# Woraus besteht Magnetismus wirklich – Richard Feynmans verblüffende Erklärung der Quantenphysik

Stel je even voor dat je twee gewone magneten in je hand hebt, je drukt ze langzaam tegen elkaar aan en plotseling is er een onzichtbare muur.

Er is iets dat ertegenaan duwt.

Je voelt het heel duidelijk in je vingers, maar je voelt niets.

Geen schroefdraad, geen verborgen motor, geen trucje.

En nu komt een van de slimste natuurkundigen aller tijden, Richard Feynman, Nobelprijswinnaar.

De man die mede de kwantumelektrodynamica ontwikkelde, kreeg in een beroemd interview precies die vraag: Hoe werken magneten?

En weet je wat hij antwoordde?

Hij weigerde.

Eerlijk gezegd, dit is geen grap.

Het grootste genie van de moderne natuurkunde zit daar, hoort de vraag van het kind en zegt zoiets als: "Dat kan ik je niet uitleggen."

Waarom in hemelsnaam weigert deze man zo'n simpele vraag te beantwoorden?

Was hij gewoon in een slecht humeur, of zat er iets diepers achter?

Iets dat de helft van de natuurkunde op zijn kop zet?

Dat is precies wat we vandaag gaan verduidelijken.

En ik beloof je, aan het einde van deze video zul je niet alleen begrijpen waaruit magnetisme werkelijk bestaat, tot aan individuele elektronen en hun zogenaamde spin.

Je begrijpt waarom.

Waarom dit misschien wel de gevaarlijkste vraag in de hele natuurkunde is.

En over een paar minuten laat ik je iets heel bijzonders zien, iets wat je in je hele leven nog nooit hebt aangeraakt.

Niet je telefoon, niet je stoel, zelfs niet de hand van iemand anders.

Klinkt volkomen absurd.

Blijf kijken, het gaat zo gebeuren.

Laten we beginnen bij iets wat iedereen al kent.

Magneten zijn zo alledaags geworden dat we er niet eens meer bij stilstaan.

Ze zitten vastgeplakt aan de koelkast, in elke luidspreker, in elke elektromotor, in de harde schijf, zelfs in de MRI-scanner bij de dokter.

En toch is wat ze doen ronduit absurd.

Twee dingen oefenen een kracht op elkaar uit zonder elkaar aan te raken, door pure lucht, zelfs door een vacuüm.

Stel je dat eens voor met iets anders.

Je duwt iemand zonder hem aan te raken.

Dat zou fantastisch voor ons zijn.

Voor magneten is het dinsdag.

En dan de eerste eerlijke vraag: Wat bevindt zich nu eigenlijk tussen de twee magneten?

Wat vult deze lege ruimte op waar de kracht doorheen gaat?

De natuurkunde heeft hiervoor een oplossing: het magnetische veld. Maar pas op, één woord is geen volledige verklaring.

Het woord "magnetisch veld" is ongeveer net zo nuttig als wanneer ik vraag waarom je moe bent en jij antwoordt: "Vanwege de vermoeidheid."

Maar we zijn nog geen stap verder, dus laten we dieper graven.

De eerste echte aanwijzing kwam bijna per ongeluk aan het licht, meer dan 200 jaar geleden.

Tijdens een college hield de natuurkundige Hans Christian Oersted een kompasnaald naast een draad.

Op het moment dat er stroom door de draad liep, schoot de naald opzij – een elektrische stroom.

En plotseling is er een magnetisch veld.

Dat was het gevoel.

Omdat elektriciteit en magnetisme geen twee aparte dingen zijn.

Het zijn twee kanten van dezelfde medaille.

Tegenwoordig noemen we het elektromagnetisme, een van de vier fundamentele krachten van het hele universum.

En hieruit volgt de regel die alles bijeenhoudt.

Het is dus een goed idee dat bewegende elektrische lading altijd magnetisme opwekt.

Een stroom in een draad is niets meer dan een grote hoeveelheid elektronen die in één richting bewegen, waardoor er direct een magnetisch veld omheen ontstaat.

