



FORMACIÓN ESTELAR MASIVA:

Observaciones de amoniaco en la fase de Núcleo Molecular Caliente

1

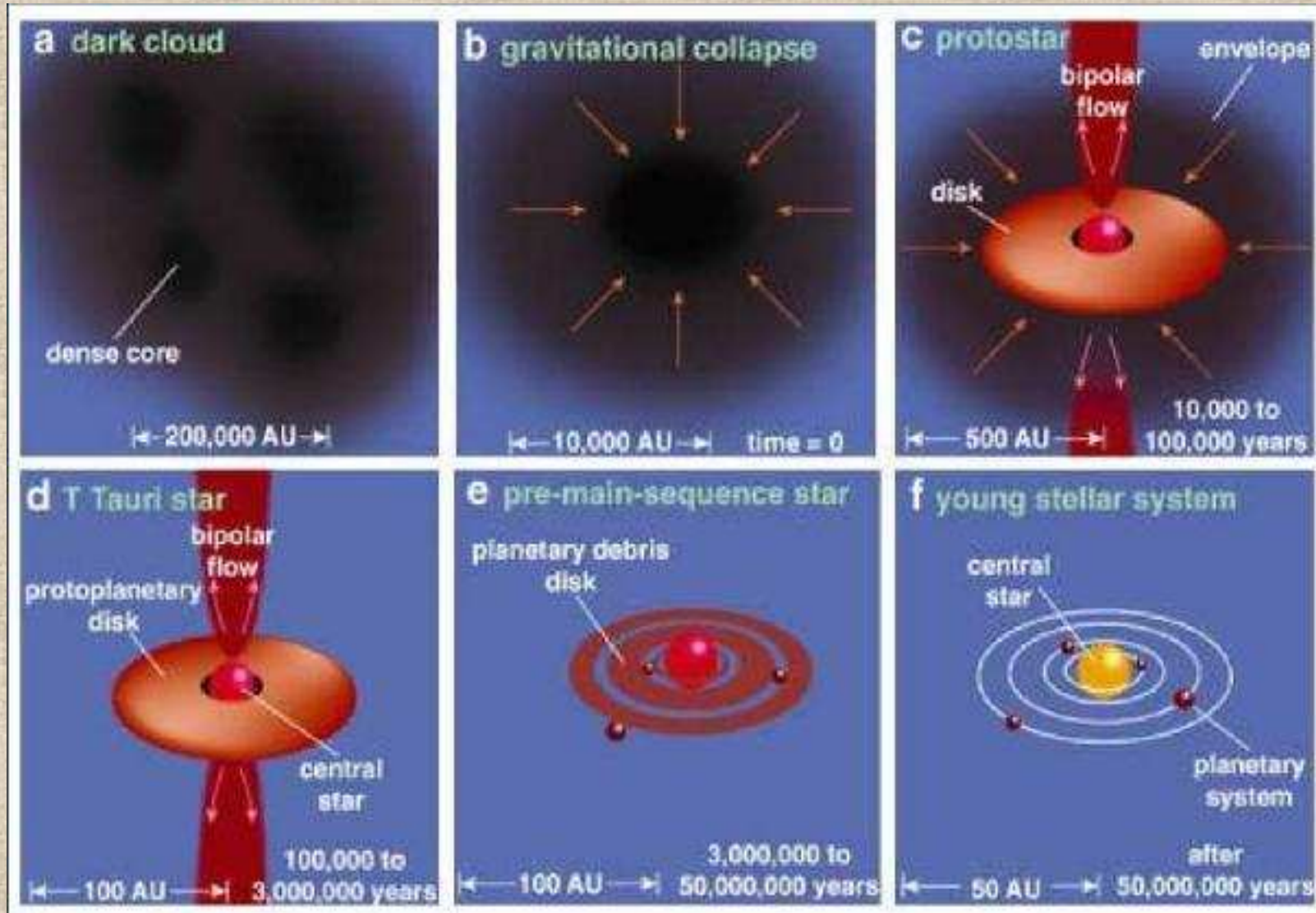
INTRODUCCIÓN

- Formación de estrellas de baja masa
- Formación estrellas de alta masa
 - Problemas
 - Coalescencia frente a acreción
 - ¿es alta masa una versión a escala de baja masa?
- Etapas en la evolución
- NMC en la región G31.41+0.31
- Observaciones de NH₃

FORMACIÓN DE ESTRELLAS DE BAJA MASA



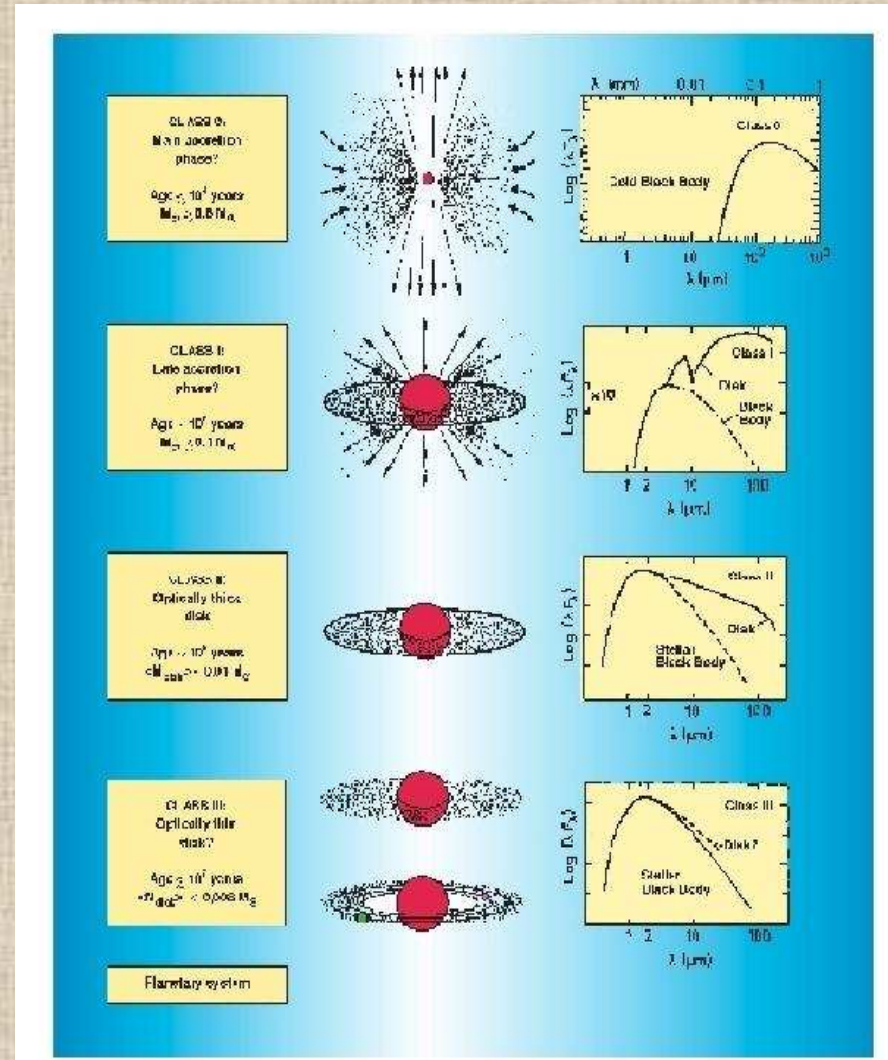
FORMACIÓN DE ESTRELLAS DE BAJA MASA



FORMACIÓN DE ESTRELLAS DE BAJA MASA

○ Colapso gravitatorio de una nube molecular

- Clase 0: SED=cuerpo negro frío
- Clase 1: aumenta a longitudes de onda larga, aun no visibles
- Clase 2: poco polvo, disco grueso, detectables en el visible
- Clase 3: polvo cicumestelar, disco delgado. T-tauri y estrellas en secuencia principal.



ALTA MASA

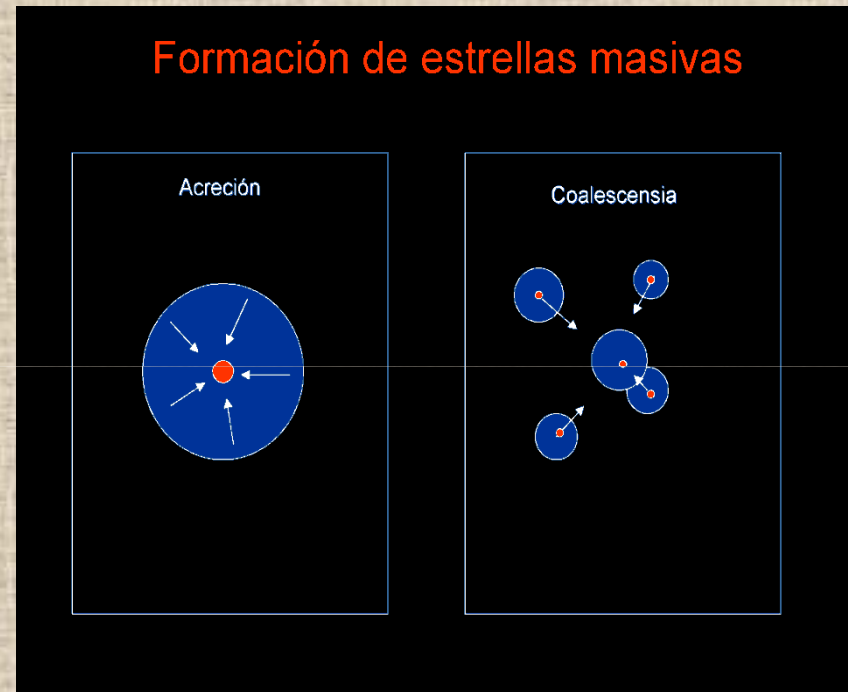
Masas	Designación
8-16 M_{\odot}	Tipo B tempranas
16-32 M_{\odot}	Tipo O tardías
32-64 M_{\odot}	Tipo O tempranas
64-128 M_{\odot}	Tipo O/WR

Entendemos por alta masa aquellas estrellas que son capaces de producir una supernova tipo II ($M_{*} > 8M_{\odot}$)

FORMACIÓN ESTRELLAS DE ALTA MASA

○ Dificultades

- Rápida evolución
 - Menor número
 - Más distantes
 - En grupos
 - Común su multiplicidad
 - Sumergidas en la nube:
Gran extinción.
-
- ignición antes de terminar
acreción
 - Escenarios:
 - Coalescencia
 - Acreción



COALESCENCIA VS. ACRECIÓN

COALESCENCIA

- A Favor:
 - Vientos estelares y presión de radiación impiden acreción (históricamente)
 - Estrellas masivas aglutinadas en el centro de los cúmulos
- En Contra:
 - Tiempo de colisión > tiempo vida del cúmulo

ACRECIÓN

- A favor:
- En Contra:

COALESCENCIA VS. ACRECIÓN

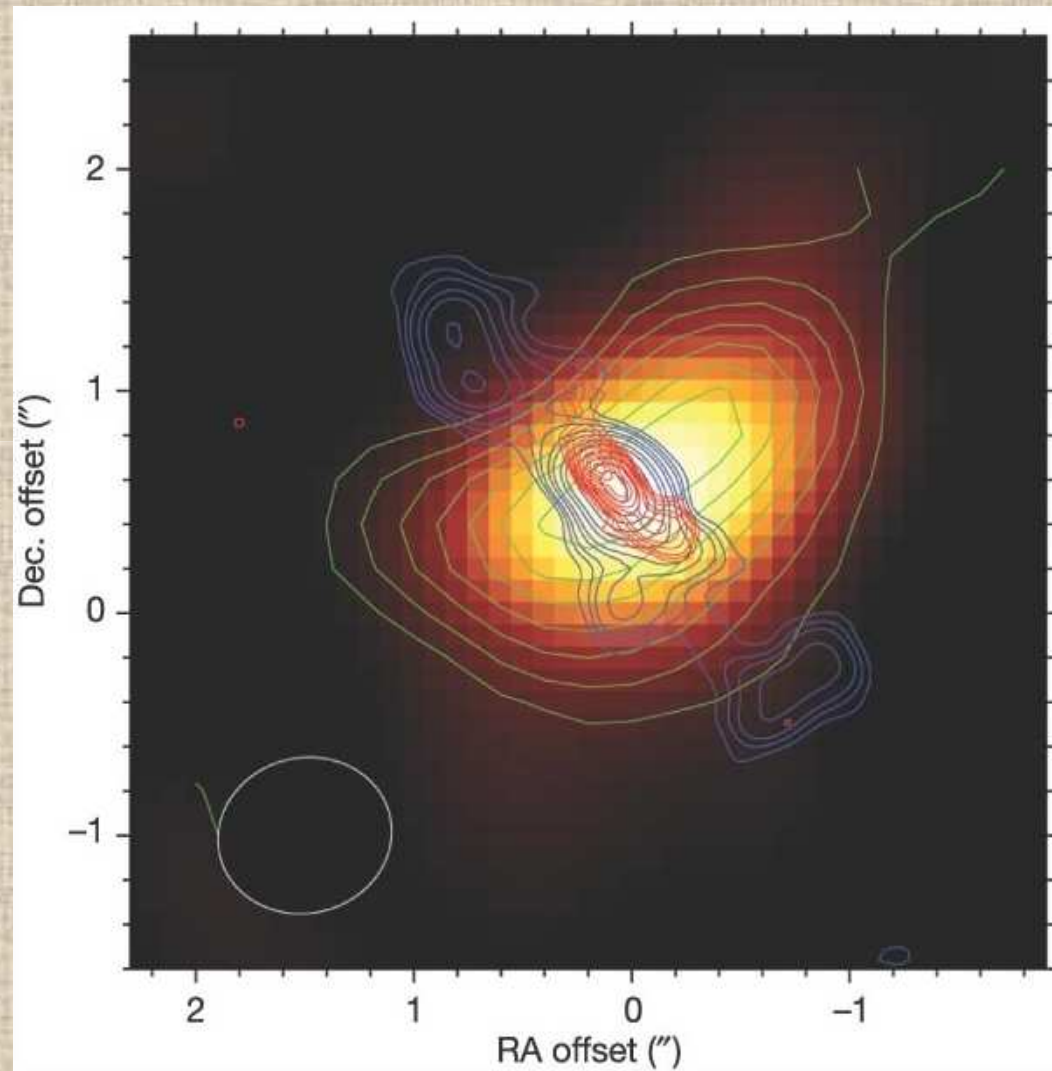
COALESCENCIA

- A Favor:
 - Vientos estelares impiden acreción (históricamente)
 - Estrellas masivas aglutinadas en el centro de los cúmulos
- En Contra:
 - Tiempo de colisión > tiempo vida del cúmulo
 - Vientos estelares NO impiden acreción:
 - Mejoras en modelos:
 - Forma de los granos de polvo
 - Distribución de tamaños
 - Segregación

ACRECIÓN

- A favor:
 - Observaciones:
 - Discos
 - Outflows
- } Tipo B
- En Contra:

DISCO DE PATEL ET AL. 2005



COALESCENCIA VS. ACRECIÓN

COALESCENCIA

- A Favor:
 - Vientos estelares impiden acreción (históricamente)
 - Estrellas masivas aglutinadas en el centro de los cúmulos
- En Contra:
 - Tiempo de colisión > tiempo vida del cúmulo
 - Vientos estelares NO impiden acreción:
 - Mejoras en modelos:
 - Forma de los granos de polvo
 - Distribución de tamaños
 - Segregación

ACRECIÓN

- A favor:
 - Observaciones:
 - Discos
 - Outflows } Tipo B
- En Contra:
 - Estrellas tipo O

¿es simplemente la formación de estrella masivas una versión a mayor escala de la formación de baja masa?

