



Universiteit
Leiden
The Netherlands

De vorming van sterrenstelsels

Schaye, J.

Citation

Schaye, J. (2012). *De vorming van sterrenstelsels*. Leiden: Universiteit Leiden. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/19814>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/19814>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Prof.dr. J. Schaye

De vorming van sterrenstelsels.

De vorming van sterrenstelsels.

Oratie uitgesproken door

Prof.dr. J. Schaye

bij de aanvaarding van het ambt van op het gebied van

the Formation of Galaxies

op maandag 17 september 2012

Mijnheer de Rector Magnificus, hooggeachte collega's, beste vrienden en familie, lieve Mam, Szilvi, en Danny,

Het is een grote eer om u allen vandaag toe te mogen spreken.

Het geven van een oratie door een nieuwe hoogleraar in deze mooie, historische zaal is een traditie. Een van de mooie kanten aan tradities, is dat ze continuïteit bieden tussen het verleden en het heden. Het idee dat een plechtigheid al door vele illustere voorgangers is ondergaan, geeft de ceremonie extra gewichtigheid.

Traditie speelt in de wetenschap een belangrijke rol. Studenten worden, al of niet bewust, opgeleid te denken binnen een bepaald kader, soms ook wel paradigma genoemd.

Paradigma's zijn uiterst nuttig, aangezien ze sturend werken. Ze geven de tegendraadse types onder ons iets om onze pijlen op te richten. En ze geven de conformisten onder ons een concreet kader waarbinnen we berekeningen kunnen doen en waarbinnen we waarnemingen kunnen interpreteren. Dit leidt vaak tot nieuwe inzichten die zelfs nuttig blijven als het onderliggende paradigma verdwijnt.

Een bekend concreet voorbeeld van een paradigma uit de sterrenkunde is het idee dat de meeste massa in het heelal bestaat uit een koude, donkere materie. Hoewel we deze materie niet direct kunnen waarnemen, kunnen we haar bestaan indirect afleiden uit de waargenomen sterkte van de zwaartekracht.

Dit paradigma maakt het mogelijk de vorming van sterrenstelsels in een representatief stuk van het heelal te simuleren met behulp van computers. De meeste inzichten die we daarmee op hebben gedaan, zouden niet verdwijnen mocht blijken dat de algemene relativiteitstheorie niet correct is en dat de donkere materie niet bestaat. De reden is dat de nieuwe theorie een vergelijkbare verdeling van de materie zal moeten voorspellen, gezien het succes van het donkere materie paradigma.

Een concreet voorbeeld van een meer recenter, maar beperkter paradigma uit mijn eigen vakgebied, is het idee dat galactische winden die hun oorsprong hebben in de directe omgeving van zwarte gaten de maximale massa van sterrenstelsels bepalen. Het gebruik van dit idee geeft modellen te kans om waarnemingen van gas en sterren in groepen van sterrenstelsels beter te reproduceren. Ook hier zouden veel inzichten die uit deze modellen voort zijn gekomen niet ongeldig zijn mocht blijken dat een ander mechanisme verantwoordelijk is voor de rem op de groei van deze structuren.

Paradigma's komen vaak voort uit herhaald gebruik, d.w.z. het zijn een soort tradities. Sterk positief bewijs is niet noodzakelijk, maar gebruiksgemak is dat wel. Veel wetenschappers zijn zich daar onvoldoende van bewust. Vooral jonge mensen hebben de neiging aan te nemen dat wijd verbreide ideeën stevige grondvesten hebben. Ze gaan ervan uit dat gepubliceerde artikelen correct zijn, terwijl de meer ervaren onderzoekers weten dat eerder het tegenovergestelde het geval is.

Het aanleren van een actieve, kritische houding ten opzichte van bestaande kennis is een kerntaak van het academische onderwijs. Studenten moeten leren het lezen van artikelen en het luisteren naar voordrachten te zien als een speurtocht naar denkfouten, mogelijke verbeteringen, en nieuwe ideeën. Onderzoeksstudenten moeten proberen verbanden te leggen

met hun eigen werk. Ze moeten leren zichzelf tijdens het lezen vragen te stellen zoals: Begrijp ik hoe de methode werkt? Zou ik het na kunnen doen? Hoe kan ik dit gebruiken? Wat zijn de implicaties voor mijn eigen onderzoek?

