

NUCLÉOSYNTHÈSE

**FORMATION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES
DANS L'UNIVERS**

VIE ET MORT DES ÉTOILES

Gérard SCACCHI

ALS 8/12/2011

ATOME

REPRÉSENTATION SYMBOLIQUE DU NOYAU

nombre de nucléons =
nombre de masse



nombre de protons =
numéro atomique =
nombre de charge

élément chimique

nombre de neutrons
= $A - Z$



Isotopes : même **Z**, nombre de neutrons différent : 2_1H 3_1H
deutérium tritium

ATOMES (suite)

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

actuellement : **118** éléments connus dont 94 naturels

Rôle particulier du **Fer** ($Z = 26$)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1.008 H 1																	4.003 He 2
6.941 Li 3	9.012 Be 4											10.81 B 5	12.01 C 6	14.01 N 7	16.0 O 8	19.0 F 9	20.18 Ne 10
22.99 Na 11	24.31 Mg 12											26.98 Al 13	28.09 Si 14	30.97 P 15	32.06 S 16	35.45 Cl 17	39.95 Ar 18
39.1 K 19	40.08 Ca 20	44.96 Sc 21	47.87 Ti 22	50.94 V 23	52.0 Cr 24	54.94 Mn 25	55.85 Fe 26	58.93 Co 27	58.69 Ni 28	63.55 Cu 29	65.39 Zn 30	69.72 Ga 31	72.64 Ge 32	74.92 As 33	78.96 Se 34	79.9 Br 35	83.8 Kr 36
85.47 Rb 37	87.62 Sr 38	88.91 Y 39	91.22 Zr 40	92.91 Nb 41	95.94 Mo 42	98.91 Tc 43	101.1 Ru 44	102.9 Rh 45	106.4 Pd 46	107.9 Ag 47	112.4 Cd 48	114.8 In 49	118.7 Sn 50	121.8 Sb 51	127.6 Te 52	126.9 I 53	131.3 Xe 54
132.9 Cs 55	137.2 Ba 56	138.9 La 57	178.5 Hf 72	180.9 Ta 73	183.8 W 74	186.2 Re 75	190.2 Os 76	192.2 Ir 77	195.1 Pt 78	197.0 Au 79	200.6 Hg 80	204.4 Tl 81	207.2 Pb 82	209.0 Bi 83	209.0 Po 84	210.0 At 85	222.0 Rn 86
223.0 Fr 87	226.0 Ra 88	227.0 Ac 89	261.1 Rf 104	262.1 Db 105	263.1 Sg 106	262.1 Bh 107	265.1 Hs 108	266.1 Mt 109	271.0 Ds 110	272.0 Rg 111							
			140.1 Ce 58	140.9 Pr 59	144.2 Nd 60	146.9 Pm 61	150.4 Sm 62	152.0 Eu 63	157.3 Gd 64	158.9 Tb 65	162.5 Dy 66	164.9 Ho 67	167.3 Er 68	168.9 Tm 69	173.0 Yb 70	175.0 Lu 71	
			232.0 Th 90	231.0 Pa 91	238.0 U 92	237.0 Np 93	244.1 Pu 94	243.1 Am 95	247.1 Cm 96	247.1 Bk 97	251.1 Cf 98	252.1 Es 99	257.1 Fm 100	258.1 Md 101	259.1 No 102	262.1 Lr 103	

RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Entre **noyaux atomiques** uniquement (pas d'intervention des électrons)
≠ chimie

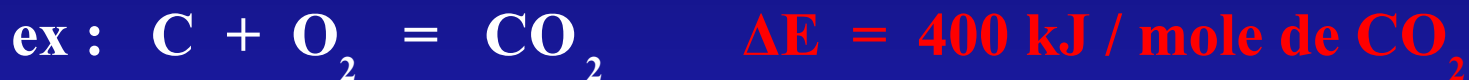
RÉACTION DE FUSION

ex : **H** → **He** (coeur des étoiles . 10 millions de K)



$$\Delta E = (4 m_{\text{H}} - m_{\text{He}} - 2 m_{\text{e}^+}) c^2 \quad \text{perte de masse}$$
$$= 2,4 \cdot 10^9 \text{ kJ / mole} \quad \text{énergie libérée par la formation d'une mole de He}$$

Comparaison avec les **réactions chimiques**



Facteur $\approx 10^7$ (10 millions) entre réactions **nucléaires**
et réactions **chimiques**

Soleil : chaque seconde : consommation de 600 millions de t de H
perte de masse : **4 millions de t** → énergie

NUCLÉOSYNTHÈSE

3 types :

1 – Nucléosynthèse **primordiale** (naissance univers)

→ éléments **très légers** : 1_1H 2_1H 3_1H 3_2He 4_2He (7_3Li)

2 – Nucléosynthèse **stellaire** (étoiles) :

- phase « **calme** » → tous les éléments entre **Li** et **Fe**

- phase « **explosive** » → tous les éléments **plus lourds** que **Fe**

3 - Nucléosynthèse **interstellaire**

→ **Li**, **Be** et **B**

NUCLÉOSYNTHÈSE PRIMORDIALE

Donne naissance aux **éléments très légers**

Modèle du **big-bang (b.b.)** 13,7 milliards d'années

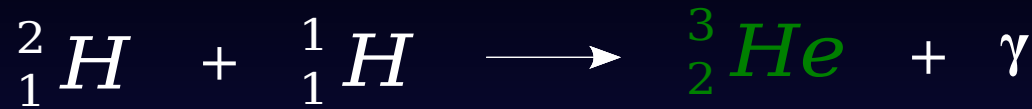
- **Jusqu'à 1 s après le b.b. : $T = 10^{10}$ K** (10 milliards)
- « Soupe de particules élémentaires », dont les plus connues :

photons γ , **électrons** ${}_{-1}^0 e^{-}$, **protons** ${}_{1}^1 H$, **neutrons** ${}_{0}^1 n$

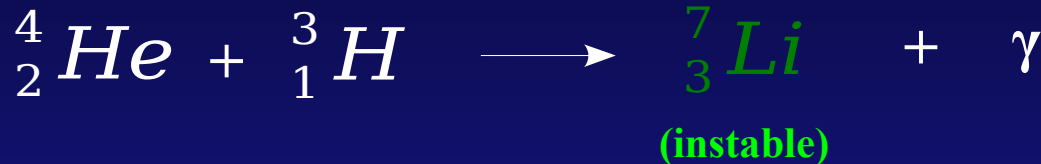
- **2 à 3 minutes après le b.b. : $T = 10^9$ K** (1 milliard)
nombreuses réactions parmi lesquelles :



NUCLÉOSYNTHÈSE PRIMORDIALE (suite)



Abondances relatives
prévues par le modèle du b.b.
≡ celles observées



**H et He = 98 % de la
matière dans l'Univers**
75 % de H , 23 % de He
% atomiques : **92** et **7**

Ce sont **les plus vieux noyaux atomiques du monde**
Présents (H surtout) en chacun de nous

TOUTE LA SUITE (nucléosynthèses stellaire et interstellaire) =
transformation et **diversification** de la matière créée au moment du b.b.
Il n'y a plus de création nette de matière depuis

NUCLÉOSYNTHÈSE STELLAIRE « CALME »

Après quelques centaines de millions d'années , la matière s'organise en **étoiles** , galaxies , amas de galaxies ...

