



Les secrets des
astres X
poussiéreux

**Ou comment l'infrarouge permet de révéler les
mystères des sources X enfouies...**

Sylvain CHATY
(Université Paris 7 / Service d'Astrophysique)
Fleurance - 18 août 2006

Plan

- 0. Prélude: l'évolution des étoiles
 - Le cimetière des étoiles
- *Digression*: Les observations multi-longueurs d'onde
- I. Découverte d'un nouveau type d'astres
- II. Comment en cerner la nature?

- III. Et après?

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006 2

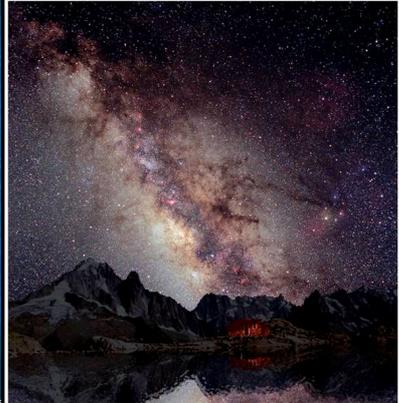
Plan

- 0. Prélude: l'évolution des étoiles
 - Le cimetière des étoiles
- *Digression*: Les observations multi-longueurs d'onde
- I. Découverte d'un nouveau type d'astres
- II. Comment en cerner la nature?

- III. Et après?

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006 3

Un ciel étoilé: la Voie Lactée, notre Galaxie



S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006 4

L'évolution des étoiles

- Les étoiles naissent...
- ...vivent...
- ... puis meurent.

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

5

Nébuleuses



S. Chaty

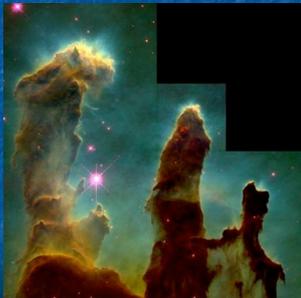
Orion

Carène



0. Prélude: l'évolution des étoiles

- Les étoiles naissent.

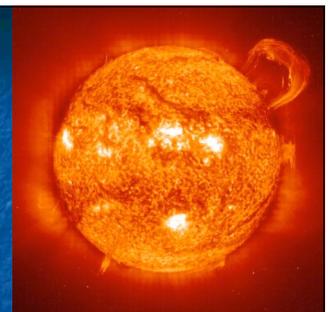


S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

7

L'évolution des étoiles

- Les étoiles vivent.
- Et même le Soleil!
- Combat **permanent**:
 - gravité – fusion nucléaire

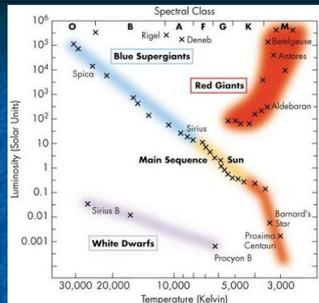


S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

8

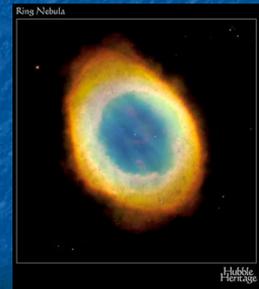
0. Prélude: l'évolution des étoiles

- « Séquence principale »
 - 10 milliards d'années
 - $T_{\text{cœur}} \approx 1$ million de degrés,
 - $H \rightarrow He$ (bombe atomique)
 - H épuisé: contraction du cœur,
 - déploiement de l'enveloppe ($\times 100$)
- « Géante rouge »
 - 1 milliard d'années
 - $T_{\text{cœur}} \approx 100$ millions de degrés, $He \rightarrow C$
 - Phase très instable: éjection de matière: nébuleuse planétaire
 - He épuisé: naine blanche



0. Prélude: l'évolution des étoiles

- Les étoiles meurent.
- M57, nébuleuse planétaire (Lyre)
- Le Soleil dans ~ 5 milliards d'années



0. Prélude: le cimetière des étoiles

- L'étoile vit constamment en sursis:
 - Combat (**permanent et injuste**) gravité – fusion nucléaire
- En fonction de leur masse, les étoiles meurent de différentes façons:
 - Les petites étoiles vivent plus longtemps que les grosses
 - Naines blanches (nébuleuse planétaire)
 - Étoiles à neutrons (supernova)
 - Trous noirs (supernova)
- Objets compacts (matière dégénérée) et relativistes