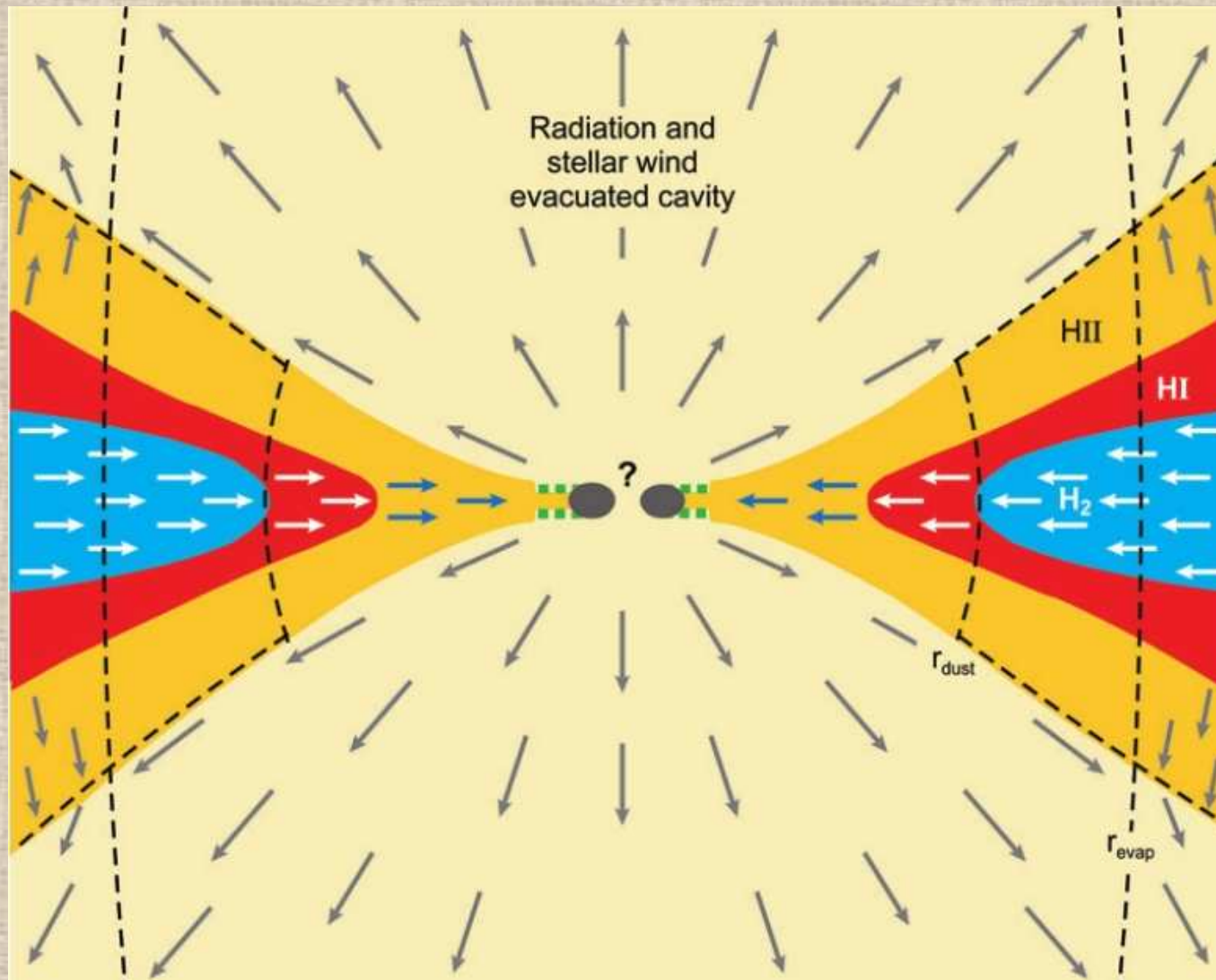
¿es simplemente la formación de estrella masivas una versión a mayor escala de la formación de baja masa?

No

DIFERENCIAS BAJA-ALTA MASA

- Fuerzas radiativas:
 - Baja masa: despreciables
 - Alta masa: influyen en la acreción y masa final de la estrella
- Fotones far-UV producidos por estrellas de alta masa disocian H₂ y CO del entorno
- Outflows:
 - Baja masa: producidos por fuerzas centrifugo-magnéticas
 - Alta masa: vientos estelares despejan los polos y escapa material ionizado
- Estrellas de alta masa inducen formación estelar:
 - Supernova
 - Vientos estelares
 - Outflows.

DISCOS ALTA MASA



DIFERENCIAS BAJA-ALTA MASA

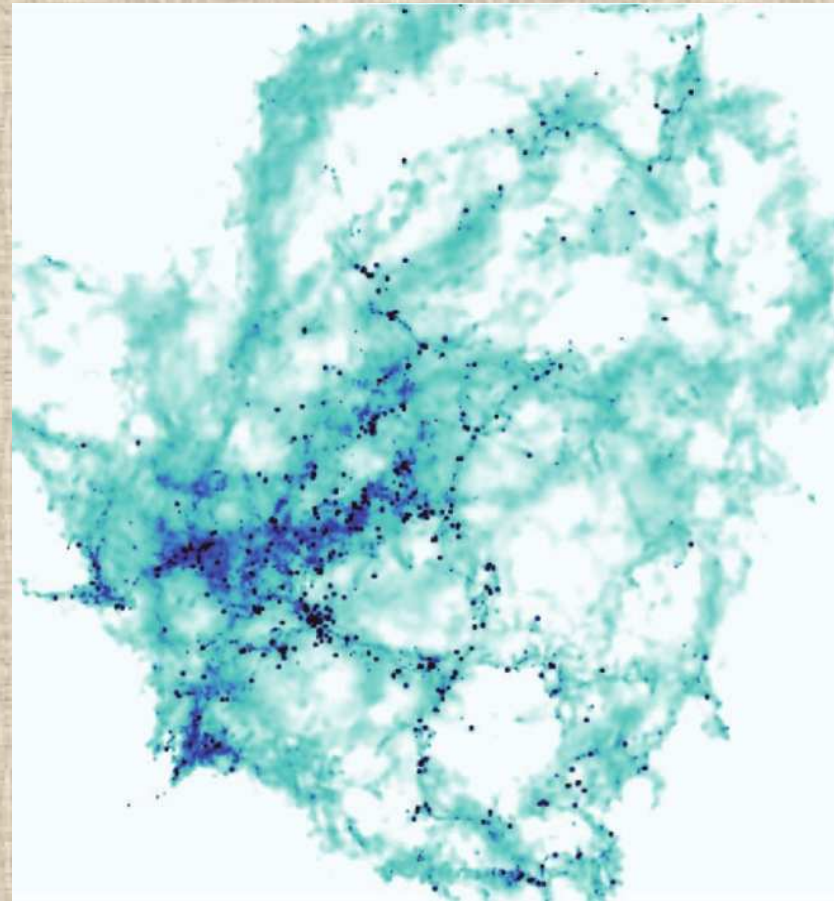
- Fuerzas radiativas:
 - Baja masa: despreciables
 - Alta masa: influyen en la acreción y masa final de la estrella
- Fotones far-UV producidos por estrellas de alta masa disocian H₂ y CO del entorno
- Outflows:
 - Baja masa: producidos por fuerzas centrifugo-magnéticas
 - Alta masa: vientos estelares despejan los polos y escapa material ionizado
- Estrellas de alta masa inducen formación estelar:
 - Supernova
 - Vientos estelares
 - Outflows.

ETAPAS FORMACIÓN ALTA MASA

Clasificación observacional

- IRDC (Infrared Dark Clouds)
- NMC
- Hipercompactas y Ultracompactas HII
- Regiones HII Clásicas

Nube molecular gigante (simulación)

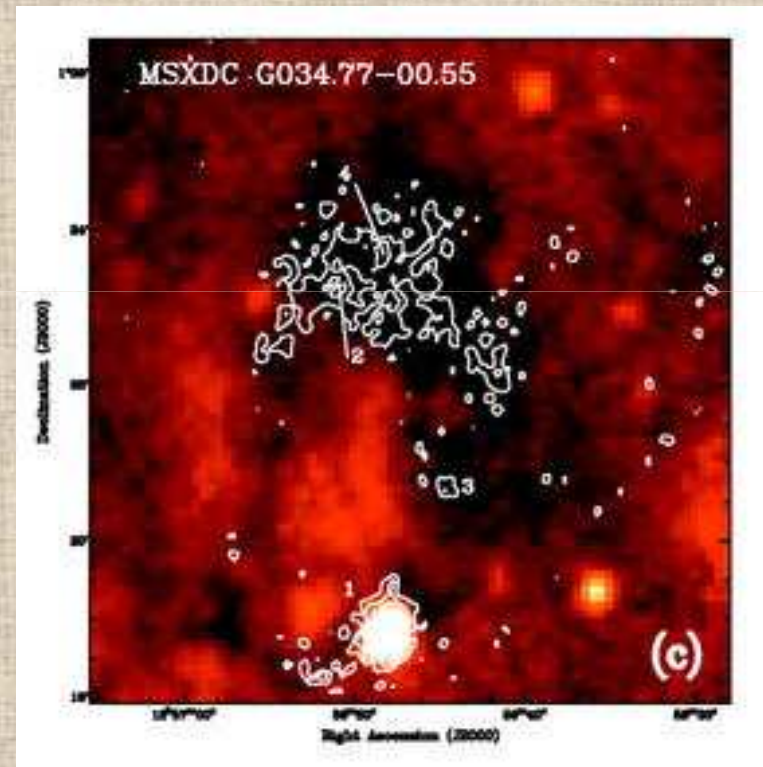


ETAPAS FORMACIÓN ALTA MASA

Clasificación observacional

- IRDC (Infrared Dark Clouds): baja temperatura y alta densidad que llega a oscurecer la radiación IR. Condiciones iniciales para el colapso, aún no existe protoestrella.
- NMC
- Hipercompactas y Ultracompactas HII
- Regiones HII Clásicas

Ejemplo IRDC

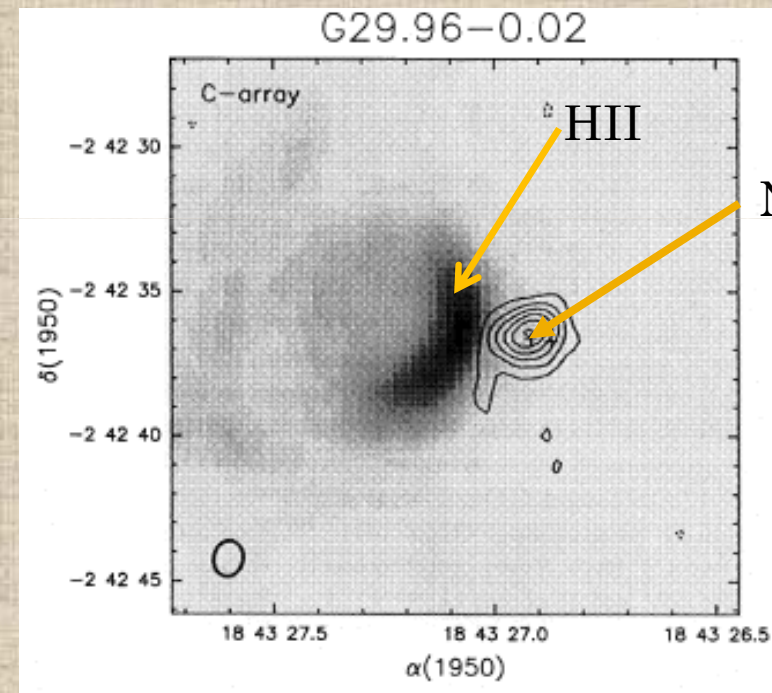


ETAPAS FORMACIÓN ALTA MASA

Clasificación observacional

Ejemplo NMC

- IRDC
- NMC: Núcleos moleculares calientes (Hot Molecular Cores)
 - condensaciones de gas denso y caliente, 100K
 - grandes abundancias de moléculas orgánicas complejas
 - Intensa emisión en polvo y líneas alta excitación
 - Protoestrella sumergida en su interior pero aún no ha empezado a ionizar
- Hipercompactas y Ultracompactas HII
- Regiones HII Clásicas

