LA CAPSULE DU DÉBUTANT

Les étoiles

- ✓ La structure de la matière (partie 1)
- ✓ La structure de la matière (partie 2)
- ✓ L'énergie des étoiles
- ✓ L'anatomie des étoiles
- ✓ **Le substrat précurseur :**
  - ✓ **Le milieu interstellaire**

LES OBJECTIFS

- Au terme de cette présentation, le participant pourra :
  - Décrire les principaux éléments qui peuplent le milieu interstellaire de notre galaxie.
  - Expliquer l'hétérogénéité du milieu interstellaire à la fois dans ses constituants chimiques et dans ses propriétés physiques.
  - Raconter la genèse moléculaire et la complexification des composés qui forment le milieu interstellaire.
  - Énumérer les méthodes d'étude et d'analyse qui ont permis la compréhension des milieux interstellaires.

Regardez le clair et pur azur du ciel

Lucrèce

- Y a-t-il « quelque substance » masquée entre les astres du ciel ?

Regardez le clair et pur azur du ciel

Lucrèce

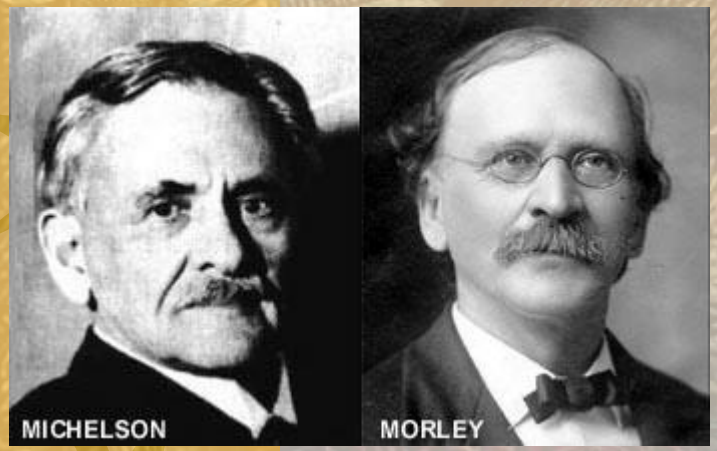
Les *Anciens* soutenaient que l'**Éther** formait la trame substantielle de l'Univers

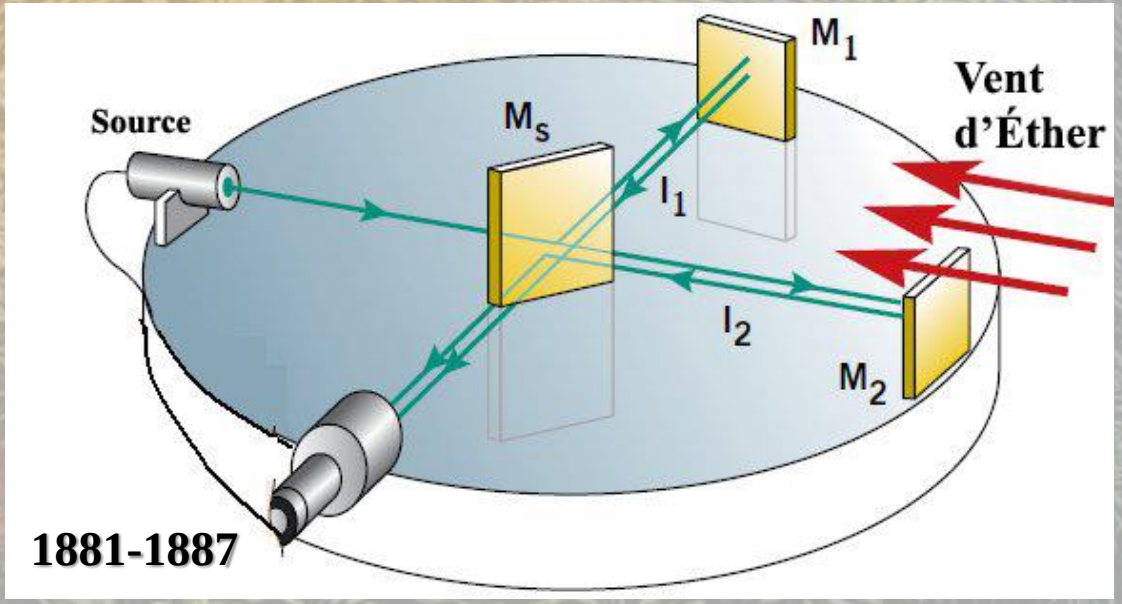
- **Y a-t-il « quelque substance » masquée entre les astres du ciel ?**

Regardez le clair et pur azur du ciel

Lucrèce

- Expériences de Michelson et Morley ont permis d'infirmer l'existence de l'**Éther**.

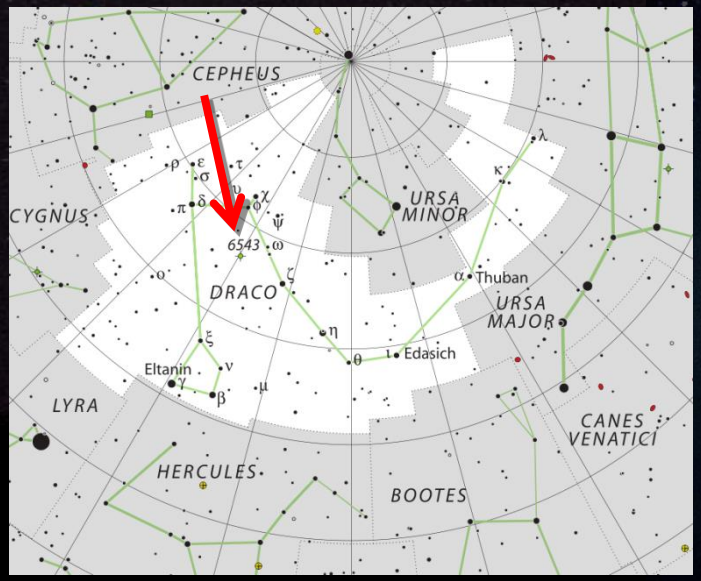


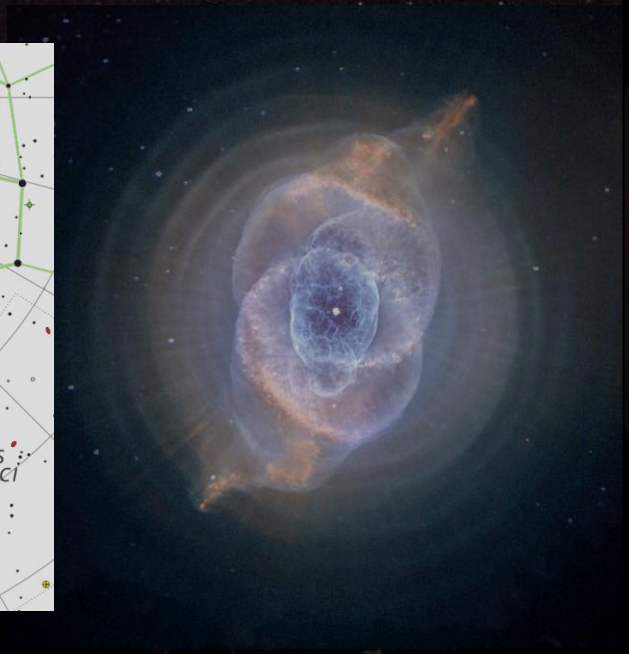


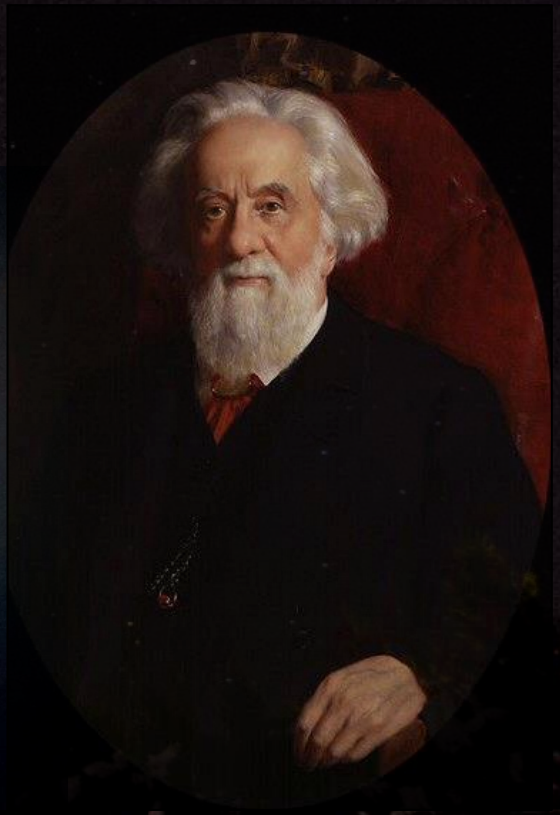
Regardez le clair et pur azur du ciel

Lucrèce

- En 1864, William Huggins examine le **spectre** de la nébuleuse de l'***Œil de chat*** (NGC 6543) dans le Dragon et détecte la présence de "***gaz lumineux***".



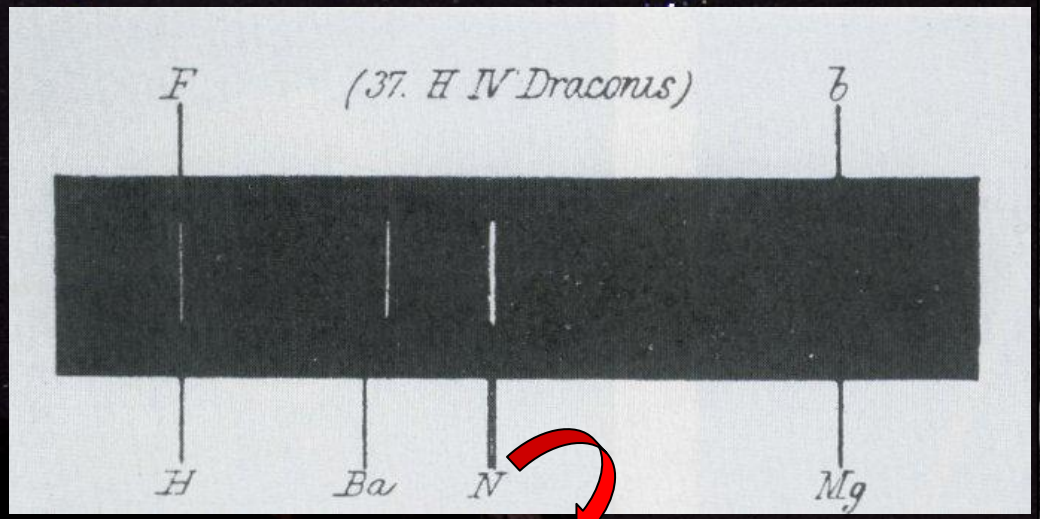




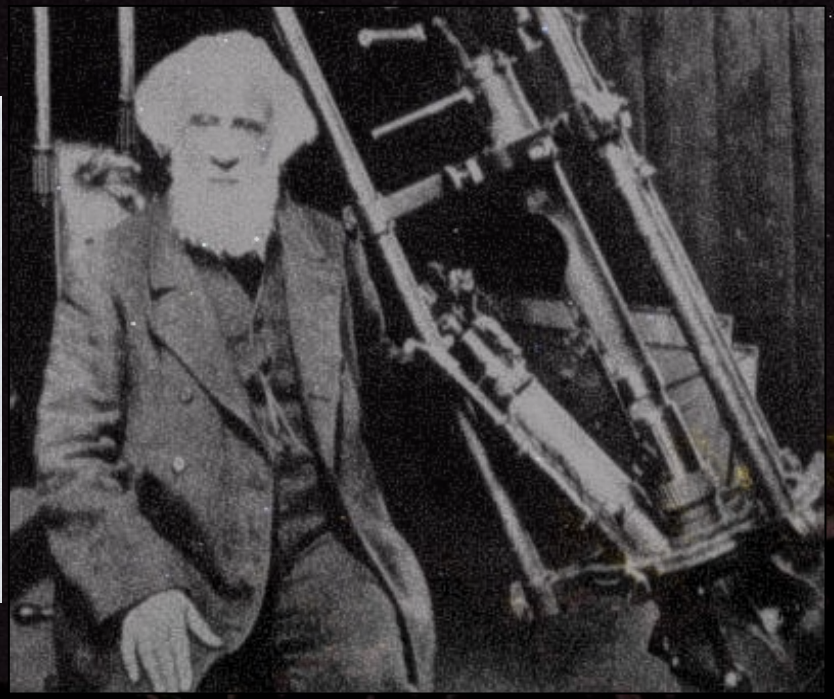
Regardez le clair et pur azur du ciel

Lucrèce

- En 1864, William Huggins examine le **spectre** de la nébuleuse de l'***Œil de chat*** (NGC 6543) dans le Dragon et détecte la présence de "***gaz lumineux***".



Nebulium



Regardez le clair et pur azur du ciel

Lucrèce

★ Y a-t-il « quelque substance » masquée entre les astres du ciel ?

La réponse est *oui*

Regardez le clair et pur azur du ciel

Lucrèce

- Depuis, on a découvert bien d'autres choses de sorte que **oui**, l'espace entre les astres n'est pas vide.

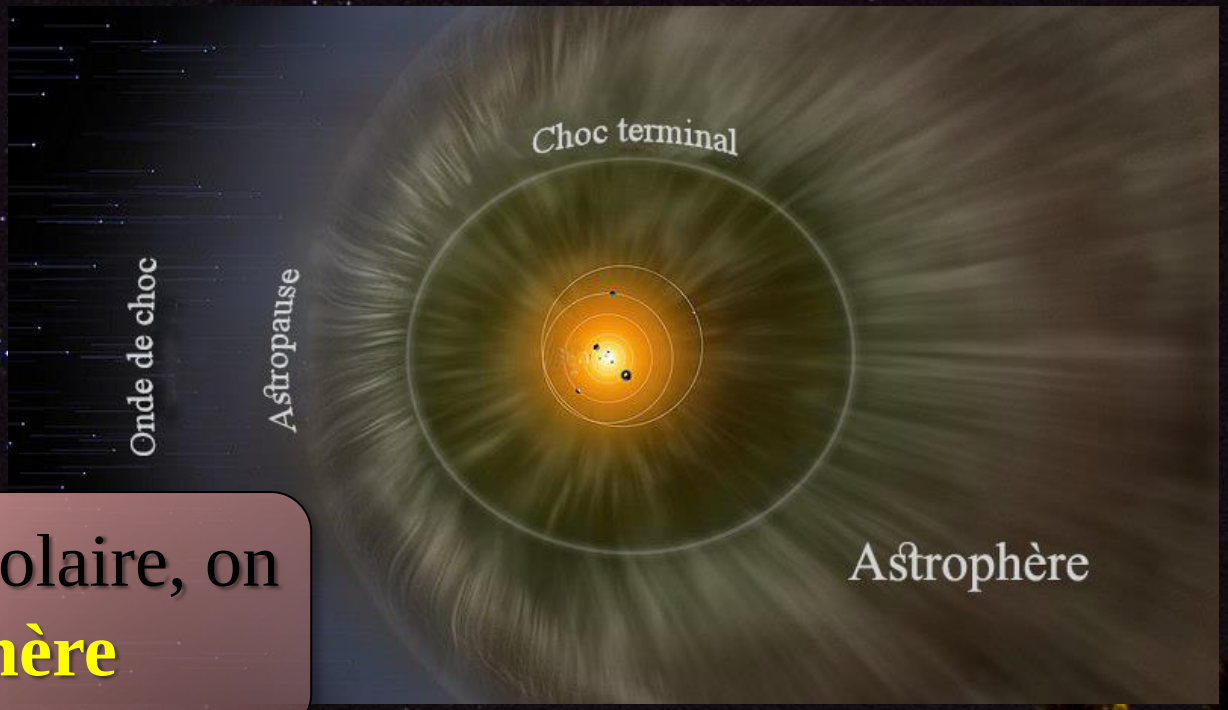
- Définition :
  - Qu'est-ce que le ***milieu interstellaire*** ?

