LA CAPSULE DU DÉBUTANT

Les étoiles (2)

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

LES OBJECTIFS

- Au terme de cette présentation, le participant pourra :
  - Raconter pas à pas l'évolution de la nébuleuse protostellaire jusqu'à la naissance de l'étoile nouvelle.
  - Décrire le passage de la région centrale de la nébuleuse d'une structure amorphe à la différentiation en étoile mature.
  - Expliquer les différentes formes successives d'énergie impliquées dans l'organisation de l'étoile.
  - Énoncer les caractéristiques des étoiles immatures.

POUR NOUS RAPPELER CE QUE NOUS VÎMES DANS LA PREMIÈRE PARTIE…

- Nous utiliserons l'exemple de la nébuleuse de la Tarentule.

Télescope James Webb
Septembre 2022

POUR NOUS RAPPELER CE QUE NOUS VÎMES DANS LA PREMIÈRE PARTIE…

- Nous utiliserons l'exemple de la nébuleuse de la Tarentule.
  - Grand Nuage de Magellan dans la constellation de la Dorade (hémisphère sud).
  - 170 000 a.l.
  - Diamètre : 1 480 a.l.
  - m=5 visible à l'œil nu par ciel noir.

POUR NOUS RAPPELER CE QUE NOUS VÎMES DANS LA PREMIÈRE PARTIE…

- Nous utiliserons l'exemple de la nébuleuse de la Tarentule.
  - La plus grande nébuleuse gazeuse connue.
  - Si elle était située à la même distance que la nébuleuse d'Orion, elle couvrirait l'entière constellation de la Grande Ourse…

POUR NOUS RAPPELER CE QUE NOUS VÎMES DANS LA PREMIÈRE PARTIE…

- Nous utiliserons l'exemple de la nébuleuse de la Tarentule.

Distance : 1350 a.l.
Diamètre : 12 a.l.

s grande nébuleuse gazeuse connue.

Elle était située à la même distance que la nébuleuse d'Orion, elle couvrirait l'entière constellation de la Grande Ourse…

POUR NOUS RAPPELER CE QUE NOUS VÎMES DANS LA PREMIÈRE PARTIE…

- Nous utiliserons l'exemple de la nébuleuse de la Tarentule.
  - Elle est le siège d'une intense formation d'étoiles.
  - Les étoiles naissent par l'effondrement gravitationnel d'un nuage interstellaire de gaz moléculaire avec/sans poussières cosmiques.
  - Quatre facteurs favorisent l'effondrement du nuage :
    1. Une *perturbation* gravitationnelle.
    2. Une grande masse.
    3. Une forte densité (masse par unité de volume). Cette densité étant relative aux densité du milieu interstellaire.
    4. Une température basse, inférieure à 100 K.

POUR NOUS RAPPELER CE QUE NOUS VÎMES DANS LA PREMIÈRE PARTIE…

- Nous utiliserons l'exemple de la nébuleuse de la Tarentule.
  - 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 unes à des milliers d'étoiles sœurs.
  - Ces regroupements deviendront les *amas ouverts* d'étoiles qui parsèment le disque des galaxies.

POUR NOUS RAPPELER CE QUE NOUS VÎMES DANS LA PREMIÈRE PARTIE…

POUR NOUS RAPPELER CE QUE NOUS VÎMES DANS LA PREMIÈRE PARTIE…

- Nous utiliserons l'exemple de la nébuleuse de la Tarentule.
  - De la *nébuleuse protostellaire* naît une étoile accompagnée ou non d'un cortège de planètes et autres objets cosmiques qui en dépendent gravitationnellement.

LE PRINCIPE PREMIER : LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE

- Petite page d'histoire : parenté de la notion de nébuleuse protosolaire
  - Emmanuel Kant (1755)

Kant

Laplace

  - Pierre-Simon de Laplace (1796)

Hypothèse Kant-Laplace

LE PRINCIPE PREMIER : LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE

- La nébuleuse protostellaire en rotation assure deux aboutissements anticipés :
  1. L'évolution vers une forme discoïdale.
  2. L'échauffement de sa région centrale.

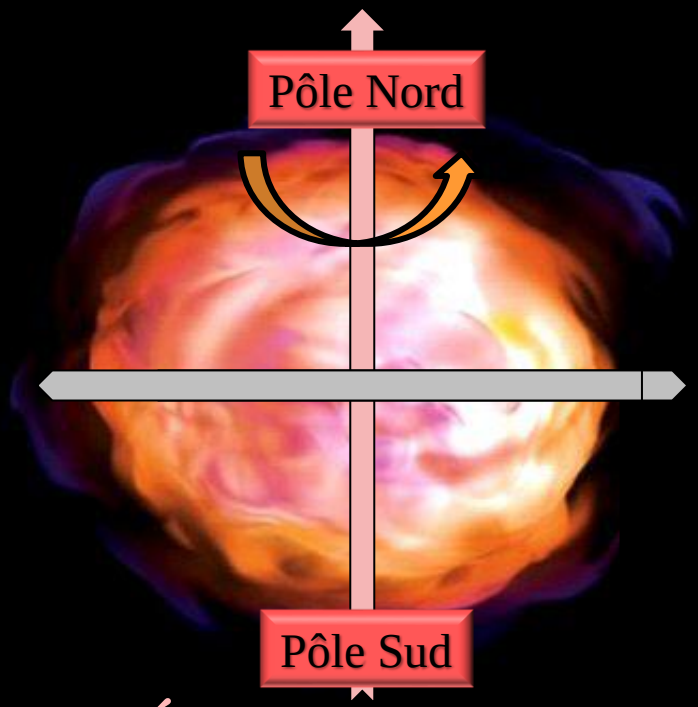
LE PRINCIPE PREMIER : LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE

Une nébuleuse protostellaire enrichie de molécules et de poussières qui se contracte par gravité.

1. L'évolution vers une forme discoïdale

- Étendue : 1000 U.A.
- Masse : 2 à 3 $M_\odot$
- Très froide
- Contient 1 à 2% de « métaux »

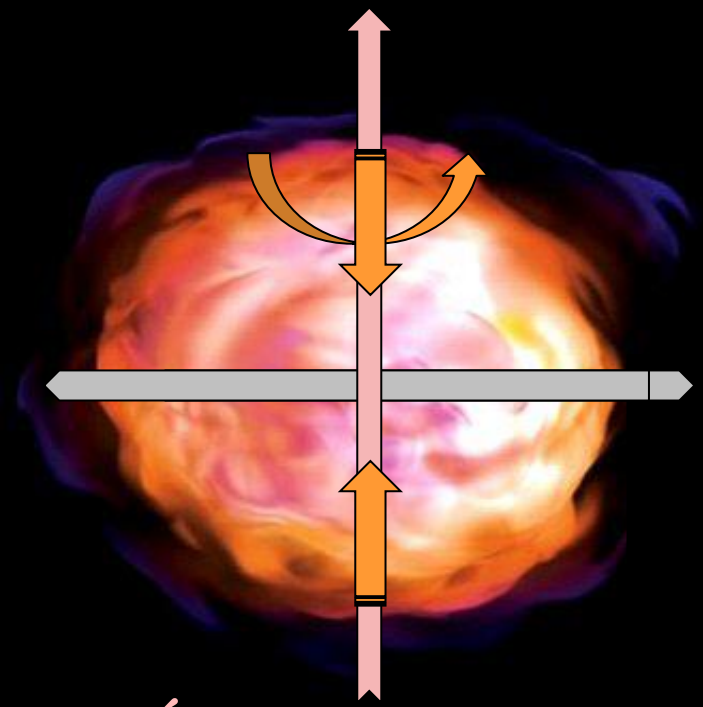
LE PRINCIPE PREMIER : LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE



- Cette nébuleuse est en rotation.
- On peut y définir un axe autour duquel la nébuleuse tourne.
- Déterminant des pôles.
- Ainsi qu'un équateur.

- Étendue : 1000 U.A.
- Masse : 2 à 3 $M_\odot$
- Très froide
- Contient 1 à 2% de « métaux »

LE PRINCIPE PREMIER : LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE



- On conçoit que la vitesse d'effondrement est maximale aux pôles.
- À l'équateur, l'effondrement peut être positif, neutre ou négatif en raison de l'effet centrifuge.

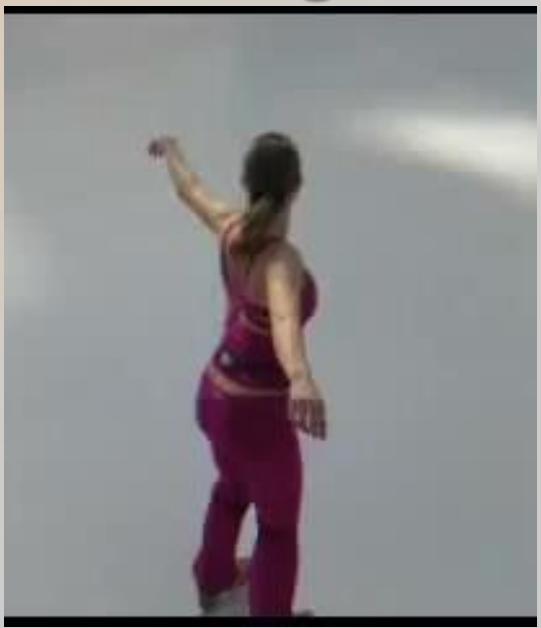
- Étendue : 1000 U.A.
- Masse : 2 à 3 $M_\odot$
- Très froide
- Contient 1 à 2% de « métaux »

LE PRINCIPE PREMIER : LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE

- Un principe physique s'applique : La conservation du moment angulaire
  - Le moment angulaire est une grandeur vectorielle utilisée pour décrire l'état général de rotation d'un système.

$$\overrightarrow{L_o} = \sum_i \overrightarrow{OM_i} \wedge \vec{p}$$

  - À quantité de mouvement constante, la vitesse de rotation ⬆ si le rayon ⬇.