Een elektromagneet werkt dus door stroom van de magneet af te voeren.

Een kraan op een autosloperij gebruikt het om auto's van vele tonnen op te tillen en ze vervolgens met een druk op de knop weer te laten zakken.

En diezelfde regel is zelfs van toepassing op iets gigantisch boven je hoofd.

Waarom wijst een kompasnaald altijd naar het noorden?

Omdat de hele aarde één gigantische magneet is.

Diep vanbinnen borrelen gesmolten, gloeiend hete ijzerbellen en wervelt geladen materiaal rond in enorme stromingen, voortdurend in beweging.

En zo geschiedde het.

Een magnetisch veld dat de planeet volledig omhult.

Dit veld is overigens je onzichtbare schild.

Het weerkaatst de gevaarlijke stroom deeltjes van de zon.

Zonder deze magneet ter grootte van een planeet zou het leven zoals wij dat kennen wellicht helemaal niet bestaan.

Een trillende kompasnaald wordt dan ineens een vraag over je overleving.

Maar, en hier komt het addertje onder het gras dat me vroeger bijna tot waanzin dreef: een gewone koelkastmagneet heeft geen batterij, geen kabel, geen elektriciteit die je kunt inschakelen.

Het staat gewoon altijd aan, jarenlang zonder externe energietoevoer.

Hoe kan dat, als magnetisme een bewegende lading vereist?

Waar zit de elektriciteit in een stuk dood metaal dat zomaar ergens rondslingert?

Wacht eens even, er ontbreekt hier iets compleet.

En precies hier zoomen we in, diep in de atomen zelf, want daar is de stroom aanwezig.

Het is klein en verborgen.

Elk atoom heeft een kern, en elektronen omringen deze kern.

En deze elektronen zijn geladen deeltjes die in beweging zijn.

Goederen verplaatsen.

Weet je het nog?

Elk afzonderlijk elektron is dus zelf een minuscule magneet, een minimagneet kleiner dan je je kunt voorstellen.

Maar er zijn twee bronnen voor dit minimale magnetisme.

En de tweede is pas echt een sensatie.

De elektronen bewegen rond de kern.

Oké, we verplaatsen de lading.

Begrepen.

De tweede en veel belangrijkere warmte van de spin.

En deze draaiing is een van de meest verbazingwekkende concepten in de hele kwantumfysica.

In het Duits zou 'spin' namelijk vertaald worden als 'rotatie', alsof het elektron om zijn eigen as draait als een kleine tol.

Maar dat is onjuist.

Het elektron roteert in werkelijkheid niet.

Spin is een puur kwantummechanische eigenschap, een soort ingebouwd gevoel voor rotatie dat het deeltje simpelweg bezit, net zoals het een lading of een massa heeft.

Je kunt het niet uitzetten, je kunt het niet weghalen.

Door deze draaiing verandert elk elektron in een klein staafmagneetje met een noordpool en een zuidpool.

Onthoud deze ene zin, want die is de sleutel tot alle videomagnetisme.

De warmte die je van de koelkast kent, komt uiteindelijk voort uit de spin van elektronen, uit een eigenschap die alleen in de kwantumwereld bestaat.

En dat brengt ons meteen bij de volgende vraag, die iedereen zich eigenlijk zou moeten stellen.

Als elk elektron werkelijk een minuscule magneet is, en er triljoenen en triljoenen van die magneten in je lichaam zitten, waarom ben je dan zelf geen magneet?

Waarom zit je arm niet vast aan de koelkast?

Waarom is een stuk hout, plastic of koper niet magnetisch, ook al bevat het elektronen?

Goede vraag.

Een zeer goede vraag inderdaad.

En het antwoord is buitengewoon elegant.

De reden hiervoor is dat de kleine magneten elkaar opheffen.

In de meeste materialen komen elektronen in paren voor.

In zo'n paar wijst de spin van het ene elektron naar boven en die van het andere naar beneden, van noordpool naar zuidpool, precies tegenover nul.

