

Cosmologie Moderne

Cours 3



J.-Ch. Hamilton, APC
hamilton@apc.univ-paris7.fr



Résumé du cours précédent

- **Relativité restreinte:**

- ★ La vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels
- ★ Pas d'espace ni temps absolus : l'espace-temps et les transformations de Lorentz
- ★ Nombreux paradoxes apparents (ex/ paradoxe des jumeaux)
 - En fait ils sont juste contraire à notre expérience quotidienne de faibles vitesses.
 - Ils sont la simple conséquence de l'invariance de Lorentz
- ★ Vérifié expérimentalement avec une haute précision



Vue d'ensemble de la cosmologie

- Les échelles en cosmologie
- Les piliers de la cosmologie
 - ★ Relativité Générale
 - ★ Expansion de l'Univers
 - ★ Principe cosmologique
 - ★ Schéma de principe de la cosmologie observationnelle
- L'Univers de Friedman-Lemaître
 - ★ Métrique de F.L.
 - ★ Redshift
 - ★ Équations de Friedman
 - ★ Histoire de l'expansion
 - ★ Big-Bang
- F.A.Q. de cosmologie
- Histoire thermique de l'Univers



Relativité Générale

- restriction de la relativité restreinte:

- ★ uniquement les référentiels inertiels ...

- ne rend pas compte des forces car du fait du Principe Fondamental de la Dynamique:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

- ★ Quid des référentiels accélérés ?

- Masse inerte et masse gravitationnelle

- ★ P.F.D. pour la gravitation: $m_G \vec{g} = m_I \vec{a}$ avec $\vec{g} = -G \frac{M_T}{r^2} \vec{u}_r$

- Masse inerte: quantité de force nécessaire à produire une accélération (que cette force soit gravitationnelle ou non)
- Masse gravitationnelle: quantité de gravité pour une quantité de matière

- ★ on identifie les deux car elles semblent égales expérimentalement

- pas de raisons de le faire, c'est une constatation...

- ★ Pour Einstein il y a une raison fondamentale



Relativité Générale

- Principe d'équivalence

- ★ «La gravitation EST une accélération»

- expérience de pensée : l'ascenseur

- ★ Propulsé (accéléré) et parois transparentes:

- l'occupant voit qu'il bouge.
- Il se dit accéléré

- ★ Propulsé (accéléré) et parois opaques:

- l'occupant ressent la force de réaction du sol
- Il se dit dans un champ de gravitation

➔ gravitation et accélération indistinguables

- ★ Chute libre, parois transparentes

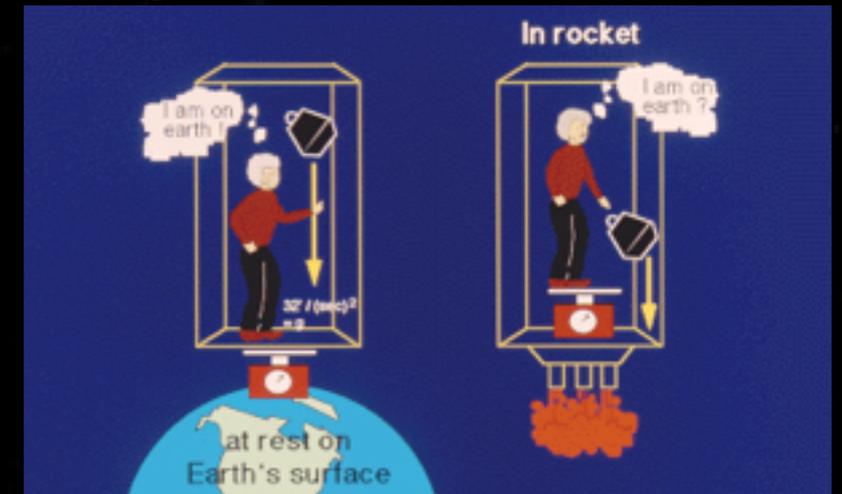
- les objets tombent en même temps: chute libre

- ★ Chute libre, parois opaques

- les objets flottent, sensation d'impesanteur

➔ gravitation et accélération indistinguables

➔ La gravitation doit courber les rayons lumineux... (prédiction !)