Voor de kunst van het "wetenschappelijk lezen en luisteren" is helaas bijna geen aandacht in het huidige curriculum. In mijn eigen onderzoeksgroep gebruiken we een "journal club", waarin we wekelijks nieuwe artikelen bespreken, om de studenten deze vaardigheden bij te brengen. Naar mijn mening verdienen dit soort kleinschalige journal clubs een prominente plaats in het curriculum van de Master fase.

Hoewel tradities, waaronder paradigma's, nuttig zijn, kunnen ze de vooruitgang ook in de weg staan. De oratie is ook daar een voorbeeld van. Het is namelijk traditie om bij de oratie geen gebruik te maken van visuele hulpmiddelen en om een geschreven tekst voor te lezen.

Pedagogen zijn het er echter over eens, en u hebt waarschijnlijk ook zelf ervaren, dat het gemakkelijker is om informatie op te nemen als de spreker gebruik maakt van visuele hulpmiddelen. Het is ook bekend dat het moeilijker is om de aandacht te houden bij een spreker die voorleest dan bij een spreker die gewoon vertelt, zeker als het om nieuwe of complexe concepten gaat.

De universiteit Leiden probeert met recht de ontwikkelingen op onderwijstechnisch gebied te volgen. Als ik mijn colleges voor zou lezen en geen gebruik zou maken van een bord of beamer, dan zou me dat niet in dank worden afgenomen. Het siert de universiteit dan ook dat het mij niet verboden is om voor mijn oratie enigszins van de traditie af te wijken, wat ik dan ook af en toe zal doen.

In het huidige economisch klimaat wordt aan onderzoekers steeds vaker gevraagd hun bestaan te rechtvaardigen. Hoewel fundamenteel onderzoek zoals sterrenkunde zeker tot algemeen nuttige, technologische ontwikkelingen leidt, is de belangrijkste rechtvaardiging de menselijke nieuwsgierigheid. Astronomie is zo oud als de mensheid. Het ligt nu eenmaal in de aard van de mens om zich af te vragen wat er zich voorbij de horizon afspeelt.

Het is een van de taken, en voorrechten, van de astronoom, om net als de kunsten, mensen een ander perspectief te bieden op de wereld om hen heen. Verder is de sterrenkunde een effectieve manier om kinderen te inspireren de wetenschap in te gaan, iets wat de maatschappij indirect economisch voordeel oplevert.

Veel mensen worden geïnspireerd door de schoonheid van ons heelal en dit is dan ook een van de redenen waarom ik gebruik zal maken van visuele hulpmiddelen.

Maar om echt te kunnen inspireren, moeten de beelden ondersteund worden door ideeën.

Toen ik een jaar of acht was, volgde mijn moeder de Teleac cursus "Moderne sterrenkunde". Dankzij Teleac, sindsdien helaas wegbezuinigd, realiseerde ik me voor het eerst dat er een heelal bestaat dat ondenkbaar veel groter is dan onze aarde. Het gevoel dat ik krijg als ik denk aan de onmetelijke afstanden in het heelal inspireert mij tot op de dag van vandaag.

Datzelfde gevoel, het gevoel dat je door een geheime deur naar een nieuwe wereld stapt, beleefde ik jaren later nogmaals toen ik de microscopische wereld van de atomen en de kwantummechanica leerde kennen. De afstanden zijn daar even onvoorstelbaar klein, als ze groot zijn in het heelal.

Een van de schitterende kanten aan de astrofysica is dat het zich niet alleen met het allergrootste, maar ook met het allerkleinste bezig houdt. Om te begrijpen waar de elementen vandaan komen, hoe gas afkoelt, en om het waargenomen licht van sterren en gaswolken te kunnen interpreteren, moeten we namelijk de microscopische wereld begrijpen.

