



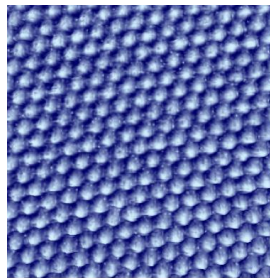
Bridge between research in modern physics
and entrepreneurship in nanotechnology

Kwantumfysica

De fysica van het allerkleinste met grootse toepassingen

Deel 2

KWANTUMEIGENSCHAPPEN & TECHNOLOGIE



Leerstation VIII: Tunneling & STM



Quantum Spin-Off is funded by the European Union under the LLP Comenius programme
(540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP).

Renaat Frans, Robert Sum

Contact:

renaat.frans@ucll.be

sum@nanosurf.com



Lifelong
Learning
Programme

Dit materiaal reproduceert alleen de mening van de auteur en de Commissie kan niet verantwoordelijk worden gesteld voor het gebruik van de informatie die het materiaal bevat.

Inhoudstabel

LEERSTATION VIII: TUNNELING & STM	3
1 Over een potentiaal barrière zonder de nodige energie	3
1.a Klassieke deeltjes kunnen niet tunnelen	3
1.b Licht kan tunnelen door een barrière	3
1.c Tunnelling in het dagelijks leven	5
2 Tunneling: een eigenschap van golven	5
3 Elektronen kunnen ook tunnelen	6
3.a Een toepassing: Flash Memory	7
3.b Flash memory verklaard door het tunnelen van elektron golven	7
3.c Tunneling ligt aan de basis van verschillende fenomenen	8
4 Scanning Tunneling Microscopie (STM)	10
4.a Scanning tunneling microscopie (STM)	10
5 Concepten in leerstation VIII	15

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

Under the following terms:

- Attribution — You must give [appropriate credit](#), provide a link to the license, and [indicate if changes were made](#). You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.
- NonCommercial — You may not use the material for [commercial purposes](#).

You can:

- Share — copy and redistribute the material in any medium or format
- Adapt — remix, transform, and build upon the material

The licensor cannot revoke these freedoms as long as you follow the license terms.

You have to refer to this work as follows:

Frans R., Sum R. (2015) Quantum SpinOff Learning Stations: Tunnelling & STM. UCLL, Art of Teching, Diepenbeek Belgium - Nanosurf AG, Liestal



Leerstation VIII: Tunneling & STM

1 Over een potentiaal barrière zonder de nodige energie

1.a Klassieke deeltjes kunnen niet tunnelen



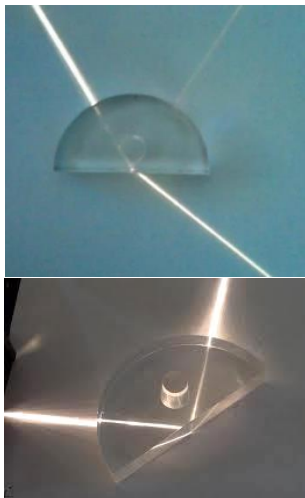
(Bron: Concord.org)

Als je een bal over een heuvel wilt rollen moet je het genoeg (kinetische) energie geven om de barrière van potentiële energie te overkomen die door de heuvel wordt gevormd.

1. Indien het niet genoeg energie heeft zal het (wel/niet) de heuvel overkomen
2. Indien het wel genoeg energie heeft zal het (wel/niet) de heuvel overkomen

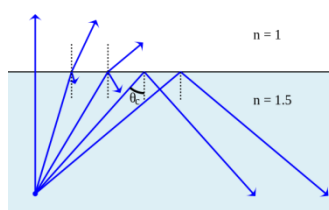
Het rare is, dat in tegenstelling tot macroscopische ballen, *kwantumdeeltjes* zoals elektronen en fotonen (lichtdeeltjes) weldegelijk een kans maken om de barrière te overkomen ook indien ze niet over de nodige energie daarvoor beschikken. De kwantumfysica voorspelt dat kwantumobjecten een kans hebben om te tunnelen door een energie barrière. Hoe groot die kans is hangt af van de hoogte en breedte van de barrière en van de energie van het object.

1.b Licht kan tunnelen door een barrière

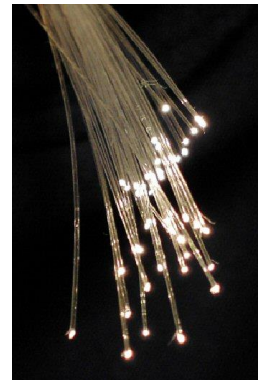


Zoals je je herinnert kunnen lichtstralen worden weerkaatst en/of doorgelaten wanneer ze van een optisch dicht naar een optisch ijel medium gaan. Bij doorlating verandert de richting van de lichtstraal, hetgeen breking heet. Dit is het gevolg van het verschil in lichtsnelheid, die (groter/kleiner) is in het optisch dicht medium.