Ze neutraliseren elkaar, alsof twee even sterke personen in precies tegenovergestelde richting aan een touw trekken.

Er gebeurt niets.

Doordat vrijwel alle materialen om je heen aanwezig zijn, heffen alle minimagneten elkaar perfect op, waardoor er aan de buitenkant niets zichtbaar is.

Het feit dat de elektronen zich zo netjes in paren rangschikken is evenmin toeval, maar een strikte regel van de kwantumwereld.

Het wordt grofweg het Pauli-uitsluitingsprincipe genoemd: Twee elektronen kunnen zich niet in exact dezelfde toestand bevinden, dus ze delen alleen een positie als hun spins tegengesteld zijn.

En dat is precies de reden waarom de kleine magneten elkaar in de meeste materialen opheffen.

Houd deze Pauli-regel in gedachten.

We hebben ze binnenkort weer nodig voor iets echt geweldigs.

Maar nu komt het spannende gedeelte: met een paar metalen werkt het perfect: ijzer, nikkel, kobalt.

In deze gevallen blijven er elektronen over waarvan de spins niet in evenwicht zijn met die van een partner.

Ongepaarde elektronen, waarvan de minimagneten allemaal nog actief zijn.

En nu gebeurt er iets dat bijna poëtisch te noemen is.

Deze niet-gepaarde spins slepen elkaar mee.

Als iemand naar boven wijst, willen zijn buren dat ook.

Ze scharen zich vrijwillig in dezelfde richting.

Dit is de bekende uitwisselingsinteractie.

Dit is wederom een puur kwantummechanisch effect, dat zonder het Pauli-uitsluitingsprincipe niet mogelijk zou zijn.

Waren.

Het resultaat is dat er binnen het ijzer minuscule zones ontstaan waar miljoenen spins precies dezelfde kant op wijzen.

Deze zones worden in het Duits de Weiss-districten genoemd, naar de natuurkundige Pierre Weiss.

Stel je ze voor als kleine teams waarbij alle spelers in dezelfde richting rennen.

En nu komt het slimme gedeelte, dat verklaart waarom een ijzeren spijker op zichzelf niet magnetisch is.

In een normaal stuk ijzer wijzen al deze teams naar deze districten die elkaar in alle mogelijke richtingen kruisen.

Eén zone naar links, de volgende naar boven, en de zone daarna naar rechts.

Over het algemeen heffen ze elkaar op.

De spijker is aan de buitenkant niet-magnetisch.

De potentie voor een sterke magneet is er al.

Het is gewoon chaotisch georganiseerd.

Wat gebeurt er als je deze spijker herhaaldelijk in dezelfde richting beweegt met een echte magneet?

Je dwingt de districten om zich allemaal in dezelfde richting te scharen.

Uit de chaos ontstaat een leger.

Plotseling bewegen miljarden spins synchroon en bam, de spijker zelf is nu een magneet.

Dat kun je thuis doen.

Het gekke is, dat een permanente magneet niets meer is dan een ongelooflijk groot aantal elektronenspins, die allemaal in dezelfde richting wijzen en gewoon zo blijven.

Dat was het moment waarop het kwartje viel.

Denk nog eens na over magnetisme.

Het heeft een bewegende lading nodig, dus een soort stroom.

Waar bevindt zich de elektriciteit in de koelkastmagneet?

Daar is hij.

Het is de spin van triljoenen uitgelijnde elektronen.

Een stroom die nooit stopt, die geen batterij, geen stopcontact en geen externe energiebron nodig heeft, en die voor eens en voor altijd in één richting wordt geleid.

Een magneet is een bevroren orde op het kleinst mogelijke niveau.

Hoe bizar is dat?!

En als je het niet gelooft, kan deze orde zelfs weer vernietigd worden.

Verhit een magneet voldoende sterk, en bij een bepaalde temperatuur, de zogenaamde Curie-temperatuur, verdwijnt het magnetisme abrupt.

Waarom?

Doordat de hitte de atomen zo heftig laat trillen dat de keurig uitgelijnde spins wild heen en weer worden geschud.