FONCTIONNEMENT D'UNE ÉTOILE

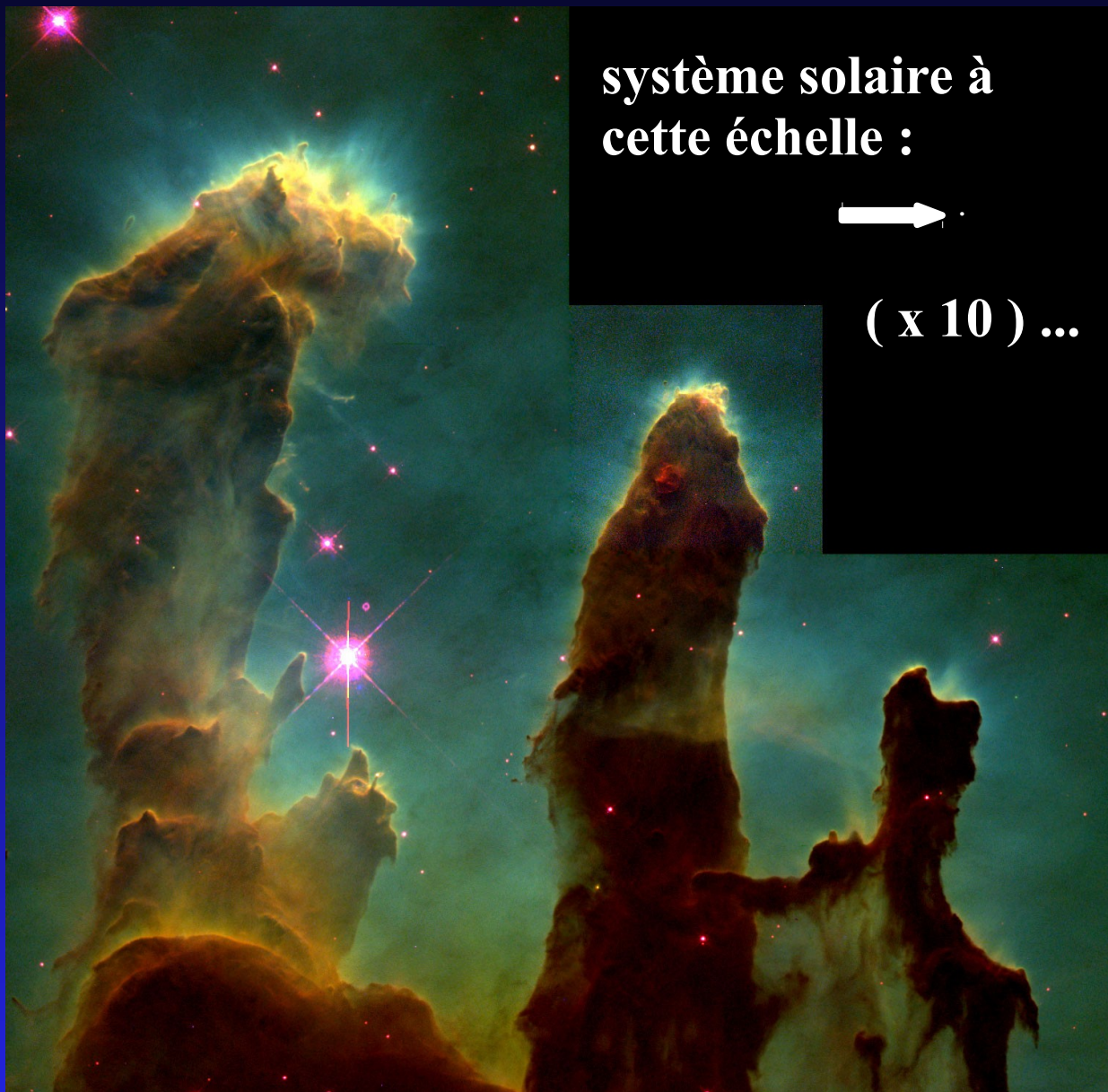
Corps gazeux , en **équilibre hydrostatique** (pendant la phase « calme ») :

- **gravitation** qui tend à comprimer l'étoile
- **réactions thermonucléaires au centre** , qui s'opposent à cette contraction (pression des gaz + pression de radiation)

Équilibre stable

NUCLÉOSYNTHÈSE STELLAIRE « CALME » (suite)

ALTERNANCE DE CYCLES DANS LE FONCTIONNEMENT « CALME » D'UNE ÉTOILE



Naissance d'une étoile :
contraction d'un **nuage de gaz (H_2)** et de poussières

Ex :

« les piliers de la création »
= « pouponnière d'étoiles »
dans la nébuleuse de l'Aigle
(télescope Hubble - 1995)
7000 années-lumière de la
Terre

1 a.l. = 10 000 milliards km

Taille des nuages : 3 a.l.

Pour comparaison :
dimensions du **système solaire** : **20 heures-lumière**

NUCLÉOSYNTHÈSE STELLAIRE « CALME » (suite)

ALTERNANCE DE CYCLES DANS LE FONCTIONNEMENT « CALME » D'UNE ÉTOILE

Contraction initiale du nuage de gaz : $T \nearrow$ ($10 \cdot 10^6$ K) \rightarrow **fusion de H** \rightarrow **He**
(premier équilibre)

épuisement de **He** \leftarrow **fusion de He** \leftarrow **nouvelle contraction** \leftarrow épuisement de **H**
 \rightarrow **C et O** (second équilibre) ($T = 100 \cdot 10^6$ K)

nouvelle contraction \rightarrow **fusion de C** \rightarrow etc.... jusqu'à $4 \cdot 10^9$ K (4 milliards)
($T = 800 \cdot 10^6$ K) \rightarrow **Ne et Mg** (nouvel équilibre)

Selon la **masse initiale M_e** de l'étoile : **arrêt** \pm tôt dans cet enchaînement

NUCLÉOSYNTHÈSE STELLAIRE « CALME » (suite)

