

Étude de la cinématique et de la population stellaire du Centre Galactique

T. Paumard

sous la direction de Jean-Pierre Maillard

Université Paris VI

Institut d'Astrophysique de Paris

Plan

I Introduction

Le parsec central de la Voie Lactée

II Les étoiles à raies d'émission

découvertes par Krabbe et al., 1991

III La source IRS 13E

un objet énigmatique

IV Étude morphologique et cinématique du gaz ionisé (la Minispirale)

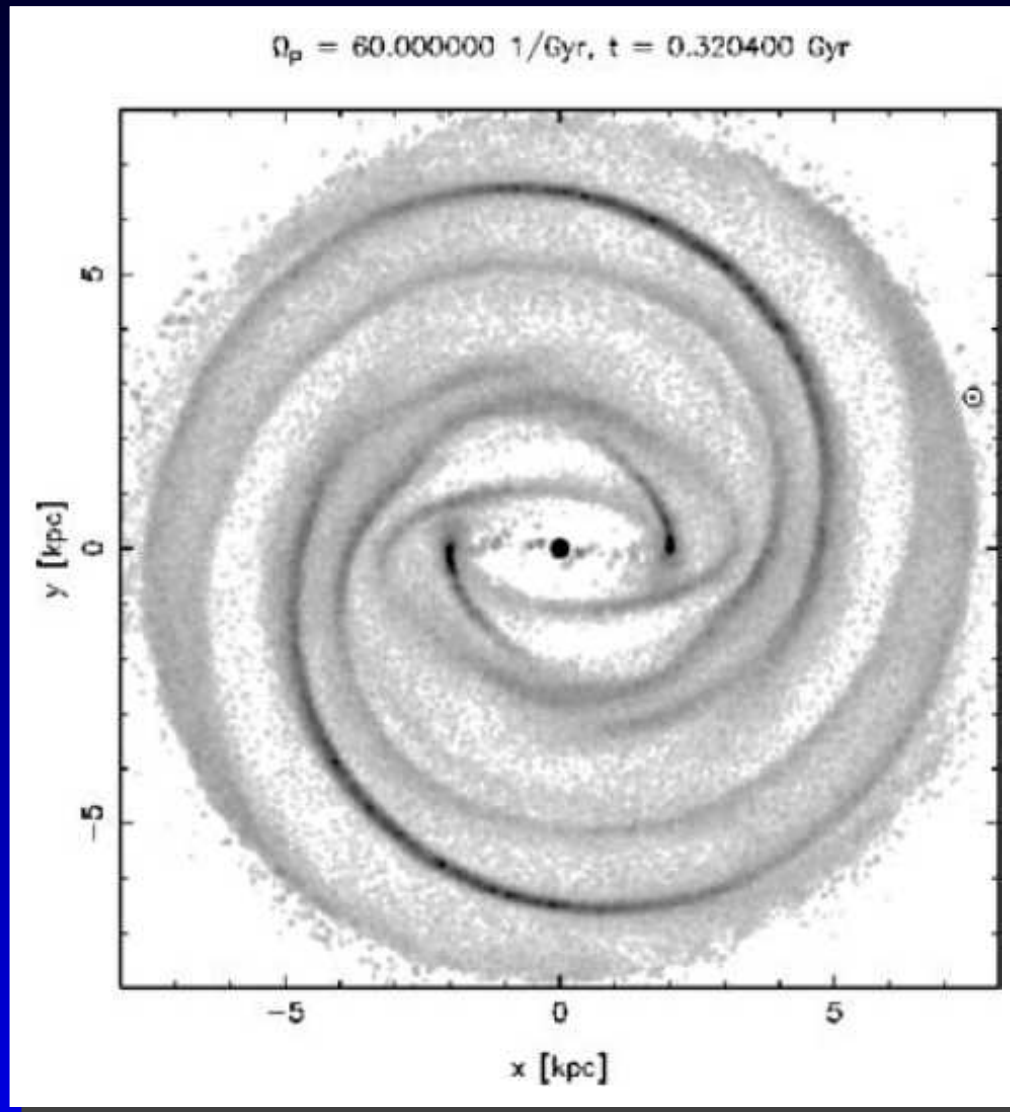
et interactions avec les étoiles

V Conclusion

origine de la population stellaire jeune et du gaz ionisé

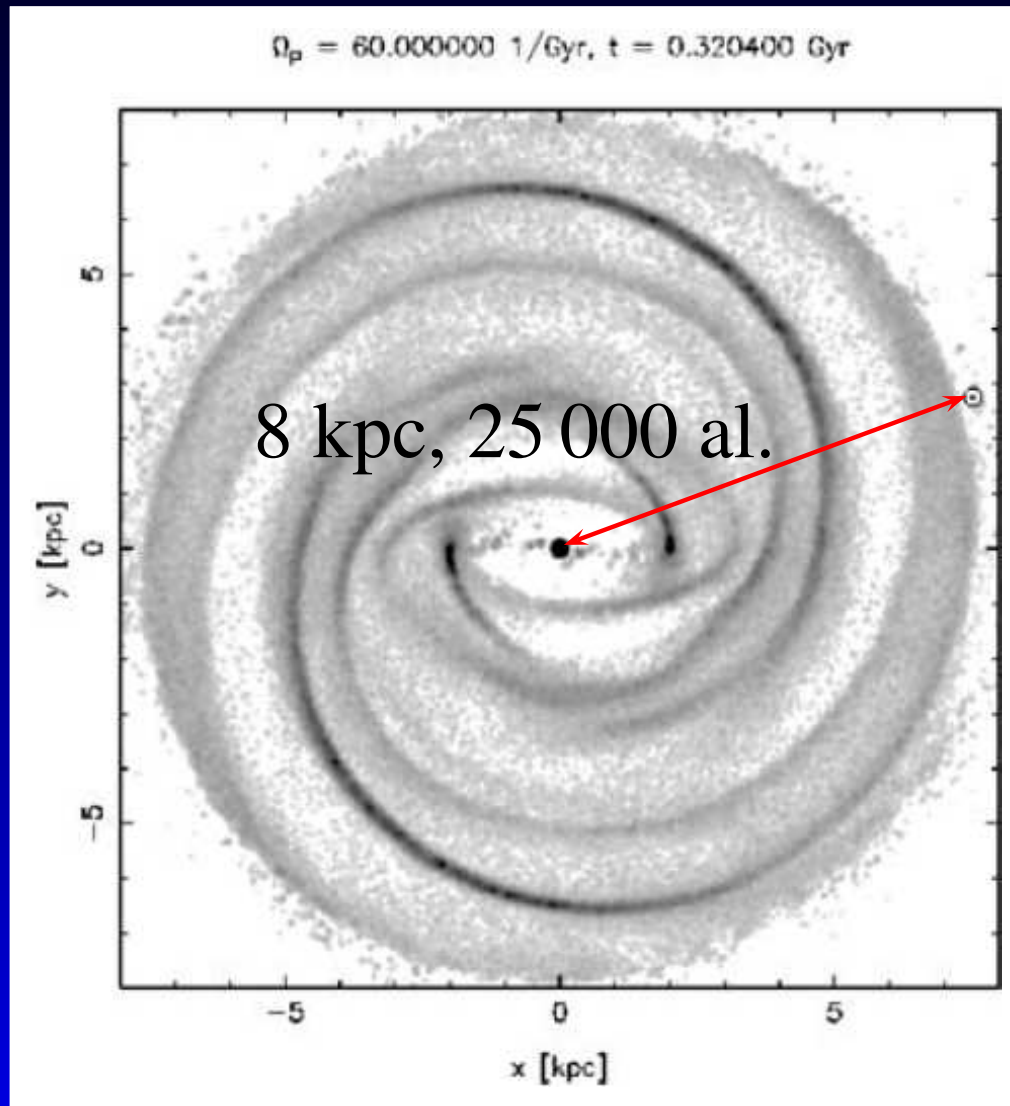
I - Introduction

La Voie Lactée



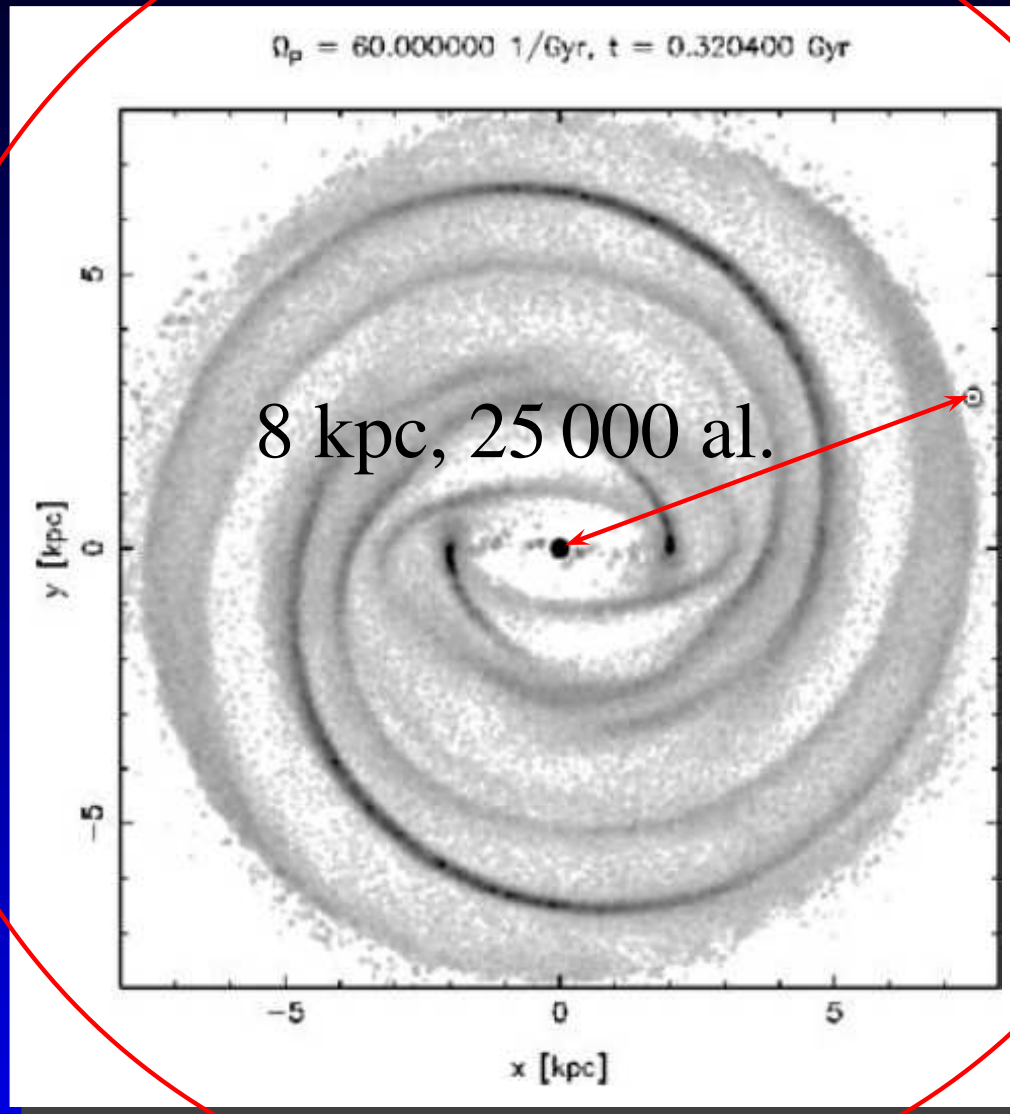
Modèle de la distribution de gaz dans la Galaxie (Bissantz *et al.* 2003).

La Voie Lactée



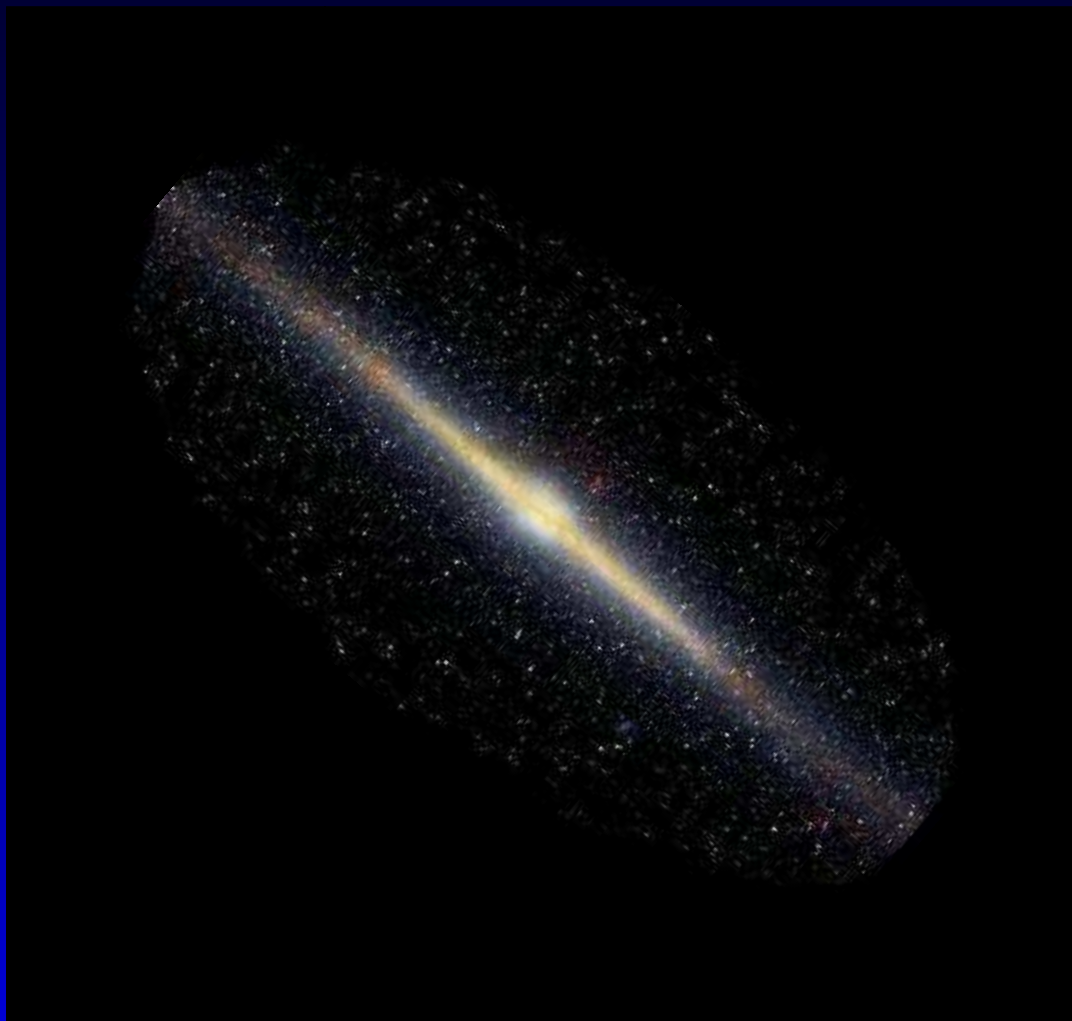
Modèle de la distribution de gaz dans la Galaxie (Bissantz *et al.* 2003).

La Voie Lactée



Modèle de la distribution de gaz dans la Galaxie (Bissantz *et al.* 2003).

Vers le Centre Galactique



La Voie Lactée en infrarouge (H, K, L, COBE)

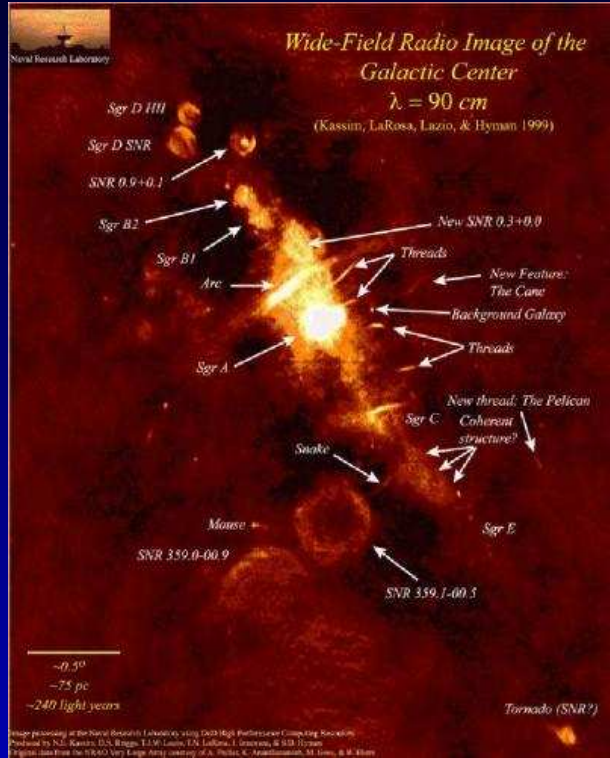
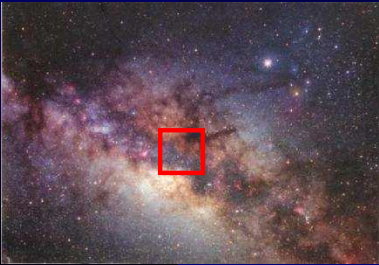
Vers le Centre Galactique



1 kpc

Le Bulbe Galactique (visible)

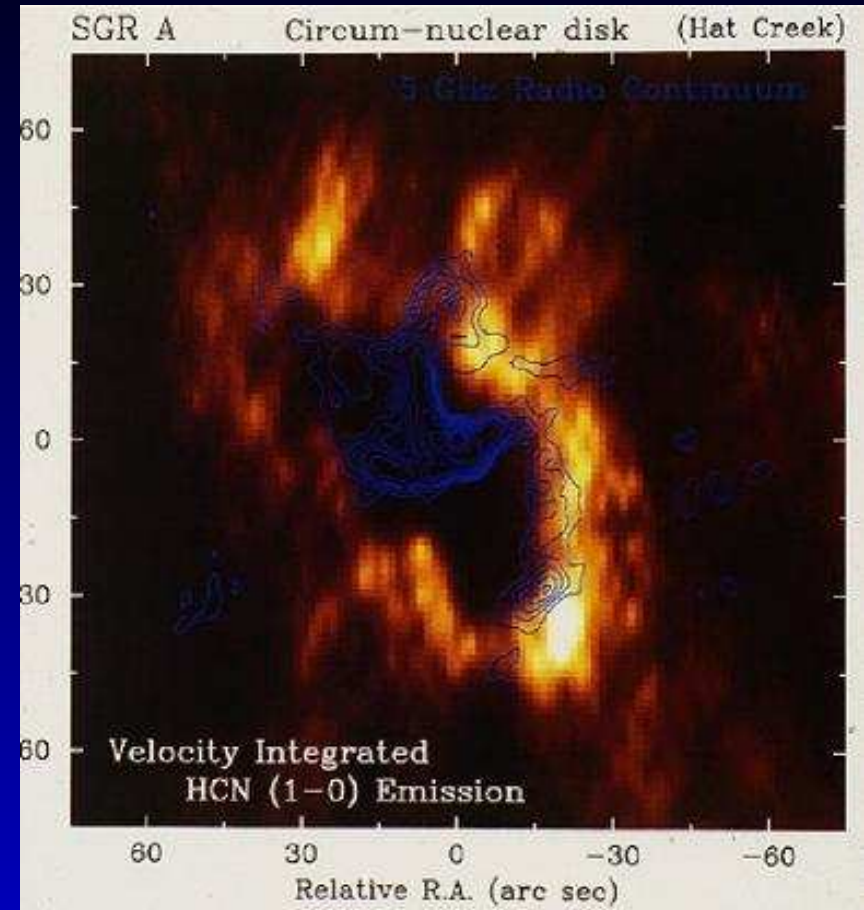
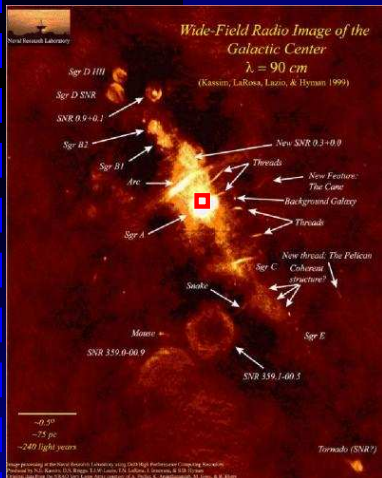
Vers le Centre Galactique



625 pc

Le Centre Galactique en ondes radio (90cm, Kassim *et al.* 1999)

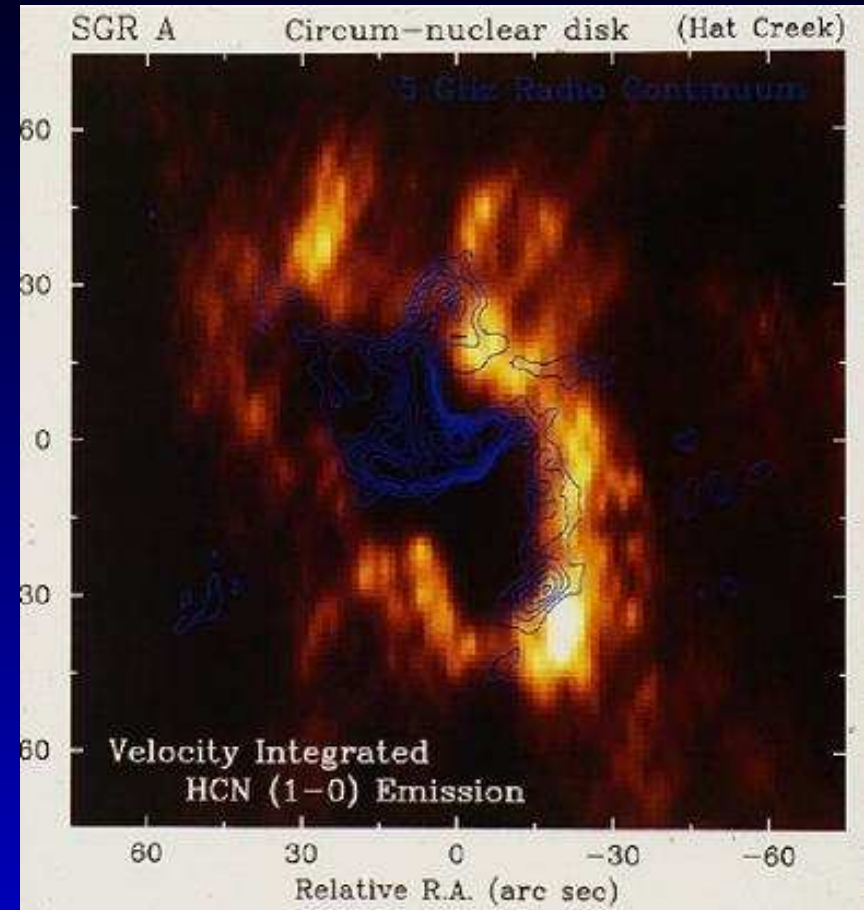
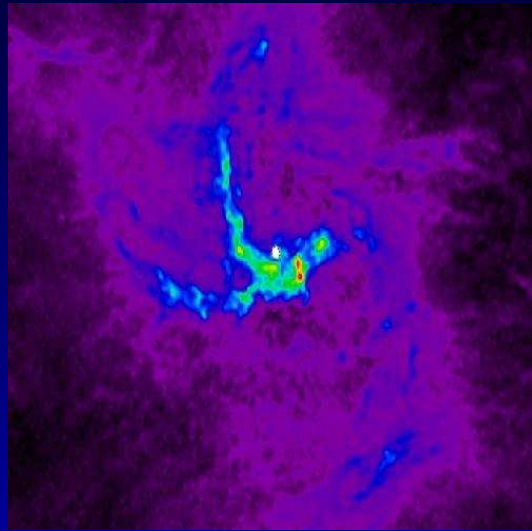
Vers le Centre Galactique



Les quelques parsecs centraux...

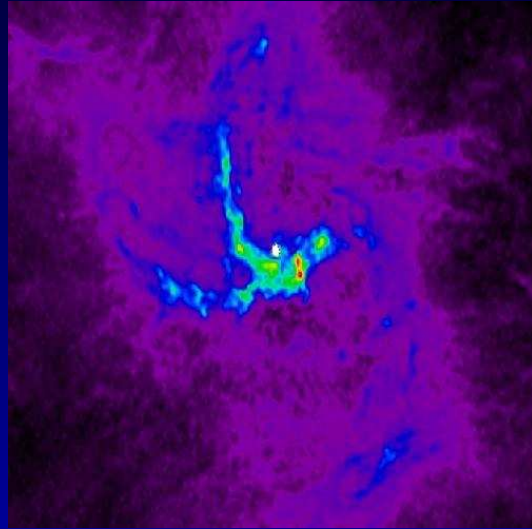
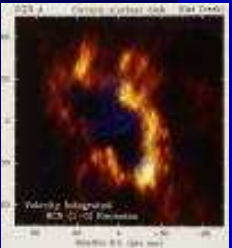
le CND, un tore de gaz moléculaire (Blitz *et al.*)

Vers le Centre Galactique



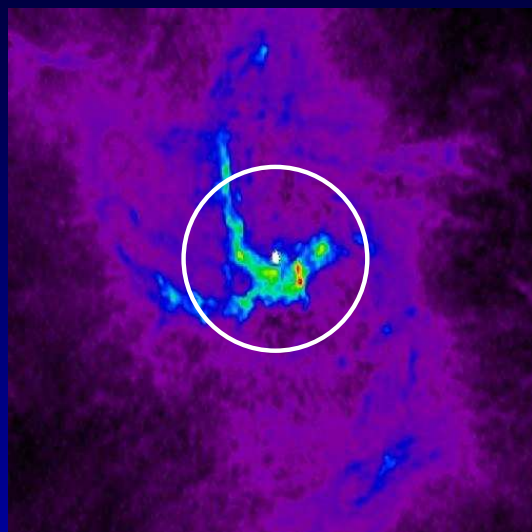
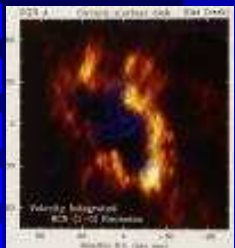
Les quelques parsecs centraux...
des flots de gaz ionisé, Sgr A le CND, un tore de
Ouest ou la Minispirale gaz moléculaire (Blitz
(6cm, Lo *et al.*) *et al.*)

Vers le Centre Galactique



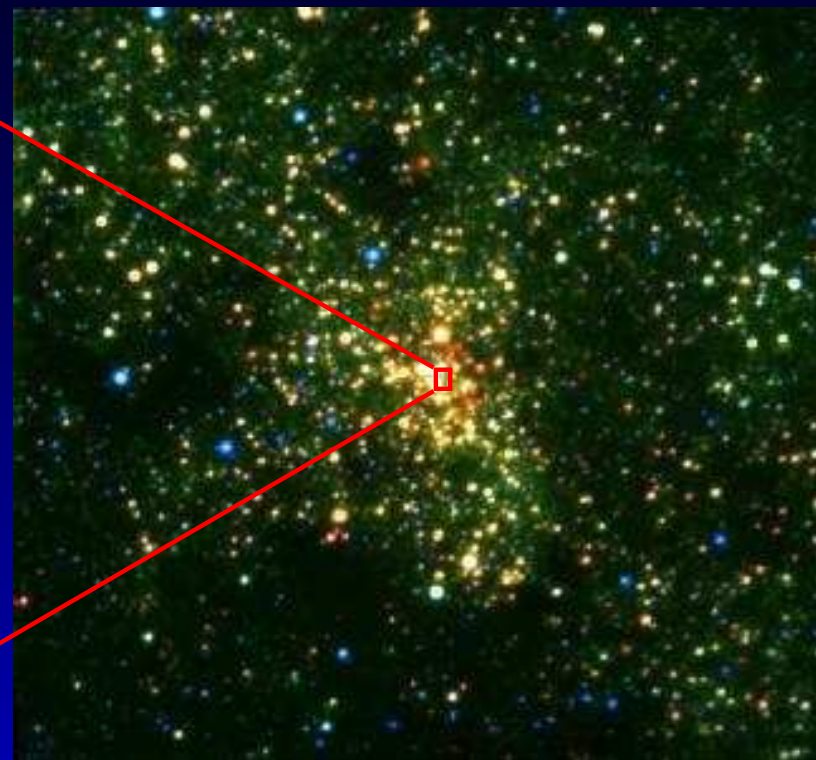
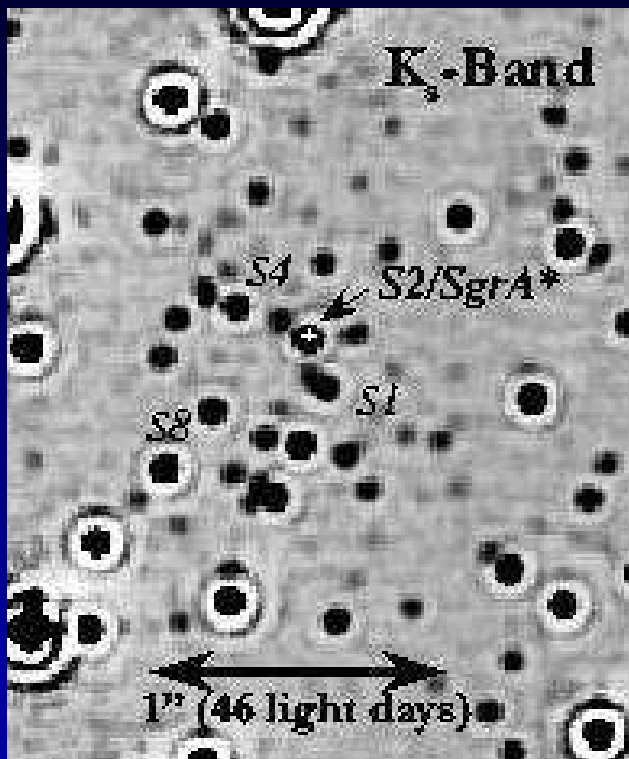
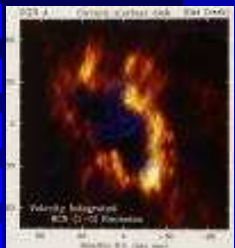
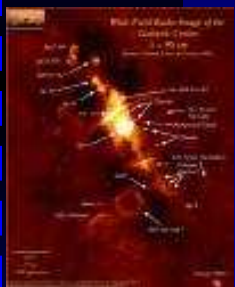
Les quelques parsecs centraux...
des flots de gaz ionisé, Sgr A Ouest ou la Minispirale (6cm, Lo *et al.*) et des étoiles massives (J, H, K, Sellgren *et al.*).