Indien de invalshoek groter is dan een bepaalde kritische hoek, die afhangt van de relatieve brekingsindex, zal het licht volledig worden weerkaatst (en dus in het optisch dicht milieu blijven).



(Bron: Wikipedia public domain)





Dit maakt het mogelijk voor licht om in een optische vezel te blijven, zodat daarmee informatie kan worden verstuurd. Licht kan dus niet uit het optisch dicht milieu indien de invalshoek groot genoeg is.

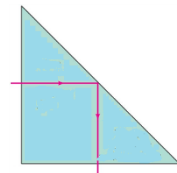


Gefrustreerde totale interne reflectie

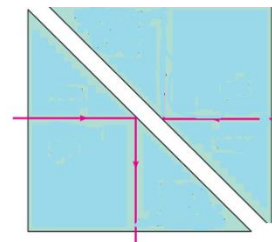
Tunneling maakt het mogelijk voor het licht om deze "onoverkomelijke" barrière toch te overwinnen. Dit kan experimenteel worden aangetoond met behulp van twee prisma's. Het experiment kan worden bekeken op: <http://www.youtube.com/watch?v=aC-4iSD2aRA>

Experiment: gefrustreerde totale interne reflectie met licht

Als voorbeeld, laat ons kijken naar het sturen van een laserstraal op één kant van een prisma, zoals op de figuur hiernaast. Op de schuine zijde is de invalshoek groot genoeg om totale interne weerkaatsing te krijgen: het licht kan de prisma niet verlaten.



Maar er gebeurt iets indien we een 2^{de} prisma daar tegen plaatsen. Als we de prisma's tegen elkaar drukken (indien nodig kan men ook het contactoppervlak wat nat maken) kan het licht ineens wel uit de prisma geraken. In tegenspraak met de voorspelling van de klassieke theorie.



Een klassiek deeltje zou in principe niet kunnen weten dat er een 2^{de} prisma wordt geplaatst tegen de eerste. Het is door de kwantumgolfeigenschappen van licht dat het de gap tussen de twee kan penetreren en een kans maakt om daardoor te tunnelen.

Experiment: gefrustreerde totale interne reflectie met microgolven

De gap tussen de twee prisma's zou van de grootte-orde van de golflengte van het licht moeten zijn. Voor rood licht is dat ongeveer 600 nm. Hierdoor moeten de prisma's zeer dicht bij elkaar zijn. In het geval van microgolven is de grootte-orde van de golflengte een paar centimeters, waardoor men kan aantonen dat prisma's die op een paar centimeters uit elkaar staan al tunneling vertonen.

De experimentele uitvoering hiervan met microgolven kun je op onderstaande film bekijken:

<http://www.sixtysymbols.com/videos/reflection.htm>



(Bron: University of Nottingham)

1.c Tunnelling in het dagelijks leven

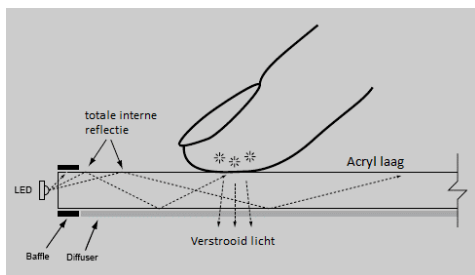


Bij het vasthouden van een glas water kun je je vingers niet zien door totale interne reflectie van het licht in het water.

Maar wat gebeurt er als je met je vingers harder aandrukt tegen het glas?

Het effect is vergelijkbaar met het experiment bovenaan beschreven: de kleine ribbels in je vingers worden zichtbaar, omdat licht door de gap tunnelt. Licht tunnelt door het glas naar de ribbels via de zeer kleine lucht gap die aanwezig is als je hard drukt.

(Bron: Wikipedia public domain)



Dit effect van tunneling kan worden gebruikt om een touch screen te maken: een licht gevoelige sensor detecteert het gereflecteerde licht, waaruit de positie van je vinger op het scherm kan worden bepaald.

(Bron: New York University: cs.nyu.edu/~jhan/ftirsense/)

2 Tunneling: een eigenschap van golven

Laat ons het fenomeen tunneling uitleggen.

