

DE WETTEN VAN HET HEELAL

Vincent Icke
17 februari 2003

Het is mijn voorrecht vandaag om te praten over de natuurkunde die aan de basis ligt van leven in het heelal, het onderwerp van dit college.

Iedereen die erover nadenkt, weet wel dat er over niets zoveel kletsboek is opgediend als juist over het leven. Over de liefde is ook heel veel onzin gezegd en geschreven, maar dat is onderdeel van het leven dus dat zit er al bij in. Maar mijn collega's en ik hebben het vaste voornemen om zo min mogelijk onzin te vertellen. Dat zal niet altijd lukken, al doen wij nog zo ons best; want zoals in iedere academische opleiding werken wij aan de grens van wat we weten en aan de grens van wat er mogelijk is voor ons, een soort aangeklede bavarianen. Het is dus niet ondenkbaar – sterker nog, ik denk dat het vrijwel zeker is – dat een deel van wat u in deze reeks colleges te horen krijgt, te zijner tijd herzien zal moeten worden. Nu geldt dat misschien minder voor het onderwerp van vandaag: de natuurwetten, die de basis vormen van de structuur die wij leven noemen. Omdat die wetten zo elementair zijn, schat ik de kans niet groot dat toekomstige verfijningen echt belangrijk zullen zijn voor het begrijpen van het leven in het heelal.

Ik wil beginnen met u een paar dingen te vertellen over dingen die ik zelf geleerd heb over de moderne ideeën over evolutie van vooral primitief leven op onze Aarde en wat we misschien zouden kunnen zeggen over primitief leven elders in het heelal op basis daarvan. Dat doe ik ook alweer omdat ik zeg dat er nogal veel onzin over geschreven is en bepaalde dingen die ik gewoon voor zoete koek had geslikt, die blijken dus helemaal niet waar te wezen. En dat wou ik graag eerst even met u delen. In de loop van dat verhaal zal wel duidelijk worden waar de verschillende punten zitten, waar de drie hoofdonderdelen van vandaag, de drie hoofdonderdelen van de natuurkunde hun rol vinden.

Het belangrijkste wat ik geleerd heb doordat ik het laatste halfjaar als voorbereiding op het college zo eens in de literatuur ben gaan kijken, is dat wij ons als het ware verkijken op de eigenschap van het leven dat het zichzelf repliceert. Ik kan me wel voorstellen, ik noemde net al dat er over de liefde ontzettend veel onzin is geschreven. Ik kan me voorstellen dat het repliceren in de mensen hun ziel een heel belangrijke emotionele rol speelt, maar dat wil niet zeggen dat het in het heelal uitzonderlijk is. Het grappige is dat blijkt dat als je op de keper scheikundige reacties beschouwt, dat replicatoren helemaal niet zeldzaam zijn. Dat wil natuurlijk niet zeggen dat iedere reageerbuis met cavia's en konijnen gevuld is, maar het repliceren van moleculen als zodanig ook onder hun eigen omstandigheden, onder hun eigen

condities is helemaal niet zo gek. Alleen als die moleculen wat groter gaan worden, dan ligt de zaak een beetje anders. En daar komt al meteen een thema om de hoek: wat bedoelen we precies met groter? Wat gaat er dan veranderen als je in plaats van met een paar atomen met een paar honderd miljard atomen te maken hebt. En wat kunnen wij op basis van de natuurkunde en van de wiskunde, want die zal hierin heel belangrijk blijken te zijn, zeggen over hoe replicatoren zich gedragen als ze groot zijn.

Het tweede is, dat wij zijn in de biologische literatuur compleet platgegooid met DNA. Als je zo'n beetje zou lezen, ook populaire zaken in de *Scientific American*, in *Natuur en Techniek*, bladen van een gelijke soort, het leven dat wordt min of meer met DNA gelijkgesteld. En de tegenwoordige trend en daarmee bedoel ik dus de laatste vijf jaar bijna, dat is iets heel recents, blijkt dat dat waarschijnlijk een misvatting is. Natuurlijk was toen, ik meen dat het in 1953 was, het ontsluiten van de structuur van DNA en van de mijlpalen in de scheikunde en in de biologie. Maar sinds die tijd zijn we ons op dat DNA een beetje dood gaan staren. Voorpagina's, als deze of gene koekenbakker weer een genoom publiceerde om te zeggen en dat zijn nu dit zijn stukjes, de bouwstenen van de mens. En we zullen aanstonds zien dat zo'n genoom, zeg maar publiceren, in feite kletsboek is in die zin dat het genoom van een levensvorm helemaal niet in die scherp gedefinieerde zin bestaat.

fragment 2 Evenals mensen in de antropologie en in de paleontologie zich hebben blindgestaard op de herseninhoud van de apen die ze aan het opgraven waren in Afrika omdat wij zo trots zijn op die snot tussen onze oren, op soortgelijke manier hebben wij ons doodgestaard op dat DNA. Het blijkt vandaag de dag dat DNA weliswaar een buitensporig belangrijke rol speelt in de vorm van een bibliotheek van gegevens, dat wisten we natuurlijk ook allemaal wel, maar dat we de bibliothecaresses over het hoofd gezien hebben. Als u hier in dit gebouw naar die prachtige bibliotheek gaat, misschien komt u daar wel eens en zo niet, dan moet u dat zeker nog een keer doen, dan lijkt het welhaast alsof dat gigantische volume aan boeken en geleerdheid en zo, dat dat het nu is. Maar zo'n bibliotheek zou zonder een bekwame bibliothecaresse helemaal niets voorstellen. En die rol daarvan, van die persoon die weet waar het over gaat en die regelend optreedt, die rol wordt niet gespeeld door DNA, maar door RNA. En ribonucleïnezuur RNA, is als het ware aan een soort heropleving bezig waar blijkt dat de rol van dit molecuul veel belangrijker is dan we hebben gedacht. Waarom is dat van belang voor het onderwerp waar we het nu over hebben. het is van belang omdat RNA een enkele streng molecuul is, dat zult u allemaal nog uitgebreid te horen krijgen in deze collegereeks, dus een enkele streng molecuul en dat het spontaan kan vormen, onder omstandigheden die hoogst waarschijnlijk niet zeldzaam zijn in onze sterrenkundige context. Dus, DNA dat dat spontaan zou kunnen ontstaan als een dubbelstreng molecuul, dat is vrijwel uitgesloten. Maar RNA kun je met betrekkelijke eenvoudige opzet zoals bijvoorbeeld een veralgemening van het Miller Urey experiment gewoon in het

laboratorium maken.

Het blijkt dus achteraf beschouwd dat het RNA, wat een tijdje als een soort rare, snertige moleculletjes werd gezien, een veel belangrijker rol speelt, en speciaal, een veel belangrijkere regulerende, ordenende rol speelt dan wij tot dusverre misschien wel hadden gedacht. Er is een ommezwaai aan de gang, zeg maar, in dat gedeelte van de biochemie. Natuurlijk, u moet mij ten goede houden, het is mijn vak niet, ik ben theoretisch fysicus van oorsprong, dus ik bekijk ook alleen maar even de literatuur zoals die nu staat. Maar ik wou u dit even meegeven omdat u misschien nog uit uw vooropleiding of wat u in de krant leest, of in populaire boekjes, de verkeerde indruk zou kunnen hebben gekregen.

Een volgend thema waarvan ik heb gemerkt dat het een zeer veel grotere rol is gaan spelen in het denken over speciaal de evolutie van beginnend leven, zeg maar, en dat is anders een belangrijk gedeelte van de natuurwetten waar we het over gaan hebben, er zich mee bemoeien, is het verband tussen complexiteit, foutcorrectie en evolutie. We hadden het over replicatoren. Het is zoals gezegd niet buitensporig lastig om een scheikundige replicator te maken, zeker niet als het een eenvoudige replicator is. Het is zelfs niet buitensporig lastig om die replicator zich te laten aanpassen bij de buitenwereld. We zullen zien als we straks spreken over de wetten van de thermodynamica dat het aanpassen aan de buitenwereld is volstrekt normaal. Aanpassen aan de randvoorwaarden in abstracte zin, welke die dan ook mogen zijn, is strijk en zet, is volledig normaal, is volledig ingebouwd in de natuurwetten. Maar als een replicator groter wordt dan een bepaald minimum, en onze wiskundige collega's zijn erin geslaagd om dat ook kwantitatief te maken, dus niet in een wollige uitspraak, maar als een replicator groter wordt dan een bepaald bedrag dan kan die replicator alleen maar blijven bestaan als een gerepliceerde versie van wat eraan voorafging als er foutcorrectie optreedt. En dat is de volgende belangrijke stap. Die foutcorrectie behoeft natuurlijk toetsing. Er moet iemand zijn die dat biologische tentamen gaat zitten nakijken en afvinken wat kan blijven en wat wegmoet. En daar zijn twee dingen voor die in het verloop van de rest van deze collegereeks nog uitgebreid aan de orde zullen komen door mensen die daar veel meer competent in zijn dan ik. En dat is het tweestrengs gedrag van DNA en evolutie. En die evolutie is dus een foutcorrectie naar als het ware de buitenwereld en het tweestrengsgedrag van DNA is een foutcorrectie naar de binnenwereld. Je kunt alleen maar iets corrigeren als je een idee hebt van wat de bedoeling is geweest. Dat moet je ergens mee kunnen vergelijken en vandaar dus dat pas nadat het evoluerende leven een bepaalde complexiteit bereikt had nadat het een beginevolutie had gehad, werd het allengs noodzakelijk om een interne foutcorrectie uit te voeren. En vandaar dus dat die enkelstrengs RNA-moleculen die misschien tot die tijd, we weten dat natuurlijk niet nauwkeurig, en misschien tot die tijd wel een heel "vrolijk" leven geleid hebben, dat die behoefte hadden aan een naslagwerk waarin ze konden nakijken wat nu ook alweer precies de bedoeling was.

fragment 3 En dat naslagwerk is DNA, dat moet tweestrengs wezen omdat je dan dingen met elkaar kunt vergelijken. Dat vergelijken gebeurt dan dikwijls door referentie naar de buitenwereld en ik zal u laten zien dat die referentie naar de buitenwereld in de natuurwetten volstrekt normaal is. Ik zal u aantonen, over een paar minuten, waarom die referentie naar de buitenwereld bijvoorbeeld in de klassieke mechanica, daar komen we dat tegen in de vorm van zogenaamde begin- en randvoorwaarden, waarom die absoluut essentieel zijn en dan onlosmakelijk onderdeel zijn van de wetten in kwestie. Dus dat contact met die buitenwereld is helemaal niet zo mysterieus en er met de haren bijgesleept, zoals u misschien zou denken. Een en ander betekent, als we dit allemaal samenvatten, dat er toch wel een behoorlijke verschuiving is opgetreden sinds de tijd van Darwin. We zijn allemaal gewend aan survival of the fittest en dat soort kretologie meer, maar dat blijkt eigenlijk helemaal niet houdbaar te zijn. Sterker nog, wij zijn als mens, als individuele persoon met een soort zelfbewustzijn geneigd om leven als iets persoonlijks te zien. Ik leef, zegt u, hoor je wel eens. dat is een volstreekte onzinuitspraak. Ik heb u al verteld aan het begin van mijn verhaal dat er over weinig zoveel onzin is verteld als over juist het leven. En zelfs de uitspraak ‘ik leef’ blijkt volgens de modernste inzichten onzin te zijn. U leeft helemaal niet. Wat eet u dan? Nou, dat komt ergens anders vandaan. Wat u uitscheidt, om het zomaar eens even duidelijk te maken, heeft ook referenties naar de buitenwereld, want als er geen bacteriën waren om uw rotzooi op te ruimen dan zou u op een gegeven ogenblik op een gigantische berg van uw eigen afval zitten. En dan mompelt mompelt Leven is, voor zover we dat kunnen overzien, een eigenschap niet van een individu, maar van een systeem.

