaal op de draaiknop loopt van 0 tot 50. Deze schaal lees je af bij de streep op de as. Dus als je de schroef één omwenteling draait, verplaatst de tafel 0,5 mm.

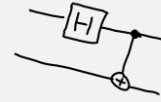
Uitlijnen

Optica is gevoelige apparatuur. De belangrijkste regel staat hier:

Raak de prisma's niet met je vingers aan!

Tref de volgende voorbereidingen:

1. Zet de laser aan.
2. Zet het diafragma bij de laser (links) op een opening van 1 mm.
3. Zet de versterker aan (het rode lampje in de schakelaar aan de achterkant gaat branden).
4. Zet de multimeter in de stand $V=$ (gelijkspanning).



Quantum Rules!

Zet de translatietafel in de beginstand: zorg dat de laser aan de kant die het verst van je verwijderd is nog net door het prisma gaat voordat hij de detector raakt. N.B. de meetversterker kan niet meer spanning leveren dan 4V, dus hogere voltages meet je niet!

De meting

Maak een tabel in Excel en noteer de stand van de voltmeter en de stand van de translatietafel. Verplaats nu de tafel door altijd één kant op te draaien (linksom) in stappen van een 0,5 mm en maak de stappen geleidelijk kleiner. De intensiteit neemt van af een zekere positie enorm af. Doe daar extra veel metingen.

Het exponentiële verband is eenvoudig aan te tonen als je de y-as logaritmisch maakt. Een deel van de data moet een rechte lijn opleveren. Dit exponentiële verband is het gevolg van het tunnelen van licht door de barrière. Kijk naar het rechte gedeelte van het logaritmisch verband. Deel de hoogste waarde van de spanning door de kleinste. Over hoeveel decaden heb jij dit effect aangetoond?

EXTRA

Vanwege de scheve projectie is de verschuiving over de wig een factor 1,38 groter dan de verplaatsing van de micrometerschroef. De zijden van het prisma zijn 20,00 mm. De luchtspleet is dus 28,28 mm lang. Over die lengte neemt de breedte 6 μm toe. De omrekenfactor voor verplaatsing van de micrometerschroef naar spleetbreedte is dus $(1.38 \times 6.0) / 28.28 = 0,293 \mu\text{m mm}^{-1}$. Voeg aan je data een kolom toe met daarin de spleetbreedte, omgerekend uit de stand van de micrometerschroef. Plot de mV als functie van de spleetbreedte en maak de y-as logaritmisch.

De theorie voorspelt dat de lichtstroom exponentieel afneemt met de breedte d van de spleet. van de barrière en van een constante α .

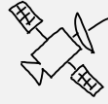
$$I = I_{0T} \cdot e^{-\alpha d}$$

met

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda_0} \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 (\sin \theta_1)^2 - 1}$$

De factor α bepaalt de helling van de grafiek. De brekingsindex van optisch glas bij 532 nm (groen licht) is 1,5201. De bijbehorende grenshoek is 41,2°.

Vergelijk jouw helling met de theoretische waarde van α



Quantum Rules!

