

L'influence des conditions astrophysiques sur la chimie interstellaire

Michaël De Becker

Département d'Astrophysique, de Géophysique et d' Océanographie

Faculté des Sciences

Université de Liège

Ecole de Printemps MPCl, Marseille, 29 mai 2015.



L'influence des conditions astrophysiques sur la chimie interstellaire

1. La rupture vis-à-vis d'une vision du passé
2. Les processus physico-chimiques dans leur contexte interstellaire
3. L'évolution d'un nuage moléculaire jusqu'au système planétaire
4. Le mot de la fin

1. La rupture vis-à-vis d'une vision du passé

1. La rupture vis-à-vis d'une vision du passé

Il est difficile d'admettre l'existence de molécules dans l'espace interstellaire, parce qu'une fois qu'une molécule est dissociée il semble n'y avoir aucune chance pour que les atomes se rejoignent à nouveau. – Arthur Stanley Eddington (1926)

Qu'est-ce qui a rendu les années 1930 si particulières?

→ Evolution significative dans deux domaines a priori distincts

Qu'est-ce qui a rendu les années 1930 si particulières?

→ Evolution significative dans deux domaines a priori distincts

Spectroscopie moléculaire

- amélioration de notre vision de la matière sous toutes ses formes, notamment du point de vue moléculaire
- progrès considérables du point de vue des techniques instrumentales permettant d'identifier et de doser des molécules

Qu'est-ce qui a rendu les années 1930 si particulières?

→ Evolution significative dans deux domaines a priori distincts

Spectroscopie moléculaire

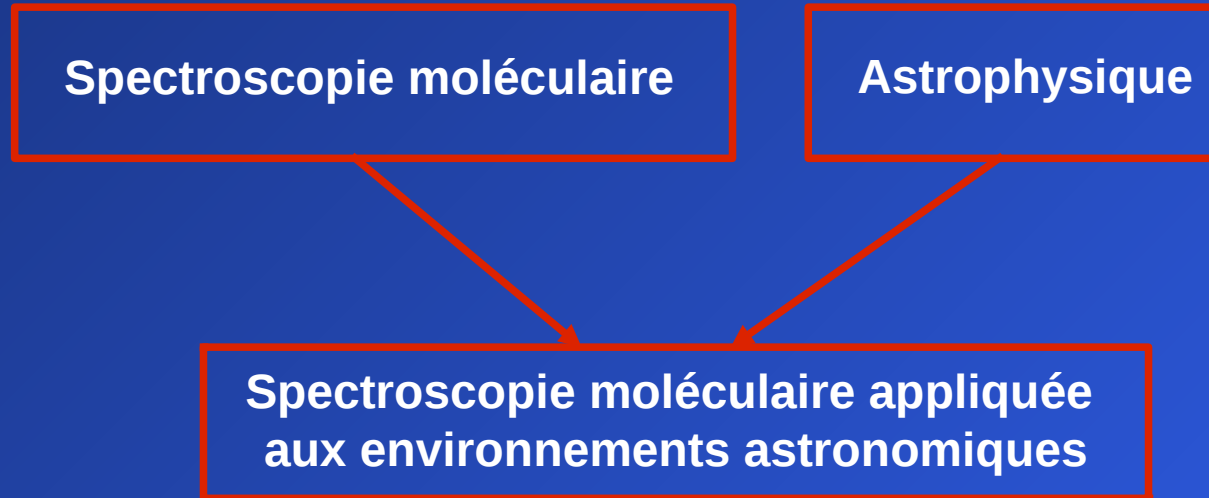
- amélioration de notre vision de la matière sous toutes ses formes, notamment du point de vue moléculaire
- progrès considérables du point de vue des techniques instrumentales permettant d'identifier et de doser des molécules

Astrophysique

- amélioration de notre vision de l'Univers, à différentes échelles, notamment du point de vue galactique
- amélioration des outils d'observationnels permettant d'explorer l'Univers

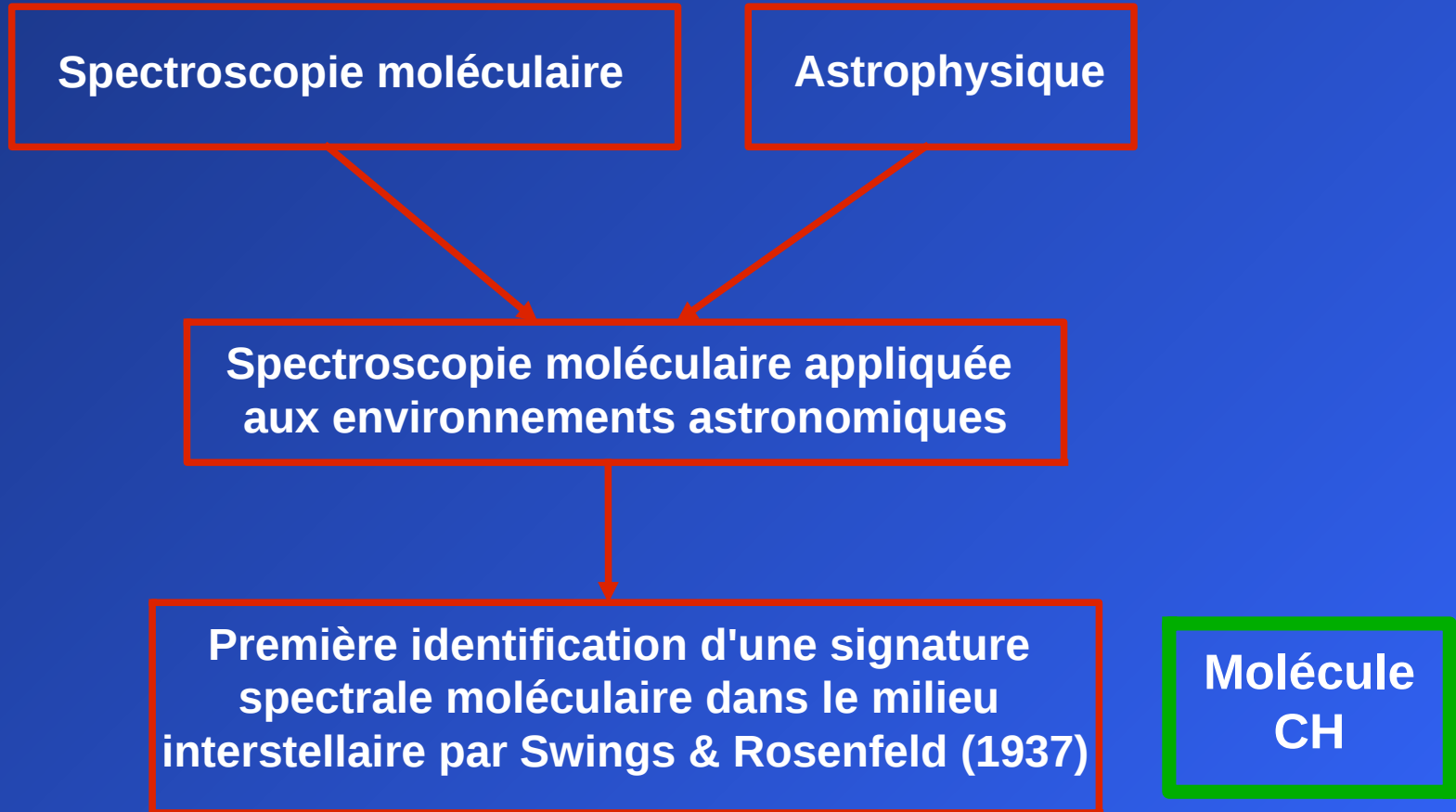
Qu'est-ce qui a rendu les années 1930 si particulières?

→ Evolution significative dans deux domaines a priori distincts



Qu'est-ce qui a rendu les années 1930 si particulières?

→ Evolution significative dans deux domaines a priori distincts



- Inventaire des molécules découvertes dans des environnements astronomiques divers (plus de 180!):
 - espèces neutres
 - espèces cationiques
 - espèces anioniques (très peu, découvertes ces dernières années)

- Inventaire des molécules astronomiques
 - espèces neutres
 - espèces cationiques
 - espèces anioniques

2 atoms	AlCl, AlF, AlO, C ₂ , CF ⁺ , CH, CH ⁺ , CN, CN ⁻ , CO, CO ⁺ , CP, CS, FeO, H ₂ , HCl, HF, NH, KCl, N ₂ , NO, NO ⁺ , NS, NaCl, O ₂ , OH, OH ⁺ , PN, SH, SH ⁺ , SO, SO ⁺ , SiC, SiN, SiO, SiS, P, TiO, ArH ⁺
3 atoms	AlNC, AlOH, C ₃ , C ₂ H, C ₂ O, C ₂ P, C ₂ S, CO ₂ , H ₃ ⁺ , CH ₂ , H ₂ Cl ⁺ , H ₂ O, H ₂ O ⁺ , H ₂ S, HCN, HCO, HCO ⁺ , HCS ⁺ , HCP, HNC, HN ₂ ⁺ , HNO, HOC ⁺ , KCN, MgCN, NH ₂ , N ₂ H ⁺ , N ₂ O, NaCN, OCS, SO ₂ , c-SiC ₂ , SiCN, SiNC, FeCN, TiO ₂ , CCN
4 atoms	l-C ₃ H, c-C ₃ H, C ₃ N, C ₃ O, C ₃ S, C ₃ H ⁺ , H ₃ O ⁺ , C ₂ H ₂ , H ₂ CN, H ₂ CO, H ₂ CS, HCCN, HCNH ⁺ , HCNO, HOCN, HOCO ⁺ , HNCO, HNCN, HSCN, NH ₃ , SiC ₃ , PH ₃ , H ₂ O ₂ , HMgNC, MgCCH, NCCP
5 atoms	C ₅ , CH ₄ , c-C ₃ H ₂ , l-C ₃ H ₂ , H ₂ CCN, H ₂ C ₂ O, H ₂ CNH, H ₂ COH ⁺ , C ₄ H, C ₄ H ⁻ , HC ₃ N, HCCNC, HCOOH, NH ₂ CN, SiC ₄ , SiH ₄ , HCOCN, HNCNH, HC ₃ N ⁻ , CH ₃ O
6 atoms	c-H ₂ C ₃ O, C ₂ H ₄ , CH ₃ CN, CH ₃ NC, CH ₃ OH, CH ₃ SH, l-H ₂ C ₄ , HC ₃ NH ⁺ , HCONH ₂ , C ₅ H, HC ₂ CHO, HC ₄ N, CH ₂ CNH, C ₅ N ⁻ , C ₅ S, SiH ₃ CN
7 atoms	c-C ₂ H ₄ O, CH ₃ C ₂ H, H ₃ CNH ₂ , CH ₂ CHCN, H ₂ CHCOH, C ₆ H, C ₆ H ⁻ , HC ₄ CN, CH ₃ CHO, HC ₅ N ⁻
8 atoms	H ₃ CC ₂ CN, H ₂ COHCOH, CH ₃ OOCH, CH ₃ COOH, C ₆ H ₂ , CH ₂ CHCHO, CH ₂ CCHCN, C ₇ H, NH ₂ CH ₂ CN, (NH ₂) ₂ CO
9 atoms	CH ₃ C ₄ H, CH ₃ OCH ₃ , CH ₃ CH ₂ CN, CH ₃ CONH ₂ , CH ₃ CH ₂ OH, C ₈ H, HC ₆ CN, C ₈ H ⁻ , CH ₂ CHCH ₃ , CH ₃ CH ₂ SH
> 9 atoms	CH ₃ COCH ₃ , CH ₃ CH ₂ CHO, CH ₃ C ₅ N, HC ₈ CN, CH ₃ C ₆ H, CH ₃ OC ₂ H ₅ , HC ₁₀ CN, C ₆ H ₆ , C ₂ H ₅ OCHO, C ₃ H ₇ CN, CH ₃ COOCH ₃ , C ₆₀ , C ₇₀
Deuterated	HD, H ₂ D ⁺ , HDO, D ₂ O, DCN, DCO, DNC, N ₂ D ⁺ , NHD ₂ , ND ₃ , HDCO, D ₂ CO, CH ₂ DCCH, CH ₃ CCD, D ₂ CS, NH ₃ D ⁺

lements

es années)

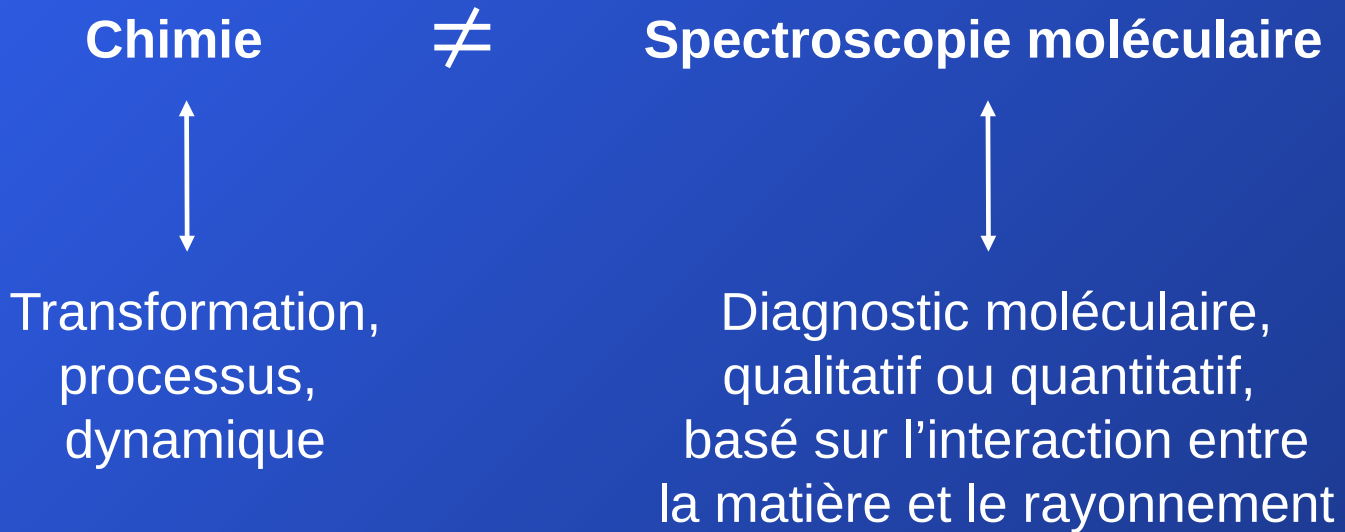
- Inventaire des molécules découvertes dans des environnements astronomiques divers (plus de 180!):
 - espèces neutres
 - espèces cationiques
 - espèces anioniques (très peu, découvertes ces dernières années)

- Inventaire des molécules découvertes dans des environnements astronomiques divers (plus de 180!):
 - espèces neutres
 - espèces cationiques
 - espèces anioniques (très peu, découvertes ces dernières années)
- Molécule la plus abondante: hydrogène moléculaire (H_2)
... ensuite: CO

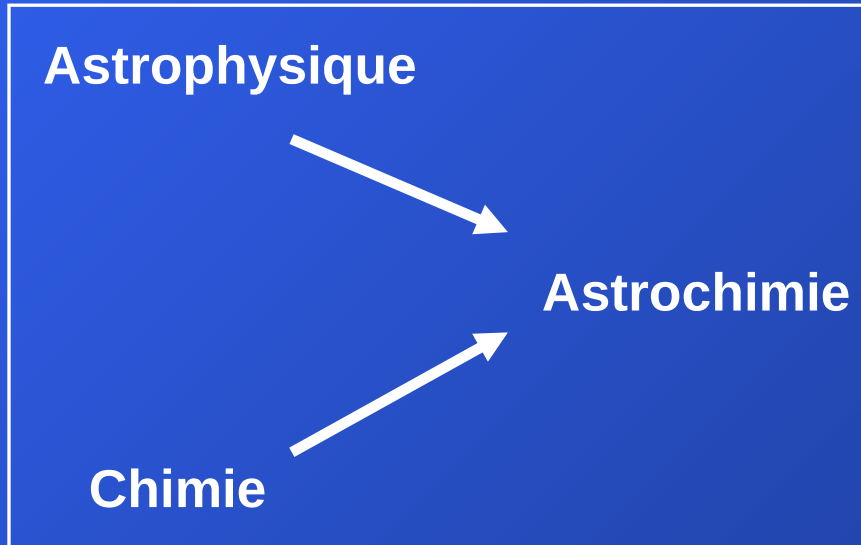
- Inventaire des molécules découvertes dans des environnements astronomiques divers (plus de 180!):
 - espèces neutres
 - espèces cationiques
 - espèces anioniques (très peu, découvertes ces dernières années)
- Molécule la plus abondante: hydrogène moléculaire (H_2)
... ensuite: CO
- Diversité et complexité chimique \Leftrightarrow processus élaborés

- Inventaire des molécules découvertes dans des environnements astronomiques divers (plus de 180!):
 - espèces neutres
 - espèces cationiques
 - espèces anioniques (très peu, découvertes ces dernières années)
- Molécule la plus abondante: hydrogène moléculaire (H_2)
... ensuite: CO
- Diversité et complexité chimique \Leftrightarrow processus élaborés
- Quels sont les défis de l'astrochimie?
(conditions physico-chimiques particulières, inaccessibilité du "laboratoire", exploration de questions scientifiques à l'intersection de plusieurs disciplines...)

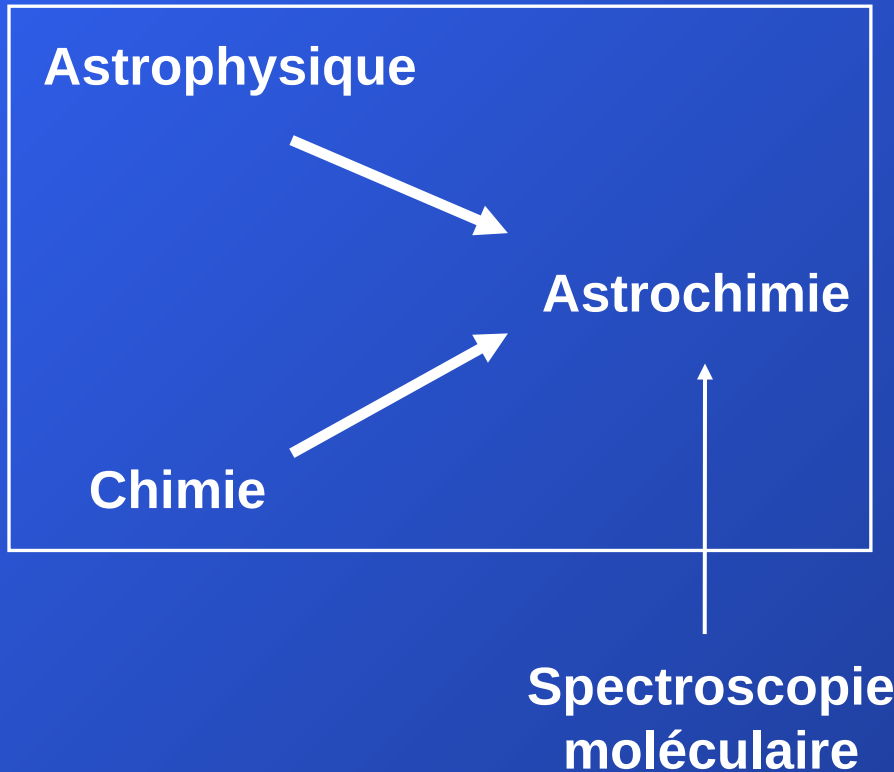
- Confusion à éviter!