1 – CONDITIONS D' « ALLUMAGE » DES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Pour **TOUTES** les étoiles : contraction initiale d'un **nuage de gaz (H_2)**
→ **échauffement**

Si : masse de gaz $M_e < 0,08 M_s$ (masse solaire) **pas d'allumage**
des réactions thermonucléaires
→ **naine brune** = « **étoile manquée** », intermédiaire entre
une planète géante et une « vraie » étoile , de petite taille
(**naine rouge**)
destin : refroidissement très lent

Si : masse de gaz $M_e \geq 0,08 M_s$ **allumage de la fusion de H**
→ **vraie étoile**

NUCLÉOSYNTHÈSE STELLAIRE « CALME » (suite)

2 – FUSION DE L'HYDROGÈNE

Nécessite $T = 10 \cdot 10^6 \text{ K}$ (10 millions)

Concerne l'évolution nucléaire de **90 %** des **200 milliards** d'étoiles de notre Galaxie

1er maillon de la chaîne de nucléosynthèse stellaire

2 manières de fusionner H : cycle proton-proton

cycle C N O (catalytique - étoiles massives)

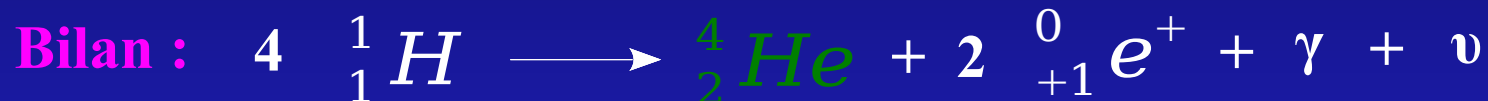
Cycle proton – proton (cycle p-p) :

Cycle important pour les **petites et moyennes étoiles**
(cycle p-p = 9 / 10 de l'énergie du **Soleil**)

$10 \cdot 10^6 \text{ K} < T < 20 \cdot 10^6 \text{ K}$ (Soleil : 15 millions K)

NUCLÉOSYNTHÈSE STELLAIRE « CALME » (suite)

Mécanisme du cycle proton -proton



(calcul de l'énergie dégagée :cf précédemment)

NUCLÉOSYNTHÈSE STELLAIRE « CALME » (suite)

Fusion de H

processus **lent** (par rapport aux autres fusions)
grande quantité de H

explique la **longévité** des étoiles moyennes
(Soleil : $10 \cdot 10^9$ années)

ÉPUISEMENT DE H

→ nouvelle contraction

si $M_e > 1/3 M_s$
(Soleil)

contraction
suffisante pour
atteindre



$T = 100 \cdot 10^6$ K (100 millions)

FUSION de He

si $M_e < 1/3 M_s$
arrêt à ce stade

contraction insuffisante
pour allumer la fusion de He

→ refroidissement

→ petite **naine noire**

NUCLÉOSYNTHÈSE STELLAIRE « CALME » (suite)

3 – FUSION DE L'HÉLIUM

$T = 100.10^6 \text{ K}$ (100 millions) $M_e > 1/3 M_s$

au coeur de l'étoile :



à la fin de la phase de fusion de He : **coeur de C et O**

ÉPUISEMENT DE He

→ nouvelle contraction

si $M_e > 8 M_s$
contraction suffisante
pour atteindre

$T = 800.10^6 \text{ K}$

FUSION DE C (puis des suivants)

si $M_e < 8 M_s$ cas du **Soleil**
arrêt à ce stade
(cf. diapos suivantes)

NUCLÉOSYNTHÈSE STELLAIRE « CALME » (suite)

**SORT DES ÉTOILES DE MASSE M_e : $1/3 M_s < M_e < 8 M_s$
(type Soleil)**

- **coeur** : fusion de He \longrightarrow C et O très haute T ($100 \cdot 10^6$ K)
enveloppe (moins chaude) : H restant commence à fusionner en He
 \longrightarrow fusion en couches \longrightarrow dilatation énorme des régions externes
de l'étoile : l'étoile = géante rouge , qui perd une partie de son enveloppe
sous forme d'un vent stellaire relativement lent (20 km/s) et dense

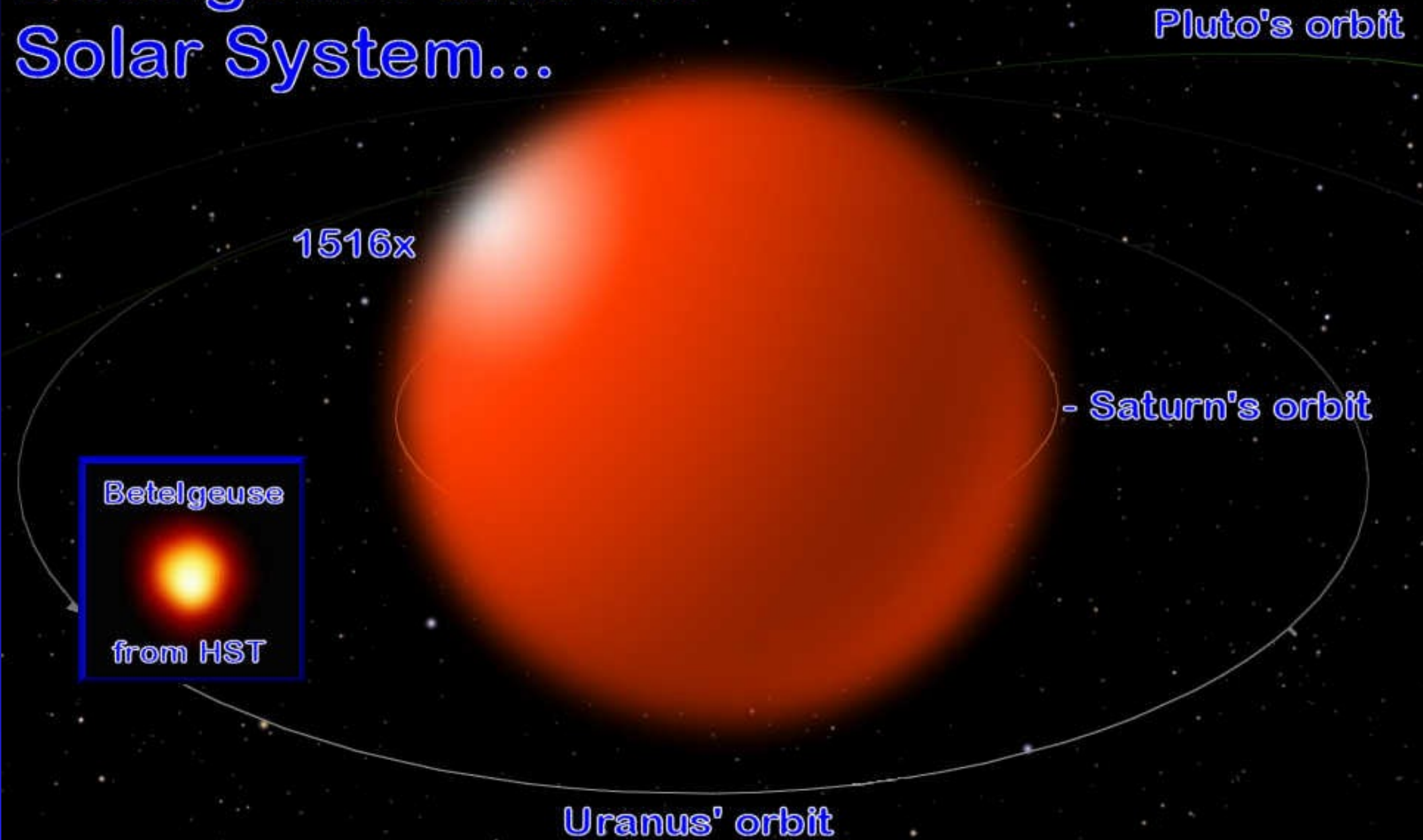
Echanges entre le coeur et l'atmosphère de l'étoile \longrightarrow enrichissement
du milieu interstellaire en C et O

