



Universidad de Guanajuato

División de Ciencias Naturales y Exactas

Departamento de Astronomía

Guanajuato, México

**Hydrodynamical Simulations
of Jets and Outflows
in AGNs**

TESIS

que para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias
(Astrofísica)**

P R E S E N T A:

Francisco Rendón Acosta

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Solai Jeyakumar

Junio del año 2013

ÍNDICE GENERAL

Índice general	I
Agradecimientos	VII
Abstract	IX
Resumen	XI
1 Introducción	1
1.1. Núcleos Galácticos Activos	1
1.2. Marco Histórico	2
1.3. Características Observacionales de un AGN	3
1.3.1. Líneas de emisión	3
1.3.1.1. Región de Líneas Anchas	3
1.3.1.2. Región de Líneas Angostas	3
1.3.2. Tipos de AGNs	4
1.4. El Modelo de un AGN	4
1.4.1. Modelo de Unificación de AGNs	5
1.5. Radio Galaxias	6
1.5.1. Emisión en una Radio galaxia	8
1.5.2. Radio Galaxias FR I y FR II	8
1.6. Flujos de gas en AGNs	9
1.6.1. Medición de flujos	9
1.6.2. Observación de flujo de gas	10
1.6.3. Mecanismos impulsores de flujo	10
1.7. Objetivo de la Tesis	11
2 MHD y el Código JIX	13
2.1. Magnetohidrodinámica	13
2.2. Ecuaciones MHD	14
2.2.1. Conservación de masa	14
2.2.2. Conservación de momentum	16
2.2.3. Conservación de la energía	18

2.2.4.	Evolución del campo Magnético	18
2.3.	Ecuaciones MHD ideales en forma conservativa	19
2.4.	Métodos Numéricos	20
2.4.1.	Característica de la solución de las ecuaciones MHD	22
2.4.2.	Método de Strang-Splitting	23
2.4.2.1.	El Método de Godunov	24
2.4.3.	El Problema de Riemann	27
2.4.4.	Soluciones aproximadas al problema de Riemann	29
2.4.4.1.	Método HLL	29
2.4.4.2.	Método HLLC	30
2.5.	El código JIX	32
2.5.1.	Funcionamiento del código JIX	32
3	Enfriamiento del gas	35
3.1.	Términos de enfriamiento e ionización en MHD	35
3.1.1.	Pérdidas Radiativas	37
3.1.1.1.	Pérdida de energía por Radiación colisional-mente excitada	38
3.1.1.2.	Pérdida de energía por radiación libre-libre	38
3.1.1.3.	Pérdida de energía por ionización y recombinación	39
3.1.1.4.	Pérdidas radiativas en función de n_{tot}	39
3.1.2.	Densidad electrónica total $n_{\text{el}}^{\text{tot}}$	40
3.2.	Ecuaciones de ionización y enfriamiento en unidades escaladas	42
3.2.1.	Balance de ionización en equilibrio	43
3.3.	Rigidez	46
3.3.1.	Tiempos de paso	46
3.3.2.	Solución de la rigidez	47
3.4.	Pruebas	48
3.4.1.	Prueba 1: Fracciones de ionización en equilibrio	48
3.4.2.	Prueba 2: Una onda de choque	51
4	Simulaciones de jets con ionización en el medio	57
4.1.	Configuración de la simulación	57
4.1.1.	Características computacionales de la Simulación	58
4.2.	Lectura y extracción de datos	59
4.3.	Velocidad de la línea de [OIII]	60
4.4.	Escalamiento del <i>jet</i>	61

5 Resultados y Conclusiones	63
5.1. Evolución del jet	63
5.2. Velocidad de la línea de [OIII]: Comparación con observación	65
5.3. Conclusiones	67
5.4. Trabajo futuro	67
A Coeficientes de ionización y recombinación	69
A.1. Coeficientes de Ionización	69
A.2. Coeficientes de Recombinación	70
B Escalamientos	73
B.1. Factores de escala: densidad y presión	73
B.2. Factores de escala: longitud, velocidad y tiempo	74
B.3. Escalamiento del problema de choque radiativo	75
C Perdidas radiativas	77
C.1. Fracciones iónicas y electrónicas	77
C.2. Pérdida de energía por radiación colisionalmente excitada . .	78
C.3. Pérdida de energía por radiación libre-libre	78
C.4. Pérdida de energía por ionización y recombinación	80
Referencias	83

*A mes très chers parents ...
Francisco & Josefina.*

AGRADECIMIENTOS

“*Nunca pierdas la santa curiosidad*”, dijo una vez Albert Einstein. Esta frase la recuerdo cada día por la mañana, cuando miro el amanecer a través de mi ventana. Pienso que es gracias a la curiosidad, que las grandes mentes humanas han descubierto el conocimiento a lo largo de la historia. Es la curiosidad la que me impulsa a conocer y comprender este enigmático universo en el que me ha tocado vivir.