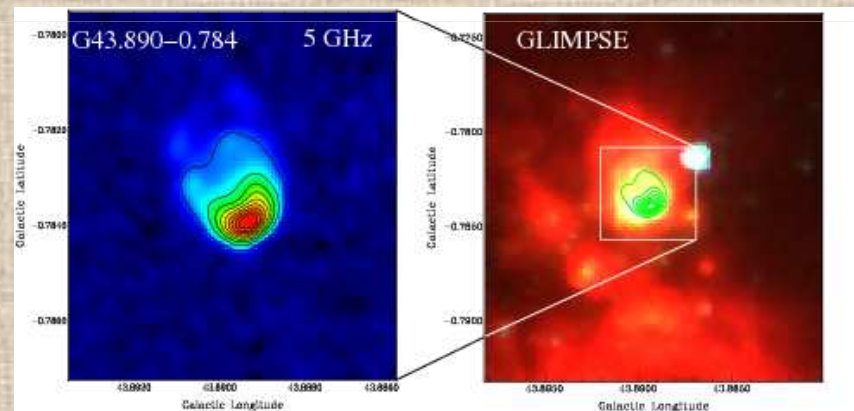


ETAPAS FORMACIÓN ALTA MASA

Clasificación observacional

Ejemplo UCHII

- IRDC
- NMC
- Hipercompactas y Ultracompactas HII: Los fotones UV de la estrella empiezan a ionizar el medio. Región de gas ionizado es pequeña y permanece confinado en las proximidades de la estrella.
- Regiones HII Clásicas

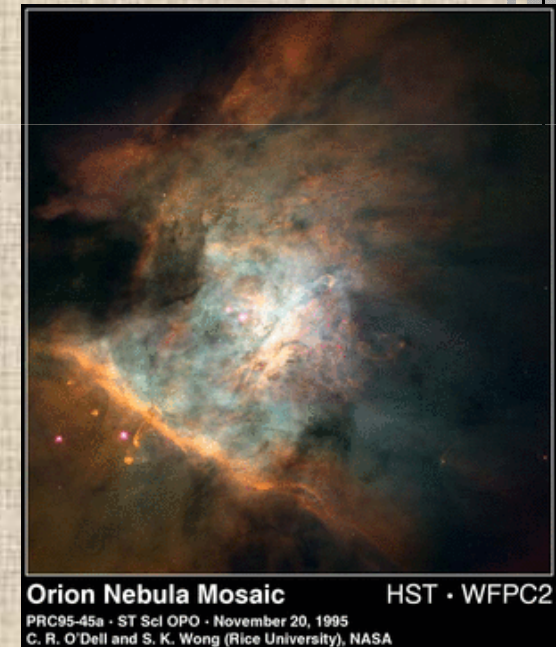
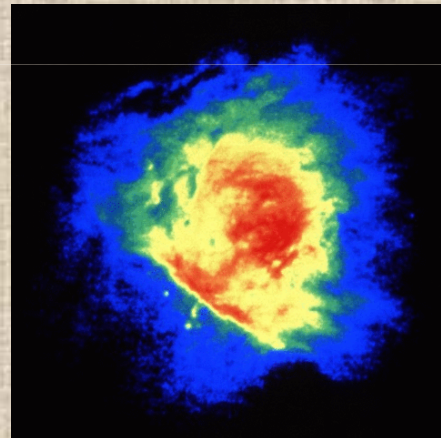


ETAPAS FORMACIÓN ALTA MASA

Clasificación observacional

Ejemplo HII

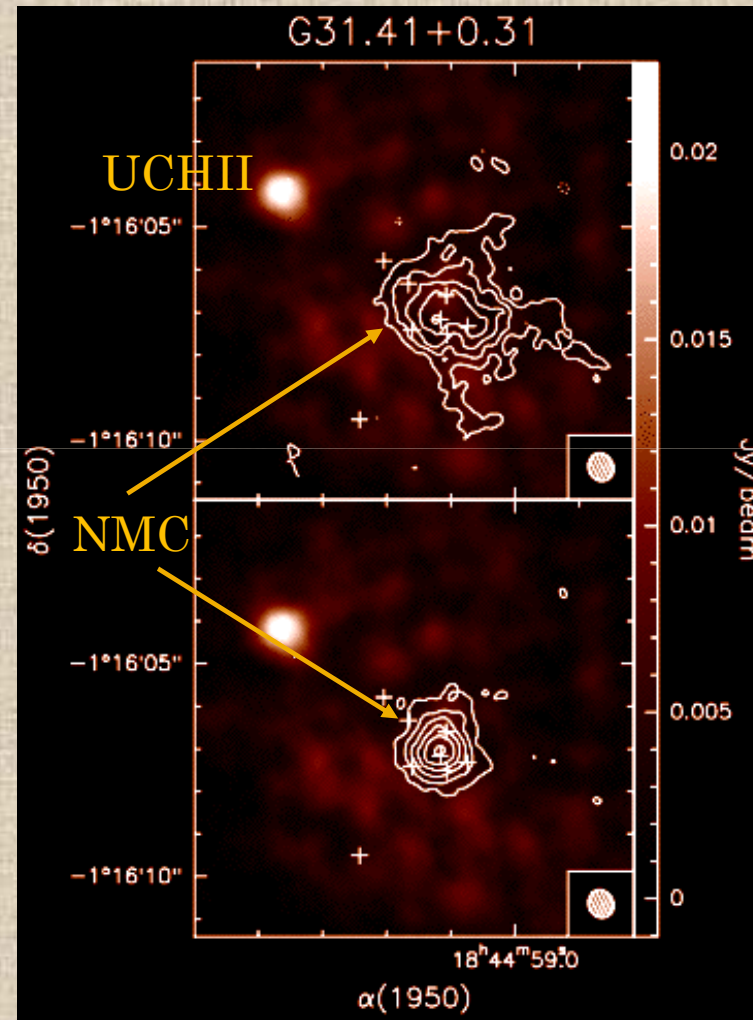
- IRDC
- NMC
- Hipercompactas y Ultracompactas HII
- Regiones HII Clásicas: gas ionizado globalmente. Se expande hidrodinámicamente y perturba la nube molecular original, haciendo visible en el óptico y en el infrarrojo la estrella de alta masa



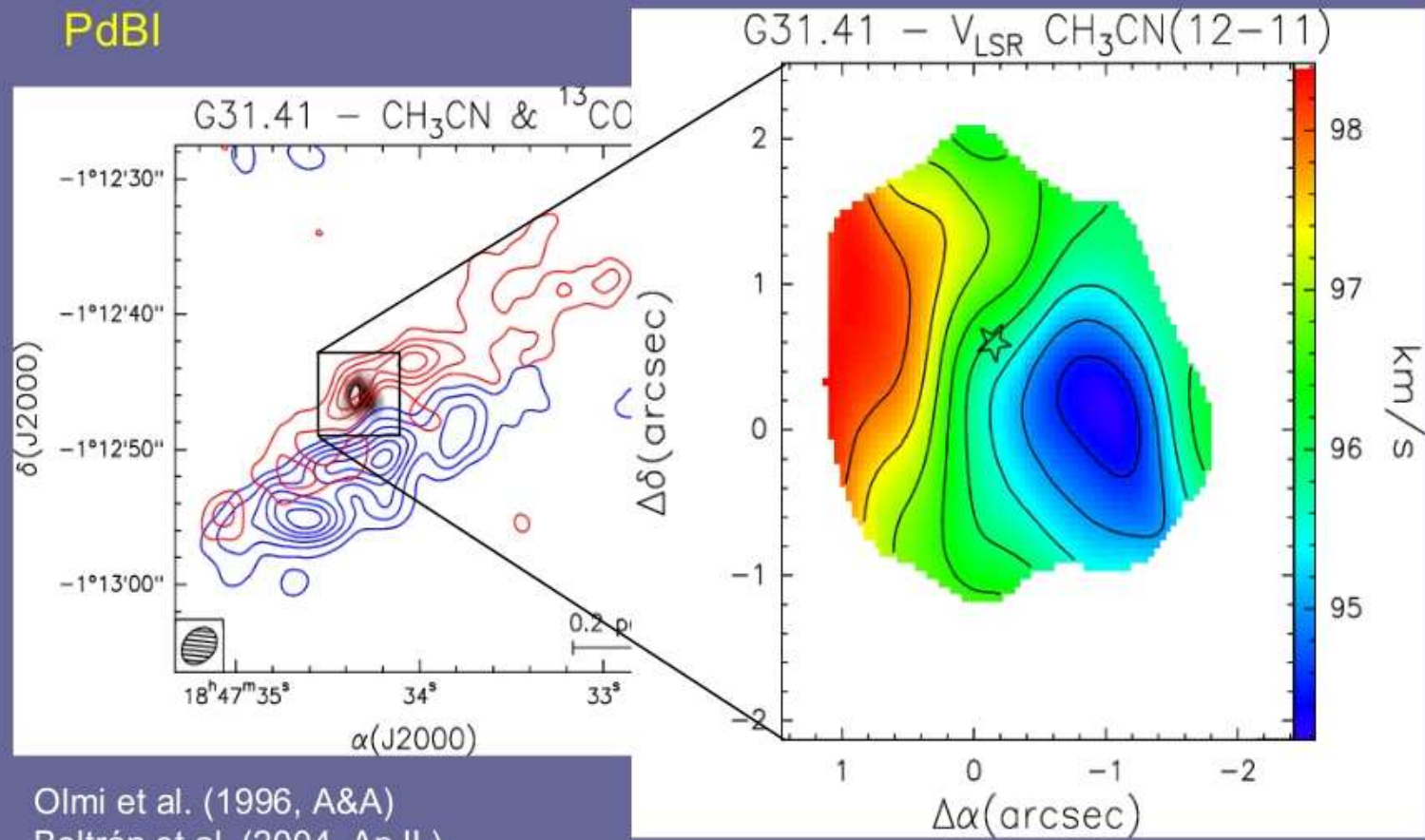
Orion Nebula Mosaic HST · WFPC2
PRC95-45a · ST ScI OPO · November 20, 1995
C. R. O'Dell and S. K. Wong (Rice University), NASA

NMC EN LA REGIÓN G31.41+0.31

- Muy caliente:
 - Muy fuerte emisión de polvo
 - Fuerte emisión de líneas moleculares de alta excitación.
- 2 fuentes de radio-continuo en el interior
- Líneas moleculares:
 - HCO+, SiO (Maxia et al. 2001)
 - ^{13}CO (Olmí et al. 1996)
 - CS (Anglada et al. 1996)
 - H₂S, C₁₈O (Gibb, Mundy & Wyrowski 2004)
 - CH₃CN (Beltrán et al. 2005)
 - NH₃ (Churchwell et al. 1990, Cesaroni et al. 1998)
- Gradiente de velocidad:
¿outflow o disco en rotación?



PdBI



Olmi et al. (1996, A&A)
Beltrán et al. (2004, ApJL)

Beltrán et al. (2004, ApJL)

Observaciones



Interferómetro VLA (Very Large Array)

Nuevo México, USA

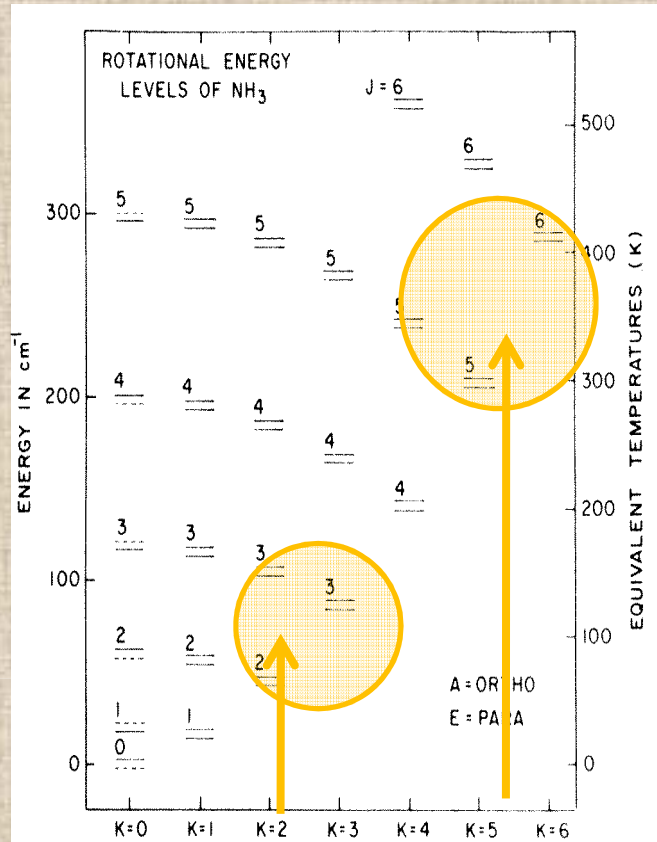
- 27 antenas
- 25m de diámetro cada antena
- Forma de Y
- Alta resolución angular

VLA

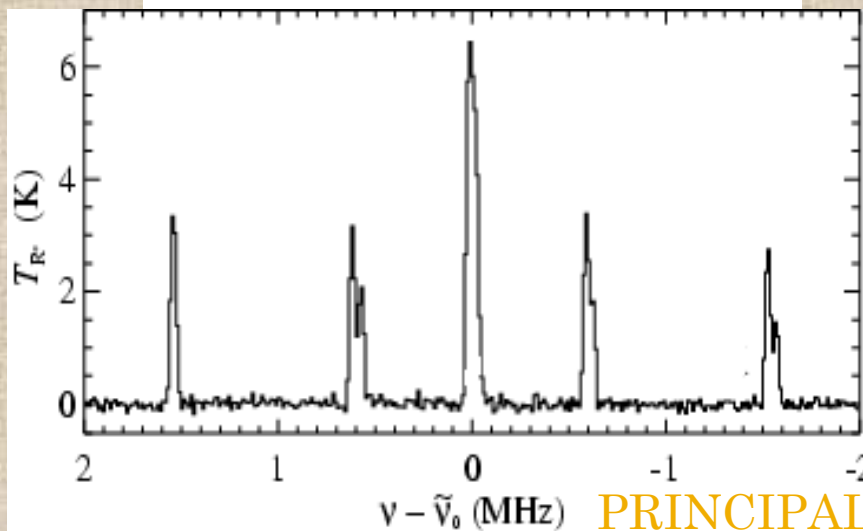
Observaciones

Transición	Fecha	Frecuencia (GHz)	Resolución angular (")	Ancho de banda (MHz)	Resolución espectral (km/s)
(2,2)	2-May-09	23.6944955	0.29 X 0.26	6.25	2.47
(3,3)	2-May-09	23.7226333	0.28x0.26	6.25	2.45
(4,4) Datos archivo	15-Oct-04	24.1394163	0.32x0.26	12.5	2.43
(5,5)	15-Oct-04	24.5329887	0.37x0.27	6.25	2.39
(6,6)	3-May-09	25.0560250	0.37x0.23	6.25	2.34

