

ISFAA, perspectivas de un SPH implícito



Jose Antonio Escartín Vigo ⁽¹⁾ <jose.antonio.escartin@upc.edu>
 Domingo García - Senz ⁽¹⁾⁽²⁾ <domingo.garcia@upc.edu>



(1) Departament de Física i Enginyeria Nuclear (UPC). Barcelona.
 (2) Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC).



La naturaleza explícita de la técnica de suavizado de partículas hidrodinámicas ("smoothed particle hydrodynamics" o SPH) restringe su aplicación a fenómenos dinámicos como explosiones o colisiones. Sin embargo un largo campo de aplicaciones en astrofísica se relaciona con la evolución casi-hidrostática, como por ejemplo las etapas pre-explosivas que ocurren en las novae o las supernovas de tipo Ia, Hillebrandt and Niemeyer [1], o fases avanzadas de la evolución estelar. Si queremos aplicar la técnica SPH a estos sistemas es necesario construir un esquema implícito. En este poster se muestran algunos aspectos destacados de un recientemente desarrollado de un SPH paralelizado implícito denominado ISFAA (SPH implícito para aplicaciones astrofísicas) que extiende el trabajo anterior de Knapp [2] sobre este tema. Las características principales del código son los siguientes: 1) Se utiliza el formalismo conservativo del SPH estándar, basado en el principio variacional de las ecuaciones de Euler-Lagrange, 2) el uso de PARDISO, que son unas rutinas paralelas utilizadas para resolver de forma eficiente un sistemas de ecuaciones con matrices dispersas, 3) que incorpora la física necesaria para manejar los problemas astrofísicos comunes en tres dimensiones, es decir, la gravedad, la viscosidad artificial, el transporte conductivo, una red nuclear simplificada y una ecuación de estado elaborada.

Conclusiones: Los resultados preliminares muestran que ISFAA es capaz de manejar los sistemas con alrededor de $3 \cdot 10^4$ partículas en un equipo de escritorio multinúcleo. Sin embargo, sería necesario hacer uso de supercomputadores para llevar a cabo cálculos realistas de los escenarios astrofísicos. Para reducir el tamaño de la matriz se ha conseguido reducir el número de las variables independientes usando variaciones de las posiciones. Además estamos trabajando para mejorar la gravedad y así conseguir una mayor estabilidad del esquema numérico con el fin de aumentar el paso de tiempo, actualmente rebasamos el paso de tiempo marcado por la condición de Courant en un factor 50.

Formalismo SPH:

Cada partícula del sistema está relacionada con una serie de ecuaciones evolutivas derivadas del formalismo de Euler-Lagrange. El esquema resultante es generalmente referido como el SPH estándar, que se resumen en las siguientes ecuaciones, Monaghan [3], Rosswog [4]:

La ecuación que se debe resolver es:

$$G + \delta G = 0 \implies \delta G = -G(x, y, z, v_x, v_y, v_z, \rho, T)$$

$$\delta G = \frac{\partial G}{\partial x} \delta x + \frac{\partial G}{\partial y} \delta y + \frac{\partial G}{\partial z} \delta z + \frac{\partial G}{\partial v_x} \delta v_x + \frac{\partial G}{\partial v_y} \delta v_y + \frac{\partial G}{\partial v_z} \delta v_z + \frac{\partial G}{\partial \rho} \delta \rho + \frac{\partial G}{\partial T} \delta T = -G$$