0. Prélude: Le cimetière des étoiles: Les naines blanches

- Étoiles peu massives ($< 1.4 M_{\text{Soleil}}$) ayant épuisé leur Hélium
- Le cœur reste intact (pas de réaction nucléaire) mais sans couche extérieure
- La pression de dégénérescence des électrons maintient l'équilibre (principe de Pauli, mécanique quantique)

- $M_{\text{Soleil}}/2$ dans Volume de la Terre
- Grande densité: 1 milliard de kg/m^3
- 1 cuillère à café pèse 1 tonne

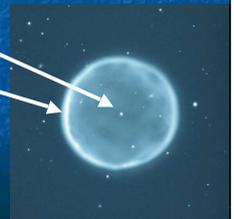


- Soleil: géante rouge \rightarrow naine blanche

- Nébuleuse planétaire Abell 39:

- Éjection des couches extérieures:
- Taille: 6 a.l. de large
- Age: plusieurs milliers d'années
- Distance: 7000 a.l.

- Puis naine blanche s'éteint lentement: \rightarrow naine noire



0. Prélude: Le cimetière des étoiles: les étoiles à neutron

- Mort d'une étoile massive (>4-8 fois M_{Soleil}): Epuisement du carburant nucléaire
- La région centrale de l'étoile s'effondre sous la gravité. Sous l'effondrement les protons et électrons se combinent en neutrons: « étoiles à neutrons ».

- $M \sim 1.4 M_{\text{Soleil}}$ (mesurée dans les **binaires X**)
- $1.4 M_{\text{Soleil}}$ dans sphère de rayon 10km

- Grande densité:
 - 1 000 000 000 000 000 000 kg/m³
 - 1 cuillère à café pèse 1 milliard de tonnes... (1 milliard de fois plus qu'une naine blanche!); Petite taille, haute densité: le champ gravitationnel = 300 000 fois celui de la Terre.



- La pression de dégénérescence des neutrons maintient l'équilibre (principe de Pauli, mécanique quantique)

- **Supergéante rouge** -> **Explosion de Supernova**
- Réjection des couches extérieures -> rémanent de supernova.

• Pulsars

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

13

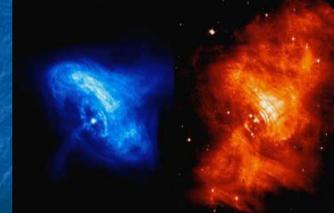
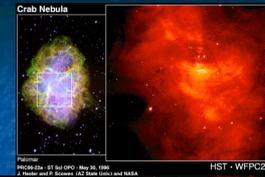
0. Prélude: le cimetière des étoiles: les étoiles à neutron

- Les étoiles à neutron: pulsar de la nébuleuse du Crabe

- **Rémanent de supernova observée en 1054 par les Chinois et Arabes (Messier 1) visible pendant 23 jours.**

- Diamètre: 6 a.l.
- Âge: 951 ans!
- Distance: 6500 a.l.
- Etoile centrale en rotation: 30 tours/s
- Expansion: 1000km/s
- Nébuleuse à plusieurs millions de degrés

- Film (plusieurs mois)
 - Ondes de choc, vent de (anti)-matière 150 000 km/s



Rayons X

Optique

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

14

0. Prélude: Le cimetière des étoiles: les trous noirs

- Étoiles beaucoup plus massives que le Soleil ($3 < M < 40 M_{\text{Soleil}}$)

- Rien n'arrête l'effondrement de l'étoile:

- M_{Soleil} ($R=700\,000\text{km}$) dans sphère de rayon 3km
- Densité: 10 000 000 000 000 000 000 kg/m³ (en fait infinie)
- 1 cuillère à café pèse 10 milliards de tonnes...



- Invention: « astres occlus »

(John Michell et Pierre-Simon Laplace, fin du 18^e: physique newtonienne)

- Réapparition: « étoile gelée, étoile effondrée, trous noirs »

(John Wheeler, 1^e moitié du XX^e: singularité de la relativité générale)

- Les objets les plus simples de l'Univers (quoique...!)

