

MATIERE DEGENEREE
Naines blanches
Etoiles à neutrons

Sylvain PERDRIEUX

Matière dégénérée : naines blanches et étoiles à neutrons

PLAN DE LA PRESENTATION

1. Bref rappel sur l'évolution des étoiles
2. Quelques rappels théoriques sur les atomes
3. Matière dégénérée et formation d'une naine blanche
4. Caractéristiques des naines blanches
5. Formation des étoiles à neutrons
6. Composition d'une étoile à neutrons
7. Caractéristiques des étoiles à neutrons
8. Conclusions

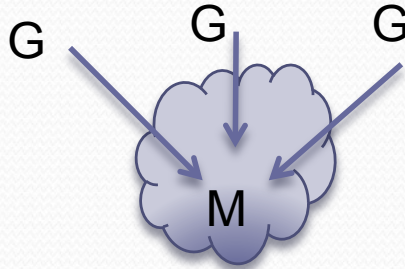
Matière dégénérée : naines blanches et étoiles à neutrons

PLAN DE LA PRESENTATION

1. **Bref rappel sur l'évolution des étoiles**
2. Quelques rappels théoriques sur les atomes
3. Matière dégénérée et formation d'une naine blanche
4. Caractéristiques des naines blanches
5. Formation des étoiles à neutrons
6. Composition d'une étoile à neutrons
7. Caractéristiques des étoiles à neutrons
8. Conclusions

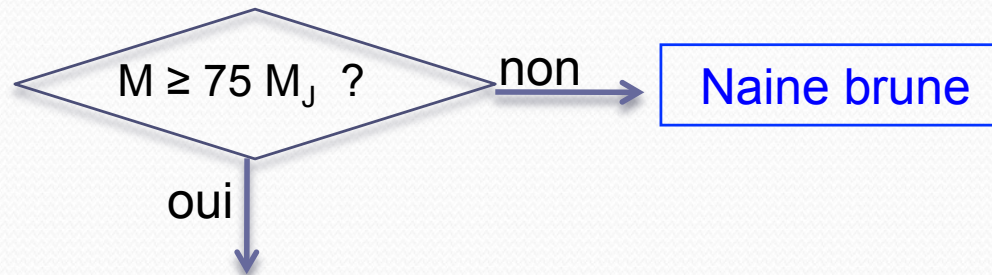
Les origines de l'étoile

Tout part d'un nuage de gaz ($> 100\,000 M_S$), essentiellement constitué d'hydrogène, qui se fragmente et s'effondre par gravité, jusqu'à atteindre la taille d'un fragment de masse stellaire ($< 120 M_S$)



Cette contraction augmente progressivement la densité des protons, donc la pression et la température.

La suite dépend de la masse M du nuage

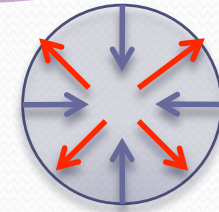


La température peut atteindre $7 \text{ à } 8 \cdot 10^6 \text{ K}$, ce qui donne assez d'énergie aux protons pour vaincre la barrière coulombienne (force de répulsion électrique entre deux charges de même signe) et ainsi se rapprocher jusqu'à leur fusion en hélium

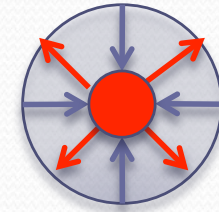
L'objet devient une étoile

La fusion de l'hydrogène

L'énergie dégagée par les réactions de fusion de l'hydrogène (→) vient contrebalancer l'énergie gravitationnelle (←) et l'étoile va ainsi parvenir à un premier équilibre hydrostatique:



Si la masse de l'étoile $> 0,26 M_{\odot}$ des hétérogénéités thermiques vont apparaître au sein de l'étoile, et il va progressivement se former un cœur (●) qui va concentrer de plus en plus les réactions de fusion, ce qui va faire monter la température au centre.



Si la masse de l'étoile $< 0,26 M_{\odot}$ les échanges d'énergie seront essentiellement convectifs : il y aura un bon mélange dans l'intégralité de l'étoile, et pas de formation de cœur.

La température nominale du cœur sera fonction de la masse de l'étoile : elle variera de $7 \cdot 10^6$ K pour les étoiles de $0,08 M_{\odot}$, à $40 \cdot 10^6$ K pour des étoiles de $30 M_{\odot}$

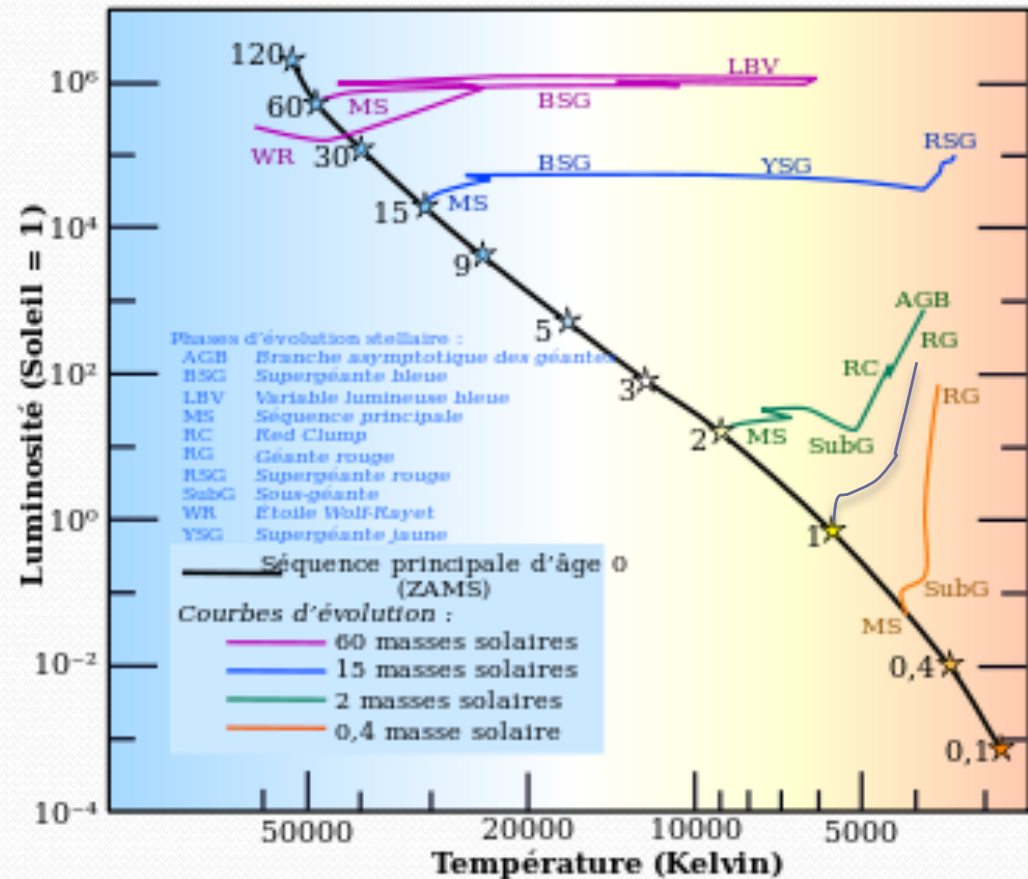
Le niveau de température fixe le processus de fusion de l'hydrogène impliqué :

- chaîne proton - proton également appelée chaîne pp
- Cycle CNO : cycle Carbone – Azote - Oxygène
- un peu des deux selon les cas.

La fusion de l'hydrogène

Tant qu'il y aura assez d'hydrogène, ces processus de fusion perdureront : l'étoile est sur la séquence principale du diagramme HR

Avec le temps, le cœur va progressivement s'enrichir en hélium et s'appauvrir en hydrogène : cela va ralentir les réactions, ce qui aura pour effet de contracter un peu plus le cœur, donc de remonter légèrement la température et ainsi maintenir la fusion : cela se traduit par une légère augmentation de la luminosité de l'étoile durant sa vie sur la séquence principale

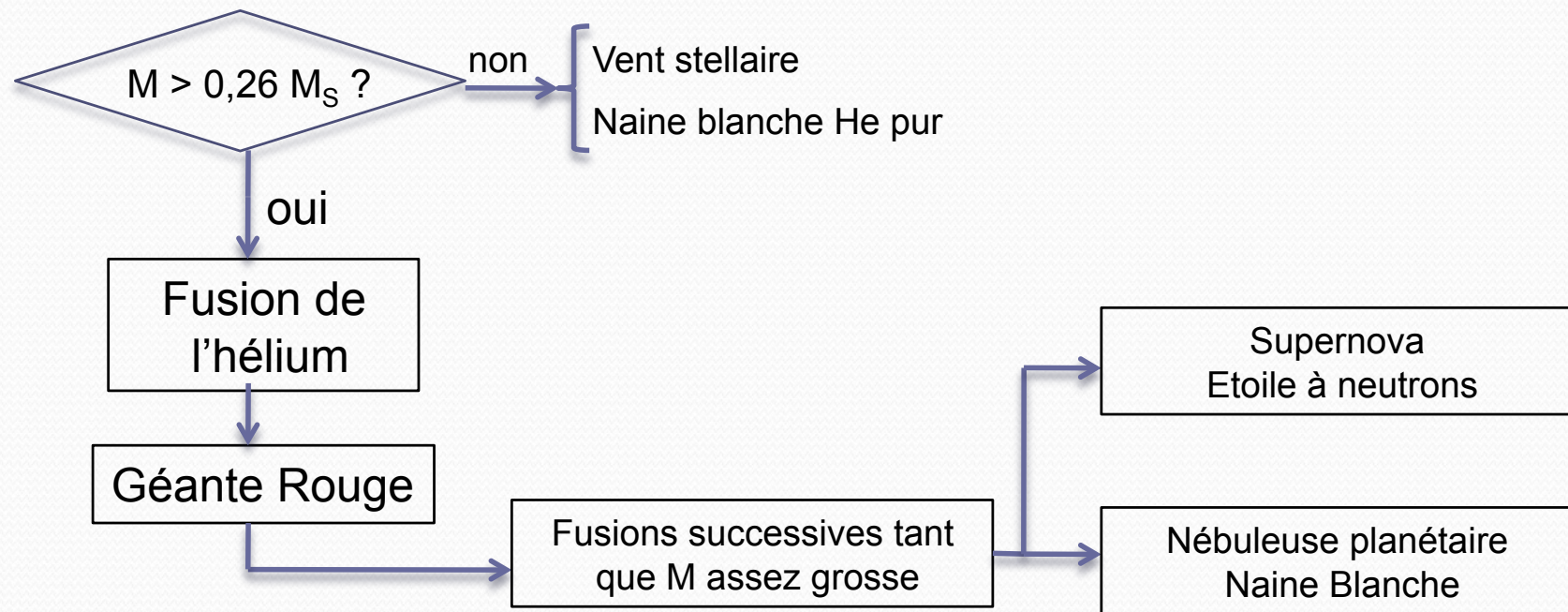


Vers la fusion de l'hélium ?

Plus une étoile est massive, plus elle consommera rapidement son hydrogène (Temp. élevée, cycle CNO..) et moins longtemps elle restera sur la séquence principale

Au bout d'un certain temps, la concentration en hydrogène dans le cœur devient insuffisante pour entretenir un taux de réaction assez élevé pour contrebalancer l'effet de la gravité : cela peut se produire alors que l'étoile n'a consommé que 10% de son hydrogène (Soleil) !

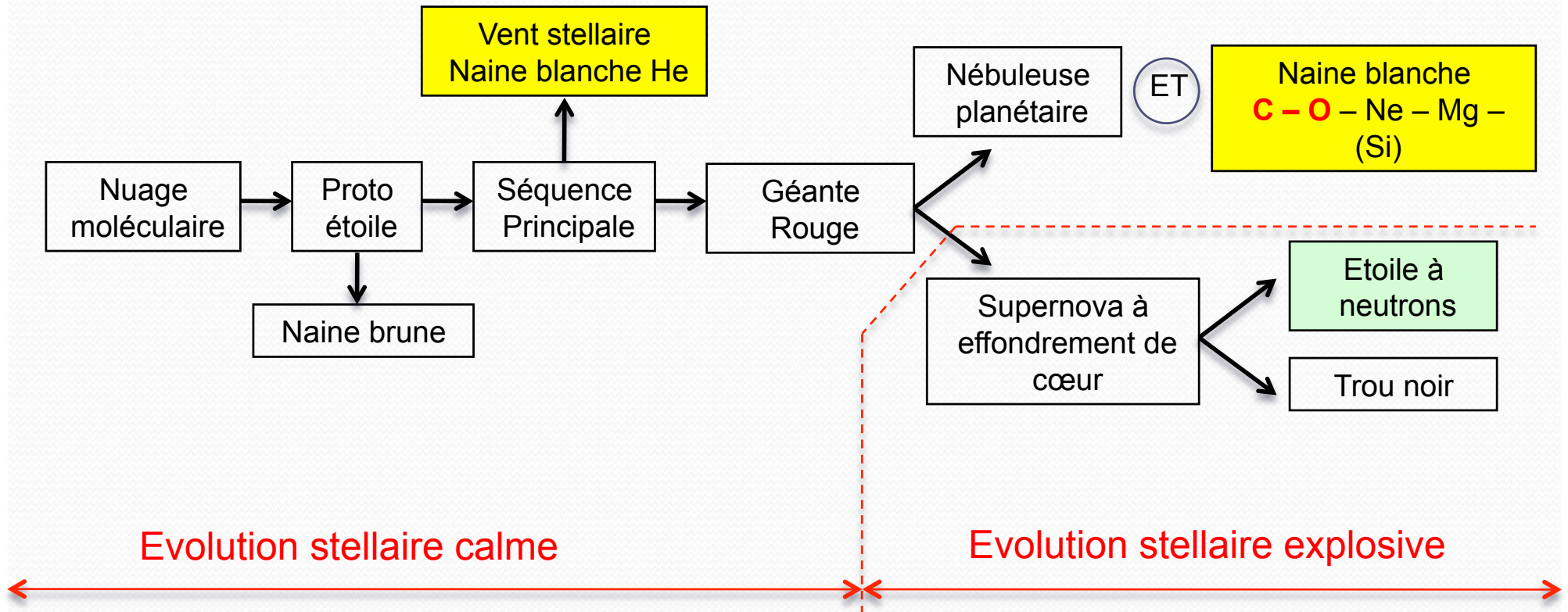
La suite dépend de la masse M de l'étoile



Evolution stellaire

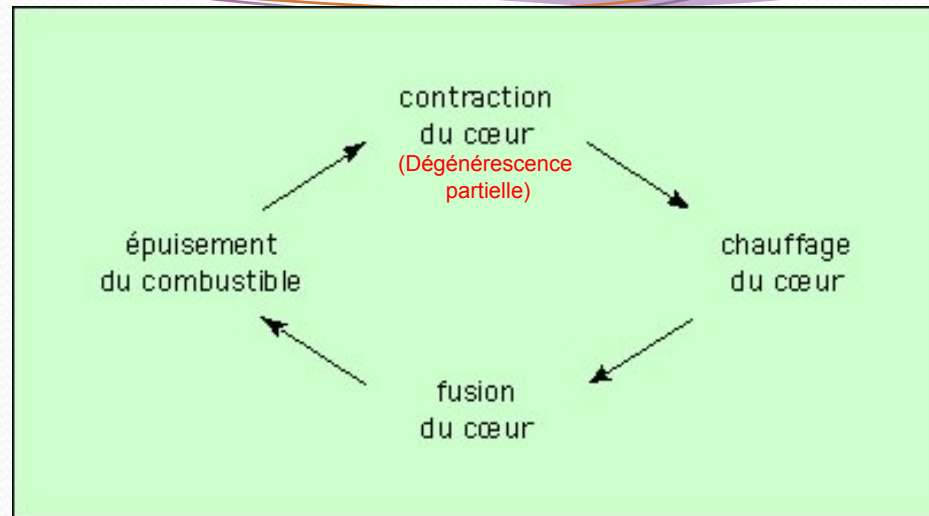
Le film de l'évolution d'une étoile dépend essentiellement de la **masse** de l'étoile.

Rapide aperçu du film de l'évolution d'une étoile



Principes du réacteur « étoile »

1. Cycle de fonctionnement →



2. Plus un noyau atomique est lourd, plus il y a de protons, donc plus la répulsion électromagnétique exercée est grande, et donc plus la température devra être élevée pour permettre sa fusion
3. L'énergie de fusion augmente quand les atomes impliqués sont légers : la fusion de l'hydrogène est de loin la fusion la plus énergétique
4. Au cours de la contraction du cœur, une partie de la matière se modifie profondément : on dit qu'elle dégénère. Le taux de dégénérescence du cœur a un impact important sur le futur de l'étoile.

