Contents

1 Introducción **5**

2 GENESIS: A high–resolution code for 3D RHD **15**

2.1 Introduction 15

2.2 Equations of RHD in conservation form 17

2.3 The relativistic hydrodynamic code GENESIS 20

2.3.1 Code structure 20

2.3.2 Memory requirements 22

2.3.3 Domain decomposition 23

2.3.4 Boundary conditions 24

2.3.5 Spatial reconstruction 24

2.3.6 Source terms 25

2.3.7 Computation of the numerical fluxes 25

2.3.8 Time advance and time step computation 26

2.3.9 Recovering primitive variables 27

2.3.10 Some notes on code structure 27

2.4 Code Testing 29

2.4.1 Mildly Relativistic Riemann Problem (MRRP) 29

2.4.2 Relativistic Planar Shock Reflection (RPSR) 31

2.4.3 Relativistic Spherical Shock Reflection (RSSR) 33

2.5 Code Performance 39

2.6 Conclusions 43

3 High–Resolution 3D Simulations of Relativistic Jets 45

3.1 Extragalactic jets 45

3.1.1 Phenomenology 46

3.1.2 The standard model 51

3.1.3 Numerical simulations 57

3.2 3D Hydrodynamical simulations of large–scale jets 60

3.2.1 An axisymmetric jet in 3D 60

3.2.2 General considerations 65

3.2.3 Morphology and dynamics of 3D relativistic jets 66

3.2.3.1 Cocoon 67

3.2.3.2 Beam and hot spot 69

3.2.3.3 Beam/cocoon shear layer 70

3.2.3.4 Jet propagation efficiency and disruption 72

3.2.4 Other models 77

3.2.4.1 Cocooun 79

3.2.4.2 Beam and Hot spot 80

3.2.4.3 Beam/cocoon shear layer 87

3.2.4.4 Jet advance and disruption 89

3.3 Emission from 3D relativistic jets 92

3.3.1 Jet Stratification: Beam and Shear Layer 97

3.3.2 Emission properties 98

3.3.2.1 Total and polarized emission stratification as a function of the viewing angle 99

3.3.2.2 Jet cross section emission asymmetry 102

3.3.3 Discussion and conclusions 105

4 Relativistic jets from Collapsars. 107

4.1 Phenomenology 107

4.1.1 The standard model: the relativistic fireball 113

4.1.2 Models for the central engine 115

4.1.3 An afterglow model 119

4.1.3.1 Emission properties 119

4.1.4 Are GRBs Jet–like structures? 121

4.2 Numerical simulations 125

4.3 Relativistic jets from collapsars 126

4.3.1 Initial model and the numerical setup 127

4.3.2 Equations of Special RHD in a spherical gravitational background 129

4.3.3 Equation of State 132

4.3.4 Constant and moderate energy deposition rate 134

4.3.5 Constant large energy deposition rate 149

4.3.6 Rapidly varying energy deposition rate 154

4.3.7 Evolution after shock breakout 157

4.4 Conclusions and outlook 167

A Characteristic fields of the RHD equations 171

B An Efficient Implementation of Flux Formulae
in Multidimensional Relativistic Hydrodynamical Codes 173

C Explicit algorithm to recover primitive variables 183

D Transfer equations for the synchrotron radiation 185

References **190**

Chapter 1

Introducción

La presente memoria está dedicada al estudio, por medio de simulaciones numéricas, de dos escenarios astrofísicos: los *chorros extragalácticos* y las *erupciones de rayos gamma* (ERG). Ambos fenómenos tienen en común la presencia de material moviéndose a velocidades cercanas a las de propagación de la luz en el vacío y, por tanto, su evolución dinámica puede tratarse convenientemente utilizando las ecuaciones de la Hidrodinámica Relativista.

Los chorros extragalácticos son canales de plasma magnetizado que se propagan (sin perder apreciablemente su colimación) desde los núcleos de algunas galáxias (galáxias activas) hasta adentrarse en el medio intergaláctico (pudiendo alcanzar longitudes de varios megaparsecs) y son detectados fundamentalmente por su emisión en radio frecuencia.

Las ERG son fenómenos esporádicos de alta energía cuyo espectro presenta una enorme variabilidad temporal y energética. Están constituidos por fotones muy duros de energías comprendidas entre varios centenares de keV y algunos MeV y son observados fundamentalmente en la región gamma del espectro, aunque también emiten parte de su energía en las bandas X, radio y óptico.

