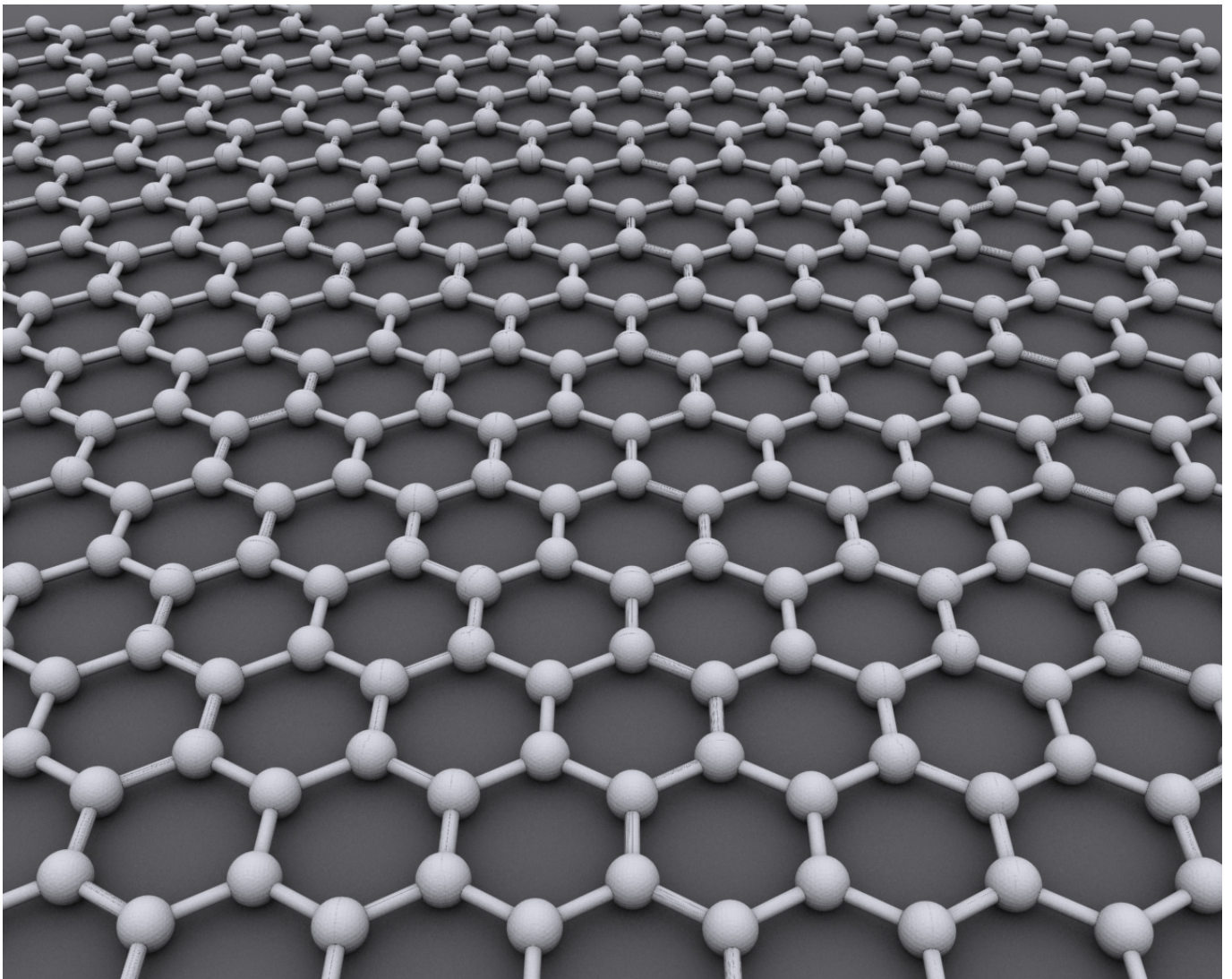


Een wonder in je potlood

In 2004 lukte het twee creatieve onderzoekers, Andre Geim en Konstantin Novoselov, om met plakband een laag koolstof te isoleren die maar één atoom dik was: het zogeheten grafeen. Zes jaar later kregen ze er [de Nobelprijs voor](#). Hoe kan een laagje koolstof - hetzelfde als waar het grafiet in je potloodpunt van is opgebouwd - Nobelprijswaardig zijn? Die vraag beantwoorden we in dit artikel.



Afbeelding 1. De structuur van grafeen. Bolletjes zijn koolstofatomen en staafjes geven de chemische verbindingen ertussen weer. Afbeelding: Wikipediagebruiker [AlexanderAIUS](#).

