

LA CAPSULE DU DÉBUTANT

Les étoiles (2)

- ✓ La naissance des étoiles :
  - ✓ La nébuleuse moléculaire



LES OBJECTIFS

- Au terme de cette présentation, le participant pourra :
  - Raconter l'histoire assumée de l'apparition des premières étoiles de l'Univers.
  - Décrire les grandes lignes de la formation des étoiles à partir des nébuleuses intragalactiques.
  - Exposer les caractéristiques physiques et les contraintes de l'effondrement gravitationnel des nébuleuses donnant naissance aux étoiles.
  - Expliquer les différentes populations d'étoiles et leurs particularités distinctives.

Au commencement
au matin du temps et de l'espace,
L'univers était dense et opaque.

Âgé de 380 000 ans à peine,
S'étant suffisamment refroidi,
Les protons et les neutrons s'apparièrent aux électrons,
Et la construction du monde put s'amorcer.

Le faisceau du premier rayonnement fut émis,
Et le monde devint transparent...
Et noir.

Ce fut la période des ***Âges sombres***

- Mais déjà, l'espace n'était pas vide.
- L'espace contenait de la matière issue de la nucléosynthèse primordiale.
- Cette matière était sous forme de gaz :
  - Hydrogène ($_1^1\boldsymbol{H}$) ➡ 92% des atomes.
    - ✓ Il était sous forme moléculaire (H_2)
    - ✓ Il y a un atome de Deutérium ($_1^2\boldsymbol{H}$) pour 50 000 $_1^1\boldsymbol{H}$
  - Hélium ($_2^4\boldsymbol{He}$) ➡ 8% des atomes.
  - Lithium ($_3\boldsymbol{Li}$) ➡ trace
  - Béryllium ($_4\boldsymbol{Be}$) ➡ trace

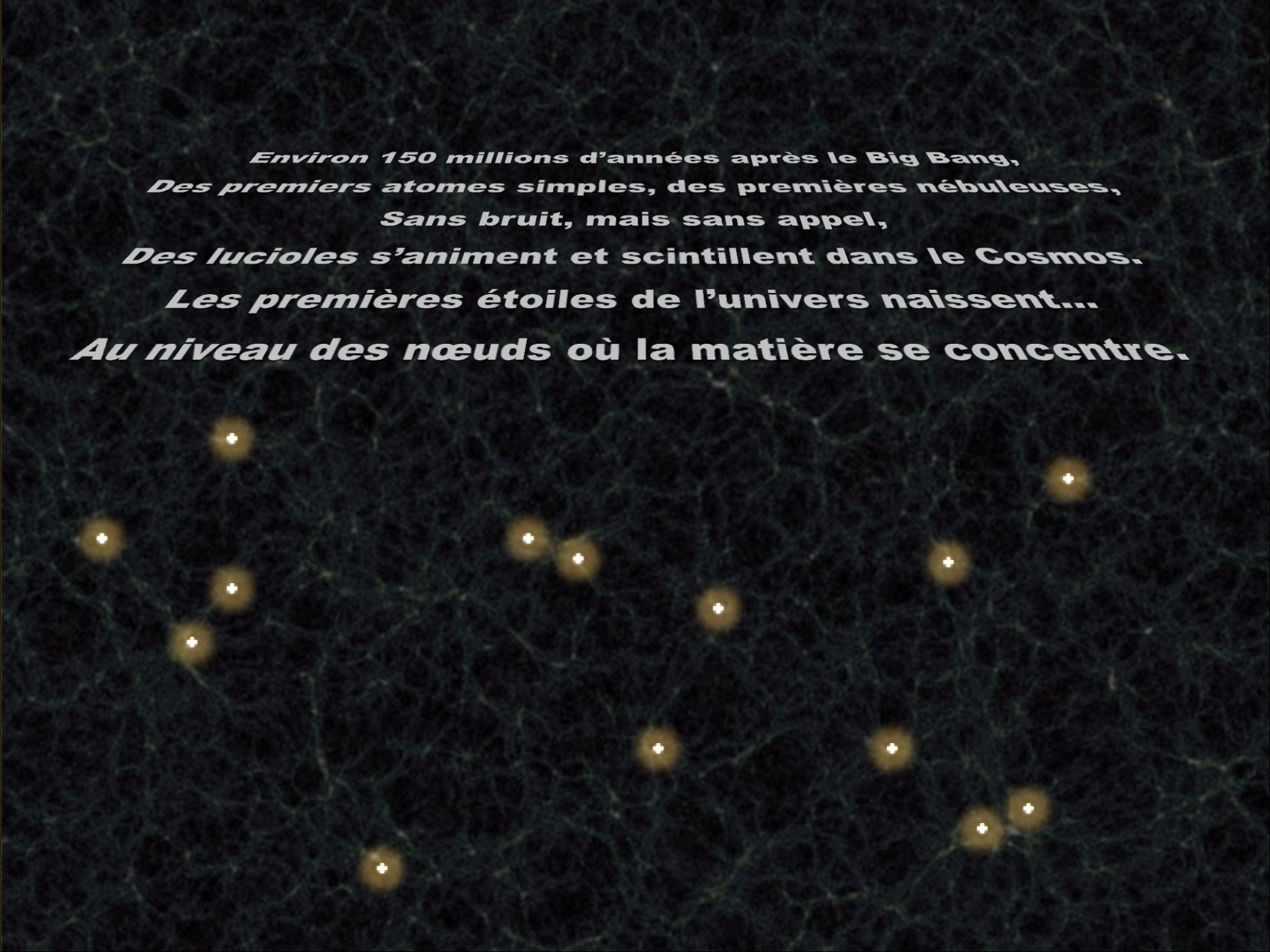
Ce fut la période des ***Âges sombres***

- Les ***Âges sombres*** n'étaient pas stagnants.
- Au cours de cette période, l'espace se structurait.
- Sous l'influence de la matière noire, la trame cosmique s'organisait et un gigantesque réseau constitué de ***filaments***, de ***nœuds*** et de ***vides*** surgissait lentement, graduellement, ostensiblement...

Dès lors, les ténèbres enveloppaient les ténèbres.
Quoi qu'il y eut, l'Un, venant à l'Être,
Tapi dans le vide,
Fut engendré par la force du Feu.

Rig-Veda

Environ 150 millions d'années après le Big Bang,
Des premiers atomes simples, des premières nébuleuses,
Sans bruit, mais sans appel,
Des lucioles s'animent et scintillent dans le Cosmos.
Les premières étoiles de l'univers naissent...
Au niveau des nœuds où la matière se concentre.



Dès lors, les ténèbres enveloppaient les ténèbres.
Quoi qu'il y eut, l'Un, venant à l'Être,
Tapi dans le vide,
Fut engendré par la force du Feu.

