

# **SIMULACIONES NUMÉRICAS EN ASTROFÍSICA**

*Dr. Alfredo J. Santillán González*

*Investigador Titular A, TC de la Unidad de Investigación en Cómputo Aplicado, DGSCA-UNAM  
alfredo@astroscu.unam.mx*

*Ing. Liliana Hernández Cervantes*

*Técnico Académico Asociado C de tiempo completo del departamento de Cómputo del Instituto de  
Astronomía de la UNAM  
liliana@astroscu.unam.mx*

*Dr. José Franco*

*Director del Instituto de Astronomía de la UNAM e Investigador Titular C.  
pepe@astroscu.unam.mx*

## SIMULACIONES NUMÉRICAS EN ASTROFÍSICA

### RESUMEN

Las simulaciones numéricas juegan un papel fundamental para estudiar y entender la evolución de diferentes eventos astronómicos que ocurren en el Universo, ya que estos fenómenos cósmicos necesitan de miles o millones de años para desarrollarse y nos sería imposible llevar un seguimiento puntual debido al tiempo de vida del ser humano. En este trabajo presentamos el valiosísimo papel que ha jugado la simulación numérica en el desarrollo de la astronomía mexicana. Finalmente mostramos ejemplos de simulaciones asociadas a diferentes eventos astronómicos.

**Palabras clave:** Astrofísica, Cómputo, Simulaciones Numéricas, México, UNAM.

## NUMERICAL SIMULATIONS IN ASTROPHYSICS

### ABSTRACT

Numerical simulations play a fundamental role in the study and understanding of the evolution of diverse astrophysical phenomena that occur in the Universe, since many take thousands, or even millions of years to develop. This paper presents the valuable role that numerical simulations have played in the development of Mexican Astrophysics. Several examples of simulations associated to different astronomical events are shown.

**Keywords:** Astrophysics, Computation, Numerical Simulations, Mexico, UNAM.

## INTRODUCCIÓN

Las simulaciones numéricas son una poderosa herramienta para el desarrollo y entendimiento de diferentes ramas de la ciencia, tales como la física, la biología, las ingenierías, la medicina, la química, etc. El impresionante crecimiento de la infraestructura computacional, manifestado en supercomputadoras con arquitecturas vectoriales y paralelas, junto con algoritmos numéricos cada vez más sofisticados, nos permiten encontrar soluciones aproximadas a sistemas de ecuaciones diferenciales no-lineales (ordinarias o parciales), dependientes del tiempo y acopladas, que describen la evolución de los fenómenos que deseamos estudiar y que no pueden resolverse por métodos analíticos. Estas soluciones aproximadas, a su vez, nos permiten hacer modelos evolutivos bajo diferentes condiciones a la frontera, que suelen denominarse experimentos numéricos. Cuando es imposible hacer experimentación directa, como es el caso de la astrofísica, o cuando es peligroso o muy costoso hacer experimentos, como es el caso de la seguridad en reactores o en aviones, los experimentos numéricos son una herramienta valiosísima para estudiar el comportamiento de los sistemas.

Sin embargo, también es importante señalar que existen científicos que consideran a los experimentos numéricos como simples ejercicios matemáticos que nada tienen que ver con la realidad. Seguramente tengan razón en algunos casos pero es una generalización injusta ya que las simulaciones numéricas cada vez toman en cuenta más elementos que nos acercan a la descripción de fenómenos físicos y se puede seguir un protocolo de calidad (Olvera 1996; Barrón 1999):

- Los cálculos numéricos deben dar resultados que estén muy próximos a las soluciones de las ecuaciones que describen nuestros sistemas y el error numérico debe ser menor a un valor fijado previamente.
- Los resultados numéricos deben ser reproducibles.
- Se debe tener un buen conocimiento de los algoritmos numéricos y del comportamiento cualitativo de las soluciones.

En el caso específico de la astronomía, no podemos hacer experimentación directa y los fenómenos cósmicos necesitan de miles o millones de años para desarrollarse. Por lo tanto es imposible seguir dicha evolución (la edad promedio de los seres humanos oscila entre los 80 y 100 años) y la simulación numérica juega un papel fundamental para estudiar y entender los diferentes campos de la astrofísica (cosmología, formación y evolución de estrellas y galaxias, discos protoestelares, formación de planetas, etc.) En la figura 1 mostramos cuántas generaciones de personas, suponiendo que una generación equivale a 100 años (lo cual es muy generoso), se necesitarían para observar la evolución de un remanente de supernova, una nebulosa planetaria, un cúmulo de estrellas y la formación a gran escala del Universo.

## LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS EN LA ASTRONOMÍA MEXICANA

En 1958 da inicio el cómputo en México con la llegada de la computadora electrónica IBM 650 (Millar 2000) a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En ese mismo año se inaugura el Centro de Cómputo Electrónico (CCE) de la UNAM que a través de los años se convirtió en lo que hoy conocemos como la Dirección General de Servicios de Cómputo Académico (DGSCA) y que alberga los principales equipos de supercómputo de nuestra universidad (Fernández 2000; Poveda 2003). Entre los pioneros del uso de cómputo está Arcadio Poveda, del Instituto de Astronomía de la UNAM (IAUNAM) quién realizó una serie de cálculos numéricos en la IBM 650 para analizar los movimientos estelares en una galaxia. Los resultados traen como consecuencia un trabajo de investigación (Poveda 1960) que resultó, no solo ser uno de los primeros, sino el primero en su tipo, en el mundo hispanohablante. Tres años después dirige la tesis de licenciatura de Renato Iturriaga, Análisis numérico del problema de N-cuerpos, que consistía en integrar numéricamente las ecuaciones de movimiento para N-puntos masa (Iturriaga 1963). Con estos



Comparación de la evolución de diferentes objetos astronómicos con la edad promedio de un ser humano (una generación).

dos trabajos de investigación, que utilizaron la computadora IBM 650 para realizar los cálculos numéricos, podemos decir que dio inicio la era de las simulaciones numéricas en la Astronomía Mexicana.

A lo largo del tiempo tanto el IAUNAM como la DGSCA fueron adquiriendo equipo de cómputo cada vez más potente, desde supercomputadoras como la Cray-YMP y la Cray-Origin 2000 hasta poderosos clusters o granjas de computadoras (Hernández 2003), que ha ido creciendo con la investigación astronómica de nuestro país. Las tablas 1 y 2 muestran la infraestructura computacional con la que cuentan el IAUNAM y el Centro de Cómputo de la UNAM, respectivamente, y que es utilizada para realizar sus simulaciones numéricas en astrofísica.

Tabla 1

Equipos de cómputo para cálculo numérico instituto de astronomía		
Equipo	Características	Página Web
Cluster Bisgal <sup>1</sup>	16 procesadores Intel Xeon a 2.4 Ghz.	<a href="http://www.astroscu.unam.mx/bisgal">http://www.astroscu.unam.mx/bisgal</a>
Cluster Ensenada <sup>2</sup>	32 Procesadores Pentium III 400 Mhz.	
Cluster Emong <sup>1</sup>	16 procesadores Intel Pentium III 550 Mhz.	
Origin 2000 de <sup>2</sup>	8 procesadores R10000	
SGI O2 <sup>2</sup>	Procesador MIPS R5000	
Estaciones de trabajo SUN <sup>1,2</sup>	Procesadores RISC Ultra I, Ultra 5, Ultra 10, Ultra 60 y SunBlaster.	
Computadoras personales Intel/AMD <sup>1,2</sup>	Procesadores desde 550 Mhz hasta 2.8 Ghz Pentium III, Pentium IV, Intel Xeón, AMD y Athlon.	

<sup>1</sup> Sede Ciudad Universitaria

<sup>2</sup> Sede Ensenada

<b>Equipos de cómputo para cálculo numérico</b>			
<b>Dirección General de Servicios de Cómputo Académico</b>			
Equipo	Características	Página Web	Tipo de cálculo
CRAY Origin 2000	40 procesadores (Berenice)	<a href="http://www.super.unam.mx/origin2k/index.php">www.super.unam.mx/origin2k/index.php</a>	Serial y Paralelo
Cluster HP AlphaServer SC 45	36 procesadores (Bakliz)	<a href="http://www.super.unam.mx/alpha/index.php">www.super.unam.mx/alpha/index.php</a>	Serial y paralelo
Cluster Intel	38 procesadores (Mixbaal)	<a href="http://www.super.unam.mx/mixbaal/index.php">www.super.unam.mx/mixbaal/index.php</a>	Paralelo

## SIMULACIONES NUMÉRICAS DE OBJETOS ASTRONÓMICOS

A continuación daremos algunos ejemplos de los trabajos de investigación que se realizan actualmente en nuestro país y que utilizan las simulaciones numéricas.