Ambos fenómenos están formalmente relacionados, dado que existe un mecanismo común de formación, a saber, el acrecimiento de material sobre un agujero negro (AN, en adelante) central en rotación que, por procesos púramente hidrodinámicos o magneto-hidrodinámicos da lugar a la transformación de enegía gravitacional en energía cinética. El resultado de esta conversión energética es la eyección de material en la dirección del eje de rotación del sistema formado por el AN y el disco de acrecimiento que le rodea. Tales eyeciones de material son colimadas por mecanismos magneto-hidrodinámicos (en el caso de chorros extragalácticos) o por confinamiento inercial (en el caso de ERGs), y pueden llegar a alcanzar velocidades relativistas.

A pesar de las similitudes entre ambos escenários, también los separan múltiples diferencias. Por ejemplo, el "motor central" del los chorros extragalácticos es un AN supermasivo (de $10^7 M_\odot - 10^9 M_\odot$), mientras que las ERG se supone que están vinculadas a AH estelares (es decir, de unas pocas masas solares). El mecanismo de aceleración es también distinto. Los chorros son acelerados por mecanismos magneto-hidrodinámicos; las ERG por la deposición de energía y momento (cerca de las regiones axiales) debida a procesos de aniquilación de neutrinos conducentes a la creación de pares electrón-positrón (que a su vez se aniquilan para formar fotones de alta energía). Así mismo, el medio que rodea al lugar de formación es muy diferente en ambos casos. Los chorros extragalácticos se forman en los núcleos de galáxias activas en regiones con tamaños típicos de $\sim 10^{11}$ cm y con densidades muy pequeñas. Las EGR se originan en regiones típicas de $\sim 10^6$ cm y las densidades son muy elevadas (corresponden a las existentes en los núcleos de estrellas masivas). Por supuesto, el medio a través del que se propagan es también muy distinto, sobre todo, en las etapas iniciales: las ERG están originadas, presumiblemente, en el seno de estrellas masivas o en las regiones de coalescencia de sistemas binarios compactos; los chorros extragalácticos se propagan inicialmente a través de regiones de mucho menor densidad y presión en el interior de los cúmulos estelares que existen en los núcleos galácticos.

Es notable, sin embargo, que ambos fenómenos pueden estudiarse empleando una aproximación *tipo fluido*. Ello permite estudiar su evolución mediante las ecuaciones de la Hidrodinámica Relativista. No obstante, dadas las peculiaridades de cada fenómeno, además de estas ecuaciones son necesarios otros ingredientes para su simulación numérica. Uno de esos ingredientes, es el adecuado tratamiento del campo gravitatorio. En el caso de los chorros extragalácticos, si pretendemos estudiar su evolución a distancias suficientemente grandes del AN central, el campo gravitatorio no es importante y puede abordarse su estudio en el marco de la Relatividad Especial. La formación de ERGs necesita de la inclusión del campo gravitatorio en los cálculos, puesto que se generan a distancias del AH a las cuales la gravedad sigue siendo importante. Además, ese campo gravitatorio es necesario para mantener la estructura material de la estrella o de la región de mezcla de un sistema binario compacto (esto es, para equilibrar la tendencia disgregadora de la presión del sistema). Otro ingrediente importante es la ecuación de estado empleada. Los chorros extragalácticos están razonablemente bien caracterizados por ecuaciones de estado del tipo gas ideal (aunque, por supuesto, sería muy interesante considerar los efectos dinámicos de ecuaciones de estado más realistas que consideraran la existencia de un plasma formado por pares electrón-positrón). Las ERG necesitan, al menos, incluir los efectos de la radiación y los pares electrón-positrón en equilibrio con la materia, puesto que en las etapas de formación, estas ERG son ópticamente gruesas, lo que significa que los fotones no pueden escapar libremente del sistema, de modo que contribuyen significativamente en la termodinámica del mismo.