Maar vandaag zal ik me beperken tot grote getallen.

De lichtsnelheid is bijna 300 duizend kilometer per seconde. Hoe snel is dat? Snel genoeg om in één seconde zeven en een half keer de aarde rond te gaan.

Onze zon staat op een afstand van 8 lichtminuten, wat wil zeggen dat het licht van de zon er 8 minuten over doet om de aarde te bereiken. We zien de zon dus zoals ze er 8 minuten geleden uit zag. Als ze zojuist ontploft is, dan zullen we daar dus pas zo meteen achter komen.

De dichtstbijzijnde ster, Proxima Centauri, staat op ongeveer 4 lichtjaren afstand. Dat is dus vier jaar maal 365 dagen maal 24 uur maal 60 minuten maal 60 seconden maal 7,5 rondjes om de aarde.

De doorsnede van ons sterrenstelsel is ongeveer honderdduizend lichtjaren en het dichtstbijzijnde grote sterrenstelsel, Andromeda, staat op twee miljoen lichtjaar afstand.

De afstanden in het heelal zijn zodanig groot, dat onze horizon bepaald wordt door de tijd die het licht dat vlak na de oerknal aan zijn reis begon, nodig heeft gehad om ons te bereiken. Onze horizon in lichtjaren is dus even ver als de oerknal lang geleden is, ongeveer 14 miljard jaar.

Voor ons hebben de grote afstanden het voordeel dat we de geschiedenis van het heelal rechtstreeks kunnen zien. Door verder weg te kijken, kijken we ook verder terug in de tijd. Dankzij dergelijke waarnemingen weten we bijvoorbeeld dat sterrenstelsels zoals de onze vroeger uit kleinere objecten bestonden die in de loop der tijd zijn gegroeid en samengesmolten.

Onze zon is een heel gewone ster. Alleen al in ons sterrenstelsel, de Melkweg, zijn er miljarden sterren die niet veel verschillen van onze zon. Ons zonnestelsel bevindt zich in een buitenwijk van ons spiraalvormig sterrenstelsel. Dit is een gewoon sterrenstelsel, waarvan er zich vele miljarden in het waarneembare heelal bevinden.

Ieder van die vele miljarden sterrenstelsels bevat dus vele miljarden sterren en om de meeste van die sterren draaien meerdere planeten. Gezien deze aantallen, lijkt het ondenkbaar dat er niet talloze planeten zijn waarop intelligent leven mogelijk is.

Maar als er zo ontzettend veel planeten zijn die veel ouder zijn dan de aarde, waarom zien we dan geen bewijs van buitenaardse beschavingen? Wellicht omdat onze technologie nog niet toereikend is om de planeten rondom andere sterren goed te kunnen bestuderen.

Maar de industriële revolutie is nog maar één eeuw oud en de digitale revolutie is nog in volle gang. Vergelijk dat met de leeftijd van het heelal, bijna 14 miljard jaar, en je zou denken dat er meer dan voldoende tijd en kansen zijn geweest voor de ontwikkeling van ondenkbaar geavanceerde, buitenaardse beschavingen.

Waar zijn die aliens dan? Waarom zijn ze niet naar de aarde afgereisd? Kijkt u nu alstublieft niet meteen zo opvallend naar uw buurman!

Misschien hebben technologische beschavingen de neiging zichzelf te vernietigen voor ze in staat zijn naar andere zonnestelsels te reizen? Misschien zijn we nog niet interessant genoeg voor een bezoek van de hypermoderne buitenaardse wezens?

De enorme afstanden tussen de sterren, gecombineerd met het feit dat niets sneller kan gaan dan het licht, zijn ook hier relevant. Aliens die vanuit de andere kant van de Melkweg met een zeer goede telescoop naar de aarde kijken, zien op dit moment Homo Erectus lopen. Onze beschaving is gewoon nog te jong om bekend te zijn. Aliens in vrijwel alle zonnestelsels in onze Melkweg kunnen simpelweg nog geen weet hebben van het ontstaan van een technologische beschaving op aarde.

