

INLEIDING

DIT BOEK IS EEN verzameling antwoorden op hypothetische vragen.

Deze vragen werden mij voorgelegd via mijn website, waar ik een soort Dear Abby-column met adviezen voor wereldvreemde wetenschappers schrijf en de simplistisch opgezette webstrip *xkcd* teken.

Ik ben niet begonnen als tekenaar van cartoons. Ik heb natuurkunde gestudeerd, en na mijn opleiding heb ik bij NASA gewerkt op de afdeling Robotica. Uiteindelijk ben ik bij NASA weggegaan om me fulltime aan strips te wijden, maar mijn belangstelling voor de natuurwetenschap en de wiskunde is niet verdwenen. Ik heb dan ook een nieuwe uitlaatklep gevonden: ik probeer antwoord te geven op de vreemde – en soms verontrustende – vragen die op internet aan de orde komen. Dit boek bevat een selectie van mijn favoriete antwoorden op mijn website, plus een stel nieuwe vragen die hier voor het eerst worden beantwoord.

Zolang ik me kan herinneren, heb ik wiskunde gebruikt om een antwoord op vragen te vinden. Op mijn vijfde had mijn moeder een gesprek met me dat ze heeft opgeschreven en heeft bewaard in een fotoalbum. Toen ze hoorde dat ik dit boek aan het schrijven was, zocht ze het verslag op en stuurde het me toe. Hier is het, zoals het letterlijk is weergegeven op haar 25 jaar oude velletje papier.

Randall: Zijn er meer zachte dingen of harde dingen in ons huis?

Julie: Dat weet ik niet.

Randall: En in de wereld?

Julie: Dat weet ik niet.

Randall: Nou, elk huis heeft 3 of 4 kussens, toch?

Julie: Klopt.

Randall: En elk huis heeft ongeveer 15 magneten, toch?

Julie: Ik denk het.

Randall: Dus 15 plus 3 of 4, zeg maar 4, is 19, hè?

- Julie:** Klopt.
- Randall:** Dan kunnen er dus zo'n 3 miljard zachte dingen zijn, en... 5 miljard harde dingen. Nou, welke wint er dan?
- Julie:** De harde dingen, denk ik.

Tot op de dag van vandaag heb ik geen idee hoe ik aan die '3 miljard' en '5 miljard' kwam. Ik wist duidelijk nog niet precies hoe getallen werkten.

Mijn wiskunde is met de jaren wel iets beter geworden, maar mijn reden om aan wiskunde te doen is nog dezelfde als toen ik vijf was: ik wil antwoorden op vragen vinden.

Ze zeggen weleens dat er geen domme vragen bestaan. Dat is duidelijk een misvatting; zo is mijn vraag over zachte en harde dingen volgens mij tamelijk dom. Maar als je probeert een degelijk antwoord op een domme vraag te vinden, kun je blijkbaar nog vrij interessante dingen tegenkomen.

Ik weet nog steeds niet of er meer harde dan zachte dingen in de wereld zijn, maar ik ben gaandeweg veel andere dingen te weten gekomen. In dit boek staan mijn favoriete onderdelen van die reis.

Randall Munroe

WERELDWIJDE STORM

V. Wat gebeurt er als de aarde, met alles wat erop voorkomt, opeens niet meer ronddraait terwijl de dampkring de oude snelheid behoudt?

– Andrew Brown

A. BIJNA ALLES WAT LEEFT, GAAT DOOD. En dán wordt het interessant.

Op de evenaar heeft het oppervlak van de aarde een rondgaande snelheid van ongeveer 470 meter per seconde – bijna 1700 kilometer per uur – ten opzichte van haar as. Als de aarde stilstaat en de lucht niet, steekt er plotseling een wind op van 1700 kilometer per uur.

Deze wind is het krachtigst op de evenaar, maar alles en iedereen tussen 42°NB en 42°ZB – waar ongeveer 85 procent van de wereldbevolking leeft – krijgt opeens te kampen met een supersonische wind.

Nabij het aardoppervlak houden de hoogste windsnelheden slechts een paar minuten aan; de wind vertraagt hier door frictie met de bodem. Maar die paar minuten zijn lang genoeg om vrijwel alle bouwwerken van de mens tot puin te blazen.