Het leger valt uiteen, iedereen rent weer zijn eigen weg en de magneet is uitgeschakeld.

Ordelijkheid schept een magneet voor chaos.

Het zal hem breken.

En hier is nog iets wat bijna niemand weet en waar je 's nachts wakker van zult liggen: elke magneet heeft een noordpool en een zuidpool.

Wat gebeurt er als je het precies in het midden doorsnijdt?

Als je de twee polen van elkaar scheidt, krijg je dan een stuk van alleen de Noordpool en een stuk van alleen de Zuidpool?

Nee, je krijgt twee complete kleine magneten, elk met een noord- en een zuidpool.

U kunt zo vaak maaien als u wilt.

Je krijgt nooit één enkele paal.

En dat wordt ineens volkomen logisch als je aan onze elektronen denkt.

Elk ervan is op zichzelf een klein magneetje met twee polen.

In de natuur heeft niemand ooit een enkele magnetische pool, een zogenaamde monopool, gevonden.

Ongelooflijk, toch?

Oké, even een korte pauze en dan wordt het nóg gekker.

Ik heb je aan het begin beloofd dat je meteen zou begrijpen waarom je in je leven nog nooit iets hebt aangeraakt.

Nu gaan we dat goedmaken.

Want die kracht tussen de magneten, die je in je vingers voelt, dezelfde soort kracht, is de reden waarom je überhaupt op je stoel zit en er niet gewoon doorheen valt.

Want wat gebeurt er als je een tafel aanraakt?

Je denkt dat je huid het hout raakt.

In werkelijkheid gebeurt dat nooit.

De buitenste schil van elk atoom bestaat uit elektronen.

Je vingertop zit er helemaal onder, en het tafelblad ook.

En elektronen zijn allemaal negatief geladen.

Gelijke ladingen stoten elkaar af.

Dit is onze elektromagnetische kracht.

Uit dezelfde familie als de magneet.

Bovendien verbiedt ons oude Pauli-principe dat deze elektronen zomaar dezelfde ruimte delen.

Dat betekent dat voordat jouw atomen de atomen van de tafel daadwerkelijk kunnen aanraken, een onzichtbare kracht ze uit elkaar duwt.

Je zweeft op een minuscule afstand boven alles wat je aanraakt.

Het constante gevoel van stevigheid en hardheid in je vingers is in werkelijkheid niets meer dan deze elektromagnetische afstandsafstoting, dezelfde afstotende kracht als tussen twee gelijksoortige magnetische polen.

Je hebt eigenlijk nooit iets anders aangeraakt.

Je voelde alleen maar de kracht.

Laat dat even tot je doordringen.

En nu keren we terug naar de belangrijkste vraag die nog steeds openstaat: hoe slaagt een kracht erin om door de lege ruimte te springen?

Er bevindt zich niets tussen twee magneten.

Hoe kan niets kracht overbrengen?

En hier komt Feynman zelf in beeld met de theorie waarvoor hij de Nobelprijs ontving: de kwantum-elektrodynamica, of QED in het kort.

QED's antwoord is even prachtig als bizar.

De elektromagnetische kracht wordt overgedragen door deeltjes, door lichtdeeltjes, de fotonen.

Twee elektronen die elkaar afstoten, doen dat door constant onzichtbare fotonen naar elkaar te slingeren.

Ze worden virtuele fotonen genoemd.

Stel je voor dat twee schaatsers op het ijs een zware bal naar elkaar overgooien.

Bij elke worp en elke vangst drijven ze een beetje verder uit elkaar.

Op dezelfde manier detecteren twee magneten elkaar door middel van een onzichtbare stroom fotonen die door de schijnbaar lege ruimte vliegen.

En zo sluit de cirkel zich op een prachtige manier.

De lege ruimte tussen je twee magneten is helemaal niet leeg.

Het bruist er praktisch van de uitgewisselde fotonen.

Het veld, dat we aanvankelijk zo onterecht een magnetisch veld noemden, is in werkelijkheid een dans van licht en lading.