    Le milieu interstellaire est la ***matière*** qui, dans une galaxie, remplit l'espace entre les étoiles et se fond dans le milieu intergalactique environnant.

La limite, c'est où tu veux.

Fitzgerald

★ Le milieu interstellaire va de la limite des astrophères ➡

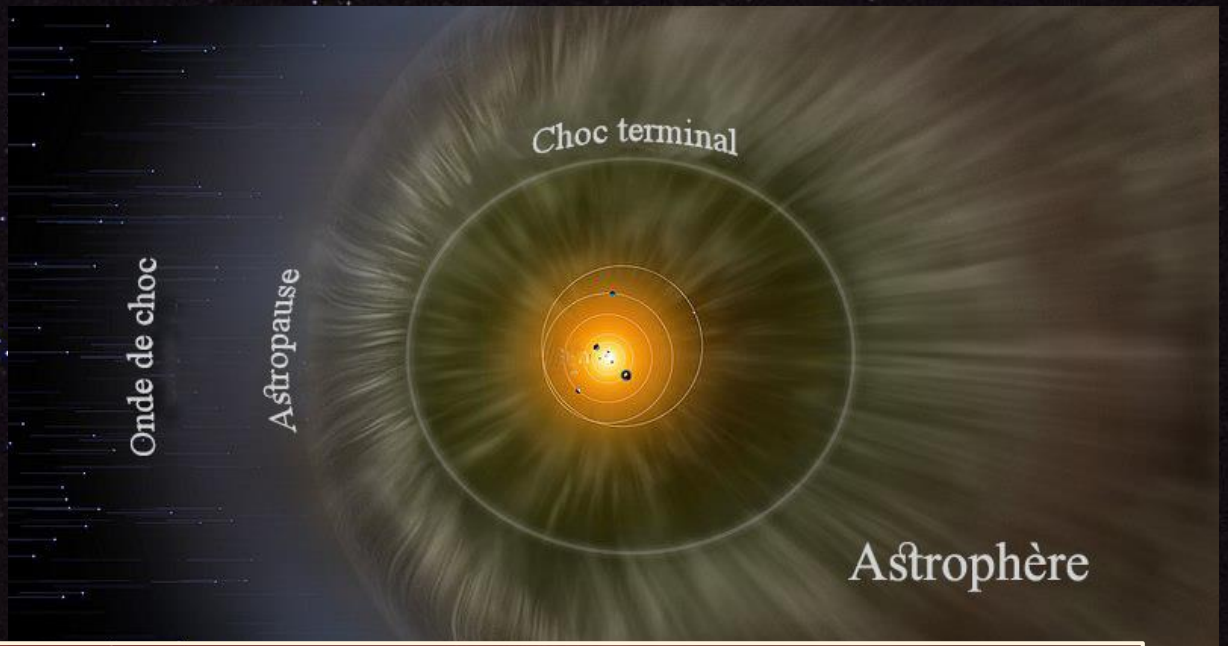


Pour le Système solaire, on parlera d'**héliosphère**

La limite, c'est où tu veux.

Fitzgerald

- ★Le milieu interstellaire va de la limite des astrophères ➡

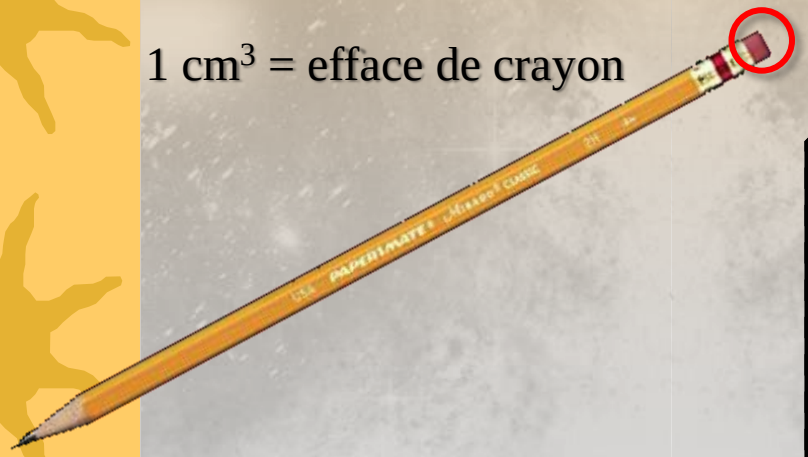


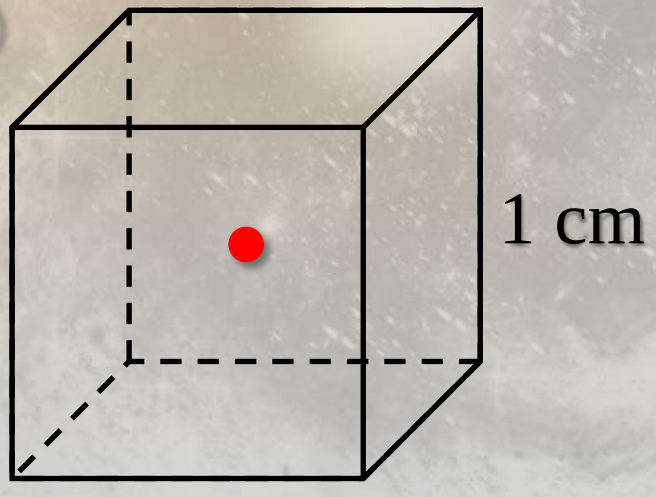
- ★Jusqu'aux limites floues de la galaxie.

➢Nous parlerons au cours de cette présentation du milieu interstellaire intragalactique

UN PEU, BEAUCOUP, PASSIONNÉMENT

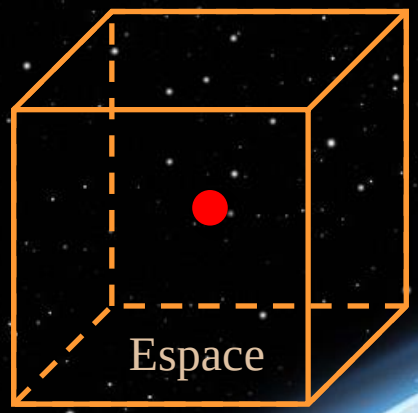
- Quelle est la densité de la matière du milieu interstellaire ?
  - Elle varie beaucoup mais elle est en moyenne de **1 atome • cm^{-3}** d'espace.

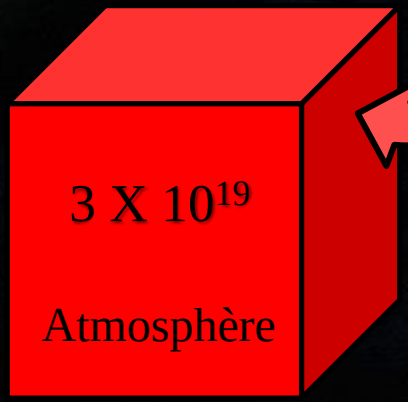




UN PEU, BEAUCOUP, PASSIONNÉMENT

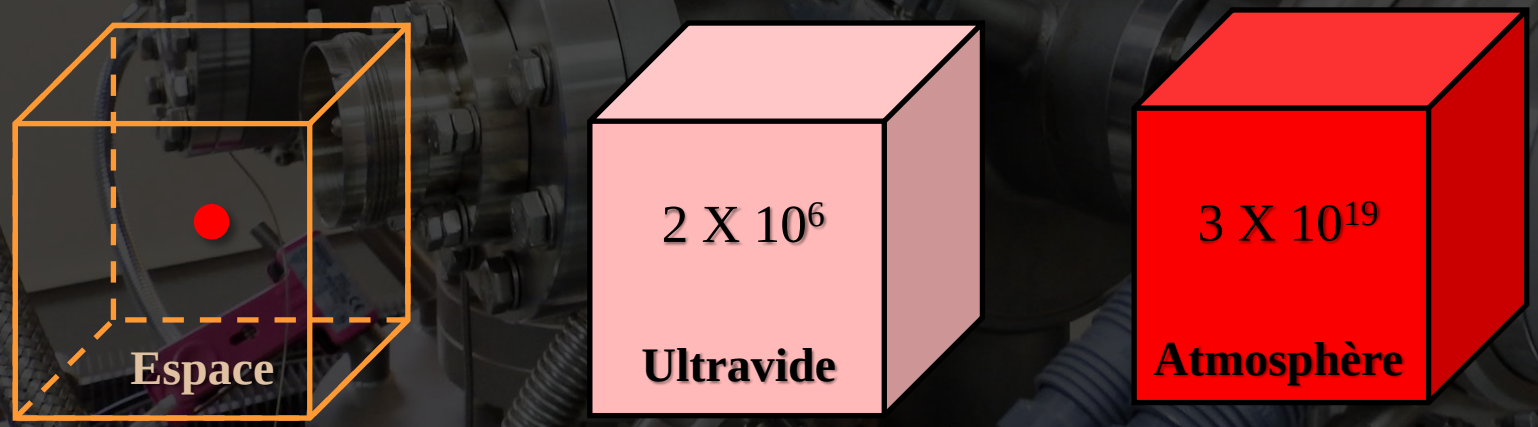
- En comparaison, voyons l'air que nous respirons.
  - 3×10^{19} molécules • cm-3
    ou 30 000 000 000 000 000 000 molécules.





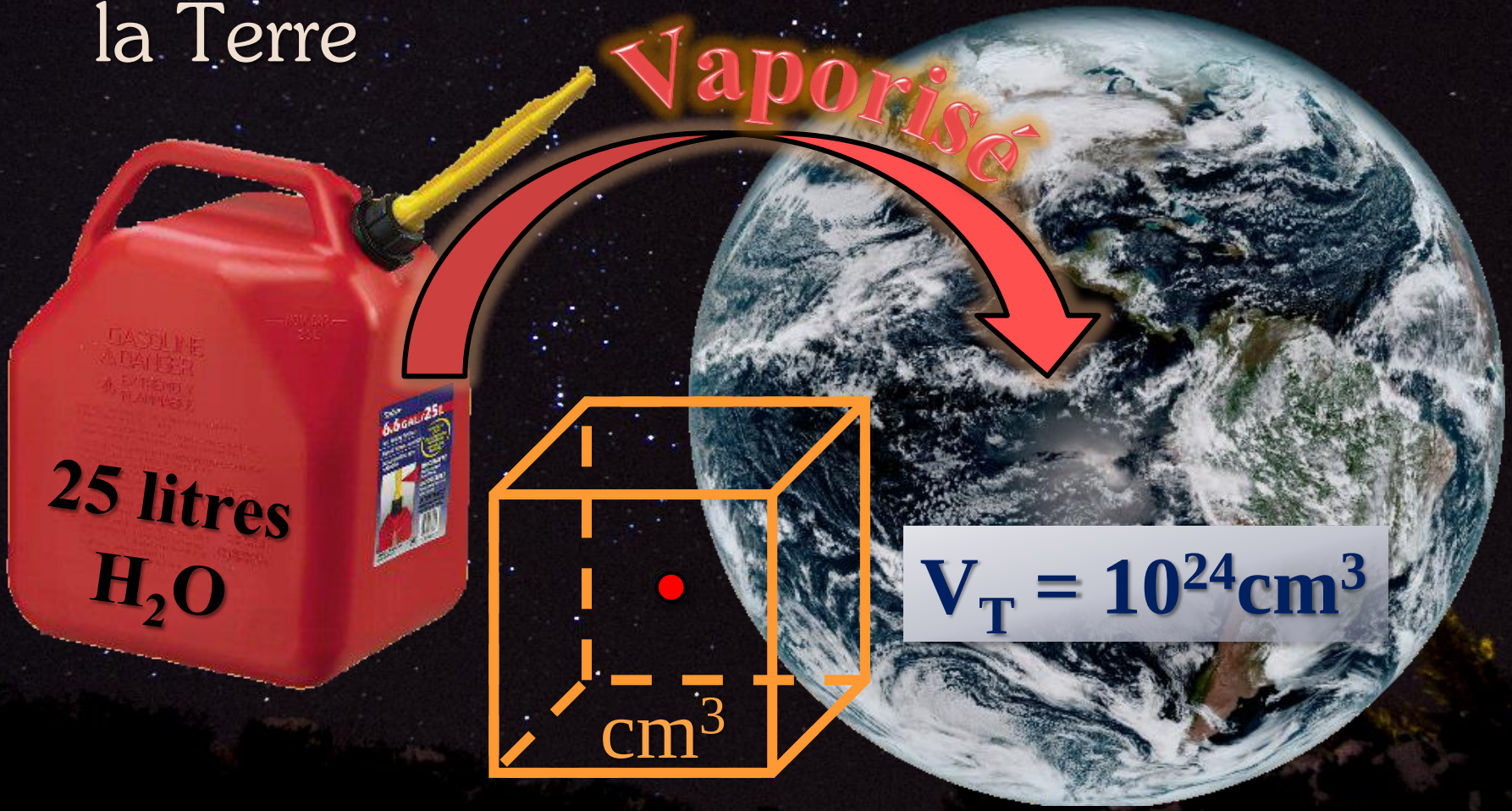
UN PEU, BEAUCOUP, PASSIONNÉMENT

- Le meilleur vide réalisable en laboratoire
  - **ultravide** :
    - 2×10^6 molécules • cm^{-3}
      ou 2 millions.



UN PEU, BEAUCOUP, PASSIONNÉMENT

★ Un bidon d'eau dans le volume de la Terre



UN PEU, BEAUCOUP, PASSIONNÉMENT

- Cependant, la densité du milieu interstellaire **varie beaucoup** d'un endroit à l'autre.
  - Elle atteint aussi peu que **10^{-4}** atomes • cm^{-3}
  - Jusqu'à **10^{5}** atomes • cm^{-3}

LDN 673
Luc Bellavance

FAISONS QUELQUES CALCULS

- Quelle est la **Masse** de la matière diffuse interstellaire dans notre galaxie ?