Ex du Soleil : dans 5 milliards d'années \longrightarrow géante rouge
rayon multiplié par 200 : $0,7 \cdot 10^6 \longrightarrow 150 \cdot 10^6$ km
il « absorbera » l'orbite de Mercure et celle de Vénus
et atteindra celle de la Terre (carbonisée)



Taille du **Soleil** comparée à celles des étoiles **Géantes** et **Super Géantes rouges**
(1 pixel)

Betelgeuse and the Solar System...



NUCLÉOSYNTHÈSE STELLAIRE « CALME » (suite)

SORT DES ÉTOILES DE MASSE M_e : $1/3 M_s < M_e < 8 M_s$
(suite) (type Soleil)

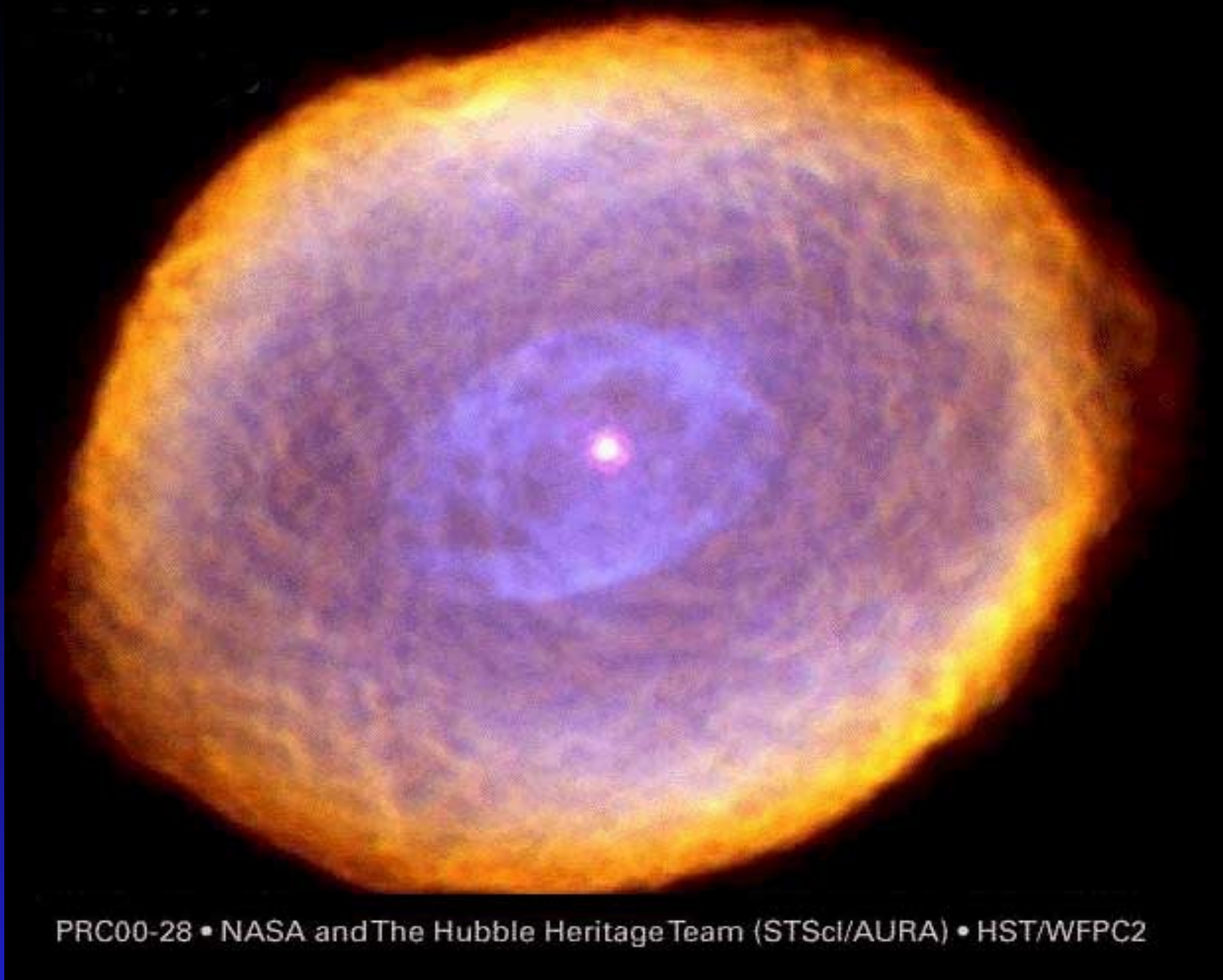
- puis **épuisement de He** : contraction du coeur de C et O \longrightarrow **naine blanche**
T = 20 à 50 000 K **Plus d'activité thermonucléaire** : étoile morte
soutenue par la P de dégénérescence des e^- (\longrightarrow volume réduit)
diamètre \approx terrestre **densité = 1 t / cm³**
refroidissement (dizaines de milliards d'années) \longrightarrow **naine noire**
(**cristallisation en diamant**)
- lors de la contraction en naine blanche : vent stellaire 100 fois + rapide
(2000 km/s) qui rattrape le matériau du vent lent \longrightarrow compression en
une coquille , gonflée par la P \longrightarrow **nébuleuse planétaire** avec la naine
blanche au centre



