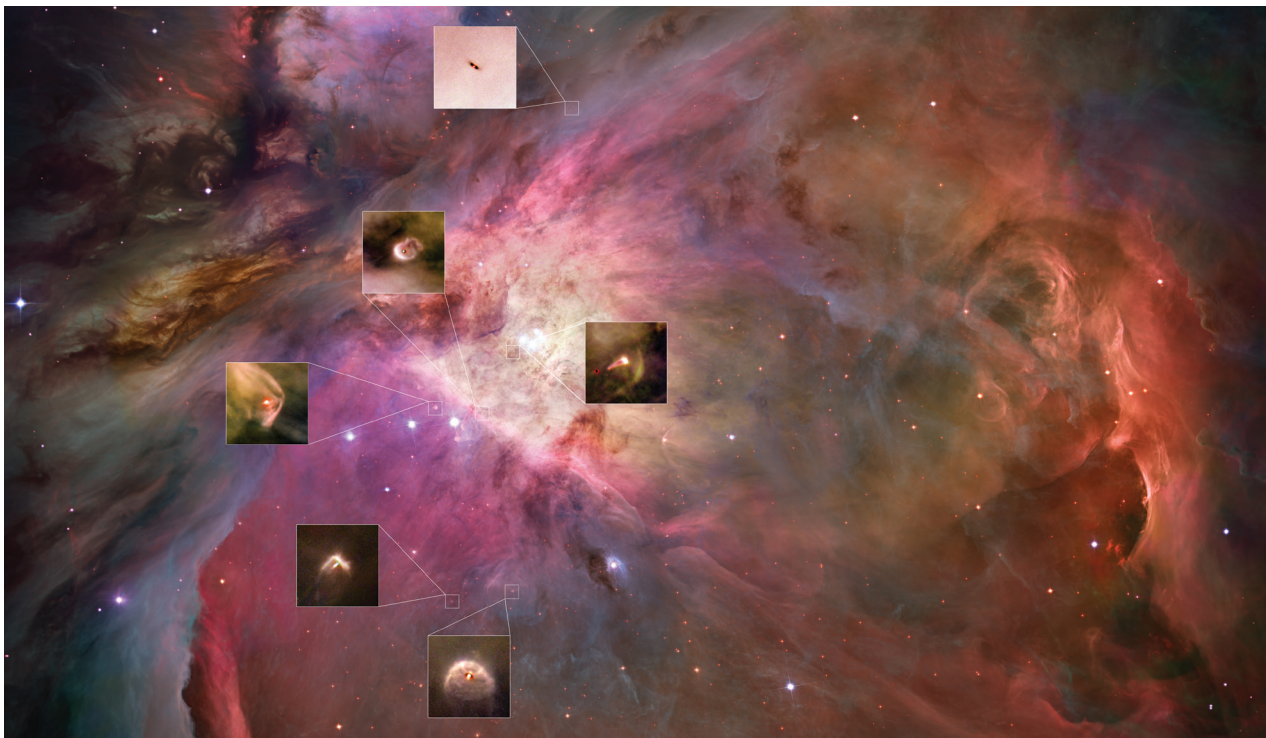


Krimpen en kantelen van protoplanetaire schijven

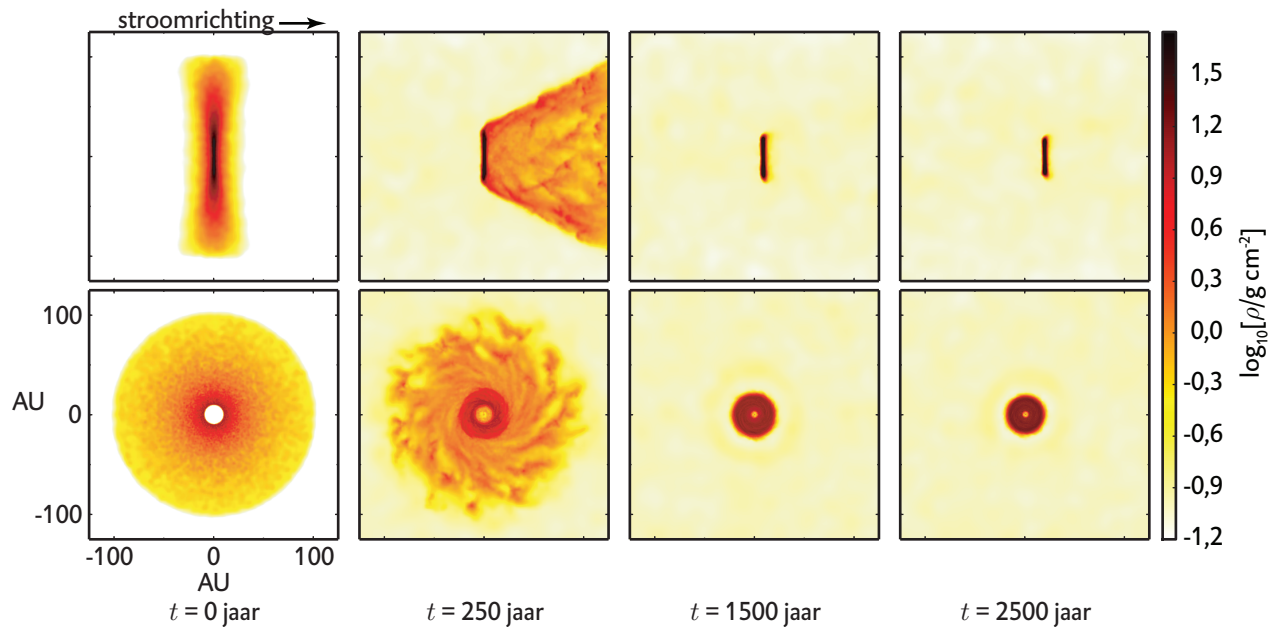
Hoe de geboortekomgeving van sterren jonge zonnestelsels kan beïnvloeden

Sterren worden geboren uit grote gaswolken. Niet al het gas in zo'n wolk wordt gebruikt om sterren van te vormen, er blijft ook gas over. Daardoor bewegen pasgeboren sterren door een gasrijke omgeving. Deze jonge sterren zijn omringd door een schijf van gas en stof. Hierin ontstaan planeten en daarom noemen we het een protoplanetaire schijf. Om te doorgronden hoe (bewoonbare) planeten ontstaan in een protoplanetaire schijf, moeten we ook de levensloop van de protoplanetaire schijf zelf begrijpen. In mijn proefschrift onderzoek ik samen met collega's de invloed die de gasrijke omgeving kan hebben op een protoplanetaire schijf. Thomas Wijnen

99



Figuur 1 In de gaswolken van de Orionnevel worden nieuwe sterren gevormd. De zes ingezoomde foto's zijn protoplanetaire schijven die onderhevig zijn aan externe foto-evaporatie. Credit: NASA, ESA, M. Robberto (STScI/ESA), HST Orion Treasury Project Team & L. Ricci (ESO).



Figuur 2 Momentopnames van een simulatie van een protoplanetaire schijf in een gasstroom. De bovenste rij geeft het zijaanzicht en de onderste rij het bovenaanzicht. Het gas stroomt in vanaf de linkerkant (dat wil zeggen de dichtheid geïntegreerd langs de kijkrichting).

Babyboom

Bijna elke ster die geboren wordt, heeft zo'n protoplanetaire schijf. De schijf bestaat voor ongeveer 99% uit gas en voor 1% uit stofdeeltjes. Deze stofdeeltjes klonteren samen in de schijf tot steeds grotere klompen en vormen uiteindelijk een planeet (of een maan, komeet, asteroïde of ander 'ruimtepuin'). Op den duur verdampt het gas in de schijf door het licht van de ster en uiteindelijk blijft alleen het planetenstelsel over.

Sterren worden vaak met meerdere tegelijk geboren in grote gaswolken (figuur 1). Van die grote gaswolken wordt maximaal een derde gebruikt om sterren en hun protoplanetaire schijven van te vormen. De rest van het gas blijft over en wordt na een paar miljoen jaar weggeblazen als de jonge sterren helder genoeg gaan schijnen.

