

Astronomie, Astrophysique

Observer et comprendre l'Univers

Université inter-âges
Paris-Sorbonne

Frédéric Daigne, Institut d'Astrophysique de Paris
Université Pierre et Marie Curie
Institut Universitaire de France



Lundi 12 décembre 2011

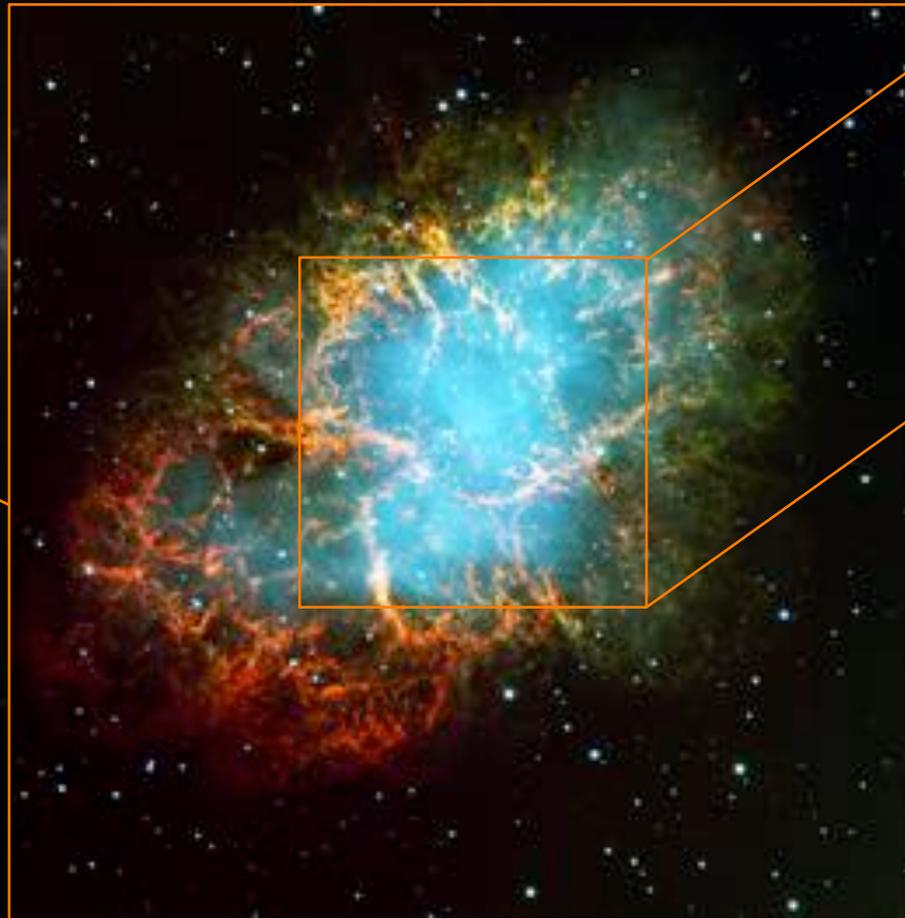
**7. Explosions
et monstres cosmiques:
supernovae, étoiles à neutrons
et trous noirs**

Explosions & monstres cosmiques: Supernovae, étoiles à neutrons, Trous noirs



Explosions & monstres cosmiques: Supernovae, étoiles à neutrons, Trous noirs

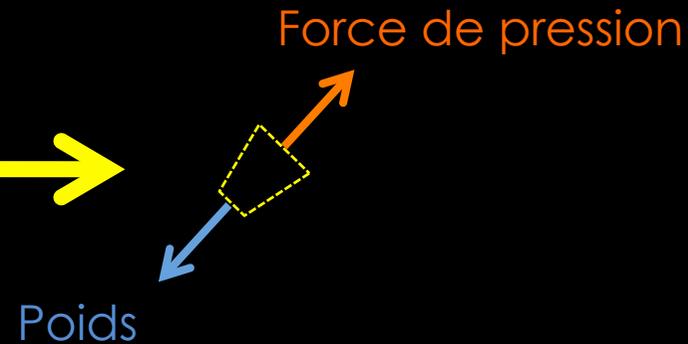
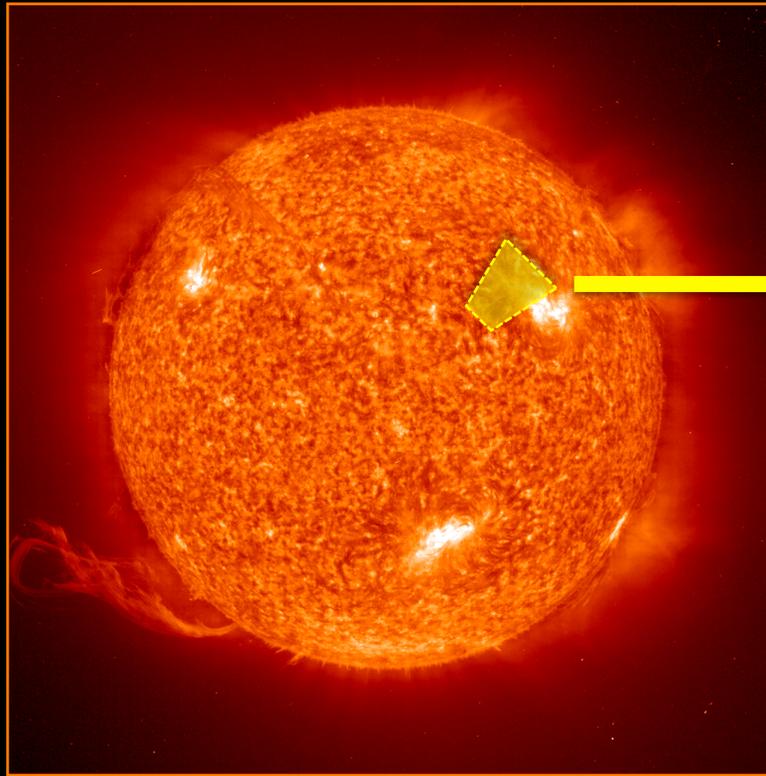
La nébuleuse du Crabe
à 6 300 années lumière (ESO-VLT)



Rayons X (Chandra)

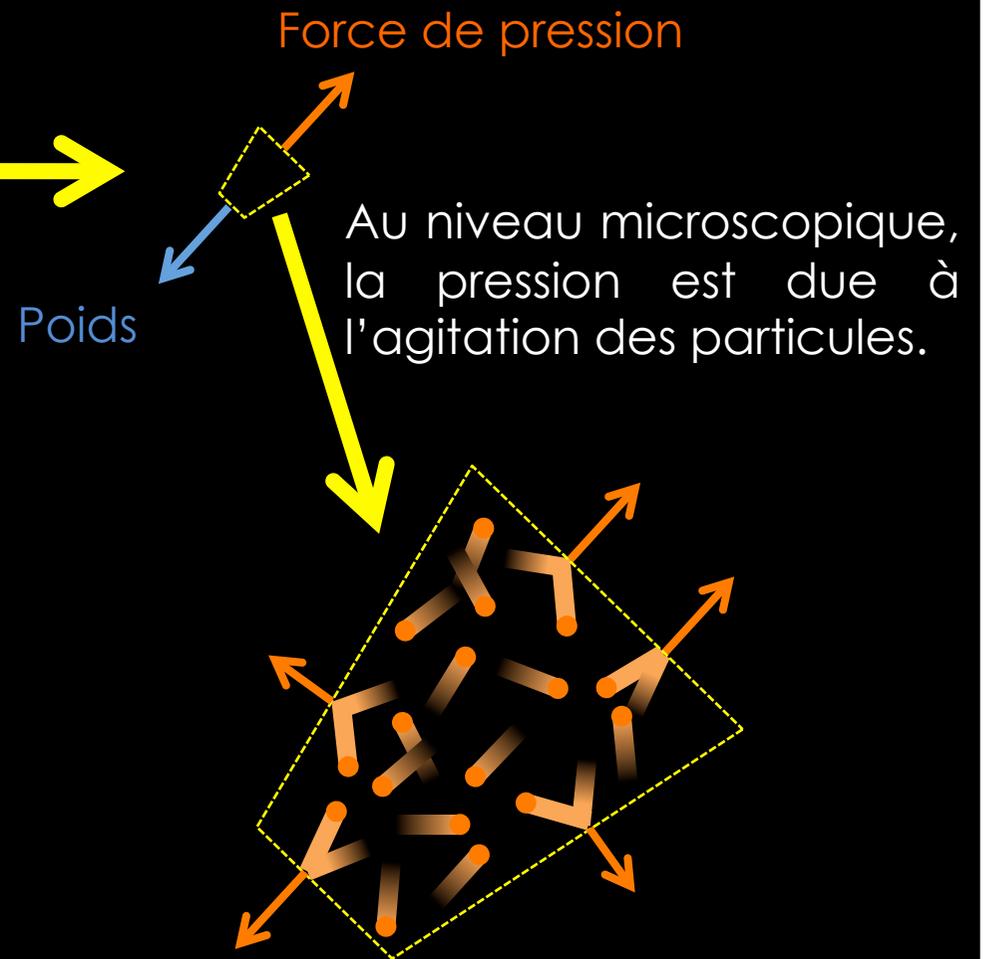
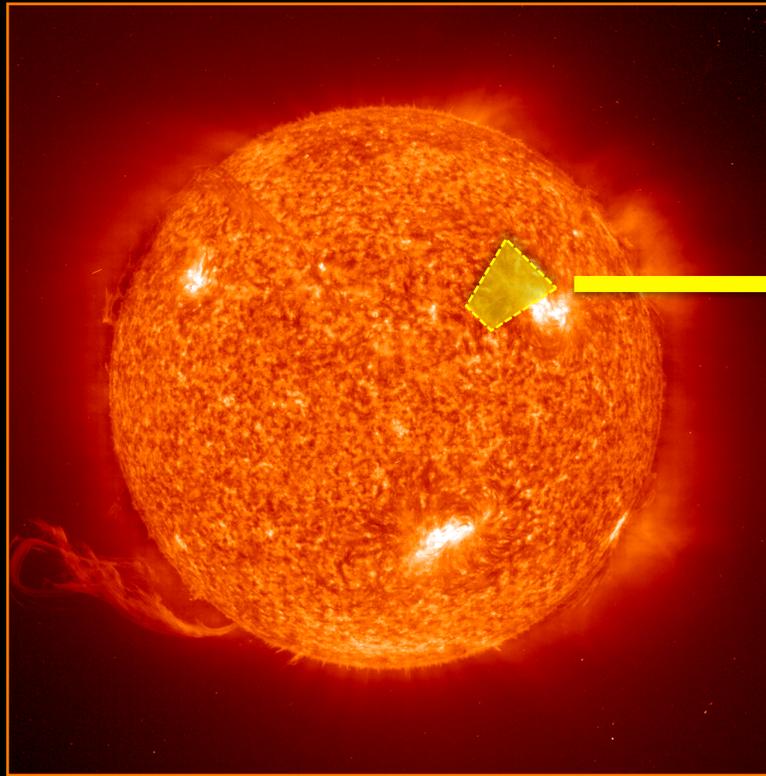
Vaincre la gravité

Les étoiles apparaissent comme des structures qui arrivent – provisoirement – à vaincre la gravité qui tend à les faire s'effondrer sur elles-mêmes.



Vaincre la gravité

Les étoiles apparaissent comme des structures qui arrivent – provisoirement – à vaincre la gravité qui tend à les faire s'effondrer sur elles-mêmes.



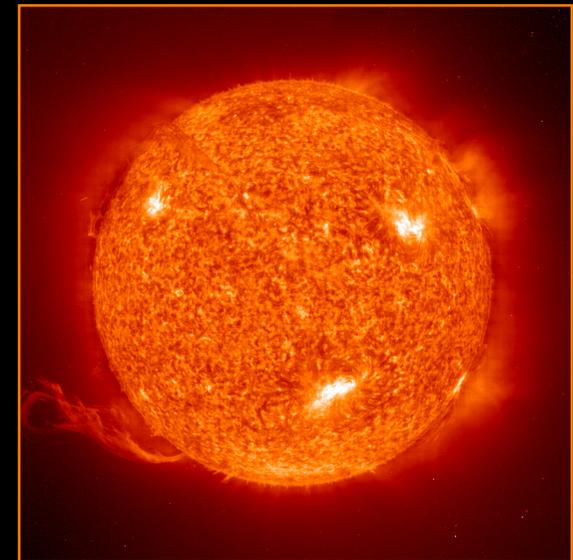
Vaincre la gravité

Les étoiles apparaissent comme des structures qui arrivent – provisoirement – à vaincre la gravité qui tend à les faire s'effondrer sur elles-mêmes.

- La pression qui équilibre le poids peut avoir plusieurs origines physiques.
- Dans le Soleil et les étoiles « normales » (séquence principale, géantes rouges), l'agitation des particules du gaz est d'origine thermique.
- Nous avons vu (cours n°2 et n°6) que tant que l'étoile produit de l'énergie, l'équilibre est parfait : la gravité est stoppée.
- Dès que la production d'énergie s'arrête, la contraction reprend.