**Nébuleuse
planétaire
M 57 (Lyre)**

**2000 a.l.
diamètre : 1,3 a.l.**

**Naine blanche
au centre**



PRC00-28 • NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • HST/WFPC2

**Nébuleuse planétaire du Spirographe (à 2000 a.l. Constellation du Lièvre)
Naine blanche au centre**

NUCLÉOSYNTHÈSE STELLAIRE « CALME » (fin)

4 – FUSIONS SUIVANTES , POUR LES ETOILES : $M_e > 8 M_s$

fusion \rightarrow épuisement \rightarrow nouvelle contraction \rightarrow fusion \rightarrow etc...
nouvelle T de la « cendre » précédente

	durée (années)					
	500 000	200	1	0,5	1 jour	tous les éléments jusqu'au FER
He \rightarrow	C \rightarrow	Ne \rightarrow	O \rightarrow	Si \rightarrow		
	$100 \cdot 10^6$	$800 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^9$	$3,2 \cdot 10^9$	
	température (K)					

Remplissage du coeur de l'étoile par le **Fer** = dernière phase de la nucléosynthèse « calme » car **le noyau de fer ($Z = 26$, $A = 56$) est le plus stable de tous les noyaux** \rightarrow aucune réaction nucléaire exothermique (fusion ou fission) **à partir du fer** \rightarrow la gravitation l'emporte (car $M_e > 8 M_s$)
 \rightarrow effondrement du coeur = **SUPERNOVA (SN II)**

NUCLÉOSYNTHÈSE STELLAIRE « EXPLOSIVE »



A la fin de la nucléosynthèse « calme » : effondrement brutal du **coeur de Fer** (en **qq s**) \longrightarrow énergie colossale (de gravitation) . T atteint des **dizaines de milliards de K** \longrightarrow **rayonnement γ** intense qui va **fournir** au fer l'énergie nécessaire pour réagir

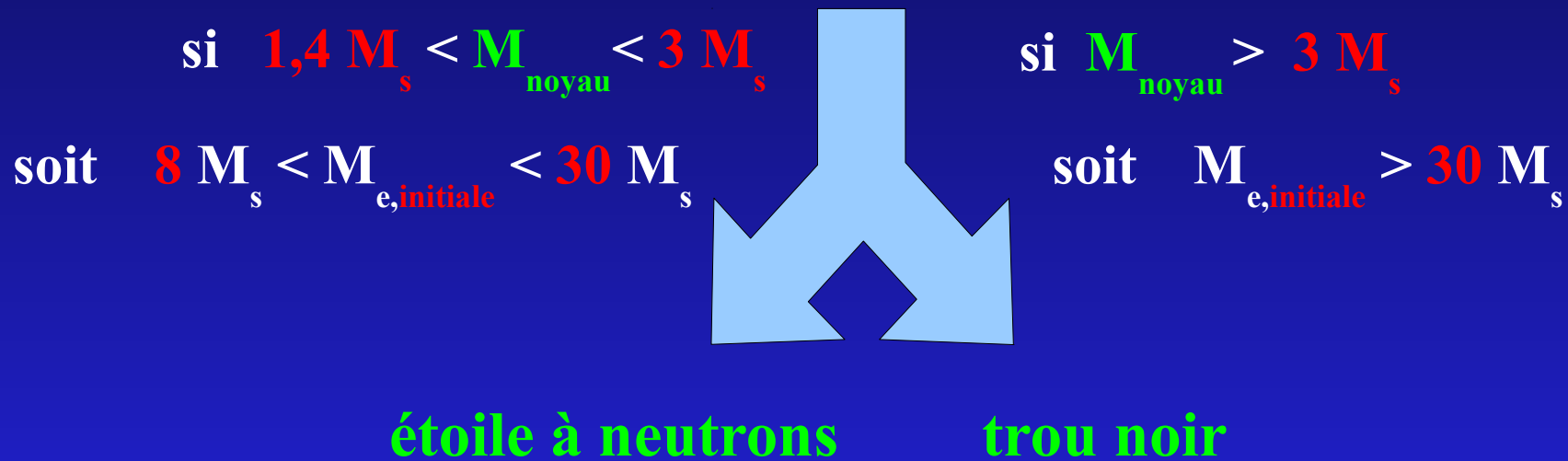
- **Sort du coeur de l'étoile** : détruit par **photodégradation** (rayons γ) :



Tout le noyau de fer est transformé en neutrons , par capture de **26 e^{-}** par les **26 p** \longrightarrow **26 n** (+ 30 n de départ = **56 n**)

NUCLÉOSYNTHÈSE « EXPLOSIVE » (suite)

A partir d'étoiles massives (c'est le cas : $M_e > 8 M_s$), la masse du **noyau** est $> 1,4 M_s$ la « **masse de Chandrasekhar** » = valeur minimale pour qu'une étoile devienne une **étoile à neutrons** ou un **trou noir** , selon M_e initiale (sinon : **naines blanches** seulement)



NUCLÉOSYNTHÈSE « EXPLOSIVE » (suite)

ÉTOILE A NEUTRONS ($8 M_s < M_{e,initiale} < 30 M_s$)

Les **neutrons** refusent de se laisser comprimer « indéfiniment »
(comme les « électrons dégénérés » dans les naines blanches)