De sterren en hun protoplanetaire schijven bewegen dus de eerste paar miljoen jaar van hun leven door een dynamische en gasrijke omgeving. Terwijl een protoplanetaire schijf door dat gas beweegt, kan zij het gas opvegen. Hier was nog geen uitgebreid onderzoek naar gedaan. Wij hebben laten zien dat de beweging door het gas en het opvegen ervan een belangrijke invloed kunnen hebben op de levensloop van een protoplanetaire schijf.

Windtunnel

De evolutie van een protoplanetaire schijf is voor menselijke begrippen een traag proces: het duurt miljoenen jaren. Jarenlang met onze telescopen dezelfde protoplanetaire schijf observeren vertelt ons dus weinig over haar evolutie op lange termijn. Daarom hebben we voor ons onderzoek gebruikgemaakt van hydrodynamische modellen. In plaats van een schijf door een heel grote gaswolk te laten bewegen, wat (te) veel rekentijd zou kosten, zetten we de schijf stil en laten we het gas langs de schijf stromen. Het is eigenlijk een soort virtuele windtunneltest. In onze virtuele windtunnel variëren we de dichtheid en snelheid van het instromende gas per simulatie. Ook kunnen we de aanvankelijke oriëntatie bepalen van de schijf. In eerste instantie onderzochten we hoe de protoplanetaire schijf reageert als zij loodrecht op het in-

stromende gas staat, zoals in figuur 2. In een later stadium hebben we onderzocht wat er gebeurt als de protoplanetaire schijf onder een hoek van 45° op de gasstroom staat, zoals in figuur 4.