(mécanisme de Kelvin-Helmholtz)

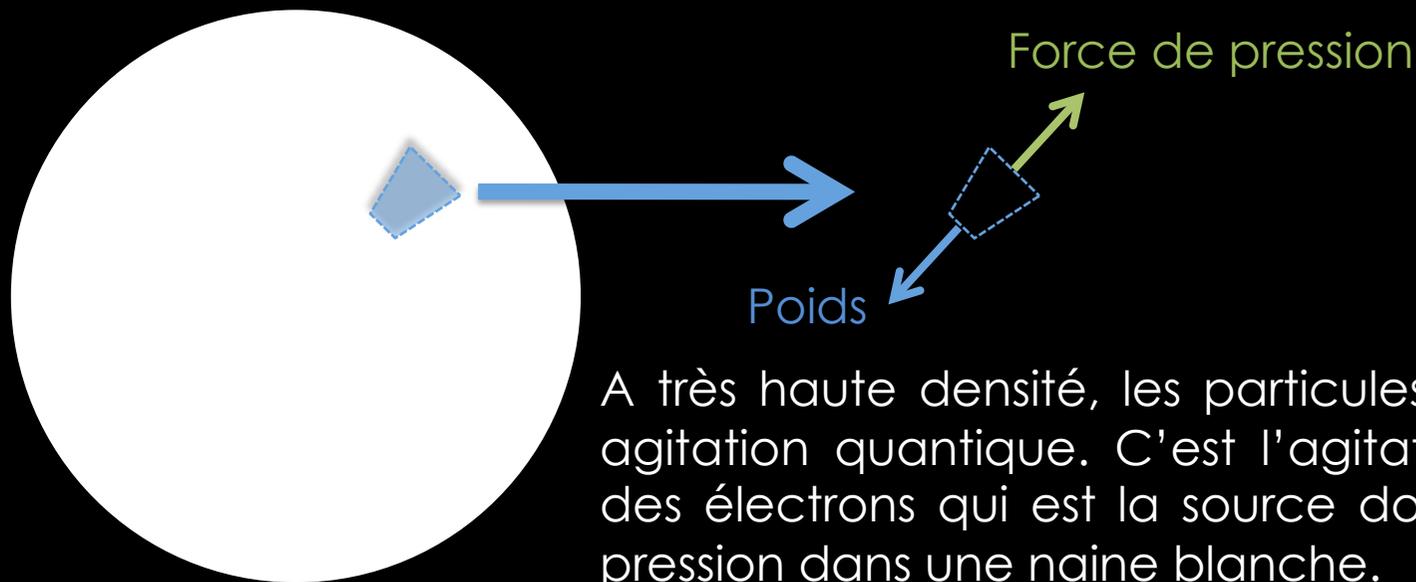
- Etat d'équilibre : l'énergie rayonnée est exactement compensée par l'énergie produite dans le cœur par fusion nucléaire.
- En l'absence de fusion : l'énergie rayonnée doit être prise sur l'énergie gravitationnelle de l'étoile : celle-ci se contracte.



Le stade ultime des étoiles

Le destin des étoiles est de se contracter sur elles-mêmes. Mais il y a de nombreuses étapes avant le stade ultime, celui de trou noir...

- Pour une étoile comme le Soleil, après la fusion de l'hélium (géante rouge), aucun autre épisode de fusion ne peut plus avoir lieu : le cœur se contracte.
- Lorsqu'il atteint une densité assez élevée, une nouvelle source de pression apparaît, qui freine considérablement la contraction : l'étoile devient une naine blanche, presque parfaitement à l'équilibre.



L'agitation quantique des électrons peut être vue comme une manifestation de leur claustrophobie (en terme savants : ce sont des « fermions ») : si on les entasse, ils paniquent et s'agitent...

Propriétés des naines blanches

Les naines blanches sont des étoiles très particulières :

- Masse : entre ~ 0.3 et $1.4 M_{\text{soleil}}$
- Rayon :
 - il diminue quand la masse augmente !
 - il est très petit pour une étoile : de $\sim 12\,000$ km à $2\,000$ km !

Ce sont des *naines...*

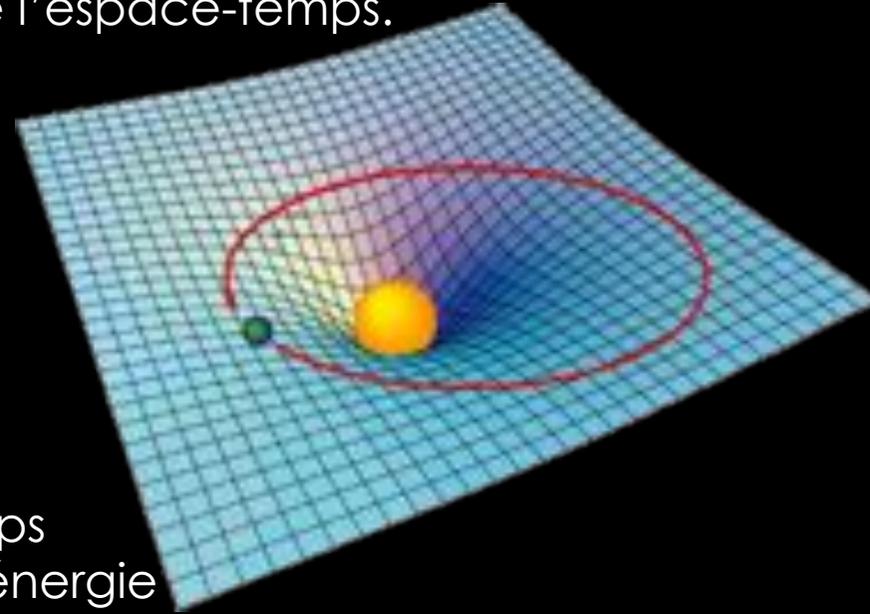
- Masse volumique : 1 tonne au centimètre cube !
- Température de surface : $15\,000$ à $30\,000$ K !

Ce sont des *naines blanches*.

- Luminosité : $1\,000$ à $10\,000$ fois plus faibles que le Soleil...
- Contraction : de l'ordre du $1/10^{\text{ème}}$ de millimètre par siècle !
Même si l'état *naine blanche* n'est pas un vrai état d'équilibre, il peut perdurer très longtemps (milliers de milliards d'années !)
- Les naines blanches sont des objets *dégénérés* :
la pression est d'origine quantique.
- Les naines blanches sont des objets *compacts* :
la gravité est très forte (la relativité générale entre en jeu)

La relativité générale

Le relativité générale (Einstein, 1915) est la théorie moderne de la gravitation. Elle décrit la gravité comme une courbure de l'espace-temps.



- Equation d'Einstein :

évolution de la structure de l'espace temps
= fonction du contenu local en masse & énergie

- La lumière est affectée par la gravité : elle est déviée par la masse
(Premier test : Eddington, 1916)

Etoile



Soleil



- Beaucoup d'autres tests plus précis depuis

(29 mai 1919 éclipse solaire à São Tomé-et-Principe)

Histoire des naines blanches

Il a fallu du temps pour admettre l'existence d'étoiles aussi bizarres...

- Dans le diagramme HR de 1915, il y a une seule naine blanche : 40 Eri
- Russell (le R de HR) est le premier à montrer que 40 Eri est chaude et sous-lumineuse, donc très petite : appellation « naine blanche »



Henri Norris Russell
(1877-1957)

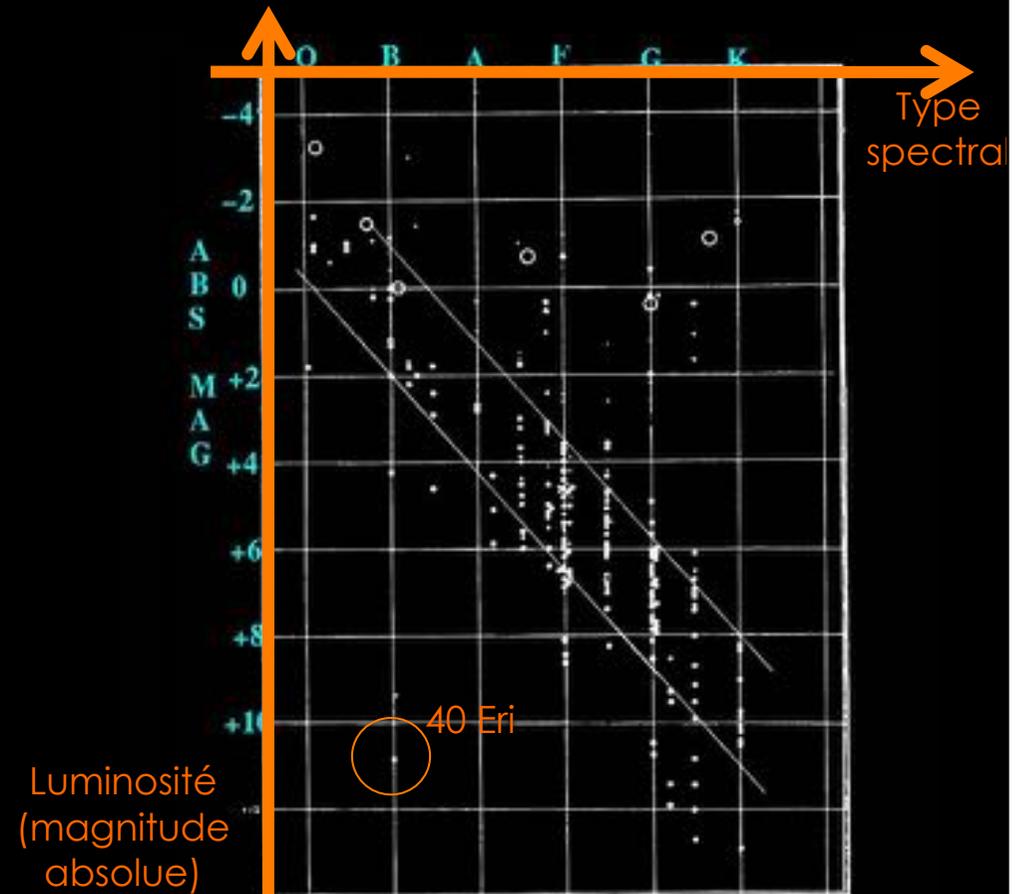


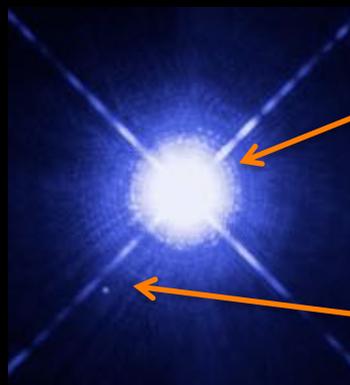
Figure 8.10 Henry Norris Russell's first diagram, with spectral types listed along the top and absolute magnitudes on the left-hand side. (Figure from Russell, *Nature*, 93, 252, 1914.)

Histoire des naines blanches

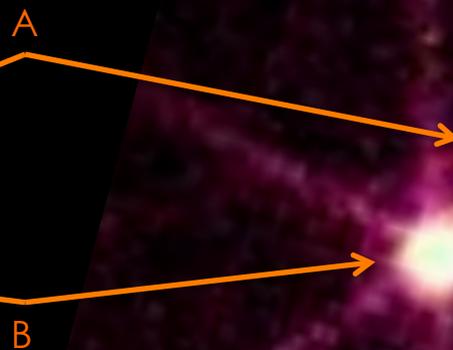
Il a fallu du temps pour admettre l'existence d'étoiles aussi bizarres... Sirius B a joué un rôle important pour la compréhension des naines blanches.

- 1844 – Bessel détermine que Sirius a un compagnon
- 1910 – Mouvement orbital (période ~50 ans) : masse de Sirius B : $0,94 M_{\text{soleil}}$
- 1914 – Adams mesure la température de surface : 8000 K (faux)
- On en déduit $R = 18\,000\text{ km}$ (faux) soit 70 kg/cm^3 (faux)
(Valeurs modernes correctes : $T = 24\,000\text{ K}$; $R = 2000\text{ km}$ soit 60 tonnes/cm^3)
- 1926 : Eddington :

« we have a star of a mass about equal to the sun and a radius much less than Uranus [...] it seems likely that the ordinary failure of the gas laws due to finite sizes of molecules will occur at these high densities, and I do not suppose that the white dwarfs behave like perfect gas ».



Sirius A et B
(HST : visible)



Sirius A et B
(Chandra : rayons X)



Eddington
(1882-1944)

Histoire des naines blanches

Il a fallu du temps pour admettre l'existence d'étoiles aussi bizarres... Sirius B a joué un rôle important pour la compréhension des naines blanches. Il a fallu ensuite attendre un progrès théorique majeur : la mécanique quantique.

- 1926 : Dirac : statistique des fermions (statistique de Fermi-Dirac)
⇒ notion de pression de dégénérescence
- 1930 : Chandrasekhar : 1^{er} calcul de la structure d'une naine blanche.
⇒ existence d'une masse maximale ($\sim 1.4 M_{\text{Soleil}}$)
(imposée par les corrections relativistes à très haute densité).

▪ Eddington n'accepte pas le calcul de Chandrasekhar.

▪ Ses conséquences sont en effet étonnantes :

« the life history of a star of small mass must be essentially different from the life history of a star of large mass. For a star of small mass the natural white-dwarf stage is an initial step towards complete extinction. A star of large mass cannot pass into the white-dwarf stage and one is left speculating on other possibilities » (Chandrasekhar, 1934)

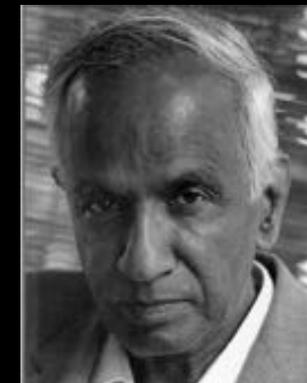
▪ 1932 : Landau confirme le résultat de Chandrasekhar.