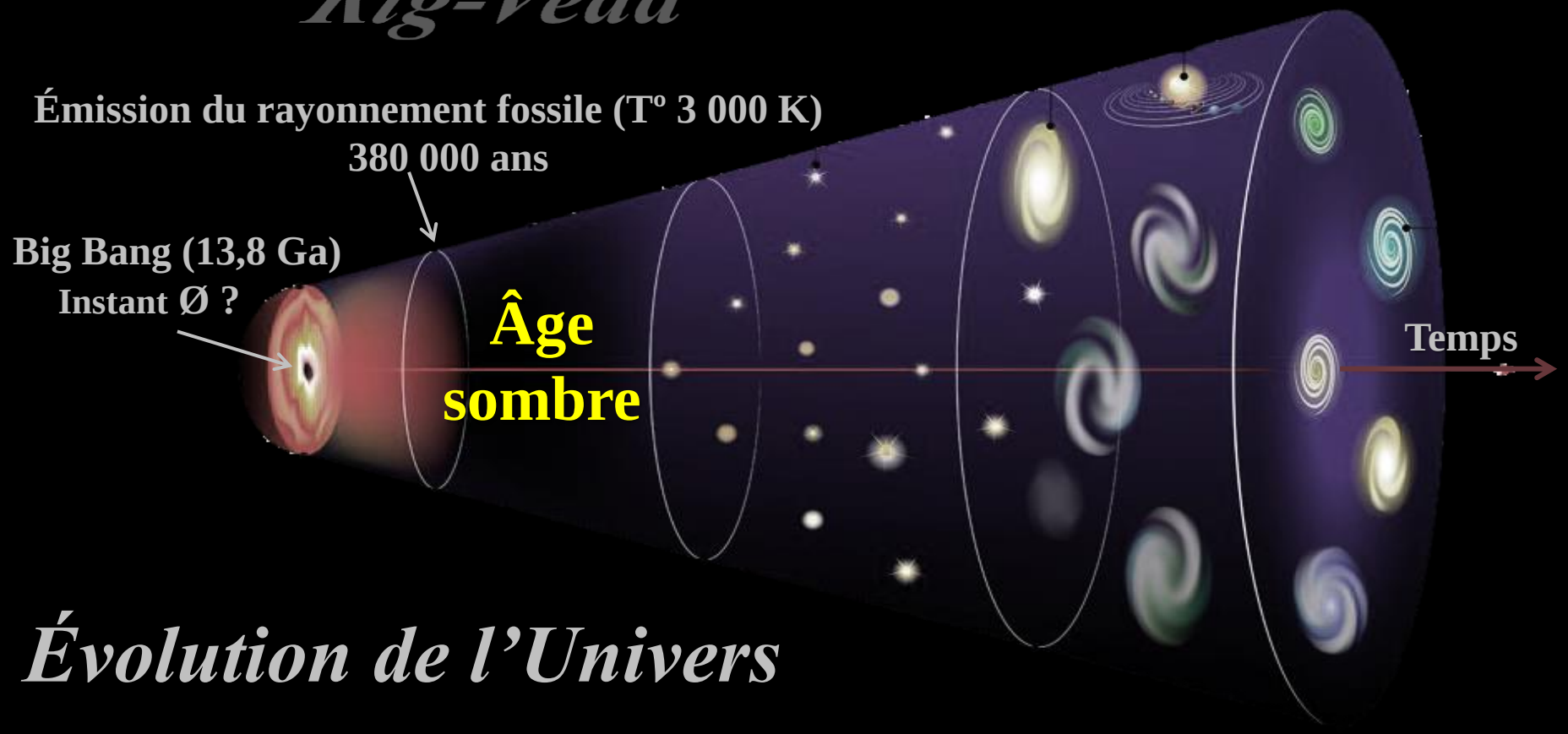
Rig-Veda





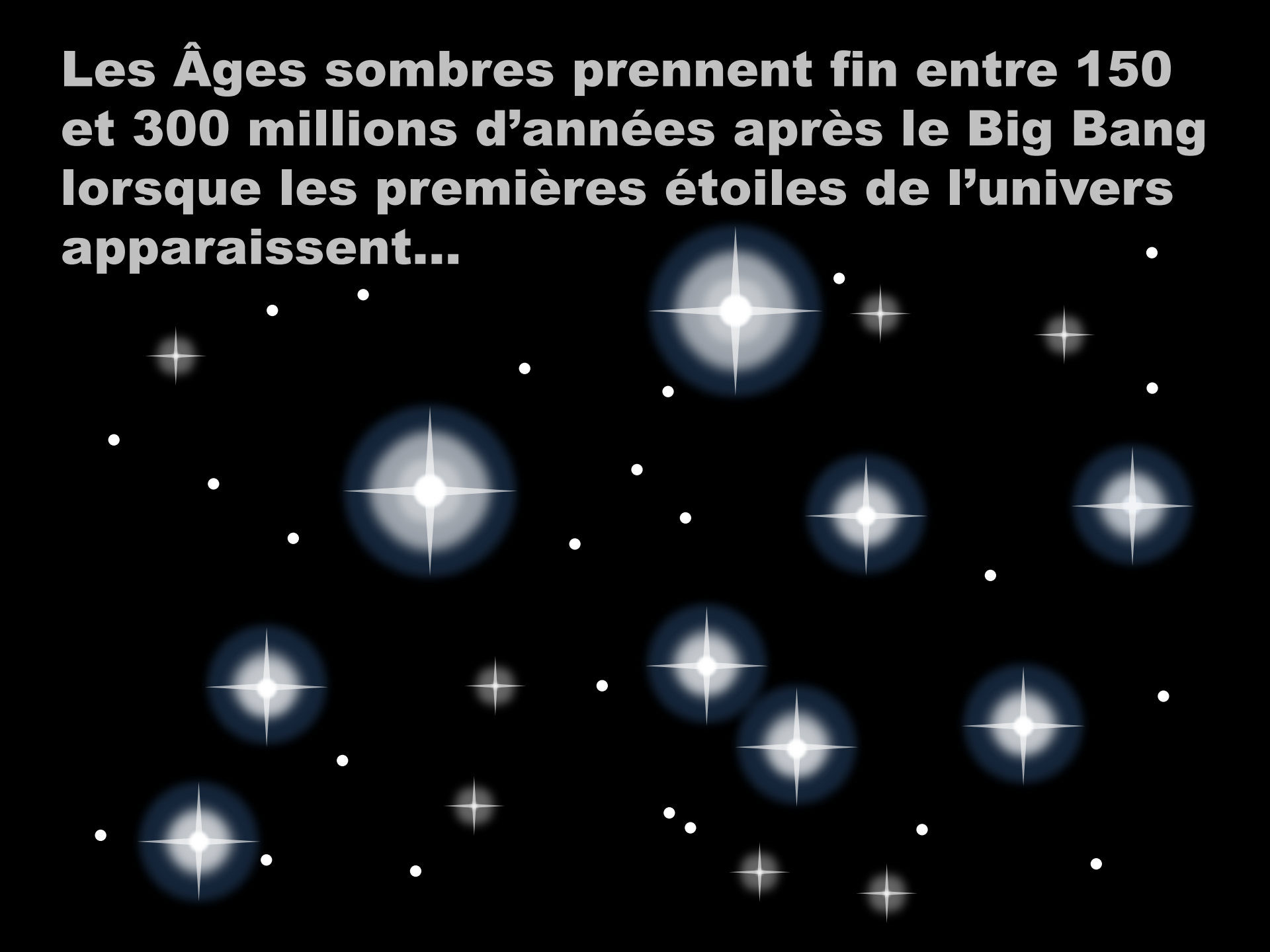
Si nous résumons jusqu'à maintenant…

Au début, les ténèbres enveloppaient les ténèbres.
Quoi qu'il y eut, l'Un, venant à l'Être,
Tapi dans le vide,
Fut engendré par la force du Feu.
Rig-Veda



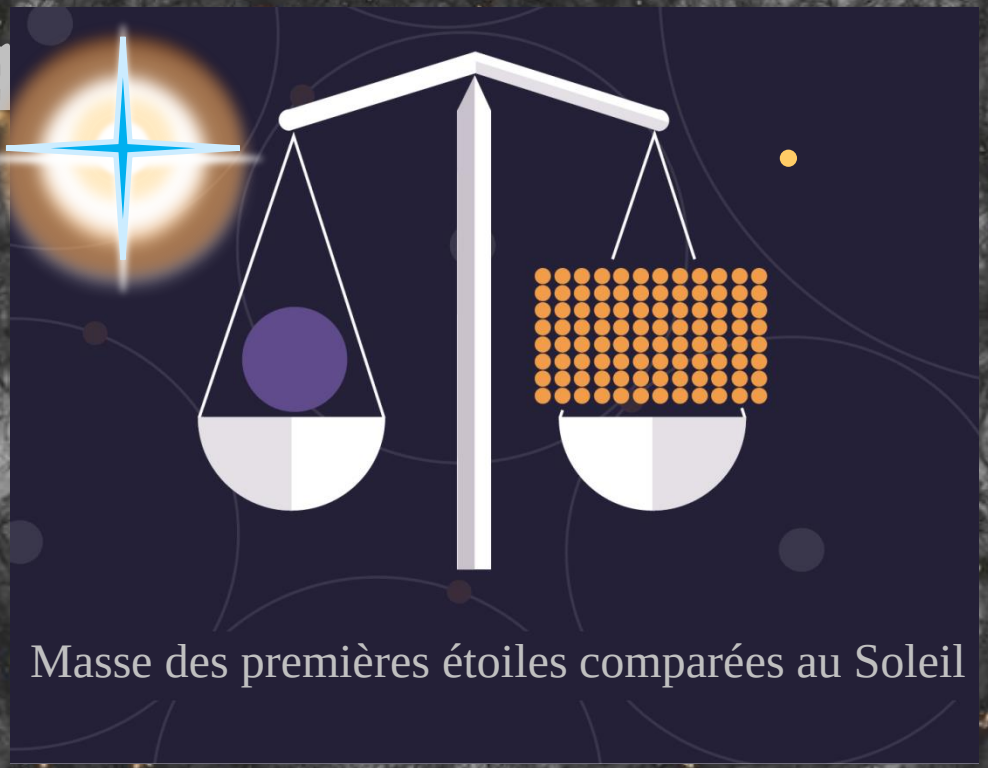
Évolution de l'Univers

Les Âges sombres prennent fin entre 150 et 300 millions d'années après le Big Bang lorsque les premières étoiles de l'univers apparaissent…



CETTE OBSCURE CLARTÉ QUI TOMBE DES ÉTOILES CORNEILLE, *LE CID*

- Ces premières étoiles sont **bleues**, grosses, immenses, gigantesq



Masse des premières étoiles comparées au Soleil



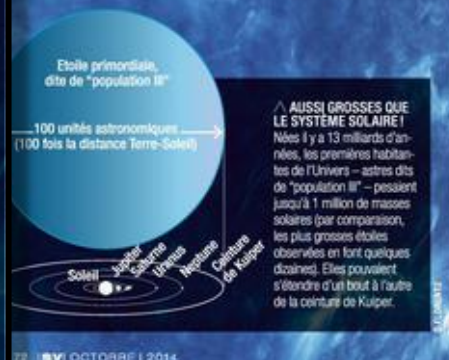
CETTE OBSCURE CLARTÉ QUI TOMBE DES ÉTOILES CORNEILLE, *LE CID*

★Ces premières étoiles sont bleues, grosses, immenses,

Elles ne sont faites que d'Hydrogène et d'Hélium



$\approx 1\ 000\ 000\ M_{\odot}$?





CETTE OBSCURE CLARTÉ QUI TOMBE DES ÉTOILES CORNEILLE, *LE CID*

★Ces premières étoiles sont bleues, grosses, immenses,

On les nomme "***Étoiles de population III***"



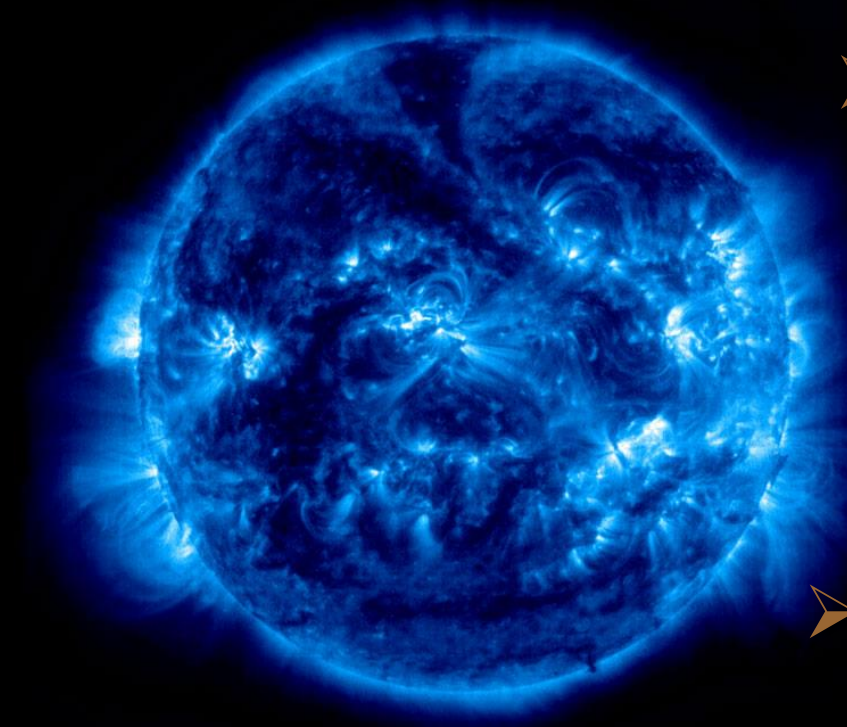
$\approx 1\ 000\ 000\ M_{\odot}$?





CETTE OBSCURE CLARTÉ QUI TOMBE DES ÉTOILES CORNEILLE, *LE CID*

- Ces premières étoiles sont chaudes, torrides, **ardentes**.



  - T° de surface ≈ 110 000 K
    - ($T_\odot$ = 5 780 K)
  - $L \approx 30 \bullet 10^6\ L_\odot$
  - Ce sont des hypermassives bleues de type O
- Elles irradient surtout dans l'UV en ionisant les gaz

CETTE OBSCURE CLARTÉ QUI TOMBE DES ÉTOILES CORNEILLE, *LE CID*

- Ces premières étoiles aiment la vie de famille et naissent en essaims.



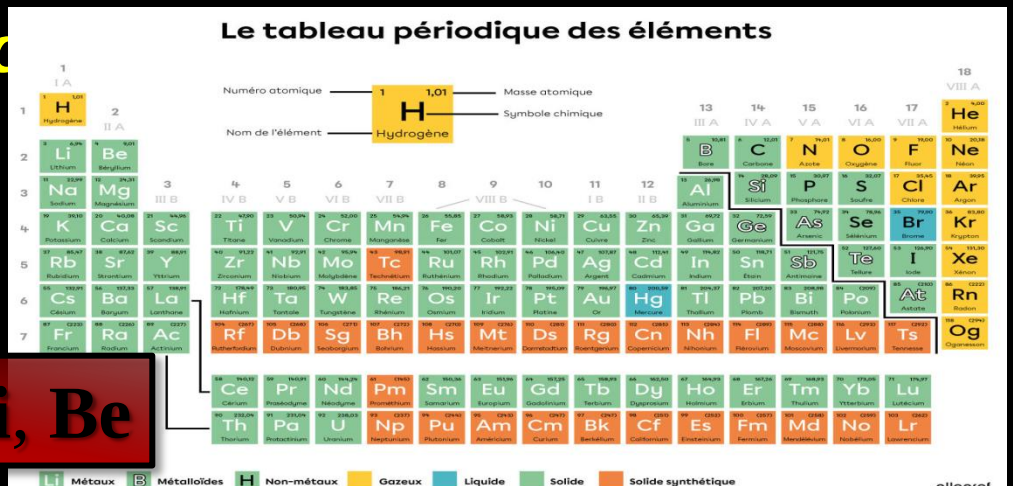
Au niveau des nœuds et à faible distance les unes des autres



CETTE OBSCURE CLARTÉ QUI TOMBE DES ÉTOILES CORNEILLE, *LE CID*

- Ces premières étoiles ont une vie brève mais mouvementée.
  - Au cours d'étapes successives, elles fabriquent les noyaux des éléments chimiques naturels (***nuc***