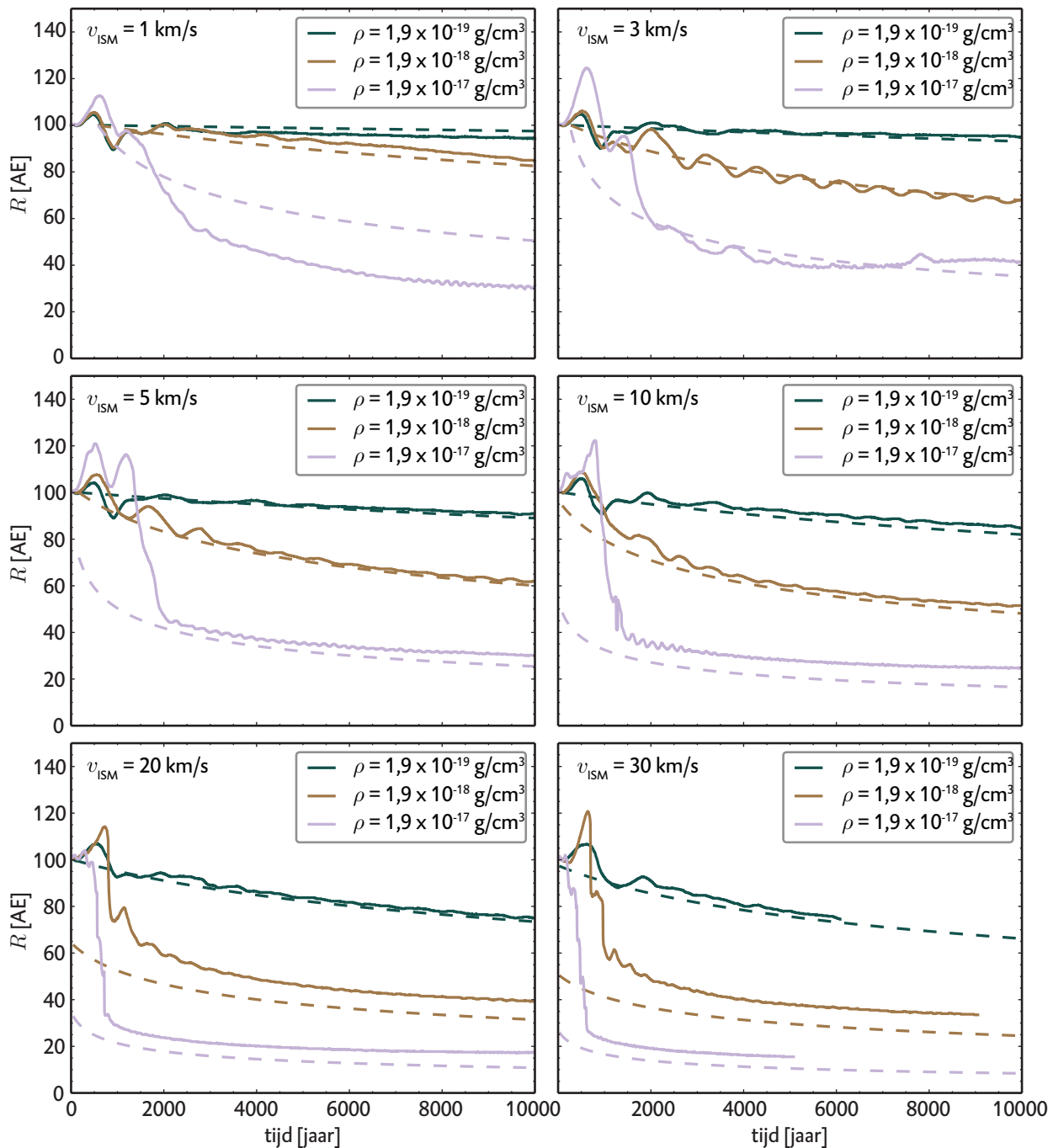
Slijtageslag

Een protoplanetaire schijf reageert op twee verschillende manieren op het instromende gas. Ten eerste oefent het instromende gas druk uit op de schijf, de zogeheten stootdruk. De stootdruk schaalst met de dichtheid ρ en de snelheid v van het instromende gas als ρv^2 . De dichtheid en de snelheid van het instromende gas in de simulatie van figuur 2 zijn erg hoog en daardoor is de stootdruk ook hoog. De buitenste rand van de schijf kan deze hoge druk niet aan en wordt meegeleurd met de stroom, zoals te zien is rond 250 jaar. We spreken van erosie door stootdruk, een fenomeen dat wel bekend is in de sterrenkunde, maar niet echt werd geassocieerd met protoplanetaire schijven. Door deze erosie wordt de diameter van de schijf in figuur 2 gehalveerd. Ten tweede zien we in onze simulaties dat de protoplanetaire schijf krimpt, of eigenlijk samentrekt. De schijf veegt continu gas op en daardoor neemt de massa van de schijf toe. We nemen in onze simulaties aan dat het instromende gas geen impulsmoment heeft ten opzichte van de schijf en het voegt daarom ook geen impulsmo-

Thomas Wijnen (Amersfoort, 1986) studeerde wiskunde en natuur- en sterrenkunde (bachelor) en astrophysics and space research (master, cum laude) aan de Universiteit Utrecht. Voor zijn masteronderzoek zat hij een half jaar in Chili. Hij deed zijn promotieonderzoek aan de Radboud Universiteit. Op dit moment werkt hij als postdoc in de instrumentatiegroep van de Sterrewacht Leiden.