Wat is grafeen?

Grafiet, waar je potloodpunt van gemaakt is, is opgebouwd uit platte lagen van koolstofatomen. Wanneer je met je potlood op papier drukt, breek je de zwakke bindingen die de lagen bij elkaar houden en laat je zo koolstof achter. Andre Geim en Konstantin Novoselov slaagden er in 2004 in om laagjes van grafiet met plakband te verwijderen totdat er stukjes overbleven van maar een enkele atoomlaag: *grafeen*. Aangezien grafeen maar één atoom dik is, is het het dunste, meest tweedimensionale materiaal dat er bestaat. De koolstofatomen zijn gerangschikt in een hexagonale configuratie, waardoor grafeen een beetje lijkt op kippengaas.

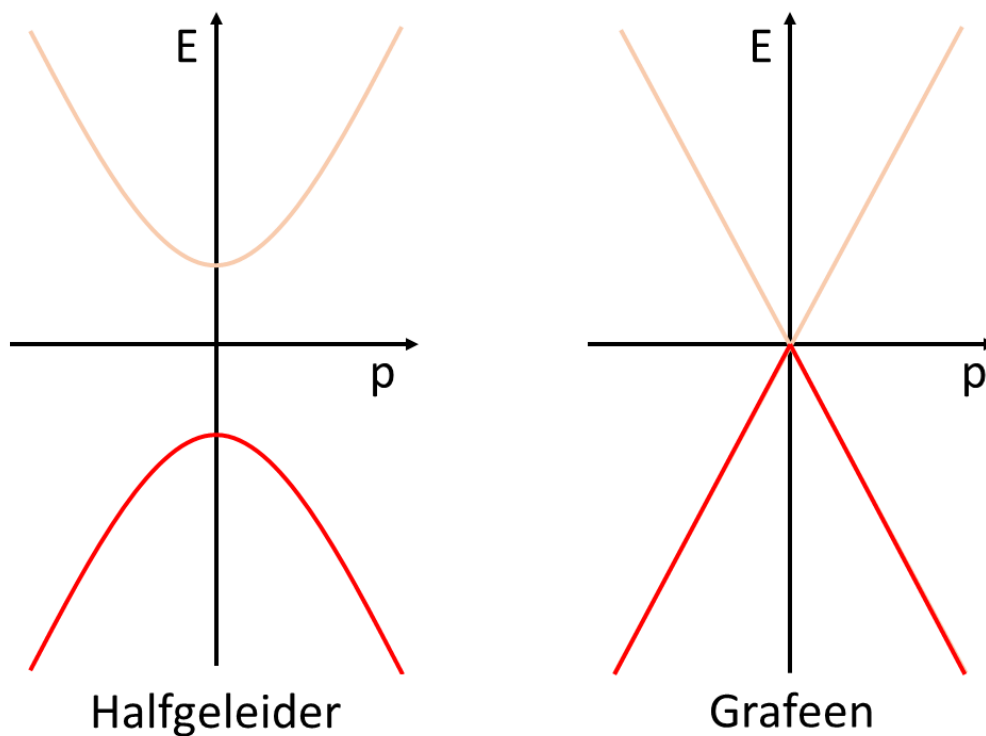
Je zou misschien verwachten dat zo'n dun materiaal heel fragiel is, maar juist het tegenovergestelde is waar. De chemische bindingen tussen de atomen in grafeen zijn zo sterk dat grafeen het sterkste materiaal is dat ooit is gemeten, meer dan honderd keer sterker dan het sterkste staal. Daarbovenop is het voor een kristal super-elastisch: je kunt het wel 20% uitrekken zonder dat het stuk gaat. Met zijn dikte van maar één atoom is het natuurlijk transparant, hoewel het verbazingwekkend genoeg ondoorzichtig genoeg is om met het blote oog te kunnen zien. En we vergelijken grafeen wel met kippengaas, maar zelfs het lichtste gas ter wereld – helium – komt er niet doorheen. Al deze eigenschappen leiden natuurlijk tot heel veel toepassingen. Als je bijvoorbeeld in zo'n sterk, licht, ondoordringbaar materiaal poriën maakt die kleiner zijn dan de ionen in zout, maar groter dan watermoleculen, is het ideaal om te gebruiken voor (goedkope) [ontzilting van water](#).