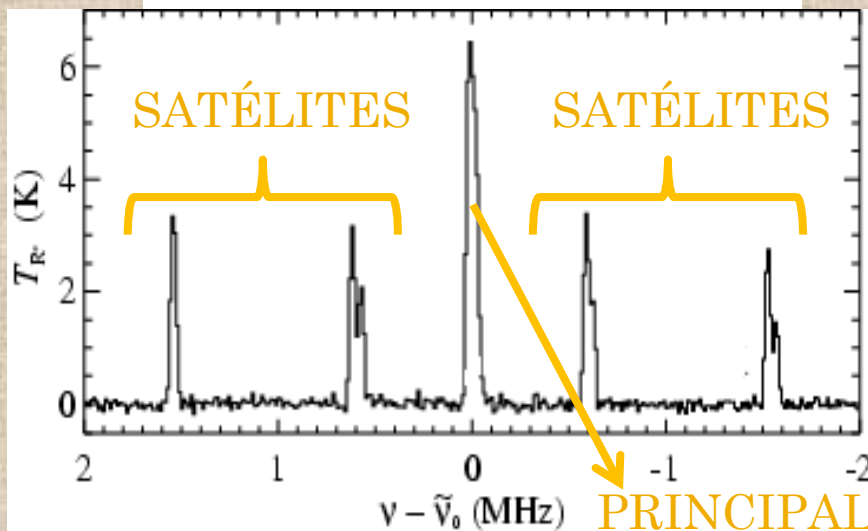
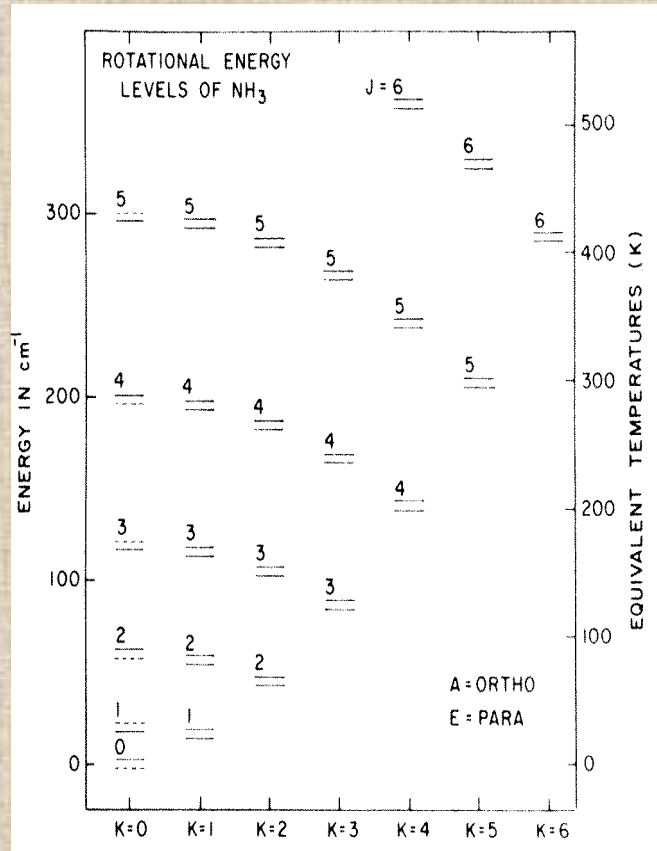
Línea de inversión del amoníaco



- ▶ Transiciones de más alta excitación trazan el gas más caliente.
- ▶ Estructura hiperfina debido a interacción átomo N con campo eléctrico H
- ▶ Principal + 2 pares de líneas satélites simétricamente espaciadas
- ▶ Intensidades relativas satélite/principal:
 - Satélites menos intensas intrínsecamente que la principal
 - En un medio de alta opacidad la principal se satura y la relación se aproxima a 1



Línea de inversión del amoníaco



- ▶ Transiciones de más alta excitación trazan el gas más caliente.
- ▶ Estructura hiperfina debido a interacción átomo N con campo eléctrico H
- ▶ Principal + 2 pares de líneas satélites simétricamente espaciadas
- ▶ Intensidades relativas satélite/principal:
 - Satélites menos intensas intrínsecamente que la principal
 - En un medio de alta opacidad la principal se satura y la relación se aproxima a 1

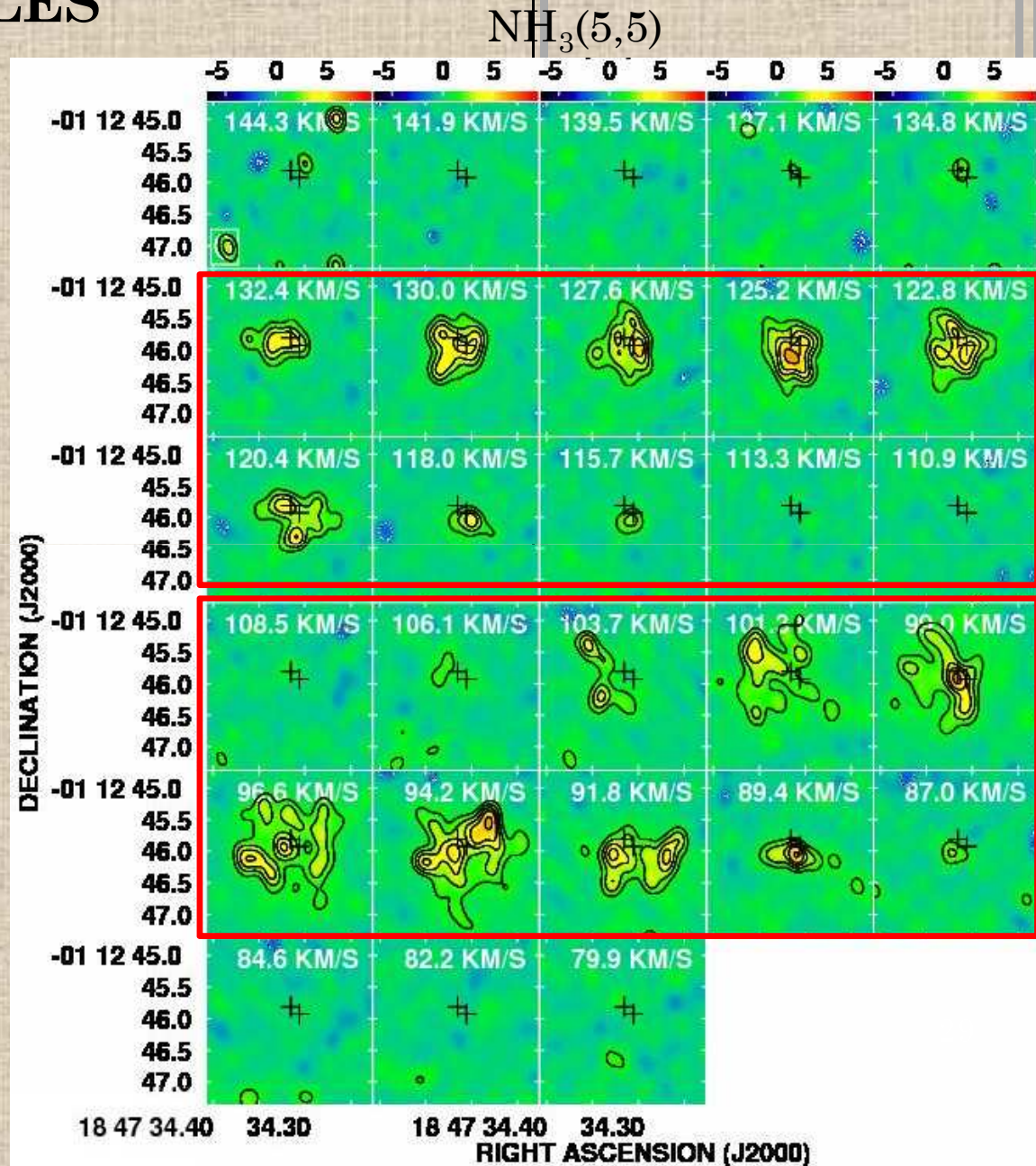
LÍNEAS DE INVERSIÓN DE AMONIACO

Transición	Principal	Satélites internas	Satélites externas
(2,2)	0.796	0.051	0.050
(3,3)	0.893	0.027	0.026
(4,4)	0.935	0.016	0.016
(5,5)	0.956	0.011	0.011
(6,6)	0.969	0.008	0.008

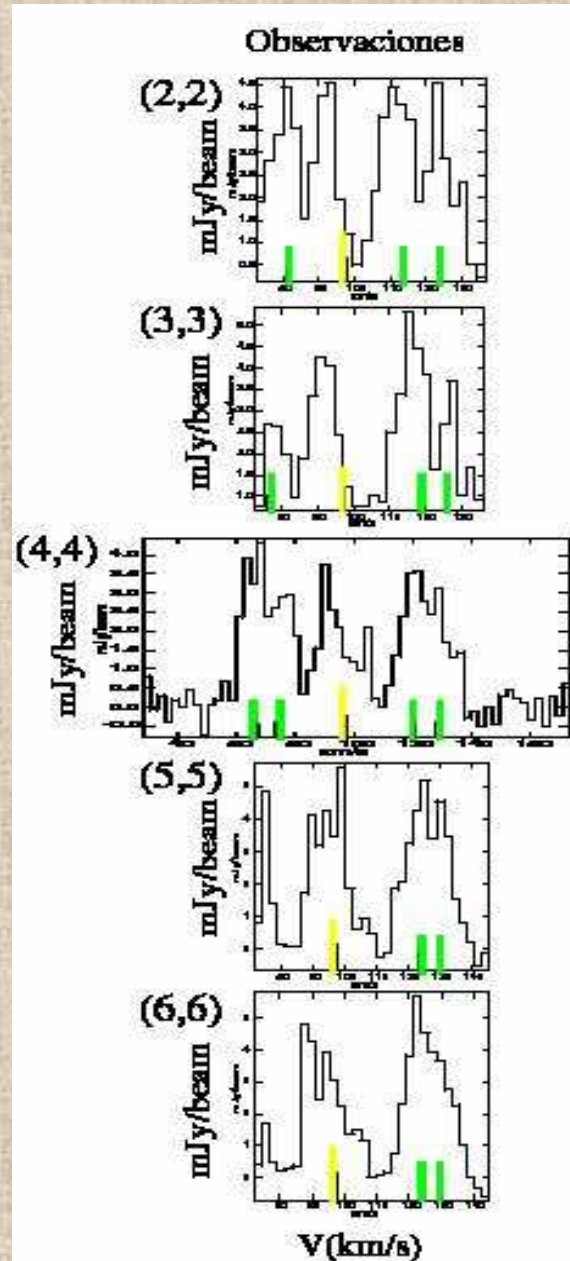
Intensidades relativas de la estructura hiperfina

MAPAS DE CANALES

- Intensidad como función de la velocidad relativa al observador
- Una única condensación compacta en torno a radiofuente doble (cruces)
- Cambios morfológicos en los diferentes canales: Estructura en velocidades



ESPECTROS



- Detección de las líneas (6,6) y (5,5)
 - NMC de los mas calientes
- Anchura de las líneas:
 - Gran Turbulencia
 - Gradientes de velocidad internos
- Asimetría en las líneas, no gaussianas
- Relación de Intensidad SAT/PPAL=1:
 - Alta densidad
 - Temperatura de evaporación 100K

TRANSPORTE RADIATIVO

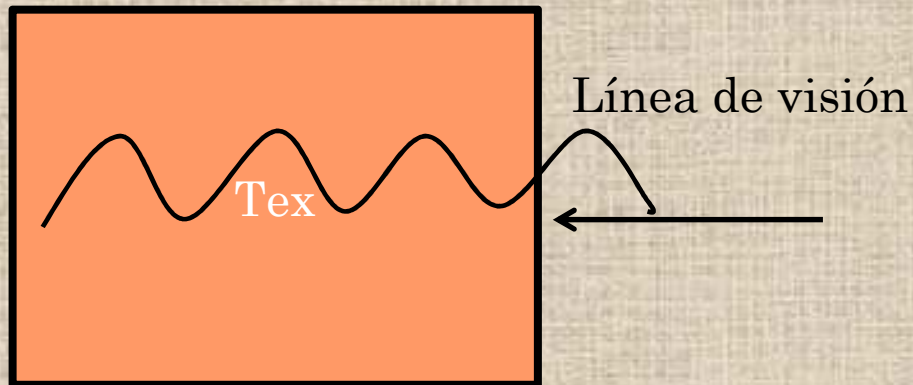
$$T_l^{obs} = (T_{ex} - T_{bg}) (1 - e^{-\tau})$$

ópticamente delgado ($\tau < 1$;
medio poco denso):

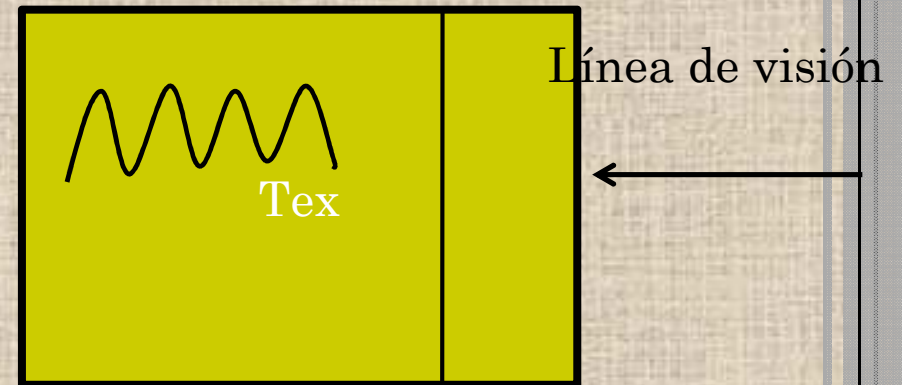
$$T_l^{obs} \simeq T_{ex} \tau \propto T_{ex} N$$

