L'evoluzione idrodinamica nei resti di supernova giovani

R. Bedogni,[1]
[1]Osservatorio Astronomico di Bologna

August 25, 1998

Abstract

Il calcolo numerico si é rivelato negli ultimi decenni uno strumento sempre piú importante per lo studio dell' evoluzione dinamica dei resti di supernova. Le tecniche numeriche, in particolare quelle alle differenze finite, si sono sviluppate raggiungendo un grado di precisione sempre piú elevato nella rappresentazione di fenomeni idrodinamici che altrimenti non potrebbero essere descritti analiticamente. In questo breve articolo forniamo un esempio di tali soluzioni numeriche applicato all' evoluzione dei resti di supernova giovani.

1 Il metodo numerico

Un gran numero di metodi numerici, in particolare quelli alle differenze finite, sono stati sviluppati in questi ultimi decenni per risolvere le equazioni di conservazione dell' idrodinamica. Uno dei piú interessanti, sia per il grado di precisione che per la capacitá di risolvere le discontinuitá del flusso idrodinamico, é certamente il "Piecewise Parabolic Method" (PPM) di Colella e Woodward (1984, J. Comp. Phys., 54, 174). Al fine di rendersi conto della "bontá" di un metodo numerico lo stesso viene sottoposto alle "forche caudine" di alcuni test numerici standard. Si puó trovare in un articolo di Woodward e Colella (1984. J. Comp. Phys., 54, 115) un valido esempio di come proceda il confronto tra differenti tecniche numeriche e dedurne facilmente il grado di affidabilitá e precisione nel riprodurre, anche a bassa risoluzione, le strutture idrodinamiche piú complesse. Un' applicazione del metodo PPM riguardante l' interazione di un'onda d'urto con una nube a contrasto di densitá predefinito si puó trovare in un precedente articolo di Bedogni e Woodward (1990, Astron. and Astroph., 231,481). Per le applicazioni ad un caso piú "realistico", che cioé possa simulare con maggior fedeltá le condizioni che si riscontrano nel mezzo interstellare (ISM), é stato introdotto, nel codice numerico, il raffreddamento radiativo utilizzando le curve di "cooling" di Cox e Kafatos (vedi ad es. Falle 1975, Mon. Not. R. Astron. Soc. 172,55)

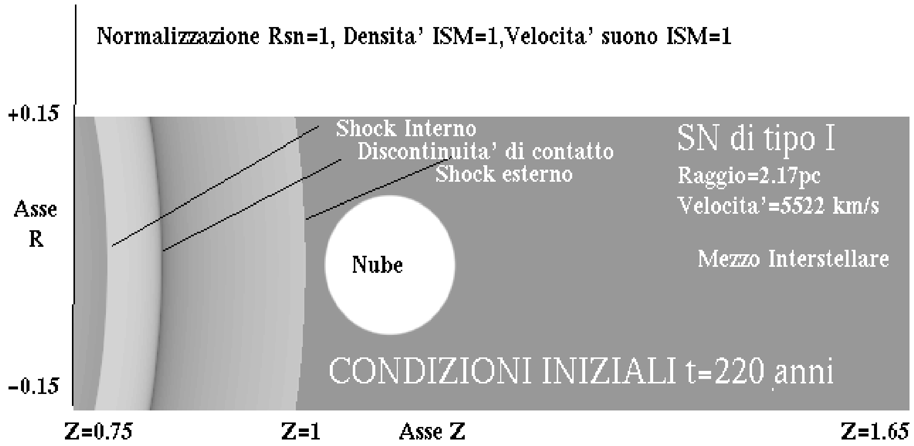

Figure 1: Le condizioni iniziali del calcolo numerico.

2 I resti di supernova giovani

Lo studio dei resti di supernova giovani si é indirizzato da tempo verso la comprensione non solo della loro struttura complessiva ma anche dell' origine delle disomogeneitá su scale piú piccole di quelle relative allo shock principale di raggio $Rsn = \sim 1 - 2pc$. Ad esempio nel caso di resti di supernova quali Cassiopea e Tycho, si é cercato di capire se le disomogeneitá locali siano prodotte da instabilitá sviluppatesi all'interno del resto di supernova oppure se siano causate dall'interazione con nubi di gas del mezzo interstellare preesistenti all'esplosione. Questo ed altri argomenti relativi alla dinamica dei resti di supernova sono trattati nell' esauriente review di McKee (1988, IAU Colloqium 101, 205). In questo articolo si focalizzerá l'attenzione sul resto di supernova in Cassiopea. Tale resto di supernova (CAS-A) ha un'etá di circa 300 anni, si trova ad una distanza di 3 pc e presenta alcune strutture ben definite: i "Fast Moving Knots" (FMK) che sono frammenti che si muovono a velocitá variabile da 4000 a 6000 km/sec ed hanno una composizione chimica analoga a quella della shell di gas espulsa dalla stella in seguito all' esplosione di supernova, ed i "Quasi Stationari Flocculi" (QSF) con velocitá piú basse (500 km/sec) e composizioni chimiche analoghe a quelle del mezzo interstellare. Nella tabella 1 sono riassunte le proprietá fisiche principali di CAS-A.

