

ARTÍCULO

EL PODER DEL SUPERCÓMPUTO EN LA ASTROFÍSICA TEÓRICA

Dr. Alfredo Santillán González
Investigador Titular B TC, UNAM
alfredo@astro.unam.mx

M. en I. Liliana Hernández-Cervantes
Técnico Académico Titular B TC, UNAM
liliana@astro.unam.mx

El poder del Supercómputo en la Astrofísica Teórica

Dr. Alfredo Santillán González

Investigador Titular B TC, UNAM

alfredo@astro.unam.mx

M. en I. Liliana Hernández-Cervantes

Técnico Académico Titular B TC, UNAM

liliana@astro.unam.mx

*Con admiración y respeto para el Dr. Arcadio Poveda, pinoero
de las simulaciones numéricas astrofísicas en Latinoamérica*

Resumen

No cabe la menor duda que el Supercómputo ha sido una herramienta esencial para el desarrollo de la Astrofísica Teórica Contemporánea. El contar con Centros de Supercómputo que albergan sofisticados equipos de alto rendimiento y que están distribuidos en todo el planeta (ver TOP 500 SUPERCOMPUTER SITES), ha permitido realizar impresionantes simulaciones numéricas, que necesitan de varios Gigabytes (GB) o Terabytes (TB) de memoria RAM y miles de CPUs para resolver una variedad de problemas astronómicos que involucran diversos procesos físicos, que serían difíciles de estudiar sino se contara con supercomputadoras. En este trabajo presentamos un panorama general de por qué los astrofísicos teóricos necesitan del supercómputo, y como la Astrofísica Computacional ha jugado un papel fundamental en el uso de las supercomputadoras.

Palabras Clave: Supercómputo, Astrofísica Computacional, Códigos Numéricos, Cómputo de Alto Rendimiento.

Supercomputing power in Theoretical Astrophysics

Abstract

High Performance Computing (HPC) has been one of the most relevant tools for the recent development of science. In particular, it has been crucial in the case of the Modern Theoretical Astrophysics where Supercomputers Centers (with a battery of high-performance supercomputers and distributed all over the world; see TOP 500 SUPERCOMPUTER SITES), have allowed for huge 3D numerical simulations using many Gigabytes (GB), even Terabytes (TB), of RAM memory and thousands of CPUs in order to solve a variety of different astronomical problems. In this work we present a panoramic view of the current use of HPC in astrophysics and its role in the use and development of supercomputer systems.

Keywords: Supercomputer, Computational Astrophysics, Numerical Codes, High Performance Computing.

Introducción

Si partimos de la definición de que una supercomputadora es una computadora central que se encuentra entre los más grandes, más rápidas y más potentes de las disponibles en un momento dado, y lo podemos aplicar a lo largo de la historia del cómputo, podríamos decir, grosso modo, que siempre han existido las supercomputadoras. Antes de que llegaran estos maravillosos entes electrónicos a las universidades, centros de investigación y a la sociedad en general, ya se realizaban complicados cálculos matemáticos vinculados a problemas astronómicos a través de las llamadas computadoras humanas. Posiblemente el primer ejemplo de cálculo humano organizado o distribuido, en otras palabras, el primer cálculo humano en paralelo, fue efectuado en el siglo XVIII por el matemático francés Alexis Claude Clairaut, quién decidió predecir la fecha del paso del cometa Halley por la Tierra. Claude sabía de la complejidad de los cálculos y de lo arduo que sería que una sola persona los desarrollara, por lo que decidió realizarlos con apoyo de sus colegas Joseph Lalande y Nicole-Reine Lepaute (Grier, 2005; Wikipedia: Human Computer). Las computadoras humanas no solo estaban presentes en la búsqueda de soluciones de problemas astronómicos, sino que jugaron un papel fundamental en el desarrollo de proyectos de los Estados Unidos durante la 2a Guerra Mundial, dónde los cálculos numéricos eran realizados principalmente por mujeres (ver Figura 1) debido a que (i) eran mucho más minuciosas y cuidadosas en realizar las operaciones matemáticas y (ii) por la escasez o falta de varones para realizarlos, ya que, se encontraban en el campo de batalla o en las fábricas como fuerza laboral. Durante esa época el desarrollo de proyectos bélicos fue de vital importancia y sin duda alguna, era necesario terminarlos en los plazos programados, esto llevó a la Universidad de Pensilvania a la creación de la primera computadora electrónica de uso general conocida como ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer, 1946). Para darnos una idea de lo que era físicamente ENIAC, a grandes rasgos esta consistía de 17,468 válvulas (tubos de vidrio al vacío), 7,200 diodos de cristal, 70,000 resistencias, 10,000 condensadores, entre otros componentes, ocupaba una superficie de aproximadamente 167 metros cuadrados (ver Figura 2) y podía realizar 5,000 sumas o restas y 360 multiplicaciones por segundo. Una