La Nucléosynthèse stellaire : récapitulatif

Objet \ Masse	0,3 M _S	1 M _S	3 M _S	10 M _S	30 M _S
Luminosité	0,004	1	100	1000	10 000
Température maximale (K)	10 . 10 ⁶	10 ⁸	10 ⁹	3 à 5 . 10 ⁹	3 à 5 . 10 ⁹
Durée de vie (ans) sur la séquence principale	800 milliards	10 milliards	300 millions	100 millions	60 millions
Production ultime majeure	Hélium	Carbone	Oxygène	Silicium/Fer	Fer
Phénomène terminal	Vent stellaire	Nébuleuse planétaire	Nébuleuse planétaire	Supernova	Supernova
Masse éjectée	0,01 M _S	0,5 M _S	2,2 M _S	8,5 M _S	24 M _S
Nature du noyau résiduel	Naine blanche	Naine blanche	Naine blanche	Etoile à neutrons	Trou noir
Masse du cadavre stellaire	0,29 M _S	0,5 M _S	0,8 M _S	1,5 M _S	6 M _S
Densité (eau=1)	10 ⁶	10 ⁷	2 . 10 ⁷	5 . 10 ¹⁴	3 . 10 ¹⁵
Rayon (en km)	5200	3200	2700	18	6

La Nucléosynthèse stellaire : durées des fusions

masse
objet

	0,3 M _S	1 M _S	3 M _S	10 M _S	25 M _S
Fusion de l'Hydrogène Durée de vie (ans) sur la séquence principale	800 milliards	10 milliards	300 millions	100 millions	70 millions
Fusion de l'Hélium (années)	-	200 millions		5 millions	500 000
Fusion du Carbone (années)	-	-	-	10 000	200
Fusion du Néon (années)	-	-	-	10	1
Fusion de l'Oxygène	-	-	-	quelques années	5 mois
Fusion du Silicium	-	-	-	1 semaine	1 jour

Matière dégénérée : naines blanches et étoiles à neutrons

PLAN DE LA PRESENTATION

1. Bref rappel sur l'évolution des étoiles
2. Quelques rappels théoriques sur les atomes
3. Matière dégénérée et formation d'une naine blanche
4. Caractéristiques des naines blanches
5. Formation des étoiles à neutrons
6. Composition d'une étoile à neutrons
7. Caractéristiques des étoiles à neutrons
8. Conclusions

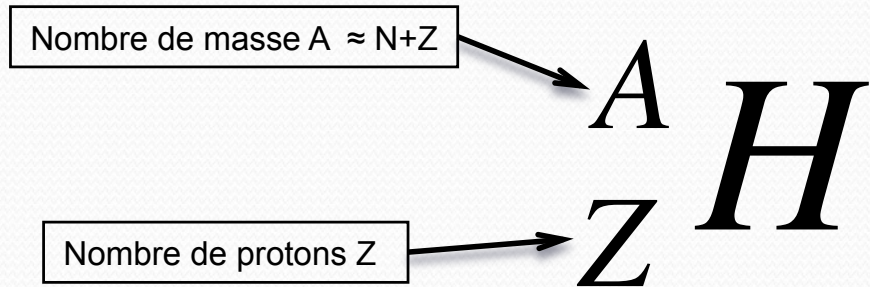
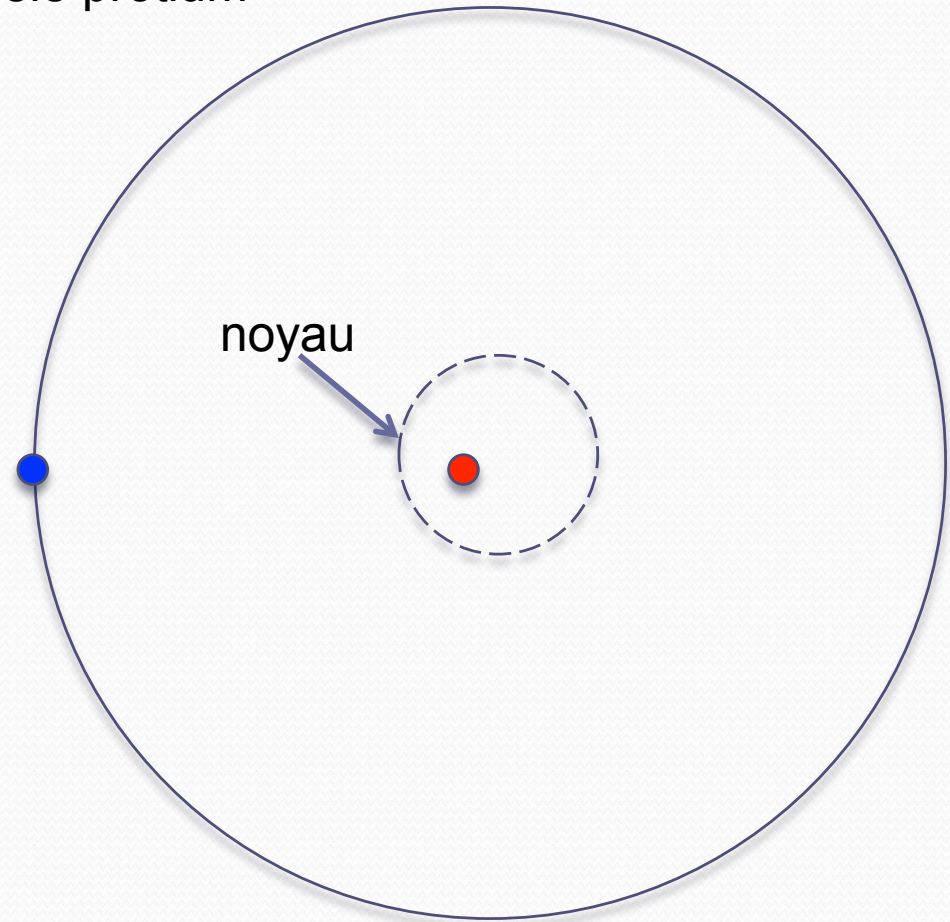
L'Atome d'Hydrogène ${}_1\text{H}$

Protium = « Hydrogène » courant

noté : ${}_1^1\text{H}$ aussi appelé protium

Z = 1 proton : ● } noyau
N = 0 neutron

1 électron : ●

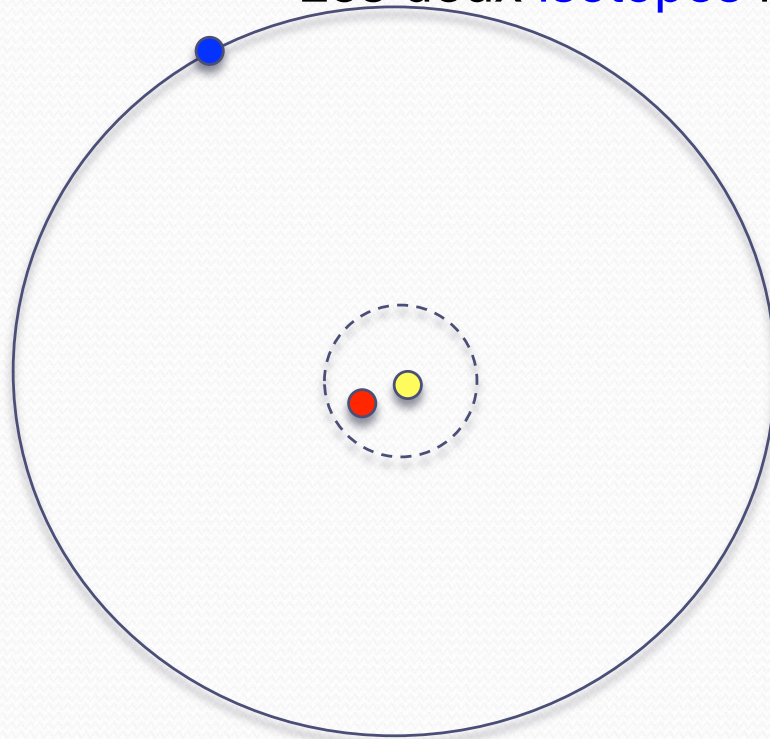


L'Atome d'Hydrogène ${}_1\text{H}$


L'hydrogène existe sous **sept** formes, les **isotopes** :

${}_1^1\text{H}$ (0 neutron) à ${}_1^7\text{H}$ (6 neutrons)

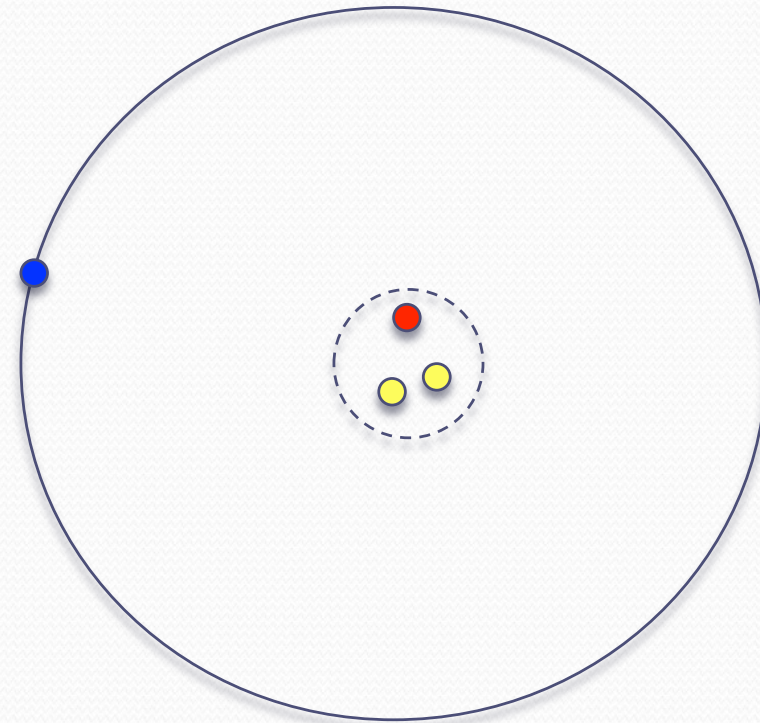
Les deux **isotopes** naturels de l'Hydrogène sont :



Le Deutérium ${}_1^2\text{H}$ parfois noté D
isotope naturel stable (0,015%)

1 proton :  } noyau
1 neutron :  }

1 électron : 



Le Tritium ${}_1^3\text{H}$ parfois noté T
Isotope instable (explosions nucléaires)

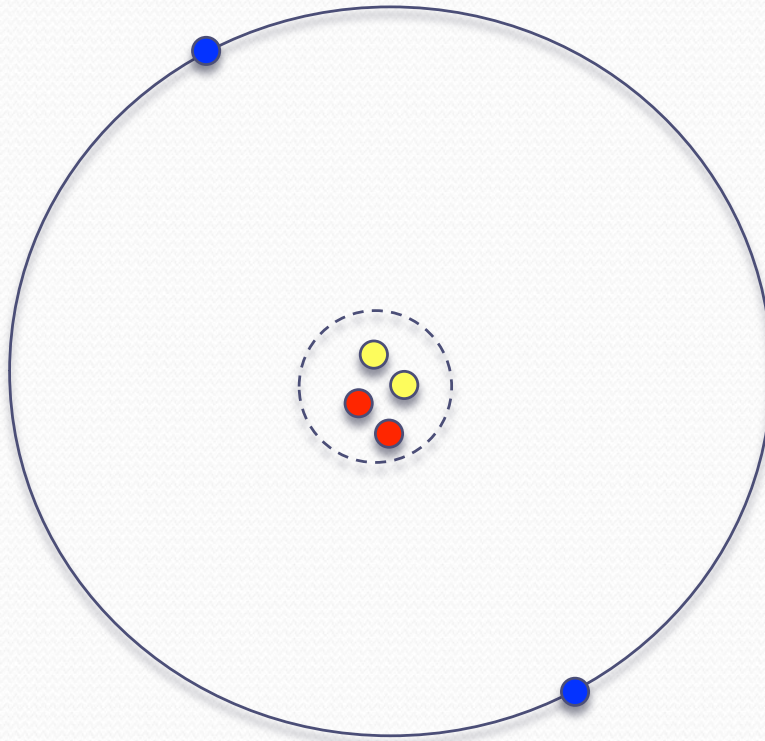
1 proton :  } noyau
2 neutrons :  }

1 électron : 

L'Atome d'Hélium ${}_2\text{He}$

L'hélium existe sous la forme de 8 isotopes: ${}^3_2\text{He}$ (1 *neutron*) à ${}^{10}_2\text{He}$ (8 *neutrons*)

Les deux isotopes naturels de l'Hélium :

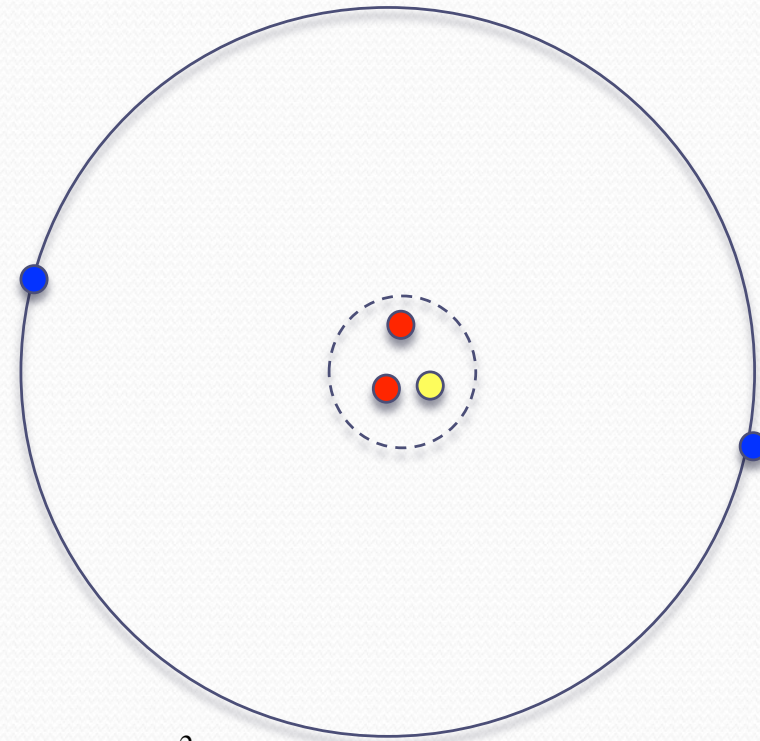


Hélium ${}^4_2\text{He}$

isotope naturel stable

2 protons : ● } noyau
2 neutrons : ● }

2 électrons : ●



Hélium ${}^3_2\text{He}$

Isotope naturel stable

2 protons : ● } noyau
1 neutron : ● }

2 électrons : ●

L'Atome de Carbone ${}_6\text{C}$

Numéro atomique = 6 donc \rightarrow 6 protons \bullet et 6 électrons \bullet dans tous les isotopes

Le carbone existe sous la forme de **15** isotopes :