Mijn huis in Boston staat ver genoeg naar het noorden om net buiten de supersonische windzone te blijven, maar de wind is altijd nog tweemaal zo sterk als de



 ER GEBEUREN VERSCHRIKKELIJKE DINGEN.

 ER GEBEUREN VERSCHRIKKELIJKE DINGEN, MAAR LANGZAMER.

krachtigste tornado. Gebouwen, van schuurtjes tot wolkenkrabbers, worden tegen de grond geslagen, van hun fundament losgerukt en tuimelend over het landschap verspreid.

Bij de Noordpool en de Zuidpool is de wind minder sterk, maar geen enkele menselijke stad ligt ver genoeg van de evenaar om aan de verwoesting te ontkomen. Longyearbyen, op de Noorse eilandengroep Spitsbergen (Svalbard) – de stad met de hoogste noordelijke breedtegraad op aarde – wordt verwoest door een wind met een kracht die gelijk is aan die van de hevigste tropische wervelstormen op aarde.

Als je wilt wachten tot de storm luwt, is de Finse hoofdstad Helsinki misschien een van de beste locaties. De vrij hoge noorderbreedte – boven de 60° – voorkomt niet dat de wind alles met de grond gelijkmaakt, maar in de bodem onder Helsinki ligt een goed verzorgd netwerk van tunnels, inclusief een ondergronds winkelcentrum, een ijshockeybaan, een zwembad en nog veel meer.



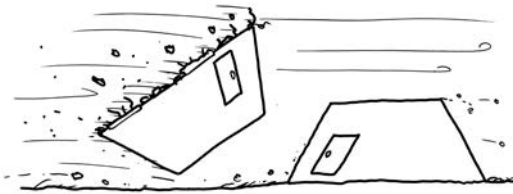
Geen enkel gebouw is veilig; zelfs gebouwen die eigenlijk sterk genoeg zijn om de wind te weerstaan, komen in de problemen. Zoals de komiek Ron White over orkanen zei: 'Het probleem is niet dat de wind waait, maar wat er met de wind meewaait.'

Stel, je zit in een zware bunker van een of ander materiaal dat een wind van 1700 kilometer per uur kan doorstaan.

TOEN BOUWDE HET 9ZE BIGGETJE
EEN HUIS VAN VERARMDE URANIUM.
EN DE WOLF MOEST TOEGEVEN: 'DA'S KWAP!'



Dat is mooi, en je bent veilig... als je tenminste de enige met een bunker bent. He-
laas heb je waarschijnlijk burens, en als die burens een minder solide bunker hebben,
krijgt jouw bunker de inslag met 1700 kilometer per uur van hún bunker voor zijn
kiezen.



Het menselijk ras sterft niet uit.¹ Over het algemeen kunnen maar heel weinig
mensen boven de grond het overleven; het rondvliegende puin verpulvert alles
wat niet bestand is gemaakt tegen een atoomaanval. Maar veel mensen onder de
grond kunnen het prima overleven. Als je in een diepe kelder zit (of beter nog, een
tunnel van de metro) op het moment dat het gebeurt, heb je een aardige kans om
het te overleven.

Er zullen ook nog andere gelukkige overlevenden zijn. De tientallen weten-
schappers en hun medewerkers op het Zuidpoolstation Amundsen-Scott zijn
veilig voor de wind. Zij krijgen voor het eerst door dat er iets aan de hand is als ze
merken dat de rest van de wereld plotseling niets meer van zich laat horen.

Ze verwonderen zich waarschijnlijk een tijdje over die mysterieuze stilte, maar
uiteindelijk merkt iemand nog iets veel vreemders op:

¹ Ik bedoel, niet meteen.



De lucht

Wanneer de oppervlaktewind luwt, wordt de situatie nog vreemder.

De stormwind vormt een hittegolf. Normaal gesproken is de kinetische energie van wind zo goed als verwaarloosbaar, maar dit is geen normale wind. Als de aarde tot een turbulente stilstand komt, wordt de wind warmer.

Boven land leidt dit tot een verzengende temperatuursverhoging en – in gebieden met een hoge luchtvochtigheid – immense onweersbuien.

Tegelijkertijd doet de wind boven de oceanen het oppervlaktewater kolken en vernevelen. De oceaan heeft enige tijd helemaal geen oppervlakte meer; je kunt onmogelijk zeggen waar de zee begint en de nevel eindigt.