Tabella 1. Caratteristiche di CAS-A

Data dell' esplosione	AD 1680
Etá	318 anni
Distanza	2.9 pc
Velocitá iniziale dell' espansione	10000 km/s
Massa espulsa	0.30 Masse solari
Energia cinetica della massa espulsa	1.5×10^{50} erg
Densitá del mezzo interstellare	$1.3\ cm^{-3}$
Raggio angolare	124"
Raggio lineare (Rsn)	1.77 pc
Massa inglobata dallo shock	1.2 Masse solari
Velocitá dello shock (Vsn)	3850-2330 km/s

3 Le simulazioni numeriche

Nel definire le condizioni iniziali delle simulazioni numeriche si é cercato di riprodurre una situazione ragionevolmente simile a quella di CAS-A e tale da rendere conto della formazione dei QSF. Dal momento che si tratta di un resto di supernova "giovane" ecco che, per rappresentare l'onda d'urto prodotta dall'esplosione iniziale, si é tenuto conto dell'interazione del materiale scagliato dall'esplosione stessa con il mezzo interstellare. A questo scopo invece della soluzione di esplosione puntiforme, la classica soluzione di Sedov, si é utilizzata una soluzione self-similare descritta da Chevalier (1976, Ap. J., 207,872) che struttura in modo piú adeguato tale interazione. Il tempo iniziale da cui si parte per il calcolo numerico é fissato a 220 anni dopo l'esplosione della supernova mentre quello finale raggiunge i 1925 anni. Le quantitá fisiche sono normalizzate al raggio dello shock (Rsn), alla densitá ed alla velocitá del suono del mezzo interstellare. Nella tabella 2 sono riassunti i parametri fisici essenziali relativi alle condizioni iniziali delle simulazioni numeriche, sia nelle loro quantitá fisiche che in quelle normalizzate utilizzate dal codice numerico.

Tabella2: Parametri del calcolo numerico

$\gamma = 5/3$	Fisiche	Normalizzate
Raggio shock interno	1.721 pc	0.79
Raggio disc. contatto	1.841 pc	0.84
Raggio shock esterno	2.174 pc	1
Velocitá shock interno	6919 km/s	420
Velocitá disc. contatto	6208 km/s	376
Velocitá shock esterno	5522 km/s	334
Densitá shock esterno	$4 \times 1.17 \cdot 10^{-24} gr/cm^3$	4
Densitá ISM	$1.17 \cdot 10^{-24} gr/cm^3$	1
Velocitá ISM	0	0
Velocitá suono ISM	16.5 km/s	1
Pressione ISM	$1.933 \times 10^{-10} dyne/cm^2$	0.6
Temperatura ISM	10^4 K	1
Raggio nube	0.12 pc	0.063
Velocitá nube	0 km/s	0

Nella figura 1 é schematizzata la griglia numerica delle simulazioni aventi come parametro libero il contrasto di densitá (χ) della nube rispetto al mezzo interstellare. Lo shock spazza la nube muovendosi nel tempo, attraverso la griglia numerica, da sinistra verso destra ed intercettandola dopo alcune decine di anni. Al fine di evidenziare gli effetti del raffreddamento nella nube si é scelto un contrasto di densitá χ variabile da 2000 a 100. Dal momento che il tempo scala di raffreddamento dell' onda d'urto della supernova é superiore a 20000 anni ecco che gli unici effetti di irraggiamento sono riferibili all'onda d'urto "trasmessa" nella nube. Un calcolo elementare mostra che la nube raffredda con un tempo scala di circa 50 anni nel caso in cui il contrasto di densitá é $\chi = 500$ ben entro i limiti, in questo caso, del tempo massimo di evoluzione dello shock esterno.