Het heelal is niet alleen ongelooflijk groot, het is ook ongelooflijk leeg. De typische afstand tussen sterrenstelsels is 100 keer groter dan de stelsels groot zijn. De situatie in ons zonnestelsel is vergelijkbaar: onze afstand tot de zon is ongeveer 100 maal de diameter van de zon.

Wat u kijkend naar een foto van een sterrenstelsel niet zou raden, is dat sterrenstelsels van binnen in zekere zin nog veel leger zijn. De gemiddelde afstand tussen de sterren is namelijk 10 miljoen maal groter dan de sterren groot zijn. Stel dat onze zon een grapefruit zou zijn, dan zou de volgende ster een grapefruit in Japan zijn!

Waarom zijn sterrenstelsels dan niet zwart? Als ze zo leeg zijn, dan zouden we er toch dwars doorheen moeten kunnen kijken? Daar zijn twee redenen voor: tussen de sterren zit gas en stof en, belangrijker, het oplossend vermogen van onze telescopen is te beperkt. Telescopen smeren het licht van naburige sterren samen, net zoals onze ogen doen met de twee koplampen van een verre auto. Foto's van sterrenstelsels zouden dus heel wat minder mooi zijn als onze technologie verder ontwikkeld was.

Zoals ik al vertelde, wonen wij in een buitenwijk van een gewoon schijfvormig stelsel. We noemen het de Melkweg, aangezien het vanuit ons gezichtspunt, d.w.z. gezien vanuit een punt in de pannenkoek, lijkt op een melkkleurige weg van sterlicht.

Onze Melkweg bevat ongeveer duizend miljard zonmassa's aan donkere materie, honderd miljard zonmassa's aan sterren, tien miljard zonmassa's aan diffuus gas, en een centraal zwart gat dat één miljoen zonmassa's zwaar is.

Wij draaien op een afstand van 25 duizend lichtjaar rond het centrum met een snelheid van ongeveer 800 duizend kilometer per uur. Ondanks onze enorme snelheid, doen we 250 miljoen jaar over een rotatie. Homo Sapiens bestaat dus nog maar gedurende 0,04% van het laatste rondje.

Maar hoe en waarom worden sterrenstelsels gevormd?

Dankzij waarnemingen van radiogolven die niet lang na de oerknal aan hun weg zijn begonnen, weten we dat de materie in het heelal oorspronkelijk extreem gelijkmatig was verdeeld.

Op de jongste onder u na, heeft u allemaal die kosmische achtergrondstraling zelf gezien. Zij is namelijk verantwoordelijk voor een paar procent van de ruis, d.w.z. de witte sneeuw, op uw analoge antenne televisie. De kosmische straling is overal om ons heen. Als u buiten uw hand

opsteekt, dan beëindigen er iedere microseconde, d.w.z. ieder miljoenste deel van één seconde, één miljard van deze fotonen hun reis van 14 miljard jaar op uw hand.

Doordat de zwaartekracht altijd aantrekkend werkt, vergroot ze kleine fluctuaties in de verdeling van de materie. Als de dichtheid ergens iets groter is dan gemiddeld, dan is de zwaartekracht daar iets sterker. Hierdoor groeit de fluctuatie en dus ook de lokale zwaartekracht. Dit is een instabiele situatie en exponentiële groei lijkt dan ook onvermijdelijk.

De zwaartekracht wordt echter tegengegaan door de uitdijning van ons heelal, net zoals de kreukels in een gefrommelde zakdoek strak getrokken worden als we de zakdoek uitstrekken. Aangezien de uitdijning van het heelal momenteel aan het versnellen is, zal er een eind komen aan de vorming van al maar grotere structuren.

Omdat de oorspronkelijke fluctuaties doorgaans niet bolvormig zijn, zal de ineenstorting over het algemeen niet synchroon verlopen in de drie ruimtelijke dimensies.