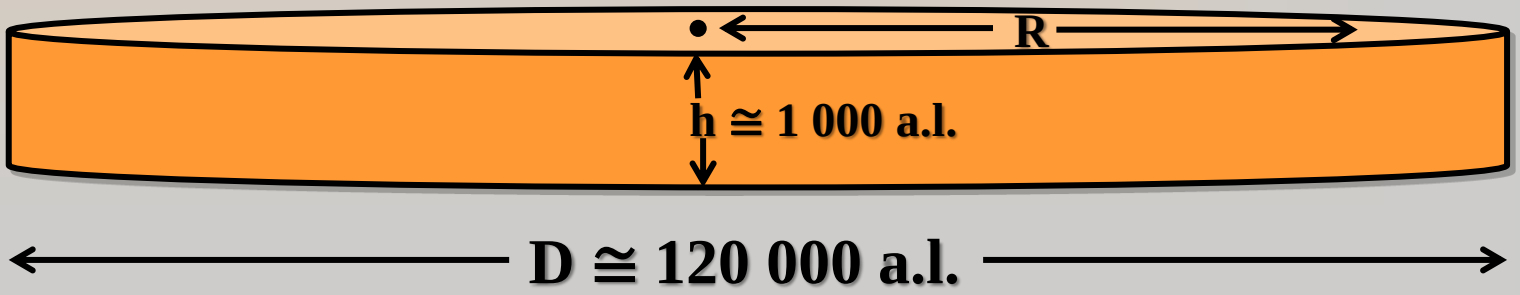
D ≅ 120 000 a.l.

FAISONS QUELQUES CALCULS

- Quelle est la Masse de la matière diffuse interstellaire dans notre galaxie ?
  - $\mathbf{M}_{\text{matière intestellaire}} = \mathbf{V}_{\text{galaxie}} \bullet \mathbf{D}_{\text{densité matière}} \bullet \mathbf{m}_{\text{masse atome}}$

Où $\mathbf{V}_{\text{galaxie}} = \pi R^2 \bullet h$] **R** ≅ 60 000 a.l. **h** ≅ 1 000 a.l.

On trouve $\mathbf{V}_{\text{galaxie}} = 3 \text{ X } 10^{66} \text{ cm}^3$



VOUS AVEZ DIT DÉMESURÉ…

- Imaginons…
  - le Système solaire =

Diamètre =
120 UA ou
18 000 000 000 km

  - la Voie Lactée =

FAISONS QUELQUES CALCULS

- Quelle est la Masse de la matière diffuse interstellaire dans notre galaxie ?
  - **Quelle est la valeur de $m_{\text{masse atome}}$?**

Composition de $C_{\text{milieu interstellaire}}$]
- $^{1}_{1}H \approx 89\ \%$ ➡ $m_p = 1{,}7 \times 10^{-27}$ kg
- $^{4}_{2}He \approx 9\ \%$ ➡ $m_{^{4}_{2}He} = 3{,}97 \times 10^{-27}$ kg

  - Quelle est la valeur de $D_{\text{densité matière}}$? = **1 atome • cm^{-3}**

FAISONS QUELQUES CALCULS

- Quelle est la Masse de la matière diffuse interstellaire dans notre galaxie ?
  - $M_{\text{matière interstellaire}} = V_{\text{galaxie}} \cdot D_{\text{densité matière}} \cdot m_{\text{masse atome}}$
- On trouve :

$$M_{\text{matière interstellaire}} \cong 5{,}65 \times 10^{39} \text{ kg}$$

FAISONS QUELQUES CALCULS

- On trouve :

  $$\mathbf{M}_{\text{matière interstellaire}} \cong 5{,}65 \text{ X } 10^{39} \text{ kg}$$

- La masse du Soleil ($M_\odot$) = $1{,}98 \text{ X } 10^{30}$ kg

- On trouve que la $\mathbf{M}_{\text{matière interstellaire}}$ vaut $\approx 3 \text{ X } 10^{9}\ M_\odot$

FAISONS QUELQUES CALCULS

- Or, la masse des étoiles de la Voie Lactée est estimée à 5 X 10^{10} $M_{\odot}$.
- La matière interstellaire représente donc $\frac{3 \times 10^{9} M_{\odot} \bullet 100}{5 \times 10^{10} M_{\odot}}$ = 6% de la masse des étoiles de la Voie Lactée.
- Certains avancent la valeur de 10%, ou même de 15%.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- On retrouve dans le milieu interstellaire de notre galaxie :
  1. ***Gaz*** qui peuvent être :
     - ✓ Atomiques
     - ✓ Ionisés
     - ✓ Moléculaires
       - Simples
       - Complexes

     99 % de la masse de la matière interstellaire
  2. ***Poussières*** **cosmiques** **1 % de la masse**
  3. ***Rayonnement*** électromagnétique

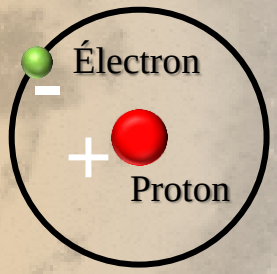
DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- On retrouve dans le milieu interstellaire de notre galaxie :
  1. ***Gaz*** qui peuvent être :
     - ✓ **Atomiques**
     - ✓ Ionisés
     - ✓ Moléculaires
       - Simples
       - Complexes

     99 % de la masse de la matière interstellaire
  2. ***Poussières*** **cosmiques** **1 % de la masse**
  3. ***Rayonnement*** électromagnétique

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Gaz neutre atomique (Régions HI).**
  - Surtout fait d' $^{1}_{1}H$



Que veut dire Région HI ?

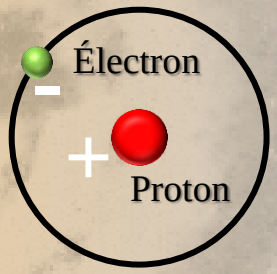
C'est un terme historique de spectroscopie

✓HI ➡ atome d'hydrogène neutre

✓HII ➡ atome d'hydrogène ionisé

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Gaz neutre atomique (Régions HI).**
  - Surtout fait d' $^{1}_{1}H$

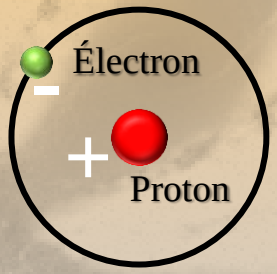


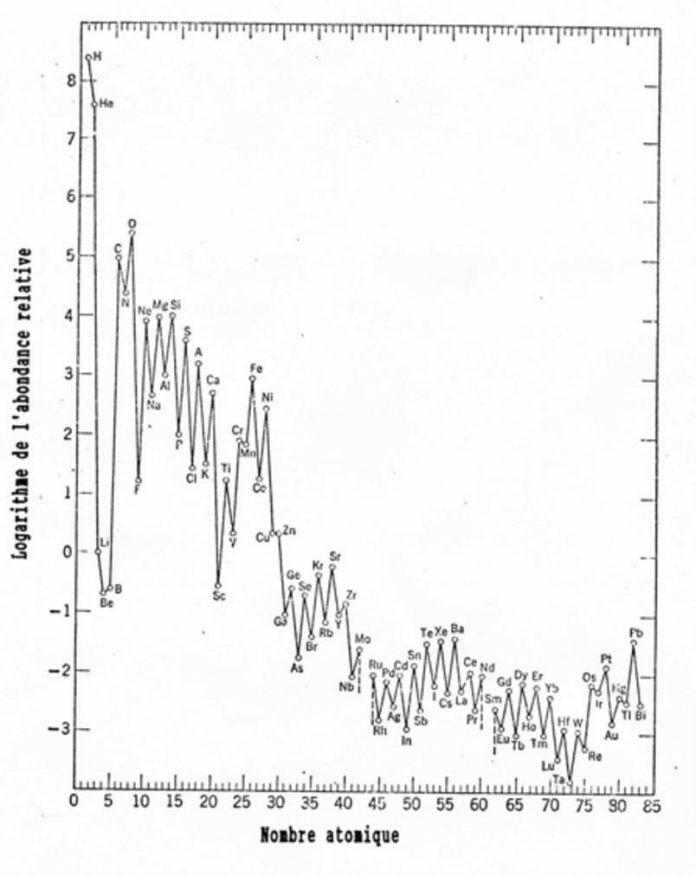
Composition des éléments de l'Univers

Éléments	No Atomes (%)	Masse (%)
Hydrogène	92,7	73,9
Hélium	7,18	24
Les autres	0,12	2,1

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

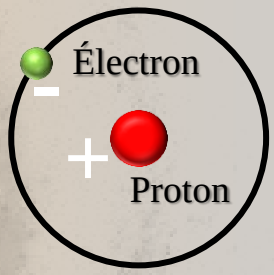
- **Gaz neutre atomique (Régions HI).**
  - Surtout fait d' $^{1}_{1}H$

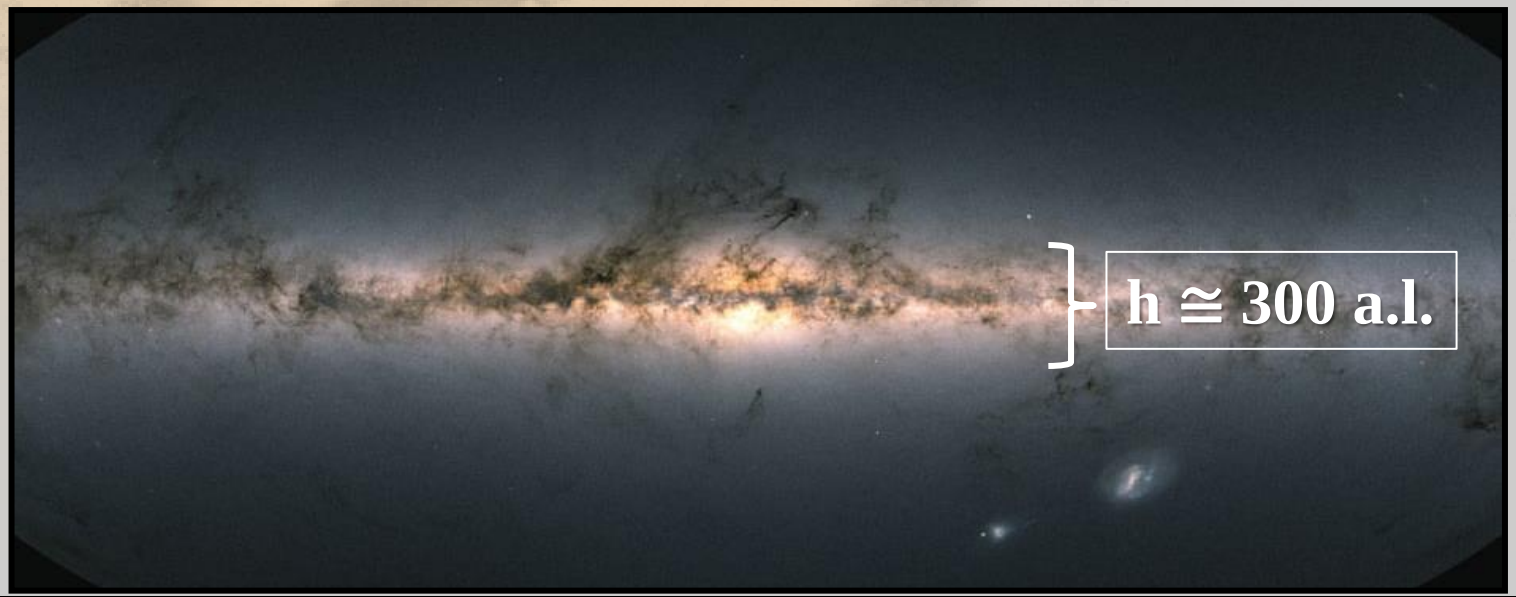




DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

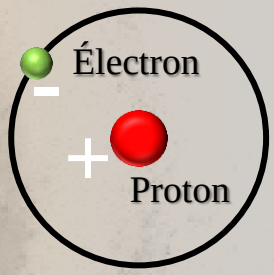
- **Gaz neutre atomique.**
  - Surtout fait d' $^{1}_{1}H$
  - Ces atomes neutres sont dispersés dans le disque de la Voie lactée.





DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Gaz neutre atomique.**

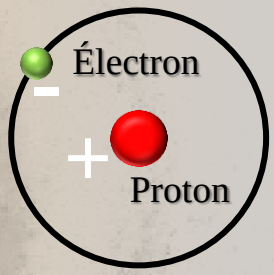


  - Surtout fait d' ${}^{1}_{1}H$
  - Ces atomes neutres sont dispersés dans le disque de la Voie lactée.
  - De manière inhomogène.
    - La densité varie de 0,1 à 1 000 atomes • cm^{-3}.
    - La température varie de 10 à 8 000 K. Le gaz est "chauffé" par la lumière des étoiles.

La température de fond de l'Univers est de **2,7** K

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

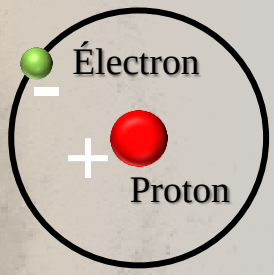
- **Gaz neutre atomique.**



  - Surtout fait d' ${}^{1}_{1}H$
  - Ces atomes neutres sont dispersés dans le disque de la Voie lactée.
  - De manière inhomogène.
    - La densité varie de 0,1 à 1 000 atomes • cm^{-3}.
    - La température varie de 10 à 8 000 K. Le gaz est "chauffé" par la lumière des étoiles.
  - Le gaz neutre atomique forme **50-75** % de toute la matière interstellaire.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

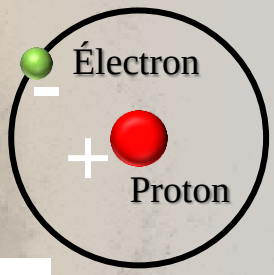
- **Gaz neutre atomique.**

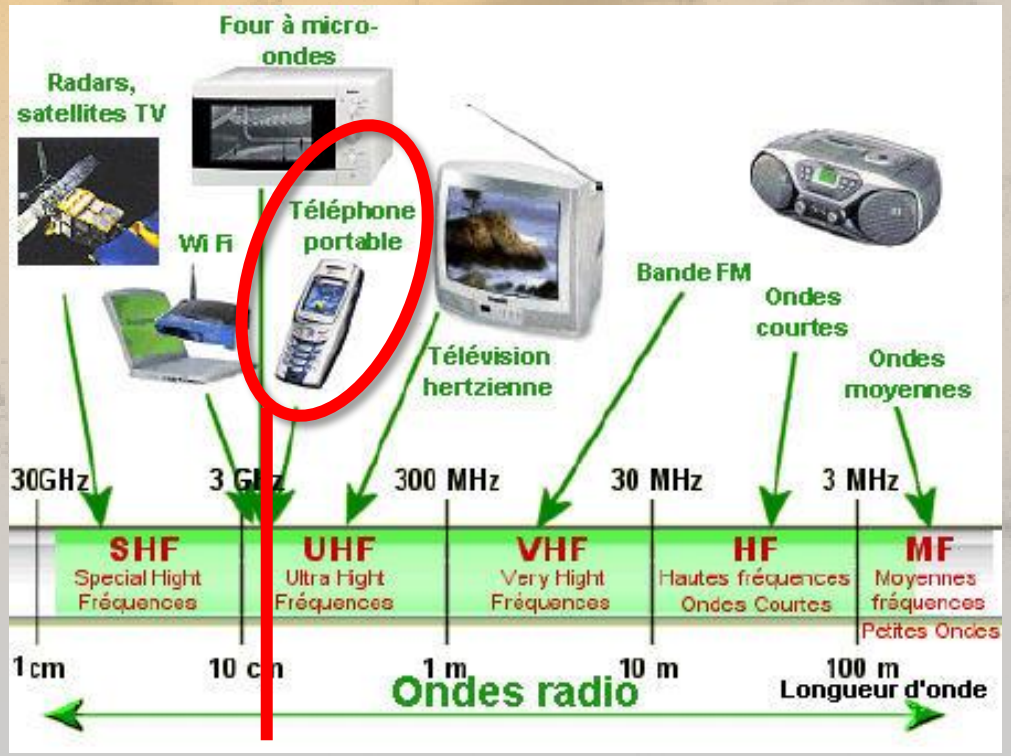


  - Surtout fait d' $^{1}_{1}H$
  - Ces gaz sont transparents en lumière visible.
    - Ils sont trop froids pour émettre des radiations où $\lambda <$ que les micro-ondes.
  - On peut "***voir***" $^{1}_{1}H$ à cette température par la raie à 21 cm du spectre électromagnétique, détectable par les radiotélescopes posés sur terre.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

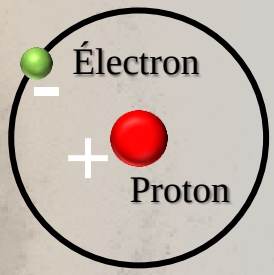
- Gaz neutre atomique.
  - La raie à 21 cm.