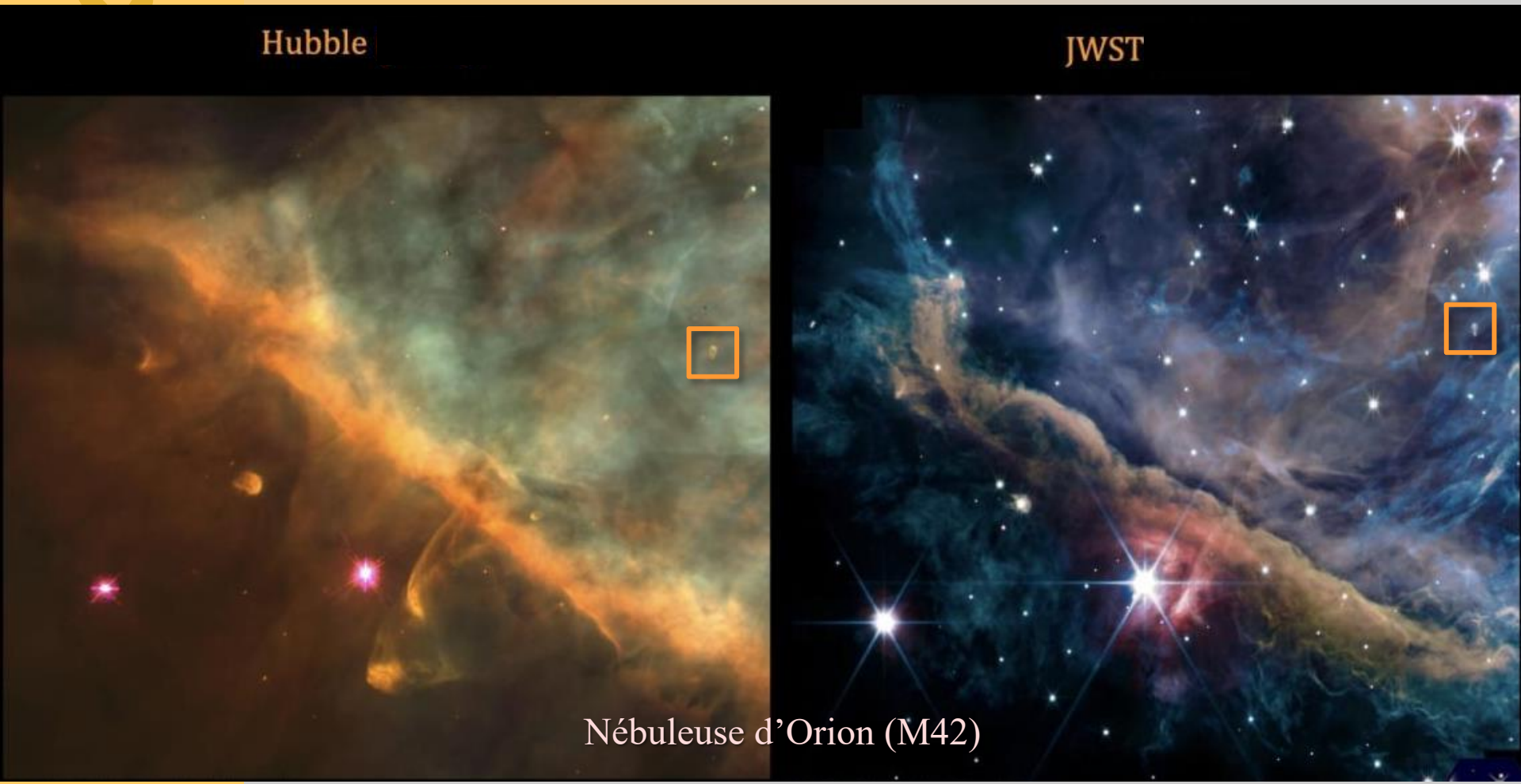
LE PRINCIPE PREMIER : LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE

Une nébuleuse protostellaire enrichie de molécules et de poussières qui se contracte par gravité.

Le disque protoplanétaire

LE PRINCIPE SECOND :
LE DISQUE PROTOSTELLAIRE

LE PRINCIPE SECOND :
LE DISQUE PROTOSTELLAIRE



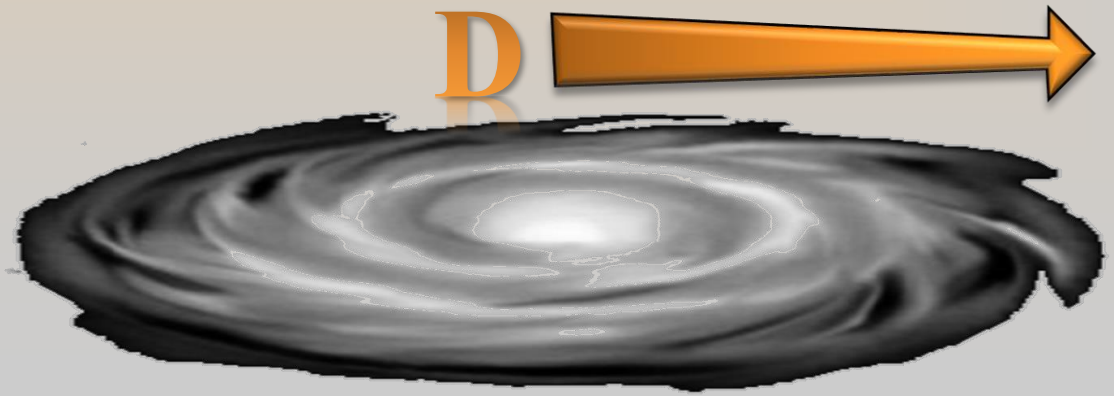
Nébuleuse d'Orion (M42)

LE PRINCIPE SECOND :
LE DISQUE PROTOSTELLAIRE

- Ce n'est pas une vue de l'esprit…

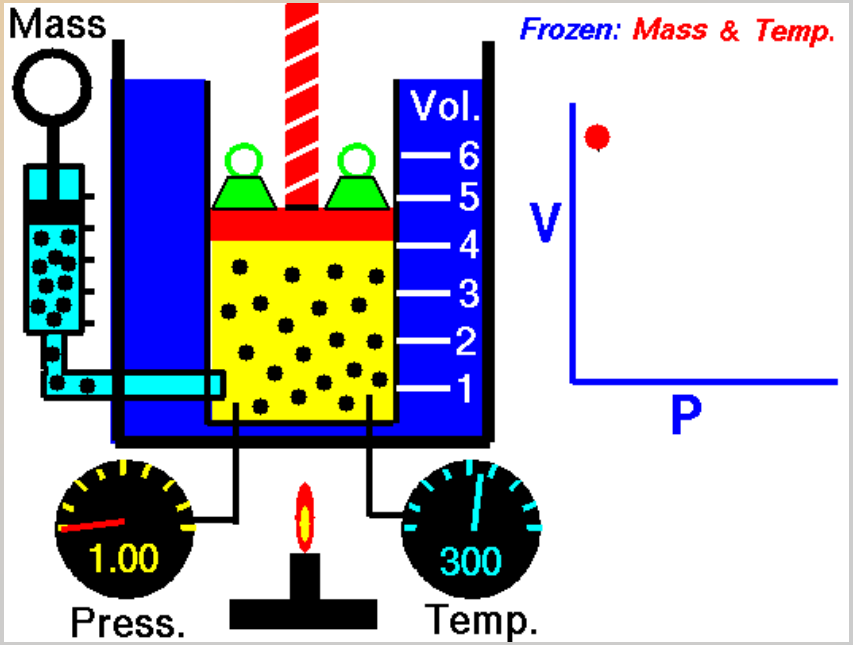
UN PEU DE PHYSIQUE

- À masse constante, l'effondrement gravitationnel de la nébuleuse s'accompagne d'une augmentation de la **densité** de matière.
- La densité montre un gradient décroissant du centre vers la périphérie du disque.



UN PEU DE PHYSIQUE

- Qu'arrive-t-il lorsqu'un volume de gaz de masse constante se contracte ?
  - La pression interne ⬆ en fonction de la densité.



Loi de Boyle-Mariotte

$$P \propto \frac{1}{V}$$

ou

$$PV=k$$

UN PEU DE PHYSIQUE

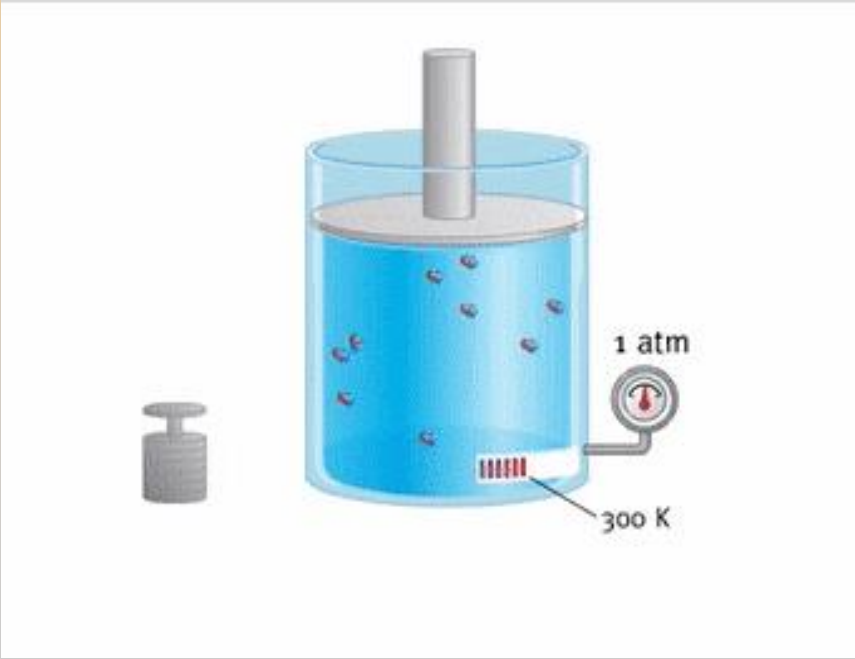
- Qu'arrive-t-il dans un gaz lorsque la pression ⬆ à masse constante ?
  - La température interne ⬆.

Loi de Gay-Lussac

$$P \propto T$$

ou

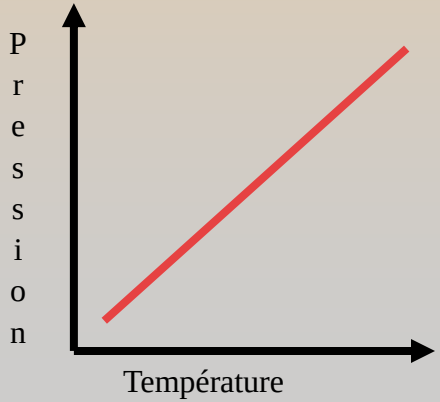
$$\frac{P}{T} = k$$



UN PEU DE PHYSIQUE

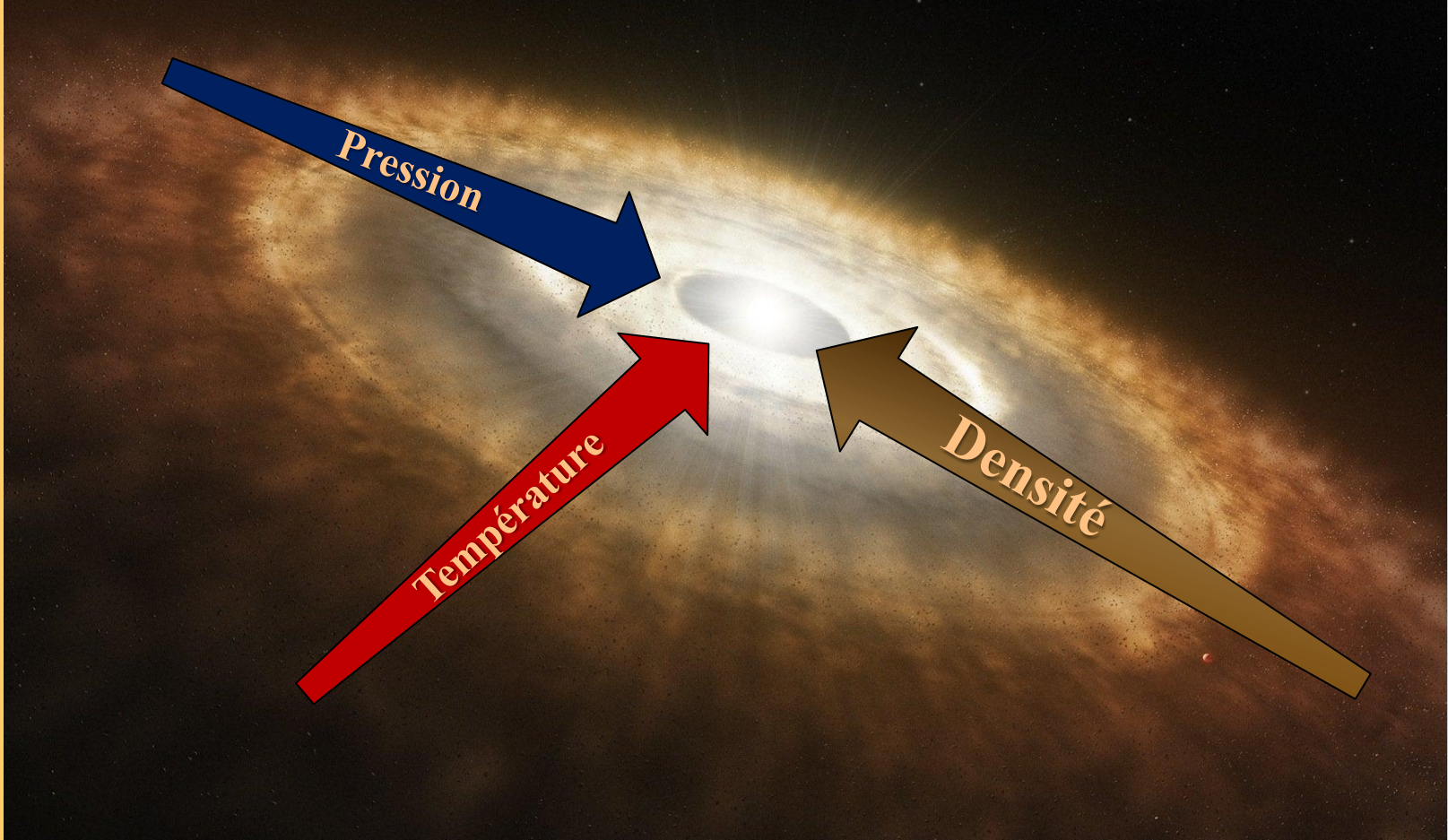
- Qu'arrive-t-il dans un gaz lorsque la pression ⬆ à masse constante ?
  - La température interne ⬆.