Hoe groot dat systeem moet zijn, wordt dan meteen een hele belangrijke vraag. Mijn persoonlijke opvatting is dat dat systeem zo groot moet zijn als het heelal zelf en dat is een van de redenen dat dat wij ook de sterrenkunde en de natuurkunde in ons verhaal absoluut en onontbeerlijk nodig hebben. U leeft niet als individu, u bent een onderdeel van een levend systeem, een onderdeel van een biologische soort, een onderdeel van een algemenere soort, een DNA-gebaseerde vorm van leven, wat zo'n beetje geldt voor alle leven op aarde. Maar ook dat is weer een onderdeel van een groter systeem. Hoe erg dat is, hoe ver dat gaat, dat verbonden zijn, zeg maar, wordt op treurige wijze duidelijk als je mensen vraagt en dat is de laatste weken helaas weer nogal in het nieuws, als je mensen gaat vragen over ruimtevaart. ‘O ja, nee, wij zijn bestemd om naar de sterren te gaan’. Oh ja? En dat zeg ik: een mens heeft in de ruimte niets te zoeken. ‘Jajaja, maar dat is heel verkeerd, want als Columbus zo gedacht zou hebben, dan...’

U bent zozeer verbonden met deze planeet dat waar u ook bent, ook al bent u ergens op het midden van de Atlantische Oceaan, u zit daar in zo'n klein bootje te dobberen en u bent Columbus, ook al zit u met de pinguïns op de Zuidpool, dan bent u toch met zeer veel meer dingen van uw leefomgeving verbonden dan iemand die ergens tussen de sterren zweeft. Zelfs de zwaartekracht is in u ingebouwd. En

dat weten we want die arme sukkels die daar in dat stompzinnige ruimtestation zitten, en die hun botten ontkalken. Hoe komt dat? Omdat ze het gewicht van hun bovenlijf niet op hun achterwerk voelen drukken; of, zoals François Villon schreef, *saura mon col que mon cul poise*. U zit met alles, met miljoenen onzichtbare draden vast aan uw leefomgeving. En dus niet alleen de leefomgeving van dat DNA, dat speelt een veel minder belangrijke rol dan wij met onze egocentrische instelling misschien zouden hebben gedacht, maar met alles om u heen, met de natuurkundige eigenschappen van onze Aarde en met de natuurwetten die daarvoor gelden.

Dit gezegd zijnde. We kunnen proberen om wat we zien en dat is dus een van de doelstellingen van dit college, we kunnen proberen wat we om ons heen zien, zodanig terug te brengen tot algemeenheden, dat ze misschien wel gelden buiten onze aarde. Ik heb nu net zitten te beweren dat: u leeft niet, maar ‘het’ leeft wel. Er is dus een systeem waar u onderdeel van uitmaakt en dat systeem kun je levend noemen, maar de vraag is hoe ver strekt zich dat uit? Wel, we weten zeker dat het zich over de hele Aarde uitstrekt, er is geen steriel plekje op de hele aardbol te vinden, zelfs in de kokende fonteinen van Yellowstone Park enzo, daar zitten nog allerlei interessante bacteriën enzo, die het bij 90 graden Celsius enorm amusant vinden om te leven.

fragment 4 Maar hoever zich dat buiten die Aarde uitstrekt, dat weten we niet. We kunnen proberen daarachter te komen, als intellectuele exercitie om het zaakje een beetje groter te maken en het een beetje bij mekaar te halen door te kijken naar wat nu de echte onlosmakelijke basis is waar dat alles zich op afspeelt. De rest van het verhaal krijgt u, zoals ik al zei, door veel competentere mensen dan ik in de loop van deze collegereeks verder geëxpliceerd, dus daar zal ik op dit moment verder niets over zeggen.

Wat ik wel wil zeggen, is dat wij, een van de algemeenheden die we zouden kunnen poneren over leven als systeem, leven als een systeem op deze specifieke planeet, dat wij een middenpositie innemen. En daarmee bedoel ik het volgende: als we eens gaan kijken wat wij weten over de structuur van de natuur op kleinere schaal - dan ga ik eventjes een beetje dimmen hier, dan kunt u er ook wat van zien, zoiets, okay. Ahem, dan kijken we in eerste instantie naar de kleinste schalen die er zijn. De microstructuur van de materie. Het is nog niet zo lang geleden dat we die microstructuur op het spoor gekomen zijn. We zullen daar voorbeelden van zien. Voor zover onze natuurkunde op dit moment reikt, weten wij dat op de kleinste schaal van lengte en op de grootste schaal van deeltjesmassa, ons heelal gebouwd is uit quarks. Die deeltjes. die quarks, die bundelen samen ten gevolge van een wisselwerking die de kleurwisselwerking wordt genoemd. Die kleurwisselwerking, die naam, dat is op zichzelf niet zo interessant, die is gekozen naar analogie van de rood-groen-blauw signalen die gezamenlijk zo’n computerbeeld opbouwen. Er zijn namelijk drie soorten kracht als het ware, een lading, die hier een rol spelen.

Bijvoorbeeld een elektrische lading, er is maar een soort elektrische lading, analoog van die elektrische lading is de kleurlading en daarvan zijn er drie verschillende soorten. Op soortgelijke manier zoals een atoom door electromagnetische wisselwerkingen bij elkaar wordt gehouden, daar spreken we zo wel over, worden de deeltjes, de zogenaamde barionen, bij elkaar gehouden door de kleurwisselwerking. Ik zeg er voor de volledigheid bij, voor zover wij op dit moment weten, maar er is gezegd er is al zoveel onzin verteld, misschien weten we dat wel niet goed. Voor zover wij dat nu weten speelt de natuurkunde op deze schaal van verfijning, op de schaal van quarks en barionen, geen rol in het ontstaan en in de evolutie van leven. Behalve dan dat ervoor gezorgd wordt dat de deeltjes er überhaupt zijn. Maar de specifieke eigenschappen van de deeltjes die komen hier niet zo duidelijk aan de orde. Van de soorten quarks die er zijn, kun je verschillende combinaties maken en de enige stabiele combinatie die bekend is, is het proton, de kern van het waterstofatoom. Er is een soortgelijke combinatie, een neutron, die samengebonden met een proton een stabiel deeltje kan zijn, maar het neutron vervalt als je het aan zijn lot overlaat na ongeveer een vervaltijd van duizend seconden en het is dus niet echt een stabiel deeltje. Gezamenlijk kunnen neutronen en protonen weg degelijk aan elkaar klitten en vormen een atoomkern en die atoomkern kan zoals gezegd een enkelvoudig proton, de kern van het waterstofatoom, het kan een neutron zijn, de kern van het deuteriumatoom, de zware waterstof, enzovoorts. Behalve die quarks en de daaruit gebouwde barionen, protonen, neutronen en wat dies meer zij en de daaruit samenklittende atoomkernen, is er nog een type deeltje dat een rol speelt in de microstructuur van de materie. En dat is het electron. Het blijkt namelijk, dat een proton heeft een positieve elektrische lading en zo'n atoomkern heeft dus ook een positieve elektrische lading. die kan worden geneutraliseerd door invangen van een aantal electronen, die die twee precies compenseren. Overigens, diegenen onder u die belangstelling hebben voor de natuurkunde die hieronder ligt: het is volstrekt niet triviaal dat de lading van het proton exact wordt gecompenseerd door de lading van het electron. Immers, het electron is geen quark. Hoe zou dit electron weten dat het precies de juiste lading moet hebben om die twee tot dekking te brengen. Dat is op dit moment in de natuurkunde een onopgeloste kwestie.

Maar goed, electronen en atoomkernen vormen samen atomen, we zullen er in de loop van het verhaal van vandaag een aantal de revue zien passeren, die atomen kunnen samenklonteren in moleculen en nu beginnen we een beetje te komen in de richting van wat wij op aardse schaal groot zouden kunnen noemen.

fragment 5 Ik heb hier een stukje van een celkern in deling en u ziet hier die blauwe dingetjes hier, dat zijn de chromosomen van zo'n cel die aan het delen is, en nu hebben we het dus echt over moleculen die bestaan uit vele honderdduizenden tot miljoenen, soms miljarden atomen. En dan beginnen we over groot te spreken. Die biomoleculen, die parkestreren de bouw van organismen. En nu begint het een beetje herkenbaar te worden. U zou zeggen, nou ja, dit is maar een blobje,

dit is c (?) elegans, dat is een soort wurm, een heel klein wormpje, dat onder de rottende bladertjes leeft enzo, maar toch, als ik u een foto van uzelf zou laten zien toen u ongeveer een kwartier oud was, dan zou het hier sprekend op lijken. Gaan we naar nog grotere zaken kijken, dan gaan plotseling hele andere dingen een rol spelen, onder andere de zelfgravitatie. En we hebben tot dusverre eigenlijk alleen gesproken over microstructuur van de materie. We hebben dat microgebied allang verlaten en zijn naar het macrogebied aan het kijken. Als wij dingen te groot maken dan zorgt hun eigen gravitatie ervoor dat ze afplatten, sterker nog, onder sommige omstandigheden als je dingen echt heel groot maakt, zo groot als onze zon bijvoorbeeld, dan is de eigen gravitatie zo belangrijk dat die, dat lichaam, niet eens zomaar een bolletje is, een kale bol zoals onder aarde, maar dat het lichaam ook een zeer hoge temperatuur heeft. Tezamen met een zeer hoge druk in het centrum en licht gaat uitstralen en dat hebt u allemaal van collega Frank Israel al gehoord en nu zijn we dus reeds lang in het allergrootste gebied wat er op dit moment is. Aan deze kant, de kant van de structuur van het heelal als geheel, hebben we misschien ook wel te maken met een microstructuur, zoals aan het begin van het verhaal, maar dat is dan de microstructuur van tijd en ruimte zelf. En evenals voor het verhaal van deze collegereeks de eigenschappen in detail van quarks niet zozeer een hoofdrol spelen, zo is het ook dat die microstructuur van tijd en ruimte die waarschijnlijk bestaat maar die wij nog niet hebben ontdekt, en voor het leven geen belangrijke rol speelt.

