LA CAPSULE DU DÉBUTANT

Les étoiles

- ✓ La structure de la matière (partie 1)
- ✓ La structure de la matière (partie 2)
- ✓ **L'énergie des étoiles**

LES OBJECTIFS

- Au terme de cette présentation, le participant pourra :
  - Énumérer les grands jalons de l'histoire des idées qui ont permis de répondre à la question : « Comment les étoiles brillent-elles ? »
  - Discuter des bases théoriques de la physique des particules qui permettent de comprendre la fusion thermonucléaire.
  - Démontrer comment la fusion thermonucléaire explique les observations qui portent sur les grands attributs et l'évolution des étoiles.

DE QUOI UNE ÉTOILE EST-ELLE LE NOM ?

- Qu'est-ce qu'une étoile ?
  - Une étoile est un astre suffisamment massif pour briller par lui-même.
    - Ici, ***massif*** n'a pas le sens de *dense* comme dans : "Cette table est en bois massif".
    - ***Massif*** signifie : "Qui a beaucoup de masse".

Au cours de cette présentation, nous verrons la relation entre la masse d'un objet et le fait de briller.

Nous prendrons exemple sur un astre qui brille dans notre banlieu : le ***Soleil***

Et nous nous demanderons :

"Comment le Soleil brille-t-il ?"

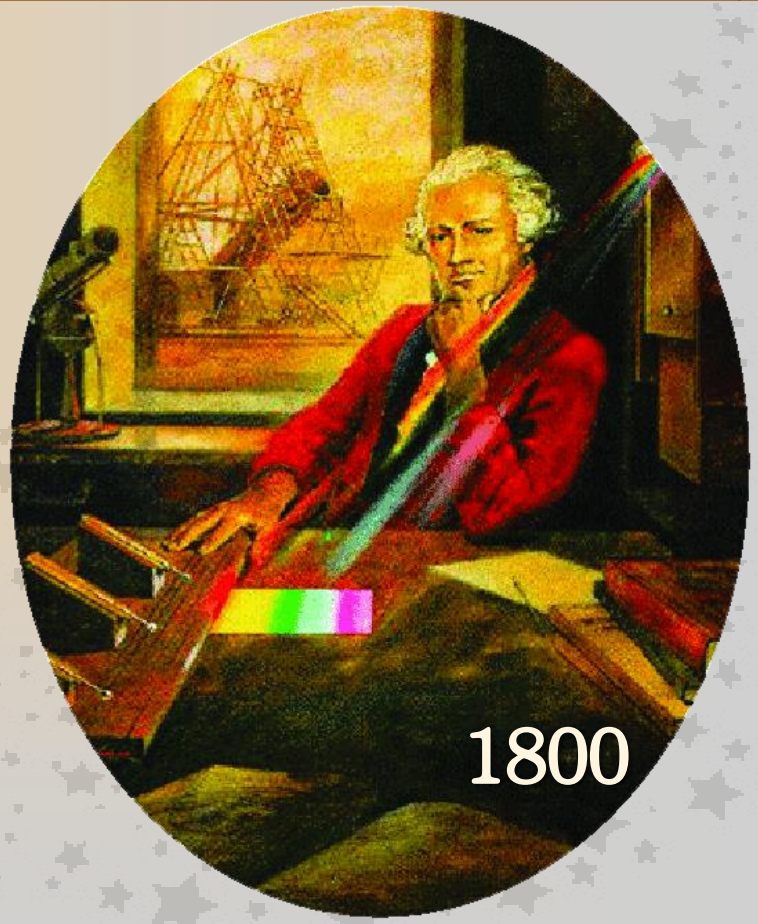
Qu'est-ce que la lumière ?

Isaac Newton
1642 (1643)-1727

LE SOLEIL BRILLE

- Le rayonnement du Soleil.

"Rayons caloriques"



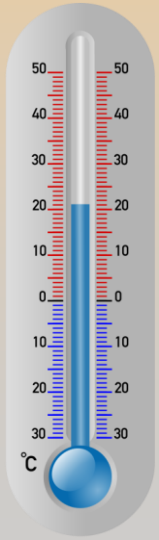
… découvre l'infrarouge

William Herschel
1738-1822

LE SOLEIL BRILLE

- Quelle est la puissance énergétique du Soleil ?

H_2O



John Herschel
1792-1871

… et un peu de math !

LE SOLEIL BRILLE

- Quelle est la puissance énergétique du Soleil ?
  - À l'époque, on savait qu'il fallait 4 187 J pour ⬆ la °T de 1 kg H_2O de 1°C.
  - Herschel calcule que la puissance radiative du Soleil ≈ 1 000 W/m² de surface terrestre.

10 ampoules de 100W

La vraie mesure = 1 350 W/m²

John Herschel
1792-1871

LE SOLEIL BRILLE

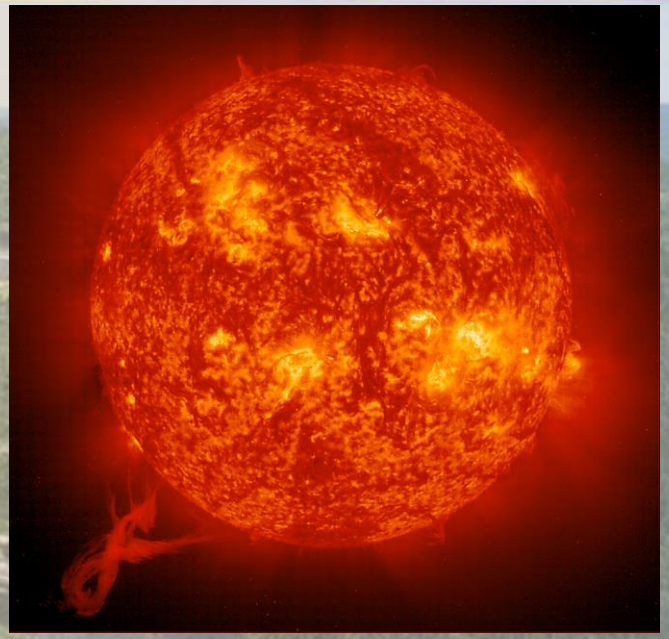
- Quelle est la puissance énergétique du Soleil ?
  - Sachant que le Soleil est à 150 millions de km de la Terre,
  - Herschel calcule que la puissance du Soleil est de **4×10^{26} W**

La vraie mesure = **$3{,}86 \times 10^{26}$ W**

John Herschel
1792-1871

LE SOLEIL BRILLE

- Quelle est la puissance énergétique du Soleil ?



La vraie mesure = **3,86 x 10^{26} W**

- Puissance installée Hydro-Québec = **3,72 x 10^{10}** W.
- La puissance énergétique du Soleil est **10^{16}** (10 000 000 000 000 000) fois supérieure à la puissance installée d'Hydro-Québec.
- La Terre reçoit 1/2 000 000e de l'énergie du Soleil.

LE SOLEIL BRILLE

- En une seule seconde, le Soleil produit plus d'énergie que n'en a consommée l'espèce humaine depuis son apparition sur la Terre…

LE SOLEIL BRILLE

- … jusqu'à maintenant

LA SOURCE

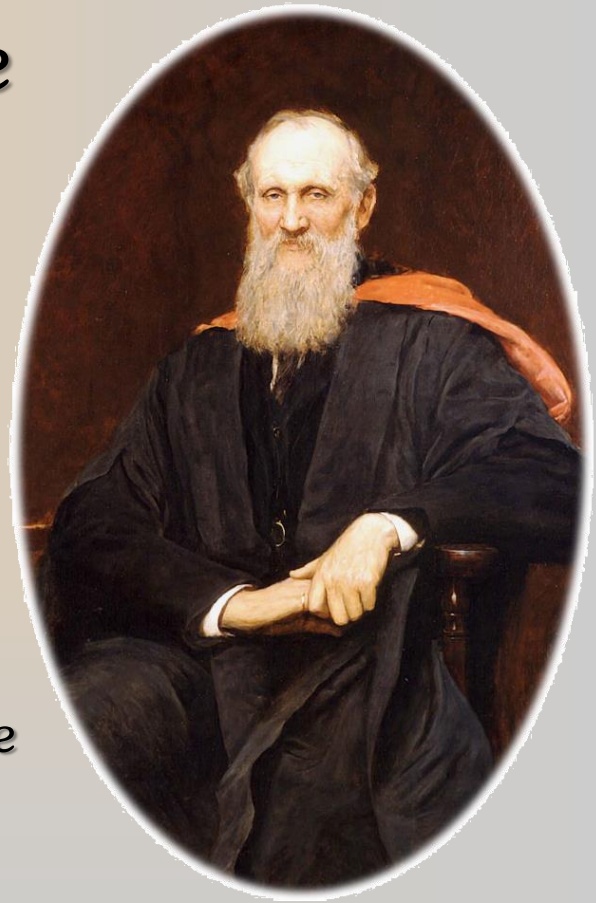
Hermann von Helmholtz
1821-1894

- D'où vient l'énergie du Soleil ?
  - À l'époque : 1838
    - On connaissait la masse du Soleil :

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3$$

3e Loi de Kepler généralisée

$M_\odot = 1{,}98 \times 10^{30}$ kg

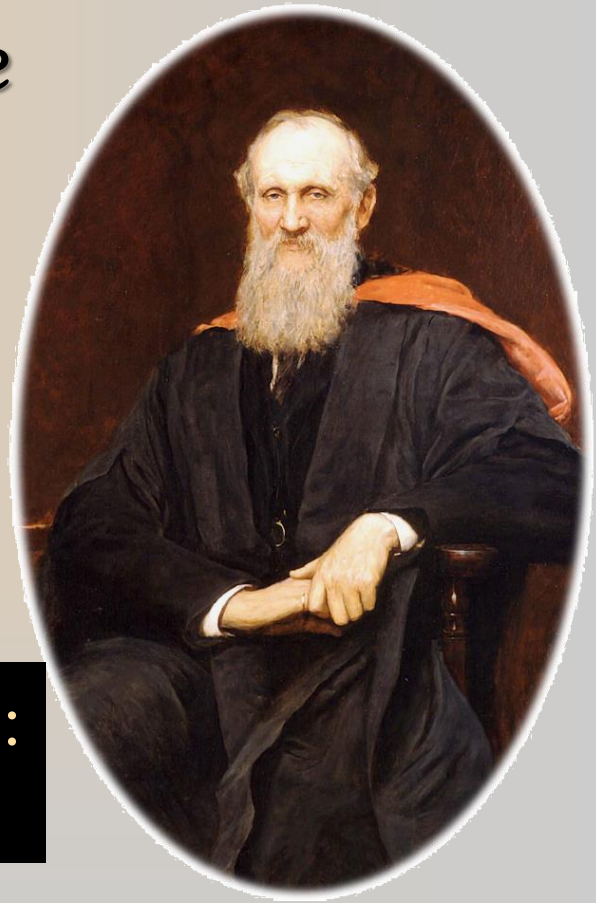


Lord Kelvin
1824-1907

LA SOURCE

- D'où vient l'énergie du Soleil ?
  - À l'époque : 1838
    - Le charbon était le combustible le plus efficace…

Hermann von Helmholtz
1821-1894



Lord Kelvin
1824-1907

Durée de vie du Soleil :
5 000 ans !

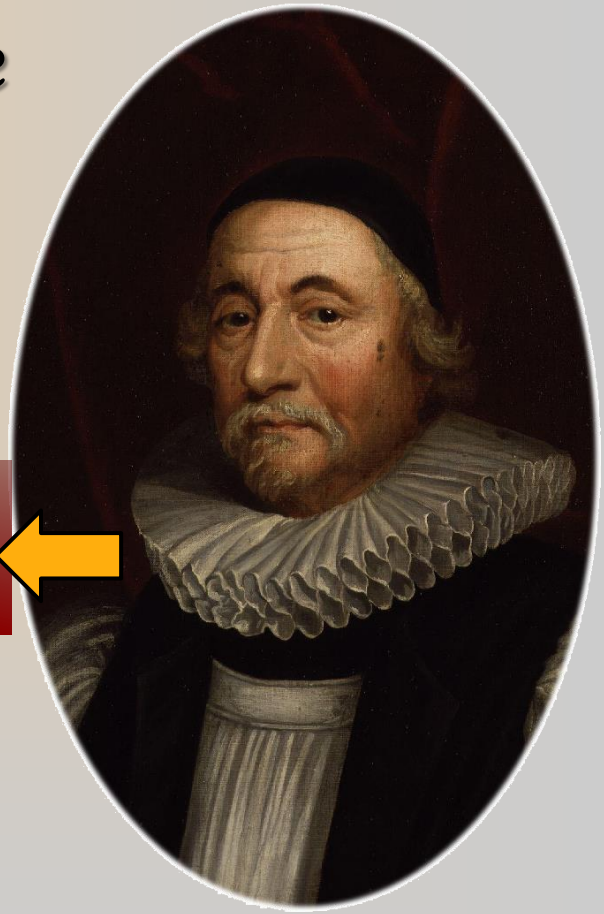
LA SOURCE

- D'où vient l'énergie du Soleil ?
  - À l'époque : 1838
    - Cela faisait du sens !

Isaac Newton
1642 (1643)-1727

La Création a eu lieu :
En 3988 AEC

La Création a eu lieu :
Le 22 octobre 4004 AEC

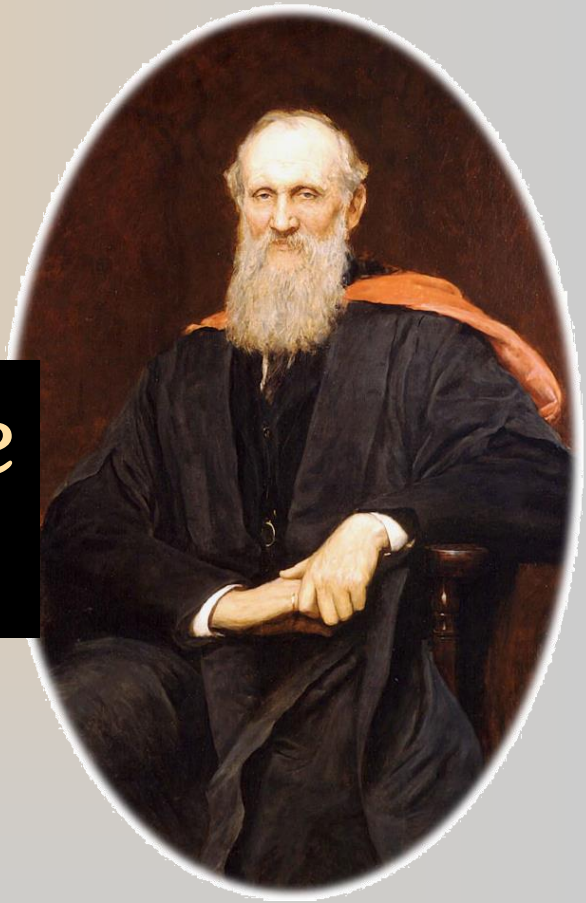


James Ussher
1581-1656

LA SOURCE

Hermann von Helmholtz
1821-1894

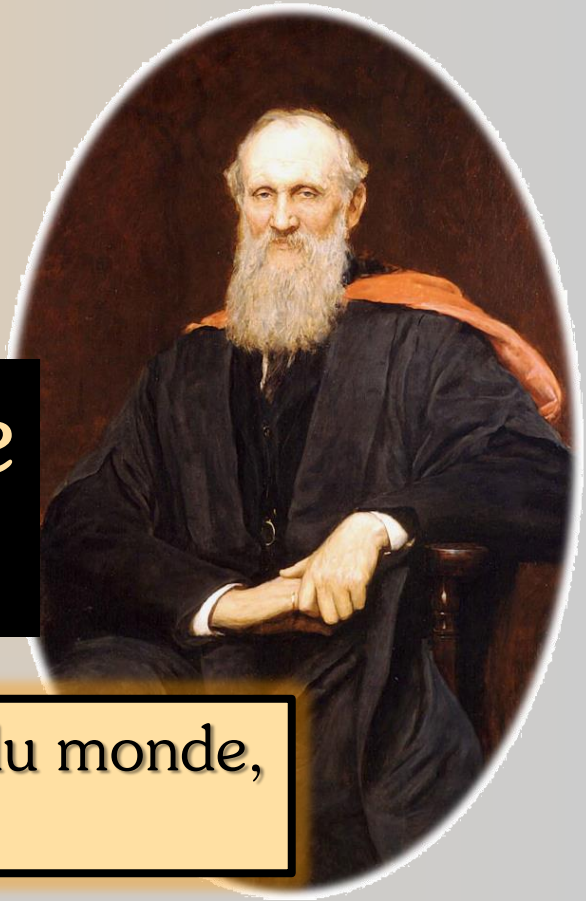
La fin du monde était proche !



Lord Kelvin
1824-1907

LA SOURCE

La fin du monde était proche !



Lorsqu'un gourou annonce la fin du monde, ne riez pas, il a raison…

Hermann von Helmholtz
1821-1894

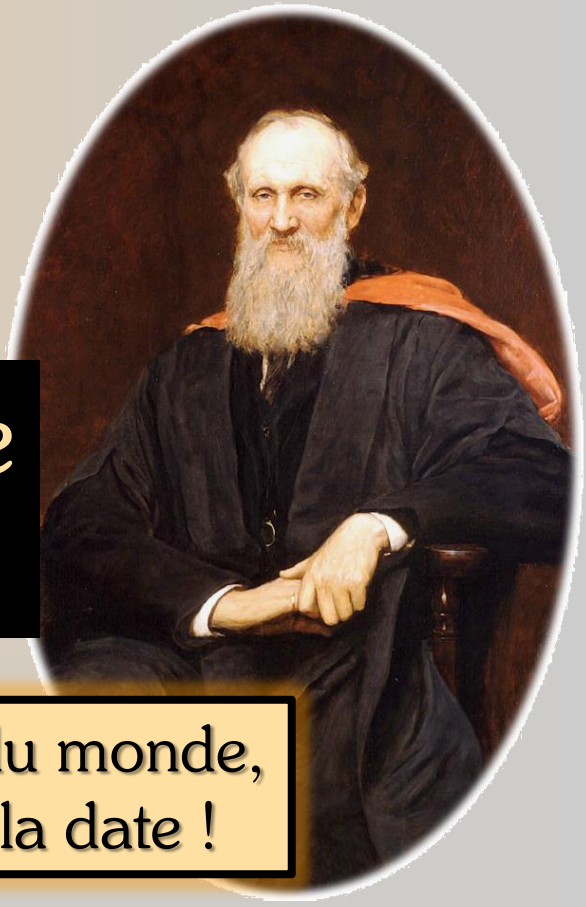
Lord Kelvin
1824-1907

LA SOURCE

Hermann von Helmholtz
1821-1894

La fin du monde était proche !

