

ONDAS DE CHOQUE

- Son muy comunes en el MIE y lo afectan de un modo **IRREVERSIBLE**
- Una onda de choque ocurre cuando **la velocidad del gas supera la velocidad del sonido en ese medio** → el medio es 'sorprendido' y no puede responder dinámicamente → densidad, temperatura, presión, velocidad, cambian en forma súbita
- Algunos efectos que causan:
 - la temperatura y la densidad del gas aumentan
 - el gas es acelerado
 - destruyen el polvo

Velocidad del sonido

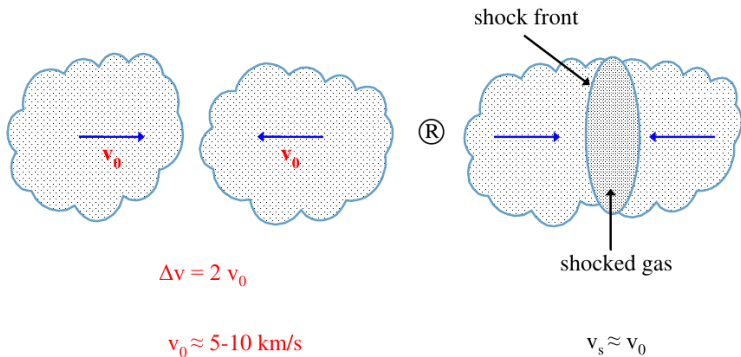
$$c_s = \left(\frac{\gamma k T}{\mu m_H} \right)^{1/2}$$

- $\gamma = 1$ para un flujo isotérmico
- $\gamma = 5/3$ para un flujo adiabático
- μ : peso molecular medio: $\sim 1,5$ para gas atómico, $\sim 2,7$ para gas molecular y $\sim 0,7$ para gas ionizado. Considerando H, He y elementos pesados.
- Medio neutro, con $T = 100 \text{ K} \rightarrow c_s \sim 1,2 \text{ km/s}$
- Región HII, con $T = 10000 \text{ K} \rightarrow c_s \sim 14 \text{ km/s}$
- Gas molecular, con $T = 10 \text{ K} \rightarrow c_s \sim 0,2 \text{ km/s}$
- $\Rightarrow$ hay muchos eventos en el MIE que generan ondas de choque
- los choques son el origen de la estructura a gran escala del MIE de la galaxia y de la componente más caliente (HIM)

Choques en el MIE

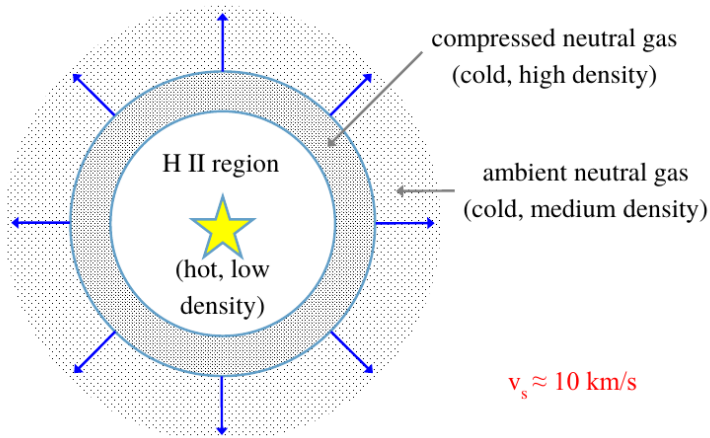
- Número de Mach: $M = \frac{v}{c_s}$
- v : velocidad de gas: $\frac{3}{2}mv^2 = kT$
- $M < 1 \rightarrow$ subsónico
- $M > 1 \rightarrow$ supersónico $\rightarrow$ choque
- Ejemplos de choques en el MIE:
 - Colisión de nubes
 - Expansión de RHII
 - Vientos estelares (burbujas interestelares)
 - Explosiones de SN
 - Acreción y outflows en zonas de formación estelar
 - Choques espirales en el disco galáctico