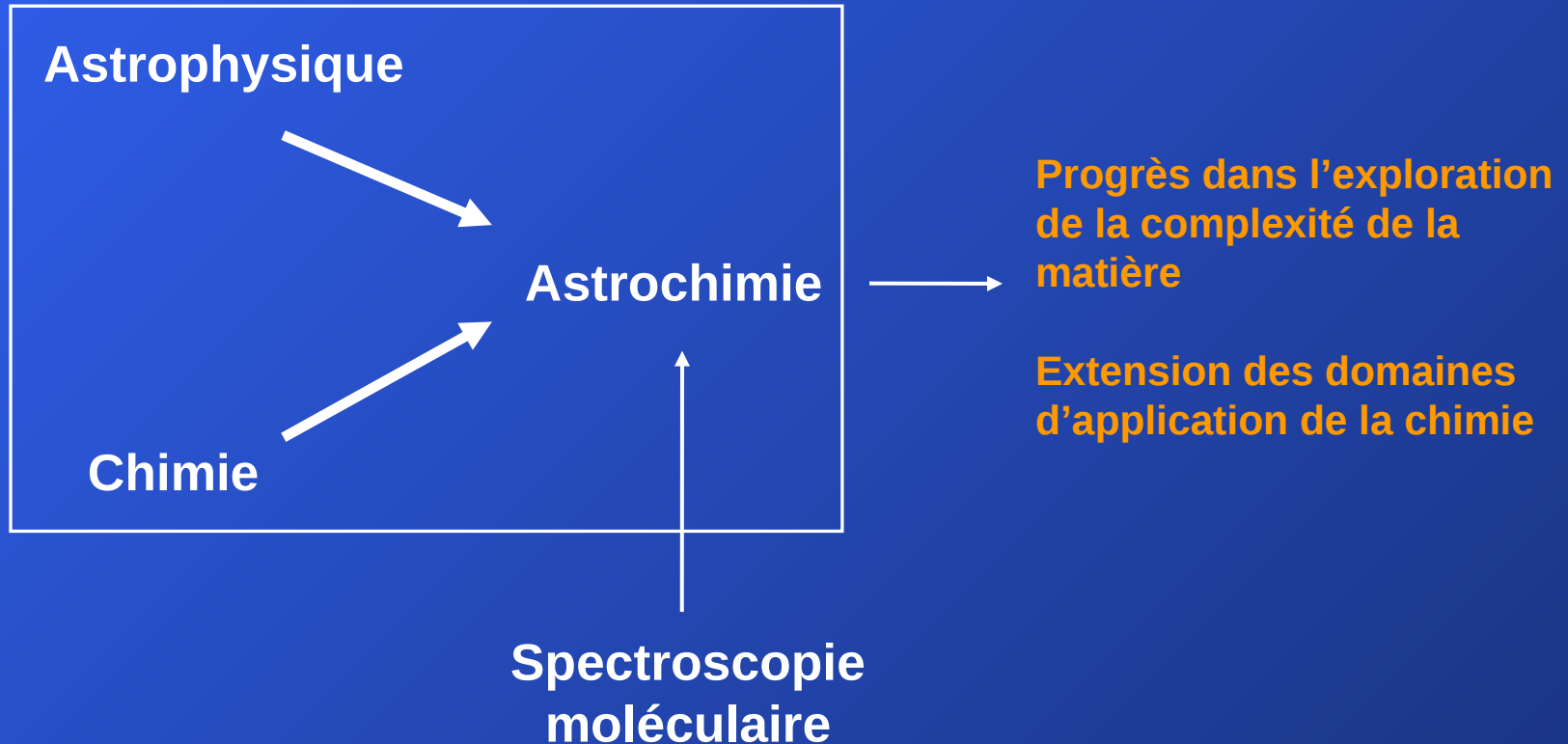
- Dans quel contexte scientifique se situe l'astrochimie?



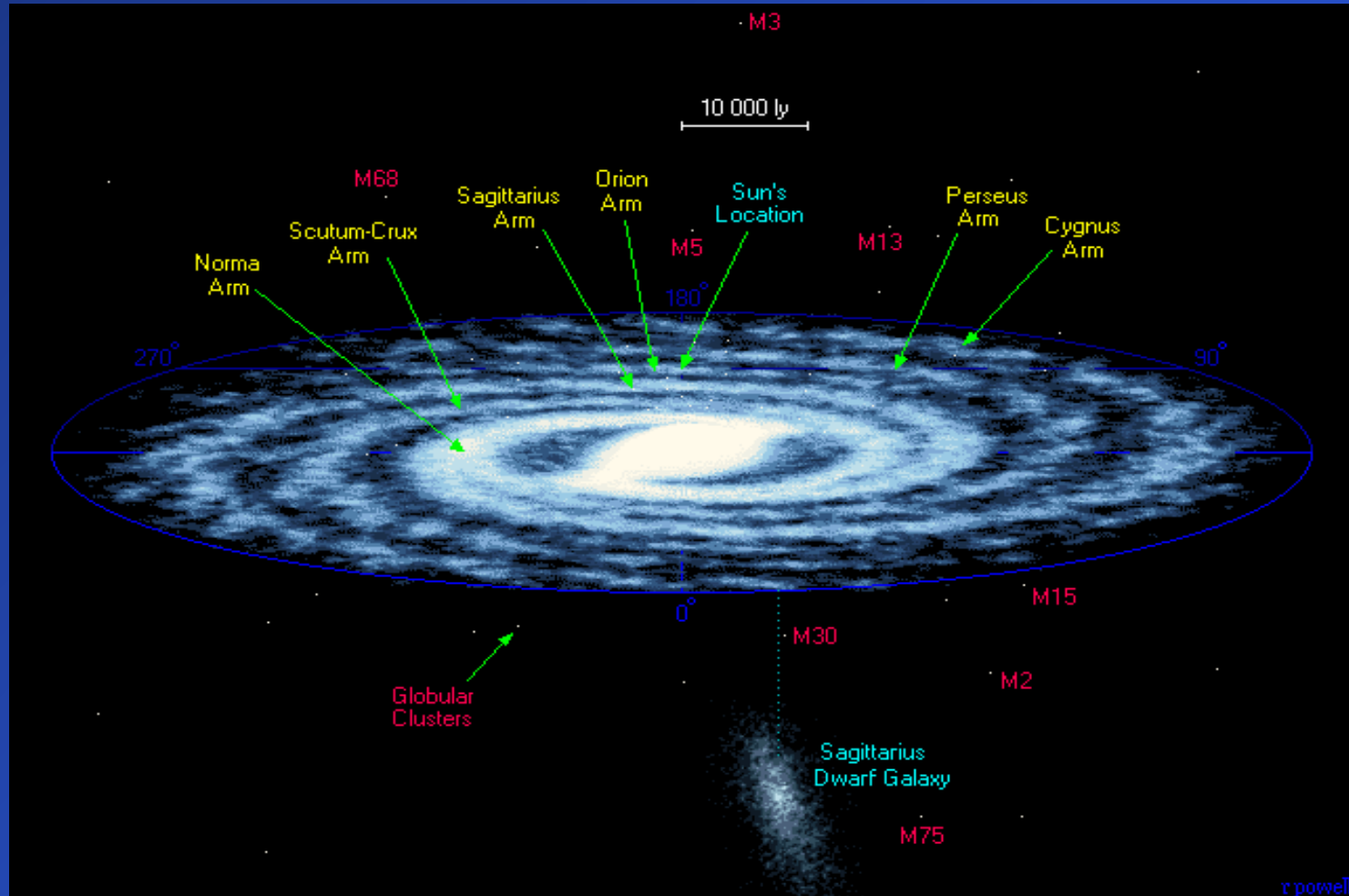
- Dans quel contexte scientifique se situe l'astrochimie?



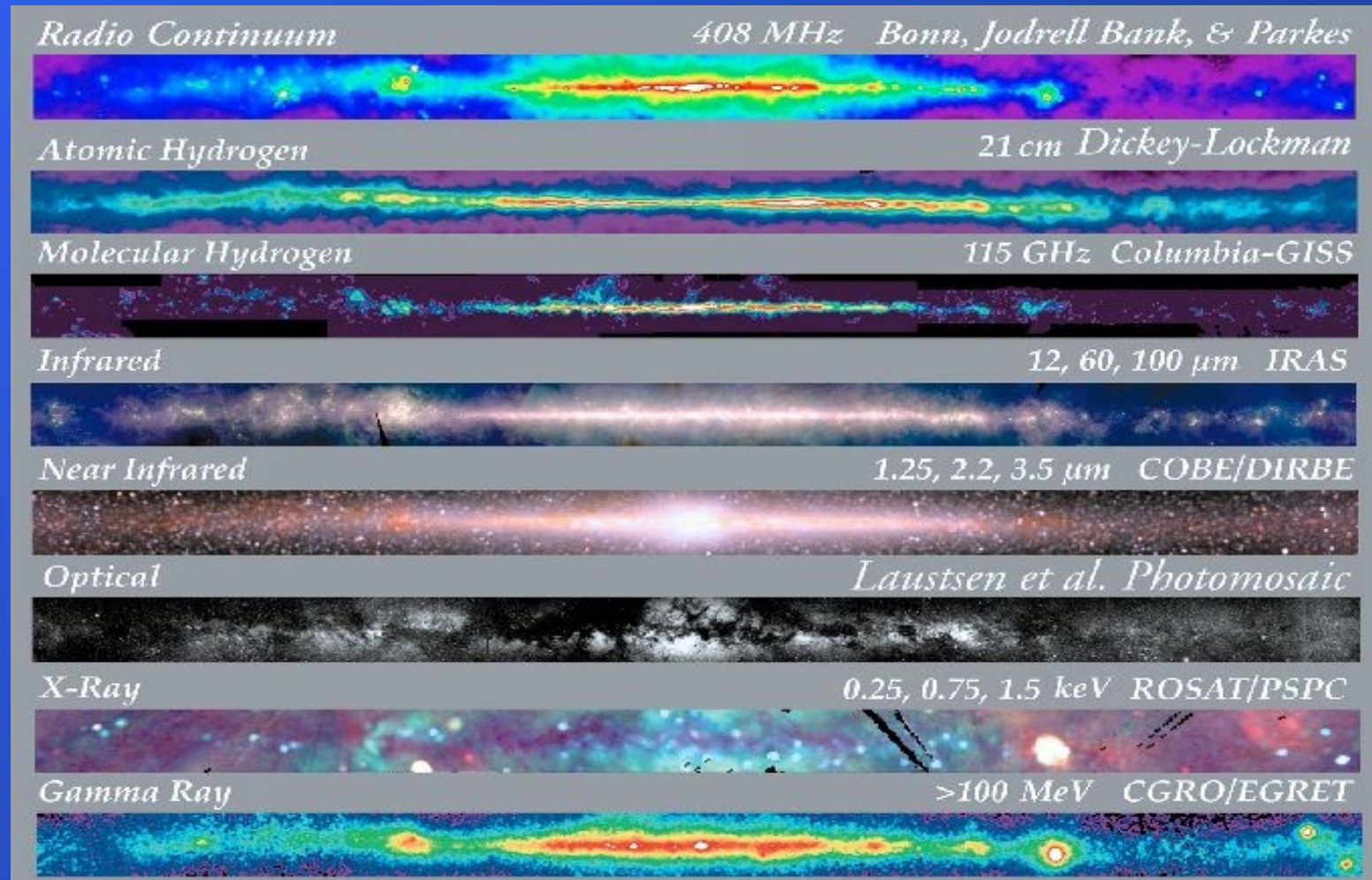
- Dans quel contexte scientifique se situe l'astrochimie?



La Voie Lactée



- Galaxie... (Voie Lactée), milieu interstellaire...



Galaxie: M51 (~ 31 Ma.l.)

Whirlpool Galaxy • M51



Hubble
Heritage

NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC01-10

Fait remarquable :
Les régions les plus riches en 'matière première ' sont aussi les plus proches des étoiles les plus brillantes (aussi les les plus massives)

Galaxie: M51 (~ 31 Ma.l.)

Whirlpool Galaxy • M51



Hubble
Heritage

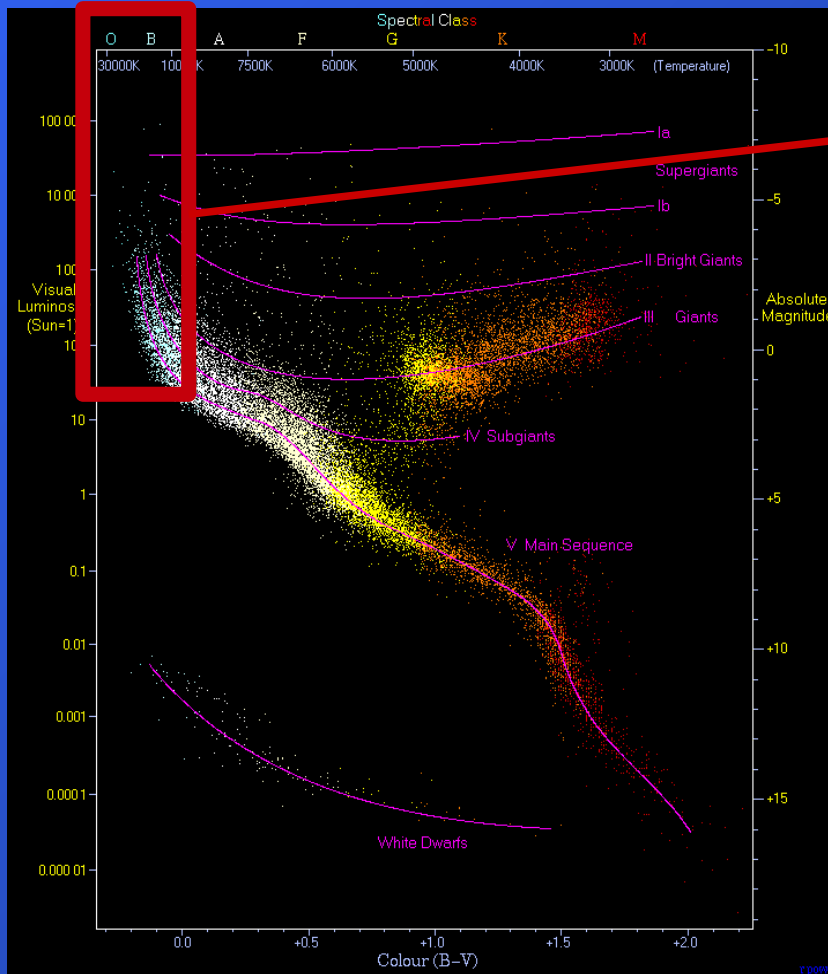
NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC01-10

Fait remarquable :
Les régions les plus riches en 'matière première ' sont aussi les plus proches des étoiles les plus brillantes (aussi les plus massives)

Etoiles massives ?

Quelques mots sur les étoiles massives

Diagramme de Hertzsprung-Russel

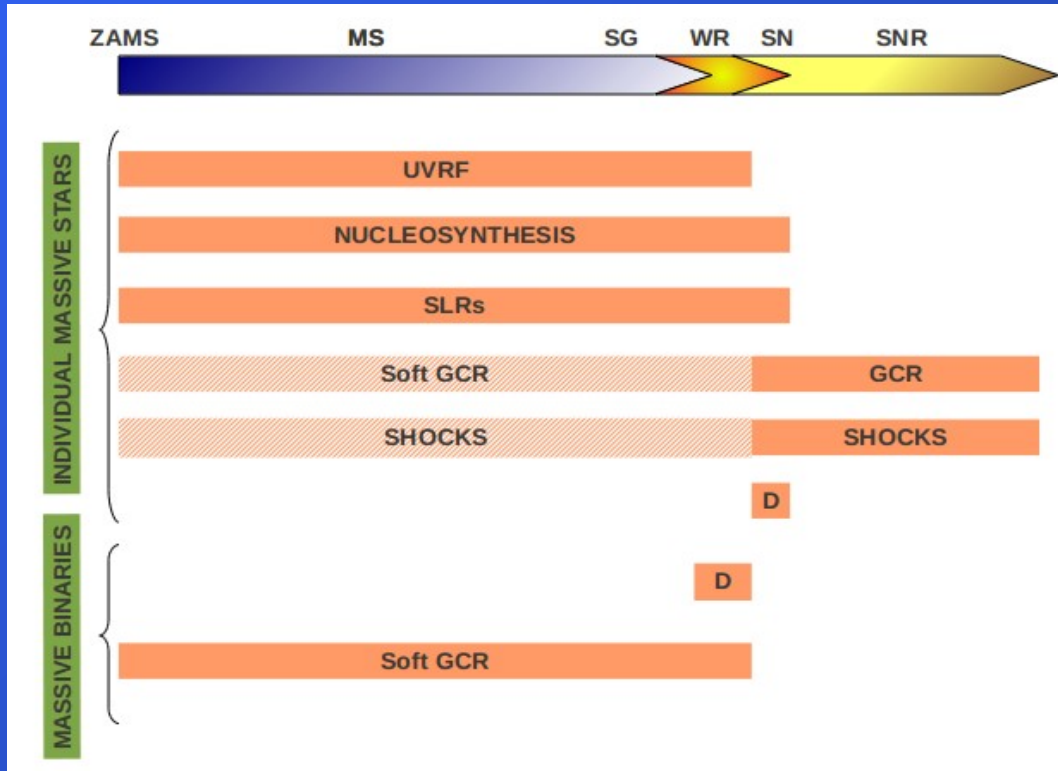


Etoiles les plus massives, mais aussi...

- les plus brillantes
- celles dont la T de surface est la plus élevée
- aussi, les moins abondantes
- celles dont l'**effet sur leur environnement** est le plus intense (vents stellaires, ionisation...)