Lorsqu'un gourou annonce la fin du monde, ne riez pas, il a raison… sauf pour la date !



Lord Kelvin
1824-1907

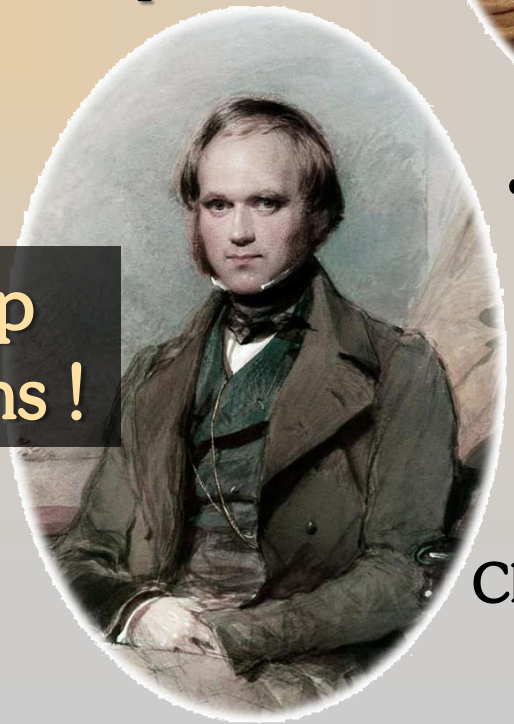
LA SOURCE

James Hutton
1726-1797

- D'où vient l'énergie du Soleil ?
  - Pendant ce temps :

Charles Lyell
1797-1875

La Terre est beaucoup plus âgée que 5 000 ans !



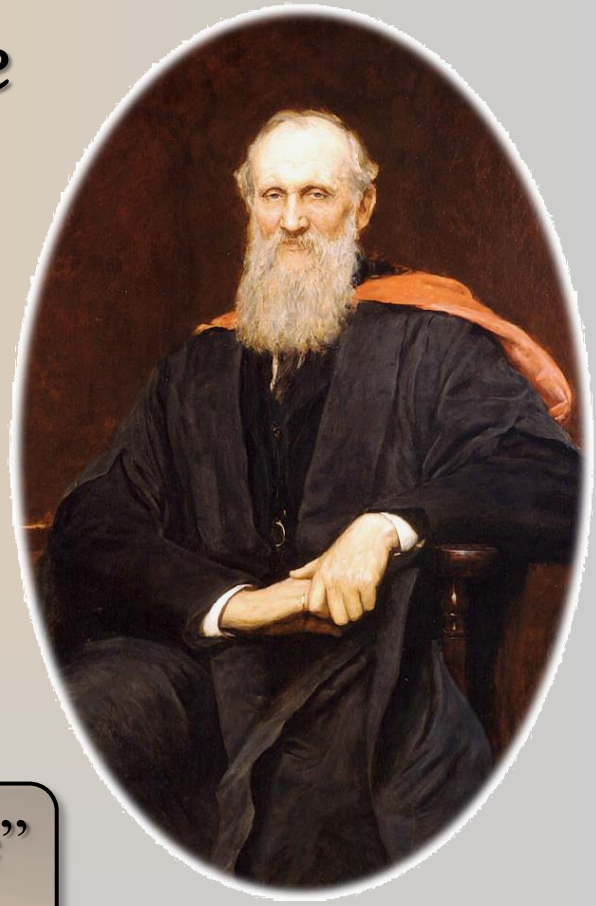
Charles Darwin
1824-1907

LA SOURCE

- D'où vient l'énergie du Soleil ?
  - Retour à la planche à dessin 1870
    - Réchauffement par effondrement gravitationnel.

Hermann von Helmholtz
1821-1894

"Théorie météoritique"
Kelvin



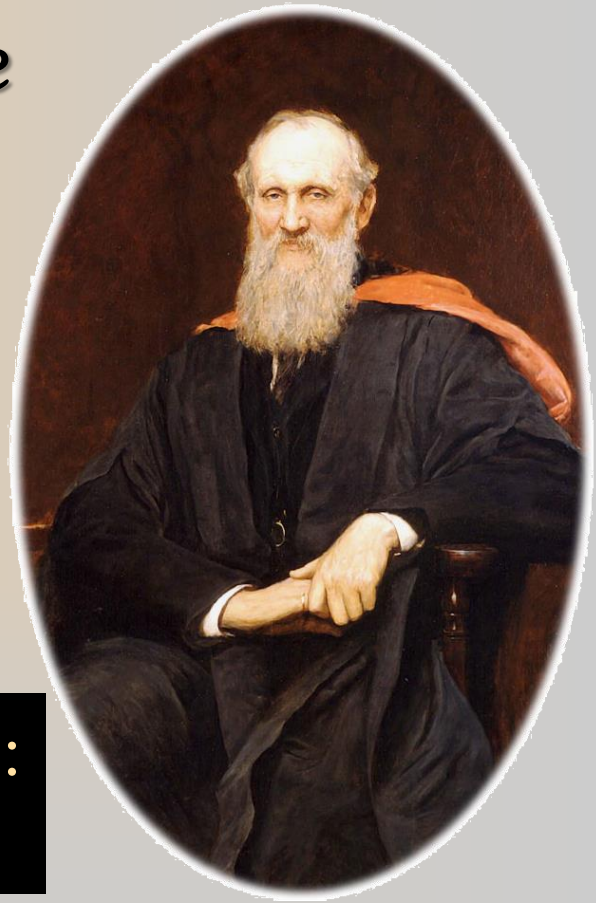
Lord Kelvin
1824-1907

LA SOURCE

Hermann von Helmholtz
1821-1894

- D'où vient l'énergie du Soleil ?
  - Retour à la planche à dessin 1870
    - Réchauffement par effondrement gravitationnel.

Durée de vie du Soleil : 30 000 000 années !

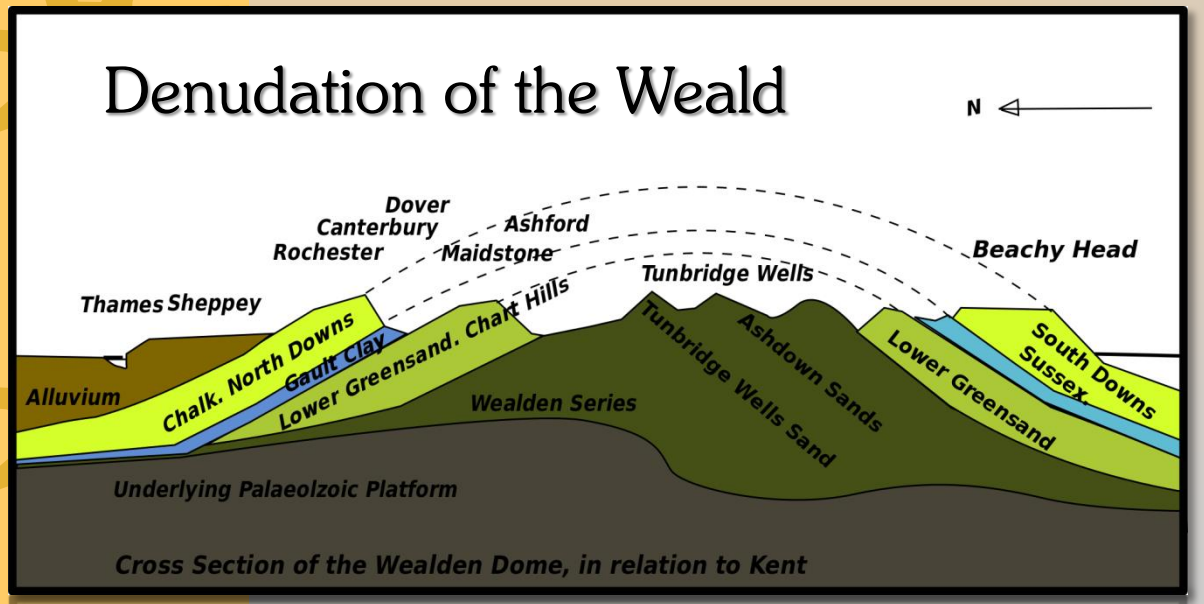


Lord Kelvin
1824-1907

LA SOURCE

- D'où vient l'énergie du Soleil ?
  - Pendant ce temps :

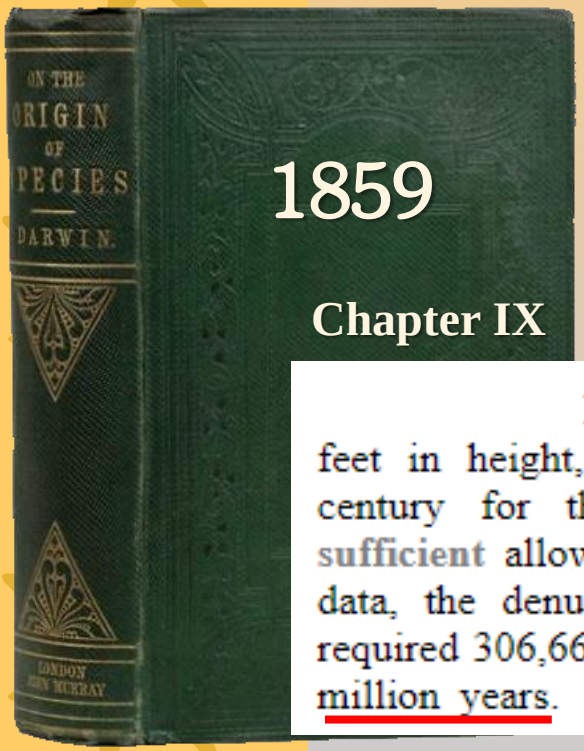
1859



Charles Darwin
1824-1907

LA SOURCE

- D'où vient l'énergie du Soleil ?
  - Pendant ce temps :



1859

Chapter IX

I should infer that for a cliff 500 feet in height, a denudation of one inch per century for the whole length would be a sufficient allowance. At this rate, on the above data, the denudation of the Weald must have required 306,662,400 years; or say three hundred million years.

Charles Darwin
1824-1907

On the Age of the Sun's Heat

By Sir William Thomson (Lord Kelvin)

Macmillan's Magazine, vol. 5 (March 5, 1862)

What then are we to think of such geological estimates as 300,000,000 years for the "denudation of the Weald"? Whether is it more probable that the physical conditions of the sun's matter differ 1,000 times more than dynamics compel us to suppose they differ from those of matter in our laboratories; or that a stormy sea, with possibly Channel tides of extreme violence, should encroach on a chalk cliff 1,000 times more rapidly than Mr. Darwin's estimate of one inch per century?

That some form of the meteoric theory is certainly the true and complete explanation of solar heat can scarcely be doubted, when the following reasons are considered:

(1.) No other natural explanation, except by chemical action, can be conceived.

(2.) The chemical theory is quite insufficient, because the most energetic chemical action we know, taking place between substances amounting to the whole sun's mass, would only generate about 3,000 years' heat.[9]

(3.) There is no difficulty in accounting for 20,000,000 years' heat by the meteoric theory.

It seems, therefore, on the whole most probable that the sun has not illuminated the earth for 100,000,000 years, and almost certain that he has not done so for 500,000,000 years. As for the future, we may say, with equal certainty, that inhabitants of the earth can not continue to enjoy the light and heat essential to their life for many million years longer unless sources now unknown to us are prepared in the great storehouse of creation.

LA SOURCE

- D'où vient l'énergie du Soleil ?
  - Le principe d'autorité

Lord Kelvin
1824-1907

Charles Darwin
1824-1907

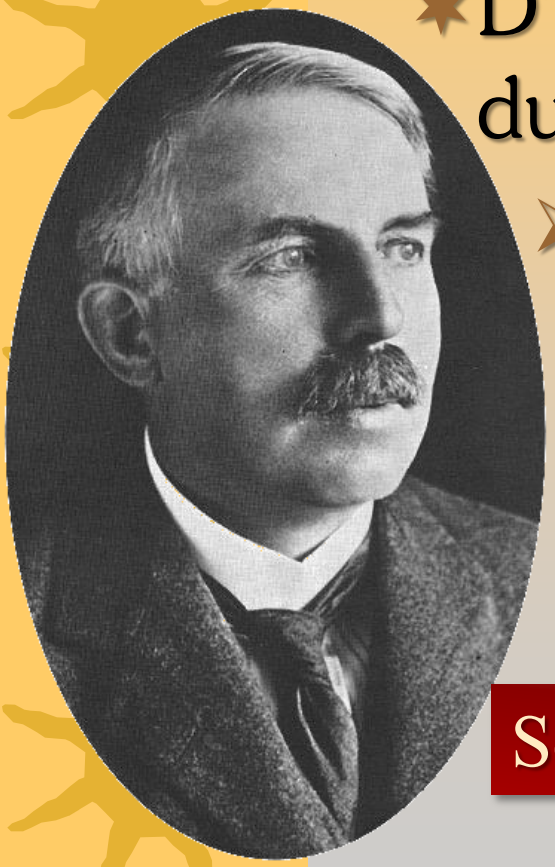
« Les opinions de Thomson sur l'âge du monde sont, depuis un certain temps, l'un de mes plus gros problèmes. »

Charles Darwin, *Letter to Wallace*

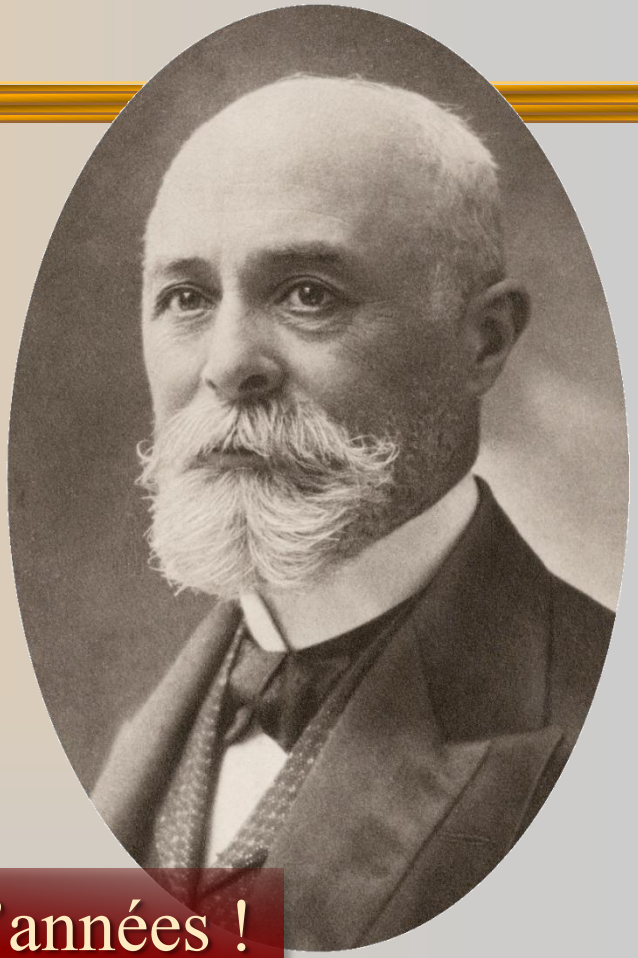
LA SOURCE

- D'où vient l'énergie du Soleil ?
  - La découverte de la ***radioactivité*** en 1896
    - Permet une datation plus précise de l'âge de la Terre.

Se mesure en milliards d'années !



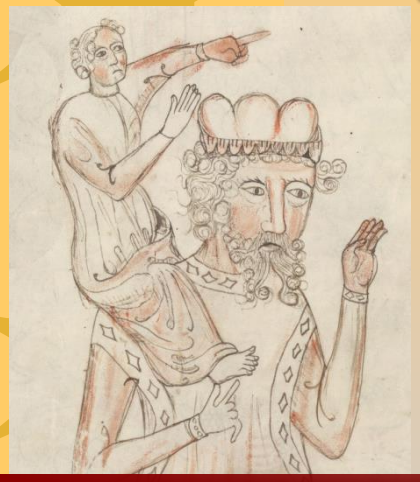
Ernest Rutherford
1871-1937

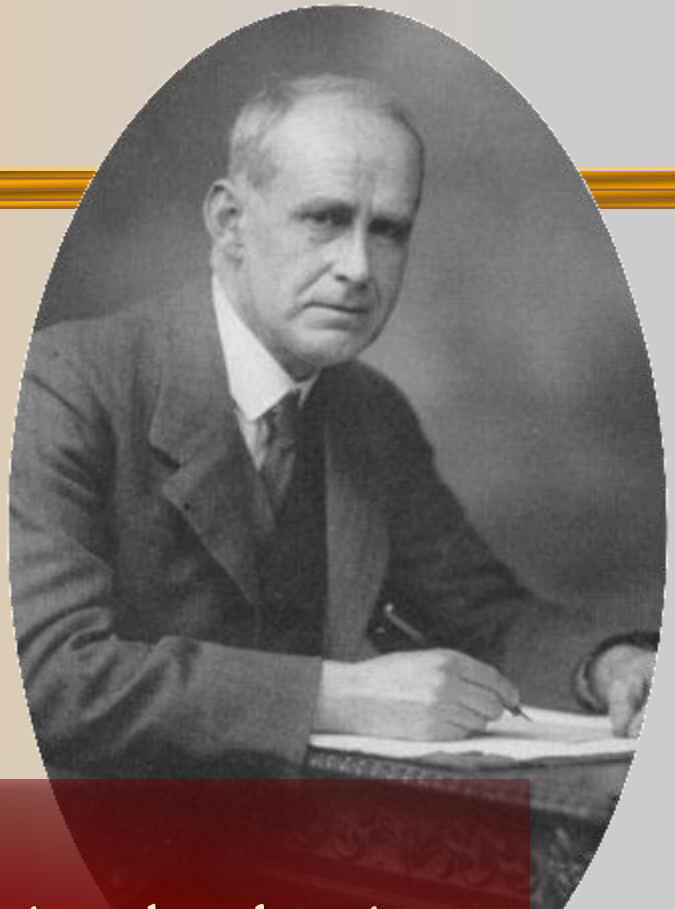


Henri Beckerel
1852-1908

LA SOURCE

- D'où vient l'énergie du Soleil ?