Relativité Générale

- Principe d'équivalence

- ★ «La gravitation EST une accélération»

- expérience de pensée : l'ascenseur

- ★ Propulsé (accélééré) et parois transparentes:

- l'occupant voit qu'il bouge.
- Il se dit accéléré

- ★ Propulsé (accélééré) et parois opaques:

- l'occupant ressent la force de réaction du sol
- Il se dit dans un champ de gravitation

➔ gravitation et accélération indistinguables

- ★ Chute libre, parois transparentes

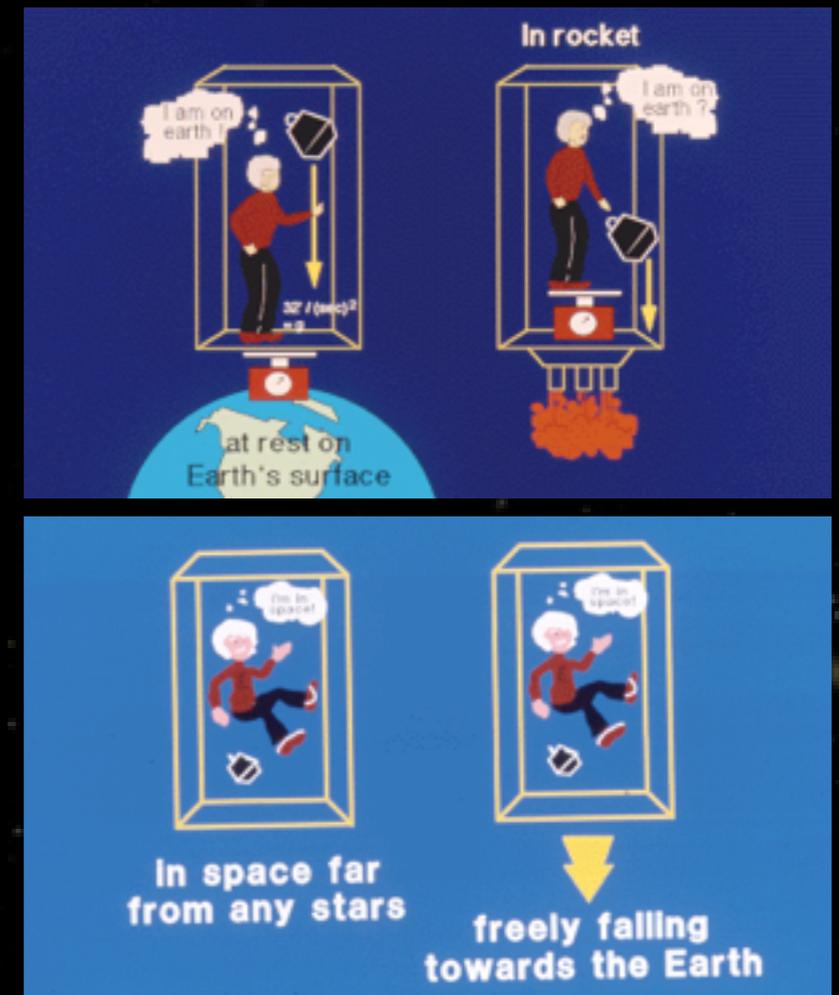
- les objets tombent en même temps: chute libre

- ★ Chute libre, parois opaques

- les objets flottent, sensation d'impesanteur

➔ gravitation et accélération indistinguables

➔ La gravitation doit courber les rayons lumineux... (prédiction !)



