

Sterrenkunde Praktikum 1

Proef 4: De expansie van planetaire nevels

March 25, 2009

1 Inleiding

In deze proef zullen we beginnen met het ontwikkelen van een simpel theoretisch model, en dit vervolgens gebruiken bij de interpretatie van waarnemingen. Doel is zowel het op een “nette” manier ontwikkelen van het theoretisch fundament, als het kritisch toepassen op de gegevens. Houd altijd in de gaten dat de theoretische beschrijving geïdealiseerd en vereenvoudigd is. Er is dus geen perfecte overeenkomst met de werkelijkheid te verwachten. De “kunst” is echter uit te maken wat wel, en wat niet te accepteren is als afwijking van het theoretisch model, en eventuele afwijkingen ook te begrijpen. Dat geeft vervolgens ook ideeën over wat er eventueel aan het model ontbreekt.

2 Planetaire nevels

Het onderwerp van deze proef is de expansie van *planetaire nevels*. Planetaire Nevels zijn heldere, diffuse gasobjecten die in verschillende vormen voorkomen. Bij hun ontdekking in de 18de eeuw werd gedacht dat het hier om lichtzwakke planeten ging, vandaar de verwarrende naam. We weten nu dat deze objecten geïoniseerde gasnevels zijn en dat ze een van de laatste evolutiestadia vormen van sterren met een massa tussen ongeveer 1 en $8 M_{\odot}$.

Waarnemingen met bijvoorbeeld de Hubble Space Telescope laten zien dat planetaire nevels allerlei vormen kunnen hebben, van simpele ringen tot ingewikkelde punt-symmetrische structuren. Op de practicum website vind je een link naar een pagina met opnamen van planetaire nevels, waaruit de grote variëteit aan vormen duidelijk wordt. Ook de uiteenlopende namen die planetaire nevels gekregen hebben, zoals Ring Nebula, Helix Nebula, Owl Nebula, Cat’s-Eye Nebula, Butterfly Nebula en Eskimo Nebula getuigen daarvan.

Hoe ontstaat nu zo’n planetaire nevel? Als een ster met een massa van tussen de 1 en $8 M_{\odot}$ aan het eind van zijn leven al zijn brandstof in de kern door middel van kernfusie heeft opgebruikt, zal hij opzwellen tot een rode reus. Tijdens deze fase verliest de ster een aanzienlijk deel van zijn massa in een sterrenwind. Het massaverlies kan oplopen tot $\sim 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ en uitstroomsnelheden zijn van de orde van $\sim 10 \text{ km s}^{-1}$. De sterkern die overblijft trekt samen, wordt heter en gaat meer ioniserende ultraviolet (UV) straling uitzenden. Tegelijkertijd blijft de ster massa verliezen, nu echter in een veel lager tempo van $\sim 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ maar met een veel hogere snelheid (van de orde van $\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$). Deze ijle, snelle wind botst met het overblijfsel van de langzame wind (het zogenaamde “interacting winds” model) en creëert daarmee een expanderende schil van geïoniseerd gas, een zogenaamde *planetaire nevel*. Afhankelijk van hoe isotroop het eerste langzame massaverlies plaatsvond, kun je de verschillende planetaire nevelvormen begrijpen.

Als de samentrekking van de kern tenslotte ophoudt, koelt de ster af en wordt een witte dwerg. De geïoniseerde gasschil lost geleidelijk op in zijn omgeving. Zodoende vormt de planetaire nevel fase de overgang van rode reus naar witte dwerg.