Donde G son las ecuaciones de Euler en SPH:

$$\begin{aligned} G_x &= \frac{x - x^{(n-1)}}{\Delta t} - v_x \\ G_y &= \frac{y - y^{(n-1)}}{\Delta t} - v_y \\ G_z &= \frac{z - z^{(n-1)}}{\Delta t} - v_z \\ G_{v_x} &= \frac{v_x - v_x^{(n-1)}}{\Delta t} + \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_j}{\Omega_j \rho_j^2} \frac{\partial W_j(h_j)}{\partial x} + \frac{P_j}{\Omega_j \rho_j^2} \frac{\partial W_j(h_j)}{\partial x} \right) \\ G_{v_y} &= \frac{v_y - v_y^{(n-1)}}{\Delta t} + \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_j}{\Omega_j \rho_j^2} \frac{\partial W_j(h_j)}{\partial y} + \frac{P_j}{\Omega_j \rho_j^2} \frac{\partial W_j(h_j)}{\partial y} \right) \\ G_{v_z} &= \frac{v_z - v_z^{(n-1)}}{\Delta t} + \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_j}{\Omega_j \rho_j^2} \frac{\partial W_j(h_j)}{\partial z} + \frac{P_j}{\Omega_j \rho_j^2} \frac{\partial W_j(h_j)}{\partial z} \right) \\ G_\rho &= \rho - \sum_{j=1}^N m_j W_j(h_j) \\ G_T &= \frac{T - T^{(n-1)}}{\Delta t} - \frac{1}{\Omega_j \rho_j^2} \frac{\partial P_j}{\partial T_j} \cdot \sum_{j=1}^N m_j (v_i - v_j) \nabla_i W_j(h_j) \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial G_{v_x}}{\partial x} & \frac{\partial G_{v_x}}{\partial y} & \frac{\partial G_{v_x}}{\partial z} & \frac{\partial G_{v_x}}{\partial v_x} & \frac{\partial G_{v_x}}{\partial v_y} & \frac{\partial G_{v_x}}{\partial v_z} & \frac{\partial G_{v_x}}{\partial \rho} & \frac{\partial G_{v_x}}{\partial T} \\ \frac{\partial G_{v_y}}{\partial x} & \frac{\partial G_{v_y}}{\partial y} & \frac{\partial G_{v_y}}{\partial z} & \frac{\partial G_{v_y}}{\partial v_x} & \frac{\partial G_{v_y}}{\partial v_y} & \frac{\partial G_{v_y}}{\partial v_z} & \frac{\partial G_{v_y}}{\partial \rho} & \frac{\partial G_{v_y}}{\partial T} \\ \frac{\partial G_{v_z}}{\partial x} & \frac{\partial G_{v_z}}{\partial y} & \frac{\partial G_{v_z}}{\partial z} & \frac{\partial G_{v_z}}{\partial v_x} & \frac{\partial G_{v_z}}{\partial v_y} & \frac{\partial G_{v_z}}{\partial v_z} & \frac{\partial G_{v_z}}{\partial \rho} & \frac{\partial G_{v_z}}{\partial T} \\ \frac{\partial G_{a_x}}{\partial x} & \frac{\partial G_{a_x}}{\partial y} & \frac{\partial G_{a_x}}{\partial z} & \frac{\partial G_{a_x}}{\partial v_x} & \frac{\partial G_{a_x}}{\partial v_y} & \frac{\partial G_{a_x}}{\partial v_z} & \frac{\partial G_{a_x}}{\partial \rho} & \frac{\partial G_{a_x}}{\partial T} \\ \frac{\partial G_{a_y}}{\partial x} & \frac{\partial G_{a_y}}{\partial y} & \frac{\partial G_{a_y}}{\partial z} & \frac{\partial G_{a_y}}{\partial v_x} & \frac{\partial G_{a_y}}{\partial v_y} & \frac{\partial G_{a_y}}{\partial v_z} & \frac{\partial G_{a_y}}{\partial \rho} & \frac{\partial G_{a_y}}{\partial T} \\ \frac{\partial G_{a_z}}{\partial x} & \frac{\partial G_{a_z}}{\partial y} & \frac{\partial G_{a_z}}{\partial z} & \frac{\partial G_{a_z}}{\partial v_x} & \frac{\partial G_{a_z}}{\partial v_y} & \frac{\partial G_{a_z}}{\partial v_z} & \frac{\partial G_{a_z}}{\partial \rho} & \frac{\partial G_{a_z}}{\partial T} \\ \frac{\partial G_\rho}{\partial x} & \frac{\partial G_\rho}{\partial y} & \frac{\partial G_\rho}{\partial z} & \frac{\partial G_\rho}{\partial v_x} & \frac{\partial G_\rho}{\partial v_y} & \frac{\partial G_\rho}{\partial v_z} & \frac{\partial G_\rho}{\partial \rho} & \frac{\partial G_\rho}{\partial T} \\ \frac{\partial G_T}{\partial x} & \frac{\partial G_T}{\partial y} & \frac{\partial G_T}{\partial z} & \frac{\partial G_T}{\partial v_x} & \frac{\partial G_T}{\partial v_y} & \frac{\partial G_T}{\partial v_z} & \frac{\partial G_T}{\partial \rho} & \frac{\partial G_T}{\partial T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \\ \delta v_x \\ \delta v_y \\ \delta v_z \\ \delta \rho \\ \delta T \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} G_{v_x} \\ G_{v_y} \\ G_{v_z} \\ G_{a_x} \\ G_{a_y} \\ G_{a_z} \\ G_\rho \\ G_T \end{pmatrix}$$