Hace aproximadamente tres años inicié un viaje en el mundo de la Astronomía; un viaje que, con la culminación del presente trabajo llega a su fin. Muchas personas están involucradas con él y por ende, debo rendirles agradecimiento, porque es gracias a ellas, que mi meta ha sido satisfactoriamente alcanzada.

Primero que nada, agradezco a mi asesor, el DR. SOLAI JEYAKUMAR, quien me brindó la oportunidad de desarrollar el presente trabajo bajo su supervisión. Le doy gracias por todas sus enseñanzas y consejos (que aplicaré en todo lo que me sea posible), por su profesionalismo como científico, y por todo el tiempo que invirtió, a mi lado, en el desarrollo de este trabajo. Por la convivencia sana tanto en el ambiente de trabajo como en lo personal, y por aquellas deliciosas comidas indúes que tuve la oportunidad de degustar.

Agradezco al comité de sinodales conformado por el DR. CESAR AUGUSTO CARETTA, el DR. ÉRICK NAGEL VEGA, el DR. DENNIS JACK y el DR. JUAN PABLO TORRES PAPAQUI, por el tiempo y dedicación que invirtieron al examinar y criticar constructivamente el presente trabajo de tesis.

Agradezco, también, a mis profesores, quienes me brindaron las herramientas necesarias para convertirme en astrónomo. En especial al DR. HÉCTOR BRAVO ALFARO y al DR. ROGER COZIOL por haberme dado ánimos cuando al inicio de este viaje tuve la intención de claudicar.

Además, agradezco a mis amigos MARCEL y YOGA, porque, a pesar de nuestros puntos de vista tan opuestos, logramos formar fuertes lazos de amistad. En particular, agradezco a Marcel por sus enseñanzas en plano de la física.

Finalmente, pero sin restar importancia, brindo mi eterno agradecimien-

Agradecimientos

to a las tres personas más importantes en mi vida: mi padre FRANCISCO, mi madre JOSEFINA y mi hermana NEYVA. Porque, a pesar de la distancia, siempre han estado conmigo tanto en los momentos de alegría como en los de dudas y debilidad. Además, por brindarme todo su apoyo y comprensión durante todo este tiempo.

*Un viaje ha finalizado,
pero otro habrá de iniciar,
me he dado cuenta que
en el mundo de la Astronomía
quiero por siempre habitar...*

ABSTRACT

Many Active Galactic Nuclei (AGNs) show outflows in nuclear regions and also in kiloparsec scales. Particularly, radio galaxies of types Fanaraff-Rieley (FR) I and II show ionized and neutral outflows. It's believed that such outflows are produced by the interaction of the relativistic jets, launched from the AGNs, with the ambient medium. Such interaction, from the computational point of view, can be studied by solving the magnetohydrodynamical equations (MHD), which describe the jet propagation. However, in order to study the behaviour of the observed outflow, using the [OIII] line, one needs to take into account cooling and ionization processes.

The dynamics of the jets is studied by using an MHD code, called JIX. The set of MHD equations: conservation of mass, momentum, energy, and the evolution of the magnetic flux (which is derived via Maxwell's equations and Ohm's law) needs an additional equation to be solvable: an equation of state. Also, a source term due to radiative losses is added to the energy equation. This system of equations is non-homogeneous. By applying the strang-splitting method a solution can be found; Godunov's method is used for solving the associated homogeneous system of equations.

To simulate the ionization and cooling of the gas, a cooling module (written in FORTRAN language) has been developed, this module can use any of the ionization states of the elements shown in the spectrograms of the AGNs. The module implements updated atomic coefficients (of ionization and recombination). Euler's method is used for solving the integration in real time for the ionization and cooling of the gas. Due to different time scales of the physical processes involved in the cooling model, at some time steps the system becomes stiff. In such a scenario a subcycling method is used for solving the stiffness of the equations. The cooling curve used by this module includes more emission lines and is extended to low temperatures, as calculated by Schure et al. (2009). After coupling the cooling module to the JIX code, some test problems of radiative shocks and ionization equilibrium states have been simulated. These results agree with the previous calculations by Teşileanu et al. (2008), but the effect of the updated cooling curve on the dynamics of the radiative shocks is relevant for the jet

simulations.