Samenvattend: aan de ene kant van de schaal atomen die eenvoudig zijn dankzij hun natuurkundige gedrag en welke natuurwet dat is, daar zullen we in dit college over komen te spreken. Aan de andere kant van de schaal dingen die eenvoudig zijn omdat daar de zwaartekracht domineert en alle andere wisselwerkingen gewoon volledig platslaat. Scheikunde heeft in de vorming van een sterrenstelsel zoals bijvoorbeeld hier de Andromedanevel of onze eigen Melkweg, heeft scheikunde totaal geen invloed. En het is alleen in die tussenzone, het rijk van het midden, dat middengebied zeg maar, waar de zaal ingewikkeld is. Ingewikkeld omdat enerzijds je geen aanspraak kunt maken op de vereenvoudigingen van dat quantumgedrag waar we over komen te praten en anderzijds ook geen vereenvoudiging door de overweldigende kracht van de zwaarte die een rol gaat spelen als dingen echt heel groot worden. En daar heeft college Israel u al uitgebreid over bericht. Het zal dus om die tussenzone gaan. Dat wil dus ook zeggen dat die tussenzone niet alle natuurkunde in zich heeft die we kennen. En ik zal u vandaag eens een selectie geven van wat wij weten over de natuurwetten en alleen voor zover die selectie van belang is voor het onderwerp van vandaag.

Nu we even stilstaan voor ik het aardige filmpje van c. elegans laat zien, even een opmerking over de inhoud van dit college zelf. Ik heb, omdat ik op sabbatical ben, ik ben dus alleen maar tijdelijk voor een paar dagen hier voor dit college, niet de gelegenheid gehad voor ik wegging om een bijgewerkte versie van mijn aantekening

ningen aan u ter beschikking te stellen. Dat komt eraan. Er staat een betere versie inmiddels op mijn webstek. U krijgt een uitgewerkte versie van dit college, tegen de tijd dat ik weer thuis ben en een beetje achter mijn computertje heb kunnen zitten. U krijgt een uitgewerkte versie daarvan ook op mijn webstek te zien. Dus maakt u zich daarover geen zorgen.

Als u wilt zien wat er gebeurt op dat snijvlak van groot en klein, dan is het heel aardig om eens naar de ontwikkeling van dit soort objectjes te kijken. Dit is het embryo van *C. elegans*, een worm die in volwassen vorm uit 922 cellen bestaat en we kennen van elk van die cellen de wordingsgeschiedenis. Onze beroemde Nederlandse collega Ronald Plasterk is een van de mensen geweest die aan de ontrafeling daarvan heeft bijgedragen. Dit is een ander filmpje van iets soortgelijks en hier hebben we dus een organisme waar we niet alleen de DNA-volgorde van kennen en een aantal andere samenstellende dingen, die RNA-kwestie is nog wat heel anders, maar die laat ik nog even terzijde, maar waarvan we ook precies weten wat de embryologie is, de hele wordingsgeschiedenis hier is bekend van al deze dingen, die zijn zodanig uitgespit dat men precies heeft kunnen volgen wat er met die verschillende celkernen gebeurt.

fragment 6 U zag net die gekleurde cirkeltjes, die geven als het ware aan wat de zonen en de dochters zijn van bepaalde van die cellen. En u ziet hier die deling en de celwanden enzo, die ziet u hier prachtig ontstaan. Goed, dus dit gebied van het midden wordt beheerst door een selectie van de natuurwetten. En over die selectie wil ik vandaag met u spreken. Ik ga dat op twee manieren doen. Ik ga in eerste instantie voor de pauze, dus vanaf nu zeg maar, met u praten over de klassieke mechanica. Dat is mechanica waarvan iedereen denkt dat-ie het begrijpt, totdat hij een keertje een tol of zo ziet en dan staan ze met een gezicht vol vullingen. Veel subtieler dan je over het algemeen zou denken en u hebt daar zeker op het VWO helemaal niet de juiste dingen over gehoord. Dus niet alleen over het leven waar gigantisch veel onzin over verteld wordt. Maar goed, dat gaan we even proberen recht te zetten. Het tweede gedeelte gaat over iets wat een beetje exotischer is. Het tweede gedeelte bestaat uit twee stukken, dat komt dus na de pauze. Een stukje over de statistische fysica, de statistische mechanica, dat is gewoon hetzelfde als klassieke mechanica maar dan van talloze deeltjes, van buitengewoon veel deeltjes, want zoals gezegd we bevinden ons op een tussenzone waarbij we er wel rekening mee moeten houden dat levende objecten, levende systemen, zou ik eigenlijk moeten zeggen, bestaan uit deeltjes, maar waarbij we de eigenschappen van die individuele deeltjes niet zo geweldig nauwkeurig onder ogen hoeven te zien. En dan het laatste gedeelte: dat bestaat uit een stuk natuurkunde dat nog weer verder van uw dagelijkse ervaringen vandaan lijkt te zijn en dat is de quantummechanica. En ik zal u proberen te laten zien hoe de regels daarvan dramatische invloed hebben op de manier waarop in ieder geval primitief leven ontstaat, de beperkende voorwaarden die daarvoor zijn. Het belangrijkste wat we moeten onthouden als we spreken over die natuurregels

is, dat het heelal gebouwd is uit deeltjes, ruimte en tijd. En gebouwd zijn moet u heel letterlijk zien. deeltjes, ruimte en tijd zijn bouwmaterialen, zoals baksteen en cement. Voor deeltjes zou u dat misschien voor kennisgeving aangenomen hebben, want u hebt allemaal scheikunde gehad, u hebt allemaal op het VWO wel eens wat gehoord over quarks en electronen en dergelijke, maar dat is helemaal niet triviaal. Als u uw eigen heelal zou bouwen, zou u misschien niet op het idee komen om het uit deeltjes te laten bestaan. Sterker nog, het heeft verschrikkelijk lang geduurd voor de mensheid, gedwongen door de scheikunde, gedwongen door de meetgegevens, tot de conclusie kwam, ja, we bestaan inderdaad uit deeltjes. Dat je ruimte en tijd als bouwmaterialen kunt zien, is ook iets wat niet algemeen bekend is. We zullen daar in dit college nauwelijks iets over zeggen, wat erover te zeggen geweest is, is door collega Israel al aan de orde gebracht. Het idee dat je een natuur zou bouwen uit een beperkt aantal stenen die op een bepaalde schaal beginnen is helemaal niet dwingend. Als wij natuur zouden hebben die bij een voortgaande vergroting steeds nieuwe substructuren zou te zien geven, zouden we daar de bijbehorende wiskunde best bij hebben. Dit is een voorbeeld daarvan, een zogenaamde fractale structuur. Ik pluk hier een stukje uit, een stukje daar, en ik ga dat eens even bekijken en dan blijkt dat dat hetzelfde is in bepaalde vergroting als het ding was ik al had. Ik ga hier, u ziet deze structuur hier, ik ga nu dit kleine stukje hier eruit plukken en hier neerzetten. Nou, u ziet bijna niet dat er iets verandert. En nu zou ik natuurlijk dit stukje hier eruit kunnen plukken en dat weer met een factor tien kunnen vergroten. En dan zou u een beeld krijgen wat niet noemenswaard verschilt van het beeld wat u nu op het scherm hebt. Maar goed, ik heb maar een beperkte tijd in het college en ik weet van tevoren al van de wiskunde dat dit oneindig lang doorgaat. Dus, als u duizend maal tien maal vergroten zou willen, dus tien tot de duizendste maal groter, dan zou u nog een beeld krijgen wat er op deze manier uitziet. Dus, de wiskunde voor het beschrijven van een oneindig doorgaande structuur hebben wij wel onder de knie. dat is helemaal geen probleem. Maar de natuur schrijft ons voor dat dat niet zo is. Wij hebben een basis, wij hebben gewoon die deeltjes van een bepaalde familiesoort zoals die quarks waar wij uit zijn gebouwd. Het gedrag van die deeltjes in ruimte en tijd moeten we nu in ogenschouw gaan nemen. We gaan dus de natuurkunde in stukken knippen, het bestaan van die deeltjes en hun eigenschappen nemen we voor kennisgeving aan. Daar is een hele hoop interessants over te zeggen, maar in de context van dit college is dat niet zo belangrijk.

fragment 7 En we nemen ruimte en tijd niet als bouw materiaal, maar als een soort theater. Op dezelfde manier als de vloer van een theaterruimte of het zaagsel in de piste van een circus wel tastbaar materiaal is, maar voor de voorstelling als zodanig niet echt van belang. We knippen er een tussenstukje uit, dus opnieuw het rijk van het midden, niet alleen het midden van grootte en tijd waar we het over gehad hebben voor levende systemen, maar ook het middengedeelte zal ik maar zeggen van de natuurkunde halen we eruit. En dit gaat allemaal om drie hoofdza-

ken die allemaal rijmen op het woord mechanica. De klassieke mechanica, enkele deeltjes die bewegen in ruimte en tijd, de statistische mechanica, dat is hetzelfde maar dan van gigantisch veel deeltjes gezamenlijk, waarbij je een gemiddelde neemt over de deeltjes en ten slotte de quantummechanica. En dan natuurlijk de astronomische context. Ik zal u aanstonds laten zien dat de begin- en randvoorwaarden van systemen van deeltjes in ruimte en tijd een heel belangrijke rol spelen. En dat betekent natuurlijk dat die randvoorwaarden zich koppelen aan de sterrenkundige context, de totale hoeveelheid tijd in ons heelal. Ons heelal is niet, zoals sommige boeken beweren, 6nulnulnul jaar oud, zoals al gezegd, er is gigantisch veel onzin over verteld en dit is één stuk onzin. Ons heelal is 13,7 miljard jaar oud. En dat is vergeleken bij de karakteristieke schaal van dat midden waar wij als levend systeem ons in bevinden, een gigantische plons tijd. waarbij het heel erg moeilijk is om je een werkelijke intuïtieve voorstelling van te maken. Niet alleen hebben we een gigantische hoeveelheid tijd, we hebben ook gigantische hoeveelheden ruimte, want de zichtbare afstand in ons heelal is omdat het heelal 13,7 miljard jaar oud is, dus 13,7 miljard lichtjaar, en dat is echt heel veel, in aanmerking genomen dat de afstand van hier tot de maan 1,1 seconde is en de afstand van hier tot de zon 8,3 minuten. Dus 13,7 miljard jaar is echt wel wat. En dan ten slotte, al die ruimte en tijd gevuld met die deeltjes, die, en dat is natuurlijk interessant als we spreken over algemeenheden, die deeltjes die voor zover wij als sterrenkundigen hebben kunnen waarnemen, overal in het heelal exact dezelfde eigenschappen hebben. Als u één waterstofatoom hier in uw laboratorium hebt gezien, dan hebt u ze overal gezien, daar hoeft u echt niet voor naar Sirius. Het zou best anders hebben kunnen zijn. Als je leest wat men in de oertijd van de natuurkunde als wetenschapper schreef over de samenstelling van het heelal, dan ging dat voornamelijk over ja, een beetje houtje-touwtje vragen, van 'zijn de sterren nu gemaakt van hetzelfde materiaal als waar de Aarde van gebouwd is'. En daar is ontzettend veel over afgevochten. Maar dat blijkt dus inderdaad wel het geval te zijn. Dit zijn de hoofdzaken, He, dus die drie verschillende vormen van mechanica en hun randvoorwaarden, de gigantische hoeveelheden materie, ruimte en tijd.