Esquema de refinamiento Newton-Rapshon:

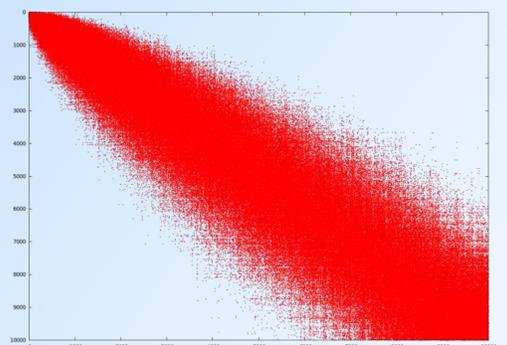
A partir de una solución aproximada y un refinamiento iterativo utilizando el método Newton-Rapshon multidimensional hasta que se alcanza la convergencia en Δt^n .

La matriz está compuesta por bloques de (eq x var), formando una matriz jacobiana correspondiente al sistema de todas las ecuaciones linealizadas de todas las partículas y sus derivados respectivas respecto a todas las variables independientes.

Hay dos tipos de bloques: bloques diagonales al calcular sobre las partículas y los bloques de interacción en el cálculo de los vecinos (típicamente 50 por partícula).

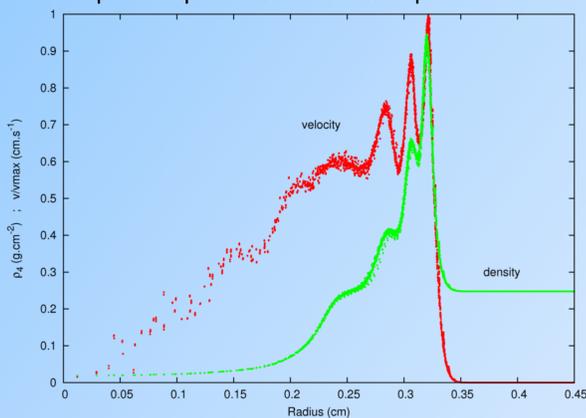
Distribución de la matriz:

El factor de relleno típico es sobre el 2%. La biblioteca de algoritmos "PARallel Direct Solver" (PARDISO), de la Universidad de Basilea, se utiliza para resolver el sistema de ecuaciones. Para un almacenamiento óptimo de las celdas no nulas PARDISO utiliza el método CSR (compresión por fila).