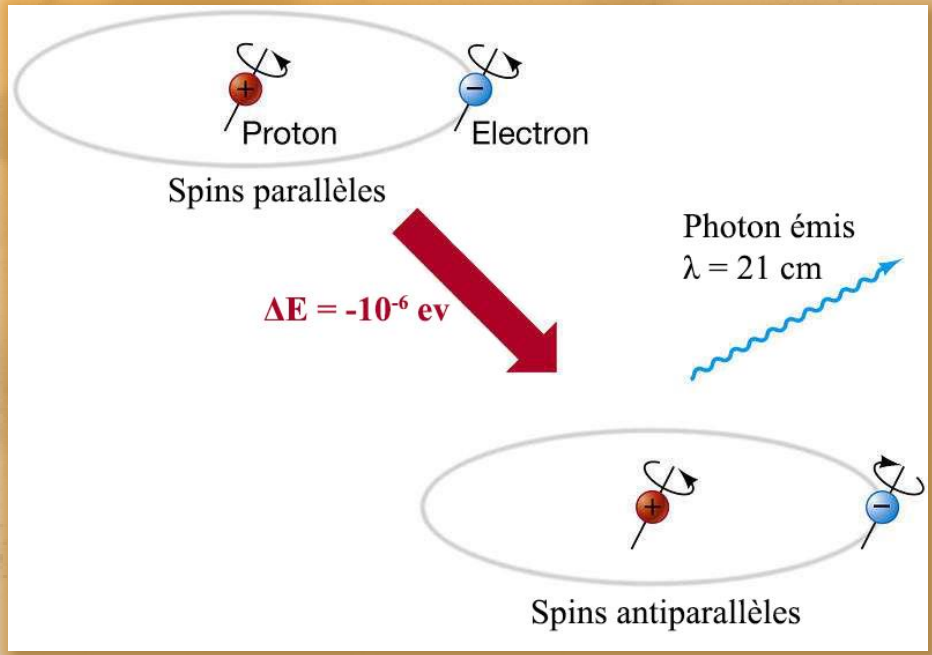




DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

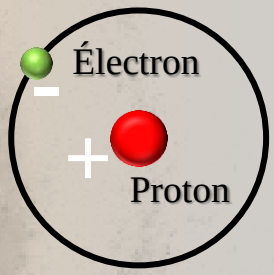
- **Gaz neutre atomique.**
  - La raie à 21 cm.
    - Reliée à la structure hyperfine de l'atome ${}^{1}_{1}H$.





DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Gaz neutre atomique.**
  - La **raie à 21 cm.**
    - **Reliée à la structure hyperfine de l'atome $^{1}_{1}H$.**
    - Un atome $^{1}_{1}H$ s'excite lors de collisions avec un autre atome ou un électron.
      - Cet événement peut prendre plusieurs siècles à survenir.
    - Puis, il peut prendre jusqu'à 10 millions d'années avant de revenir à son état fondamental.



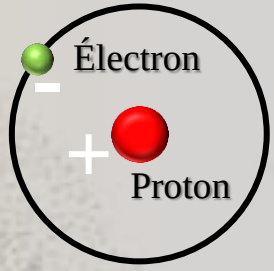
DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- On retrouve dans le milieu interstellaire de notre galaxie :
  1. ***Gaz*** qui peuvent être :
     - ✓ Atomiques
     - ✓ Ionisés
     - ✓ Moléculaires
       - Simples
       - Complexes

     99 % de la masse de la matière interstellaire
  2. ***Poussières*** **cosmiques** **1 % de la masse**
  3. ***Rayonnement*** électromagnétique

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- Gaz ionisé des régions HII.



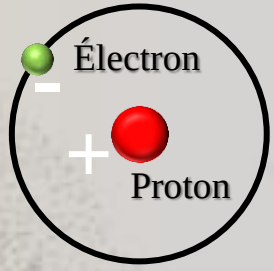
DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- Gaz ionisé des régions HII.
  - Teinte rouge de la raie Hα de ${}^{1}_{1}H$

NGC 7000
Luc Bellavance

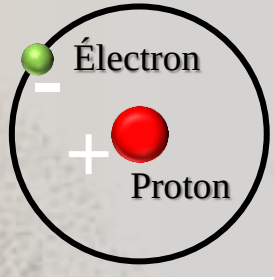
DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

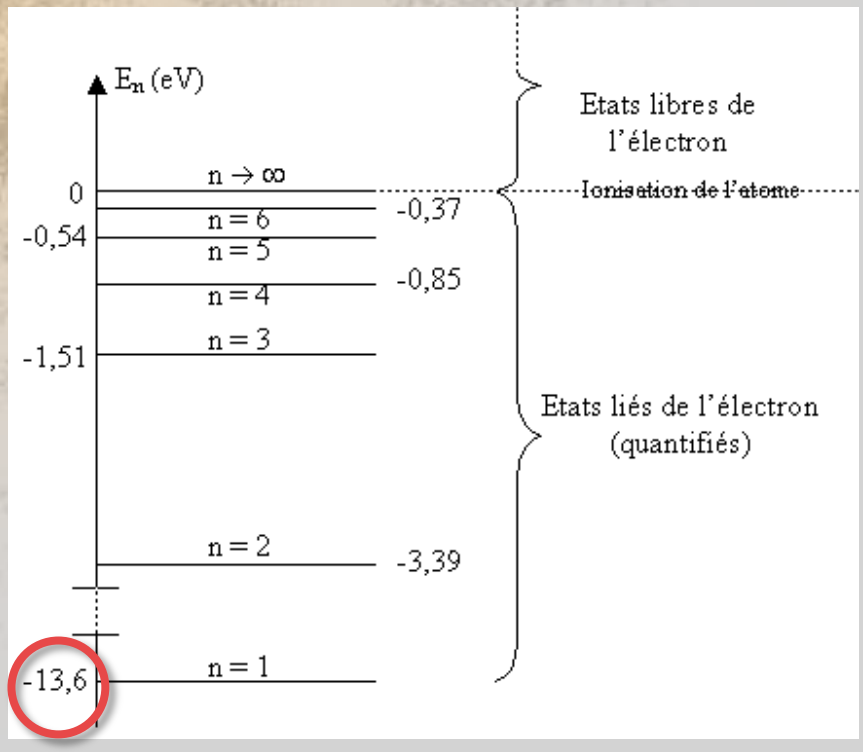
- **Gaz ionisé des régions HII.**
  - **Teinte rouge de la raie Hα de $^{1}_{1}H$**
  - Ces régions gazeuses côtoient des étoiles massives et chaudes qui irradient amplement dans l'ultraviolet.



DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

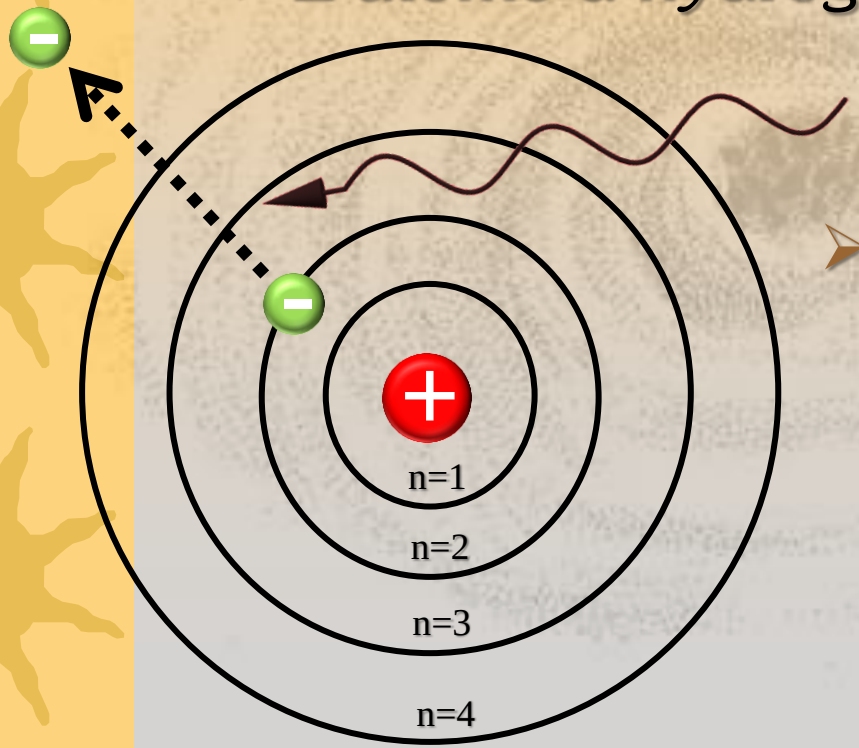
- **Gaz ionisé des régions HII.**
  - Ces photos peuvent être assez énergétiques ($\geq$ 13,6 eV) pour ioniser $^{1}_{1}H$.





DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN

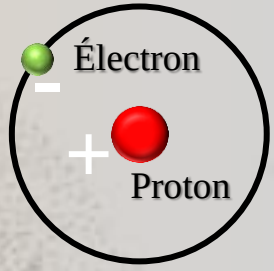
- L'atome et les couches électroniques :
  - L'atome d'hydrogène $^{1}_{1}H$ (modèle de Bohr)



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

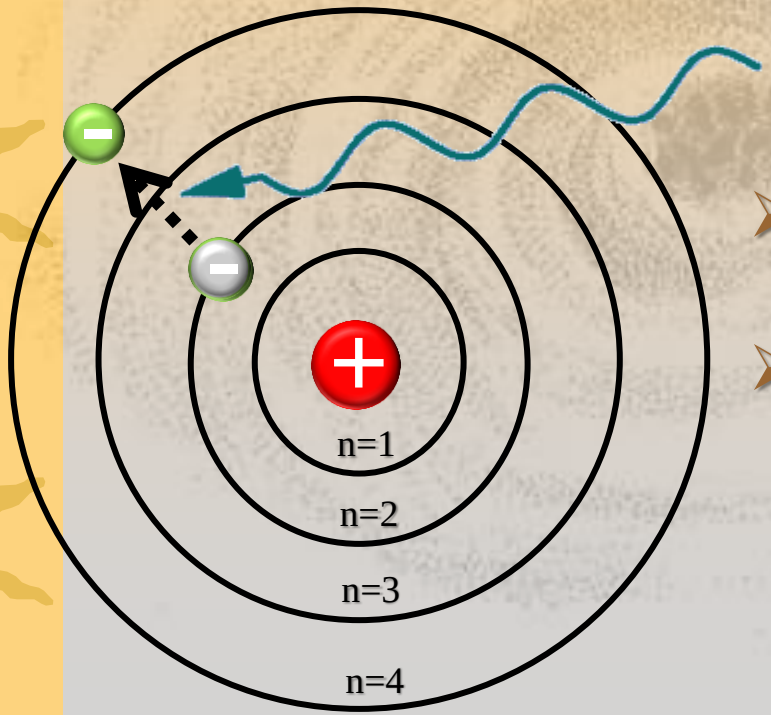
DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Gaz ionisé des régions HII.**
  - **Teinte rouge de la raie Hα de $^{1}_{1}H$**
  - Ces régions gazeuses côtoient des étoiles massives et chaudes qui irradient amplement dans l'ultraviolet.
  - Ces photos sont assez énergétiques ($\geq$ 13,6 ev) pour ioniser $^{1}_{1}H$.
  - Cependant, des photons de plus faible énergie ne provoquent que des sauts de niveau orbital de l'électron.



DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN

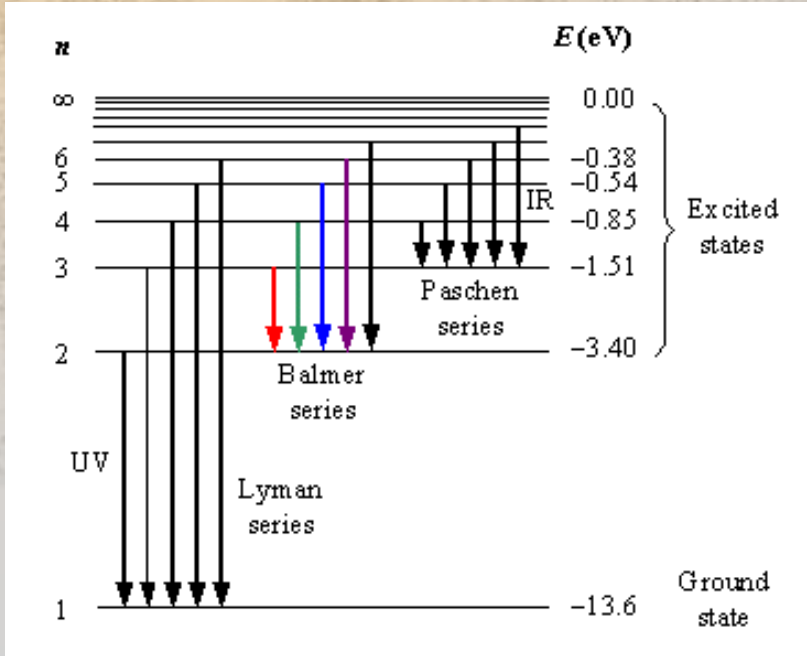
- L'atome et les couches électroniques :
  - L'atome d'hydrogène $^{1}_{1}H$ (modèle de Bohr)



- Un photon incident peut ⬆ le niveau d'excitation de l'électron
- L'électron *excité* tend à revenir spontanément à son niveau de base fondamental en émettant un photon d'énergie déterminé.