Sauf H, He, Li, Be



CETTE OBSCURE CLARTÉ QUI TOMBE DES ÉTOILES CORNEILLE, *LE CID*

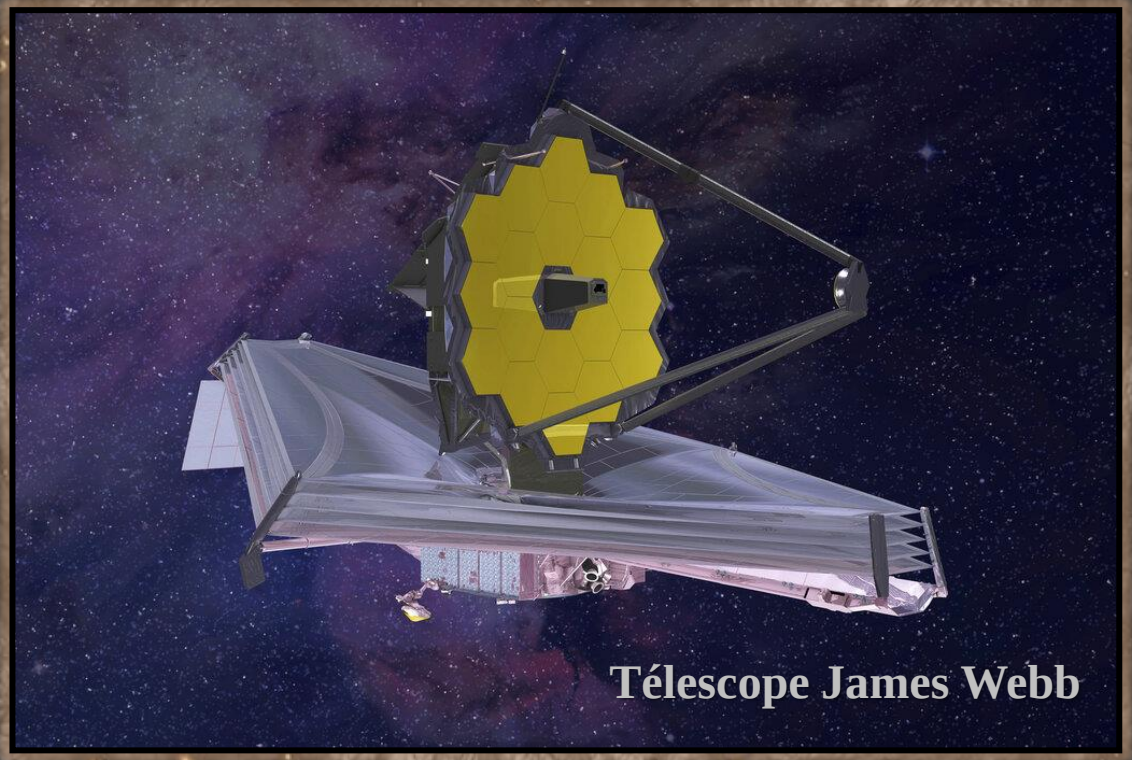
- Ces premières étoiles ont une vie brève mais mouvementée.



  - Elles terminent leur vie en supernovæ après qq millions d'années de durée seulement :
    - Ensemençant le milieu cosmique des éléments dits "métalliques".
    - Laissant derrière elles les premiers trous noirs de

CETTE OBSCURE CLARTÉ QUI TOMBE DES ÉTOILES CORNEILLE, *LE CID*

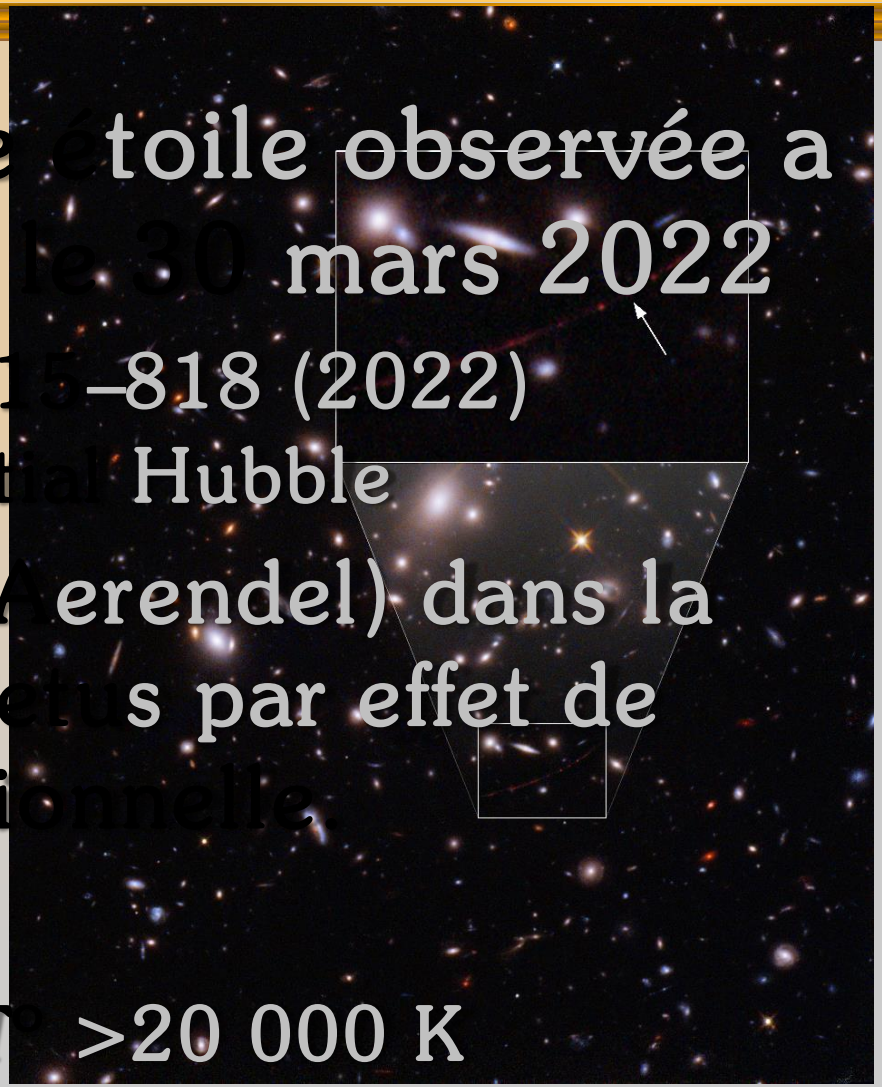
- Ces premières étoiles n'ont pas encore été observées.



Télescope James Webb

TU AURAS, TOI, DES ÉTOILES QUI SAVENT RIRE ST-EXUPÉRY, *LE PETIT PRINCE*

- La plus vieille étoile observée a été rapportée le 30 mars 2022
  - ***Nature*** 603, 815–818 (2022)
  - Télescope spatial Hubble
- WHL0137-LS (Earendel) dans la constellation Cetus par effet de lentille gravitationnelle
  - 12,9 Ga
  - 50 à 100 $M_\odot$, T° >20 000 K



TU AURAS, TOI, DES ÉTOILES QUI SAVENT RIRE ST-EXUPÉRY, *LE PETIT PRINCE*

- Une patriarche bien près de nous : HD 140283 (étoile de Mathusalem)

Toute la durée de la vie de Mathusalem fut de **969** ans, puis il mourut.

Genèse, 5, 27





TU AURAS, TOI, DES ÉTOILES QUI SAVENT RIRE ST-EXUPÉRY, *LE PETIT PRINCE*

- Une patriarche bien près de nous : HD140283 (étoile de Mathusalem)
  - Âgée de 13,6 [illegible] 0,8 Ga

C'est la **plus vielle étoile connue**. Rappelons que l'âge estimé de l'Univers est de 13,799 ± 0,038 Ga.



TU AURAS, TOI, DES ÉTOILES QUI SAVENT RIRE ST-EXUPÉRY, *LE PETIT PRINCE*

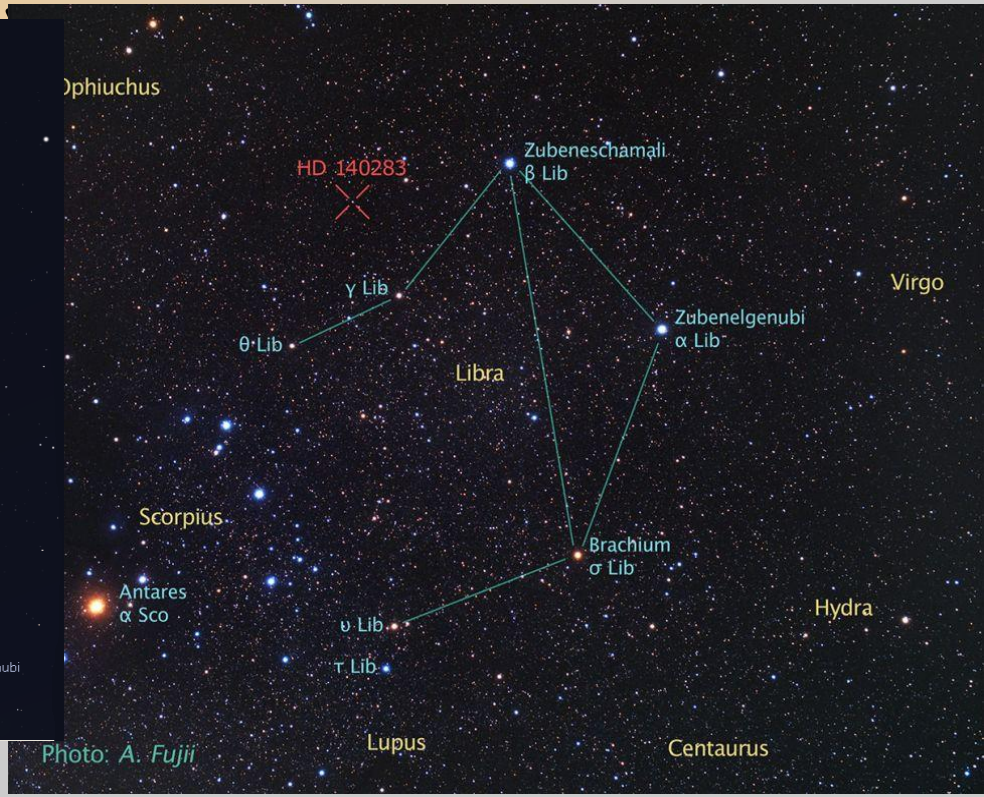
- Une patriarche bien près de nous : HD140283 (étoile de Mathusalem)
  - Âgée de 13,66 ± 0,8 Ga
  - Caractéristiques astronomiques :
    - Rayon = 1,4 $R_\odot$
    - Luminosité = 4,82 ± 0,27 $L_\odot$,
    - Magnitude absolue = 3,37
    - Magnitude apparente = 7,2
    - Classe spectrale = G0



TU AURAS, TOI, DES ÉTOILES QUI SAVENT RIRE ST-EXUPÉRY, *LE PETIT PRINCE*

- Une patriarche bien près de nous : HD140283 (étoile de







TU AURAS, TOI, DES ÉTOILES QUI SAVENT RIRE ST-EXUPÉRY, *LE PETIT PRINCE*

- Une patriarche bien près de nous : HD140283 (étoile de Mathusalem)
  - Indice de métallicité = -2,5

On appelle ***métallicité*** l'abondance des éléments plus lourds que l'Hydrogène et l'Hélium. Ainsi, en astronomie, on utilise le vocable ***métal*** comme un terme pratique pour désigner tout ce qui n'est pas Hydrogène ou Hélium.



