



Universiteit  
Leiden

The Netherlands

## **Withstanding the cold: energy feedback in simulations of galaxies that include a cold interstellar medium**

Chaikin, E.

### **Citation**

Chaikin, E. (2024, February 27). *Withstanding the cold: energy feedback in simulations of galaxies that include a cold interstellar medium*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3719692>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3719692>

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

# Nederlandse samenvatting

## Introductie

Het begrip van het ontstaan en de evolutie van sterrenstelsels komt grotendeels voort uit vergelijkingen tussen waarnemingen van sterrenstelsels en voorspellingen uit theoretische modellen. Om betrouwbare voorspellingen te kunnen doen, moeten de theoretische modellen zo veel mogelijk fysische processen van sterrenstelsels omvatten en zo min mogelijk benaderingen maken. Dit is lastig want de fysische processen in en rond sterrenstelsels zijn in hoge mate niet-lineair en stochastisch en betreffen heel verschillende lengteschalen. Bijvoorbeeld, de accretie van interstellair gas op kolossale zwarte gaten in de centra van massieve sterrenstelsels speelt zich af op schalen veel kleiner dan één parsec<sup>1</sup> (voortaan 'pc'), terwijl de groottes van clusters van sterrenstelsels die ook materie van hun omgeving naar binnen kunnen trekken, een paar miljoen pc kunnen bereiken. Het nauwkeurig modelleren van sterrenstelsels is dus alleen mogelijk met computersimulaties, omdat met numerieke berekeningen de astrofysische processen in veel meer detail gesimuleerd kunnen worden, dan met (semi-)analytische modellen waarin de fysica van sterrenstelsels sterk vereenvoudigd is.

Computersimulaties die proberen de evolutie van zowel individuele sterrenstelsels als de groteschaalstructuur van het (uitdijende) heelal na te bootsen, worden 'kosmologische simulaties' genoemd. Ze lossen de gediscretiseerde vergelijkingen op van de gasdynamica en de zwaartekracht in de kosmologische achtergrond. Ze volgen de baryonen en donkere materie vooruit in de tijd, vanaf het moment toen het heelal pas een paar duizend jaar oud was tot de huidige tijd (ongeveer 13.8 miljard jaar). De baryonen en donkere materie waaruit het heelal bestaat, worden in deze computersimulaties vertegenwoordigd door miljoenen tot biljoenen puntachtige deeltjes. De massa van die deeltjes geeft de resolutie van de simulatie aan. In de simulaties worden de baryonen verder opgesplitst in sterren en gas, omdat ze verschillende eigenschappen hebben en zich verschillend gedragen. Computersimulaties gebruiken stellaire deeltjes om de stellaire massa te vertegenwoordigen, terwijl het gas in de simulaties in individuele gase-

---

<sup>1</sup>Eén parsec is ongeveer  $3.1 \times 10^{16}$  meter.

lementen wordt gediscrètiseerd. Elk stellair deeltje vertegenwoordigt een grote populatie sterren en elk gasdeeltje draagt een bepaalde massa gas met unieke eigenschappen zoals positie, snelheid, temperatuur en dichtheid.

De resolutie en volume van computersimulaties zijn altijd beperkt door de grootte van de machine waarop de simulatie wordt uitgevoerd. De fysische processen die niet direct kunnen worden gesimuleerd vanwege onvoldoende resolutie, worden geïmplementeerd met behulp van ‘subgridmodellen’. Zulke processen omvatten bijvoorbeeld de vorming van sterren, de energetische feedback van supernovae (SNe) en de accretie van interstellair gas op superzware zwarte gaten. Ze gebeuren allemaal op schalen (veel) kleiner dan  $\sim 10^3$  pc, wat voor grote simulaties van sterrenstelsels moeilijk te bereiken is. Een subgridmodel zorgt er dus voor dat de effecten van een bepaald astrofysisch proces kunnen worden nagebootst in de simulatie, ondanks het feit dat het proces zelf niet direct gesimuleerd kan worden. Bijvoorbeeld: in het echte heelal exploderen grote sterren aan het eind van hun leven als core-collapse supernovae<sup>2</sup> (CC SNe) en deponeren daardoor de SN-energie in het gas in hun omgeving. Hoewel de simulaties de schalen van individuele sterren niet kunnen bereiken, bootsen ze de SN-feedback na door de stellaire deeltjes een bepaalde hoeveelheid SN-energie te laten injecteren in de gaselementen die dichtbij hen zijn.