### ***Evolución de un sistema binario compuesto de un agujero negro y una estrella de neutrones. (Instituto de Astronomía, Ciudad Universitaria-UNAM)***

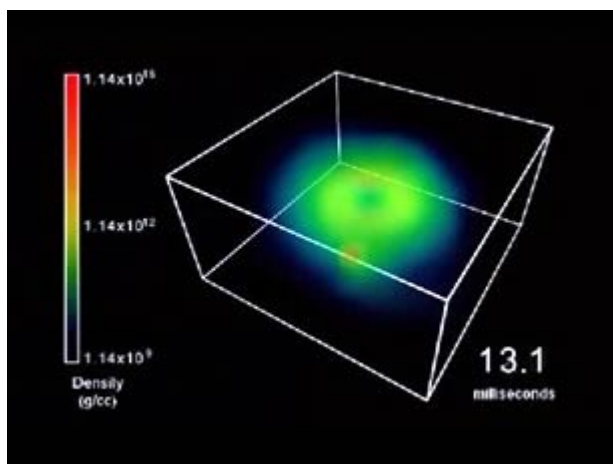
Las estrellas frecuentemente se encuentran en sistemas múltiples, ligadas por su atracción gravitacional mutua, girando cada estrella en torno a las otras (el Sol en este sentido es más bien una excepción). Existen sistemas dobles, o binarios, donde las estrellas son en realidad solo las remanentes, estrellas de neutrones y/o agujeros negros, que quedan al término de la vida normal de la estrella (esta se denomina la secuencia principal, en la que ocurre la combustión de hidrógeno en helio, y que ocupa la mayor parte del tiempo de la vida de una estrella). Estos objetos son sumamente compactos (miden apenas unos 10 a 20 km. de diámetro) y tienen masas mayores a nuestro Sol. Una predicción de la teoría general de la relatividad es que los cuerpos en movimiento acelerado (como en un sistema binario), emiten ondas gravitacionales: perturbaciones en el espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz, transportando energía y momento angular.

El efecto de la emisión de estas ondas sobre el sistema es reducir la separación entre las dos estrellas. Así, en 350 millones de años, dos estrellas de 1.4 masas solares separadas por 700,000 kilómetros llegarán a hacer colisión (este tiempo es función de la masa de las estrellas y de su separación inicial). Dicha interacción es investigada por William Lee, del IAUNAM en Ciudad Universitaria, y algunos de sus resultados contenidos en la animación 1 muestran las últimas etapas de la vida de un sistema binario compuesto por un agujero negro de 3-5 masas solares y una estrella de neutrones de 1.4 masas solares. Al iniciar el cálculo, la separación es de apenas unos 45 km. Las poderosas fuerzas de marea, y los efectos de radiación gravitacional, hacen que la estrella de neutrones sea deformada y rápidamente destruida. Gran parte del gas que la conforma es absorbido por el agujero negro y el resto forma un disco de acreción que está en torno a él (una pequeña fracción es lanzada a grandes velocidades y produciendo un gran brazo en forma espiral). Se puede observar como la densidad del gas cae rápidamente al destruirse la estrella, de unos  $10^{14}$  g/cc a  $10^{11}$  g/cc hacia el final.

La evolución es sumamente rápida, todo el evento dura solo 23 milésimas de segundo. Para estudiar la evolución del disco que queda, es necesario cubrir un período mas largo, del orden de un segundo. Estos sistemas son interesantes desde el punto de vista astrofísico por muchas razones. En primer lugar, la emisión de ondas gravitacionales durante las etapas mencionadas es sumamente intensa y como tal, estos sistemas son fuertes candidatos para la primera detección directa de ondas gravitacionales. Esto representaría una confirmación directa de una predicción de la teoría general de la relatividad de A. Einstein. Segundo, la colisión de dos estrellas de neutrones, o de una estrella de neutrones con un agujero negro representa en esencia un enorme acelerador de partículas, donde la fuente de la aceleración es

la gravitación de las mismas estrellas. Como tal, puede permitir la determinación de características de la materia a densidades supra-nucleares, en condiciones imposibles de duplicar en un laboratorio. Finalmente, el disco de acreción que sobrevive a la fusión es absorbido por el agujero negro en una escala de tiempo un poco mas larga que la que se modela aquí (del orden de un segundo).

