

# TRANSPORTE RADIATIVO EN LÍNEAS MOLECULARES:

## APLICACIONES EN ASTROFÍSICA

Andrés Asensio Ramos

[aasensio@iac.es](mailto:aasensio@iac.es)

Tesis doctoral dirigida por Javier Trujillo Bueno (IAC-CSIC) y José Cernicharo Quintanilla (DAMIR-CSIC)

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias

Fecha de lectura: 2 de julio de 2004

Esta tesis presenta el desarrollo de una serie de métodos y técnicas para resolver problemas de transporte radiativo en líneas moleculares, y su aplicación en algunos campos de investigación en astrofísica molecular.

Nuestro primer objetivo ha consistido en el desarrollo de un eficiente código de transporte radiativo para líneas moleculares en atmósferas estelares con geometría esférica y campos de velocidad macroscópicos, sin suponer Equilibrio Termo-dinámico Local (ETL). Para resolver tales problemas de transporte radiativo, es necesario primero calcular las concentraciones moleculares en cada punto del medio. Para tal fin, hemos desarrollado un código que permite obtener las abundancias moleculares, suponiendo la aproximación de equilibrio químico instantáneo. Como en los plasmas astrofísicos las escalas de tiempo dinámicas suelen ser menores que los tiempos de formación de moléculas, hemos desarrollado también un código que permite obtener la variación en el tiempo de las abundancias moleculares, mediante la resolución de las ecuaciones de evolución química. Este tipo de ecuaciones deben estar basadas en una red de reacciones suficientemente realista para cada problema particular. Hemos aplicado estas técnicas para solucionar varios problemas clave en física solar y estelar, como el enigma del gas frío en las atmósferas de tipo solar.

En esta tesis mostramos en detalle cómo generalizar a geometría esférica los métodos iterativos más rápidos de solución de problemas de transporte radiativo que existen actualmente: el método de la iteración  $\Lambda$  acelerada (basado en el método de Jacobi) y los métodos iterativos desarrollados por Trujillo Bueno & Fabiani Bendicho (1995), los cuales están basados en la iteración Gauss-Seidel y SOR. Mostramos que las excelentes propiedades de convergencia de tales métodos en atmósferas

plano-paralelas se mantienen en geometría esférica. La tasa de convergencia de estos métodos es muy alta, con un tiempo de cómputo por iteración semejante al de la iteración  $\Lambda$ , siendo además idóneos para la solución de complejos problemas de transporte radiativo en plasmas tridimensionales. El código que hemos desarrollado mediante la implementación de estos métodos de transporte radiativo constituye una herramienta muy poderosa para una gran variedad de aplicaciones en astrofísica molecular, incluyendo el problema, particularmente complejo, del transporte radiativo en máseres astronómicos.

Una parte significativa de esta tesis se centra en la investigación de las propiedades espectro-polarimétricas de las líneas moleculares, con el objetivo de desarrollar nuevas herramientas de diagnóstico para la investigación empírica del magnetismo solar y estelar. Para ello, hemos investigado las señales de polarización producidas por el efecto Zeeman o por procesos de dispersión, incluyendo el efecto Hanle. Por ejemplo, presentamos un método muy general para calcular el efecto de un campo magnético sobre los niveles rotacionales de las moléculas diatómicas, mediante la diagonalización numérica del Hamiltoniano efectivo.

En cuanto concierne a las señales de polarización en líneas moleculares inducidas por el efecto Zeeman, hemos investigado el origen físico de perfiles de polarización anómalos observados en manchas solares, mostrando que son producidos por líneas infrarrojas de CN, las cuales muestran un patrón Zeeman muy particular. Para extraer información empírica de este tipo de observaciones espectro-polarimétricas, hemos desarrollado un código de inversión de perfiles de Stokes inducidos por el efecto Zeeman molecular. Hemos investigado en detalle el espectro de polarización circular, producido por la molécula de CH en la banda G, y

hemos realizado observaciones con novedosos polarímetros que corroboran nuestras predicciones teóricas. Por último, hemos observado por primera vez las señales de polarización producidas por el efecto Zeeman en líneas de FeH en manchas solares, resaltando su potencial interés para explorar empíricamente el magnetismo solar y estelar.