Vers le Centre Galactique



Concentrons-nous sur le parsec central...

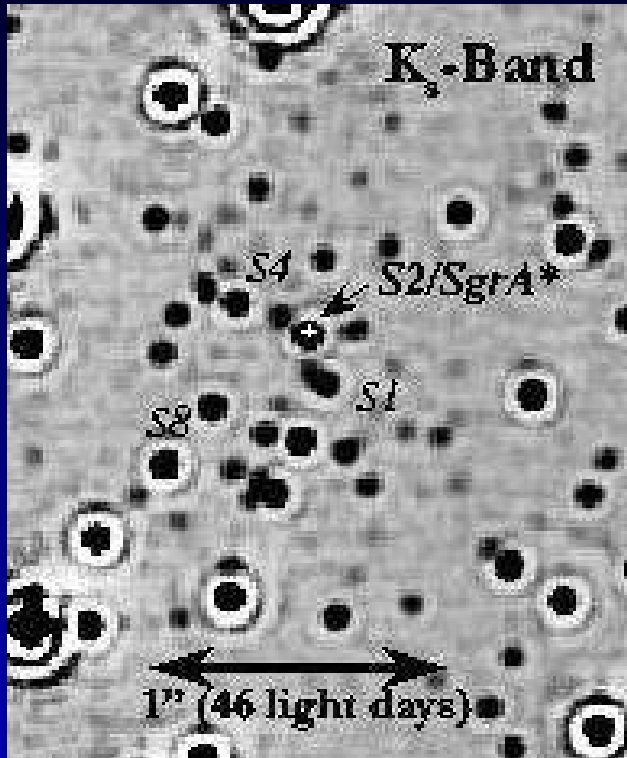
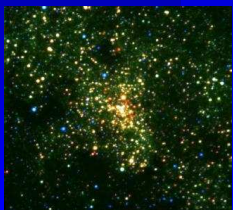
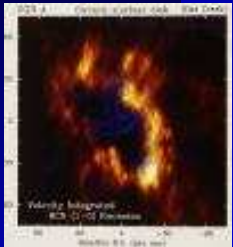
Vers le Centre Galactique



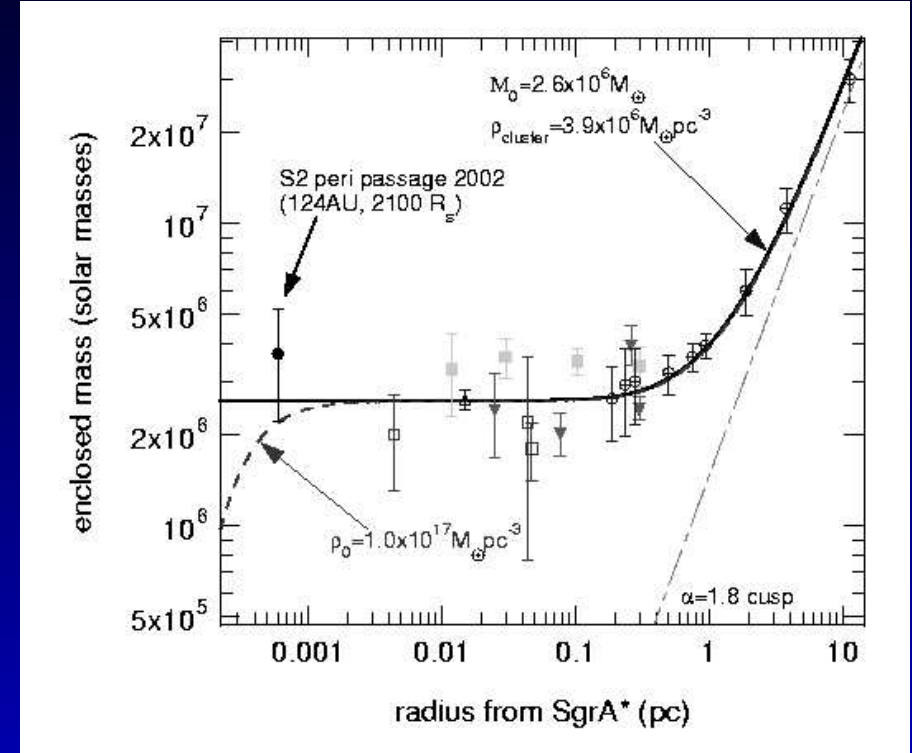
NAOS/CONICA, bande K

Seconde centrale : complexe Sgr A* (IR) d'étoiles chaudes

Vers le Centre Galactique



NAOS/CONICA, bande K



Genzel *et al.*

Au centre : un trou noir supermassif !

Questions

- Quelle est l'origine de la concentration d'étoiles massives ?
- Quelle est l'origine de la Minispirale de gaz ionisé ?
- Comment interagissent ces étoiles et ce gaz ?

L'approche de ces questions est renouvelée par de nouveaux outils :

- la spectro-imagerie haute résolution spectrale (BEAR) ;
- l'imagerie haute résolution spatiale (optique adaptative, HST).

II- Étoiles à raies d'émission

**Amas d'étoiles à hélium découvert en 1991 par Krabbe *et al.*
Nous l'avons réétudié à l'aide de spectro-imagerie BEAR en
He I et Br γ et d'imagerie haute résolution NICMOS en Pa α**

BEAR

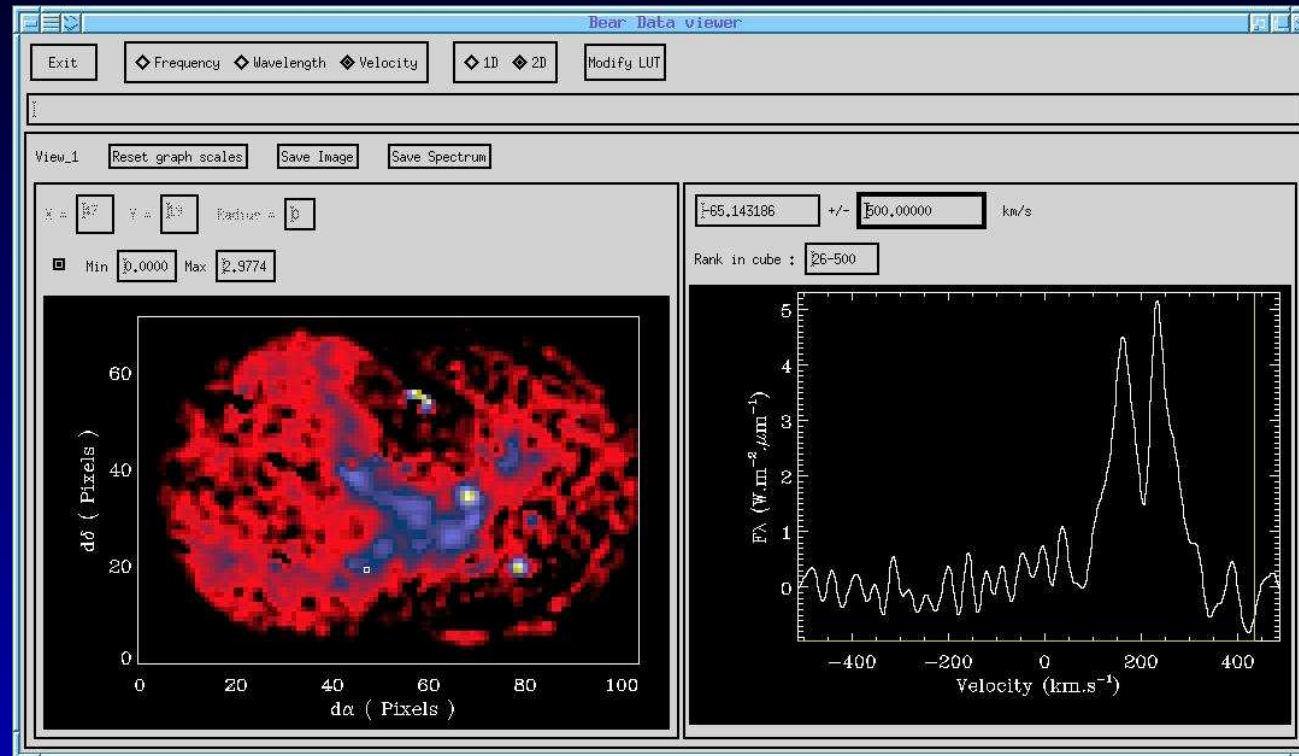
Un spectromètre à transformée de Fourier imageur :

- spectromètre à transformée de Fourier \Rightarrow haute résolution spectrale ;
- spectro-imageur intégral de champ \Rightarrow haute résolution spatiale (limitée par la turbulence pour BEAR : $\simeq 0,5''$)

Données BEAR utilisées dans ce projet :

- données Br γ (bande passante : $4585 - 4658 \text{ cm}^{-1}$, résolution spectrale : $21,3 \text{ km s}^{-1}$)
- données He I (bande passante : $4806 - 4906 \text{ cm}^{-1}$, résolution spectrale : $52,9 \text{ km s}^{-1}$)

Un Spectro-imageur

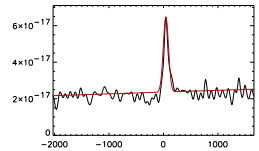


- Spectroscopie à travers une ouverture virtuelle quelconque ;
- Imagerie en bande étroite à travers un filtre quelconque.

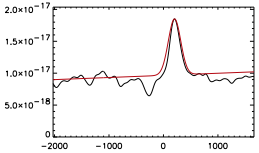
Réduction des données BEAR He I

- identification des étoiles à hélium ;
- soustraction de l'émission interstellaire ;
- ajustement de profils stellaires.

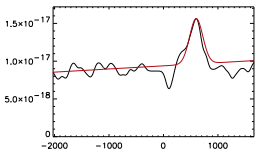
Deux profils de raies distincts



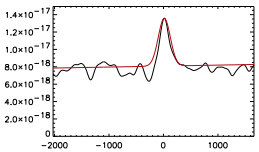
N 1



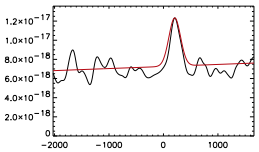
N 2



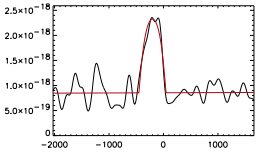
N 3



N 4

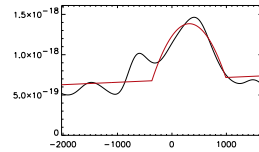


N 5

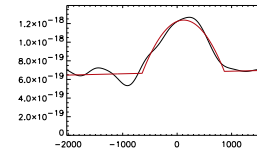


N 7

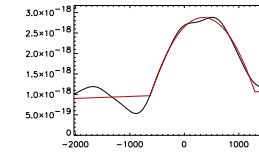
6 étoiles à raie étroite
(FWZI $< 500 \text{ km s}^{-1}$)



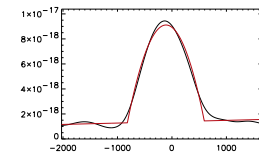
B 1



B 2



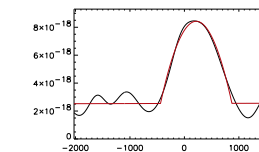
B 3



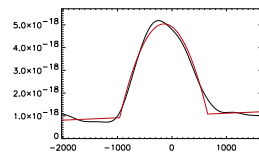
B 4



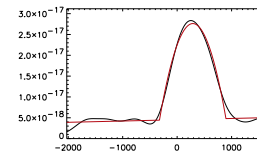
B 7



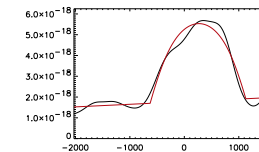
B 5



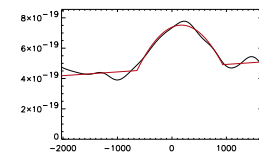
B 6



B 7



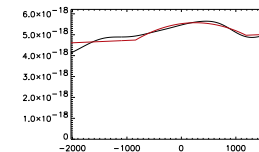
B 8



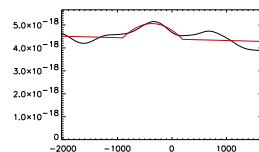
B 9



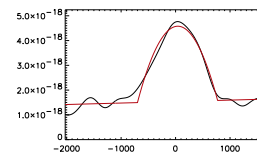
B 12



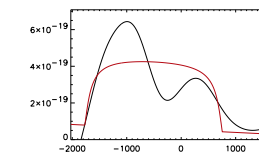
B 10



B 11



B 12

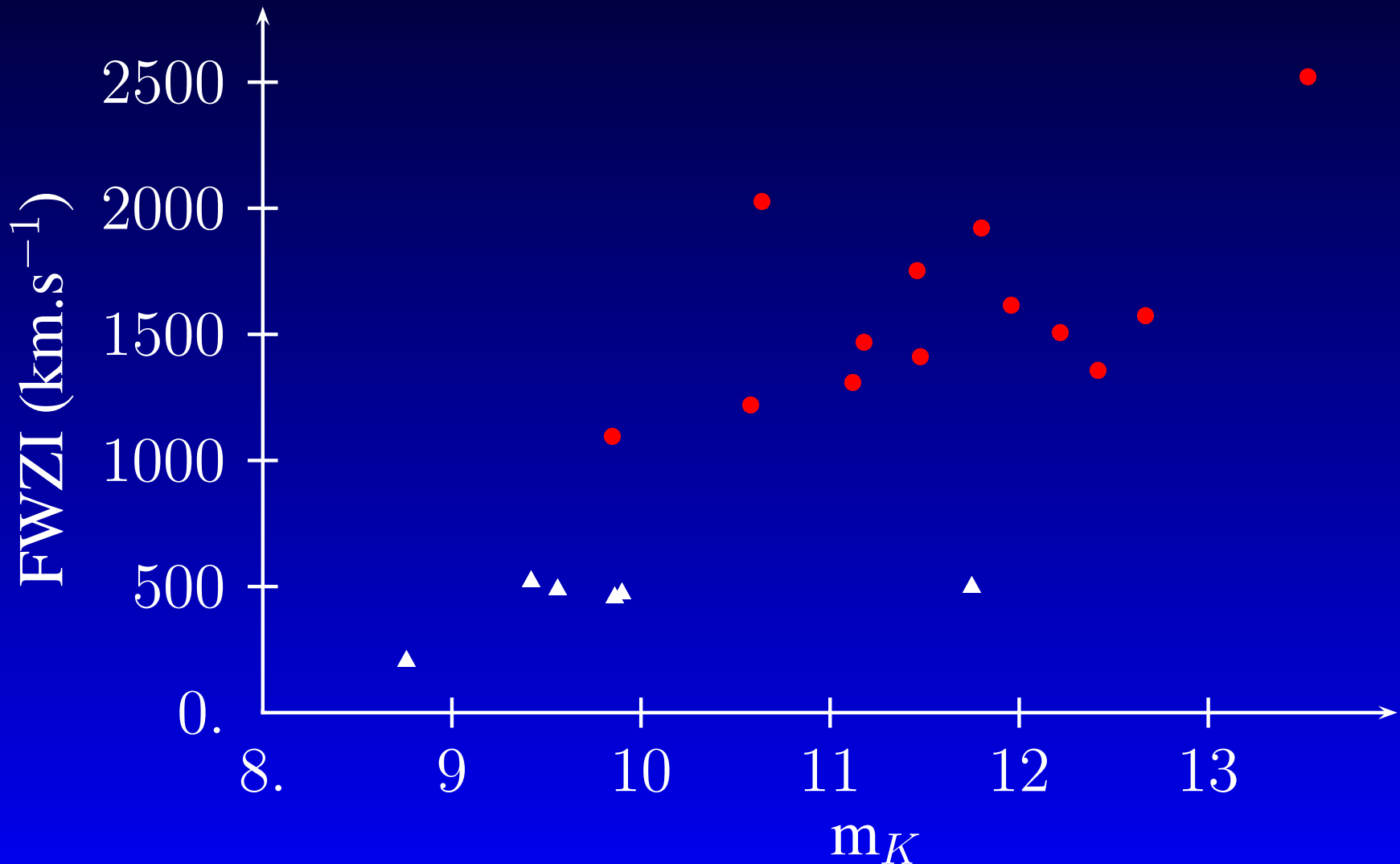


B 13

13 étoiles à raie large (FWZI $> 1000 \text{ km s}^{-1}$)

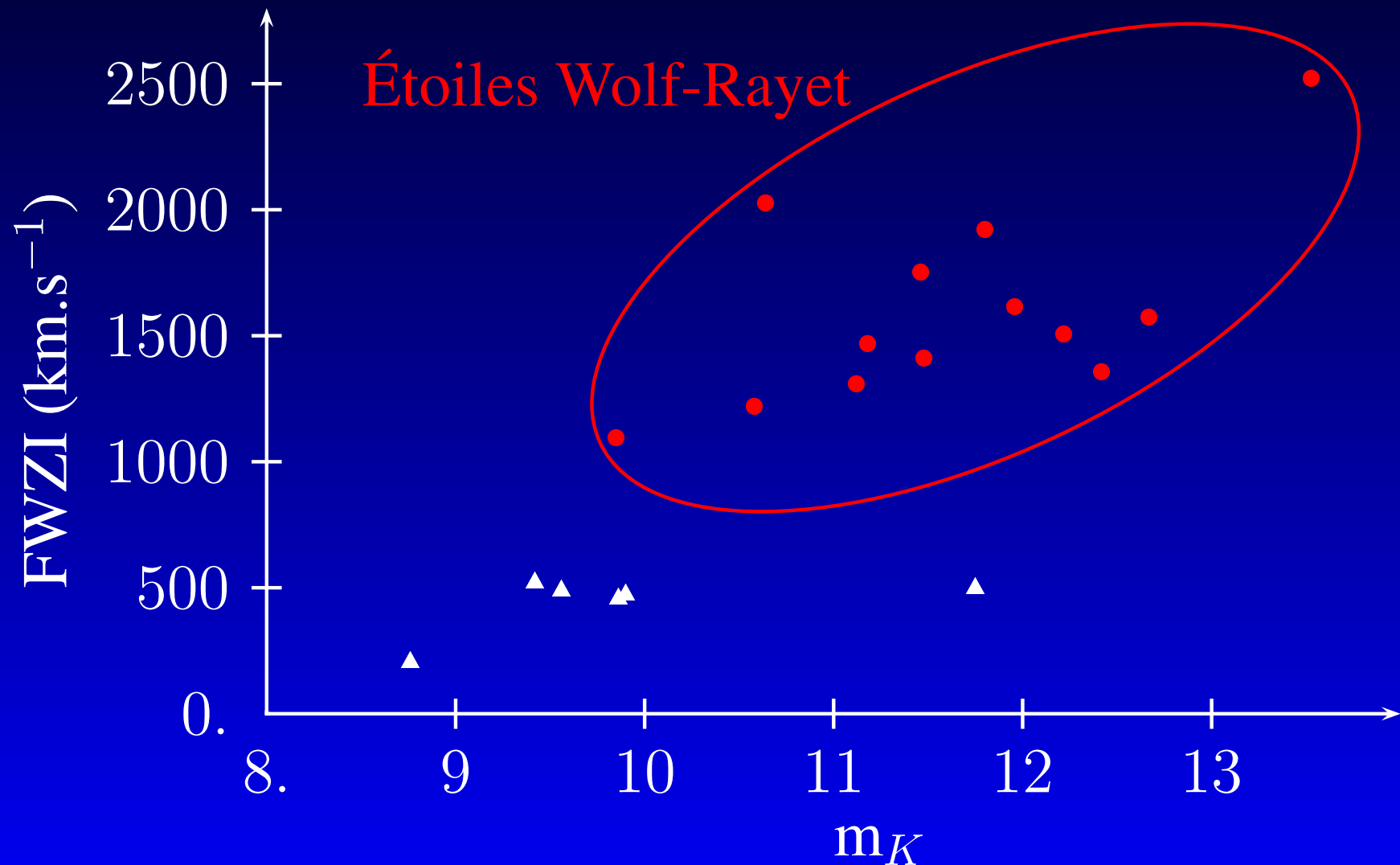
Deux classes stellaires distinctes

Largeur “totale” de la raie contre magnitude K



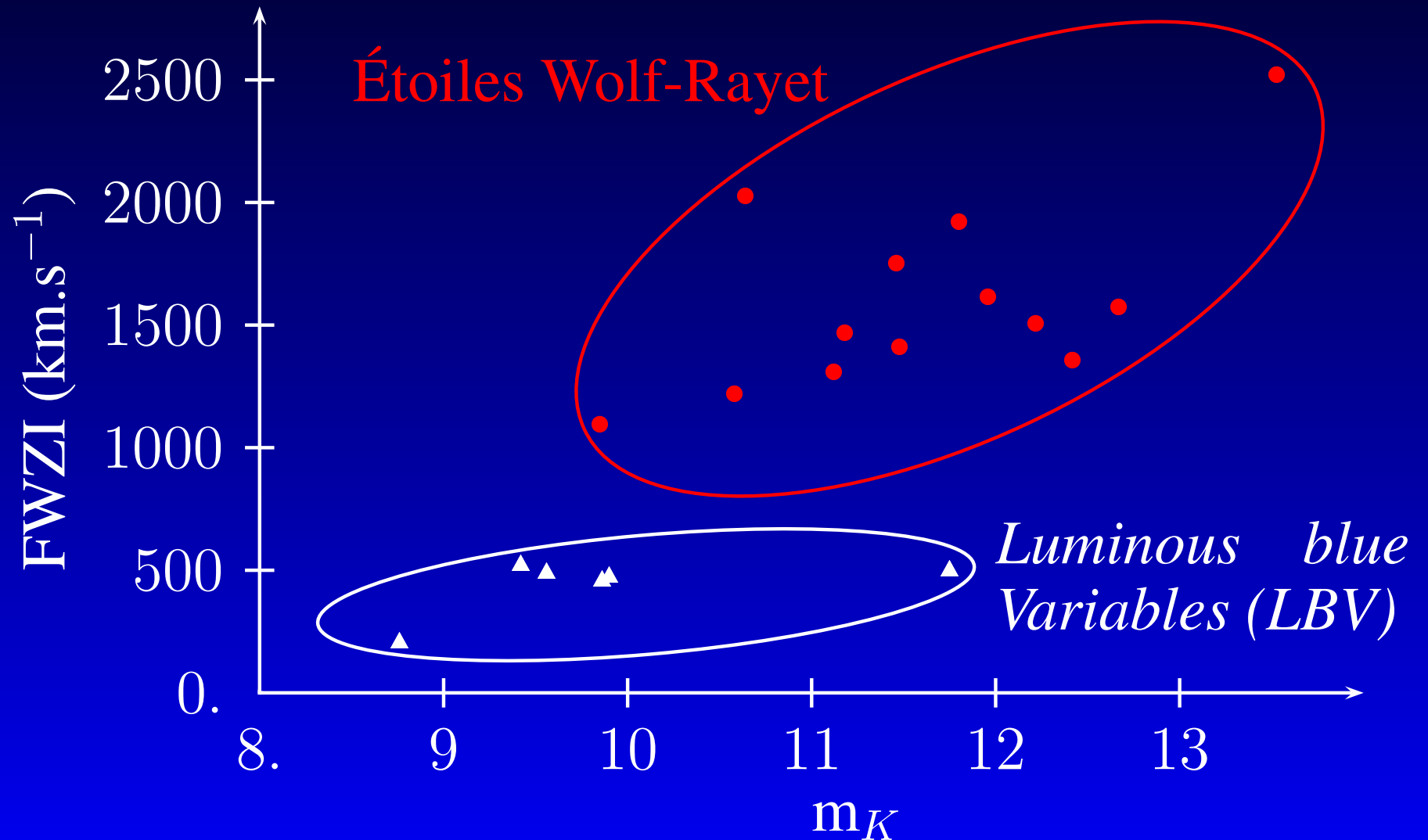
Deux classes stellaires distinctes

Largeur “totale” de la raie contre magnitude K

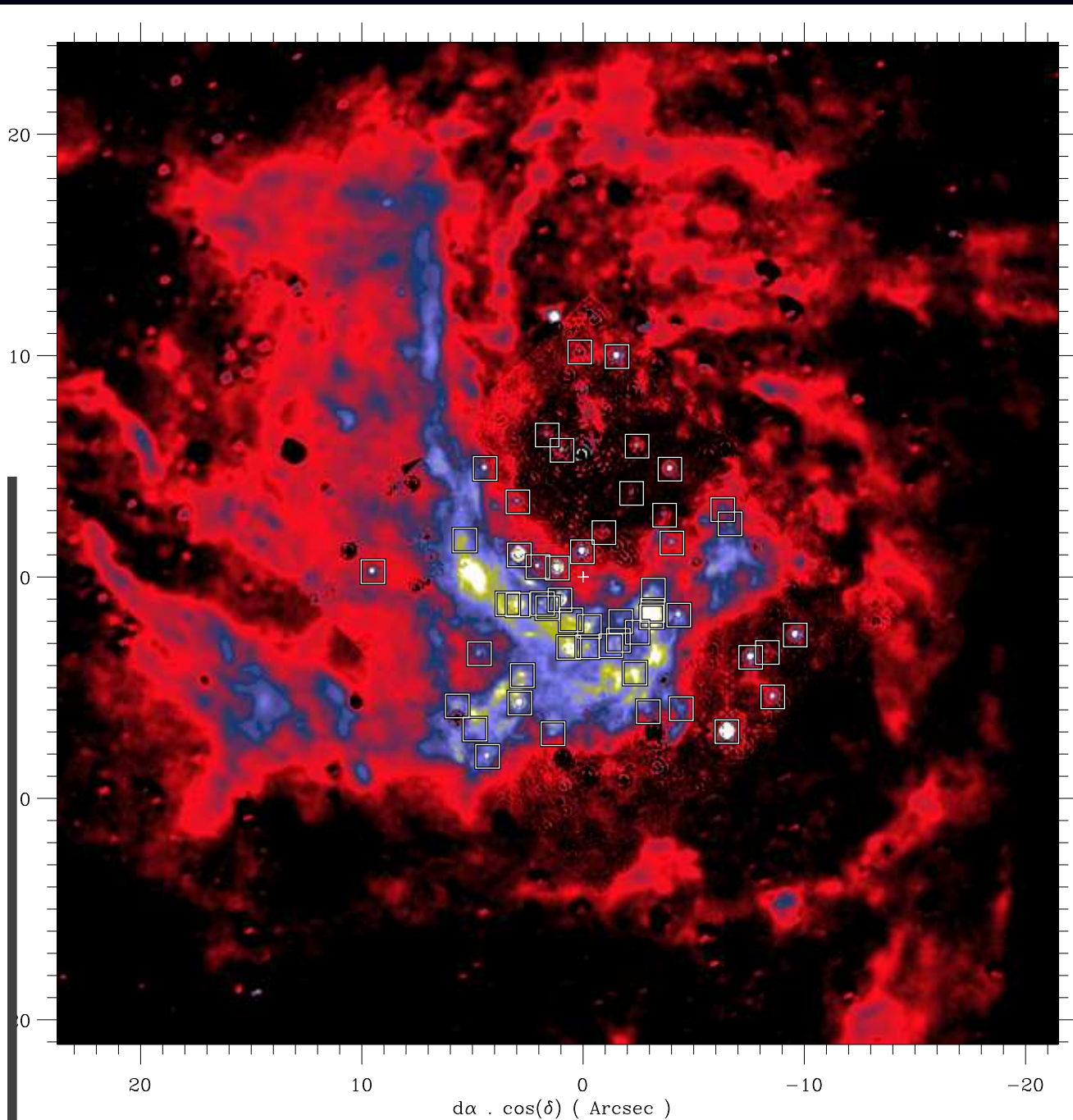
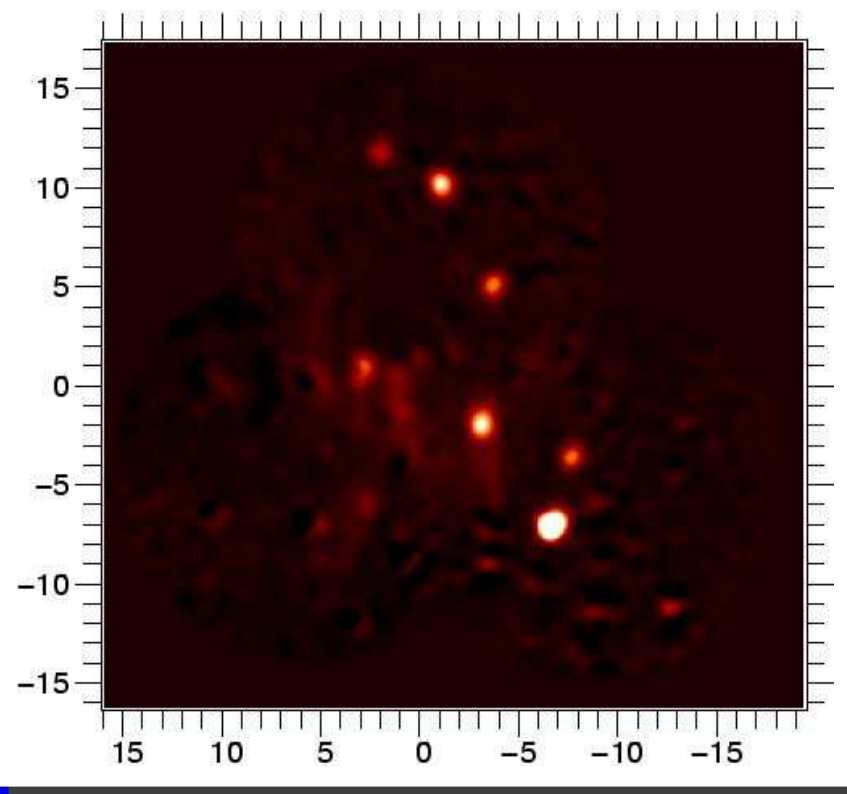