Loi de Gay-Lussac



UN PEU DE PHYSIQUE

- La différentiation du disque protoplanétaire



UN PEU DE PHYSIQUE

- La différentiation du disque protoplanétaire

Aujourd'hui, nous ne parlerons que de l'étoile

UN PEU DE PHYSIQUE

- La matière qui "*tombe*" sur le centre de la nébuleuse perd de l'énergie potentielle…

$$E_{pg} = mg\Delta y$$

- …et gagne tout autant en l'énergie cinétique.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

C'est la loi de conservation de l'énergie (1er principe de la thermodynamique).

UN PEU DE PHYSIQUE

- Dans un gaz, $E_c \propto$ Vitesse^2 des atomes et/ou des molécules.

$$E_c \propto v^2$$

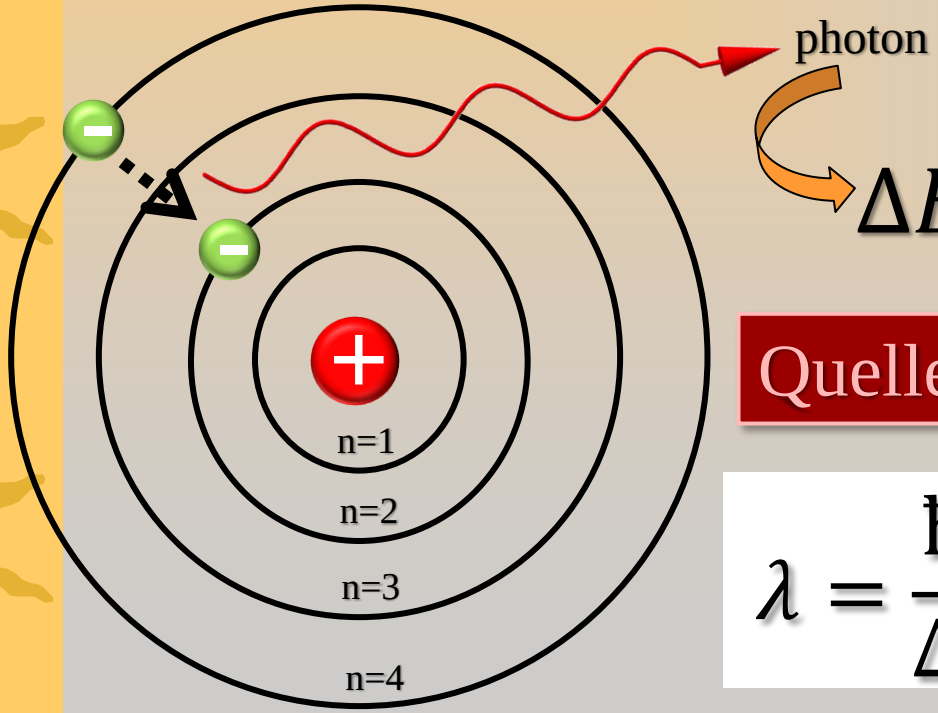
- Or, la Température mesure l'agitation des particules.
  - Dans le cas d'un gaz, cette agitation représente la **vitesse** des atomes et des molécules.

UN PEU DE PHYSIQUE

- L'⬆ de la densité et de la température ⬆les collisions entre les particules.
- Ces collisions de hautes énergies excitent les électrons qui, en revenant à des niveaux inférieurs, émettent des photons de λ variées.

VOIR ➡ *LA STRUCTURE DE LA MATIÈRE_PARTIE 2*

- L'atome et les couches électroniques :
  - L'atome d'hydrogène $^{1}_{1}H$ (modèle de Bohr)



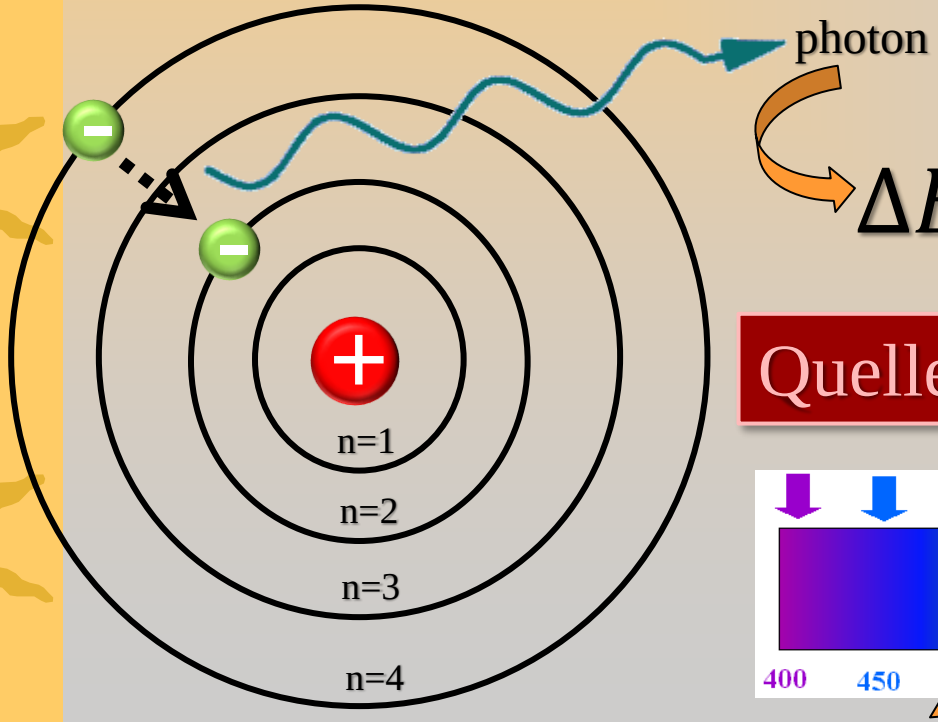
$$\Delta E = \hbar \frac{c}{\lambda} = 2{,}54 \text{ eV}$$

Quelle est la λ du photon ?

$$\lambda = \frac{\hbar c}{\Delta E}$$ = **486** nm

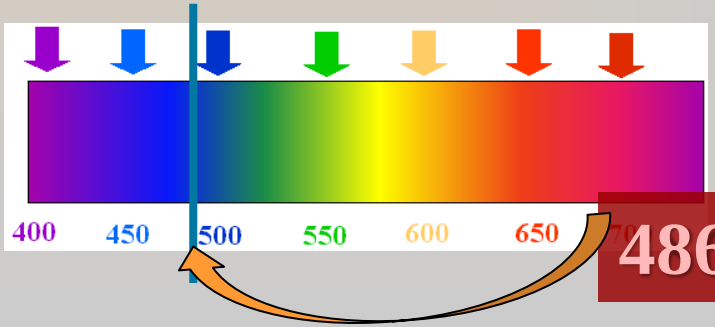
VOIR ➡ *LA STRUCTURE DE LA MATIÈRE_PARTIE 2*

- L'atome et les couches électroniques :
  - L'atome d'hydrogène $^{1}_{1}H$ (modèle de Bohr)



$$\Delta E = \hbar \frac{c}{\lambda} = 2{,}54 \text{ eV}$$

Quelle est la λ du photon ?



486 nm

UN PEU DE PHYSIQUE

- L'⬆ de la densité et de la température ⬆ les collisions entre les particules.
  - Ces collisions de hautes énergies excitent les électrons qui, en revenant à des niveaux inférieurs émettent des photons de λ variées.
    - Au début, les photons sont surtout du domaine infrarouge (le nuage initial est ultra froid).
    - Puis des photons plus énergétiques du domaine visible sont émis…

UN PEU DE PHYSIQUE

- Le centre de la nébuleuse s'illumine désormais d'énergie électro-magnétique.

Une protoétoile apparaît…

- Au début, elle est peu visible, noyée au sein de la poussière dense de la nébuleuse.