Colisión de nubes

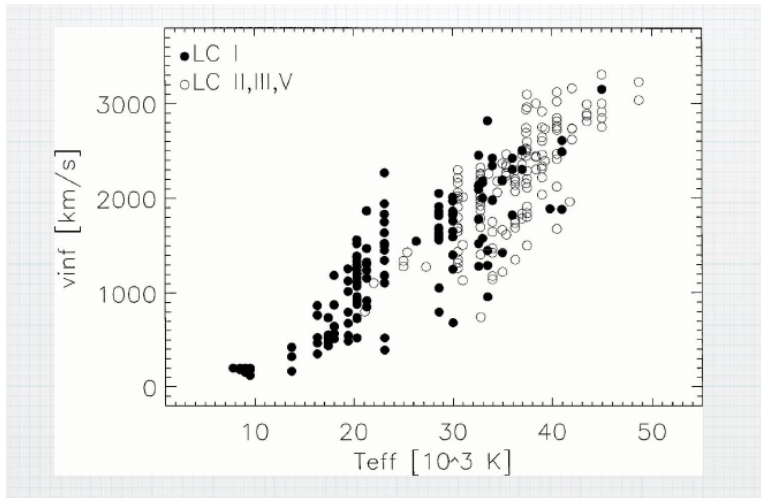


Expansión de RHII

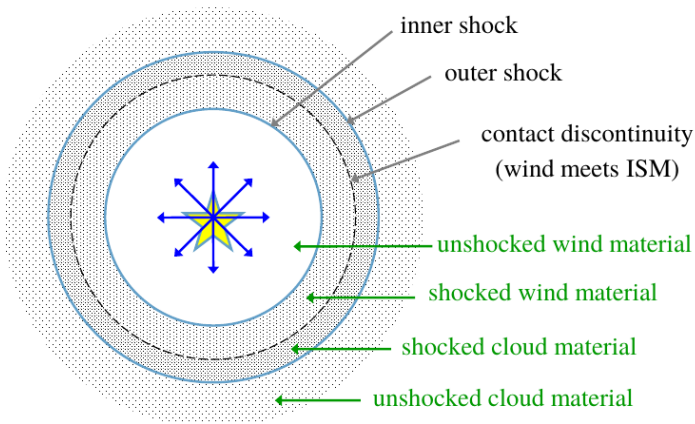
Expansión por diferencia de presiones entre gas ionizado y neutro:



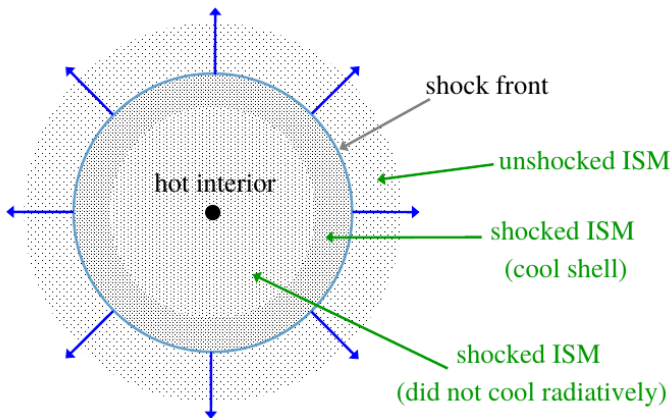
Velocidades terminales de los vientos estelares