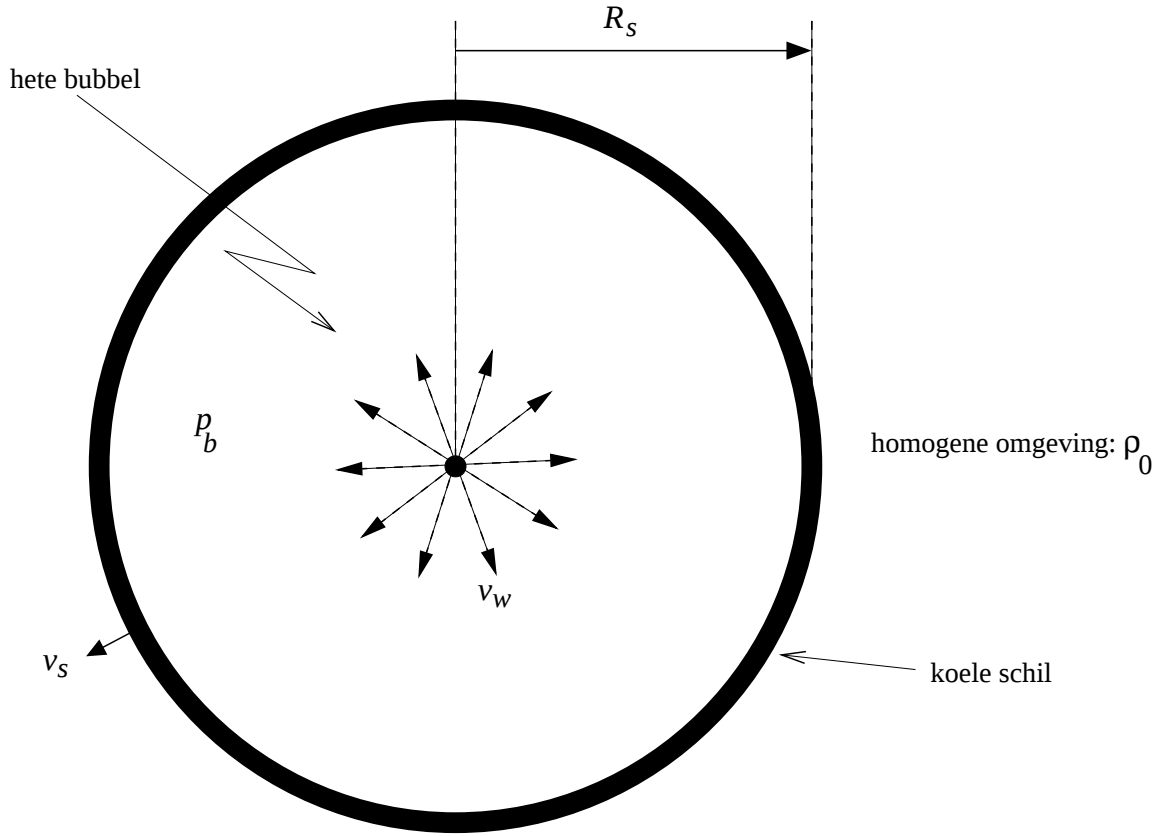


Figure 1: Simpel model van een expanderende bel in een homogene omgeving

3 Model voor een expanderende sterrenwind

Om inzicht te krijgen in het mechanisme waardoor een planetaire nevel gevormd wordt bekijken we het volgende simpele model. Een snelle sterrenwind blaast met een constant massaverlies $dM_w/dt = \dot{M}_w$ en een constante uitstroomsnelheid v_w in een homogene omgeving met (lage) dichtheid ρ_0 . Doordat de windsnelheid veel groter is dan de lokale geluidssnelheid van het gas in de omgeving zal zich een naar buiten bewegend schokfront vormen. Dit schokfront vormt de grens tussen de omgeving en de door de sterrenwind geblazen bel. Er zijn globaal drie fasen te onderscheiden in de evolutie van deze bel.

Fase 1: In de eerste fase expandeert de bel vrijwel ongehinderd, omdat de omgeving zo'n lage dichtheid heeft. De bel veegt materiaal uit de omgeving op, dat terecht komt in een schil van materiaal met een hoge dichtheid. Dus het materiaal *binnen in* de bel is afkomstig van de wind en het materiaal in de schil komt uit de omgeving. Wanneer de uit de omgeving opgeveegde massa ongeveer gelijk is aan de door de ster in de sterrenwind verloren massa begint fase twee.

Opgave 1: Bereken na hoeveel tijd de eerste fase is afgelopen. Gebruik hierbij de volgende waarden: massaverlies $\dot{M}_w = 10^{-7} M_\odot \text{ yr}^{-1}$, windsnelheid $v_w = 1000 \text{ km s}^{-1}$ en omgevingsdichtheid $\rho_0 = 10^{-23} \text{ g cm}^{-3}$.

Fase 2: De tweede fase wordt de “snowplow” fase genoemd omdat een relatief koele schil van samenge-drukt omgevingsmateriaal wordt opgeveegd door een hete expanderende bel. Figure 1 laat een schematische weergave van deze fase zien. Merk op dat $v_s = dR_s/dt$ veel kleiner is dan v_w . In deze fase creëert de sterrenwind een druk in de hete bel, en die druk zorgt voor een versnelling (en dus een verandering van impuls) van de expanderende schil, gegeven door

$$4\pi R_s^2 p_b = \frac{d}{dt} (M_s v_s). \quad (1)$$

Hierin is R_s de schilstraal, $v_s = dR_s/dt$ de schilsnelheid en p_b de druk in de bel, en M_s is de opgeveegde massa in de schil. Merk op dat al deze grootheden van de tijd afhangen. In de evenwichtsvergelijking (1)

staat in het linker lid de kracht geleverd door de hoge druk in de hete bel terwijl in het rechter lid de tijdsafgeleide van de schilimpuls staat.