Als de instorting in één van de drie dimensies verder gevorderd is dan in de andere twee dimensies, dan hebben we te maken met een tweedimensionaal object. Sterrenkundigen spreken in dat geval van een "kosmische pannenkoek". Als de materie in twee van de drie dimensies is ingestort, dan hebben we een ééndimensionaal object dat we een filament noemen. Als tenslotte de instorting compleet is, dan hebben we een min of meer bolvormige structuur die we een halo noemen.

Het stadium van de instorting verschilt van plaats tot plaats, en is over het algemeen verder gevorderd voor kleinere structuren. De materie in het heelal is daarom verdeeld in een kosmisch web van pannenkoeken, filamenten en halo's. Filamenten zijn te vinden waar twee pannenkoeken elkaar raken en halo's waar verschillende filamenten elkaar snijden.

De door donkere materie gedomineerde zwaartekracht is de drijvende kracht achter de vorming van structuur in het heelal. Sterrenstelsels bestaan echter uit sterren en diffuus gas, d.w.z. gewone materie. Om de vorming en evolutie van sterrenstelsels te begrijpen, moeten we de stromen van gas begrijpen waarvan uiteindelijk sterren worden gevormd.

Het gas wordt door de zwaartekracht getrokken naar concentraties van donkere materie. Maar naarmate de gasdichtheid groter wordt, wordt de gasdruk groter en wordt het gas meestal ook heter.

Dat het verhogen van gasdruk de temperatuur kan doen stijgen, hebben de meesten van u wel eens ervaren. Voel bijvoorbeeld maar eens onder aan de pomp direct na het oppompen van een fietsband.

De instorting van het gas zal doorgaan totdat de gasdruk zich kan meten met de zwaartekracht.

Door de zwaartekracht bij elkaar gehouden halo's van heet gas en donkere materie zijn echter nog geen sterrenstelsels. Verdere ineenstorting en fragmentatie zijn noodzakelijk voor stervorming, maar kan alleen plaats vinden als het evenwicht tussen de zwaartekracht en de gasdruk wordt verstoord in het voordeel van de zwaartekracht. Dit kan gebeuren als het gas afkoelt.

Het gas koelt af op dezelfde wijze als de aarde 's nachts afkoelt: door het uitzenden van straling. Voor de aarde gebeurt dit in het infrarood, maar het gas rondom een sterrenstelsel is

veel heter: tienduizenden tot tientallen miljoenen graden. Dat is heter dan de atmosfeer van de zon. Bij zulke hoge temperaturen wordt de straling voornamelijk uitgezonden in het ultraviolet en in de vorm van röntgenstralen.

De complexiteit van het proces van de groei van sterrenstelsels zit hem grotendeels in de terugkoppeling van stervorming naar gasstromen. Als massieve sterren aan het eind van hun leven komen, sterven ze in enorme explosies die gezamenlijk gas terug het intergalactisch medium in blazen en zodoende de stervorming remmen. Deze zogenaamde galactische winden kunnen ook worden aangejaagd door straling afkomstig van jonge sterren en van het gas rondom de superzware zwarte gaten die zich in de kernen van sterrenstelsels bevinden.

Het simuleren van de wisselwerkingen tussen gasstromen vereist complexe modellen. Van de andere kant zorgt de competitie tussen instroom en uitstroom voor het ontstaan van evenwicht en dus orde.

Stel dat de instroom groter is dan de uitstroom. De gasdichtheid zal dan omhoog gaan. Hierdoor zal de intensiteit van stervorming stijgen, wat op zijn beurt de galactische wind zal aanwakkeren en de uitstroom zal doen toenemen.

Stel nu dat de instroom kleiner is dan de uitstroom. Dan zal de gasdichtheid, en dus de intensiteit van stervorming, afnemen. Er zal dan minder energie in de galactische wind gepompt worden en de uitstroom zal afnemen.

Het eindresultaat is dus evenwicht tussen instroom en uitstroom. Dit evenwicht heeft enkele interessante en zelfs paradoxale gevolgen.