Oceanen zijn koud. Onder de dunne oppervlaktelaag hebben ze een vrij uniforme temperatuur van 4°C. De storm brengt in een omgekeerde maalstroom koud water vanuit de diepte omhoog. De toestroom van koude nevel in de hete lucht creëert een soort weer dat nooit eerder op aarde is voorgekomen – een kolkende mix van wind, nevel, mist en abrupte temperatuurwisselingen.

Dit borrelende brouwsel leidt tot nieuwe vormen van leven doordat er nieuwe voedingsstoffen door de bovenste lagen stromen. Tegelijkertijd heeft het een enorme sterfte tot gevolg onder vissen, krabben, zeeschildpadden en andere dieren die de toestroom van zuurstofarm water uit de diepte niet aankunnen. Alle dieren die adem moeten halen, zoals walvissen en dolfinen, krijgen het moeilijk om te overleven in de turbulente mengeling van zee en lucht.

De golven spoelen van oost naar west de wereld rond, en elke naar het oosten gewende kust krijgt te maken met de grootste stormvloed in de geschiedenis van de wereld. Een verblindende wolk van waternevel schiet landinwaarts door, en daarachter doemt een turbulente, kolkende muur van water op als een tsunami. Hier en daar reiken de golven vele kilometers landinwaarts.

De storm brengt grote hoeveelheden stof en puin in de dampkring. Tegelijkertijd komt er een dichte deken van mist over de koude oppervlakten van de oceaan te liggen. Normaal gesproken daalt hierdoor de mondiale temperatuur. En dat gebeurt ook.

Tenminste, aan één kant van de aarde.

Als de aarde stopt met ronddraaien, betekent dat het einde van de normale cyclus van dag en nacht. De beweging van de zon langs de hemel stopt niet helemaal, maar in plaats van eens per dag op te komen en onder te gaan, doet de zon dat nu eens per j aar.

De dag en de nacht zijn elk zes maanden lang, zelfs op de evenaar. Aan de dagkant blakert de oppervlakte onder het voortdurende zonlicht, terwijl aan de nachtkant de temperatuur sterk daalt. De convectie aan de dagkant leidt tot grote stormen in het gebied dat pal onder de zon ligt.²

ALS DE OUDE CYCLUS VAN DAG EN NACHT
ER NIET MEER IS, WANNEER MOET IK DEZE
DUIVELTJES DAN ETEN GEVEN?



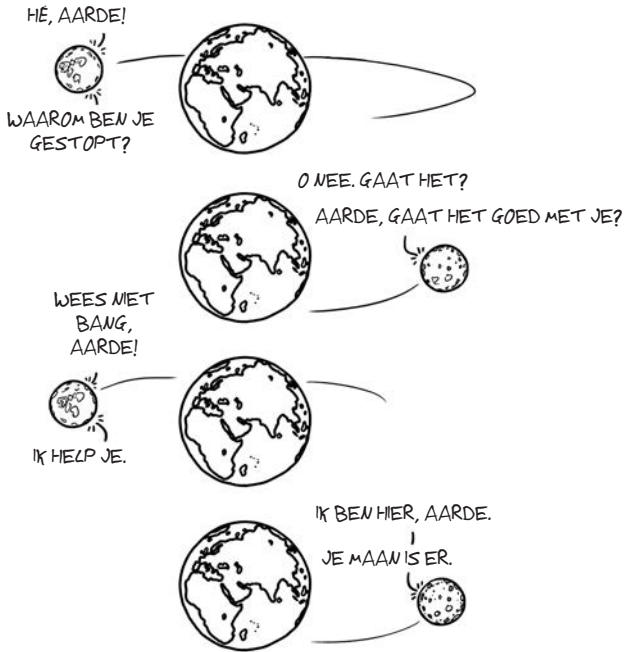
In bepaalde opzichten heeft deze aarde veel weg van een van de exoplaneten met een synchrone rotatie rond een rode dwerg, maar een betere vergelijking is misschien de heel vroege Venus. Door haar rotatie houdt Venus net als onze stilgezette aarde maandenlang dezelfde kant naar de zon gewend. De dichte dampkring circuleert er echter zeer snel, waardoor de dag- en de nachtkant toch ongeveer dezelfde temperatuur hebben.