vez que empezó a funcionar ENIAC las computadoras humanas (mujeres) se convirtieron en las primeras programadoras profesionales del mundo, reconocimiento que se les dio muchos años después. Como dato interesante, actualmente en los principales centros de supercómputo en México, el grupo de administradores de estos equipos son de género femenino, en su mayoría, es decir, se sigue manteniendo esta tradición de grandes profesionales en la computación. A más de 5 décadas (1958) de la llegada de la primera computadora a nuestro país, la IBM 650 (ver 50 Años del Cómputo en México, 2008), la infraestructura computacional ha evolucionado vertiginosamente y ha jugado un papel fundamental en el desarrollo de las ciencias básicas e ingeniería en nuestro país y sin lugar a duda en todo el mundo. Una de las áreas de la ciencia que se ha desarrollado más fuertemente es la astronomía; solo recordemos que de las primeras aplicaciones que se ejecutaron en la IBM 650 de la UNAM fueron la solución de problemas astronómicos, realizadas por Arcadio Poveda, Renato Iturriaga y Christine Allen del Instituto de Astronomía de nuestra Universidad (Santillán, Hernández-Cervantes y Franco, 2004) y continuaron en 1991 con la llegada de la primera supercomputadora CRAY YMP/464 a Latinoamérica, gracias a la llegada de dicha máquina se pudo realizar en 1993 el Primer Congreso Internacional de Supercómputo en nuestro país (Franco et al. 1994) dedicado a temas astronómicos. Finalmente, es importante mencionar que el primer Cluster Beowulf de nuestro país, que se utilizó para aplicaciones científicas, se diseñó y configuró en el Instituto de Astronomía de la UNAM, sede Ensenada, Baja California (Velázquez & Aguilar, 2003).

El Cómputo en la Astrofísica

En la actualidad hay muy pocas cosas en la Astrofísica que puedan hacerse sin que este de por medio el uso de una computadora, por ejemplo, en pleno siglo XXI sería difícil imaginar tener una comunicación fluida con la comunidad astronómica, nacional o internacional, por medio del correo ordinario; actualmente casi todo se hace vía correo electrónico, por lo que es común que cada instituto o dependencia tenga instalado su propio servidor de correo, sin embargo, existen servidores de correo a los que se puede acceder a través de Internet, tales como los utilizados por Gmail, Hotmail y Yahoo, entre otros, lo sorprendente es que atrás de algo que actualmente es muy común, exista toda una infraestructura computacional que requiere de equipos de alto rendimiento para dar un buen servicio. En el caso de la comunidad científica el uso del correo es necesario para intercambiar información de eventos, tales como los congresos especializados que se organizan en todo el mundo y el envío de artículos a revistas científicas, solo por mencionar algunos. Aunque el correo es uno de los servicios más utilizados por la comunidad científica, es importante señalar que también se requieren servidores de transferencia de datos (File Transfer Protocol, FTP), y servidores de Web entre otros, los cuales facilitan la interacción entre grupos de investigación de todo el mundo. Las bases de datos juegan un papel vital en la astronomía, ya que en ellas esta contenida la información de muchos años de observaciones de telescopios espaciales y terrestres. También existen otros tipos de bases de datos, en particular, la comunidad astronómica internacional cuenta con una muy importante biblioteca digital, el Astrophysics Data System (ADS), que es manejada y actualizada constantemente por el Smithsonian

Astrophysical Observatory (SAO-NASA; <http://www.adsabs.harvard.edu/>). El ADS tiene acceso a tres bases de datos bibliográficas que cuentan con más de 7.4 millones de entradas (records). El cuerpo principal de datos del ADS consiste en entradas bibliográficas, que son accesibles mediante búsquedas en formatos simples y amigables, y textos digitalizados de la literatura astronómica, que pueden ser vistos y transportados con una interfase muy eficiente y automatizada. Además de integrar a las bases de datos, el ADS permite acceso a una enorme variedad de herramientas y bases externas, que incluye artículos en forma electrónica, así como a catálogos y archivos de diferentes tipos. Asimismo, se tienen enlaces a más de 8.1 millones de entradas mantenidas por otros grupos. Además de lo mencionado anteriormente, podemos decir a grandes rasgos que los astrofísicos utilizan la computación como herramienta indispensable para realizar:

1. Simulaciones numéricas.
2. Procesamiento y análisis de datos observacionales.
3. Búsqueda y manipulación de información astronómica en enormes bases de datos.
4. Control de telescopios.

En este artículo y en particular en la siguiente sección nos enfocaremos al primer punto, ya que, creemos es el que está enormemente relacionado con el supercómputo.