"Nani gigantum humeris insidentes"

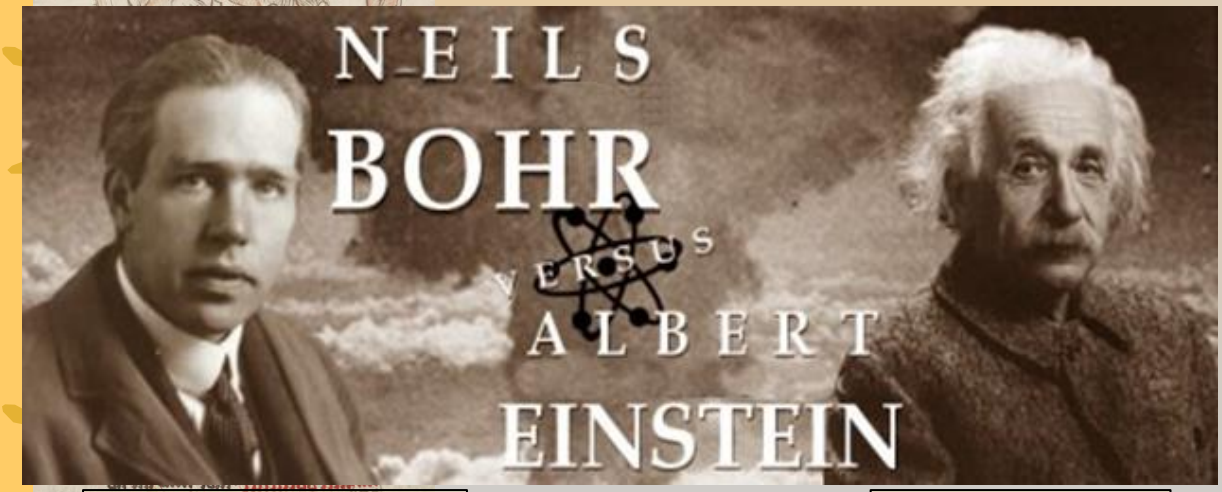
Nous sommes des nains assis sur les épaules de géants

Bernard de Chartres, 1159

Sir Arthur Eddington
1882-1944

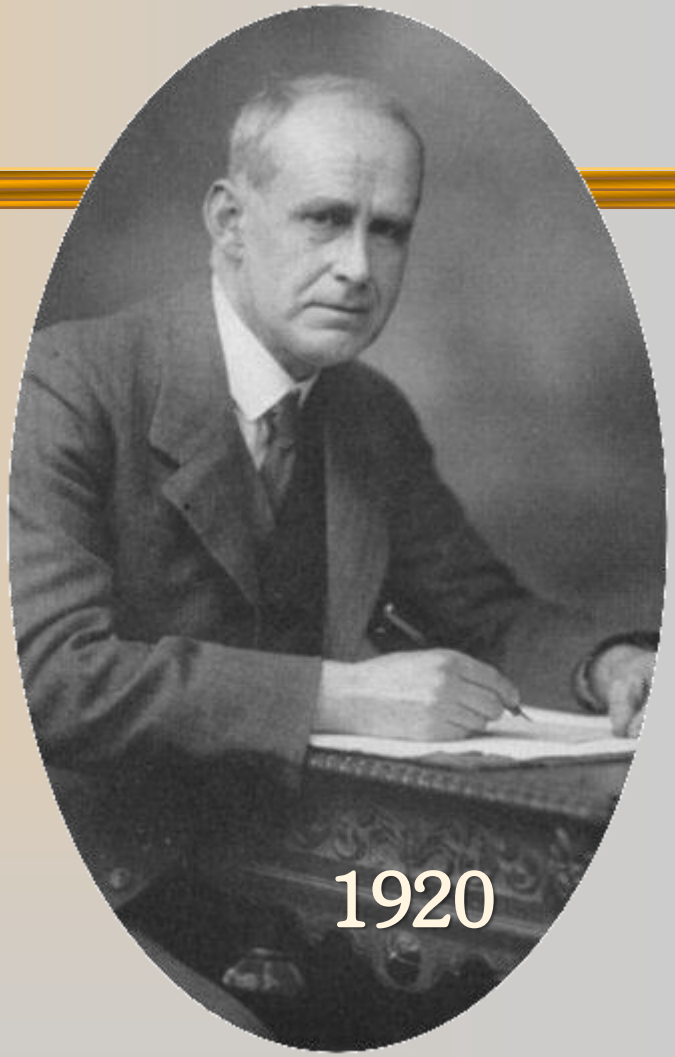
LA SOURCE

- D'où vient l'énergie du Soleil ?



$$E_1 = -\frac{me^4}{2\hbar^2}$$

$$E = mc^2$$

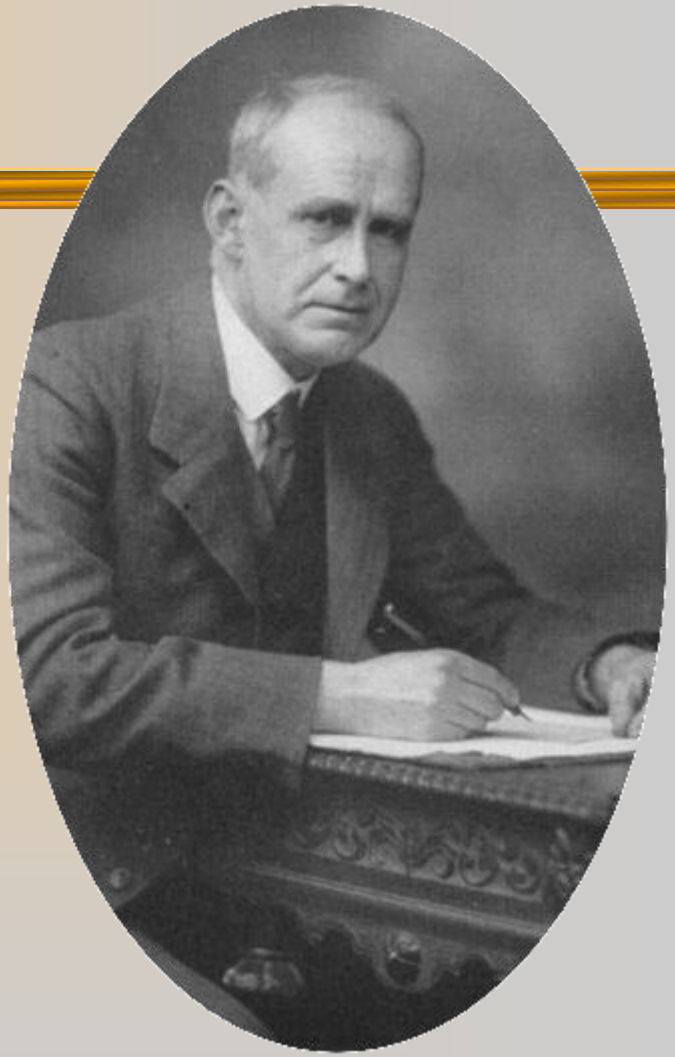


Sir Arthur Eddington
1882-1944

LA SOURCE

- D'où vient l'énergie du Soleil ?

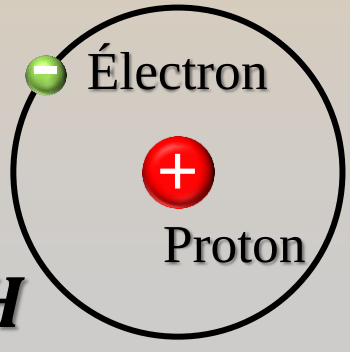
  - La **fusion nucléaire**

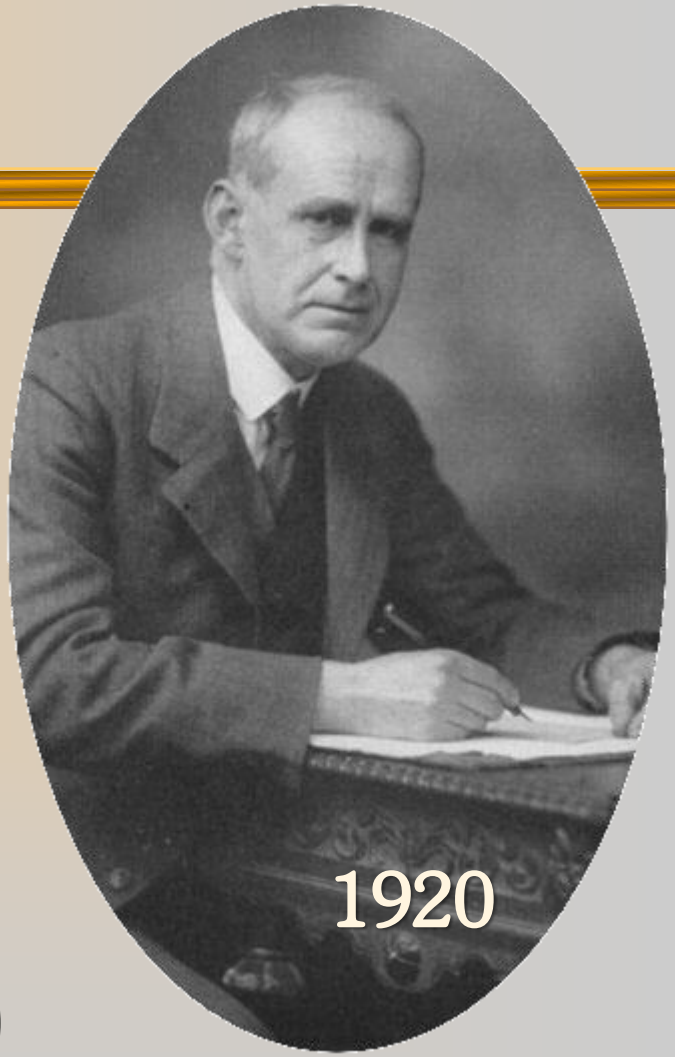


Sir Arthur Eddington
1882-1944

LA SOURCE

- La fusion nucléaire…
  - N'est possible qu'avec de petits noyaux.
  - Le plus petit des noyaux est celui $^{1}_{1}H$ ➡ constitué d'un seul proton (p^{+}).



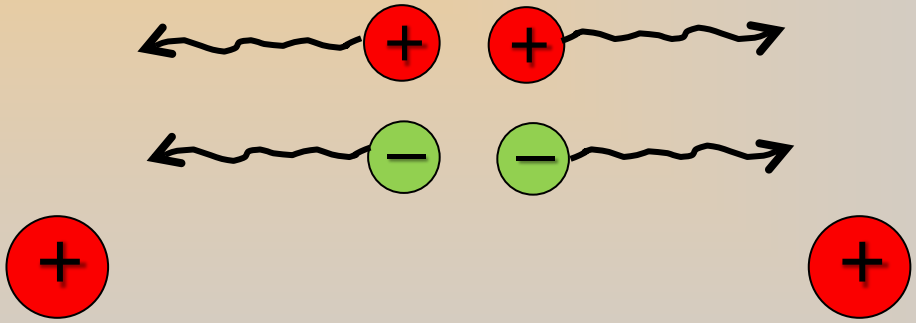


Sir Arthur Eddington
1882-1944

LES PROBLÈMES

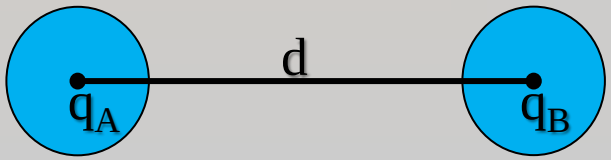
a) Le problème avec la fusion nucléaire…

- C'est que les particules de même signe électrique ***se repoussent***…



- …et la portée de cette interaction est ***infinie***.
  - Elle est décrite par la loi de Coulomb

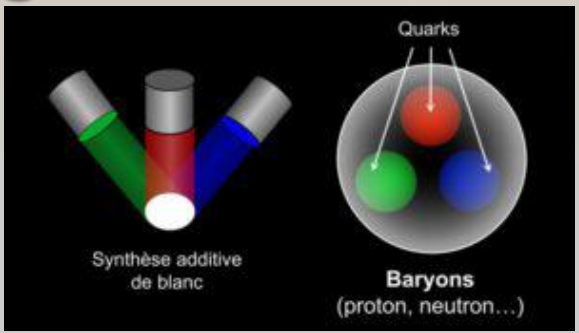
$$\overrightarrow{\boldsymbol{F_e}}(N) = \mathrm{K}\frac{|q_A| \bullet |q_B|}{\mathrm{d}^2}$$



LES PROBLÈMES

a) Le problème avec la fusion nucléaire…

- Elles se repoussent à moins qu'une ***super colle*** n'en vienne à les cimenter…
- Cette colle est la ***force nucléaire forte***.
  - Mais sa portée est limitée à $\sim 10^{-14}$ mètre.
  - Elle est portée par les ***gluons*** qui changent la *couleur* des quarks.



LES PROBLÈMES

a) Le problème avec la fusion nucléaire…

- Ainsi, l'initiation de la fusion nucléaire exige une ***forte énergie cinétique*** des noyaux chargés positivement afin de vaincre la répulsion électrique des protons jusqu'à la portée de l'interaction nucléaire forte.
- Il faut que la vitesse des protons soit élevée.

Fusion nucléaire

LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

Qu'on appelle aussi "l'énergie d'amorce"

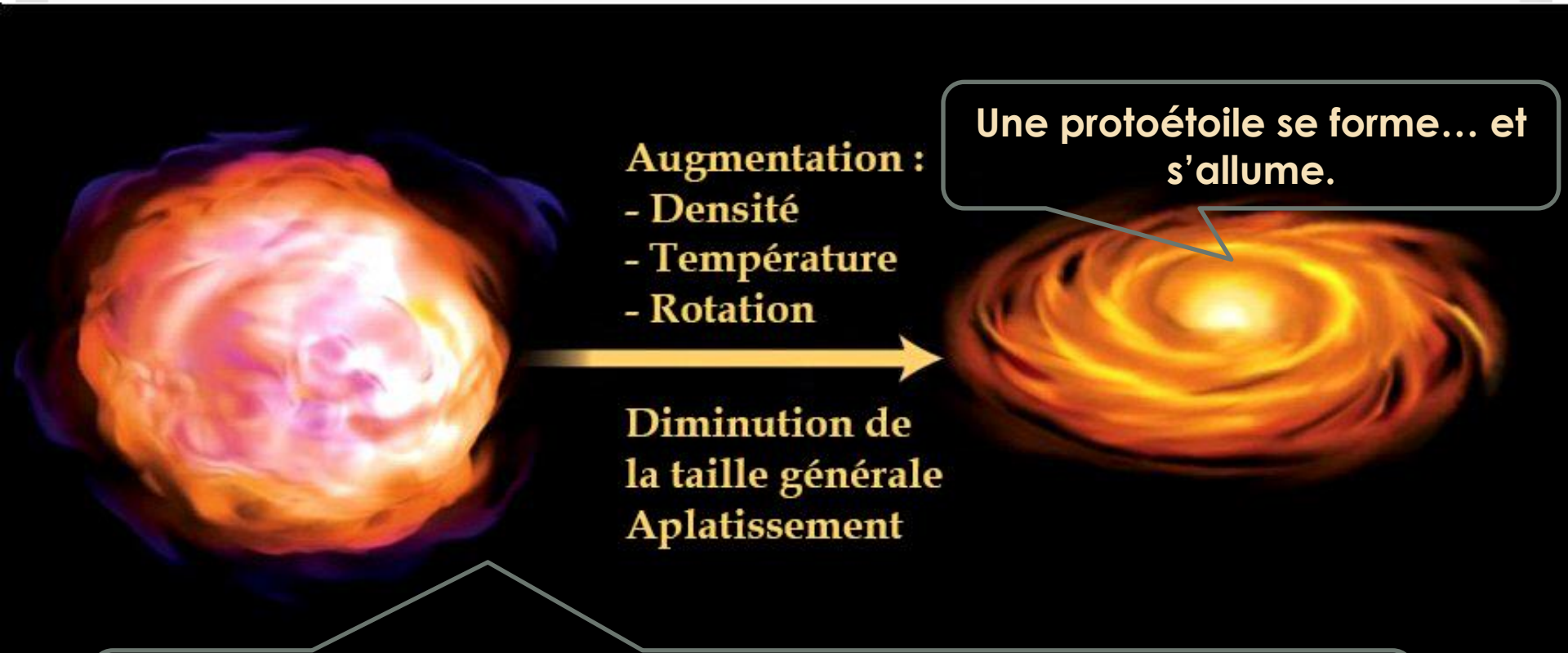
LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

- Elle vient de l'**effondrement gravitationnel** à l'origine de la naissance des Systèmes stellaires.

LA FORMATION DU SYSTÈME SOLAIRE :

Le modèle de Nice



Une protoétoile se forme… et s'allume.