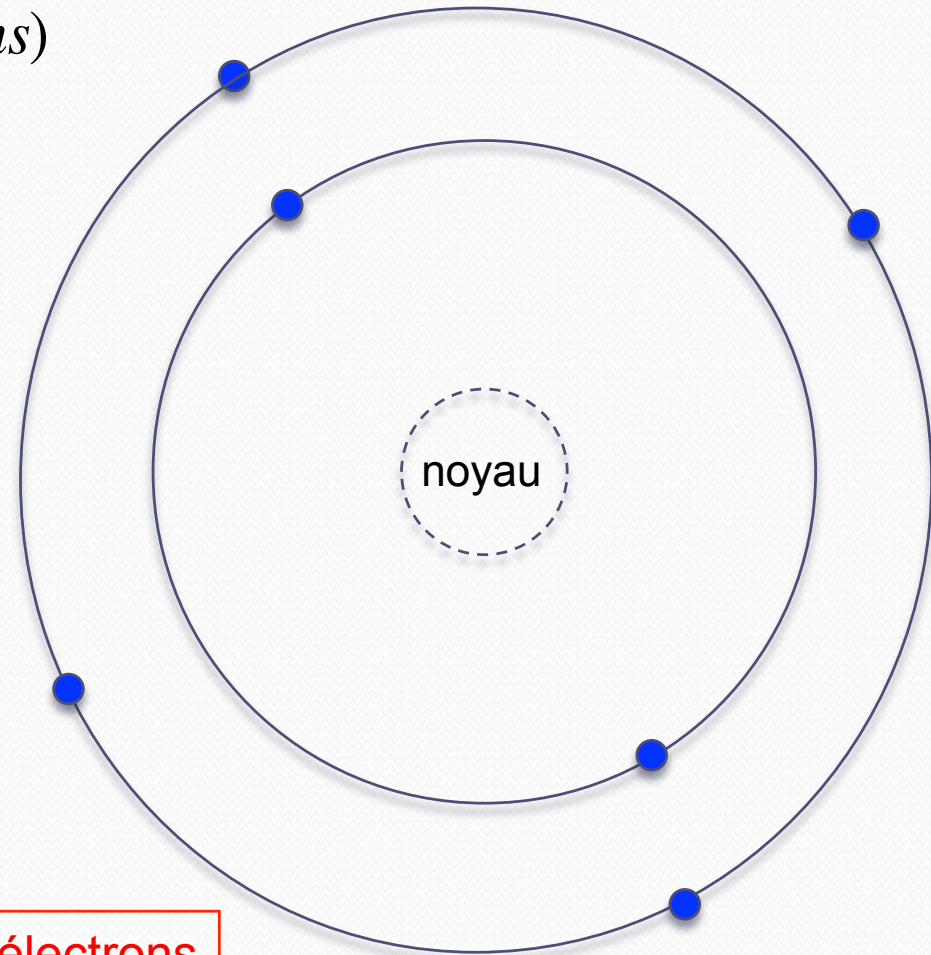
${}_6^8\text{C}$ (2 neutrons) à ${}_6^{22}\text{C}$ (16 neutrons)

Composition du noyau dans
chacun des 3 isotopes naturels :

Isotope ${}_6^{12}\text{C}$
6 protons
6 neutrons

Isotope ${}_6^{13}\text{C}$
6 protons
7 neutrons

Isotope ${}_6^{14}\text{C}$
6 protons
8 neutrons



Le nombre maximum d'électrons
sur la couche n est = $2.n^2$

L'Atome de Fer ${}_{26}^{56}\text{Fe}$

Numéro atomique = 26 donc \rightarrow 26 protons \bullet et 26 électrons \bullet dans tous les isotopes

Le Fer possède **28** isotopes, dont le ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ est le nucléide stable le plus lourd. Les isotopes ont des nombres de masse qui varient de 45 à 72

Le nombre de neutrons dans les noyaux des isotopes varie donc de 19 à 46

Le Fer se situe sur la 4^{ème} ligne du tableau de Mendeleïev : ses 26 électrons évoluent donc sur 4 orbites (2,8,**14**,2)

Le nombre maximum d'électrons sur la couche n est = $2.n^2$

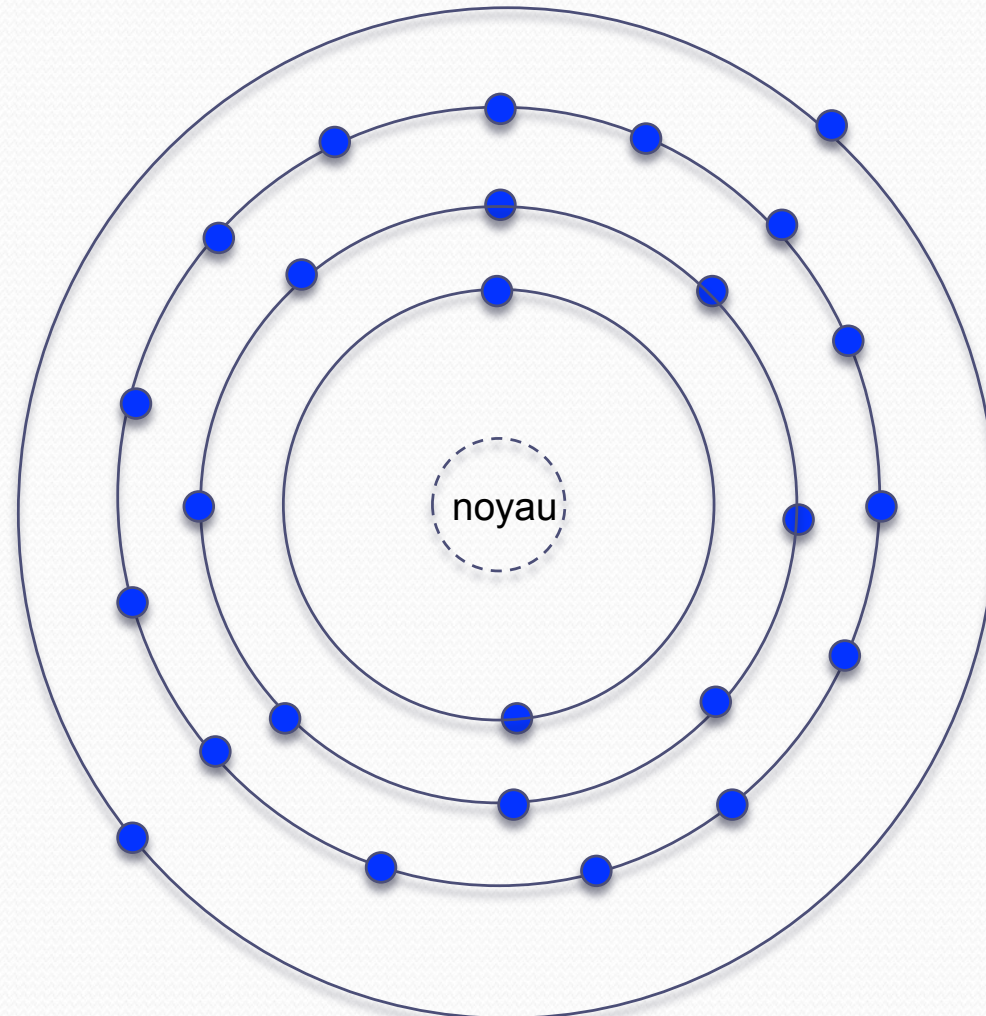


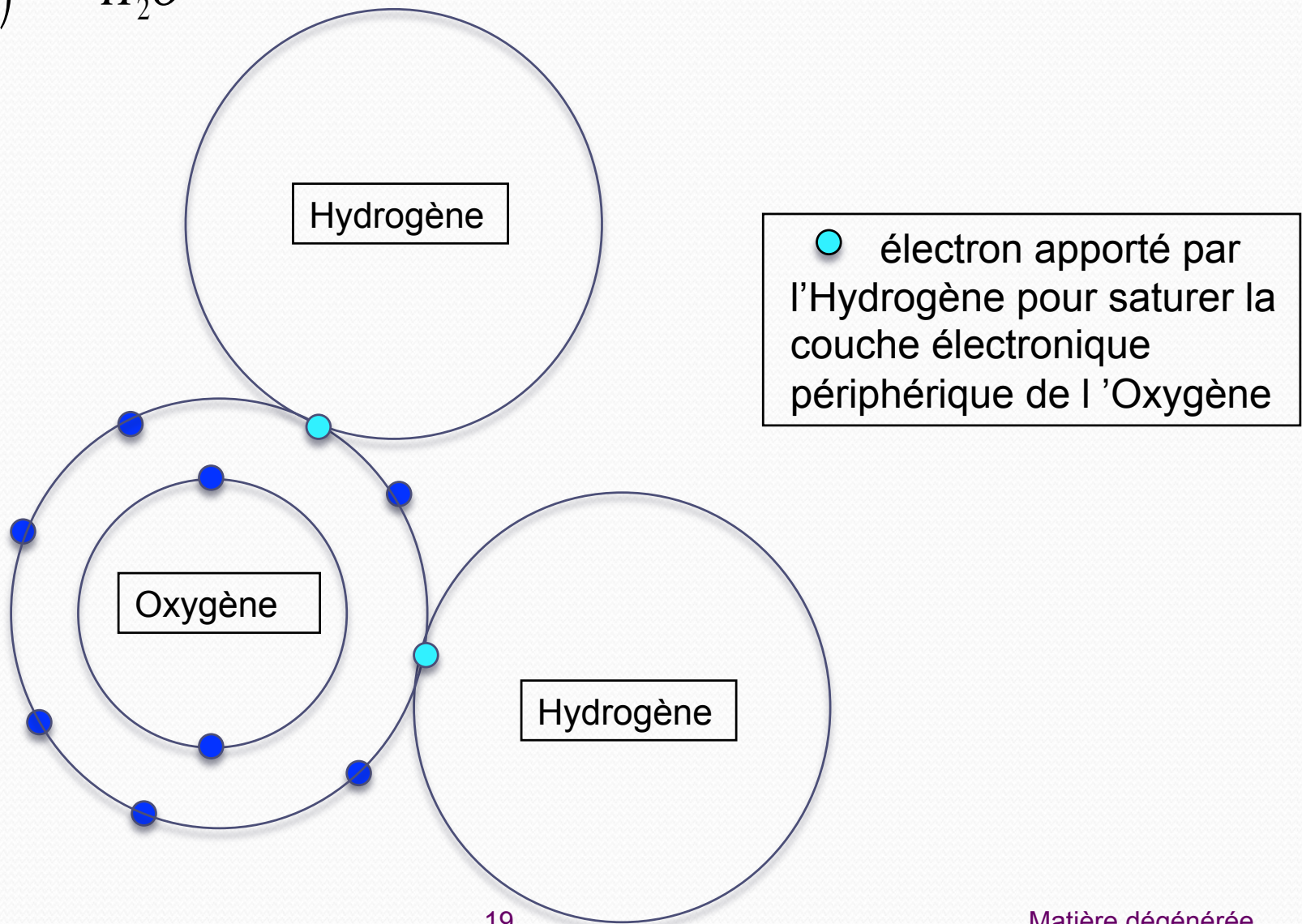
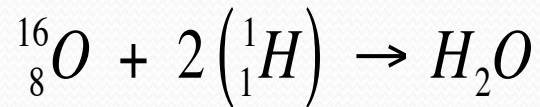
Tableau de Mendeleïev — nombre d'électrons périphériques en

1	2	2											3	4	5	6	7	8
1 H																		2 He
3 Li	4 Be												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg												13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca		21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr		39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-70 Lant.	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 à 102 Act.	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb
Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No

La Chimie = échanges d'électrons

Principe de l'association d'un atome d'oxygène avec 2 atomes d'hydrogène pour former de l'eau



Matière dégénérée : naines blanches et étoiles à neutrons

PLAN DE LA PRESENTATION

1. Bref rappel sur l'évolution des étoiles
2. Quelques rappels théoriques sur les atomes
3. Matière dégénérée et formation d'une naine blanche
4. Caractéristiques des naines blanches
5. Formation des étoiles à neutrons
6. Composition d'une étoile à neutrons
7. Caractéristiques des étoiles à neutrons
8. Conclusions

Une question:

Pourquoi l'électron ne colle-t-il pas à son noyau ?

À l'échelle atomique, l'électron n'est pas une particule qui tourne autour de son noyau : c'est une **onde**.

Cette onde n'est pas localisée en un point précis : elle s'étale autour du noyau et prend la forme géométrique qui **minimise** son énergie globale $E_G = E_p + E_C$

E_p = Energie potentielle liée à l'attraction du noyau

E_C = Energie cinétique liée à la longueur d'onde

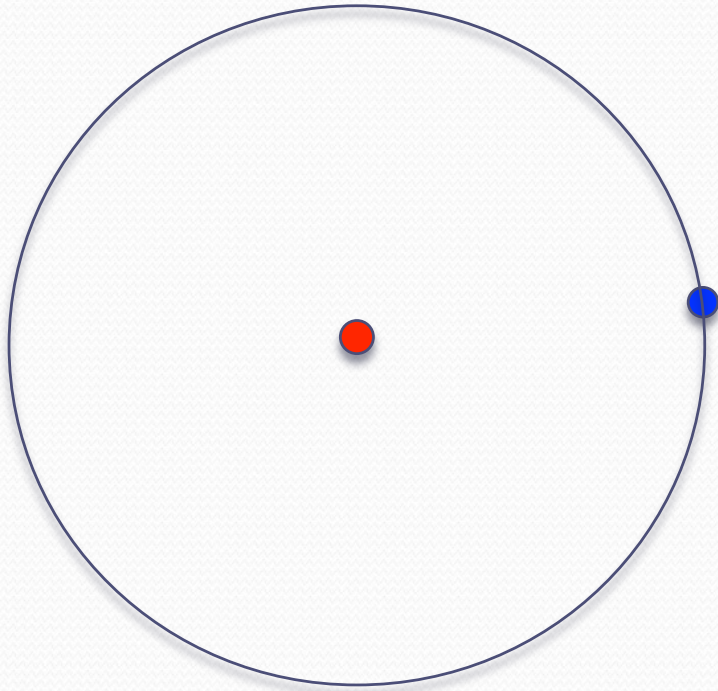
Lorsque l'onde n'est pas confinée, c'est à dire non contrainte par un phénomène extérieur, donc « normale », elle se maintient assez proche du noyau pour réduire son énergie potentielle tout en s'étalant suffisamment pour diminuer du même coup son énergie cinétique : ce compromis correspond à l'état le plus stable de l'atome, appelé **état fondamental**.

Lorsque l'onde est confinée dans un petit espace, sa longueur d'onde diminue, ce qui augmente son énergie cinétique. Son énergie potentielle quant à elle diminue. Toutefois, l'énergie cinétique augmente beaucoup plus vite que l'énergie potentielle ne diminue. Résultat : plus l'onde est confinée (plus elle se rapproche du noyau), plus son énergie globale augmente

C'est cette énergie qui empêche l'électron de tomber sur le noyau !

Confinement et énergie

Retenons que plus les électrons se rapprochent du noyau, plus leur énergie cinétique est élevée

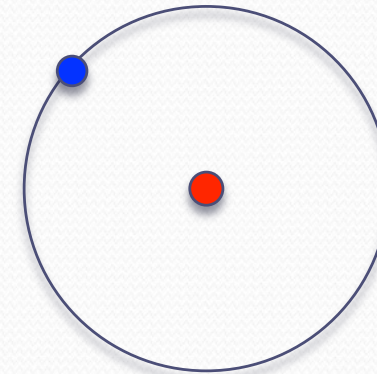


Onde électronique non confinée

E_P faible

E_C faible

$E_P + E_C$ minimale (*)



Onde électronique confinée

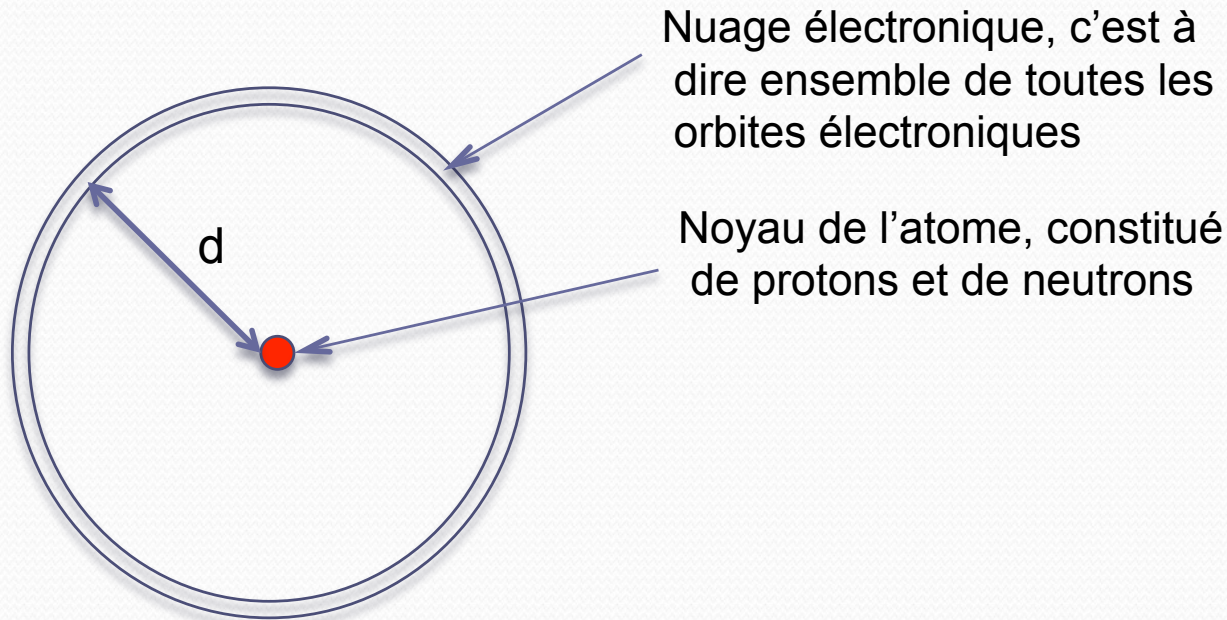
E_P plus faible

E_C très élevée

$E_P + E_C$ très élevée

(*) Pour l'atome d'hydrogène, par exemple, dans son état fondamental, l'onde occupe un volume de la forme d'une sphère dont le rayon mesure 53 milliardièmes de millimètre (53 pm).