La energía liberada por esta acreción es enorme (unos  $10^{52}$  ergs en un segundo, cuando la luminosidad del Sol es de  $10^{33}$  ergs por segundo), y podría producir un destello de rayos gama. Estas son gigantescas explosiones que ocurren constantemente por todo el Universo (observamos aproximadamente una por día), a grandes distancias de nosotros. Su origen ha sido objeto de estudio durante más de 30 años (fueron descubiertos en 1967) y hoy en día se considera que las fusiones de objetos compactos son un posible mecanismo para su producción.

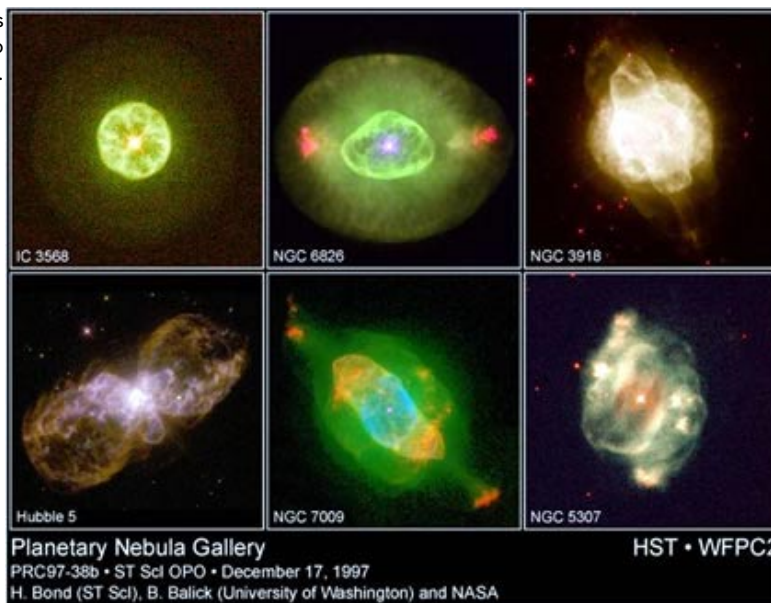


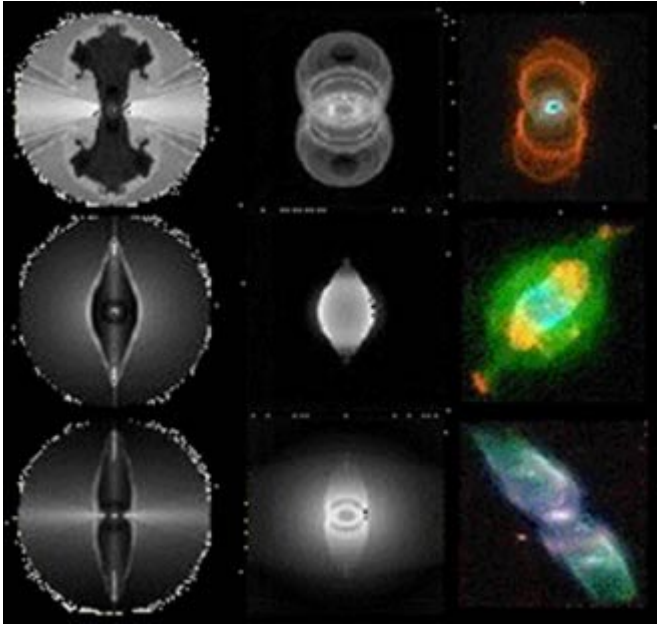
Evolución de un sistema binario compuesto por una estrella de neutrones y un agujero negro.

### Formación y evolución de nebulosas planetarias (Instituto de Astronomía, UNAM)

Las nebulosas planetarias (NP) se forman en los estados evolutivos tardíos de una estrella de baja masa como nuestro Sol. Conforme va transcurriendo la vida de la estrella, esta se va deshaciendo de sus capas externas hasta dejar un remanente estelar muy caliente, que fotoioniza las capas de gas expulsadas. Las estructuras que se forman en el espacio llegan a tener desde morfologías simétricas hasta muy complejas, tal y como se muestran en la figura 2. Un buen número de estas estructuras pueden ser formadas por una combinación de rotación y campo magnético estelares, así como inestabilidades en los vientos estelares y en los frentes de ionización. Guillermo García-Segura, José Franco y José Alberto López han trabajado estos temas y reproducen un buen número de estructuras similares a las observadas (García-Segura et al 1999, 2001: ver figura 3).