wijnen@strw.leidenuniv.nl



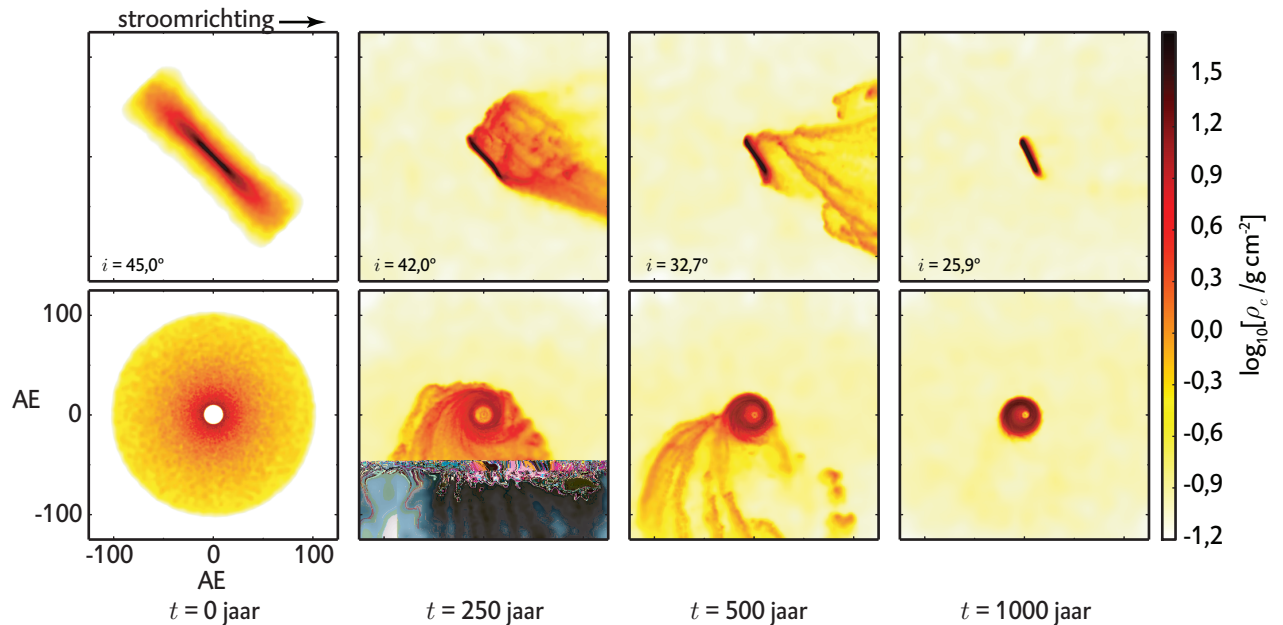
Figuur 3 De evolutie van de straal van een protoplanetaire schijf (in astronomische eenheden, AE) als functie van de tijd voor verschillende constante snelheden (elk paneel) en dichtheden (aangegeven met verschillende kleuren) van instromend gas. De doorgetrokken lijnen zijn de simulaties en de stippellijnen ons theoretische model. De simulaties met een snelheid van 30 km/s kosten enorm veel rekentijd en we hebben deze voortijdig moeten stopzetten.

ment toe aan de schijf. In echte ster-
vormingsgebieden heeft het gas wel
enig impulsmoment en dat kan zowel
positief als negatief bijdragen aan de
schijf. De verwachting is dat er geen
nettobijdrage van het opgeveegde gas
aan het impulsmoment is, wanneer
wordt gemiddeld over een populatie
van protoplanetaire schijven. Het op-
geveegde gas verkleint het specifieke
impulsmoment, dat wil zeggen het
impulsmoment per massa-eenheid,
van het gas in de schijf. Het gas be-
weegt daarom naar kleinere banen die

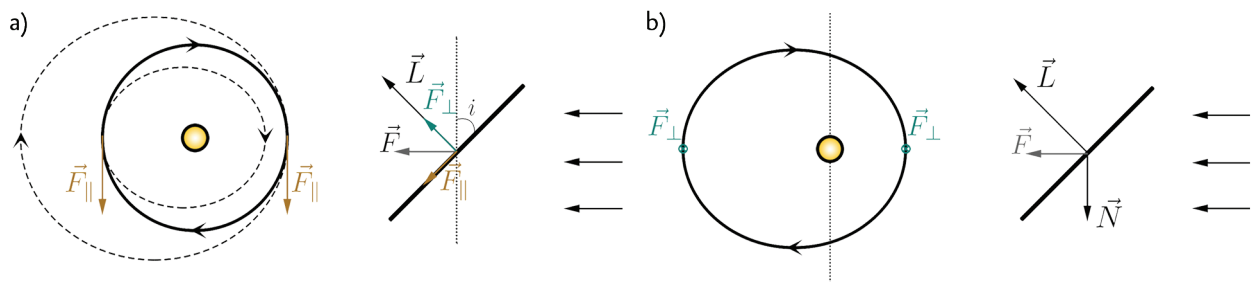
overeenkomen met hun nieuwe speci-
fieke impulsmoment: de schijf trekt
samen.