De instroom wordt bepaald door de zwaartekracht, en dus door de massa van de halo van donkere materie. Als we die massa kennen, dan kunnen we dus dankzij het evenwicht tussen instroom en uitstroom voorspellen hoe sterk de galactische wind zal zijn. En omdat deze wind wordt aangedreven door stervorming, weten we dat de stervorming de intensiteit zal hebben die nodig is om een uitstroom te veroorzaken die gelijk is aan de instroom.

Maar als de intensiteit van de stervorming bepaald wordt door de instroom, dan wordt ze dus niet bepaald door de theoretisch moeilijk te voorspellen efficiëntie van het stervormingsproces. Met de efficiëntie van stervorming bedoelen we in dit geval het aantal sterren dat per tijdseenheid gevormd wordt uit een gegeven verdeling van gas.

Dit brengt ons tot de conclusie dat de hoeveelheid sterren in sterrenstelsels niet bepaald wordt door de efficiëntie van de stervorming, maar door de efficiëntie waarmee stervorming galactische winden aanwakkert.

Om de levensloop van sterrenstelsels beter te begrijpen, moeten we dus in de eerste plaats galactische winden beter begrijpen.

Sterrenstelsels staan via de continue instroom en uitstroom van gas in verbinding met het kosmisch web.

Het gas in het kosmisch web is veel ijler dan het gas in sterrenstelsels. Het licht dat afkomstig is van het gas in het kosmisch web is over het algemeen dan ook veel te zwak om te detecteren. Hoewel nieuwe instrumenten in de nabije toekomst ons zullen helpen bij het zien van het gas

rondom sterrenstelsels, zullen ze niet gevoelig genoeg zijn om het meer diffuse intergalactische gas te zien.

We kunnen dit intergalactische gas echter prima bestuderen door te meten hoe doorzichtig het is voor het licht dat afkomstig is van zeer heldere, verder weg gelegen bronnen. Hiervoor gebruiken we zogenaamde quasars.

Quasars zijn zo helder dat we ze op vele miljarden lichtjaren afstand nog gemakkelijk met onze telescopen kunnen zien. Deze bronnen ontlenen hun enorme lichtkracht aan het zeer hete gas dat via een soort draaikolk op weg is om opgeslokt te worden door een superzwaar zwart gat.

Het spectrum van een quasar, d.w.z. de verdeling van licht als functie van kleur, bevat een schat aan informatie. De informatie zit verborgen in het licht dat onderweg is achterbleven. Het spectrum zit vol met absorptielijnen, d.w.z. delen van het spectrum waar licht ontbreekt omdat het is tegengehouden door elektronen in atomen. Waterstof, het eenvoudigste en meest voorkomende atoom, is verantwoordelijk voor veruit de meeste absorptielijnen.

De gebonden elektronen verstrooien alleen fotonen van bepaalde kleuren. De uitdijing van het heelal zorgt er echter voor dat de kleur van het licht roder wordt met de tijd, en dus naarmate het waterstofatoom verder van ons weg is. We kunnen het spectrum daarom vertalen in een kaart van de verdeling van waterstof over onze gezichtslijn naar de quasar. Bij iedere afstand hoort een kleur licht en op afstanden waar meer waterstof is, wordt minder licht doorgelaten.

Dat bijna ieder absorptielijntje in het spectrum van een quasar miljarden jaren geleden veroorzaakt is door een gaswolk met een dikte van wel honderdduizend lichtjaren, vind ik nog steeds een fantastisch idee.

De dikte van de halo's, filamenten en pannenkoeken wordt bepaald door het evenwicht tussen de zwaartekracht en de gasdruk. Het inzicht dat dit evenwicht niet alleen geldt voor halo's, maar ook voor de ingestorte dimensies van pannenkoeken en filamenten, is een vrij recente ontdekking. Dit inzicht stelt ons in staat om uit waargenomen grootheden zoals oppervlaktedichtheden, de gasdruk en, in veel gevallen, de gasdichtheid en de temperatuur te berekenen.