De modernste kosmologische simulaties kunnen veel verschillende soorten waarnemingen van sterrenstelsels matchen, zowel in de tijd toen het heelal jong was als in het huidige tijdperk. De simulaties reproduceren onder andere de stellaire massa’s en groottes van waargenomen sterrenstelsels, hun ruimtelijke verdeling in het heelal, de metalliciteit van de gasfase<sup>3</sup> van hun interstellaire media, en de mate van stervorming daarin. De theorie van sterrenstelsels is echter niet compleet. Er bestaan met name nog veel onzekerheden in het modelleren van astrofysische processen die niet in detail nagebootst kunnen worden door simulaties, zoals SN-feedback en stervorming. Bovendien worden sommige astrofysische processen in simulaties vaak volledig genegeerd, zoals magnetische velden en het transport van kosmische straling. Ten slotte wordt in de meeste kosmologische simulaties de temperatuur van interstellair gas beperkt tot temperaturen boven circa tienduizend Kelvin; anders zouden de numerieke berekeningen veel langer (en dus duurder) worden om uit te voeren en zouden er meer fysische processen in het numerieke model opgenomen moeten worden. Dit alles wijst erop dat steeds betere numerieke modellen, grotere en snellere rekenfaciliteiten, en hogere resolutie samen met grotere volumes van simulaties nodig zijn om ons begrip van de vorming en evolutie van sterrenstelsels verder

---

<sup>2</sup>Core-collapse supernovae zijn supernovae die ontstaan door het instorten van een sterkern. Alleen sterren met een initiële massa groter dan  $\approx 8$  zonsmassa’s kunnen core-collapse supernovae produceren.

<sup>3</sup>De gasmetalliciteit is het deel van de gasmassa dat bestaat uit elementen die zwaarder dan waterstof en helium zijn. Ze ontstaan meestal door kernfusie binnen sterren en in supernovae.

te verbeteren.

## Dit proefschrift

Dit proefschrift beschrijft de ontwikkeling van een nieuw model voor kosmologische simulaties van de vorming van sterrenstelsels: COLIBRE. Het COLIBRE-model is gebaseerd op het EAGLE-model voor de vorming en evolutie van sterrenstelsels<sup>4</sup>, met een groot aantal verbeteringen. Deze omvatten onder andere:

- het modelleren van een koude interstellaire gasfase (de gastemperatuur mag zo laag als 10 Kelvin worden);
- het gebruik van vier keer meer donkere materie deeltjes dan baryonische (gas en stellaire) deeltjes, wat de morfologische en kinematische eigenschappen van gesimuleerde sterrenstelsels verbetert;
- het gebruik van een model voor de vorming en evolutie van interstellair stof;
- het gebruik van een tijdsafhankelijk chemisch netwerk voor de berekening van de mate van stralingskoeling en ionen- en moleculaire fracties van waterstof en helium;
- verbeterde voorschriften voor het modelleren van subgrid-fysische processen, inclusief de voorschriften voor stervorming en energiefeedback van sterren en superzware zwarte gaten.

In **Hoofdstuk 2** simuleren we geïsoleerde explosies van supernovae in een homogeen interstellair medium met een gasresolutie van  $\sim 1$  pc. Deze hydrodynamische testen waren oorspronkelijk gemaakt tijdens de ontwikkeling van een nieuw model voor CC SN-feedback dat wordt gebruikt in de COLIBRE-simulaties, maar hier worden ze gebruikt om een probleem op te lossen dat enigszins buiten het kader van het COLIBRE-project ligt.

Met behulp van onze simulaties van supernovae laten we zien dat de aanwezigheid van de radioactieve isotoop  $^{60}\text{Fe}$  in het zonnestelsel, die meermaals is aangetroffen in monsters van het oppervlak van de maan en van een ferromangaankorst op aarde, waarschijnlijk een supernova-oorsprong heeft. Meer specifiek laten we zien dat  $^{60}\text{Fe}$ , dat deel uitmaakt van de SN-ejecta in onze simulaties, kan worden verspreid tot een afstand van  $\sim 100$  pc vanaf de plaats van de SN-explosie in een interstellair medium met een dichtheid van  $0.1 \text{ cm}^{-3}$ , en dat de intensiteit en de duur van  $^{60}\text{Fe}$ -accretie naar het zonnestelsel afhangen van het

---

<sup>4</sup>De kosmologische simulaties met het EAGLE-model (Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments) zijn in 2015 uitgebracht en gebleken succesvol te zijn in het reproduceren van veel eigenschappen (en correlaties daartussen) van waargenomen sterrenstelsels.

traject van het zonnestelsel door het interstellair medium. We laten zien dat het waargenomen  $^{60}\text{Fe}$ -signaal kan worden gereproduceerd met twee onafhankelijke SN-explosies, uitgaande van twee lineaire trajecten voor het zonnestelsel met een snelheid van  $30 \text{ km s}^{-1}$ . Dit ondersteunt de theorie dat het  $^{60}\text{Fe}$ -signaal afkomstig is van SNe die waarschijnlijk niet verder dan  $\sim 100 \text{ pc}$  van de aarde zijn ontploft.