Un grand nuage de gaz d'hydrogène et d'hélium, parfois enrichi d'atomes, de molécules et de poussières commence à s'effondrer

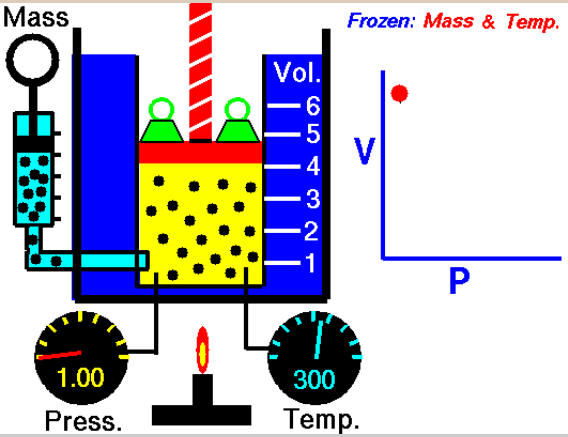
LA NAISSANCE… il y a 4,6 Ga

- Hypothèse de la Nébuleuse stellaire

LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

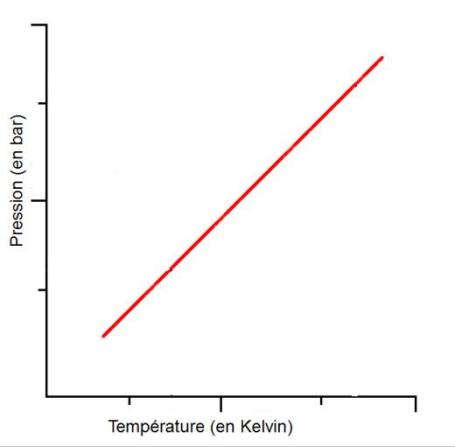
- Elle vient de l'effondrement gravitationnel à l'origine de la naissance des Systèmes stellaires.
- Lois des gaz parfaits :
  - Loi de Boyle-Mariotte ➡ $\boxed{P \bullet V = cte}$



LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

- Elle vient de l'effondrement gravitationnel à l'origine de la naissance des Systèmes stellaires.
- Lois des gaz parfaits :
  - Loi de Boyle-Mariotte ➡ $\boxed{P \bullet V = cte}$
  - Loi de Gay-Lussac ➡ $\boxed{\frac{P}{T} = cte}$



LES PROBLÈMES

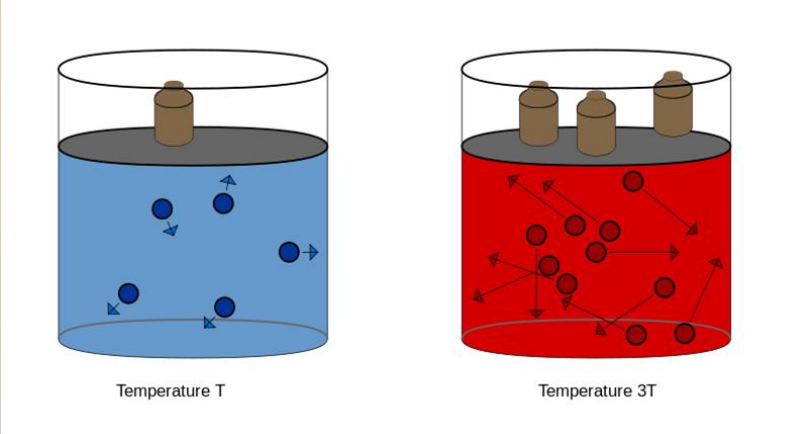
a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

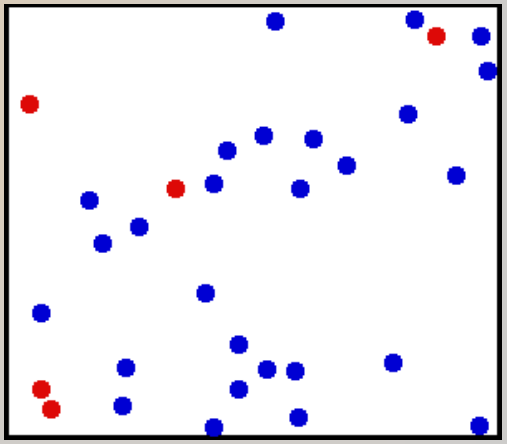
- Elle vient de l'effondrement gravitationnel à l'origine de la naissance des Systèmes stellaires.
- Lois des gaz parfaits :
  - Loi de Boyle-Mariotte ➡ $\boxed{P \bullet V = cte}$
  - Loi de Gay-Lussac ➡ $\boxed{\frac{P}{T} = cte}$
  - Si le Volume ⬇ par effondrement gravitationnel, la Pression ⬆ et la <u>**Température**</u> ⬆.

LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'*énergie* nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

- Qu'est ce que la Température ?
  - La température est la mesure de l'***agitation*** des particules.





  - Plus les particules sont agitées, plus leur énergie cinétique est grande et plus leur ***vitesse*** est élevée.

LES PROBLÈMES

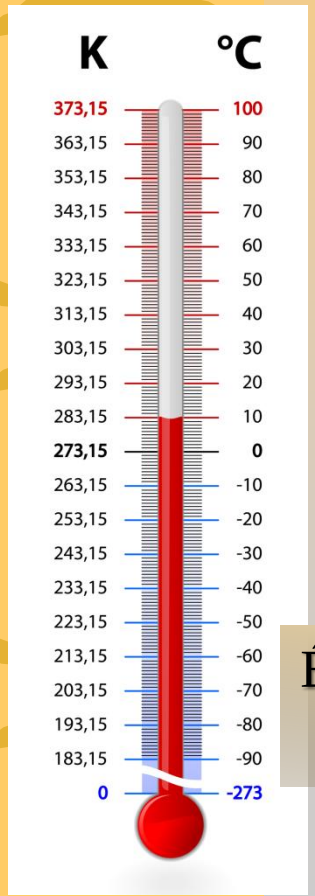
a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

- À compter de quelle température les réaction de fusion s'amorcent-elle ?
  - $\boxed{4 \text{ X } 10^6 \text{ K}}$ ➡ 4 000 000 K pour ${}^{1}_{1}\boldsymbol{H}$. Quatre fois moins pour le Deutérium ${}^{2}_{1}\boldsymbol{H}$ ➡ 10^6 K.

LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

- À compter de quelle température les réaction de fusion s'amorcent-elle ?
  - $\boxed{4 \text{ X } 10^6 \text{ K}}$ ➡ 4 000 000 K pour ${}^{1}_{1}\boldsymbol{H}$.
    Quatre fois moins pour le Deutérium ${}^{2}_{1}\boldsymbol{H}$ ➡ 10^6 K.



Échelle ***Celsius*** (°C) = Échelle ***Kelvin*** (K) mais l'origine (degré 0) varie.

$T_k = T_c + 273{,}15$

LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

- À compter de quelle température les réaction de fusion s'amorcent-elle ?
  - $\boxed{4 \text{ X } 10^6 \text{ K}}$ ➡ 4 000 000 K pour ${}^{1}_{1}\boldsymbol{H}$.

    Quatre fois moins pour le Deutérium ${}^{2}_{1}\boldsymbol{H}$ ➡ 10^6 K.

13 M_J

LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

- À compter de quelle température les réaction de fusion s'amorcent-elle ?
  - 4×10^6 K ➡ 4 000 000 K pour ${}^{1}_{1}H$.

    Quatre fois moins pour le Deutérium ${}^{2}_{1}H$ ➡ 10^6 K.

0,08 $M_\odot$

LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

- Le Soleil contient beaucoup d'hydrogène.

La composition du Soleil

Éléments	No d'atomes (%)	Masse (%)
$_{1}H$	92,1	75
$_{2}He$	7,8	24
$_{8}O$	0,061	
$_{6}C$	0,03	
$_{7}N$	0,008	

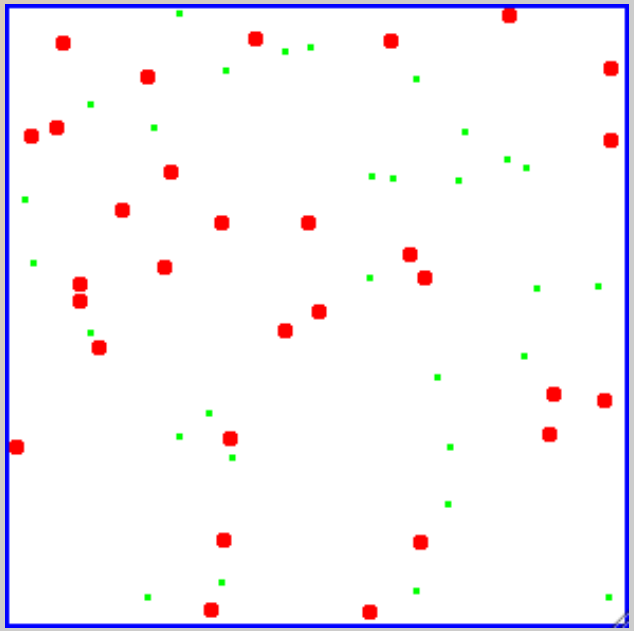
99,9 %

- La température au cœur du Soleil atteint **15 560 000** K !
  - Amplement suffisant pour fournir l'énergie cinétique nécessaire à l'amorce de la fusion de l'hydrogène $^{1}_{1}H$.

LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

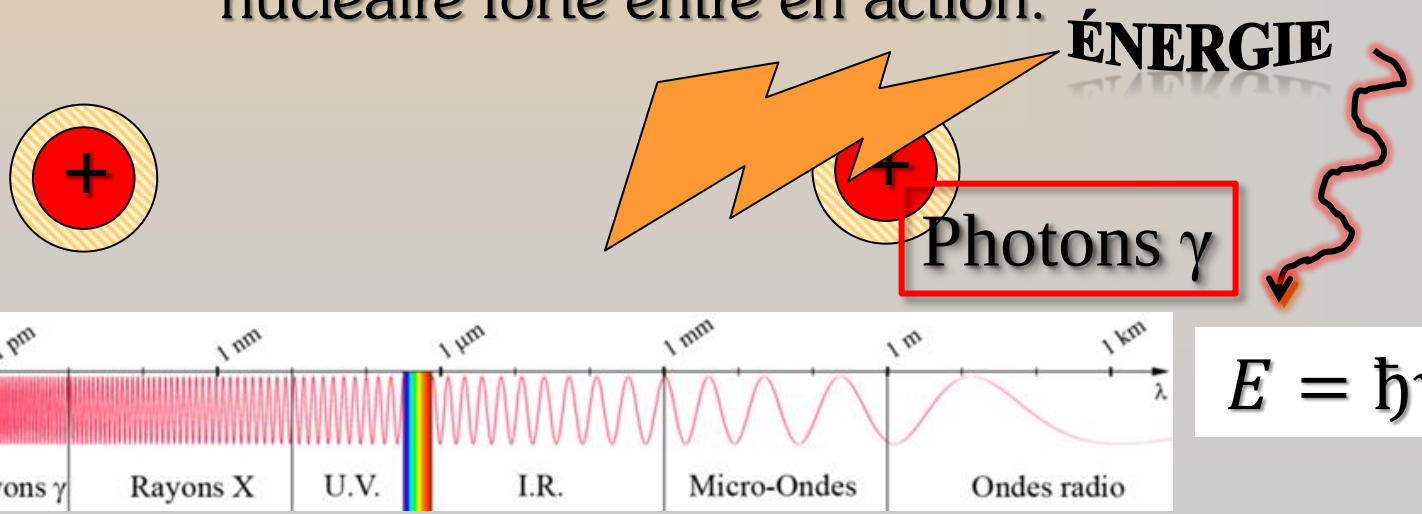
- À ces °T élevées, $^{1}_{1}H$ est dissocié et n'existe qu'à l'état de plasma.
  - Les protons sont libres.
    Les électrons sont libres.
  - Il n'y a plus d'atomes.



LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

- Les protons sont mus à grande vitesse.
  - Ils peuvent s'approcher suffisamment l'un de l'autre ($\sim 10^{-14}$ m) jusqu'à ce que l'interaction nucléaire forte entre en action.

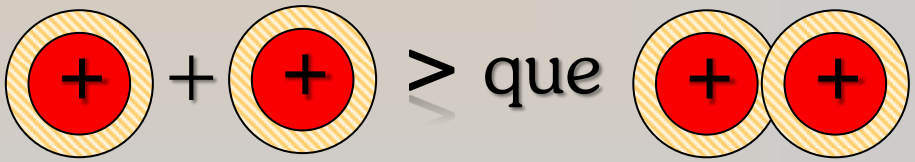


$$E = \hbar\nu$$

LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

- L'énergie dégagée par la fusion des p^+ est >>> que l'énergie nécessaire à l'initiation de la fusion.
- Cette énergie est reliée à la ***perte de masse*** :

La masse de 

Et c'est le ***photon*** γ qui emporte cet excès de masse.

LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

- En réalité, 4 $\boldsymbol{p^+}$ fusionnent pour former un noyau d'hélium. $\boxed{4\ {}^{1}_{1}\boldsymbol{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\boldsymbol{He}}$

- La masse de 4 $\boldsymbol{p^+} = 4_{\mathrm{mp}}$
  La masse de ${}^{4}_{2}\boldsymbol{He} = 3{,}9726_{\mathrm{mp}}$
  $\Delta = 0{,}0274_{\mathrm{mp}}$

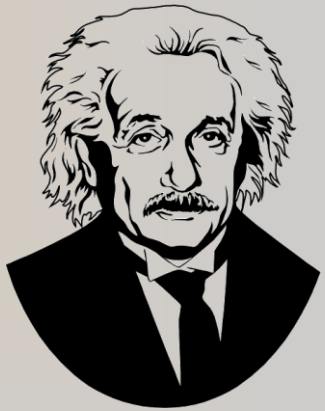
- Si 4 kg de ${}^{1}_{1}\boldsymbol{H}$ fusionnent, la perte de masse est de 0,0274 kg soit 0,00685 kg/kg$_{{}^{1}_{1}\boldsymbol{H}}$

LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

- Or, l'énergie et la masse sont deux expression différentes d'une même grandeur.

$$\boxed{\boldsymbol{E = mc^2}}$$



- La fusion d'un kg $^{1}_{1}\boldsymbol{H}$ produit :

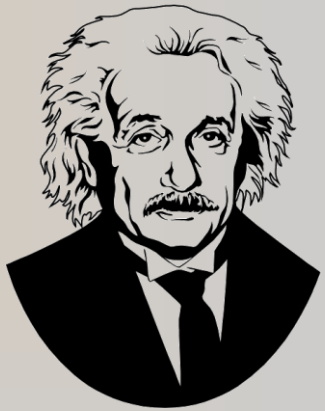
$$\boldsymbol{E} = 0{,}00685\ kg \bullet (3 \times 10^{8}\ {}^{m}/_{s})^2 = \mathbf{6{,}17 \times 10^{14}}\ \frac{kg \bullet m^2}{s^2}$$

LES PROBLÈMES

a) D'où vient l'***énergie*** nécessaire à l'initiation de la fusion nucléaire ?

- Or, l'énergie et la masse sont deux expression différentes d'une même grandeur.

$$\boxed{\boldsymbol{E = mc^2}}$$



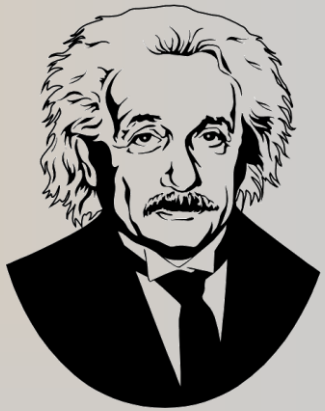
- La fusion d'un kg $\boldsymbol{^1_1H}$ produit :

$$\boldsymbol{E} = 0{,}00685\ kg \bullet (3 \times 10^8\ {}^{m}/_{s})^2 = \mathbf{6{,}17 \times 10^{14}}\boldsymbol{J}$$

LES PROBLÈMES

b) Quel est la valeur du rendement en énergie de la fusion nucléaire ?

- Le rendement énergétique R_F de la fusion de $^{1}_{1}\boldsymbol{H}$ est stupéfiant ! ➡$R_F = \mathbf{6,17 \times 10^{14}}\boldsymbol{J}/\mathbf{kg}$
- Tandis que le rendement R_C de la combustion du charbon est de $R_C = \mathbf{3 \times 10^{4}}\boldsymbol{J}/\mathbf{kg}$



$$\frac{R_F}{R_C} = \cong \mathbf{20}\ \boldsymbol{milliards}$$

LES PROBLÈMES

b) Quel est la valeur du rendement en énergie de la fusion nucléaire ?

- La puissance installée d'Hydro-Québec = 37 243 MegaWatt ou $\mathbf{3,7 \times 10^{10}\, J/_s}$
- La fusion d'un seul kg de $\mathbf{^1_1H}$ fournit = $\mathbf{6,17 \times 10^{14}\, J/_s}$

  Soit ≈ 20 000 fois plus !
- La fusion d'un seul kg de $\mathbf{^1_1H}$ équivaut à la production maximale totale d'Hydro-Québec pendant 5,5 heures.

LES PROBLÈMES

b) Quel est la valeur du rendement en énergie de la fusion nucléaire ?

- Une famille québécoise consomme environ 27 000 kWh d'électricité par année, soit $\cong 9{,}72 \times 10^{10}$ J

- $\boldsymbol{m} = \frac{\boldsymbol{E}}{\boldsymbol{c}^2} = \frac{\boldsymbol{9{,}72 \times 10^{10} J}}{(\boldsymbol{3 \times 10^8 m})^2} \cong 0{,}000\ 001\ kg$

  ou 0, 001 mg de $^{1}_{1}\boldsymbol{H}$ qui fusionne en $^{4}_{2}\boldsymbol{He}$

Soit 0,02% de la masse d'un cube de sucre (5 g) !

LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

La composition du Soleil		
Éléments	**No d'atomes (%)**	**Masse (%)**
$_1H$	92,1	75

- La masse du Soleil $M_\odot = 1{,}989 \times 10^{30}$ kg
- Mais le Soleil ne pourra fusionner plus de 10% de sa masse, soit $\cong 2 \times 10^{29}$ kg en ^1_1H
  - Appelons cette masse disponible pour la fusion M_D.

LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

1. Quelle quantité de $^{1}_{1}\boldsymbol{H}$ le Soleil fusionne-t-il par unité de temps ?
   - La puissance énergétique du Soleil se nomme « Luminosité », et $L_{\odot} = 3{,}86 \text{ X } 10^{26}$ W (J/s)
   - $\frac{L_O}{R_F} = \frac{3{,}86\times10^{26}\,{}^{J}/_{s}}{6{,}17\times10^{14}\,{}^{J}/_{kg\,{}^{1}_{1}\boldsymbol{H}}} = 6{,}26 \times 10^{11}\,{}^{kg}/_{s}$ ou ***626*** million de tonnes d'hydrogène par seconde…
   - … qui sont converties en ***621,7*** million de tonnes de $^{4}_{2}\boldsymbol{He}$ avec une perte de masse de ***4,3 million*** de tonnes par seconde.

LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

2. À ce rythme, quelle est la durée de vie prévue du Soleil ?

- $M_{\odot} \cong 2 \text{ X } 10^{30}$ kg ; mais on estime que 10% de sa masse en ${}^{1}_{1}H$ peut effectivement être fusionnée en ${}^{4}_{2}He$, soit **2 X 10^{29}** kg. C'est la masse disponible **M_D**.
- En multipliant M_D par R_F, on obtient $2 \times 10^{29} kg \bullet 6{,}17 \times 10^{14}\ {}^{J}/_{kg\,{}^{1}_{1}H} = \mathbf{3{,}187 \times 10^{44}} J$ C'est la capacitance énergétique totale du Soleil à l'origine. Appelons-là **$C_{\odot}$**.

LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

2. À ce rythme, quelle est la durée de vie prévue du Soleil ?

- Durée de vie $= \frac{C_O}{L_O} = \frac{1{,}23\times10^{44}\,J}{3{,}86\times10^{26}\,J/s} = \mathbf{3{,}187\times10^{17}}\,s$,

soit **10 milliards** d'années.

Bien plus que ne l'estimait Lord Kelvin !

Lord Kelvin
1824-1907

LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

3. Quel % de sa masse initiale le Soleil a-t-il perdu jusqu'à maintenant par la fusion ?
   - Le Soleil est à la moitié de sa "vie" ➡ 4,6 X 10^9 années.

$$M_{perdue} = \frac{3{,}187 \times 10^{17} s}{2} \bullet 4{,}3 \times 10^{9}\ {}^{kg}/_{s} = 6{,}8 \times 10^{26} kg$$

La Masse de la Terre ($M_\oplus$)= 5,972 X 10^{24} kg

La masse perdue par la fusion jusqu'à maintenant ≅ 100 $M_\oplus$
Mais la Terre entre 1 305 620 fois dans le Soleil !

LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

3. Quel % de sa masse initiale le Soleil a-t-il perdu jusqu'à maintenant par la fusion ?

- Le Soleil est à la moitié de sa "vie" ➡ 4,6 X 10^9 années.

  $M_{perdue} = \frac{3{,}187\times10^{17}s}{2} \bullet 4{,}3 \times 10^9\ {}^{kg}/_{s} = 6{,}8 \times 10^{26} kg$

- Or la $M_\odot$ est de 2 X 10^{30} kg.

  Le % de $M_{perdue} = \frac{6{,}8\times10^{26}\bullet100}{2\times10^{30}} = \mathbf{0{,}034}$ %

C'est minime !

LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

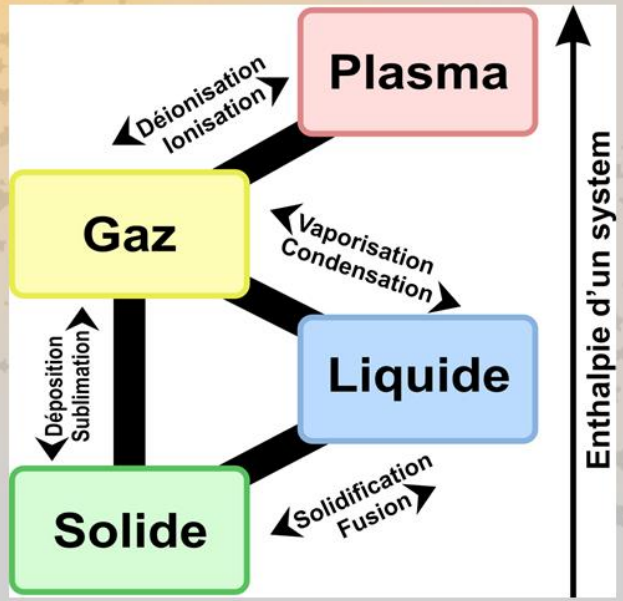
4. Quel est le mécanisme de la fusion nucléaire au sein du Soleil ?
   - La fusion s'opère dans le noyau du Soleil, là où la température atteint ***15 600 000*** K.
   - À cet endroit, la matière existe sous ***forme plasmatique*** uniquement. Les électrons ont une telle énergie qu'ils ne sont liés à aucun noyau.
   - Les atomes sont totalement ionisés.

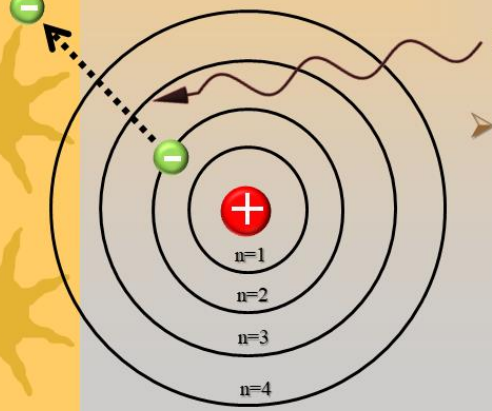
LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

4. Quel est le mécanisme de la fusion nucléaire au sein du Soleil ?

★ Les états de la matière et les transitions



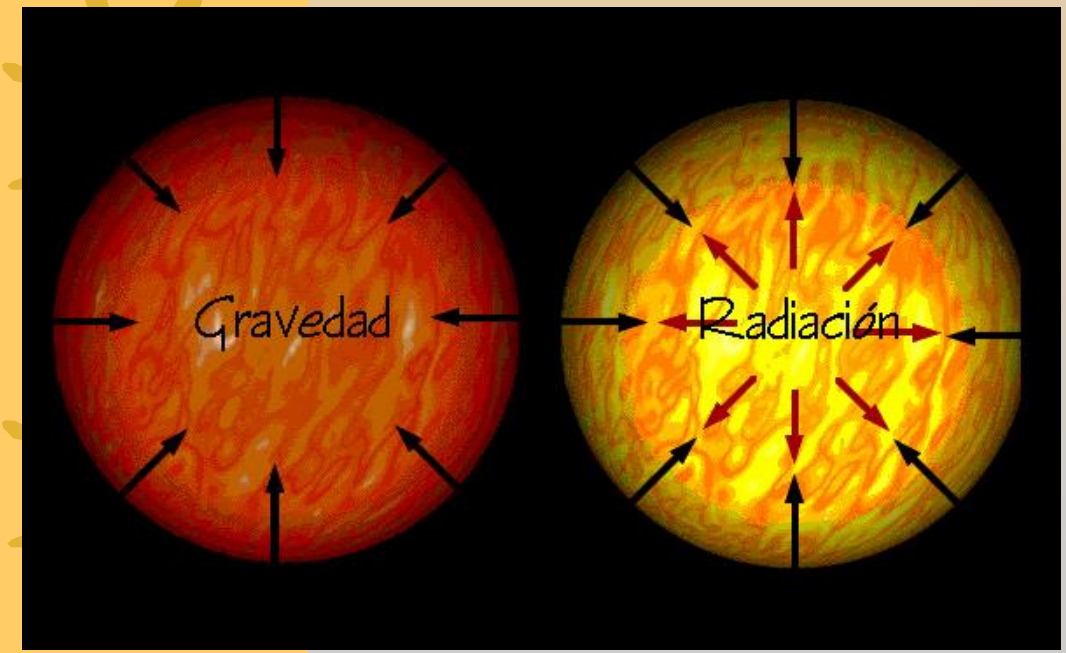


➢ Un photon incident de haute énergie peut expulser un électron de l'atome. C'est l'***ionisation***.

LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

- Le cœur de l'étoile (et l'étoile toute entière) est dans un état d'équilibre hydrostatique.

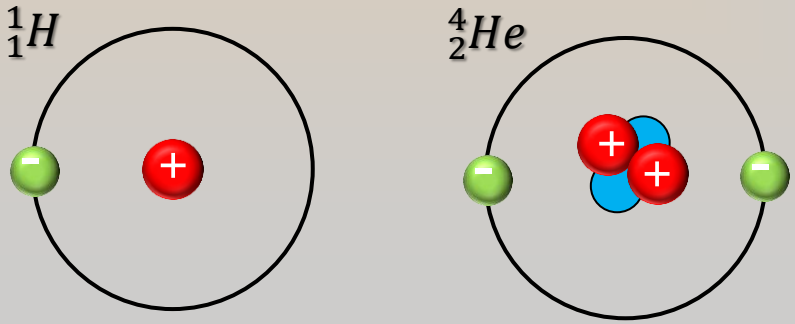


- Où l'effet centripète de la gravité est compensé par l'effet centrifuge de la "pression de lumière".

LES PROBLÈMES

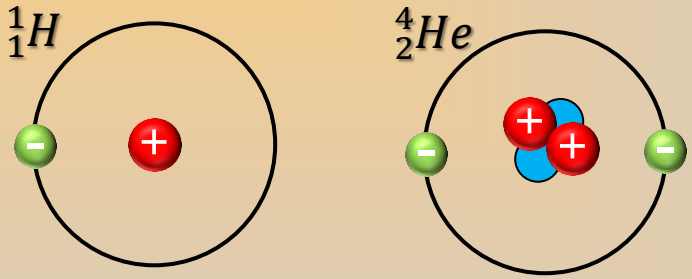
c) Quelques données sur le Soleil

4. Quel est le mécanisme de la fusion nucléaire au sein du Soleil ?
   - La fusion s'opère par une cascade d'événements appelée ***Chaine proton-proton***.
   - On a vu que les noyaux d'hydrogène ${}^{1}_{1}H$ fusionnent pour former des noyaux d'hélium ${}^{4}_{2}He$



LES ORBITALES ÉLECTRONIQUES

✶L'atome et les orbitales électroniques :



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1.00794 1 H hydrogène																	4.002602 2 He hélium
2	6.941 3 Li lithium	9.012182 4 Be béryllium											10.811 5 B bore	12.0107 6 C carbone	14.0067 7 N azote	15.9994 8 O oxygène	18.998403 9 F fluor	20.1797 10 Ne néon
3	22.98976 11 Na sodium	24.3050 12 Mg magnésium											26.98153 13 Al aluminium	28.0855 14 Si silicium	30.97696 15 P phosphore	32.065 16 S soufre	35.453 17 Cl chlore	39.948 18 Ar argon
4	39.0983 19 K potassium	40.078 20 Ca calcium	44.95591 21 Sc scandium	47.867 22 Ti titane	50.9415 23 V vanadium	51.9962 24 Cr chrome	54.93804 25 Mn manganèse	55.845 26 Fe fer	58.93319 27 Co cobalt	58.6934 28 Ni nickel	63.546 29 Cu cuivre	65.38 30 Zn zinc	69.723 31 Ga gallium	72.64 32 Ge germanium	74.92160 33 As arsenic	78.96 34 Se sélénium	79.904 35 Br brome	83.798 36 Kr krypton
5	85.4678 37 Rb rubidium	87.62 38 Sr strontium	88.90585 39 Y yttrium	91.224 40 Zr zirconium	92.90638 41 Nb niobium	95.96 42 Mo molybdène	98 43 Tc technétium	101.07 44 Ru ruthénium	102.9055 45 Rh rhodium	106.42 46 Pd palladium	107.8682 47 Ag argent	112.441 48 Cd cadmium	114.818 49 In indium	118.710 50 Sn étain	121.760 51 Sb antimoine	127.60 52 Te tellure	126.9044 53 I iode	131.293 54 Xe xénon
6	132.9054 55 Cs césium	137.327 56 Ba barium	lanthanides 57-71	178.49 72 Hf hafnium	180.9478 73 Ta tantale	183.84 74 W tungstène	186.207 75 Re rhénium	190.23 76 Os osmium	192.217 77 Ir iridium	195.084 78 Pt platine	196.9665 79 Au or	200.59 80 Hg mercure	204.3833 81 Tl thallium	207.2 82 Pb plomb	208.9804 83 Bi bismuth	210 84 Po polonium	210 85 At astate	220 86 Rn radon
7	223 87 Fr francium	226 88 Ra radium	actinides 89-103	261 104 Rf rutherfordium	262 105 Db dubnium	266 106 Sg seaborgium	264 107 Bh bohrium	277 108 Hs hassium	268 109 Mt meitnérium	271 110 Ds darmstadtium	272 111 Rg roentgenium	285 112 Cn copernicium	284 113 Uut ununtrium	289 114 Fl flérovium	288 115 Uup ununpentium	292 116 Lv livermorium	292 117 Uus ununseptium	294 118 Uuo ununoctium

138.9054 57 La lanthane	140.116 58 Ce cérium	140.9076 59 Pr praséodyme	144.242 60 Nd néodyme	145 61 Pm prométhium	150.36 62 Sm samarium	151.964 63 Eu europium	157.25 64 Gd gadolinium	158.9253 65 Tb terbium	162.500 66 Dy dysprosium	164.9303 67 Ho holmium	167.259 68 Er erbium	168.9342 69 Tm thulium	173.054 70 Yb ytterbium	174.9668 71 Lu lutécium
227 89 Ac actinium	232.0380 90 Th thorium	231.0358 91 Pa protactinium	238.0289 92 U uranium	237 93 Np neptunium	244 94 Pu plutonium	243 95 Am américium	247 96 Cm curium	247 97 Bk berkélium	251 98 Cf californium	252 99 Es einsteinium	257 100 Fm fermium	258 101 Md mendélévium	259 102 No nobélium	262 103 Lr lawrencium

- métaux alcalins
- alcalino-terreux
- métaux pauvres
- métaux de transition
- métalloïdes
- non-métaux
- halogènes
- gaz rares

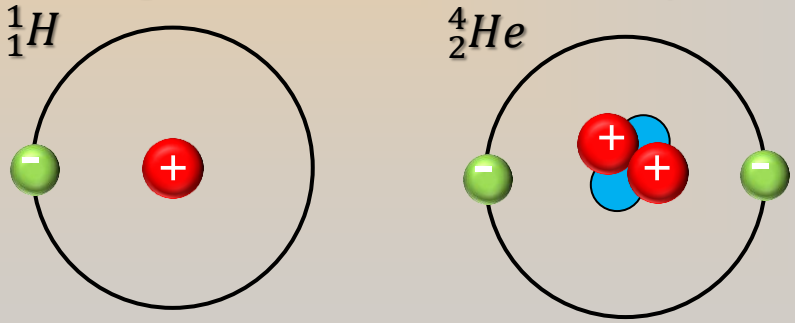
Sources : IUPAC, Wikimedia Commons

LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

4. Quel est le mécanisme de la fusion nucléaire au sein du Soleil ?

- On a vu que les noyaux d'hydrogène ${}^{1}_{1}H$ fusionnent pour former des noyaux d'hélium ${}^{4}_{2}He$

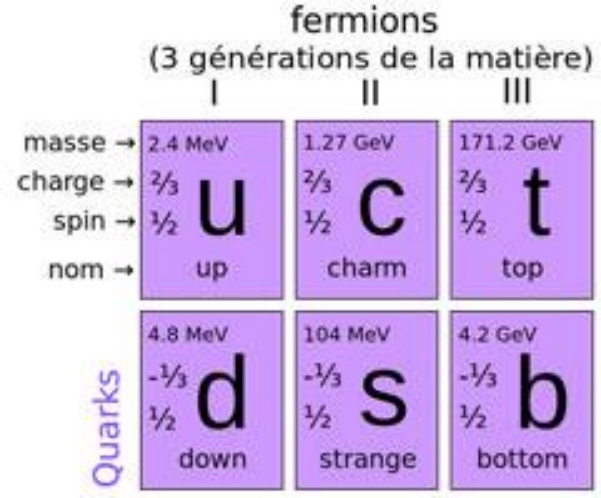


- Comment la fusion de 4 p^+ peut-elle donner 2 p^+ et 2 n ?

LES PROBLÈMES

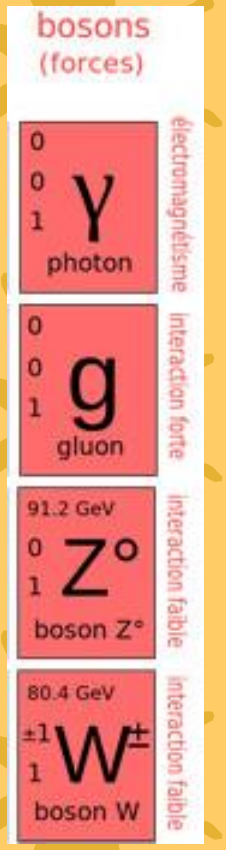
c) Quelques données sur le Soleil

4. Quel est le mécanisme de la fusion nucléaire au sein du Soleil ?
   - C'est par l'intermédiaire de la force nucléaire faible.
   - Elle modifie la saveur des quarks en transformant les **protons ⇌ neutrons**