Relativité Générale

- Principe d'équivalence

- ★ «La gravitation EST une accélération»

- expérience de pensée : l'ascenseur

- ★ Propulsé (accéléré) et parois transparentes:

- l'occupant voit qu'il bouge.
- Il se dit accéléré

- ★ Propulsé (accéléré) et parois opaques:

- l'occupant ressent la force de réaction du sol
- Il se dit dans un champ de gravitation

➔ gravitation et accélération indistinguables

- ★ Chute libre, parois transparentes

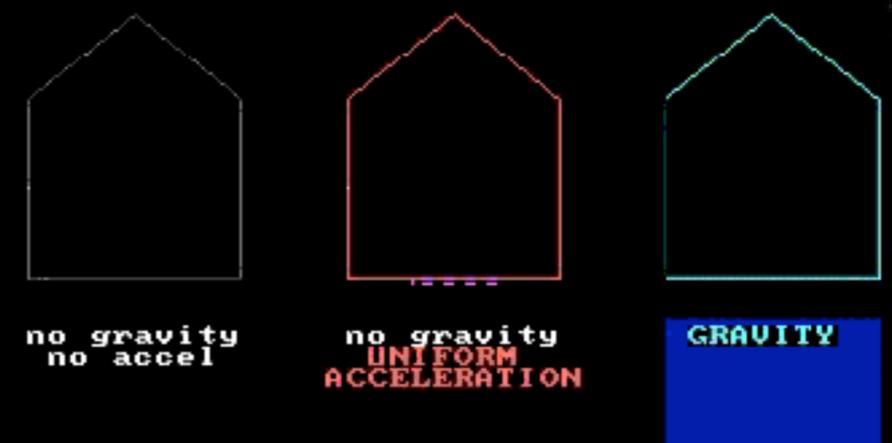
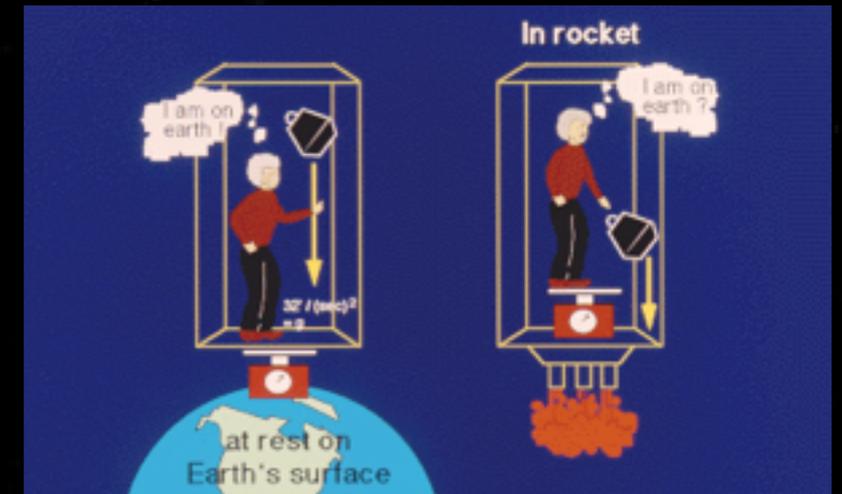
- les objets tombent en même temps: chute libre

- ★ Chute libre, parois opaques

- les objets flottent, sensation d'impesanteur

➔ gravitation et accélération indistinguables

➔ La gravitation doit courber les rayons lumineux... (prédiction !)



Relativité Générale

- Principe d'équivalence:

- ★ En tout point on peut:

- Se placer dans un référentiel inertiel en chute libre
- Pas d'accélération : espace-temps de Minkowski

- ★ Espace-temps global:

- Collection d'espace-temps de Minkowski,
- accolés par des changements de référentiels
- Courbure différente en chaque point traduisant l'effet de la gravitation

- ★ Gravitation = courbure de l'espace-temps

- la courbure dépend de la matière
- la courbure accélère la matière et l'énergie

- ★ Théorie géométrique de la gravitation

- objet: la dynamique de la métrique de l'espace-temps



Relativité Générale

- Principe d'équivalence:

- ★ En tout point on peut:

- Se placer dans un référentiel inertiel en chute libre
- Pas d'accélération : espace-temps de Minkowski

- ★ Espace-temps global:

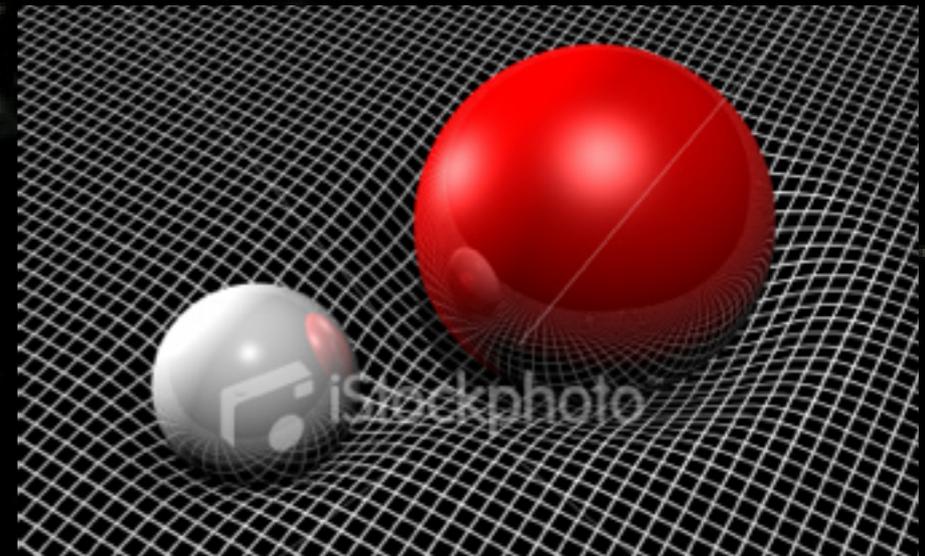
- Collection d'espace-temps de Minkowski,
- accolés par des changements de référentiels
- Courbure différente en chaque point traduisant l'effet de la gravitation

- ★ Gravitation = courbure de l'espace-temps

- la courbure dépend de la matière
- la courbure accélère la matière et l'énergie

- ★ Théorie géométrique de la gravitation

- objet: la dynamique de la métrique de l'espace-temps



Relativité Générale

- Principe d'équivalence:

- ★ En tout point on peut:

- Se placer dans un référentiel inertiel en chute libre
- Pas d'accélération : espace-temps de Minkowski

- ★ Espace-temps global:

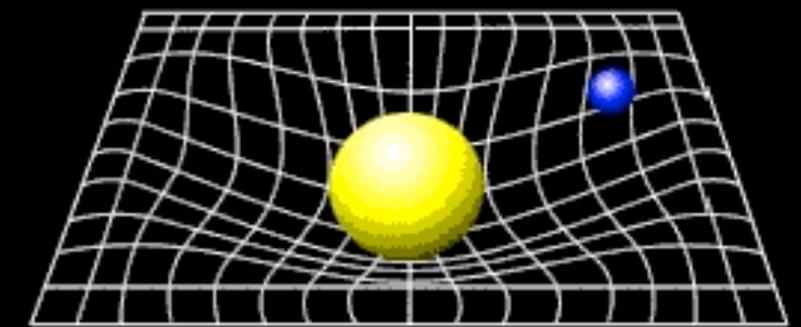
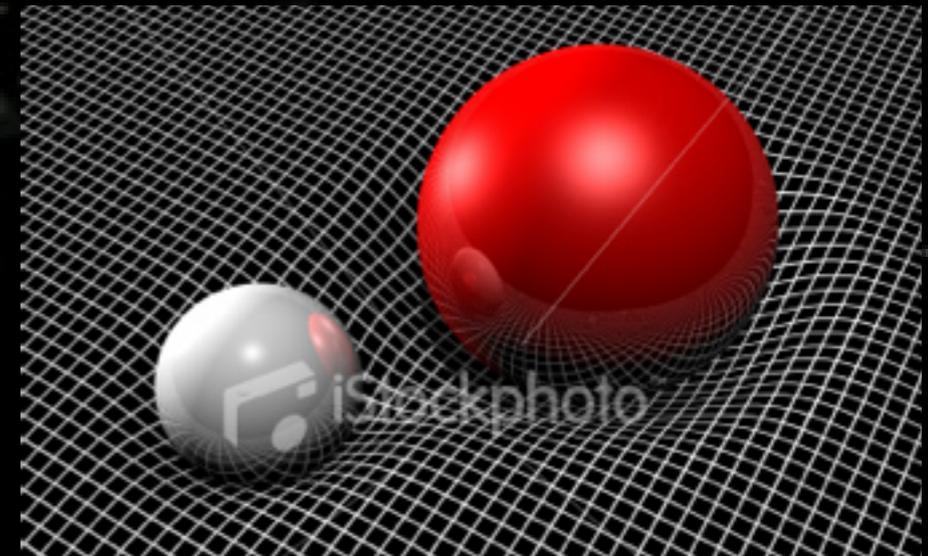
- Collection d'espace-temps de Minkowski,
- accolés par des changements de référentiels
- Courbure différente en chaque point traduisant l'effet de la gravitation