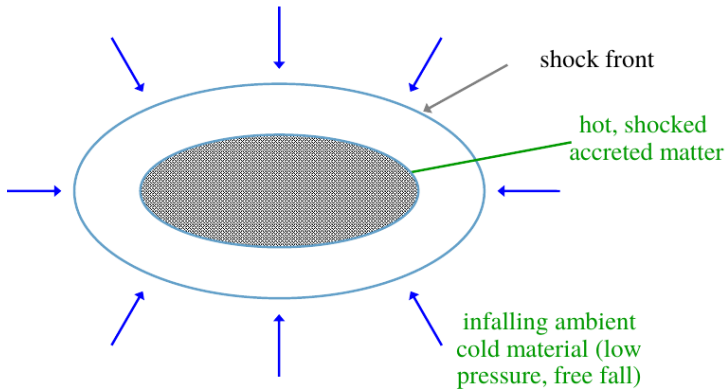
Burbuja Interestelar



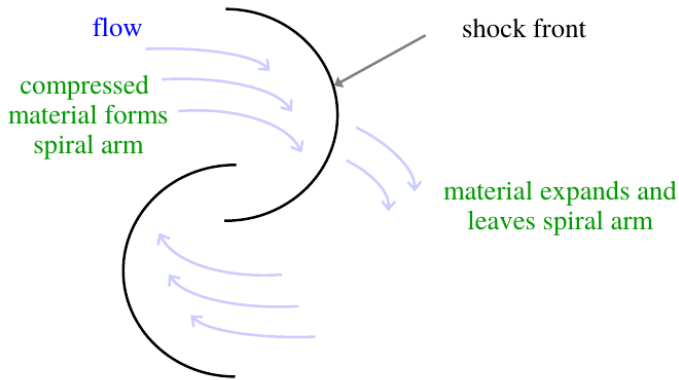
Supernova



Formación estelar



Choques en el disco galáctico



- El gas en SN, burbujas, RHII, jets, alcanza altas velocidades, supersónicas.
- En estas condiciones, se forman **discontinuidades**:

superficies donde la velocidad y los parámetros físicos del gas exhiben **saltos** (jumps)

- Las discontinuidades a través de las cuales fluye el gas son **choques**
- Las discontinuidades sin flujo de gas: **discontinuidades de contacto.**

Choques

Para describir un choque:

- se elige el frente de choque como sistema de referencia: el gas pre-choque fluye hacia el choque con velocidad v_s
- se considera un choque de capas paralelas $\rightarrow$ todas las propiedades dependen solo de la distancia x al choque
- adoptamos un choque estacionario: $d/dt = 0$
- suponemos gas ideal de cada lado del choque
- $B=0$

ZONA CHOCADA

ρ_1 v_1
 T_1

ZONA PRE CHOQUE

ρ_0 v_0
 T_0

El flujo de cualquier cantidad escalar por unidad de masa, Φ , es $\Phi \rho v$, por ejemplo:

- Flujo de masa: ρv
- Flujo de momento: $(\rho v) v$
- El flujo de energía cinética: $(\rho v) (v^2/2)$
- El flujo de la energía interna: $(\rho v) (u/\rho)$

Queremos relacionar las condiciones físicas del gas a cada lado del choque:

- Conservación de la masa:

El flujo de masa que entra al choque = al flujo de masa que sale (masa x unidad de área y de tiempo).

No se crea ni se destruye masa durante el proceso del choque.

$$\rho_0 v_0 = \rho_1 v_1$$

- Conservación de momento:

La ecuación de conservación del momento establece que la suma de las fuerzas externas sobre un sistema es igual a la tasa de cambio del momento del sistema.

$$\rho_0 v_0^2 + P_0 = \rho_1 v_1^2 + P_1$$

donde P es la presión (fuerza x ud de área de cada lado del frente). En este caso es la presión térmica del gas:

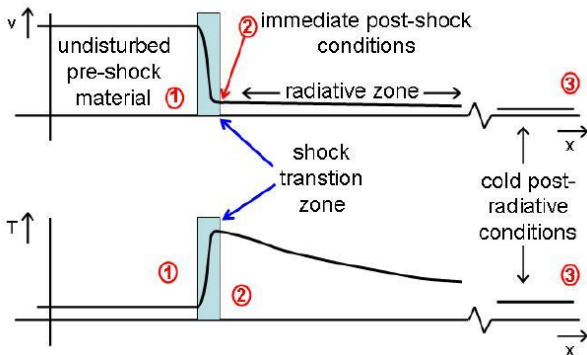
$$P = \rho k T / \mu \quad (\text{gas ideal})$$

- **Conservación de energía:**

Consideramos dos casos límites:

1) el gas no radía nada $\Rightarrow$ **choque adiabático**

2) la radiación es tan rápida que se establece un equilibrio radiativo $\Rightarrow$ **choque radiativo isotérmico**