La matière ordinaire est pleine de vide



La taille du noyau est d'environ 10^{-15}m

La distance **d** entre noyau et nuage électronique est d'environ 10^{-10}m

L'atome est donc 100 000 fois plus grand que son noyau !

Si le noyau était représenté par une balle de ping-pong, le nuage électronique se trouverait à 4 km de cette balle !

Principe d'exclusion de PAULI

Le principe d'exclusion de PAULI s'applique à tous les fermions

Les fermions sont des particules à spin semi-entiers :

- particules élémentaires : électrons, neutrinos, quarks,
- baryons : neutrons et protons,
- certains atomes tels que l'hélium 3 : ${}^3_2\text{He}$

Le principe d'exclusion de PAULI interdit à tout fermion appartenant à un système de fermions d'avoir exactement les mêmes nombres quantiques qu'un autre fermion du système.

L'électron est défini par 4 nombres quantiques:

- n : nombre quantique principal = n° de la couche, détermine l'énergie de l'orbitale
- l : nombre quantique orbital, définit la forme de l'orbite, entier variant de 0 à $n-1$
- m_l : nombre quantique magnétique, lié à l'orientation spatiale de l'orbite, entier variant de $+l$ à $-l$
- m_s : nombre quantique de spin, valant $-1/2$ ou $+1/2$

Deux électrons possédant les 4 mêmes nombres quantiques ne pouvant coexister, cela explique que la couche électronique n ne peut pas contenir plus de $2n^2$ électrons

Principe d'exclusion de PAULI

CONSEQUENCES du Principe d'exclusion de PAULI

Il explique l'organisation des couches d'électrons autour du noyau :

- Le nombre d'électrons sur la couche n est $\leq 2n^2$
- Impossibilité pour un électron de migrer d'une couche vers les couches voisines
- impossibilité pour que les électrons d'un atome pénètrent dans le nuage électronique d'un atome voisin (sauf s'il y a mise en commun d'électrons des couches périphériques de ces atomes, exemple H_2O)

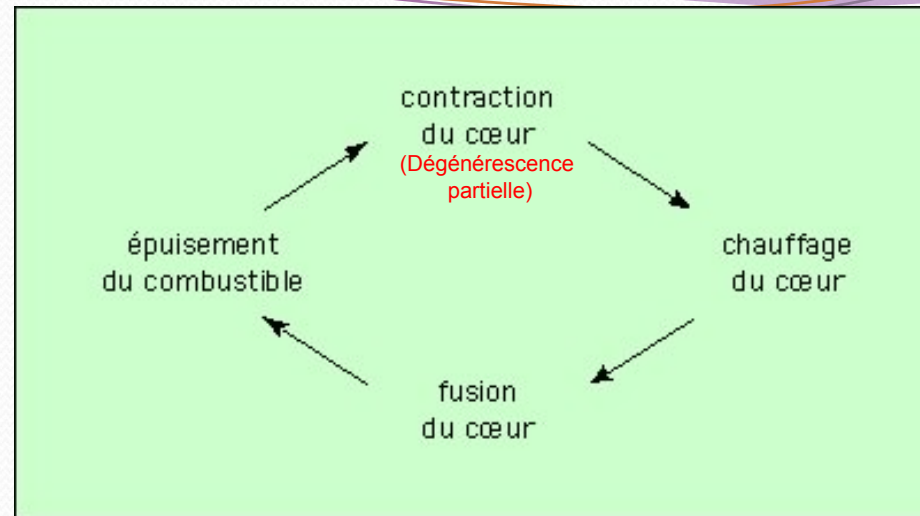
C'est lui qui empêche notre main posée sur une table de pénétrer à l'intérieur de celle-ci

Car toute tentative pour enfreindre le Principe de Pauli se traduit par une contribution répulsive provenant de l'indiscernabilité des électrons, qui se manifeste lorsque l'on pousse les nuages électroniques à s'interpénétrer. On l'appelle *répulsion de Pauli*. Cette répulsion crée une contrepression appelée *pression de Fermi* également appelée *pression de dégénérescence*.

Noter que *cette pression de dégénérescence ne dépend que de la densité*, donc de l'intensité des forces gravitationnelles. Elle ne dépend pas de la température.

Formation d'une naine blanche

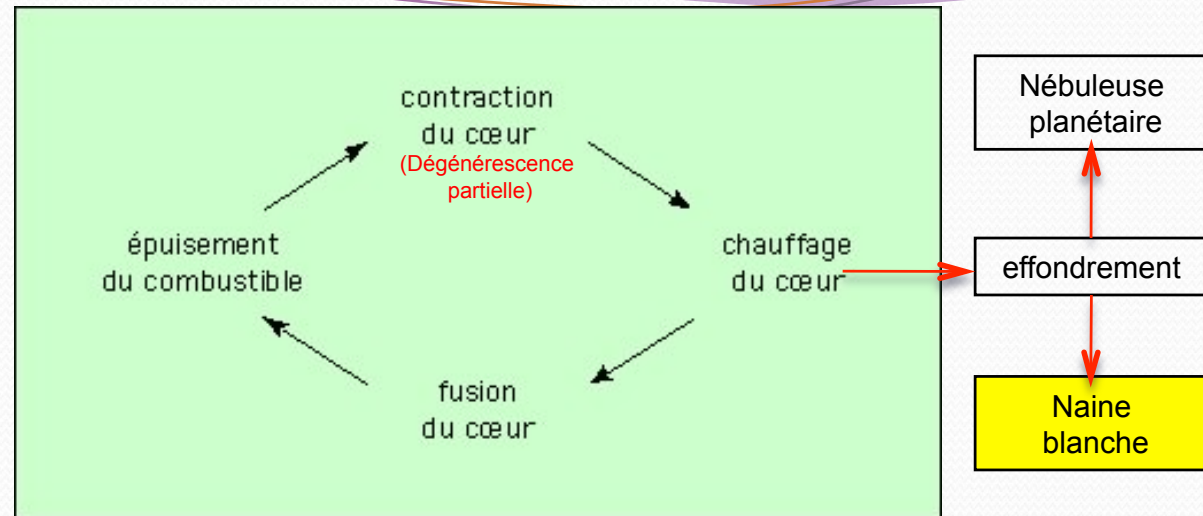
1. Cycle de fonctionnement



2. Lorsque l'étoile a épuisé son combustible nucléaire, elle se contracte sous l'effet de la gravité, ce qui a pour effet d'accroître la température de son cœur.

Formation d'une naine blanche

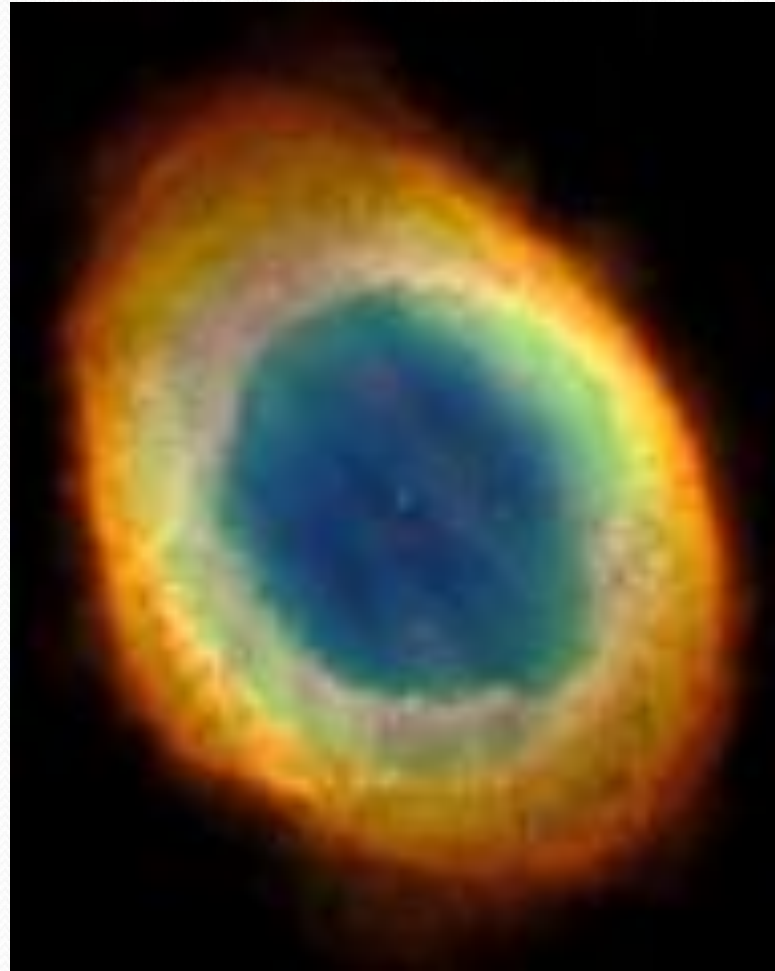
1. Cycle de fonctionnement



2. Lorsque l'étoile a épuisé son combustible nucléaire, elle se contracte sous l'effet de la gravité, ce qui a pour effet d'accroître la température de son cœur.
3. Si la température n'atteint pas un niveau suffisant pour déclencher de nouvelles réactions de fusion, le cœur continue à s'effondrer, tandis que les couches externes de l'étoile rebondissent violemment sur le cœur et sont projetées dans l'espace sous forme de **nébuleuse planétaire**. Celle-ci est un nuage de gaz composé essentiellement de l'hydrogène, de l'hélium (et d'un peu de carbone) non consommés par fusion dans l'étoile.
4. Lors de la contraction du cœur, la matière se densifie énormément et tend à dégénérer : un nouvel équilibre est atteint entre les forces de gravité et la pression de dégénérescence (pression de Fermi). Un nouvel astre est né : la **naine blanche**