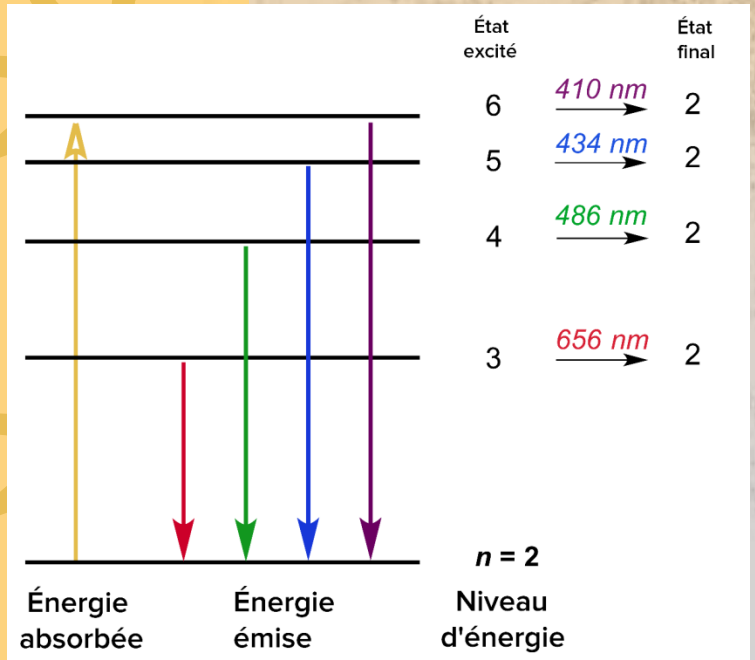
DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN

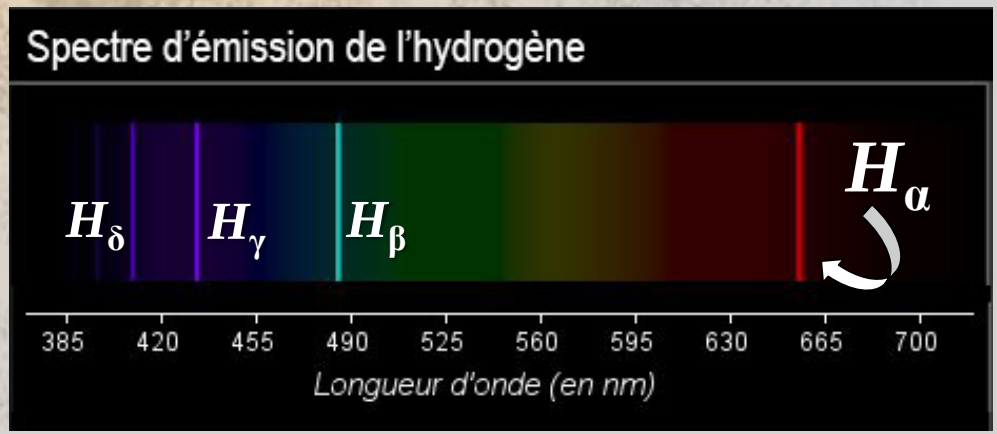
- L'atome et les couches électroniques :
  - L'atome d'hydrogène $^{1}_{1}H$ (modèle de Bohr)
    - Le spectre de l'hydrogène



DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN

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





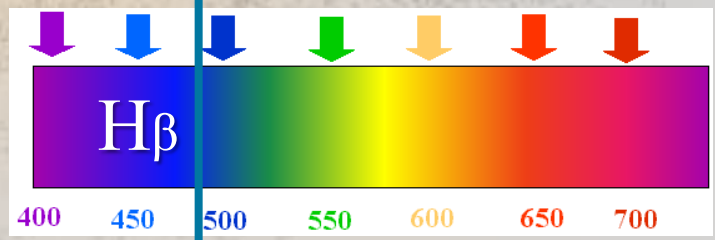
Série de Balmer

LES NIVEAUX ÉLECTRONIQUES

Hβ

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

$$\Delta E = \hbar\nu = 2{,}54 \text{ eV}$$



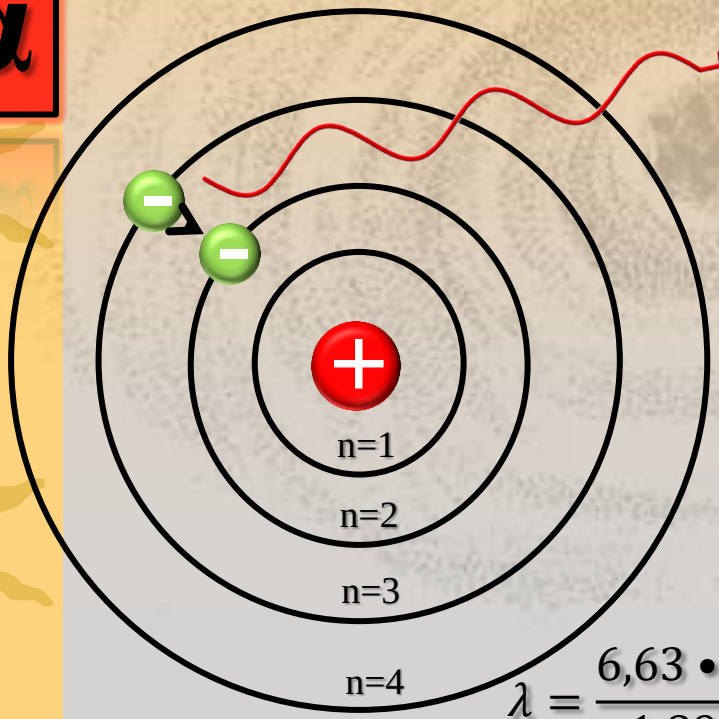
486 nm

$$\lambda = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} J \cdot s \times 3 \cdot 10^{8} m \cdot s^{-1}}{2{,}54\ eV \times 1{,}60 \cdot 10^{-19} J \cdot eV^{-1}} = \mathbf{4{,}86 \cdot 10^{-7} m}$$

LES NIVEAUX ÉLECTRONIQUES

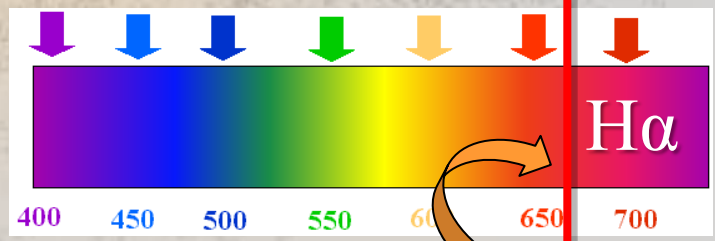
Hα

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



photon

$$\Delta E = \hbar\nu = 1{,}89 \text{ eV}$$

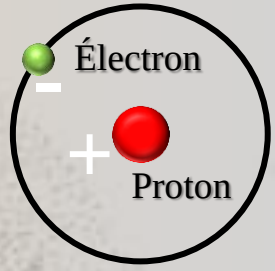


656 nm

$$\lambda = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} J \cdot s \times 3 \cdot 10^{8} m \cdot s^{-1}}{1{,}89\ eV \times 1{,}60 \cdot 10^{-19} J \cdot eV^{-1}} = \mathbf{6{,}56 \cdot 10^{-7} m}$$

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Gaz ionisé des régions HII.**
  - **Teinte rouge de la raie Hα de $^{1}_{1}H$**
  - Le processus de conversion de l'irradiation ultraviolette en lumière visible se nomme "*fluorescence*".



DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Gaz ionisé des régions HII.**
  - Densité varie de 1 à 10^4 atomes • cm^{-3}.
  - Température ≅ 10 000 K
  - Les régions HII comptent pour ≈ 1 % de la matière interstellaire.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- Gaz ionisés ultra chauds.

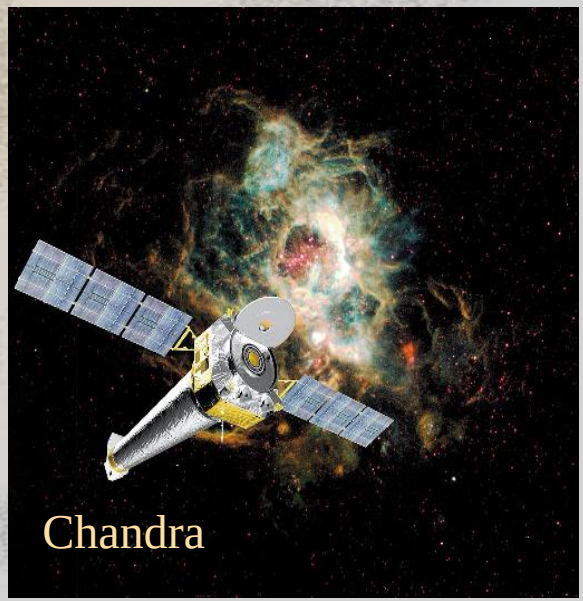
DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Gaz ionisés ultra chauds.**
  - On les trouve dans les rémanents de **supernovæ**.

NGC 6960
Patrick Dubé

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Gaz ionisés ultra chauds.**
  - On les trouve dans les rémanents de **supernovæ**.
    - Ces régions ne sont pas toujours décelables dans le spectre du visible.
    - On les ***voit*** dans le domaine des ultraviolets ou des rayons-X avec des observatoires supra atmosphériques.



DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Gaz ionisés ultra chauds.**
  - On les trouve dans les rémanents de **supernovæ**.
    - Ces régions atteignent des T° ≥ 1 000 000 K
    - Le gaz est sous forme de plasma.
    - L'énergie des photons peut produire de O^{-5} (de l'oxygène ionisé 5 fois).
    - Leur densité est de 0,006 particule • cm^{-3}.
    - Leur masse galactique = ?

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

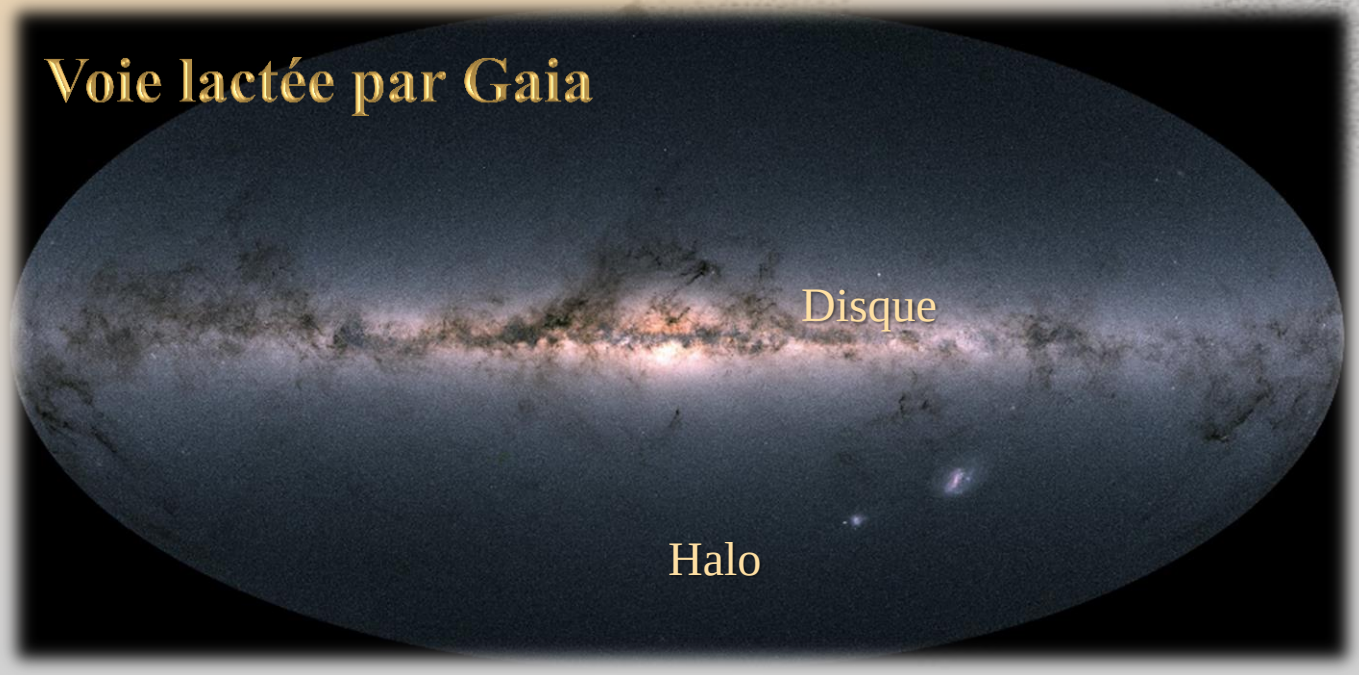
- **Gaz ionisés ultra chauds.**
  - On les trouve dans les rémanents de **supernovæ**.
    - La vitesse de déplacement de ces gaz peut atteindre 30 % de la vitesse de la lumière.
    - Ils causent de la **turbulence** dans les milieux avoisinants.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Gaz ionisés ultra chauds**.
  - On les trouve dans les rémanents de **supernovæ**.
    - On estime qu'une supernova explose dans notre galaxie
      q̄ 100 ans.
    - Les chocs causés par ces explosions balaient tout point de la galaxie une fois aux quelques millions d'années.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Gaz ionisés ultra chauds.**
  - On trouve aussi ce plasma hautement énergétique dans le halo galactique.



DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Gaz ionisés ultra chauds.**
  - On trouve aussi ce plasma hautement énergétique dans le halo galactique.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- On retrouve dans le milieu interstellaire de notre galaxie :
  1. ***Gaz*** qui peuvent être :
     - ✓ Atomiques
     - ✓ Ionisés
     - ✓ **Moléculaires**
       - Simples
       - Complexes

     99 % de la masse de la matière interstellaire
  2. ***Poussières*** **cosmiques** **1 % de la masse**
  3. ***Rayonnement*** électromagnétique

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- Nuages gazeux moléculaires.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- Nuages gazeux moléculaires.