TU AURAS, TOI, DES ÉTOILES QUI SAVENT RIRE ST-EXUPÉRY, *LE PETIT PRINCE*

- Une patriarche bien près de nous : HD140283 (étoile de Mathusalem)
  - Indice de métallicité (Z) = -2,5
    - Soleil : $Z_{\odot}$ = 0,01 ou 1,6 % de masse en ***métaux***
    - HD 140283 = 0,0064 % de sa masse en ***métaux***
  - Ce type d'étoile n'a presque aucune chance d'avoir des planètes telluriques.



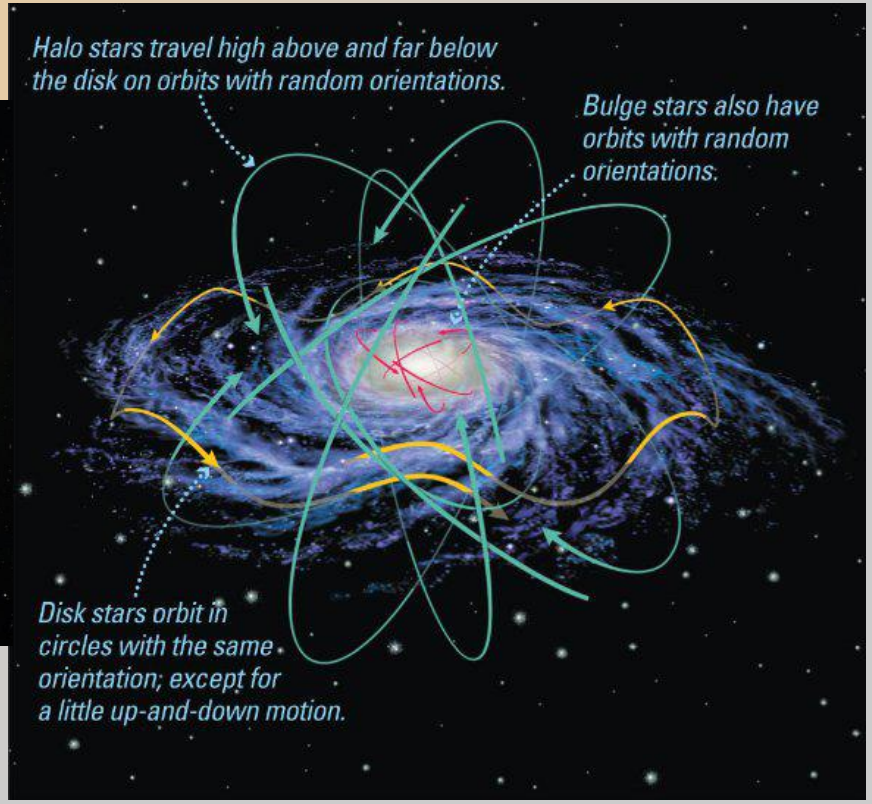
TU AURAS, TOI, DES ÉTOILES QUI SAVENT RIRE ST-EXUPÉRY, *LE PETIT PRINCE*

- Une patriarche bien près de nous : HD140283 (étoile de Mathusalem)
- Sa vitesse propre est de 3 400 km/s
  - Elle est une étoile ***vagabonde*** qui n'appartient pas au disque de la Voie Lactée.
  - Elle fut capturée d'une galaxie naine il y a 12 Ga. On retrouve ce type d'étoiles

TU AURAS, TOI, DES ÉTOILES QUI SAVENT RIRE ST-EXUPÉRY, *LE PETIT PRINCE*

- Une patriarche bien près de nous : HD140283 (étoile de Mathusalem)


NGC 4594 (Sombrero)





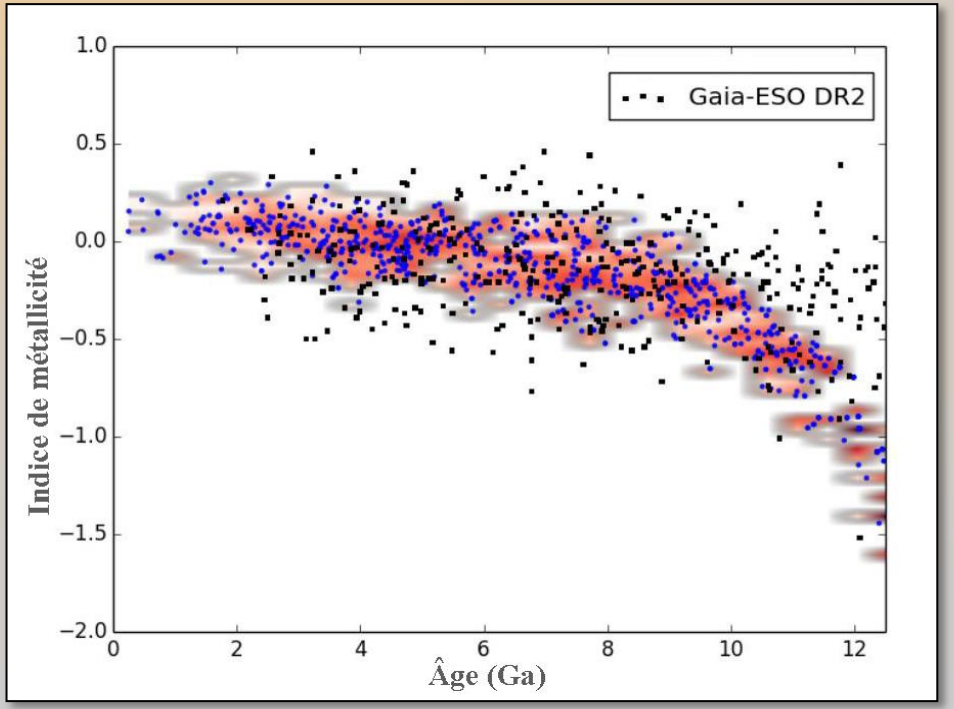
TU AURAS, TOI, DES ÉTOILES QUI SAVENT RIRE ST-EXUPÉRY, *LE PETIT PRINCE*

- HD140283 (étoile de Mathusalem) ou WHL0137-LS (étoile Aerendel) appartiennent à la Population II.
  - Ce sont des étoiles de 2e génération à faible métallicité.
  - Elles proviennent de nuages de gaz enrichis des éléments chimiques laissés par la Population III.
  - Elles ont plus de 10 Ga et la grande



OÙ VA-T-ON MADEMOISELLE ? DANS LES ÉTOILES TITANIC, LE FILM

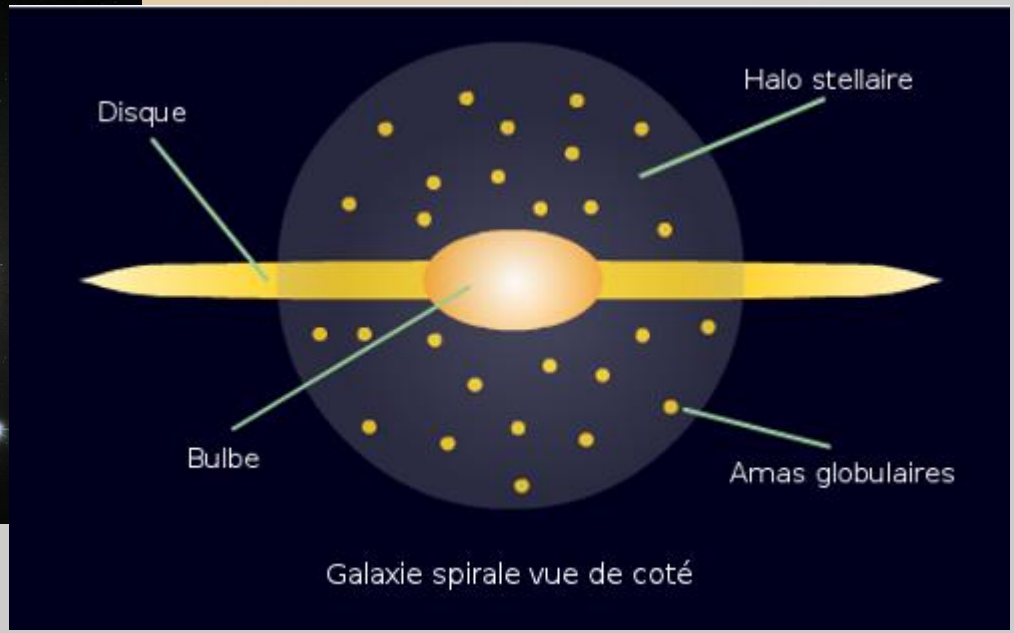
- Les étoiles de population I :
  - Toutes les étoiles qui se sont formées dans notre galaxie depuis 10 Ga.



OÙ VA-T-ON MADEMOISELLE ?
DANS LES ÉTOILES TITANIC, LE FILM

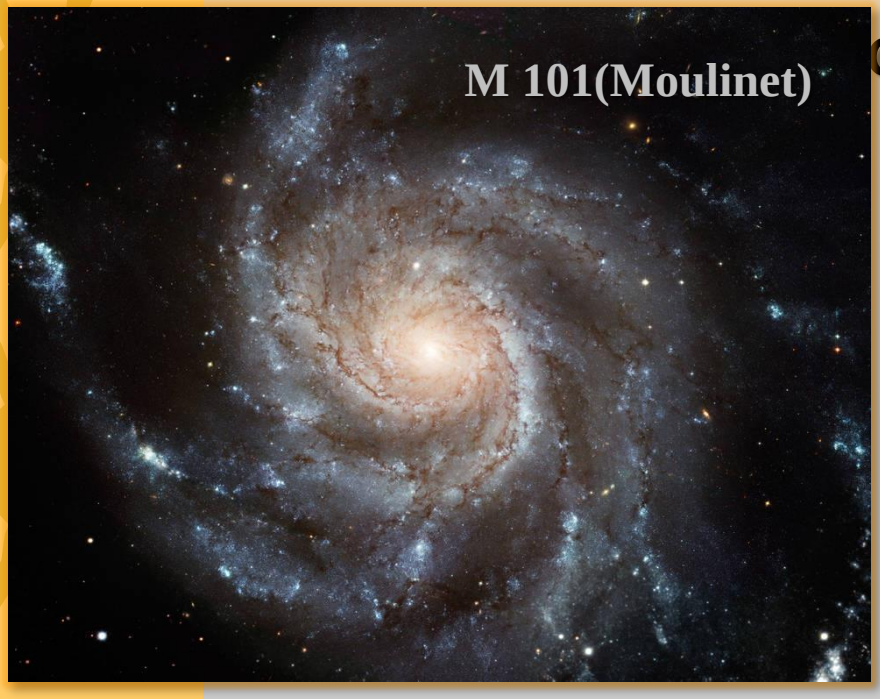
- Les étoiles de population I :
  - On les retrouve dans le disque de la galaxie.


NGC 4594 (Sombrero)



OÙ VA-T-ON MADEMOISELLE ?
DANS LES ÉTOILES TITANIC, LE FILM

- Les étoiles de population I :
  - On les retrouve dans le disque de la galaxie.