Ook al verandert de lengte van de dag, de lengte van de maand verandert niet! De maan is niet gestopt met om de aarde heen draaien. Maar zonder de rotatie van de aarde die de maan getijenergie geeft, stopt de maan met de geleidelijke beweging van de aarde vandaan (die zich momenteel voordoet) en begint langzaam naar ons terug te komen.

In feite geeft de maan, onze trouwe metgezel, hiermee de aanzet om de schade te herstellen die Andrew heeft aangericht. Momenteel draait de aarde sneller om

² Al valt zonder het corioliseffect niet te voorspellen in welke richting ze draaien.

haar as dan de maan, en hebben onze getijden een vertragende invloed op de rotatie van de aarde, terwijl ze de maan van ons weg duwen.³ Als we stoppen met ronddraaien, zweeft de maan niet meer van ons vandaan. De getijden van de maan vertragen ons niet meer, maar zetten juist aan tot een draaiing. Heel stilletjes, heel zachtjes trekt de zwaartekracht van de maan aan onze planeet...



... en begint de aarde weer te draaien.

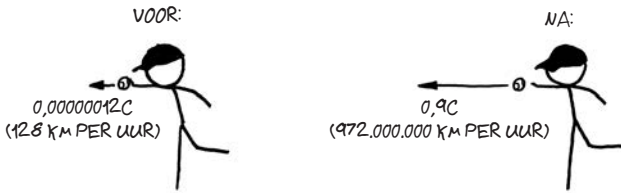


3 Zie <http://what-if.xkcd.com/26> onder *Leap Seconds* voor een uitleg waarom dit gebeurt.

DE RELATIVITEIT VAN HONKBAL

V. Wat gebeurt er als je een honkbal probeert te raken die met 90 procent van de snelheid van het licht op je afkomt?

- Ellen McManis



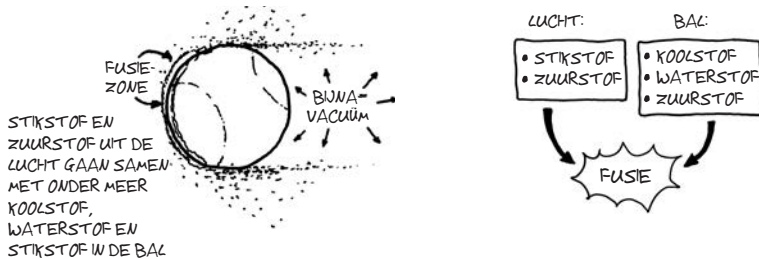
We laten buiten beschouwing hoe we de bal zo'n grote snelheid kunnen geven. We gaan ervan uit dat het een normale worp is, waarbij de bal op het moment dat de werper deze loslaat, op magische wijze accelereert naar 0,9c. Vanaf dat punt verloopt alles volgens de gangbare fysica.

A. HET ANTWOORD IS: 'Veel.' En het gaat allemaal erg snel, en het loopt niet goed af voor de slagman (ook niet voor de werper). Ik heb er een paar natuurkundeboeken bij genomen, een poppetje van de werper Nolan Ryan, een stel video-opnames van kernproeven, en probeerde het uit te werken. Hier volgt wat volgens mij het aannemelijkst is in een schets van nanoseconde tot nanoseconde.

De bal gaat zo snel dat al het andere praktisch stilstaat. Zelfs de moleculen in de lucht staan stil. Luchtmoleculen gaan in principe trillend heen en weer met een snelheid van een paar honderd kilometer per uur, maar de bal schiet er met 970 miljoen kilometer per uur doorheen. Dus in vergelijking met de bal hangen ze gewoon stil.

De principes van de aerodynamica gaan dan niet op. Normaal stroomt de lucht om alles heen wat erop afkomt. Maar voor de luchtmoleculen in de baan van deze bal is de tijd te kort waarin ze uit de weg kunnen worden gedrongen. De bal raakt ze zo hard dat de atomen in de luchtmoleculen samensmelten met de atomen aan

het oppervlak van de bal. Op elke botsing volgt een uitbarsting van gammastralen en uiteenspattende deeltjes.¹