Door onder andere gebruik te maken
van de wet van behoud van impuls-
moment, kunnen we theoretisch be-
schrijven hoe de schijf reageert op het
opgeveegde gas. We hebben hiervoor
de bestaande theorie om de evolutie
van protoplanetaire schijven te be-
schrijven uitgebreid. Met onze uit-
breiding kunnen we de evolutie van de
straal en massa van de schijf beschrij-
ven als functie van de dichtheid en de

snelheid van het instromende gas.
Ondanks enkele versimpelde aanna-
mes in ons theoretische model, laat
figuur 3 zien dat het de evolutie op
de lange termijn van de straal van de
schijf in onze simulaties goed bena-
dert. Het samentrekken van de schijf
is het sterkst in het begin en neemt
af naarmate de relatieve toename in
massa steeds kleiner wordt. Met ons
model kunnen we voorspellen dat een
protoplanetaire schijf behoorlijk kan
samentrekken als de dichtheid van het
gas en de snelheid van de schijf ten



Figuur 4 Vergelijkbaar met figuur 1, maar in deze simulatie staat de schijf onder een hoek van 45° op het instromende gas. In de bovenste rij is op elk tijdstip de hoek aangegeven die de schijf maakt met de y-as. In de onderste rij kijken we, langs de draaias, in het vlak van de protoplanetaire schijf.



Figuur 5 Schematische weergave van het kantelproces van een protoplanetaire schijf (niet op schaal). De schijf draait met de klok mee en haar impulsmoment is aangegeven met de vector L . De linkerkant van figuur a en b toont de baan van een gaselement in het vlak van de schijf, rechts toont het zijaanzicht van de schijf waar het gas vanaf rechts instroomt. Figuur a illustreert het effect van F_{\parallel} op het gas in de schijf dat in eerste instantie in cirkelbanen om de ster beweegt. Figuur b toont dat wanneer de schijf excentrisch is geworden, met een grotere linkerheft ten opzichte van de ster, het nettokrachtmoment N naar beneden gericht is. Hierdoor kantelt de impulsmomentvector en richt de schijf zich langzaam op.

opzichte van het gas hoog zijn. En dat zou waarnemingen van protoplanetaire schijven in stervormingsgebieden kunnen verklaren.

Krimpregio's

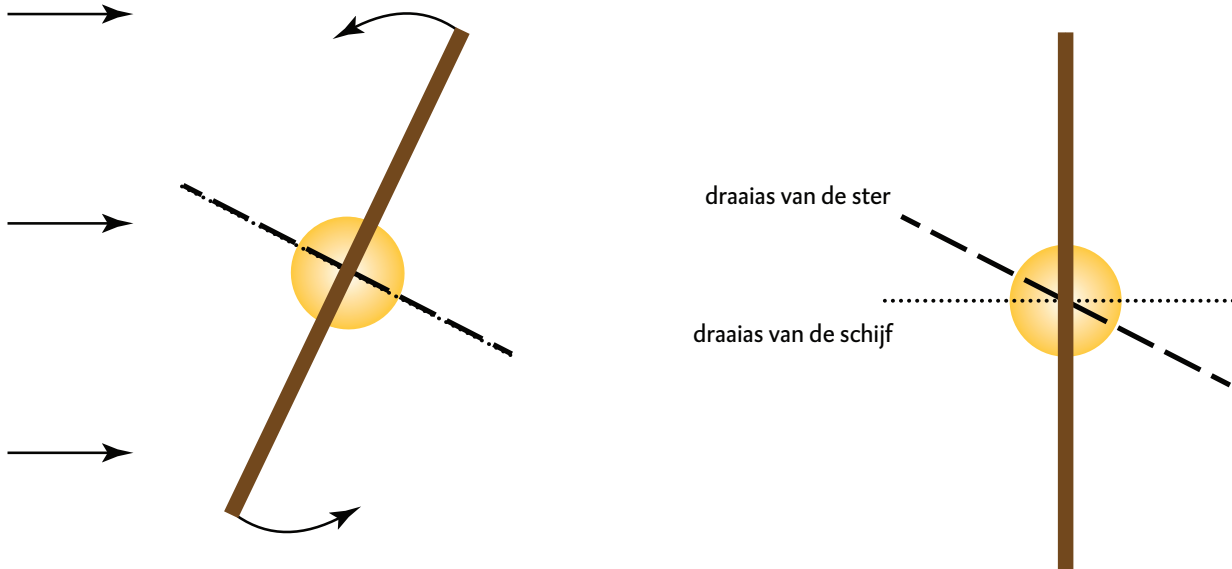
Uit waarnemingen van protoplanetaire schijven in stervormingsgebieden blijkt dat de protoplanetaire schijven in een kortere tijd verdwijnen dan we theoretisch zouden verwachten. Tot nu toe dacht men dat er twee externe processen zijn die de evolutie van een protoplanetaire schijf hoofdzakelijk beïnvloeden: 1) externe foto-evaporatie en 2) bijna-botsingen tussen sterren. Externe foto-evaporatie treedt op wanneer een ster en haar protoplanetaire schijf te dicht in de buurt komen van een andere ster die vele malen helderder is dan de ster waar de schijf omheen draait. Het licht van deze heldere ster versnelt de verdamping van