De druk p_b wordt geleverd door de kinetische energie die de sterrenwind in het inwendige van de bel deponeert. De druk in de bel die daarvan het gevolg is volgt uit $p_b = n_b k T_b$, terwijl de bijbehorende energie in de bel gelijk is aan $3/2 n_b k T_b V_b$; hierin is V_b het volume van de bel, n_b en T_b zijn de deeltjes-dichtheid en de temperatuur van het gas in het inwendige van de bel, en k is de Boltzmann constante. De energie in de bel is ook gelijk aan de door de sterrenwind in de bel gedeponeerde energie $1/2 \dot{M}_w v_w^2 t$.

Opgave 2:

Bekijk nu de “snowplough” fase. Ons doel is om een uitdrukking te vinden voor de straal R_s als functie van de tijd.

1. Leid met bovenstaande vergelijkingen een uitdrukking af voor de druk p_b in de bel, als functie van $\dot{M}_w$, t , v_w en R_s . Neem aan dat de schil dun is zodat de straal van de schil en de straal van de bel gelijkgesteld kunnen worden.
 2. Vul deze uitdrukking vervolgens in de evenwichtsvergelijking (1) in om een vergelijking voor de straal R_s als functie van de tijd te vinden waarbij je mag aannemen dat R_s van de vorm $R_s = \xi t^\alpha$ is.
 3. Bereken uitdrukkingen voor de constanten ξ en α (gebruik daarbij dat $\dot{M}_w$ en v_w niet van de tijd afhangen).
 4. Leg uit welke van de hiervoor beschreven twee fasen in de evolutie van een planetaire nevel het meest waarschijnlijk is om waar te nemen. Gebruik hierbij dat de straal van een planetaire nevel aan het eind van fase twee ongeveer 50000 AU is.
-

4 De expansie van de planetaire nevel BD+30°3639

We gaan nu Hubble Space Telescope (HST) waarnemingen van de planetaire nevel (PN) rond de ster BD+30°3639 gebruiken om een schatting van de leeftijd van deze nevel te maken. In Figs. 2 and 3 zie je de resultaten van de bepaling van de expansie van de PN rondom BD+30°3639. Figure 2 is gemaakt op basis van twee HST opnames in de $H\alpha$ -lijn ($\lambda = 656$ nm), terwijl Fig. 3 is gebaseerd op twee opnames in de $[N II]$ -lijn ($\lambda = 658$ nm). Voor vele posities in de PN kon de verplaatsing in de periode tussen de twee opnamen bepaald worden, en die is weergegeven met een vector. Zoals je kunt zien zijn de verplaatsingen wel globaal van het centrum af gericht, maar niet altijd perfect radieel.

Opgave 3: Het streepje linksonder in beide figuren geeft zowel de schaal van de eigenbeweging μ als de schaal van de afbeelding weer. Gebruik de waarden van de eigenbeweging μ in Fig. 2 om te onderzoeken of er aanwijzingen zijn voor een azimuthale (ϕ -) en/of radiële (r -) afhankelijkheid van μ . Maak een zinnige keuze voor het aantal sectoren (intervallen in positiehoek) en radiële intervallen waarin je de gemiddelde waarde van μ en de spreiding daarin (in milliboogseconden per jaar) berekent; maak vervolgens twee figuren: $\mu(\phi)$ en $\mu(r)$.

De significantie van eventuele radiële en/of azimuthale afwijkingen van de gemiddelde waarde van μ kun je beter beoordelen als je weet wat de meetonnauwkeurigheden zijn. Om daarvan een indruk te krijgen maak je een histogram van de verschillen tussen zo goed mogelijk in positie corresponderende waarden van $\mu_{H\alpha}$ (Fig. 2) en $\mu_{N II}$ (Fig. 3). Gebruik hierbij enkele tientallen posities die egaal over de nevel zijn verdeeld. Bediscussieer nu je resultaat voor $\mu(\phi)$ en $\mu(r)$. Trek tenslotte een conclusie over de beste globale waarde voor μ .