▪ Beaucoup d'autres travaux théoriques et observationnels ont suivi ceux de Chandrasekhar

▪ 1983 : Prix Nobel de Physique pour Chandrasekhar (avec Fowler, cf. cours n°6)



Landau
(1908-1968)



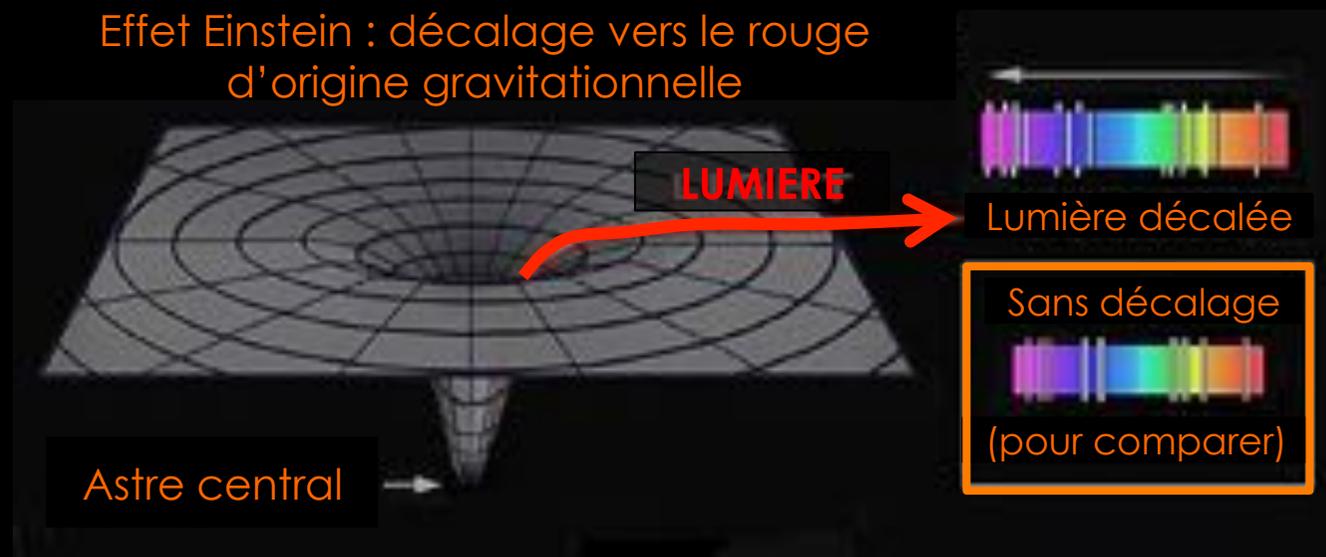
Chandrasekhar
(1910-1995)

Observation des naines blanches

Avec les télescopes d'aujourd'hui, observer les naines blanches est plus facile. Elles se révèlent un intéressant laboratoire de physique.

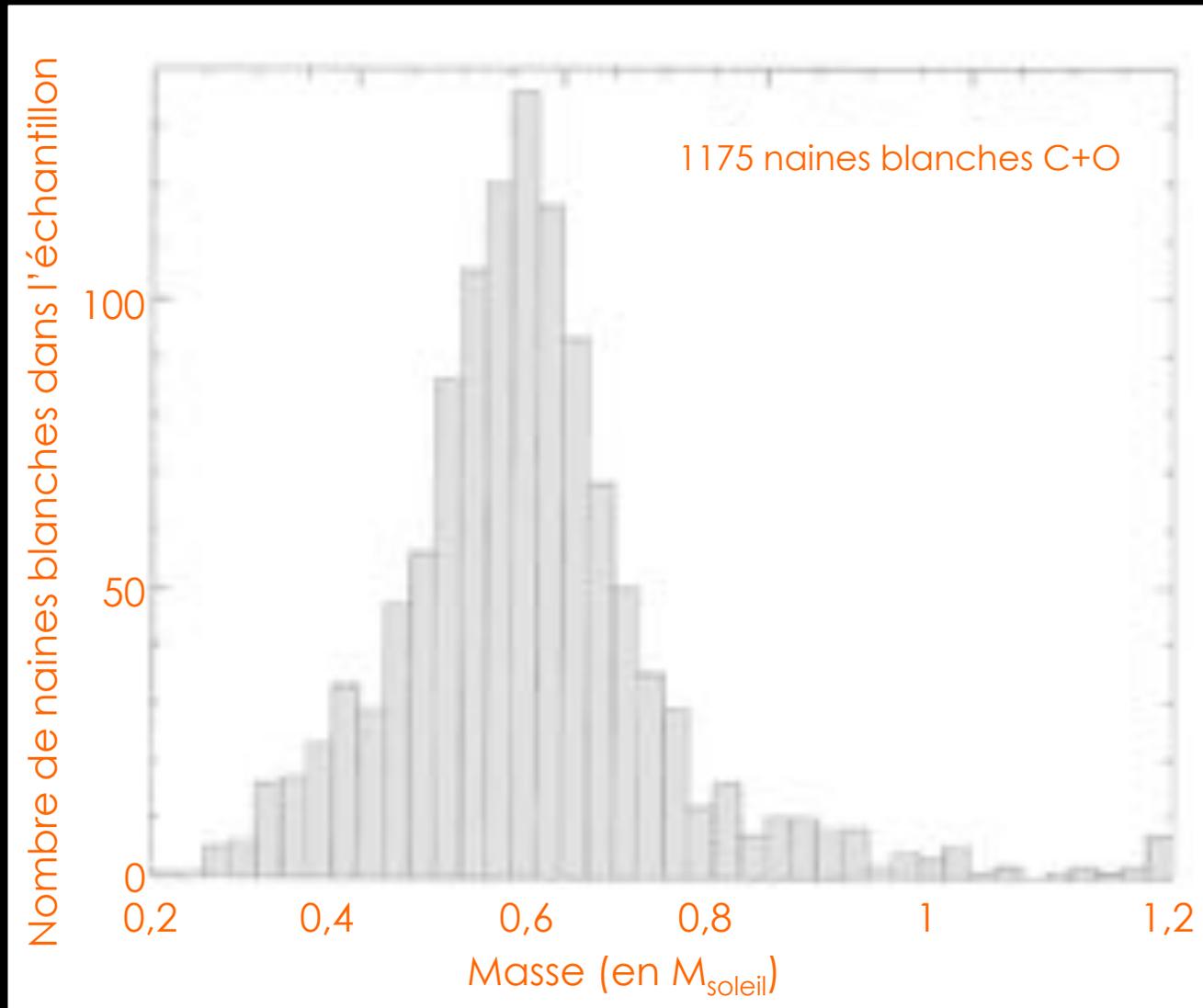
- L'accord entre la théorie et l'observation pour la masse et le rayon est excellent : cela confirme notre compréhension physique de la structure de la matière à haute densité (tonne au cm^3), y compris d'effets quantiques et relativistes très inhabituels.
- Les raies dans le spectre sont très légèrement décalées vers le rouge : c'est une vérification expérimentale de la relativité générale (effet Einstein).

Première mesure : $\Delta\lambda/\lambda = 0.000063$ (faux ; Adams 1925 – valeur moderne: 0.0003)



Masses des naines blanches

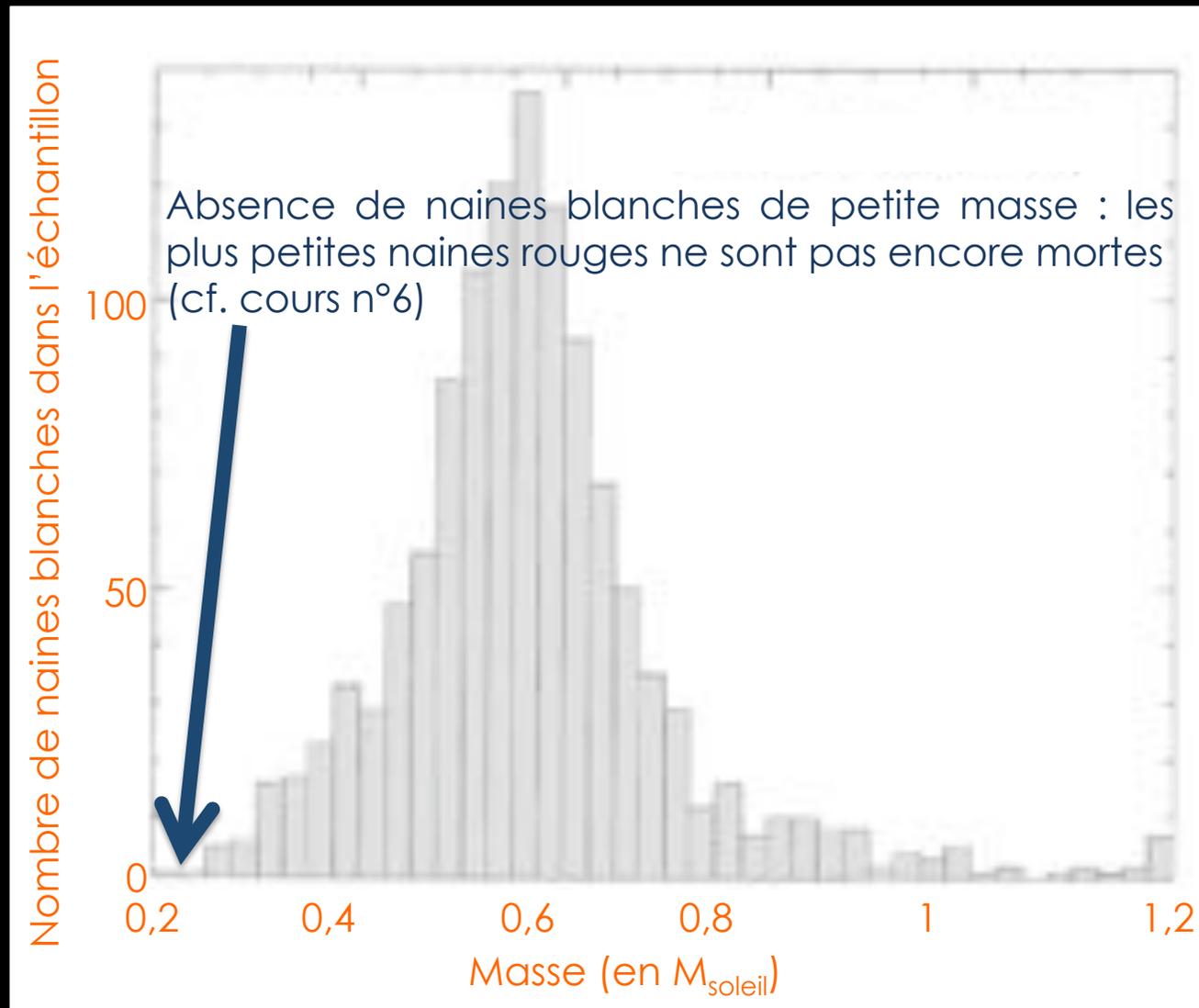
La distribution en masse des naines blanches confirme beaucoup d'aspects de notre compréhension de la physique stellaire.



Madej et al. 1994

Masses des naines blanches

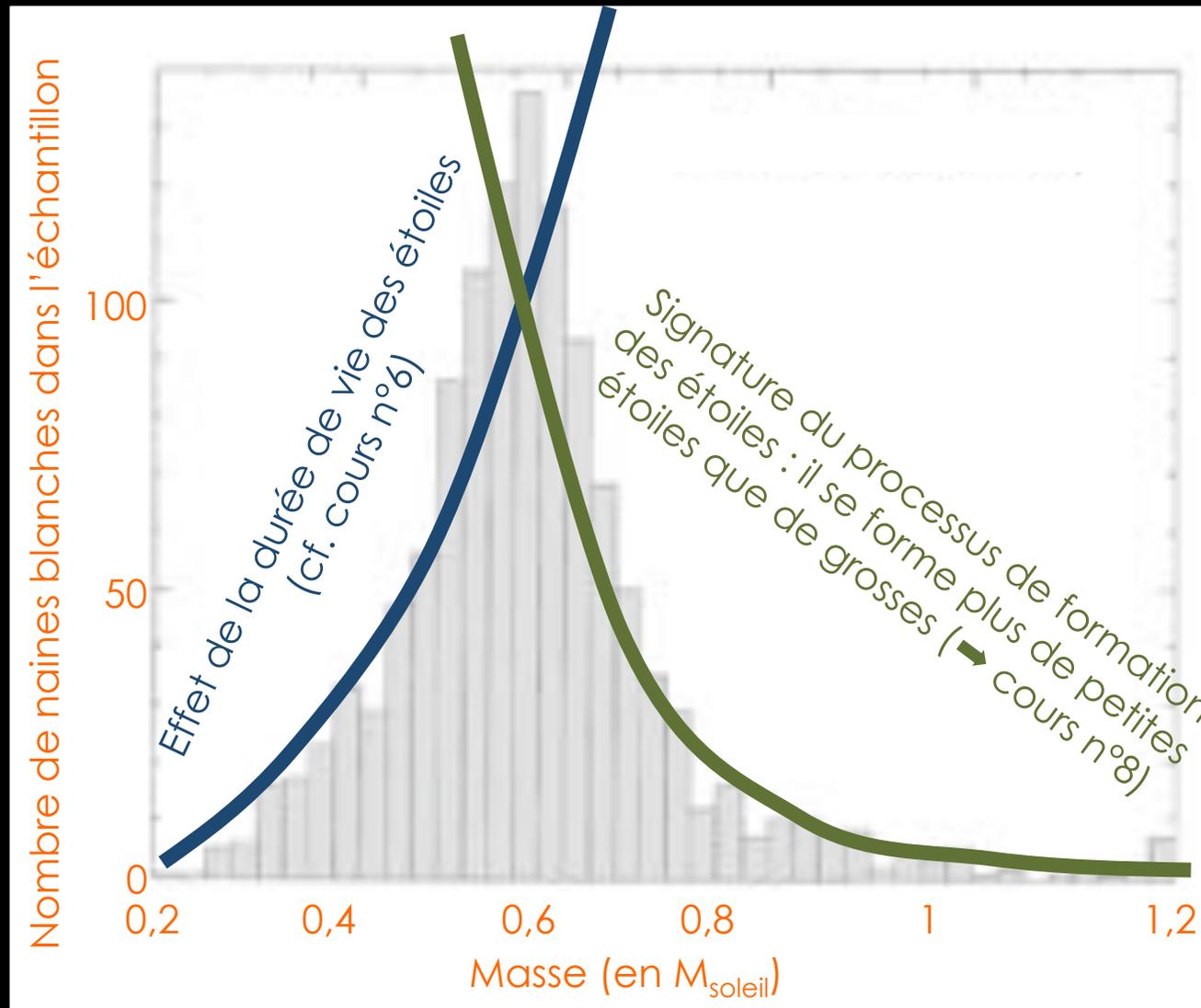
La distribution en masse des naines blanches confirme beaucoup d'aspects de notre compréhension de la physique stellaire.