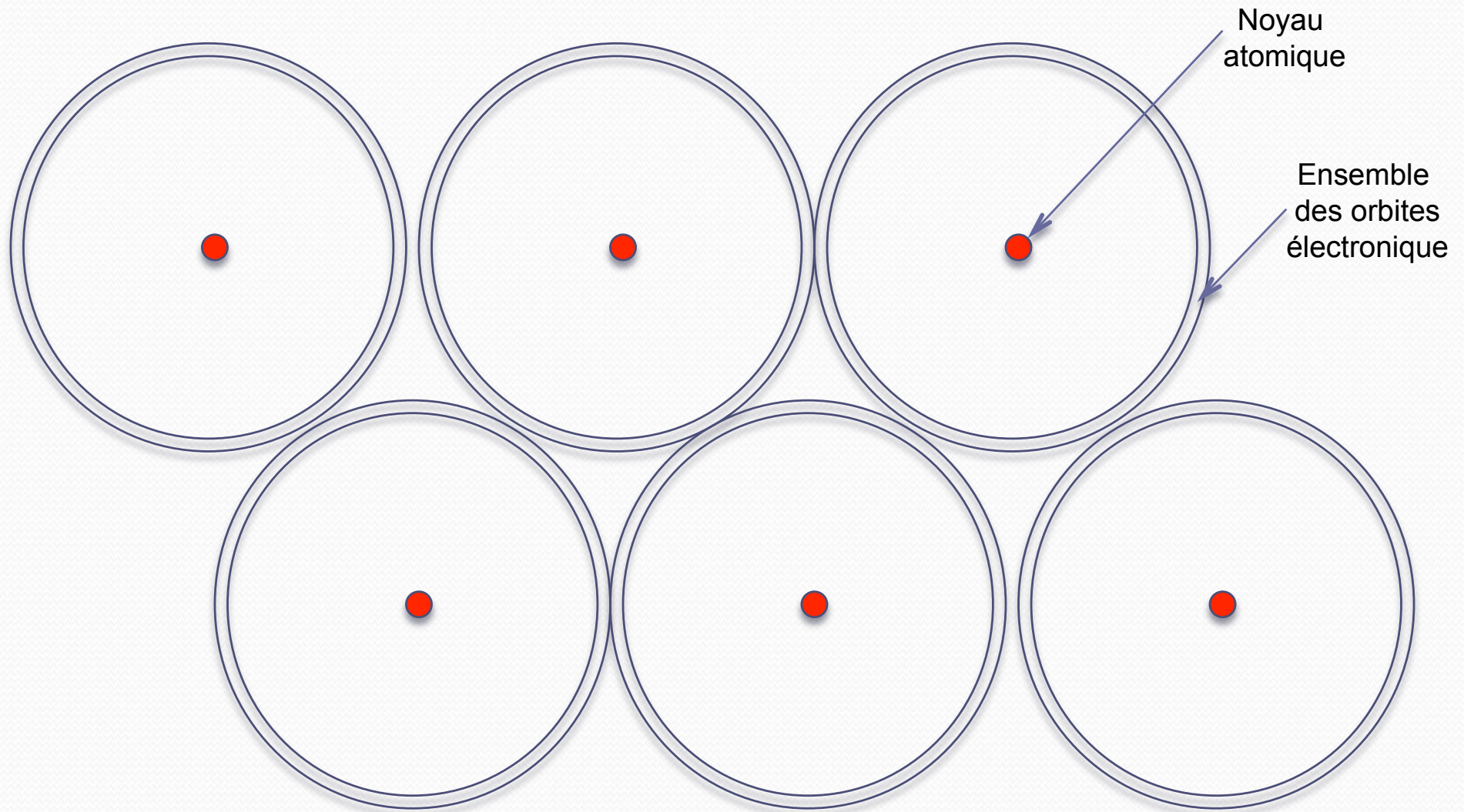
Exemple de nébuleuse planétaire

Nébuleuse planétaire de la Lyre



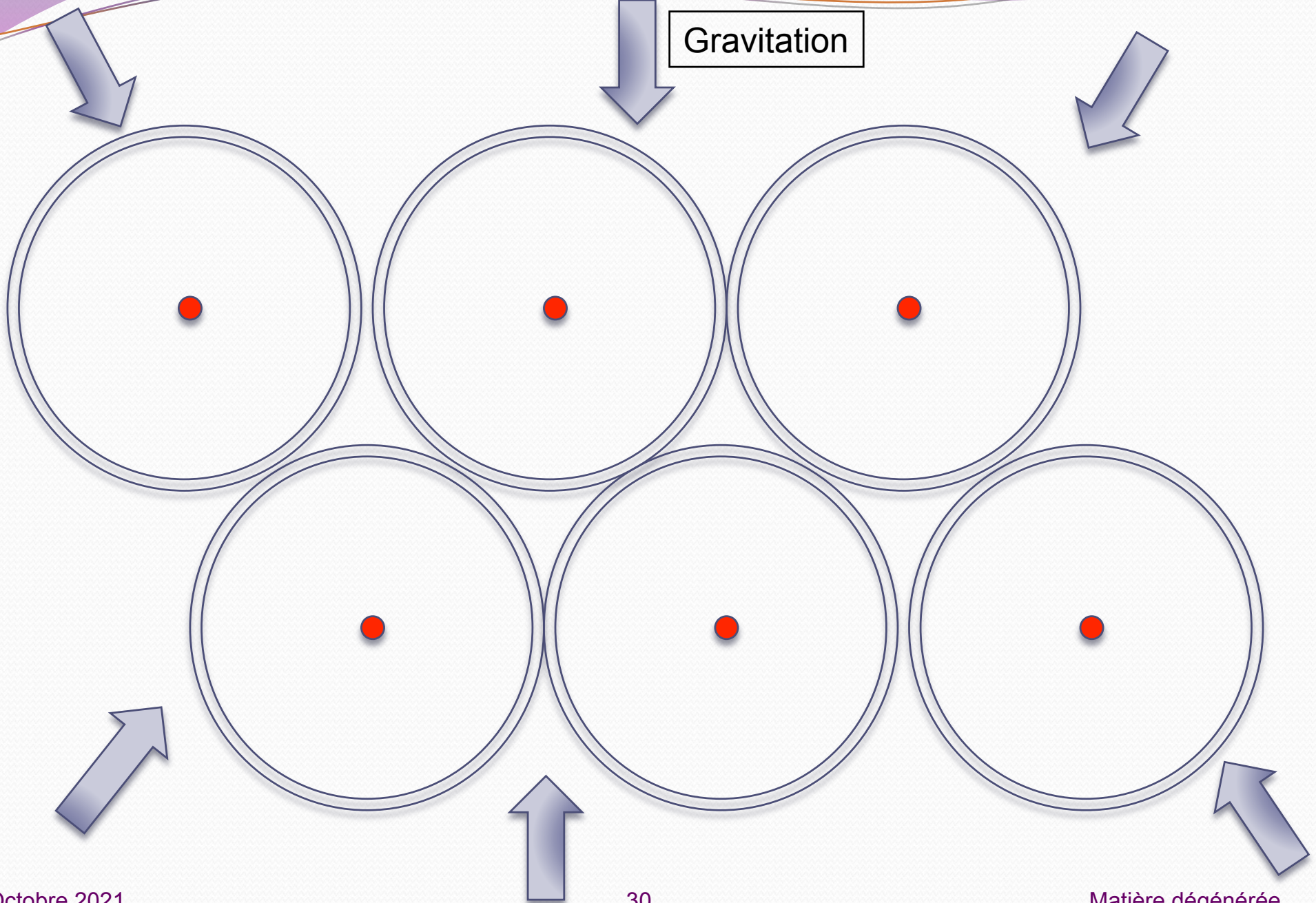
Matière ordinaire

Représentation simpliste de la matière ordinaire

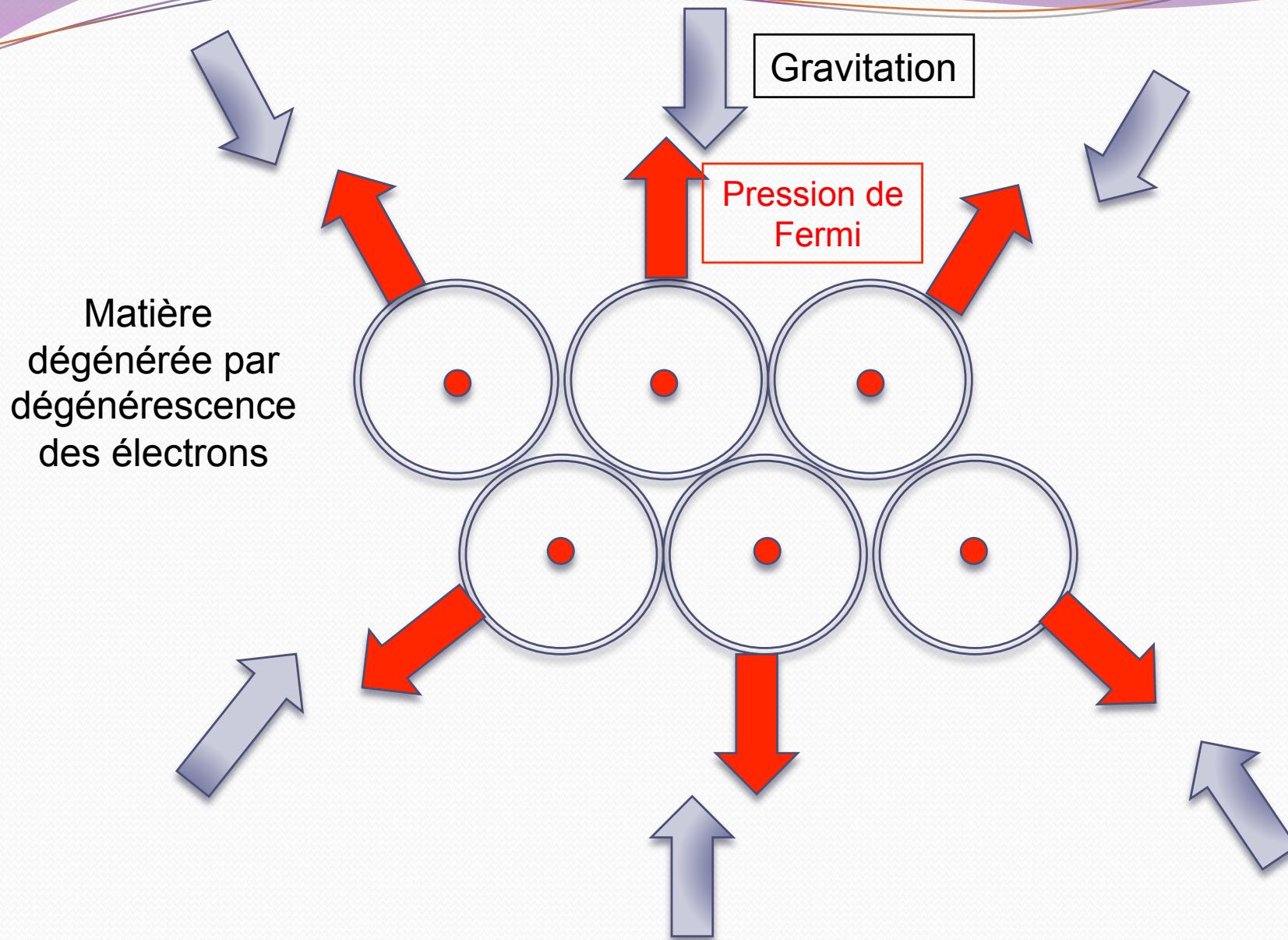


Matière ordinaire soumise à la contraction gravitationnelle

Gravitation



Equilibre dans le cœur d'une naine blanche



Matière dégénérée

La matière dégénérée « par dégénérescence électronique » est constituée d'un plasma de noyaux et d'électrons proches des noyaux et dotés d'une très grande énergie cinétique.

Par ailleurs de plus en plus d'atomes perdent leurs électrons (ionisation), qui deviennent alors libres.

La forte densité électronique lui confère de très grandes conductivités électrique et thermique : le cœur de la naine sera donc isotherme.

La matière dégénérée se comporte comme un gaz qui ne respecte plus la loi des gaz parfaits donc $PV \neq k.n.R.T$. En d'autres termes : quand la température T s'élève, la pression P et le volume V ne s'accroissent pas

Le taux de dégénérescence de la matière augmente si :

- la densité augmente
- la température baisse

La matière dégénérée est relativement compressible donc :

- la densité d'une naine de forte masse est beaucoup plus élevée que celle d'une naine de faible masse
- de ce fait le rayon d'une naine décroît quand sa masse croît

Masse limite

L'équilibre entre la gravitation et la pression de dégénérescence, qui permet à la naine blanche de se maintenir, est soumis à une masse limite M_{lim}

Lorsque cette masse est atteinte, la pression de Fermi ne suffit plus, et l'édifice s'écroule

C'est la masse de CHANDRASEKHAR

Pour une naine blanche, cette masse limite $M_{\text{lim}} = 5,7 M_{\text{S}}/m_e^2$

Avec : M_{S} = masse solaire

m_e = masse moléculaire moyenne par électron de l'étoile

Pour une naine de carbone, ou de carbone-Oxygène, ce qui est la majorité des cas, le numéro atomique (= nombre de protons) est de moitié égal à la masse atomique, donc m_e est voisin de 2.

Donc :

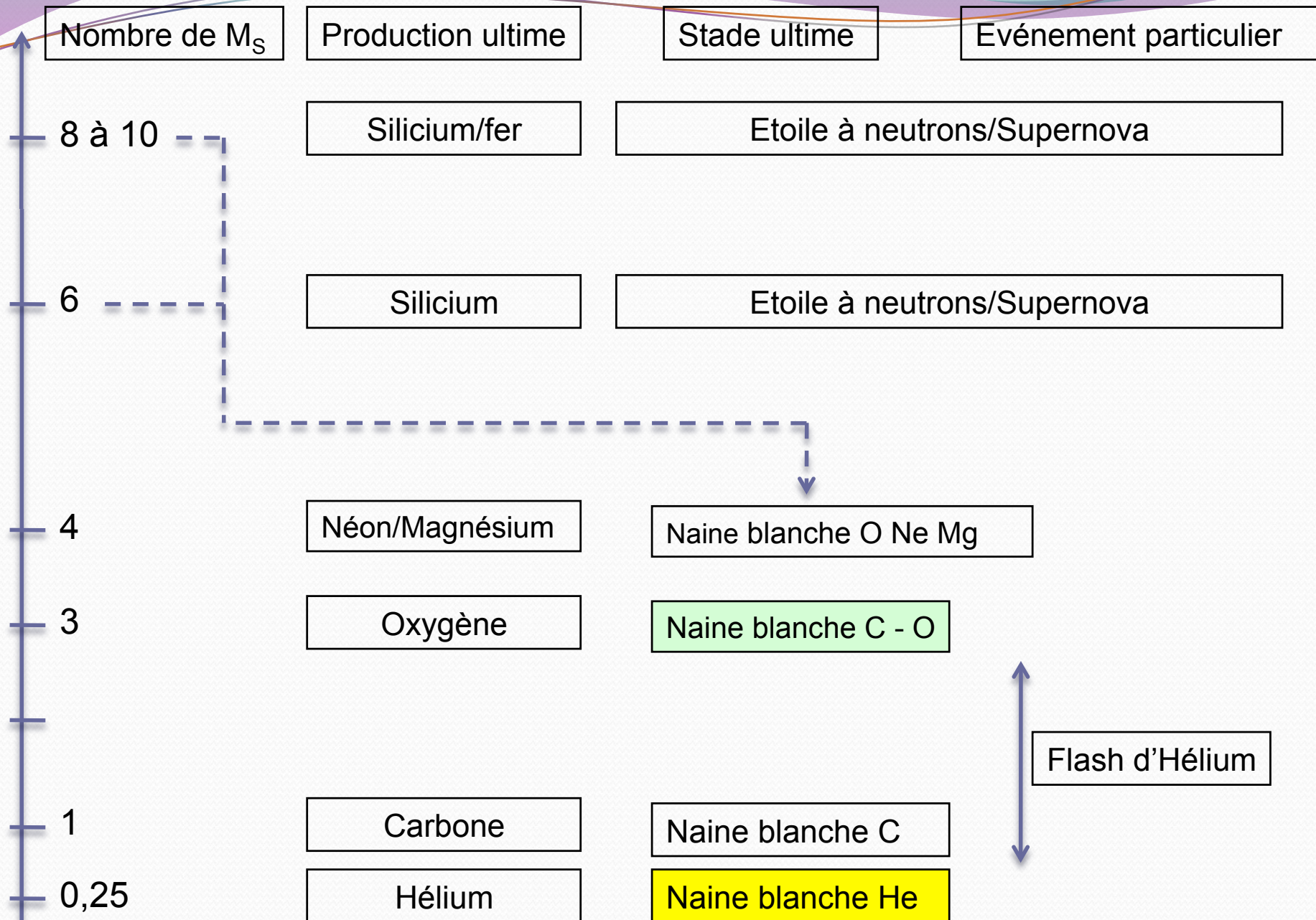
$$M_{\text{lim}} = 1,43 M_{\text{S}}$$

C'est cette masse limite qui limite la masse totale de l'étoile initiale qui donnera naissance à une naine blanche, à 4 à 5 M_{S} , exceptionnellement 8 à 10 M_{S} : l'écart de masse entre l'étoile initiale et la naine est la masse éjectée dans l'espace au cours de la vie de l'étoile

Domaine de formation des Naines blanches

Nombre de M_{\odot}	Production ultime	Stade ultime	Evénement particulier
8 à 10	Silicium/fer	Etoile à neutrons/Supernova	
6	Silicium	Etoile à neutrons/Supernova	
4	Néon/Magnésium	Naine blanche O Ne Mg	
3	Oxygène	Naine blanche C - O	
1	Carbone	Naine blanche C	Flash d'Hélium
0,25	Hélium	Naine blanche He	

Domaine de formation des Naines blanches



Matière dégénérée : naines blanches et étoiles à neutrons

PLAN DE LA PRESENTATION

1. Bref rappel sur l'évolution des étoiles
2. Quelques rappels théoriques sur les atomes
3. Matière dégénérée et formation d'une naine blanche
4. **Caractéristiques des naines blanches**
5. Formation des étoiles à neutrons
6. Composition d'une étoile à neutrons
7. Caractéristiques des étoiles à neutrons
8. Conclusions

Caractéristiques des Naines blanches

Généralités

Une naine blanche est un astre d'une masse variant de 0,2 à 1,33 M_{\odot} (le plus souvent de 0,5 à 0,7 M_{\odot}) avec un volume comparable à celui de la Terre. C'est un petit astre, d'où son nom de **NAINE**

Sa masse volumique est donc très élevée, de l'ordre de 1 tonne par cm^3 , c'est à dire environ 1 million de fois supérieure à celle du Soleil.

Sa température, qui peut excéder 20 000 000 K au coeur, provient de l'énergie emmagasinée par son étoile parente : elle est donc souvent très chaude, notamment au début, d'où son qualificatif de **BLANCHE**

Malgré sa haute température, sa petite surface entraîne que sa luminosité reste limitée, généralement de l'ordre de 1/1000 de la luminosité solaire

La très grande majorité des étoiles parentes ont moins de 4 M_{\odot} : les étoiles plus massives étant plutôt rares, les naines blanches constituent donc le destin de 96% des étoiles

Caractéristiques des Naines blanches

Structure

Une naine blanche est un astre très compact, dont la gravité de surface est très élevée. Etant isotherme, son cœur ne présente pas de phénomène de convection, et sa densité la rend opaque au rayonnement.

Ces conditions sont à l'origine du phénomène de **trilage gravitationnel** : une stratification de la matière qui fait que les éléments les plus légers se retrouvent seuls à la surface, constituant ainsi **son atmosphère**.

La naine est donc constituée :

- **d'un cœur** très dense
- d'une très fine **atmosphère** de constituants légers

Caractéristiques des Naines blanches

Coeur

Le cœur est constitué d'un plasma très dense composé de noyaux atomiques et d'électrons très rapprochés et très dynamiques (matière dégénérée).

Les noyaux impliqués dépendent de la masse de l'étoile parente:

- il peut s'agir d'atomes d'hélium ${}^4_2\text{He}$ pour les étoiles de masse très faible ($\leq 0,5 M_{\odot}$)
- le plus souvent il s'agit d'atomes de carbone ${}^{12}_6\text{C}$ et d'oxygène ${}^{16}_8\text{O}$ pour les étoiles de masses faibles et intermédiaires ($\leq 3 M_{\odot}$) : **cela correspond à la très grande majorité des naines blanches observées.**
- Très rarement, quand les étoiles parentes sont massives (4 à $10 M_{\odot}$), on peut trouver des atomes d'oxygène ${}^{16}_8\text{O}$, de néon ${}^{22}_{10}\text{Ne}$ et de magnésium ${}^{26}_{12}\text{Mg}$
- Il est prédit théoriquement, et de plus en plus vérifié expérimentalement, que, lors d'un stade tardif du refroidissement de la naine, la matière du cœur pourrait **crystalliser** en commençant par le centre : les atomes les plus chargés électriquement (O, Ne et Mg) cristallisent en premier et sédimentent au centre de l'étoile.
- Dans certaines naines, on estime entre 30% et 90% le taux de masse cristallisée

Caractéristiques des Naines blanches

Atmosphère

L'atmosphère est en fait la seule partie de la naine qui est directement accessible à l'observation. Notamment la spectroscopie fait apparaître :

- dans la majorité des naines, les raies spectrales de l'hydrogène en absorption (série de Balmer);
- on observe souvent les raies de l'hélium non ionisé , ou une fois ionisé;
- on note parfois les raies du carbone atomique ou moléculaire;
- plus rarement les raies d'éléments plus lourds, oxygène, néon et magnésium

L'atmosphère des naines est dominée :

- dans 75% des cas par l'hydrogène,
- dans 0,1% des cas par le carbone;
- dans près de 25% des cas par l'hélium

Dans le cas où la naine est seule et n'a donc pas accrété de matière venant d'un compagnon ou de l'espace, on pense que l'atmosphère est constituée :

- d'une enveloppe riche en hélium entourant le cœur et correspondant à 1/100 de la masse totale
- éventuellement elle-même entourée d'un enveloppe riche en hydrogène correspondant à 1/1000 de la masse totale

L'atmosphère d'une naine blanche est donc très fine !

Caractéristiques des Naines blanches

Comportement thermique (1)

La température effective (*) de la **surface** d'une naine blanche peut varier de moins de 4000 K à plus de 150 000 K.

Dans la majorité des cas, elle se situe entre 8000 et 40 000 K

La température d'une naine blanche est très élevée au début de sa formation car elle récupère une grande partie de l'énergie emmagasinée par l'étoile parente : la naine blanche se situe alors dans l'angle inférieur gauche du diagramme de Hertzsprung-Russel (HR) : faible luminosité malgré une température élevée.