In **Hoofdstuk 3** bestuderen we het effect van verschillende manieren om gas resolutie elementen te selecteren waarin stellaire deeltjes supernova-energie injecteren. We voeren simulaties uit van een geïsoleerd sterrenstelsel<sup>5</sup> met de massa van ons Melkwegstelsel en kleine kosmologische volumes. We beschouwen

- (i) de massagewogen selectiemethode waarbij stellaire deeltjes meer SN-energie injecteren in de delen van hun lokale omgevingen die meer gasmassa bezitten;
- (ii) een nieuw isotroop algoritme waarbij de gas resolutie elementen statistisch isotroop worden geselecteerd rond stellaire deeltjes;
- (iii) een benadering waarbij stellaire deeltjes hun SN-energie deponeren in de gas resolutie elementen die het dichtst bij hen zijn;
- (iv) de twee algoritmen waarbij stellaire deeltjes het gas resolutie element selecteren uit hun lokale omgeving dat de hoogste dan wel de laagste dichtheid heeft.

We benadrukken dat we alleen de manier veranderen waarop gasdeeltjes worden geselecteerd voor SN-energie-injectie, terwijl het SN-feedbackmodel altijd hetzelfde is. We laten zien dat veranderingen in de gaselectiemethode die wordt gebruikt met ons SN-feedbackmodel, leiden tot sterke variaties in de mate van stervorming van sterrenstelsels, de dichtheden van de gas-omgeving waarin nieuwe stellaire deeltjes worden geboren, en de sterkte van galactische winden. De meeste van deze variaties worden veroorzaakt door verschillen in de efficiëntie van SN-feedback, die afhangt van de dichtheid van de gas-omgeving waarin de SN-energie wordt geïnjecteerd, die op zijn beurt gevoelig is voor de gaselectiemethode.

In **Hoofdstuk 4** presenteren we een nieuw model voor CC SN-feedback, dat ontworpen is voor het gebruik in kosmologische simulaties van sterrenstelsels die een koude gasfase van het interstellair medium kunnen nabootsen, zoals COLIBRE. In ons model injecteren stellaire deeltjes hun SN-energie in thermische en kinetische vorm<sup>6</sup>. Ze selecteren de gaselementen van hun lokale omgevingen

<sup>5</sup>Dit betekent dat de simulatie uit maar één sterrenstelsel bestaat.

<sup>6</sup>Bij kinetische (thermische) injecties wordt de kinetische (inwendige warmte) energie van gasdeeltjes vergroot.

voor energie-injectie op een statistisch isotrope manier. Tijdens de injecties behoudt het model ook de energie, impuls en impulsmoment van het hele systeem van gas en stellaire deeltjes. We voeren simulaties van geïsoleerde dwergsterrenstelsels en sterrenstelsels met de massa van ons Melkwegstelsel uit om het feedbackmodel te testen en te valideren. We onderzoeken de verschillen tussen de thermische en kinetische kanalen van energie-injectie en tonen dat het samen gebruiken van de twee kanalen sterrenstelsels oplevert waarvan de eigenschappen het beste overeenkomen met waarnemingen. In onze beste versie van het model wordt 10 procent van de SN-energie in kinetische vorm geïnjecteerd door gasdeeltjes met een snelheid van  $50 \text{ km s}^{-1}$  weg te schieten, en de resterende 90 procent in thermische vorm geleverd door de temperatuur van gasdeeltjes met  $10^{7.5}$  Kelvin te verhogen.

Ten slotte presenteren we in **Hoofdstuk 5** de kalibratie van het COLIBRE-model voor de vorming en evolutie van sterrenstelsels. De voorschriften voor de energetische feedback van SNe en AGN<sup>7</sup> in het COLIBRE-model zijn gebaseerd op de resultaten uit hoofdstukken 3 en 4. We laten zien hoe verschillende eigenschappen van sterrenstelsels – zoals stellaire- en gasmassa, grootte, en mate van ster- vorming – worden beïnvloed door de keuze van de parameters van ons AGN- en SN-feedbackmodel. We vinden de beste waardes voor deze parameters door de stellaire massa's en groottes van gesimuleerde sterrenstelsels te matchen met waarnemingen, waarvoor we een machine learning-methode gebruiken. We laten zien dat het gekalibreerde COLIBRE-model niet alleen de waargenomen gegevens reproduceert die bij de kalibratie zijn gebruikt, maar ook overeenkomt met veel andere eigenschappen van waargenomen sterrenstelsels waarop het model niet is gekalibreerd, inclusief de eigenschappen van koud gas.

---

<sup>7</sup>De letters 'AGN' staan voor 'active galactic nucleus' in het Engels of 'actieve sterrenstelsels' in het Nederlands. Zowel waarnemingen als theorie wijzen erop dat AGN-bronnen worden aangedreven door gas-accretie op superzware zwarte gaten in de centra van massieve sterrenstelsels, waarbij veel energie vrijkomt.