- ★ Gravitation = courbure de l'espace-temps

- la courbure dépend de la matière
- la courbure accélère la matière et l'énergie

- ★ Théorie géométrique de la gravitation

- objet: la dynamique de la métrique de l'espace-temps



Relativité Générale

- Principe d'équivalence:

- ★ En tout point on peut:

- Se placer dans un référentiel inertiel en chute libre
- Pas d'accélération : espace-temps de Minkowski

- ★ Espace-temps global:

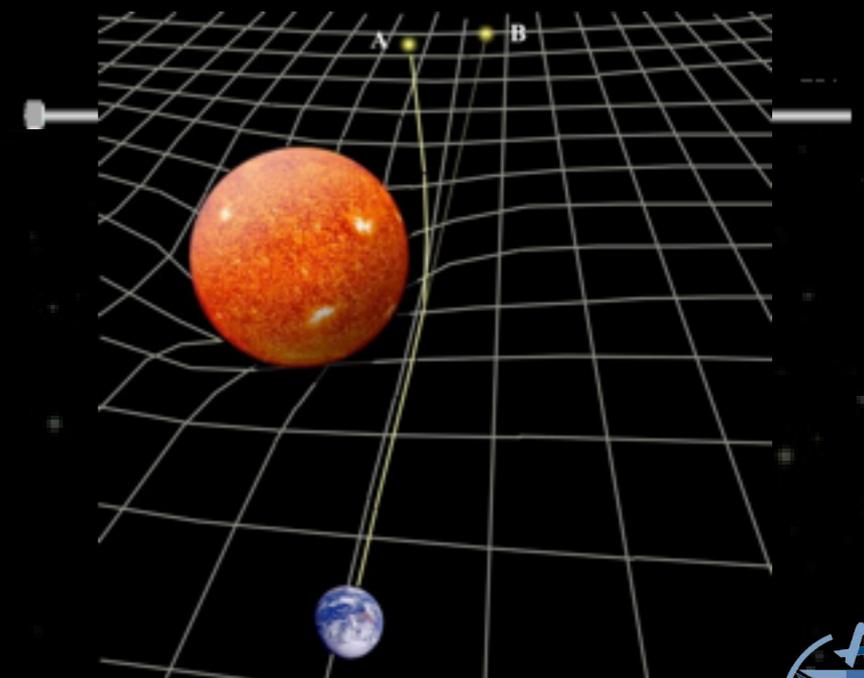
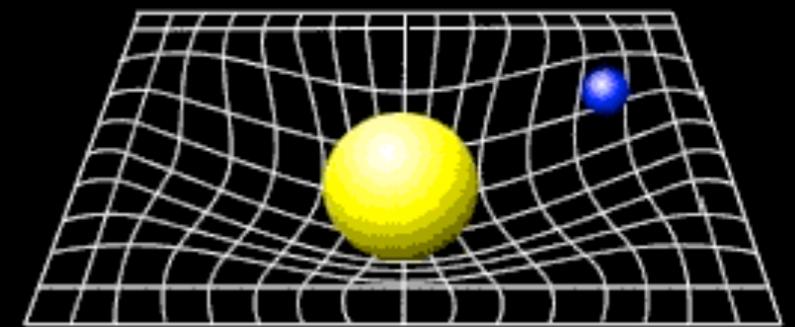
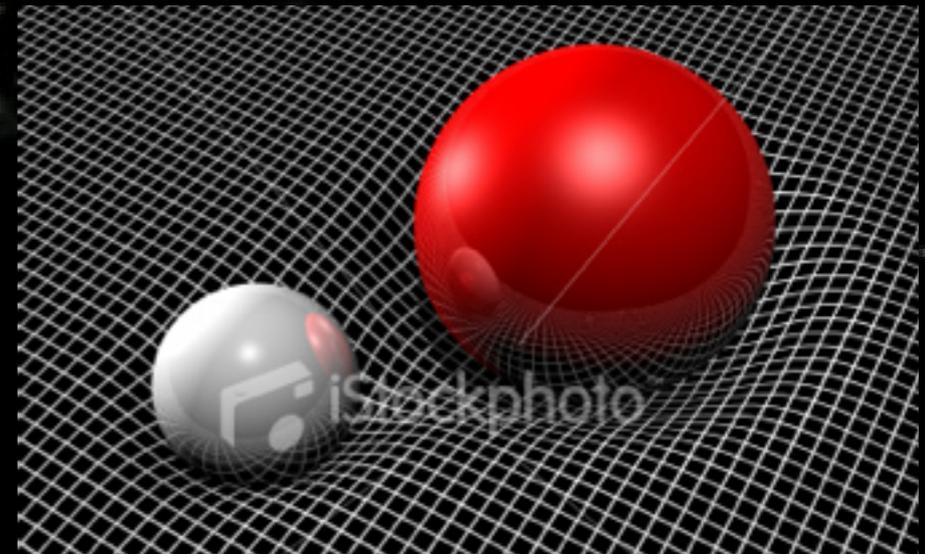
- Collection d'espace-temps de Minkowski,
- accolés par des changements de référentiels
- Courbure différente en chaque point traduisant l'effet de la gravitation