Madej et al. 1994

Masses des naines blanches

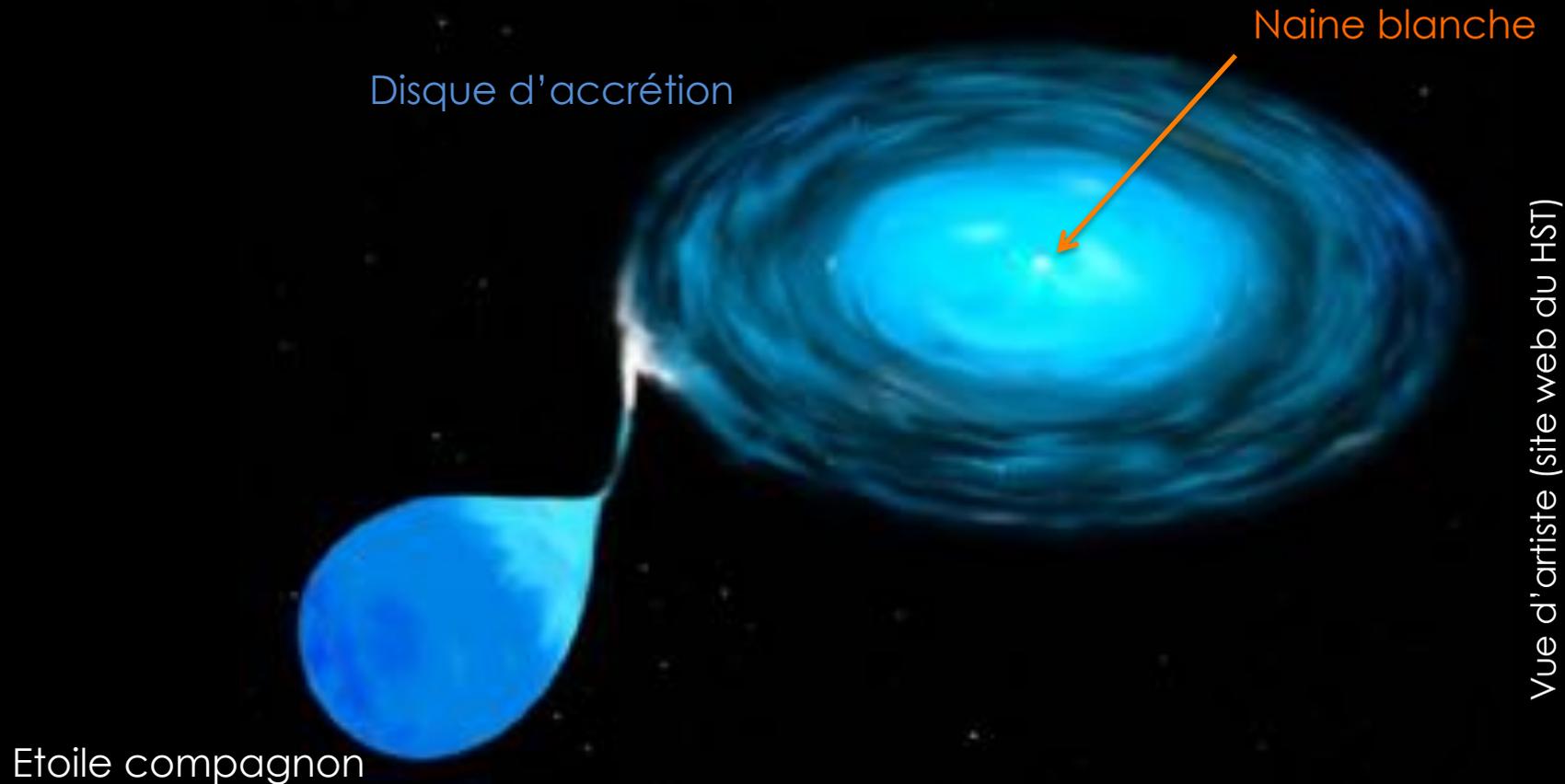
La distribution en masse des naines blanches confirme beaucoup d'aspects de notre compréhension de la physique stellaire.



Madej et al. 1994

Naines blanches accrétantes

Les naines blanches ne sont pas observées qu'isolées. Elles peuvent faire partie d'un système binaire (cf. cours n°6) et dans ce cas – en raison de leur champ gravitationnel élevé – accréter la matière de leur compagnon.

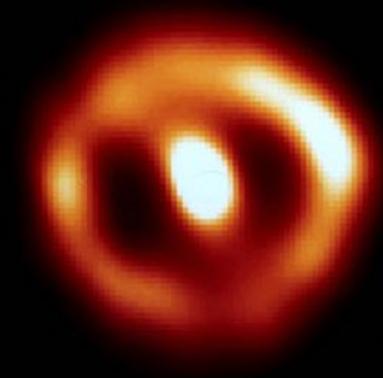


Dans ces systèmes, on observe la lumière émise par le disque d'accrétion en plus de la lumière des deux étoiles.

Naines blanches & Novae

Une naine blanche accrétante peut accumuler suffisamment de matière à sa surface pour que celle-ci, comprimée en raison du champ de gravité, atteigne la température du seuil de la fusion : une explosion thermonucléaire a alors lieu, on observe une nova.

Nova Cyg 1992

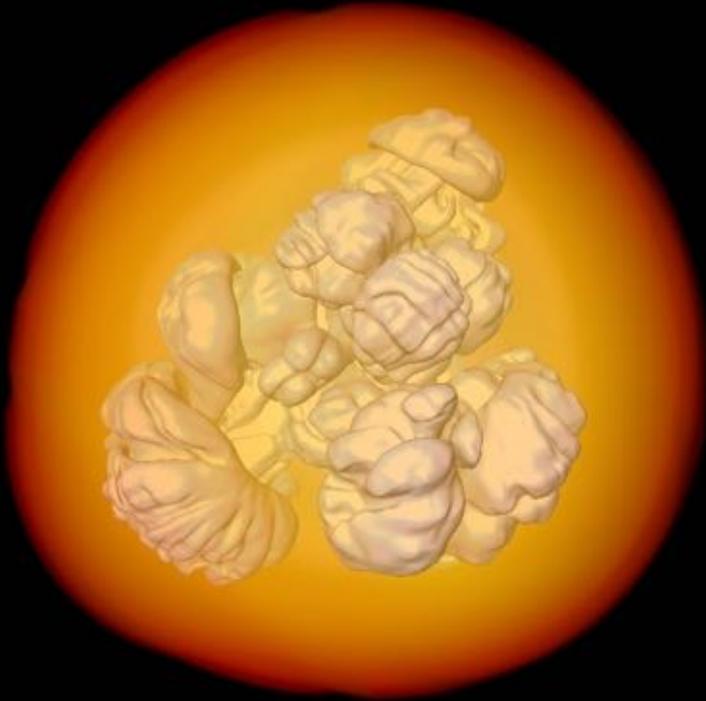


HST

Naines blanches & Supernovae

Si une naine blanche accumule suffisamment de masse pour atteindre la masse de Chandrasekhar, elle s'effondre sur elle-même. La matière comprimée atteint le seuil pour la fusion nucléaire, mais celle-ci n'est pas stable comme dans une étoile normale : l'étoile explose, c'est une supernova de type Ia

Röpke et al. 2004



Une SN Ia dans la galaxie NGC 5584 (VLT)

Les détails de l'explosion restent mal compris (progéniteur, mécanisme).

Supernovae & Cosmologie

Les supernovae sont tellement brillantes qu'on peut les observer très loin dans l'Univers. L'effet de seuil à l'origine des supernovae de type Ia (la masse de Chandrasekhar) font que toutes ces explosions ont une énergie comparable. On peut alors les utiliser pour mesurer des distances dans l'Univers (→ cours n°10&11).



Une SN Ia dans la galaxie NGC 5584 (VLT)

Les étoiles à neutrons

Après les travaux de Chandrasekhar (1930), les astrophysiciens se sont demandés ce que devenaient les étoiles à la fin de leur vie quand leur cœur a une masse supérieure à la masse maximum d'une naine blanche.

- 1932 : découverte du neutron par Chadwick
- 1934 : Zwicky & Baade suggère l'idée d'étoiles à neutrons
- 1939 : Oppenheimer & Volkoff font le premier calcul de structure d'une étoile constituée majoritairement de neutrons à haute densité



Les fusées-sondes Aerobee ayant permis les premières observations en X de Giacconi



Oppenheimer
(1904-1967)

- Années 50 & 60, les étoiles à neutrons font l'objet de travaux théoriques poussés mais on pense qu'on ne pourra jamais les observer (trop peu lumineuses)
- 1962 : débuts de l'astronomie X avec la découverte de Sco X1 (Giacconi et al.)
On pense que Sco X1 est peut-être une étoile à neutrons...

Les prix Nobel de l'astrophysique...

Prix Nobel de Physique 2002 :



« for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos » (RD & MK)

« for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources » (RG)



Raymond Davis Jr.



Masatoshi Koshiwa



Riccardo Giacconi

Propriétés des étoiles à neutrons

Les étoiles à neutrons sont plus extrêmes que les naines blanches :

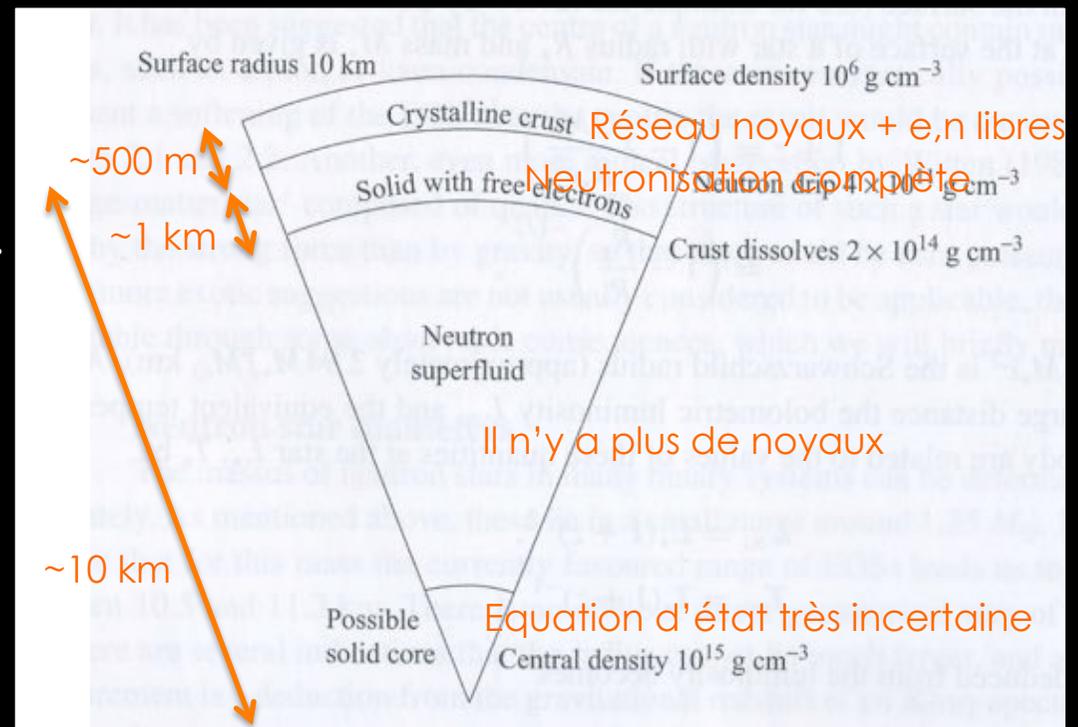
- Masse : entre $\sim 1.4 M_{\text{soleil}}$ et $\sim 2-3 M_{\text{soleil}}$ (limite supérieure mal connue)
- Rayon : 10 km !
- Masse volumique : 1 milliard de tonnes au centimètre cube !
- Température de surface : million de degrés ! (rayonnement dans le domaine X)
- Luminosité : inférieure à $L_{\text{soleil}}/10$ = très difficile à détecter en X
- Contraction : de l'ordre du $1/10^{\text{ème}}$ de micron par millénaire !
Même si l'état étoile à neutrons n'est pas un vrai état d'équilibre, il peut perdurer très longtemps (dizaines de milliers de milliards d'années !)
- Les étoiles à neutrons sont des objets *quantiques* :
la densité est tellement élevée que la compréhension théorique de la nature de la matière au cœur de l'étoile à neutrons est encore assez partielle.
- Les étoiles à neutrons sont des objets *compacts* :
la gravité est très forte (la relativité générale entre en jeu)

Le dernier rempart contre la gravité

Dans les étoiles à neutrons, l'interaction forte est la contribution dominante à la pression qui équilibre le poids.

- 4 interactions fondamentales : gravité, force électromagnétique, interactions fortes et faibles
- L'interaction forte est la plus intense à courte distance : cohésion des noyaux
- Théorie de l'interaction forte (chromodynamique quantique) : très compliquée à mettre en œuvre pour un grand nombre de particules
- Grandes incertitudes sur l'état de la matière dans une étoile à neutrons.
- Expériences de laboratoire impossibles : les observations des étoiles à neutrons sont le seul moyen de progresser (mesures de masse, de rayon, ...).

Est-ce que le cœur est constitué de neutrons, de quarks libres, ou d'autres particules plus stables ?



La gravité des étoiles à neutrons

Le champ de gravité à la surface d'une étoile à neutrons est extrême. Quelques exemples d'effets associés :

- Effet Einstein : la lumière émise près de la surface d'une étoile à neutrons est décalée de 20% vers le rouge.

Exemple : bleu (500 nm) devient rouge/orange (600 nm)
(effet vérifié observationnellement, mais dans les rayons X)

- Montagnes : la taille maximum (cf. cours n°4) est de l'ordre du micron !
Les étoiles à neutrons sont des sphères parfaitement lisses.

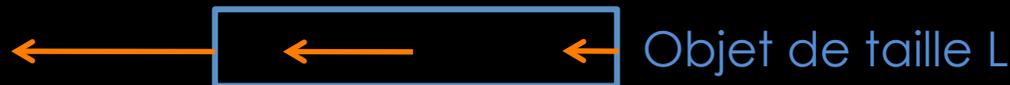
- Effet de marée : un objet de taille L dans le champ gravitationnel d'une étoile à neutrons subit une force de marée intense.