M 101(Moulinet)


NGC 4565 (Aiguille)

OÙ VA-T-ON MADEMOISELLE ? DANS LES ÉTOILES TITANIC, LE FILM

- Les étoiles de population I :
  - On les retrouve dans le disque de la galaxie.
  - Dans les bras des
    - Parfois, adjacente
      à ces raies sombre
      on voit les éclats
      rougeâtres des
      nébuleuses en
      émission, témoin d
      la naissance récen
      d'étoiles massives


M 61

OÙ VA-T-ON MADEMOISELLE ?
DANS LES ÉTOILES TITANIC, LE FILM



ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Les étoiles de population I naissent des grands nuages moléculaires et de poussières cosmiques du disque galactique.
  - Ces nébuleuses sont sombres et froides
    - Leur densité varie de 10^{-6} particules • m^{-3} jusqu'à 10^4 molécules • cm^{-3}
    - $T^o < 100$ K



LDN 673
Luc Bellavance



ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- La ***gravité*** est le moteur de la formation des étoiles.

La gravité est l'une des quatre forces de la nature.

- La plus faible
- Mais sa portée est infinie
- À grande échelle, elle est la force dominante.



ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- La ***gravité*** est le moteur de la formation des étoiles.
  - Le principe est le suivant :

Imaginons un nuage interstellaire de gaz moléculaire et de poussières cosmiques dans un bras galactique



  - Ces nuages sont inhomogènes.



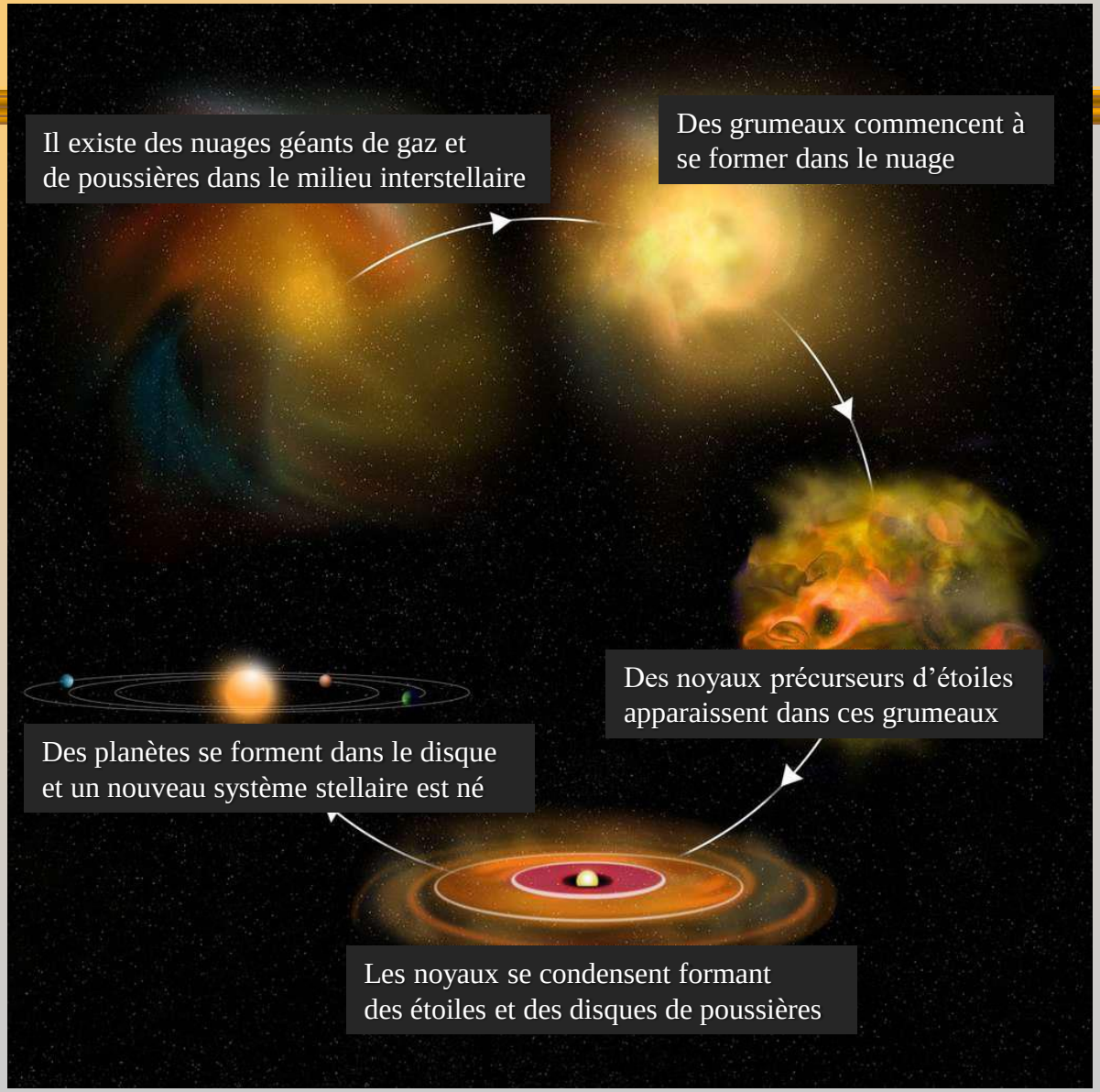
ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- La ***gravité*** est le moteur de la formation des étoiles.
  - L'hypothèse est la suivante :

Il se produit un ***effondrement gravitationnel*** du nuage qui engendre l'apparition d'étoiles nouvelles.



ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?



ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Cette hypothèse de la nébuleuse est ancienne.



Pour comprendre comment, dans la formation d'un système, le corps qui en est le centre d'attraction a dû devenir un corps en feu, tandis que les autres globes compris dans sa sphère d'activité sont restés des astres obscurs et froids, il suffit de se rappeler le mode de développement d'un monde, que nous avons longuement esquissé dans ce qui précède (…) [càd la formation des planètes et leur rotation à partir d'un nuage de poussières gravitaient autour de l'étoile.

Comme ces parties les plus légères et les plus subtiles sont en même temps les plus actives pour entretenir le feu, nous voyons que, grâce à leur adjonction, le corps central du système acquiert le privilège de devenir un globe enflammé, en un mot un Soleil.



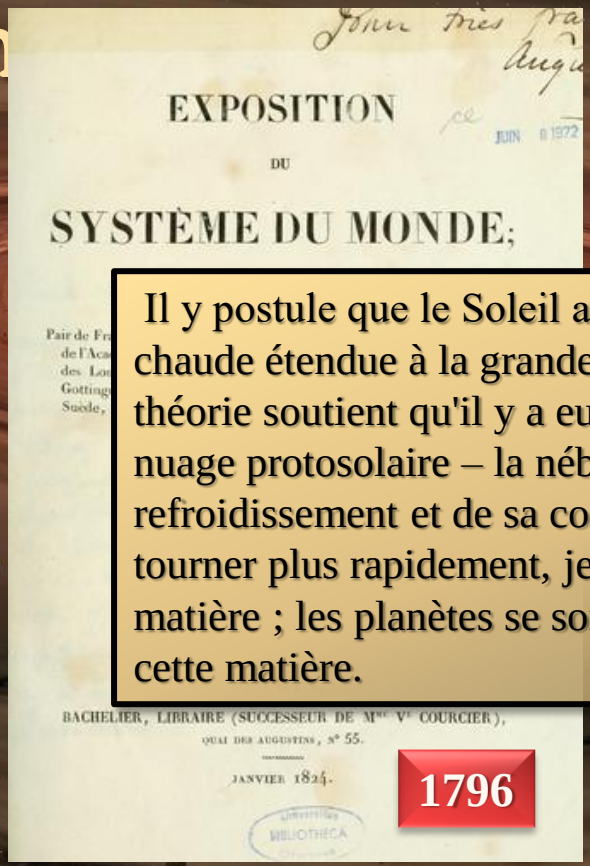
Kant

ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Cette hypothèse de la nébuleuse est ancien



Laplace



EXPOSITION

DU

SYSTÈME DU MONDE;

BACHELIER, LIBRAIRE (SUCCESSEUR DE Mme Ve COURCIER),

QUAI DES AUGUSTINS, N° 55.

JANVIER 1824.

1796

Il y postule que le Soleil avait, à l'origine, une atmosphère chaude étendue à la grandeur du volume du Système solaire. Sa théorie soutient qu'il y a eu contraction et refroidissement du nuage protosolaire – la nébuleuse protosolaire. Lors de son refroidissement et de sa contraction, il s'est aplati et s'est mis à tourner plus rapidement, jetant une série d'anneaux gazeux de matière ; les planètes se sont condensées et sont apparues de cette matière.

ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Cette hypothèse de la nébuleuse est ancienne.



Laplace



Kant

- On parle de l'hypothèse de Kant et Laplace.
- La recherche scientifique ultérieure a conforté les grandes lignes de cette hypothèse.

ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Selon cette hypothèse :
  - Des endroits d'hétérogénéité de la densité de matière dans des nuages moléculaires entraînent des effondrements gravitationnels responsables de la formation d'étoiles nouvelles.

$$\Delta\rho = \Delta m_{locale} / V_{unitaire}$$

IC 348
Télescope Spitzer

ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- L'⬆ "***accidentelle*** " de la densité locale peut être due à :
  - Collisions avec d'autres nuages dans notre galaxie en rotation ***différentiée***.

Un tour complet en 220 Ma avec un mouvement de précession et d'oscillation.



IC 348
Télescope Spitzer

ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- L'⬆ "*accidentelle* " de la densité locale peut être due à :
  - Collisions avec d'autres nuages dans notre galaxie en rotation ***différentiée***.
  - Explosions de supernovæ et ondes de choc.



IC 348
Télescope Spitzer

ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- L'⬆ "*accidentelle* " de la densité locale peut être due à :
  - Collisions avec d'autres nuages dans notre galaxie en rotation ***différentiée***.
  - Explosions de supernovæ et ondes de choc.
  - Souffle stellaire des étoiles naissantes.

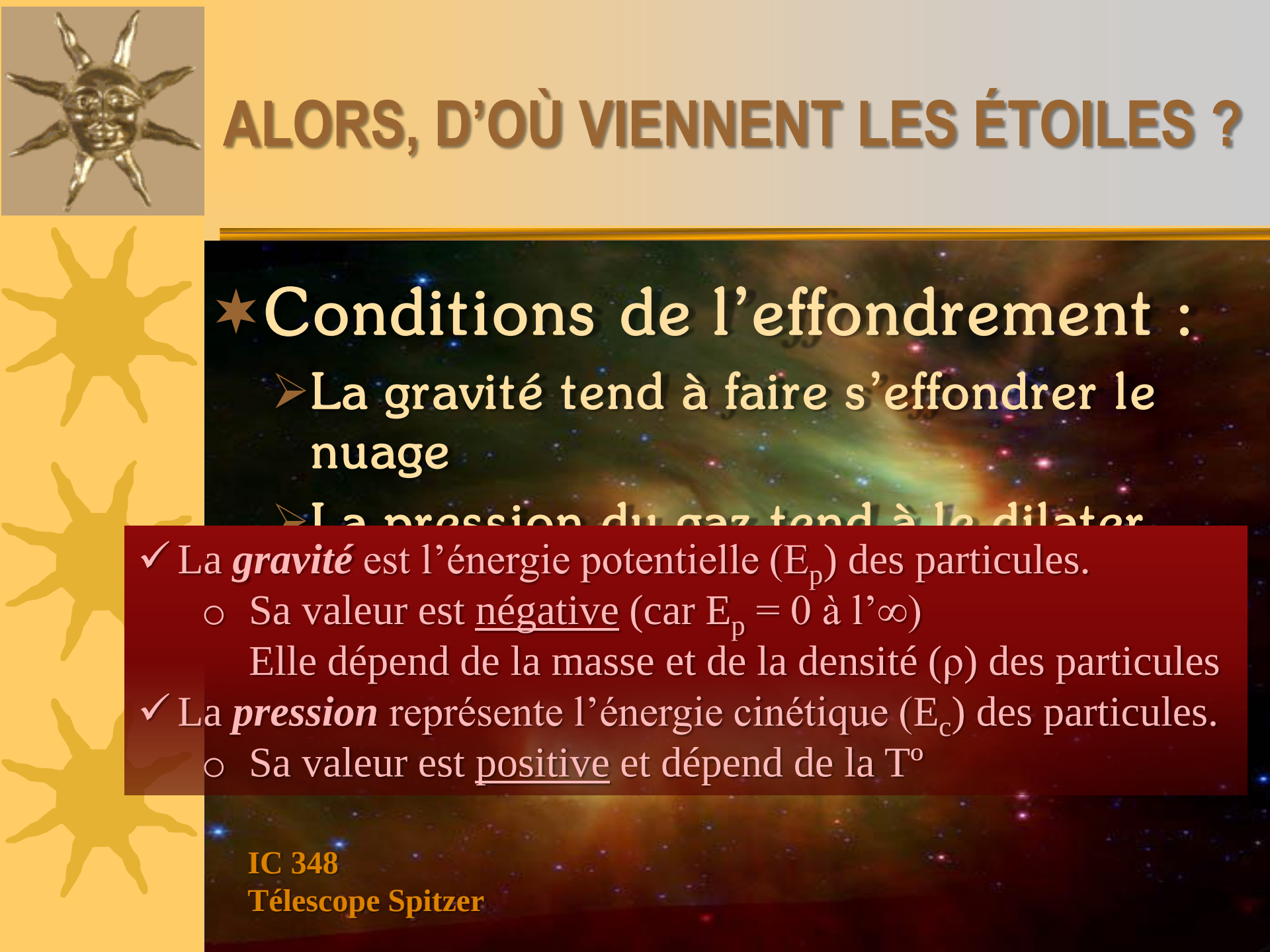
Éventuellement, tout nuage moléculaire géant développera ***inévitablement*** à quelque part des conditions de densité entraînant des effondrements gravitationnels.