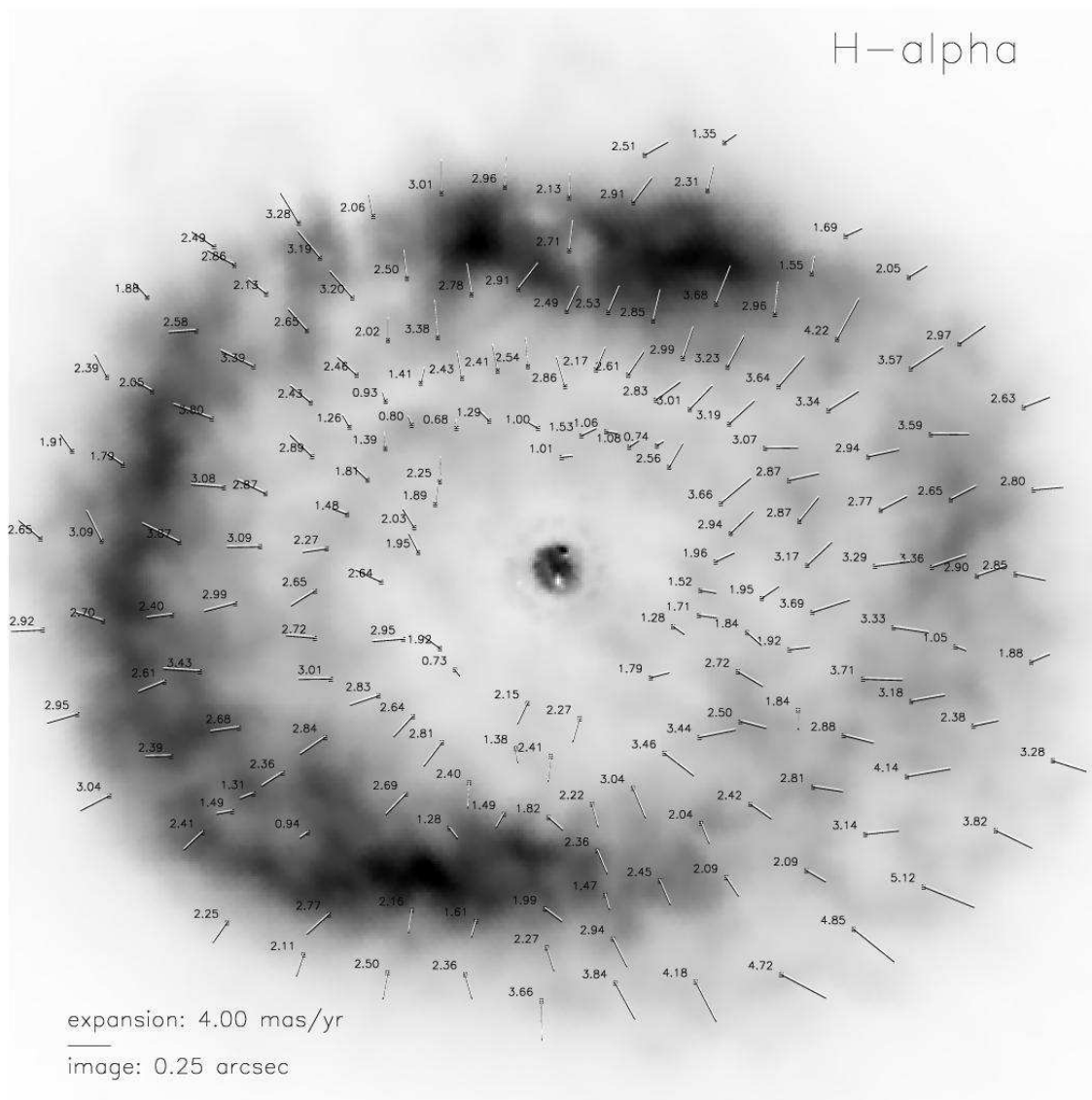


Figure 2: Hubble Space Telescope opname van de planetaire nevel BD+30°3639 in de H α spectraallijn. Het horizontale streepje in de linker benedenhoek geeft zowel de schaal van de afbeelding als de schaal van de expansievectoren aan. De bij de expansievectoren vermelde getallen geven de expansie aan in milliboogseconden per jaar.

Opgave 4: In principe zou je de leeftijd van de PN nu kunnen bepalen door de straal te delen door de expansiesnelheid, waarbij je dus impliciet aanneemt dat de expansiesnelheid constant is geweest. De resultaten van Opgave 2 laten echter zien dat deze aanname niet correct is. Gebruik de resultaten van Opgave 2 om een uitdrukking te krijgen voor de leeftijd van de PN gebaseerd op bovenstaande metingen. Hoeveel (in procenten) is deze leeftijd groter of kleiner dan de leeftijd die verkregen zou worden onder aanname van constante expansie?