Deux classes stellaires distinctes

Largeur “totale” de la raie contre magnitude K



Émission He I et Pa α de ces étoiles



Propriétés physiques

ID	N1	N2	N3	N4	N5	N7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13
Nom	16NE	16C	16SW	16NW	33SE	34W	id180	7E2	9W	15SW	13E2	7W	AF	AFNW	HeIN3			15NE	
m_K	8.8	9.6	9.4	9.9	9.9	11.8	12.4	12.2	11.8	11.5	11.1	12.0	10.6	11.5	12.7	10.6	9.9	11.2	13.5
FWZI ^a	2.1	4.9	5.2	4.7	4.6	5.0	14	15	19	14	13	16	12	18	16	20	11	15	25
$\Phi_{Pa\alpha}$ ^b	3.46	2.14	2.09	1.15	1.12	0.14	0.40	0.28	0.83	0.76	2.27	0.44	4.40	1.05	0.14	0.37	0.07	0.37	1.15

a : $\times 100 \text{ km s}^{-1}$


b : $10^{-20} \text{ W cm}^{-2}$

En vert : nos nouvelles détections

Propriétés physiques

LBVs^c

WRs^d



ID	N1	N2	N3	N4	N5	N7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13
Nom	16NE	16C	16SW	16NW	33SE	34W	id180	7E2	9W	15SW	13E2	7W	AF	AFNW	HeIN3			15NE	
m_K	8.8	9.6	9.4	9.9	9.9	11.8	12.4	12.2	11.8	11.5	11.1	12.0	10.6	11.5	12.7	10.6	9.9	11.2	13.5
FWZI ^a	2.1	4.9	5.2	4.7	4.6	5.0	14	15	19	14	13	16	12	18	16	20	11	15	25
$\Phi_{Pa\alpha}$ ^b	3.46	2.14	2.09	1.15	1.12	0.14	0.40	0.28	0.83	0.76	2.27	0.44	4.40	1.05	0.14	0.37	0.07	0.37	1.15

a : $\times 100 \text{ km s}^{-1}$

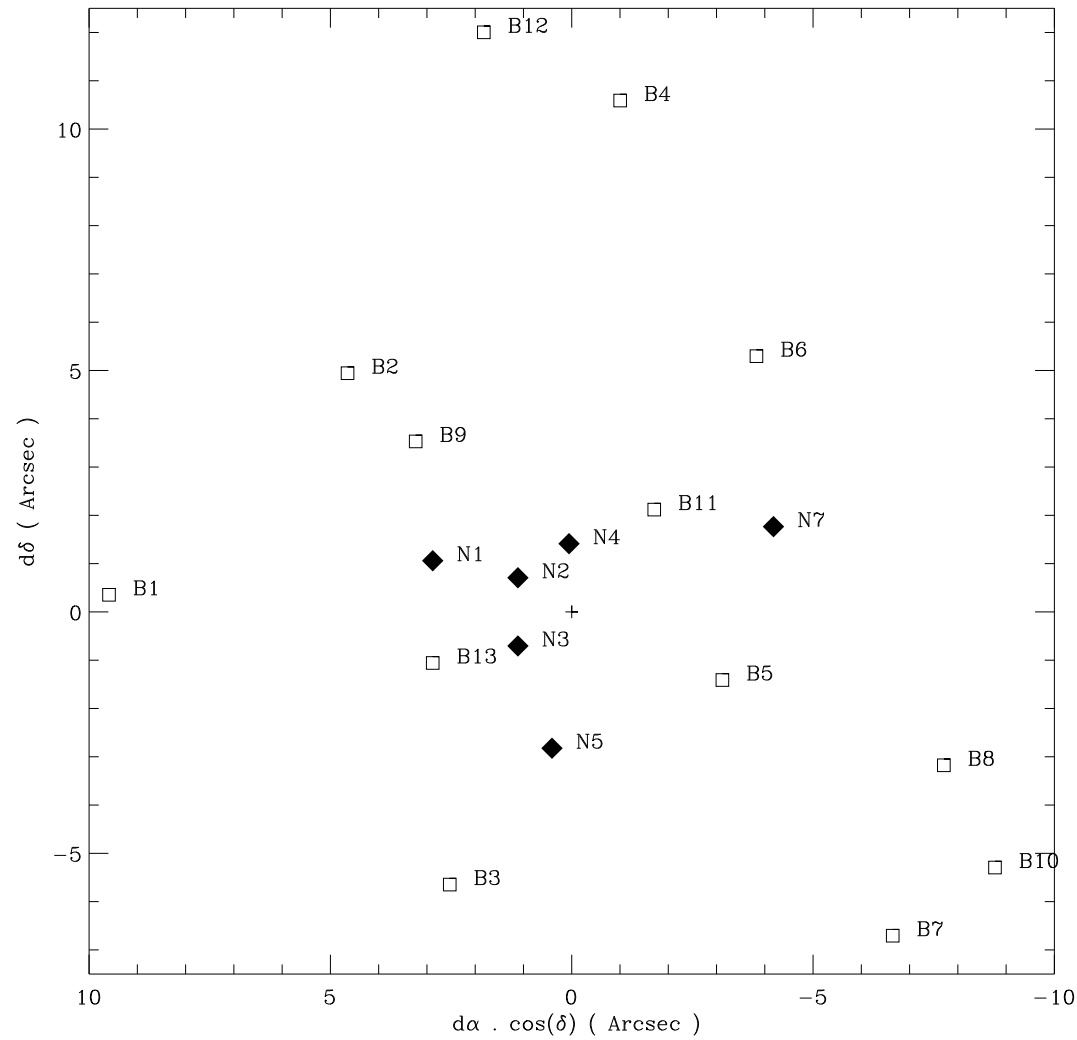
b : $10^{-20} \text{ W cm}^{-2}$

En vert : nos nouvelles détections

c : Luminous Blue Variable

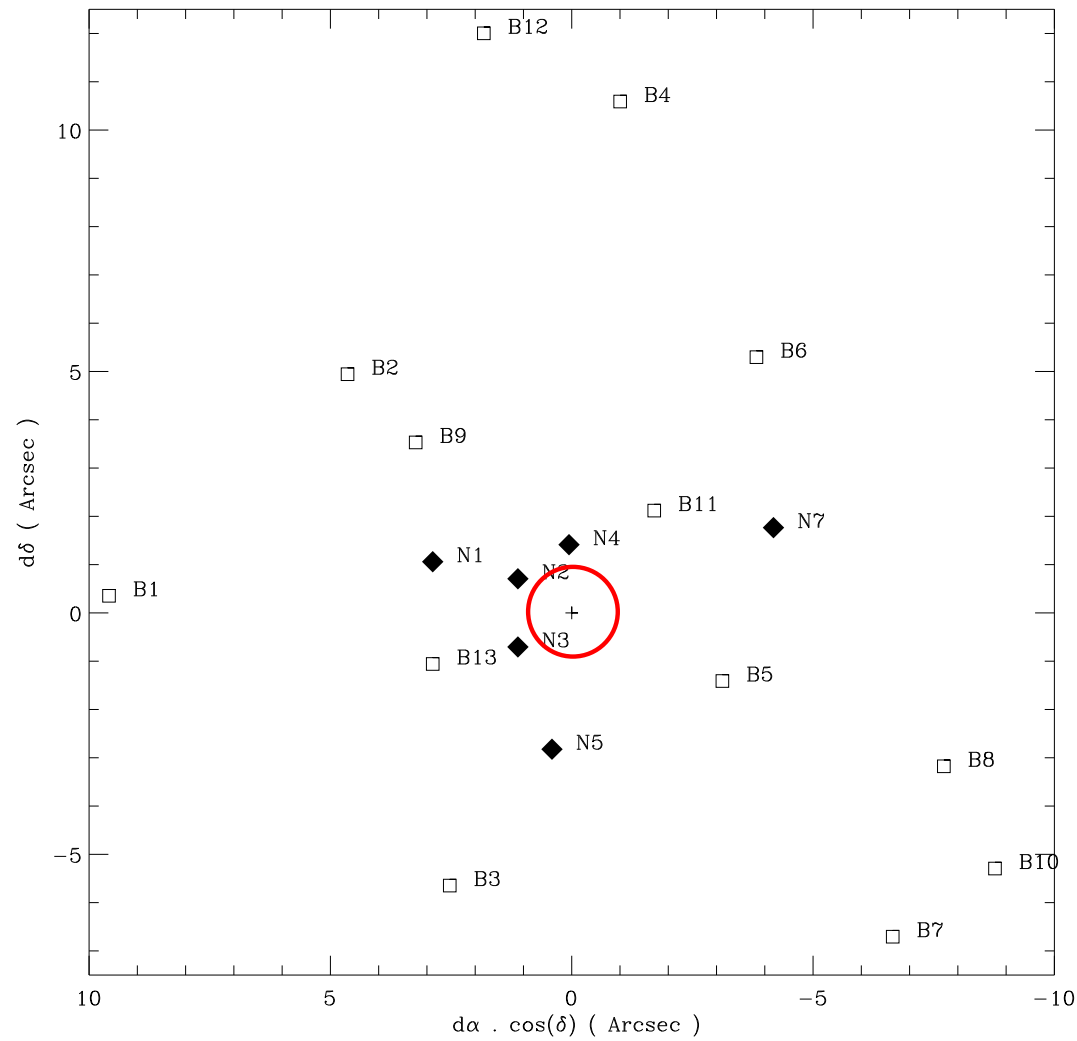
d : Wolf-Rayet

Ségrégation



Carte des deux classes stellaires

Ségrégation



Carte des deux classes stellaires

Amas "S" dans la région la plus centrale

Récapitulatif

- Deux classes d'étoiles à hélium :
 - largeur de raie ;
 - magnitude K ;
 - flux Pa α .
- Avec les étoiles "S", trois classes d'étoiles massives, les plus massives (initialement) à la périphérie.
- \simeq 30 étoiles détectées en Pa α sans contrepartie détectée en He I.

(Cf. Paumard *et al.* 2001, A&A 366, 466-480

et les actes de la conf. GC2002, sous presse)

III- IRS 13E

l'une des étoiles à hélium, très particulière

Plan

I Introduction

Un objet brillant des rayons X au domaine centimétrique

II Images haute résolution de IRS 13

Données AO et NICMOS de 1,1 à 3,5 μm

III Analyse du contenu stellaire

Déconvolution des images AO H, K, et L

IV SED et loi d'extinction

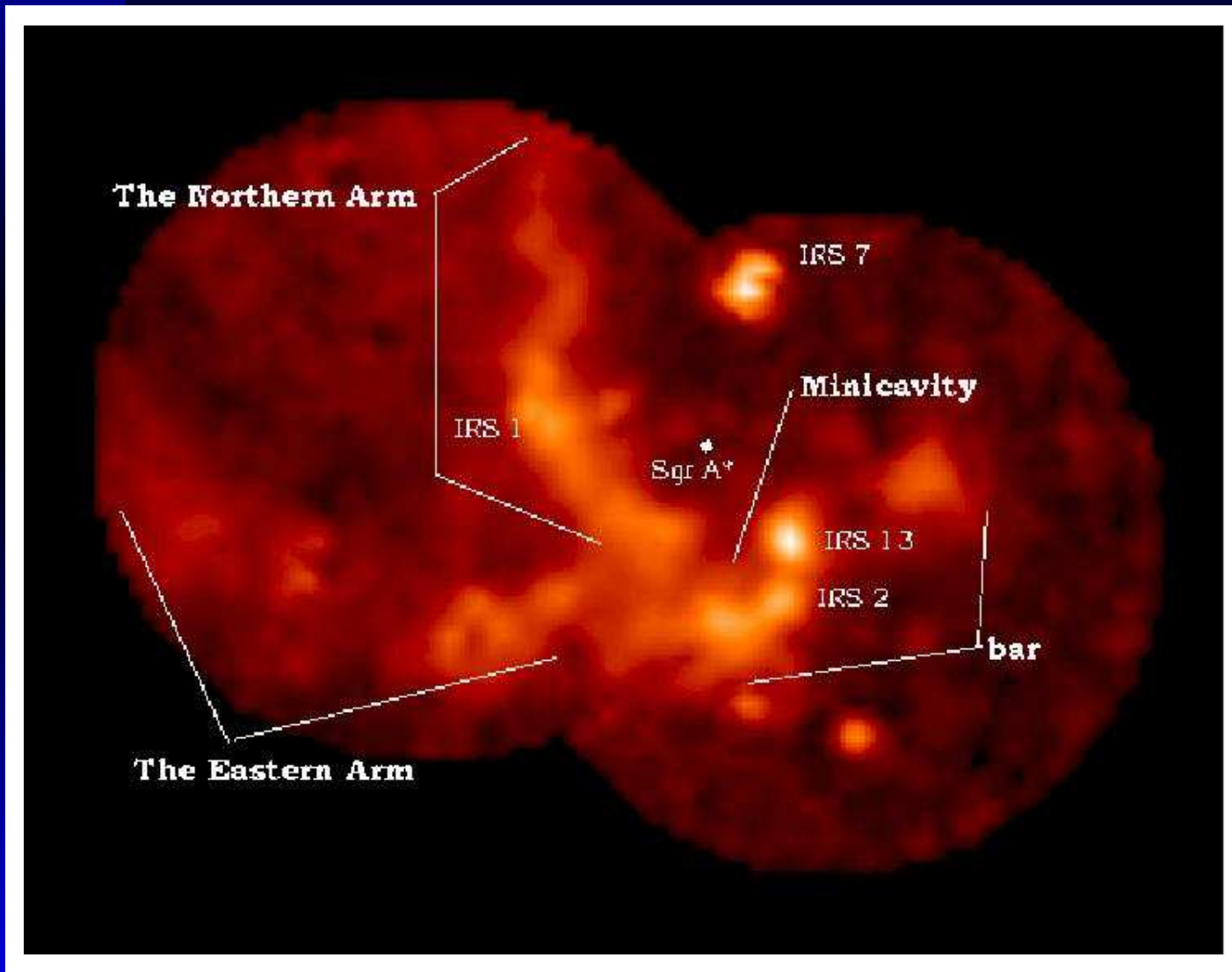
Nature des sources de IRS 13E

V Modèle de IRS 13E

cœur résiduel d'un amas d'étoiles massives

Introduction : localisation

IRS 13 : brillant des domaines X à cm $3,6''$ au SO de Sgr A*



Carte d'intensité intégrée en $\text{Br}\gamma$ en direction de Sgr A Ouest. IRS 13 apparaît comme la source ponctuelle la plus brillante.

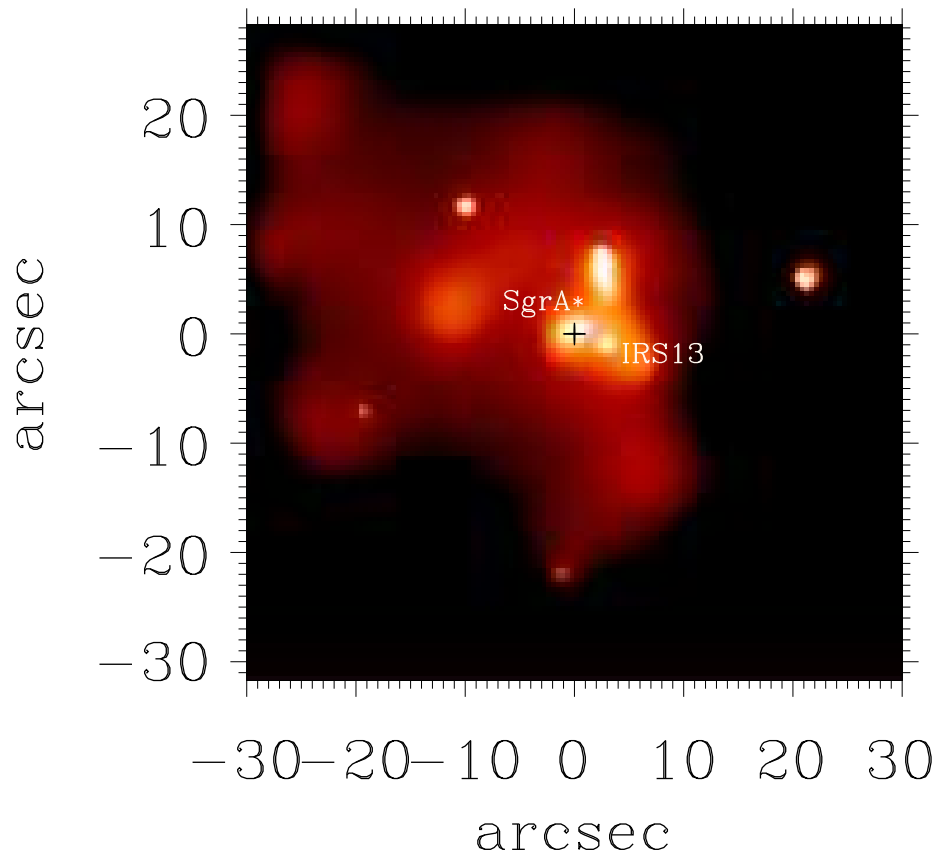
Introduction : historique

- **Séparation de 13E et 13W** *Simon et al. 1990*
distance : $\sim 1,2''$ 13E $m_K=9,4$ 13W $m_K=10,4$
- **Étoile à He I à cette position** *Genzel et al. 1996*
- **Intense à 7 & 13 mm** *Zhao & Goss 1998*
- **1^{ère} carte AO de 13E en K** *Paumard et al. 2001*
Séparation de 13E1, 13E2 et 13E3
- **1^{ère} carte AO de 13E en L** *Clénet et al. 2001*
13E $m_L=6.5$
- **Émission X discrète** *Baganoff et al. 2003*

IRS 13 : un objet spécial

Émission X à la position de IRS 13

CHANDRA IMAGE of SgrA* and IRS13

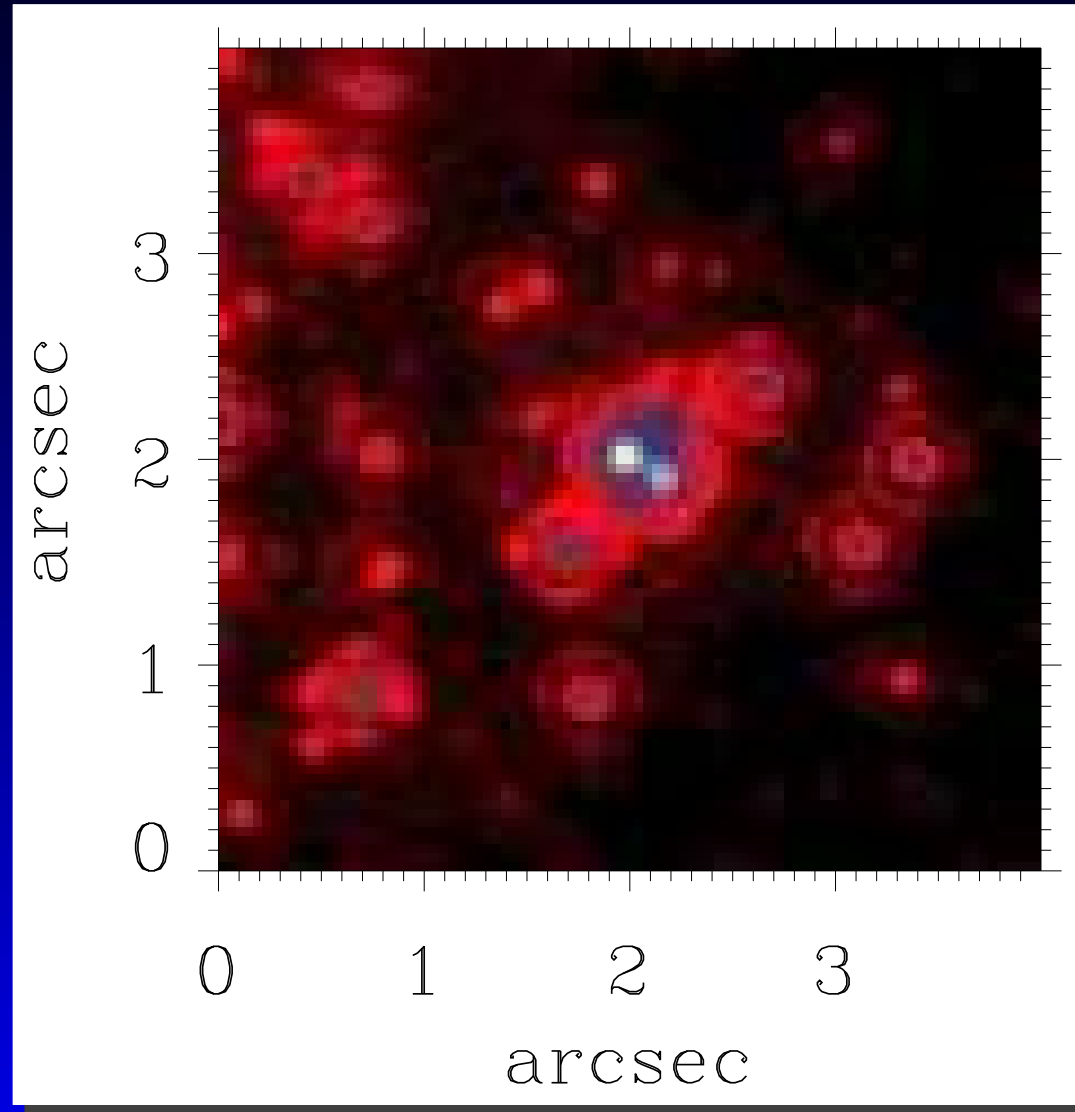


Minute d'arc
centrale, contenant
un gaz chaud
entourant
Sgr A* et des
sources discrètes,
dont IRS 13
(NASA/MIT/PSU).

Images haute résolution de IRS 13

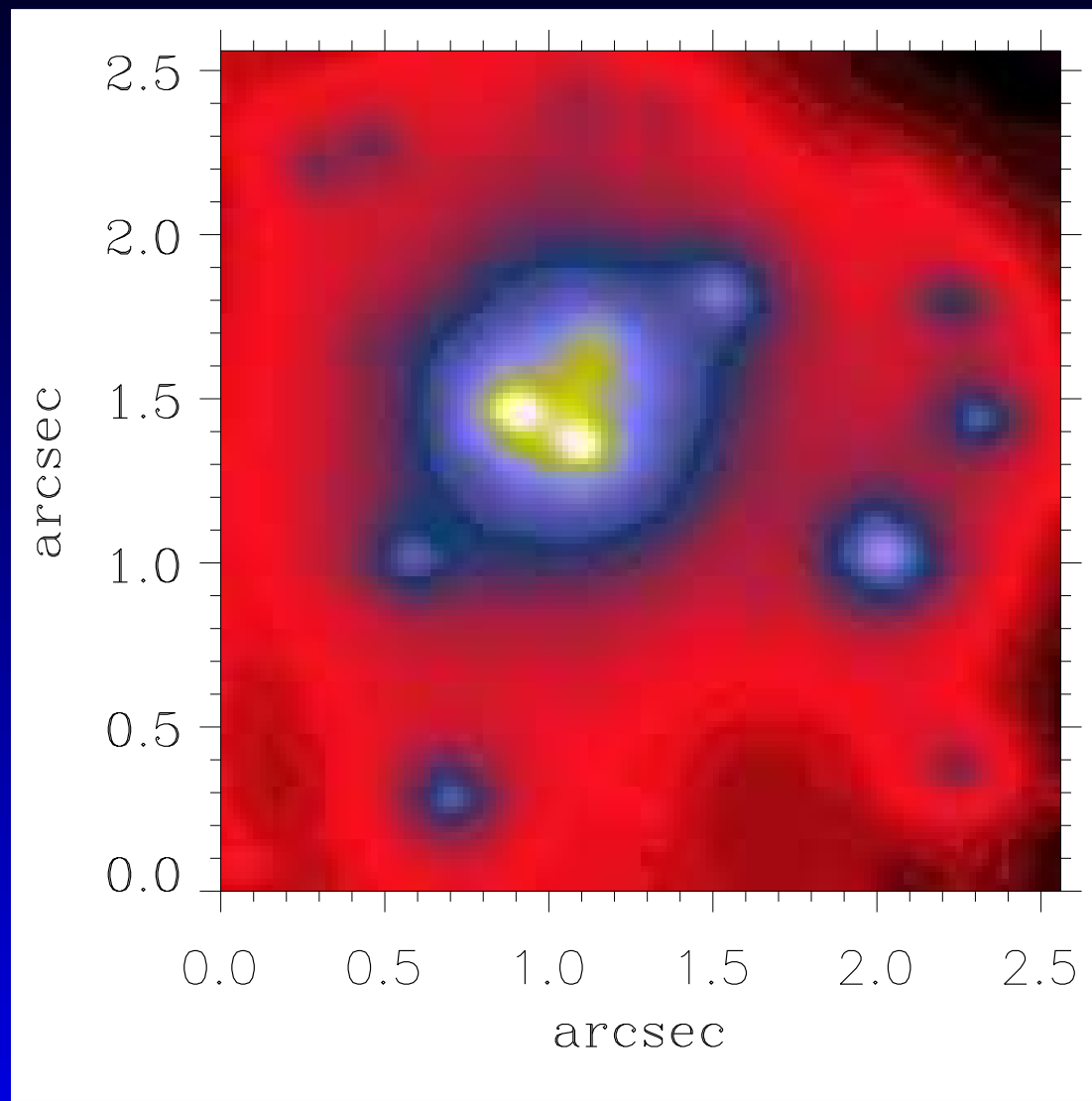
Filtre	Instrument / Télescope	λ / FWHM (μm)	Résolution
F110M	NICMOS / HST	1,10 / 0,200	0,12''
F145M	NICMOS / HST	1,45 / 0,197	0,15''
F160W	NICMOS / HST	1,60 / 0,400	0,17''
H	Hokupa'a+Quirc / Gemini N	1,65 / 0,296	0,18''
Pa α	NICMOS / HST	1,87 / 0,019	0,20''
F190N	NICMOS / HST	1,90 / 0,017	0,20''
K'	Hokupa'a+Quirc / Gemini N	2,12 / 0,410	0,17''
K	PUEO+KIR / CFHT	2,20 / 0,340	0,13'' / 0,20''
F222M	NICMOS / HST	2,22 / 0,143	0,23''
L	ADONIS+COMIC / 3.6 m ESO	3,48 / 0,590	0,29''

Image NICMOS à $1,45 \mu\text{m}$



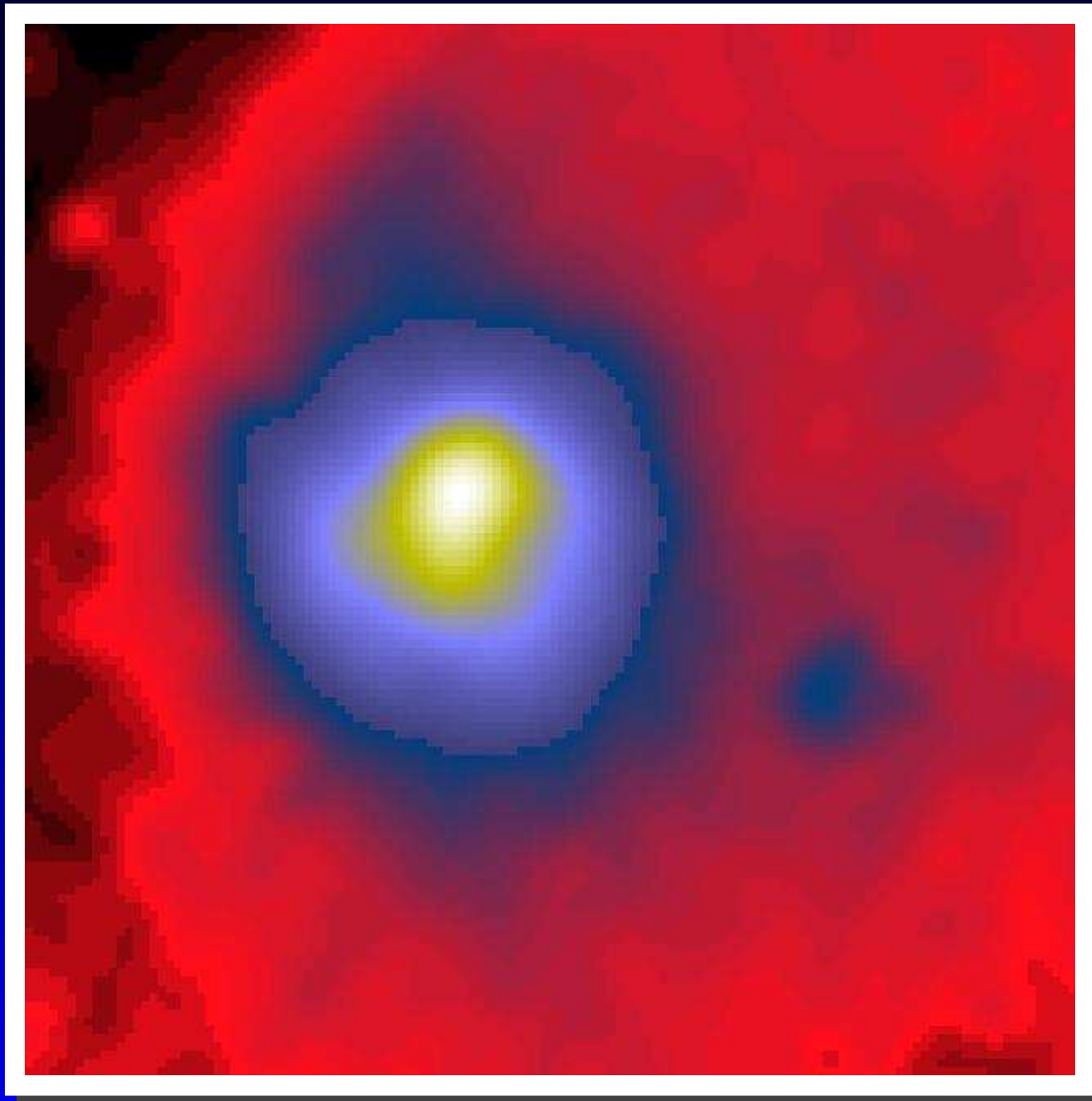
Champ de $4'' \times 4''$ centré sur IRS 13

Image AO Gemini en K'



Portion de l'image AO de $19'' \times 19''$ centrée sur IRS 13

Image AO de IRS 13 en L



2.5'' × 2.5''
de l'image
Adonis en bande
L, montrant
IRS 13E et 13W
(Clénet *et al.*
2001).