Queremos relacionar las propiedades del gas en 2 y en 3, respecto a las de 1

En el caso del choque adiabático: conservación de energía

$$E_0 = \rho_0 v_0 \left(\frac{1}{2} v_0^2 + \frac{u_0}{\rho_0} \right)$$

$$E_1 = \rho_1 v_1 \left(\frac{1}{2} v_1^2 + \frac{u_1}{\rho_1} \right)$$

La diferencia de energía del gas (cinética+interna) tiene que ser igual al trabajo hecho por el choque sobre el gas por unidad de tiempo y de área

Flujo de energía = Trabajo / (tiempo x área) = Presión x Velocidad

$$E_1 - E_0 = P_0 v_0 - P_1 v_1 \implies$$

$$\left(\frac{1}{2} v_0^2 + \frac{u_0}{\rho_0} + \frac{P_0}{\rho_0} \right) = \left(\frac{1}{2} v_1^2 + \frac{u_1}{\rho_1} + \frac{P_1}{\rho_1} \right)$$

En un gas ideal la energía interna $u = \frac{P}{(\gamma-1)}$

Relaciones de Rankine-Hugoniot

Se llega a las siguientes relaciones, para $M \gg 1$

- $\rho_1/\rho_0 \longrightarrow \frac{\gamma+1}{\gamma-1} = 4$

$\implies$ la densidad aumenta en un factor 4

- $P_1 \longrightarrow \frac{2}{\gamma+1} \rho_0 v_0^2 = \frac{3}{4} \rho_0 v_0^2$

$\implies$ la presión aumenta sin límite

- $v_1 = \frac{1}{4} v_0$

$\implies$ la energía cinética disminuye en un factor 16

- $T_1 = \frac{2(\gamma-1)\mu}{(\gamma+1)^2 k} = \frac{3\mu m_H}{16 k} v_0^2 \quad (P = \rho k T / \mu)$

$\implies$ no tiene límite! la temperatura aumenta acorde a v_0^2 .

La energía cinética se transforma en energía térmica

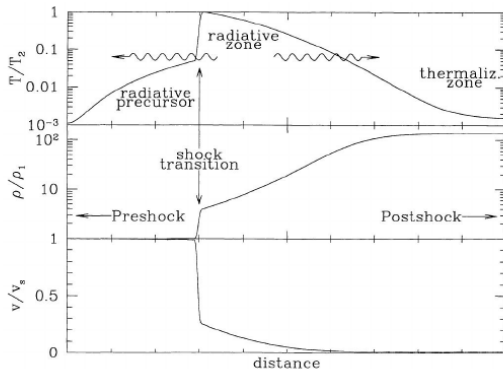
v_0 es la velocidad del frente de choque, v_{sh}

El aumento de la temperatura tiene varias consecuencias:

- Puede ionizar el gas por colisiones
- Puede acelerar las reacciones químicas
- Puede disociar moléculas
- El gas chocado radía como consecuencia de la excitación colisional de los átomos, iones y moléculas → se enfría
- La radiación ionizante se adelanta al choque e ioniza el gas aún no chocado: precursor radiativo

Precursor radiativo

La radiación viaja a la velocidad de la luz $\rightarrow$ afecta al gas aún no chocado: *radiative precursor*



- Zona pre-choque, frente de choque, zona post-choque
- El aumento de la temp. genera excitación colisional $\rightarrow$ radía hacia todos lados (zona radiativa): precursor radiativo en el gas pre-choque, lo ioniza y disocia.

Cambio de sistema de referencia

- Si ahora considero el **sistema de referencia en la estrella** y tomo una velocidad del frente de choque $V_{sh} \rightarrow$ las velocidades del gas cambian:

$$u_0 = V_{sh} - v_0$$

$$u_1 = V_{sh} - v_1$$

Reemplazando y tomando $u_0 = 0$ obtenemos:

- $\rho_1 / \rho_0 = 4$ **SE COMPRIME**

- $P_1 = \frac{3}{4} \rho_0 V_{sh}^2$

- $u_1 = \frac{3}{4} V_{sh}$ **SE PONE EN MOVIMIENTO**

- $T_1 = \frac{3 \mu m_H}{16 k} V_{sh}^2$ **LA TEMP. AUMENTA MUCHO**

(puedo sacar la V_{sh} necesaria para que el gas se ionice si $\frac{3}{2} k T = 13,6 \text{ eV}$)