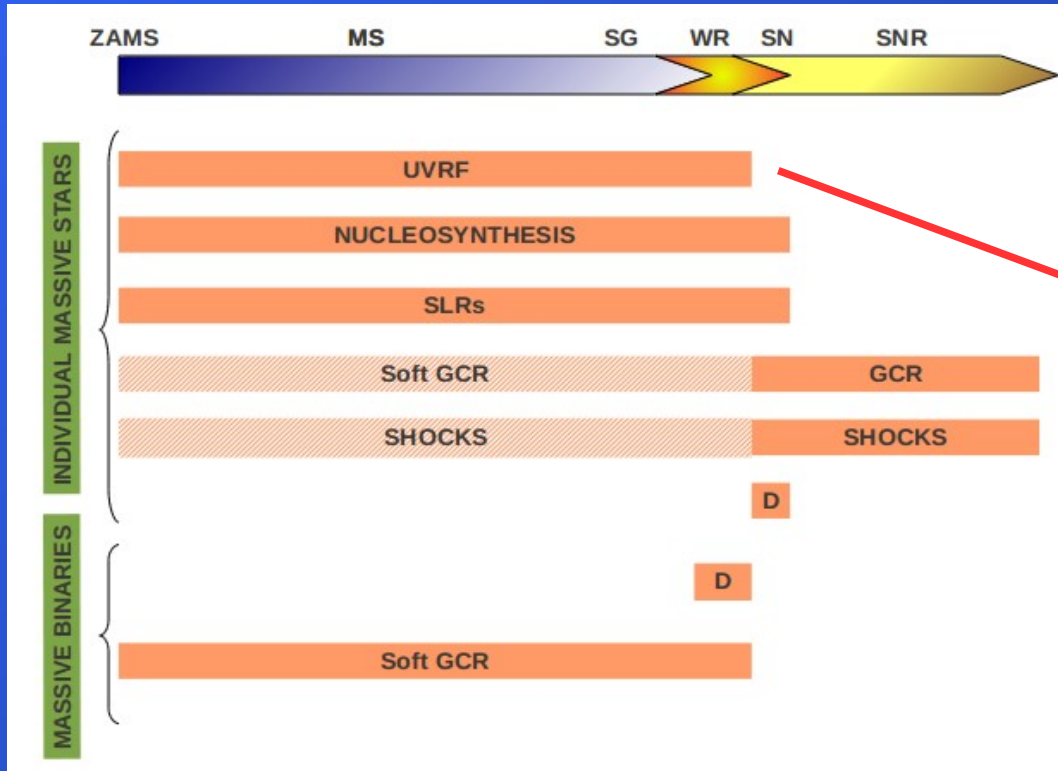
Quelques mots sur les étoiles massives

Résumé de leur impact sur l'astrochimie :



Quelques mots sur les étoiles massives

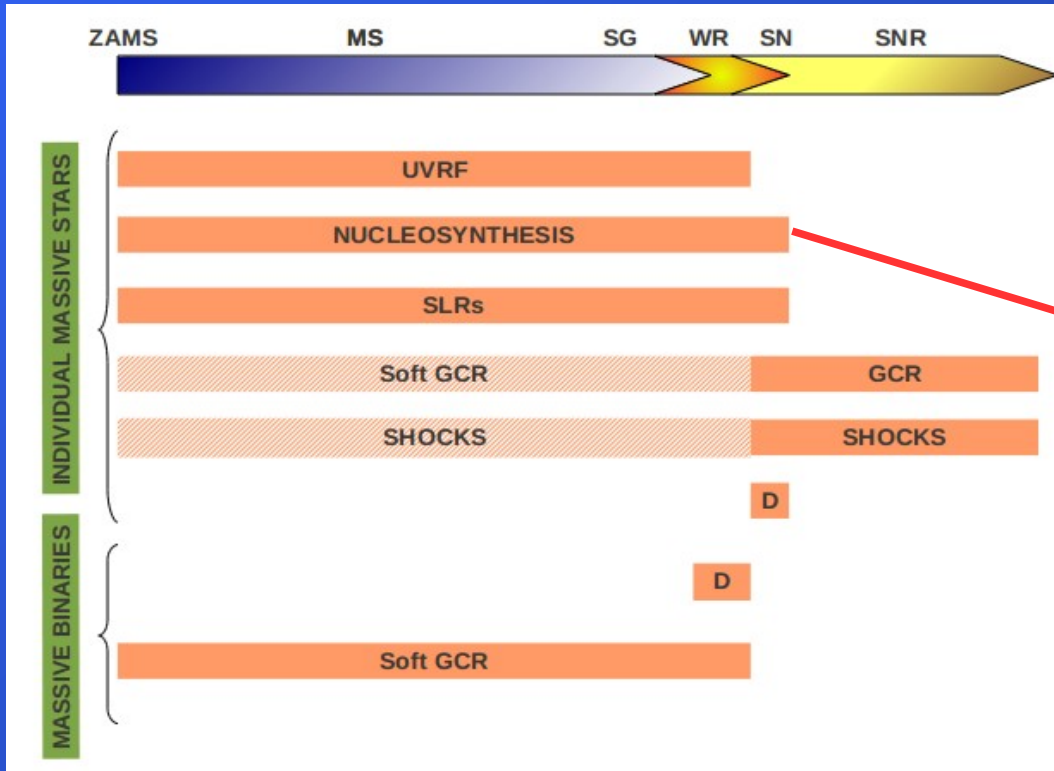
Résumé de leur impact sur l'astrochimie :



Rayonnement UV

Quelques mots sur les étoiles massives

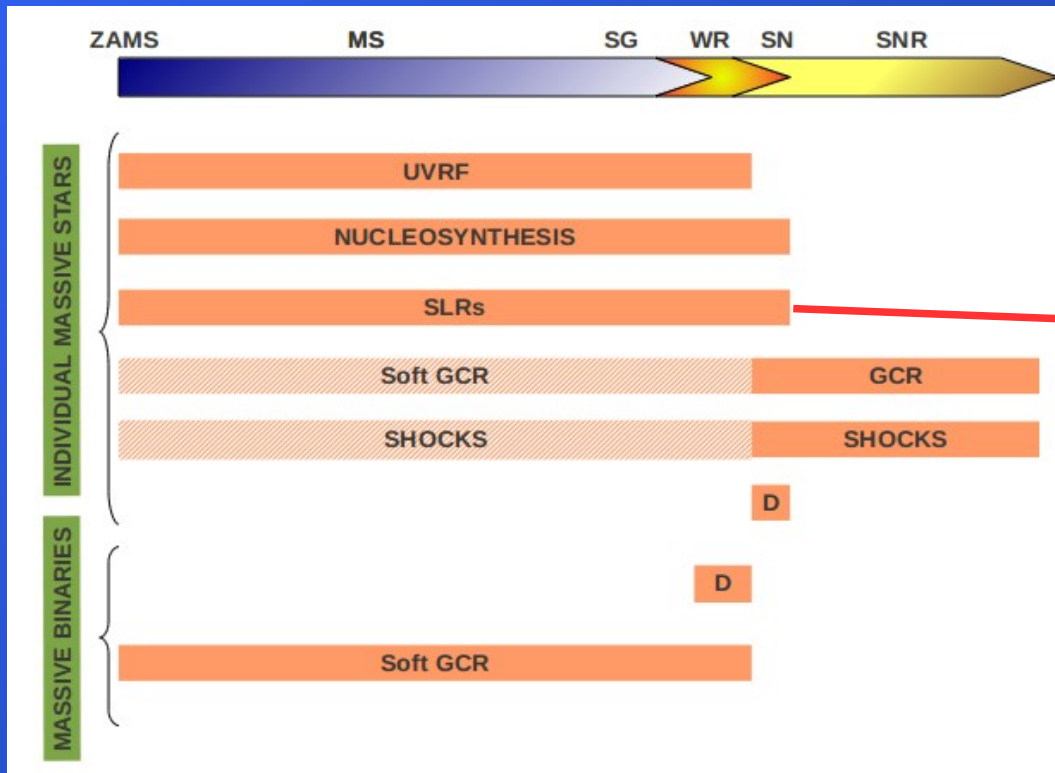
Résumé de leur impact sur l'astrochimie :



Synthèse
d'éléments
chimiques

Quelques mots sur les étoiles massives

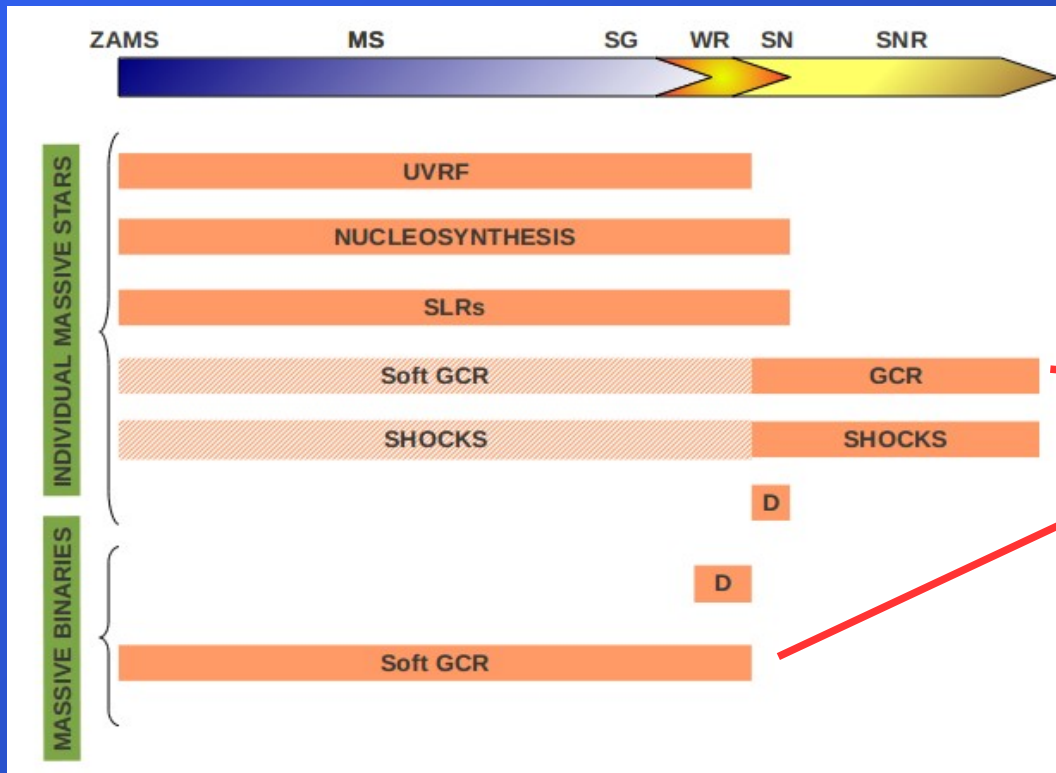
Résumé de leur impact sur l'astrochimie :



Radionucléides de courte durée de vie

Quelques mots sur les étoiles massives

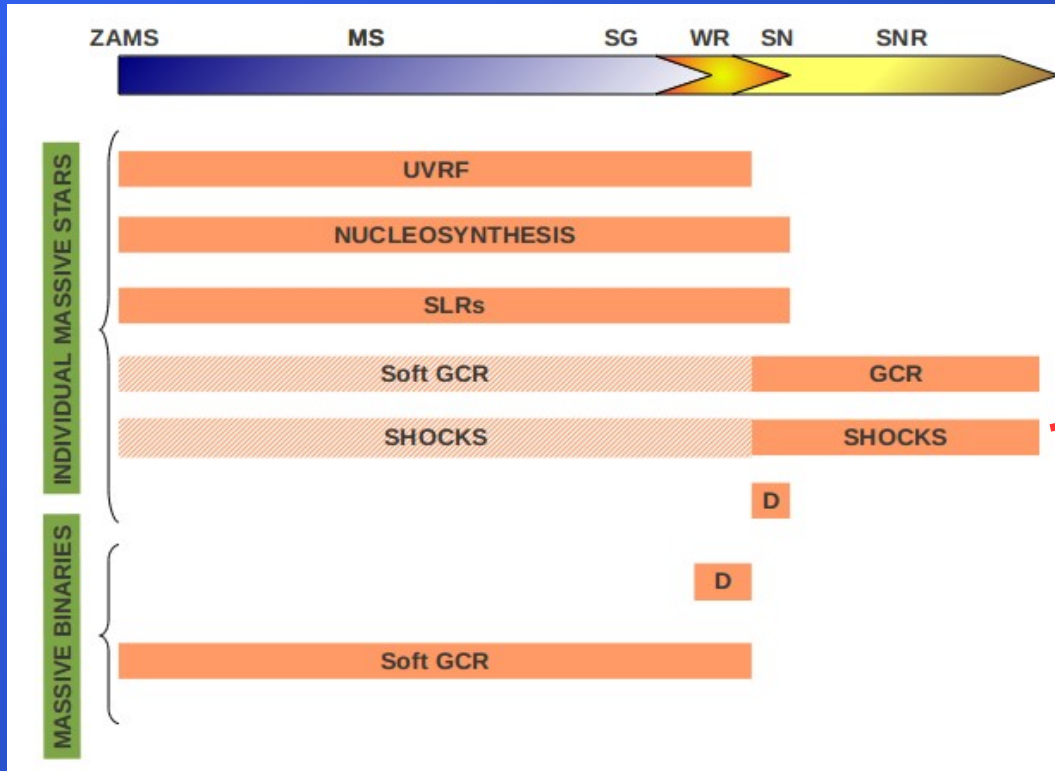
Résumé de leur impact sur l'astrochimie :



Rayons cosmiques galactiques

Quelques mots sur les étoiles massives

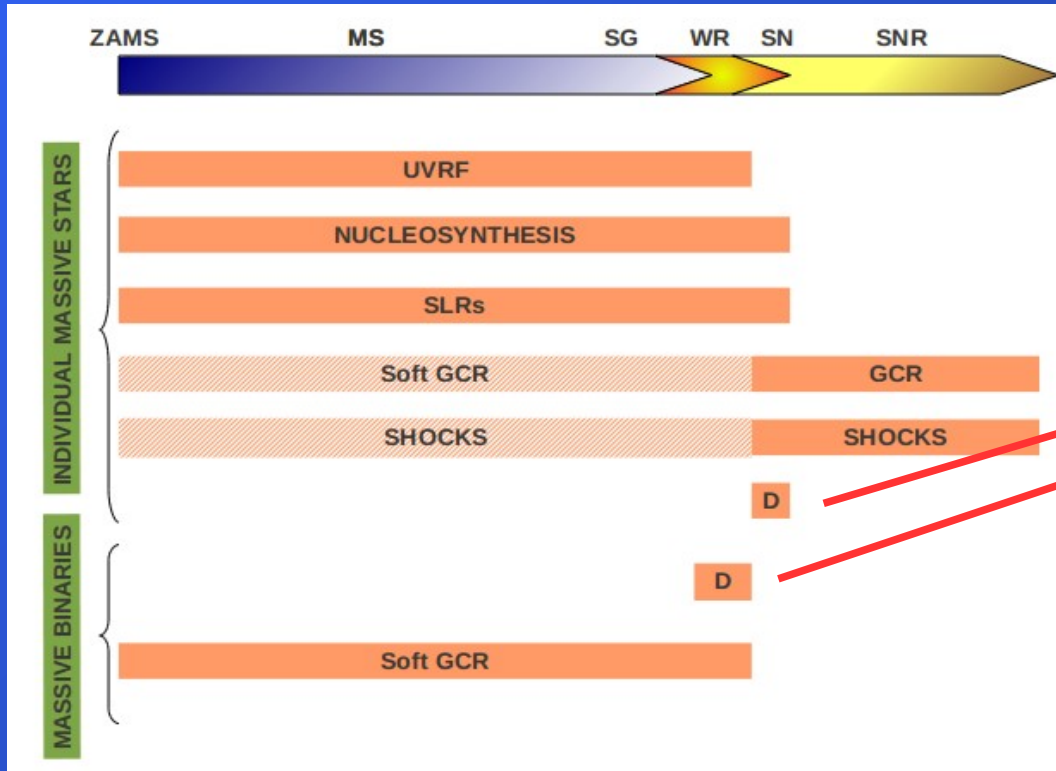
Résumé de leur impact sur l'astrochimie :



Chocs hydrodynamiques

Quelques mots sur les étoiles massives

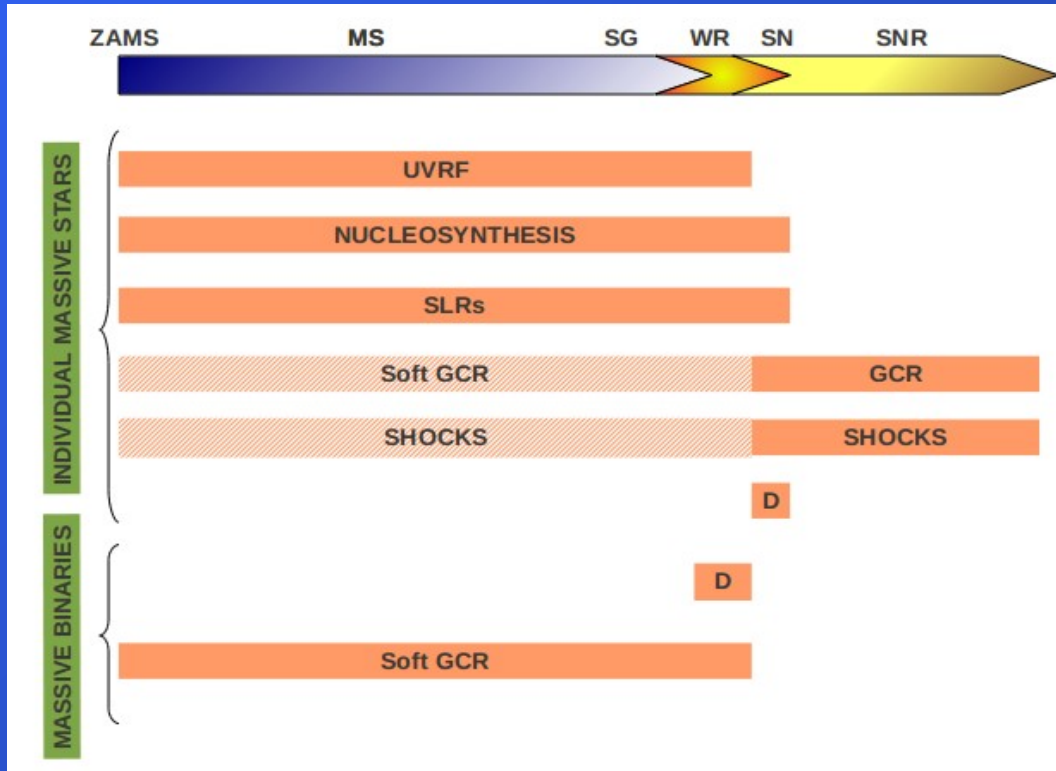
Résumé de leur impact sur l'astrochimie :



Production de
poussière

Quelques mots sur les étoiles massives

Résumé de leur impact sur l'astrochimie :



Les divers "ingrédients" pour lesquels les étoiles massives jouent un rôle significatif interviendront dans le cadre des processus physico-chimiques.

3. Les processus physico-chimiques dans leur contexte interstellaire

Processus physico-chimiques

- Formalisme de la cinétique chimique

→ densités/concentrations/abondances dépendent du temps

- bimolecular reactions: $A + B \rightarrow C$

$$-\frac{dn(A)}{dt} = k n(A) n(B) = \frac{dn(C)}{dt}$$

- unimolecular reactions: $A \rightarrow C$

$$-\frac{dn(A)}{dt} = k n(A) = \frac{dn(C)}{dt}$$

- t(h)ermolecular reactions: $A + B + M \rightarrow C + M$

$$-\frac{dn(A)}{dt} = k n(A) n(B) n(M) = \frac{dn(C)}{dt}$$

$n(i)$: densité en nombre
(unité: cm^{-3})

k : constante cinétique
(unité: dépend de la
molécularité de la
réaction!)

Molécularité: nombre de partenaires impliqués simultanément dans un processus
Ordre: molécularité du **processus élémentaire** considéré

Processus physico-chimiques

- Influence de la température:



$$v = -\frac{dn(A)}{dt} = -\frac{dn(B)}{dt} = kn(A)n(B)$$

$$k \propto T^{1/2} \exp\left(-\frac{E'_a}{k_B T}\right)$$

Facteur pré-exponentiel:

Lié aux propriétés du gaz,
et à leurs conséquences
sur l'interaction entre les
partenaires de réaction

Facteur exponentiel:

Lié à la présence d'une
barrière d'activation
dans le processus

Hypothèse de départ: Gaz parfait!