Dankzij dit nieuwe gereedschap kunnen we, slechts gebruikmakend van pen en papier, laten zien dat waarnemingen van waterstof absorptielijnen impliceren dat de meeste materie in het heelal zich in het intergalactisch medium bevindt, d.w.z. tussen de sterrenstelsels in, en dat de verdeling van die materie consistent is met het idee dat ze wordt bepaald door de werking van de zwaartekracht in een uitdijend heelal.

Driekwart van de gewone materie in ons heelal bestaat uit waterstof, het lichtste element. De rest bestaat bijna allemaal uit helium, het op één na lichtste element. Zowel waterstof als helium is gevormd in de eerste drie minuten na de oerknal, toen het gehele universum een soort nucleaire reactor was.

Wij mensen bestaan echter voornamelijk uit zuurstof en koolstof, twee elementen die niet in de oerknal werden gevormd. Waar komen de atomen waaruit wij bestaan dan vandaan?

Ieder atoom waaruit wij en onze aarde bestaan, met uitzondering dus van waterstof en helium, moet gevormd zijn in de kern van een ster. Niet in onze zon, maar in sterren die al aan het eind

van hun leven waren gekomen voordat ons zonnestelsel zes miljard jaar geleden ontstaan is. De explosies van deze sterren hebben de atomen verspreid waaruit ons zonnestelsel bestaat.

Deze kosmische recycling speelt niet alleen een cruciale rol in de vorming van planeten, ze is ook van groot belang voor de vorming van sterrenstelsels. Jonge sterren blazen grote hoeveelheden nieuwe elementen de ruimte in. Deze chemische verrijking zorgt ervoor dat gas gemakkelijker kan afkoelen door het uitzenden van straling. Hierdoor wordt de ineenstorting dus versneld.

De terugkoppeling tussen stervorming en gasstromen is dus zowel positief als negatief. De energie die vrij komt bij stervorming stimuleert uitstroom, maar de bijkomende chemische verrijking stimuleert juist de instroom.

Dankzij verfijnde zoektechnieken voor zwakke signalen in de eerder genoemde quasar spectra, weten we dat elementen zoals zuurstof en koolstof ook voorkomen in het intergalactisch medium. Dit geeft ons informatie over het bereik van de galactische winden en over stervorming in het vroege heelal.

De informatie die verborgen ligt in de quasar spectra komt echter pas echt tot zijn recht als we de locaties kennen van de vele kleine sterrenstelsels die zich in de buurt van onze gezichtslijn naar de quasar bevinden. Op die manier kunnen we namelijk de relatie tussen de stelsels en het kosmisch web in kaart brengen en de instromen en uitstromen van gas meten.

Dit soort waarnemingen levert nu al zeer interessante resultaten op, zo hebben we bijvoorbeeld recentelijk voor het eerst de gemiddelde gasdichtheid kunnen meten rond sterrenstelsels in het vroege heelal. Dankzij nieuwe instrumenten en methodes voor het detecteren van kleine hoeveelheden stervorming, zal dit soort werk binnenkort nog veel krachtiger worden.

Maar begrip komt niet alleen voort uit de analyse van nieuwe waarnemingen. Voor de interpretatie van de waarnemingen, en voor het testen van onze theorieën, zijn computermodellen van groot belang.

Hoewel theoretici de neiging hebben zich te concentreren op het doen van één hele grote simulatie die zoveel mogelijk fysische effecten in rekening neemt, is dit niet altijd de beste manier om tot nieuwe inzichten te komen.

Computers zijn onze laboratoria. We gebruiken ze om de vorming van sterrenstelsels onder gecontroleerde omstandigheden te simuleren. Ze stellen ons in staat om aan de knoppen te draaien. We zijn vrij om individuele processen, zoals galactische winden of chemische verrijking, uit te zetten, ook al weten we dat dit de simulatie onrealistisch maakt omdat deze processen echt bestaan. Met dit soort experimenten kunnen we echter het belang van de verschillende processen bepalen.