La simulación numérica de estos fenómenos requiere como parte esencial la construcción de un código robusto que resuelva numéricamente las ecuaciones de la Hidrodinámica Relativista. Esta parte técnica se complica enormemente cuando se consideran simulaciones multidimensionales y, particularmente en tres dimensiones espaciales (3D). GENESIS es un código hidrodinámico, relativista, multidimensional, de alta resolución en la captura de choques que se ha desarrollado para abordar problemas astrofísicos generales que involucren un tratamiento hidrodinámico y relativista. La pieza clave a partir de la que se construye un código de este tipo (*tipo Godunov*), es el resolvedor de problemas de Riemann[1]. La idea básica de los métodos tipo Godunov es discretizar una solucion física sobre una malla numérica y tomar en cada nodo de esa malla el valor medio de cada variable en un entorno del nodo (este entorno es la celda computacional). El proceso de promediado espacial introduce discontinuidades en las interfases de las celdas computacionales. A su vez, la presencia de discontinuidades da lugar a *flujos* de las variables promediadas hacia (o

[1]Un problema de Riemann es un problema unidimensional de valores iniciales discontínuos que, tiene una solución analítica conocida en el caso de las ecuaciones de la Hidrodinámica.

desde) las celdas adyacentes, cuyo valor puede calcularse resolviendo los problemas de Riemann correspondientes a cada interfase. Tras evaluar los flujos espaciales, la evolucion temporal del sistema hasta un instante de tiempo posterior, puede determinarse mediante un método explícito de alto orden. De esta forma se obtiene la solución numérica en el instante $t^n + 1$ partiendo de los valores en el instante t^n.

GENESIS permite, dada su modularidad, la posibilidad de utilizar cualquiera de los resolvedores linealizados existentes en la literatura. Particularmente, las aplicaciones que se muestran en esta memoria se han realizado utilizando el resolvedor (o fórmula de flujos) de Marquina (Marquina *et al.* 1992). La resolución espacial se incrementa utilizando una interpolación parabólica monótona (PPM; *Piecewise Parabolic Method*) de tercer orden. Las capacidades y rendimiento de GENESIS tanto en ejecuciones secuenciales como en paralelas (para las que ha sido preparado) se han analizado en el capítulo 2 de esta memoria. En concreto, en dicho capítulo, se presentan los resultados de una batería extensa de tests numéricos que demuestran que el código puede capturar y evolucionar con precisión choques fuertes en 3D. El código es multiplataforma, y ha sido probado con éxito en varias arquitecturas computacionales (HP y SGI), aunque en el futuro se pretende utilizar GENESIS en superordenadores masivamente paralelos con memoria distribuida (en la actualidad se está utilizando en arquitecturas multiprocesadoras de superordenadores con memoria central compartida).

En el campo numérico hemos estudiado la implementación eficiente de las fórmulas aproximadas de flujos en varias dimensiones espaciales. Estas fórmulas de flujos son una pieza clave en cualquier código numérico basado en técnicas tipo Godunov y, en problemas hidrodinámicos suelen ser una de las partes que demandan más tiempo de cálculo (dada su complejidad). Las expresiones que se dan en el Apéndice B generalizan (e incluyen) en el ámbito analítico a otras dadas por diferentes autores (además de incluir prescripciones para aumentar el rendimiento computacional).

Se han realizado las primeras simulaciones numéricas de alta resolución en tres dimensiones espaciales de chorros relativistas alcanzando el haz del chorro factores de Lorentz 7 (publicadas en Aloy *et al.* 1999b). El material que compone el chorro (así como también el medio que lo rodea), se describe empleando una ecuación de estado de gas ideal (de tipo politrópico). La resolución espacial de estas simulaciones ha sido de 8 celdas computacionales por cada radio del haz (el radio del haz, R_b, es una escala de longitud característica del sistema). Las simulaciones se han realizado en coordenadas cartesianas y GENESIS se ha modificado levemente para incluir una nueva ecuación de adveción para la variable fracción másica de partículas del haz en cada celda computacional (f). Esta nueva variable conservada no requiere cambio alguno en el resolvedor de problemas de Riemann, dado que las partículas del haz son advectadas con el fluido. La evolución de los chorros se ha seguido hasta alcanzar ~ 75 unidades de tiempo normalizado. Durante ese periodo hemos analizado la morfología y la dinámica de los chorros relativistas tridimensionales (véase capítulo 3).

Con objeto de inducir fenómenos genuinamente tridimensionales se han introducido perturbaciones de tipo helicoidal sobre el campo de velocidades en el punto de injección de un modelo de referencia axisimétrico 3D que, a su vez, nos sirve para calibrar y comparar nuestras simulaciones con las ya existentes en el caso 2D axisimétrico (Martí *et al.* 1997). Las perturbaciones dependen de dos parámetros: amplitud de la perturbación y frecuencia de giro, cuya influencia en la dinámica se ha estudiado considerando varios modelos (con perturbaciones de mayor o menor amplitud y de alta o baja frecuencia).