- M/R tel que vitesse libération $> c$: même la lumière ne peut s'en échapper!
- **Rayon de Schwarzschild**: vitesse de libération = $c = (2GM/R)^{1/2} \Rightarrow R = 2GM/c^2$ (**Horizon des événements**)

- 3 paramètres: Masse M , Rotation a , Charge électrique Q

« A black hole has no hair »

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

15

0. Prélude: Le cimetière des étoiles: déformations de l'espace-temps

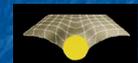
- Relativité générale: 4 dimensions d'espace-temps intimement liées.
- La matière courbe l'espace.
- Espace à 2 dimensions: feuille de papier plate, mais déformée par un poids.



Vide



Terre



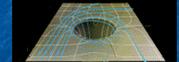
Soleil



Naine blanche



Etoile à neutron



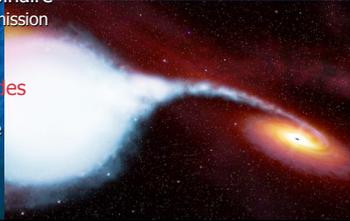
Trou Noir

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

16

0. Prélude: le cimetière des étoiles

- Différence trou noir/ étoile à neutron:
 - Les trous noirs seuls n'émettent rien.
- Objet compact + étoile compagnon = système binaire
 - « Accrétion/éjection »: émission de rayons X/γ
- Premières observations des trous noirs en 1960:
 - Prix Nobel de Physique de Riccardo Giacconi (2002)



S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

Plan

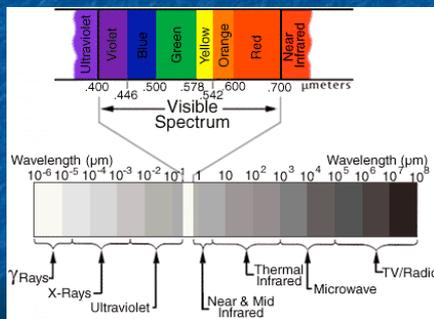
- Prélude: l'évolution des étoiles
 - Le cimetière des étoiles
 - Digression: Les observations multi-longueurs d'onde
 - I. Découverte d'un nouveau type d'astres
 - II. Comment en cerner la nature?
- III. Et après?

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

18

Digression: Les observations multi-longueurs d'onde

- Ce que voit le Petit Prince...



S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

20



S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

21

Digression: Les observations multi-longueurs d'onde

- Le spectre électromagnétique est riche en informations diverses...
- Et d'ailleurs, pourquoi n'a-t-on pas toujours observé dans toutes les longueurs d'onde?

Raison 1: l'œil est adapté au maximum de l'émission du Soleil!

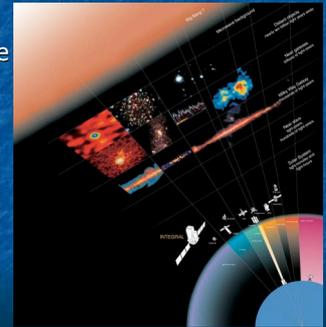
Raison 2: l'atmosphère ne laisse pas passer tous les rayonnements!

Et d'ailleurs, heureusement!!!

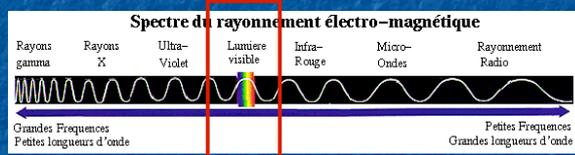
Comment récolter tous les messagers de l'information?

Digression: Les observations multi-longueurs d'onde

- Afin de s'affranchir de l'atmosphère, on envoie des ballons, puis des satellites
- Aujourd'hui on a une vision multi-longueur d'onde de l'Univers...



Digression: Les observations multi-longueurs d'onde Télescopes optiques (visible)

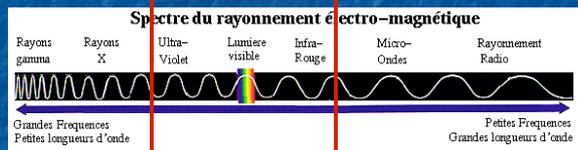


Digression: Les observations multi-longueurs d'onde Télescopes optiques (visible)

- L'œil:
- 2 éléments optiques:
 - Cristallin: lentille frontale pour concentrer la lumière
 - Rétine: Matrice sensible aux photons, capturant l'image, constituée de cônes et bâtonnets (~pixels électroniques)