Frentes radiativos



- Es un frente adiabático con una zona de enfriamiento
- consideramos dos superficies donde los parámetros cambian
- caso isotérmico $T_2 = T_0$: reemplaza Eq. de cons. de energía.
- $\gamma = 1$
- En este caso se conservan la masa y el momento y obtenemos:

- $$v_2 = V_{sh} \left(1 - \frac{1}{M_0^2} \right) \rightarrow V_{sh}$$

- $$\rho_2 = M_0^2 \rho_0 \implies \text{puedo superar la compresión adiabática!}$$

- $$P_2 = P_0 M_0^2$$

- $$T_2 = T_0$$

Tiempo de enfriamiento

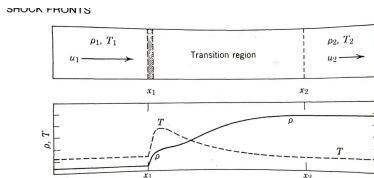


Figure 10.1 Schematic diagram of radiating shock. In the upper diagram the fluid is shown moving from left to right. At x_1 the fluid enters the shaded area, representing the nonradiative shock, followed by the transition region, where the temperature drops by radiation. The changes of density and temperature are indicated schematically in the lower figure.

- El gas radía y emite.
- Tasa de enfriamiento si dominan las recombinaciones es $\Lambda \propto \sqrt{T}$
- $\Rightarrow$ Tiempo de enfriamiento: $\tau_{enf} = \frac{kT}{n\Lambda(T)} \propto \sqrt{T}$
- $\Rightarrow$ para choques fuertes, $M \gg 1$ la temperatura del gas chocado puede ser muy elevada y el τ_{enf} muy largo, quizás mayor que el tiempo que dura el choque. Esto ocurre por ejemplo en el MIE chocado por una SN.

Tipos de choques

- **Choque adiabático:**

- Se desprecian las pérdidas radiativas. Se toman superficies de control MUY cerca del choque.
- La temperatura aumenta tanto que las pérdidas radiativas son despreciables.
- Ocurren cuando la velocidad de choque es alta (choques fuertes), el tiempo transcurrido es chico, o la densidad es muy baja.
- **A través del frente de choque se conserva la masa, el momento y la energía.**

- **Choque radiativo:**

- No se desprecian las pérdidas radiativas. Son choques más débiles.
- Ocurren para velocidades de choque más bajas y para gases más densos.
- **Se conserva la masa y el momento.**
- Caso isotérmico: $T_2 = T_0$. Las temperaturas pueden ser iguales solo si el gas no cambia de estado, no se ioniza ni se disocia (choque más débil)

Química detrás de un choque

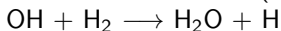
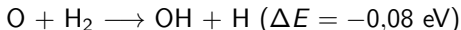
Los choques tienen fuertes consecuencias en el MIE.

El aumento de la temperatura permite reacciones químicas que no son posibles a bajas temperaturas

- la química en los gases chocados es MUY distinta a la que se da en las nubes densas inactivas.
- Los choques pueden generar **disociación, ionización y eventualmente formación de moléculas.**
- La disociación de H_2 por colisión ocurre para gas a $T > 10^5 \text{ K}$, o velocidades de choque superiores a 50 km/s. Cuando el gas se enfria, el H_2 vuelve a formarse.

- En la región post-choque, con temperaturas elevadas, se pueden formar moléculas a través de **reacciones endotérmicas**. Los elementos importantes para esto son H, H₂ y O (suponiendo una mezcla cósmica con O > C).

- Si el H₂ no se disocia → reacciona con el O y forma H₂O



y las moléculas más abundantes son: H₂, H₂O, CO y O₂.

También se detectan trazas de CH⁺, SiO y H₂S (molec. características de choques no-disociativos)

- Si el H₂ se disocia → los átomos de H colisionan con otras moléculas y las disocian y casi todo el gas está en estado atómico. Esto ocurre para un gas con T ~ 1000 K.