**MAIS! ... en pratique: écarts significatifs par rapport au gaz parfait
⇒ écarts par rapport à cette dépendance en T**

Processus physico-chimiques

- Influence de la densité:



$$v = -\frac{dn(A)}{dt} = -\frac{dn(B)}{dt} = kn(A)n(B)$$

Prise en compte de manière évidente par les facteurs $n(A)$ et $n(B)$

- dans les environnements interstellaires, les densités sont très faibles; conditions “moins défavorables” dans les nuages moléculaires
- les épisodes de contraction gravitationnelle (formation stellaire) sont favorables du point de vue de la dépendance vis-à-vis de n .
- les environnements circumstellaires offrent des conditions de densité plus favorables
- les atmosphères planétaires sont encore plus favorables

Processus physico-chimiques

- Processus en phase gazeuse:
 - Photodissociation
 - Photoionisation
 - Réactions neutre-neutre
 - Réactions ion-molécule
 - Réactions par recombinaison dissociative d'électron
 - Réactions induites par les rayons cosmiques
 - Réactions par transfert de charge
 - Réactions par association radiative
 - Réactions par détachement associatif
 - Réactions par association collisionnelle

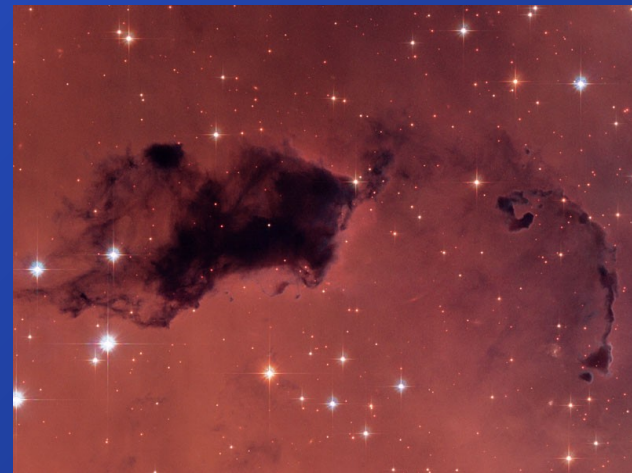
Processus physico-chimiques

Photochimie: photodissociation et photoionisation

Où la photochimie est-elle active?

- où les photons d'énergie adéquate sont disponibles
- milieu interstellaire diffus, atmosphères planétaires (couches supérieures), comètes (près du passage au périastre)...

NGC281
(globule de Bok)



Processus physico-chimiques

Photodissociation: $AB + h\nu \rightarrow A + B$

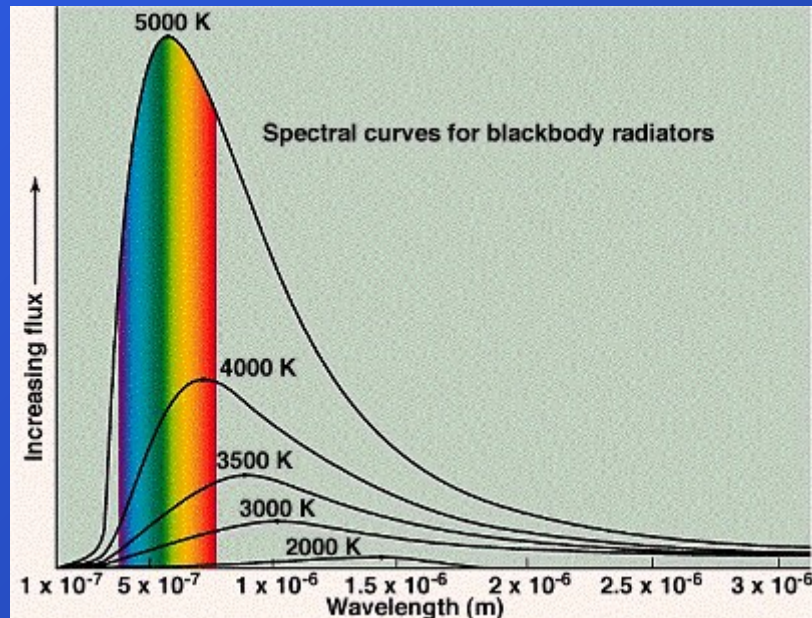
- dans le milieu interstellaire: UV (étoiles massives) = agent de destruction principal des petites molécules
- énergie de liaison $\sim 5 - 10$ eV \rightarrow FUV

Processus physico-chimiques

Photodissociation: $AB + h\nu \rightarrow A + B$

- dans le milieu interstellaire: UV (étoiles massives) = agent de destruction principal des petites molécules
- énergie de liaison $\sim 5 - 10$ eV \rightarrow FUV

Rayonnement de corps noir



Loi de Planck:

$$B_{\lambda} = \frac{2 h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Loi de déplacement de Wien:

$$\lambda_{max} = 2.9 \cdot 10^7 / T$$

Etoiles massives :

$T \sim 10000 - 100000$ K

\rightarrow Max dans l'UV

Processus physico-chimiques

Photodissociation: $AB + h\nu \rightarrow A + B$

- dans le milieu interstellaire: UV (étoiles massives) = agent de destruction principal des petites molécules
- énergie de liaison $\sim 5 - 10$ eV \rightarrow FUV

$$k_{\text{pd}} = \int_{\nu_d}^{\nu_H} 4 \pi J_{\text{IS}} \alpha(\nu) d\nu$$

- bornes d'intégration: limite de dissociation – limite de photo-ionisation de l'H
- ordre de grandeur de k_{pd} : $10^{-9} - 10^{-10} \text{ s}^{-1}$

Processus physico-chimiques


Photodissociation: $AB + h\nu \rightarrow A + B$

- dans le milieu interstellaire: UV (étoiles massives) = agent de destruction principal des petites molécules
- énergie de liaison $\sim 5 - 10$ eV \rightarrow FUV

$$k_{\text{pd}} = \int_{\nu_d}^{\nu_H} 4 \pi J_{\text{IS}} \alpha(\nu) d\nu$$

- bornes d'intégration: limite de dissociation – limite de photo-ionisation de l'H
- ordre de grandeur de k_{pd} : $10^{-9} - 10^{-10} \text{ s}^{-1}$
- effet de la poussière : atténuation du champ de rayonnement, exprimée par une exponentielle décroissante:

$$k_{\text{pd}} = \alpha \exp[-\gamma A_v]$$

 Extinction en échelle de magnitude

Processus physico-chimiques

Photodissociation: $AB + h\nu \rightarrow A + B$

- dans le milieu interstellaire
- principal des petites molécules
- énergie de liaison

Reaction	α	γ
$\text{HCN} + h\nu \rightarrow \text{CN} + \text{H}$	1.3×10^{-9}	2.1
$\text{HCO} + h\nu \rightarrow \text{CO} + \text{H}$	1.1×10^{-9}	0.8
$\text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{OH} + \text{H}$	5.9×10^{-10}	1.7
$\text{CH} + h\nu \rightarrow \text{C} + \text{H}$	8.6×10^{-10}	1.2
$\text{CH}^+ + h\nu \rightarrow \text{C} + \text{H}^+$	2.5×10^{-10}	2.5
$\text{CH}_2 + h\nu \rightarrow \text{CH} + \text{H}$	7.2×10^{-11}	1.7
$\text{C}_2 + h\nu \rightarrow \text{C} + \text{C}$	1.5×10^{-10}	2.1
$\text{C}_2\text{H} + h\nu \rightarrow \text{C}_2 + \text{H}$	5.1×10^{-10}	1.9
$\text{C}_2\text{H}_2 + h\nu \rightarrow \text{C}_2\text{H} + \text{H}$	7.3×10^{-9}	1.8
$\text{C}_2\text{H}_3 + h\nu \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}$	1.0×10^{-9}	1.7
$\text{CO} + h\nu \rightarrow \text{C} + \text{O}$	2.0×10^{-10}	2.5
$\text{N}_2 + h\nu \rightarrow \text{N} + \text{N}$	2.3×10^{-10}	3.8
$\text{NH} + h\nu \rightarrow \text{N} + \text{H}$	5.0×10^{-10}	2.0
$\text{NO} + h\nu \rightarrow \text{N} + \text{O}$	4.3×10^{-10}	1.7
$\text{O}_2 + h\nu \rightarrow \text{O} + \text{O}$	6.9×10^{-10}	1.8
$\text{OH} + h\nu \rightarrow \text{O} + \text{H}$	3.5×10^{-10}	1.7

destruction

- bornes d'intégration
- ordre de grandeur
- effet de la poussière
- exponentielle d'extinction

ionisation de l'H

exprimée par une

Processus physico-chimiques

Photoionisation: $A + h\nu \rightarrow A^+ + e^-$

Autre conséquence de l'existence de champs de rayonnement (UV) dans le milieu interstellaire

→ source d'ions dans le milieu interstellaire, particulièrement important pour le déclenchement de filières de réactions ioniques

ex: la photoionisation du C = point de départ d'une fraction importante de la chimie du carbone

Reaction	α	γ
$C + h\nu \rightarrow C^+ + e^-$	3.0×10^{-10}	3.0
$C_2 + h\nu \rightarrow C_2^+ + e^-$	4.1×10^{-10}	3.5
$CH + h\nu \rightarrow CH^+ + e^-$	7.6×10^{-10}	2.8
$NH + h\nu \rightarrow NH^+ + e^-$	1.0×10^{-11}	2.0
$OH + h\nu \rightarrow OH^+ + e^-$	1.6×10^{-12}	3.1

Processus physico-chimiques

Réactions neutre-neutre: $A + B \rightarrow C + D$

- des interactions faibles agissent entre partenaires réactionnels: van der Waals
→ déviations par rapport aux gaz parfaits
 - les coefficients de réaction peuvent être exprimés de façon paramétrique
-

Présence d'une barrière d'activation:

$$k = \alpha (T/300)^\beta \exp[-\gamma/T]$$

- les constantes de vitesse sont généralement relativement faibles, et très sensibles aux barrières d'activation
- significatif si le milieu dispose de l'énergie thermique nécessaire ("hot cores", PDRs, chocs...)

Barrière d'activation très faible ou nulle? ex. radicaux libres

→ le terme exponentiel peut être négligé

$$k = \alpha (T/300)^\beta$$

Processus physico-chimiques

Réactions neutres

- des interactions faibles (van der Waals) → déviations
- les coefficients de réaction sont souvent asymétriques

Présence d'une barrière

- les constantes de réaction sont sensibles aux barrières d'activation
- significatif si le milieu est riche en PDRs, chocs...

Barrière d'activation

→ le terme exponentiel

Reaction	α	β	γ
$H + OH \rightarrow O + H_2$	7.0×10^{-14}	2.8	1950
$H + CH_4 \rightarrow CH_3 + H_2$	5.9×10^{-13}	3.0	4045
$H + NH_3 \rightarrow NH_2 + H_2$	7.8×10^{-13}	2.4	4990
$H + H_2CO \rightarrow HCO + H_2$	4.9×10^{-12}	1.9	1379
$H_2 + CN \rightarrow HCN + H$	4.0×10^{-13}	2.9	820
$C + OH \rightarrow CH + O$	2.3×10^{-11}	0.5	14800
$C + NH \rightarrow N + CH$	1.7×10^{-11}	0.5	4000
$CH + O \rightarrow OH + C$	2.5×10^{-11}	0.0	2381
$CH + O_2 \rightarrow HCO + O$	1.4×10^{-11}	0.7	3000
$CH + N_2 \rightarrow HCN + N$	5.6×10^{-13}	0.9	10128
$CH_3 + OH \rightarrow CH_4 + O$	3.3×10^{-14}	2.2	2240
$N + HCO \rightarrow CO + NH$	5.7×10^{-12}	0.5	1000
$N + HNO \rightarrow N_2O + H$	1.4×10^{-12}	0.5	1500
$N + O_2 \rightarrow NO + O$	2.3×10^{-12}	0.9	3134
$NH + CN \rightarrow HCN + N$	2.9×10^{-12}	0.5	1000
$NH + OH \rightarrow NH_2 + O$	2.9×10^{-12}	0.1	5800
$NH + O_2 \rightarrow HNO + O$	6.9×10^{-14}	2.7	3281
$O + CN \rightarrow CO + N$	4.4×10^{-11}	0.5	364
$O + HCN \rightarrow CO + NH$	7.3×10^{-13}	1.1	3742
$O + C_2H_4 \rightarrow H_2CCO + H_2$	5.1×10^{-14}	1.9	92
$OH + OH \rightarrow H_2O + O$	1.7×10^{-12}	1.1	50
$O_2 + SO \rightarrow SO_2 + O$	1.1×10^{-14}	1.9	1538

van der Waals

asymétriques

et très

("hot cores",

Processus physico-chimiques

Réactions ion-molécule: $A^+ + B \rightarrow C^+ + D$

- les partenaires réactionnels peuvent donner lieu à une interaction par polarisation induite (moins courte distance que Van der Waals)
 - ⇒ constantes cinétiques généralement plus grandes que pour le cas neutre-neutre
 - ⇒ impact énorme sur la chimie interstellaire!!!

Processus physico-chimiques

Réactions ion-molécule: $A^+ + B \rightarrow C^+ + D$

- les partenaires réactionnels peuvent donner lieu à une interaction par polarisation induite (moins courte distance que Van der Waals)
 - ⇒ constantes cinétiques généralement plus grandes que pour le cas neutre-neutre
 - ⇒ impact énorme sur la chimie interstellaire!!!

- pas de dépendance significative vis-à-vis de T

- constantes cinétique plus favorable par rapport aux processus 'neutre-neutre'.

Reaction	k
$H_2^+ + OH \rightarrow H_2O^+ + H$	7.6×10^{-10}
$H_2 + OH^+ \rightarrow H_2O^+ + H$	1.1×10^{-9}
$H_2O^+ + H_2 \rightarrow H_3O^+ + H$	6.1×10^{-10}
$H_2O^+ + CO \rightarrow HCO^+ + OH$	5.0×10^{-10}
$H_2O^+ + C_2 \rightarrow C_2H^+ + OH$	4.7×10^{-10}
$C^+ + OH \rightarrow CO^+ + H$	7.7×10^{-10}
$C^+ + CH_3 \rightarrow C_2H_2^+ + H$	1.3×10^{-9}
$C^+ + C_2H_2 \rightarrow C_3H^+ + H$	2.2×10^{-9}
$C^+ + C_2H_4 \rightarrow C_3H_2^+ + H_2$	3.4×10^{-10}
$CH^+ + OH \rightarrow CO^+ + H_2$	7.5×10^{-10}
$CH_2^+ + O_2 \rightarrow HCO^+ + OH$	9.1×10^{-10}
$CH_3^+ + OH \rightarrow H_2CO^+ + H_2$	7.2×10^{-10}
$O^+ + CH_4 \rightarrow CH_3^+ + OH$	1.1×10^{-10}
$OH^+ + CN \rightarrow HCN^+ + O$	1.0×10^{-9}
$OH^+ + NH_3 \rightarrow NH_4^+ + O$	1.0×10^{-9}

Processus physico-chimiques

Réactions par recombinaison électronique dissociative:



- première étape: capture d'un électron
- deuxième étape: dissociation de l'espèce neutre excitée

Constantes cinétiques $\sim 10^{-7} \text{ s}^{-1}$

Remarques importantes:

- Son efficacité rend sa prise en compte indispensable là où des cations sont présents.
- Il s'agit de la principale source de perte de cations dans les environnements astrophysiques
- Ce processus interrompt des chaînes de réactions cationiques
- Il ponctue des chaînes de réactions cationiques menant à des composé neutres, y compris des composés significativement abondants

Processus physico-chimiques

Réactions induites par les rayons cosmiques:

On peut distinguer essentiellement 3 types de réactions:

- réactions de dissociation
 - réactions d'ionisation
 - photoréactions
-

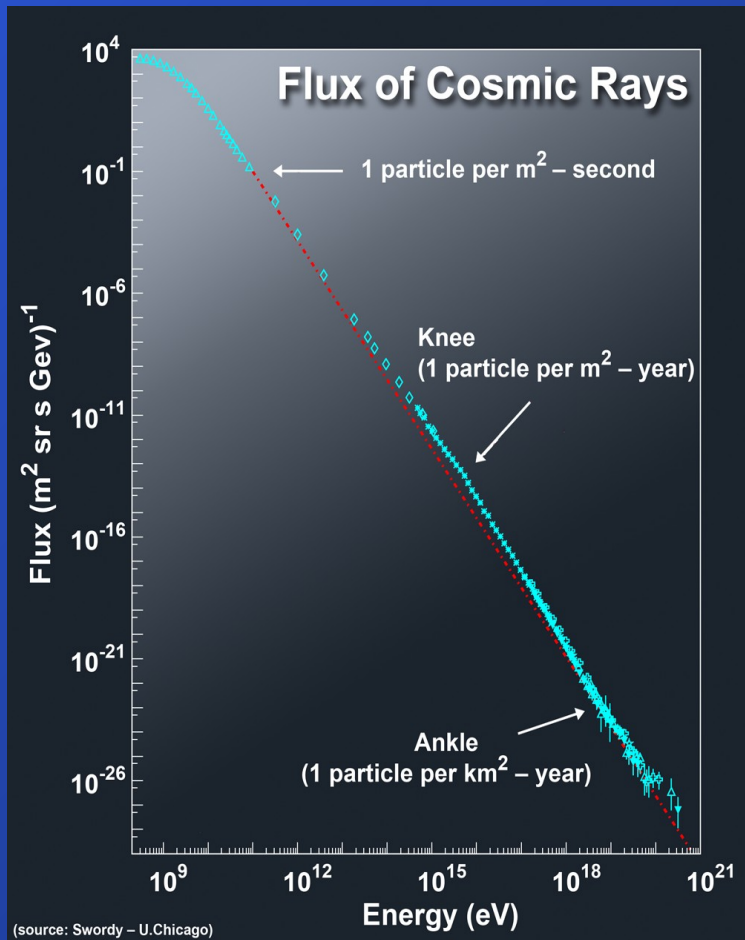
→ **Quelques mots sur les
rayons cosmiques**

Processus physico-chimiques

Réactions induites par les rayons cosmiques:

Rayons cosmiques: particules chargées, de haute énergie, accélérées dans divers environnements astrophysiques (électrons, protons, particules alpha, noyau d'éléments plus lourds que l'He...)

On peut distinguer les sources galactiques et les sources extragalactiques.