Digression: Les observations multi-longueurs d'onde
Télescopes UV, visible, IR



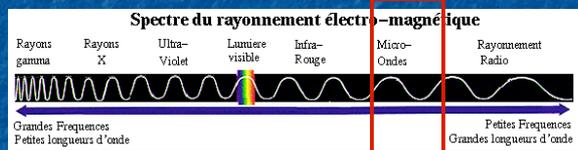
Digression: Les observations multi-longueurs d'onde
Télescopes (UV, visible, IR)

The ESO Very Large Telescope Array (VLT)



- ESO La Silla et Paranal (VLT)
- Optique active adaptative
- Interférométrie

Digression: Les observations multi-longueurs d'onde
le sub-millimétrique



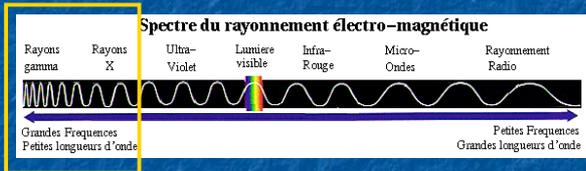
Digression: Les observations multi-longueurs d'onde
le sub-millimétrique

64 antennes de 12 m de diamètre chacune
Projet ESO

ALMA
ATACAMA LARGE
MILLIMETER ARRAY



Digression: Les observations multi-longueurs d'onde les rayons X/ γ



S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

30

Observations multi-longueurs d'onde rayons X/ γ



Satellite INTEGRAL: 2 keV – qq MeV
Lancé le 17 octobre 2002

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

31

Les observatoires

- Télescopes au sol et dans l'espace...
- Observations multi-longueur d'onde (radio, infrarouge et rayons X/ γ)



S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

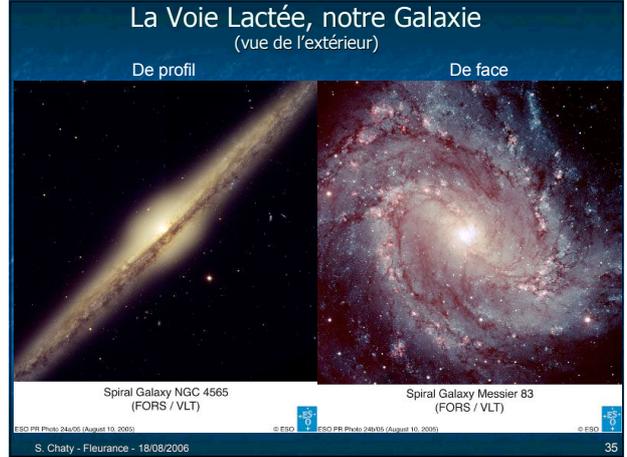
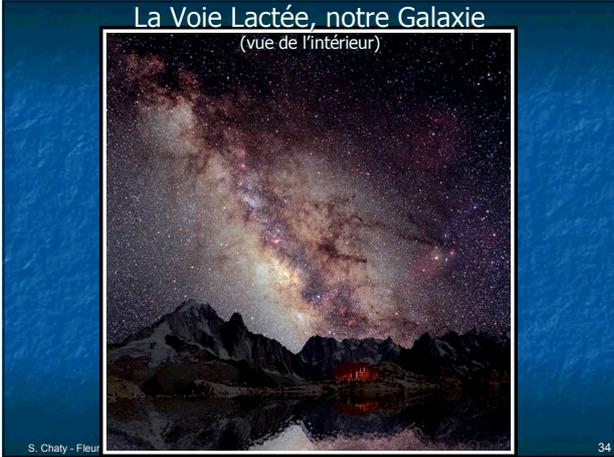
32

Plan

- Prélude: l'évolution des étoiles
 - Le cimetière des étoiles
- Digression: Les observations multi-longueurs d'onde
- I. Découverte d'un nouveau type d'astres
- II. Comment en cerner la nature?
- III. Et après?

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

33



INTEGRAL SOURCES du bras de Norma

Nouveau type d'étoiles mystérieux dans le bras de Norma de la Galaxie, inconnus auparavant...

Or ce bras de Norma est rempli de régions de formation d'étoiles!

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006 38

Plan

- Prélude: l'évolution des étoiles
 - Le cimetière des étoiles
- Digression: Les observations multi-longueurs d'onde
- I. Découverte d'un nouveau type d'étoiles
- II. Comment en cerner la nature?
- III. Et après?