La formación de estas moléculas y la energía que disipan en sus líneas rotacionales y vibracionales tienen mucho impacto en la termodinámica del choque. Esto debe ser tenido en cuenta en los modelos de choques.

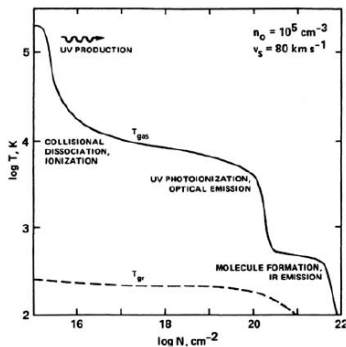


Figura: Estructura de un choque fuerte (80 km/s) sobre una nube molecular. Temperatura del gas y del polvo. Eje x : distancia al frente de choque, expresada en densidad de columna $N(\text{H} + 2\text{H}_2)$. Hay 3 regiones después del choque: una región angosta a muy alta temp. (10^5 K), donde el gas está colisionalmente dissociado e ionizado. Otra donde el H se recombina ($T = 10^4$ K), se emiten líneas en el óptico, y otra donde las moléculas vuelven a formarse ($T = 200$ K), se emiten líneas en el IR. A la densidad elegida, el polvo está débilmente acoplado térmicamente con el gas y $T_{gr} \ll T_{gas}$.

Espectros de regiones chocadas

La naturaleza de las líneas de emisión y la radiación emitida por un gas chocado dependen en gran medida de la densidad del medio en el que ocurre el choque.

- Los choques que ionizan elevan la temperatura a 10^6 K $\rightarrow$ brillan en rayos X. Si la densidad es baja, el tiempo de enfriamiento es largo y la densidad columnar chica $\rightarrow$ no va a emitir mucho en UV, óptico, IR.
- Si un choque ionizante entra en una zona muy densa, el gas radía y se comprime. Densidad de columna alta: muchas colisiones. Puede ser brillante en óptico/IR por líneas de estructura fina excitadas colisionalmente.

- Las líneas emitidas por una región ionizada por choque son distintas a las foto ionizadas, suele usarse para diferenciar:
 - El cociente $[\text{NII}]\lambda\lambda 6548, 6584$ con $\text{H}\alpha\lambda 6565$, ya que $[\text{NII}]$ no es tan brillante en RHII como si lo es en los choques
 - El cociente $[\text{FeII}] 1.644 \mu\text{m}/\text{Br}\gamma 2.166 \mu\text{m}$ es más alto en choques porque en RHII el Fe está en estados de ionización más elevados.
 - los cocientes de $[\text{OI}]$, $[\text{OII}]$, $[\text{NI}]$, $[\text{NII}]$, $[\text{SII}]$, en relación a $\text{H}\beta$.
- en los choques la zona de recombinación excede por alrededor de un factor 100 a la zona totalmente ionizada.
- cocientes de líneas sensibles a la temperatura son tmb buenos trazadores de choques: $[\text{OIII}]\lambda 4363/5007$, ya que en los choques la temp supera los 10^4 K de las RHII.
- Los choques tmb producen una mayor variedad de grados de especies ionizadas

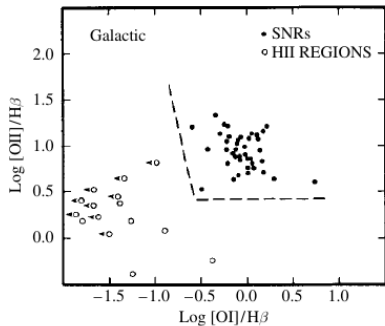


Figure 11.3 The $[\text{OII}]/\text{H}\beta$ and $[\text{OI}]/\text{H}\beta$ ratios provide an easy discriminant between shocked and photo-ionized gas. Figure reprinted with permission from R. A. Fesen, W. P. Blair, and R. P. Kirshner, 1985, *Ap. J.*, **292**, p. 29.