En laten we nu eerst eens kijken naar de klassieke mechanica. Dat gaan we doen voordat we pauzeren, dan kan wel even in tien minuten. Je krijgt, en nogmaals, dit is een college wat gaat over het thema onzin en geen onzin, je krijgt over klassieke mechanica ook gigantisch veel bagger op je bord. Zeker op baggerinstituten zoals VWO's. Je krijgt eigenlijk nooit te horen waarom wij, natuurkundigen, natuurkunde hebben gebouwd zoals die is. Er wordt gezegd van 'de natuurwetten' en dan, natuurwetten worden dan gezien, stompzinnig genoeg, als iets wat onveranderlijk is, wat gewoon voor het hele heelal geldt, terwijl een natuurwet in wezen niet anders is dan de interpretatie die ons apenbrein geeft aan datgene wat de natuur ons oplegt. En als je nou even je verstand had gebruikt, dan had je beseft dat het woord wetten daar eigenlijk heel goed mee overeenkomt. Want wetten zijn

gemaakte dingen, ze zijn niet overal het zelfde, wetten hebben wij bedacht omdat die onder bepaalde omstandigheden goed bleken te werken. Natuurlijk is een sociale wet iets heel anders dan een natuurwet, want voor een sociale kwestie moet je bij elkaar te rade gaan en voor een natuurwet ga je te rade bij de natuur. Maar goed, wat wij hebben aan wetten, ik gebruik zelf ook nooit het woord wet, ik spreek over regels in het algemeen, een verzameling regels, die hebben wij gebouwd om een bepaalde reden. En het gaat mij er in dit college vooral om, om u te laten zien wat de achterliggende grap is. Waarom de klassieke mechanica gebouwd is op de manier zoals wij hem hebben geconstrueerd. Ja, niet ik, ik ben daar te stom voor. Maar mensen zoals Huygens, echt slimme mensen. En ik zal u proberen te laten zien welke waarnemingen dwingend leiden tot de regel, de bewegingsregel die wij gebruiken om bepaalde dingen in de natuur te beschrijven.

fragment 8 en 9 (springt direct over op 9) Laten we eens dicht bij huis beginnen. Wie woont er hier in een huis zonder huisnummer? U, ah! Kunt u uw huis daarom minder goed terugvinden dan iemand die wel een huisnummer heeft? “Alleen als ik dronken ben...” Dan hebt u wel vrienden of vriendinnen die zo vriendelijk zijn om te denken van ah, ze heeft wel eens vaker een glaasje op, joh we nemen d'r gewoon mee naar huis en dat vinden ze je de volgende ochtend op je stoep en dan denk je 'oh wat een brakke dag'. He, nee. Natuurlijk kunt u uw huis wel terugvinden, maar dat doet u niet met uw huisnummer maar met behulp van de huisnummers daarnaast. Het is eigenlijk als je er goed over nadenkt, helemaal niet zo vanzelfsprekend dat er een nummer op een huis staat. Waarom hebben we huisnummers nodig? *Omdat de positie van iets in de ruimte nergens aan is af te lezen.* Je moet het erop schrijven, je moet het erbij zetten. Pak een object, het kan me niet schelen wat het is en kijk eens of daar een getal op staat, of daar een tellertje in zit, waarop staat 'dit deeltje is op deze plek'. Dat staat er niet. Ja, daar lacht u nu om. Maar het zou gekund hebben van wel. Tussen mijn oren zit voldoende snot om me te realiseren dat ik best een natuurkunde zou kunnen bouwen waarbij op ieder deeltje te allen tijde is af te lezen waar het is. Daar is niks moeilijks aan. Zo'n natuurkunde heb ik tussen de soep en de aardappels voor je gebakken. En dan ga ik 'm vergelijken met wat de natuur doet en dan blijkt-ie fout te zijn. In onze natuur zit het zo in elkaar dat de positie van een deeltje geen meetbare grootte is. Wat u wel kunt meten, ook als u een beetje in delorum thuiskomt, is het verschil tussen waar u bent en waar u zou willen wezen. En speciaal als je een glaasje teveel op hebt, is dat héél belangrijk. Dus, het gaat niet om de grootte van iets maar het gaat over het verschil in twee punten. Verschil tussen punt a en b, dat kunnen wij meten. Hoe je dat meet is een natuurkundekwestie, gaan we ons verder niet mee inlaten.

Ah, nu: u bent naar het college gekomen, we gaan straks een kopje koffie halen, het is een bepaalde tijd. Hoe weet ik dat? Doordat ik op mijn horloge kijk of doordat ik op mijn computer kijk of doordat u op uw horloge kijkt. Waar is dat voor nodig? Wat is dat nou voor 'n onzin? Is ergens aan af te lezen wat de tijd is?

Nee. Tijd is geen absoluut meetbare grootheid. Diegenen onder u die de oerserie van Isaac Asimovs boeken over robots hebben gelezen, die kennen dat verhaal. Hoe weet ik of u een robot bent? Ik vraag hoe laat het is en dan zeg je ‘oh, het is tien voor half zeven’. Zonder op je horloge te kijken. Ja, dan ben je een robot, want je hebt een klokke in je kop. Dus, ahem. Ha ha, gefopt! nee, dat is echt hoor, ik vond het geniaal van de Asimov, dat is zo leuk bedacht. Enfin, zonder noemenswaard een horloge te constateren, maar daar zit dan een chip, op dezelfde manier als in uw gsm-metje een chip zit die laat zien hoe laat het is. Maar, als je een batterijtje verwisselt, dan verlies je twee minuten. Tijd is helemaal niet absoluut. Tijd is ook relatief. Op dezelfde manier zoals ruimte relatief is, is tijd relatief. Alleen verschillen in tijd en verschillen in plaats zijn waarneembaar. Welnu, in een zekere hoeveelheid tijd kan dus een object een zekere afstand afleggen. En ik kan die afstand in tijd en die afstand in ruimte kan ik kleiner maken en op die manier krijg ik een getal wat de afgelegde afstand per tijdseenheid voorstelt. En dat ding heeft een naam, dat noemen we een snelheid. Dus: hoe bouwen we dat in de natuurkunde? Ik constateer dat er op een deeltje niet is af te lezen waar het is en hoe laat het is. Ik moet dus, gedwongen door de waarnemingen, een natuurkunde bouwen waarin alleen de verandering van de afstand per verandering van de tijdseenheid een rol in speelt. Dus een algebraïsch voorschrift van de baan van een deeltje, een natuurkunde gebaseerd op gewone algebra die parabolen tekent, cirkels en dat soort dingen meer, pffft, kunnen we in de prullenbak gooien. En dit is een nieuw inzicht. Er wordt wel eens gedacht dat bijvoorbeeld Galilei hier hele verstandige dingen over heeft gezegd. Nou. ik woon op dit moment in Italië, en ik lees Galilei op dit moment in het origineel en Galilei zegt niets van dien aard. Galilei spreekt over deeltjes als hebbende een *suo luogo*, dat staat echt zo in Galilei’s boeken. Hun eigen plaats, en waarom is dat van belang, als je iets optilt dan zoekt het zijn eigen plaats op, kledder en dan valt het weer op de grond.

fragment 1nul Dat was dan het bewijs dat iets een eigen plaats heeft. Zeg maar, wat je dan met ballonnen en rook moet, dat is weer een andere kwestie, die hebben weer een andere eigen plaats. Flauwekul! Deeltjes hebben geen eigen plaats. Positie is niet af te lezen, eigen tijd ook niet. Nou zou je denken dat het mogelijk moet zijn om een natuurkunde te bouwen gebaseerd op het voorschrift van de snelheid. En iedereen die hier bij Rijkswaterstaat werkt, die denkt ook in die termen. Die zet er af en toe een bord neer met 5nul, met 1nulnul of 12nul enzo. En dan denken ze dat je op die manier de gang van zaken kunt reguleren. Komt een ander langs en ik ga zijn naam opschrijven want u moet hem onthouden. Onze beroemde landgenoot Huygens, ja ik schrijf hem met enige schroom op hoor, want Huygens heeft nooit een voet in een universiteit gezet, dat vond-ie niks. Maar ja goed, zijn vader was secretaris van Prins Maurits en die kon zich dus wel een privéleraar veroorloven, maar dat was allemaal voor onze tijd. Huygens realiseerde zich dat het evenmin mogelijk is om een natuurkunde te bouwen op snelheid als dat het mogelijk is een

natuurkunde te bouwen op plaats en tijd. In Huygens' geschriften staat met zoveel woorden, ja weliswaar in het Latijn, maar goed dat krijgt u niet meer op school, staat met zoveel woorden: iedere beweging is relatief. je kunt de absolute snelheid van iets niet waarnemen. En dat weet u want anders zou je nooit een krantje kunnen lezen in de trein, want dan ging u deze kant op en de krant ging de andere kant op en dan moet je nog maar zien dat je die letters voor gaas krijgt. Nee, die trein beweegt met een of andere constante snelheid, willen we althans hopen, en u kunt zonder referentie aan een ander punt niet weten wat uw snelheid is. En houdt u het in de gaten dat dit een meetgegeven is. Als u uw eigen natuurkunde zou bedenken voor uw eigen ontworpen heeal. Je programmeert een computerspelletje of zo, dan is het heel goed denkbaar om een natuur te maken waarbij de snelheid wel degelijk op een deeltje af te lezen is. En net zo min als je de positie in tijd op een deeltje kunt aflezen, kun je de snelheid op een deeltje aflezen. Dus u weet al wat ik ga vertellen. Het is de verandering van snelheid per tijdseenheid die wij de versnelling noemen, die een rol moet spelen bij de beschrijving van de klassieke mechanica, bij de beschrijving van de natuur. Ja, denk je dan, nou weet ik al wat er gaat volgen. Tuurlijk: die versnelling kan ik natuurlijk ook in de loop van de tijd laten veranderen, want waarom zou die versnelling altijd hetzelfde zijn?