Dit is de stof waaruit magnetisme is opgebouwd.

En nu begrijp je eindelijk waarom Feynman destijds weigerde.

Hij was geen arrogant type dat gewoonweg geen antwoord wilde geven.

Hij deed iets veel eerlijkers.

Hij zei zoiets als: "Als ik je vertel dat magneten elkaar aantrekken alsof ze met onzichtbare elastiekjes verbonden zijn, dan bedrieg ik je."

Omdat elastiekjes alleen samentrekken door elektrische krachten.

Dat komt precies door hetgeen ik je moet uitleggen.

Ik zou in rondjes rennen.

Dat is de kern van de zaak.

Elke "waarom"-vraag roept weer een nieuwe "waarom"-vraag op.

Waarom stoten magneten elkaar af?

Vanwege de elektromagnetische kracht.

Waarom bestaan er paden voor de uitwisseling van fotonen?

Waarom wisselen ze fotonen uit?

Uiteindelijk kom je dan helemaal onderaan terecht, bij de fundamentele krachten van het universum.

En er is simpelweg niets bekenders onder datgene waarmee men het zou kunnen verklaren.

Feynman illustreerde dit met een voorbeeld: Als je tante uitglijdt op het ijs en haar been breekt, en jij... Waarom kun je eindeloos doorgaan, helemaal tot aan de aard van ijs en atomen?

Waarom heeft het geen vloer?

En dit is geen nederlaag voor de natuurkunde.

Dat is hun eerlijkheid.

Feynman wilde je geen mooi sprookje verkopen dat weliswaar prettig aanvoelde, maar uiteindelijk onjuist bleek.

Hij wilde dat je het punt zou accepteren waarop het eerlijke antwoord is: "Vanaf nu is het gewoon zo."

Dit is een fundamentele natuurwet.

En eerlijk gezegd vind ik dat duizend keer spannender dan welk goedkoop, simpel antwoord dan ook.

Laten we het geheel dus in één adem samenvatten.

Magnetisme is een onderdeel van elektromagnetisme, een van de vier fundamentele krachten.

Het wordt gecreëerd door bewegende lading.

In een permanente magneet is deze bewegende lading, de spin van elektronen, een puur kwantummechanische eigenschap.

In de meeste materialen heffen deze spins elkaar op volgens het Pauli-principe.

In ijzer scharen ze zich achter de districten van Weiss.

En als ze allemaal in één richting wijzen, heb je een magneet.

De kracht zelf doorkruist de lege ruimte door de uitwisseling van virtuele fotonen.

En helemaal onderaan, bij de allerlaatste "waarom"-vraag, houdt de uitleg eerlijk gezegd ook hier op.

Een enkele koelkastmagneet is in werkelijkheid dus een venster rechtstreeks naar de kwantumwereld.

Dezelfde regels die deze minuscule rotaties ordenen, vormen de atomen waaruit alles is opgebouwd: de lucht, de tafel, je koffie, jijzelf.

De volgende keer dat je twee magneten tegen elkaar drukt en die onzichtbare wand voelt, weet je dat je met je blote vingers de kwantumfysica aan het werk ervaart.

En nu is het jouw beurt.

Schrijf me: Wat was het gekste moment voor jou dat je uiteindelijk helemaal niets hebt aangeraakt?

De oneindige stroom in een magneet, of Feynmans stelling dat 'waarom' geen bodem heeft.

Ik lees daadwerkelijk mee.

Als deze video je heeft geholpen om natuurkunde eindelijk te begrijpen in plaats van het alleen maar gedachteloos uit je hoofd te leren, abonneer je dan en begrijp het zoals Feynman.

Dat is precies waar dit kanaal voor bedoeld is.

Geef deze video een duim omhoog, zodat YouTube hem aan nog meer geïnteresseerden kan laten zien.

En als je vervolgens wilt weten waarom je eigenlijk bijna volledig uit lege ruimte bestaat, klik dan op de video die zojuist op het scherm verscheen.

Tot de volgende keer, en blijf nieuwsgierig.