→ **arrêt brutal de la contraction du coeur**

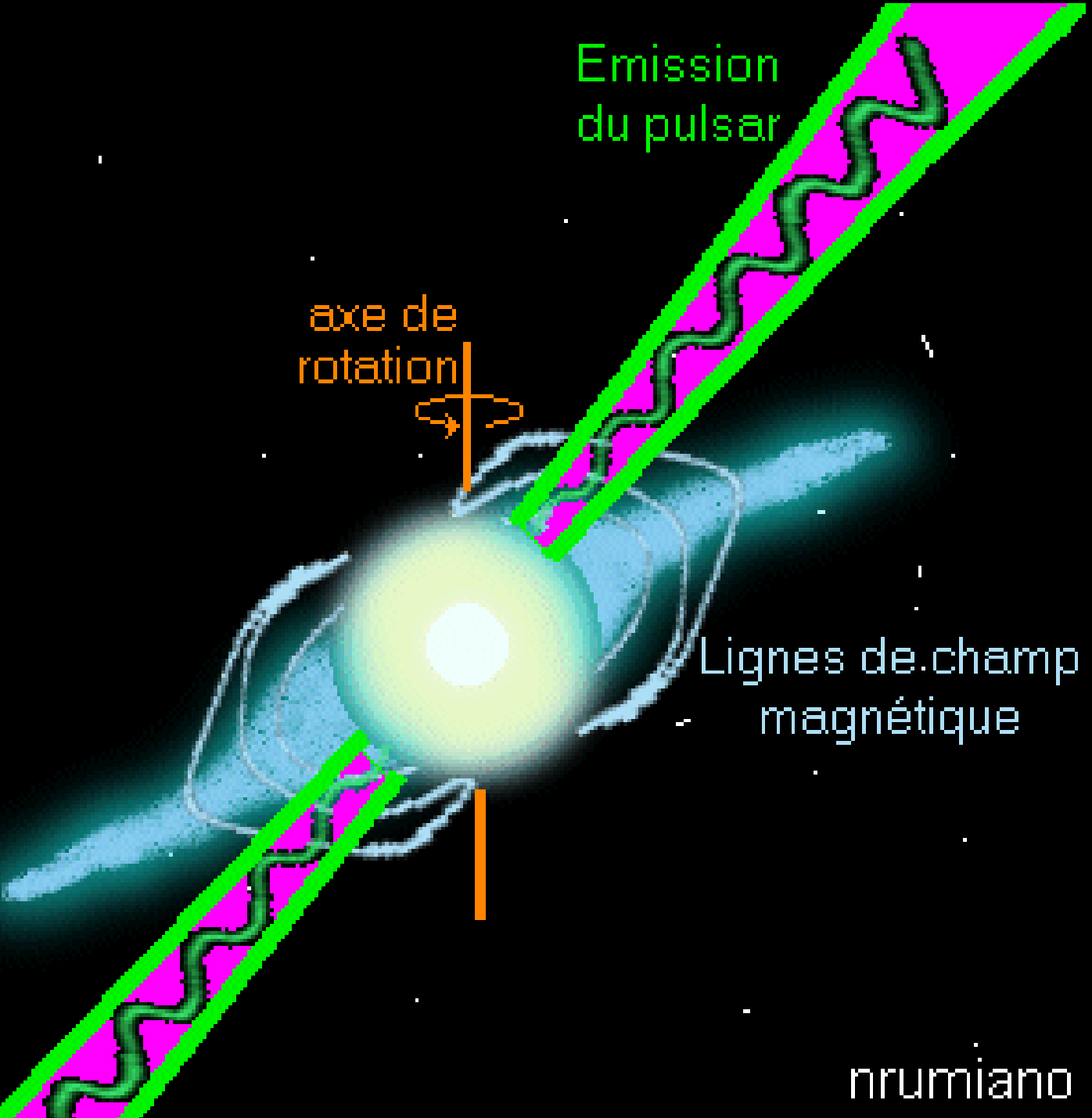
diamètre : qq km $d = 10^9 \text{ t / cm}^3$ (1 tête d'épingle = masse
d'un pétrolier)

T = qq centaines de milliers à qq millions de K en surface

gravité : 10^{11} fois celle sur Terre → vit. de libération $\approx 150\,000 \text{ km/s}$

étoile morte : refroidissement → cadavre stellaire invisible

rotation extrêmement rapide (entre 0,1 et 1000 tours / s)



Emission d'un faisceau
d'ondes électromagnétiques
(surtout radio)

Quand le faisceau balaie
la Terre : **pulsar**
(= « phare céleste »)

Pulsar (vue d'artiste)

NUCLÉOSYNTHÈSE « EXPLOSIVE » (suite)

TROU NOIR ($M_{e,initiale} > 30 M_s$)

Même le « gaz » de **neutrons** dégénérés est incapable de résister à la gravitation \longrightarrow effondrement « infini » du coeur . La vitesse de libération de l'étoile devient $> c \longrightarrow$ **trou noir**

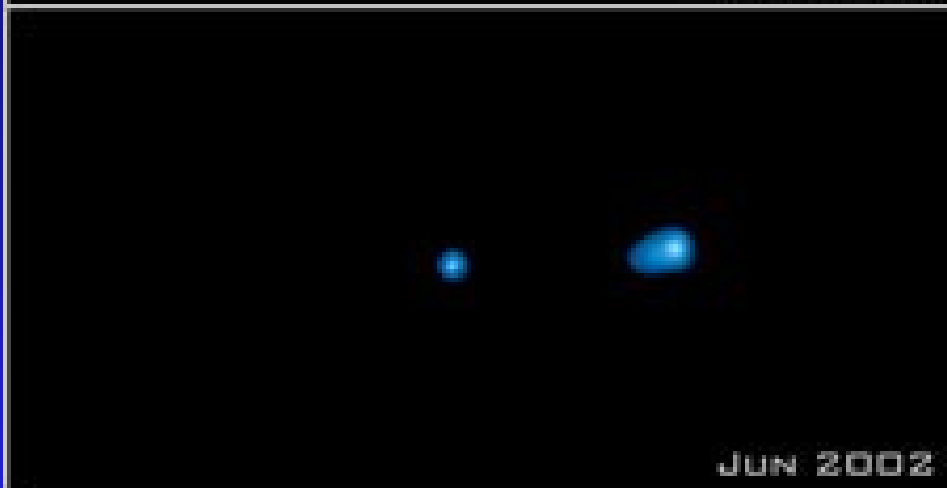
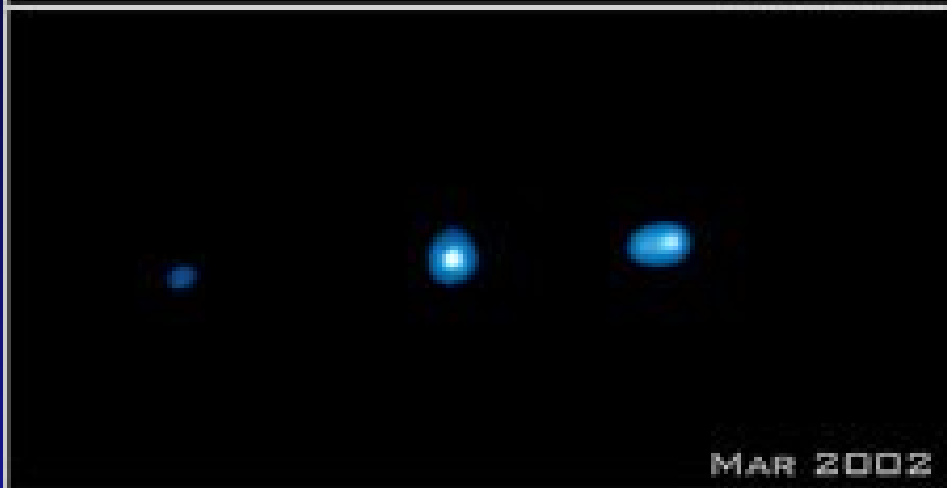
« **Horizon des évènements** » du trou noir = rayon de « non-retour »
 R_s : si un objet est comprimé de telle façon que son **rayon soit $< R_s$** , cet objet devient un trou noir . **R_s = rayon de Schwarzschild**

ne dépend que de la masse de l'étoile

ex : pour le Soleil $R_s = 3 \text{ km}$

pour la Terre $R_s = 1 \text{ cm}$

Au centre de la Voie Lactée : trou noir supermassif d'environ **4 millions de masses solaires** , autour duquel tournent les quelque 200 milliards d'étoiles de la Galaxie ...



