



Perfiles de Densidad Radial de Halos de Nebulosas Planetarias a partir de Modelos Numéricos de Historiales de Pérdida de Masa

Juan Luis Verbena Contreras

Asesores: Dr. Klaus-Peter Schröder, Dr. Solai Jeyakumar

Para obtener el grado de Dr. en Ciencias (Astrofísica)

Universidad de Guanajuato

Noviembre 2013

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por esta oportunidad de dedicarme a lo que me apasiona. También a mis asesores, y a mis sinodales por sus valiosos comentarios, por su tiempo y dedicación al revisar este trabajo.

Abstract

Fundamental open questions remain on the evolution of late AGB giant stars of low to intermediate mass and the formation of planetary nebulae (PNe) - especially the transition from the dense, slow and mostly spherically symmetric dust-driven wind to the bipolar, axisymmetric outflow of the fast, thin hot wind from the hot central star just a few thousand years later.

This work is an attempt to look deeper into this crucial evolutionary phase and to put to an observational test our current understanding and computer models.

We first analyze the outflow velocity in a consistent set of over 50 carbon-rich, dust-driven and well-saturated wind models, and how it depends on basic stellar parameters. We find that the velocity of such cool, dust-driven winds follows the simple relation $v_{\text{out}} \propto (L/M)^{0.6}$. By contrast to the vast changes of the mass loss rate in the final outflow phase, this relation suggests only very modest variations in the wind velocity, even during a thermal pulse, allowing us to closely relate a present-day density profile of a cool, outer PN-envelope with its previous mass-loss history.

We then obtain theoretical density profiles, shaped by mass-loss histories computed with an evolution code and a simple dilution via the equation of continuity. We aim to match these to the observed halos of the following PNe: CN 1-5, IC 2165, NGC 2022, NGC 2438, NGC 2792, NGC 2867, NGC 3918, NGC 6826, NGC 7662. We use the observed emission profiles in $H\alpha$, $24 \mu\text{m}$ and $4.5 \mu\text{m}$. The density declines of the models have characteristics similar to those observed.

We also made a direct quantitative comparison via $^{13}\text{CO}(1-0)$ and $^{13}\text{CO}(2-1)$ observations in the undisturbed, neutral halo of NGC 6826, a young slightly elliptical PNe. We are able to quantitatively reproduce the observed lines from the density profiles predicted by our computed mass-loss histories, using a non-LTE (non Local Thermodynamic Equilibrium) radiative transfer code and appropriate collisional excitation conditions.

We conclude that the outer halos of PNe are indeed described mainly by the late mass-loss history, which we seem to be able to compute adequately. We reach this conclusion via our analysis of the outflow velocity, the fact that we can reproduce observations by our density profiles obtained from numerical models of mass-loss histories, and via observations of ^{13}CO in the halo of NGC 6826.

Resumen

Existen cuestiones fundamentales que no comprendemos completamente sobre la evolución de estrellas de masa baja e intermedia y la formación de nebulosas planetarias (NP) - especialmente la transición a partir del viento estelar denso rico en polvo, lento y de simetría esférica, hacia la efusión a través de vientos rápidos bipolares y calientes de la estrella central sólo unos miles de años después.

Este trabajo contribuye al dar una mirada más profunda a esta fase crucial de la evolución y poner a prueba observacional nuestro entendimiento actual y modelos computacionales.

Primero analizamos la velocidad de efusión en un conjunto de más de 50 modelos de viento y su dependencia en los parámetros estelares básicos. Estos vientos son ricos en carbono, generados por presión de radiación sobre polvo y saturados. Encontramos que tales vientos siguen la relación $v_{\text{out}} \propto (L/M)^{0.6}$. En contraste con los vastos cambios en la tasa de pérdida de masa en la fase final de la efusión, esta relación sugiere variaciones modestas en la velocidad del viento, aún durante un pulso termal, lo que nos permite relacionar un perfil de densidad actual de la envoltura exterior de una nebulosa planetaria con su historial previo de pérdida de masa.

Posteriormente obtuvimos perfiles de densidad modelados por los historiales de pérdida de masa y diluidos de acuerdo a la ecuación de continuidad. Comparamos éstos con los halos de las siguientes NPs: CN 1-5, IC 2165, NGC 2022, NGC 2438, NGC 2792, NGC 2867, NGC 3918, NGC 6826, NGC 7662. Usamos emisión en $H\alpha$, $24 \mu\text{m}$ y $4.5 \mu\text{m}$ para hacer esta comparación. Las caídas en la densidad de los halos que encontramos tienen características similares a las caídas en la emisión observada.

También hemos llevado a cabo una comparación directa a través de observaciones de $^{13}\text{CO}(1-0)$ y $^{13}\text{CO}(2-1)$ en el halo neutro, y aún no perturbado, de NGC 6826, una nebulosa planetaria joven y ligeramente elíptica. Hemos reproducido las líneas observadas

usando perfiles de densidad predichos por nuestros modelos y transferencia radiativa sin considerar equilibrio termodinámico local (non-LTE por sus siglas en inglés non Local Thermodynamic Equilibrium) y condiciones de excitación colisional apropiadas.

De manera que podemos concluir que los halos exteriores de las nebulosas planetarias pueden ser descritos principalmente mediante los historiales de pérdida de masa, los cuales podemos calcular adecuadamente. Llegamos a esta conclusión al observar que la velocidad de expansión no varía de manera dramática en la evolución de la estrella, ajustando perfiles de densidad obtenidos a partir de modelos numéricos de historiales de pérdida de masa, además de mediante observaciones de ^{13}CO en el halo de NGC 6826.