El poder del Supercómputo presente en la Astrofísica

En el siglo XX y hasta la fecha las supercomputadoras han tenido un desarrollo imponente y por lo tanto se han convertido en una herramienta imprescindible para realizar extraordinarias y complejas simulaciones numéricas vinculadas a problemas astrofísicos. Recordemos que los experimentos numéricos nos proporcionan información invaluable asociada a sistemas complejos y procesos físicos que ocurren bajo condiciones extremas que serían imposible realizar experimentalmente en un laboratorio y difíciles de observar directamente. Ya que en la Astronomía no se puede hacer experimentación directa, toda la información se obtiene a partir de la luz o fotones, y partículas cargadas, que son producidas por procesos físicos muy complicados, y que escapan de los objetos astronómicos que se están observando. Sofisticadas simulaciones frecuentemente se utilizan para explicar estos fenómenos, tales como, la actividad en la superficie del Sol, la formación y evolución de planetas, estrellas y galaxias, hasta la estructura a gran escala de nuestro universo, por mencionar algunos. Para tratar de explicar la formación y dinámica de estos fenómenos, los astrofísicos proponen y desarrollan modelos teóricos que consisten en un complicado sistema de ecuaciones que representan al mayor número de procesos físicos posibles involucrados; en pocas situaciones este sistema de ecuaciones llegan tener una solución única o analítica, y por lo tanto, se tiene que recurrir a las soluciones aproximadas que se obtienen a través de métodos numéricos, que necesitarán de enormes computadoras para ser resueltos. Los modelos numéricos que describen un fenómeno o sistema físico, frecuentemente deben simplificarse debido a la falta o carencia de recursos computacionales, es decir, entre más realistas

sean nuestros modelos teóricos, más poder de cómputo será necesario.

Astrofísica Computacional

Como se mencionó en la sección anterior, las simulaciones numéricas están sujetadas a un modelo teórico que consiste de un conjunto de ecuaciones matemáticas que nos permiten describir la formación y/o evolución del objeto astronómico que estamos estudiando y que en la mayoría de las veces no tienen una solución exacta o analítica, y por lo tanto, es necesario recurrir a métodos numéricos para obtener una solución aproximada. La rama de la Astronomía que utiliza los métodos numéricos para resolver problemas de investigación vinculados a esta ciencia utilizando una computadora se le conoce como Astrofísica Computacional. Aún cuando sabemos que el cómputo ha tenido un crecimiento descomunal en los últimos años y ha permitido que una parte considerable de problemas astrofísicos puedan resolverse en una computadora de escritorio, existen áreas de investigación en astrofísica que necesitan de enormes recursos computacionales y que su desarrollo estará limitado por la memoria y velocidad de los procesadores de los equipos de alto rendimiento disponibles, para permitirles a los astrofísicos trabajar con códigos numéricos en alta resolución temporal y espacial, así como, incluir el mayor número de procesos físicos en sus experimentos numéricos.

Actualmente, la astrofísica computacional está presente en cuatro grandes áreas de la astronomía (Stone, 2007):

1. Evolución y estructura estelar.
2. Transferencia de radiación y atmósferas estelares.
3. Dinámica de fluidos astrofísicos.
4. Dinámica planetaria, estelar y galáctica.

En cada una de estas áreas se han desarrollado una serie de códigos numéricos que permiten resolver las ecuaciones que describen el problema en cuestión (si el lector está interesado en ampliar la información sobre la variedad de códigos astrofísicos que se han creado en los últimos años se recomienda ver Stone 2007). En particular, un grupo importante de astrofísicos de los Institutos de Astronomía, Ciencias Nucleares y Geofísica, del Centro de Radioastronomía y Astrofísica, así como, de la Dirección General de Servicios de Cómputo Académico de la UNAM, han trabajado en el desarrollo y uso de códigos numéricos vinculados al área de Dinámica de Fluidos Astrofísicos, que utilizan diferentes métodos numéricos, tales como, diferencias finitas (ZEUS3D; Stone & Norman 1992); smooth particle hydrodynamics (SPH; Monaghan, 2001); mallas adaptativas (Raga, et al; 2000); total variation diminishing (TVD; Kim, et al 1999), etc. Hasta el momento hemos dado un panorama general de la astrofísica computacional, sin embargo, no hemos contestado la pregunta que seguramente muchos lectores se estarán haciendo, ¿por qué las simulaciones numéricas astronómicas necesitan de supercomputadoras? Para contestar esta pregunta nos apoyaremos en el concepto de malla

computacional, que no es otra cosa que la división del dominio computacional con el que estamos trabajando; en coordenadas cartesianas (x,y,z) esto se manifestaría geoméricamente en puntos si trabajáramos en una dimensión (1D), en cuadros en 2D y en cubos en 3D. Supongamos que deseamos estudiar numéricamente el comportamiento de la superficie del Sol con un código numérico que tiene una malla computacional tridimensional fija en el espacio, donde las celdas que la componen tienen un tamaño determinado que no cambia en ningún punto de la malla. Las dimensiones o tamaños de las celdas estarán fuertemente asociadas a que tan fino o detallado se puede hacer el análisis del sistema astrofísico que deseamos estudiar. Entre más fina sea la malla computacional (celdas muy pequeñas), más recursos computacionales se requerirán para realizar la simulación numérica. En la Figura 3 se muestran dos imágenes del Sol, que tienen superpuestas dos mallas computacionales, una menos refinada que la otra, es decir, las celdas de la Figura 3a son más grandes que las de la Figura 3b, o la malla computacional de la Figura 3a tiene menos celdas que la de la Figura 3b. Cuando comparamos las dos mallas computacionales (ver Figura 3), claramente vemos que la malla B puede resolver con más detalle pequeñas zonas activas de la superficie del Sol, que no pueden estudiarse en la malla A. Supongamos que nuestro código calcula 120 números reales por cada celda y que por cada número real en precisión sencilla la memoria de la computadora le asigna 4 bytes, esto quiere decir que por cada celda de mi malla, la computadora deberá apartar 480 bytes (~ 0.5 MB) de memoria. Conforme vamos haciendo más refinado nuestro dominio computacional, la demanda de memoria irá incrementándose sustancialmente (ver Tabla 1). En la última columna de la Tabla 1 se tiene la resolución del sistema que se está modelando, es decir, la escala mínima que es capaz de estudiar mi experimento numérico. Por ejemplo, si el radio del Sol es de R_s y la malla es de 256^3 , se podrán estudiar fenómenos que ocurran a una escala de $R_s/256$. Respecto al uso de los procesadores, que son los encargados de realizar las operaciones matemáticas, entre más celdas tenga en la malla, más operaciones tendrán que realizar, y por lo tanto, para una simulación en tres dimensiones, el tiempo de CPU podrá incrementarse exponencialmente.