Tests Explosión de Sedov:

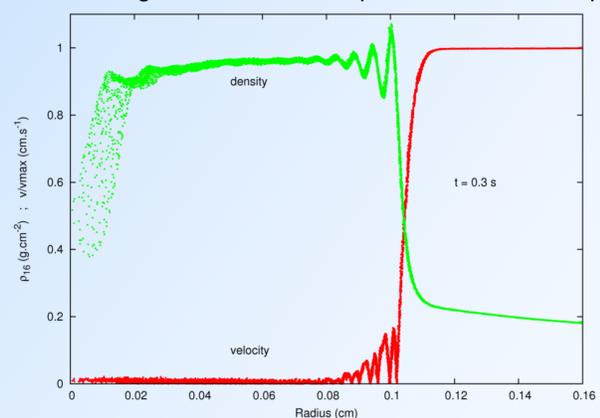
Se estudia la propagación, en un medio homogéneo, de un frente de onda generado por una explosión puntual. N = 62.500 partículas.



Perfil de densidad normalizado a 4 y perfil de velocidad normalizado a la velocidad máxima en un tiempo t = 0.09 s.

Test de Noh: "The wall heating shock"

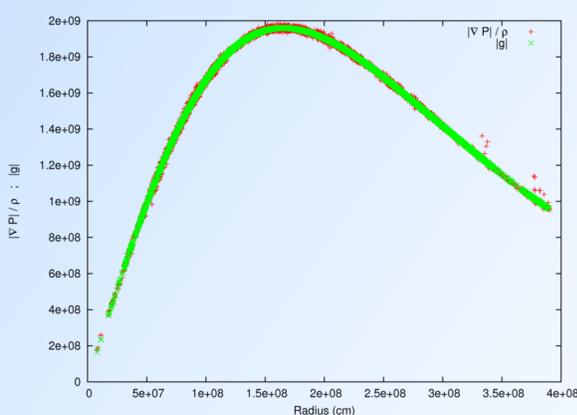
Un flujo de gas supersónico 2D se lanza hacia el centro geométrico, formando una región altamente comprimida. N = 31.000 partículas.



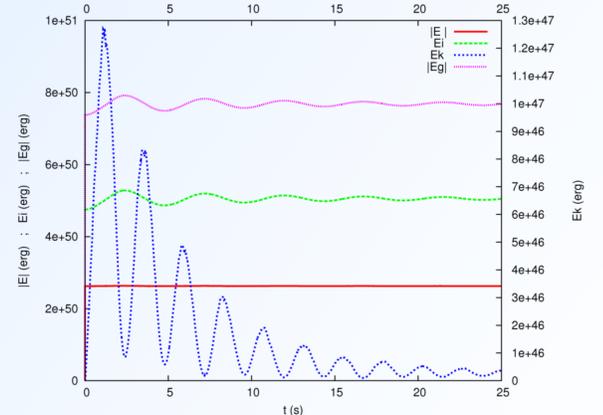
Perfil de densidad normalizado a 16 g/cm² y perfil de velocidad normalizado a la velocidad máxima en un tiempo t = 0.3 s.

Estabilidad de una enana blanca:

Relajación de una enana blanca estable de $M_{wd} = 1,15 M_{sol}$ con N = 10.000 partículas usando temperatura variable, conducción térmica y ecuación de estado realista. En partículas se ve que la energía cinética decae rápidamente y la estructura se aproxima al equilibrio mecánico. Después de 25 s el sistema se encuentra relajado mecánicamente y los gradientes de presión y gravitacional se encuentran el equilibrio.



Perfiles del gradiente de presión y gravedad en una enana blanca en un tiempo t = 25 s.



Evolución temporal de la energía cinética, interna, gravitacional y la suma de todas en un tiempo t=25 s durante la relajación se llega a la estabilidad de la enana blanca.

Referencias

- (1) Hillebrandt W. and Niemeyer J.C. 2000, ARAA, 38
- (2) Knapp C.E. 2000, PhD thesis
- (3) Monaghan J. J., 2005, Rep. Prog. Phys., 68, 1703
- (4) Rosswog S., 2009, New Astronomy Review, 53, 78

Para cualquier cuestión contacte con:



Jose Antonio Escartín

Agradecimientos

"Con el soporte del Comisionado para Universidades e Investigación del Departament d'Innovació, Universitats i Empresa de la Generalitat de Catalunya y el fondo social Europeo."