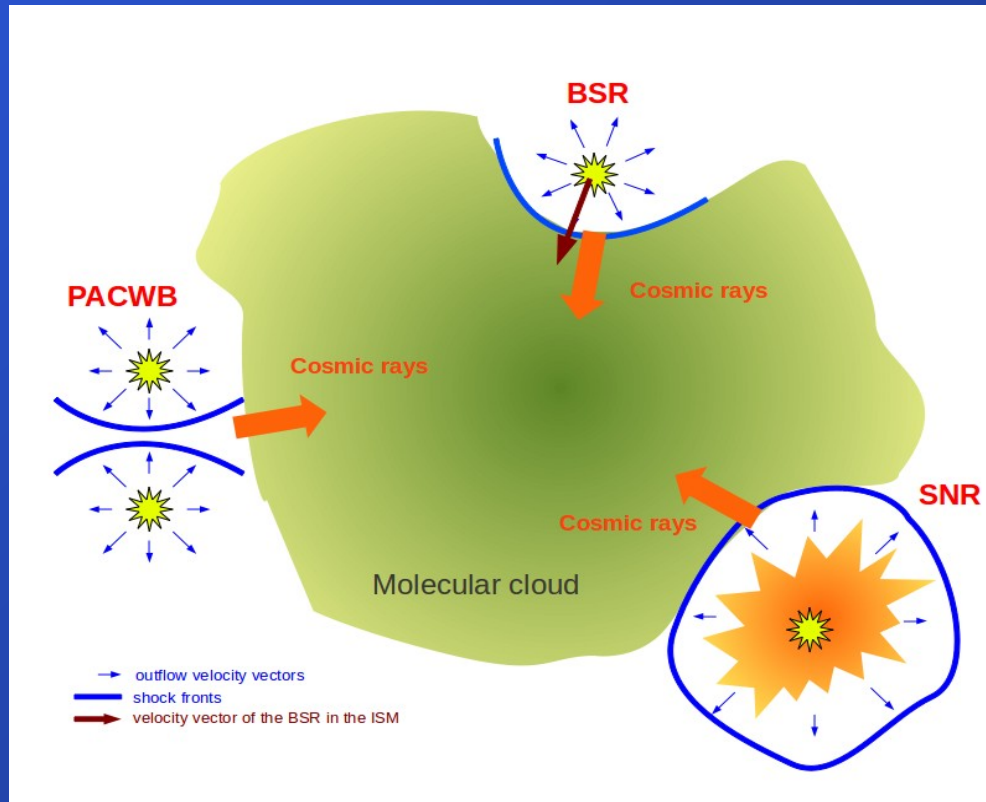


Processus physico-chimiques

Réactions induites par les rayons cosmiques:

Sources galactiques (entre autres)

- résidus de supernova (SNR)
- binaires massives à collisions de vents (PACWB)
- étoiles massives fuyeuuses (BSR)
- ...



Processus physico-chimiques

Réactions induites par les rayons cosmiques:

On peut distinguer essentiellement 3 types de réactions:

- réactions de dissociation
- réactions d'ionisation
- photoréactions

Dissociation

Reaction	k
$\text{H}_2 + \text{CR} \longrightarrow \text{H}^+ + \text{H} + \text{e}^-$	1.2×10^{-17}
$\text{He}^+ + \text{CO} \longrightarrow \text{C}^+ + \text{O} + \text{He}$	1.6×10^{-9}
$\text{He}^+ + \text{OH} \longrightarrow \text{O}^+ + \text{H} + \text{He}$	1.1×10^{-9}
$\text{He}^+ + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}^+ + \text{OH} + \text{He}$	2.0×10^{-10}

Exemple : la formation d'ammoniaque dans les nuages interstellaires froids, amorcée par la dissociation de l'azote moléculaire par des rayons cosmiques produisant des cations azote avec suffisamment d'énergie pour réagir avec de l'hydrogène moléculaire...

Processus physico-chimiques

Réactions induites par les rayons cosmiques:

On peut distinguer essentiellement 3 types de réactions:

- réactions de dissociation
- réactions d'ionisation
- photoréactions

Ionisation

Reaction	k
$\text{H} + \text{CR} \longrightarrow \text{H}^+ + \text{e}^-$	6.0×10^{-18}
$\text{He} + \text{CR} \longrightarrow \text{He}^+ + \text{e}^-$	6.5×10^{-18}
$\text{H}_2 + \text{CR} \longrightarrow \text{H}_2^+ + \text{e}^-$	1.2×10^{-17}
$\text{C} + \text{CR} \longrightarrow \text{C}^+ + \text{e}^-$	2.3×10^{-17}
$\text{CO} + \text{CR} \longrightarrow \text{CO}^+ + \text{e}^-$	3.9×10^{-17}
$\text{Cl} + \text{CR} \longrightarrow \text{Cl}^+ + \text{e}^-$	3.9×10^{-17}
$\text{N} + \text{CR} \longrightarrow \text{N}^+ + \text{e}^-$	2.7×10^{-17}
$\text{O} + \text{CR} \longrightarrow \text{O}^+ + \text{e}^-$	3.4×10^{-17}

Processus physico-chimiques

Réactions induites par les rayons cosmiques:

On peut distinguer essentiellement 3 types de réactions:

- réactions de dissociation
- réactions d'ionisation
- photoréactions

Photoréaction

$$k = \alpha (T/300)^\beta \gamma / (1 - \omega)$$

Source in situ de photons
UV !

CR arrachent des électrons, qui excitent l'hydrogène moléculaire par collision, qui se relaxe lui-même radiativement

Reaction	α	β	γ
$\text{H}_2\text{O} + \text{CR} \rightarrow \text{OH} + \text{H}$	1.3×10^{-17}	0.0	486
$\text{HCO} + \text{CR} \rightarrow \text{HCO}^+ + \text{e}^-$	1.3×10^{-17}	0.0	585
$\text{HCO} + \text{CR} \rightarrow \text{CO} + \text{H}$	1.3×10^{-17}	0.0	211
$\text{C} + \text{CR} \rightarrow \text{C}^+ + \text{e}^-$	1.3×10^{-17}	0.0	155
$\text{CH} + \text{CR} \rightarrow \text{C} + \text{H}$	1.3×10^{-17}	0.0	365
$\text{C}_2 + \text{CR} \rightarrow \text{C} + \text{C}$	1.3×10^{-17}	0.0	120
$\text{CO} + \text{CR} \rightarrow \text{C} + \text{O}$	3.9×10^{-17}	1.17	105
$\text{NH} + \text{CR} \rightarrow \text{N} + \text{H}$	1.3×10^{-17}	0.0	250
$\text{O}_2 + \text{CR} \rightarrow \text{O} + \text{O}$	1.3×10^{-17}	0.0	376

Processus physico-chimiques

Réactions par transfert de charge: $A^+ + B \rightarrow A + B^+$

- ces réactions se produisent sans rupture de liaison chimique
- ces réactions jouent un grand rôle dans l'instauration d'un équilibre d'ionisation parmi les constituants du milieu interstellaire
- les constantes cinétiques peuvent atteindre des valeurs élevées ($\sim 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$)

Reaction	k
$\text{H}^+ + \text{OH} \rightarrow \text{H} + \text{OH}^+$	2.1×10^{-9}
$\text{N}_2^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}^+$	2.3×10^{-9}
$\text{C}^+ + \text{CH} \rightarrow \text{C} + \text{CH}^+$	3.8×10^{-10}
$\text{C}^+ + \text{CH}_2 \rightarrow \text{C} + \text{CH}_2^+$	5.2×10^{-10}
$\text{C}^+ + \text{C}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{C} + \text{C}_2\text{H}_4^+$	3.0×10^{-10}
$\text{N}^+ + \text{CH}_2 \rightarrow \text{N} + \text{CH}_2^+$	1.0×10^{-9}
$\text{O}^+ + \text{CH} \rightarrow \text{O} + \text{CH}^+$	3.5×10^{-10}
$\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}^+$	3.2×10^{-9}

Processus physico-chimiques

Réactions par association radiative: $A + B \rightarrow AB^* \rightarrow AB + h\nu$

- le résultat de l'association de deux réactifs est stabilisé par l'émission d'un photon
- on peut distinguer 3 constantes cinétiques pour le processus:
 1. Association : k_a
 2. Dissociation : k_d
 3. Relaxation radiative : k_r
- la constante cinétique résultante pour l'association radiative est

$$k_{ra} = \left(\frac{k_a}{k_r + k_d} \right) k_r$$

Processus physico-chimiques

Réactions par association radiative: $A + B \rightarrow AB^* \rightarrow AB + h\nu$

- quelques exemples...

Reaction	k
$C + H \rightarrow CH + h\nu$	1.0×10^{-17}
$C + C \rightarrow C_2 + h\nu$	4.4×10^{-18}
$C + N \rightarrow CN + h\nu$	1.4×10^{-18}
$C + H_2 \rightarrow CH_2 + h\nu$	1.0×10^{-17}
$C^+ + H \rightarrow CH^+ + h\nu$	1.7×10^{-17}
$C^+ + H_2 \rightarrow CH_2^+ + h\nu$	4.0×10^{-16}
$O + O \rightarrow O_2 + h\nu$	4.9×10^{-20}

- facteur essentiel déterminant la cinétique de ce processus: temps de vie du complexe activé!!
énergie excédentaire \Rightarrow degré de liberté vibrationnel
densité d'états = fonction croissante du nombre d'atomes dans la molécule
(cfr m.n.v)
 \Rightarrow processus efficace pour les grandes molécules (cfr PAH)

Processus physico-chimiques

Réactions par détachement associatif:



Réaction entre un anion et une espèce neutre, aboutissant à la formation d'une nouvelle molécule avec libération d'un électron

Processus physico-chimiques

Réactions par détachement associatif:



Réaction entre un anion et une espèce neutre, aboutissant à la formation d'une nouvelle molécule avec libération d'un électron

Exemple important!



- processus conduisant à la formation d'hydrogène moléculaire
- vraisemblablement LE processus dominant dans l'Univers jeune, en raison de l'insuffisance en éléments lourds

Processus physico-chimiques

Réactions par association collisionnelle:



- processus t(h)ermoléculaire
- molécularité plus élevée \Rightarrow peu probable (densité faible!!)

Ce processus peut devenir significatif dans certains cas, où la densité est suffisante

- photosphères stellaires
- disques circumstellaires
- atmosphères planétaires

Processus physico-chimiques

Réseaux chimiques en phase gazeuse:

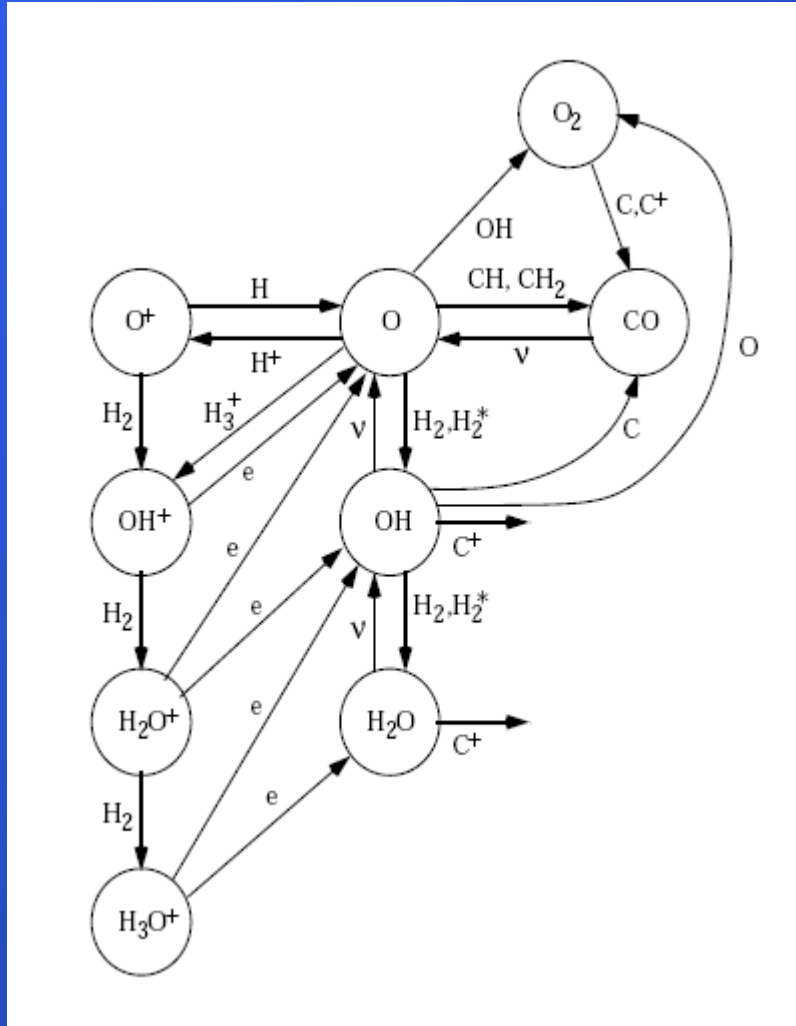
*Ensemble de processus élémentaires
gouvernant les transformations d'espèces
chimiques et reproduisant les filiations entre
molécules dans un milieu donné*

Nécessite:

- Un bon inventaire des espèces chimiques présentes
- Une bonne connaissance des processus susceptibles d'intervenir
- Une bonne connaissance des constantes cinétiques concernées

Processus physico-chimiques

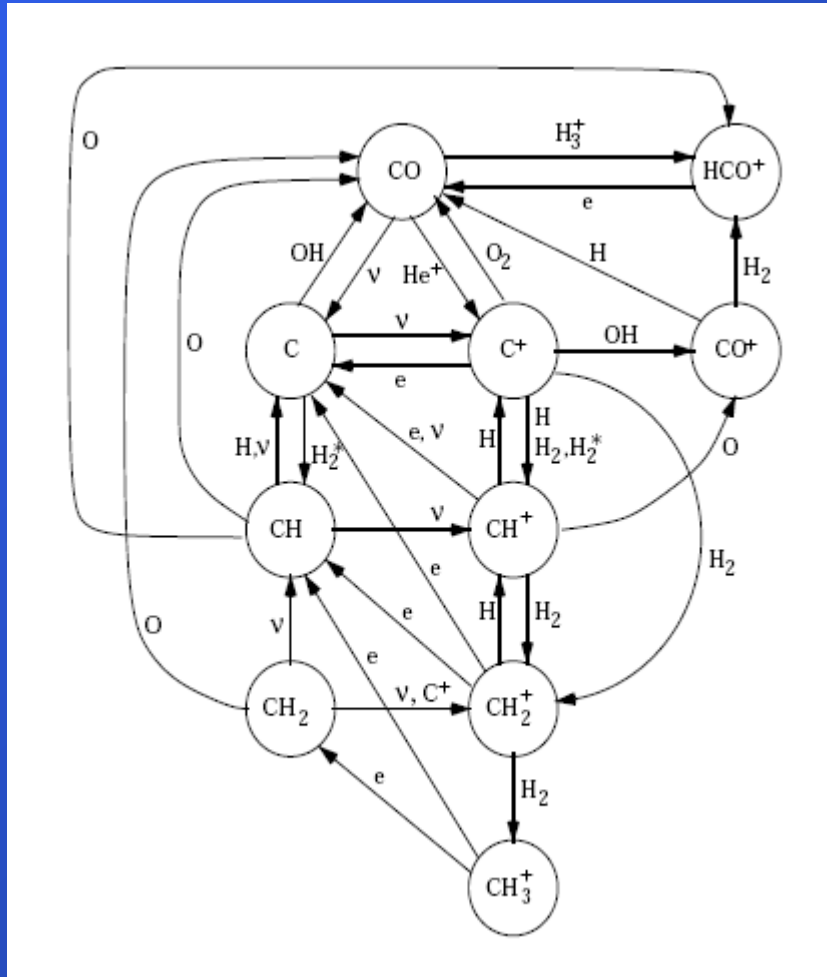
Réseaux chimiques en phase gazeuse:



Chimie de l'oxygène dans un nuage diffus, ou une région de photodissociation

Processus physico-chimiques

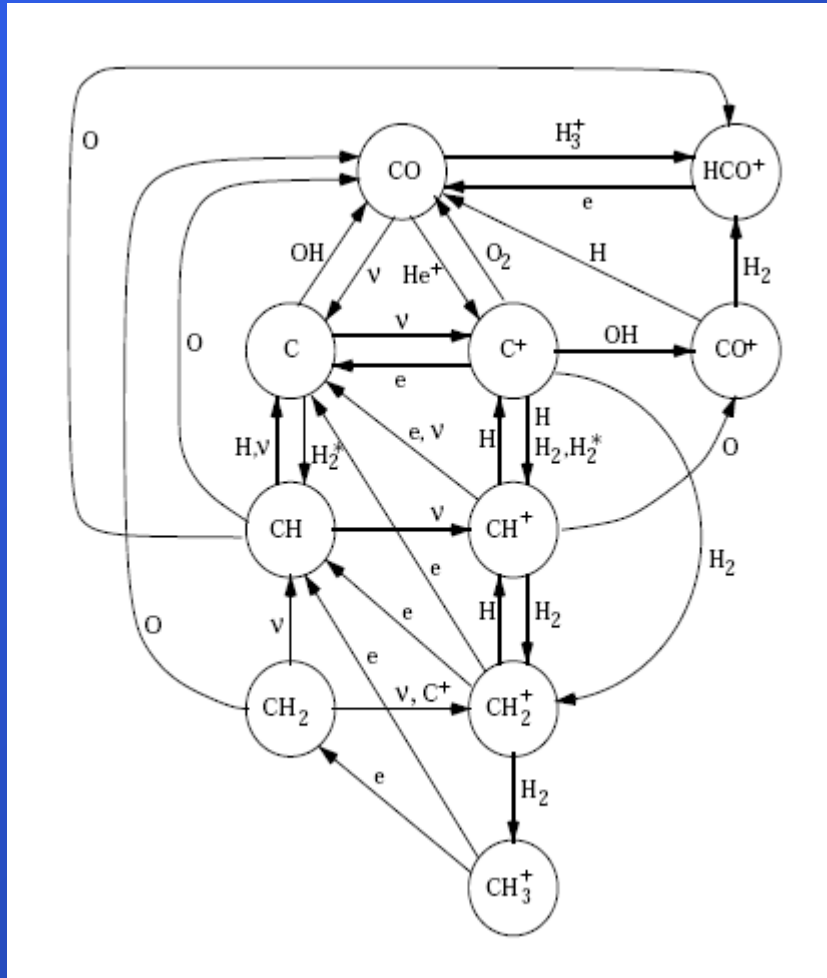
Réseaux chimiques en phase gazeuse:



Chimie du carbone dans un nuage diffus, ou une région de photodissociation

Processus physico-chimiques

Réseaux chimiques en phase gazeuse:



Chimie du carbone dans un nuage diffus, ou une région de photodissociation

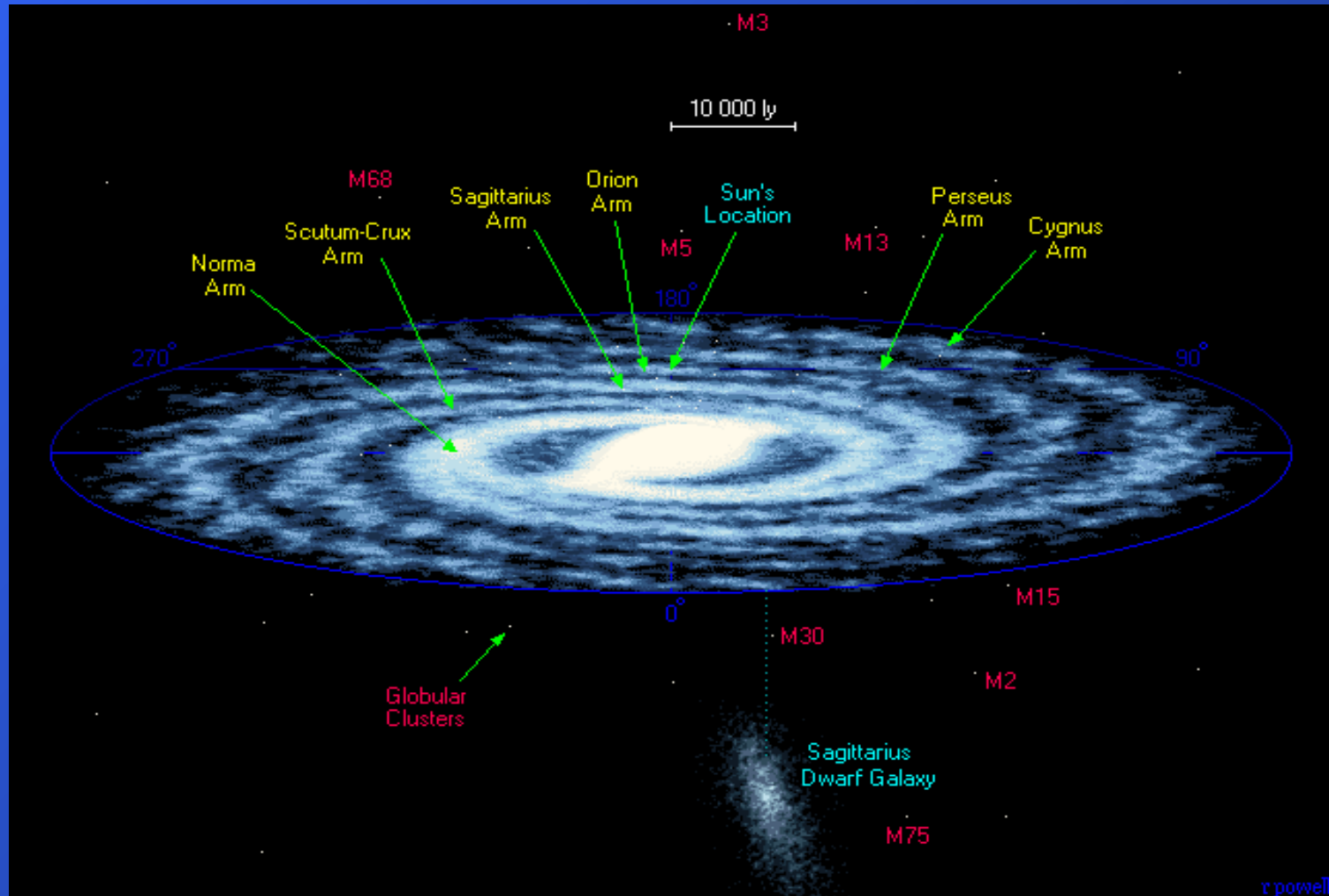
**La chimie en phase gazeuse est importante, mais elle ne suffit pas à tout expliquer!
→ recours à une approche complémentaire !**

Processus physico-chimiques

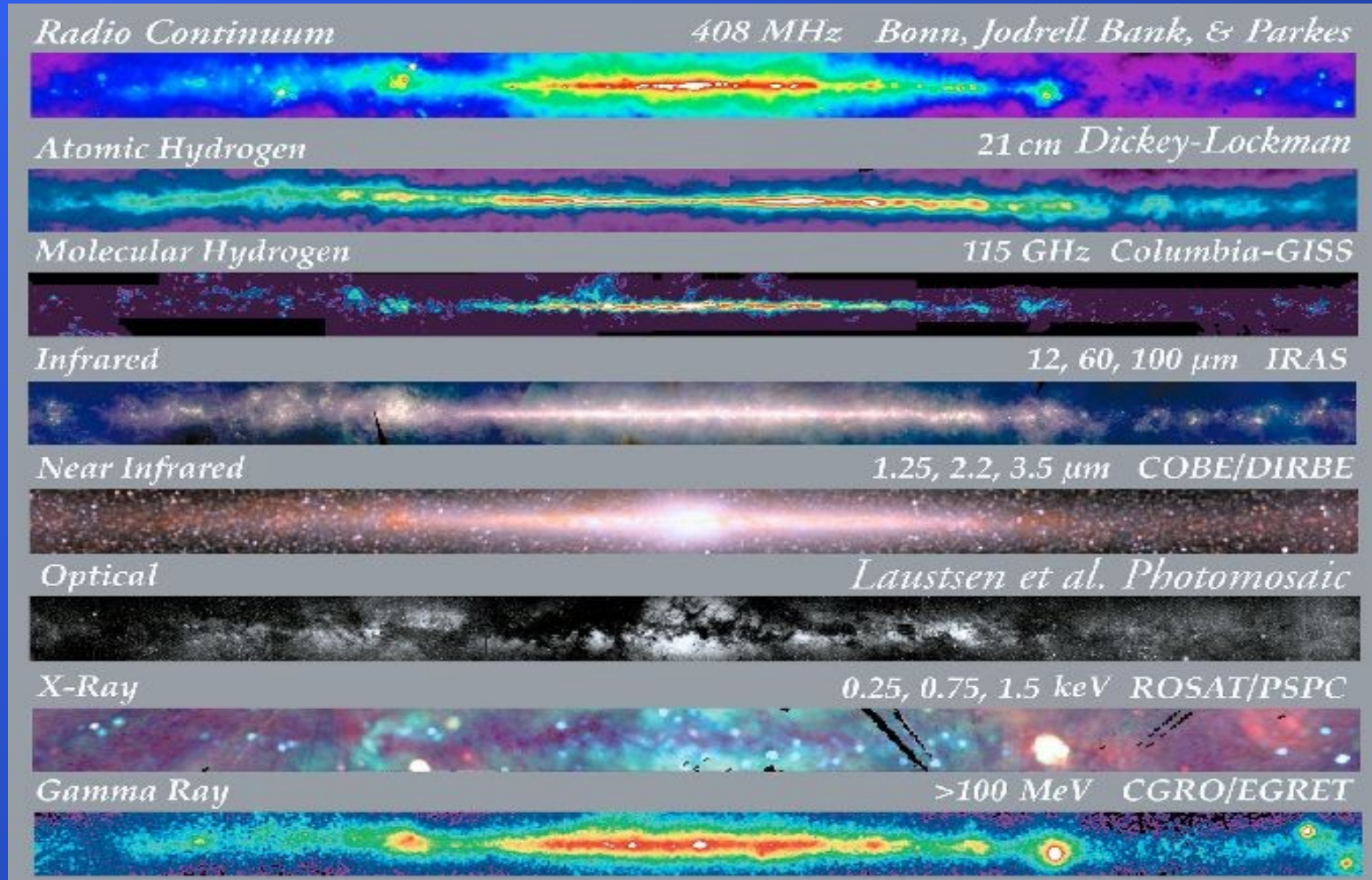
- Phase gazeuse: problème de la densité faible
ISM diffus: 10^2 cm^{-3}
nuage moléculaire (max!): $10^4 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$
CSM dense: $10^{11} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
(... atmosphère terrestre au niveau de la mer: $2.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)
⇒ cinétique insatisfaisante

- Filière parallèle pour produire des molécules?
Une catalyse est-elle envisageable?
⇒ piste à envisager: catalyse hétérogène
⇒ nécessite la présence de corps solides en abondance
suffisante : **poussières!!**

Processus physico-chimiques



Processus physico-chimiques



Processus physico-chimiques

- **Poussières:**

Taille: ~ 0,001 à ~ 1 μm

Composition:

- très difficile à déterminer, pas de signature spécifique, uniquement des signatures génériques associées à certaines classes de composés
- essentiel de la masse : éléments de poids atomique supérieur ou égal à 12 (C, O, N, Si, Mg, Fe)
- graphite, silicates, “glaces sales”...
- couches externes éventuellement riches en molécules diverses

Structure:

Complexe, variable (lieu et temps...)

Processus physico-chimiques

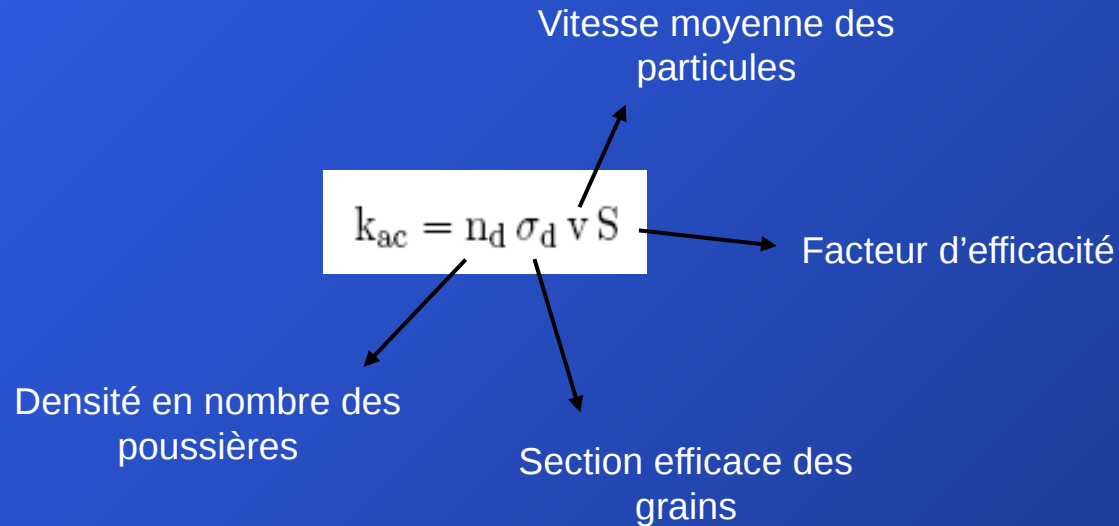
Processus en surface: vue schématique (2 approches)

- Langmuir-Hinshelwood
 - Accretion
 - Migration
 - Réaction
 - Ejection
- Eley-Rideal
 - Accretion - Réaction
 - Ejection

Processus physico-chimiques

Processus en surface:

- Accretion:



Physisorption: interactions de type van der Waals, ~ 0.1 eV

Chimisorption: interactions plus fortes, formation d'une liaison chimique, \sim quelques eV

Processus physico-chimiques

Processus en surface:

- Migration:
 - Surface du grain : multitude de sites potentiels de physisorption et de chimisorption.
 - La migration consiste en un changement de site d'adsorption, nécessitant de franchir des barrières de potentiel plus ou moins hautes.
 - La migration est d'autant plus probable que l'interaction est faible et que la température caractéristique du grain est grande

$$\tau_m = \nu_m^{-1} \exp\left(\frac{E_m}{k T_d}\right)$$

Barrière de migration

Temps caractéristique de migration

Température caractéristique du grain

Processus physico-chimiques

Processus en surface:

- Réaction:

Migration vers un site occupé → interaction entre espèces chimiques

Processus physico-chimiques

Processus en surface:

- Réaction:

Migration vers un site

- sans E_a

Reactants		products
H + O	→	OH
H + OH	→	H ₂ O
H + C	→	CH
H + CH	→	CH ₂
H + CH ₂	→	CH ₃
H + CH ₃	→	CH ₄
H + N	→	NH
H + NH	→	NH ₂
H + NH ₂	→	NH ₃
H + O ₂ H	→	H ₂ O ₂
H + NO	→	HNO
H + CN	→	HCN
H + CNO	→	HCNO
H + HCO	→	H ₂ CO
H + HCOO	→	HCOOH
H + CH ₃ O	→	CH ₃ OH
O + O	→	O ₂
O + N	→	NO
O + C	→	CO
O + CN	→	OCN
O + HCO	→	HCOO
C + N	→	CN
N + N	→	N ₂
N + NH	→	N ₂ H

entre espèces chimiques

Processus physico-chimiques

Processus en surface:

- Réaction:

Migration vers un site occupé → interaction entre espèces chimiques

- sans E_a

- avec E_a :

Réactions fortement inhibées
en phase gazeuse.

Le temps de résidence accru sur
la surface rend ces processus plus
efficaces.

Reactants		products	E_a (K)
H + CO	→	HCO	1000
H + O ₂	→	HO ₂	1200
H + H ₂ O ₂	→	H ₂ O + OH	1400
H + O ₃	→	O ₂ + OH	450
H + C ₂ H ₂	→	C ₂ H ₃	1250
H + C ₂ H ₄	→	C ₂ H ₅	1100
H + H ₂ S	→	SH + H ₂	860
H + N ₂ H ₂	→	N ₂ H + H ₂	650
H + N ₂ H ₄	→	N ₂ H ₃ + H ₂	650

Réaction favorisée par un long temps de résidence, une couverture superficielle de sites réactionnels élevée, et une probabilité de pénétration de la barrière élevée.

Processus physico-chimiques

Processus en surface:

- Réaction:

Gain considérable apporté par les processus en surface:

1. Concentration des espèces en surface

2. Probabilité non-négligeable de rencontres multiples durant le temps de résidence

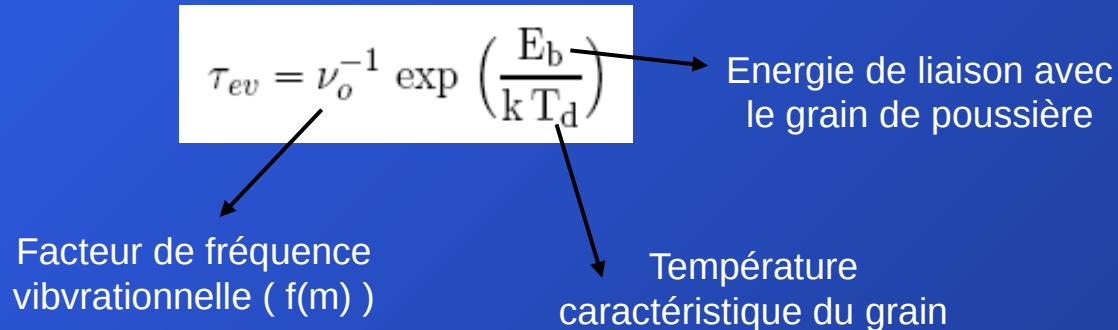
**3. Rôle de 'troisième partenaire' joué par le grain de poussière
(→ additions simples envisageables)**

Processus physico-chimiques

Processus en surface:

- Evaporation:

Le temps de résidence peut être exprimé de la façon suivante:

$$\tau_{ev} = \nu_o^{-1} \exp\left(\frac{E_b}{k T_d}\right)$$


Facteur de fréquence vibrationnelle (ν_o)

Energie de liaison avec le grain de poussière

Température caractéristique du grain

Facteurs favorisant un long temps de résidence:

- masse élevée
- température faible
- énergie de liaison élevée

Processus physico-chimiques

Formation de H₂:

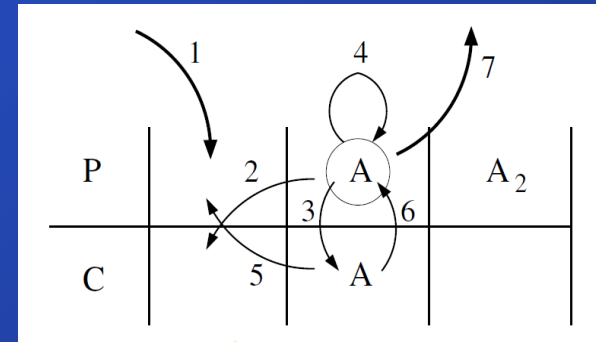
- 2 types de site: P et C
- flux de H en provenance de la phase gazeuse vers P uniquement
- réaction immédiate si un H migre vers un site occupé
- monocouche

Processus physico-chimiques

Formation de H₂:

- 2 types de site: P et C
- flux de H en provenance de la phase gazeuse vers P uniquement
- réaction immédiate si un H migre vers un site occupé
- monocouche

Diagramme de processus élémentaires →



$$\dot{H}_P = F(1 - H_P - H_2) - \alpha_{PC} H_P(1 - H_C) - \alpha_{PC} H_P H_C - 2\alpha_{PP} H_P^2 + \alpha_{CP} H_C(1 - H_P - H_2) - \alpha_{CP} H_C H_P - \beta_{H_P} H_P$$

$$\dot{H}_C = \alpha_{PC} H_P(1 - H_C) - \alpha_{PC} H_P H_C - \alpha_{CP} H_C(1 - H_P - H_2) - \alpha_{CP} H_C H_P - 2\alpha_{CC} H_C^2 - \beta_{H_C} H_C$$

Processus physico-chimiques

Formation de H₂:

Taux de formation avec rétention en surface:

$$\dot{H}_2 = \mu (\alpha_{PP} H_P^2 + \alpha_{CP} H_C H_P + \alpha_{PC} H_P H_C + \alpha_{CC} H_C^2) - \beta_{H_2} H_2$$

μ : fraction d'hydrogène moléculaire qui reste adsorbé immédiatement après formation

Taux de désorption total:

$$\dot{H}_2 = (1 - \mu) (\alpha_{PP} H_P^2 + \alpha_{CP} H_C H_P + \alpha_{PC} H_P H_C + \alpha_{CC} H_C^2) + \beta_{H_2} H_2$$

Processus physico-chimiques

Formation de H₂: Présence simultanée de H et D

- Sites de physisorption

$$\begin{aligned} \dot{H}_P = & F(1 - H_P - D_P - HD - H_2 - D_2) - \alpha_{PC} H_P (1 - H_C - D_C) \\ & - \alpha_{PC} H_P H_C - 2\alpha_{PP} H_P^2 - \alpha_{PP} H_P D_P - \alpha'_{PP} D_P H_P \\ & - \alpha_{PC} H_P D_C - \alpha'_{CP} D_C H_P - \alpha_{CP} H_C H_P \\ & + \alpha_{CP} H_C (1 - H_P - D_P - HD - H_2 - D_2) - \beta_{H_P} H_P \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{D}_P = & F(1 - H_P - D_P - HD - H_2 - D_2) - \alpha'_{PC} D_P (1 - H_C - D_C) \\ & - \alpha'_{PC} D_P H_C - 2\alpha'_{PP} D_P^2 - \alpha'_{PP} D_P H_P - \alpha_{PP} H_P D_P \\ & - \alpha'_{PC} D_P D_C - \alpha'_{CP} D_C D_P - \alpha_{CP} H_C D_P \\ & + \alpha'_{CP} D_C (1 - H_P - D_P - HD - H_2 - D_2) - \beta_{D_P} D_P \end{aligned}$$

Processus physico-chimiques

Formation de H₂: Présence simultanée de H et D

- Sites de chimisorption

$$\begin{aligned}\dot{H}_C = & \alpha_{PC} H_P (1 - H_C - D_C) - \alpha_{CP} H_C (1 - H_P - D_P - HD - H_2 - D_2) \\ & - \alpha_{CP} H_C H_P - \alpha_{CP} H_C D_P - \alpha_{PC} H_P H_C - \alpha'_{PC} D_P H_C \\ & - 2\alpha_{CC} H_C^2 - \alpha_{CC} H_C D_C - \alpha'_{CC} D_C H_C - \beta_{H_C} H_C\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{D}_C = & \alpha'_{PC} D_P (1 - H_C - D_C) - \alpha'_{CP} D_C (1 - H_P - D_P - HD - H_2 - D_2) \\ & - \alpha'_{CP} D_C D_P - \alpha'_{CP} D_C H_P - \alpha'_{PC} D_P D_C - \alpha_{PC} H_P D_C \\ & - 2\alpha'_{CC} D_C^2 - \alpha'_{CC} D_C H_C - \alpha_{CC} H_C D_C - \beta_{D_C} D_C\end{aligned}$$