Número de Celdas	Memoria RAM	Resolución
64^3	125 MB	$2R_s/64$
128^3	1 GB	$2R_s/128$
256^3	8 GB	$2R_s/256$
512^3	64 GB	$2R_s/512$
1024^3	512 GB	$2R_s/1024$
2048^3	4 TB	$2R_s/2048$

R_s es el radio del Sol

Para darnos una idea de lo que es consumo excesivo de recursos computacionales, presentamos el siguiente ejemplo. En el 2007 un grupo de astrofísicos de la Universidad de California, San Diego, realizaron un simulación numérica con una malla computacional de 2048^3 celdas (~ 8,589 millones de celdas), utilizando 4,096 CPUs durante dos semanas, equivalentes a 1.33 millones de horas de CPU, para estudiar con detalle el problema de la turbulencia en el medio interestelar, en particular dentro de las nubes moleculares (Kritsuk et al. 2008; ver Figura 4).

Ahora la siguiente pregunta es, ¿qué han hecho los astrofísicos para resolver este problema?

1. Buscar y desarrollar mejores métodos numéricos.
2. Adaptar sus códigos a la arquitectura paralela de las supercomputadoras.

En el caso particular del punto (2) cabe recordar el concepto de cómputo paralelo o distribuido. El cómputo paralelo se puede entender de una manera muy simple, repartir el trabajo que se tiene que hacer para resolver numéricamente las ecuaciones que describen un sistema astronómico entre 2 o más procesadores que se tengan disponibles. Y para hacer esto, es conveniente dividir el problema que estoy estudiando en un número equivalente de procesadores que tenga a la mano. Las Figura 5 y 6 muestran dos claros ejemplos de cómo puede partirse repartirse entre los procesadores, un problema en particular. También se puede ver que la malla computacional se hace más en las zonas donde ocurren los fenómenos que se quieren estudiar. La Figura 5 esta vinculada al estudio de la migración de planetas (Masset 2002), en tanto que, la Figura 6 representa un corte de densidad de un grumo de gas autogravitante que está siendo fotoevaporado por una estrella masiva que se localiza al lado izquierda de la figura. El código numérico que se utilizó para realizar esta simulación 3D se conoce con el nombre de YGUAZÚ-A, y fue desarrollado por un grupo de astrofísicos del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM (Esquivel & Raga, 2007)

La era de los GPUs presente en el supercómputo y la astrofísica

Hasta el momento, nos hemos referido a simulaciones numéricas que se ejecutan en equipos de alto rendimiento “tradicionales”, es decir, supercomputadoras con gran capacidad de memoria y almacenamiento, grandes cantidades de CPUs que son capaces de realizar miles de millones de operaciones por segundo, etc. No obstante, en la actualidad diferentes grupos multidisciplinarios de astrofísicos y programadores, están migrando sus códigos a una tecnología de hardware que se ha aplicado en los últimos años a los videojuego; los GPUs. Como sabemos los CPUs (Central Processing Unit) estan encargados de realizar la mayoría de los cálculos matemáticos; dependiendo del fabricante, cada CPU podrá hacer más o menos operaciones de punto flotante por segundo (flops). En la actualidad el concepto de CPU se ha transformado y un solo procesador puede incluir más de una unidad de procesamiento o núcleo; hasta el 2009 los procesadores pueden llegar a tener 8 núcleos como máximo, ya que presentan problemas de disipación de calor. Durante la última década, no solo se han desarrollado los CPUs, sino también las Unidades de Procesamiento Gráficas (GPUs, por sus siglas en inglés) que se utilizan intensivamente en la industria de los videojuegos. A diferencia de los CPUs, los GPUs pueden llegar a tener cientos de núcleos en un solo procesador. Aunque su función primordial está vinculada a gráficos, se han hecho enormes esfuerzos para aprovechar la sinergia de ambas unidades de procesamiento para obtener mejores rendimientos y así poder realizar simulaciones numéricas de gran envergadura. Tal es el caso del grupo de investigadores del Centro de Astrofísica y Supercómputo de la Universidad de Swinburne en Australia, quienes se han dedicado a implementar sus códigos numéricos astrofísicos al uso simultaneo de CPUs con GPUs, obteniendo resultados impresionantes

que llegan a dar rendimiento hasta de 2 ordenes de magnitud mejor que los códigos que funcionan bajo el ambiente de los CPUs, es decir, obtienen resultados 100 veces más rápidos que lo utilizando solamente con CPUs (Barsdell, Barnes & Fluke 2010). En suma, creemos que en nuestro país, deberíamos entrarle de lleno al uso intensivo de Clusters de GPUs, no solo para desarrollo de videojuegos, sino para aplicaciones relacionadas a problemas astrofísicos que necesitan de grandes recursos computacionales y así desarrollar investigación de frontera a través del supercómputo.