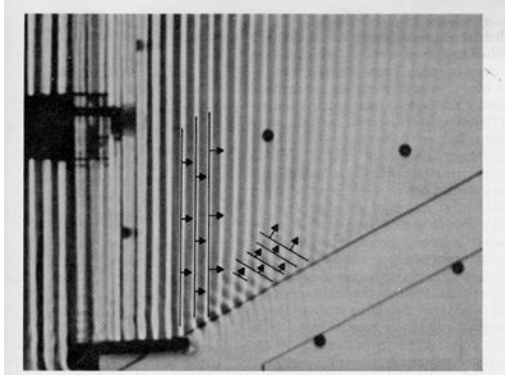
Gefrustreerde totale inwendige reflectie: verklaring door tunneling

Zolang het licht zich volledig in het glas bevindt, kan het niet "weten" wat daarbuiten gebeurt. Om het te weten te komen moet het een kleine afstand in de "verboden zone" binnendringen. Een afstand van een paar golflengtes. Als er binnen die afstand een tweede stuk glas aanwezig is, kan het licht aan de andere kant weer verschijnen. De waarschijnlijkheid van het licht om de gap gevormd door de lucht te overbruggen, daalt naarmate de gap groter wordt.

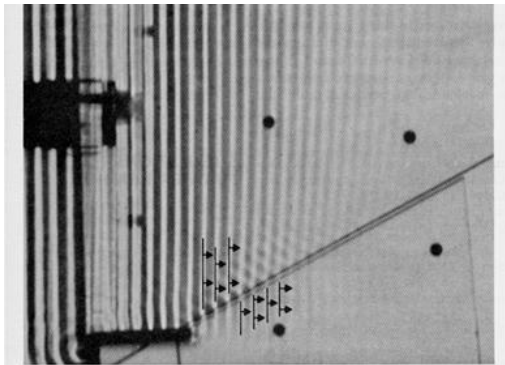
Tunneling van watergolven

De totale interne reflectie is het gevolg van de plotse verandering van de lichtsnelheid op de grens tussen beide media. De lichtsnelheid is bijvoorbeeld veel (groter/kleiner) in glas dan in lucht.

De snelheid van watergolven is bijvoorbeeld ook afhankelijk van de *diepte* van het water. De golven verplaatsen trager in ondiep water dan in diep water. Hierdoor kun je bij watergolven ook totale interne reflectie waarnemen, vergelijkbaar bij wat zich met licht voordoet.

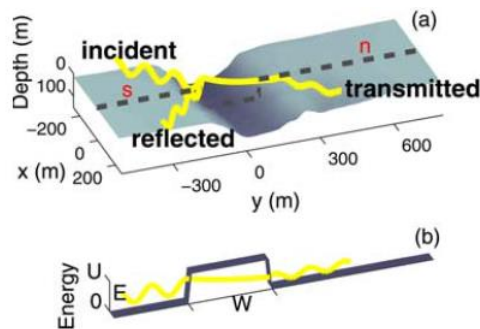


De twee schuine lijnen (aan de rechter onderkant van de figuur) markeren een zone waar het water dieper is. De watergolven die aankomen van de linkerkant, zullen aan de grens tussen het ondiep en het diep water weerkaatst worden.



Indien de gap dat gevormd wordt door het diep water smal genoeg wordt gemaakt (met name, van de grootte-orde van de golflengte van de watergolven zelf), zullen de golven (gedeeltelijk) worden doorgelaten.

(Bron: Education Development Center, Newton, MA USA)



Het tunnelen van oceanische golven wordt ook waargenomen boven onderzeese canyons (dat zijn onderzeese kloven)!

Thomson, J., Elgar, S., & Herbers, T. H. C. (2005). Reflection and tunneling of ocean waves observed at a submarine canyon. *Geophysical research letters*, 32(10).

3 Elektronen kunnen ook tunnelen

Aangezien we ondertussen weten dat zowel als *materie* de *golf-deeltje dualiteit* vertonen, kunnen elektronen, net zoals fotonen, tunneling vertonen.

Het is net kwantumfysica die het golfkarakter van elektronen beschrijft. Elektron golven kunnen tunnelen door een barrière waardoor ze klassiek gezien niet door zouden kunnen geraken.

Door de golf-deeltje dualiteit is het een natuurlijke eigenschap van elektronen dat ze door een barrière kunnen tunnelen, ondanks het feit dat ze te weinig energie hebben om die klassiek gezien te overkomen.