La naine, privée de source d'énergie, ne peut que se refroidir et donc se déplacer en bas vers la gauche du diagramme HR

Le refroidissement d'une naine blanche est extrêmement lent car :

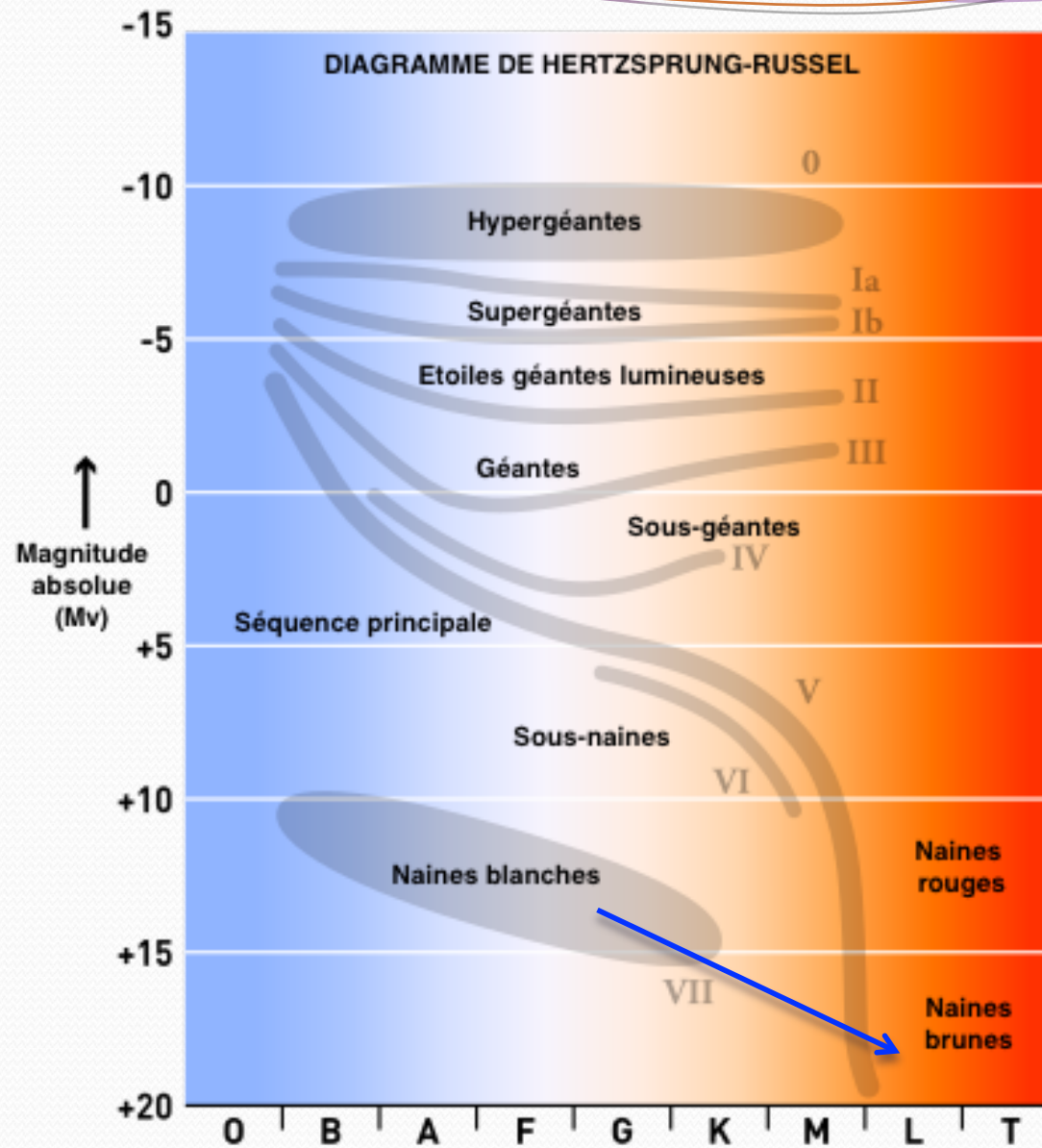
- le transfert thermique est limité par la très petite surface de l'astre;
- les couches externes constituant l'atmosphère de la naine diffusent très mal la chaleur (alors que le cœur est isotherme et très conducteur)

De ce fait **le gradient de température est colossal à la traversée des couches externes** :

- une température de surface de 8000 K correspond à un cœur à 5 000 000 K
- une température de surface de 16 000 K correspond à un cœur de 20 000 000 K

(*) La température effective est la température qu'aurait un corps noir de même surface rayonnant la même quantité d'énergie:

Caractéristiques des Naines blanches



Caractéristiques des Naines blanches

Comportement thermique (2)

Du fait de la lenteur du refroidissement :

- il y a très peu de naines dont la température est inférieure à 4000 K : le record semble être de 3900 K dans notre galaxie;
- **il n'existerait aucune naine noire**, aboutissement final des naines blanches, car la durée de vie de notre univers est insuffisante : ainsi, une naine blanche formée au début du Big Bang (13,5 milliards d'années) aurait aujourd'hui une température supérieure à 3000 K.

On peut utiliser la fonction de luminosité des naines blanches pour trouver la date du début de formation des étoiles parentes : c'est ainsi que l'on date la formation de notre galaxie à 8 milliards d'années.

Cela est corroboré par la loi de Stefan-Boltzmann qui indique que la température d'une naine varie comme le $(\text{temps})^{-1/3}$: la température de la plus vieille naine blanche observée (3900 K) correspond ainsi à la naissance de son étoile mère il y a 8 milliards d'années

Caractéristiques des Naines blanches

Comportement thermique (3)

Un autre aspect du comportement thermique d'une naine blanche, ou d'une « presque naine blanche » réside dans les deux propriétés de la matière de son cœur :

- elle ne respecte pas la loi des gaz parfaits : $PV \neq k.n.R.T$
- sa très forte conductivité thermique fait que le cœur est isotherme

De ce fait, si pour une raison quelconque la température du cœur vient à augmenter suffisamment pour déclencher de nouvelles réactions de fusion :

- le non respect de la loi des gaz parfaits fera que le volume du cœur ne va pas s'accroître, donc rien ne freinera l'élévation de la température;
- le cœur étant isotherme, c'est l'ensemble du cœur qui sera concerné par l'augmentation de température;
- il va donc y avoir emballement des réactions et de la température, ce qui conduira soit à un flash brutal, soit à une explosion pouvant détruire l'étoile :
 - Flash d'hélium dans les étoiles de faibles masses (1 à 2,5 M_{\odot})
 - Flash de carbone dans les étoiles de masses intermédiaires ($< 4 M_{\odot}$)
 - Supernova thermonucléaire SN Ia (voir plus loin)

Caractéristiques des Naines blanches

Champ magnétique

P. Blackett : « tout corps non chargé en rotation doit générer un champ magnétique proportionnel à son moment angulaire ($L = mvr$) »

Prédiction de Blackett (1947) : les naines blanches devraient avoir des champs magnétiques en surface pouvant atteindre 100 Tesla (*)

1960 : « **conservation du flux magnétique de surface** durant l'évolution d'une étoile en naine blanche » : si l'étoile initiale a un champ magnétique superficiel de 0,01 T, le champ magnétique de la naine correspondante avec un rayon 100 fois plus faible que l'étoile initiale = $0,01 \times (100)^2 = 100 \text{ T} = 1 \text{ million de Gauss}$

On a effectivement découvert des champs magnétiques sur de nombreuses naines blanches, dont les intensités varient de 0,2 à 10^5 Tesla

(*) pour mémoire :

- champ magnétique terrestre moyen = $50 \cdot 10^{-6}$ Tesla
- champ magnétique solaire moyen = 0,3 Tesla

Illustration : si le soleil se contacte 200 fois (passant de 1,2 million de km à 6000 km, le champ magnétique de sa naine blanche pourrait valoir : $0,3 \times (200)^2 = 1,2 \cdot 10^4 \text{ T}$

Caractéristiques des Naines blanches

Variabilité

On a observé que certaines naines blanches avaient une luminosité variable

Cette variabilité semble due à un régime de pulsations conduisant à une fréquence de variation de la luminosité généralement de plus de 10 minutes.

Ces pulsations peuvent être dues :

- soit à des phénomènes associés à l'accrétion de matière provenant d'une étoile voisine:
 - dans un système binaire serré, tant que la masse reste suffisamment en deçà de la limite de Chandrasekhar, la naine peut accréter de la matière riche en hydrogène, qui reste en périphérie du cœur, et qui s'enflamme périodiquement par **fusion** de l'hydrogène et crée des pulsations. C'est **la nova classique**
 - des pics de luminosité plus petits et plus fréquents sont observés lorsqu'une partie du disque d'accrétion s'effondre sur l'astre, par **libération de l'énergie potentielle gravitationnelle**. C'est la **nova naine**
- soit à la présence d'un disque de débris en orbite autour de la naine, disque formé après qu'un corps rocheux (astéroïde, planétoïde, planète) a été détruit par les forces de marée exercées par la naine.

Evolutions possibles des Naines blanches

1) - Naine blanche solitaire

Une naine blanche solitaire est un astre stable qui va se refroidir extrêmement lentement pour finalement devenir une **naine noire**.

On pense que la durée de vie d'une naine blanche devenue noire devrait être de l'ordre de celle des protons (10^{32} à 10^{49} années, voire 10^{200} années selon les théories).

La masse de la naine va diminuer très progressivement, au rythme de la désintégration des protons, donc de ses noyaux, jusqu'à redevenir une boule de matière non dégénérée de masse réduite, puis disparaître complètement.

Evolutions possibles des Naines blanches

2) - Naine blanche au sein d'un système binaire naine - étoile

Dans un tel système, la naine blanche peut capturer de la matière provenant de son compagnon, donc sa masse augmente jusqu'à **atteindre la limite de Chandrasekhar** ($\approx 1,4 M_{\odot}$), et deux cas peuvent se présenter :

- **A – Supernova thermonucléaire (SN Ia)**

Les phénomènes suivants s'enchaînent:

1. La pression quantique devenant insuffisante pour supporter le nouvel apport de masse, la naine commence à s'effondrer.
2. Cela accroît la température, ce qui permet le rallumage de la fusion des atomes présents, notamment de Carbone et d'Oxygène
3. Cette fusion n'est plus régulée car la pression quantique ne dépend que de la densité, et pas de la température : **elle s'emballe**
4. Les réactions accélérées de fusion **vont désintégrer la naine dans une gigantesque explosion thermonucléaire**
5. **Il ne restera plus rien de la naine** : couches externes soufflées; couches internes épluchées progressivement

- **B – Effondrement en étoile à neutrons**

Cette transformation résulte de la dégénérescence, non plus des électrons, mais des noyaux atomiques, telle qu'elle se produit dans une **supernova à effondrement de cœur** (voir plus loin)

Evolutions possibles des Naines blanches

3) - Naine blanche au sein d'un système binaire naine - naine

Deux naines blanches C-O fusionnent, créant un objet de **masse supérieure à la limite de Chandrasekhar ($> 2 M_{\odot}$)**, ce qui allume la fusion explosive du carbone, conduisant à une supernova thermonucléaire SN Ia et à la destruction complète des deux naines. On note une émission anormalement élevée de carbone et de silicium, et une très importante luminosité. Il s'agit d'un événement très rare.

4) - Naine blanche s'approchant d'un trou noir

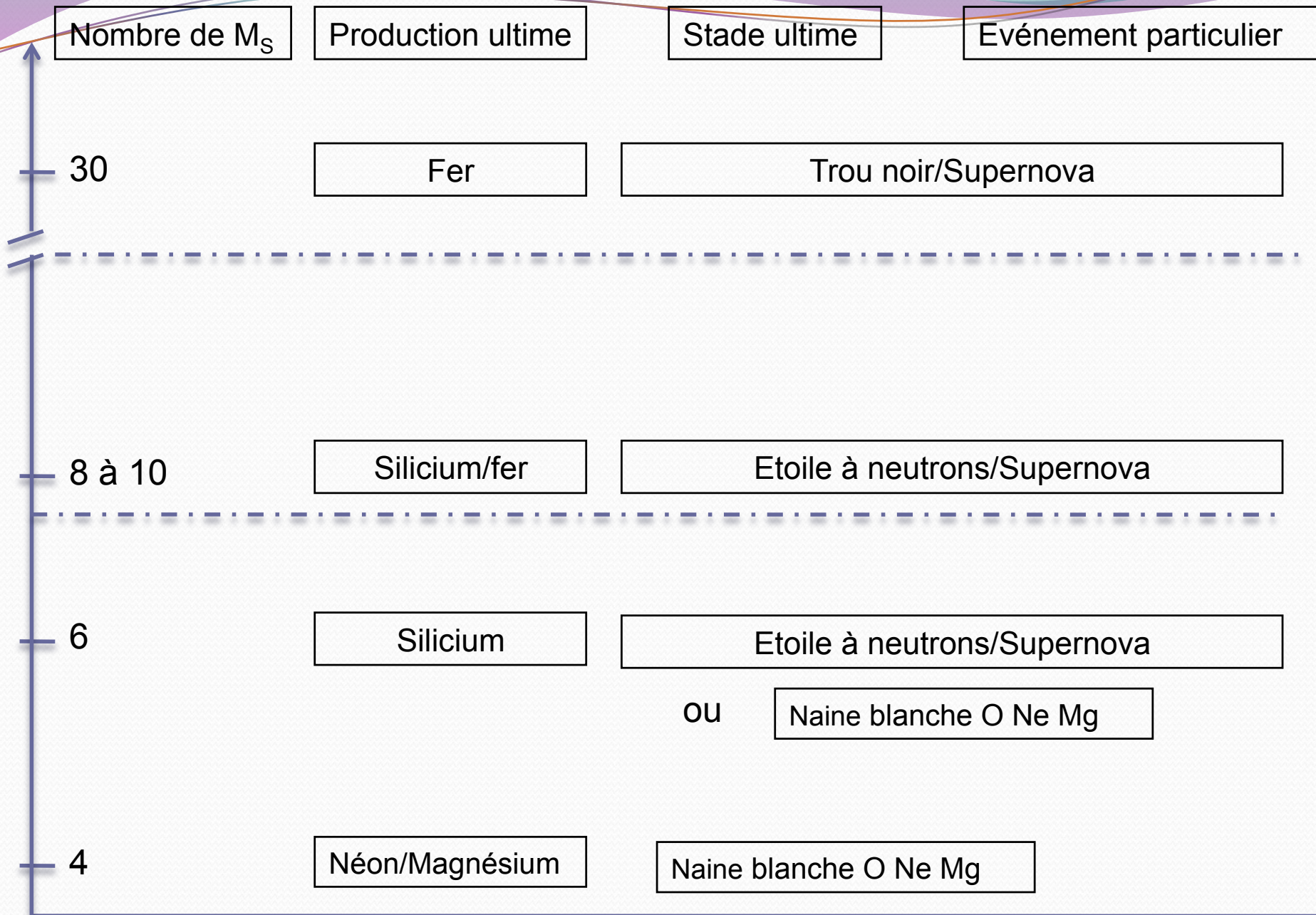
Si une naine blanche, **même de très petite masse ($0,2 M_{\odot}$)** s'approche suffisamment d'un trou noir, elle peut exploser sous forme de supernova thermonucléaire SN Ia : les forces de marée très intenses déforment fortement la naine, augmentant localement fortement la compression du cœur et la température au point d'enclencher la fusion explosive du carbone. Il s'agit d'un événement très rare.

Matière dégénérée : naines blanches et étoiles à neutrons

PLAN DE LA PRESENTATION

1. Bref rappel sur l'évolution des étoiles
2. Quelques rappels théoriques sur les atomes
3. Matière dégénérée et formation d'une naine blanche
4. Caractéristiques des naines blanches
5. Formation des étoiles à neutrons
6. Composition d'une étoile à neutrons
7. Caractéristiques des étoiles à neutrons
8. Conclusions

Domaine de formation des étoiles à neutrons



Etoiles à neutrons

Une étoile à neutrons est le résidu compact de l'effondrement gravitationnel du cœur de certaines **étoiles massives** qui survient quand elles ont épuisé leur combustible nucléaire.