Conjunto de nebulosas planetarias con diferente morfología (Telescopio Espacial Hubble).





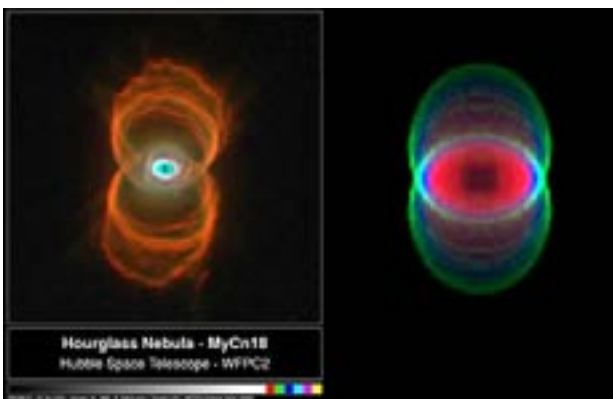
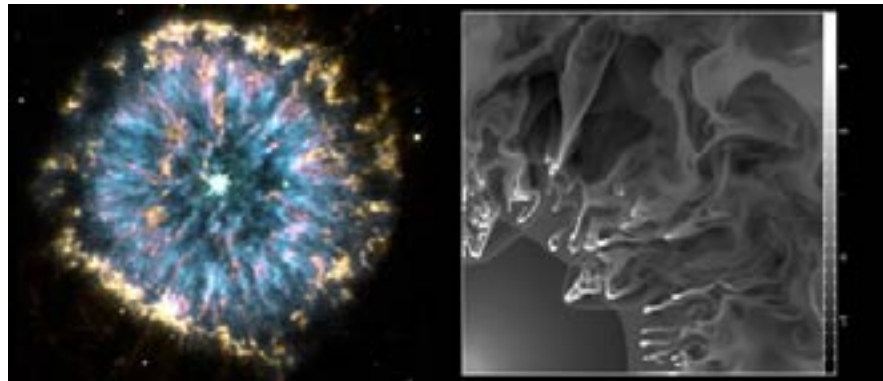
Comparación de observaciones con simulaciones numéricas de nebulosas planetarias.

Como un caso particular se puede mencionar la nebulosa planetaria NGC6751, cuya imagen tomada por el telescopio espacial Hubble (NASA) se muestra en la figura 4a. Allí se puede ver una compleja estructura a pequeña escala cuyo origen no es conocido.

Para tratar de entender la formación de dicha estructura filamentaria Wolfgang Steffen y José Alberto López, del IAUNAM-Ensenada, realizan simulaciones numéricas para modelar el viento estelar de una estrella central de una nebulosa planetaria dentro de un ambiente inhomogeneo con grumos (figura 4b). Con este tipo de simulaciones estudian la formación de la estructura y cinemática de estas microestructuras en nebulosas planetarias, sobre sus estrellas progenitoras y su evolución, que aparentemente puede ser muy variada. Algunos de estos resultados se muestran en la siguiente figura. (Steffen & López, 2004).

Por otro lado, en el IAUNAM con sede en Ciudad Universitaria, Christopher Morisset realiza simulaciones numéricas tridimensionales, utilizando un código de fotoionización, para generar modelos realistas de nebulosas planetarias, en particular estudia la nebulosa planetaria MyCn18 (figura 5a).

(a) Nebulosa planetaria NGC6751 (Hubble Space Telescope; izquierda) (<<http://www.hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archieve/releases/2000/12/>>)  
(b) Simulación del viento estelar dentro de ambiente inhomogeneo (derecha).



(a) Nebulosa planetaria MyCn18: imagen tomada por el Hubble Space Telescope (izquierda: <<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap970914.html>>). (b) Animación 2 De la simulación numérica realizada por Christophe Morisset del IAUNAM (derecha).