IC 348
Télescope Spitzer

ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Conditions de l'effondrement :
  - La gravité tend à faire s'effondrer le nuage
  - La pression du gaz tend à le dilater

- ✓ La ***gravité*** est l'énergie potentielle (E_p) des particules.
  - Sa valeur est <u>négative</u> (car $E_p = 0$ à l'∞)
    Elle dépend de la masse et de la densité (ρ) des particules
- ✓ La ***pression*** représente l'énergie cinétique (E_c) des particules.
  - Sa valeur est <u>positive</u> et dépend de la T°

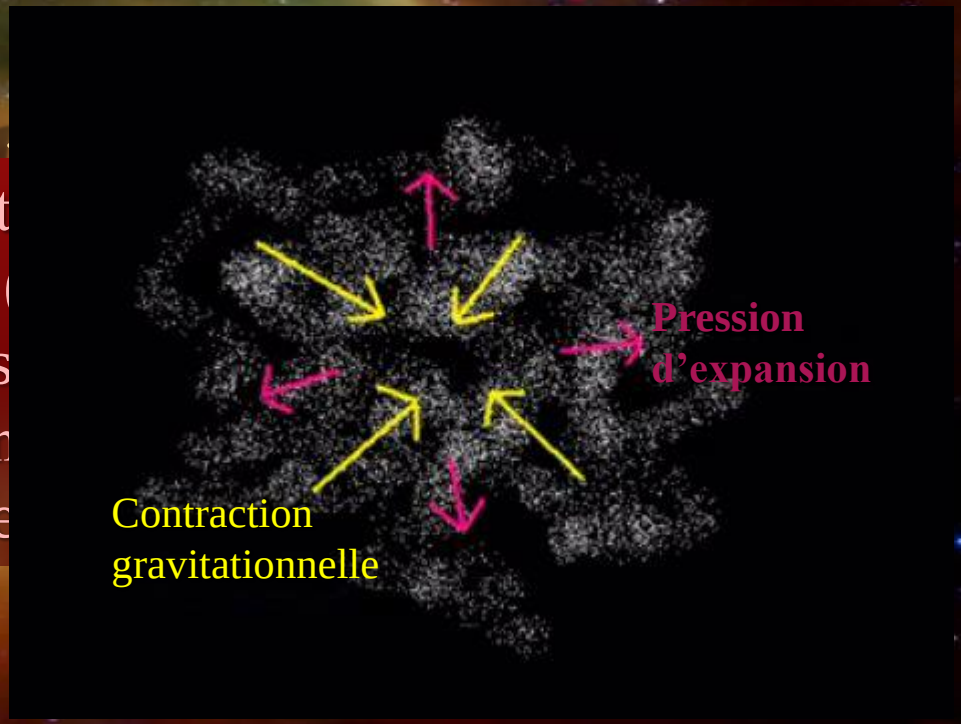


IC 348
Télescope Spitzer

ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Conditions de l'effondrement :
  - La gravité tend à faire s'effondrer le nuage
  - La pression d

- ✓ La ***gravité*** est l'énergie pot
  - Sa valeur est négative (
    Elle dépend de la mass
- ✓ La ***pression*** représente l'ér
  - Sa valeur est positive e



IC 348
Télescope Spitzer

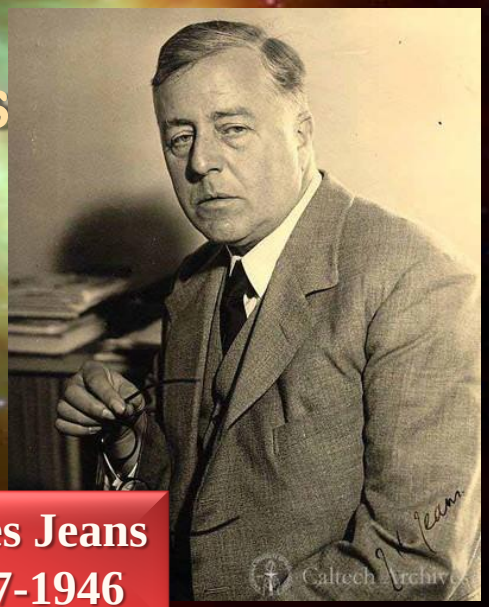
ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Conditions de l'effondrement :
  - Pour qu'il y ait contraction du nuage et formation d'étoiles, il faut $E_p > E_c$
  - C'est le critère de Jeans

$$M_j = \left(\frac{5kT}{G\mu m_H}\right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi\rho_n}\right)^{1/2}$$

1902

La Masse de Jeans (M_j) est la masse critique où Ep et Ec sont en équilibre l'une avec l'autre.



James Jeans
1877-1946

Lyman Spitzer

ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Conditions de l'effondrement :
  - Pour qu'il y ait contraction du nuage, il faut que des endroits de la masse du nuage (M_n) excède la M_j.
  - Soit :

$$M_n = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_n > M_j = \left(\frac{5kT}{G\mu m_H}\right)^{3/2}\left(\frac{3}{4\pi\rho_n}\right)^{1/2}$$

Où :

- ρ est la densité du nuage (m/V_u)
- μm_H est la masse moyenne des particules
- k est la constante de Boltzmann

IC 348
Télescope Spitzer

ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Conditions de l'effondrement :
  - Pour simplifier, en éliminant les constantes

$$M_j \propto \sqrt{\frac{T^3}{\rho}}$$

  - Si T° ⬇ , alors M_j ⬇
  - Si ρ ⬆ ,alors Mj ⬇
- Pour qu'un nuage interstellaire s'effondre, il faut une forte densité de particules et/ou une T° froide



ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Conditions de l'effondrement :
  - Mais il y a plus…

    Les calculs montrent que le rayon (R) de la sphère en effondrement est obligatoirement limité.
  - Rayon de Jeans : $\mathbf{R}_j = \frac{c_s}{\sqrt{G\rho}}$

    Où :
    - c_s est la vitesse du son
    - ρ est la densité



ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Conditions de l'effondrement :
  - Rayon de Jeans : $R_j = \frac{c_s}{\sqrt{G\rho}}$

    Lors de l'effondrement d'une grande portion d'un nuage moléculaire froid, la densité ρ ⬆ plus rapidement que la T°.
  - Il se crée des oscillations qui fragmentent le nuage qui se contracte en de multiples pôles d'effondrement individuels fabriquant autant de

ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Conditions de l'effondrement :
  - Ainsi, les étoiles naissent-elles en **essaims**.



ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Conditions de l'effondrement :
  - Ainsi, les étoiles naissent-elles en **essaims**.
  - Lorsque la nébuleuse se dissipe par
    e



Les Pléiades (**100** Ma)
Patrick Dubé



Amas double de Persée (**12** Ma)
Luc Bellavance



ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Conditions de l'effondrement :
  - En combien de temps le nuage s'effondre-t-il ?
    - Un nuage type a une masse de $\approx 10^5\ M_\odot$
    - Sa densité ρ est de 10^9 particules /m^3
    - Son rayon mesure $\approx$ 30 a.l.
  - On mesure le temps d'effondrement par le temps de chute libre

$$t_{cl} = \sqrt{\frac{R^3}{GM}} \simeq 1{,}5 \text{ Ma}$$

ALORS, D'OÙ VIENNENT LES ÉTOILES ?

- Conditions de l'effondrement :
  - En combien de temps le nuage s'effondre-t-il ?
  - On mesure le temps d'effondrement par le temps de chute libre pour le nuage complet.

$$t_{cl} = \sqrt{\frac{R^3}{GM}} \simeq 1{,}5 \text{ Ma}$$

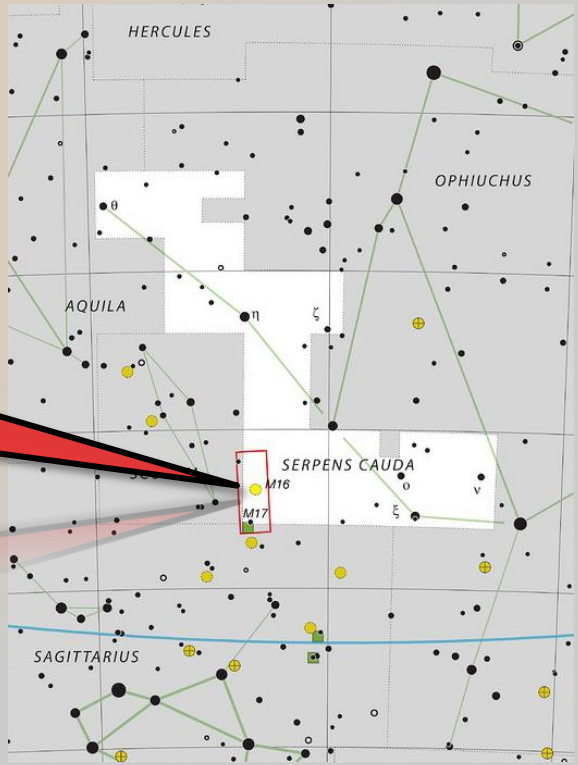
  - Mais pour une protoétoile d'une seule $M_\odot$