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad \text{relatieve versnelling} \quad (1)$$

Maar, nu komt uw trein tot stilstand bij een station. En als die machinist dat niet netjes doet dan gaat u met uw krantje zo... kaboem. Hoe komt dat nou? Ja hoe het komt, die natuurkunde gaan we het niet over hebben. Maar het is wel meetbaar, dus dit hoeft niet. De versnelling in onze natuur is een waarneembare grootheid. Wij kunnen op een deeltje wel degelijk aflezen wat de versnelling is. Dat kunnen we als volgt doen: ik neem dit dingetje waarvan ik de versnelling wil weten, ik hol het uit, ik doe er een veertje met een balletje in. En kijk, als dat balletje dan zo doet, dan verandert de snelheid. En zo werken alle accellerometers en dat soort dingen meer. Dat kun je meten. met andere woorden: onze hele natuurkunde op dit niveau van de klassieke mechanica kunnen we in één regel opschrijven. versnelling = rettekettekete een of ander voorschrift voor die versnelling. En dat weten wij dankzij Huygens. Als je gaat kijken wat dit voor gevolgen heeft, dan is dat eigenlijk heel subtiel. We gaan even een stapje terug om te laten zien dat Galilei het echt bij het verkeerde eind had. Wat is de eenvoudigste natuurwet die ik hier in deze vorm kan opschrijven. Nou dat weet u wel. Zo: versnelling is nul, simpeler kan het niet. Er gebeurt helemaal niets met die snelheid. Aha denk ik, nou, dan weet ik het. Die versnelling is nul, he? Nou, fijn, dan is de verandering van de snelheid ook nul. Maar als de verandering van de snelheid ook nul is, dan is dit een constante. Ha! Dus als er niets gebeurt is de snelheid constant. Dat wil dus zeggen: de beweging van een deeltje als ik er niets mee doe, is een constante

snelheid. Ja, u weet natuurlijk, we zitten in een drieruimte, dus eigenlijk moet ik hier gewoon een pijltje boven schrijven, maar u wist dat natuurlijk allemaal al lang. De eenparig rechtlijnige beweging is *de* beweging van de natuur. En nou ga ik Galilei lezen, en Galilei schrijft dat de cirkelbeweging is de natuurlijke beweging in onze natuur. Kepler had al lang uitgevonden dat de planeten in ellipsbanen bewogen, maar Galilei was van mening dat Kepler zich vergist moest hebben. Echt, het staat er. Want de cirkelbeweging is de natuurlijke beweging.

fragment 11 Dat is trouwens niet zo stom als het lijkt, hoor. Ik bedoel, ik presenteer het nu een beetje op clowneske wijze, maar zo stom was het helemaal nog niet, want Galilei realiseerde zich en dat had hij trouwens van Aristoteles gebijetst, dat een cirkelbeweging een van de weinige soorten bewegingen is, waarbij niets verandert. Het is een symmetrieprincipe. Als ik iets in een cirkelbeweging laat bewegen, wordt dit stukje als het die kant opgaat, precies vervangen door dat stukje wat op exact die plaats terecht komt. Dus cirkelbeweging is helemaal niet zo stom, hoor, als je er een beetje over nadenkt. En Galilei was natuurlijk aanzienlijk slimmer dan ik, dus ik maak hier maar een beetje grappen over iemand z'n graf. Maar goed, waarom overigens, voor we pauzeren mag u er even vijf seconden over nadenken, waarom Galilei deze rechtlijnige beweging, die hij donders goed begreep, verwierp. Staat er met zoveel woorden in zijn geschriften. Als van iets de snelheid niet verandert, dan moet het dus op een rechte lijn bewegen. Nou, dat wist-ie. Maar hij wist ook, want hij had natuurlijk alle boeken van Euclides uit zijn hoofd geleerd, hij wist ook dat een rechte lijn oneindig ver in die richting doorgaat en oneindig ver in die richting doorgaat. Maar, zegt Galilei, het heelal is niet oneindig, want ik zie daar al die sterren, daar houdt het ergens op. Dus een rechtlijnige beweging kan niet bestaan in ons heelal, zegt-ie met deze woorden. Jammer, maar helaas. Maar goed, Huygens was gelukkig degene die zo slim was om dat wel te doen. Wat is de eerstvolgende versie van een natuurwet, dat is dat dit moet een of andere extern gegeven versnelling zijn. Nou daar komen dingen in zoals bijvoorbeeld de wisselwerking tussen die deeltjes waar ik het eerder over had, die zijn een voorschrift voor het externe deel van deze vergelijking. Wisselwerking van de zwaartekracht, waar Frank Israel het over heeft gehad, een voorschrift voor het rechterdeel van deze vergelijking. Geeft u mij dat externe voorschrift, dan kan ik dat hierin invullen en dan kan ik proberen deze vergelijking op te lossen. Ik vraag mij af, welke is de snelheid die zodanig verandert met de tijd dat hij precies deze versnellingen oplevert. nou dan moet ik dus een stapje teruggaan, dat is in plaats van dat je differentieert moet je integreren en dat doen we dus niet om u te jennen, maar dat doen we omdat de natuur ons dat heeft afgedwongen. Ik zou ook veel liever met algebra werken, want dat kan ik op m'n slofjes. Integratie is een beetje lastiger. Twee dingen. In de eerste plaats, het is technisch ingewikkeld, in de tweede plaats, als je alleen maar verandering kunt uitrekenen, moet je datgene wat het in het begin is geweest erbij geven. Dat is voor ons van belang. Want ik

heb u verteld dat referentie aan de buitenwereld, aan rand- en beginvoorwaarden in ons onderwerp een heel belangrijke rol speelt. Dus het idee dat je als onderdeel van een systeem leeft, dat je dus niet zomaar een los DNA-molecuul hebt, maar dat dat op allerlei ingewikkelde manieren vastzit aan rand- en beginvoorwaarden, dat zit op dit niveau al ingebakken in je natuurwetten. Nou, u begrijpt natuurlijk wat ik ga zeggen. Je hebt deze beginsnelheid uitgerekend, die ga ik dan hierin invullen en nog een keer een integratiestap doen om uit te vinden wat de positie is in de loop van de tijd. Maar u weet natuurlijk ook dat ik daar de beginvoorwaarden bij moet geven op dezelfde (er wordt kennelijk wat op het bord geschreven) manier als ik beginsnelheid geef. En daarmee ligt alles vast. Heb je de beginsnelheid, heb je de beginpositie, en heb je gegeven wat de uitwendige invloeden zijn, dan zijn we klaar. Nou dat is alles wat er van de klassieke mechanica in feite valt te vertellen. De rest is gewoon een kwestie van dit oplossen. Dat is technisch verdraaid lastig en dat gaan we hier ook niet doen. Dat staat in alle boekjes. Het gaat er in dit geval mij om om u te laten zien wat de witz is. Wat het onderliggende is. Zou het u dus geloven om aan die klassieke mechanica te gaan dokteren en als je natuurkundige bent dan moet je dat willen, zo van ja, dan zal er wel wat meer zijn dan dit. Dan moet je kijken naar die relativiteitsprincipes die eronder zitten en dat is natuurlijk ook het geval en daar wil ik mee besluiten voordat we een kopje thee gaan halen. U vraagt zich natuurlijk af, waarom dit, he? Ik hoop tenminste dat u zich dat afvraagt. Waarom die versnelling wel absoluut waarneembaar is. Dat komt doordat onze natuur nog weer pienterder in elkaar zit dan Huygens had gedacht. (Fluisterend) Er is namelijk, dames en heren, wel een absolute snelheid. Die staat nergens op maar die geldt voor iedereen. Dat is de snelheid van het licht. De snelheid van het licht is voor iedereen, strijk en zet, toujours, onder alle omstandigheden dezelfde. En je kunt daaruit bewijzen, dat zal ik niet doen, dat heeft onze brave landgenoot Lorentz gedaan, die bijna zo slim was als Huygens, die heeft laten zien dat je daardoor ook een maximum snelheid hebt. Dus dat is het bestaan van een absolute snelheid. Dat zorgt ervoor dat er ook een maximum snelheid is. Als er een maximum snelheid is, dan betekent dat het volgende. Als ik de snelheid ergens van ga veranderen, dan moet het nieuws dat hier de snelheid anders is geworden dan daar, moet zich voortplanten door het object heen, hoe klein het ook is.

fragment 12 En dat doet er dus even over. Die zogenaamde retardatie die volgt uit het bestaan van een invariante snelheid zorgt ervoor dat je een versnelling kunt waarnemen. En zo subtiel zit onze natuur in elkaar. Daar hebben we het nu in dit geval niet over, want het heeft met de rest van het verhaal niks te maken. Ik wou zeggen, we gaan het middenstuk eruit snijden. We moeten nog twee dingen doen: kijken naar wat er gebeurt als we die klassieke mechanica nemen voor zeer veel deeltjes, dus die statistische mechanica en we moeten gaan kijken naar wat er gebeurt als we het echt op deeltjesniveau bekijken.

fragment 13 Laten we weer beginnen. We hebben nog ongeveer de helft van

onze natuurkunde te doen, dus ik stel voor dat we daar een begin mee maken. De basis van het geheel hebt u allemaal al gezien en dat is namelijk dat we te maken hebben met die mechanica. We gaan nu eigenlijk maar een wijziging toepassen en dat is we gaan er gewoon heel veel deeltjes van maken en dat kan ik betrekkelijk snel behandelen, want dat is dermate intuïtief, dat we daar niet al teveel tijd aan hoeven te besteden. We hebben al gezien dat je vanwege die klassieke relativiteitsregels: de relativiteit van tijd, de relativiteit van ruimte en de relativiteit van de snelheid, te maken hebt met positie en tijd van deeltjes

$$\vec{x} = (x, y, z) \quad \text{relatieve positie(0.2)}$$

$$t \quad \text{relatieve tijd(0.3)}$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{x}}{dt} \quad \text{relatieve snelheid(0.4)}$$

en de snelheid en dan hebben we het eigenlijk gehad. Dus als je op een bepaalde tijd wilt weten hoe iets eruit ziet, heb je maar zes grootheden nodig, dat zijn de positie en de snelheid en dan ben je er. Meer hoeft niet, meer kan ook niet binnen die regels van die klassieke mechanica. Als je nu te maken hebt met een systeem dat bestaat uit buitengewoon veel deeltjes dan is het niet alleen onmogelijk, maar zelf onwenselijk, onnodig en onwenselijk, om allemaal te gaan uitrekenen wat die individuele deeltjes doen. Je kunt een mechanica maken van het gemiddelde. En we gaan eens kijken door gewoon even te schetsen, wat daar zo'n beetje de eigenschappen zouden kunnen zijn. Als je spreekt over gemiddelden, dan zit daarin meteen al ingebouwd het idee van een waarschijnlijkheid. Een kansverdeling. Ik ga dus vanaf nu niet spreken over de individuele banen van deeltjes in ruimte en in tijd, u hebt al gezien dat je die zo kan uitrekenen, maar we gaan kijken naar de gemiddelden daarvan en die gemiddelden zijn dus een kansverdeling. Ik spreek over wat is de waarschijnlijkheid dat een bepaald deeltje op een bepaalde plaats wordt aangetroffen met een bepaalde snelheid. Die waarschijnlijkheid heeft een naam. We noemen dat de verdelingsfunctie, distribution function, en met behulp daarvan kunnen we de eigenschappen van zeer grote hoeveelheden deeltjes laten zien. Een van de directe manieren waarop dat gebeurt is als je gaat kijken naar wat er gebeurt als je een systeem bestaand uit zeer veel deeltjes aan verandering onderwerpt. We kunnen daarbij bijvoorbeeld denken aan het fameuze voorbeeld van een feestballon, ik heb hier een of andere ballon (er wordt op het bord geschreven), en die ga ik proberen op te blazen. Dat doe ik door hier een kracht op dat spul uit te oefenen, een bepaalde druk. En we weten dat de druk die ik hier uitoefen, die is gelijk aan de totale kracht die op dit oppervlak staat, gedeeld door de grootte van het oppervlak zelf. Dus die druk is gelijk aan een kracht gedeeld door een oppervlak. Dat is niets anders dan dit gedeelte hier uit de mechanica gelicht, nou ja, middels die