IC 434
Luc Bellavance

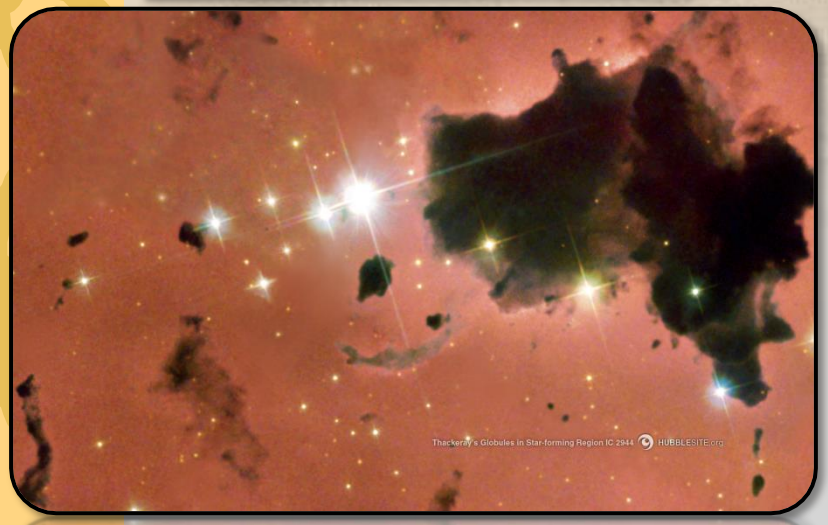
DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

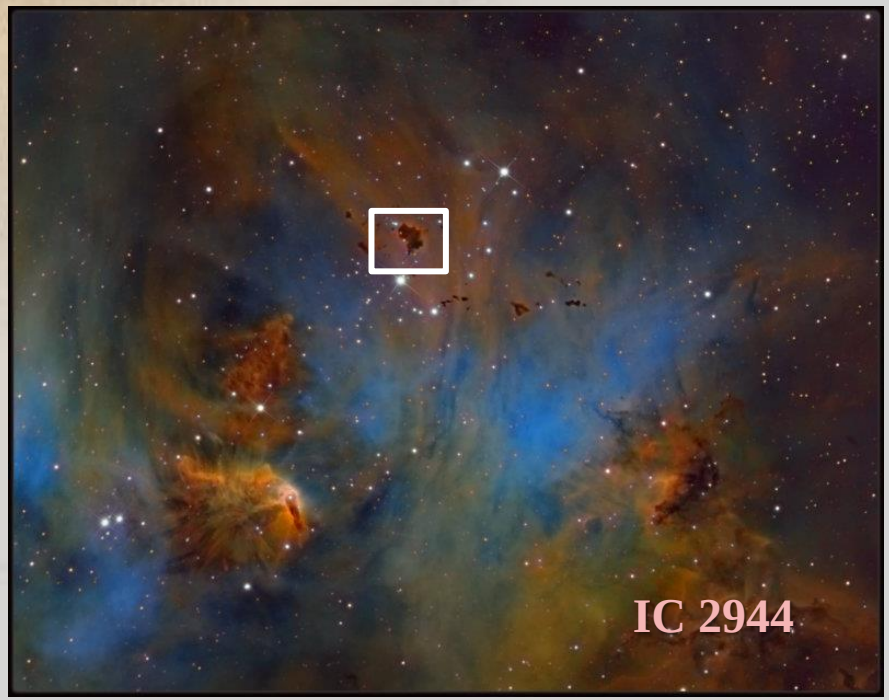
- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Ils se situent à ± 125 a.l. du plan de la galaxie.
  - Densité de 10^2 à 10^4 molécules • cm^{-3}.
  - T froide 10 à 100 K.
  - Ils forment 1% du milieu interstellaire, mais 20 à 30% de la masse gazeuse de la Voie lactée.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Leur taille varie :
    - Petits ou minuscules ➡ 0,3 à 1 a.l. (10 à 50 $M_{\odot}$)

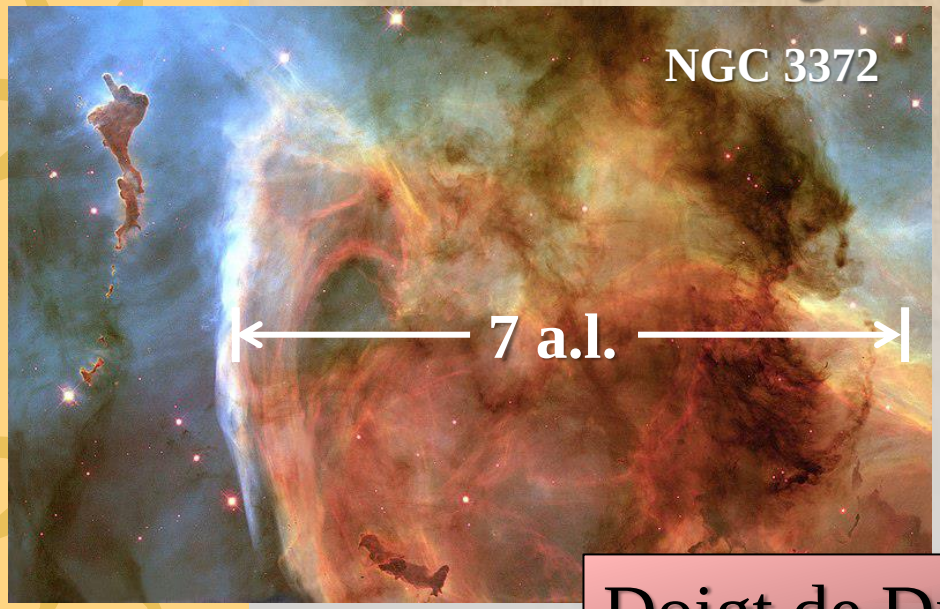
Globules de Bok





DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

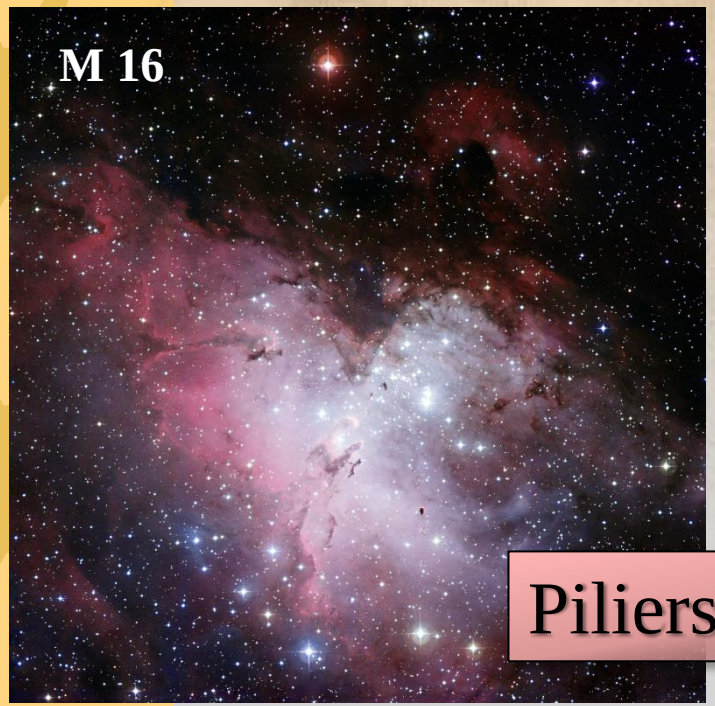
- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Leur taille varie :
    - Grands ou géants ➡ 15 à 600 a.l. (10^3 à 10^6 $M_\odot$)

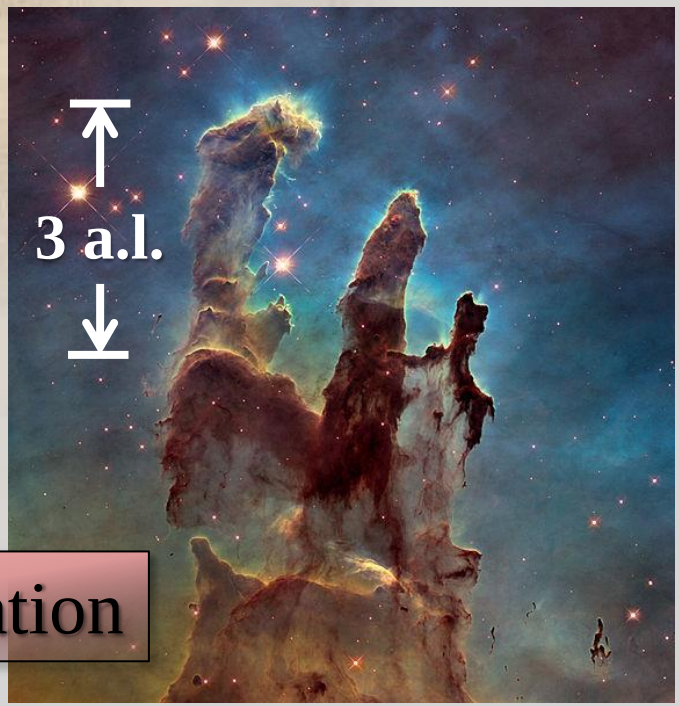


Doigt de Dieu

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Leur taille varie :
    - Grands ou géants ➡ 15 à 600 a.l. (10^3 à 10^6 $M_\odot$)





Piliers de la création

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Ils apparaissent sombres, vides.

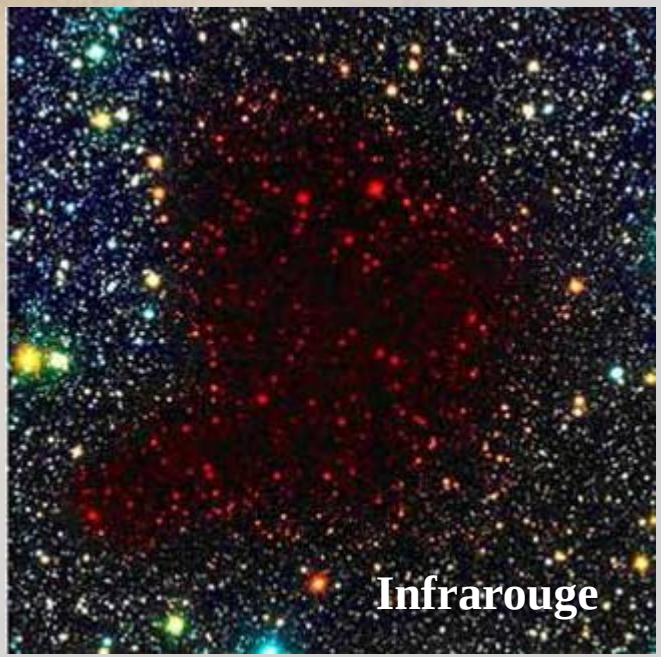
DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Nuages gazeux moléculaires**.
  - Ils bloquent les λ du domaine visible et apparaissent comme des zones sombres dans la Voie lactée.
  - Ils sont le plus souvent associés à des **poussières cosmiques** qui les protègent des rayons UV provenant des étoiles…
  - …ainsi, des molécules peuvent se former et persister.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Leur opacité laisse cependant filtrer les infrarouges auxquels ils sont ± transparents.

Barnard 68



DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

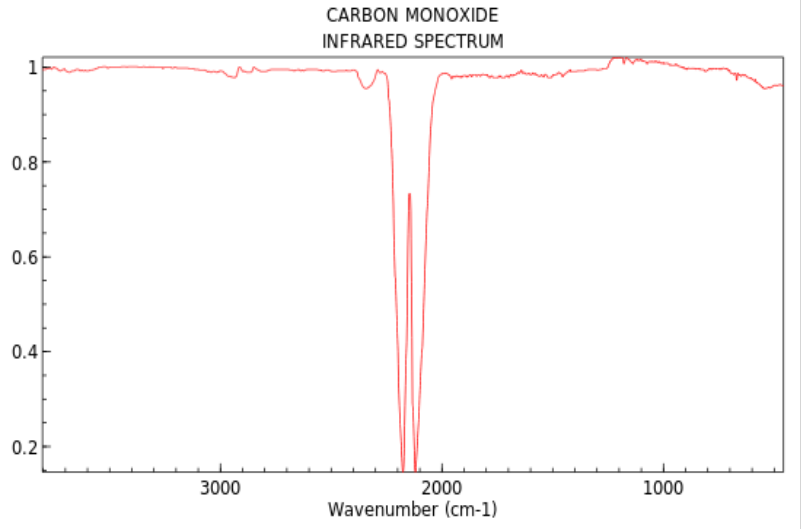
- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Leur opacité laisse cependant filtrer les infrarouges auxquels ils sont ± transparents.
  - Ils peuvent être étudiés par des observatoires supra atmosphériques comme le satellite Spitzer

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - La vibration et la rotation des atomes dans les molécules laissent des empreintes spectrales caractéristiques qui permettent l'identification.
  - Ces λ sont du domaine de l'**infrarouge** et des **ondes radio**.
  - La recherche spectroscopique en laboratoire terrestre fournit des modèles qui autorisent des comparaisons.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

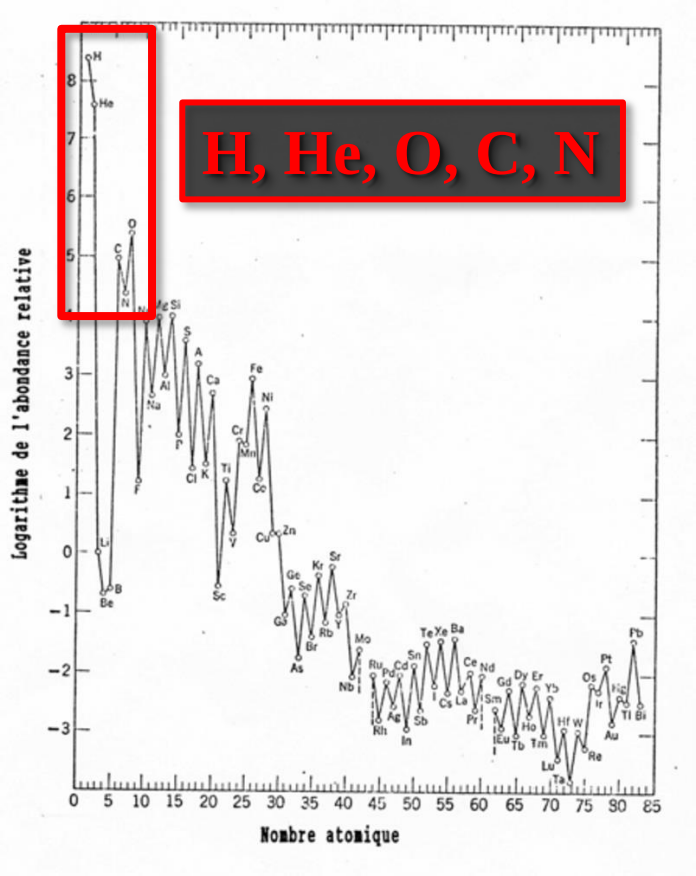
- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - La molécule la plus abondante est H_2, mais elle est trop froide pour émettre du rayonnement.
  - Par contre CO est aussi très abondant et il est l'outil de préférence pour étudier ces régions.



DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Les molécules :

Rappel de l'abondance des élément chimiques du milieu interstellaire



DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Les **molécules :**
    - On trouve surtout des combinaisons d'hydrogène, de carbone, d'oxygène et d'azote.
    - L'hélium ne forme pas de combinaisons chimiques.

DE QU

- **Nuages**
  - Les mol

> 200 molécules différentes ont été identifiées dans le milieu interstellaire.

Molécules du milieu interstellaire

composés hydrogénés					
H_2	HD	H_3^+	H_2D^+		
composés contenant uniquement de l'hydrogène et du carbone					
CH CH_3 H_2CCC (lin) *HC_4H CH_3C_4H	CH^+ C_2H_2 C_4H CH_3CCH C_8H	C_2 C_3H (lin) *C_5 C_6H *C_6H_6	CH_2 c-C_3H *C_2H_4 H_2C_6	CCH CH_4 C_5H *HC_6H	C_3 c-C_3H_2 H_2C_4 (lin) C_7H
composés contenant de l'hydrogène, de l'oxygène et du carbone (éventuellement)					
OH HOC^+ C_3O HC_2CHO CH_3COOH	CO C_2O CH_2CO C_5O CH_3OCH_3	CO^+ CO_2 HCOOH CH_3CHO CH_3CH_2OH	H_2O H_3O^+ H_2COH^+ c-C_2H_4O $(CH_3)_2CO$	HCO $HOCO^+$ CH_3OH CH_3OCHO $(C_2H_5)_2O$?	HCO^+ H_2CO CH_2CHOH CH_2OHCHO
composés contenant de l'azote, de l'hydrogène et/ou du carbone (éventuellement)					
NH NH_3 CH_2NH CH_3NC CH_3C_3N	CN $HCNH^+$ HC_3N HC_3NH^+ CH_3CH_2CN	NH_2 H_2CN HC_2NC C_5N HC_7N	HCN HCCN NH_2CN CH_3NH_2 CH_3C_5N	HNC C_3N C_3NH CH_2CHCN HC_9N	N_2H^+ CH_2CN CH_3CN HC_5N $HC_{11}N$
composés contenant de l'azote, de l'oxygène, de l'hydrogène et du carbone (éventuellement)					
NO	HNO	N_2O	HNCO	NH_2CHO	NH_2CH_2COOH?
autres espèces					
SH *SiC *AlCl H_2S *SiCN *NaCN	CS SiN *KCl C_2S *MgCN *SiC_3	SO SiO HF SO_2 *MgNC *SiH_4	SO^+ SiS *AlF OCS H_2CS *SiC_4	NS HCl *CP HCS^+ HNCS CH_3SH	SiH *NaCl PN *c-SiC_2 C_3S C_5S

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Les molécules :

Quelques molécules intéressantes du milieu interstellaire

Nom	Formule	Usage
Ammoniaque	NH_3	Nettoyant domestique
Formaldéhyde	H_2CO	Biocide et fixateur
Acétylène	HC_2H	Chalumeau, soudure
Acide acétique	$C_2H_2O_4$	Vinaigre
Alcool éthylique	CH_3CH_2OH	Fêtes de Noël
Éthylène glycol	$HOCH_2CH_2OH$	Antigel
Benzène	C_6H_6	Vernis, teintures, etc.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

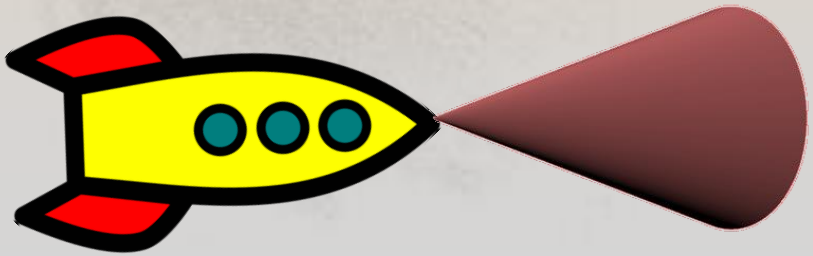
- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Les **molécules :**
    - Pour apaiser les longs ennuis des voyages interstellaires ➡ **Éthanol** (C_2H_5OH)
    - On trouve 1 molécule par m^3 dans ces nuages…
    - Les plus vastes peuvent fournir 10^{28} bouteilles de spiritueux !