Contenu stellaire : méthode d'analyse

Extraction des étoiles du champ de IRS à l'aide de deux logiciels.

- **La procédure IDL StarFinder** Diolaiti *et al.* 2000

Écrite spécialement pour les données d'optique adaptative. PSF construite à partir des images de quelques étoiles brillantes et isolées.

- **Le code de déconvolution MCS** Magain *et al.* 1998

PSF analytique. PSF finale compatible avec l'échantillonnage des données. Ajustement du fond diffus.

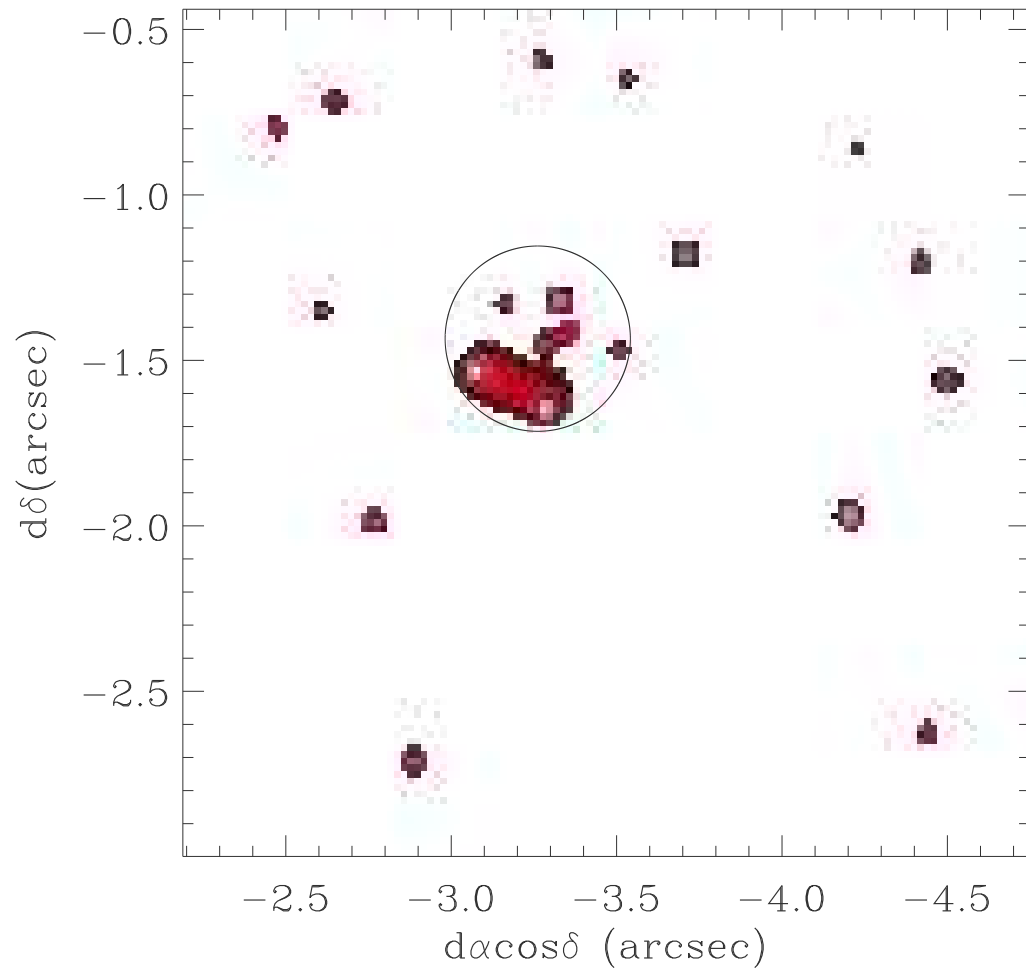
Utilisé uniquement sur nos images d'optique adaptative. Pas prêt à être appliqué sur des images strictement limitées par la diffraction.

Données spectroscopiques :

- **Image NICMOS Pa α et cubes BEAR**

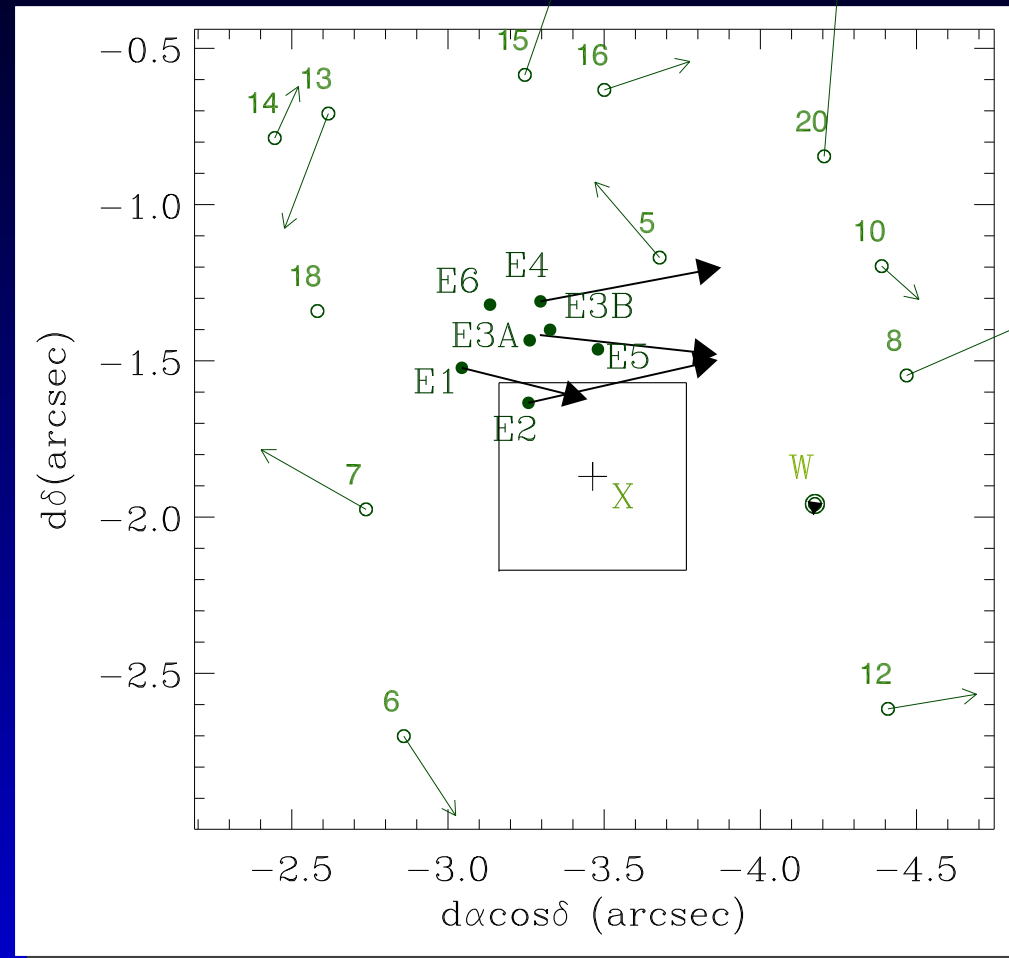
Données BEAR : spectro-imagerie en He I 2,06 μ m, Br γ , He II 2,19 μ m

Contenu stellaire : résultats



Déconvolution de
 $2.5'' \times 2.5''$ de l'image
Gemini AO en bande
K. Résolution : $0.040''$

Identification des étoiles et mouvements propres

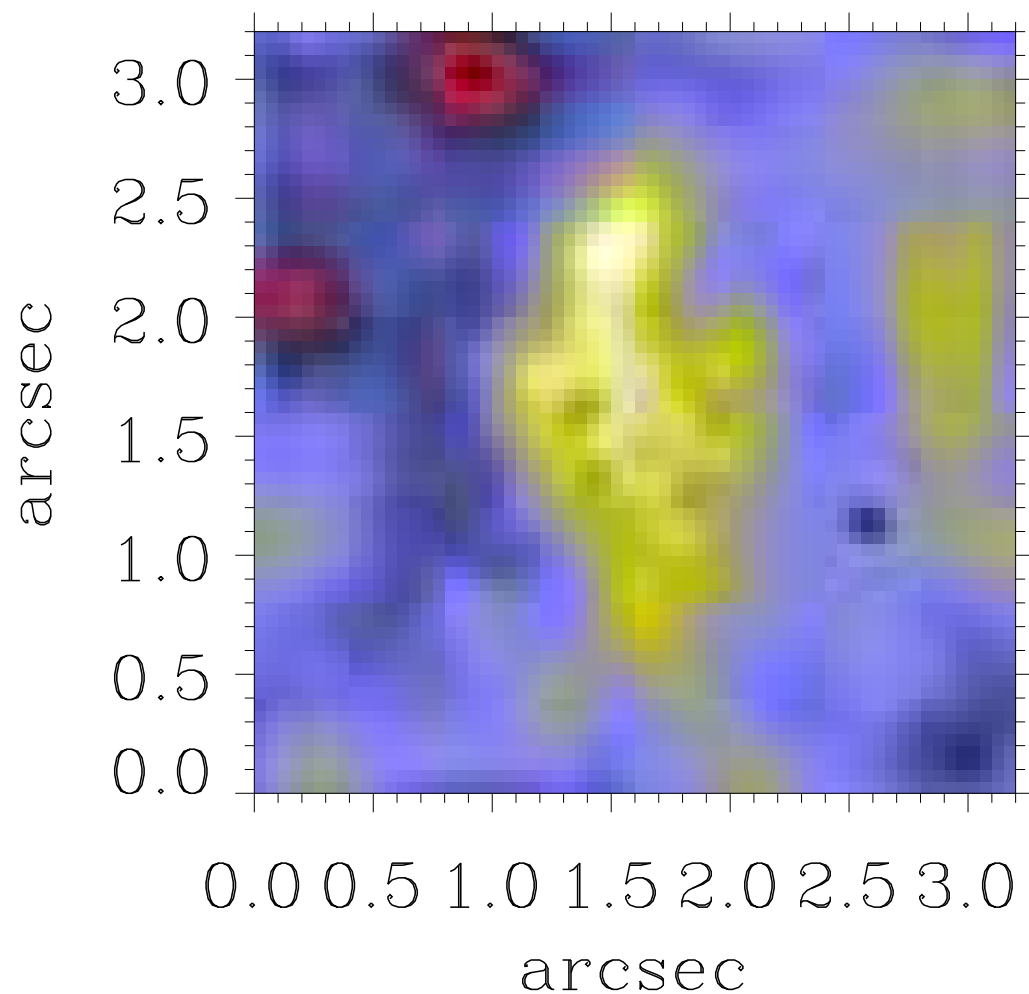


IRS 13E apparaît comme un complexe stellaire de 7 sources.

Mouvements propres : Ott *et al.* 2003

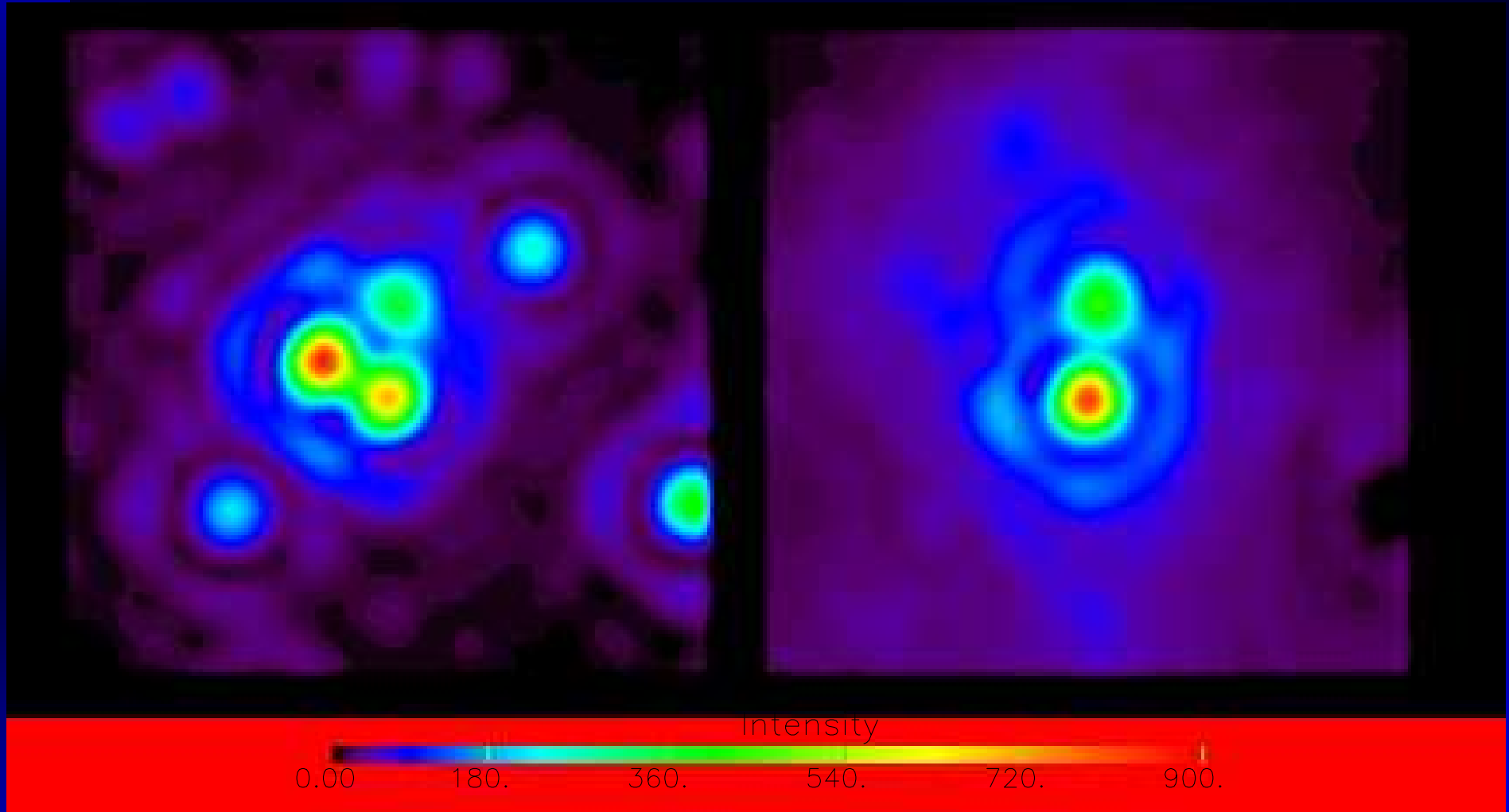
Émission X : Baganoff *et al.* 2003

Composante diffuse en bande L



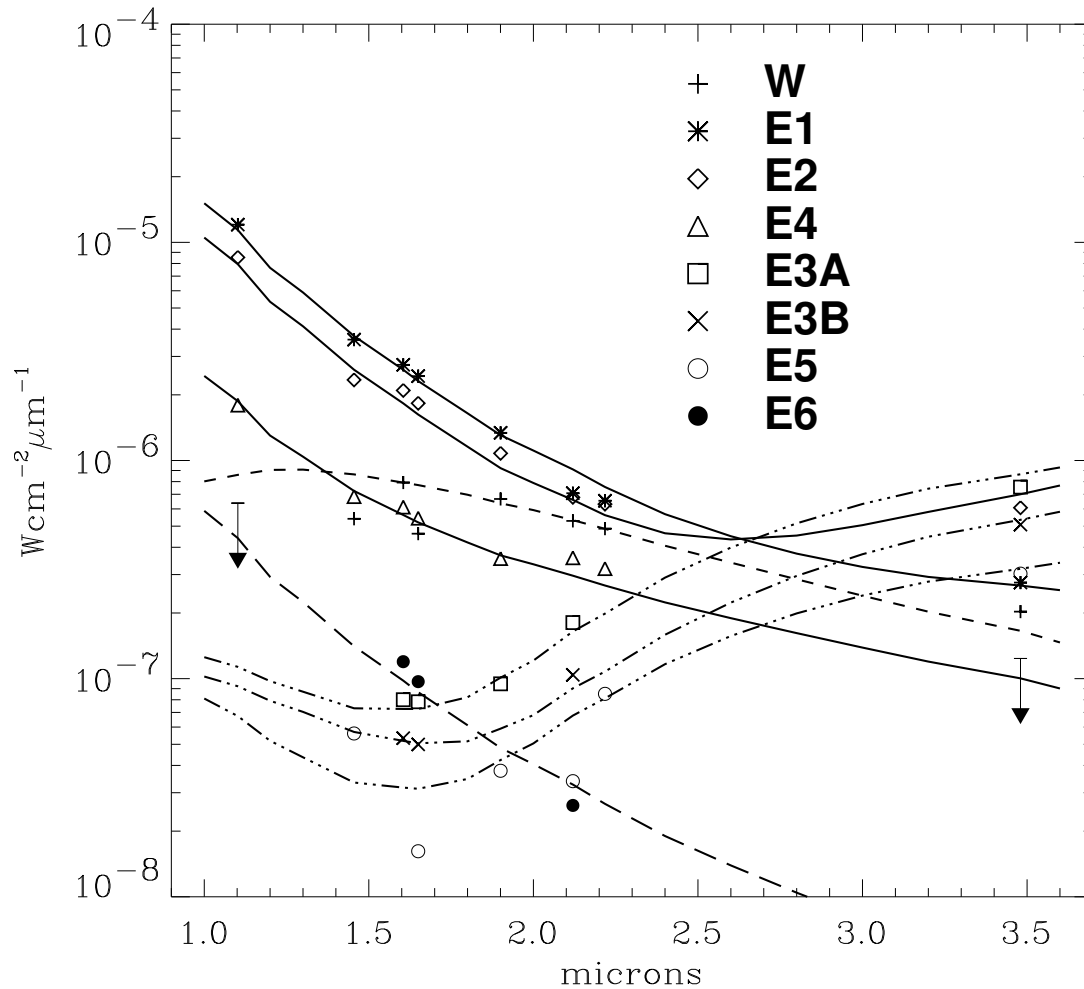
Fond diffus ajusté
par le code de
déconvolution
MCS sur IRS 13.
Résolution : 0.2".

Données spectroscopiques : émission Pa α



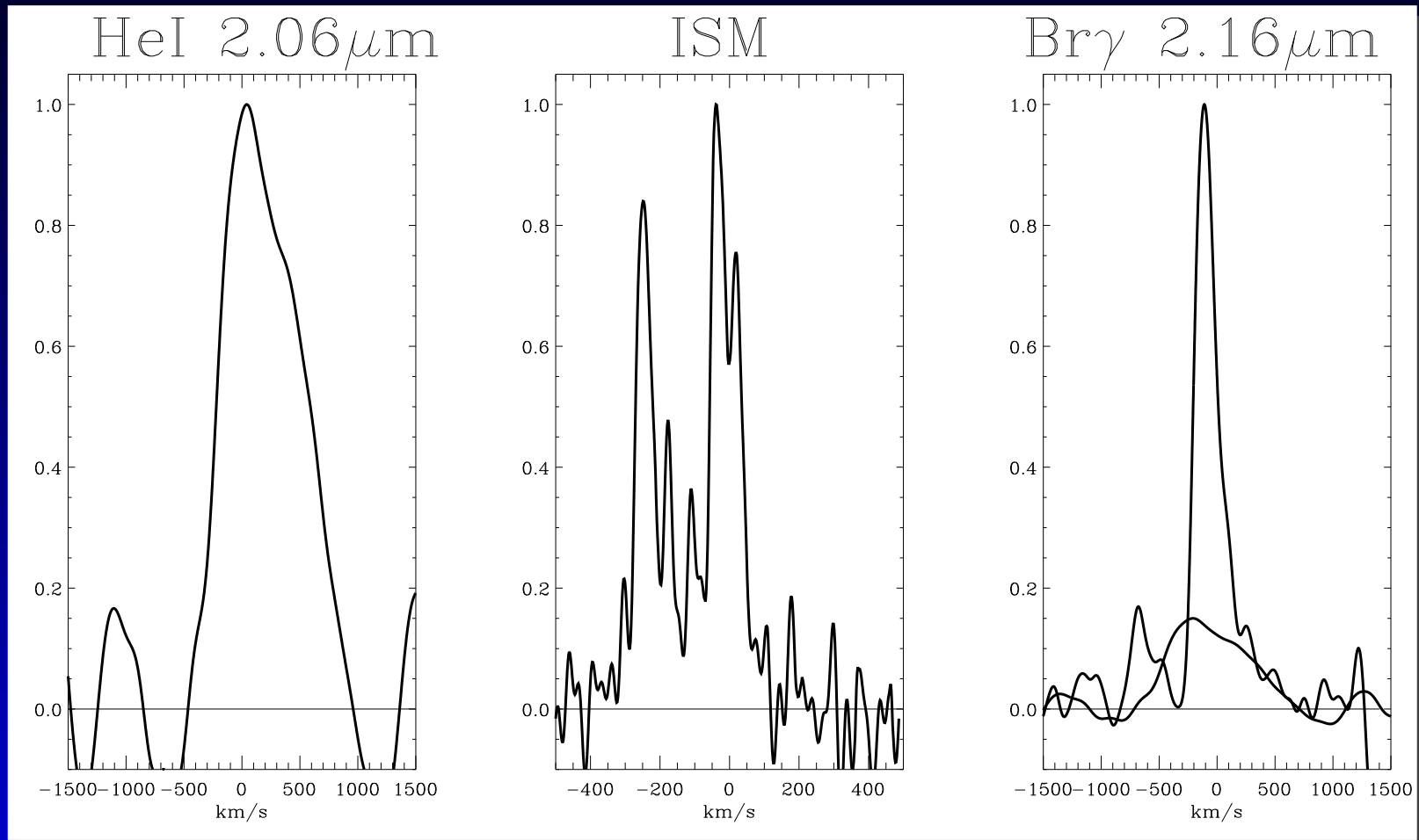
À gauche : NICMOS F187N ; à droite : F187N-F190N.
IRS 13E2 et 13E4 apparaissent comme des étoiles à raies
d'émission.

SED après dérougissement



SED des sources IRS
13E et IRS 13W.
Loi de dérougissement :
Moneti *et al.* (2001).
 $A_v = 35$.

Données spectroscopiques BEAR



Profils d'émission HeI 2,06 μm et Brγ sur IRS 13E après nettoyage de l'émission interstellaire

$$\text{FWHM}(\text{He I } 2,06 \mu\text{m}) = 880 \text{ km s}^{-1}$$

$$\text{FWHM}(\text{Br}\gamma) = 216 \text{ km s}^{-1}$$

Type spectral de chaque source de IRS 13

Star	W	E1	E2	E4	E3A	E3B	E5	E6
$T_1 / 10^3 \text{ K}$	2,6	≥ 25	≥ 25	≥ 25	3,8	3,8	6	≥ 25
<i>Coef1</i>	2,3	$9e^{-2}$	$7,2e^{-2}$	$1,4e^{-2}$	$4,6e^{-2}$	$3,7e^{-2}$	$7e^{-3}$	$3,2e^{-3}$
$T_2 / 10^3 \text{ K}$	0,65	0,55	0,55	1,55	0,61	0,58	0,63	
<i>Coef2</i>	170	1 200	4 000	4,5	3 300	2 900	980	
Raies			He I ^a , Pa α ?	Pa α				
Sp	M5III	O5I	WC9	O5IIIe	d. WR ^a	d. WR	d. WR	O5V

a : Clénet *et al.* 2003

b : étoile Wolf-Rayet poussiéreuse, *dusty Wolf-Rayet*

Coefficients de l'ajustement bitherme de la SED de chaque étoile

Récapitulatif sur IRS 13E

- IRS 13E : amas compact, au moins six étoiles massives, représentatives des types spectraux des étoiles massives du parsec central ;
- Émission X : peut-être E2 (binaire X ? Coker *et al.* 2002) ;
- E6, étoile chaude (O), fait-elle partie de l'amas ? Trois autres étoiles chaudes dans le champ.

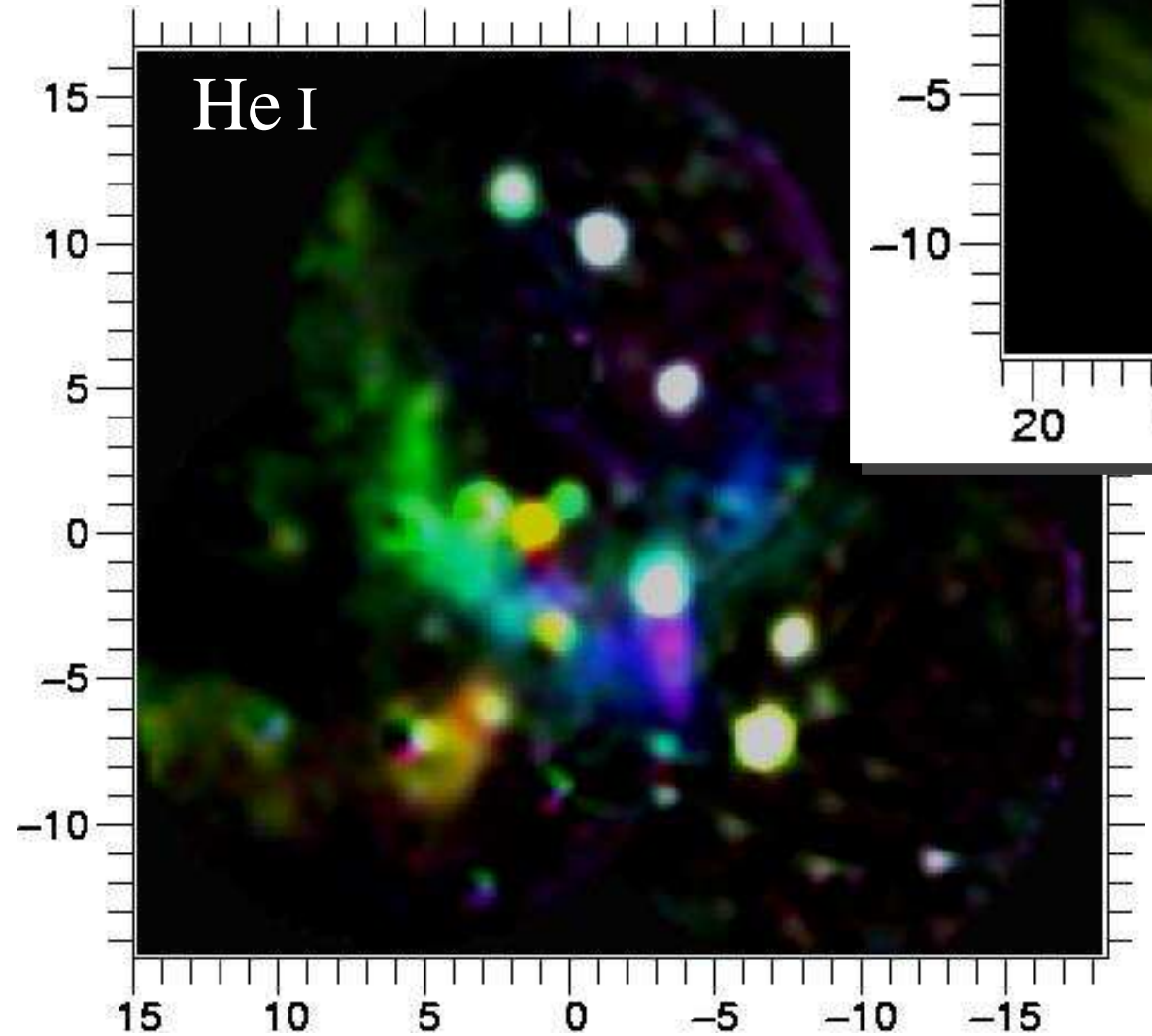
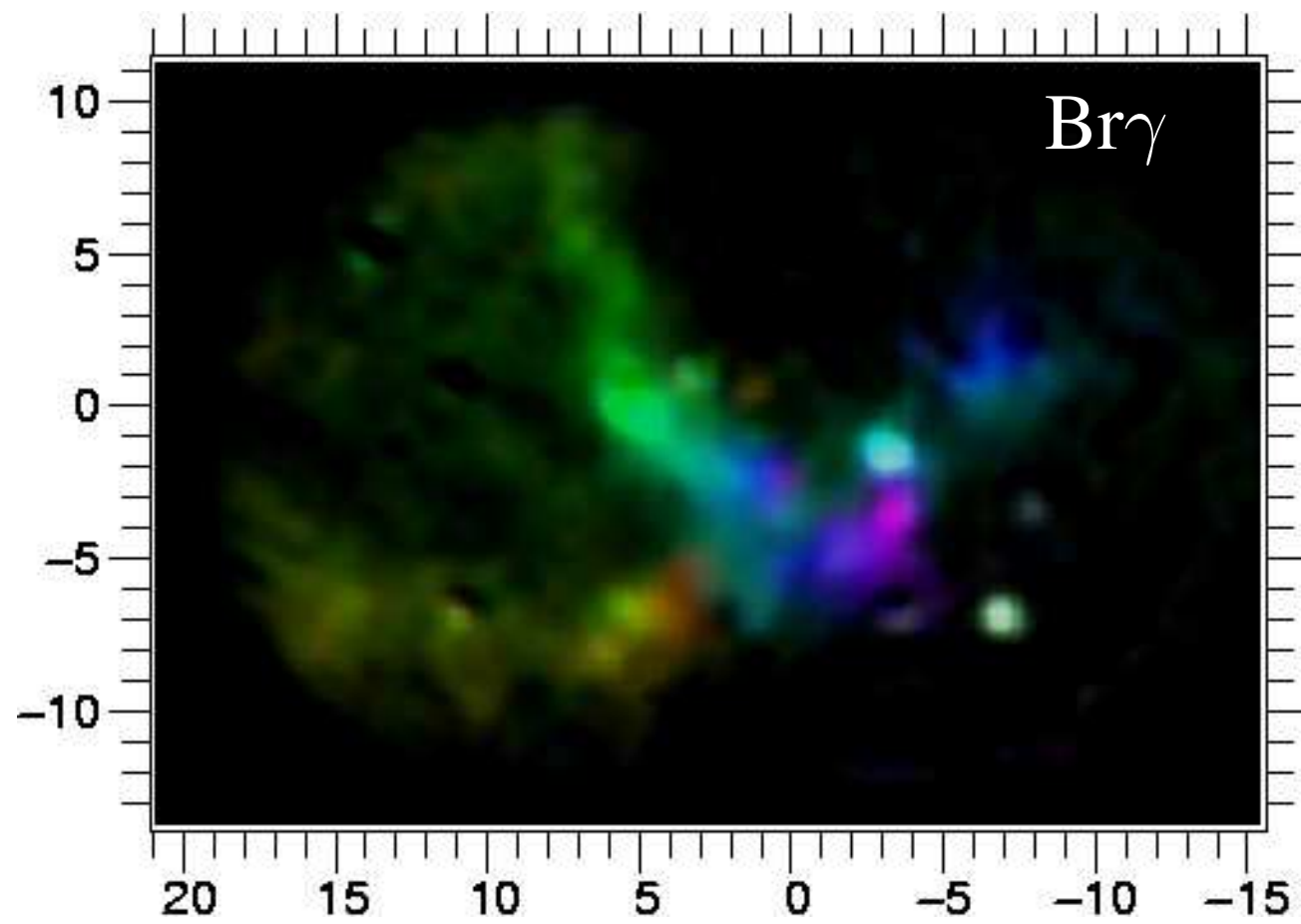
(Cf. Maillard *et al.* 2003, A&A, soumis

et les actes de la conf. GC2002, sous presse)

IV- Étude morphologique et cinématique de la Minispirale

à partir de données BEAR Br γ et He I.