En el IR, el gas chocado puede distinguirse del gas foto-calentado (PDR):

- por la fuerte presencia de de la línea de [SI] a $25\ \mu\text{m}$ en el gas chocado. En las PDR el azufre está fotoionizado en las zonas tibias donde la línea podría producirse.
- por la ausencia de la emisión de los PAH (característico de gas afectado por fotones UV)
- por el cociente de las líneas [OI] $63\mu\text{m}$ y [CII] $158\ \mu\text{m}$. La línea de emisión [CII] a $158\ \mu\text{m}$ es muy sensible a la presencia de gas ionizado y se considera una línea de enfriamiento dominante en las regiones foto-ionizadas. Por otro lado, la línea de [OI] a $63\ \mu\text{m}$ es sensible a la presencia de gas neutro y puede contribuir a la emisión en regiones chocadas.

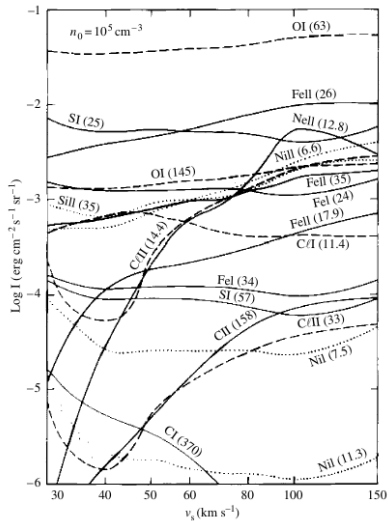


Figure 11.4 Calculated intensities of important infrared fine-structure lines as a function of shock velocity for a preshock density of 10^5 cm^{-3} . Figure reprinted with permission from D. Hollenbach and C. F. McKee, 1989, *Ap. J.*, **342**, p. 306.



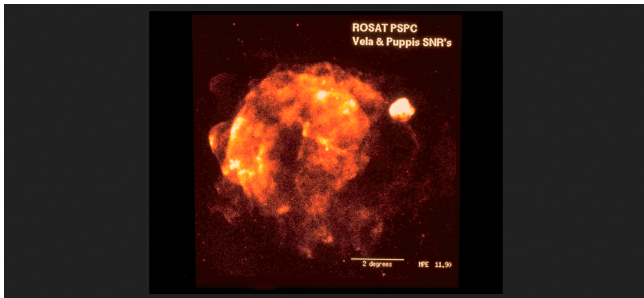
The glowing, clumpy streams of material shown in these NASA/ESA Hubble Space Telescope images are the signposts of star birth. Ejected episodically by young stars like, the blobby material zips along at more than 700 000 kilometres per hour. The speedy jets are confined to narrow beams by the powerful stellar magnetic field.



Infrared image of the shockwave (yellow arc) created by the runaway star Zeta Ophiuchi in an interstellar dust cloud.



The explosion is over but the consequences continue. About eleven thousand years ago a star in the constellation of Vela could be seen to explode, creating a strange point of light briefly visible to humans living near the beginning of recorded history. The outer layers of the star crashed into the interstellar medium, driving a shock wave that is still visible today. A roughly spherical, expanding shock wave is visible in X-rays. The above image captures some of that filamentary and gigantic shock in visible light.



What happens when a star explodes? A huge fireball of hot gas shoots out in all directions. When this gas slams into the existing interstellar medium, it heats up so much it glows in X-rays. The above picture by the ROSAT satellite has captured some of these X-rays and shown the Vela supernova explosion was roughly spherical. Non-uniformity of the interstellar medium causes Vela's appearance to be irregular. Coincidentally, a completely different supernova shell can also be seen in X-rays in this picture! It is visible as the bright patch near the upper right. This Puppis supernova remnant nebula is actually about four times farther than the Vela nebula.

Las ondas de choque producen cambios significativos en el MIE:

- son cruciales para la formación y evolución de estructuras
- generan un aumento repentino de presión y temperatura. Esto tiene implicancias en la emisión y absorción de radiación en distintas longitudes de onda
- pueden ionizar y excitar átomos y moléculas presentes en el medio interestelar, lo que se refleja en las características espectrales observadas
- ponen el gas en movimiento, generando perturbaciones y contribuyendo a la dinámica global del medio interestelar.
- generan las condiciones físicas propicias para la formación de algunas moléculas
- comprimen el gas, aumentando significativamente su densidad y proporcionando el entorno adecuado para la formación de nuevas estrellas