kracht natuurlijk, en die kracht uitgerekend per oppervlakte-eenheid. Dit bewijst natuurlijk ook weer ogenblikkelijk dat het in het begin moeilijker is om een ballon op te blazen dan aan het eind, want immers als de ballon klein is, is dit oppervlak klein, is dit quotient dus groot voor een bepaalde hoeveelheid weerstand die dat rubber van die ballon biedt, en dat betekent dus dat ik een grote druk moet uitoefenen om dat ding een beetje op te blazen. En naarmate die ballon groter wordt, wordt dat makkelijker. En dat kent u allemaal. Ik heb gezegd, er is een zekere hoeveelheid moeite voor nodig om dat op te blazen, nou, ook op diezelfde manier hier kunnen we uitrekenen hoe dat gaat (bord), gewoon door te zeggen: we hebben een kracht en als die kracht over een bepaalde afstand werkzaam is, dan kunnen we zeggen dat we een bepaalde hoeveelheid arbeid hebben verricht. Ik pak dit vast en ik sleep het een beetje en het produkt van die twee, die kracht en die afstand, dat is een arbeid. Dat wil dus zeggen: de hoeveelheid arbeid die ik verricht, die is gelijk aan een kracht maal de afstand en dat is een kwestie van definitie. Dat is dus helemaal geen natuurkunde in feite, dat spreken we gewoon even zo af. En u ziet natuurlijk meteen nu al dat dit gelijk moet zijn aan het produkt van de druk in die ballon maal het volume daarvan. Immers, dat volume is gelijk aan het oppervlak maal de verandering van die afstand hier, dus die arbeid die ik ergens voor nodig heb om een bepaalde druk ergens in aan te brengen, is het produkt van de druk en het volume. We zullen het hebben over de veranderingen daarvan. Dat wil dus ook zeggen dat als we gaan spreken overrrr de verandering van de toestand van zoiets dat je gaat spreken over kleine wijzigingen daarvan. Dus je kunt bijvoorbeeld zeggen dat DW , verandering van die arbeid, die is dan gewoon DPV , dus PDV plus VDP .

fragment 14 De verandering van het volume en de verandering van de druk, je vermenigvuldigt die dingen met elkaar en je krijgt de verandering van de totale hoeveelheid per arbeid. En dus ook de verandering van de totale hoeveelheid energie die ergens in zit. Dit zal dan evenredig zijn met de verandering van de totale hoeveelheid energie. Energie komt er automatisch in. Ik had u al laten zien dat die in feite genoeg zijn. Je kunt bewijzen uit het feit dat je die differentiaalvergelijkingen hebt, dat bij ieder van die symmetrieën, in variantie, dus de relativiteit van tijd, ruimte en snelheid, dat bij ieder van die relativiteitsregels behoort ook een behoudswet. Dat gaat nu een beetje te ver om u dat in detail te tonen en in dit geval is het behoud wat ik gebruik het behoud van de totale energie hierin.

Het zou makkelijk zijn om onze natuurkunde hier gewoon op te baseren. Gewoon de totale hoeveelheid energie die in een systeem zit. En dat is nou juist verschrikkelijk lastig. Want, die energie die we hier hebben die kan uit twee delen bestaan. De totale energie is weliswaar behouden, maar ik kan die opsplitsen in twee gedeelten. Ik kan de energie nemen die een systeem als geheel neemt, de energie van het gemiddelde. Dus ik neem bijvoorbeeld dit krijtje en geef het een optater, dan heeft het een bepaalde snelheid, het heeft een bepaalde massa en ik kan dus de energie daarvan uitrekenen. En dat is makkelijk genoeg, dat is iets dat is

grootschalig. (bord) Maar, er is meer dan dat, want ik had het gemiddelde genomen over een zeer groot aantal deeltjes. Dat is de sport op dit moment. Statistische mechanica, gemiddelden over gigantische hoeveelheden deeltjes. En die doen onderling ook wat. Nou, zou je zeggen, maar gemiddeld doen ze niks, want ik zie ze nergens heengaan hoor, ze zitten allemaal op dezelfde plek naast mij/erbij (?) en ze gaan niet bewegen. Ja, ze bewegen wel, maar ze bewegen om een bepaald gemiddelde heen. Dat wil zeggen dat hun gemiddelde snelheid is nul. Maar dat wil niet zeggen dat hun kwadratisch gemiddelde snelheid nul is. Want het kwadraat is positief definitief/definieerbaar (?). En omdat een energie kwadratisch is in de snelheid, wil het dus zeggen dat ik niet alleen een bijdrage heb van het grote gemiddelde, maar dat ik daarbij ook nog het gemiddelde over de kleine bewegingen moet nemen. En die tweedeling tussen de hoeveelheid energie die je in het groot kunt meten en wat daar in het gemiddelde van die deeltjes is opgesloten, die tweedeling zorgt voor een buitengewoon grote hoeveelheid last. En ik zal proberen u een beetje duidelijk te maken waar dat toe aanleiding geeft. Maar laten we eerst even teruggaan naar dit verhaal hier. We hebben: dat het produkt van de druk en het volume gelijk is aan energie en daar zou ik het bij kunnen laten. Maar door een historisch toeval wordt dit niet zo genoemd als we spreken over de interne gedragingen van de deeltjes. We noemen dat anders. Dit wordt niet waargenomen, we noemen dat de temperatuur. Dat's in feite helemaal niets verschillends, is gewoon de interne energie. Maar: omdat de natuurkunde nu eenmaal een historische weg heeft gevolgd, noemen we dat de temperatuur. Sterker nog, er is een tweede historisch toeval, een tweede historische ongelukkigheid, die temperatuur wordt niet in dezelfde eenheden gemeten als die energie. Als u, enigszins herstellende van een kater, zal ik nu maar naar aanleiding van de vorige discussie zeggen, uw temperatuur wilt weten, dan meet u die niet in Joules of daaromtrent, maar daar staan Celcius-streepjes op. En die zijn weer afgeleid van een hele andere temperatuurschaal. En er moet dus een evenredigheidsconstante tussen die twee zijn, niet omdat dat natuurkundig van belang is, maar door een samenloop van historische omstandigheden. En die evenredigheidsconstante is de constante van Holzman en die wordt over het algemeen met de kleine k aangegeven. Omdat je hier gebruik maakt van het totale aantal deeltjes, komt daar dan nog die totale hoeveelheid deeltjes voor en dit is dan de regel die je hebt als je een gemiddelde maakt over en een buitensporig groot aantal deeltjes van een bepaalde temperatuur en die in verband brengt met de druk die zij uitoefenen in een bepaalde volume. Even tussendoor: want we gaan het later, deskundiger mensen dan ik zullen het later hebben over scheikunde. Het opmerkelijke hierbij is dat we dus nu hebben bewezen dat een zeker volume aan gas met een bepaalde temperatuur en druk altijd dezelfde hoeveelheid deeltjes bevat.

fragment 15 Dus ik geef u een liter waterstof van zoveel Kelvin hier op deze toonbank en ik geef u een liter zuurstof, onder dezelfde omstandigheden, dan zitten daar precies evenveel deeltjes in. En dat is niet triviaal. Dat is iets wat je niet zo

zelf misschien zou hebben bedacht. Maar onze natuur zit op die manier in elkaar. Je kunt, als je dat wilt, maar dat gaat te ver voor de doeleinden van dit college, ook nog uitrekenen wat de waarschijnlijkheidsdeling is die hieraan ten grondslag ligt. Maar dat zullen we niet gebruiken. Laten we nu eens kijken naar wat we kunnen zeggen over dat linkergedeelte. Dus ik ga hier eventjes dit (bord) opschrijven. De toestandsvergelijking van een systeem van deeltjes, en laten we nu eens kijken wat we kunnen zeggen over die verdeling van groot en klein hier. Ze hebben ook, historisch gezien, verschillende namen gekregen. Op de manier zoals ik het hier heb opgeschreven ziet u natuurlijk wel dat het gewoon varianten zijn van dezelfde natuurkundige grootheid, namelijk van de energie. Dit wordt, en daarom staat er ook W voor work, ook arbeid genoemd, en dit warmte. Maar het is in feite precies hetzelfde. Er is natuurlijk een hele goede reden om die twee te scheiden en dat komt omdat wij een gemiddelde aan het nemen zijn over buitensporig veel deeltjes. Dit blijft dus over op grote schaal en dit is iets op kleine schaal. De scherpstijvers onder u, en ik hoop dat er heel veel van zijn, zullen natuurlijk nu zeggen van ho ho ho ho ho, waar staat dat plusteken? Wat bedoel ik precies met groot en wat bedoel ik precies met klein? Waar zet ik die scheidlijn nou. Nou, dat is een hele goede vraag. Dat is iets wat je wel kunt oplossen, deze vraag, als je gaat kijken naar de echte waarschijnlijkheidstheorie die hier onder ligt, maar die ik niet zo eentwee-drie kan oplossen op het niveau waarop ik het hier heb weergegeven. Dus de vraag is correct, van waar leg je die scheidlijn. Je kunt hem ook oplossen, dat heeft Holzman gedaan, maar dat gaan we hier in dit college niet doen, want dat zou te ver voeren. hebben we ook niet nodig. Dat deze scheiding mogelijk is, dat weet u inmiddels. Ik had immers al gezegd dat als ik een snelheid kan schrijven als een gemiddelde plus een afwijking daarvan en ik richt het zodanig in dat ik weet dat het gemiddelde van die afwijking gelijk is aan nul, zo heb ik dat immers gedefinieerd, dan weet ik dat de gemiddelde snelheid van deze gelijk is aan dit gemiddelde, de windsnelheid, zal ik maar zeggen. Maar ik weet eveneens, als ik het gemiddelde van W -kwadraat ga nemen, dat ik dan de som van een gemiddelde V -kwadraat plus gemiddelde U -kwadraat krijg. Tenzij er ingewikkelder correlaties zijn tussen die snelheden maar daar zie ik even vanaf. Dat wil dus zeggen dat deze tweedeling is in zekere zin natuurlijk in een systeem waarbij je een gemiddelde bepaalt over grote aantallen deeltjes. Op zichzelf zou dat niet zo'n probleem zijn, want ik had al gezien, dat was voorafgaande hieraan, dat die totale energie in verband gebracht kan worden met de temperatuur. Maar dat is niet wat we in de praktijk doen. In de praktijk zien we dat grote gebeuren als een zekere hoeveelheid arbeid, een schop die ik ergens tegen moet geven, een sleur die ik ergens aan moet geven, en die warmte brengen we in verband met die temperatuur. En u ziet nu natuurlijk ogenblikkelijk, hoop ik, in waar 'm hier de schoen wringt. Want, dames en heren, wij hebben een behoudswet voor de totale hoeveelheid energie. En die gaf uiteindelijk aanleiding tot deze uitspraak. Maar wij hebben geen behoudswet voor de hoeveelheid arbeid, die

kan ik namelijk erin en eruit halen door een zekere hoeveelheid arbeid eruit te halen, door een fietspomp in elkaar te drukken van buitenaf en ander spierballenwerk, daar is geen behoudswet voor. En voor de inwendige vrijheidsgraden van die deeltjes staat evenmin een behoudswet. Het enige wat ik weet is dat ze gezamenlijk behouden moeten zijn. Het is heel erg lang gedacht in de geschiedenis van de natuurkunde dat de hoeveelheid warmte behouden zou zijn. Er is wel gedacht over warmte als een soort onzichtbare vloeistof, dat heette flogiston, waarbij je die warmte van het ene vat in het andere kunt schenken, op dezelfde manier waarop je dat met water, of, in uw geval, bier kunt doen. Ja, ik blijf u plagen, natuurlijk.