$$t_{cl} \simeq 140\,000 \text{ années}$$

LES POUPONNIÈRES D'ÉTOILES

- **Les lieux de l'effondrement :**
  - Les nuages moléculaires géants

Considérons la nébuleuse de l'Aigle M 16



LES POUPONNIÈRES D'ÉTOILES

- Les lieux de l'effondrement :
  - Les nuages moléculaires géants



M 16 (Nébuleuse de l'Aigle)
Luc Bellavance

LES POUPONNIÈRES D'ÉTOILES

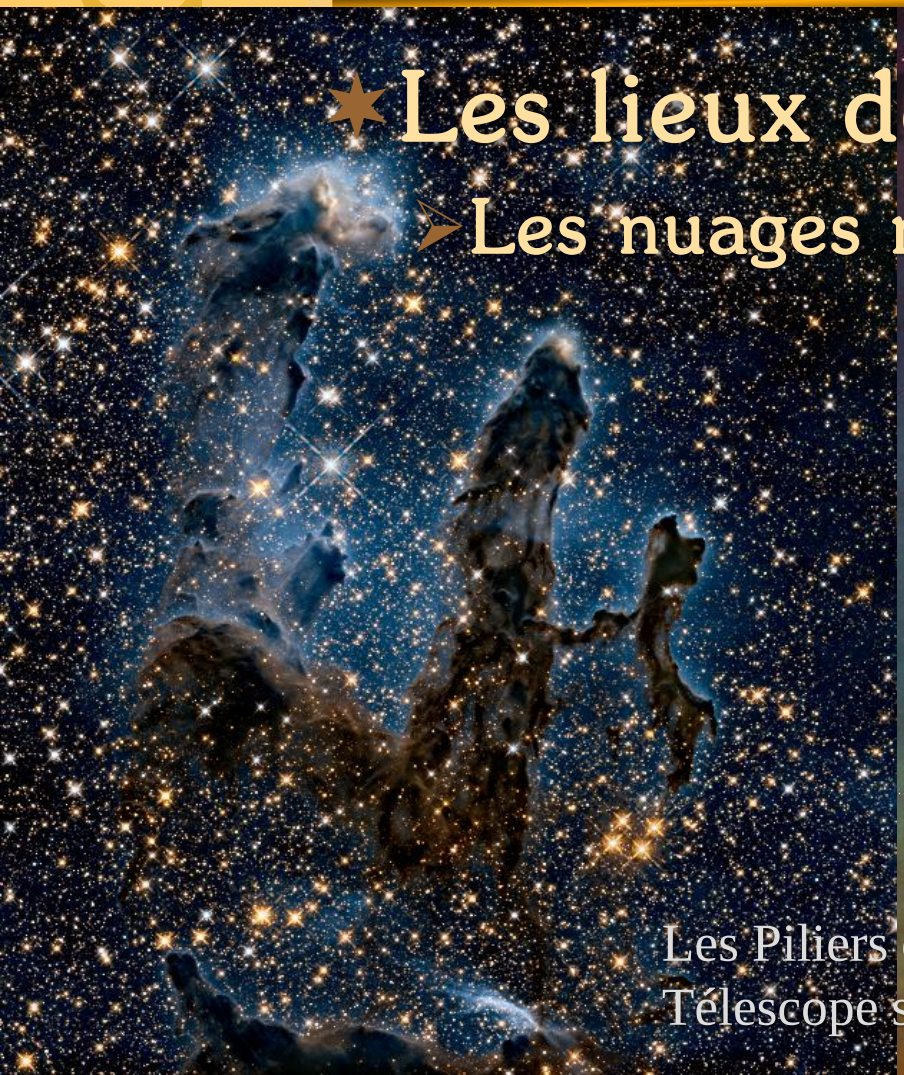
- Les lieux de l'effondrement :
  - Les nuages moléculaires géants

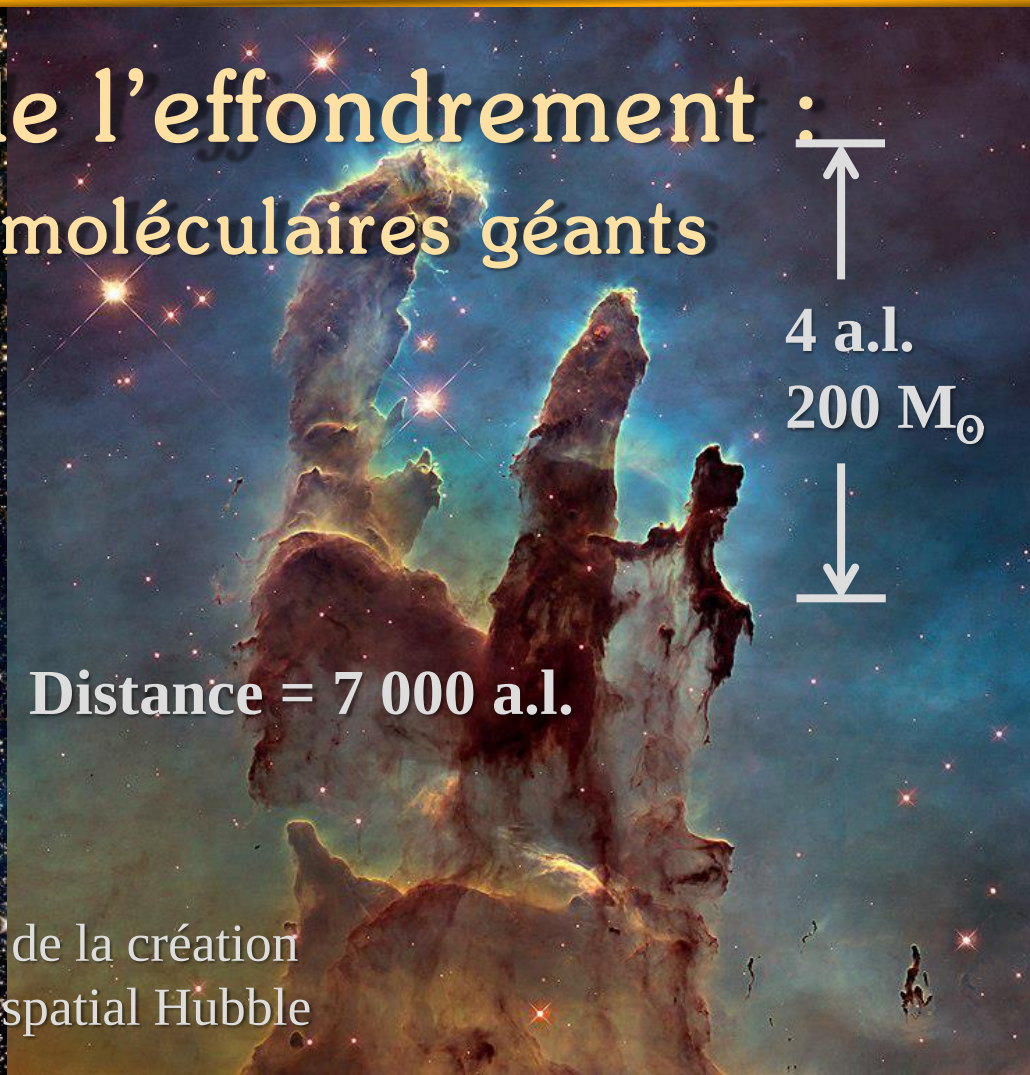


Les Piliers de la création
Télescope spatial Hubble

LES POUPONNIÈRES D'ÉTOILES

- Les lieux de l'effondrement :
  - Les nuages moléculaires géants





4 a.l.
200 $M_\odot$

Distance = 7 000 a.l.

Les Piliers de la création
Télescope spatial Hubble

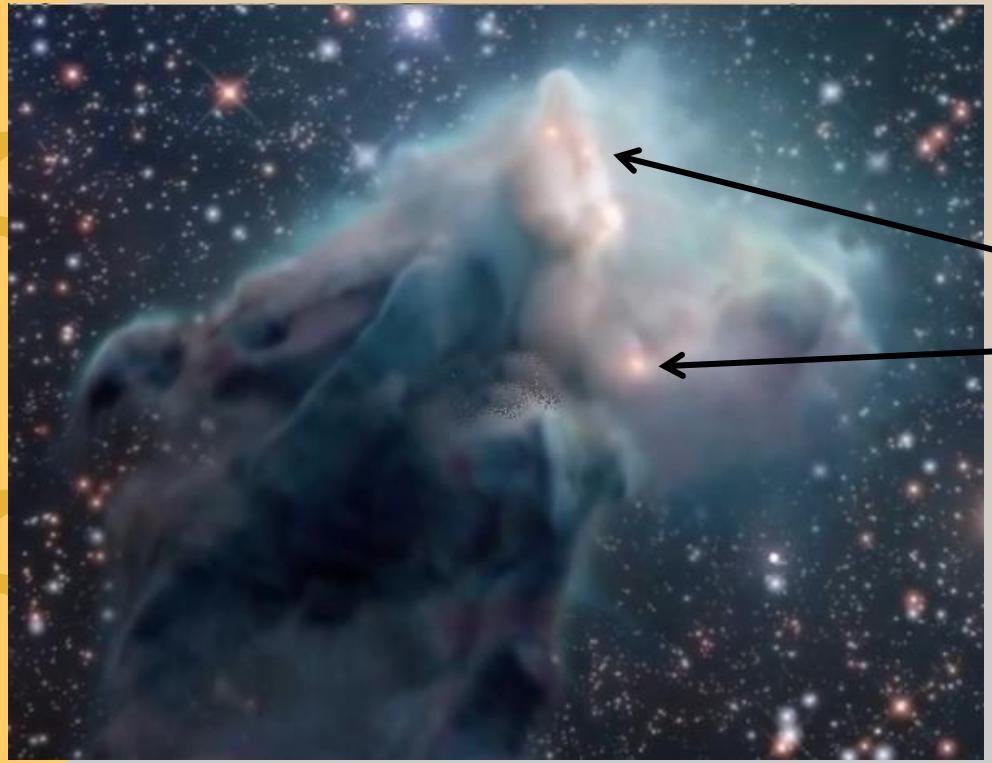
LES POUPONNIÈRES D'ÉTOILES

- Les lieux de l'effondrement :
  - Les nuages moléculaires géants



LES POUPONNIÈRES D'ÉTOILES

- Les lieux de l'effondrement :
  - Les nuages moléculaires géants



LES POUPONNIÈRES D'ÉTOILES

- **Les lieux de l'effondrement :**
  - **Les nuages moléculaires géants**



The Eagle Nebula Unveiled by the Spitzer/MIPSGAL Survey

Show affiliations

Flagey, Nicolas ; Carey, S. ; Boulanger, F. ; Compiegne, M. ; Noriega-Crespo, A. ; Paladini, R. ; Shenoy, S.

We report the discovery of structured diffuse infrared emission in MIPSGAL 24 microns Spitzer images of the Eagle Nebula that fills the wind-blown cavity of this massive star forming region. We combine the Spitzer data with ISO and MSX observations to present a spectral energy distribution of this emission and compare it to that of the famous Pillars of Creation. The SED peaks at 24 microns, tracing hotter dust than within the surrounding photo-dissociation regions (PDRs). We show that the emission from the Pillars of Creation is well reproduced by our dust model of PDRs powered by the NGC 6611 cluster radiation field while the inside shell requires an order of magnitude higher incident energy. We suggest several interpretations to explain such a discrepancy.

Publication:

Pub Date:

Bibcode: 2009AAS...21332401F

On pense aujourd'hui que ces Piliers de la création n'existent plus ; soufflés par une supernova il y a 6 000 ans.

LES POUPONNIÈRES D'ÉTOILES

- Les lieux de l'effondrement :
  - Les nuages moléculaires géants



LES POUPONNIÈRES D'ÉTOILES

- Les lieux de l'effondrement :
  - Les globules de Bok



Bart Bok
1906-1983

LES POUPONNIÈRES D'ÉTOILES

- Les lieux de l'effondrement :
  - Les globules de Bok
- Amas sombres et denses de poussières et de gaz d'une masse de 10 à 2 000 $M_{\odot}$ contenue dans un volume de ± 1 a.l. cube.