Toch zijn het niet alleen de bovengenoemde eigenschappen waardoor zoveel natuurkundigen als opgewonden kippen met dit gaas aan de slag gingen. Grafeen heeft ook fantastische elektronische eigenschappen. Koolstofatomen hebben vier valentie-elektronen: drie van deze elektronen zitten in grafeen 'vast' in de chemische 'sigma-bindingen' met de drie atomische burens, en de vierde is gedelocaliseerd boven en onder het atomische vlak, in zogenoemde 'pi-bindingen'. (Voor een leuke introductie/verfrisser (in het Engels) over verschillende soorten

bindingen kun je [deze video](#) bekijken.) Deze vierde elektronen zijn de ideale stroomgeleiders. Om dit te begrijpen keren we even terug naar bandentheorie.

Relativistische stroomgeleider

Zoals in een eerder [artikel](#) is uitgelegd, bepaalt de zogenoemde bandenstructuur, en tot welke energie deze is opgevuld, de elektronische eigenschappen van een materiaal. Zo kun je makkelijk herkennen of een materiaal een stroomgeleider is of juist een isolator. **Halfgeleiders** zitten een beetje tussen geleiders en isolatoren in, en worden gebruikt in bijvoorbeeld [diodes](#), [transistoren](#), en [zonnecellen](#). Nu is grafeen geen halfgeleider, maar een *semimetaal*. De kippengasstructuur van grafeen zorgt ervoor dat de energiebanden elkaar lineair kruisen, zoals te zien is in afbeelding 2. Dit houdt in dat er geen bandkloof zit tussen de gevulde valentieband en de lege conductieband, maar dat deze twee banden elkaar *nét* aanraken.



Afbeelding 2. De bandenstructuur van een halfgeleider en die van grafeen. De verticale as geeft de energie van de elektronen aan (ten opzichte van het Fermi-niveau), en p is hun impuls. Rode lijnen geven gevulde banden aan, en oranje lijnen lege banden (bij nul temperatuur).

Niet alleen het feit dat er geen bandkloof is, maar ook de vorm van de bandenstructuur heeft grote gevolgen voor grafeen, en maken dat het zo'n interessant materiaal is. Elektronen in een materiaal gedragen zich anders dan vrije elektronen; in het bijzonder bewegen ze alsof ze een bepaalde effectieve massa hebben die niet gelijk hoeft te zijn aan de echte massa van het deeltje. De effectieve massa van de elektronen in een materiaal is evenredig met de kromming van de onderkant van de conductieband. Het grappige is dat de conductieband in grafeen helemaal recht is, oftewel een kromming heeft van nul. De elektronen in grafeen kunnen dus over het oppervlak zoeven alsof ze geen massa hebben!

Een deeltje zonder massa dat we al kennen is een [quantum van licht](#), oftewel een foton, dat zich relativistisch gedraagt (zie hierover ons [dossier](#)). Wiskundig kunnen we de elektronen in grafeen op een vergelijkbare manier beschrijven, zij het met een lagere snelheid. Dit is leuk, want het betekent dat we principes van relativiteitstheorie gewoon in een laboratorium kunnen testen, in plaats van met telescopen die diep in de ruimte turen of met dure deeltjesversnellers.

Overal goed voor

Na de ontdekking van grafeen werd het vrijwel meteen beschreven als een wondermateriaal, met eindeloos veel toepassingen. Behalve het hiervoor genoemde voorbeeld van ontzilting, zou het ook halfgeleiders kunnen vervangen in bijna alles, aangezien het een soort 'halfgeleider-plus' is. Omdat grafeen buigzaam en transparant is, zou het ook goed te gebruiken zijn in flexibele touchscreens en draagbare elektronica. De hype rondom grafeen is misschien het beste samengevat met een muzikale ode aan grafeen:

Het klinkt allemaal fantastisch, maar waar blijven al die grafeen-gadgets? Helaas zijn er nog steeds wat drempels die genomen moeten worden. Ten eerste is het maken van stukken

grafeen groter dan enkele centimeters nog niemand gelukt. Omdat het anders tijdens productie uit zichzelf opkrult en driedimensionaal wordt vanaf een bepaalde grootte, wordt grafeen bijna altijd bovenop een ander materiaal gemaakt. Dat is jammer, omdat dit juist een effect heeft op de geleidende elektronen boven en onder de atoomlaag, en grafeen zich hierdoor als een normale (niet-relativistische) halfgeleider gaat gedragen. De gevoeligheid van grafeen is een reden waarom men ook verder is gaan zoeken in de nauw verwante wereld van [topologische materialen](#), waar gelijksoortige lineaire bandkruisingen voorkomen die wél tegen een stootje kunnen. Gelukkig zijn er nog ontelbare materialen met fantastische eigenschappen waar we nog niks van weten, dus de zoektocht naar het volgende wondermateriaal gaat gewoon door!