Pour L = 1,8 m (être humain) : 30 millions de « g » terrestres : aucune matière ne peut résister, les corps macroscopiques sont forcément déchirés.

Etoile à neutrons



← Effet différentiel →



Ordre de grandeur de la force de marée par unité de masse :

$$g_{\text{marée}} \sim G M L / R^3 \sim (M/M_{\text{Terre}})(R_{\text{Terre}}/R)^2(L/R) \times g_{\text{Terre}}$$

La découverte des pulsars

La surface des étoiles à neutrons est trop petite pour pouvoir détecter directement le rayonnement thermique de l'étoile. En 1968, une découverte a cependant montré qu'observer les étoiles à neutrons allait devenir « facile ».

- 1967 : Pacini suggère que la source d'énergie de la nébuleuse du Crabe est une étoile à neutrons en rotation et fortement magnétisée



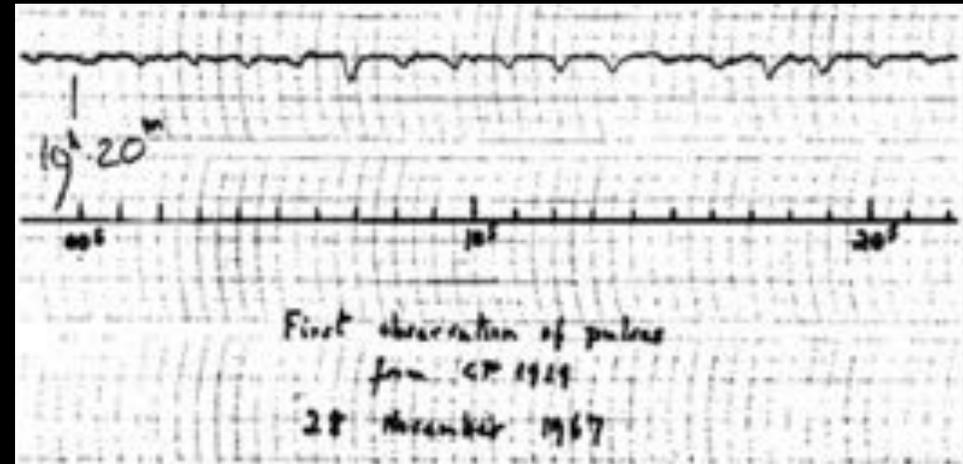
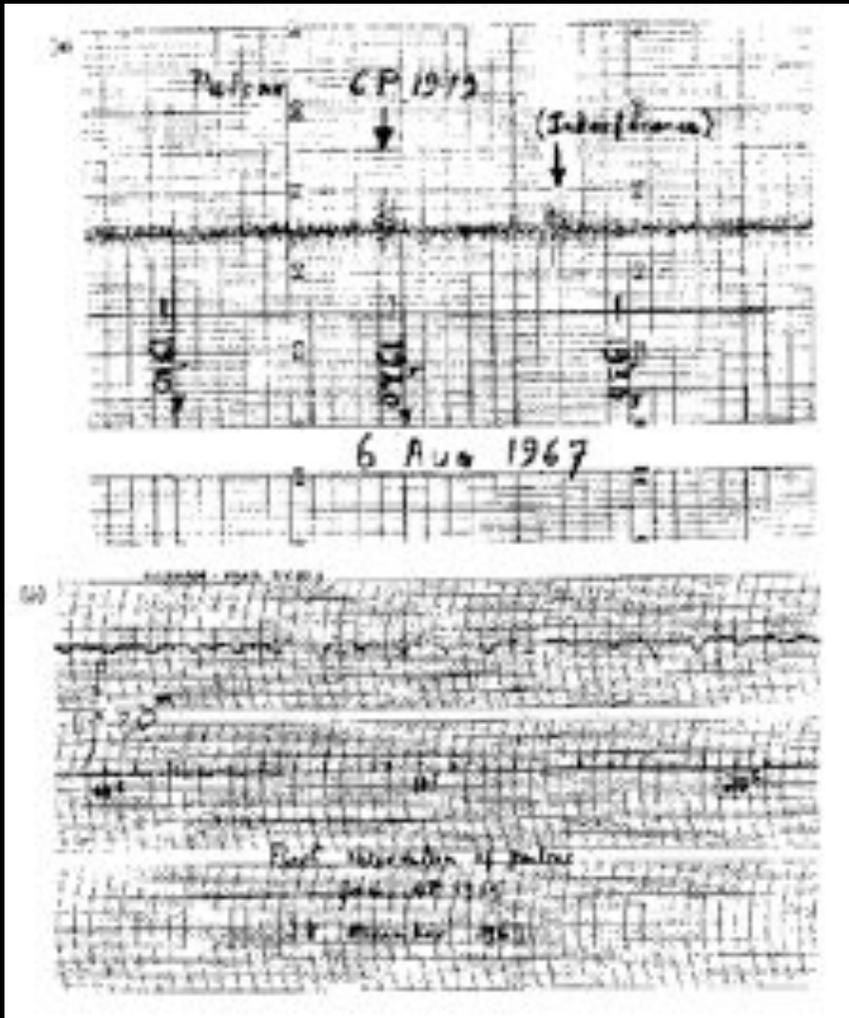
La nébuleuse du Crabe (ESO/VLT)

A cause de la conservation de la rotation (moment cinétique) et du magnétisme (flux magnétique) dans un effondrement gravitationnel, les étoiles à neutrons se forment avec une vitesse de rotation élevée et un champ magnétique intense.

La découverte des pulsars

La surface des étoiles à neutrons est trop petite pour pouvoir détecter directement le rayonnement thermique de l'étoile. En 1968, une découverte a cependant montré qu'observer les étoiles à neutrons allait devenir « facile ».

- 1967 : découverte des pulsars par Hewish & Bell



Le premier pulsar : LGM-1 ? PSR B 1919+21

La découverte des pulsars

La surface des étoiles à neutrons est trop petite pour pouvoir détecter directement le rayonnement thermique de l'étoile. En 1968, une découverte a cependant montré qu'observer les étoiles à neutrons allait devenir « facile ».

- 1967 : découverte des pulsars par Hewish & Bell

« We did not really believe that we had picked up signals from another civilization, but obviously the idea had crossed our minds and we had no proof that it was an entirely natural radio emission. It is an interesting problem - if one thinks one may have detected life elsewhere in the universe how does one announce the results responsibly ? Who does one tell first ? We did not solve the problem that afternoon, and I went home that evening very cross. Here was I trying to get a Ph.D. out of a new technique, and some silly lot of little green men had to choose my aerial and my frequency to communicate with us.. » (J. Bell 1977)

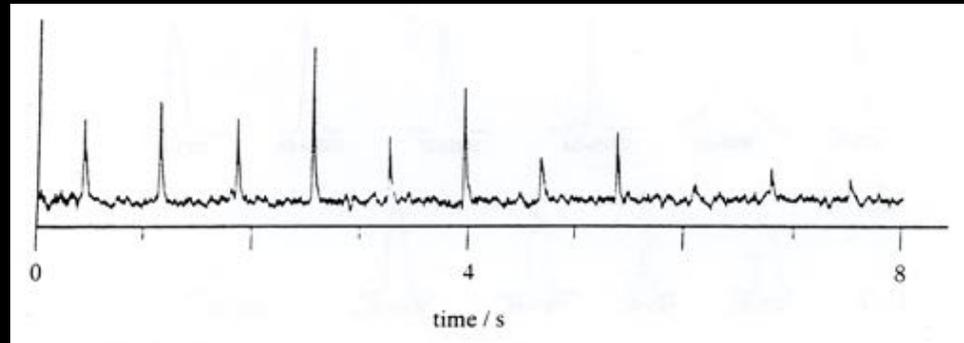
Jocelyn Bell



La découverte des pulsars

La surface des étoiles à neutrons est trop petite pour pouvoir détecter directement le rayonnement thermique de l'étoile. En 1968, une découverte a cependant montré qu'observer les étoiles à neutrons allait devenir « facile ».

- 1967 : découverte des pulsars par Hewish & Bell



- 1968 : identification des pulsars comme des étoiles à neutrons en rotation rapide et fortement magnétisée (Gold)
- 1968 : découverte des pulsars du Crabe et de Véla : lien avec les supernovae



Le reste de supernova de Vela



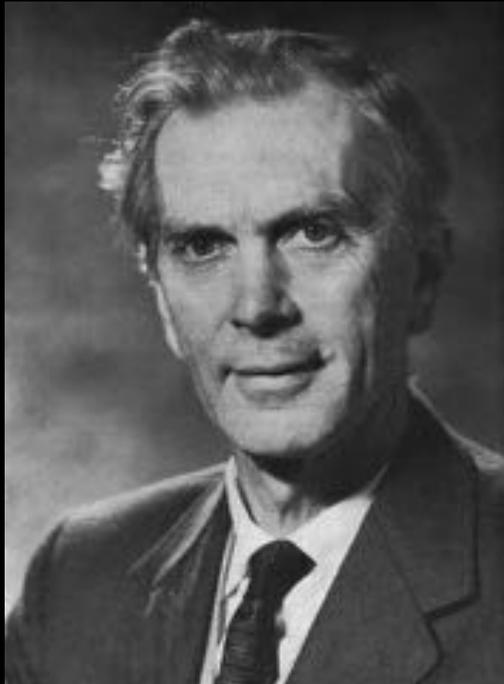
Le reste de supernova du Crabe

Les prix Nobel de l'astrophysique...

Prix Nobel de Physique 1974 :



« for their pioneering research in radio astrophysics: Ryle for his observations and inventions, in particular of the aperture synthesis technique, and Hewish for his decisive role in the discovery of pulsars »



Sir Martin Ryle



Antony Hewish

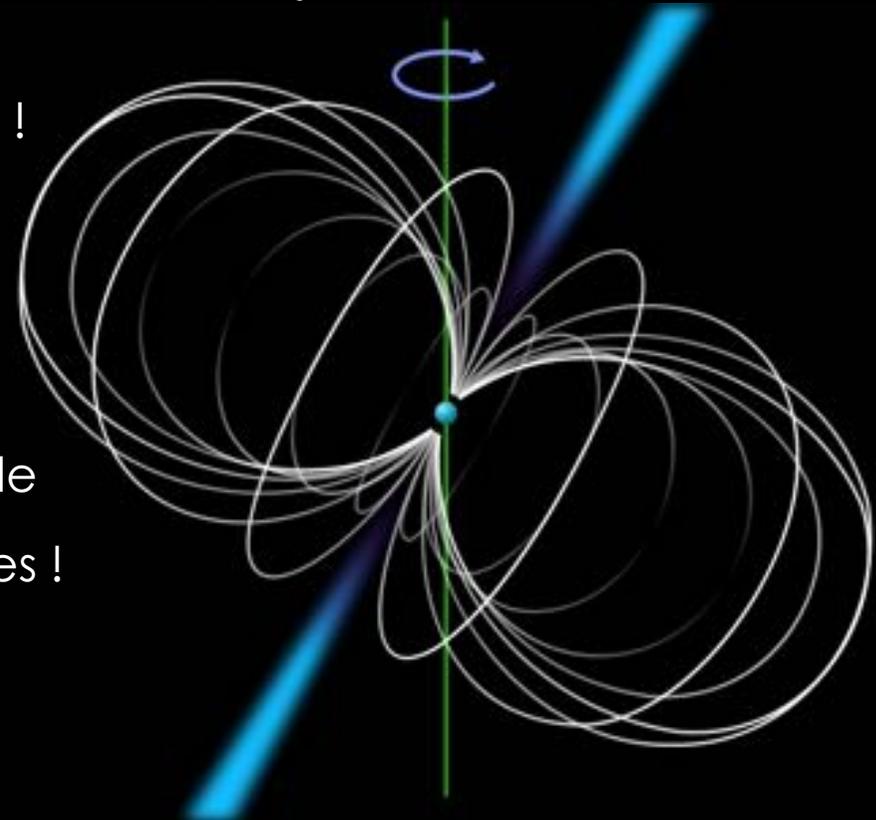


Jocelyn Bell
Burnell ???

Les pulsars

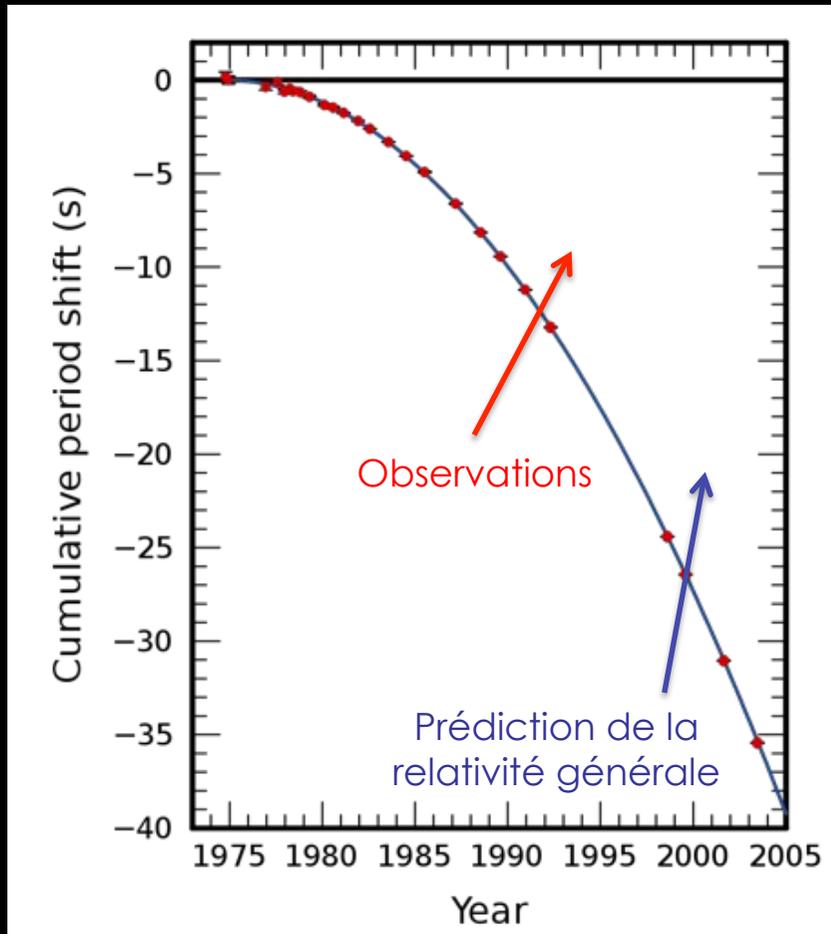
Les pulsars sont de merveilleuses horloges astronomiques...