Figuras



Figura 1. "Centro de Cálculo" de la NACA High Speed Flight Station, actualmente conocida como NASA

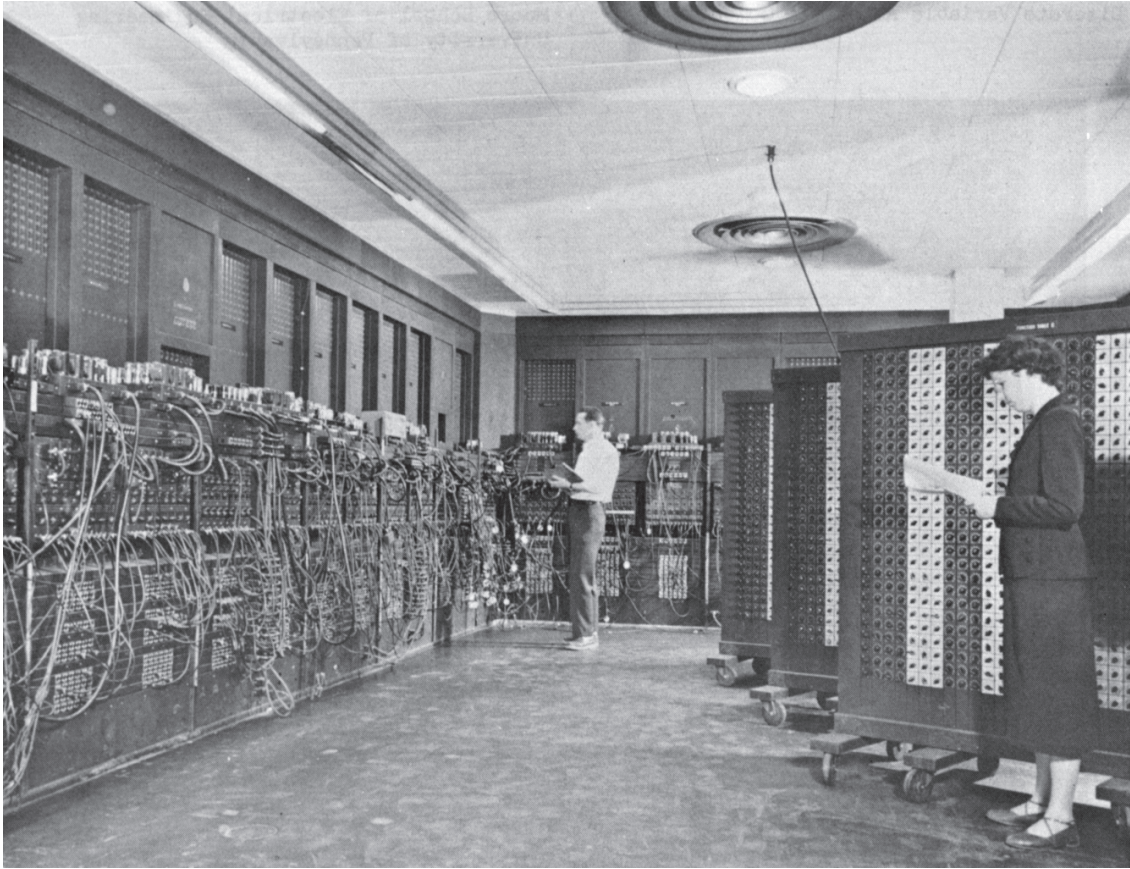


Figura 2. Primera Computadora Electrónica de uso general (ENIAC, Electronic Numerical Integrator And Computer, ENIAC, 1946). (This image is a work of a U.S. Army soldier or employee, taken or made during the course of the person's official duties. As a work of the U.S. federal government, the image is in the public domain:Wikipedia).

Glen Beck (background) and Betty Snyder (foreground) program the ENIAC in BRL building 328