ópticamente grueso ($\tau > 1$
medio muy denso):

$$T_l^{obs} = T_{ex} - T_{bg} \simeq T_{ex}$$



A más densidad columnar más
Intensidad en la línea



La intensidad deja de
depende r de la densidad
columnar, solo depnede de
la T_{ex}. Se satura

LÍNEAS DE INVERSIÓN DE AMONIACO

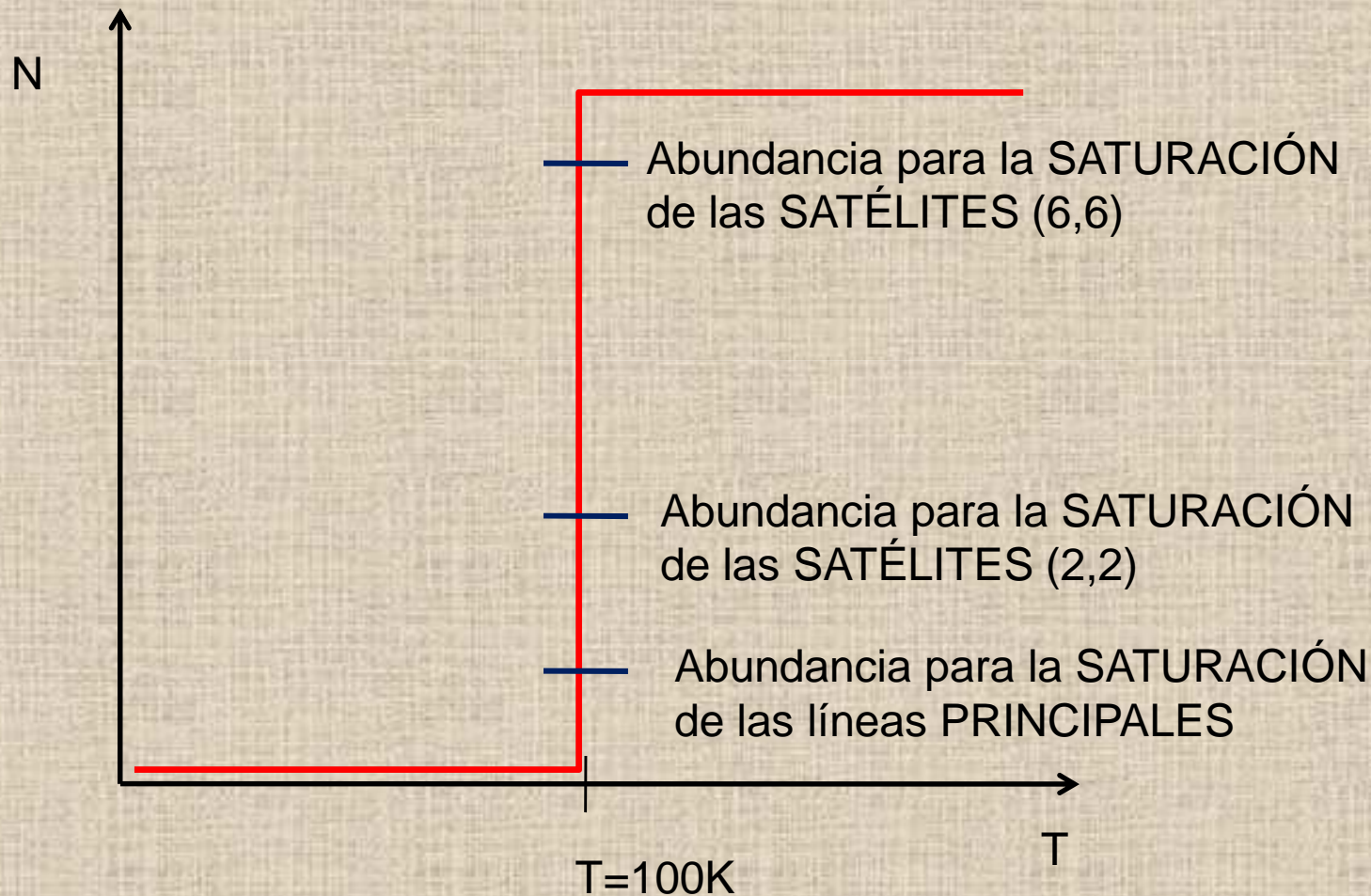
Transición	Principal	Satélites internas	Satélites externas
(2,2)	0.796	0.051	0.050
(3,3)	0.893	0.027	0.026
(4,4)	0.935	0.016	0.016
(5,5)	0.956	0.011	0.011
(6,6)	0.969	0.008	0.008

Intensidades relativas de la estructura hiperfina

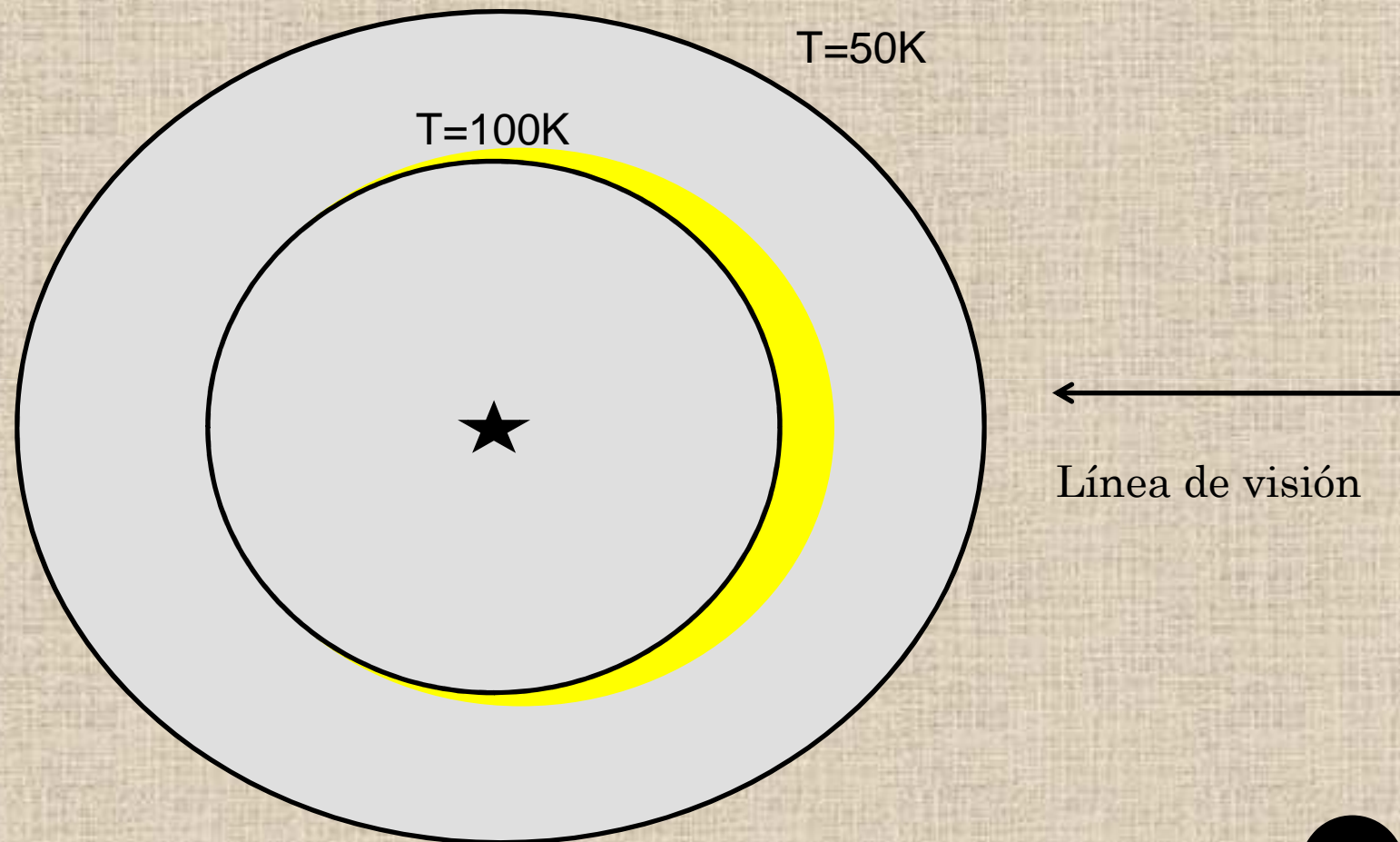
16

120

ESPECTROS. SATURACIÓN POR DENSIDAD



ESPECTROS. SATURACIÓN POR DENSIDAD

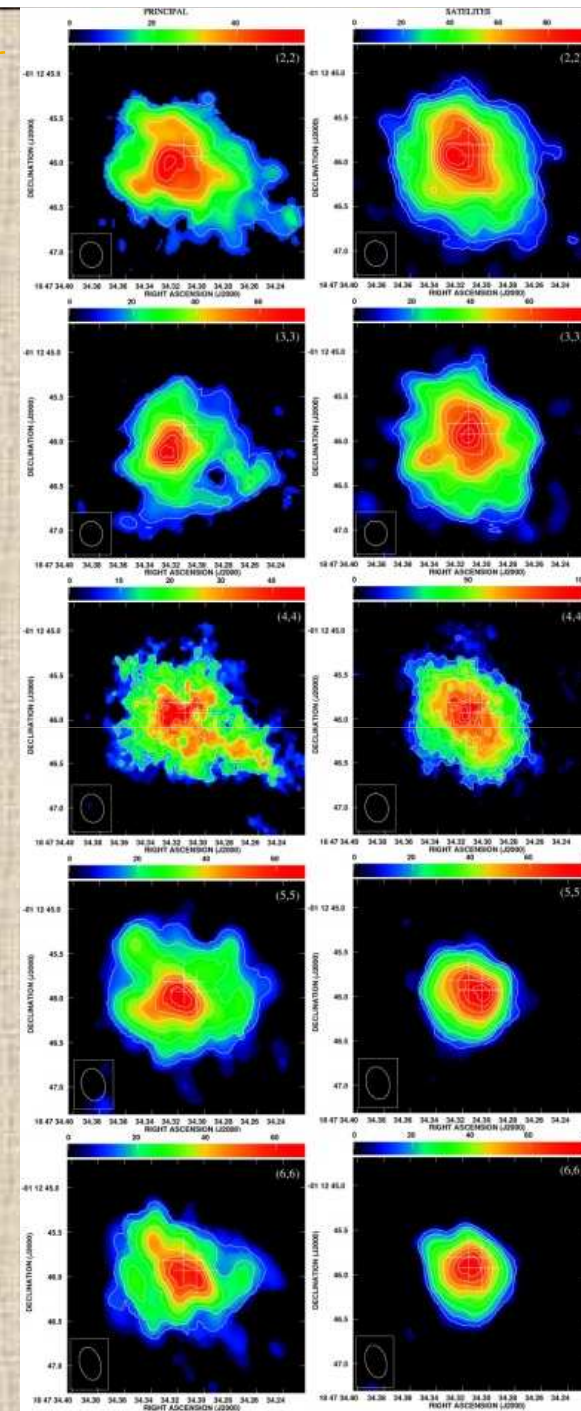


Supone medio: Muy denso y muy bturbulento

Intensidad integrada en velocidad (MOM 0)

- ▶ Similar extensión de la emisión satélites y principal en transiciones bajas
- ▶ En las transiciones (5,5) y (6,6) la emisión de las satélites es más compacta que la emisión de la línea principal
- ▶ Sugiere gradiente de densidad
- ▶ Satélites (5,5) y (6,6) trazan región más caliente y más interna, con condiciones más homogéneas

Principal



(2,2)

(3,3)

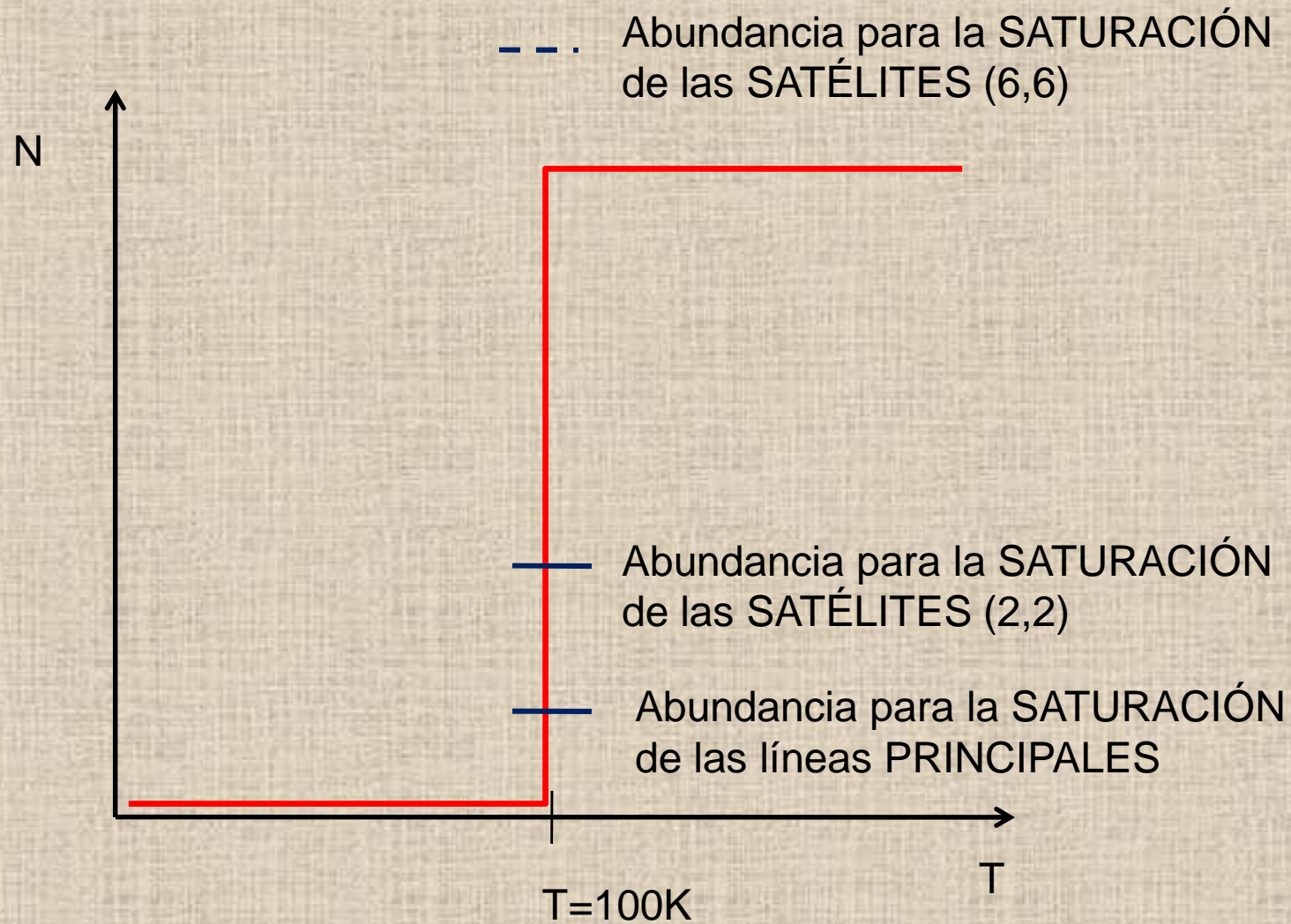
(4,4)