- ★ Gravitation = courbure de l'espace-temps

- la courbure dépend de la matière
- la courbure accélère la matière et l'énergie

- ★ Théorie géométrique de la gravitation

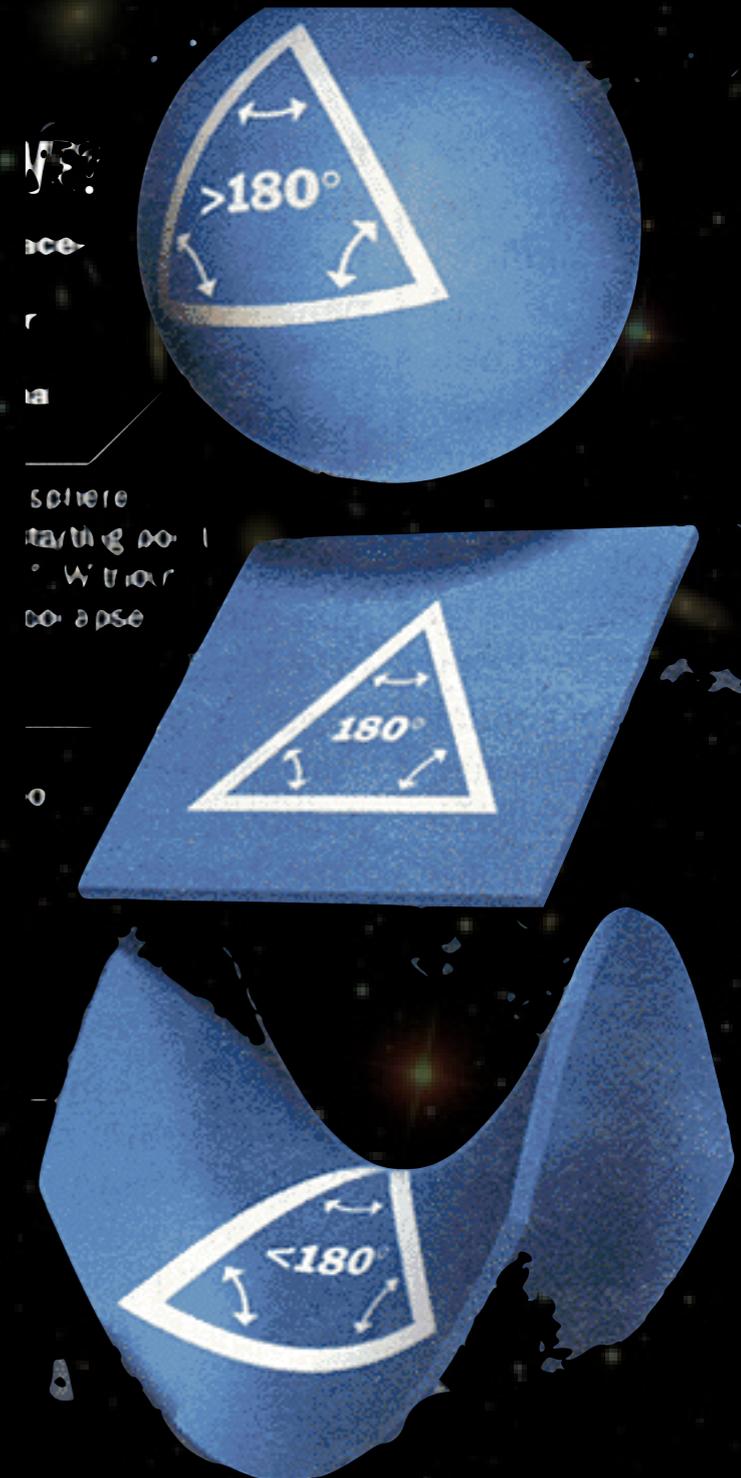
- objet: la dynamique de la métrique de l'espace-temps



Relativité Générale

- Théorie qui décrit l'espace-temps de manière géométrique
 - ★ Géométrie différentielle : description des «variétés possédant une courbure»
 - ★ Au centre de cette description : l'élément de distance :
 - Géométrie Euclidienne : $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$
 - Géométrie non Euclidienne : $ds^2 = \sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$
 - ★ L'inconnue de la RG: la métrique $g_{\mu\nu}$
 - ★ L'équation d'Einstein exprime sa dépendance par rapport au contenu matériel de l'espace-temps