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006 39

II. Comment en cerner la nature?

- Observations en:
 - Rayons γ
 - Rayons X
 - Visible
 - Infrarouge
 - Radio

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006 40

Observations optiques/NIR

IGR J17544-2619
(Pellizza, Chaty, Negueruela, 2005, Astrophysical Journal)

Image: 1.5' x 5.5'
INTEGRAL: 2' cercle d'erreur
ROSAT: 23'' cercle d'erreur
XMM: 4'' cercle d'erreur

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

Observations optiques/NIR de IGR J17544-2619

1 candidat brillant (B) identifié dans USNO & 2MASS
 3 candidats très faibles (F1-3): étoiles naines?
 1 objet étendu (E): galaxie lointaine?

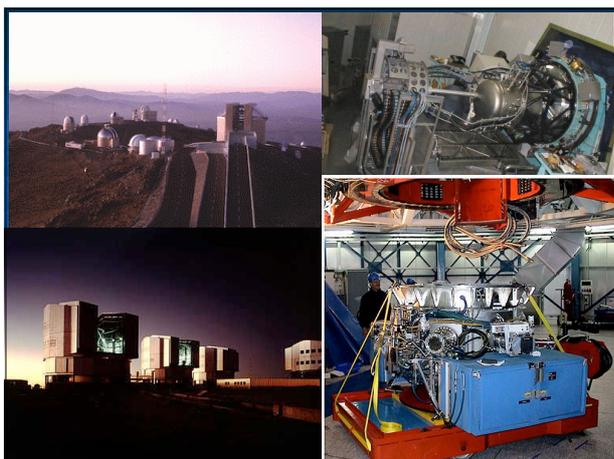
S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006 42

Découverte d'un nouveau type d'astres

- Comment identifier toutes ces nouvelles sources INTEGRAL?
- Observer en rayons X/γ n'est pas suffisant:
 - Localisation insuffisante
- Observer en optique est difficile:
 - Astres principalement dans le plan de la Galaxie: trop d'absorption (poussières et gaz interstellaires)

⇒ Observer en INFRAROUGE

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006 43



La source INTEGRAL IGR J16318-4848...

- Observations depuis les hautes énergies avec INTEGRAL ...
- ...jusqu'en optique/NIR avec ESO/NTT.
- (Chaty & Fillâtre 2005, Fillâtre & Chaty, Astrophysical Journal 2004)

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006 45

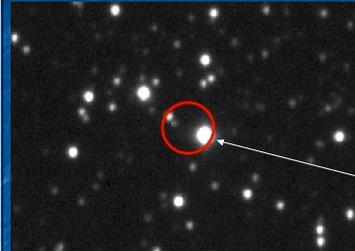
Découverte de IGR J16318-4848 par INTEGRAL

- 1^{er} astre découvert par INTEGRAL le 29 janvier 2003
- Position:
 - $(l,b) \sim (336^\circ, 0.5^\circ)$
 - RA=16^h31.8^m, DEC=-48°48'
- Précision de localisation:
 - 2' avec INTEGRAL
 - Puis 4" avec XMM
 - (Lune: 30')



INTEGRAL/ISGRI (15-40 keV)
image de la région de Norma

Découverte de la contrepartie optique

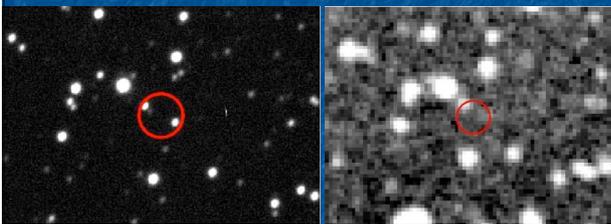


B>25.4+/-1 mag
V>21.1+/-0.1 mag
R=17.72+/-0.12 mag
I=16.05+/-0.54 mag

IGR J16318-4848

- Rien en B, V, apparaît en R, I et Z.
- Cercle d'incertitude: 4" (XMM EPIC)

Découverte de la contrepartie optique

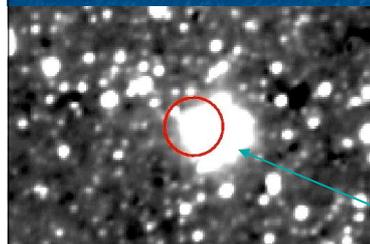


ESO/NTT R band

USNO B1.0 plate R band

- Comparaison entre nos observations NTT et catalogue USNO: seule une des 2 sources a varié dans le cercle.