het gas in de schijf, zoals waargenomen in figuur 1. Bij een bijna-botsing scherpen twee (of meer) sterren, met hun protoplanetaire schijf, zo dicht langs elkaar dat ze door hun wederzijdse zwaartekracht materiaal uit de schijf van de andere ster lostrekken. Ze maken elkaars schijf deels kapot. Het opvegen van gas, in combinatie met erosie door stootdruk van de schijf, blijkt ook een mogelijke manier om schijven kleiner te maken. We hebben ons theoretische model gebruikt in simulaties van stervormingsgebieden om te bepalen welk proces belangrijker is om schijven kleiner te maken: het opvegen van gas of bijna-botsingen tussen sterren. Het proces van externe foto-evaporatie laat zich niet eenvoudig theoretisch modelleren en we hebben het onder andere daarom buiten beschouwing gelaten. We zien in onze simulaties dat het op-

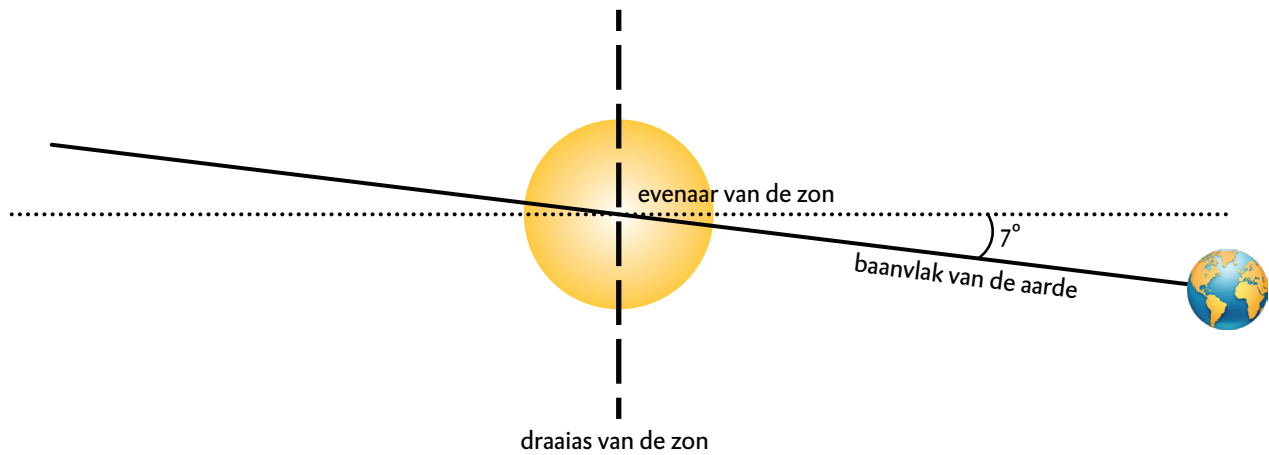
vegen van gas een effectievere manier is om protoplanetaire schijven kleiner te maken in gasrijke stervormingsgebieden dan bijna-botsingen tussen sterren. Dat is erg interessant, want tot nu toe werd geen rekening gehouden met de rol van het opvegen van gas in de evolutie van protoplanetaire schijven.