- L'émission est dirigée dans un faisceau orienté selon l'axe des pôles magnétiques.
- Si cet axe n'est pas aligné avec l'axe de rotation : effet de phare
- La régularité est extrême : presque aussi bien que les horloges atomiques
- Exemples :
Crabe : $P = 33.4 \text{ ms}$ dérive = 36 ns par jour
Véla : $P = 89.3 \text{ ms}$ dérive = 11 ms par jour
- Vitesse de rotation :
périodes de quelques 10 ms à quelques s !
- Champ magnétique :
million à dizaine de milliards de Tesla
(Terre : 50 micro-Tesla)
- Depuis 1967 :
observations à toutes les longueurs d'onde
- 1982 : découverte des pulsars millisecondes !



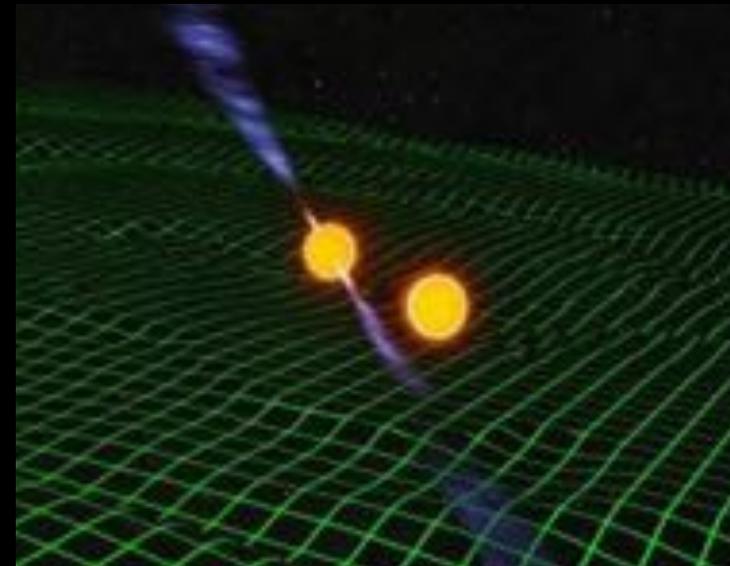
Tester la relativité générale

Un des meilleurs tests de la relativité générale est fourni par le pulsar binaire PSR B 1913+16. Un laboratoire dont aurait rêvé Einstein : un horloge de grande précision dans un système gravitationnel à 2 corps...



Hulse & Taylor 1975

- Le système perd de l'énergie et de la rotation par émission d'ondes gravitationnelles.
- Les deux étoiles à neutrons se rapprochent
- la période orbitale diminue



Vue d'artiste

Les prix Nobel de l'astrophysique...

Prix Nobel de Physique 1993 :



« for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation »

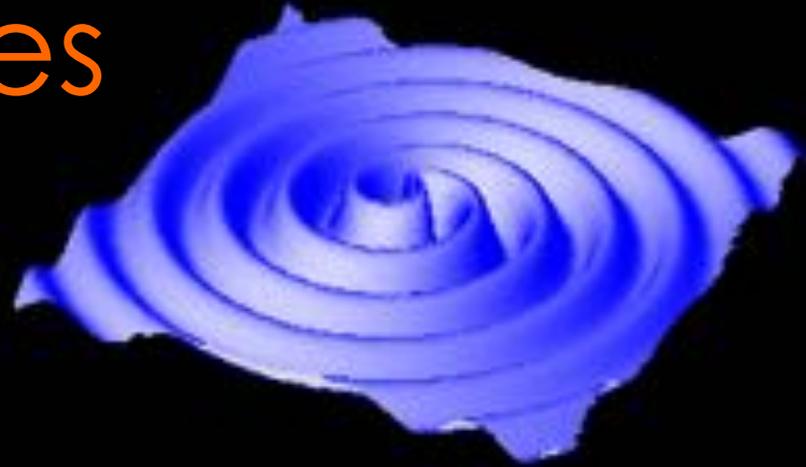


Russell A. Hulse



Joseph H. Taylor Jr.

Détecter les ondes gravitationnelles



Des projets expérimentaux d'une extrême complexité sont en cours pour essayer de détecter directement les ondes gravitationnelles. Les systèmes binaires d'étoiles à neutrons, au moment où les deux étoiles se rejoignent (coalescence) sont parmi les sources les plus attendues.

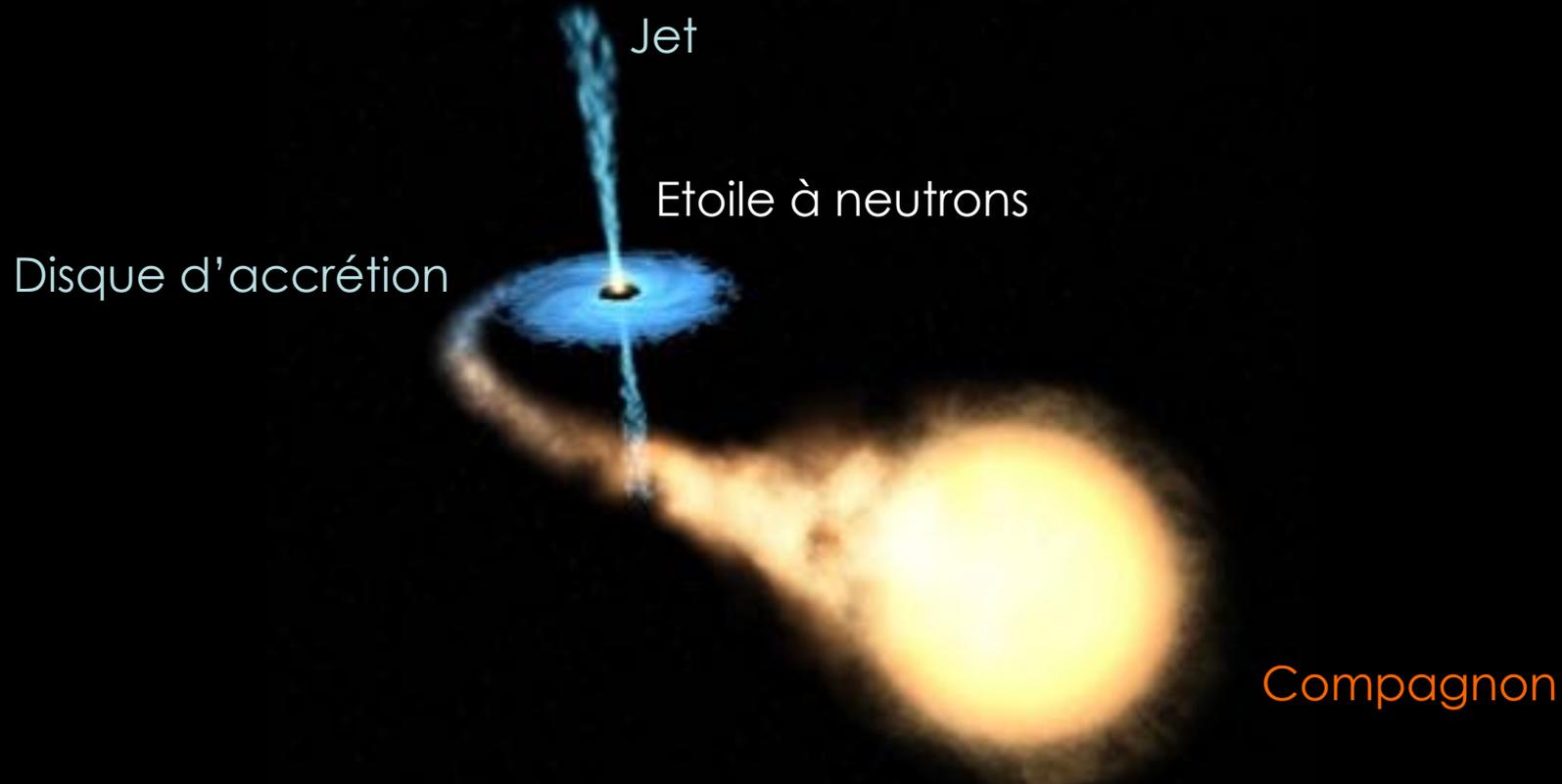
La nouvelle génération de détecteurs (advanced LIGO/VIRGO) entrera en fonctionnement en 2015 : les premières détections ?



Les détecteurs VIRGO et LIGO

Etoiles à neutrons accrétantes

Comme pour les naines blanches, les étoiles à neutrons deviennent des sources très brillantes (plutôt en X) lorsqu'elles accrètent la matière d'un compagnon. La première source X (Sco-X1) appartient à la catégorie de ces « binaires X ».

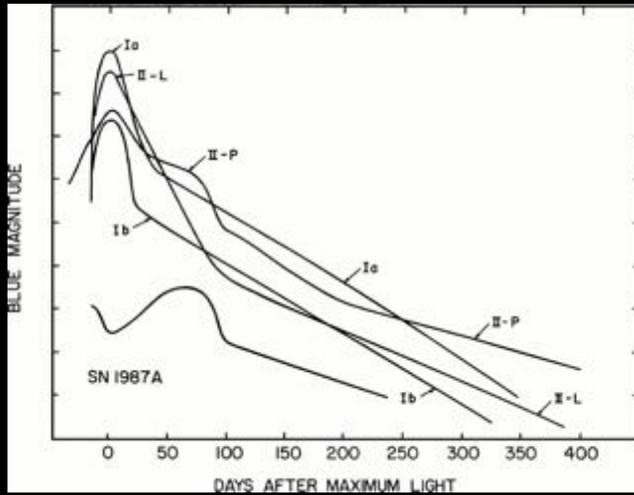


Le champ gravitationnel de l'étoiles à neutrons est si intense qu'une grande quantité d'énergie est libérée. On observe la lumière du disque d'accrétion et on constate également parfois la présence d'un jet à grande vitesse.

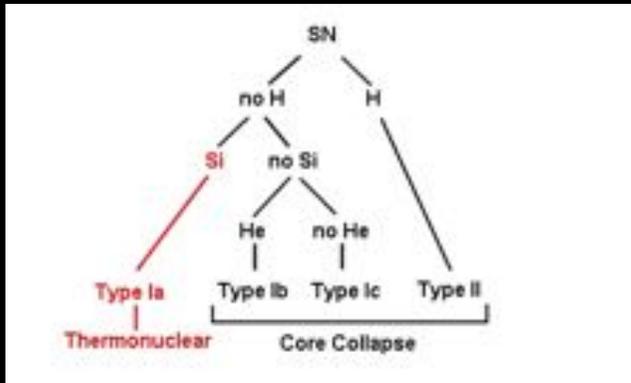
Comme pour les novae des naines blanches, des explosions thermonucléaires peuvent avoir lieu : les sursauts X.

Les supernovae

Les supernovae sont parmi les événements astronomiques les plus spectaculaires



Classification :



Une SN Ia dans la galaxie NGC 5584 (VLT)

Les Ia sont observées dans des galaxies avec des populations stellaires âgées
(progéniteur : naine blanche issue d'une étoile peu massive à longue durée de vie)

Les autres avec des populations stellaires jeunes

(progéniteur : formation d'une étoile à neutrons dans l'effondrement d'une étoile massive à courte durée de vie)

Les supernovae

Les supernovae sont parmi les événements astronomiques les plus spectaculaires

- Naissance de Geminga il y a 500 000 ans (étoile à neutrons la plus proche) : explosion plus brillante que la pleine Lune...
- Observations anciennes ? (Chine : -1400 ; 185 ; 386-387 ; 393)



FIGURE 47 - Les plus anciens témoignages écrits d'une supernova? Gauche et milieu : deux fragments d'os sacrés (ou fragments de carapace de tortue) datant du XIV^e siècle av. JC, sous la dynastie Shang. Ils rapportent l'observation d'événements qui pourraient être des supernovae. Seul le second fragment donne une direction, on ne peut donc pas dire s'il s'agit de deux descriptions du même phénomène. Droite : inscription chinoise trouvée sur le fragment du milieu « Le septième jour du mois, un jour « Ji-Si », une nouvelle étoile remarquable apparaît en compagnie d'[Antarès (α Sco)] » (figure tirée de Z. Wang, 1996).

SN 185 ? « La deuxième année de l'ère Chung-P'ing, sous le règne de l'empereur Hsiao-Ling, le dixième mois, jour « kwei-hai », une étoile invitée apparut dans Nam-Mên. Elle était aussi grande que la moitié d'un tapis ; elle brillait de cinq couleurs, et elle scintillait. Elle devint de plus en plus nette et disparut pendant le sixième mois de l'année suivante »



XMM FULL-FIELD

SN 185 ? RCW 86

Les supernovae

Les supernovae sont parmi les événements astronomiques les plus spectaculaires

- SN1006 : reste identifié en radio (PKS 1459-41)
(textes chinois, japonais, coréens, arabes, européens) :
visible en plein jour, elle donne une ombre aux objets la nuit...
- Astronome égyptien Ali Ibn Ridwan : « Je vais maintenant décrire le spectacle auquel j'ai assisté au début de mes études. Ce spectacle est apparu dans le signe zodiacal du Scorpion, en opposition avec le Soleil. Le Soleil ce jour là était à quinze degrés dans la constellation du Taureau et le phénomène dans le quinzième degré du Scorpion. C'était un corps circulaire de grande taille, deux et demi à trois fois plus grand que Vénus. Le ciel brillait à cause de sa lumière. L'intensité de sa lumière était un peu plus grande que le quart de la lumière de la lune ... »
- Chroniques du monastère bénédictin de Saint Gall (Suisse) : « une nouvelle étoile de taille inhabituelle est apparue ; elle scintillait d'apparence et était éblouissante pour les yeux, ce qui provoqua de l'inquiétude. De manière merveilleuse, elle se contractait parfois, d'autre fois grossissait, et même pouvait disparaître. Elle a été observée cependant pendant 3 mois [...] »

Les supernovae

Les supernovae sont parmi les événements astronomiques les plus spectaculaires

- SN1054 : naissance du pulsar du Crabe (textes chinois et japonais)
Visible en journée pendant 23 jours, de nuit pendant 20 mois.