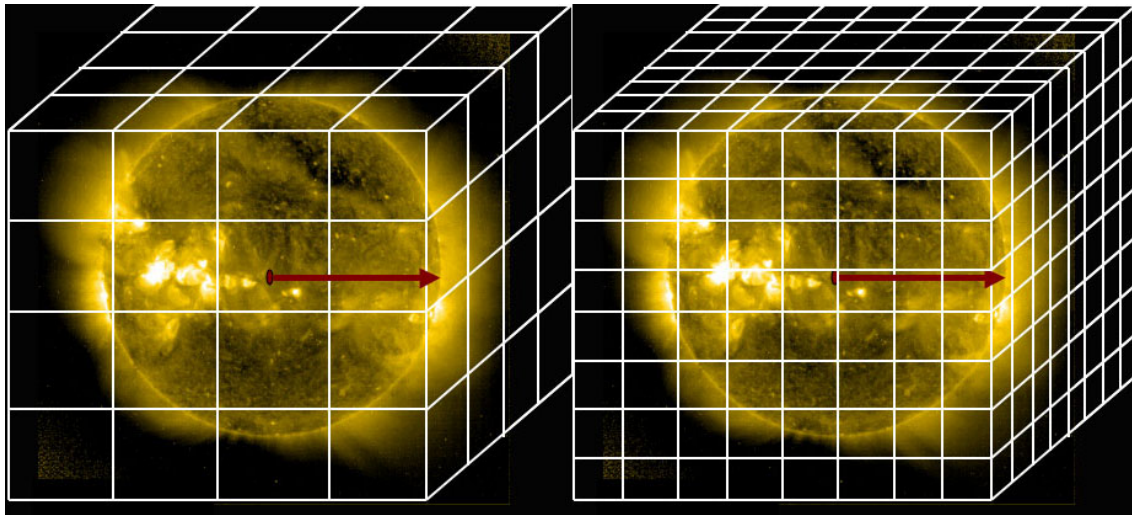


Figura 3. En la figura se muestran dos imágenes de la superficie Sol, que tienen sobrepuestas dos mallas computacionales con diferentes resoluciones: baja resolución (izquierda-malla A) y alta resolución (derecha-malla B).

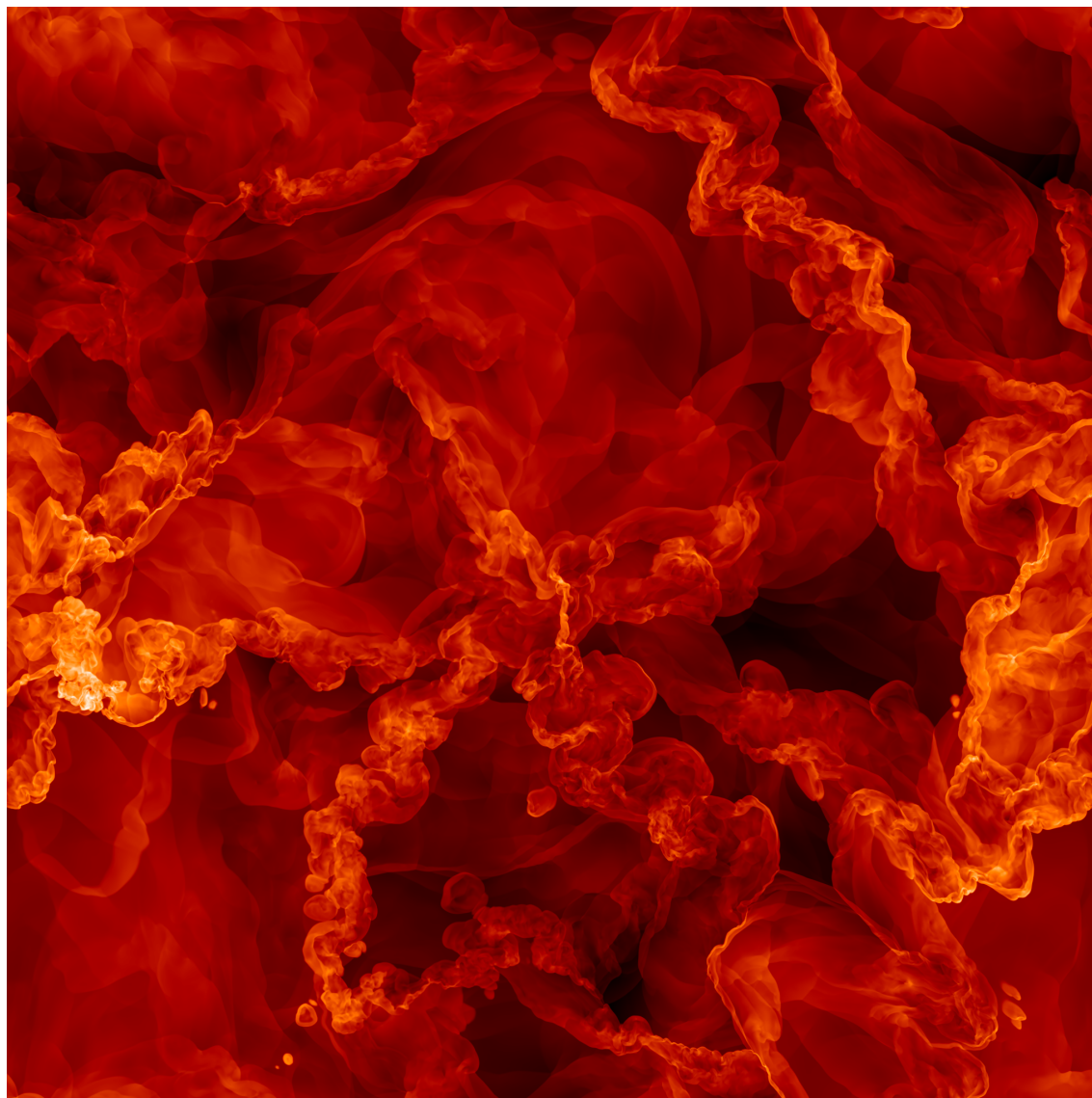


Figura 4. En la grafica se muestran los efectos que produce la turbulencia en el material que compone a una nube molecular. La escala de colores está asociada a la densidad del gas (negro-baja densidad; blanco-alta densidad). Esta simulación necesitó de 4,096 CPUs durante 14 días.