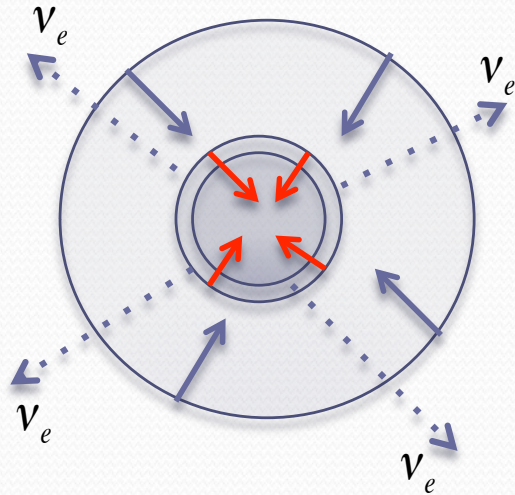
Cet effondrement s'accompagne d'une éjection explosive des couches externes de l'étoile dans le milieu interstellaire, phénomène appelé « supernova à effondrement de cœur ».

On situe aux alentours de $8 M_{\odot}$ la masse minimale de l'étoile mère conduisant à ce phénomène, car il faut qu'on ait atteint le stade de la production du Fer par les réactions nucléaires

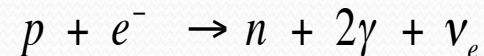
Au delà d'une certaine masse, voisine de 20 à 30 M_{\odot} , la supernova ne produira pas d'étoile à neutrons, mais un trou noir, car la pression gravitationnelle est si intense qu'aucun cœur organisé ne peut exister : le principe d'exclusion de PAULI ne peut plus s'appliquer.

Le phénomène Super Nova par effondrement du cœur

PHASE 1

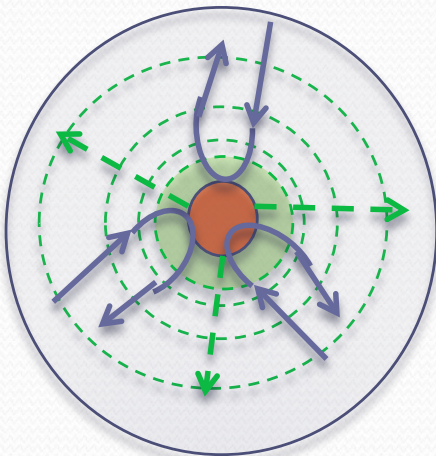


- Quand le silicium est épuisé, et que le fer est en trop forte concentration, le cœur de l'étoile ne peut plus entretenir les réactions car la fusion du fer est endothermique : donc **les processus de fusion s'arrêtent** et **l'étoile s'effondre**.
- Effondrement gravitationnel du cœur et des couches supérieures de l'étoile.
- Fort accroissement de la température du cœur
- Le fer est détruit par les photons → Disparition de l'énergie lumineuse → Baisse de la pression centrale → l'effondrement du cœur se précipite
- Le cœur se densifie: capture d'électrons par les noyaux, transformant les protons en neutrons avec une forte émission de neutrinos :



- Le cœur s'enrichit ainsi très rapidement (qq dixièmes de seconde) en neutrons

PHASE 2



- La matière des couches extérieures s'effondre par gravité sur le cœur de neutrons dans lequel aucune matière ne peut pénétrer : donc elle s'écrase dessus à grande vitesse ($\approx 20\%$ de c) et rebondit sur le cœur

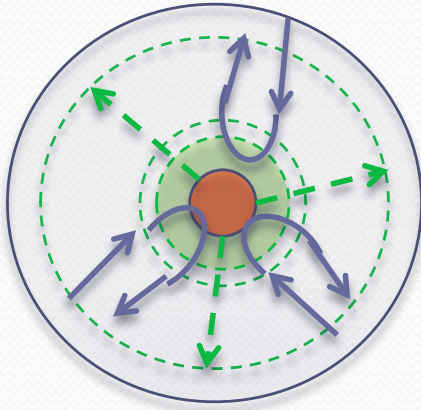
- Cela crée une zone de forte compression autour du cœur, qui génère une forte onde de choc qui va remonter vers les couches extérieures

- La couche enserrant directement le cœur devenu inerte, **continue à produire du nickel 56 et du fer à la surface du cœur**. C'est la chaîne des

désintégrations β^+ : ${}^{56}_{28}\text{Ni} \rightarrow {}^{56}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{56}_{26}\text{Fe}$ qui produira une bonne partie de la grande luminosité de l'explosion de la supernova

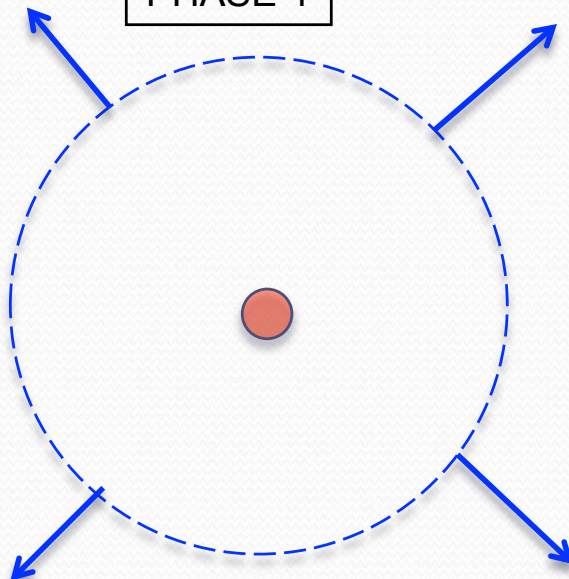
Le phénomène Super Nova par effondrement du cœur

PHASE 3



- En remontant, l'onde de choc réchauffe toutes les couches externes à des températures $> 10^9$ K : cela va **rallumer les réactions de fusion** à tous les étages
- L'intense bombardement neutronique ambiant va aussi favoriser le processus de nucléosynthèse de produits lourds, **le processus « r »**
- Dans les couches du néon et de l'oxygène, on trouvera un autre procédé de nucléosynthèse, **le processus « p »**
- Enfin, les couches externes riches en hydrogène seront le siège **du processus « rp »**

PHASE 4



- Quand l'onde de choc atteint la surface de l'étoile, la température s'accroît de façon phénoménale : il y a **une explosion** qui éjecte toutes les couches, donc tous les produits formés au cours de la vie de l'étoile, ainsi que ceux formés lors du passage de l'onde de choc, dans le milieu interstellaire
- Parallèlement le cœur poursuit sa neutronisation tout en augmentant de masse : lorsqu'il atteint la « masse de Chandrasekhar » (environ 1,4 masse solaire), il se contracte et s'effondre sur lui-même : il devient une étoile à neutrons

Matière dégénérée : naines blanches et étoiles à neutrons

PLAN DE LA PRESENTATION

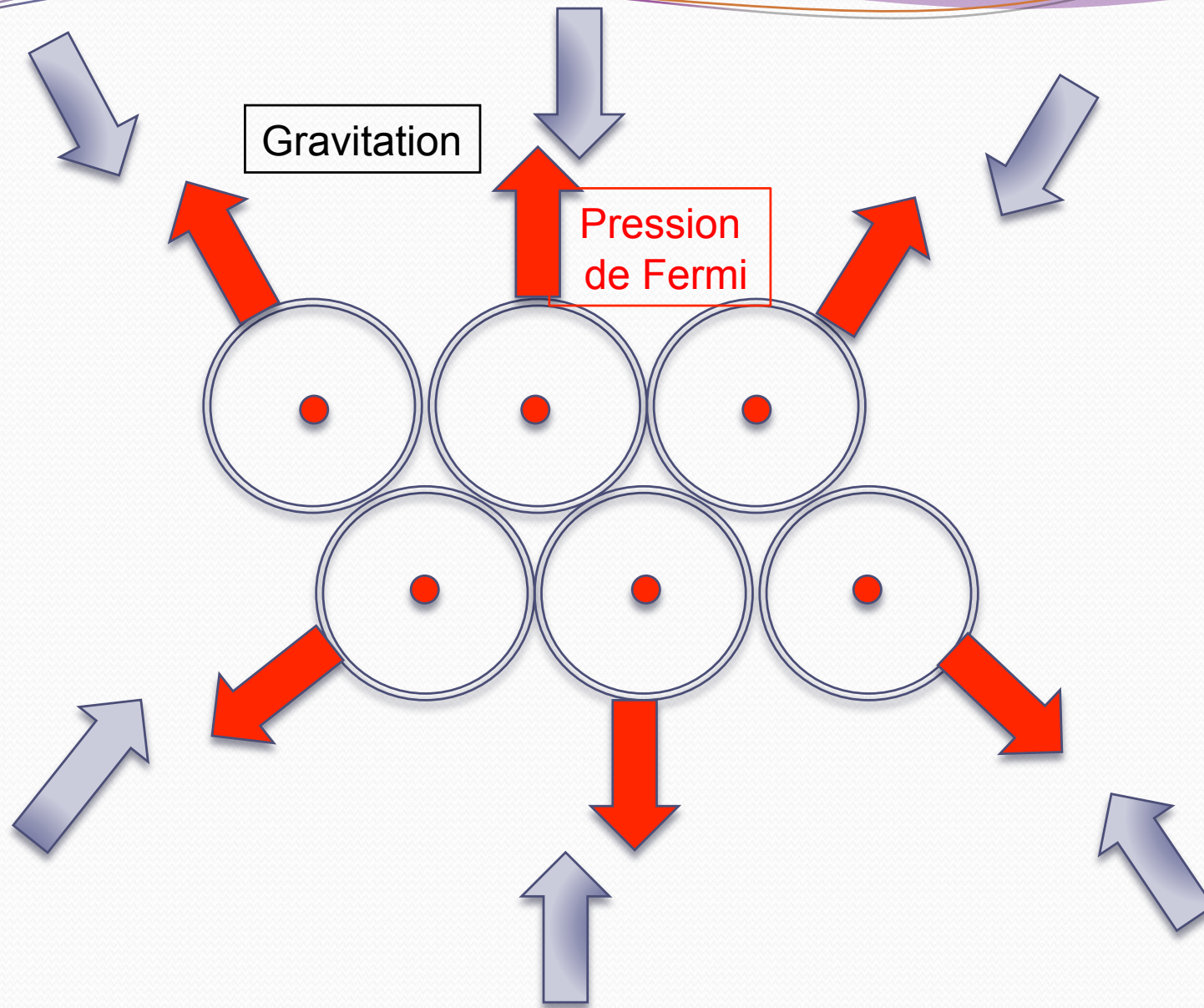
1. Bref rappel sur l'évolution des étoiles
2. Quelques rappels théoriques sur les atomes
3. Matière dégénérée et formation d'une naine blanche
4. Caractéristiques des naines blanches
5. Formation des étoiles à neutrons
- 6. Composition d'une étoile à neutrons**
7. Caractéristiques des étoiles à neutrons
8. Conclusions

Etoiles à neutrons

Que se passe-t-il à l'intérieur du cœur conduisant à une étoile à neutrons ?

La chronologie des événements explique la composition d'une étoile à neutrons

Retour au stade de la naine blanche



Evolution du cœur en fonction de l'intensité de la gravité

(1)

Au fur et à mesure que les forces de gravitation vont s'accroître sur le cœur, sa matière va se comprimer, donc sa densité va augmenter : cette compression va continuer à dégénérer la matière. On peut distinguer les étapes successives ci-après :

A – Stade du niveau du cœur de la naine blanche (voir schéma précédent) :

- $\rho \approx 1 \text{ tonne/cm}^3 = 10^6 \text{ g/cm}^3$
- on est au stade de la « dégénérescence électronique » : la pression de Fermi équilibre la pression de la gravité (principe d'exclusion de PAULI)
- du fait de leur grande énergie, les électrons s'arrachent de leurs atomes : ils deviennent « libres » pour être captés par les atomes voisins, ce qui fait que beaucoup d'atomes sont ionisés.

B – Stade de la dissociation de la matière :

- Quand la densité croît, de plus en plus d'électrons deviennent libres sans pouvoir être captés par les atomes : la quasi-totalité des électrons acquièrent une énergie suffisante pour ne plus être liés au noyau, et ils ne peuvent plus rester sur leurs couches orbitales, et le principe d'exclusion de PAULI ne peut plus s'appliquer aux électrons
- donc la matière peut se contracter encore davantage
- cette matière est une soupe de noyaux atomiques et d'électrons libres

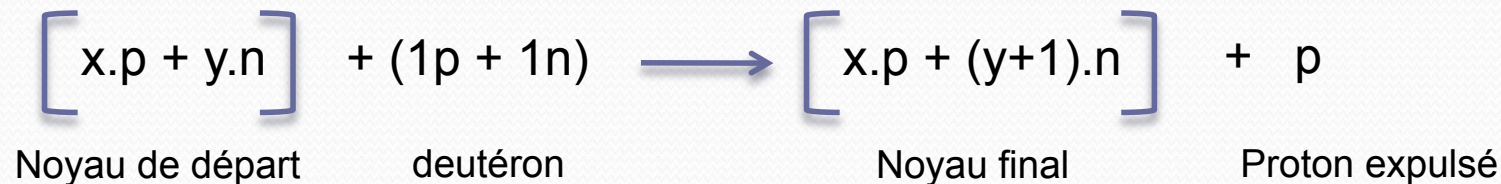
Evolution du cœur en fonction de l'intensité de la gravité

(2)

C – Expulsion des protons hors des noyaux

Deux processus provoquent cette expulsion :

- Quand la matière se contracte, les nucléons (protons et neutrons) vont tendre à se rapprocher : la force nucléaire, qui est normalement la force attractive qui va empêcher aux protons de se fuir, devient une force répulsive;
- Processus d'Oppenheimer-Phillips : dans les conditions qui règnent ici, les deutérons (noyaux de Deutérium) peuvent se rapprocher suffisamment des noyaux atomiques pour y fusionner :



On note que les noyaux atomiques s'enrichissent en neutrons.

D – Transformation des protons en neutrons :

Simultanément à l'étape C précédente, les protons expulsés des noyaux réagissent avec les électrons libres présents pour former des neutrons :



Evolution du cœur en fonction de l'intensité de la gravité

(3)

C et D – Ces deux étapes simultanées précédentes ont pour conséquence d'enrichir les noyaux atomiques en neutrons, avec beaucoup plus de neutrons que dans leur état dans la matière ordinaire, et ceci d'autant plus que la densité augmente:

	Référence Matière ordinaire
à $\rho \approx 200 \text{ tonnes/cm}^3 = 2 \cdot 10^8 \text{ g/cm}^3$ on forme le ${}_{28}^{62}\text{Ni}$	${}_{28}^{58}\text{Ni}$
à $\rho \approx 50\,000 \text{ tonnes/cm}^3 = 5 \cdot 10^{10} \text{ g/cm}^3$ on forme le ${}_{30}^{80}\text{Zn}$	${}_{30}^{64}\text{Zn}$
à $\rho \approx 400\,000 \text{ tonnes/cm}^3 = 4 \cdot 10^{11} \text{ g/cm}^3$ on forme le ${}_{36}^{118}\text{Kr}$	${}_{36}^{84}\text{Kr}$

E – Expulsion des neutrons hors des noyaux :

Quand $\rho > 430\,000 \text{ tonnes/cm}^3 = 4,3 \cdot 10^{11} \text{ g/cm}^3$ les noyaux deviennent trop riches en neutrons : une partie de ces derniers s'échappent des noyaux.

La matière est alors composée de noyaux très riches en neutrons, d'électrons libres de moins en moins nombreux, de protons et de neutrons libres

Evolution du cœur en fonction de l'intensité de la gravité

(4)

F – Dissolution des noyaux atomiques :

Quand $\rho > 1,7 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$ les noyaux atomiques achèvent de se dissoudre.

La matière est alors composée de neutrons, de protons et d'électrons libres de moins en moins nombreux.

G – Etape ultime :

Quand $\rho > 3 \cdot 10^{15} \text{ g/cm}^3$ les modifications qui surviennent concernent les quarks, qui sont les constituants des protons et des neutrons. Des réorganisations des quarks, ou l'apparition de nouveaux types de quarks, tels que les quarks *s* (*strange*) sont possibles.