Trou noir (observé dans le domaine des rayons X - Satellite Chandra)
(au centre des 3 photos)

Fait partie d'un **système binaire** , avec une étoile ordinaire

Celle-ci perd peu à peu son gaz qui vient former un **disque d'accrétion** autour du trou noir

Température du gaz : plusieurs millions de degrés (rayonnement X)

Emission périodique de jets de particules perpendiculairement au disque (vitesse : $c / 2$)

NUCLÉOSYNTHÈSE « EXPLOSIVE » (suite)

- **Sort de l'atmosphère de l'étoile (cas d'une étoile à neutrons)**

Effondrement du coeur en **qq secondes** → la matière des couches supérieures se précipite sur le coeur et rebondit

Onde de choc (vitesse : 30 à 60 000 km / s !) du centre vers l'extérieur qui rallume la fusion des couches externes ≡ **Supernova**

Energie dégagée colossale , sous forme de :

onde de choc

échauffement de la matière (T monte à plusieurs centaines de milliards de K)

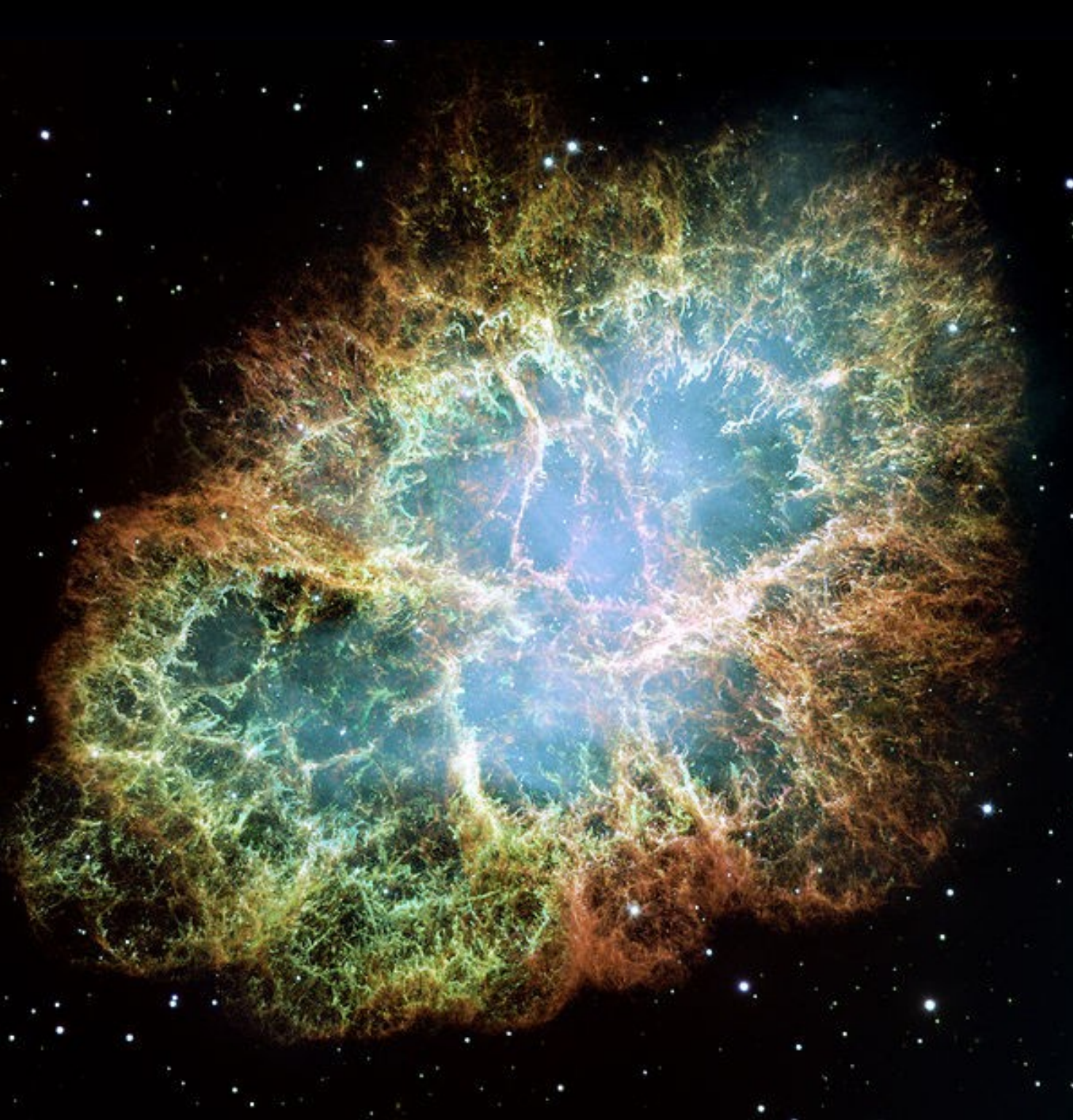
flux de neutrinos = 99 % de l'énergie totale de la supernova

Ex : **Supernova de 1987** (Grand Nuage de Magellan à 170 000 a.l.) :
pendant la 1ère seconde : 10^{58} neutrinos → 10^{46} W
≈ « luminosité » de TOUTES les étoiles de TOUTES les galaxies de l'Univers observable ... (Soleil : $4 \cdot 10^{26}$ W)



© Anglo-Australian Observatory

après **avant**
Supernova 1987 A (24 février 1987)
dans le Grand Nuage de Magellan