Satélites

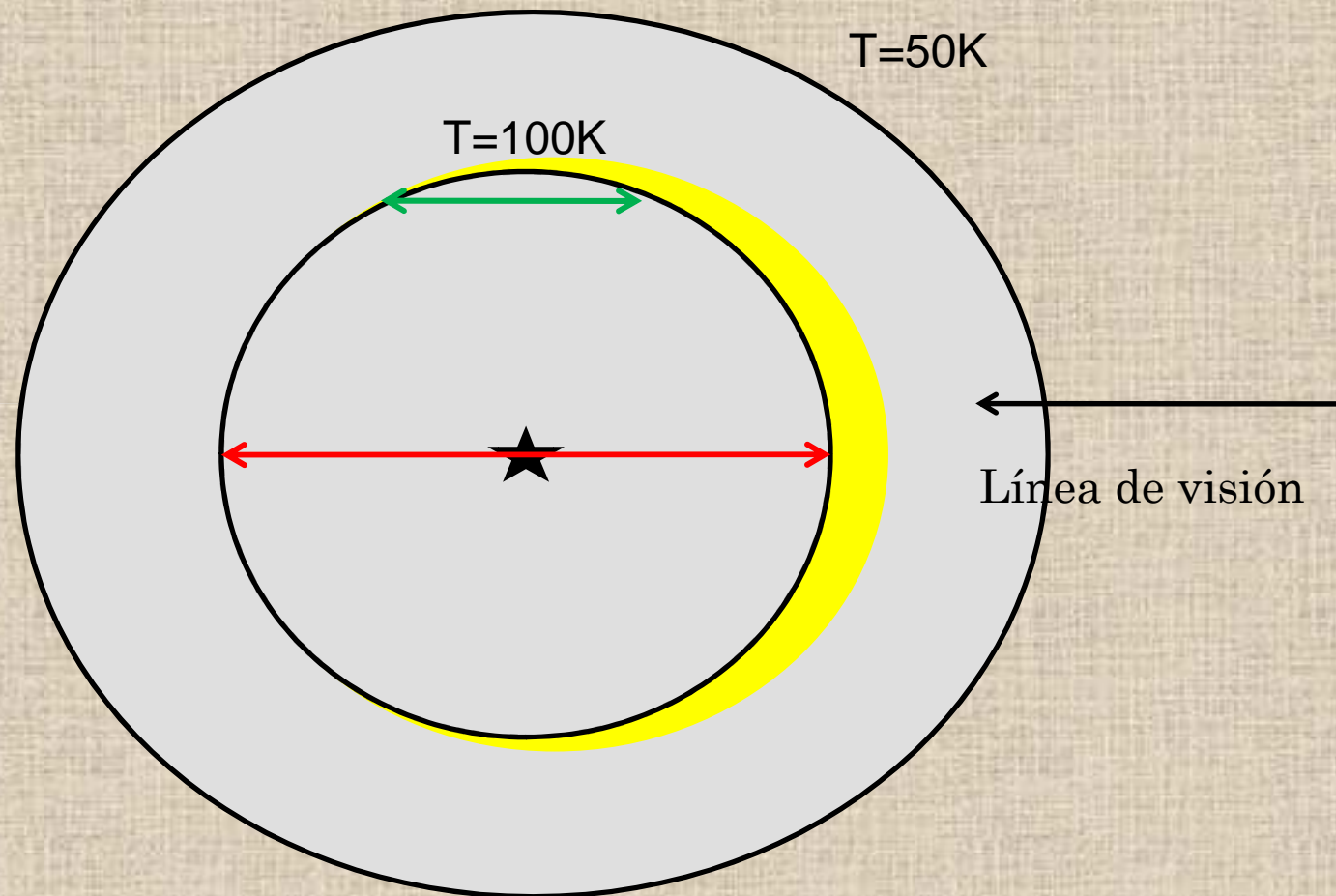
(5,5)

(6,6)

ESPECTROS. SATURACIÓN POR DENSIDAD

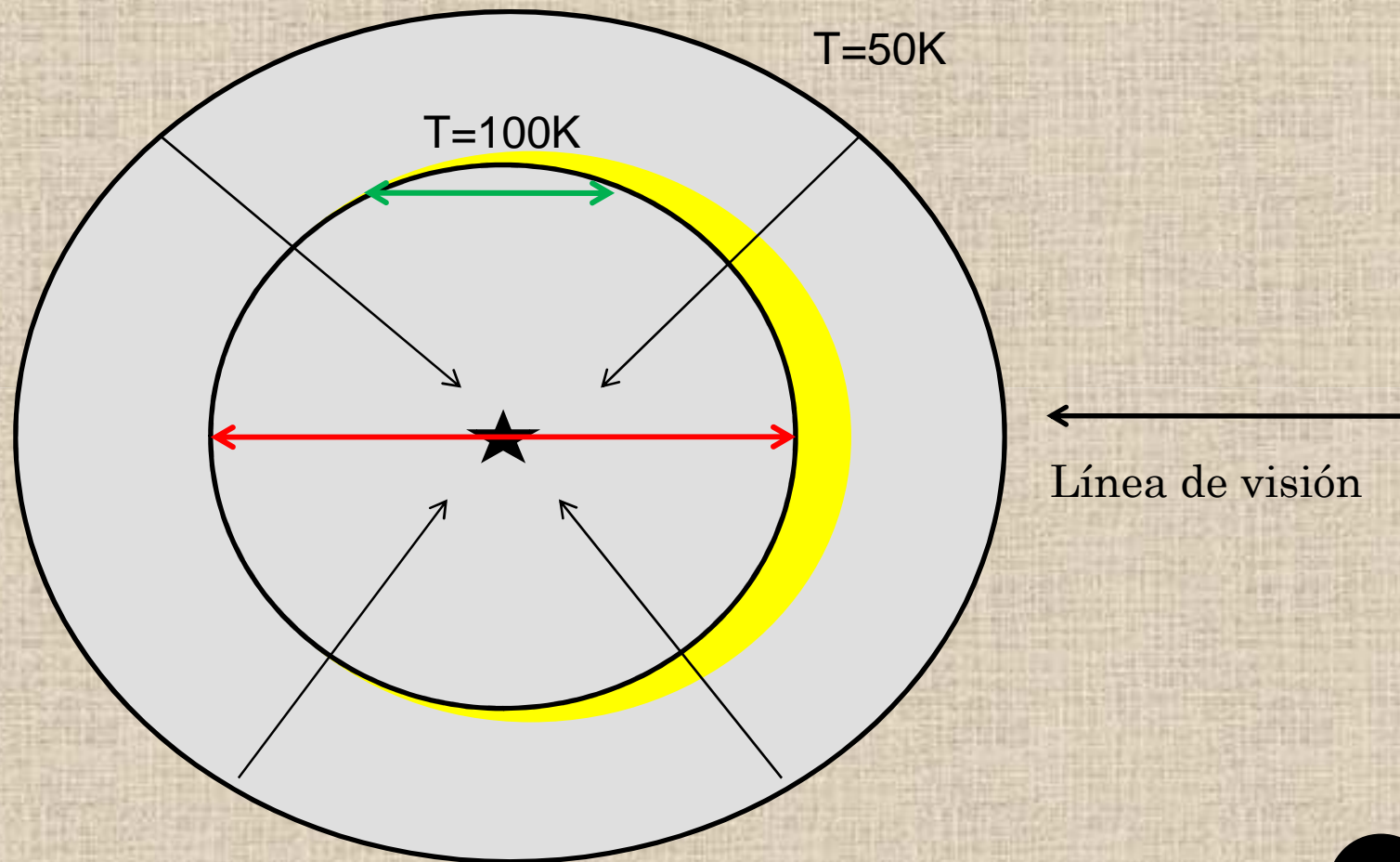


ESPECTROS. SATURACIÓN POR DENSIDAD



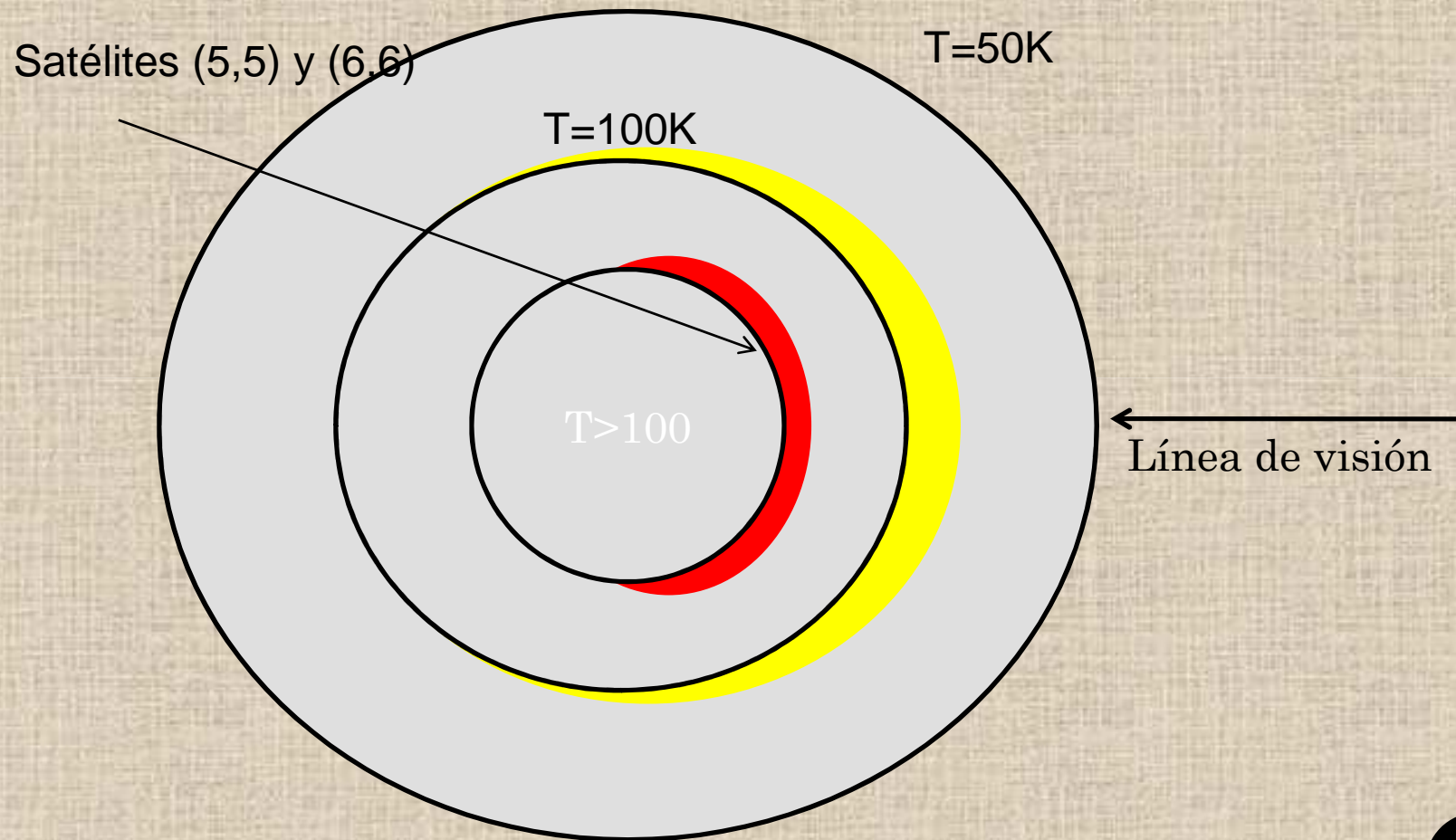
Supone medio: Muy denso y muy bturbulento