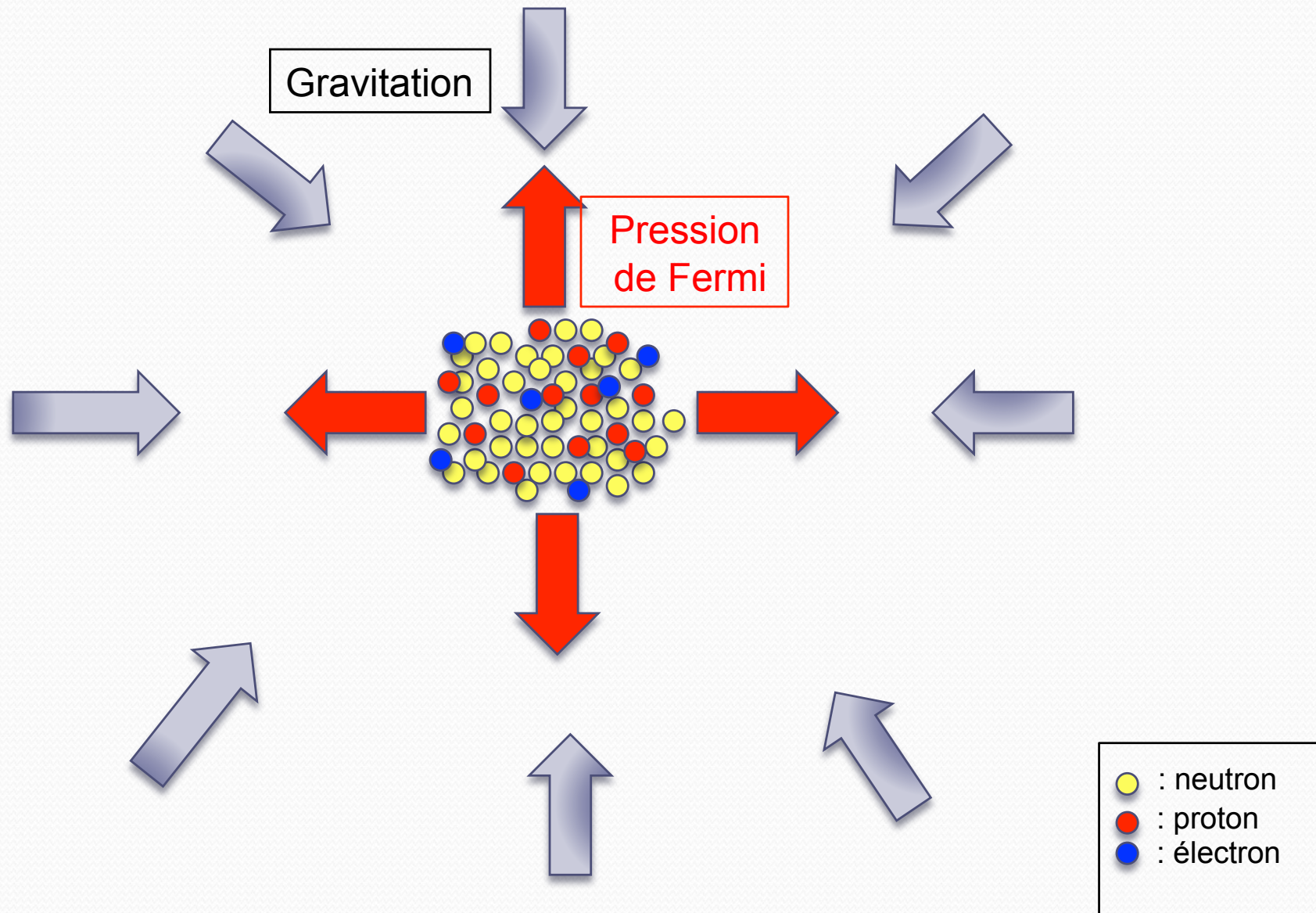
Cette étape ultime est moins bien connue.

La matière est alors composée essentiellement de neutrons, avec des protons moins nombreux et d'autres particules exotiques (muons ?). Les électrons libres sont peu nombreux, liés à l'équilibre neutrons/protons.

Cette soupe de fermions est soumise au principe d'exclusion de PAULI, mais ici au niveau des nucléons: la force de répulsion de PAULI permet d'équilibrer la pression gravitationnelle.

Equilibre dans le cœur d'une étoile à neutrons

Matière dégénérée par dégénérescence des nucléons



Composition d'une étoile à neutrons

Atmosphère très ténue
H, He, C..

Croûte externe

Noyaux ionisés s'enrichissant en neutrons
Etapes A, B C et D
 ρ varie de 10^6 à $4 \cdot 10^{11}$ g/cm³

Surface cristalline
de matière ordinaire
H = 100 m
 $\rho = 10^6$ g/cm³
T = 10^6 K
Gravité = 10^{11} g
Siège du pulsar

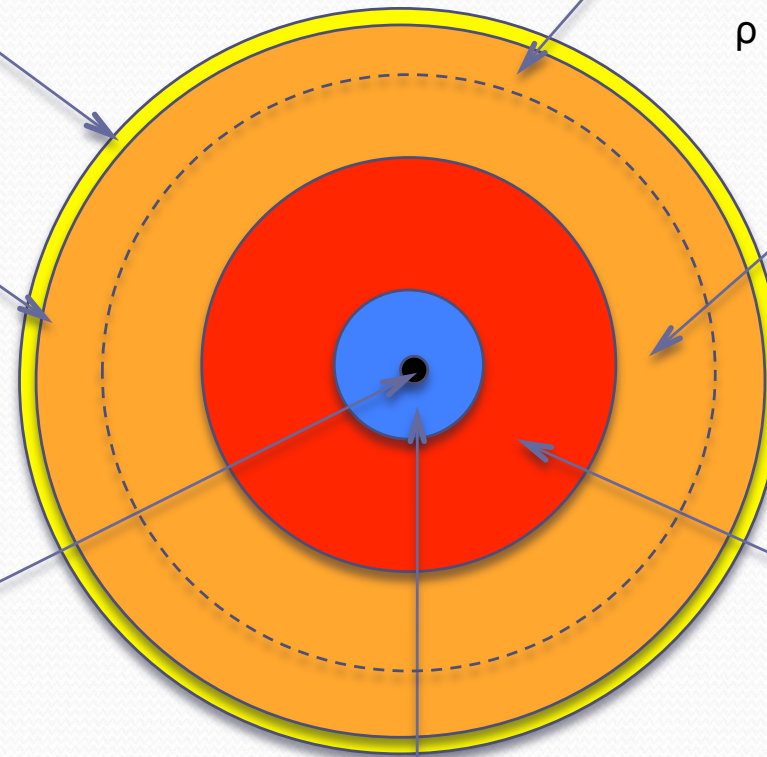
Croûte interne

Etape E
Les neutrons s'échappent des noyaux
 $\rho > 4 \cdot 10^{11}$ g/cm³

Suspicion existence d'un **noyau solide** de nature inconnue ?

Noyau externe

Etape F
Les noyaux atomiques achèvent de se dissoudre
Milieu très riche en neutrons
 $\rho > 1,7 \cdot 10^{14}$ g/cm³



Noyau interne

Etape G
Réorganisation des nucléons
Milieu très riche en neutrons
 $\rho > 3 \cdot 10^{15}$ g/cm³

Matière dégénérée : naines blanches et étoiles à neutrons

PLAN DE LA PRESENTATION

1. Bref rappel sur l'évolution des étoiles
2. Quelques rappels théoriques sur les atomes
3. Matière dégénérée et formation d'une naine blanche
4. Caractéristiques des naines blanches
5. Formation des étoiles à neutrons
6. Composition d'une étoile à neutrons
7. **Caractéristiques des étoiles à neutrons**
8. Conclusions

Etoile à neutrons : généralités

Une étoile à neutrons est une boule **parfaitement sphérique**,
Sa masse est comprise dans une fourchette étroite de **1,4 à 2,6 M_{\odot}** .
Son diamètre est très restreint, de l'ordre de **20 à 40 km** seulement.
Sa densité est donc extraordinairement élevée.

A sa naissance, l'étoile à neutrons est dotée d'une **vitesse de rotation très élevée**, au minimum de l'ordre de plusieurs dizaines de tours par seconde.
Elle possède un **champ magnétique très intense, de l'ordre de 10^{11} Teslas**, qui résulte de l'énorme contraction de son étoile mère

L'intérieur d'une étoile à neutrons, constitué principalement de neutrons libres à l'état superfluide, est **un milieu supraconducteur**:

- la supraconductivité d'un matériau est l'absence de résistance électrique et l'aptitude à expulser tout champ magnétique hors de ce matériau;
- elle est très liée à la **très forte conductivité électrique** du milieu et à sa nature quantique : interactions entre atomes ionisés et électrons libres, puis interactions entre protons et électrons.

Etoile à neutrons : détection, observation

Une étoile solitaire de grande vitesse de rotation et de champ magnétique intense projette le long de son axe magnétique un mince pinceau de radiations : un observateur placé dans cet axe verra une émission électromagnétique pulsée, appelée **pulsar** (Jocelyn Bell, 1967).

Certains pulsars clignotent jusqu'à mille fois par seconde.

Les pulsars émettent dans toutes les longueurs d'onde : du rayonnement gamma et X jusqu'aux ondes radio

L'analyse du **ralentissement des pulsars**, ou des brusques variations de leur vitesse angulaire (glitch) permet d'estimer l'ordre de grandeur de leur champ magnétique et donne des informations sur la nature superfluide de l'intérieur de l'étoile.

Quand l'étoile à neutrons fait partie d'un système binaire, les interactions de matière font qu'elle devient une **source de rayons X**, ce qui permet de mieux comprendre les processus physiques qui règnent au sein même de l'étoile à neutrons.

L'étoile à neutrons fait l'objet d'un récent regain d'intérêt : **l'intensité des ondes gravitationnelles** qu'elle peut émettre lors d'une collision avec une autre étoile à neutrons ou à l'approche d'un trou noir la rend particulièrement intéressante pour la détection de ces ondes et pour une meilleure compréhension des phénomènes gravitationnels

Etoile à neutrons : connaissances

L'extraordinaire densité qui règne au cœur d'une étoile à neutron justifie que notre connaissance de la matière qui y règne soit limitée : **cette connaissance décroît** d'ailleurs quand on va de la surface au cœur, c.a.d. **quand la densité augmente**.

Toutefois **la physique nucléaire permet de prédire** le type de noyaux qui seront produits à une densité donnée. Les nombres magiques de nucléons (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126), les zones de stabilités à 40 neutrons ou protons, à 50 neutrons ou à 82 neutrons, sont des balises qui permettent d'expliquer la formation de nouveaux noyaux très enrichis en neutrons, tel qu'on peut les obtenir en laboratoire

Il est possible de **déterminer la masse d'une étoile à neutrons** quand celle-ci fait partie d'un système binaire, par l'étude de son orbite.

C'est particulièrement vrai pour un couple serré de deux étoiles à neutrons : l'étude des émissions de l'un et/ou les deux pulsars permet de remonter aux masses des deux astres par des calculs faisant intervenir la relativité générale

Il est en principe possible de **déterminer le rayon d'une étoile à neutrons** en observant l'émission thermique en provenance de sa surface. Cependant beaucoup de données intermédiaires sont mal connues (distance de l'étoile, température de surface, composition chimique de l'atmosphère....)

Etoile à neutrons : devenir

Une étoile à neutrons isolée a une durée de vie probablement très longue : la densité ρ est tellement forte que la matière ne peut s'en échapper.

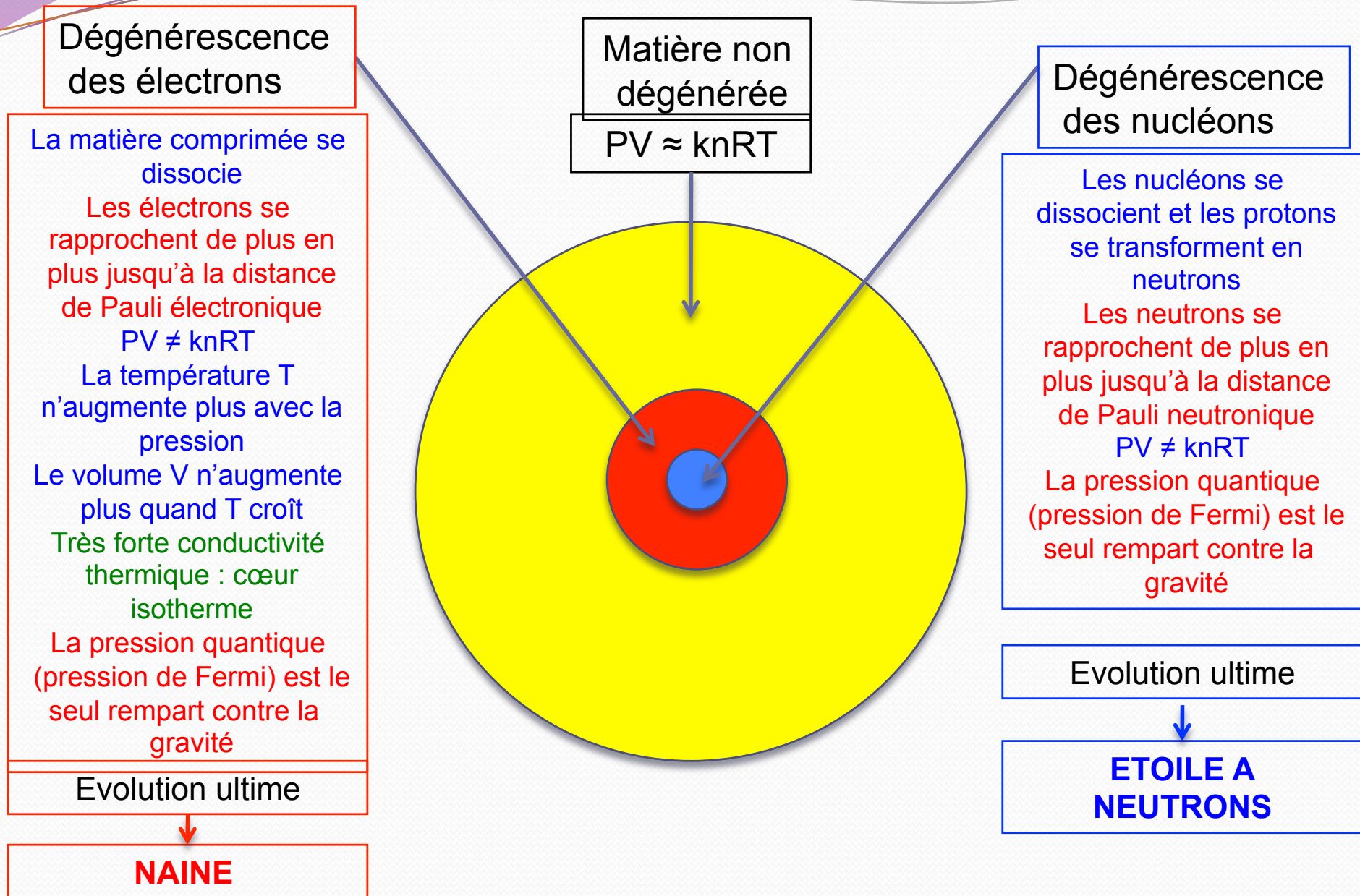
Par ailleurs, si les neutrons peuvent se transformer en protons par radioactivité β^- les conditions favorisent la re-transformation des protons en neutrons.

Comme pour une naine blanche, la durée de vie est donc voisine de celle du proton, c'est à dire d'au moins 10^{32} années.

Par contre l'avenir d'une étoile à neutrons peut être profondément modifié en cas de système binaire, ou de rencontre avec une autre étoile à neutrons : la fusion de deux étoiles à neutrons peut d'ailleurs donner naissance à une nouvelle étoile à neutrons plus massive ou à un trou noir

CONCLUSION

Matière dégénérée



Séminaire de la Société Astronomique de Lyon

Les naines blanches et les étoiles à neutrons constituent les deux **résidus finaux** de la quasi-totalité des étoiles de l'Univers

Elles sont caractérisées par une **très forte masse volumique et par un champ gravitationnel intense** : cela devient même inouï pour les étoiles à neutrons

Leur cœur est constitué d'une matière insolite, dite **dégénérée** : dégénérescence des électrons pour la naine blanche, dégénérescence des nucléons pour l'étoile à neutrons. Leur stabilité est assurée **par le respect du Principe d'exclusion de PAULI** qui permet l'existence de forces de répulsion qui s'opposent à l'écrasante pression gravitationnelle.

Les naines blanches sont mieux connues dans leur contenu et leur comportement. Ce sont aussi les résidus les plus nombreux

Les étoiles à neutrons sont moins bien connues : **ces objets sont extrêmes en tout point**, à commencer par la densité, le champ de gravitation et le champ magnétique. **Presque toute la physique est nécessaire pour comprendre les propriétés d'une étoile à neutrons** : la relativité générale bien sûr mais aussi la magnétohydrodynamique, la théorie de la superfluidité et celle de la supraconductivité. Ce sont aussi de formidables laboratoires de physique nucléaire et de physique des particules élémentaires.