fragment 16 Maar dat is niet zo. Alleen de som hiervan is behouden. En dat wil dus zeggen: wij kunnen natuurlijk wel gewoon IJzeren Heinig ditzelfde voorschrift geven voor die warmte. Ik kan gerust zeggen dat de totale hoeveelheid warmte is een of ander veelvoud van de temperatuur. En dit veelvoud dat kan ik zelfs een naam en een symbool geven. Maar het is geen behouden grootheid meer. En merk nu het verschil op met wat we hier hadden gezegd. we hadden hier U is KT en dan kon dus DU de verandering van energie met DT in verbinding brengen. Maar als ik nu DQ ga opschrijven, de verandering van de totale hoeveelheid warmte in een systeem, dan kan ik dat alleen maar schrijven als een produkt van die verandering. Die S hoeft geen constante te zijn. Sterker nog dat is over het algemeen helemaal niet zo. Die evenredigheid hier gaat een eigen rol spelen met zijn eigen thermodynamische grootheid, een eigen grootheid die de inwendige toestand beschrijft. En daar wil ik in feite mee besluiten, laten zien wat voor een speciale rol die speelt, want die zal de rest van dit college ook heel belangrijk blijken te zijn. Dit ding heeft een naam. Dat noemen we de entropie. En u ziet dat die entropie niet behouden is. Als DS gelijk is aan nul, dat kan wel, de zogenaamde isentrope veranderingen, veranderingen zonder verandering van de entropie, maar dat moet ik dat apart er even bijgeven. Dat kan ik niet zo maar weglaten, dat moet ik erbij specificeren. Over die entropie dus. Die gaat nu vanwege het feit dat die warmte, dat zien we uit onze behoudswetten hier, niet uitzonderlijk behouden is, maar in samenspraak met die arbeid een totale hoeveelheid behouden energie oplevert, die gaat een eigen rol spelen. En daar moeten we dus even naar kijken. Wat zou dat kunnen zijn? Op welke manier kunnen wij die entropie in verband brengen met de inwendige eigenschappen van onze verzameling van deeltjes. Want ik heb het er de hele tijd over gehad, het gaat om gigantische hoeveelheden deeltjes waar wij over middelen. Nou, bepaalde van die middelen hebt u gezien. De gemiddelde impuls is niet interessant, die hadden we eruit gegooit. De gemiddelde energie hebben we afgesplitst. Het arbeidsgedeelte, het grondstoffelijke grootschalige gedeelte en het microgedeelte hadden we van elkaar gescheiden door die kwadratische gemiddelden te nemen. En het zou dus zo moeten zijn dat wij die entropie op een of andere manier in verband brengen met een andere inwendige eigenschap van zo'n groot systeem van deeltjes. En welke zou dat kunnen zijn? Het is bewezen en het is de grote Ludwig Boltzman

die dat heeft gedaan, dat er wel degelijk zo'n verband bestaat, maar daarbij moet je ernaar gaan kijken op welke manier, welk aantal manieren een systeem van deeltjes zich zodanig aan u kan voordoen, dat het hetzelfde gemiddelde oplevert. Want kijk, bij het bepalen van deze gemiddelden, geef ik u alleen maar het eindresultaat. Die W of die Q. Maar of dit gemiddelde hier, van die willekeurige bewegingen van die deeltjes, of dat is samengesteld doordat sommige deeltjes een hele grote snelheid hadden en een heleboel andere een hele kleine, of dat er min of meer gelijkelijk op zijn Nederlands, het is allemaal dezelfde snelheid anders word je wegbelast, dat soort dingen, al die verschillende toestanden komen onder dezelfde noemer terecht en geven hetzelfde eindresultaat. En Botsman realiseerde zich dat er een gemiddelde eigenschap, een manier is, waarop je die gemiddelde eigenschappen van die deeltjes nog in rekening kunt brengen. En dat is deze. Het aantal manieren waarop een systeem gerangschikt kan worden, zodanig dat het toch hetzelfde gemiddelde oplevert. He, denkt u dan, het aantal manieren, dat ken ik ergens van. Als u zou willen bepalen wat die waarschijnlijkheidsverdeling is van die deeltjes, dan is de kans dat ik een deeltje heb met zoveel snelheid naar het noordwesten en zoveel snelheid naar het zuidoosten, enz. enz. Die kansverdeling geeft mij aan wat het totaal aantal manieren is dat een systeem kan worden gerangschikt. Dus die entropie die moet iets te maken hebben met die kansverdeling. En de vraag is welke. Daarbij realiseren we ons twee dingen. Als we gaan kijken naar die gemiddelden, dan zien we dat die gemiddelde energieën gewoon optellen.

fragment 17 Gewoon plus, twee Joule plus drie Joule is vijf Joule. Punt uit, en niet vijf komma nogwat, of vier komma iets minder. Nee, de energieën hier zijn additief. Gewoon, lineair additief. Maar kansen, dames en heren, zijn niet lineair additief. Kansen zijn een produktkwesitie. Als ik wil weten wat de kans is dat mij iets overkomt en ook nog iets anders, dan moet ik die twee kansen met elkaar vermenigvuldigen. Wat is de kans dat er een bom in een vliegtuig zit? Nou, dat kun je langzamerhand uitrekenen, het is vaak genoeg gebeurd. Wat is de kans dat ik in een vliegtuig zit. Nou, dat kan ik u ook zo voorrekenen. En dan kan ik dus uitrekenen wat de kans is dat er een bom zit in mijn vliegtuig, door die twee kansen met elkaar te vermenigvuldigen. Zo werkt dat nou een keer. Nou, gelukkig is dat getal klein, dus ik kan straks weer lekker terug naar Florence. Maar goed. Dit getal hier staat op voet van gelijkheid met die energie en moet dus additief zijn. Die kansen zijn op produktniveau. Kansverdeling, voorwaardelijke kansen gaan op produktief. Hoe kan ik die op dezelfde manier met elkaar in verbinding brengen. Nou, dat is verschrikkelijk simpel, een wiskundige staat hier voor niets, daar is een speciale functie voor verzonnen en dat is de logaritme. De logaritme van het totaal aantal manieren waarop ik een systeem kan rangschikken zodat ik hetzelfde eindresultaat krijg. En u weet, dit is gewoon een functie, dit is een getal, gewoon een wiskundig getal, een op zoveel, zeg maar, gewoon een normaal getal. Logaritme kan ik daarvan dus nemen, is ook een normaal getal. Dit is geen normaal getal, want

u ziet het heeft hier deze dimensie van S maal T. Maar we hadden afgesproken dat die energie geschreven zou worden als K maal T. Dus om de zaak in eenheden okay te krijgen moet ik diezelfde constante er voorzetten. Gewoon een historisch toeval. Als ze voor die tijd zo pienter waren geweest om alles te meten, niet in termen van een of andere stompzinige thermometer, maar gewoon in Joules, dan had het allemaal niet gehoeven. En dit is dan de volgende regel die geldt. Het staat gebeiteld op het graf van Ludwig Boltzmann en volkomen terecht, want het is een volstrekt briljant inzicht. Sluitsteen hiervan, maar dat zal in de volgende colleges wel verder worden uitgebreid, dat, omdat die waarschijnlijkheid van een systeem aan bepaalde wiskundige regels voldoet, specifiek dat het waarschijnlijker is dat iets wanordelijk is dan dat iets ordelijk is, gaat de verandering van die entropie altijd in een bepaalde richting, namelijk die kan alleen maar toenemen. Als je een gemiddelde neemt over een zeer groot systeem, dan kan in bepaalde onderdelen van dat systeem de orde toenemen, in andere onderdelen van het systeem de orde afnemen en gezamenlijk zorgt het er voor dat deze grootheid alleen maar kan toenemen. En dat zal in de loop van de rest van het verhaal een buitengewoon belangrijke rol spelen. En hieruit halen we dus het

=====

Dit is voor de discussie eigenlijk van relatief weinig belang, het is alleen zo dat wij een temperatuur uitzoeken, zodanig dat de energieschaal, het gaat nu weer om de energie, dat die energieschaal ten naaste bij overeenkomt met iets wat normaal is. Dus een paar electron per volt per deeltje of daaromtrent. Dit zal voor het verloop van de rest van het verhaal een veel belangrijker rol spelen, maar daar gaan anderen u over doorzagen.

Tot besluit. In eerste instantie, dat wil ik u even laten zien, dat deze regel hier, dat het over de logaritme van de waarschijnlijkheid heeft in grote systemen die wij kennen zoals de biologische systemen waar het onder andere over zal gaan, een bijzonder belangrijke rol speelt. Ik wil u een kwantitatief voorbeeld geven. We gaan een dier bouwen dat uit twee verschillende deeltjes bestaat. En ik ga u even een specifiek voorschrift voor het berekenen van deze kans geven. Dat komt allemaal ook op mijn webstek te staan, dus doet u geen moeite om het op te schrijven. Als ik een deeltje heb dan kan ik dat op een manier rangschikken. Doe ik er een tweede bij dan kan het links staan van het vorige deeltje en rechts. Dus ik heb twee mogelijkheden. Doe ik er een derde bij dan kan het op drie verschillende plaatsen staan, enz. dus de basisformule voor het berekenen van de waarschijnlijkheid van rangschikking. En ik heb het hier alleen over een eendimensionale rangschikking, maar ook overige dimensies zijn niet zo moeilijk als je dit een keer hebt gezien. Is gewoon maal een, maal twee, maal drie, maal vier, maal puntje puntje puntje N, maal en het totale aantal deeltjes waar het over gaat en met een buitengewoon grote snelheid neemt dat getal toe. Natuurlijk, we weten, biologisch gezien, dat

we uit verschillende deeltjes bestaan en de vraag is dus hoe kan ik uitrekenen wat deze waarschijnlijkheid is. Als ik eens ga kijken naar wat meer verschillende soorten deeltjes.

fragment 18 En om u een smaak te geven van de manier waarop dat gaat, gaan we naar twee deeltjes kijken. Dat wil dus zeggen, ik mag ze onderling met elkaar verwisselen, en ik kan het geheel uitrekenen. Dat wil dus zeggen, ik kan dus een maal, twee maal, drie maal N , dat kan ik in beide gevallen doen en ik krijg dus een basisformule die er zo uitziet: een maal, twee maal, enz. maal twee N , gedeeld door het aantal verwisselingen van de ene soort en gedeeld door het aantal verwisselingen van de andere soort. En dat geeft deze uiteindelijke regel. En ik heb dat even voor u uitgerekend hoe dat in getallen zit. Voor een dier wat uit negen maal twee verschillende deeltjes bestaat heb ik al ongeveer 5nul.nulnulnul verschillende arrangementen. Een echt dier, dus een cavia of een eekhoorn of zo, ik heb het even uitgerekend, bestaat ongeveer uit zoveel deeltjes, ik weet niet eens hoe je dat uitspreekt, en dat zijn verschillende soorten atomen ook nog eens een keer, een stuk of dertig, en de vraag is dus hoe komen we die op de juiste plaats in plaats van dat we hier dit gemiddelde krijgen. En daar zal een belangrijk deel van de rest van het verhaal van de andere docenten over gaan om u te laten zien op welke manier dat gebeurt. Waarbij uiteindelijk, en dat zei ik aan het begin van mijn verhaal al, iets anders ook een rol speelt, namelijk het heelal bevat een buitensporig grote hoeveelheid ruimte, buitensporig oud, vergeleken bij de karakteristieke afmetingen van de organismen en de samenstellende organismen zoals bijvoorbeeld de planeet waar het hier over gaat.