- Très belle coopération scientifique sur presque 10 siècles :

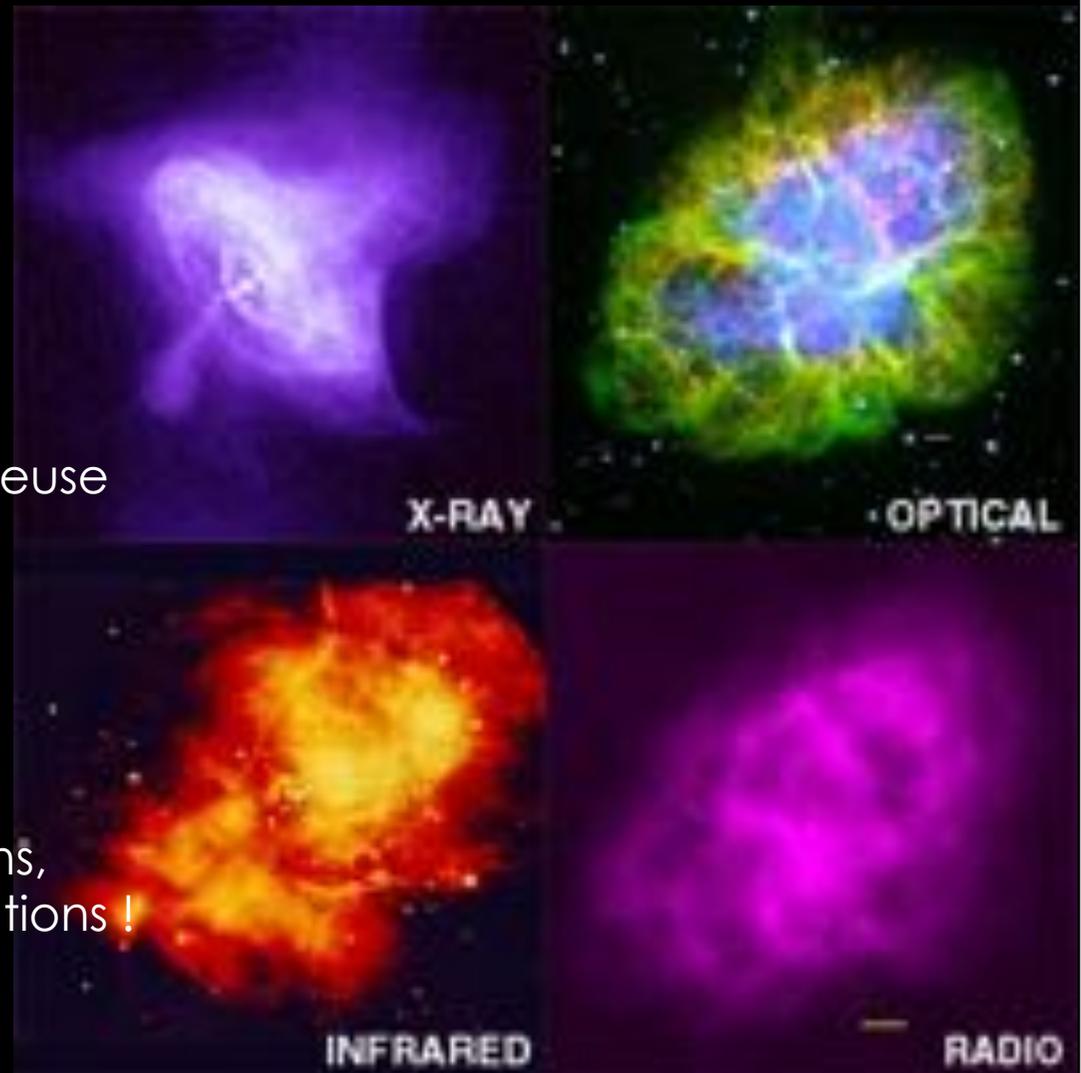
- observations chinoises en 1054

- découverte de la nébuleuse du Crabe dans le visible en 1731
(objet M1 du catalogue Messier)

- mesure de l'expansion de la nébuleuse au début du XX^{ème} siècle

- découverte du pulsar du Crabe en 1968

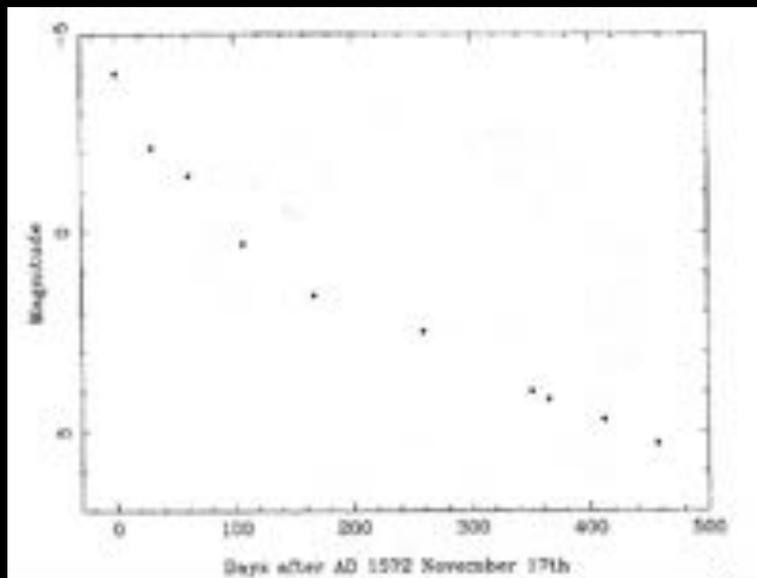
- le modèle théorique permet de dater le pulsar à partir de ses propriétés actuelles : environ 950 ans, en parfait accord avec les observations !



Les supernovae

Les supernovae sont parmi les événements astronomiques les plus spectaculaires

- SN1181 : textes chinois et japonais
- SN 1572 : observation par Tycho Brahé (visible pendant 15 mois dans Cassiopée)
« *nova stella* »

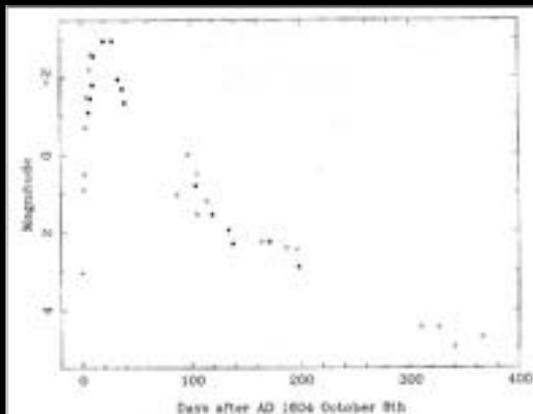


Chandra-Spitzer-Calar Alto

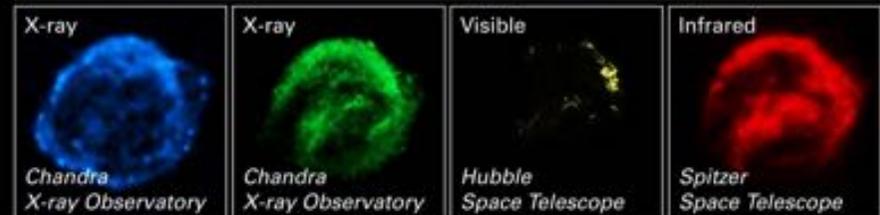
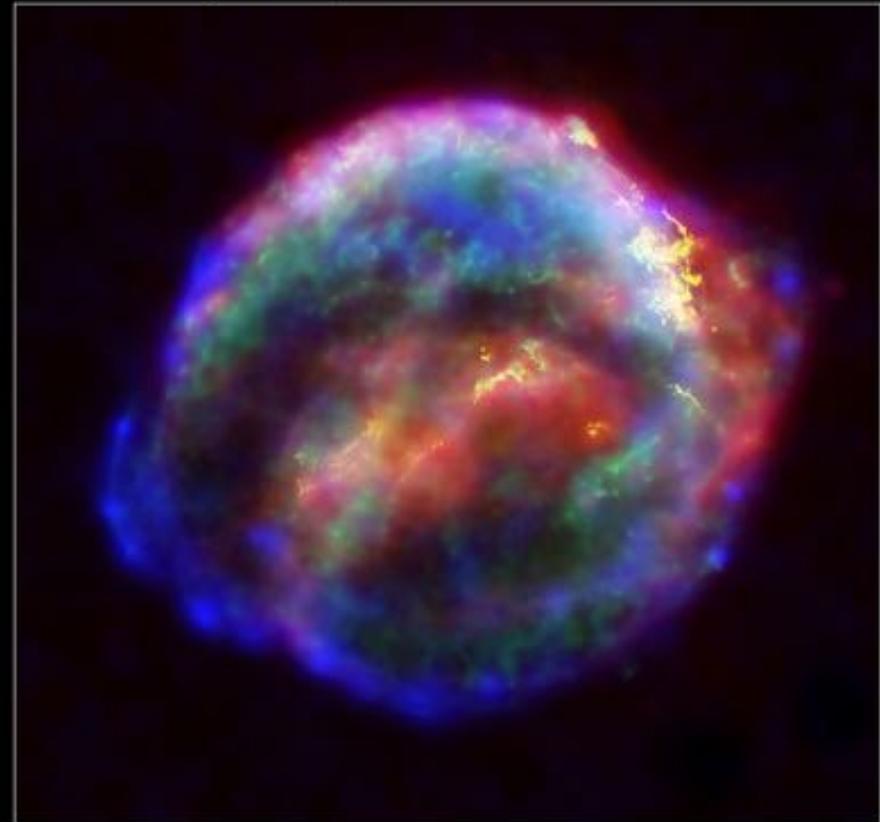
Les supernovae

Les supernovae sont parmi les événements astronomiques les plus spectaculaires

- SN 1604 : observation par Kepler (visible pendant 1 an dans Ophiuchus)



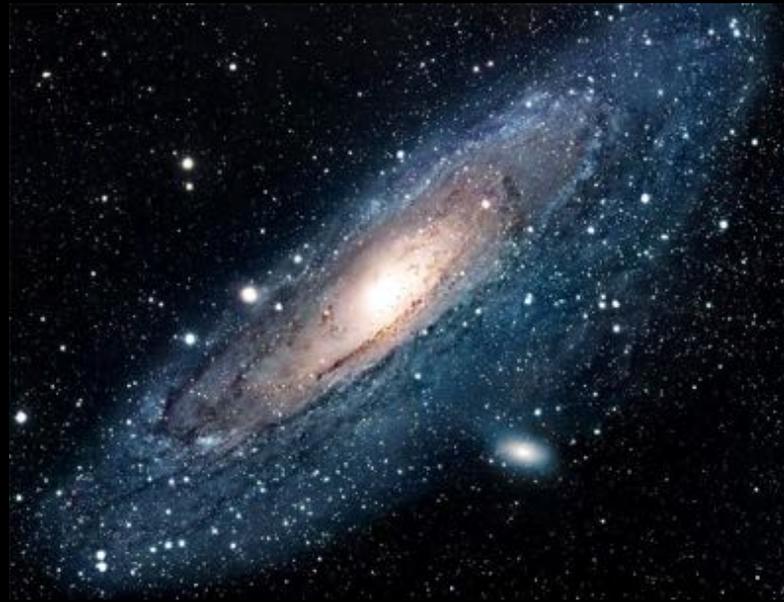
Kepler's Supernova Remnant • SN 1604



Les supernovae

Les supernovae sont parmi les événements astronomiques les plus spectaculaires

- Dans les années 1920-1930, on comprend que la Voie Lactée n'est pas unique mais que l'Univers contient beaucoup d'autres galaxies (→ cours n°9).
- Ces galaxies sont très distantes.
Par exemple, Andromède (M31) est à 2,5 millions d'années lumière.