The code is used to study the interaction of the jets with the ambient medium. A simulation of a (cylindrical) jet propagating through a constant density medium has been carried out. The jet is simulated in two-dimensions in cartesian coordinates. The scaled jet power is similar to that of the FR II galaxies. Also, the mean velocity of the [OIII] line is computed as a function of the distance using the second power of the density of the OIII as the weighting function.

In this simulation the radio structure of a typical galaxy is observed: lobe, bow-shock, back flow, jet-shock, among others. Also, the flux velocity of [OIII] line, obtained using the simulation, is compared to the observations by Tadhunter (1991). It is found that the velocity in such a simulation increases by a factor of 3, from the center to the outer regions, which is similar to the observed variation.

RESUMEN

Muchos Núcleos Galácticos Activos (AGNs) muestran flujos de gas en regiones nucleares y también a escalas de kiloparsecs. En particular, las radio galaxias de tipo Fanaraff-Riley (FR) I y II muestran flujos de gas ionizado y neutro. Se cree que estos flujos están producidos por la interacción de los *jets* relativistas eyectados por los AGNs con el medio ambiente. Esta interacción se puede estudiar, desde el punto de vista computacional, resolviendo las ecuaciones magnetohidrodinámicas (MHD) de la propagación de los *jets*. Sin embargo, para estudiar el comportamiento del flujo observado, mediante la línea de [OIII], se deben considerar dos procesos físicos como el enfriamiento y la ionización.

La dinámica de los *jets* se estudia mediante el uso de un código MHD, llamado JIX. Al conjunto de ecuaciones MHD: conservación de masa, conservación de momentum, conservación de energía y evolución del flujo del campo magnético (ésta última calculada vía las ecuaciones de Maxwell y la ley de Ohm) se le debe agregar una ecuación de estado para que el sistema pueda ser solucionado. Además, a la ecuación de energía se le incorpora un término de fuente debido a la pérdida de energía radiativa. Este sistema no homogéneo es resuelto aplicando el método de *strang-splitting*, y se utiliza el método de Godunov para resolver la parte homogénea del sistema resultante.

Para simular la ionización y el enfriamiento del gas, se ha desarrollado un módulo (en lenguaje de FORTRAN) que está construido para utilizar cualquier número de estados de ionización de los elementos presentes en los espectros de los AGNs. Este módulo implementa coeficientes atómicos (ionización y recombinación) actualizados. Se utiliza el método de Euler de primer orden para resolver la integración de la evolución en tiempo real de la ionización y el enfriamiento del gas. Debido a las escalas de tiempo de los dos procesos físicos inmiscuidos en el módulo de enfriamiento, en ciertas etapas de tiempo el sistema completo se vuelve rígido; por lo que, en tal caso se utiliza un método de sub-ciclo para solucionar el problema de la rigidez. En este módulo se usa la función de enfriamiento más reciente calculada por Schure et al. (2009), que incorpora más líneas de emisión y es

extendida a bajas temperaturas. Con el acoplamiento del módulo de enfriamiento al código JIX (que resuelve las ecuaciones MHD) se han simulado problemas ejemplos de choque radiativo y estado de ionización en equilibrio. El resultado obtenido se compara bien con los cálculos previos hechos por Teşileanu et al. (2008). Se encuentra que la curva de enfriamiento más actualizada afecta la dinámica de choques radiativos, lo cual tiene relevancia en las simulaciones de radio *jets*.

Utilizando este código para estudiar la interacción de los *jets* con el medio ambiente, se ha simulado la propagación de un *jet* (cilíndrico) en un medio de densidad constante. La simulación se ha realizado en coordenadas cartesianas en dos dimensiones, y se ha asumido una potencia cinética del *jet* representativa de las galaxias FR II. Con los datos arrojados por la simulación se ha calculado la velocidad promedio del [OIII] como una función de la distancia utilizando el cuadrado de la densidad del [OIII] como función de peso.

En esta simulación se observa parte de la estructura de una radio galaxia típica: un choque de proa, flujo en reversa, el choque-*jet*, entre otros. Además, se ha comparado la velocidad de flujo de la línea de [OIII] con el resultado observacional de Tadhunter (1991), encontrándose que la dependencia de la velocidad del flujo de gas en la simulación aumenta, por un factor de 3, con la distancia del centro, casi similar que la variación observada.