ESPECTROS. SATURACIÓN POR DENSIDAD



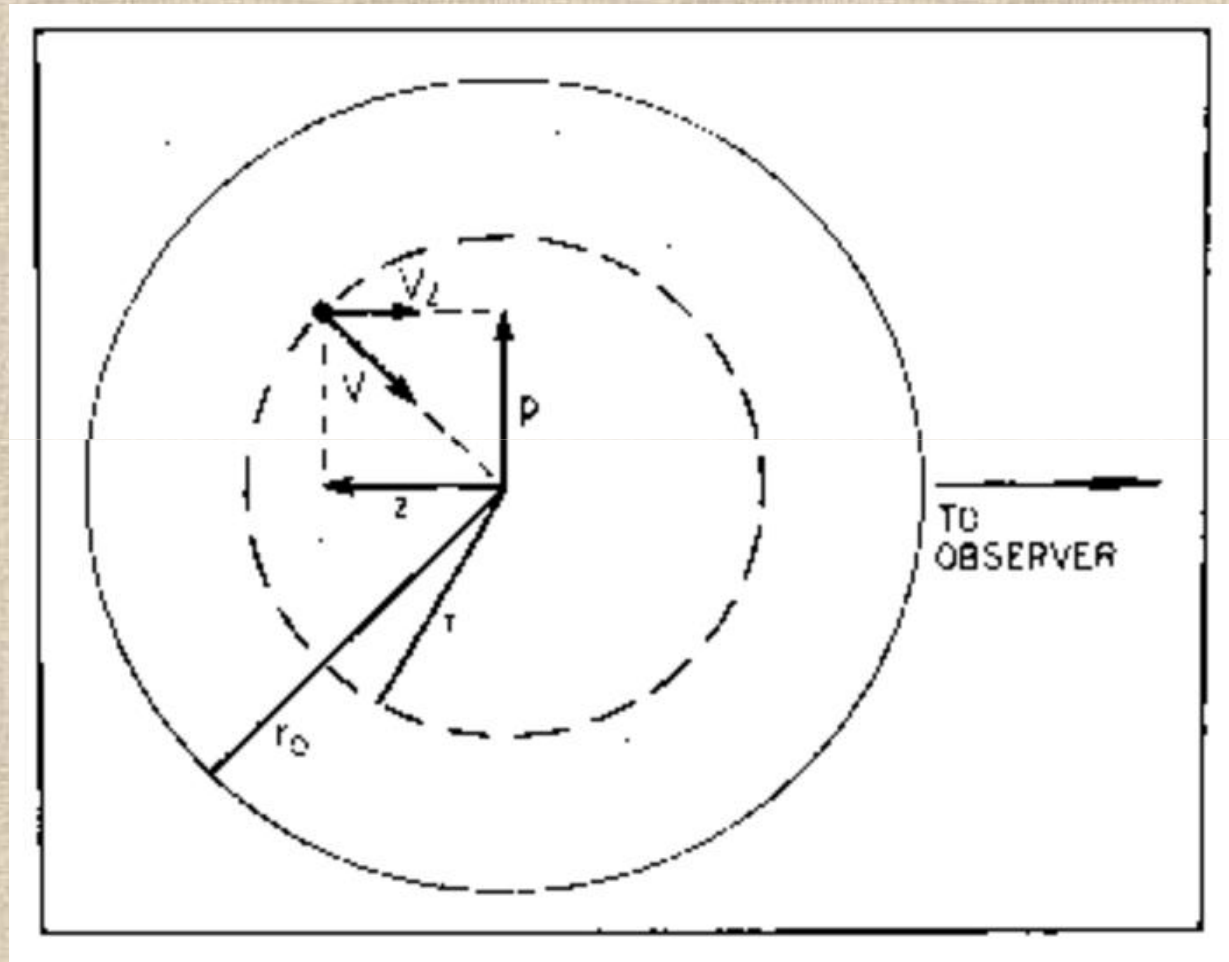
Supone medio: Muy denso y muy bturbulento

ESPECTROS. SATURACIÓN POR DENSIDAD

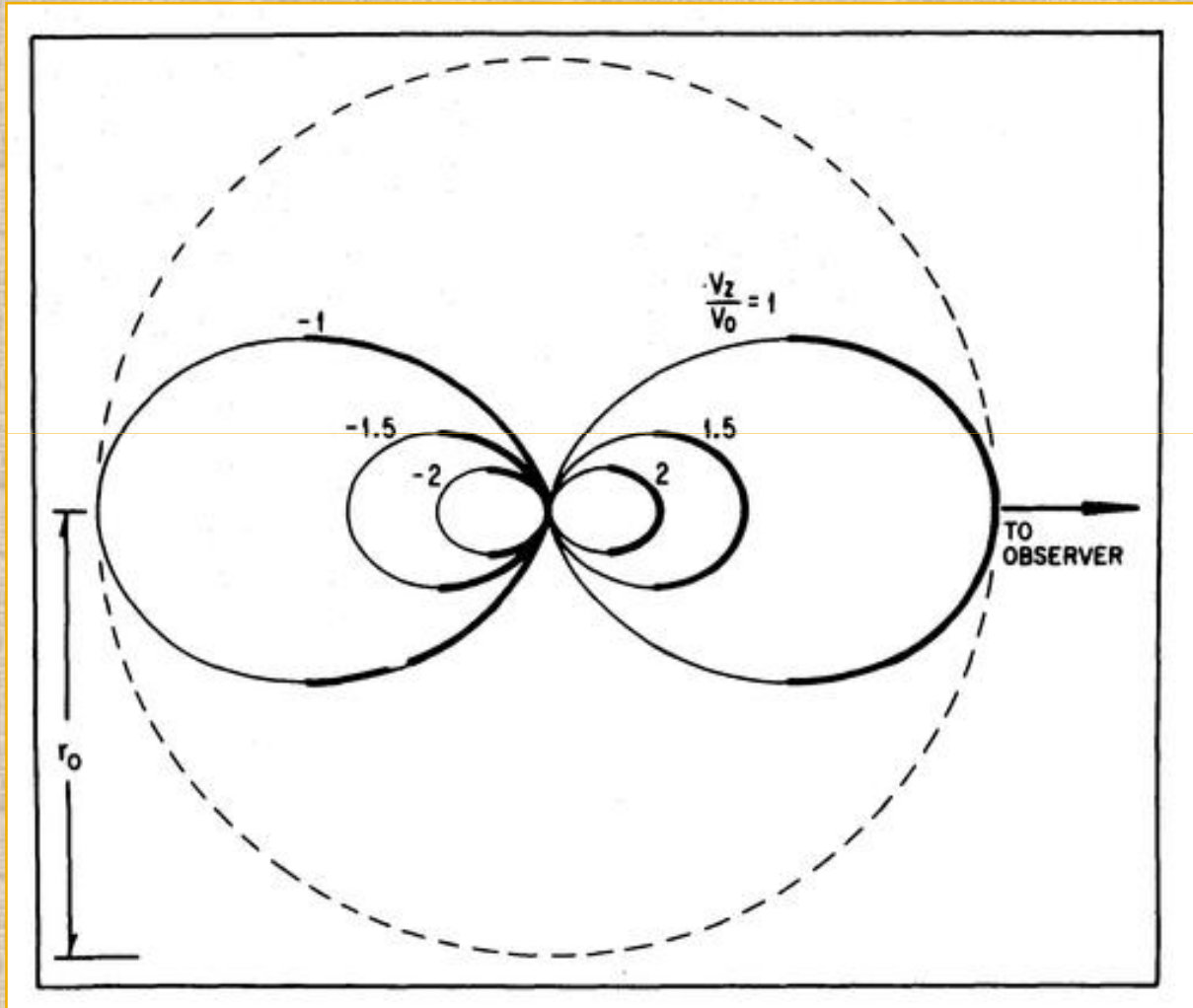


Supone medio: Muy denso y muy bturbulento

COLAPSO



COLAPSO



cada huevo es material que se mueve a diferente velocidad respecto del observador

Cada canal observamos un huevo

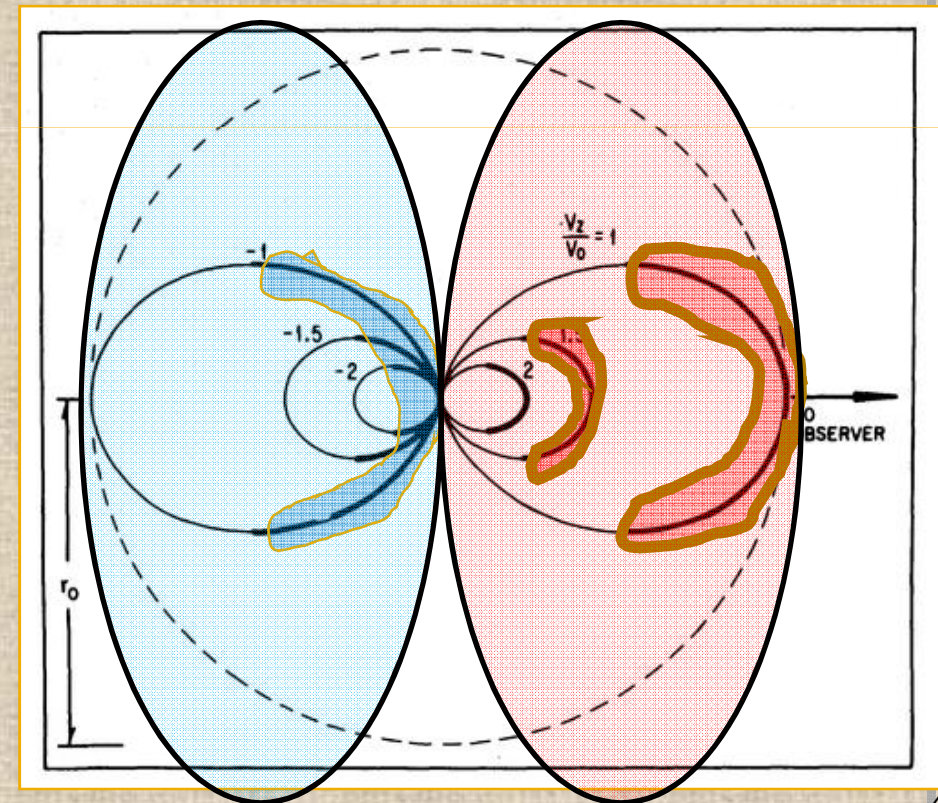
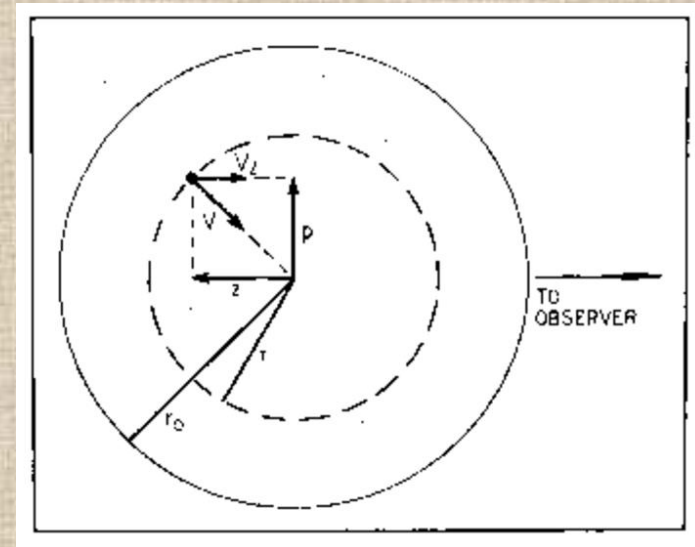
Profundizamos en el núcleo canal a canal

Huevos más externos son transparentes a las satélites

Huevos internos saturan las SAT.

Evidencia de colapso

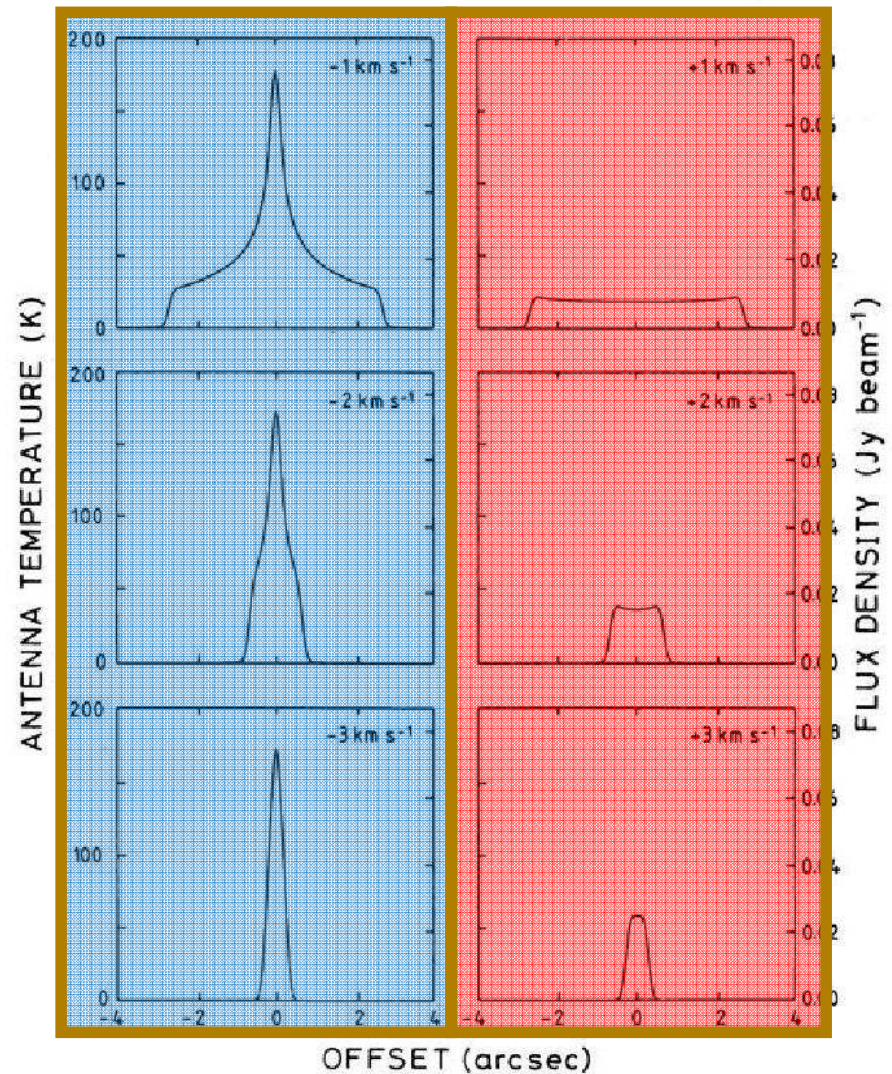
- ▶ Esfera en colapso gravitatorio:
 - ▶ Gradiente de velocidad radial, V aumenta hacia el centro
 - ▶ Gradiente de temperatura radial, T aumenta hacia el centro
- ▶ Si emisión es opaca, solo vemos emisión de la parte más cercana
- ▶ Emisión al azul proviene de regiones más internas (más cerca al centro, T alta)
- ▶ Emisión al rojo proviene de regiones más externas (más lejanas al centro, T baja)