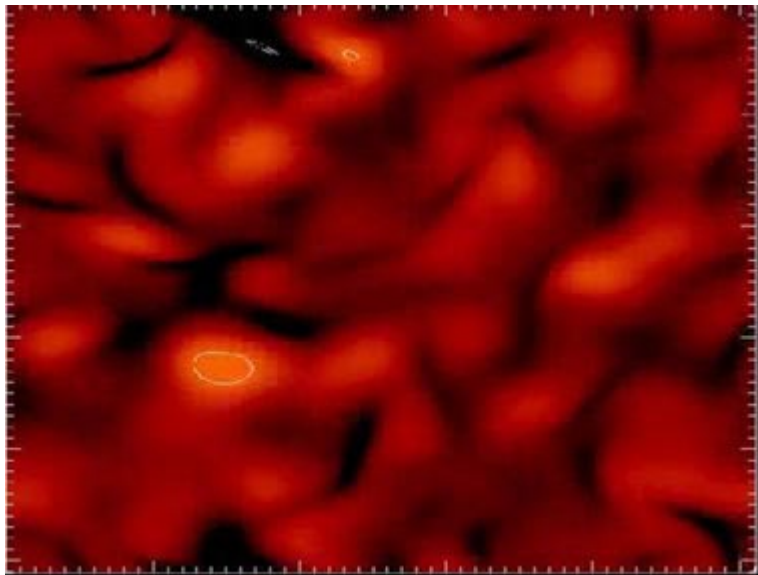
En la animación 2 se puede ver la estructura de la nebulosa planetaria tipo Hourglass a diferentes ángulos de vista, como si estuviéramos girando alrededor de ella. Los diferentes colores están asociados a las emisiones de diferentes tipos de átomos y permiten, comparando con las observaciones, conocer con más precisión la estructura, geometría y dinámica de los últimos momentos de la vida de estos tipos de estrellas (como el Sol).

### ***Turbulencia en el medio interestelar (Centro de Radioastronomía y Astrofísica, Morelia-UNAM)***

En el gas que se encuentra entre las estrellas, conocido como plasma interestelar, ocurren flujos muy complejos y existe turbulencia. Adriana Gazol, Javier Ballesteros y Enrique Vázquez astrónomos teóricos del Centro de Radioastronomía y Astrofísica (CRyA) de la UNAM con sede en la ciudad de Morelia, Michoacán. Se dedican a estudiar y modelar este fenómeno utilizando métodos numéricos. La animación 3 muestra una simulación de la evolución de un área de 1 kilo-pársec (3260 años luz) por lado en nuestra Galaxia, a lo largo de 68 millones de años. La simulación es en dos dimensiones, con una resolución de 512 puntos por dimensión, y sigue los movimientos de un plasma magnetizado, incluyendo el enfriamiento, la autogravedad y la formación de estrellas (suponiendo que se forman en las regiones de densidad mayor que 10 veces la densidad promedio).

Las estrellas a su vez calientan el medio circundante, generando burbujas expansivas que agitan al medio y lo mantienen en un régimen turbulento.

Además, fomentan más formación estelar. En la animación observamos el cambio del campo de temperaturas con el tiempo, donde los colores oscuros representan zonas frías ( $T \sim 10^4$  K) y densas (las nubes) mientras que los tonos claros representan zonas más calientes ( $T \sim 10,000^4$  K) y de baja densidad. Las líneas delimitan las zonas que corresponden al rango térmicamente inestable, que en teorías clásicas del gas en la Vía Láctea se pensaba que no debería existir. La simulación muestra sin embargo que una fracción importante del espacio está ocupada por este gas, explicando así observaciones recientes que lo detectan y mostrando que dichas teorías omitían el efecto de la turbulencia en el gas. Para obtener más detalles sobre esta simulación ver Gazol et al (2001).



Turbulencia del medio interestelar.