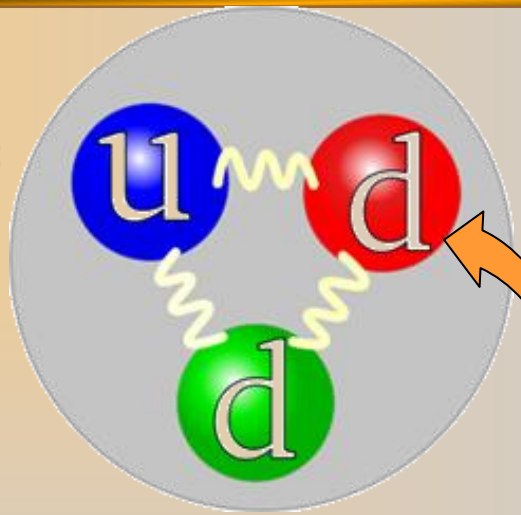


L'INTERACTION FAIBLE

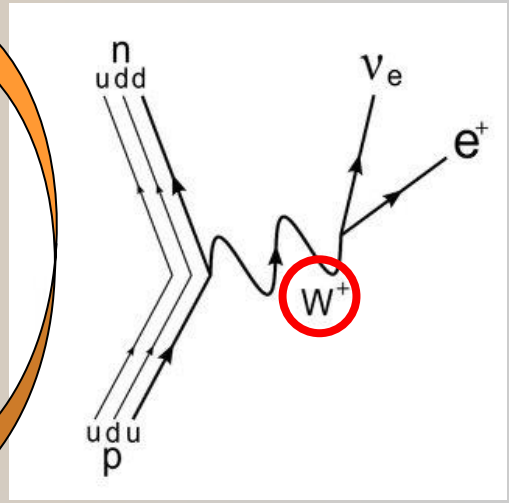
Bosons de jauge



★Le neutron =

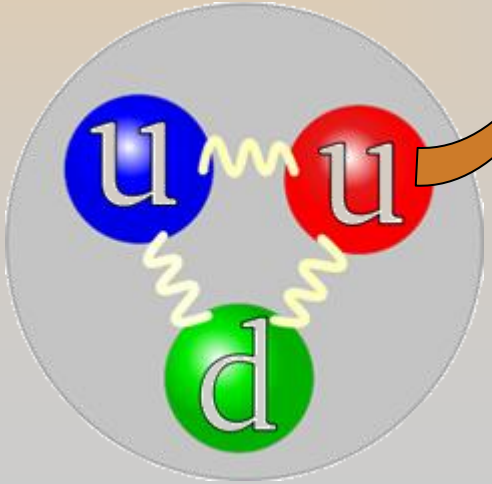


Charge 0



Change la saveur des quarks

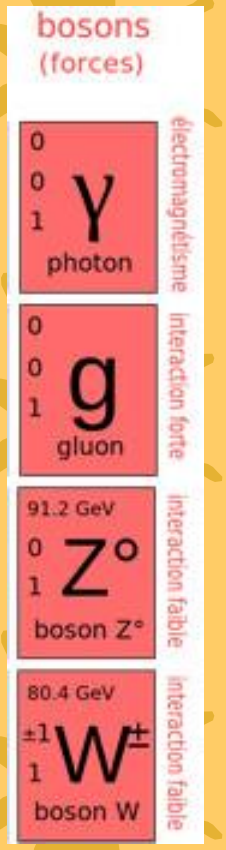
★Le proton =



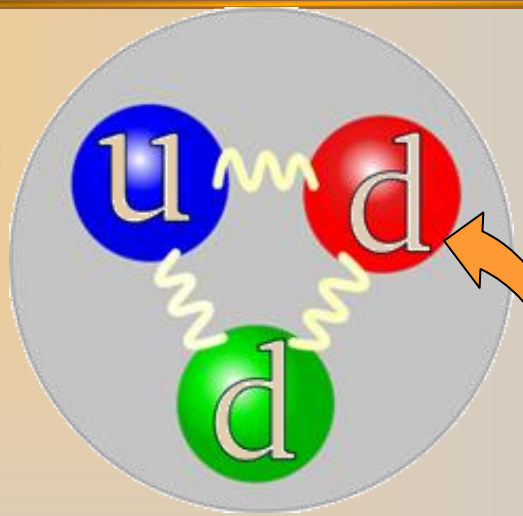
Charge +1

L'INTERACTION FAIBLE

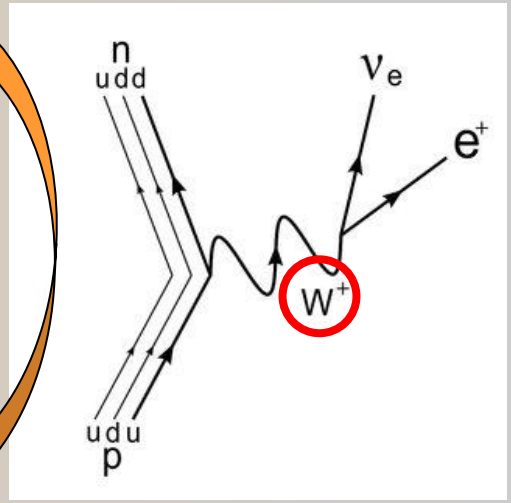
Bosons de jauge



★Le neutron =



Charge 0



Change la saveur des quarks

★Le proton =

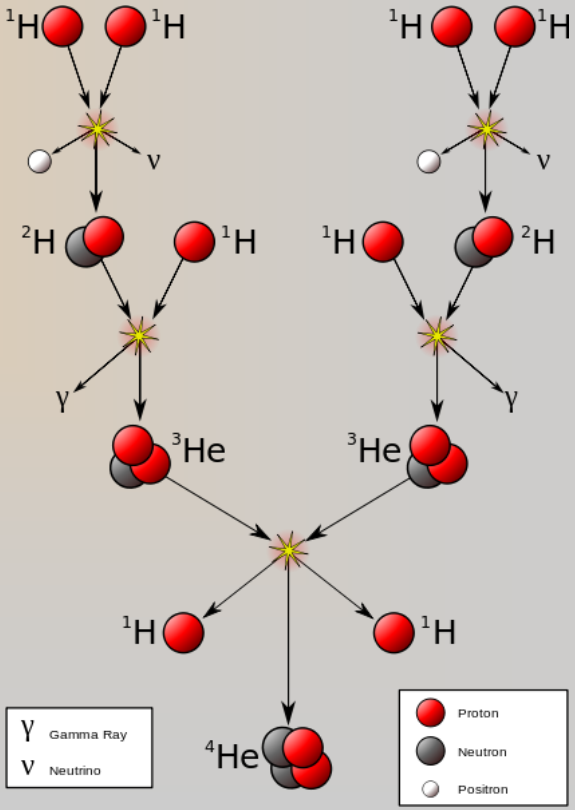
Charge +1

Radioactivité β+

LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

- La chaîne proton-proton



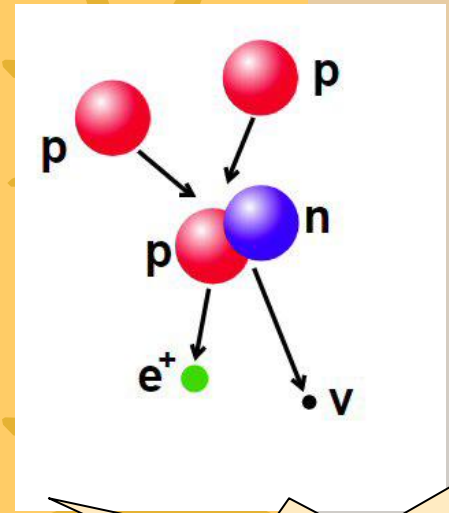
LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

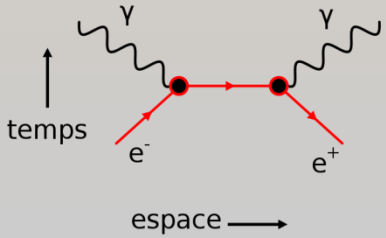
➢ La chaîne proton-proton

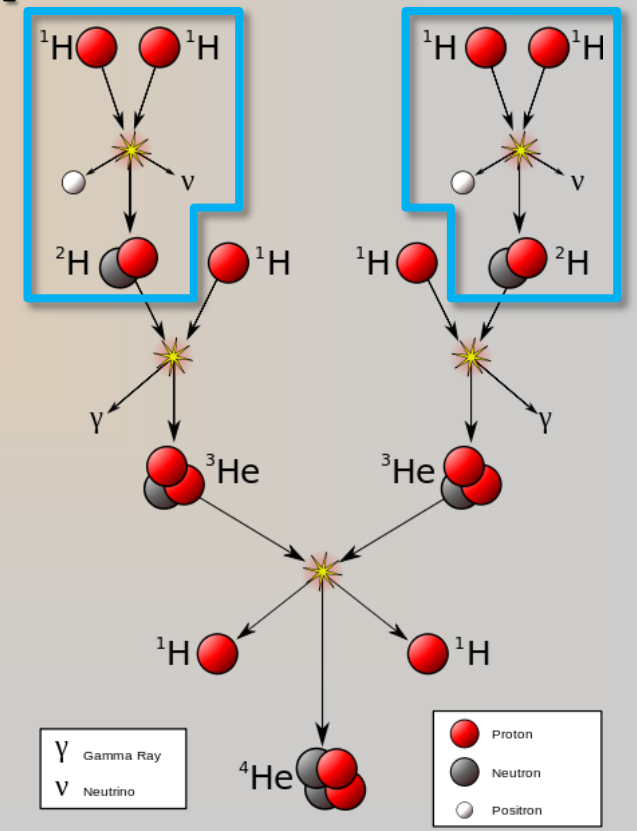
✓ Première étape :

- **Fusion de 2 p^+**
  Sitôt le contact, l'un des p^+ doit se convertir en n en émettant un positon et un neutrino
  ➡ ${}^{2}_{1}H$ (Deutérium).
- Le positon e^+ s'annihile avec un e^- en émettant 2 photons gamma γ.



Produit 1,02Mev



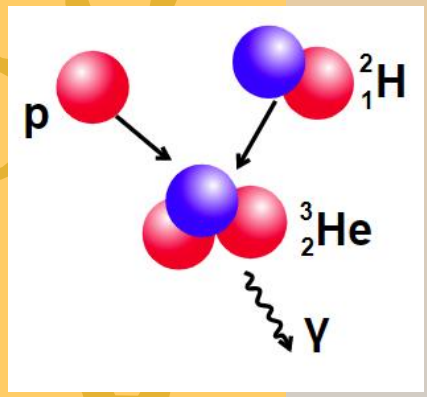


LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

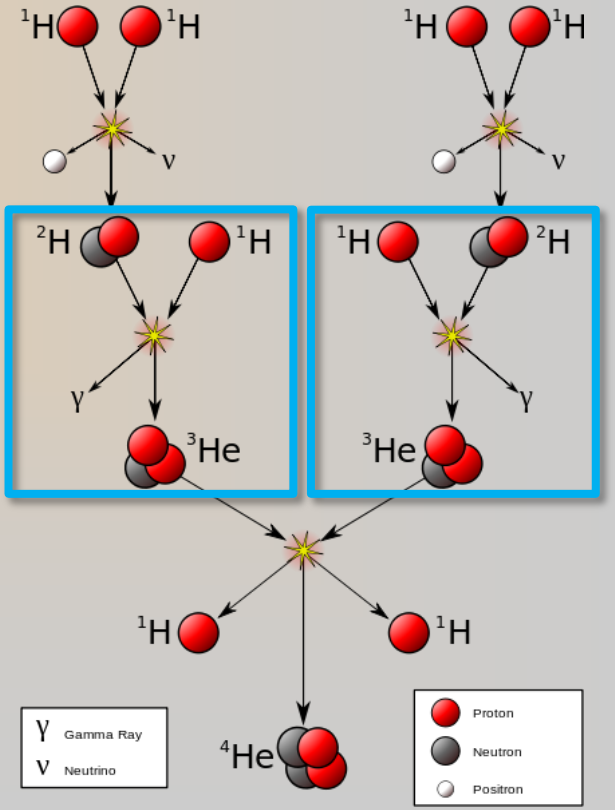
- La chaîne proton-proton

✓ Deuxième étape :



- **Fusion de $^{2}_{1}H$ avec 1 p^{+}**
  Cette réaction formera un noyau $^{3}_{2}He$ avec émission d'un photon **γ**.

Produit 5,49 Mev



LES PROBLÈMES

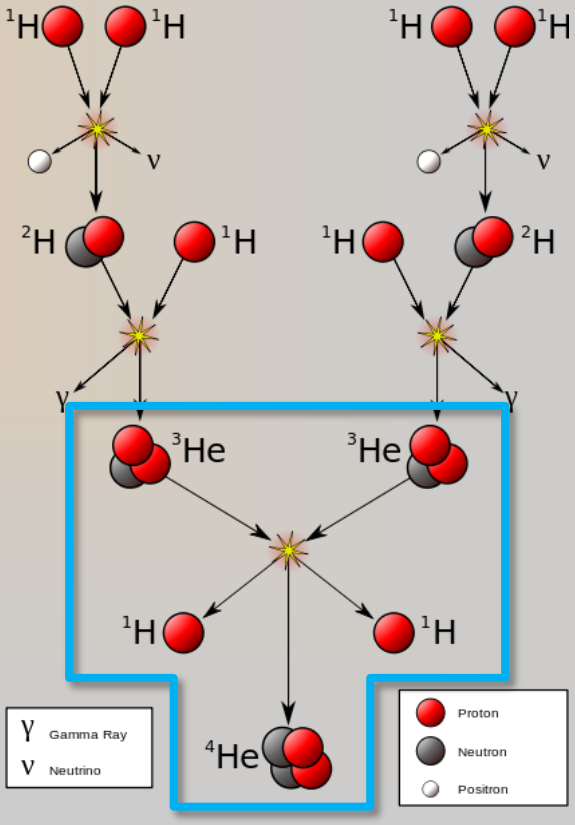
c) Quelques données sur le Soleil

- La chaîne proton-proton

✓ Troisième étape :

- **Fusion de 2 noyau $^{3}_{2}H$**
  Cette réaction formera un noyau $^{4}_{2}He$ avec émission de 2 p^{+}.

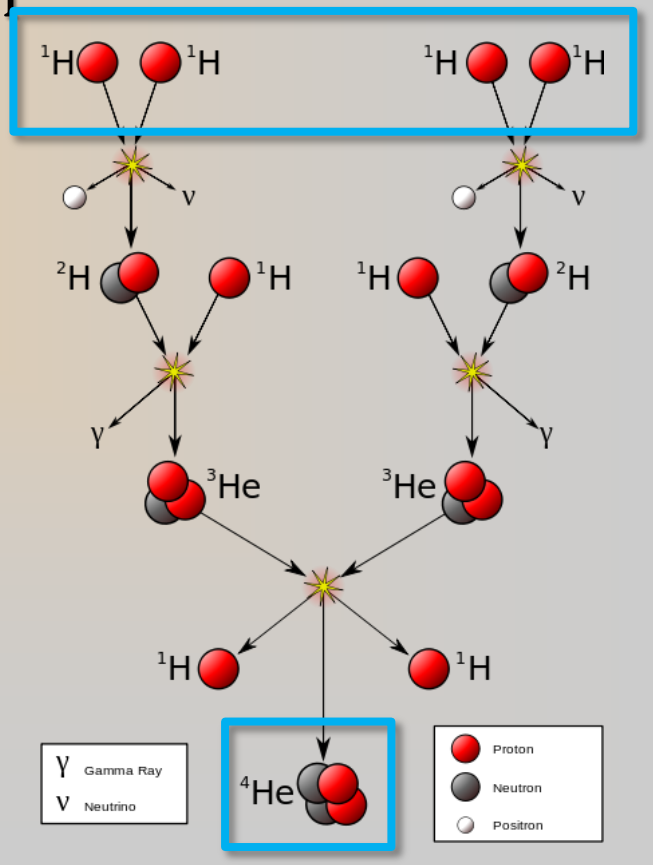
Produit 12,86 Mev



LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

- La chaîne proton-proton



✓ **Conclusion :**

- Ainsi, la fusion initiale de 4 p^+ pour finalement donner un noyau ^4_2He émet 6 photons γ totalisant **26,7 Mev** ou 4,13 X 10^{-12} J d'énergie.
- On appelle ***particule alpha*** le noyau d'hélium ^4_2He.

LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

5. Le Soleil est-il un réacteur nucléaire efficace ?
   - On entend souvent dire que pour développer un réacteur nucléaire industriel, il nous faudrait tout simplement ***imiter*** le Soleil.
   - Or, j'ai de petites nouvelles pour vous !
     - Pour développer un réacteur à fusion efficace, **il ne faut surtout pas imiter le Soleil**.

Pourquoi

LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

- On a mesuré qu'un m^3 du cœur du Soleil produit une puissance de **800** W.
- Calcul de $P_\odot$ par m^3 du cœur solaire :
  - Le noyau fait 25% du rayon du Soleil ($R_\odot$ =6,96 X 10^8 m), soit 174 085 000 m.
  - $V_{noyau} = \frac{4}{3}\pi(174\,085\,000\ m)^3 = 2{,}2 \times 10^{25} m^3$
  - $L_\odot = P_\odot = 3{,}86$ X 10^{26} W
  - $P_\odot$ /m^3 du noyau $= \frac{3{,}86\times10^{26} W}{2{,}2\times10^{25} m^3} = \boxed{17{,}5\ {}^{W}/_{m^3}}$

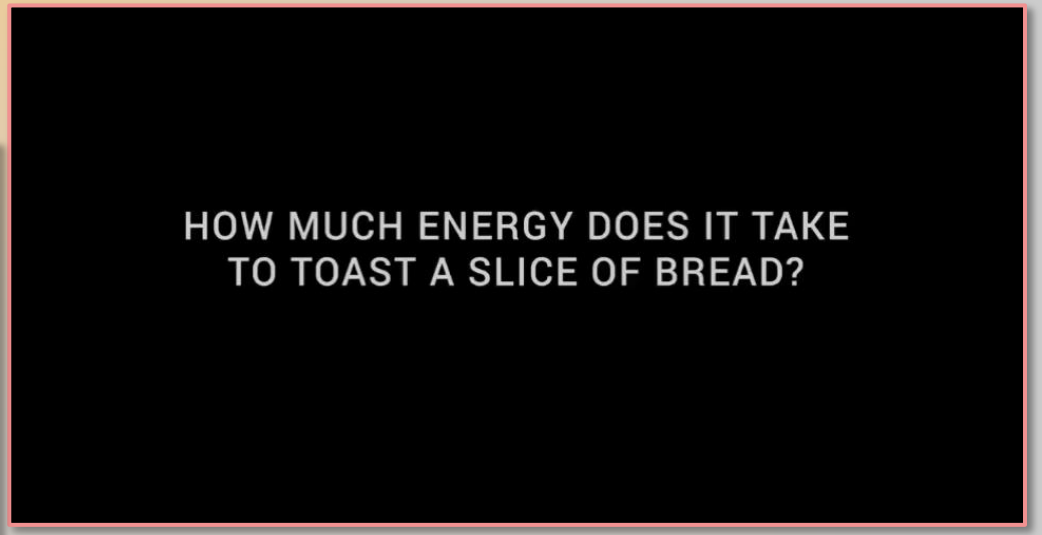
LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

5. Le Soleil est-il un réacteur nucléaire efficace ?
   - Eh ben !!!

Robert Förstemann a développé 700 W de puissance.

- Avec un poids de 95 kg, on peut mesurer son volume à 0,095 m³
- Il produit donc $P = \frac{700\ W}{0{,}095\ m^3} =$ **7 368** $^{W}/_{m^3}$



- Soit ≅ 10 fois plus que le Soleil !