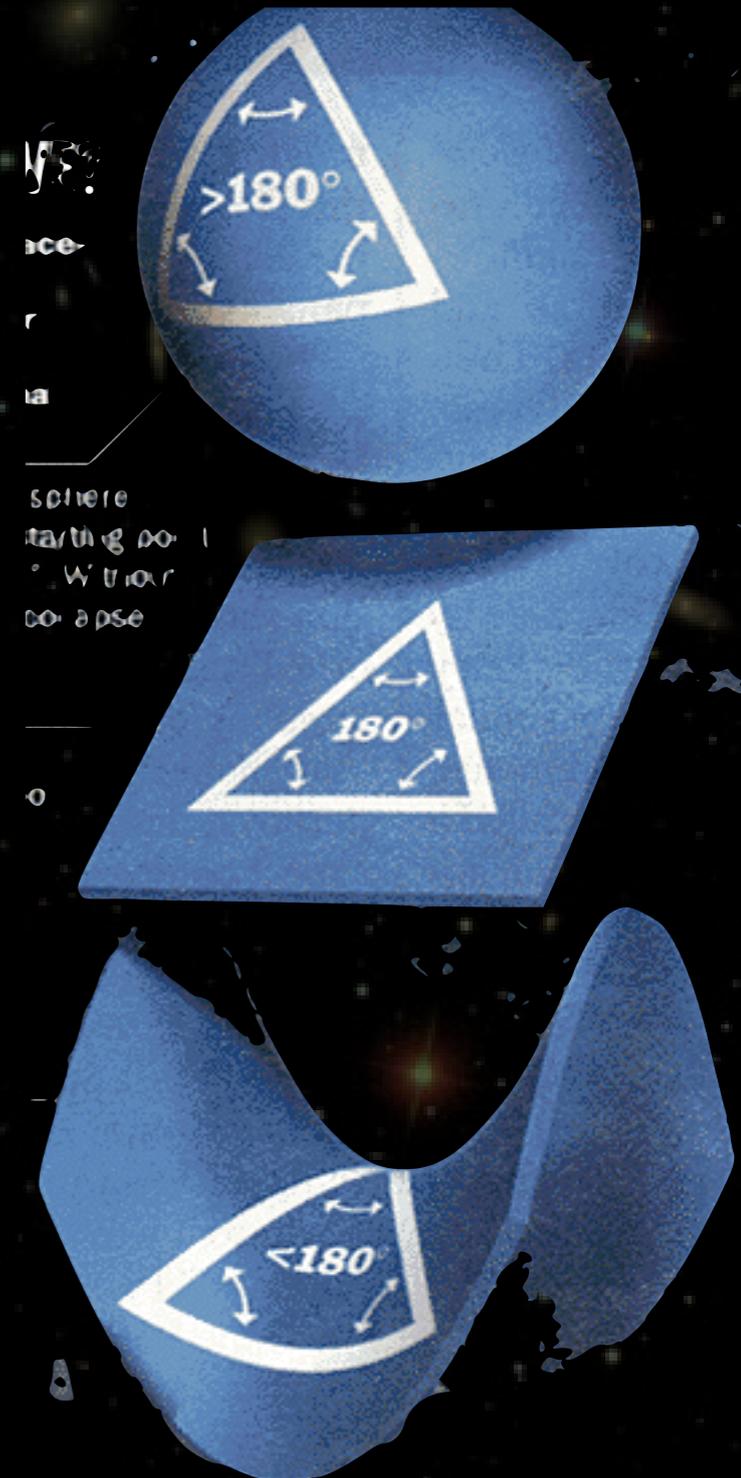
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