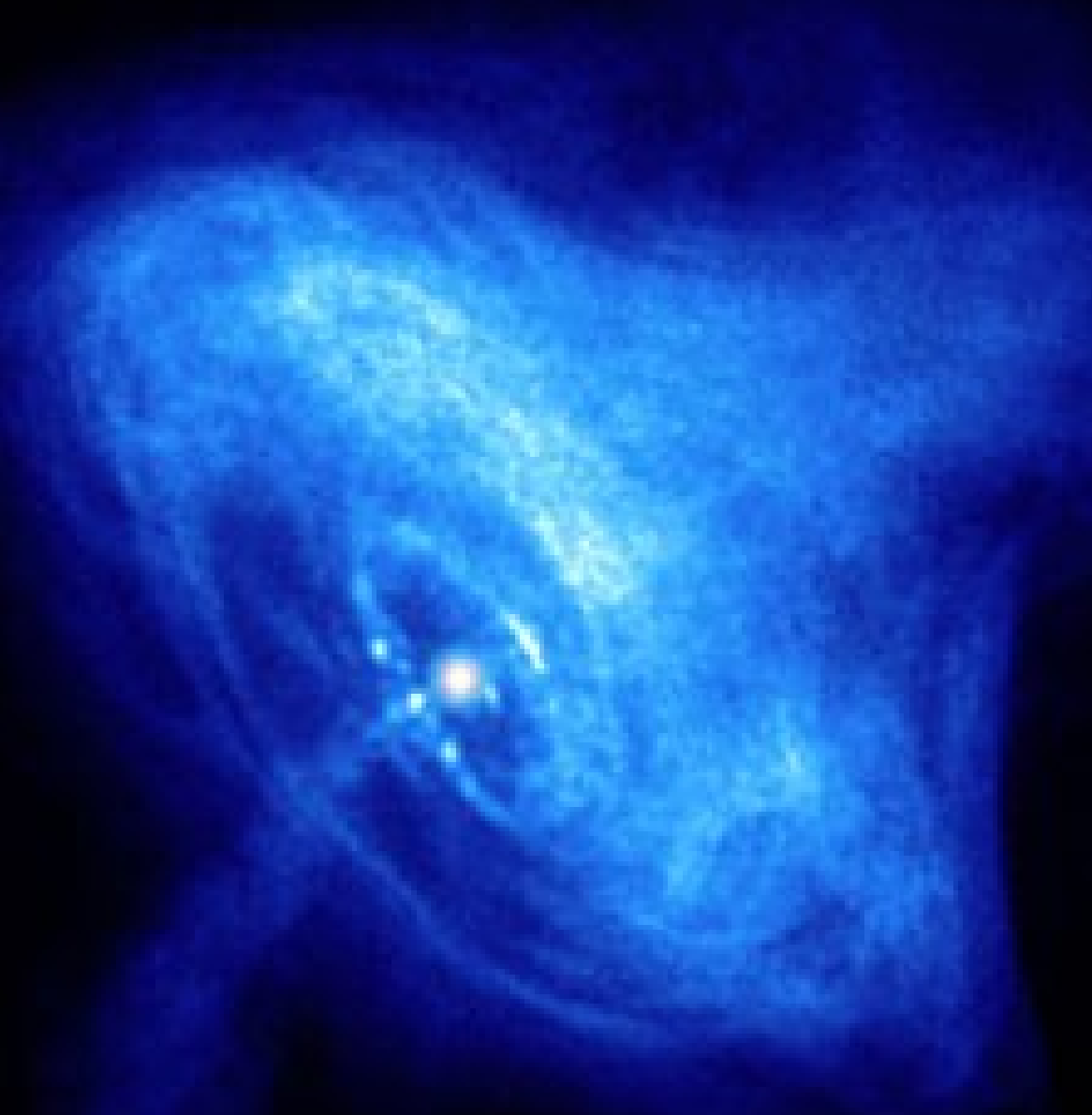
Nébuleuse du Crabe
M 1 (Taureau)

**Reste d'une étoile qui
a explosé en **supernova**
en 1054**

**Observée par les
chinois . Visible en
plein jour pendant 3
semaines**

**6500 a.l.
diamètre : 10 a.l.**

**Au centre : étoile à
neutrons (pulsar)**



**Etoile à neutrons
pulsar**
au centre de la
Nébuleuse du Crabe

**Image composite
(visible-rayons X)
satellite Chandra**

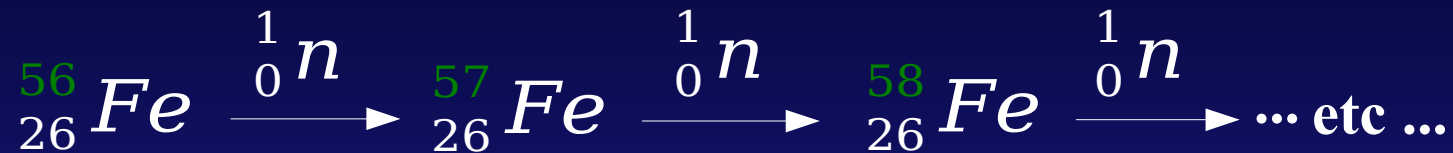
**Jets de matière et
d'antimatière**

**Anneau central :
diamètre 1 a.l.**

NUCLÉOSYNTHÈSE « EXPLOSIVE » (suite)

▪ Nucléosynthèse et ensemencement du milieu interstellaire

neutrons : fabriqués en très grand nombre lors du passage de l'étoile en phase Supernova \longrightarrow réactions avec les différents noyaux \longrightarrow **augmentation de leur masse** ex : **Fe**



Isotopes , de + en + instables \longrightarrow **désintégrations β^-** (départ d'un e^-) :



Pour chaque ensemble $(+ {}_0^1n - {}_{-1}^0e^-)$:
$$\left. \begin{array}{l} A \rightarrow A + 1 \\ Z \rightarrow Z + 1 \end{array} \right\} \text{noyaux plus lourds que le Fer}$$

Pendant l'explosion de la SN : naissance de plus d'une **soixantaine de noyaux plus lourds que le fer**

NUCLÉOSYNTHÈSE INTERSTELLAIRE (Spallation cosmique)

Tout ce qui précède forme **tous** les éléments de la table périodique ,
sauf :



Noyaux trop **fragiles** pour être formés dans les étoiles (T trop élevées)

Abondance élevée \longrightarrow seule possibilité : interaction des **rayons cosmiques** (protons, électrons, autres noyaux : He et rayons γ) avec les noyaux (ou atomes) He , C , O , N du milieu interstellaire

Réactions **difficiles** , mais T très basse dans le milieu interstellaire
 \longrightarrow noyaux produits stables car non détruits par des réactions nucléaires

CONCLUSION ... PROVISOIRE

Tout ce qui précède rend compte de la formation des éléments chimiques constituant la **matière « ordinaire »** (protons, neutrons, électrons)

mais

Observations : masse « **dynamique** » >> sa masse « **lumineuse** »
(années 30) d'une galaxie
(vitesse des étoiles) (luminosité des étoiles)

Explication possible :

- matière ordinaire : lumineuse ou **non lumineuse** (nuages de gaz, naines brunes, cadavres stellaires, trous noirs ...) = **15 %** de la matière totale
- **85 %** = « **matière noire** » : **autre nature** : neutrinos et autres particules \pm hypothétiques (Wimp's) ? Cette matière formerait d'immenses halos autour des galaxies

...à moins que les **lois de la dynamique newtonienne** ne soient plus valables à très grande échelle...Théorie MOND (**MO**dified **N**ewtonian **D**ynamics)

Matière noire = une des grandes énigmes de l'astrophysique actuelle