### ***Magnetohidrodinámica del medio interestelar (Cómputo Aplicado de la DGSCA e Instituto de Astronomía, UNAM)***

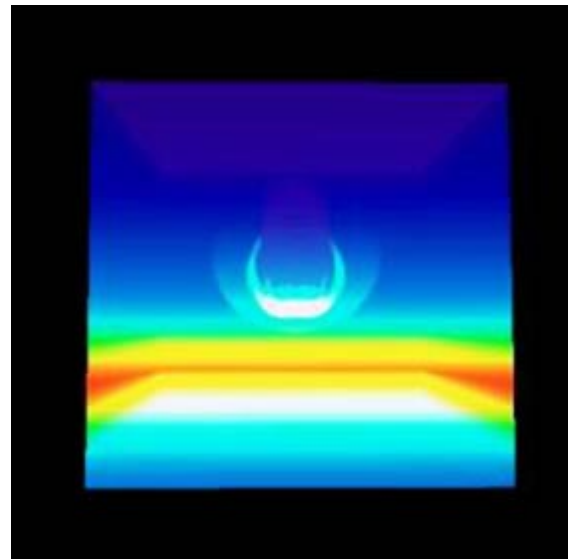
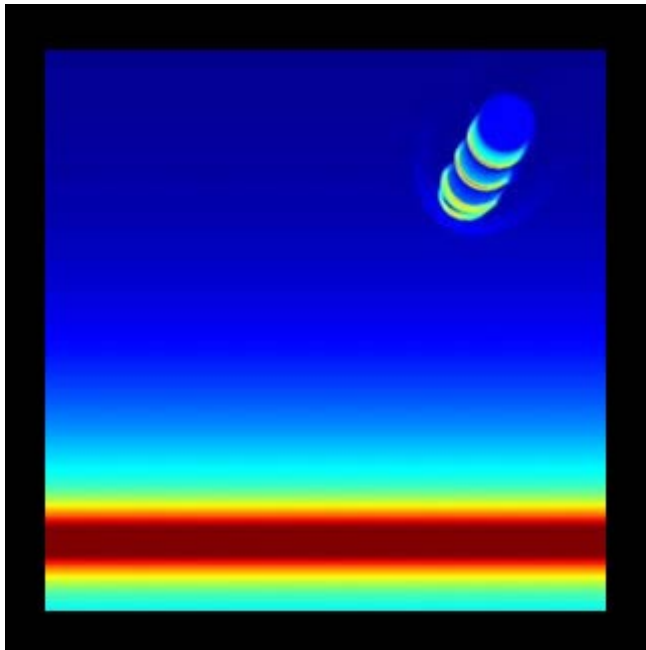
Hasta la fecha sabemos que nuestra Galaxia, la Vía Láctea, es un sistema que tiene una geometría espiral y está compuesto principalmente por estrellas, material gaseoso y polvo. En el disco galáctico, cuyo grosor total varía de unos 150 pc en la parte interna, hasta unos 1000pc en las zonas externas ( $1\text{pc}=3.086 \cdot 10^{18}$  cm), están concentrados tanto el gas, como el polvo y la mayoría de las estrellas. Por otro lado, el medio interestelar (MI), tiene tres componentes principales: gas interestelar (atómico y molecular), campos magnéticos y rayos cósmicos (partículas cargadas que se mueven a velocidades relativistas). También debemos tener en cuenta que nuestra Galaxia es un sistema abierto y puede tragarse a galaxias pequeñas y a nubes intergalácticas o robarle el gas a las galaxias cercanas.



Tal interacción atrae el gas hacia nuestra Galaxia y podría producir colisiones de nubes de alta velocidad (NAV) con el disco galáctico y formar grandes estructuras gaseosas. Las NAV son complejos de nubes compuestas principalmente de hidrógeno atómico, se localizan a altas latitudes galácticas y se mueven a grandes velocidades ( $V_{NAV} > 90$  km/s) que no corresponden a un modelo simple de rotación de nuestra Galaxia. Sus distancias y movimientos tangenciales son desconocidos lo cual complica la interpretación de su origen y evolución. Existen evidencias observacionales de colisiones de NAVs con discos gaseosos tanto en nuestra galaxia como en galaxias externas, estas interacciones pueden tener gran influencia en la estructura del medio interestelar. Conjuntamente, investigadores de la DGSCA (Alfredo J. Santillán) y del IAUNAM (José Franco y Marco A. Martos) realizaron simulaciones numéricas para estudiar la evolución de chorros de gas supersónicos (NAV) en el MI de nuestra Galaxia. Las animaciones 4 y 5 presentan la densidad, en escala logarítmica de colores, del MI una vez que es perturbado por el paso de una NAV que inicialmente es lanzada oblicuamente y termina impactándose con el plano galáctico (simulaciones en 2D y 3D).