La Minispirale vue par BEAR



Composition de trois images
obtenues à travers des filtres
virtuels idoines en Br γ et en He I.

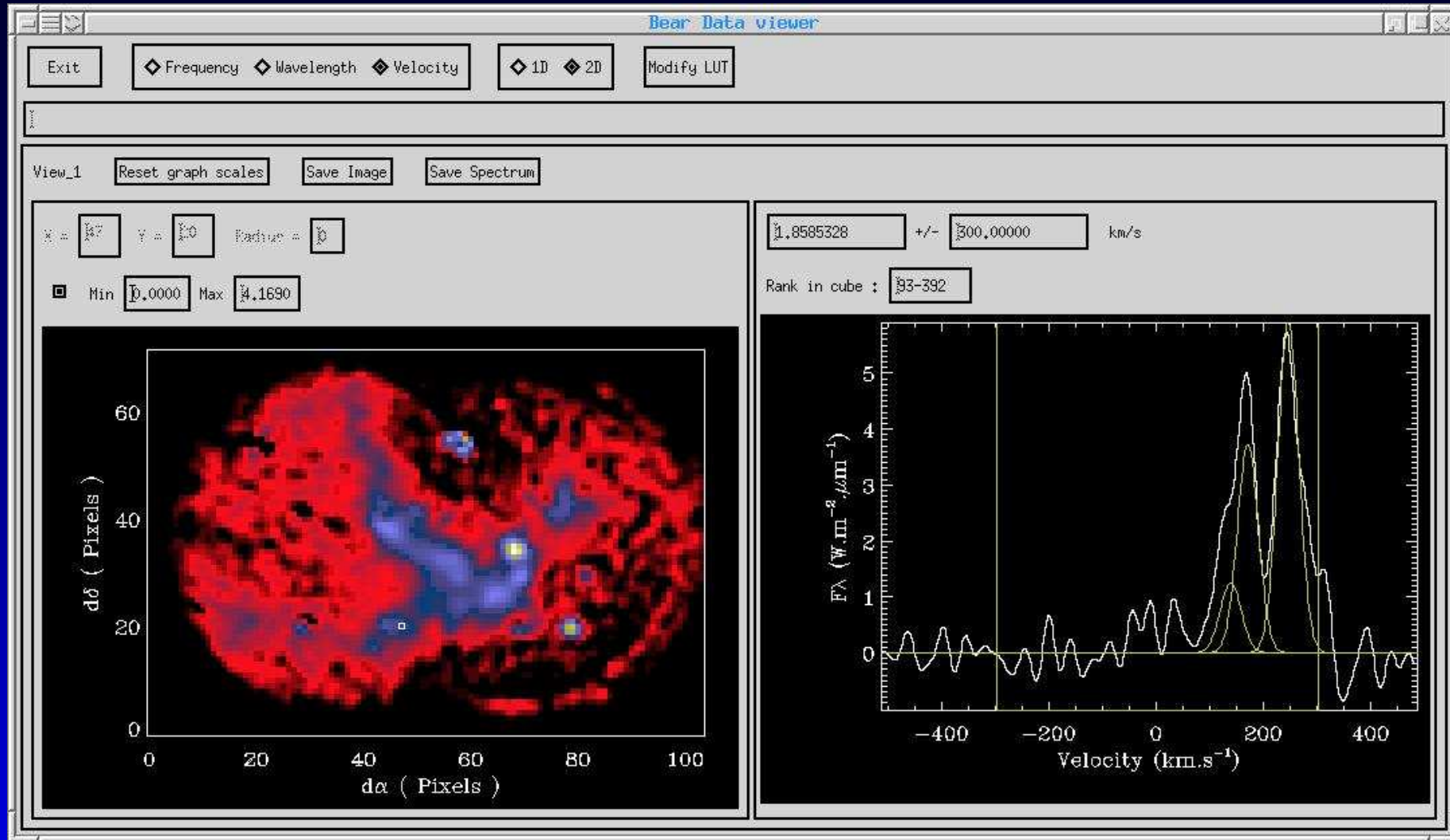
Vitesses : -400 à $+400$ km s $^{-1}$

Plan

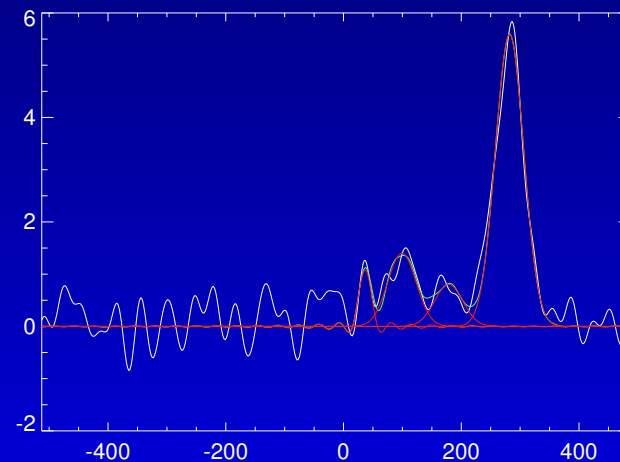
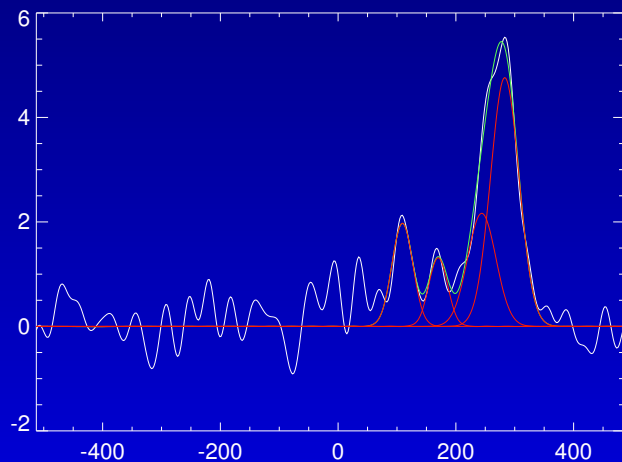
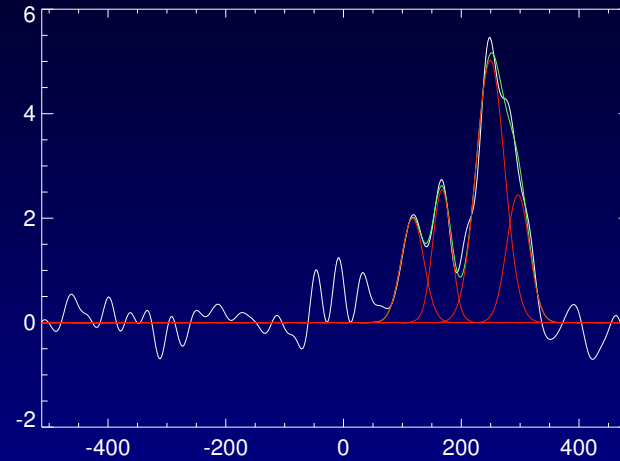
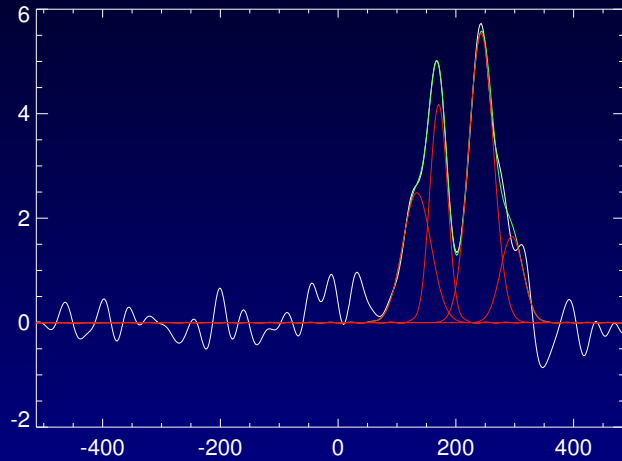
- I **Identification des structures en vitesse**
en $Br\gamma$, puis en $He\ I$
- II **Ajustement d'orbites keplériennes sur la**
carte de vitesses du Bras Nord

À tout moment : recherche d'informations 3D

Ajustement multi-composantes de raies

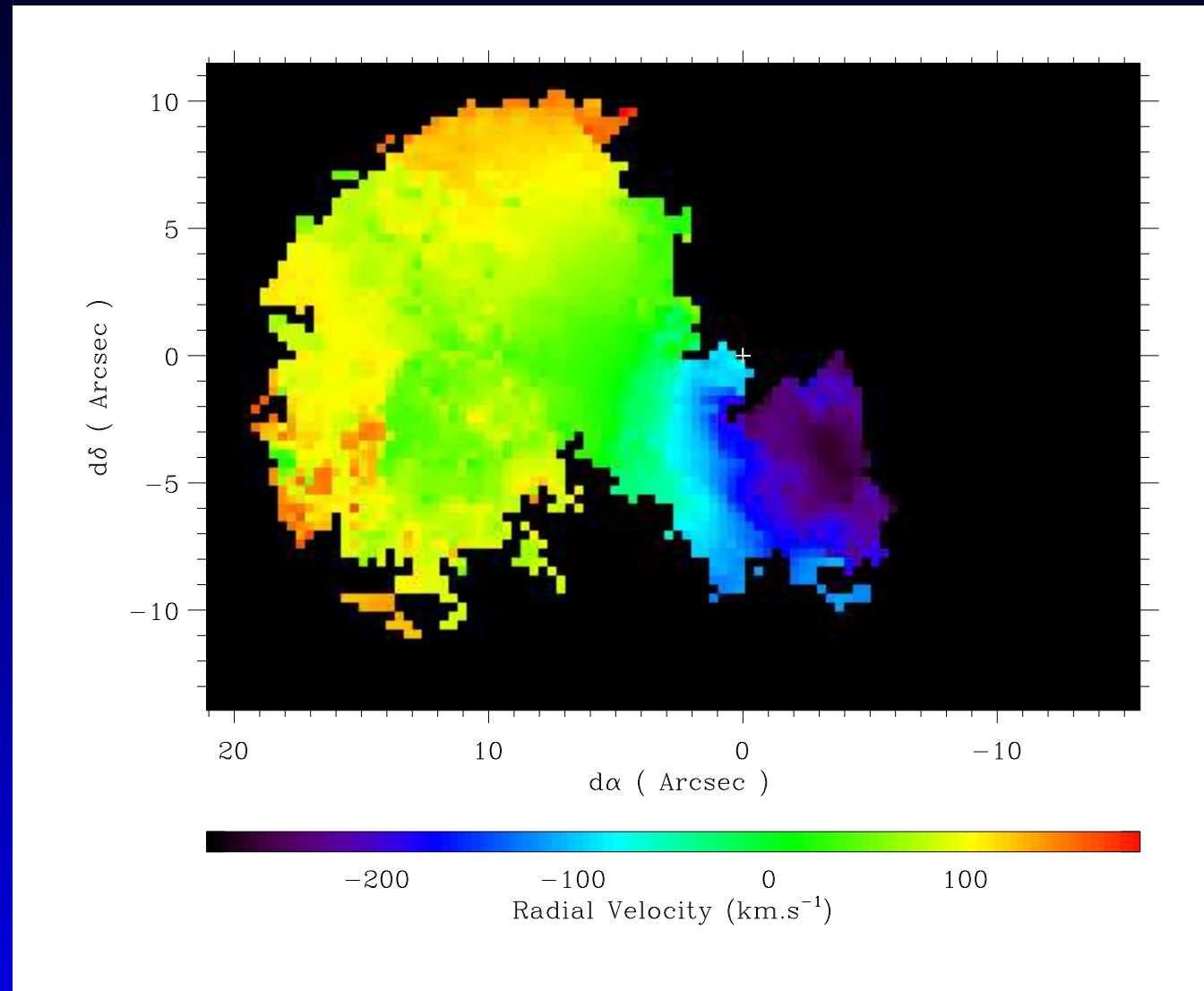


Environnement \Rightarrow résolution des mélanges et détection de structures faibles



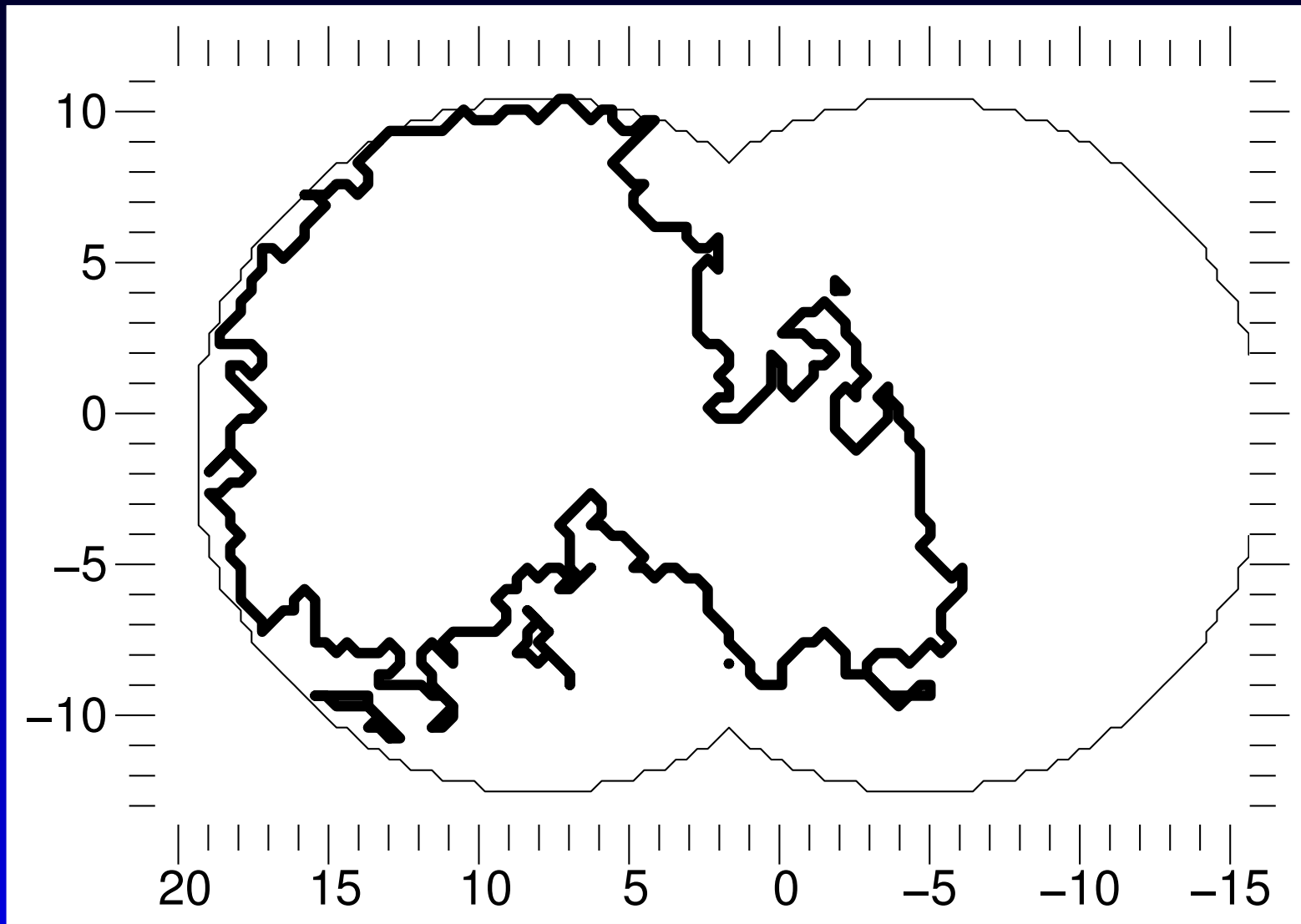
Spectres de quatre pixels alignés adjacents