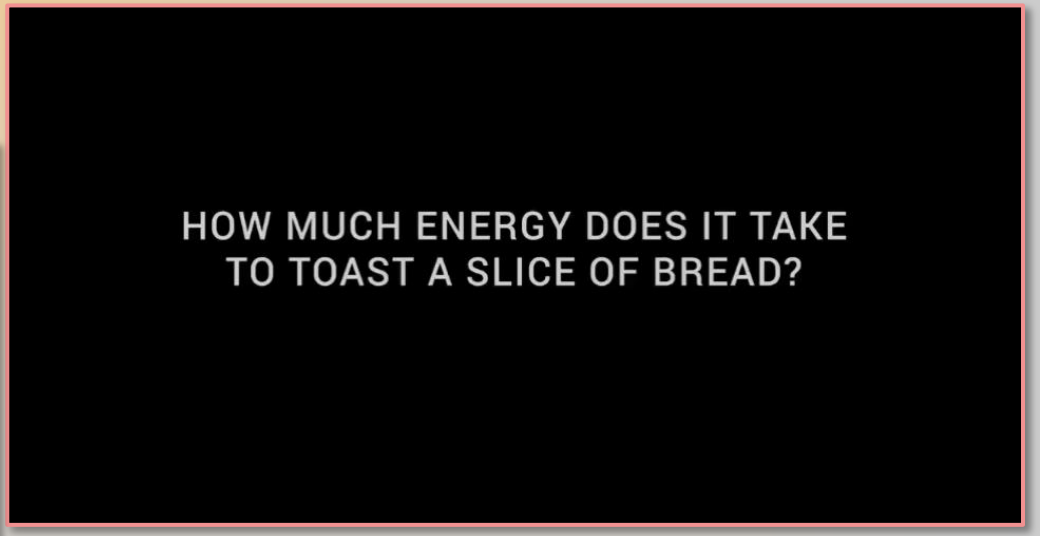
LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

5. Le Soleil est-il un réacteur nucléaire efficace ?
   - Eh ben !!!

Robert Förstemann a développé 700 W de puissance.

- Avec un poids de 95 kg, on peut mesurer son volume à 0,095 m³
- Il produit donc $P = \frac{700\ W}{0{,}095\ m^3} =$ $\mathbf{7\ 368}\ {}^{W}/_{m^3}$

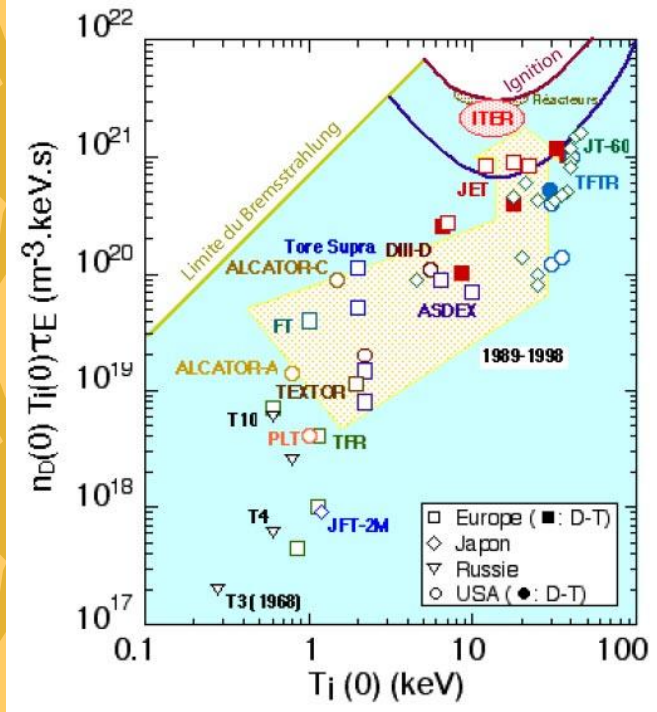


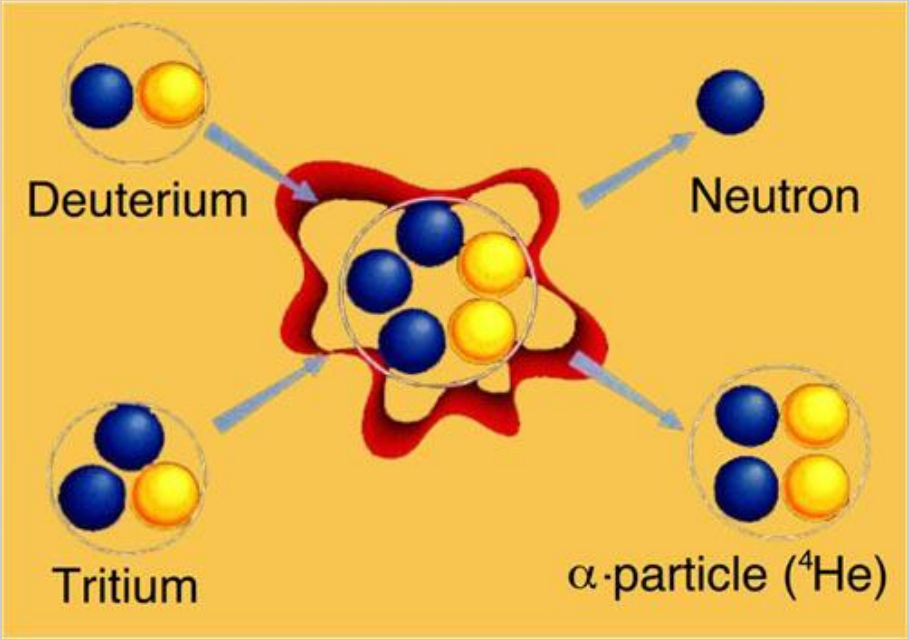
- Le Soleil ***n'est pas*** un réacteur très efficace !

LES PROBLÈMES

c) Ne surtout pas imiter le Soleil…

- … si on veut développer un réacteur à fusion efficace.





LES PROBLÈMES

c) Ne surtout pas imiter le Soleil…

- … si on veut développer un réacteur à fusion efficace.
- Fusion ${}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H$ est beaucoup plus efficace que le Soleil mais il faut °T initiale de 150 X 10^6 K.
  - 1 µg de combustible ➡ 1 kWh d'énergie.
    Le Soleil a besoin de 5,85 µg de ${}^{1}_{1}H$.
- La fusion ${}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H$ fait appel à l'interaction nucléaire **forte** ; le Soleil utilise la voie de l'interaction nucléaire **faible**.

LES PROBLÈMES

c) Ne surtout pas imiter le Soleil…

- Mais surtout, la fusion $p^+ + p^+$ en ${}^2_2H$ est remarquablement ***peu efficace*** !
  - ${}^2_2H$ est instable et se désintègre en 2 $p+$ en 10^{-8} secondes.
  - Pour assurer la stabilité de cette étape de la fusion, il faut qu'en $< 10^{-8}$ s, un des protons se transforme en neutron (interaction faible) ➡ ${}^2_1H$ (deutérium).
  - Pour un $p+$ particulier, l'attente est de **1 milliard d'années** !

LES PROBLÈMES

c) Ne surtout pas imiter le Soleil…

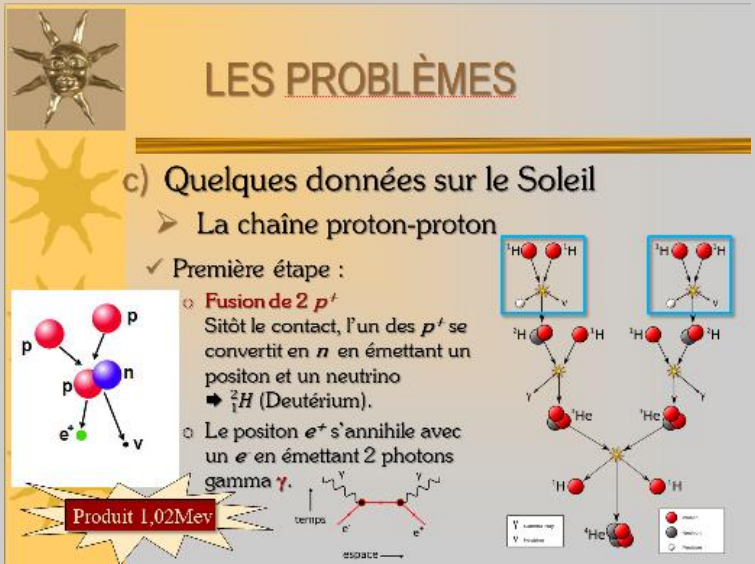
- Mais surtout, la fusion $p^+ + p^+$ en ${}^2_2H$ est remarquablement ***peu efficace*** !
  - ${}^2_2H$ est instable e[illegible] 10^{-8} secondes.
  - Pour assurer la [illegible] fusion, il faut qu[illegible]ns se transforme en neutr[illegible] (interaction faible) ➡ ${}^2_1H$ (deutérium).
  - Pour un $p+$ particulier, l'attente est de **1 milliard d'années** !

Ainsi, très peu de ${}^2_1H$ sont produits au même moment.

LES PROBLÈMES

c) Ne surtout pas imiter le Soleil…

- Mais surtout, la fusion $p^+ + p^+$ en ${}^2_2H$ est remarquablement ***peu efficace*** !
  - Cette première étape est le ***facteur temporel limitant*** de la fusion nucléaire au sein des étoiles.
  - Sinon, le Soleil aurait « brulé » tout son ${}^1_1H$ disponible en < 1 million d'années.

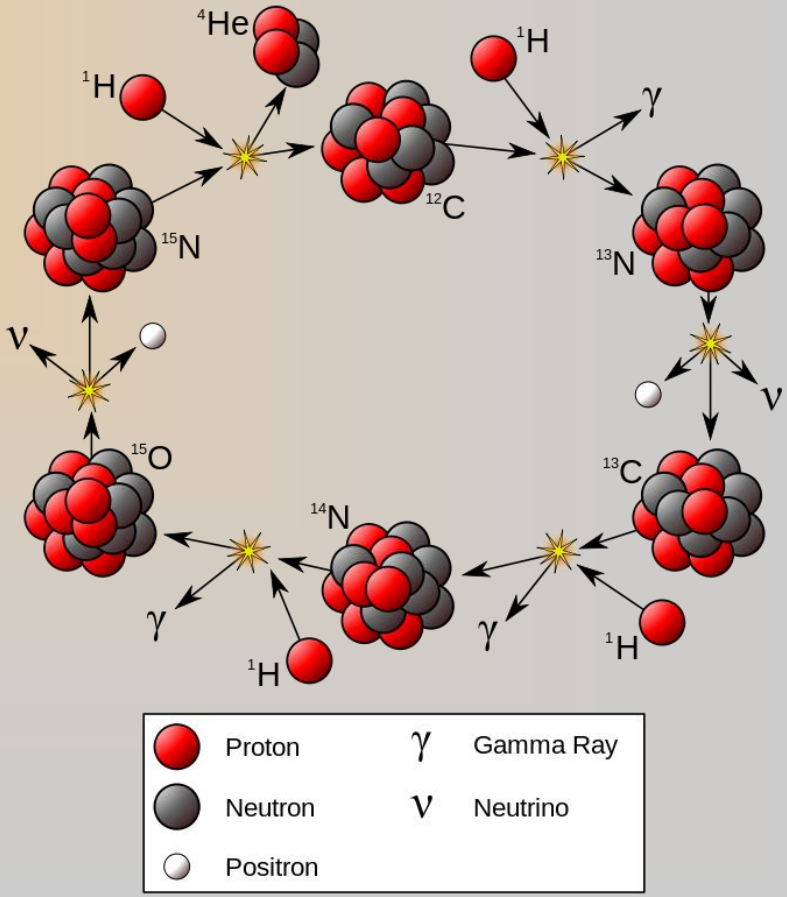


LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

➢ Le cycle CNO

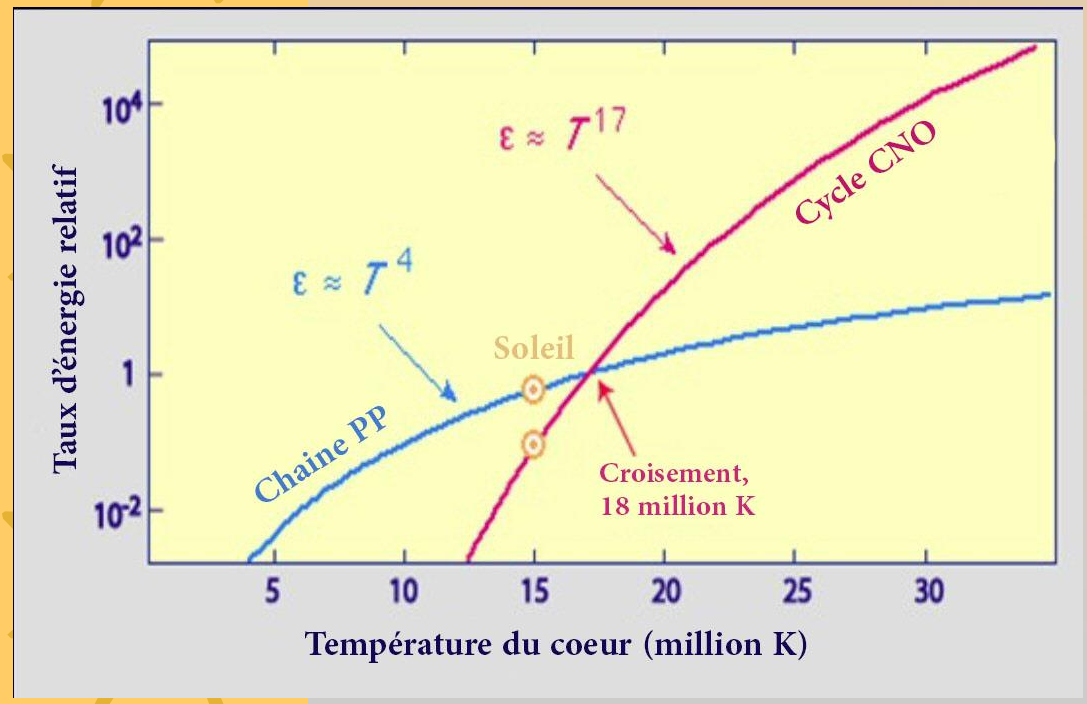
- ✓ Le Soleil, qui n'est pas une étoile de 1ère génération réalise ≈ 23% de la fusion de $^{1}_{1}H$ par le cycle CNO.
- ✓ Ce mode de fusion de $\boldsymbol{^{1}_{1}H}$ en $\boldsymbol{^{4}_{2}He}$ est le plus important dans les étoiles plus massives que le Soleil (≥ 1,5 $M_{\odot}$).

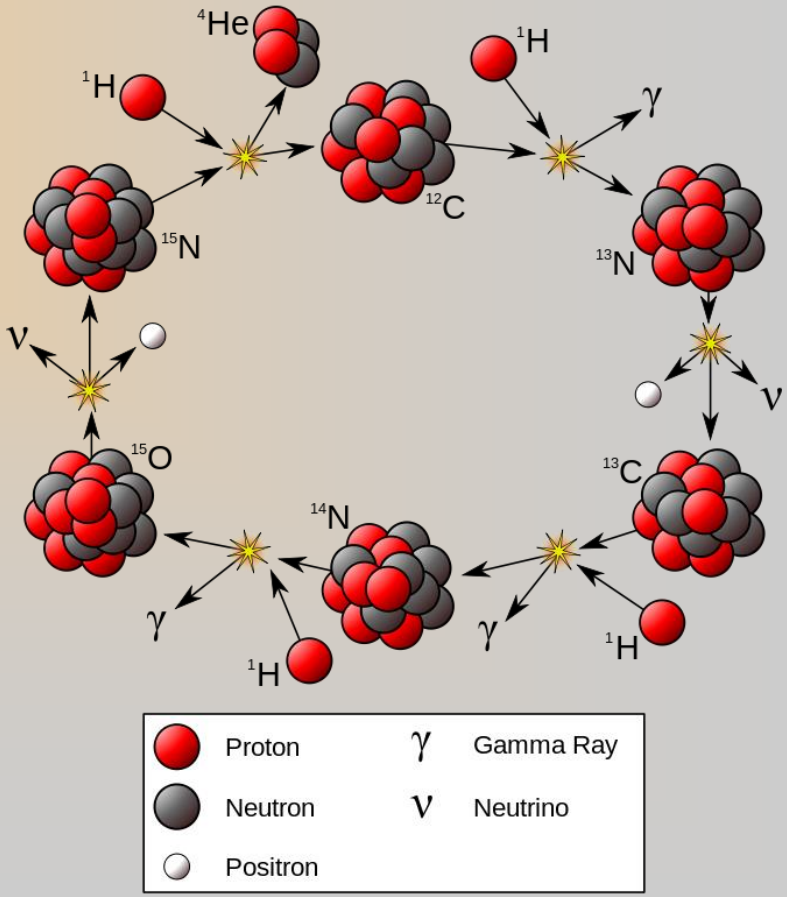


LES PROBLÈMES

c) Quelques données sur le Soleil

- Le cycle **CNO**





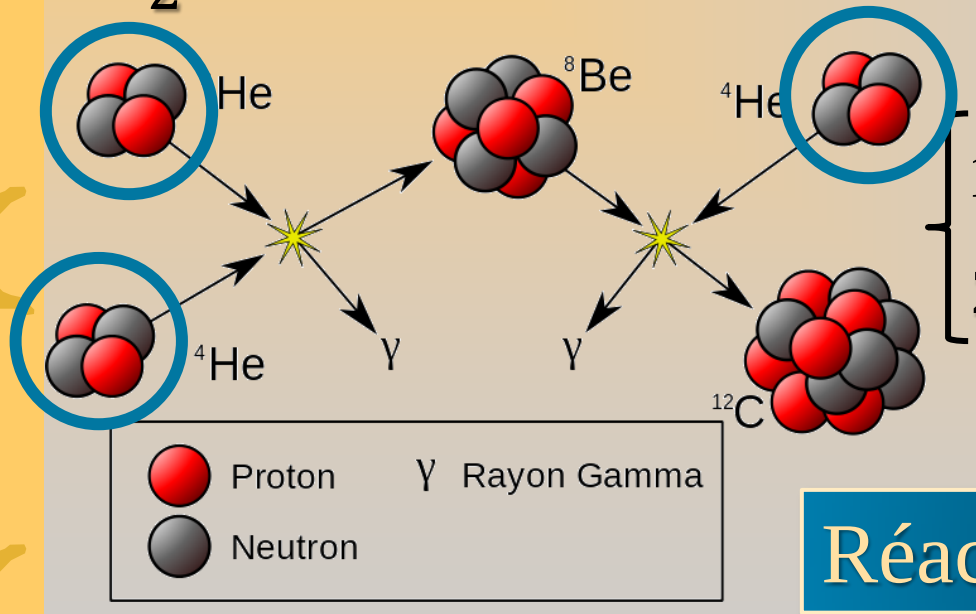
LES PROBLÈMES

d) Qu'arrivera-t-il lorsque le Soleil aura fini de fusionner ${}^{1}_{1}H$ disponible ?