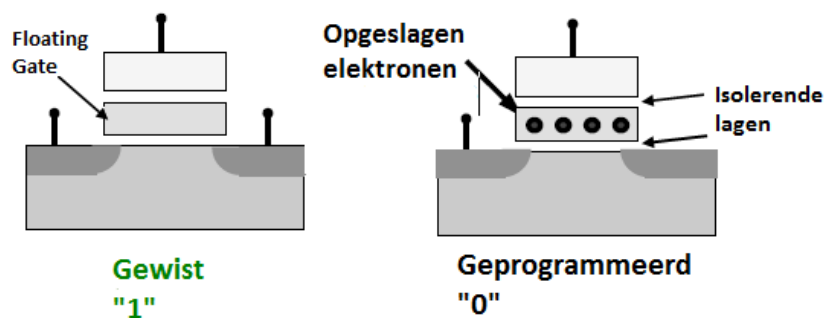
3.a Een toepassing: Flash Memory

Een mooie toepassing van elektrontunneling is flash geheugen, dat gebruikt wordt in usb sticks, chipkaarten en dergelijke. De informatie daarop zal behouden blijven, ook zonder externe energiebron.

De werking daarvan maakt gebruik van de opslag van elektronen. Elektronen worden opgeslagen in zogenaamde *Floating Gates* die *geïsoleerd worden van de rest van het apparaat* door middel van isolerende oxide lagen: **elk elektron dat daar geplaatst wordt, wordt gevangen en bevat dus informatie.**

De elektronen tunnelen door de isolerende laag en worden op de Floating Gate gevangen. Na het tunnelen moet de barrière (met name de dikte van de isolerende lagen) moet groot genoeg worden gemaakt zodat de elektronen daar jarenlang in gevangen blijven.

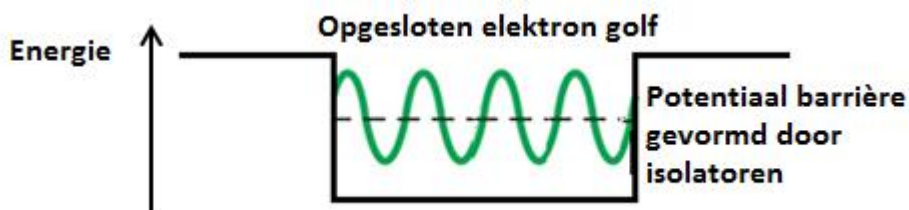
Het tunnelen van elektronen door een (elektrische) potentiaal barrière kan worden begrepen aan de hand van het golfkarakter van elektronen.



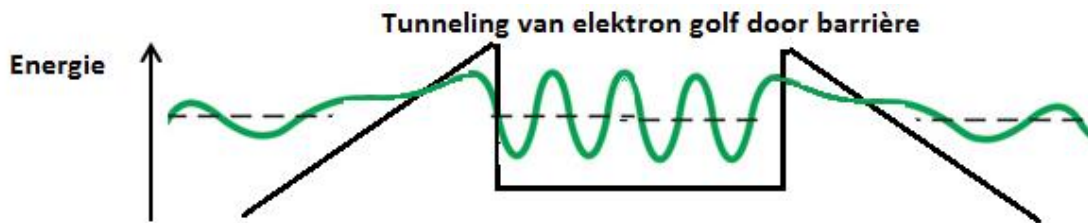
Bron: Massachusetts Institute of Technology Open Course Ware

3.b Flash memory verklaard door het tunnelen van elektron golven

De omringende isolerende lagen sluiten het elektron op in de energieput, waar het jarenlang kan blijven zitten zonder externe energiebron. De werking van niet-volatiele geheugen steunt op dit fenomeen.



Door een elektrisch veld aan te brengen op de gate, kan de potentiaal barrière kleiner (dunner) worden gemaakt, zodat het elektron in of uit de put kan tunnelen. Het is dus tunneling dat het mogelijk maakt om éénen en nullen te "schrijven" in de gate.



Je kunt **meer educatief materiaal over tunneling en simulaties van de werking van flash geheugen terugvinden op concord.org**

The screenshot shows a webpage with the title 'Quantum Tunneling' and the subtitle 'Explore the unique concept of quantum tunneling and its importance to modern technology.' There is a button labeled 'Quantum Tunneling' in the bottom right corner. The page also features some small images and text related to quantum tunneling.