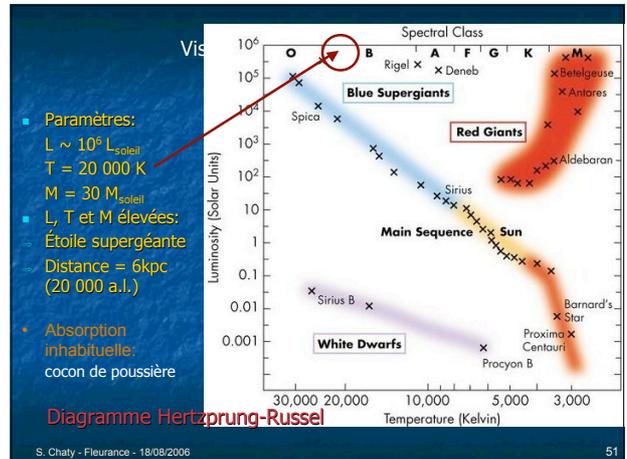
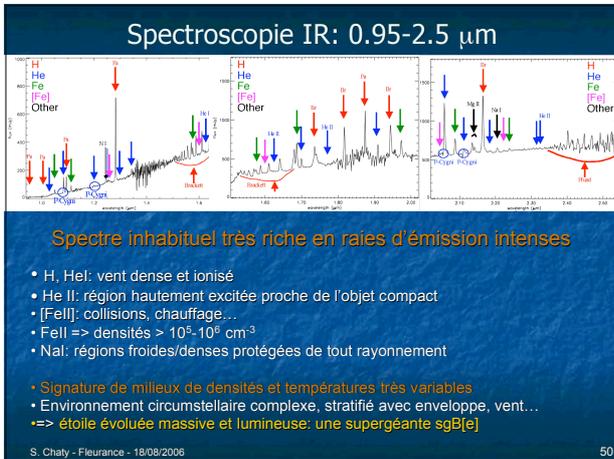
Observations profondes en infrarouge



J=10.33+/-0.14 mag
H=8.33+/-0.10 mag
Ks=7.20+/-0.05 mag

IGR J16318-4848

- Source extrêmement brillante en infrarouge
- Cercle d'erreur EPIC 4"



Mais alors, que sont ces astres? Différents scénarii possibles

- Une nouvelle population d'astres de notre Galaxie découverte par INTEGRAL
 - Une douzaine de sources aux mêmes propriétés: ce n'est pas un hasard!
- 80% sont des étoiles à neutrons orbitant autour d'étoiles super-géantes (chaudes, massives, lumineuses), le tout enrobé d'un cocon de poussières dense et absorbant.

- 1) Soit l'étoile à neutron orbite dans un vent équatorial dense:
 - densité $10^{11-12} \text{ cm}^{-3}$
 - épaisseur du disque 10^{12-13} cm (10-100 R_{soleil})
 - Rayon du disque 10^{13-14} cm (1-10 u.a.)
- 2) Soit l'étoile à neutron pénètre (ou même spirale) dans l'atmosphère/enveloppe de l'étoile, provoquant des sursauts d'activité?
 - Il nous manque la période orbitale de ces astres...



S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006 52

Plan

- Prélude: l'évolution des étoiles
 - Le cimetière des étoiles
- Digression: Les observations multi-longueurs d'onde
- I. Découverte d'un nouveau type d'astres
- II. Comment en cerner la nature?
- III. Et après?

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006 53

Et après?

- Beaucoup de questions en suspens...
- Quelle est la géométrie de ces systèmes (taille de l'orbite, période orbitale...)?
- Pas de jet: à cause de la poussière?
- Et d'ailleurs, d'où vient toute cette poussière?
- Comment se sont-ils formés?
- Comment vont-ils évoluer? (étoile à neutron peu à peu ralentie?)
- Ces astres permettront de mieux comprendre la naissance et l'évolution des systèmes binaires de haute énergie.
- Pour répondre à ces questions: de nouvelles campagnes d'observation prévues ou demandées, dans les hautes énergies et en infrarouge

Étude multi-longueur d'onde nécessaire afin de révéler la nature de ces astres...

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006

54



Fin?

■ El universo es tremendamente creativo, lo que nos obliga a abrirnos a lo desconocido...
(Alberto Ludwig Urquieta, 1926)

The ESO Very Large Telescope Array (VLT)

S. Chaty - Fleurance - 18/08/2006