Analyse des gradients de vitesse ⇒ structures

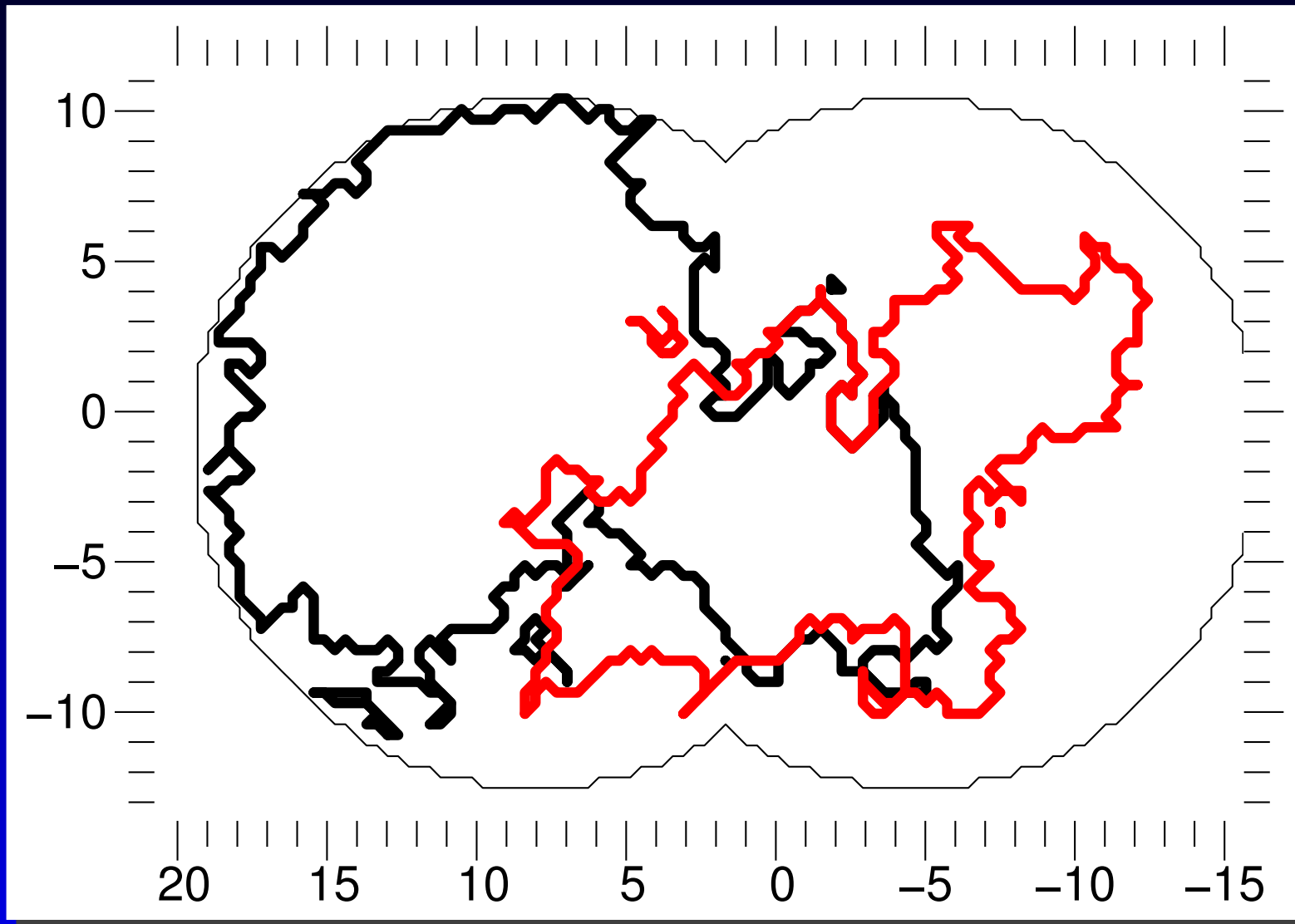


Ex : carte de vitesses radiales du Bras Nord

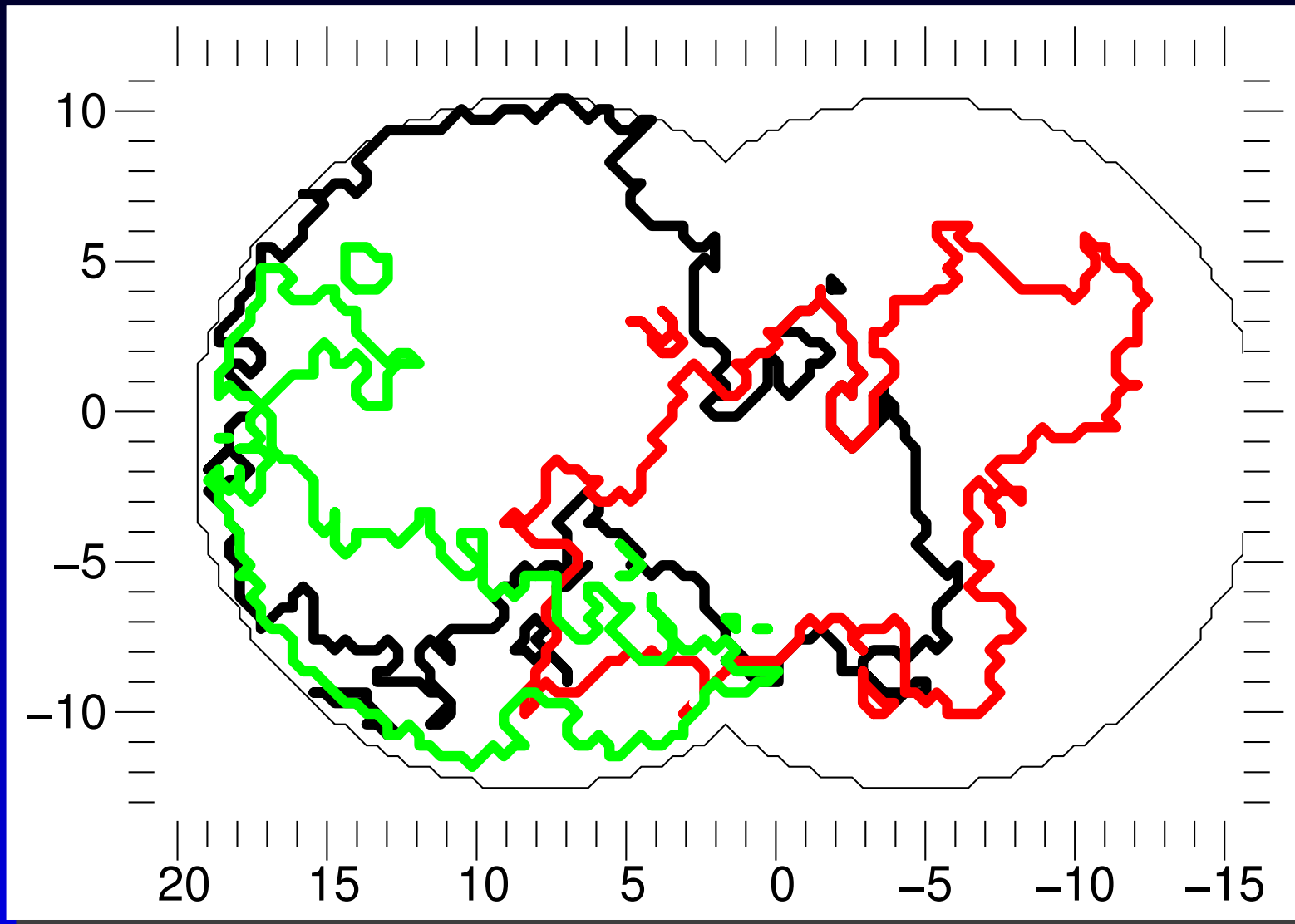
Les 9 structures interstellaires



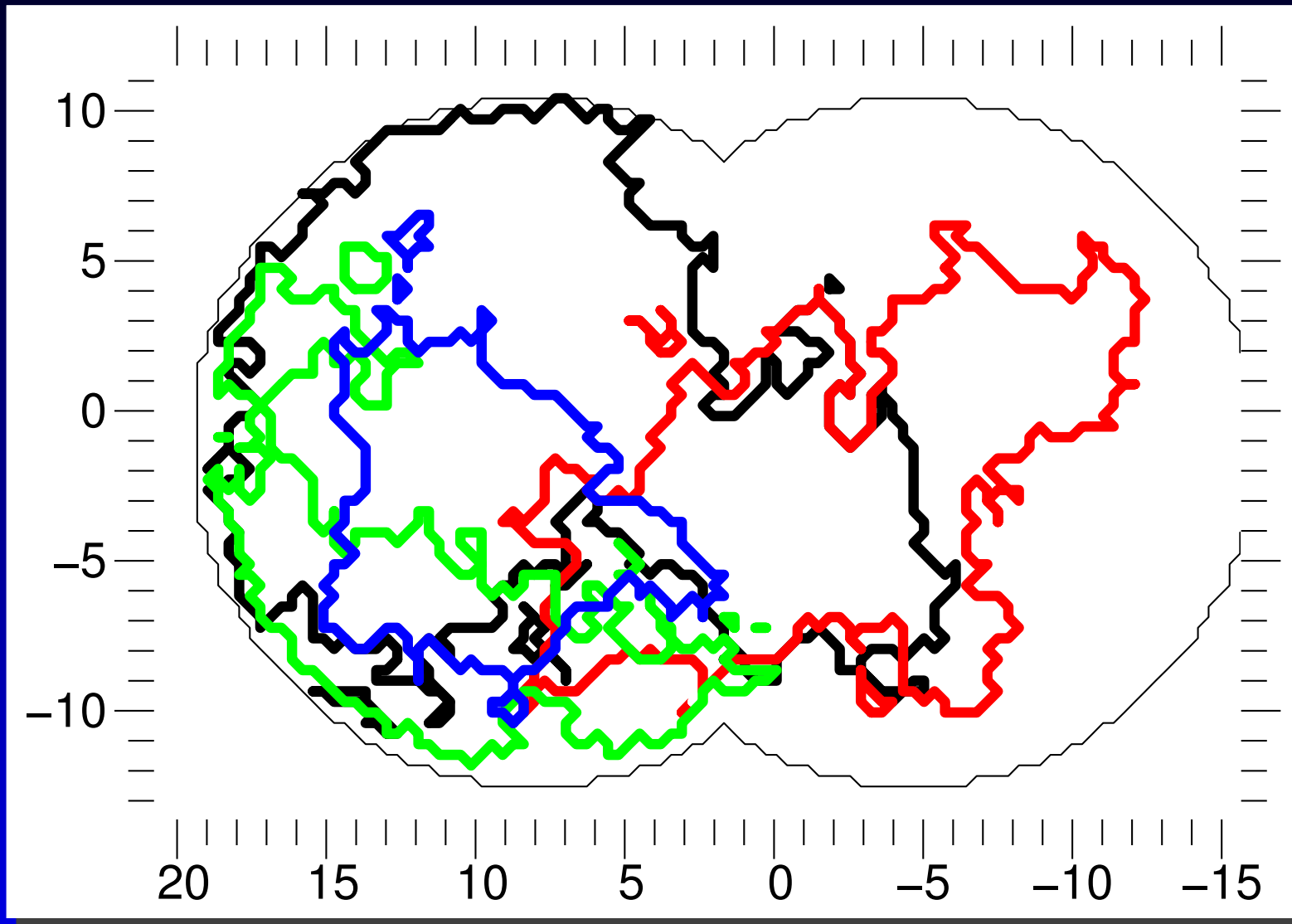
Les 9 structures interstellaires



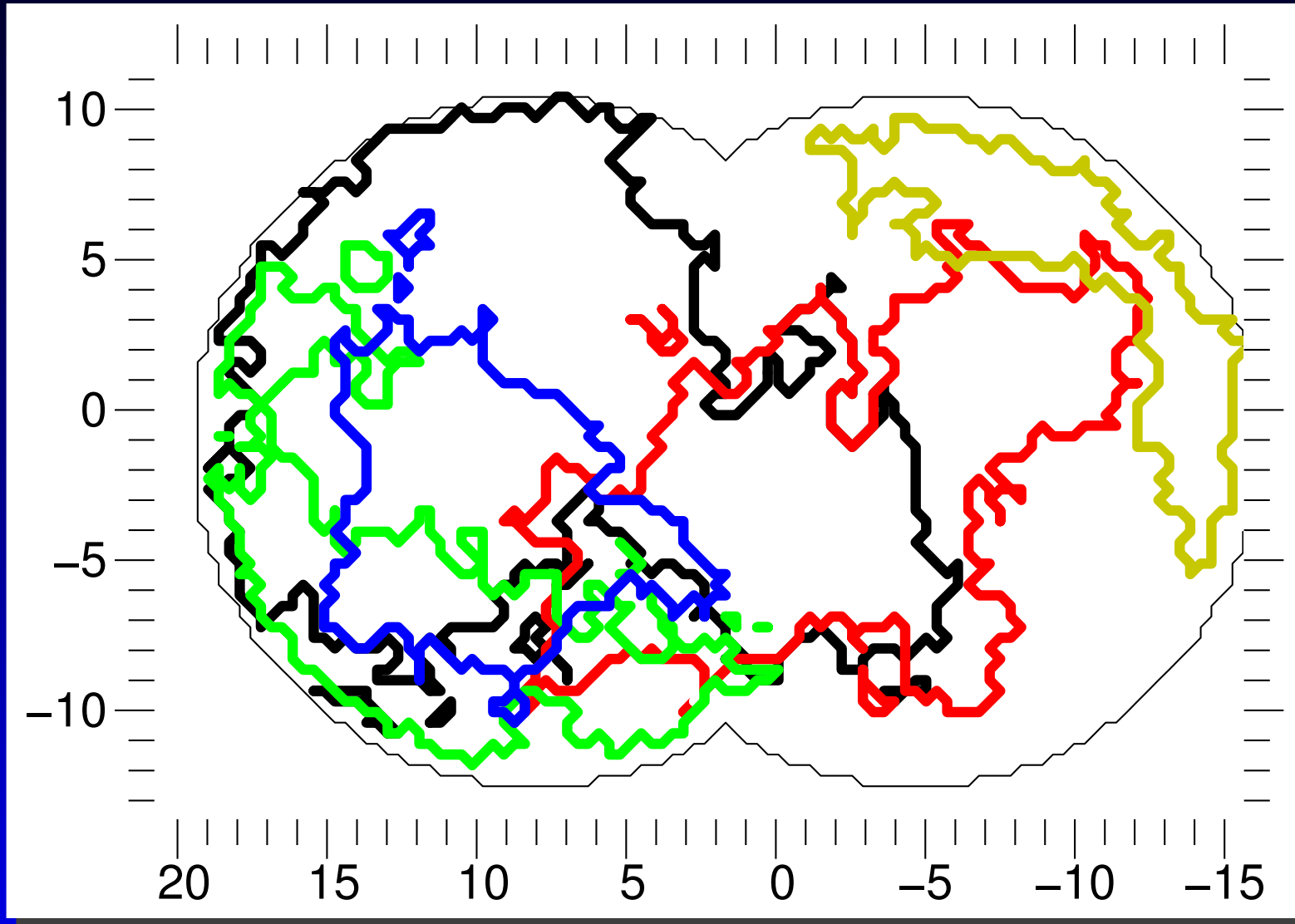
Les 9 structures interstellaires



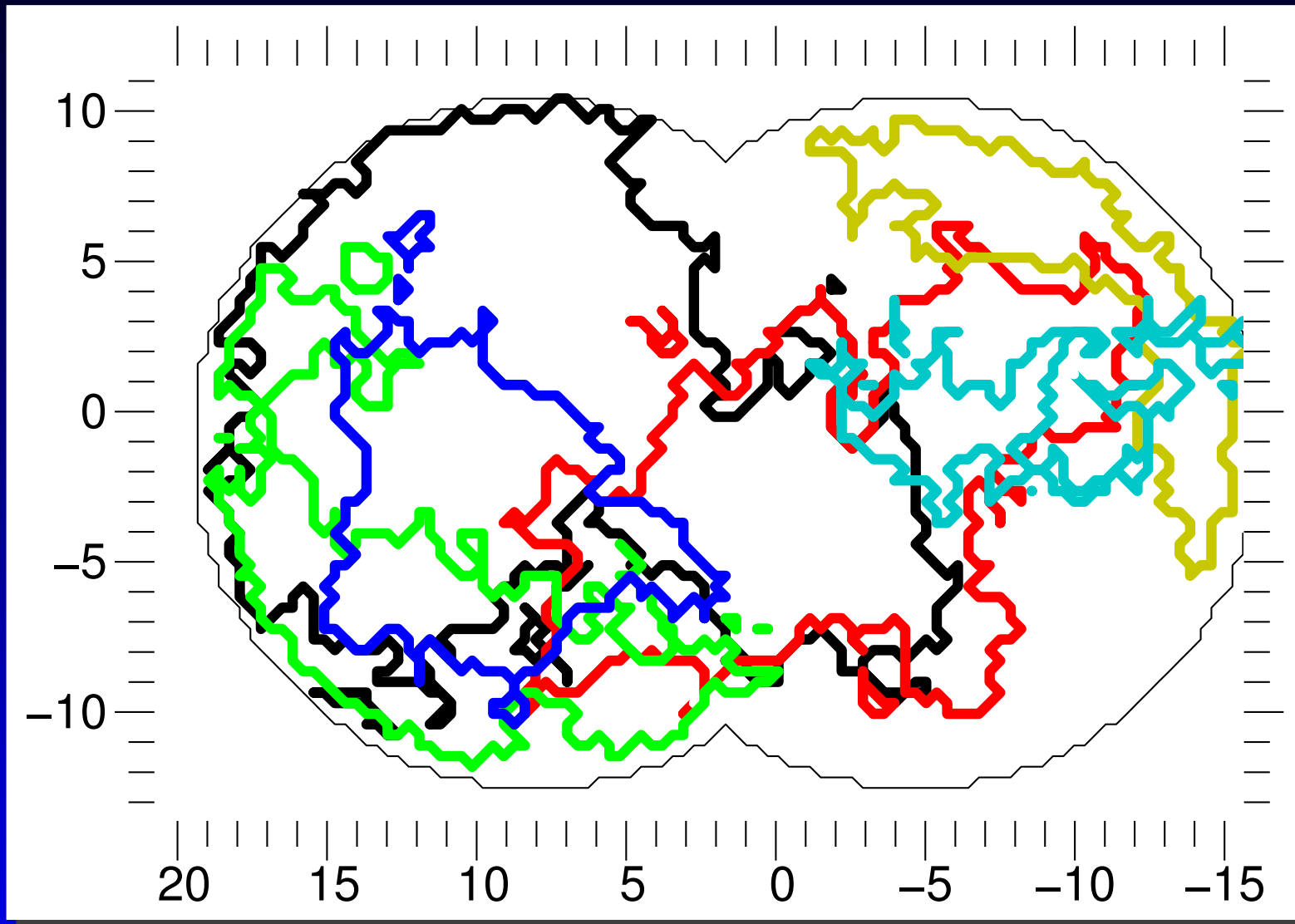
Les 9 structures interstellaires



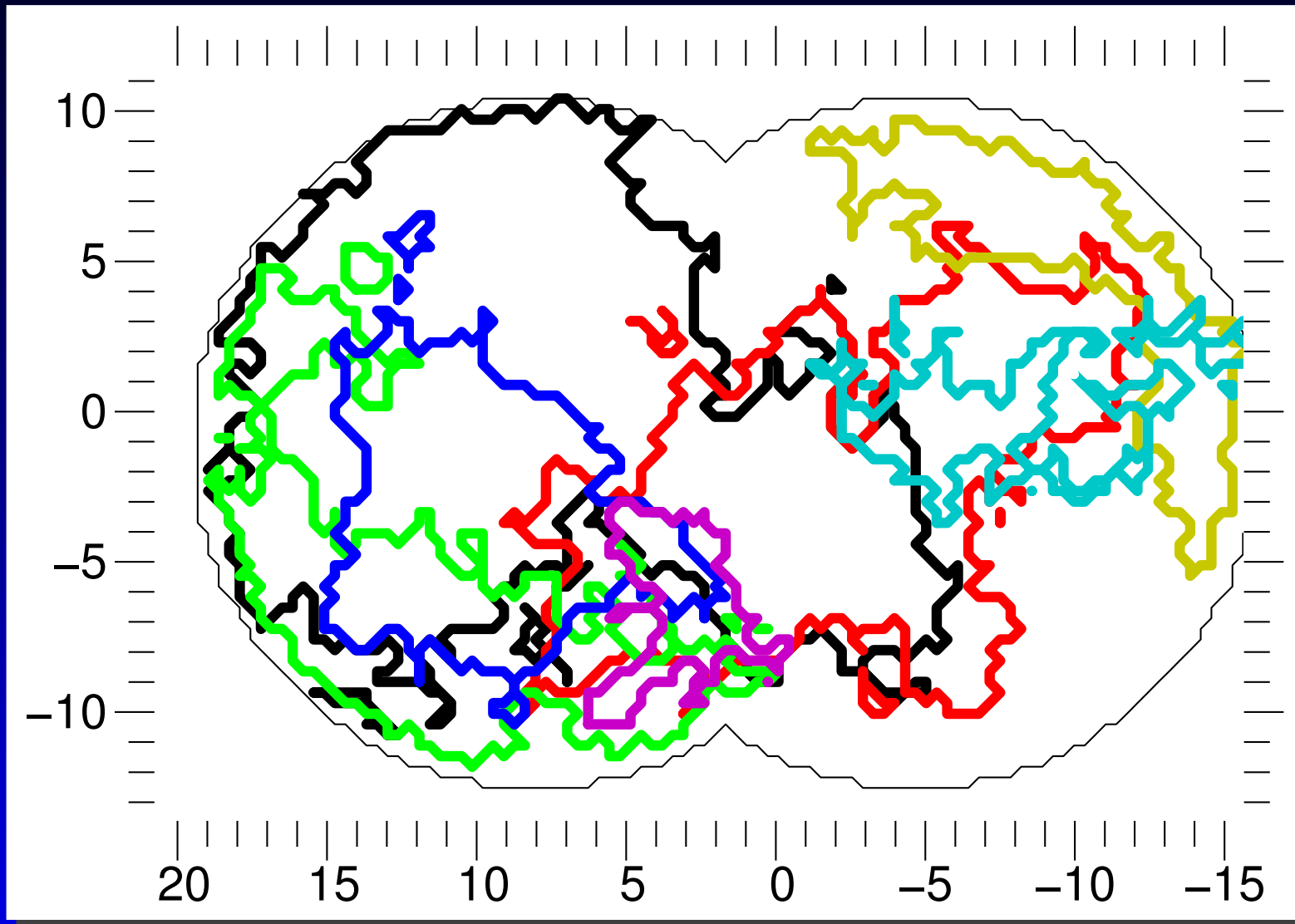
Les 9 structures interstellaires



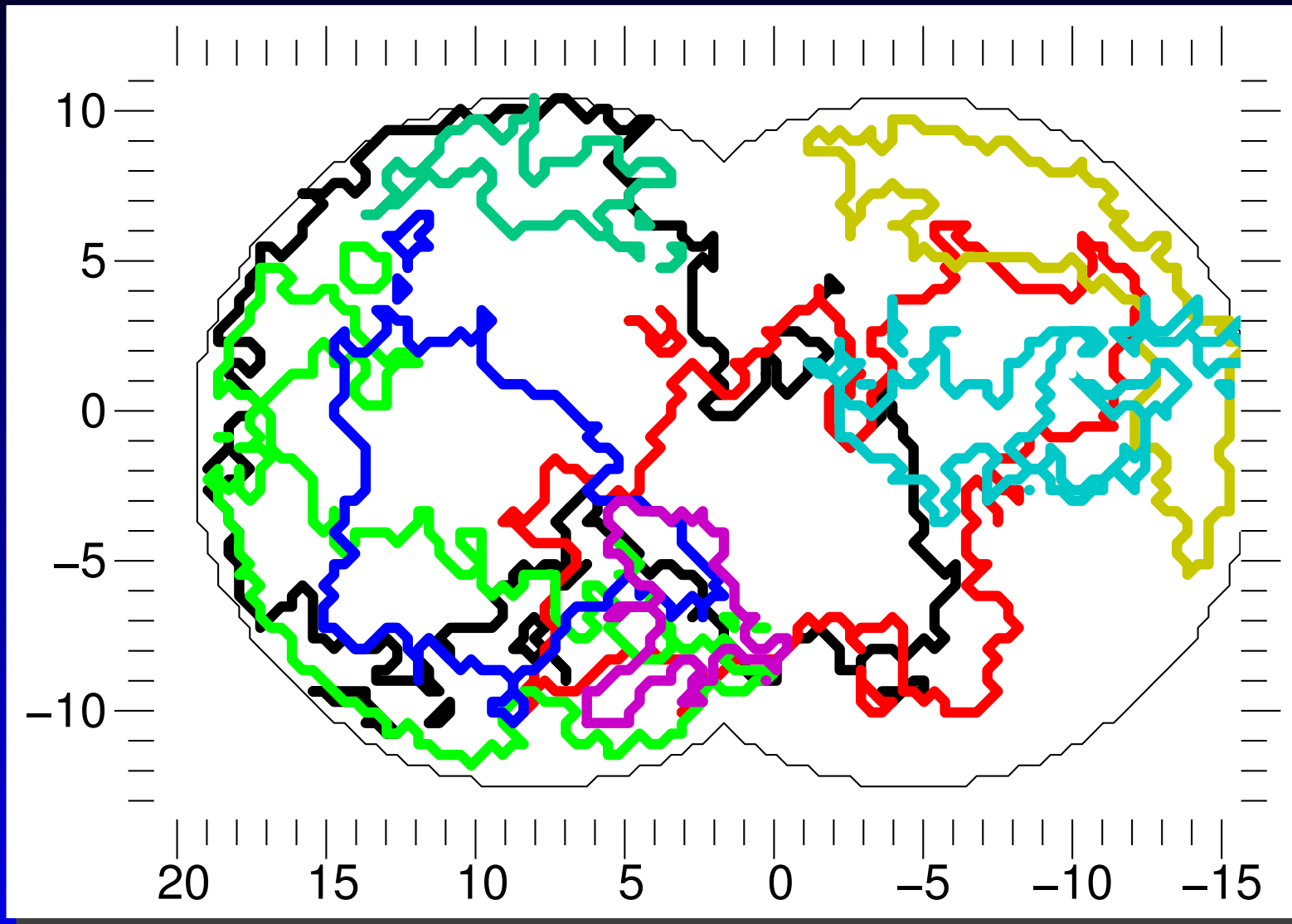
Les 9 structures interstellaires



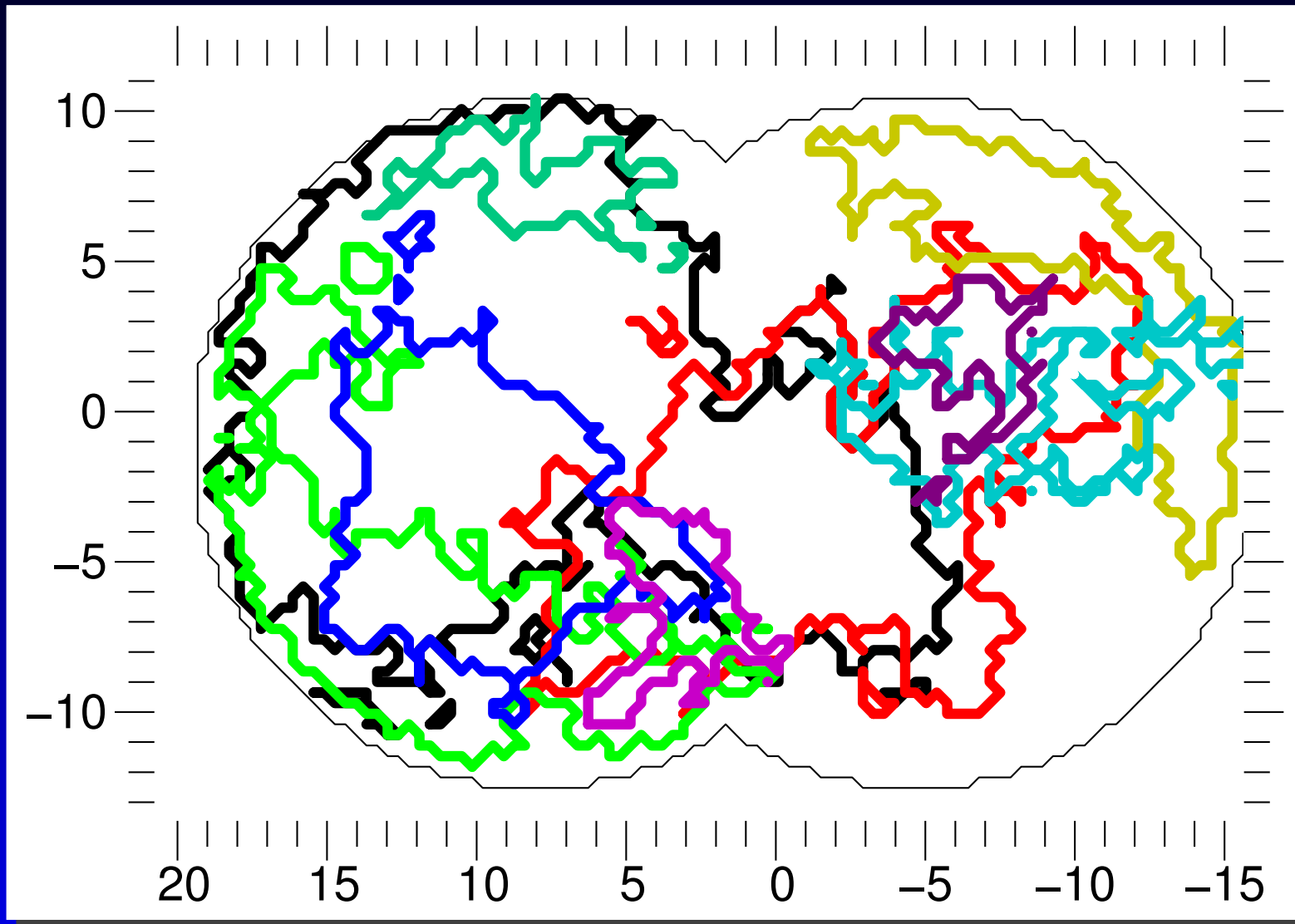
Les 9 structures interstellaires



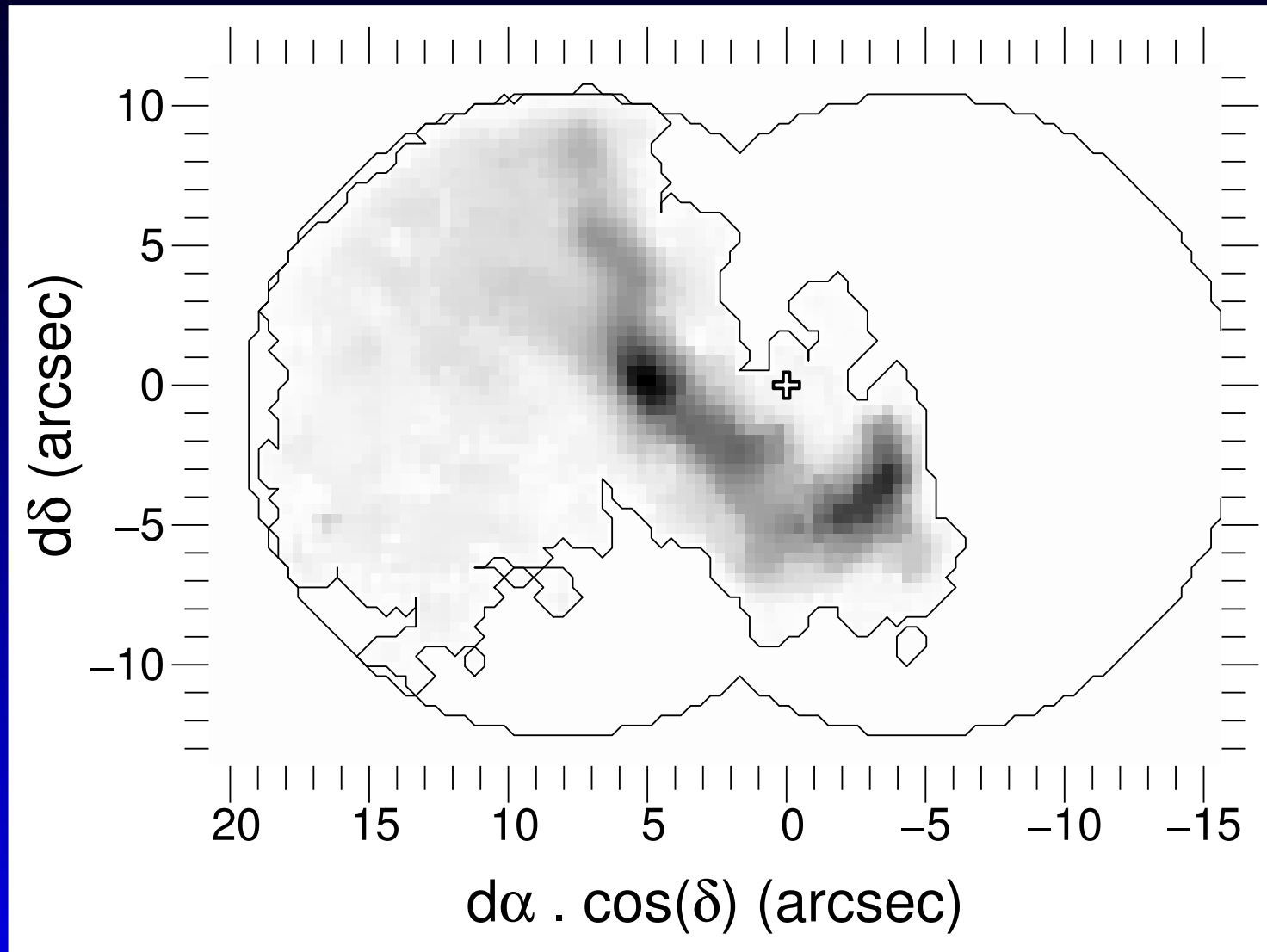
Les 9 structures interstellaires



Les 9 structures interstellaires

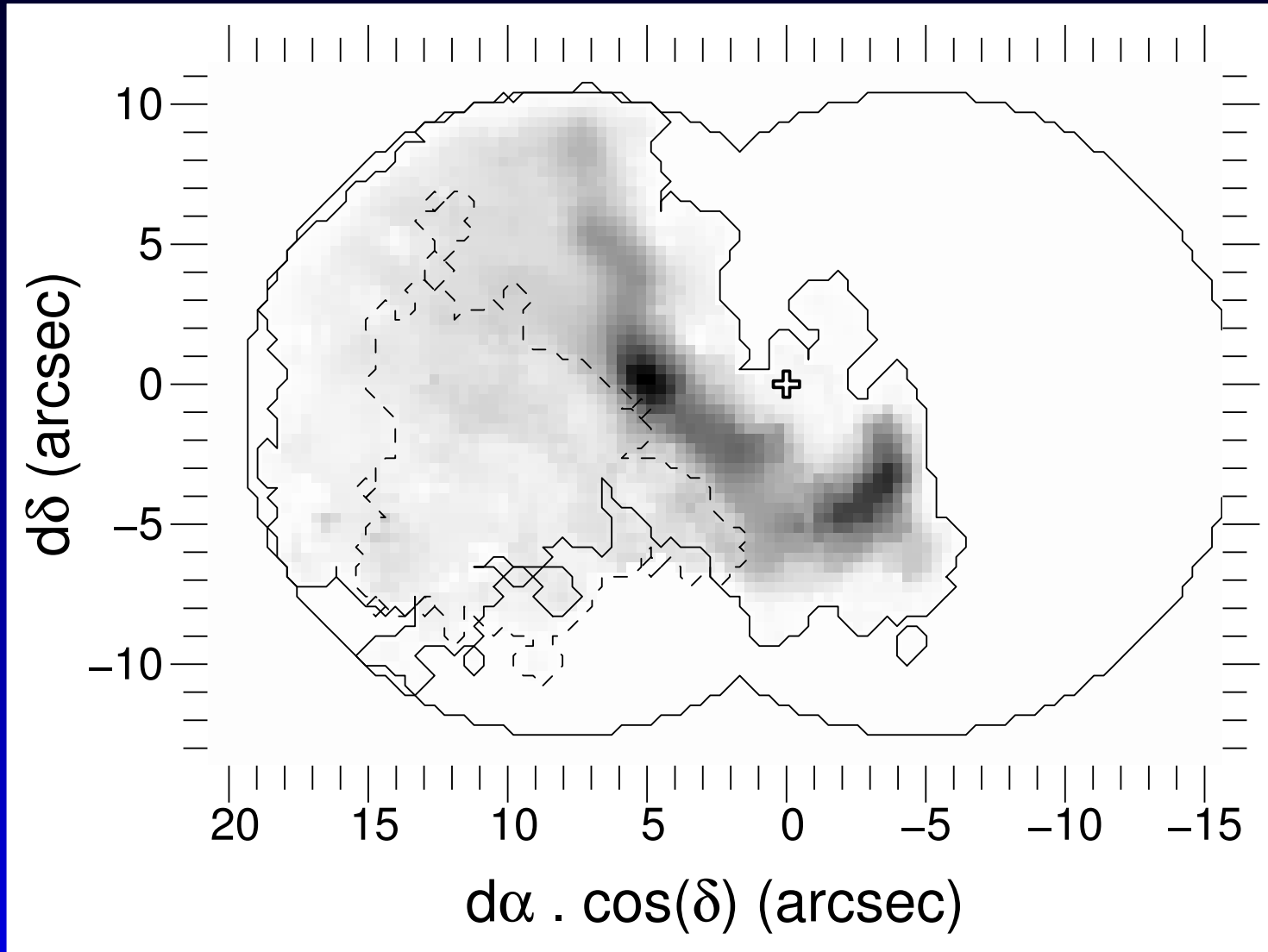


Cartes de flux de la raie



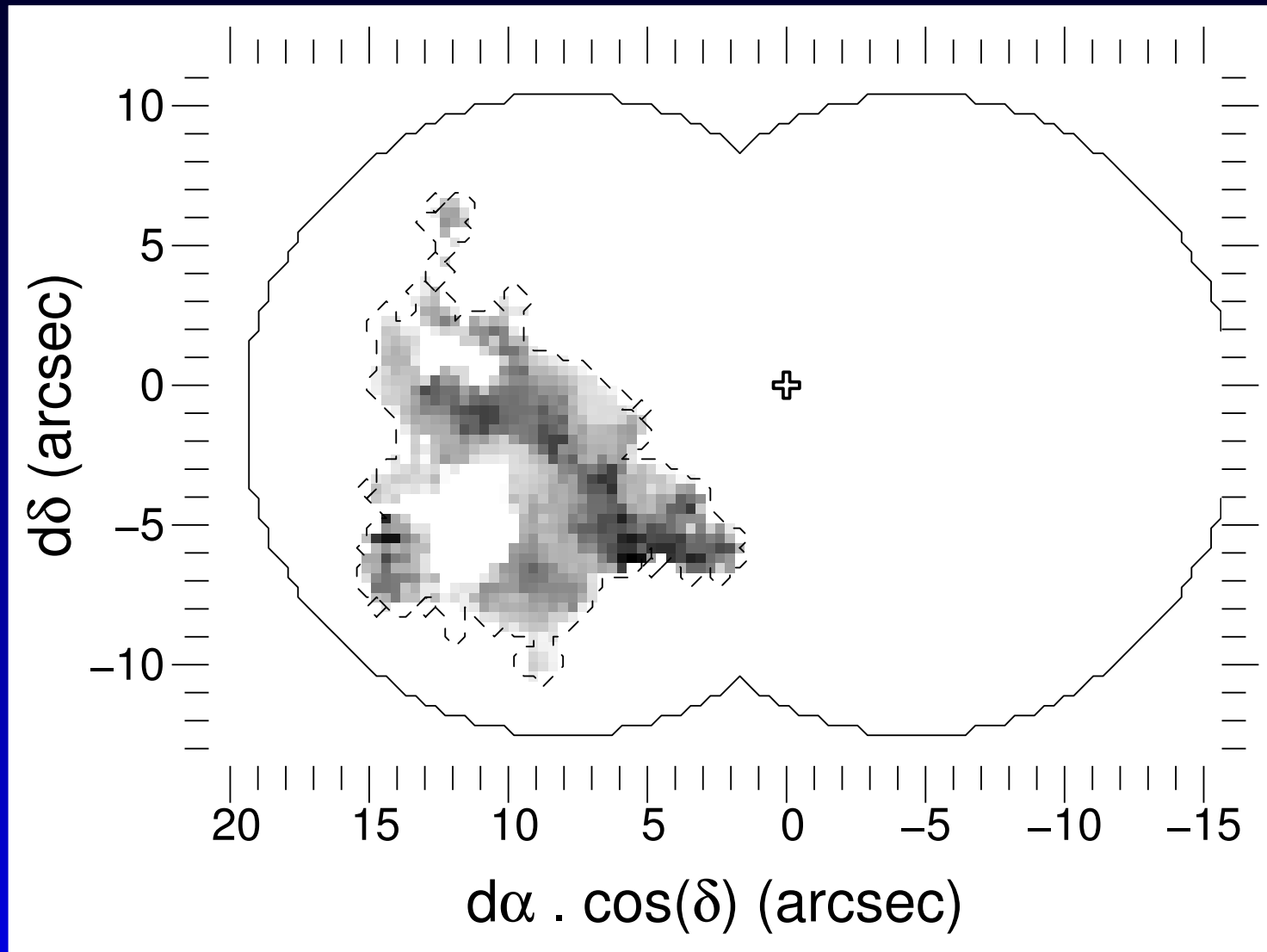
Discontinuité sur le Bras Nord...