Nuestras simulaciones muestran multitud de elementos novedosos respecto a otras semejantes en dos dimensiones espaciales (2D) y, por supuesto, respecto a las simulaciones 3D clásicas. Del análisis de los resultados se desprende que en 3D no aparecen contraflujos coherentes extremadamente relativistas que si estaban presentes en los modelos 2D axisimétricos. Así mismo, se ha encontrado que cuando los jets son expuestos a pequeñas perturbaciones no axisimétricas, (i) no muestran las fuertes perturbaciones exitentes en modelos 3D clásicos, tanto hidrodinámicos como magnetohidrodinámicos (al menos durante el periodo de tiempo cubierto por nuestros cálculos), y (ii) los chorros se propagan a velocidades próximas a la estimación unidimensional (1D). Ello se explica como consecuencia, fundamentalmente, de dos hechos: la primera es el tiempo de evolución de nuestros modelos, que está un par de órdenes de magnitud por debajo del de una radio fuente extragaláctica real; la segunda es la resolución con que se han realizado las simulaciones que, pese a ser la mayor las utilizadas hasta la fecha en 3D, puede no ser suficiente para capturar con precisión algunas de las escalas de relevancia en el proceso de interacción chorro-medio externo (el efecto de la resolución se puso de manifiesto en Aloy *et al.* 1999a al comparar la morfodinámica del mismo chorro usando mallas de 4 y 8 celdas/R_b en 3D, y 20 celdas/R_b en el mismo modelo 2D axisimétrico). Otro elemento destacable es que las pequeñas perturbaciones 3D inducen en el haz relativista una distribución de velocidades aparentes de grupo semejante a la observada en M87.

La parte final capítulo 3, presenta las primeras simulaciones de radioemisión procedentes de modelos relativistas tridimensionales de alta resolución, cuyo principal objetivo es el estudio de las implicaciones observacionales de la interacción entre el chorro y el medio externo (Aloy *et al.* 1999c). Como consecuencia de tal interacción aparece una estratificación natural del chorro, consistente en una "espina" central rápida (parte más interna del haz), rodeada por una capa de fricción caracterizada por una elevada energía interna específica y un campo de velocidades progresivamente decreciente (respecto a la dirección normal al eje del jet). La estratificación y, en particular, la relativamente alta energía interna y la baja velocidad del fluido en la capa de fricción, determinan en gran medida la emisión del chorro. Es de señalar que la estratificación del chorro es el resultado del cálculo y no ha sido impuesta *a priori* (tal como han hecho otros autores para estudiar numéricamente las propiedades de las capas de fricción entre el haz y el medio ambiente).

La inclusión *ad hoc* de diferentes configuraciones de campo magnético en el chorro ha permitido extraer consecuencias observaciones importantes. Si, por ejemplo, el campo magnético en la capa de fricción combina un campo helicoidal (quizás inducido por el efecto de fricción actuando sobre un campo magnético alineado con el eje del jet que se une a un campo magnético toroidal) la emisión se observa que muestra una asimetría en sobre la sección transversal del chorro (respecto a la dirección normal al eje del chorro). Tal asimetría, además del abrillantamiento hacia los bordes o hacia la espina central, se debe al efecto relativista de *aberración de la luz* y es función del ángulo de visión y de la velocidad del fluido, y puede cambiar su sentido si el chorro cambia su dirección con respecto al observador (debido a su interacción con el medio externo), o presenta un cambio en velocidad. La asimetría es más notable en el flujo polarizado, a resultas de la cancelación (o amplificación) del campo a lo largo de la línea de visión. Suponiendo que el modelo es válido, hemos interpretado las observaciones de polarización del *blazar* 1055+018 realizadas por Attridge, Roberts y Wardle (1999), concluyendo que el jet de esta fuente se está decelerando, y que tal deceleración es la responsable del cambio brusco en la polarización (entre las partes superior e inferior del chorro).