Il calcolo numerico é stato effettuato in coordinate cilindriche R-Z, per cui le immagini mostrate risultano perfettamente simmetriche rispetto all'asse Z. La risoluzione numerica delle due simulazioni é la stessa ed, in unitá del raggio normalizzato dello shock della supernova, é pari a $dZ = dR = 0.0015$ corrispondente ad una risoluzione in Z e R pari a 750x150 punti di griglia. Nella parte inferiore delle immagini é riportata la scala dei grigi: le parti scure corrispondono a densitá minori delle parti chiare. Nella figura 2 mostriamo il risultato del calcolo dell'interazione onda d'urto-nube per $\chi = 500$ ad una etá di 412 anni ed, in figura 3, alla fine del calcolo numerico, cioé a 1925 anni. Non si pretende, con queste immagini del logaritmo della densitá, di fornire una descrizione quantitativa dell' evoluzione del fenomeno idrodinamico ma solo di darne un'idea qualitativa. Nella figura 2 si puó notare come lo shock esterno di supernova

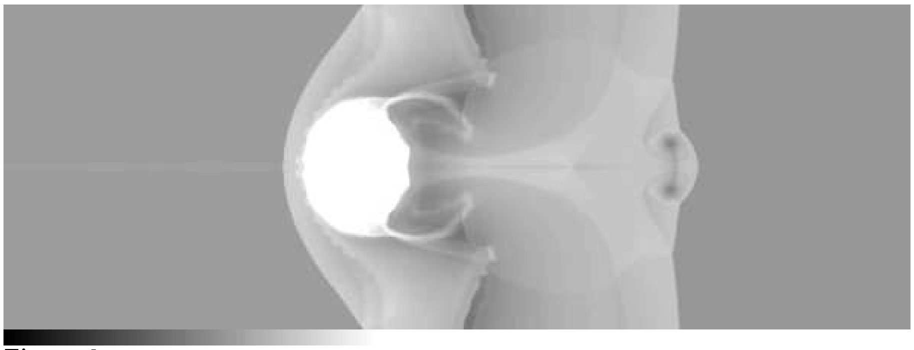

Figure 2: Interazione onda d'urto nube per $\chi = 500$ a t=412 anni, immagine del logaritmo della densitá.

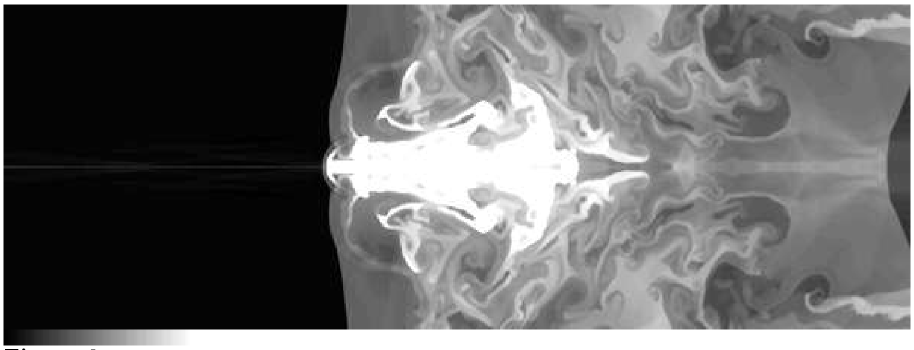

Figure 3: Interazione onda d'urto nube per $\chi = 500$ a t=1925 anni immagine del logaritmo della densitá.

ha da poco sorpassato la nube la quale é giá stata compressa, deformata ma non del tutto modificata dal passaggio dell' onda d'urto stessa. L'effetto del raffreddamento sta giá facendosi sentire comprimendo ulteriormente la nube. Nella figura 3 siamo al termine del calcolo numerico e non rimane praticamente traccia della forma sferica originale della nube. Attorno all'asse di simmetria la nube é stata quasi completamente distrutta e ridotta ad una "traccia" (vedi la parte piú chiara dell'immagine) schiacciata lungo l'asse Z. Intorno alla parte longitudinale della nube si notano sbuffi di gas che sono una conseguenza delle instabilitá di Rayleigh-Taylor dovute al flusso turbolento del gas spazzato dall'onda d'urto esterna che é giá fuori dalla griglia numerica verso destra.

References

[1] Bedogni,R., Woodward,P.R., Astron.Astrophys., 1990,231,481.

[2] Chevalier,R. Ap.J., 1976, 207,872.

[3] Colella,P., Woodward,P.R., J. Comp. Phys., 1984, 54,174.

[4] Falle, S.A.E.G., 1975 Mon. Not, R. Astron. Soc., 1975, 172, 55.

[5] Mc Kee, C.F., 1988, Supernova Remnants and the Interstellar Medium IAU Colloqium 101, edited by R.S. Roger, T.L. Landecker, Cambridge University Press, 205.

[6] Woodward,P.R.,Colella,P., J. Comp. Phys., 1984, 54,115.