Finalmente, hemos investigado las señales de polarización lineal producidas por procesos de dispersión en líneas de MgH, C<sub>2</sub> y CN, las cuales han sido descubiertas recientemente mediante observaciones espectro-polarimétricas realizadas muy cerca del borde del disco solar. Hemos realizado un análisis exhaustivo de las propiedades de las bandas moleculares que producen señal de polarización lineal. Mediante la aplicación de la teoría cuántica de la polarización, investigamos cómo los procesos de bombeo óptico inducen desequilibrios en las poblaciones de los subniveles magnéticos

pertenecientes a cada nivel molecular e interferencias mecano-cuánticas entre ellos y cómo la presencia de débiles campos magnéticos modifica esta polarización atómica (y la polarización lineal emergente) a través del efecto Hanle. Enfatizamos que una interpretación rigurosa de la polarización por dispersión observada en las líneas moleculares requiere abandonar el uso de modelos unidimensionales de la atmósfera estelar y utilizar en su lugar modelos hidrodinámicos tridimensionales que describen la inhomogeneidad y el estado dinámico del plasma. Teniendo en cuenta la diferente sensibilidad al campo magnético que tienen las líneas de C<sub>2</sub> observadas, hemos sido capaces de poner algunas restricciones a las distribuciones de campo magnético turbulento en las zonas granulares, constatando que los campos magnéticos en tales zonas del plasma solar deben ser muy débiles.

## ESTUDIO INFRARROJO DE ESTRELLAS OH/IR GALÁCTICA

Francisco M. Jiménez Esteban

Francisco.Jimenez-Esteban@hs.uni-hamburg.de

Tesis doctoral dirigida por Pedro Gracia Lario y Dieter Engels

Centro: ESAC-Estación de Seguimiento de Satélites ESA

Fecha de lectura: 23 de julio de 2004

En esta tesis presentamos un estudio de estrellas OH/IR galácticas llevado a cabo principalmente en el rango de longitudes de onda del infrarrojo, aunque para el análisis también hemos usado datos en el óptico y radio.

En primer lugar, hemos analizado 371 fuentes *IRAS* pertenecientes a la llamada ‘muestra de Arecibo’ de estrellas OH/IR. Se ha obtenido astrometría y fotometría en el infrarrojo cercano, y determinado las principales propiedades fotométricas de la muestra. Los pocos objetos sin contrapartida en el infrarrojo cercano han sido identificados como variables OH/IR fuertemente oscurecidas o como OH/IR no variables al comienzo de la fase post-AGB. La distribución relativa en el diagrama de colores *IRAS* [12]–[25] vs. [25]–[60] de las fuentes con y sin contrapartida óptica, al igual que sus característicos colores en el infrarrojo cercano, se han interpretado como una consecuencia del incremento del espesor óptico de sus envolturas circunestelares (ECS). La conexión entre los datos en el infrarrojo cercano y medio ha sido estudiada con la

ayuda del diagrama de colores K–[12] vs. [12]–[25], encontrando una clara correlación. Ésta ha sido interpretada como un indicador del incremento de la contribución de la emisión en el infrarrojo medio (procedente del polvo frío de la ECS) con respecto a la del infrarrojo cercano (procedente de la estrella central y del polvo caliente que la rodea) sobre el total de la distribución espectral de energía. Así, la distribución de las estrellas OH/IR observada en diagrama K–[12] vs. [12]–[25] se explica como la consecuencia de los diferentes espesores ópticos de sus ECS.

Posteriormente, se ha realizado el mismo análisis a una muestra de 94 estrellas OH/IR mucho más enrojecidas pertenecientes al catálogo GLMP, encontrando que sus propiedades fotométricas son una extensión de las encontradas para la ‘muestra de Arecibo’.

Como un subproducto, hemos creado el atlas de estrellas OH/IR más extenso existente hasta la fecha. Este atlas consiste en cartas de identificación en el óptico y en el infrarrojo cercano para un total