Tot besluit. Het zou makkelijk genoeg zijn om het hier bij te laten. Maar ik denk dat u zich nu een beetje onaangenaam gaat voelen, want ik heb net laten zien dat zelfs een bijzonder eenvoudig organisme zoals daar zijn de cavia, de eekhoorn en de mens één zijn uit een bijzonder grote hoeveelheid alternatieven. En waarom nou juist zo weinig alternatieven. Waarom is het zo dat van alle mogelijkheden die de deeltjes ons laten, er maar zo weinig gerealiseerd zijn. Daarom kom ik op het sluitstuk van mijn verhaal en dat is de quantummechanica. Het blijkt en dat is nogmaals iets wat wij niet hebben verzonnen, maar iets wat de natuur voor ons heeft bekokstoofd, het blijkt dat deeltjes in onze natuur een lengte met zich meedragen. Een bepaalde, intrinsieke maatstaf. Een eigen lengteschaal. Daarbij moet u niet denken aan de afmeting van het deeltje zelf, maar een abstract iets met de dimensie van een natuurkundige lengte. Het is die lengte die blijkt aanleiding te geven tot het feit dat rangschikkingen van deeltjes maar op heel weinig manieren kunnen voorkomen. Bijvoorbeeld, waterkristallen, die kunnen maar op een beperkt aantal zestellige symmetrievormen, kunnen die voorkomen. Als je gaat kijken naar de deeltjes zelf, dan hebben we hier bijvoorbeeld het bewijs dat ook op kleine schaal het heelal uit deeltjes bestaat. Er zijn maar erg weinig configuraties die mogelijk zijn. Dit zijn bijvoorbeeld twee kernen van lood die tegen elkaar aan knallen in een

versneller, dus het is duidelijk dat de boel uit deeltjes bestaat. De eerste aanwijzing die er was dat er maar heel erg weinig configuraties mogelijk zijn in de natuur, komt uit de scheikunde. De scheikunde, een veel miskend onderwerp, heeft eigenlijk aan de basis gestaan van ons begrip van de deeltjesstructuur van het heelal. Als je stofjes gaat uiteenplukken in hun samenstellende onderdelen, dan blijkt dat je altijd te maken krijgt met heeltallige verhoudingen. H_2O en niet $1,8 O$, wat ook heel goed zou hebben gekund. Die gehele getallen zie je overal in scheikundige formules: C_{60} , H_2SO_4 , Fe_2O_3 . Sterker nog, als wij een stofje vinden dat 1.8 delen waterstof bevat voor elk deel zuurstof, dus $H_{1,8}O$, dan zouden we dat schrijven als $H_{18}O_{10}$. Zo goed weten wij dat et hier om gehele getallen gaat. Een deeltje is iets met een lengteschaal. Hoe kan dat aanleiding geven tot zo bijzonder weinig configuraties? Ik zal in uw dictaat schrijven wat de bijbehorende bewegingsvergelijkingen zijn: de vergelijkingen van Schrödinger, maar die hebben we op dit moment niet nodig. Ik wil u alleen maar laten zien hoe het bestaan van die lengteschaal aanleiding kan geven tot het beperken van het totaal aantal configuraties die je kunt hebben. Wij merken die lengteschaal in het geval van licht bijvoorbeeld aan het bestaan van kleuren. Rood licht heeft een lange lengteschaal, blauw en violet licht hebben een korte lengteschaal. Die lengteschaal is in verband gebracht met natuurkundige eigenschappen door De Broglie en door Planck en dat zeg ik hier eventjes voor het historisch belang, ik sla het nu even over anders is de tijd te kort. U krijgt het in uw aantekeningen wel te zien. Nou, dit kunnen we even overslaan. De manier waarop die lengteschaal een beweging kan beïnvloeden is deze. Ik vraag mij af wat is de bewegingsregel voor een deeltje met een ingebouwde lengte.

fragment 19 Die bewegingsregel is deze. Deeltjes moeten in de pas aankomen en dan heb ik de juiste baan gevonden. Dus een deeltje kan willekeurig welke baan volgen van hier naar daar en van daar naar daar en het kan allemaal niet schelen welke baan, maar het is de kortste weg die de weg is die we in de natuur vinden en die kortste weg die wordt bepaald door wat er in de pas aankomt. Bijvoorbeeld, kijken we naar deze baan en vergelijken we dat met die baan dan zien we dat er een verschillend aantal stappen is. Dus mensen die dit pad nemen met een gegeven staplengte, komen uit de pas aan, vergeleken met die. Wie vertrekken er in de pas? Iedereen, per definitie. Wie komen er in de pas aan? Nou, alleen diegenen die de kortste weg volgen. Alles wat wegen volgt van dergelijke soort, die komen ten naaste bij in de pas aan bij het eindpunt. En het is deze baan die uiteindelijk door de natuur wordt gerealiseerd met de grootste waarschijnlijkheid. Wat betekent dat in de praktijk? Dat betekent, dat bijvoorbeeld als ik die lengteschaal van een deeltje af ga passen, dat die lengteschaal bepaalt wat er kan en wat er niet kan. Kijken we bijvoorbeeld naar een stuk glas met een wigvorm, en daar laat ik licht doorheenvallen, ik vermeldde u al dat rood licht heeft een lange lengteschaal en blauw licht heeft een korte lengteschaal, er wordt wel gezegd golflengte maar dat is natuurkundig volstrekt fout, licht is helemaal geen golf, licht is een deeltje met een

lengteschaal. Als die lengte geheel past op de doorsnede krijg je weerkaatsing en als het niet geheel past krijg je doorlating en dat wil dus zeggen dat je een alternering krijgt van doorlaten stop doorlaten stop doorlaten stop. Dat herkennen we door bijvoorbeeld te laten zien als je dat met rood licht doet krijg je dit, met blauw licht dat en met groen licht dat. Volg ik die samen dan krijg je dit. Of beter gezegd: als ik met het sinusachtige gedrag ervan rekening hou, dit. Dus het bestaan van kleuren van een zeepbel bijvoorbeeld, u herkent dat allemaal, dat komt door de lengteschaal van die deeltjes van het licht die zich doen gelden. Dat geldt ook als ik de lengteschaal van het electron in een atoom ga afpassen. Dat kan ik bijvoorbeeld op deze manier doen. Dit zijn een soort patronen die je krijgt, ik zal eens eventjes kijken of ik wat kan doen, in bijvoorbeeld in dit geval het waterstofatoom door de lengteschaal van een electron af te passen in de ruimte. Ik heb het net bij het nemen van die stapjes gedaan langs een lijn, eendimensionaal, maar als je dat driedimensionaal gaat doen, dan krijg je deze configuraties. En alleen maar deze. En dat is de belangrijkste mededeling hier, dat tussengelegen configuraties zijn niet mogelijk. Die bestaan niet. Dus het bestaan van die lengteschaal dwingt af het bestaan van maar een eindig aantal configuraties. En dat is de basis van de scheikunde en het is natuurlijk ook de basis van die biomoleculen waar we het later over zullen hebben. Ik heb hier drie verschillende configuraties van zo'n waterstofatoom over elkaar heen geprojecteerd, rood, groen en blauw, in dit geval en gezamenlijk geven die die symmetrische bolvorm, die eindtoestand, dus deze en die. Goed, die lengteschaal komt overeen met een bepaalde kleur en die zou je dus kunnen vergelijken met een golf zoals dat wel gedaan is in het geval van trilling. Maar er trilt helemaal niks in zo'n deeltje, het is gewoon een deeltje met een bepaalde lengteschaal. Als we bijvoorbeeld gaan kijken naar de mogelijke lengteschalen in een atoom, dan krijgen we die spectraalreeksen, en die zien er ook helemaal niet uit als een keurig nette harmonische reeks. Dat is iets wat veel ingewikkelder in elkaar zit.

Tot besluit. Het bestaan van die lengteschaal dwingt af het bestaan van heel weinig configuraties. Maar er is nog iets anders. En dat is dat deeltjes uit twee verschillende soorten bestaan. Eentje waarbij die lengteschalen zoveel mogelijk over elkaar heen proberen te vallen, dat zijn de zogenaamde bosonen en eentje waarbij die lengteschalen op afstand blijven van elkaar en dat zijn de fermionen. Deze soorten deeltjes zijn dus heel moeilijk tot een klein volume samen te persen, want die deeltjes proberen een bepaalde afstand tot elkaar te houden omdat anders de lengteschaal niet past. Bij deze deeltjes is dat net andersom, die zijn gezellig, die zitten het liefst zo dicht mogelijk op mekaar, en op grote schaal noemen wij dus dit materie en dat kracht. Maar dat zijn in feite gewoon verschillende namen voor hetzelfde ding. We hebben gezien dat wat we aan regels hebben op Aarde en klassieke mechanica, gemiddelde mechanica, dus statistische mechanica en quantummechanica aanleiding geven tot een bepaald aantal regels, waarvan we verwachten dat ze elders in het heelal ook gelden. de regels van de klassieke mechanica die de planeet-

banen beschrijven, de regels die beschrijven hoe sterren en planten zich gedragen, waar Israel het over heeft gehad.

fragment 20 De statistische mechanica die niet alleen het thermische gedrag voorschrijft maar ook de manier waarop dat met een waarschijnlijkheid samenhangt en dat wanorde waarschijnlijker is dan orde en dit dus in een bepaalde drijvende richting gaat. Dat is het tweede wat van belang is. Ten derde hebben we gezien dat de quantummechanica bepaalde klein aantal configuraties afdwingt, terwijl we hadden verwacht op klassieke gronden dat er oneindig veel configuraties van deeltjes mogelijk zijn en die kleine aantallen die spelen niet alleen in de scheikunde een rol van gewone moleculen zoals H₂O enzo, maar ook in de scheikunde van ingewikkelder moleculen zoals RNA en DNA. Deze dingen, dames en heren, weten wij absoluut zeker. Wij weten ook absoluut zeker dat ze de grondslag vormen voor het samenstel van deeltjes die wij zijn met onze omgeving. Dat samenstel wat wij een levend systeem noemen. En waar wij wonen kunnen we dus afleiden dat deze regels overal zullen gelden. de vraag die we ons dan natuurlijk moeten stellen is waar al die andere zijn en daar heeft de sterrenkunde op dit moment nog geen antwoord op.