- Autrement dit, les étoiles peuvent-elles fusionner des noyaux atomiques plus lourds que ${}^{1}_{1}H$?
- La réponse est oui, mais…
  - Plus de noyau contient de ***p+***, plus la charge électrique répulsive ⬆ et…
  - Plus il faut ⬆ l'énergie d'amorce de la réaction de fusion.
- Or, lorsque ${}^{1}_{1}H$ s'épuise, la pression de lumière ⬇ et le cœur de l'étoile se contracte, ce qui fait ⬆ la °T.

LORSQUE ${}^{1}_{1}H$ S'ÉPUISE

d) Lorsque la °T ≥ 100 X 10^6 K, ${}^{4}_{2}He$ commence à fusionner.



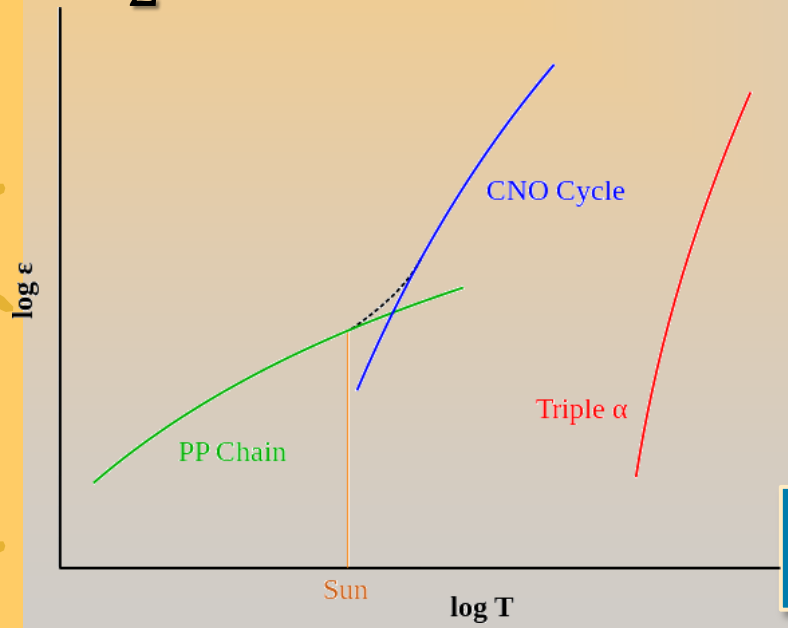
1) ${}^{4}_{2}He + {}^{4}_{2}He = {}^{8}_{4}Be$

2) ${}^{8}_{4}Be + {}^{4}_{2}He = {}^{12}_{6}C$

Réaction triple alpha

LORSQUE ${}^{1}_{1}H$ S'ÉPUISE

d) Lorsque la °T ≥ 100 X 10^6 K, ${}^{4}_{2}He$ commence à fusionner.



$$\begin{cases} 1)\ {}^{4}_{2}He + {}^{4}_{2}He = {}^{8}_{4}Be \\ 2)\ {}^{8}_{4}Be + {}^{4}_{2}He = {}^{12}_{6}C \end{cases}$$

Réaction triple alpha

- En raison de sa masse, le Soleil ne dépassera pas cette étape.

LORSQUE $^{1}_{1}H$ S'ÉPUISE

d) Puis, alors que $^{4}_{2}He$ s'épuise, dans le cœur des grosses étoiles ($M \geq 8\ M_{\odot}$), la contraction gravitationnelle ⬆ °T à plus de 600 X 10^6 K et le $^{12}_{6}C$ fusionne à son tour.

a) $^{12}_{6}C + ^{12}_{6}C = \mathbf{^{20}_{10}Ne} + ^{4}_{2}He + 4{,}16\ Mev$

b) $^{12}_{6}C + ^{12}_{6}C = \mathbf{^{16}_{8}O} + 2\ ^{4}_{2}He + 0{,}113\ Mev$

c) $^{12}_{6}C + ^{12}_{6}C = \mathbf{^{24}_{12}Mg} + 19{,}9\ Mev$

d) $^{12}_{6}C + ^{12}_{6}C = \mathbf{^{23}_{11}Na} + ^{1}_{1}H + 2{,}241\ Mev$

LORSQUE $^{1}_{1}H$ S'ÉPUISE

d) Puis, lorsque la °T ≥ 1,5 X 10^9 K…
c'est au tour de $^{16}_{8}O$ à s'associer.

a) $^{16}_{8}O + {}^{16}_{8}O = {}^{28}_{14}Si + {}^{4}_{2}He + 9{,}594\ Mev$

b) $^{16}_{8}O + {}^{16}_{8}O = {}^{31}_{15}P + {}^{1}_{1}H + 7{,}678\ Mev$

c) $^{16}_{8}O + {}^{16}_{8}O = {}^{31}_{16}S + 2\ {}^{1}_{1}H + 0{,}381\ Mev$

d) $^{16}_{8}O + {}^{16}_{8}O = {}^{23}_{11}Na + {}^{1}_{1}H + 2{,}241\ Mev$

LORSQUE $^{1}_{1}H$ S'ÉPUISE

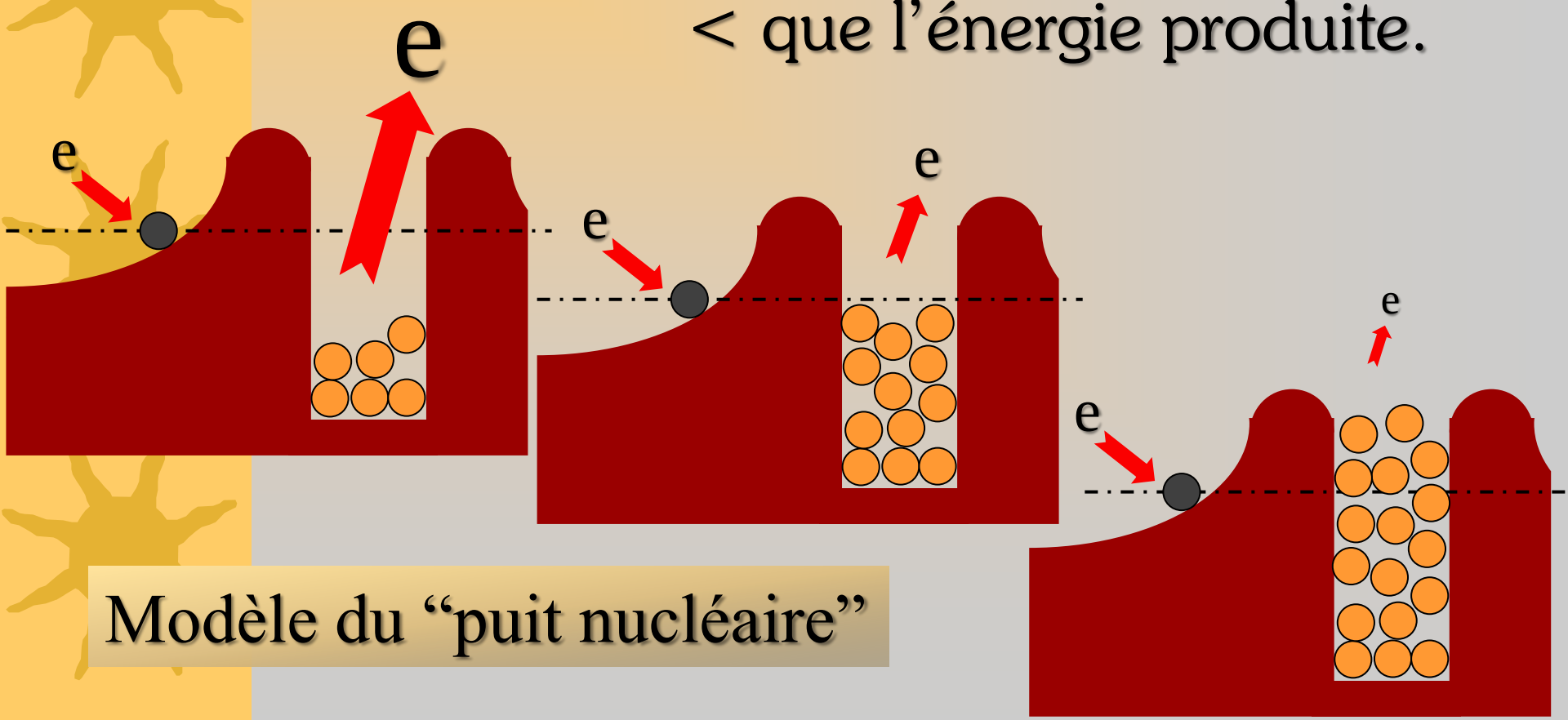
d) Puis, lorsque la °T ≥ 3 X 10^9 K…
le $^{28}_{14}Si$ fusionne à son tour.

$$[(^{28}_{14}Si + ^{4}_{2}He) + ^{4}_{2}He) \ldots + ^{4}_{2}He] \rightarrow \mathbf{^{56}_{26}Fe} + \cdots$$

e) Et puis, peut-on continuer à l'infini ?
Y a-t-il une limite ?

LA FUSION NUCLÉAIRE EST POSSIBLE LORSQUE…

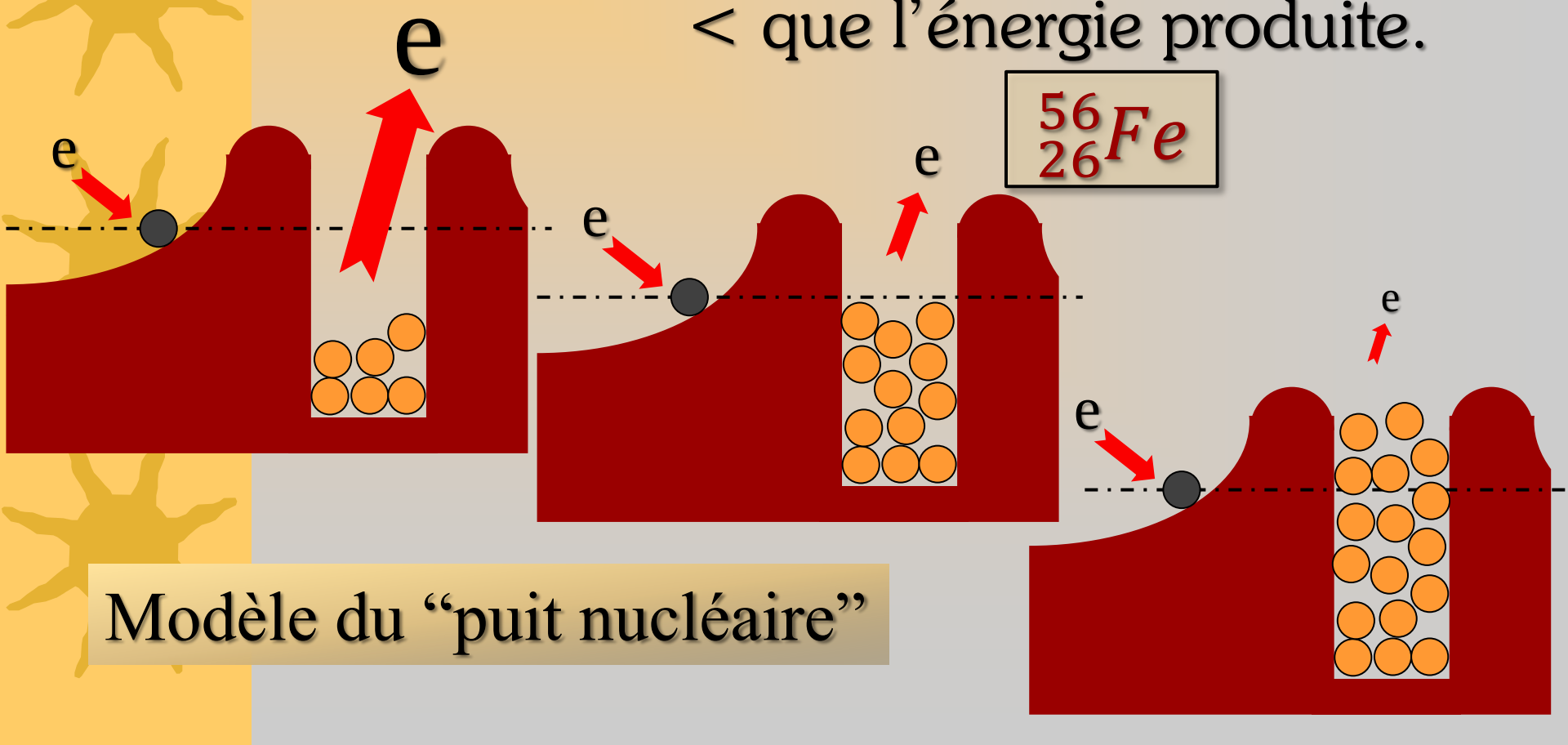
- L'énergie nécessaire à l'amorce est < que l'énergie produite.



Modèle du "puit nucléaire"

LA FUSION NUCLÉAIRE EST POSSIBLE LORSQUE…

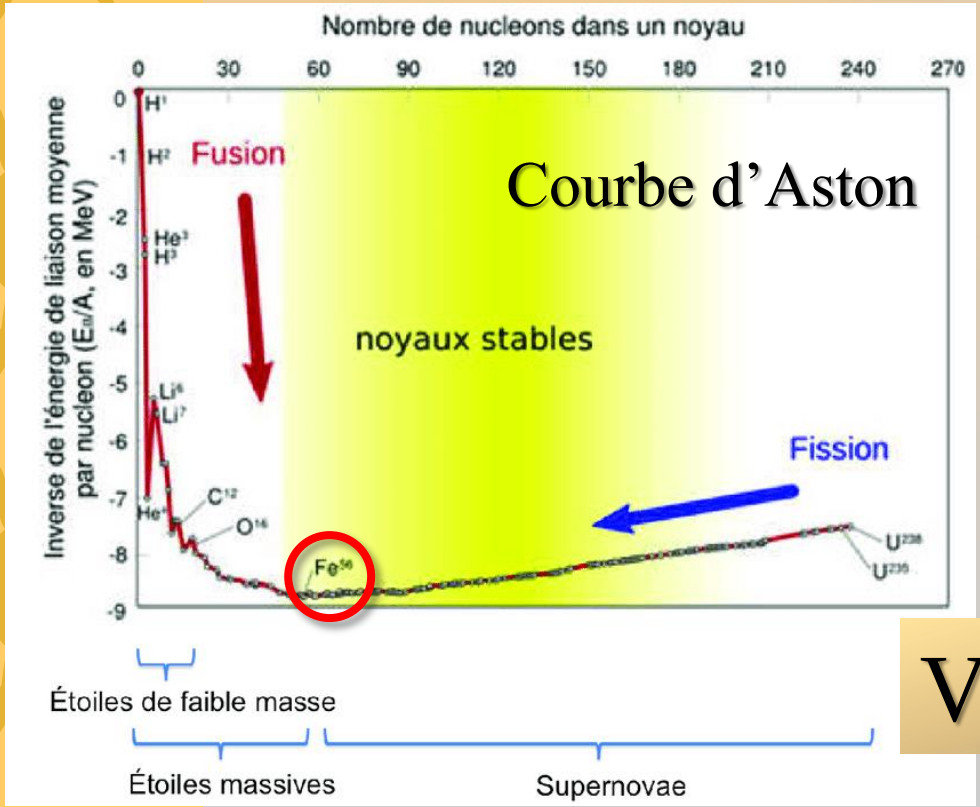
- L'énergie nécessaire à l'amorce est < que l'énergie produite.



Modèle du "puit nucléaire"

LA FUSION NUCLÉAIRE EST POSSIBLE LORSQUE…

- L'énergie nécessaire à l'amorce est < que l'énergie produite.



Vallé du fer

MESSAGES CLÉS

- Pour qu'un astre brille activement, il faut que sa masse soit suffisante pour que, par effondrement gravitationnel, la pression et la température ($\geq 4 \times 10^6$ K) en son centre autorisent à :
  - La matière d'y exister à l'état plasmatique (les atomes sont dissociés en noyaux et électrons).
  - L'énergie cinétique des noyaux de vaincre leur répulsion électrique de sorte que leur rapprochement les met à portée de l'interaction nucléaire forte permettant leur fusion.
- La fusion n'est possible qu'avec les éléments chimiques légers dont la masse atomique est < que celle du $^{56}_{26}Fe$. Alors, la masse résultante du produit de la fusion est < que la masse totale de chacune des composantes prises séparément.

MESSAGES CLÉS

- C'est la « masse perdue » qui est convertie en énergie selon l'équation d'Einstein $E=mc^2$. l'énergie est transportée sous forme de photons γ.
- Plus la °T interne de l'étoile est élevée, plus l'étoile peut fusionner des noyaux atomiques de masse importante.
- L'énergie produite par la fusion des noyaux atomiques au cœur des étoiles est prodigieuse. La conversion en hélium d'un seul kilogramme d'hydrogène génère autant d'énergie que la puissance installée d'Hydro-Québec peut en fournir en 5,5 heures.

MESSAGES CLÉS

- La perte de masse résultant de la fusion est minime en regard de la masse des étoile et leur durée de « vie » se mesure en plusieurs millions ou milliards d'années.
- La fusion d'atomes de plus en plus lourds peut continuer si la température du cœur de l'étoile est suffisamment élevée. Elle ne peut cependant dépasser le stade du $^{56}_{26}Fe$ car alors, l'énergie nécessaire à l'amorce de la fusion est supérieure à l'énergie produite.
- Malgré tout, le Soleil n'est pas un réacteur nucléaire très efficient car il mise sur l'interaction nucléaire faible pour assurer son cycle de fusion.

RÉFÉRENCES

- Astronomie et Astrophysique, 2e édition
  Séguin M, Villeneuve B
  Éditions du Renouveau Pédagogique Inc., 2002

- Wikipédia :
  - Sur la fusion nucléaire :
    https://fr.wikipedia.org/wiki/Fusion_nucl%C3%A9aire
  - Sur la chaîne proton-proton :
    https://fr.wikipedia.org/wiki/Cha%C3%AEne_proton-proton
- L'énergie des étoiles :
  1) http://nrumiano.free.fr/Fetoiles/energie.html
  2) http://www.astrosurf.com/omega-astro/vie_etoiles/energie_etoile.html

RÉFÉRENCES

- De quoi l'énergie est-elle le nom ? par Étienne Klein https://www.youtube.com/watch?v=Nb2S7oge8TQ
- Olympic Cyclist Vs. Toaster: Can He Power It? https://www.youtube.com/watch?v=S4O5voOCqAQ
- Hydro-Québec : https://www.hydroquebec.com/production/