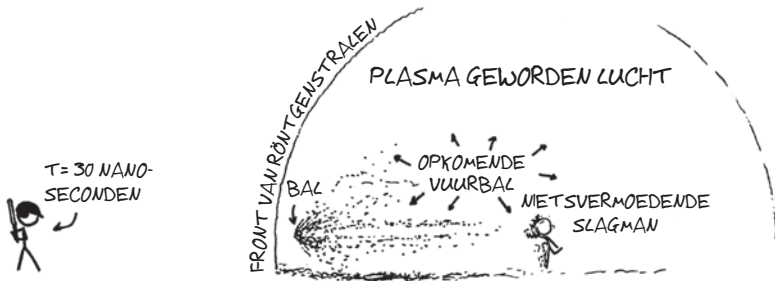


Deze gammastralen en de restanten dijen uit in een grote bol rond de werpheuvel. Ze beginnen de moleculen in de lucht uiteen te trekken, waarbij ze de elektronen losmaken van hun nucleus en de lucht in het stadion veranderen in een uitdijende bol van gloeiendheid plasma. De wand van deze bol nadert de slagman met ongeveer de snelheid van het licht – net iets voor de bal zelf uit.

De aanhoudende samensmelting aan de voorkant van de bal oefent een terugwaartse kracht uit, waardoor de bal vertraagt, alsof hij een raket is die achterstevoeren vliegt terwijl de motoren ontbranden. Helaas gaat de bal zo snel dat zelfs de enorme kracht van deze voortgaande thermonucleaire explosie nauwelijks een merkbare vertraging oplevert. De kracht van de explosie vreet echter wel aan de oppervlakte, waardoor kleine fragmenten van de bal in alle richtingen wegspringen. Deze fragmenten gaan zo snel dat ze, wanneer ze luchtmoleculen raken, nog twee of drie fusies ontketenen.

Na ongeveer 70 nanoseconden komt de bal aan op de thuisbasis. De slagman heeft niet eens gezien dat de werper de bal losliet, doordat het licht dat deze informatie draagt, zo'n beetje op hetzelfde moment aankomt als de bal. De botsingen met de lucht hebben de bal vrijwel geheel weggevreten, en hij is nu een kogelvormige wolk van uitdijend plasma (hoofdzakelijk koolstof, zuurstof, waterstof en stikstof) dat tegen de lucht ramt en onderweg nog meer fusies veroorzaakt. Het omhulsel van röntgenstralen raakt de slagman het eerst, en een paar nanoseconden later wordt hij getroffen door de wolk van restanten.

¹ Toen ik dit artikel voor het eerst publiceerde, liet Hans Rinderknecht, een natuurkundige van het Massachusetts Institute of Technology, me weten dat hij dit scenario had gesimuleerd op de computers in hun lab. Hij constateerde dat de meeste lucht moleculen in het begin van de baan van de bal te snel bewogen om een fusie te veroorzaken, en dwars door de bal heen gingen, waardoor deze langzamer en gelijkmatiger werd verwarmd dan ik had beschreven.



Wanneer de wolk de slagman bereikt, beweegt het centrum zich nog steeds met een aanzienlijk percentage van de snelheid van het licht voort. De wolk raakt eerst het slaghout, maar dan worden de slagman, de thuisplaat en de achtervanger allemaal opgepakt en dwars door het vangscherm meegesleurd terwijl ze desintegreer. Het omhulsel van röntgenstralen en gloeiendheid plasma zet verder naar buiten en omhoog uit, waarbij het vangscherm, beide teams, de zitbanken en de nabije omgeving worden opgeslokt – dat allemaal in de eerste microseconde.

Stel dat je op een heuvel buiten de stad staat te kijken. Het eerste wat je dan ziet, is een verblindend licht, veel sterker dan dat van de zon. Dit licht wordt in de loop van een paar seconden flauwer, waarna een vuurbal uitgroeit tot een paddenstoelwolk. Daarna arriveert met groot geraas een vernietigende golf die bomen losrukt en huizen in puin legt.

Alles binnen een straal van zo'n anderhalve kilometer van het park wordt met de grond gelijkgemaakt, en een vuurstorm golft over de omringende stad. Het honkbal-binnenveld, inmiddels een flinke krater, komt zo'n honderd meter achter de voormalige plek van het vangscherm te liggen.



Volgens regel 6.08(b) van het reglement voor de Amerikaanse honkbalcompetitie wordt de slagman in deze situatie geraakt door de worp en mag hij vrij doorlopen naar het eerste honk.