Cartes de flux de la raie



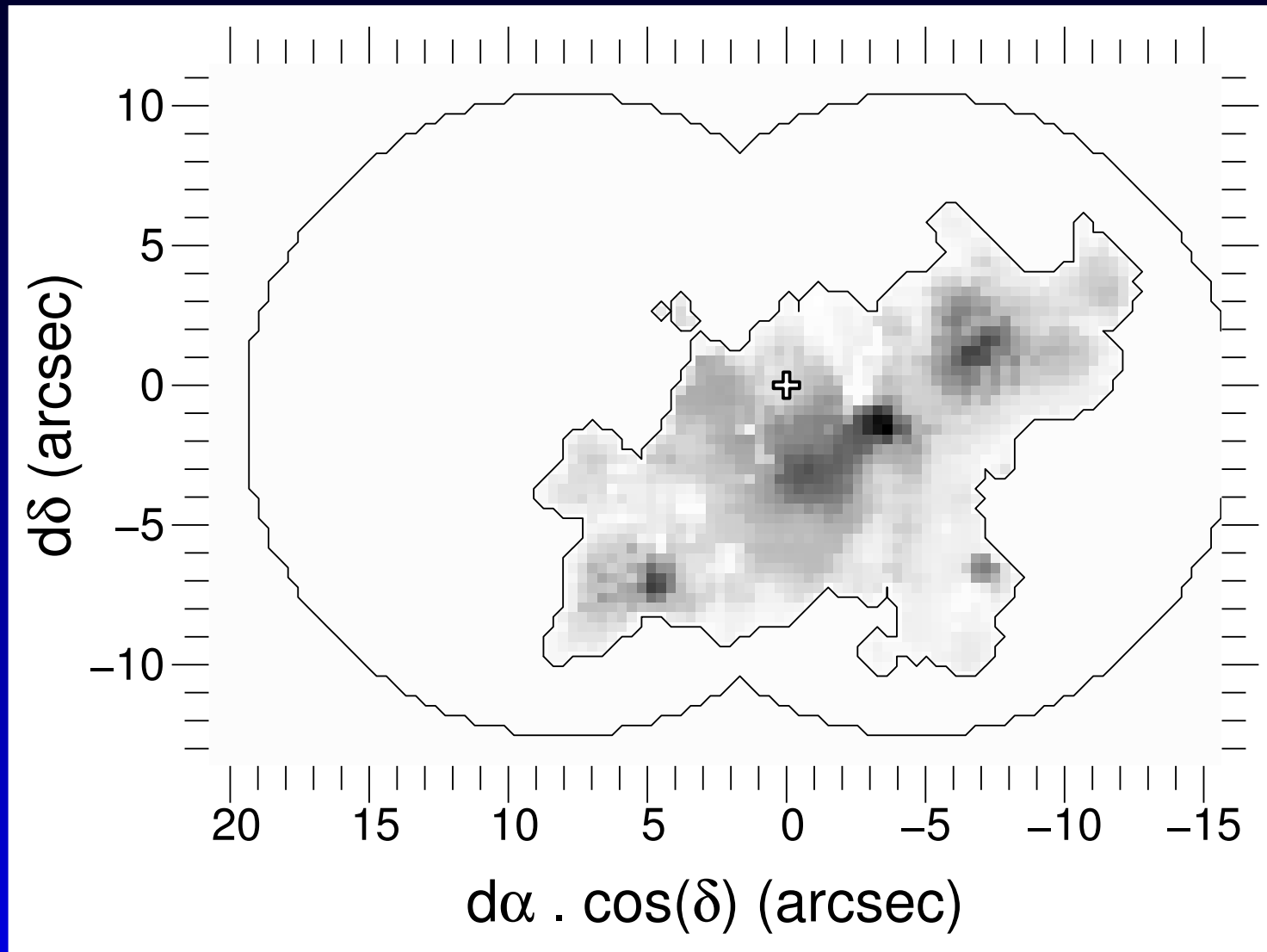
...coïncide avec le bord d'une autre structure...

Cartes de flux de la raie



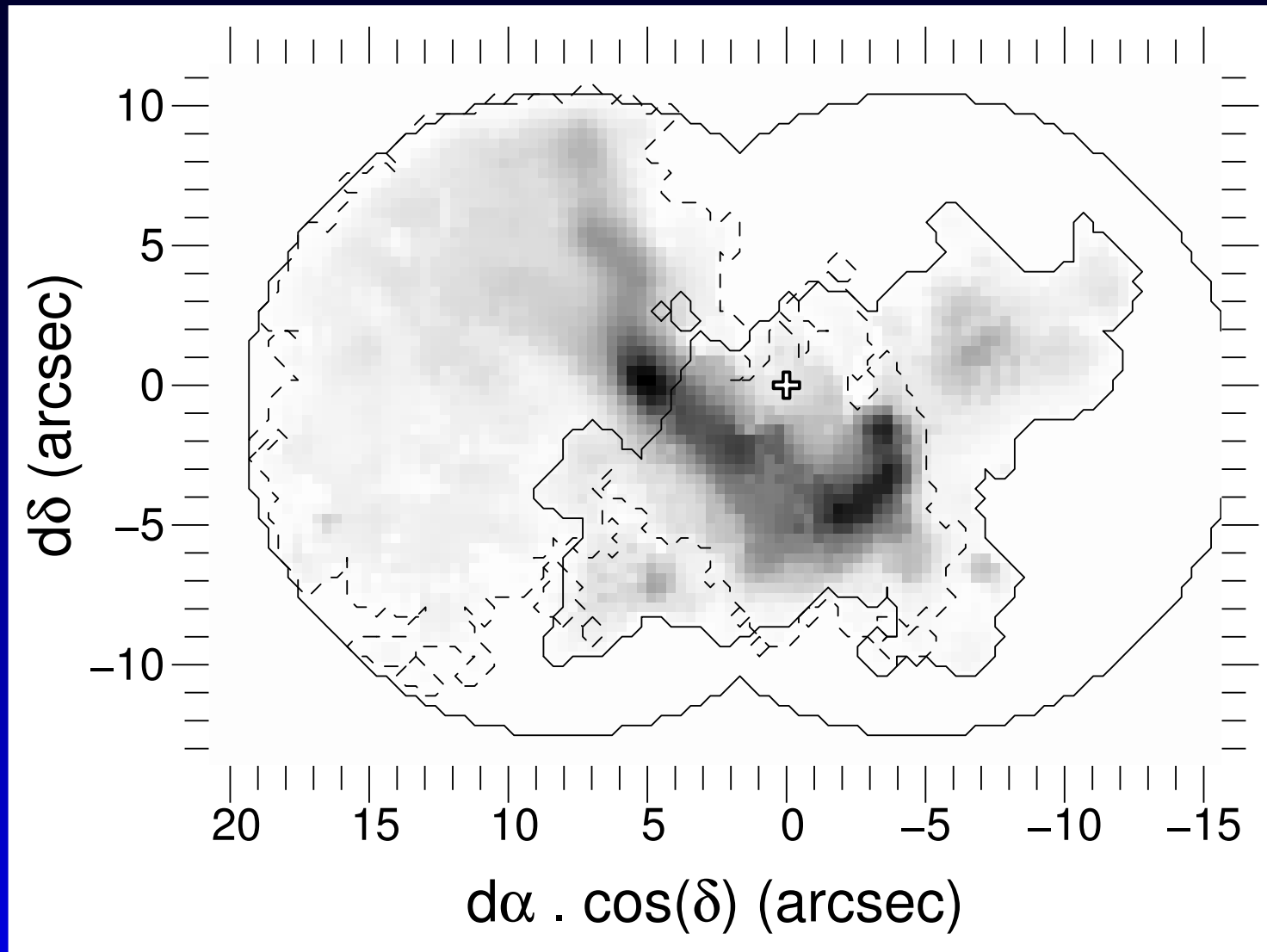
⇒ absorption : le Pont Est est devant le Bras Nord

Deuxième exemple



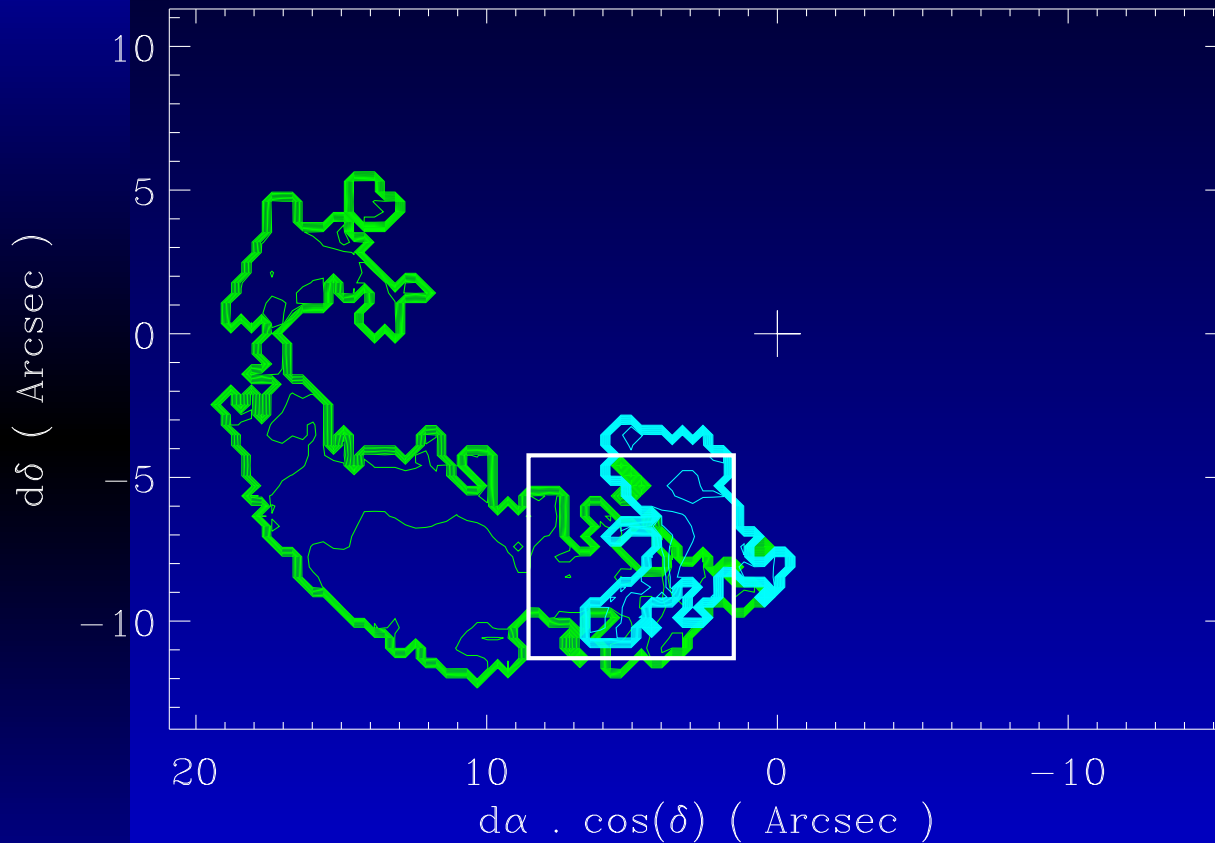
Discontinuité sur la Barre...

Deuxième exemple

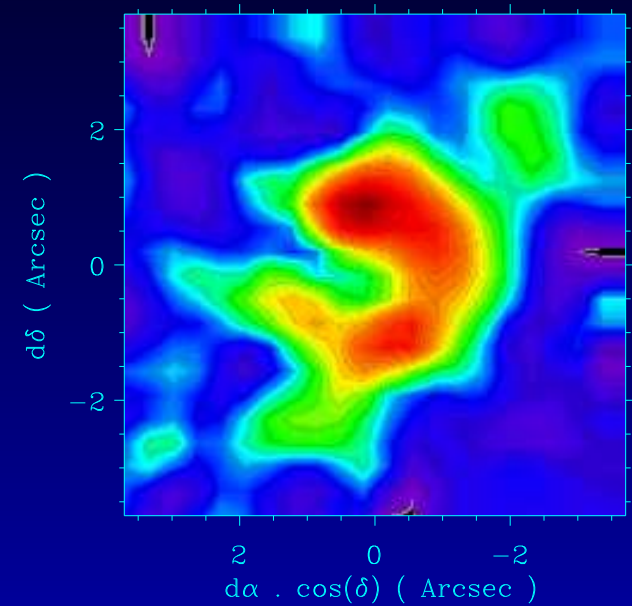


...coïncide avec la Minicavité dans le Bras Nord

Le coude du Bras Est



2 composantes en vitesse distinctes
cartes de vitesse du Ruban et de son Extrêmité



μ -cavité

image en bande étroite
en $\text{Br}\gamma$, avec un décalage
vers le rouge de
 230 km s^{-1}

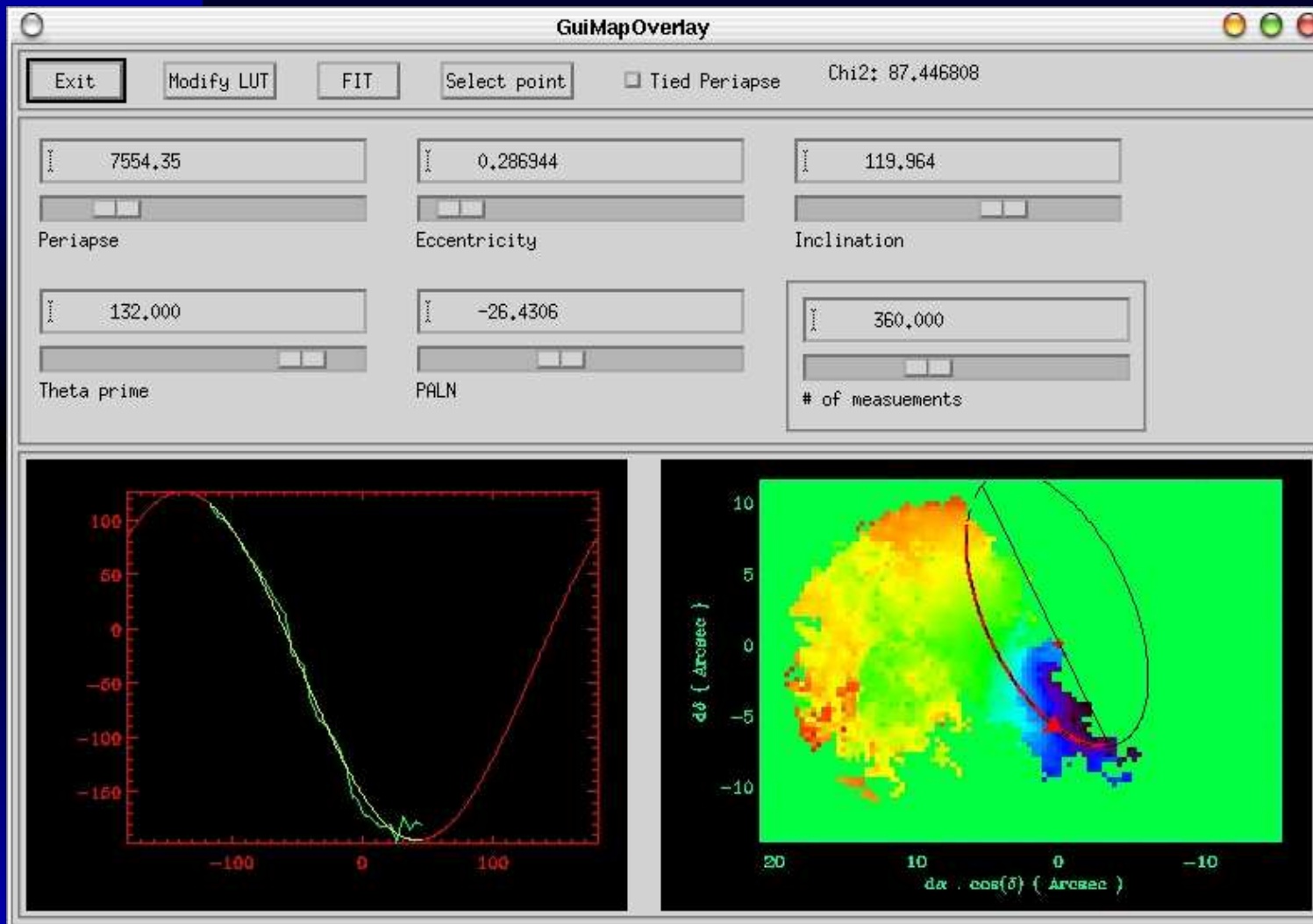
Conclusion sur les structures

ID	Nom de la structure	S (pixels)	S(arcsec ²)	Vmin	Vmax	$\left\langle \frac{[\text{He I}]}{[\text{Br}\gamma]} \right\rangle^a$
a	Bras Nord	2414	301	-287	189	0,74 ^a
	dont Minicavité					0,85
b	Barre	1389	173	-211	197	0,99
c	Ruban	833	104	133	243	0,78
d	Pont Est	670	84	35	183	1,09
e	Arc Ouest	471	59	-37	75	0,52
f	Pont Ouest	327	41	-121	101	1,73
g	Extrémité	207	26	223	339	2,64
h	<i>Northern Arm Chunk</i>	185	23	15	75	–
i	<i>Bar Overlay</i>	136	17	-267	-7	1,81

^a normalisé

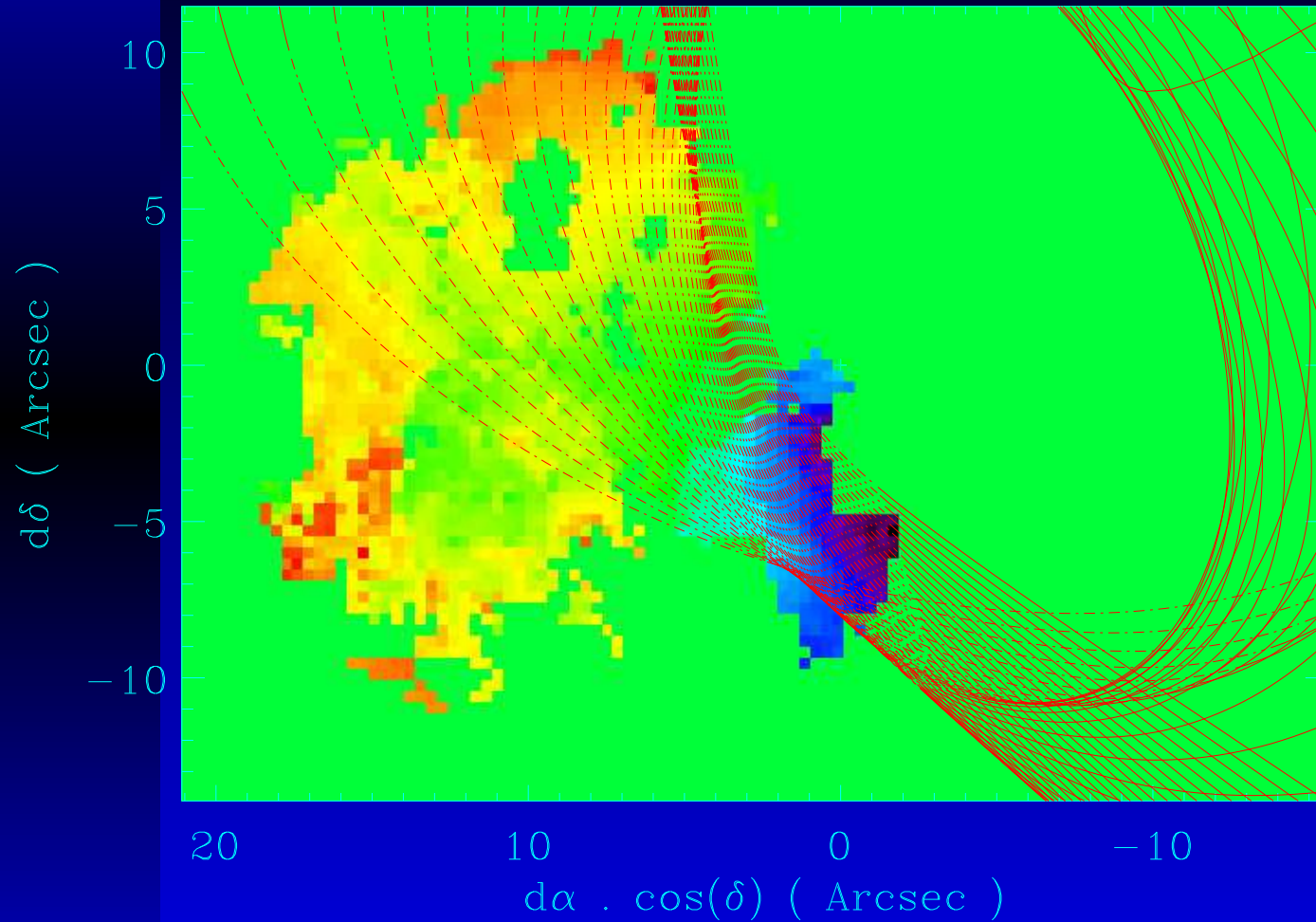
^b sauf Minicavité

Ajuster une orbite keplérienne sur une carte de vitesses

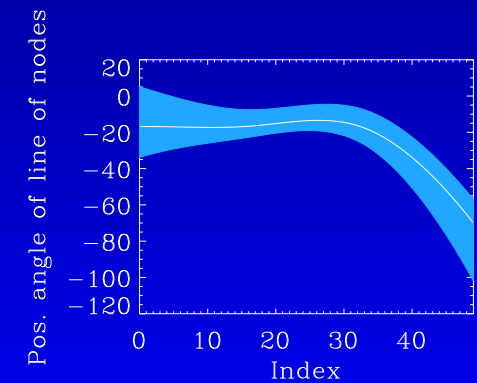
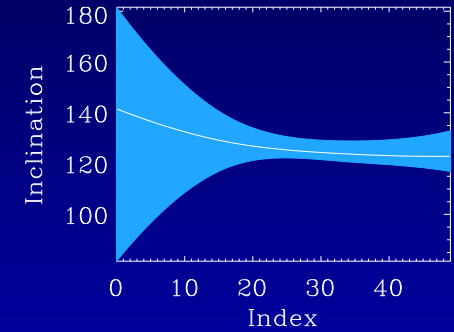
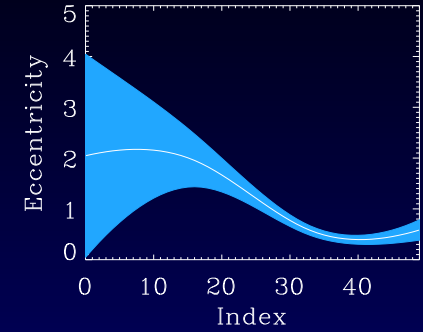


Masse, distance et position de l'objet central sont fixés ($M_0 = 3$ à $4 \times 10^6 M_\odot$, $d_0 = 8$ kpc)

Faisceau d'orbites ajusté sur le Bras Nord



Periapse : $\simeq 0.1 \rightarrow 0.5$ pc



Comparaison avec la carte d'intensité

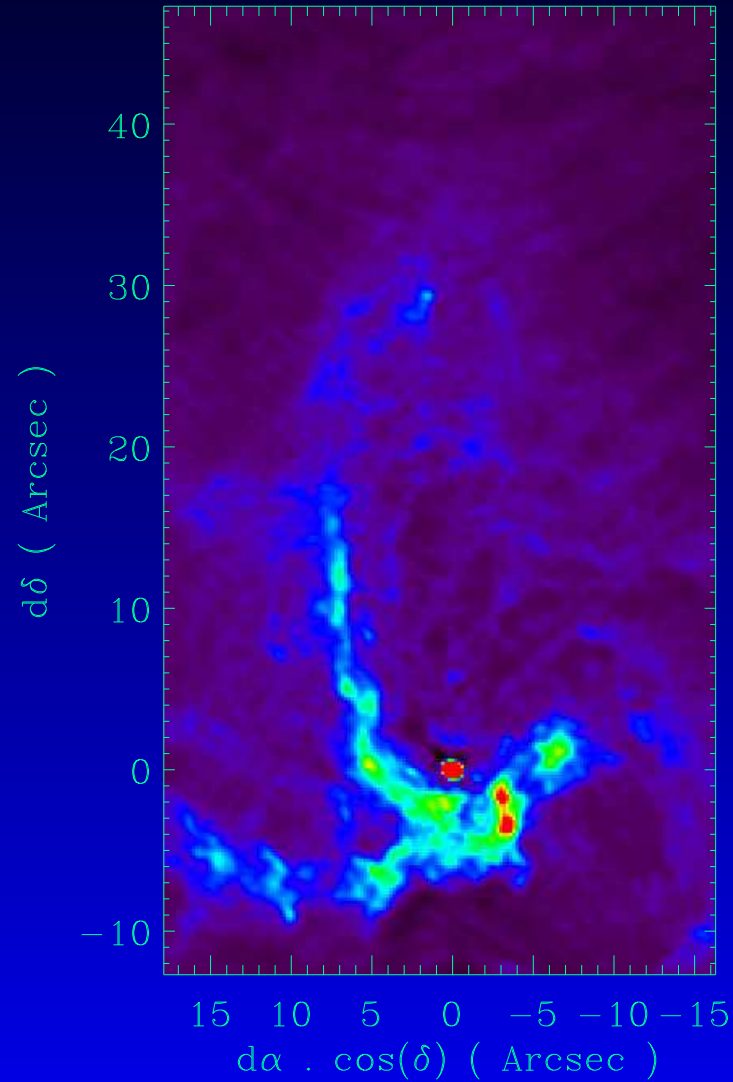


Image : Roberts &
Goss 1993, VLA,
 $H92\alpha$

Comparaison avec la carte d'intensité

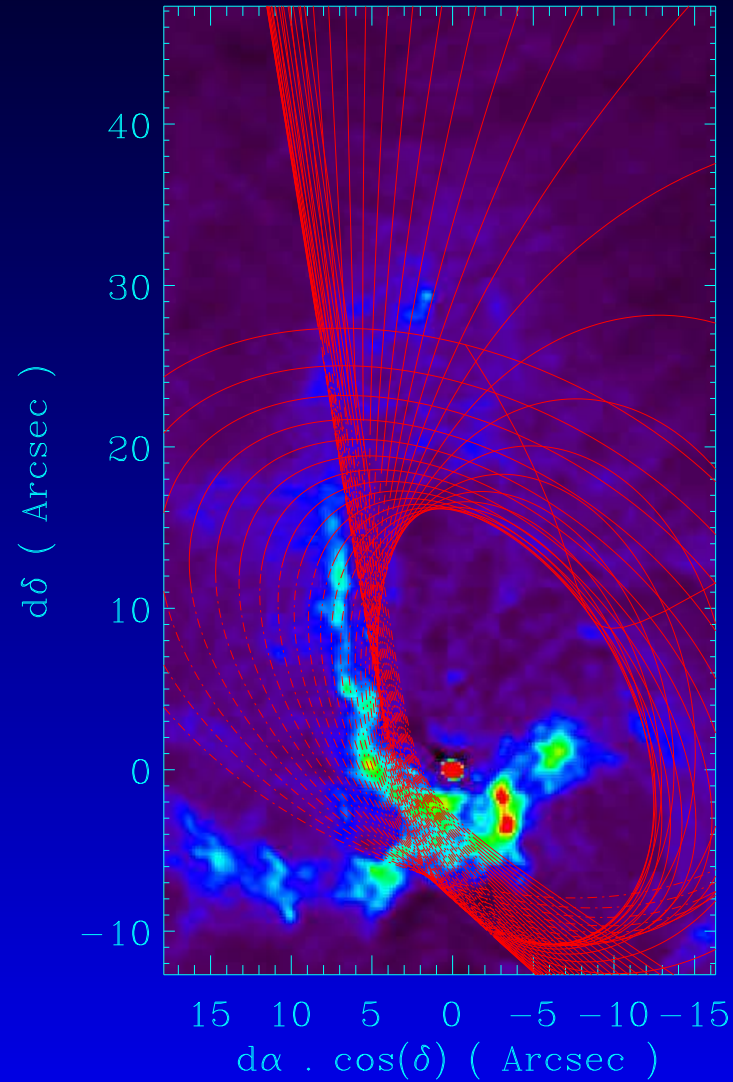


Image : Roberts &
Goss 1993, VLA,
 $H92\alpha$

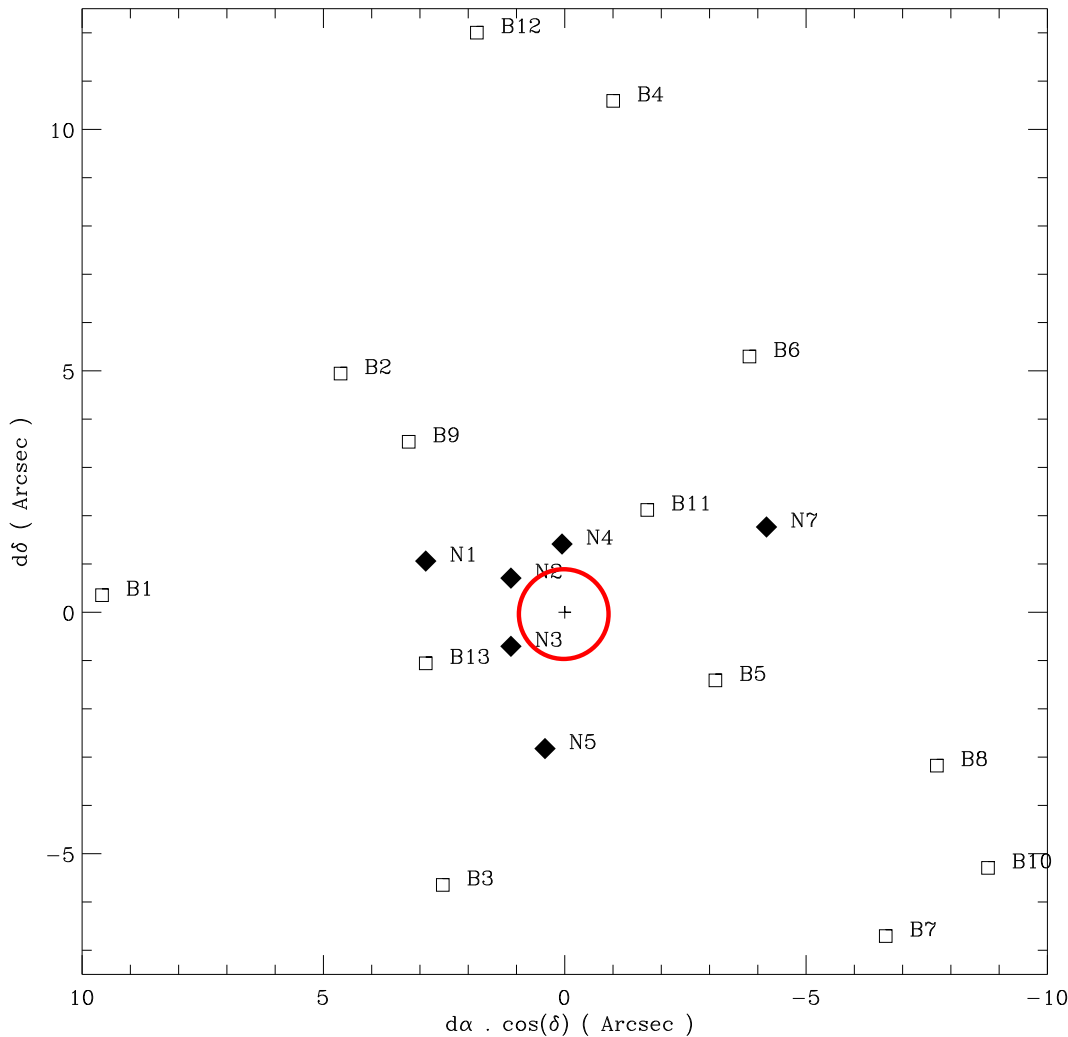
Conclusion sur la cinématique du Bras Nord

- Les gradients d'intensité sont partiellement expliqués par ce modèle.
- Les périodes vont de $\simeq 10^4$ à $\simeq 10^5$ ans.
- Si la structure devait former un objet permanent, elle formerait un tore complet en quelques 10^4 ans.
- Le Bras Nord n'est pas une structure plane.