Simulaties van Kwantumtunneling op Concord.org

3.c Tunneling ligt aan de basis van verschillende fenomenen

Het wordt almaar duidelijker dat kwantumtunneling een belangrijke rol speelt in chemie, en in het bijzonder in de chemie van het leven¹. Bijvoorbeeld in fotosynthese zullen elektronen tunnelen van de ene molecule naar de andere, door membranen heen gaan enzovoort, wat snelle uitwisselingen van energie mogelijk maakt. Onderzoek in dit domein geeft nieuwe mogelijkheden in kwantumbiologie, wat onder ander zou kunnen leiden tot het ontwikkelen van meer efficiënte zonnecellen.

Hiernaast kunnen ook processen zoals radioactief alpha-verval worden begrepen aan de hand van tunneling van deeltjes uit de atoomkern. In het geval van alpha-verval gaat het om een He-kern die uit een grotere atoomkern "tunnelt". De probabilistische eigenschappen van radioactieve processen is het gevolg van de kwantumeigenschappen van deeltjes. Deze probabilistische eigenschappen, zichtbaar op de nanoschaal, worden verklaard met de deeltje-golf dualiteit. De amplitude van de kwantum mechanische golven is evenredig met de waarschijnlijkheid dat een energie kwantum (een deeltje) gemeten wordt in verschillende lokaties.

In elektronische circuits worden de metalen geleiders, waar de elektronen in bewegen, van elkaar gescheiden door isolerende lagen waar de elektronen klassiek gezien niet kunnen komen. De isolerende lagen zijn met andere woorden barrières voor de elektronen zodat ze in de metalen blijven. In oudere circuits waren de barrières dik genoeg zodat er geen tunneling kon optreden. Maar als de barrières *dunner/dikker* worden, is tunneling niet

¹ Zie bijvoorbeeld: Moser, C. C., Keske, J. M., Warncke, K., Farid, R. S., & Dutton, P. L. (1992). Nature of biological electron transfer. *Nature*, 355(6363), 796-802.

meer verwaarloosbaar. Als gevolg hiervan zouden elektronen daardoor kunnen tunnelen waardoor ze niet meer enkel door de metalen geleiders gaan stromen. Dit is een probleem voor verdere miniaturisatie van elektronica, waarbij die barrières zijn onder andere dunner geworden. Om dit te vermijden mag men die isolerende lagen niet te dun maken, wat een grens oplegt aan de grootte van de circuits. Aan de andere kant zijn er net door de tunneling nieuwe toepassingen mogelijk.

Terwijl je dit leest treedt tunneling op in miljarden processen, zowel in de natuur als in de technologie. Tunneling is een fenomeen die nanowetenschappers en ingenieurs goed moeten begrijpen en mogelijks in hun voordeel kunnen gebruiken.

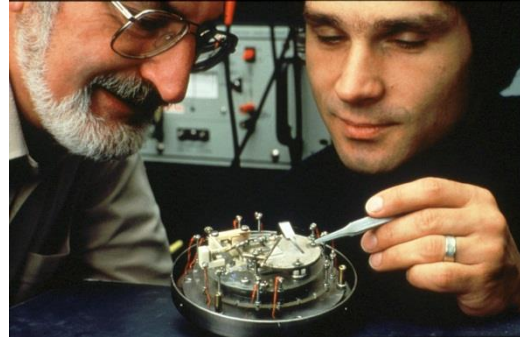
De natuur vertoont dus niet-determinisme op nanoschaal: er bestaat geen zekerheid over de plaats van een deeltje maar wel over de waarschijnlijkheid dat een deeltje bv. door een barrière kan tunnelen. Het is de amplitude van de kwantummechanische golf van een deeltje, die een maat is voor de waarschijnlijkheid dat het deeltje zich op die plaats kan bevinden.

Een fascinerende toepassing van elektronentunneling is de ontwikkeling van de Scanning Tunneling Microscoop: een toestel dat het mogelijk maakt om een kijkje te nemen op de atomaire, en zelfs op de subatomaire schaal.

4 Scanning Tunneling Microscopie (STM)

4.a Scanning tunneling microscopie (STM)

De Scanning Tunneling Microscoop is in 1982 in Zwitserland ontwikkeld, in het onderzoekslaboratorium van IBM in Rüslikon. Hiervoor hebben ze de nobelprijs fysica in 1986 gekregen. De STM heeft het mogelijk gemaakt om voor het eerst atomen te "zien" (of scannen). De nodige technische en fysische voorwaarden hiervoor zullen hieronder worden besproken.