Mais armez vous de patience

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Les **molécules :**
    - Pour apaiser les longs ennuis des voyages interstellaires ➡ **Éthanol** (C_2H_5OH)

- Un véhicule spatial équipé d'un entonnoir de 1 km de diamètre qui voyage à la vitesse **c** mettra 1 000 ans pour remplir une simple coupe comme celle-ci…



DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

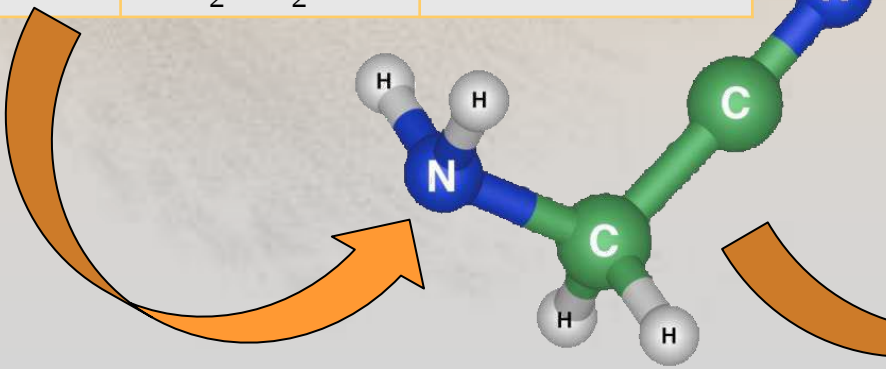
- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Et la vie là-dedans ? Pourquoi pas !
  - La chimie de la vie (biochimie) n'a rien d'unique ou d'exceptionnel.
  - Elle est essentiellement faite des 4 éléments les plus abondants de l'Univers, hormis He :
    - **C** pour **carbone**
    - **H** pour **hydrogène**
    - **N** pour **nitrogen** (En) ou azote (Fr)
    - **O** pour **oxygène**

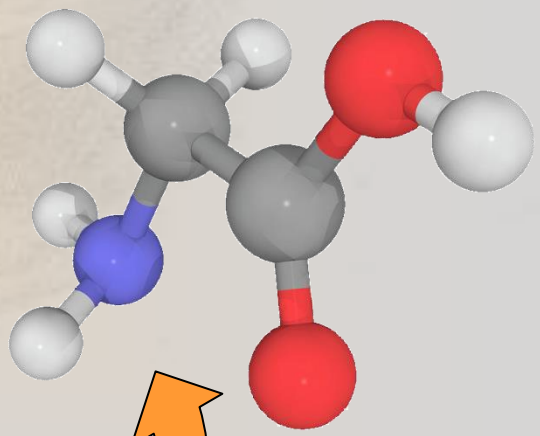
CHNO

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Et la vie là-dedans ? Pourquoi pas !

Molécule	Formule	Précurseur de
Radical amine	NH_2	Acides aminés
Cyanoacetylène	HC_3N	Acides aminés
Acetaldehyde	CH_3CHO	Acides aminés
Aminoacétonitrile	NH_2CH_2CN	Acides aminés





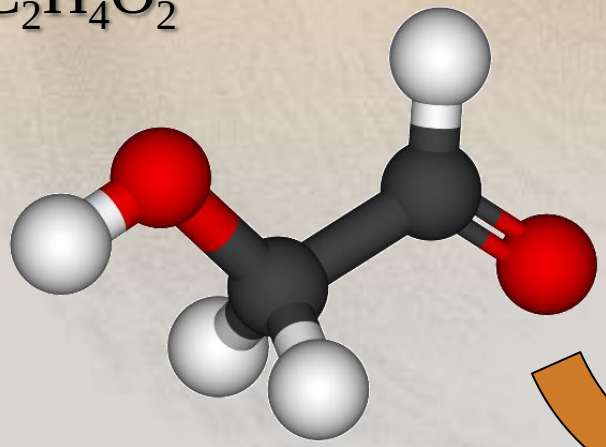
Glycine

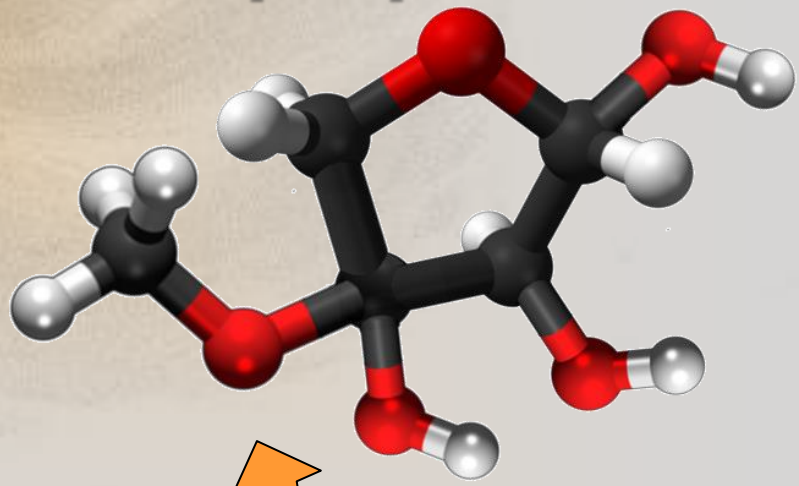
DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Nuages gazeux moléculaires.**
  - Et la vie là-dedans ? Pourquoi pas !

Glycolaldehyde

$C_2H_4O_2$





Ribose

ARN

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- On retrouve dans le milieu interstellaire de notre galaxie :
  1. ***Gaz*** qui peuvent être :
     - ✓ Atomiques
     - ✓ Ionisés
     - ✓ Moléculaires
       - Simples
       - Complexes

     99 % de la masse de la matière interstellaire
  2. ***Poussières*** **cosmiques** — **1 % de la masse**
  3. ***Rayonnement*** électromagnétique

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- Poussières interstellaires.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- Poussières interstellaires.

IC 2118
Luc Bellavance

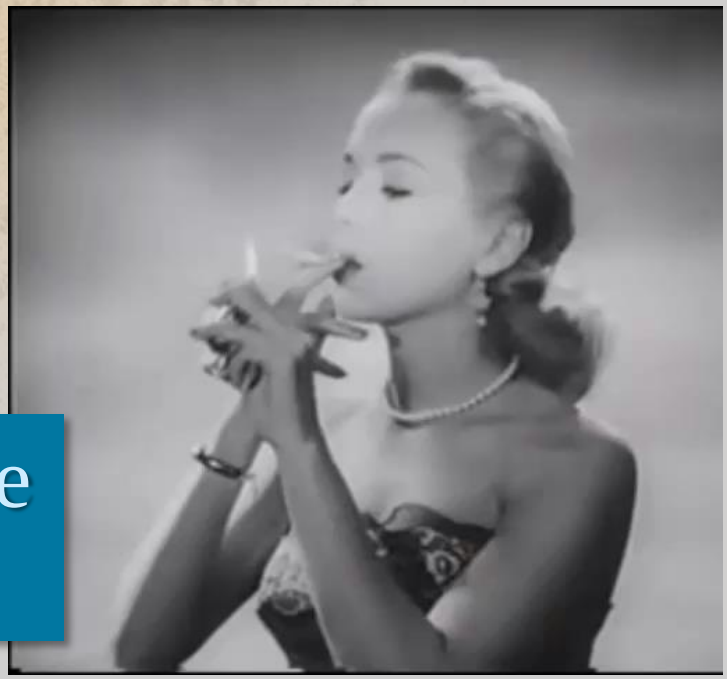
DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- Poussières interstellaires.

IC 2118
Luc Bellavance

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Poussières interstellaires.**
  - Forment 1% des "*particules*" interstellaires.
  - Elles sont entremêlées aux gaz moléculaires.
  - Leur taille est le plus souvent < 1 μm, mais peuvent atteindre 25 μm.



Comme la fumée de cigarette

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Poussières interstellaires.**
  - Leur densité est faible, parfois seulement 10^{-6} grain • m^{-3}, chacun ayant une masse de 10^{-17} kg.
  - Ils diffusent la lumière dans le domaine du spectre visible, comme le fait l'atmosphère terrestre.
    - Courtes λ plus affectées que les longues.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- Poussières interstellaires.

  - Courtes λ plus affectées que les longues.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

NGC 7023
Patrick Dubé

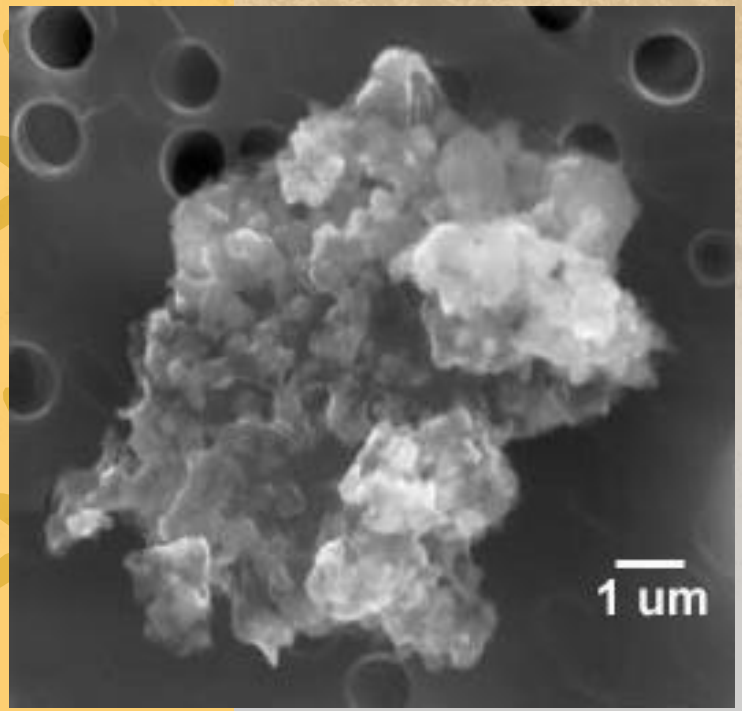
- Courtes λ plus affectées que les longues.

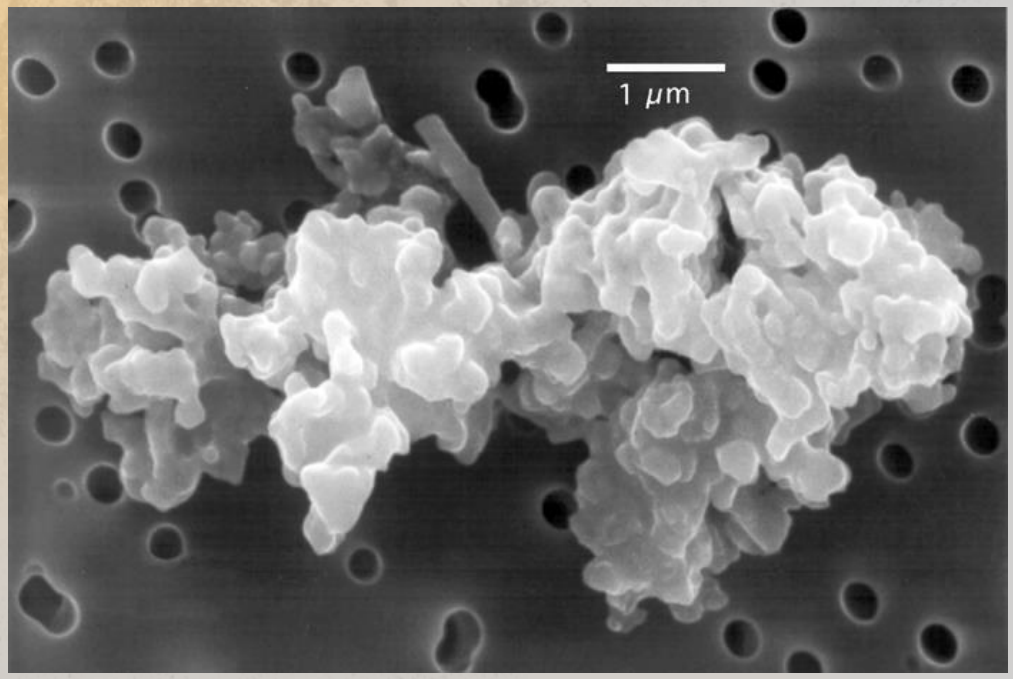
DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Poussières interstellaires.**
  - Leur densité est faible, parfois seulement 10^{-6} grain • m^{-3}, chacun ayant une masse de 10^{-17} kg.
  - Ils diffusent la lumière dans le domaine du spectre visible, comme le fait l'atmosphère terrestre.
    - Courtes λ > que les longues.
  - Elles réduisent la lumière visible transmise de 50 % par 1 000 a.l. (atténuent les étoiles).