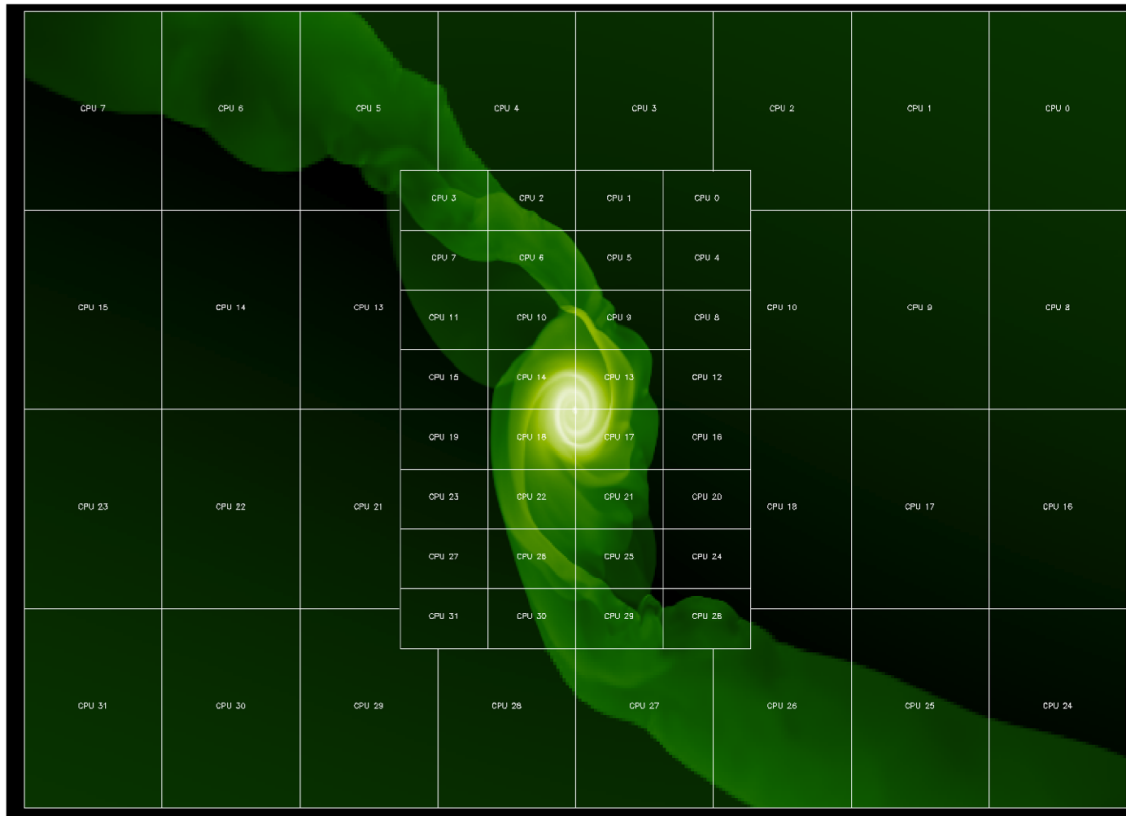


Figura 5. La imagen muestra un ejemplo de como de puede “partir” un problema y distribuir los cálculos numéricos en diferentes procesadores (Cortesía Fredeic Masset 2002)