Opgave 5: Als je uit spectra weet dat de radiële expansiesnelheid van de PN BD+30°3639 $18 \pm 1.3 \text{ km s}^{-1}$ bedraagt, wat is dan de afstand van de PN BD+30°3639, en wat is de geschatte fout in de afstand ?

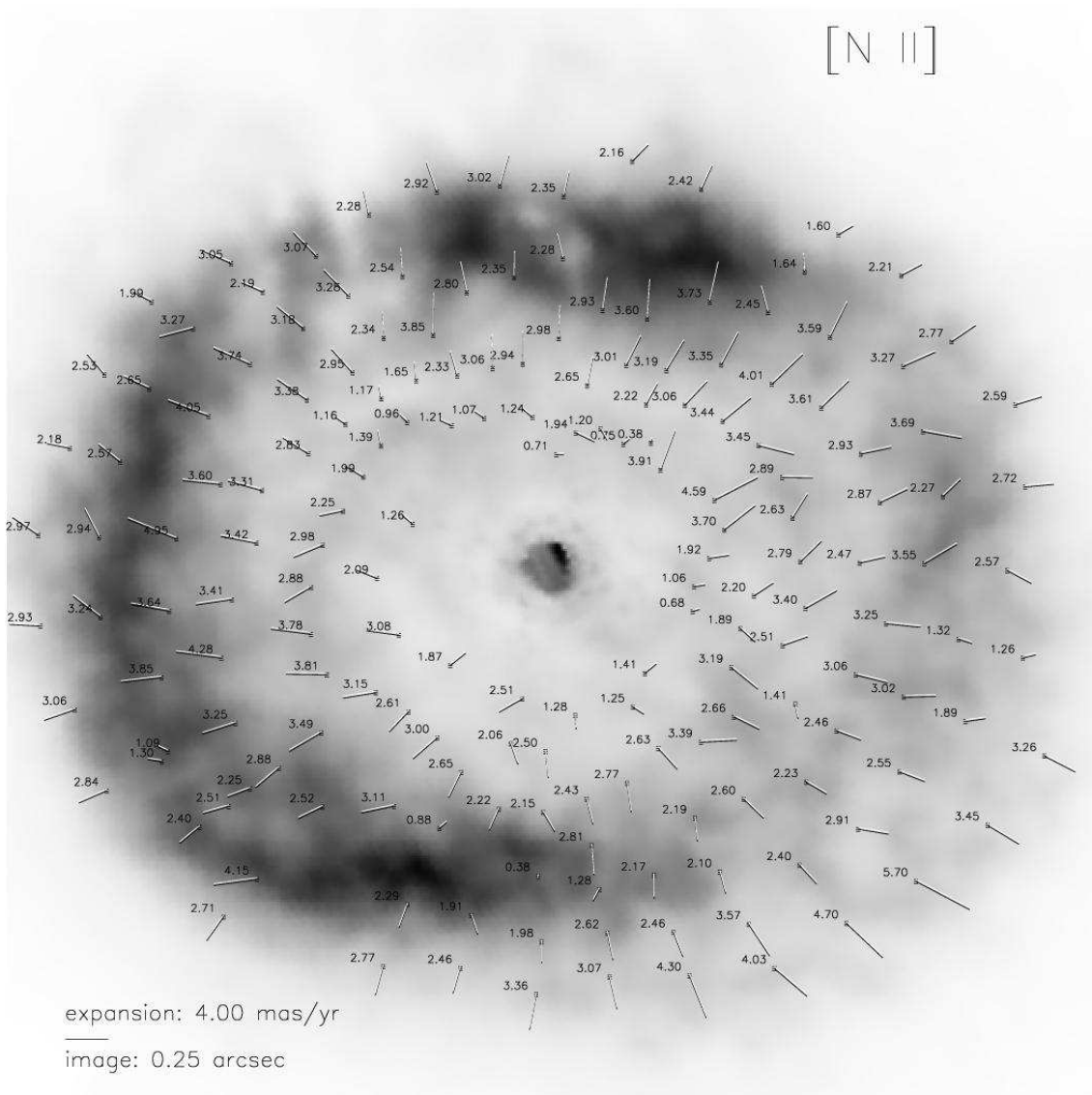


Figure 3: Hubble Space Telescope opname van de planetaire nevel BD+30°3639 in de [N II] spectraallijn. De betekenis van de symbolen en getallen is als in Fig. 2.