LE PRINCIPE TERTIAIRE : LA PROTOÉTOILE

- Ce n'est pas une vue de l'esprit…

LE PRINCIPE TERTIAIRE : LA PROTOÉTOILE

LE PRINCIPE TERTIAIRE : LA PROTOÉTOILE

ue de l'esprit…

Atria

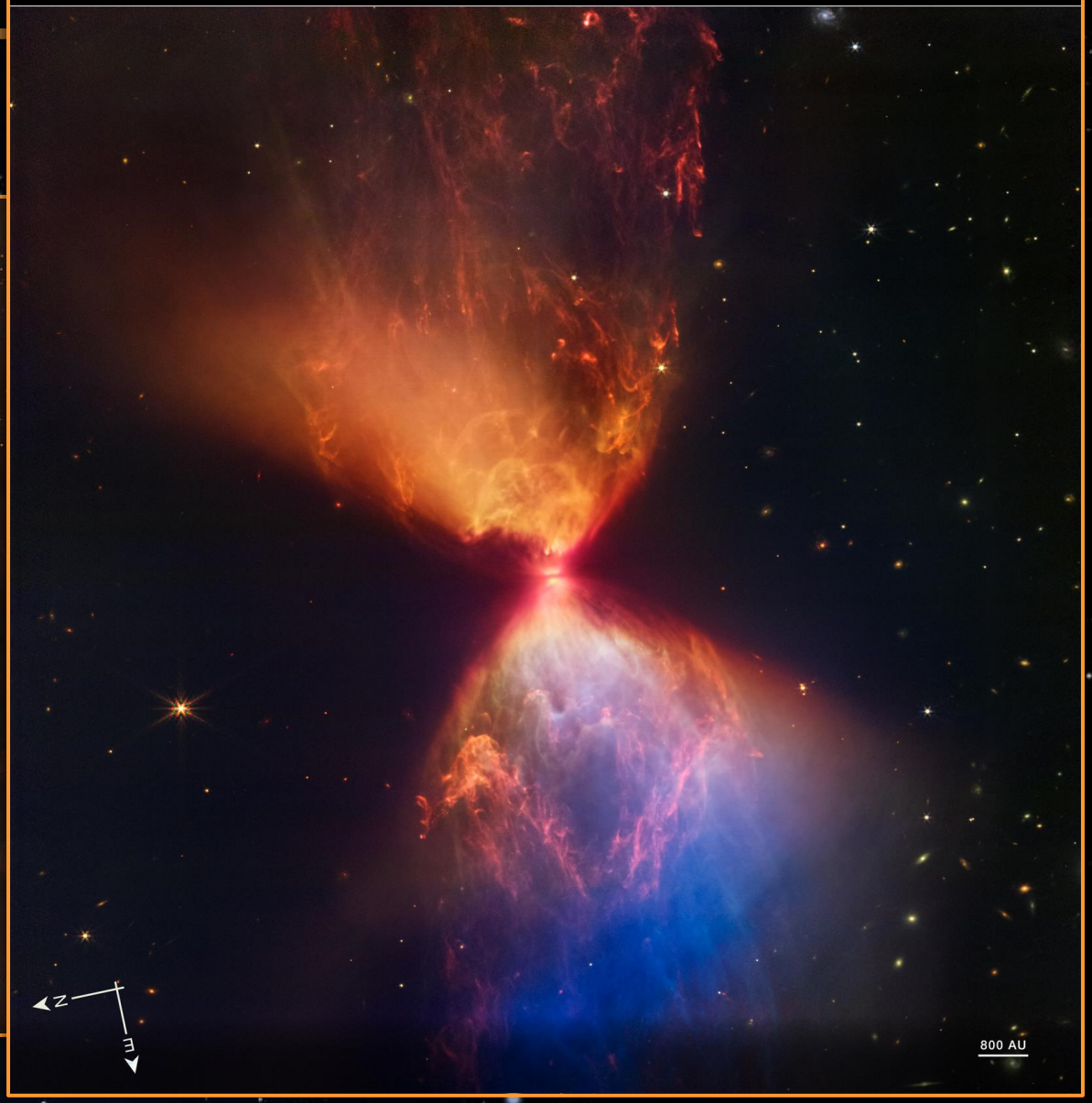
LE PRINCIPE TERTIAIRE : LA PROTOÉTOILE

★Ce n'est pas une vue de l'esprit…

LE PRINC
LA PROT

JAMES WEBB SPACE TELESCOPE

L1527 IRS | IRAS 04368+2557

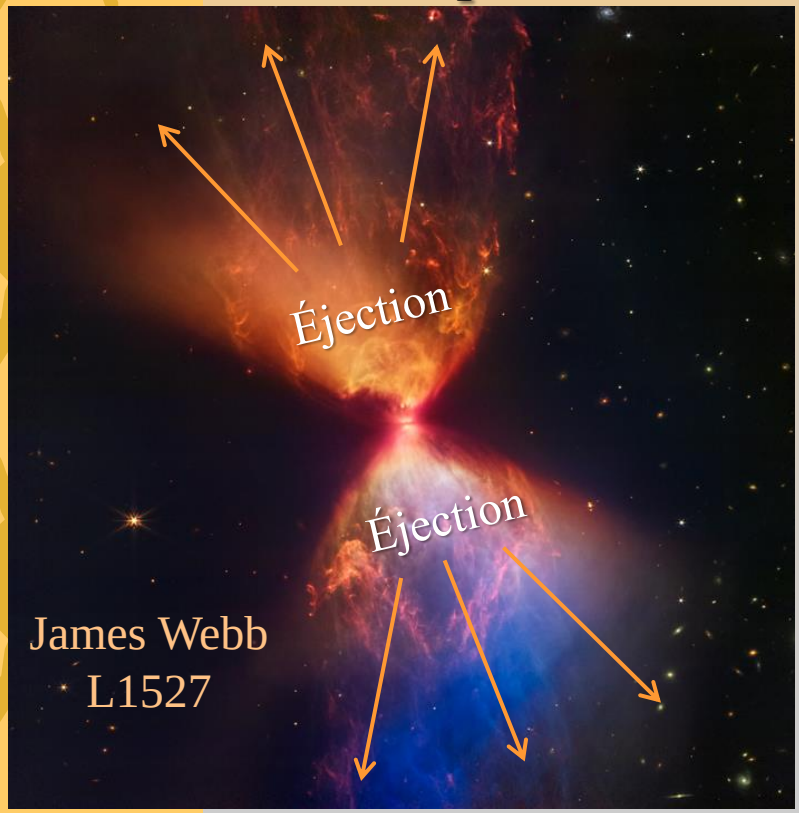


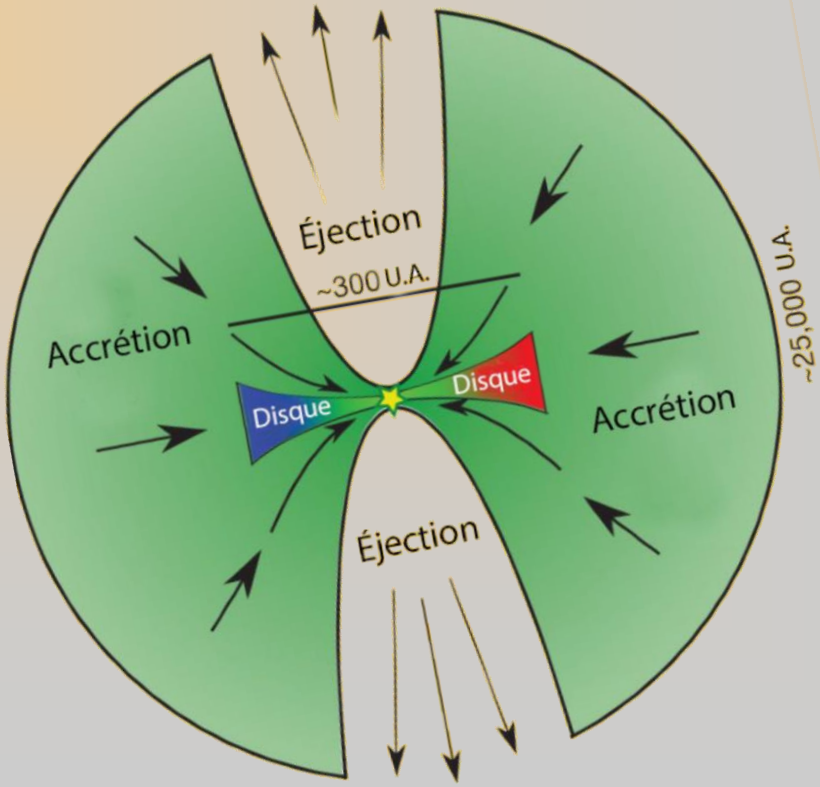
LE PRINCIPE TERTIAIRE : LA PROTOÉTOILE

- Vous avez sûrement remarqué l'aspect conique des zones lumineuses…

LE PRINCIPE TERTIAIRE : LA PROTOÉTOILE

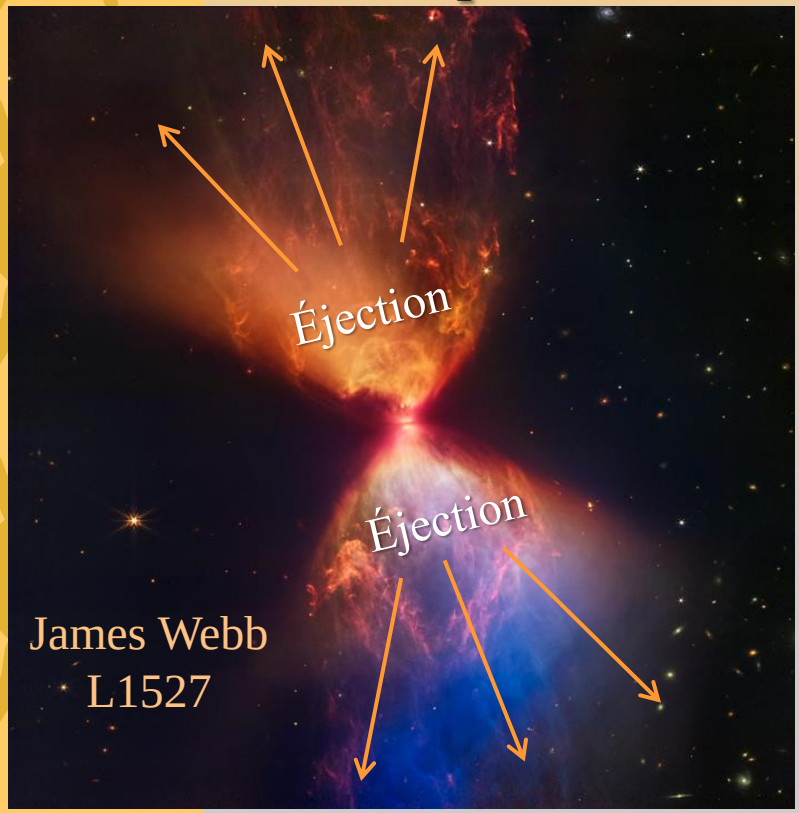
- Vous avez sûrement remarqué l'aspect conique des zones lumineuses…





LE PRINCIPE TERTIAIRE : LA PROTOÉTOILE

- Vous avez sûrement remarqué l'aspect conique des zones lumineuses…



- On pense que l'effondrement de plus en plus rapide de la matière tourbillonnante vers le centre de plus en plus dense et massif de la nébuleuse engendre un *trop plein*, un défaut d'intégration, qui est violemment expulsé par les champs magnétiques naissants du noyau central.

CARACTÉRISTIQUES DE LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE (JUSQU'À MAINTENANT)

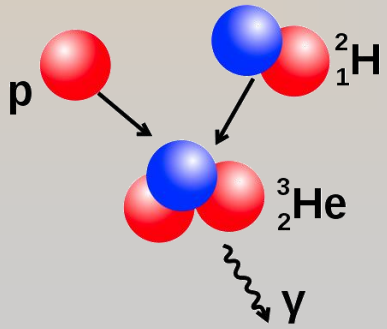
1. **Masse** :
   D'une fraction jusqu'à plusieurs fois la $M_\odot$
2. **Taille** :
   2 000 à 20 000 U.A.
3. **Densité** :
   10 000 à 100 000 particules/cm^3
4. **Durée de l'effondrement** :
   ≈ 100 000 ans (soit 0,01% de la durée de vie du ☉)

CARACTÉRISTIQUES DE LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE (JUSQU'À MAINTENANT)

- Quant au noyau central :
  1. Luminosité :
     Peut atteindre ≅ 100 fois $L_\odot$ car ($R>R_\odot$),
     Même si on voit à peine la protoétoile, enfouie qu'elle est dans un manchon dense de particules.
     Elle éclaire cependant le milieu interstellaire environnant.
     La source de son énergie est la contraction gravitationnelle (mécanisme de Kelvin-Helmholtz).
     Son expression est électromagnétique.

CARACTÉRISTIQUES DE LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE (JUSQU'À MAINTENANT)

- Quant au noyau central :
  2. Masse :
     Le noyau central concentre à présent 80 à 90% de la masse de la nébuleuse.
  3. Température :
     À ce moment, la T° peut atteindre 10^6 K.
     Et le Deutérium (^2_1H) peut fusionner.