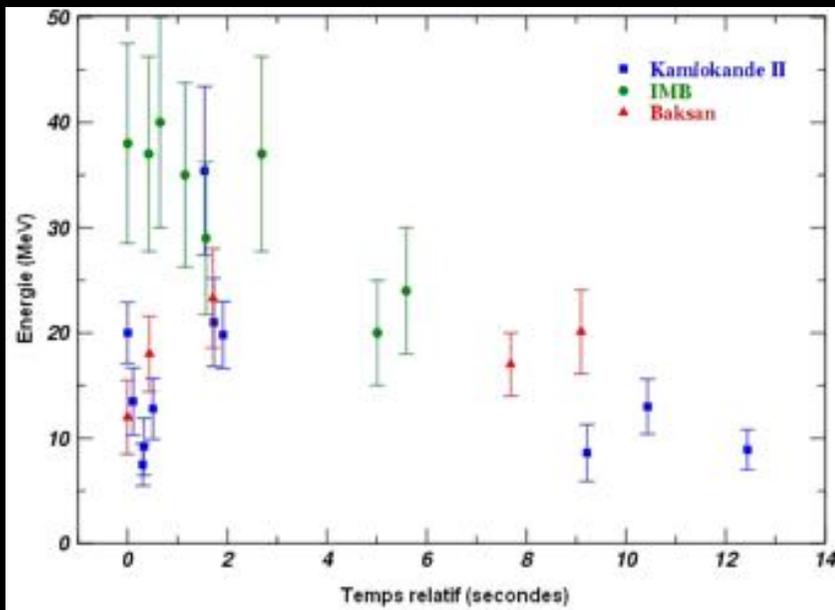
Andromède (NASA)

- En 1885, une nova a été observée dans Andromède
- En 1920, Lundmark comprend que cette nova extragalactique doit être beaucoup plus lumineuses que les novae habituelles de la Voie Lactée.
- En 1931, Baade & Zwicky proposent de les appeler *supernovae*
- En 1936 commence le premier programme de recherche de supernovae

Les supernovae

Les supernovae sont parmi les événements astronomiques les plus spectaculaires

- SN1987A dans le grand nuage de Magellan



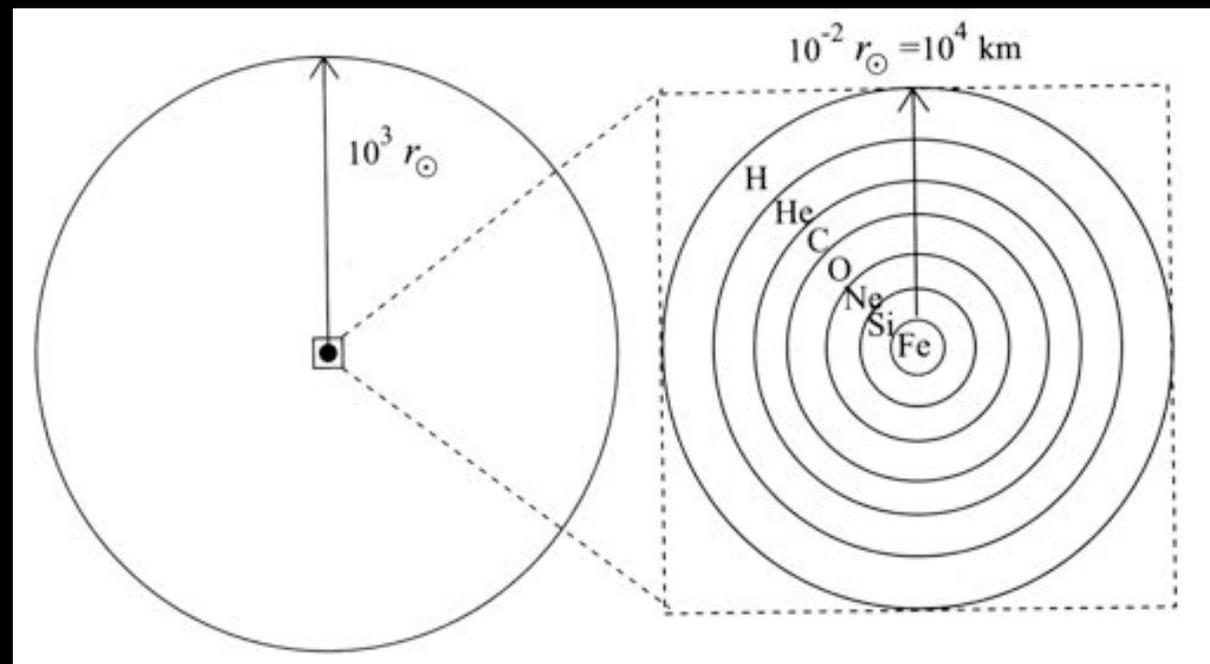
La théorie prédit qu'une grande partie de l'énergie libérée dans l'effondrement d'une étoile est rayonnée sous forme de neutrinos. Les observations de SN1987A ont confirmé cette prédiction !

Etoiles à neutrons & Supernovae

Les étoiles à neutrons se forment lorsque le cœur de fer d'une étoile massive s'effondre (cf. cours n°6).

- A très haute densité, la matière se neutronise
- L'effondrement du cœur se fait en quasi-chute libre : quelques ms !
- Lorsque l'étoile à neutrons se forme au cœur, le reste de l'enveloppe de l'étoile rebondit : c'est l'explosion de supernova
- Les conditions sont favorables à une nucléosynthèse spécifique (dite explosive) : formation d'éléments plus lourds que le fer.

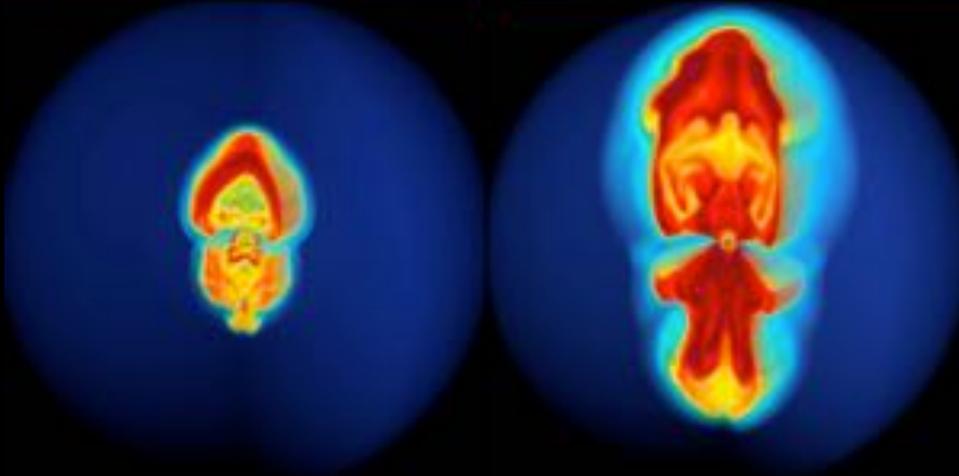
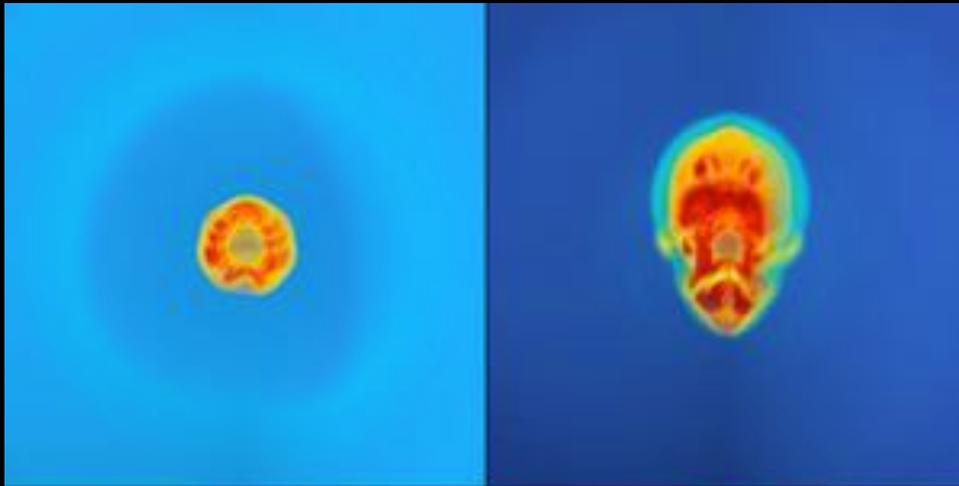
Structure en
« pelure d'oignon »
de l'étoile pré-supernova



Etoiles à neutrons & Supernovae

Les étoiles à neutrons se forment lorsque le cœur de fer d'une étoile massive s'effondre (cf. cours n°6).

- Le scénario général est bien compris et bien validé par de nombreuses observations différentes
- Les détails du mécanisme sont complexes et encore mal maîtrisés.



Simulation numérique de l'explosion d'une étoile de $11 M_{\text{Soleil}}$ effectuée au MPA-Garching.

Images à 0.1 ; 0.18 ; 0.26 et 0.32 s

Suite du cours n°7

Il reste à traiter :

- La fin de la discussion sur les supernovae
- Le lien entre supernovae et rayonnement cosmique
- Les trous noirs

Ces points seront présentés lors du cours n°9 sur la Voie Lactée le 16 janvier (d'ici là : lundi 9 janvier, cours de Patrick Boissé sur les nuages interstellaires et la formation des étoiles).

Un résumé du cours n°7 sera communiqué le 16 janvier 2012 et les transparents complets de ce cours déposés sur le site web.

Bonnes fêtes de fin d'année à tous !

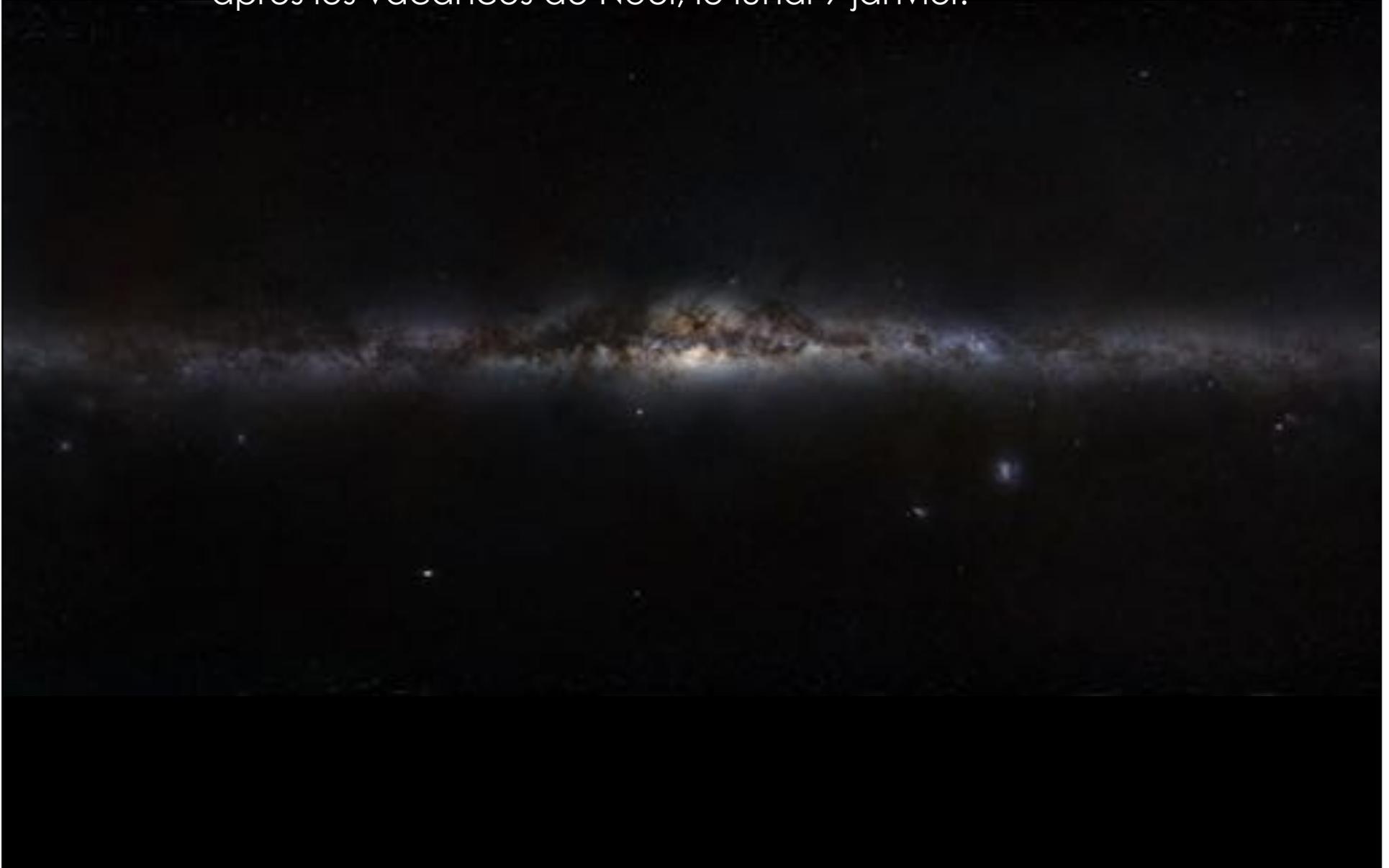
Prochains cours



Montage ESO de photographies prises au Chili (La Silla & Paranal) et aux Canaries (La Palma)

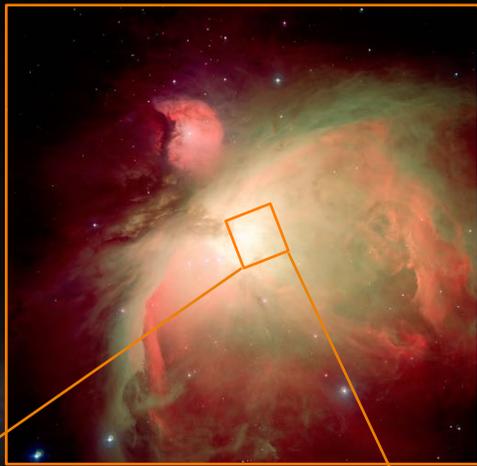
Prochains cours

Cours n°8 – Les nuages interstellaires et la formation des étoiles, par P. Boissé :
après les vacances de Noël, le lundi 9 janvier.



Prochains cours

Cours n°8 – Les nuages interstellaires et la formation des étoiles, par P. Boissé :
après les vacances de Noël, le lundi 9 janvier.



La nébuleuse d'Orion
(ESO-2.2 m)



Amas du trapèze
(HST)

La nébuleuse d'Orion
à 1350 années lumière

Orion



Prochains cours

Construire la vision moderne de l'Univers

1. Introduction: qu'est ce que l'astrophysique
 2. Notre étoile, le Soleil
 3. De la lunette de Galilée
aux télescopes spatiaux :
l'observation en astronomie
 4. Panorama du système solaire
 5. A la recherche d'autres mondes,
les exoplanètes
 6. Vie et mort des étoiles
 7. Explosions et monstres cosmiques :
supernovae, étoiles à neutrons, trous noirs
 8. Les nuages interstellaires
et la formation des étoiles
 9. La Voie Lactée et les galaxies proches
 10. L'Univers lointain
 11. La cosmologie moderne :
un Univers en évolution
 12. Conclusion :
les défis pour l'astrophysique contemporaine
- 

Page web du cours

Les transparents + quelques liens + une courte bibliographie

http://www.iap.fr/users/daigne/FD_IAP/UIA2011.html

Courriels :

Patrick Boissé :	boisse@iap.fr
Frédéric Daigne :	daigne@iap.fr