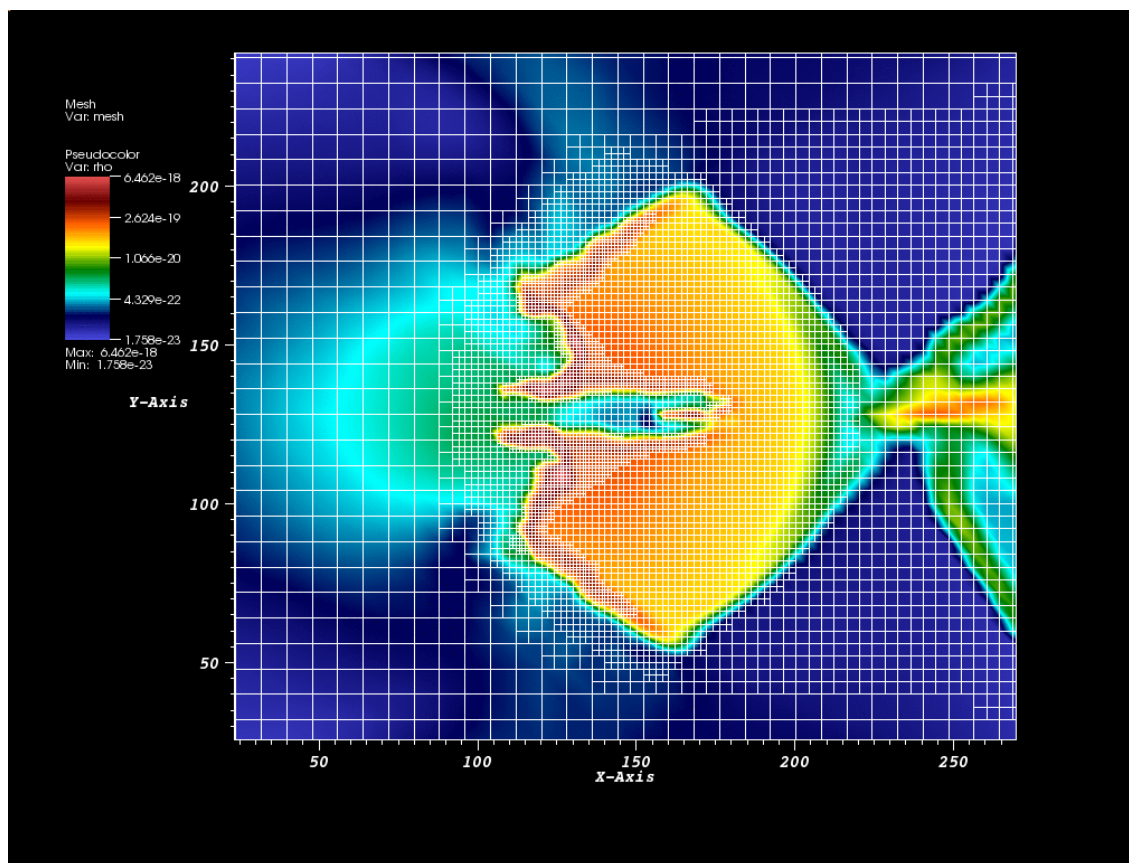


Figura 6. La imagen muestra la densidad (escala de colores) de un grumo autogravitante que está siendo fotoevaporado por una estrella masiva que se localiza al lado izquierda de la figura. Sobrepuesta se encuentra una malla computacional que presenta múltiples niveles de refinamiento. (La evolución temporal de este proceso puede verse en el video).

Bibliografía

50 Años del Cómputo en México, ENTER@TE, Año 7 Núm. 70, 26 de Junio de 2008, [en línea] [Consulta: 31 de enero de 2010], <http://www.enterate.unam.mx/artic/2008/junio>

Barsdell, B.R., Barnes, D.G. & Fluke C.J., Advanced Architectures for Astrophysical Supercomputing, [en línea] <http://arxiv.org/abs/1001.2048> [Consulta: 31 de enero de 2010].

ENIAC, "Wikipedia, the free encyclopedia" [en línea] [Consulta: 31 de enero de 2010], <http://en.wikipedia.org/wiki/ENIAC>

Esquivel, A. & Raga, A., (2007), MNRAS 377, 383.

Franco, J., Lizano, S., Aguilar, L. & Daltabuit, E., 1994, Numerical simulations in astrophysics: Modelling the dynamics of the Universe First UNAM-CRAY Supercomputing Workshop, Cambridge University Press, Cambridge UK Registro: ISBN 0-521-46238-X.

Grier, D. A., When Computers Were Human, page 22-25, Princeton University Press, 2005. ISBN 0-691-09157-9.

Human computer, "Wikipedia, the free encyclopedia" [en línea] [Consulta: 31 de enero de 2010], http://en.wikipedia.org/wiki/Human_computer#cite_note-0

Kim, J., Ryu, D., Jones, T. W. & Hong, S.S., 1999, The Astrophysical Journal, Volume 514, pp. 506-519.

Kritsuk, A. Norman, A., Padoan P. and Wagner, R., 2008, Simulations open new understanding of hypersonic shock waves that contribute to the birth of Stars, [en línea] <http://www.psc.edu/science/2008/mach6/> [Consulta: 31 de enero de 2010]

Monahan, J.J., 2001, Journal of the Korean Astronomical Society, vol. 34, no. 4, pp. 203-207.

Raga, A.C., Navarro-González, R. & Villagrán-Muñiz, M., 2000, Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, vol. 36, p. 67.

Santillán González, Alfredo J., Hernández-Cervantes, Liliana y Franco, José. (2004) "Simulaciones numéricas en astrofísica" [en línea]. Revista Digital Universitaria. 10 de mayo de 2004, <http://www.revista.unam.mx/vol.5/num4/art24/art24.htm> [Consulta: 31 de enero de 2010].

Stone, James, (2007), "Computacional Astrophysics" [en línea]. Sholarpedia, http://www.scholarpedia.org/article/Computational_astrophysics [Consulta: 31 de enero de 2010].

Stone, J.M. Norman, & M.L., 1992, The Astrophysical Journal Supplements, 80, (753).

TOP 500 SUPERCOMPUTERS SITE, [en línea] <http://www.top500.org/> [Consulta: 31 de enero de 2010].

Velázquez, H. & Aguilar, L., 2003, Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, 39, (197-205).