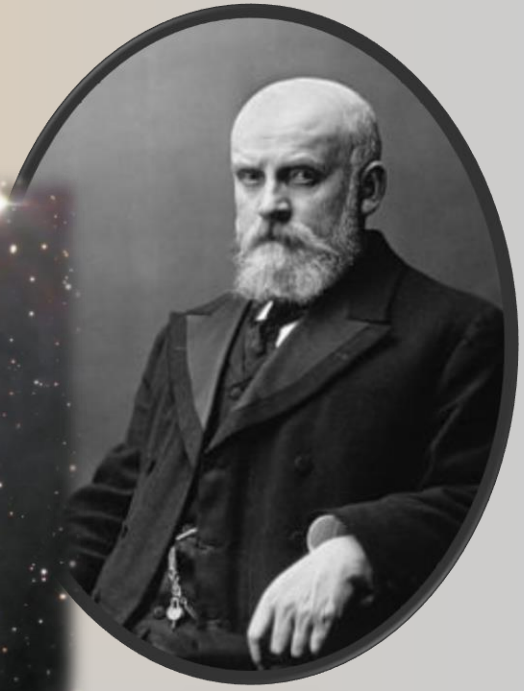
LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- La matière de la nébuleuse continue à s'effondrer vers le noyau central sauf au niveau du disque équatorial en rotation où l'effet centrifuge étire la structure.
  - Le noyau finit par accaparer >90 % de la masse.
  - L'enveloppe nucléaire ⬇ en densité et la protoétoile se fait plus visible.

LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

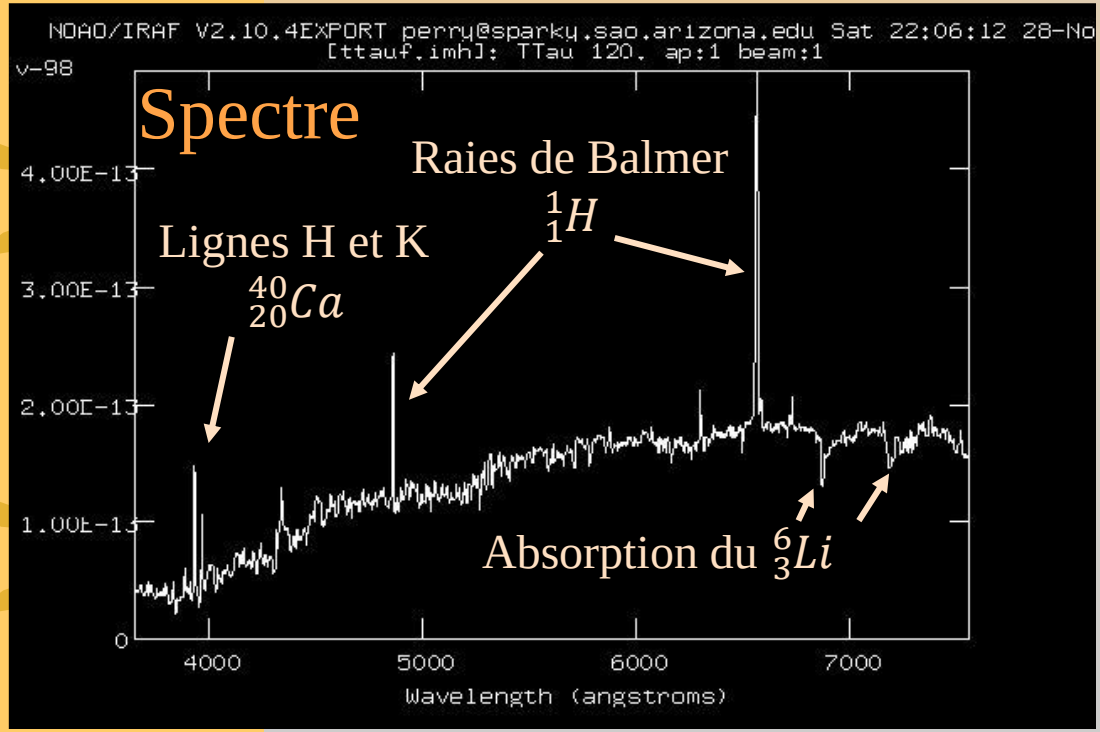
- En 1852, John Russell Hind découvre une étoile *inclassable*…



John Russell Hind
1823-1895

LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

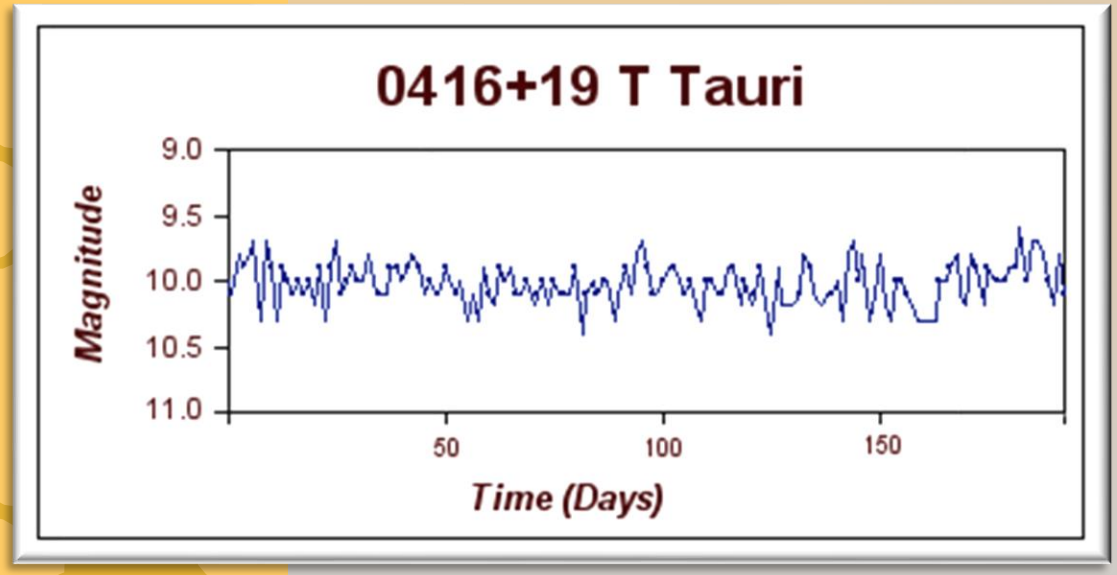
- En 1852, John Russell Hind découvre une étoile *inclassable*…



- Image d'absorption du Lithium.
  - Les nuages interstellaires ont des concentrations en $^{6}_{3}Li$ > que les étoiles.
  - Détruit à T° > 2,5 X 10^6 K
- Émissions Radio et Rayons-X sont 1 000 fois > que le ☉.

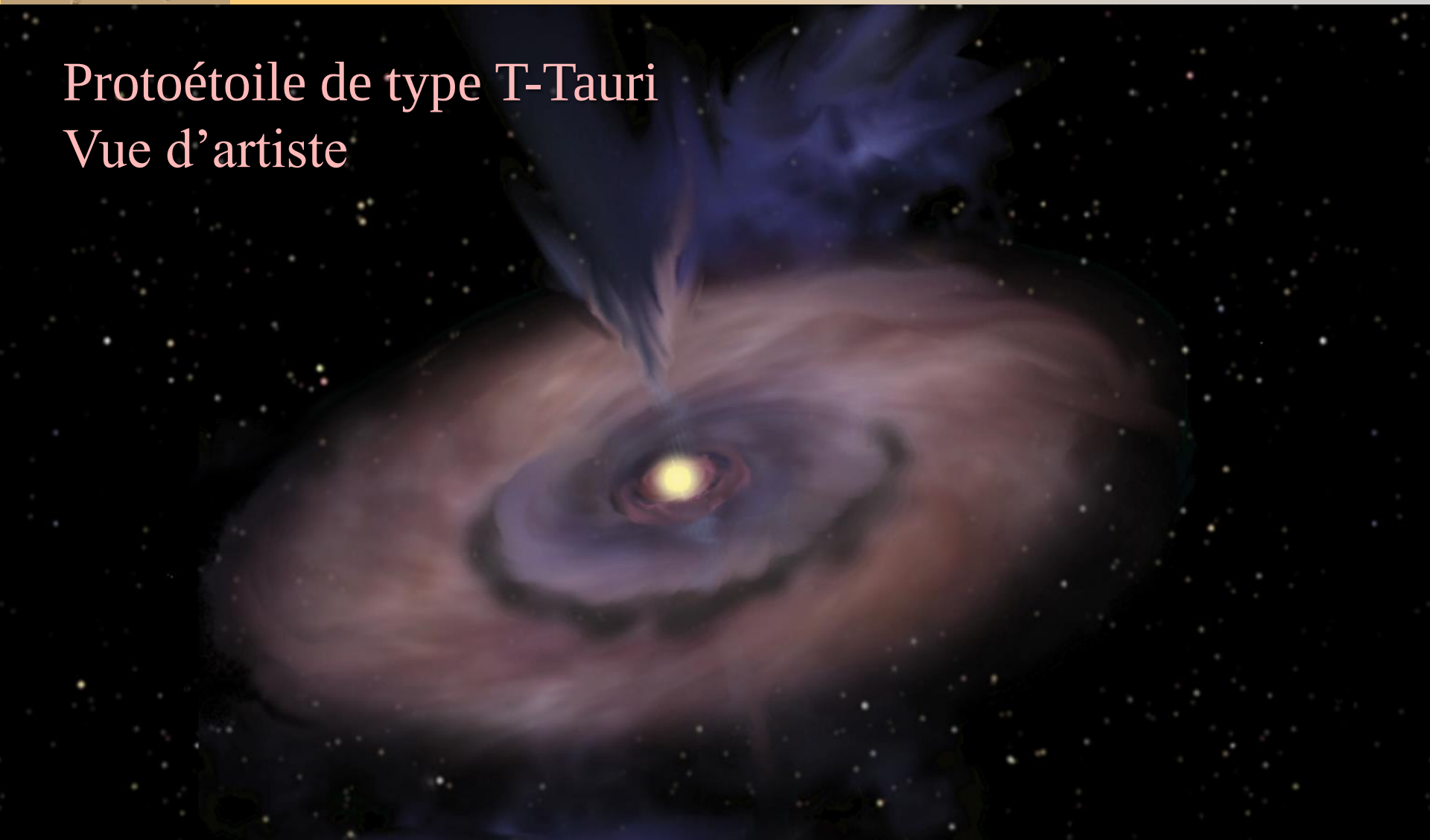
LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- En 1852, John Russell Hind découvre une étoile *inclassable*…



- Variabilité de la ***L***uminosité :
  a. Aléatoire
     - Instabilité et obscurcissement par le disque d'accrétion
     - Éjections de surface
  b. Périodiques (Jours)
     - Grosses taches de surface

LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE



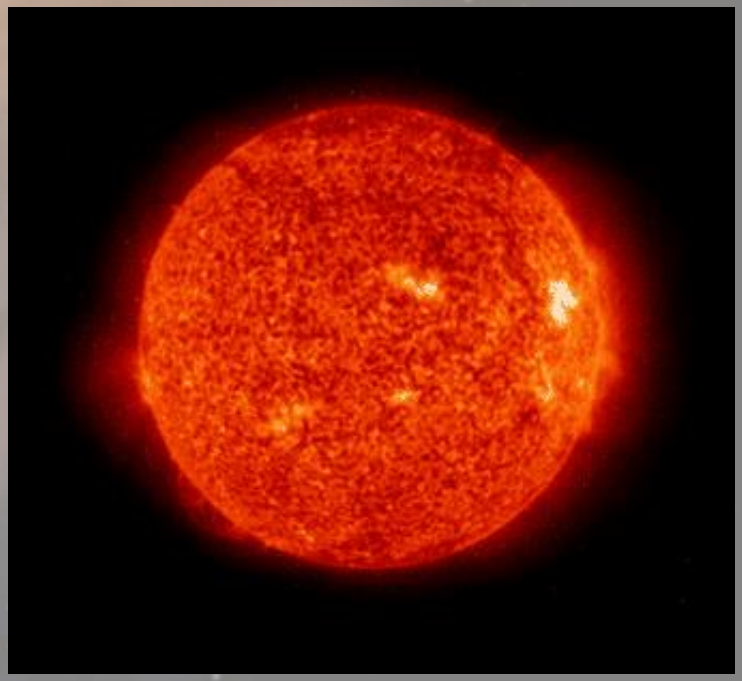
Protoétoile de type T-Tauri
Vue d'artiste

LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Masse : ≤ que 3 $M_\odot$ (Types F,G,K,M).
  - Âge : 1 X 10^6 ans < âge < 10 X 10^6 ans
  - T° centrale : 1 X 10^6 K < T° < 10 X 10^6 K
    - Elles brillent par le mécanisme de Kelvin-Helmholtz et par fusion du ${}^2_1H$.
    - La T° du disque protoplanétaire peut atteindre 1 500 K jusqu'à 3 UA du centre du noyau central.

LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Rotation : La période est de 1 à 12 jours. (À noter que cette période est ≈ 30 jours pour le ☉)

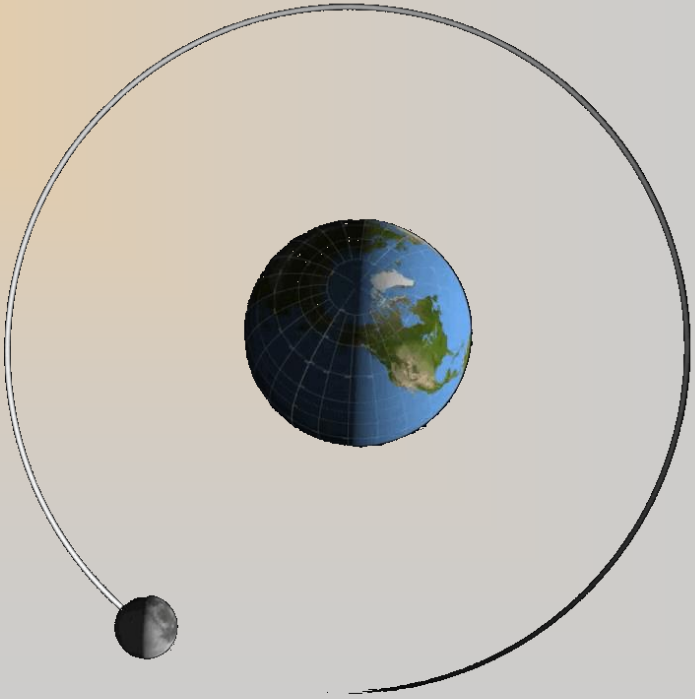


LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Rotation : La période est de 1 à 12 jours. (À noter que cette période est ≈ 30 jours ◉)
  - Il va s'exercer un transfert du moment angulaire du noyau central vers le disque protoplanétaire.
    - La rotation du noyau central va ralentir.
    - Le disque protoplanétaire va s'étaler.

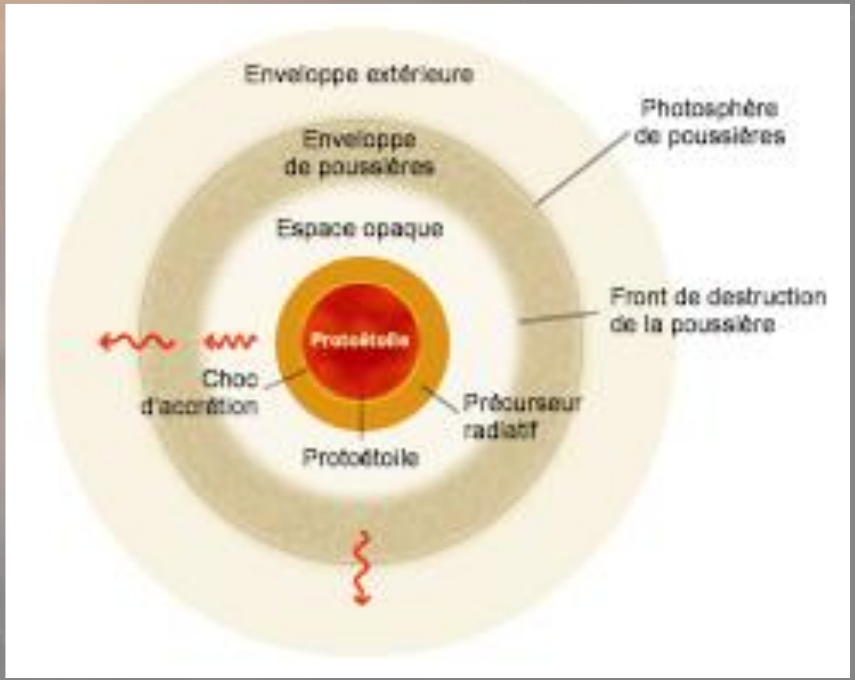
LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- On voit ce phénomène de transfert du moment cinétique au sein du couple Terre-Lune dû à l'effet de marée.
  - La rotation de la Terre **ralentit** de $1,64 \times 10^{-5}$ s/an.
  - La Lune s'**éloigne** la Terre de 3,4 cm/an.



LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

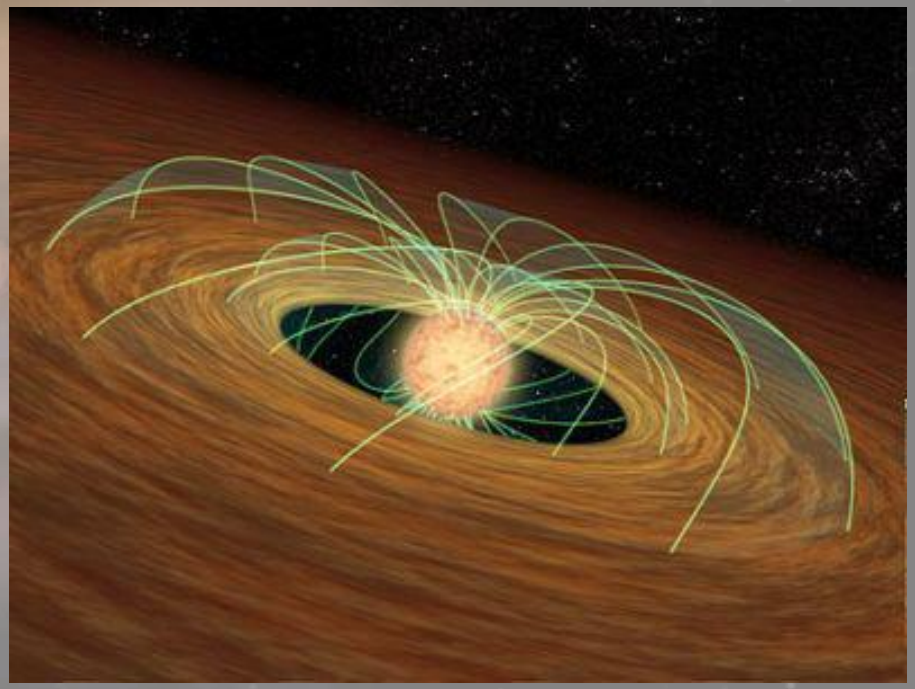
- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Vents stellaires : Ils sont beaucoup plus puissants que les vents solaires actuels.
  - Ils vont creuser un espace opaque libre entre la protoétoile et le disque protoplanétaire d'accrétion.
  - Ils vont repousser au loin les volatiles (molécules légères)



LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Champ magnétique intense :

- Ils est en partie responsable du transfert du moment angulaire.
- Il surcharge les régions polaires de particules chargées
  ➡ Jets d'éjection.



LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Champ magnétique intense :
    - Ils est en partie responsable du transfert du moment angulaire.
    - Il surcharge les régions polaires de particules chargées
      ➡ Jets d'éjection.

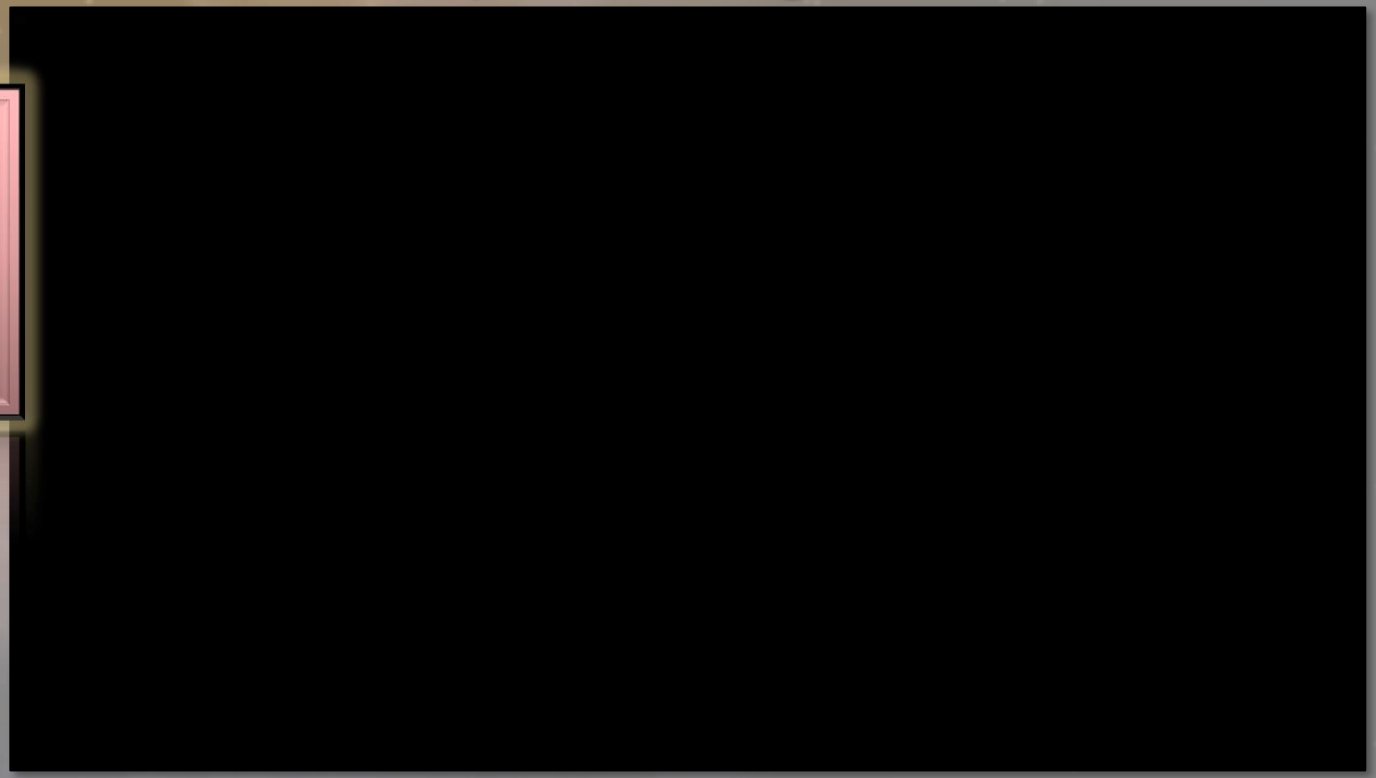
Guillermo Haro
1913-1988

George Herbig
1920-2013

LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Associées aux objets Herbig-Haro:

HH 24
Nuage moléculaire
Orion B
1 350 a.l.



LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Associées aux objets Herbig-Haro:

James Webb
L1527

Vue d'artiste

LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Associées aux objets Herbig-Haro:

Avec le temps :

- ✓ La masse du noyau central ⬆ > 95% de la masse totale de la nébuleuse protostellaire.
- ✓ Son rayon ⬇, sa densité ⬆.
- ✓ L'intensité de son champ magnétique ⬆.

LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Associées aux objets Herbig-Haro:

- ✓ Alors, les **jets polaires** s'effilent.
- ✓ Ils se projettent de plus en plus loin dans l'espace environnant ➡ 0,5 à 3 a.l.

LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Associées aux objets Herbig-Haro:

- ✓ Alors, les **jets polaires** s'effilent.
- ✓ Ils se projettent de plus en plus loin dans l'espace environnant ➡ 0,5 à 3 a.l.

HH 24
télescope spatial Hubble

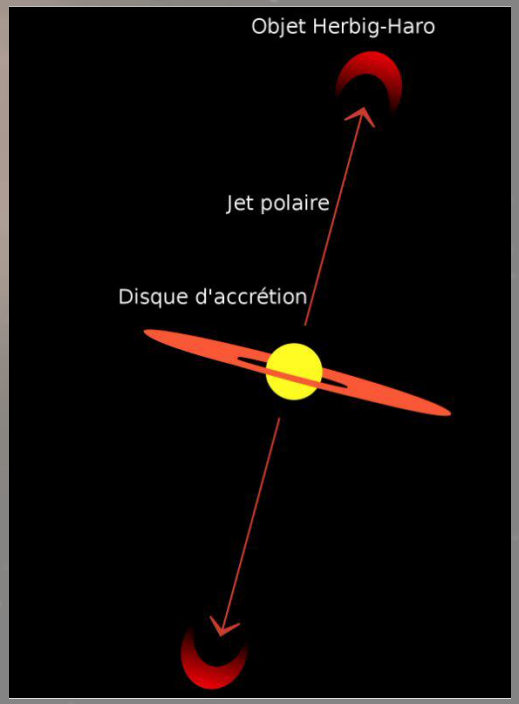
LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Associées aux objets Herbig-Haro:
    - Plus de **600** de ces objets ont été répertoriés.

LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

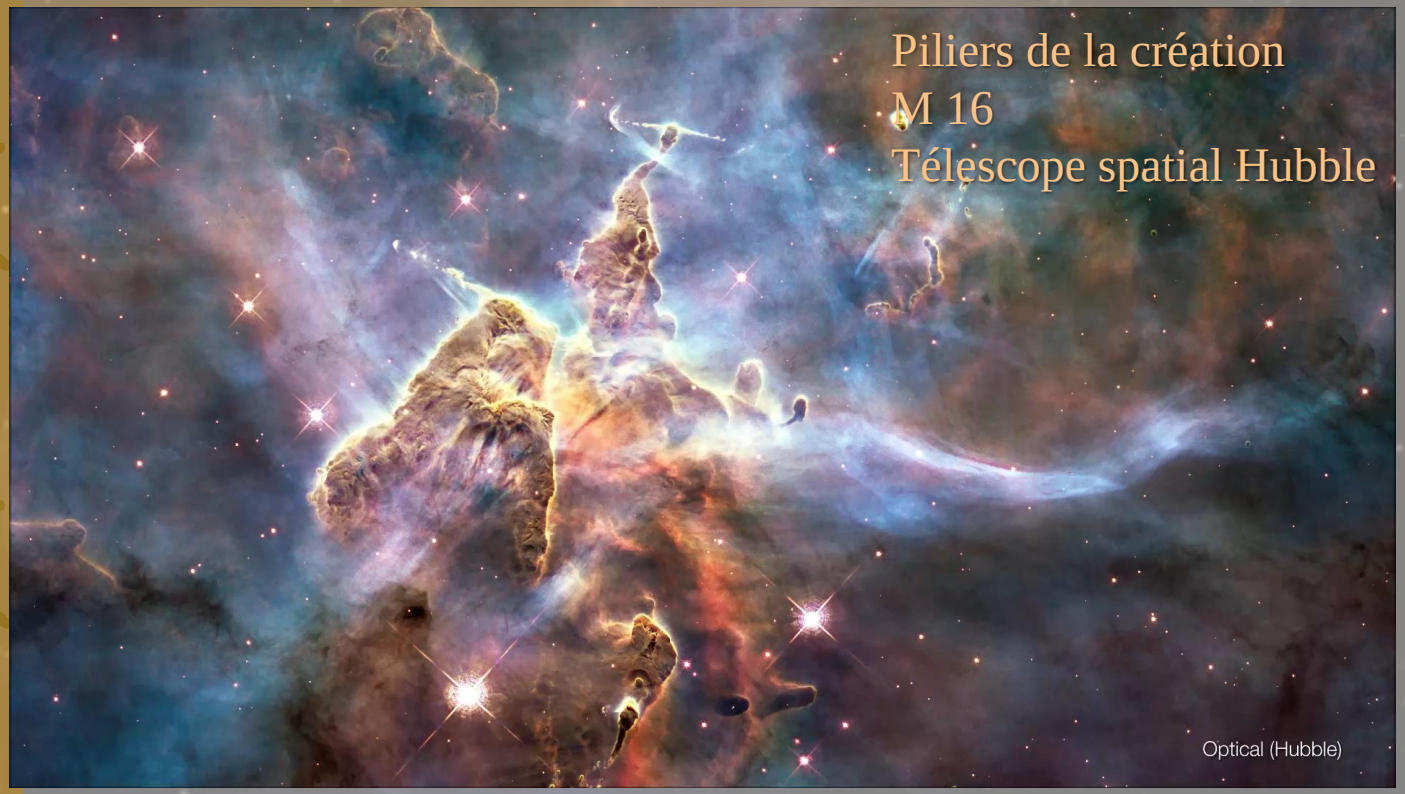
- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Associées aux objets Herbig-Haro:
    - Plus de 600 de ces objets ont été répertoriés.

✓ En rencontrant le milieu environnant, les jets repoussent la matière interstellaire.



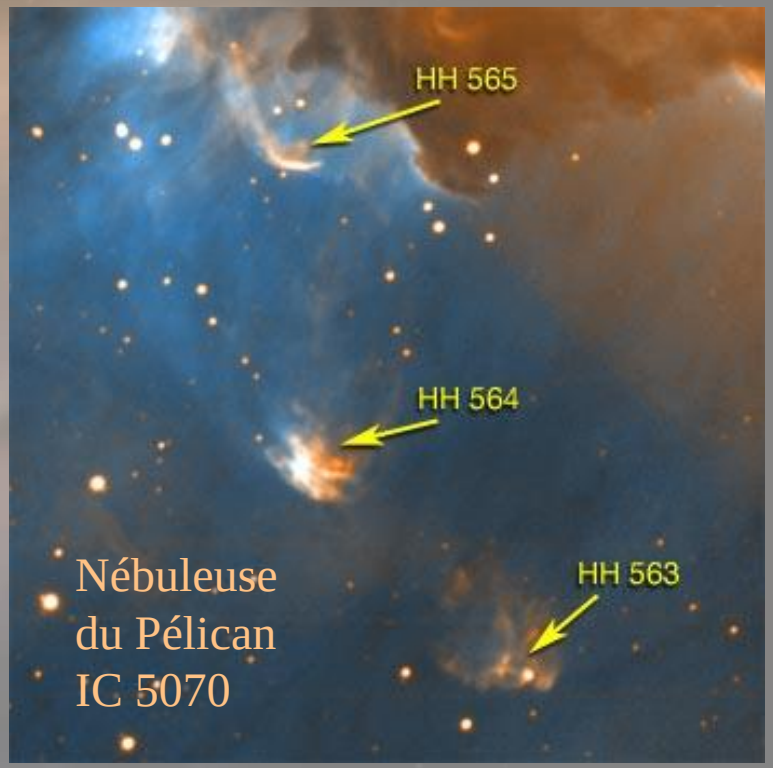
LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Associées aux objets Herbig-Haro:



LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Associées aux objets Herbig-Haro:

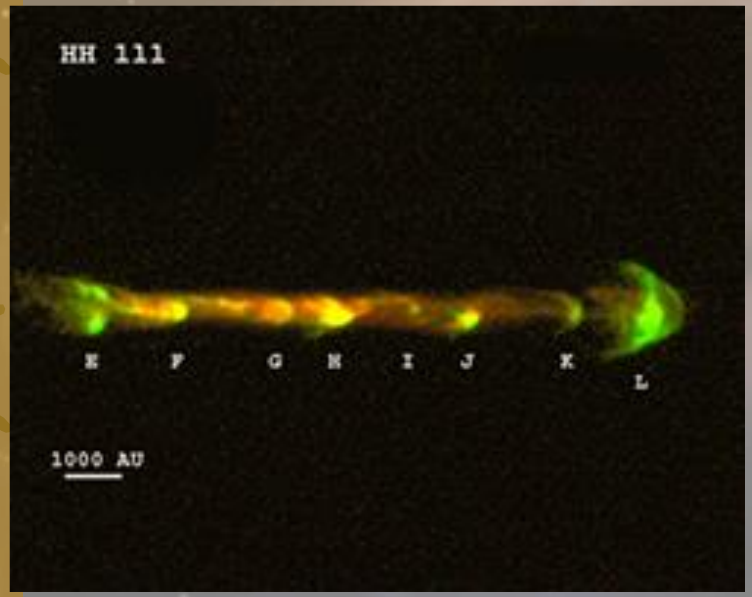


LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Caractéristiques des objets Herbig-Haro:
    - Durée : Ils sont éphémères ≈ quelques milliers d'années.
    - Masse : 1 à 20 $M_{\oplus}$.
    - Taux d'ionisation ≈ 30%.
    - Vélocité : 100 à 1 000 km/s
    - Étendue : 0,5 à 3 a.l.
    - 80 % sont associés à des systèmes binaires d'étoiles.

LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Caractéristiques des étoiles T-Tauri :
  - Caractéristiques des objets Herbig-Haro:
    - Température : 10 000 K
    - Ils sont pulsatiles.



LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- La protoétoile est maintenant âgée de ± 100 millions d'années (1% âge ⊙).
- Elle a atteint le maximum de la masse que lui a offert son berceau au sein de la pouponnière qui lui a donné le jour.
- Toujours frémissante, la chrysalide doit maintenant devenir papillon…
- Son devenir dépendra de son opulence.

LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Gourmande, elle s'est empiffrée de tout ce qu'elle pouvait de sa nébuleuse mère…
- Ne laissant que des miettes à ses parcelles orbitantes.