(Cf. Paumard *et al.* 2003, A&A, soumis, les actes de la conf. GC2002, sous presse, la Une du web de l'IAP de septembre)

V- Conclusions

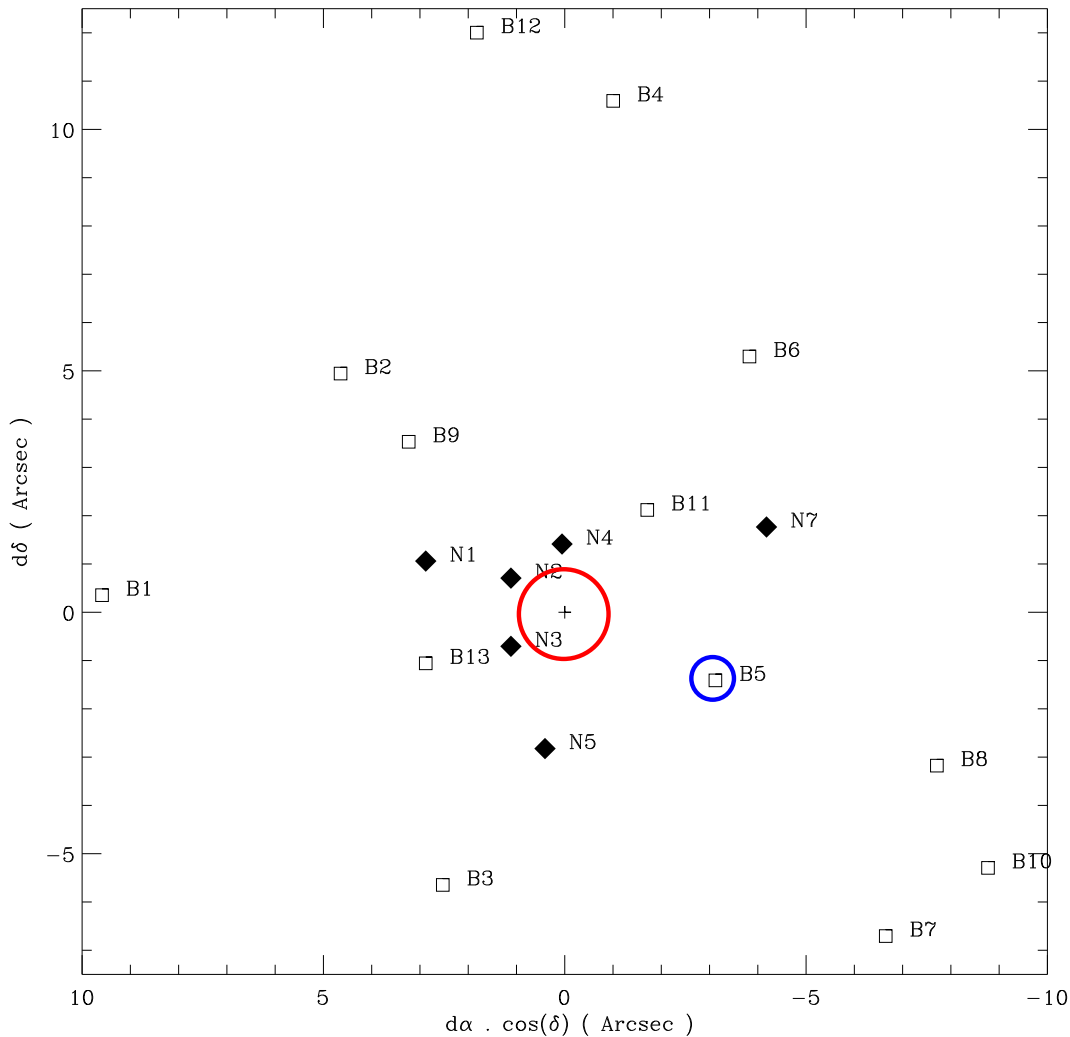
Population d'étoiles massives



Concentration exceptionnelle d'étoiles très massives, avec une ségrégation spatiale remarquable :

- $O \lesssim 0,05$ pc
- $LBV \lesssim 0,2$ pc
- $WR \lesssim 0,5$ pc

Population d'étoiles massives



IRS 13E :

- un amas compact de ces types d'étoiles à $\simeq 3''$ de Sgr A* ;
- source X discrète.

Scénario de formation des étoiles massives

Formation *in situ* ou à distance ?

Scénario de formation des étoiles massives

Formation *in situ* ou à distance ?

Formation *in situ* rendue difficile par effets de marée.

- Densité nécessaire à la cohésion d'un nuage :

$$10^7 \text{ cm}^{-3} (1,6 \text{ pc}/R_G)^{1,8}$$

(R_G : rayon galactocentrique ; Morris 1993).

- Densité observée des nuages de la région :

$$< 3 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

(Genzel 1989, Güsten 1989).

Scénario de formation des étoiles massives

Formation ~~*in situ*~~ ou à distance ?

Besoin d'hypothèses *ad hoc* peu privilégiées (chocs de nuages moléculaires, coalescence d'étoiles).

Scénario de formation des étoiles massives

Formation ~~*in situ*~~ ou à distance ?

Simulations \Rightarrow un amas d'étoiles massives peut migrer jusqu'au parsec central en $\lesssim 10^7$ ans si :

- formé à $\lesssim 20$ pc ;
- masse initiale $\simeq 10^5 M_{\odot}$.

Au cours de cette migration :

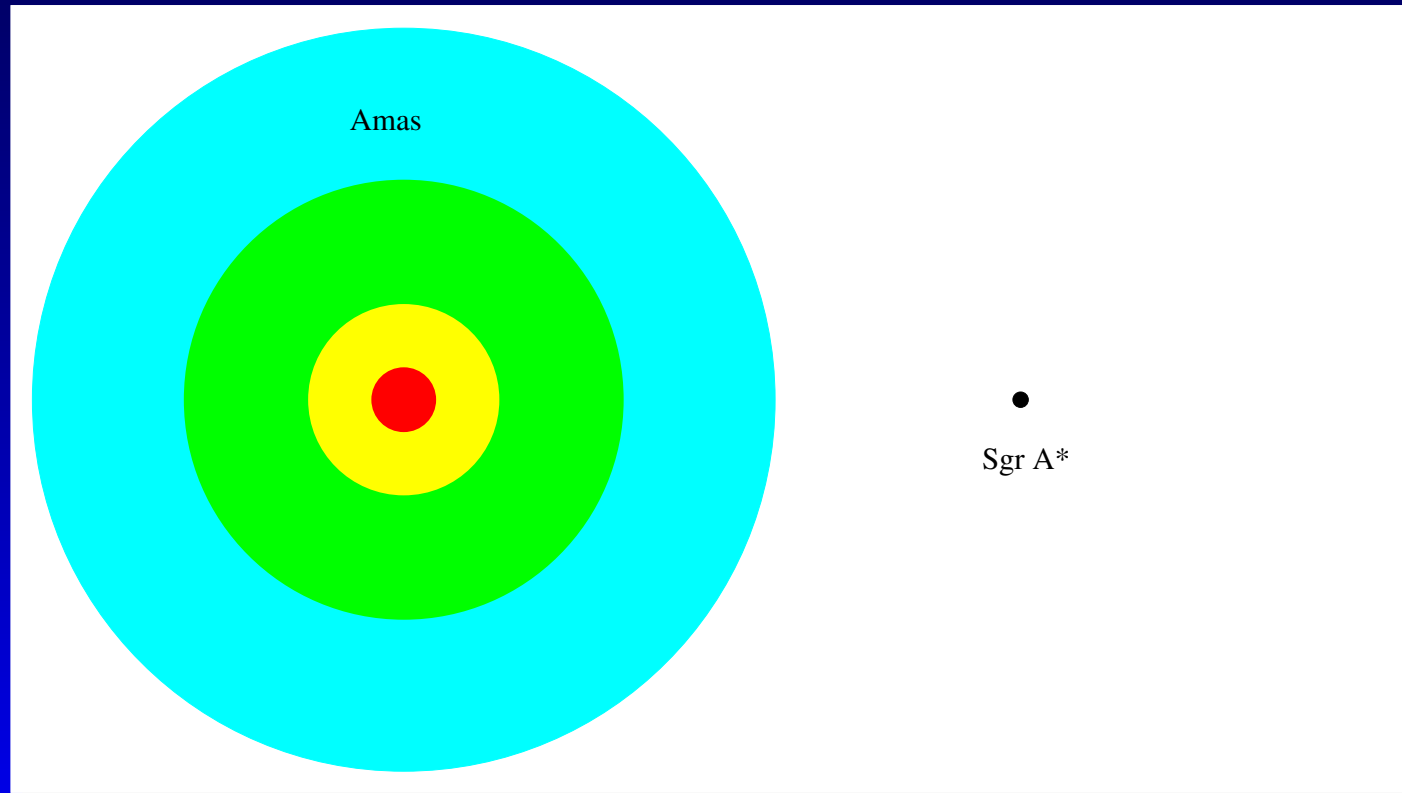
- ségrégation
 - \Rightarrow étoiles les plus massives au centre de l'amas ;
- effondrement du cœur
 - \Rightarrow trou noir de masse intermédiaire.

(McMillan & Portegies Zwart 2003)

Scénario de formation des étoiles massives

Formation ~~*in situ*~~ ou à distance?

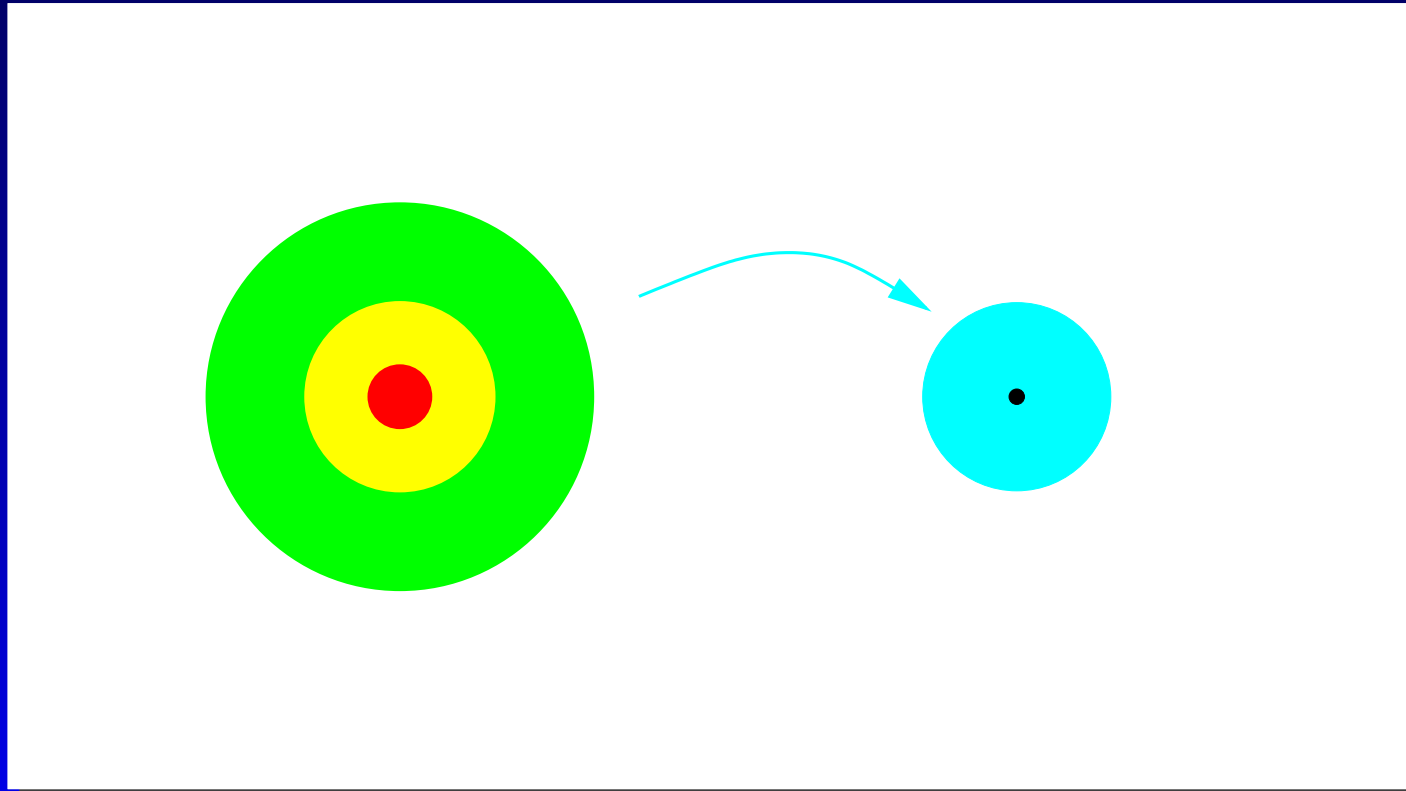
- Épluchage par effets de marée pourrait expliquer ségrégation ;



Scénario de formation des étoiles massives

Formation ~~*in situ*~~ ou à distance?

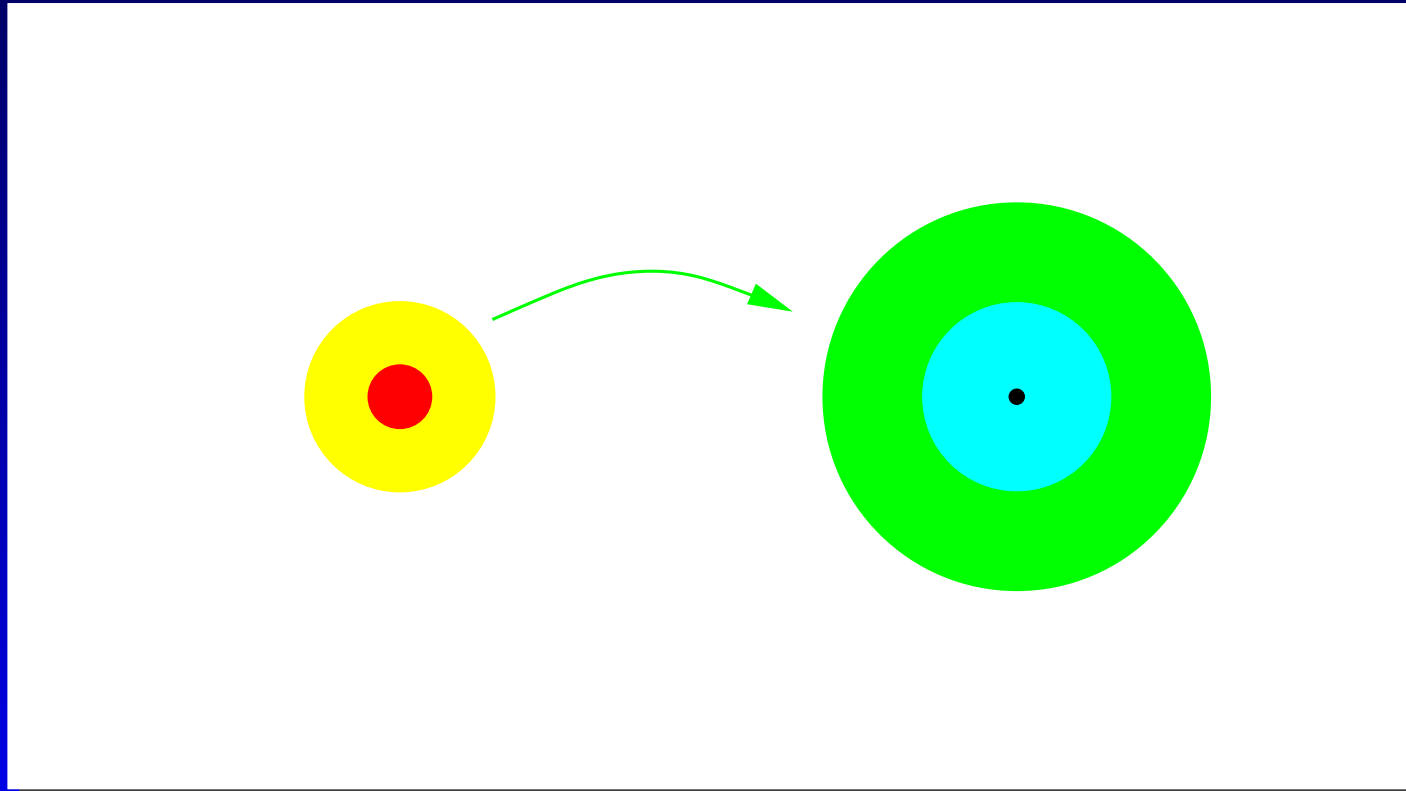
- Épluchage par effets de marée pourrait expliquer ségrégation ;



Scénario de formation des étoiles massives

Formation ~~*in situ*~~ ou à distance?

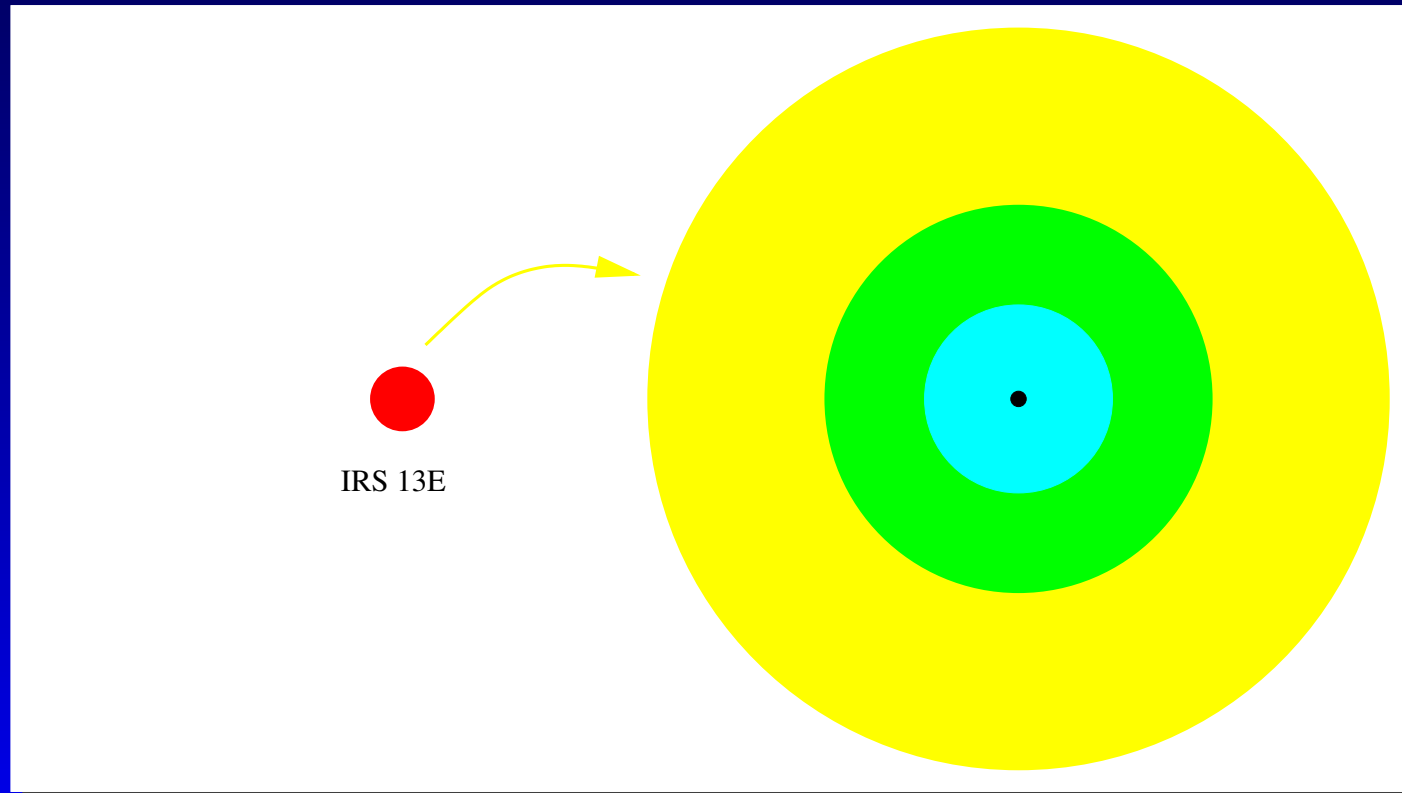
- Épluchage par effets de marée pourrait expliquer ségrégation ;



Scénario de formation des étoiles massives

Formation ~~*in situ*~~ ou à distance?

- Épluchage par effets de marée pourrait expliquer ségrégation ;



Scénario de formation des étoiles massives

Formation ~~*in situ*~~ ou à distance?

- Épluchage par effets de marée pourrait expliquer ségrégation ;
- son cœur pourrait demeurer : IRS 13E.
 - Ce cœur, source de l'émission X discrète ?
Comparable à la source A1 au centre de l'amas des Arches (Yusef-Zadeh *et al.* 2002)

Scénario de formation des étoiles massives

Formation ~~*in situ*~~ ou à distance?

- Épluchage par effets de marée pourrait expliquer ségrégation ;
- son cœur pourrait demeurer : IRS 13E.

Accord qualitatif et quantitatif avec les modèles (Gerhardt 2001, Kim & Morris 2002, McMillan & Portegies Zwart 2003).

Lien entre population stellaire massive et milieu ionisé

- Concentration d'étoiles chaudes
 - ⇒ intenses sources UV = ionisation du gaz avec fortes variations locales ;

Lien entre population stellaire massive et milieu ionisé

- Concentration d'étoiles chaudes
 - ⇒ intenses sources UV = ionisation du gaz avec fortes variations locales ;
- vents stellaires responsables de cavités (Mini- et micro-)
 - ⇒ perturbations locales de la dynamique du gaz ;

Lien entre population stellaire massive et milieu ionisé

- Concentration d'étoiles chaudes
 - ⇒ intenses sources UV = ionisation du gaz avec fortes variations locales ;
- vents stellaires responsables de cavités (Mini- et micro-)
 - ⇒ perturbations locales de la dynamique du gaz ;
- gaz interstellaire apparemment bien mélangé, pas d'enrichissement local
 - ⇒ les étoiles massives ne sont pas à l'origine de la Minispirale.

Nature et origine de la Minispirale

- Apparence de spirale = effet de projection :
décomposition en structures distinctes ;

Nature et origine de la Minispirale

- Apparence de spirale = effet de projection : décomposition en structures distinctes ;
- Détection de l'absorption de structures par d'autres \Rightarrow poussière contenue dans les structures ;

Nature et origine de la Minispirale

- Apparence de spirale = effet de projection : décomposition en structures distinctes ;
- Détection de l'absorption de structures par d'autres \Rightarrow poussière contenue dans les structures ;
- Bras Nord : surface non plane.

Nature et origine de la Minispirale

- Apparence de spirale = effet de projection : décomposition en structures distinctes ;
 - Détection de l'absorption de structures par d'autres \Rightarrow poussière contenue dans les structures ;
 - Bras Nord : surface non plane.
- \Rightarrow Surfaces ionisées de nuages neutres allongés par effet de marée.

Nature et origine de la Minispirale

- Apparence de spirale = effet de projection : décomposition en structures distinctes ;
 - Détection de l'absorption de structures par d'autres \Rightarrow poussière contenue dans les structures ;
 - Bras Nord : surface non plane.
- \Rightarrow Surfaces ionisées de nuages neutres allongés par effet de marée.
- \Rightarrow Fondamentalement la même nature que le CND : ensemble de nuages neutres \Rightarrow origine commune ou lien de filiation ?

Perspectives

- Étude profonde de la population d'étoiles chaudes
⇒ compléter l'IMF de l'amas jeune ;

Perspectives

- Étude profonde de la population d'étoiles chaudes
⇒ compléter l'IMF de l'amas jeune ;
- Modélisation de l'inversion de ségrégation
⇒ confirmer notre hypothèse ;

Perspectives

- Étude profonde de la population d'étoiles chaudes
⇒ compléter l'IMF de l'amas jeune ;
- Modélisation de l'inversion de ségrégation
⇒ confirmer notre hypothèse ;
- analyse structurelle et cinématique de la Minispirale sur un plus grand champ
⇒ lien avec le CND ;

Perspectives

- Étude profonde de la population d'étoiles chaudes
⇒ compléter l'IMF de l'amas jeune ;
- Modélisation de l'inversion de ségrégation
⇒ confirmer notre hypothèse ;
- analyse structurelle et cinématique de la Minispirale sur un plus grand champ
⇒ lien avec le CND ;
- structure et cinématique du CND (données BEAR en H₂)
⇒ lien avec la Minispirale.

Perspectives

- Étude profonde de la population d'étoiles chaudes
⇒ compléter l'IMF de l'amas jeune ;
- Modélisation de l'inversion de ségrégation
⇒ confirmer notre hypothèse ;
- analyse structurelle et cinématique de la Minispirale sur un plus grand champ
⇒ lien avec le CND ;
- structure et cinématique du CND (données BEAR en H₂)
⇒ lien avec la Minispirale.

Comparaison avec d'autres noyaux de galaxies.

Collaborateurs

- **Jean-Pierre Maillard, IAP**
Directeur de thèse
- **Mark Morris, UCLA**
co-investigateur pour les données BEAR
- **Susan Stolovy, CalTech**
données NICMOS
- **François Rigaut, Gemini North**
données Gemini
- **Yann Clénet, LESIA**
données ESO