Onverwachte wending

In de simulaties waarin we starten met de protoplanetaire schijf onder een hoek van 45° , vonden we, tot onze verrassing, dat de schijf zich opricht in de stroom en langzaam loodrecht op het instromende gas komt te staan. In de simulatie in figuur 4 is de hoek van 45° na duizend jaar nog maar $25,9^\circ$. Er moet een nettokrachtmoment zijn op de aanvankelijk symmetrische schijf. Het proces dat hiervoor verantwoordelijk is, is schematisch weergegeven



Figuur 6 Versimpelde weergave van het kantelproces van een protoplanetaire schijf. Het gas stroomt van links in en kantelt de impulsmomentvector van de schijf. Hierdoor richt de schijf zich loodrecht op de instroomrichting van het gas, waardoor de draaias van de schijf niet meer samenvalt met de draaias van de ster.



Figuur 7 Het baanvlak van de aarde en de meeste andere planeten maakt een hoek van ongeveer 7° met de evenaar van de zon.

in figuur 5 en versimpeld in figuur 6 en kan als volgt worden begrepen: doordat de schijf gekanteld is, oefent het instromende gas een deel van zijn kracht uit in het vlak van de schijf, F_{\parallel} . De cirkelvormige banen van gas-elementen in de schijf worden hierdoor excentrisch: in de linkerhelft van de schijf wordt het gas afgeremd en in de rechterhelft versneld. Dit resulteert in een asymmetrische schijf, waar het gas een groter deel van zijn baanperiode in de linkerhelft verblijft dan in de rechterhelft. De kracht op het gas in de linkerhelft heeft dus een langere arm ten opzichte van de ster en wordt gedurende een langere tijd uitgeoefend dan wanneer het gas zich in de rechterhelft bevindt. Het netto krachtmoment N op een gaselement, gemiddeld over de baanperiode, staat loodrecht op de totale kracht F . Aan-

gezien $N = dL/dt$, kantelt de schijf en richt deze zich langzaam loodrecht op het instromende gas.

Ons jonge zonnestelsel

Het kantelproces zou een verklaring kunnen zijn voor de hoek van ongeveer 7° die de evenaar van de zon maakt met het baanvlak van de aarde en de meeste andere planeten, zoals geïllustreerd in figuur 7. Intuïtief zou men verwachten dat het baanvlak van de protoplanetaire schijf, en de planeten die zich daarin vormen, samenvalt met de evenaar van de zon. Over het ontstaan van de waargenomen hoek zijn al verschillende ideeën, maar wij doen een nieuwe suggestie: namelijk dat die hoek het gevolg is van gas dat met hoge snelheid in de protoplanetaire schijf van onze zon is gestroomd. Uit waarnemingen vermoeden we dat

ons jonge zonnestelsel een interactie heeft ondergaan met supernovaejecta. In een supernova explodeert een ster en slingert haar buitenste lagen met hoge snelheid het heelal in. Als het weggeslingerde materiaal het jonge zonnestelsel met zijn protoplanetaire schijf op zijn pad treft, zou dat de schijf kunnen kantelen. Er is echter wel vervolgonderzoek noodzakelijk om deze theorie hard te maken.

Met mijn promotieonderzoek hebben we aangetoond dat de beweging van sterren door hun gasrijke geboortekomgeving de levensloop van een vroeg zonnestelsel op verschillende manieren kan beïnvloeden. Het biedt een startpunt om deze processen in meer detail te onderzoeken, in het bijzonder wat hun invloed kan zijn op het ontstaan van (bewoonbare) planeten.