LE PRINCIPE QUATERNAIRE : L'ÉTOILE PRÉ SÉQUENCE PRINCIPALE

- Gourmande, elle s'est empiffrée de tout ce qu'elle pouvait, cannibalisant sans vergogne sa nébuleuse mère…
- Ne laissant que des miettes à ses parcelles orbitantes.
- Le Soleil ne contient-il pas **99,86** % de toute la masse de son Système dans l'espace-temps…

LE PRINCIPE QUINTERNAIRE : ÉTOILE DE LA SÉQUENCE PRINCIPALE

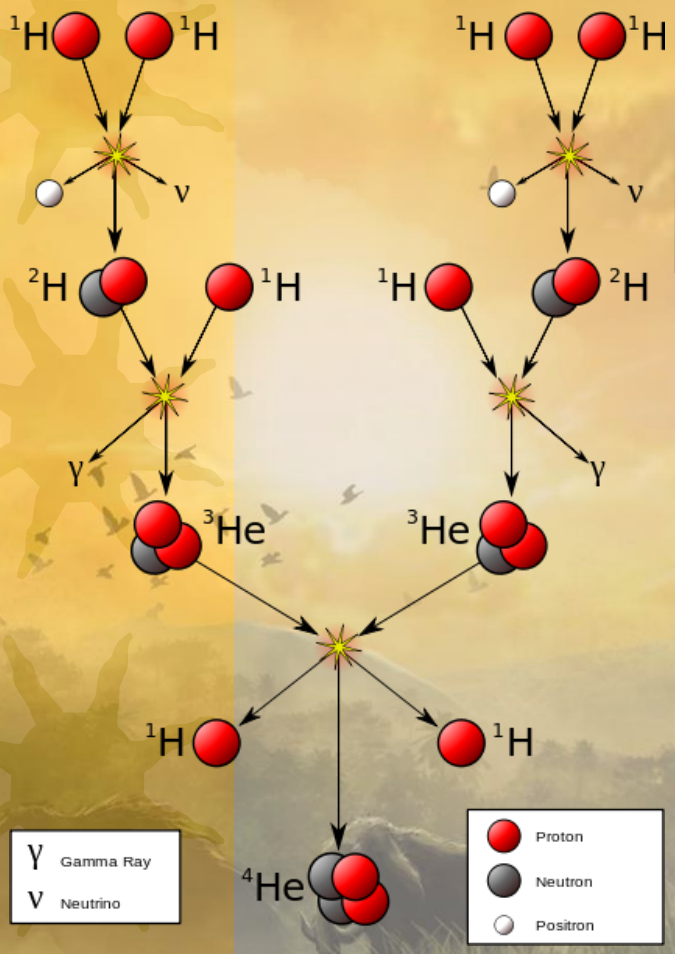
- Question de masse du noyau :
  - Si la masse $< 80\ M_{Jupiter}$, la protoétoile deviendra un Naine brune (étoile avortée).
  - Si la masse $\geq 80\ M_{Jupiter}$ la température centrale atteindra $\geq 10 \times 10^6$ K…

Et l'Hydrogène (^1_1H) en son cœur commencera à ***fusionner***.

Dès lors,

Une étoile est née

LE PRINCIPE QUINTERNAIRE : ÉTOILE DE LA SÉQUENCE PRINCIPALE



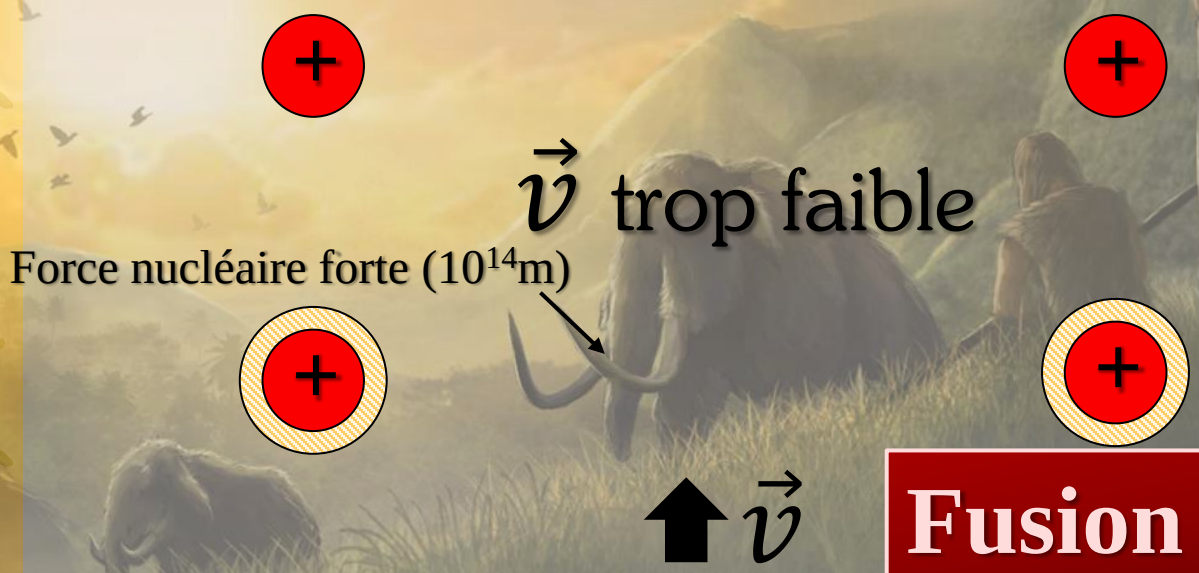
Chaîne proton-proton

Voir Capsule du débutant # 23
Énergie des étoiles

Une étoile est née

LE PRINCIPE QUINTERNAIRE : ÉTOILE DE LA SÉQUENCE PRINCIPALE

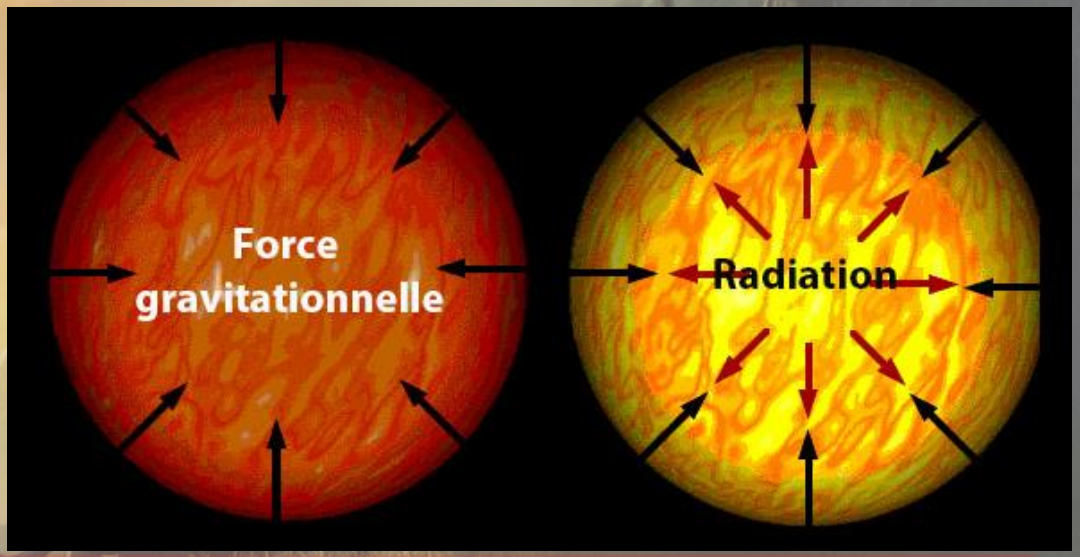
- Une T° ≥ 10 X 10^6 K est nécessaire pour vaincre la force de répulsion électrique des noyaux ${}^{1}_{1}H$ (protons).



Fusion nucléaire

LE PRINCIPE QUINTERNAIRE : ÉTOILE DE LA SÉQUENCE PRINCIPALE

- S'en suit une courte période d'instabilité, le temps d'atteindre l'équilibre…
- Où la pression de lumière neutralisera la force gravitationnelle.



Une étoile est née

LE PRINCIPE QUINTERNAIRE : ÉTOILE DE LA SÉQUENCE PRINCIPALE

- Une étoile n'étant autre chose qu'une immense marmite sphérique chauffée de l'intérieur, tendant à l'expansion par la pression de lumière, mais où la gravitation agit comme un couvercle en maintenant l'intégrité de l'astre en état d'équilibre hydrostatique.

Une étoile est née

DORÉNAVANT, L'ÉTOILE DÉBUTANTE PRENDRA SA PLACE SUR LA SÉQUENCE PRINCIPALE.

MESSAGES CLÉS

- La fragmentation d'un grand nuage moléculaire interstellaire en nébuleuses protostellaires différentiées est responsable de la naissance d'autant d'étoiles individuelles.
- Les étoiles naissent en essaims formant des amas ouverts d'étoiles qui finiront par se disperser dans la galaxie.
- L'étoile est le résultat de la contraction gravitationnelle de la nébuleuse protostellaire en rotation.
  - La contraction est maximale aux pôles…
  - Tandis qu'à l'équateur, la nébuleuse s'étire pour former un disque protoplanétaire.

MESSAGES CLÉS

- La nébuleuse protostellaire prend alors la forme d'un disque tournoyant dans l'espace.
- Le centre du disque se densifie, s'échauffe, jusqu'à ce que les collisions particulaires engendrent une émission photonique qui illumine la région.
- Cette émission d'énergie électromagnétique crée un champ magnétique intense qui transporte les particules électriquement chargées vers les pôles du centre de la nébuleuse.
- Ce *trop plein* est évacué sous forme de jets polaires dans l'espace environnant.

MESSAGES CLÉS

- Après ± un million d'années, une étoile de type T Tauri se forme. Elle irradie dans l'espace grâce à l'énergie électromagnétique et à la fusion du deutérium.
- Des objets de Herbig-Haro éphémères accompagnent souvent ces étoiles naissantes.
- Enfin, lorsque la température centrale atteint les dix millions de degrés, l'hydrogène commence à fusionner.
- Cette énergie nucléaire est le déterminant de la naissance d'une nouvelle étoile véritable.
- Après une période d'instabilité, un état d'équilibre thermodynamique s'installe et la nouvelle étoile prend sa place sur la séquence principale.

MESSAGES CLÉS

- Il s'est alors écoulé ± cent millions d'années depuis le début de l'effondrement gravitationnel de la nébuleuse protostellaire.

QUELQUES RÉFÉRENCES

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

- Wikipédia :
  - Hypothèse de la nébuleuse
    https://fr.wikipedia.org/wiki/Hypoth%C3%A8se_de_la_n%C3%A9buleuse
  - Protoétoile
    https://fr.wikipedia.org/wiki/Proto%C3%A9toile
  - Formation des systèmes stellaires (Exemple du Soleil)
    https://fr.wikipedia.org/wiki/Formation_et_%C3%A9volution_du_Syst%C3%A8me_solaire

QUELQUES RÉFÉRENCES

- Wikipédia :
  - Étoiles de la pré séquence principale https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89toile_de_la_pr%C3%A9-s%C3%A9quence_principale
  - Étoiles de type T-Tauri https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89toile_variable_de_type_T_Tauri
  - Objets de Herbig-Haro https://fr.wikipedia.org/wiki/Objet_Herbig-Haro
- Protoétoile : Télescope James-Webb https://www.nasa.gov/feature/goddard/2022/nasa-s-webb-catches-fiery-hourglass-as-new-star-forms