El tamaño del sistema es de 3 kpc  $\times$  3 kpc y se localiza dentro de una malla computacional con aproximadamente un millón de celdas (1024  $\times$  1024 celdas). Allí puede verse claramente que mientras se va desarrollando la evolución se presentan estructuras muy interesantes, por ejemplo, el movimiento de las capas chocadas (nariz de la NAV) producen un par de vórtices, y una pluma, o cola, muy pronunciada que adquiere un movimiento oscilatorio que produce un campo de velocidades muy caótico y turbulento a lo largo de la trayectoria de la interacción (Santillán et al 1999).

Esta animación es un claro ejemplo de que en unos cuantos segundos podemos observar la evolución que toma 42 millones de años. La animación en tres dimensiones fue realizada por Carmen Ramos y Elio Vega del Departamento de Realidad Virtual de la DGSCA.



Simulación de la evolución de un chorro de gas supersónico impactándose con el disco de nuestra Galaxia. Cálculos numéricos en 2 dimensiones (izquierda) y en tres dimensiones (izquierda).

## AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestros agradecimientos a Enrique Vázquez (CRyA), Guillermo García-Segura, William Lee, Christopher Morisset, Wolfgang Steffen y Arcadio Poveda, del IAUNAM, por proporcionarnos material para ser publicado en este artículo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barrón Mena, Miguel Ángel (1999) "¿Simulaciones numéricas o experimentos?" [en línea]. Periódico La Jornada, enero 1999 <<http://www.jornada.unam.mx/1999/ene99/990111/cien-mesa.html>> [Consulta: 10 de Abril 2004].
- Centro de Radioastronomía y Astrofísica (2004) UNAM [en línea] <<http://www.astrosmo.unam.mx>> [Consulta 10 de abril 2004]
- Dirección General de Servicios de Cómputo Académico (2004) UNAM [en línea] <<http://www.dgsca.unam.mx>> [Consulta 10 de abril 2004].
- Fernández, Rafael (2000) "Nota para una Historia del Cómputo en México del Centro de Cálculo Electrónico al Centro de Investigaciones Matemática Aplicada, Sistemas y Servicios" [en línea]. Revista Digital Universitaria, 31 marzo 2000, Vol. 1 No.0. <<http://www.revista.unam.mx/vol.0/art4/princi.html>>. [Consulta: 10 abril 2004].
- García-Segura, G.; Langer, N.; Rózyczka, M. and Franco, J. (1999) *Astrophysical Journal*, 517, 767.
- García-S., Guillermo; López, J. A.; Franco, J. (2001) *Astrophysical Journal*, 560, 928.
- Gazol, A., Vázquez-Semadeni, E., Sánchez-Salcedo, F. J. y Scalo, J. (2001), "The Temperature Distribution in Turbulent Interstellar Gas", *Astrophysical Journal*, 557, L121-L124.
- Hernández Cervantes, Liliana, Santillán González, Alfredo J. y Caballero Cruz, Reyna E. (2003) "Maestros y Esclavos. Una aproximación de los Cúmulos de Computadoras" [En línea]. *Revista Digital Universitaria*. 30 de junio 2003, vol. 4, no.2. <<http://www.revista.unam.mx/vol.4/num2/art3/art3.htm>> [Consulta: 01 de agosto de 2003].
- Instituto de Astronomía (2004) UNAM [en línea] <<http://www.astroscu.unam.mx/>> [Consulta 10 de abril 2004].
- Iturriaga, R. (1963) "Análisis numérico del problema de N-cuerpos", Tesis de Licenciatura, UNAM.
- Millar Art (2000) "IBM 650" [en línea]. Department of Mathematics & Computer Science, Mount Allison University, <<http://www.mta.ca/~amiller/ibm650/ibm650.htm>> [Consulta: 10 abril 2004].
- Olvera, Arturo (1996) "¿Quién cree en las simulaciones numéricas?" [en línea]. Boletín de la Sociedad Mexicana de Física, abril 1996 <<http://www.smf.mx/boletin/Abr-96/computer/computer.html>> [Consulta: 10 abril 2004].
- Poveda, A. (1960) "Boletín de los Observatorios de Tonantzintla y Tacubaya" No. 20, 3.
- Poveda, A. (2003) "Mi vida en la ciencia". En *Forjadores de la ciencia en la UNAM*, Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, pp.148-181.
- Santillán, A., Franco, J., Martos, A., & Kim, J. (1999), *Astrophysical Journal*, 515, 657.
- Steffen W. & López, J.A. (2004) *Astrophysical Journal*, enviado.