Processus physico-chimiques

Formation de H₂: Présence simultanée de H et D

- Produits résultant de ces processus:

$$\dot{H}_2 = \mu (\alpha_{PP} H_P^2 + \alpha_{CP} H_C H_P + \alpha_{PC} H_P H_C + \alpha_{CC} H_C^2) - \beta_{H_2} H_2$$

$$\dot{D}_2 = \mu (\alpha'_{PP} D_P^2 + \alpha'_{CP} D_C D_P + \alpha'_{PC} D_P D_C + \alpha'_{CC} D_C^2) - \beta_{D_2} D_2$$

$$\begin{aligned} \dot{HD} = & \mu (\alpha_{PP} H_P D_P + \alpha'_{PP} D_P H_P + \alpha_{CP} H_C D_P + \alpha'_{CP} D_C H_P \\ & + \alpha_{PC} H_C D_P + \alpha'_{PC} D_C H_P + \alpha_{CC} H_C D_C + \alpha'_{CC} D_C H_C) \\ & - \beta_{HD} HD \end{aligned}$$

Processus physico-chimiques

Formation de H₂: Présence simultanée de H et D

- Produits résultant de ces processus:

$$\dot{H}_2 = \mu (\alpha_{PP} H_P^2 + \alpha_{CP} H_C H_P + \alpha_{PC} H_P H_C + \alpha_{CC} H_C^2) - \beta_{H_2} H_2$$

$$\dot{D}_2 = \mu (\alpha'_{PP} D_P^2 + \alpha'_{CP} D_C D_P + \alpha'_{PC} D_P D_C + \alpha'_{CC} D_C^2) - \beta_{D_2} D_2$$

$$\begin{aligned} \dot{HD} = & \mu (\alpha_{PP} H_P D_P + \alpha'_{PP} D_P H_P + \alpha_{CP} H_C D_P + \alpha'_{CP} D_C H_P \\ & + \alpha_{PC} H_C D_P + \alpha'_{PC} D_C H_P + \alpha_{CC} H_C D_C + \alpha'_{CC} D_C H_C) \\ & - \beta_{HD} HD \end{aligned}$$

Taux de formation de l'hydrogène moléculaire (rejeté en phase gazeuse):

$$\begin{aligned} R_{H_2} = & (1 - \mu) (\alpha_{PP} H_P^2 + \alpha_{CP} H_C H_P + \alpha_{PC} H_P H_C + \alpha_{CC} H_C^2) \\ & + \beta_{H_2} H_2 \end{aligned}$$

Processus physico-chimiques

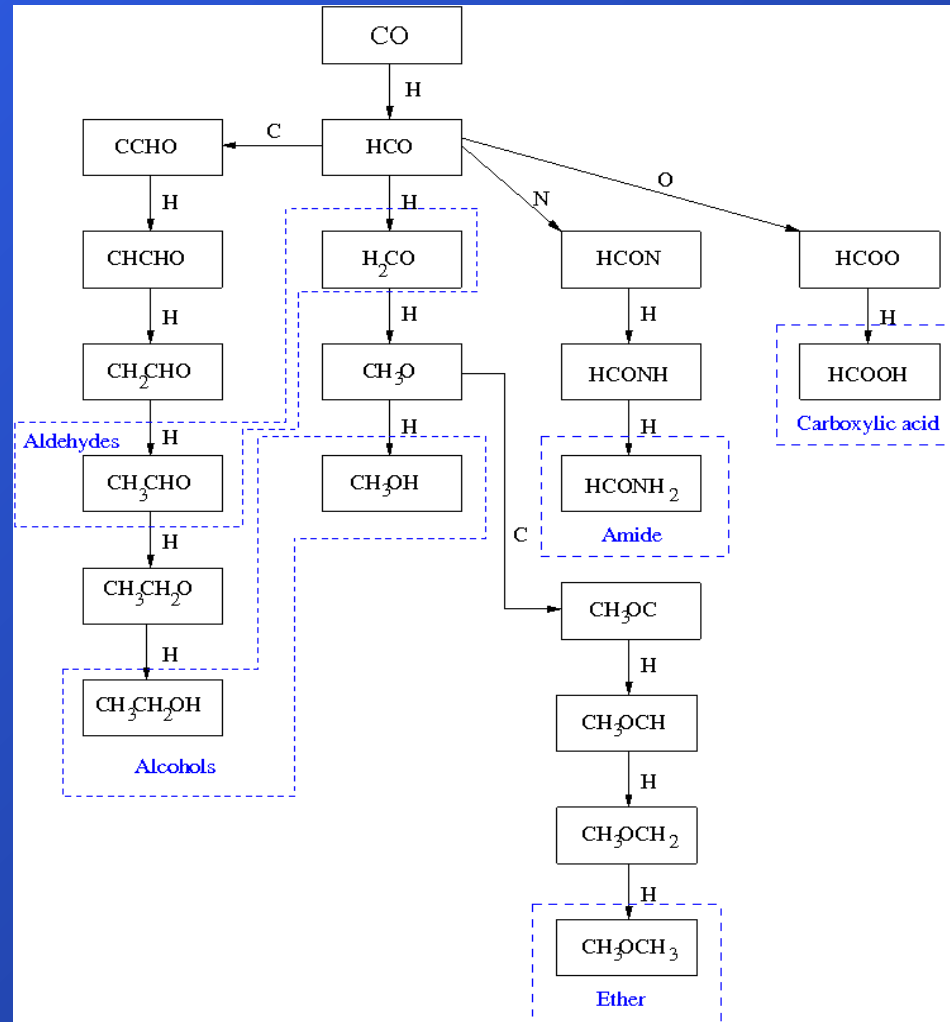
Formation de H₂: hypothèses affectant les résultats

- seules H, D et les molécules formées de ces espèces sont considérées
- en cas de taux d'accrétion élevé, l'hypothèse de la monocouche n'est plus valable
- la photodissociation a été négligée
- seul le mécanisme de Langmuir-Hinshelwood a été considéré; celui d'Eley-Rideal pourrait devenir significatif en cas de couverture surfacique importante
- quatre types de coefficients de diffusion ont été considérés; une représentation plus réaliste envisagerait une distribution de coefficients différents, tenant compte des propriétés variables des sites d'adsorption

Processus physico-chimiques

Exemples de réseaux chimiques en surface:

Chimie du CO...



3. L'évolution d'un nuage moléculaire

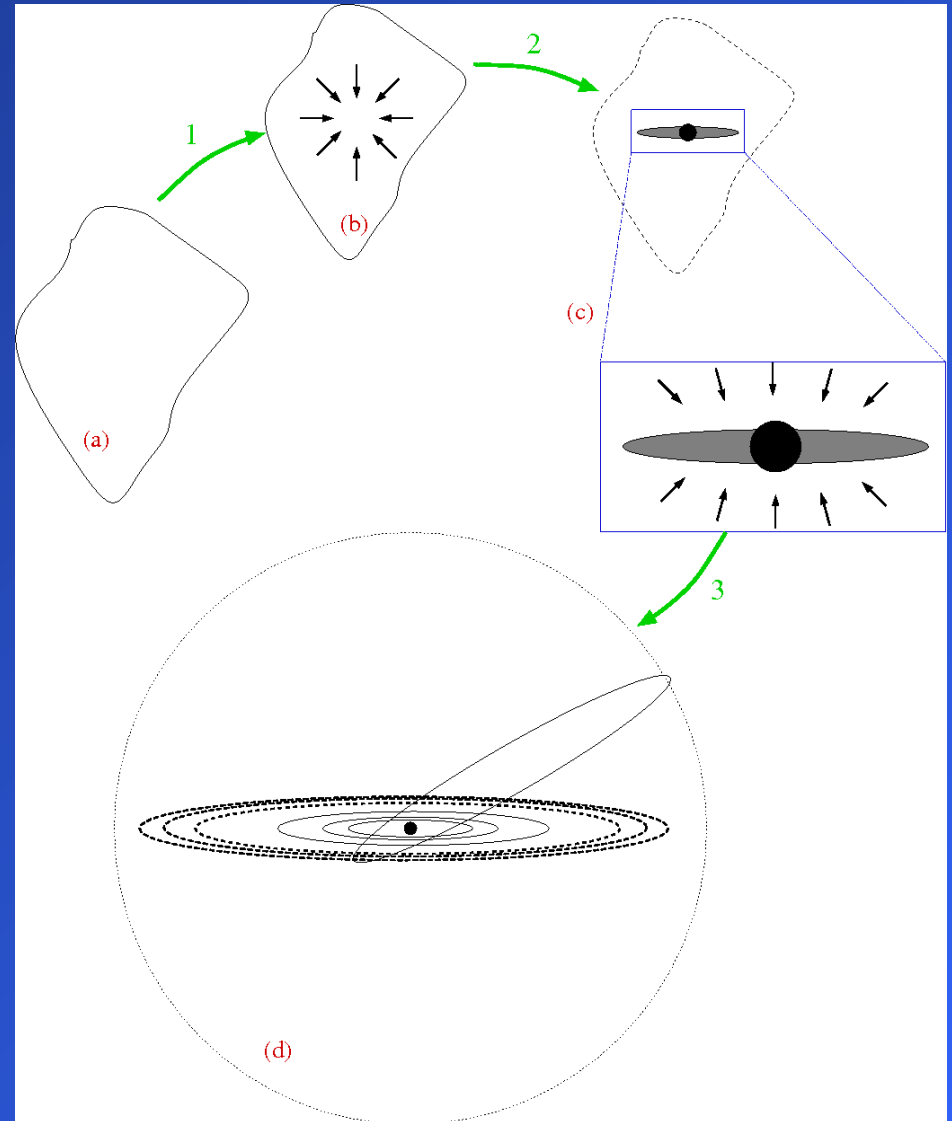
Evolution d'un nuage moléculaire

(a) nuage moléculaire

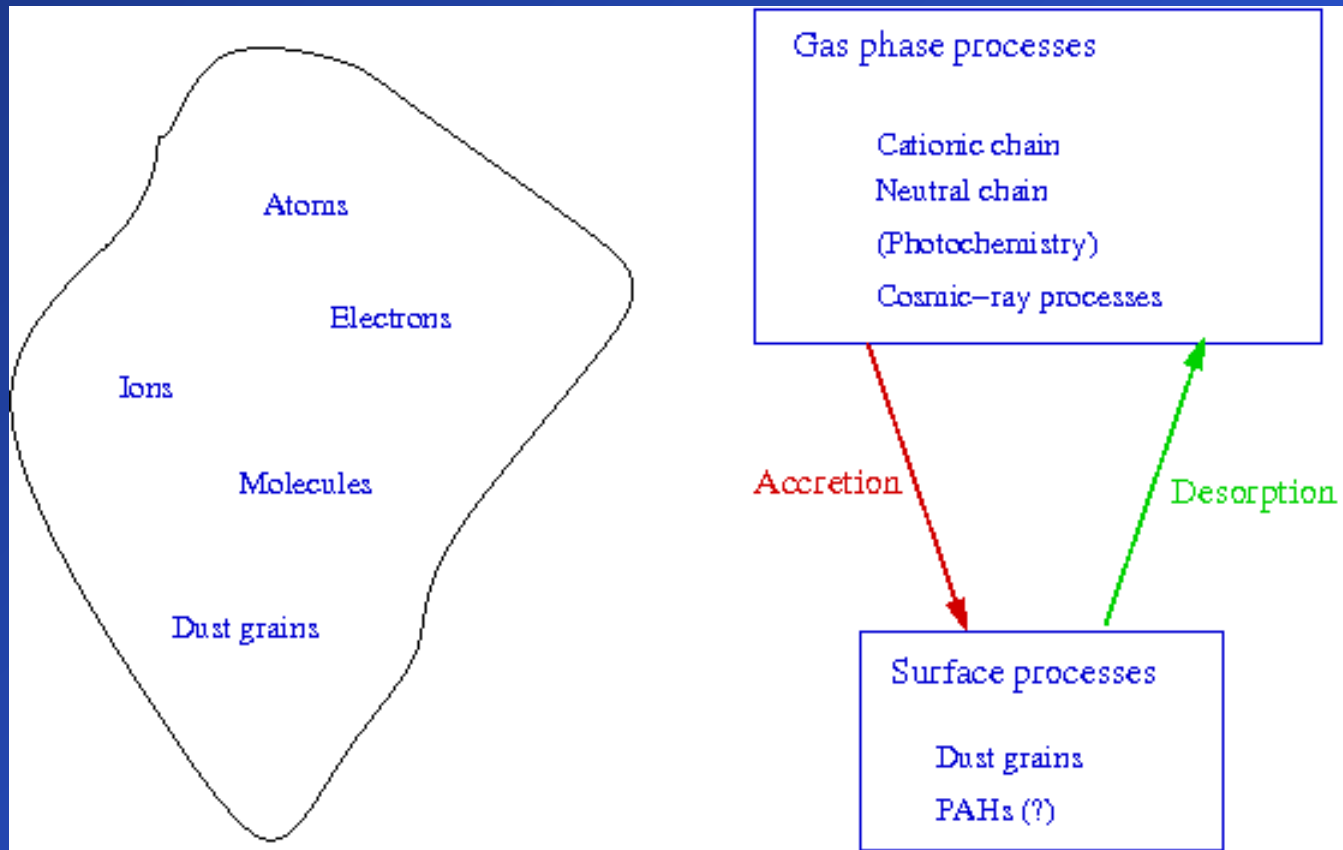
(b) objet proto-stellaire
(Classe 0)

(c) objet proto-stellaire
(Classe 1 ou 2)

(d) système planétaire



Evolution d'un nuage moléculaire



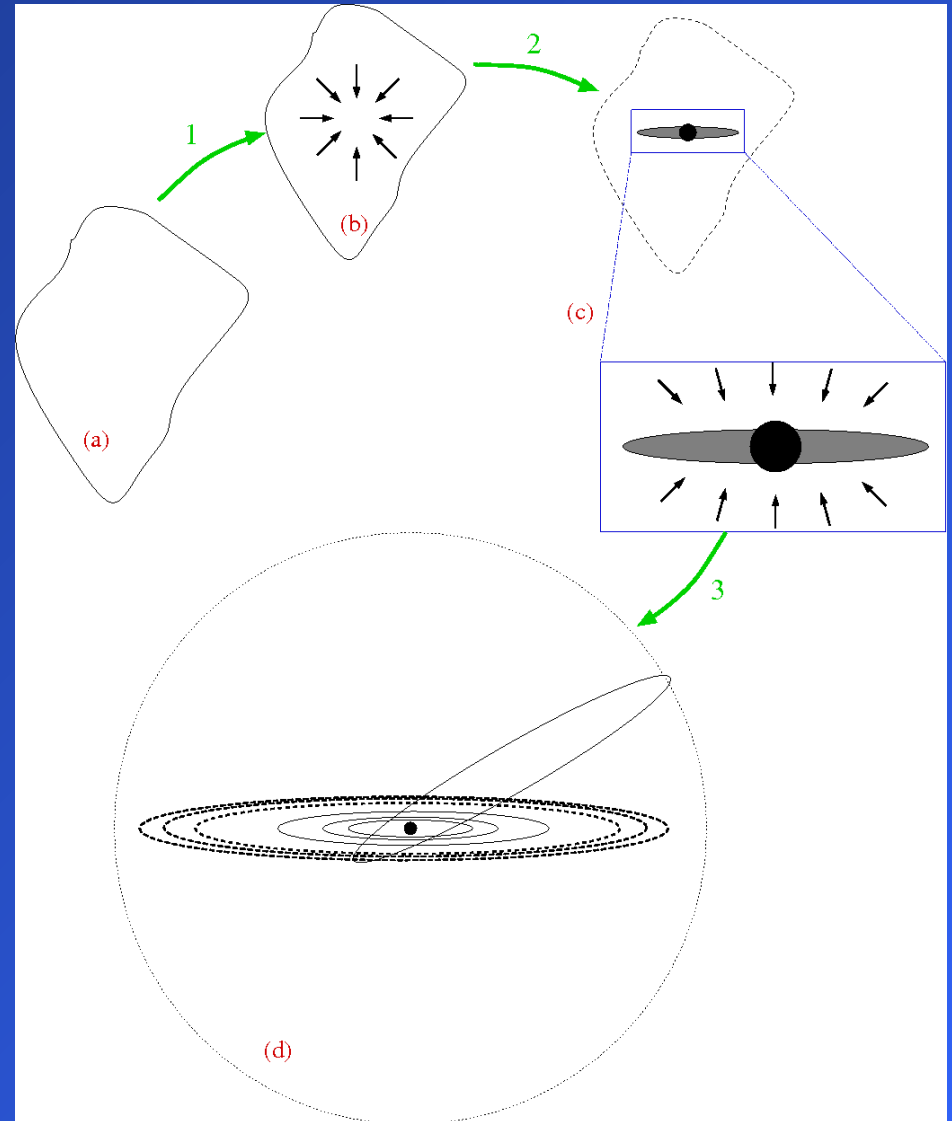
Evolution d'un nuage moléculaire

(a) nuage moléculaire

(b) objet proto-stellaire
(Classe 0)

(c) objet proto-stellaire
(Classe 1 ou 2)