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Poussières interstellaires.**
  - Structure :

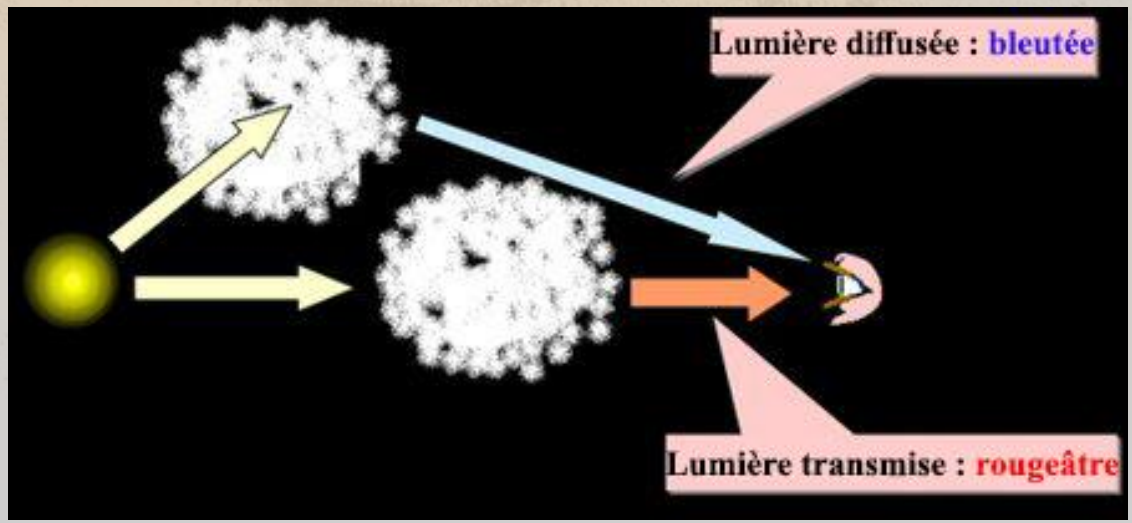




Gros grains

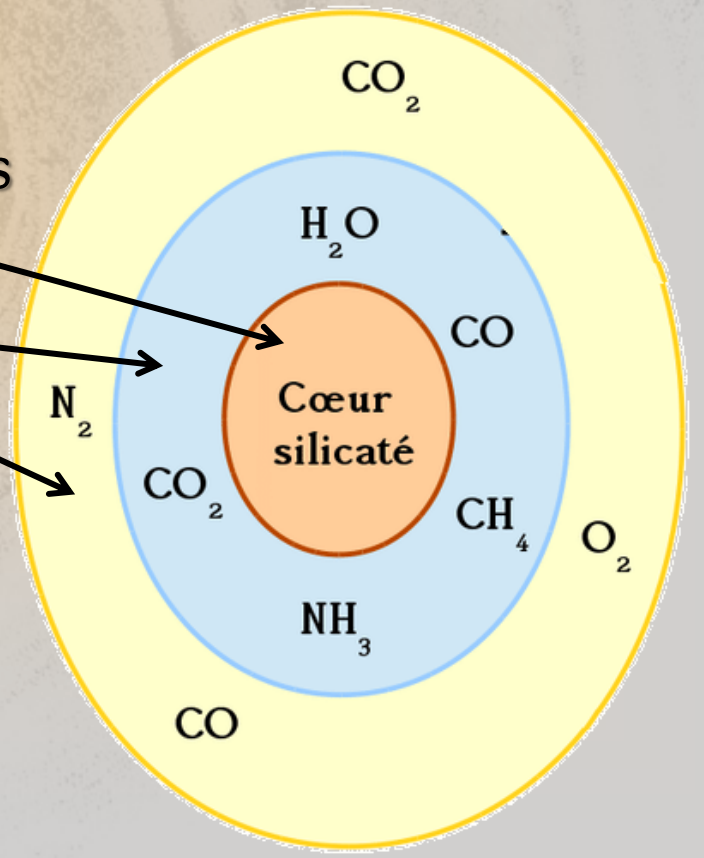
DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Poussières interstellaires.**
  - Ils diffusent la lumière dans le domaine du spectre visible, comme le fait l'atmosphère terrestre.
    - Courtes λ > que les longues.



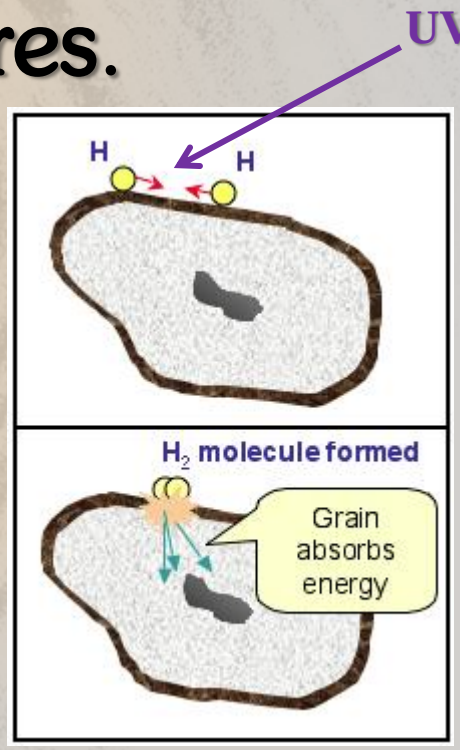
DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

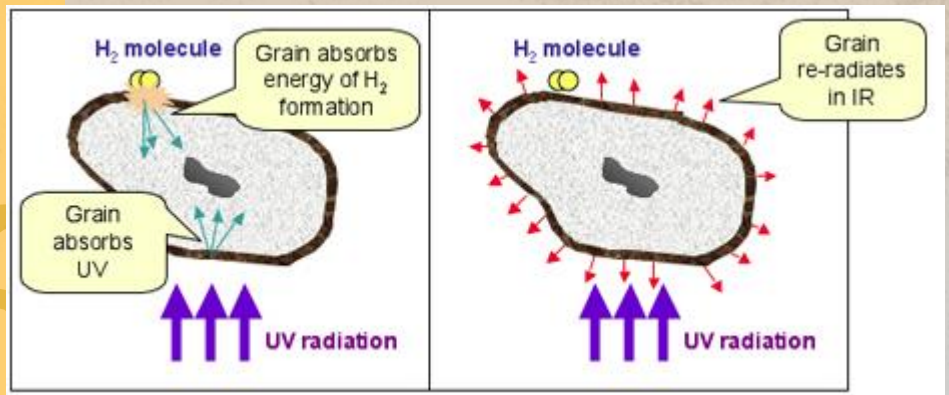
- **Poussières interstellaires.**
  - Structure :
    - Cœur de silicates ou carbonates
    - Glace polaire
    - Glace apolaire



DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

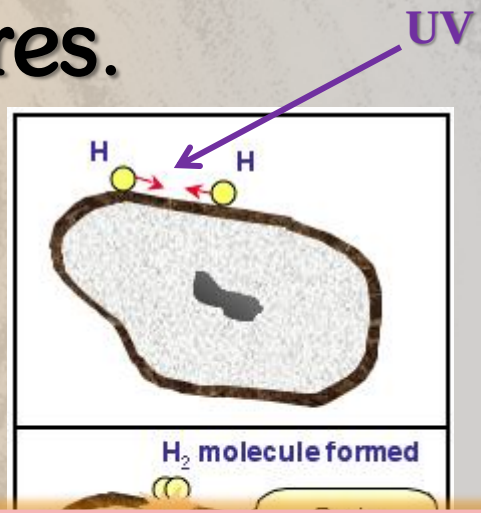
- **Poussières interstellaires.**
  - Structure :
    - Les grains sont des **catalyseurs** de réactions chimiques.





DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Poussières interstellaires.**
  - Structure :
    - Les grains sont des **catalyseurs** de réactions chimiques.

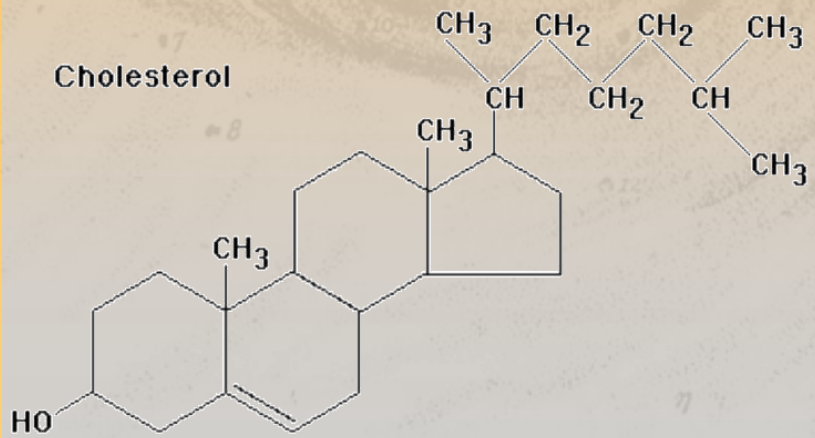


Les grains servent de support bidimensionnel au rapprochement et à la création de lien chimiques qui n'auraient pas lieu autrement et qui enrichissent le milieu interstellaire de molécules complexes.

DE QUOI LE VIDE EST-IL PLEIN ?

- **Poussières interstellaires.**
  - Structure :
    - Ils sont le siège d'une chimie complexe.

Cholesterol

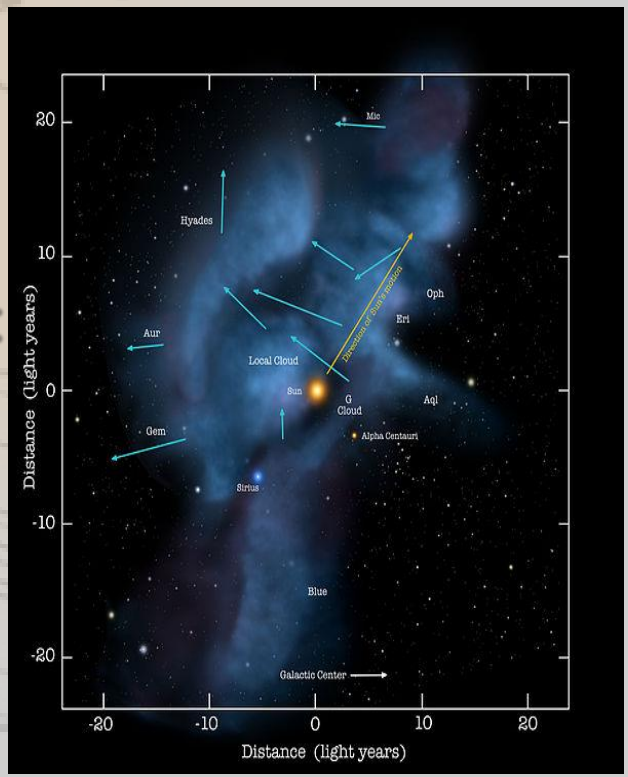


Hydrocarbures aromatiques polycycliques

Composé chimique		Composé chimique	
Anthracène		Benzo[a]pyrène	
Chrysène		Coronène	
Corannulène		Tétracène	
Naphtalène		Pentacène	
Phénanthrène		Pyrène	
Triphénylène		Ovalène	

L'ENVIRONNEMENT QUI EST LE NÔTRE

- **La Peluche locale.**
  - Le Système solaire transite depuis ≈ 50 000 ans à travers une zone de la galaxie qui a les caractéristiques suivantes :
    - Taille de 30 à 40 a.l.
    - T° = 7 000 K
    - Densité de 0,26 atome/cm^3



L'ENVIRONNEMENT QUI EST LE NÔTRE

- **L'*homéostasie* cosmique locale.**
  - Le milieu interstellaire est inhomogène d'un endroit à l'autre de notre galaxie.

La Voie Lactée

Bras de Persée

Système Solaire

Bras d'Orion

~100.000 Années-Lumière

Bras du Sagittaire

Bras Règle-Cygne

Bras du Centaure

L'ENVIRONNEMENT QUI EST LE NÔTRE

La Voie Lactée

Bras de Persée

Système Solaire

Bras d'Orion

~100.000 Années-Lumière

- L'*homéostasie* cosmique locale.
  - Le milieu interstellaire est inhomogène d'un endroit à l'autre de notre galaxie.
  - Au cours de ses pérégrinations dans la Voie lactée, le Système solaire traverse des milieux aux propriétés physico-chimiques variés.

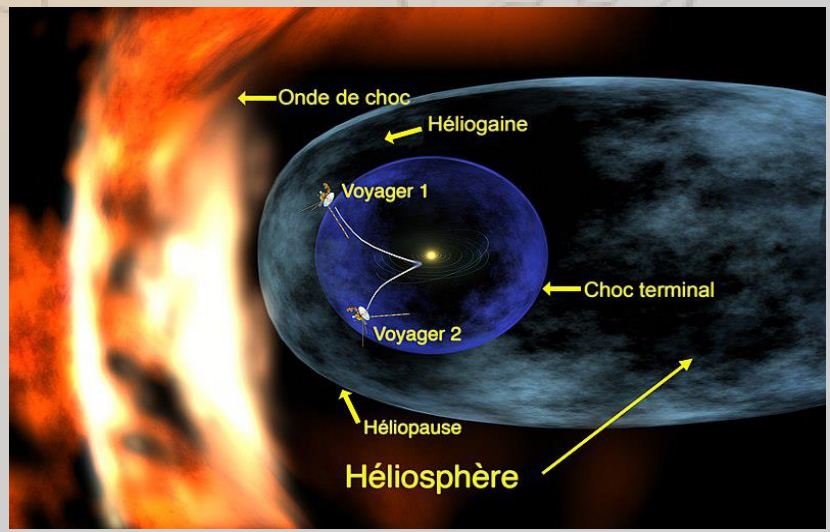
Bras du Sagittaire

Bras Règle-Cygne

Bras du Centaure

L'ENVIRONNEMENT QUI EST LE NÔTRE

- L'*homéostasie* cosmique locale.
  - L'héliosphère aux limites fluctuantes (~120 UA) s'étend bien au-delà de l'orbite de Neptune et maintien autour de nous un espace relativement constant.
  - Elle aplanit les risques des milieux changeants et imprévisibles.



MESSAGES CLÉS

- Le milieu interstellaire s'étend de la limite des astrosphères aux confins flous et évanescents des marges galactiques.
- Il contient des gaz dans des états variés (ionisés ou plasmatiques, atomiques et moléculaires) et des poussières cosmiques dans des concentration variables au sein de milieux hétérogènes.
- Dans sa course autour du centre de la galaxie, le Système solaire traverse ces différents espaces.
- L'héliosphère assure l'homéostasie interne du Système solaire en le protégeant des éléments et radiations du milieu galactique.

MESSAGES CLÉS

- La densité moyenne du milieu interstellaire n'est que de un atome par centimètre cube ; bien plus faible que les meilleurs vides atteints sur Terre par la technologie la plus avancée.
- La densité varie cependant de manière importante d'un endroit à l'autre du milieu interstellaire.
- Il en va de même de tous ses composants chimiques et de ses propriétés physiques fondamentales de sorte que le milieu interstellaire se caractérise par sa grande hétérogénéité.
- Plusieurs méthodes d'observation et d'analyse nous ont permis de peaufiner nos connaissances de ces milieux complexes.

QUELQUES RÉFÉRENCES

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

- L'espace interstellaire
  François Boulanger
  https://books.openedition.org/editionscnrs/11545?lang=fr

- Wikipédia :
  - Le milieu interstellaire
    https://fr.wikipedia.org/wiki/Milieu_interstellaire

QUELQUES RÉFÉRENCES

- Wikipédia :
  - Liste d'espèces chimiques détectées dans le milieu interstellaire ou circumstellaire https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_d%27esp%C3%A8ces_chimiques_d%C3%A9tect%C3%A9es_dans_le_milieu_interstellaire_ou_circumstellaire
  - Poussières interstellaires https://fr.wikipedia.org/wiki/Poussi%C3%A8re_interstellaire

- Milieu interstellaire, gaz à tous les étages
  La méthode scientifique
  https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/la-methode-scientifique-emission-du-mardi-29-octobre-2019