El último capítulo lo ocupa el estudio de flujos colimados relativistas propuestos, en el modelo de *collapsar*, como un mecanismo para generar erupciones de rayos gamma. Empleando el modelo de collapsar de MacFadyen y Woosley (1999) como progenitor de una ERG, se ha simulado la propagación de un chorro relativista a través del manto y la envoltura de una estrella masiva en rotación que colapsa. Para estas simulaciones ha sido necesario modificar el código GENESIS para que incluya un campo gravitacional estático de Schwarzschild semejante al producido por el AN central en el modelo de collapsar. Adicionalmente, se ha incluido en GENESIS una ecuación de estado analítica (Witti, Janka y Takahashi 1994) que incluya las contribuciones de la radiación, de los pares electrón-positrón y de nueve gases de Boltzman ideales que se corresponden con los núcleos de siete elementos representativos del sistema, protones y neutrones. Esto es necesario porque con una ecuación de estado de gas ideal con exponente adiabático constante estariamos representando incorrectamente bien el chorro caliente y dominado por la presión de radiación y los pares, bien el resto del manto que es no relativista y está soportado por la presión de los bariones. De este modo, nuestra ecuación de estado es formalmente equivalente a una ecuación de índice adiabático variable. Sin embargo, esta ecuación de estado es sólo aproximada (de hecho, el tratamiento de los pares se realiza haciendo una interpolación entre altas y bajas temperaturas). El modelo inicial de MacFadyen y Woosley se obtiene utilizando la ecuación de estado de Blinnikov, Dunina-Barkovskaya y Nadyozhin (1996), que es más realista (tanto en el tratamiento de los pares como en el de las contribuciones a la presión de los electrones degenerados), aunque las diferencias efectivas entre esta ecuación y la de Witti, Janka y Takahashi (1994) sólo son relevantes en las partes más densas del toro (que se excluyen del modelo inicial al eliminar los 200 km más internos de la estrella sustituyéndolos por una condición de contorno adecuada).

El flujo saliente con forma de chorro se origina como resultado de la deposición de $\sim 10^{50} - 10^{51}$ erg/s en el seno de un cono de 30° alrededor del eje de rotación de la estrella progenitora. El fluido del chorro generado se propaga siguiendo este eje debido a que la rotación del manto crea un canal de baja densidad alrededor de tal eje (debido a la fuerza centrífuga). La distribución de masa del modelo inicial es tal que el fluido del chorro saliente es fuertemente colimado (el chorro presenta un ángulo de apertura menor o del orden de unos pocos grados) por el confinamiento inercial proporcinado por las paredes del canal central y, adicionalmente, mantiene su estructura (altamente colimada) hasta llegar a la superficie de la estrella progenitora ($r \approx 3 \times 10^{10}$ cm).

Para verificar la convergencia de los modelos numéricos se han repetido dos simulaciones (la de $\sim 10^{50}$ erg/s y 10^{51} erg/s) sobre mallas de diferentes tamaños la dirección angular (manteniendo fija la resolución radial), siendo el resultado claramente dependiente de la resolución empleada excepto cuando las mallas son suficientemente finas como para capturar las escalas apropiadas del problema (cosa que sucede para resoluciones efectivas cerca del eje de rotación de medio grado).

Uno de los resultados del presente trabajo es que el máximo factor de Lorentz alcanzado por los modelos justo cuando alcanzan la superficie de la estrella está en el intervalo $20 - 34$. Claramente estos factores de Lorentz están por debajo de los mínimos requeridos desde el punto de vista teórico para explicar las observaciones. Ello ha motivado que se estudiase la propagación del chorro tras haber alcanzado la superficie de la estrella. Naturalmente, dado que nuestro modelo inicial unicamente cubría la estrella progenitora propiamente dicha, ha sido necesario incluir una atmósfera *ad hoc*, cuyas características no se ajustan exactamente a las que cabría esperar en la atmósfera de una estrella Wolf-Rayet (modelo inicial). No obstante, el perfil de la atmósfera (primero gaussiano y enlazando después con una región uniforme) permite estudiar la evolución del chorro tanto en un ambiente progresivamente más diluido y rarificado como en un medio uniforme.

Los principales resultados del análisis de la propagación a través del medio externo son que se produce una mayor acelerción tanto del fluido del haz como de la onda de choque delantera del chorro. Esta aceleración es mayor en la dirección lateral que en la longitudinal (respecto al eje del chorro), tal como se espera teóricamente. Cabe señalar, sin embargo, que nuestras simulaciones sólo cubren una parte pequeña de la evolución de una ERG (de hecho, considerando distancias de propagación, sólo alcanzan entre la décima y la centésima parte de la distancia carácterística a partir de la cual comienzan a ser detectables), por tanto, la extrapolación de nuestros resultados debe ser hecha cuidadosamente. No obstante, es de señalar que la viabilidad del modelo de collapsar como progenitor de erupciones de rayos gamma, depende fuertemente del ritmo de deposición de energía y del perfil del gradiente del medio que rodee a la estrella Wolf-Rayet a través del cual este *proto-ERG* se propaga.