(d) système planétaire



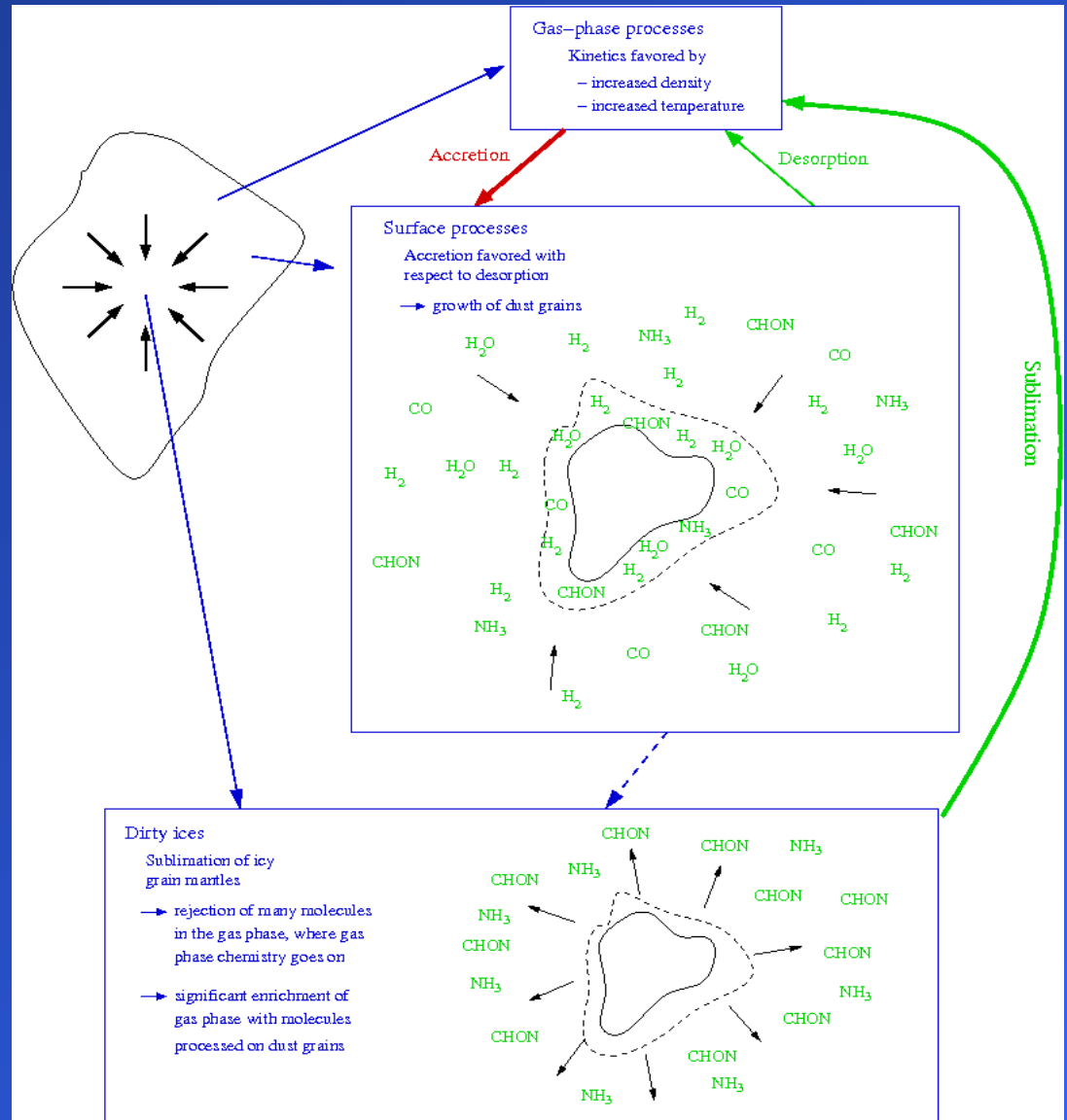
Evolution d'un nuage moléculaire

Contraction forte du nuage moléculaire

--> la densité dépasse celle des nuages moléculaires

Gradient de conditions physiques

--> chimie fonction de la position dans le nuage proto-stellaire



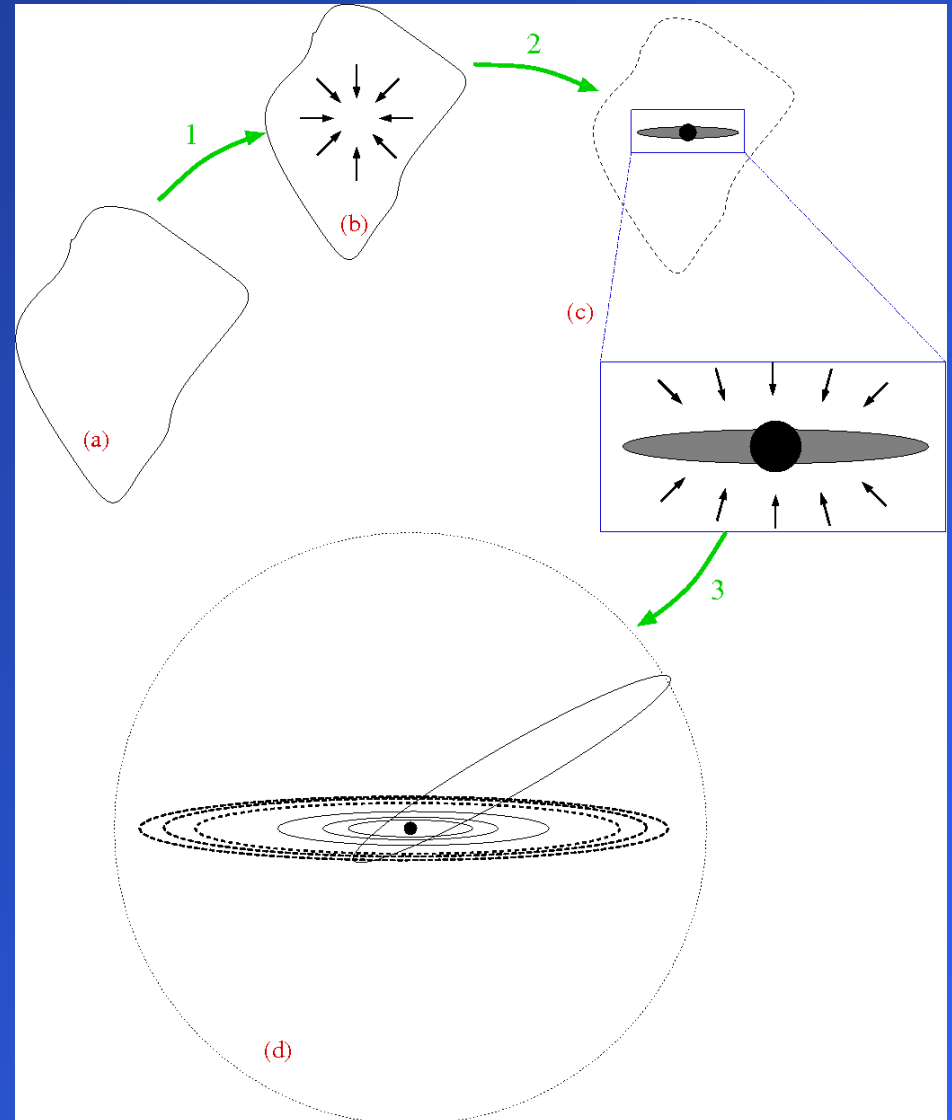
Evolution d'un nuage moléculaire

(a) nuage moléculaire

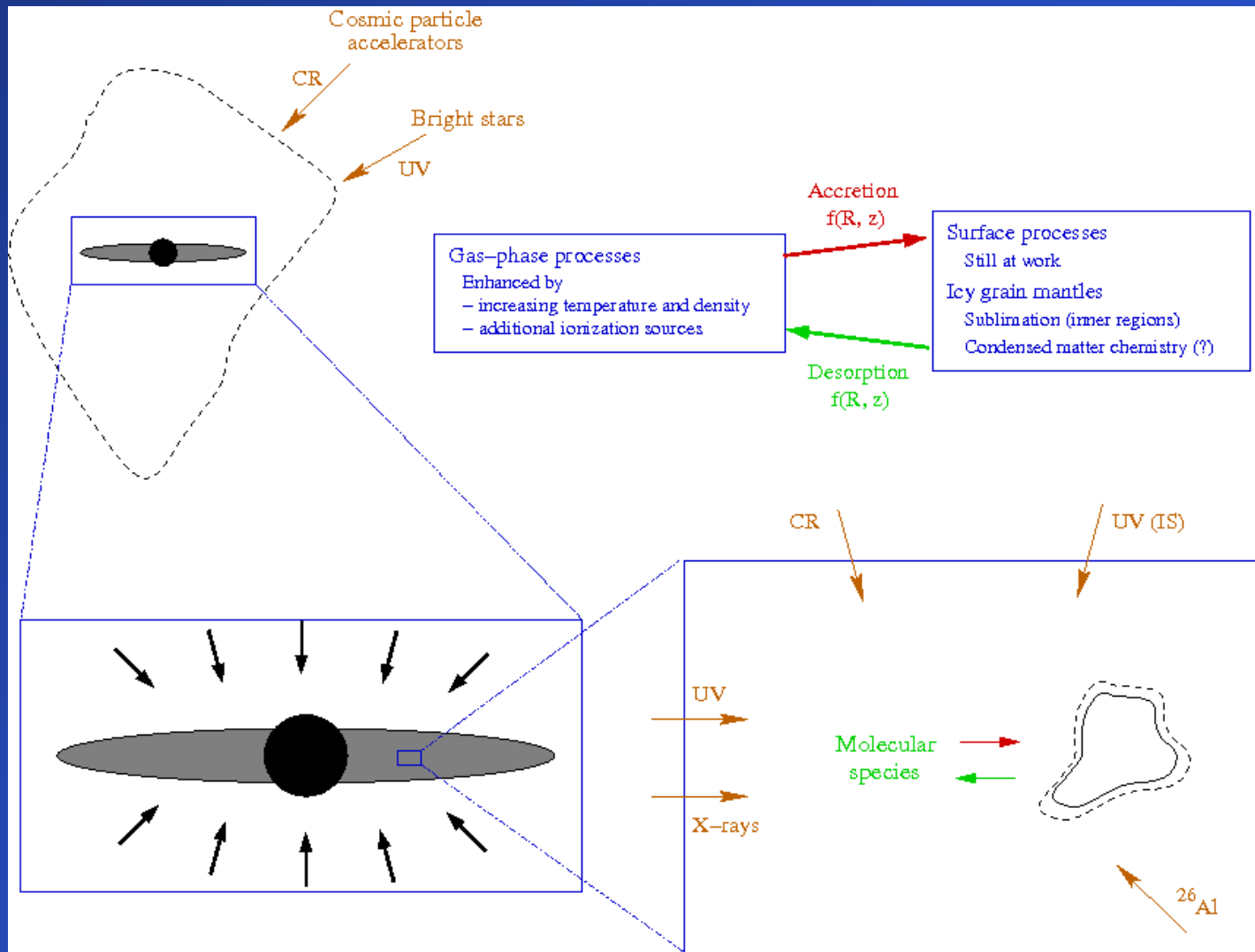
(b) objet proto-stellaire
(Classe 0)

(c) objet proto-stellaire
(Classe 1 ou 2)

(d) système planétaire



Evolution d'un nuage moléculaire



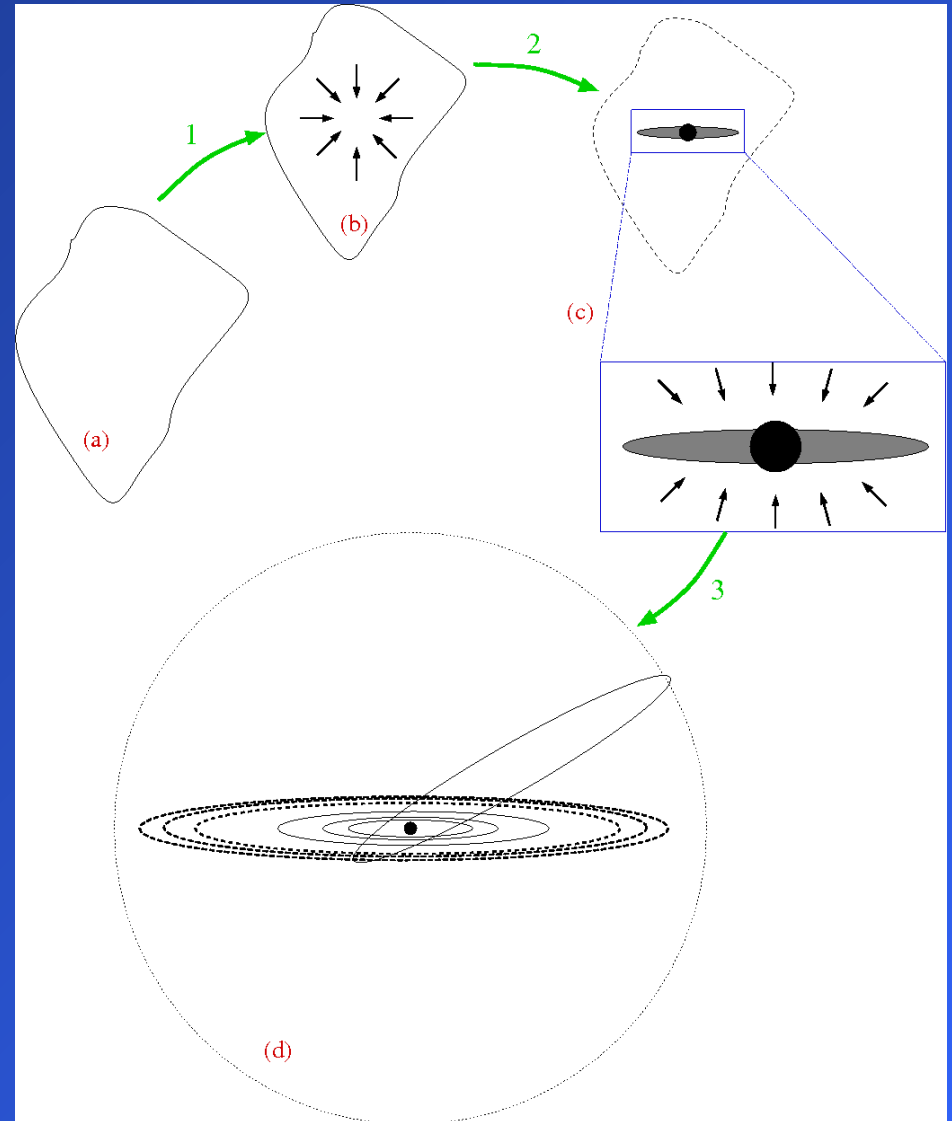
Evolution d'un nuage moléculaire

(a) nuage moléculaire

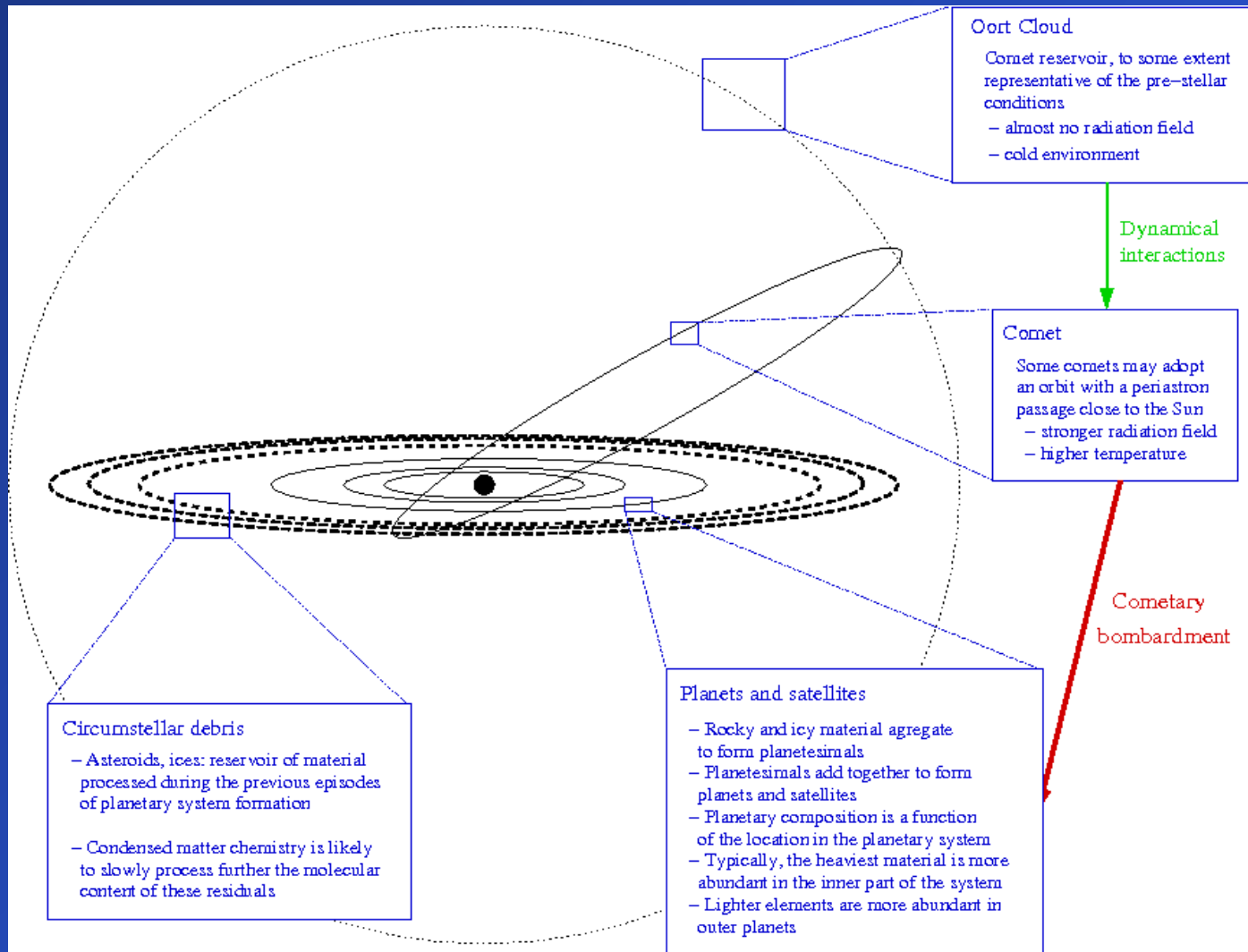
(b) objet proto-stellaire
(Classe 0)

(c) objet proto-stellaire
(Classe 1 ou 2)

(d) système planétaire



Evolution d'un nuage moléculaire



4. Le mot de la fin

L'étude de la matière interstellaire démontre que de multiples molécules sont significativement présentes, et donc que des processus efficaces sont actifs pour les produire

La connaissance des conditions physiques dictées par les populations stellaires est essentielle pour comprendre la physico-chimie interstellaire

L'évolution des nuages interstellaires pose la question de la filiation moléculaire, et donc du lien entre molécules interstellaires et par ex. cométaires

L'exploration des questions scientifiques discutées brièvement dans ce cours nécessite l'adoption d'une approche pluri-disciplinaire

Les découvertes dans ce cadre sont certes nombreuses, mais nous sommes encore très loin d'avoir fait le tour de la question

Références:

Recensement de molécules interstellaires:

- www.astrochymist.net

Influence des étoiles massives sur les processus astrochimiques

- De Becker M. 2014, *Astrophysics and Space Sciences*, 350, 237

Généralités sur les processus en phase gazeuse et en surface des grains de poussière:

- Tielens A.G.M.M 2005, *The physics and chemistry of the interstellar medium*, Cambridge University Press

Sources de rayons cosmiques galactiques:

- Proximité des nuages moléculaires: De Becker M. 2015, *BSRSL*, 84, 15
- SNR: Vink J. 2013, in *370 years of astronomy in Utrecht*, ed. H. Lamers & V. Pugliese, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*
- PACWB: De Becker M. & Raucq F. 2013, *Astronomy & Astrophysics*, 558, A28
- BSR: del Valle M.V. et al. 2015, *MNRAS*, 448, 207

Formation de l'hydrogène moléculaire sur les grains:

- Cazaux S. & Tielens A.G.M.M. 2004, *The Astrophysical Journal*, 604, 222

Ionisation par les radionucléides dans les disques proto-stellaires:

- Cleeves L.I. et al. 2013, *The Astrophysical Journal*, 777, id28

Bombardement cométaire de la Terre prébiotique:

- Chyba C.F. et al. 1990, *Science*, 249, 366

Base de données de constantes cinétiques:

- www.udfa.net ; Woodall J. et al. 2007, *Astronomy & Astrophysics*, 466, 1197