Evidencias de colapso

▶ Asimetría en el perfil de intensidad espacial:

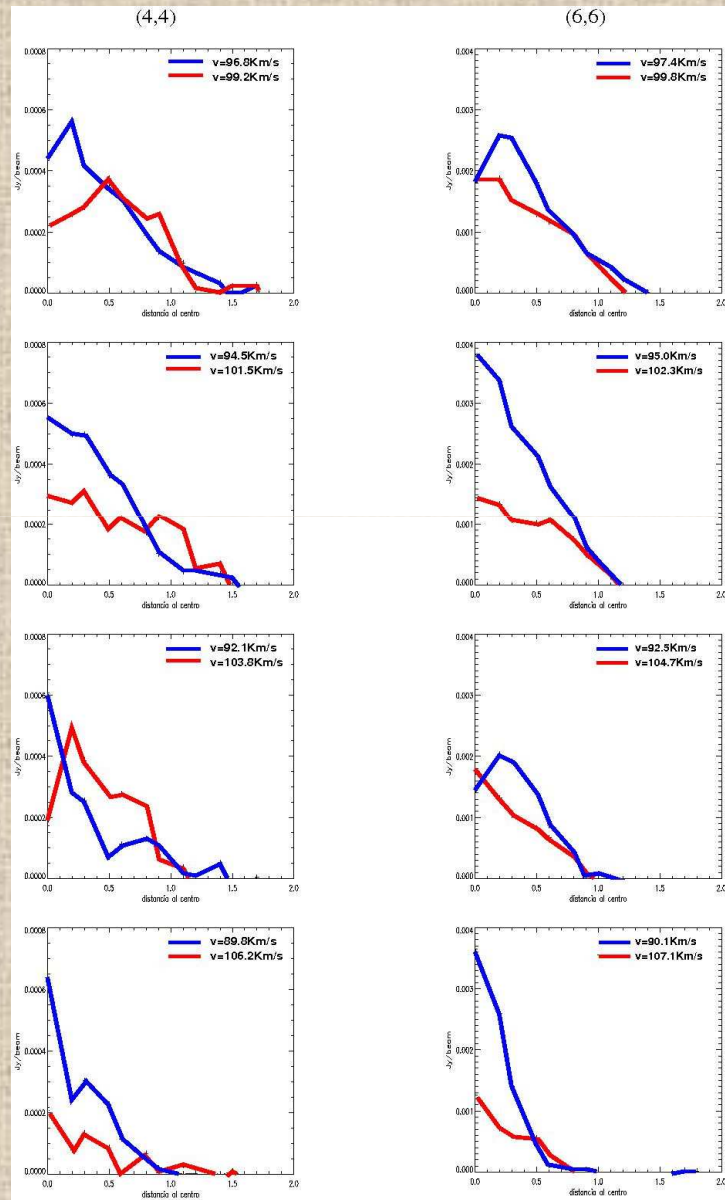
- Canales azules más intensos en el centro que los rojos.
- Caída abrupta de intensidad con la distancia al centro en canales azules
- Disminución de la intensidad más suave con la distancia al centro en canales rojos



Anglada et al. 1991

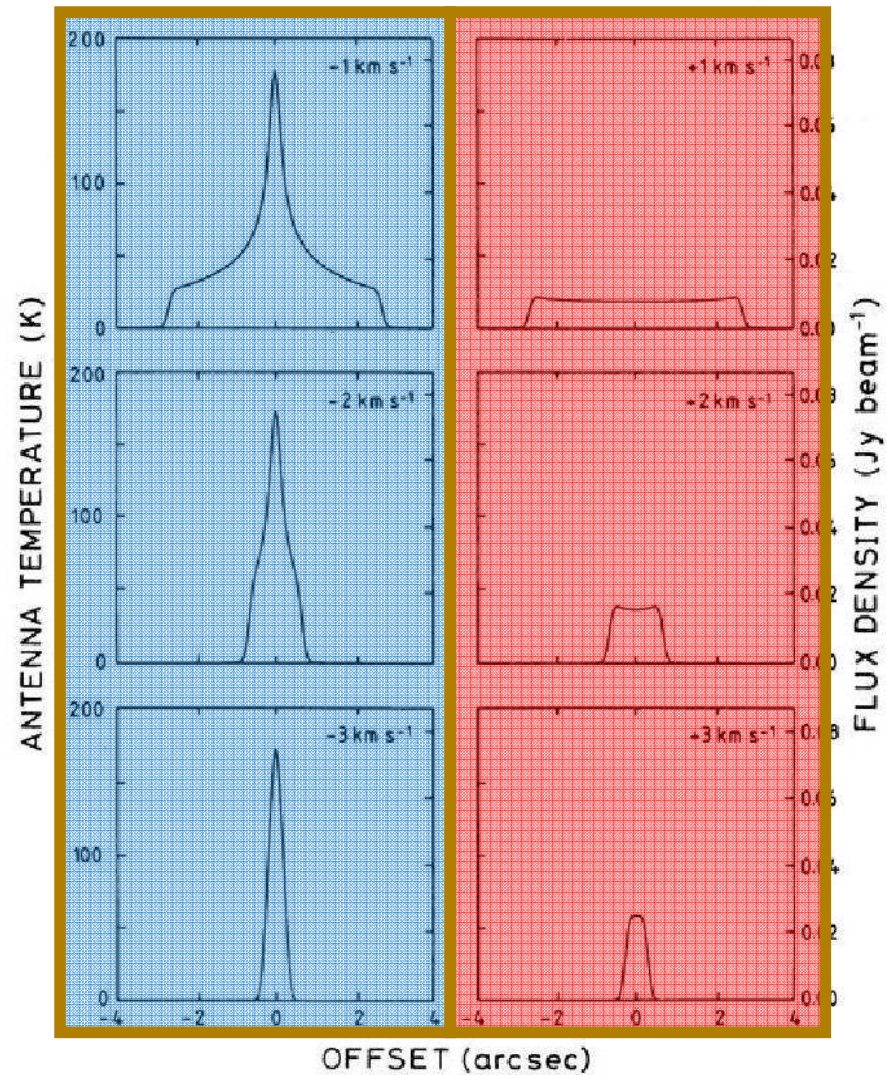
Evidencia de colapso

Observaciones



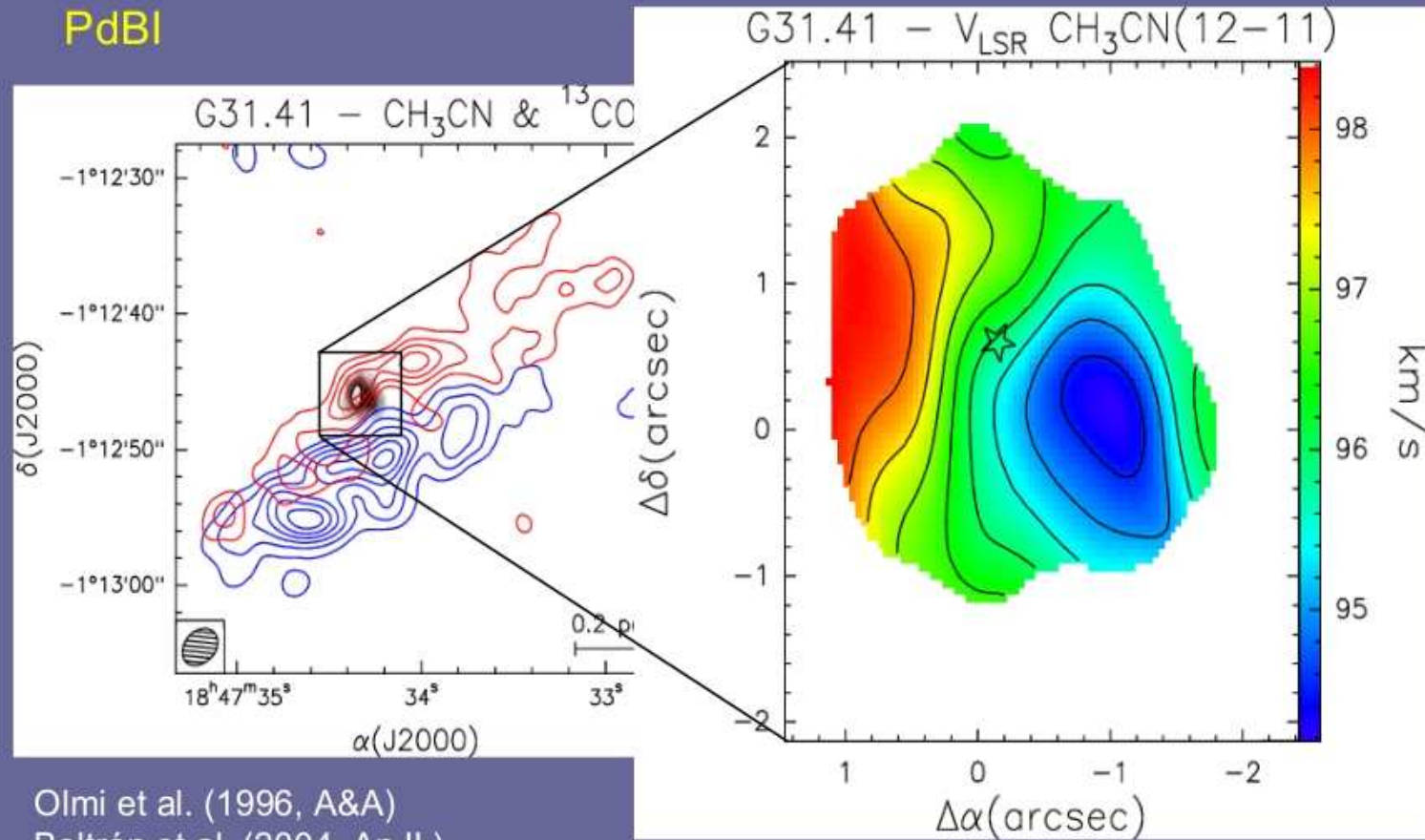
ΔV
Sep. en Vel.

Teoría



Anglada et al. 1991

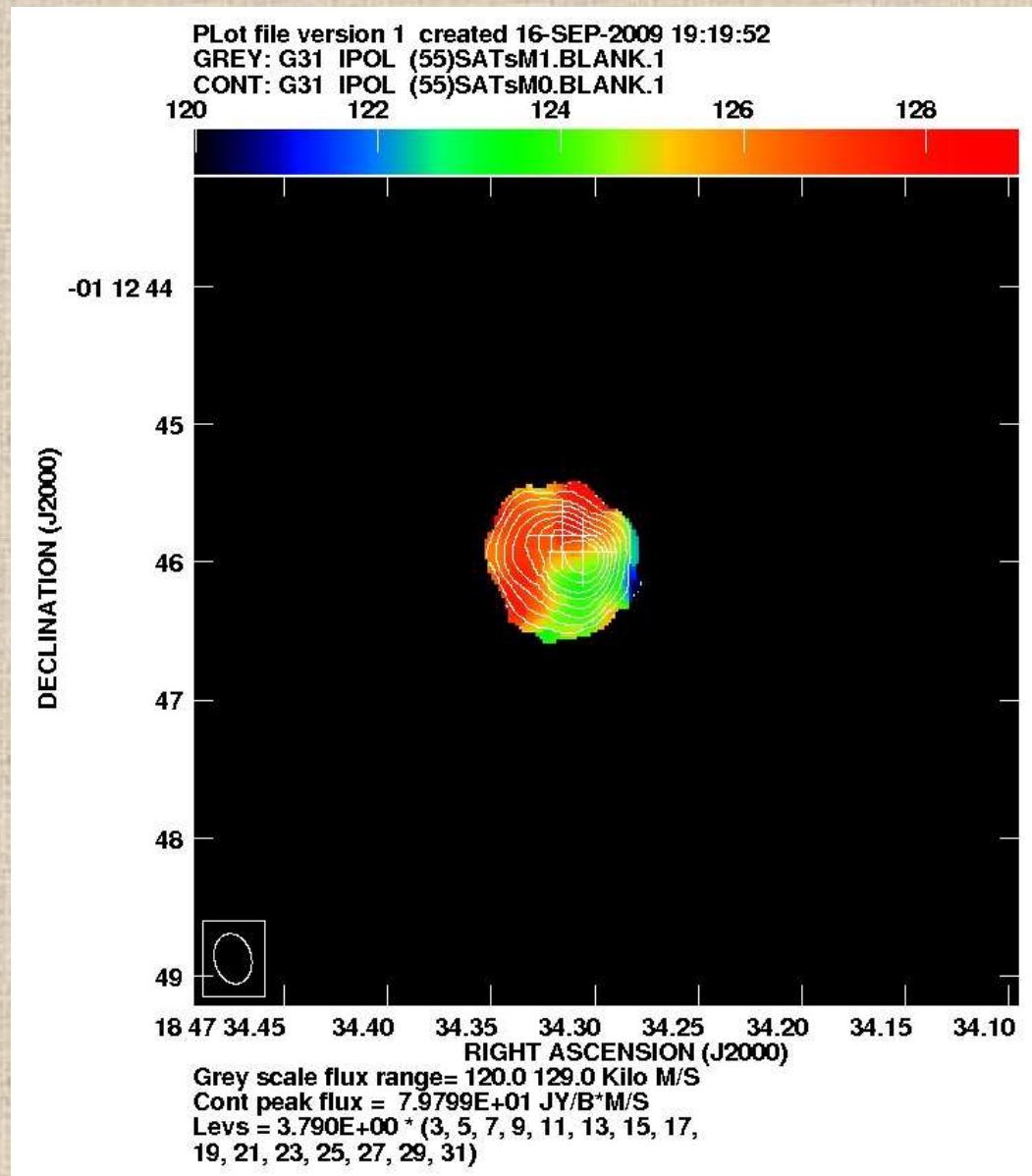
PdBI



Olmi et al. (1996, A&A)
Beltrán et al. (2004, ApJL)

Beltrán et al. (2004, ApJL)

GRADIENTE DE VELOCIDAD



Mismo valor del gradiente

Misma dirección.

...pero sin forma ni de toroide

...y sin forma colimación

Parece una pelota rotando,
movimiento que tendría que
sumarse al de colapso