Computersimulaties spelen nog een andere belangrijke rol, die dicht staat bij de wijze waarop veel theoretische ontdekkingen tot stand komen. Ze stellen ons in staat met de theorie te spelen.

Het traditionele beeld van de wetenschappelijke methode is dat men begint met een vraagstelling of hypothese. Vervolgens wordt een methode ontwikkeld of een bestaande techniek gebruikt om de vraag te beantwoorden of de hypothese te toetsen. Hoewel voorstellen

voor financiering van onderzoeksprojecten deze mythe ondersteunen, is de werkelijkheid vaak totaal anders.

Het echte verhaal begint dikwijls met een nieuw stuk speelgoed. Het kan bijvoorbeeld gaan om een nieuwe computercode, een nieuwe computersimulatie, of een inzicht dat ons in staat stelt iets met de hand te kunnen berekenen.

Met dit nieuwe stuk gereedschap gaat de onderzoeker vervolgens spelen. In het geval van een nieuwe code of rekenmethode, worden er zomaar wat dingen berekend. In het geval van nieuwe simulaties of datasets, worden allerlei grootheden tegen elkaar uitgezet en veel naar plaatjes en filmpjes gekeken. Intuïtie speelt hierbij een grote rol.

Vaak denkt de onderzoeker een bepaald doel na te streven, maar de aanvankelijke motivatie blijkt achteraf vaak niet de meest interessante.

Dan ziet de opletende onderzoeker spelenderwijs iets opmerkelijks of iets onverwachts. Dit gebeurt soms plotsklaps, maar het besef iets nieuws gezien te hebben sijpelt dikwijls ook slechts langzaam het bewustzijn binnen. Dit kan zelfs maanden of jaren duren.

Wat ook regelmatig gebeurt, is dat de onderzoeker zonder duidelijke aanleiding opeens het antwoord bedenkt op een vraag die al beantwoord had kunnen worden, of op een vraag waarover de onderzoeker zich eerder niet eens druk maakte.

Nog productiever dan alleen spelen, is samen spelen. Discussies met collega's, het luisteren naar voordrachten, en het uitleggen van concepten aan studenten, kunnen de hersenen allemaal aanzetten om een nieuw verband te leggen.

De les die ik hieruit zou willen trekken, is dat er ruimte moet zijn voor het ontwikkelen van nieuw gereedschap en voor het spelen met dit gereedschap. Men hoeft niet altijd van een vraagstelling uit te gaan en een methode te bedenken om die vraag te beantwoorden.

De ontwikkeling van een stuk gereedschap is de moeite waard als het ons in staat zal stellen om anders te spelen. We moeten er nieuwe dingen mee kunnen berekenen of meten, maar het is gevaarlijk om van tevoren te eisen dat het gereedschap ons in staat zal stellen eenduidige antwoorden te geven op bestaande vragen.

Onderzoekers moeten genoeg tijd vrij maken en niet bang zijn om te spelen en te verkennen. Het loont om na te denken welk nieuw speelgoed gemaakt zou kunnen worden, bijvoorbeeld dankzij nieuwe technologische ontwikkelingen of inzichten, zelfs als er ogenschijnlijk geen directe relatie is met de belangrijke geachte wetenschappelijke vraagstukken.

Financieringsorganisaties en referenten zouden het op hun beurt voor getalenteerde onderzoekers mogelijk moeten maken om op deze wijze te werk te gaan.

Ik had het al over samen spelen. Ik kan niet genoeg benadrukken dat de hedendaagse sterrenkunde vooral teamwerk is.

We hebben elkaar nodig om elkaar op nieuwe ideeën te brengen en om de juistheid van onze ideeën uit te pluizen. Door de steeds verdergaande specialisatie wordt teamwerk almaar belangrijker. Samen krijgen we meer gedaan en is het ook veel leuker.

Ik wil daarom bij deze ook graag mijn dank uitspreken aan al mijn voormalige en huidige studenten en al de collega's met wie ik samen heb mogen werken.

Ik heb gezegd.