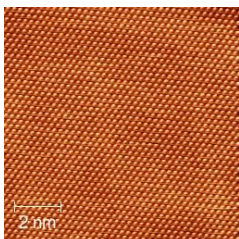
Heinrich Rohrer en Gerd Binnig met hun eerste scanning tunneling microscoop (Bron: IBM)

Gebruik maken van de eigenschappen van golven

Kwantummechanica leert ons dat als gevolg van de golfeigenschappen van elektronen, ze niet in het atoom bewegen als bollen, maar eerder wat "uitgesmeerd" zijn in gebieden die we orbitalen noemen (en waarover we gesproken hebben op het einde van leerstation V). Hierdoor is er een kleine kans dat een elektron in een metaal, in tegenstelling tot in de klassieke fysica, aanwezig *kan zijn een beetje buiten het metaal*. Als je een meetapparaat dicht genoeg bij het metalen oppervlak brengt, kun je een kleine elektrische stroom meten. Het lijkt alsof de atomen door de gap of energie barrière tunnelen. Dit heet daarom ook het "tunnel effect".

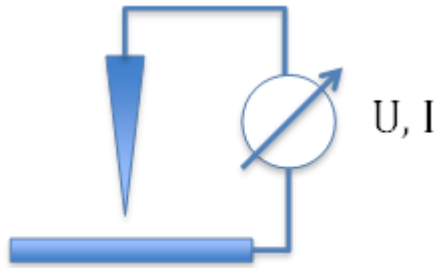


De scanning tunneling microscoop van NanoSurf



STM foto: Atomische structuur van zilver (Ag(111)).

(bron: University of Basel, Department of Physics)



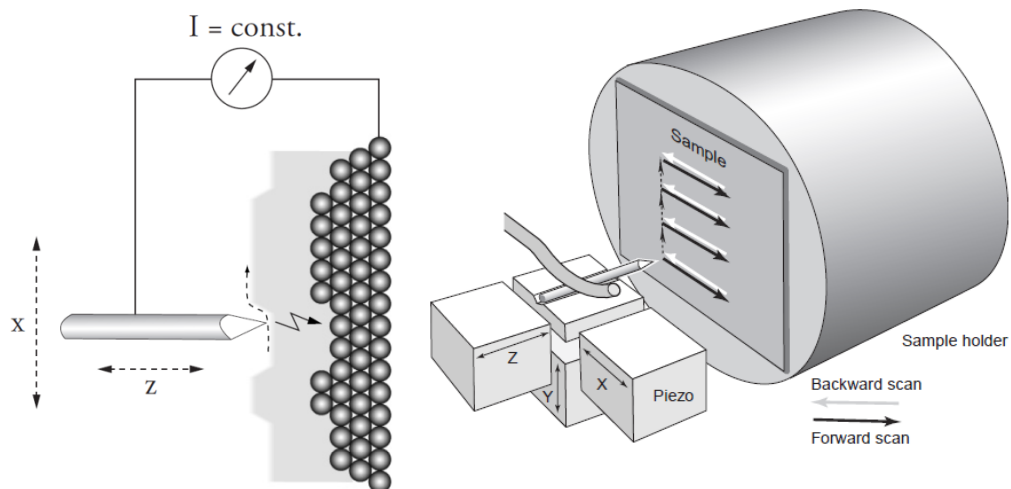
Aangezien de elektronen zich net boven het oppervlak bevinden – op een afstand van 1 à 2 diameters van een atoom – moet het meettoestel zeer dicht bij het oppervlak worden gebracht. Dit was al geweten in de jaren 1950, maar het was onduidelijk hoe dit precies technisch te implementeren. Het is pas in 1982 dat Gerd Binnig en Heinrich Rohrer het hebben geïmplementeerd in een apparaat dat men de scanning tunneling microscoop noemt.

Taak 4.1:

Probeer de moeilijkheden in te schatten die je tegenkomt als je een meettoestel op een atoomafstand (~ 0.1 nm) van een oppervlak wil plaatsen.

Werkingsprincipe van de STM:

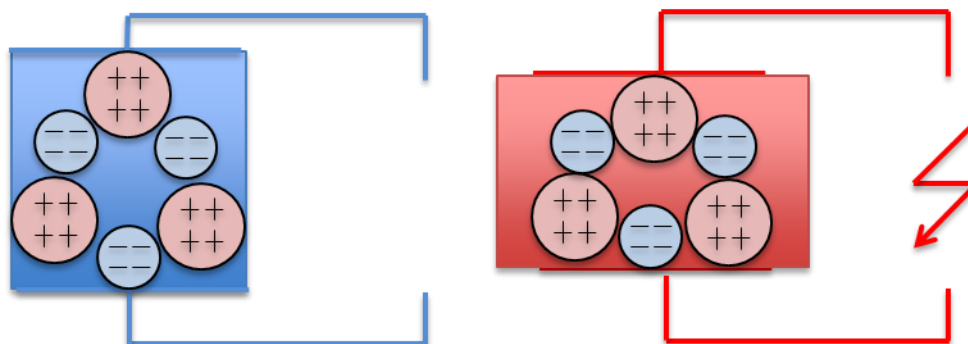
De werking van de scanning tunneling microscoop is gebaseerd op het meten van de **tunnel stroom** aan de oppervlakte van het staal. Hiervoor gebruikt men een platina of wolfram meetapparaat dat oppervlakken scant met een vaste waarde van de tunnel stroom. Het mechanisme dat de positionering bepaalt van het meetapparaat verplaatst het op een manier zodat de gemeten tunnelstroom constant blijft. De bewegingen van het meetapparaat² worden geregistreerd en daarmee vormt men een beeld van het oppervlak.



Figuur 4.1: Werkingsprincipe van de STM

² De beweging van het apparaat langs het oppervlak, of de corrigerende variabele van de piezo-elektrische actuators op de x/y as (zie Fig. 4.1)

Voor deze ingewikkelde en delicate bepaling van de positie gebruikt men zogenaamde piezo-elektrische kristallen zoals kwarts of lood zirkoon titanaat. Deze materialen vertonen een (minimale) uitzetting als ze onderhevig zijn aan een elektrisch veld. Ze genereren wel een elektrische stroom als ze worden samengedrukt.

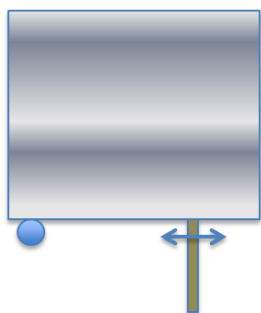


Figuur 4.2: Werkingsprincipe van het piezo-elektrisch kristal, d.w.z. kristallen die worden elektrisch opgeladen indien ze vervormd worden. Door een piezo-elektrisch kristal te vervormen produceren wij een elektrische spanning: we kunnen dus elektrische stroom genereren door de twee tegenoverliggende vlakken aan elkaar te sluiten om een circuit te maken (figuur aan de rechter kant). Het omgekeerde proces zie je in de figuur links: het kristal wordt vervormd als er een elektrische spanning op wordt aangelegd.

Taak 4.2:

Waar vinden we piezo-elektrische kristallen in het dagelijks leven?

De volgende uitdaging bij het bouwen van een STM is de benadering van het meetapparaat bij het oppervlak van de te onderzoeken staal. Precieze micrometer schroeven met stap motor actuators of simpele piezo-elektrische stap motoren kunnen hiervoor worden gebruikt.



Het werkingsprincipe is het volgende: een cilinder steunt op een drager (blauw), een beweegbare piezo-elektrisch kristallen plaatje (groen) dat heen en weer kan bewegen door middel van een elektrische spanning. Als het dun plaatje traag naar rechts wordt verplaatst, kan de cilinder de beweging volgen. Maar indien de beweging snel gebeurt, kan de cilinder door zijn eigen traagheid niet bijblijven en blijft het achter. Indien dit proces wordt herhaald, zal de cilinder naar rechts bewegen.

Met zo een motor kunnen stappen van de grootte van 50-100 nanometer worden uitgevoerd zodat de staal binnen het bereik van de meetapparaat kan worden gebracht.

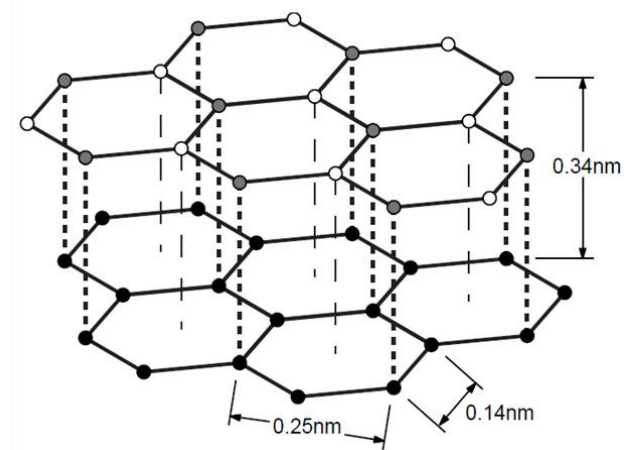
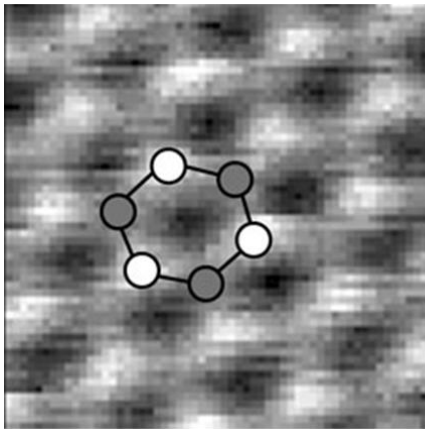
Taak 4.3: Temperatuursgevoeligheid:

Bereken hoeveel de cilinder uitzet bij een opwarming van één Kelvin.