Bart Bok
1906-1983

IC 2944

LES POUPONNIÈRES D'ÉTOILES

- Les lieux de l'effondrement :
  - Les globules de Bok



  - Ils sont froids ≈ 3 à 10 K
  - Et denses ≈ 10^3 • cm^{-3}

LES POUPONNIÈRES D'ÉTOILES

- Les lieux de l'effondrement :
  - Les globules de Bok

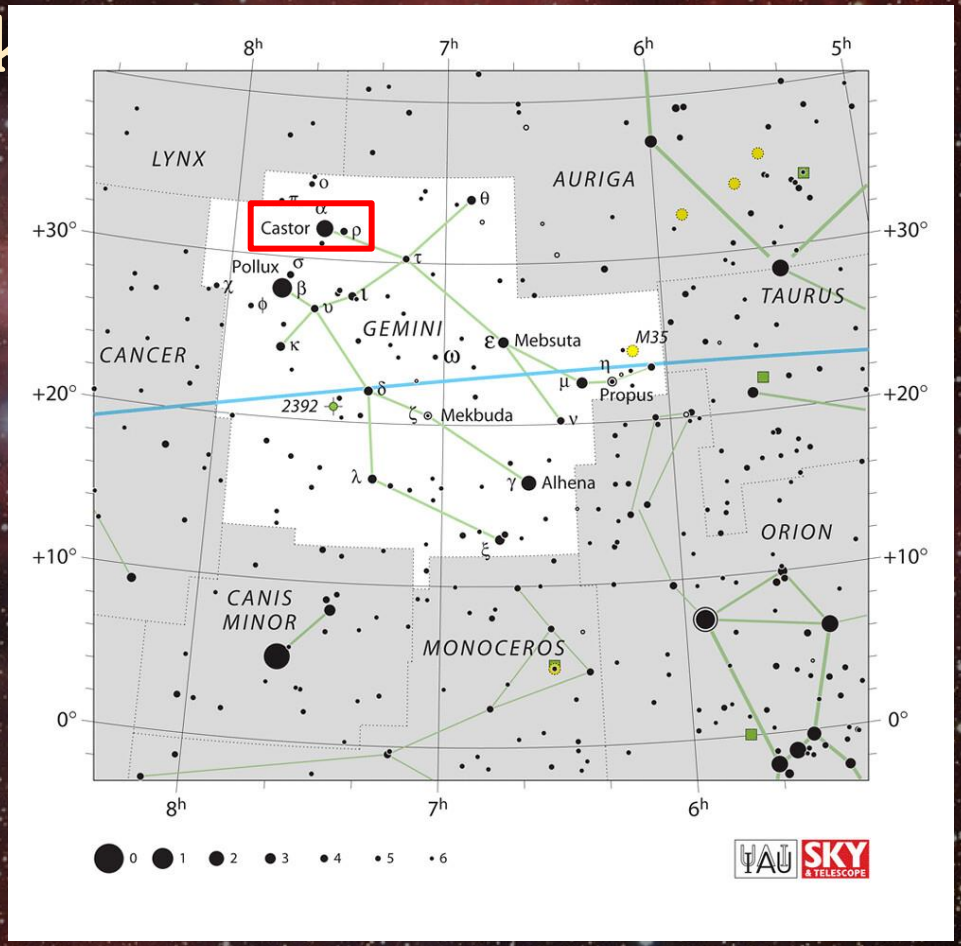
- Ils donnent souvent naissance à des systèmes d'**étoiles multiples**.



IC 2944

LES POUPONNIÈRES D'ÉTOILES

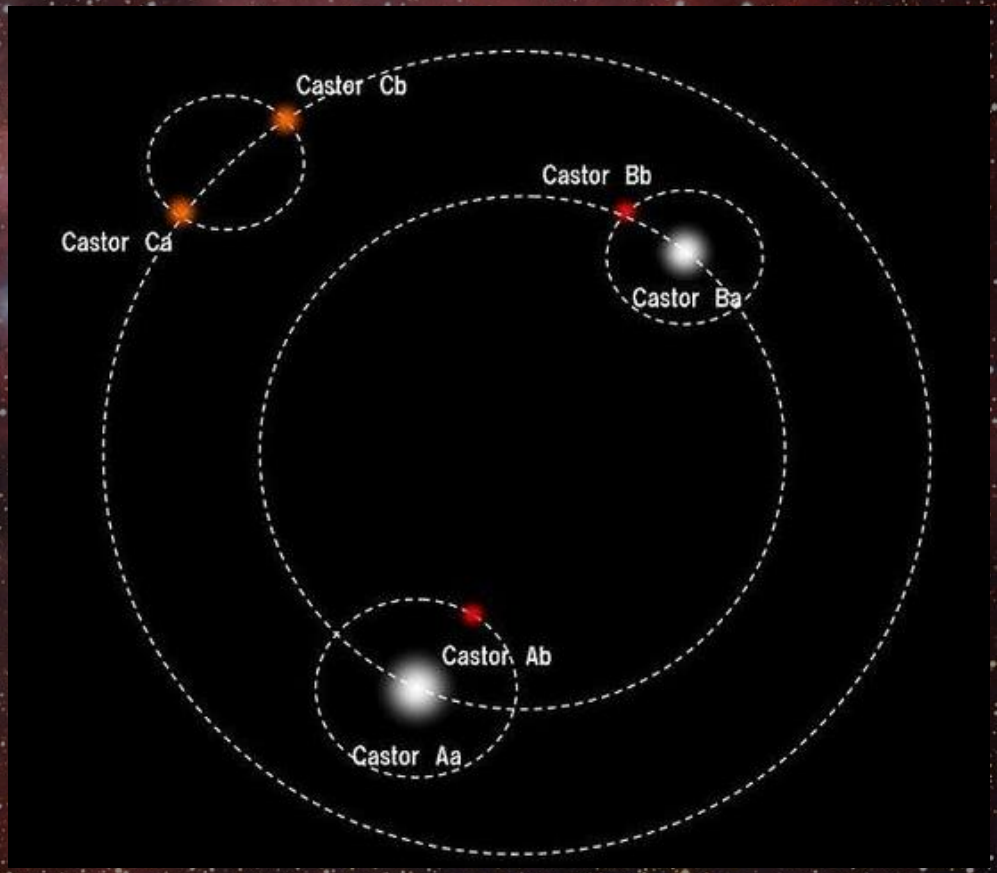
- Les lieux de l'effondrement :
  - Les globules de Bok
  - L'étoile **Castor** dans les Gémeaux



IC 2944

LES POUPONNIÈRES D'ÉTOILES

- Les lieux de l'effondrement :
  - Les globules de Bok
  - L'étoile Castor dans les Gémeaux
  - Est un système sextuple !
  - Toutes ces étoiles nées dans un espace restreint sont liées gravitationnelleme



IC 2944



SPLENDIDE EST TON LEVER DANS L'HORIZON DU CIEL, SOLEIL VIVANT, QUI VIT DEPUIS L'ORIGINE.

HYMNE AU SOLEIL, AKHÉNATON

✶Les conditions de formation de notre Soleil :

Étoile de population I

- ✓ Née d'un nuage moléculaire géant de plusieurs a.l. de diamètre.
- ✓ La nébuleuse protosolaire avait 20 000 U.A.
- ✓ Composée (masse) de :
  - ✓ 75 % $_1H$
  - ✓ 23 % $_2He$
  - ✓ 2 % « autres »

Elle possède des planètes telluriques
Indice de métallicité ➡ Z_0 = 0,01

Daniel Fournier



SPLENDIDE EST TON LEVER DANS L'HORIZON DU CIEL,
SOLEIL VIVANT, QUI VIT DEPUIS L'ORIGINE.

HYMNE AU SOLEIL, AKHÉNATON

Les conditions de formation de notre Soleil :

Étoile de population I

- ✓ L'effondrement de la nébuleuse protosolaire a été causée par l'explosion à proximité de supernovae.
  - ✓ Isotopes $^{60}_{26}Fe$ et $^{26}_{13}Al$ dans des météorites
- ✓ Né il y a 4,55 Ga, au sein d'un amas épars, le Soleil est une étoile solitaire.
- ✓ Durée de l'effondrement de la nébuleuse = 140 000 ans.

TU RAYONNES, DISQUE SOLAIRE

AKHÉNATON

- Étoile solitaire, notre Soleil est probablement né au sein d'un amas secondaire dans une nébuleuse résiduelle émiettée ressemblant à des parties denses de la nébuleuse d'Orion.



Daniel Fournier

Copyright Daniel Fournier

VOYAGE AU SEIN D'UNE NÉBULEUSE…





MESSAGES CLÉS

- La métaphore sied bien, les étoiles naissent, vivent et meurent.
- Les étoiles naissent par l'effondrement gravitationnel d'un nuage interstellaire de gaz moléculaire avec/sans poussières cosmiques.
- Trois facteurs favorisent l'effondrement du nuage :
  - Une grande masse
  - Une forte densité (masse par unité de volume). Cette densité étant relative aux densité du milieu interstellaire.
  - Une température basse, inférieure à 100 K.
- La relation entre la masse, la densité et la température est formulée mathématiquement par le critère de Jeans.



MESSAGES CLÉS

- Un vaste nuage interstellaire qui s'effondre se fragmente inévitablement en ultimes unités de base appelées nébuleuses protostellaires (prédit par la longueur de Jeans).
- En raison de cette fragmentation du nuage interstellaire, les étoiles naissent en essaims qui varient de quelques étoiles à des milliers d'étoiles sœurs. Ces regroupements deviendront les amas ouverts d'étoiles qui parsèment le disque des galaxies.
- De la nébuleuse protostellaire naît une étoile accompagnée ou non d'un cortège de planètes et autres objets cosmiques dépendants.



MESSAGES CLÉS

- Les premières étoiles (Population III) de l'Univers n'étaient constituées que d'Hydrogène et d'Hélium formés par la nucléosynthèse primordiale après le Big Bang.
- Ces premières étoiles étaient massives et éphémères. En mourant dans l'apothéose d'une supernova, elles ont enrichi et ensemencé le milieu interstellaire d'une myriade d'éléments chimiques nouveaux produits en leur cœur (nucléosynthèse stellaire). Ces éléments chimiques naturels forment le tableau de Mendeleïev.



MESSAGES CLÉS

- Actuellement, les étoiles naissantes (Population I) ont des taux de métallicité avoisinant le 2% de sorte que la nébuleuse protostellaire contient tous les éléments chimiques pour former des planètes telluriques.
- S'il existe dans un nuage moléculaire des zones hyperconcentrées (de forte densité) et très froides (3-5 K), la fragmentation donne lieu à une concentration accentuée de nébuleuses protostellaires et à la naissance d'étoiles multiples (≥ 3) liées par la gravité. C'est ainsi qu'elles évolueront par la suite dans l'espace galactique.



QUELQUES RÉFÉRENCES

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

- Les premières étoiles de l'Univers
  N Laporte et al.
  https://academic.oup.com/mnras/article/505/3/3336/6301992?login=true#

- Wikipédia :
  - Naissance des étoiles
    https://fr.wikipedia.org/wiki/Naissance_des_%C3%A9toiles



QUELQUES RÉFÉRENCES

- Wikipédia :
  - Instabilité gravitationnelle https://fr.wikipedia.org/wiki/Instabilit%C3%A9_gravitationnelle
  - Effondrement gravitationnel https://fr.wikipedia.org/wiki/Effondrement_gravitationnel
  - Formation et évolution du Système solaire https://fr.wikipedia.org/wiki/Formation_et_%C3%A9volution_du_Syst%C3%A8me_solaire
- Masse de Jeans https://astronomia.fr/4eme_partie/details_html/masseDeJeans.php