Lengte cilinder is 2.5 cm, expansiecoëfficiënt van ijzer: $\alpha = 11.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Welke maatregelen moeten worden getroffen voor een vlotte werking?

De scanning tunneling microscoop meet niet alleen de vorm van het oppervlak, maar tegelijkertijd ook de elektrische conductiviteit in de nabijheid van de oppervlakte van de staal. Indien er een grotere stroom wordt gemeten op een bepaalde plaats, kan het ook te wijten zijn aan een zwakkere binding van de elektronen aan hun atomen op die plaats. Dit wordt waargenomen bij grafiet.

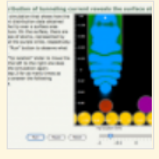


Links zie je een meetresultaat van de atoomrooster structuur van een laag van grafiet – je kunt er weliswaar de hexagonale structuur van het rooster, die men kent uit verstrooiingsexperiment niet op zien. Het lijkt erop dat we slechts elke 2^{de} atoom kunnen zien op het STM beeld.

Taak 4.4:

Gegeven de structuur van de grafietlagen, hoe zou je verklaren dat slechts elke 2^{de} atoom zichtbaar is?

Meer leermateriaal over de scanning microscoop kan worden gevonden op concord.org



Scanning Tunneling Microscopy
Use a virtual scanning tunneling microscope to explore the quantum tunneling effect.

Scanning Tunneling Microscopy

STM simulaties op Concord.org

Oplossingen:**4.1:**

Trilling, thermische expansie

4.2:

Piezo-elektrische luidsprekers, oscillerend kwarts in horloges en radio's, piezo aanstekers³

4.3:

$\Delta L \approx \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T = 295 \text{ nm}$. De scanning tunneling microscoop meet in de nanometer schaal en de expansie is enkele honderden nanometers, wat een aanzienlijk verschil distortie op de meting veroorzaakt. Maatregelen moeten worden genomen voor thermische stabilisatie, zoals afscherming voor tocht door middel van een deksel, het vermijden van een rechte reeks warmte-afgevend lichtbron, of het toelaten voor voldoende tijd voor stabilisatie.

4.4:

Er zijn 2 verschillende posities in het grafiet rooster: de "grijze" die een buur hebben in de onderliggende laag – de elektronen van deze atomen interageren met de atomen van de onderliggende laag zodat ze sterker gebonden zijn. De "witte" atomen hebben geen buur in de onderliggende laag en kunnen gemakkelijker elektronen losmaken zodat ze duidelijker zichtbaar zijn.

³ Piezo aanstekers worden gebruikt in gas grillen of aanstekers.

5 Concepten in leerstation VIII

Vervolledig de ontbrekende begrippen

Klassieke concepten

Macroscopische voorwerpen kunnen enkele over een barrière van potentiële energie geraken indien ze

Het fenomeen 'gefrustreerde totale interne reflectie' vindt plaats met licht dat van een optisch naar een optisch medium gaat indien de invalshoek is dan een bepaalde kritische hoek.

Een vergelijkbaar effect kan geobserveerd worden met watergolven omdat de snelheid van watergolven afhankelijk is van de van het water. Indien de gap die gevormd wordt door het diepe water genoeg wordt gemaakt (met name, van de grootte-orde van de golflengte van de watergolven zelf), zullen de golven (gedeeltelijk) worden doorgelaten

Kwantumconcepten

Deeltjes kunnen wel met een zekere kans door een energiebarrière tunnelen dankzij hun

Dit is een kwantumeffect omdat tunneling kan optreden dankzij het feit dat elk foton naast deeltjeskarakter ook een -karakter heeft.

Dankzij hun kunnen elektronen en materie ook tunnelen. M.a.w. ze kunnen door een energiebarrière tunnelen ook als ze niet voldoende energie hebben om de barrière te overbruggen.

De waarschijnlijkheid dat kwantumobjecten door een energie barrière tunnelen hangt af van de **energie** van het deeltje en van de van de barrière.