$



Relativité Générale

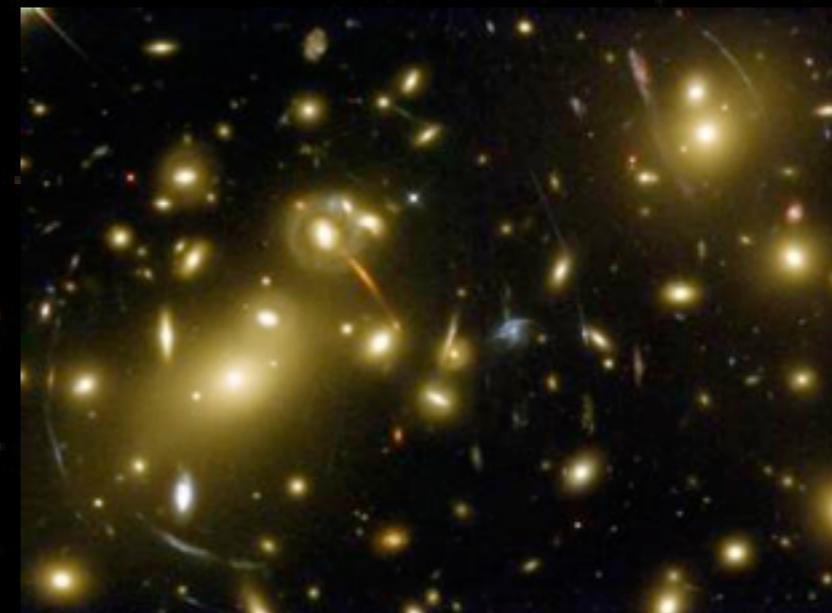
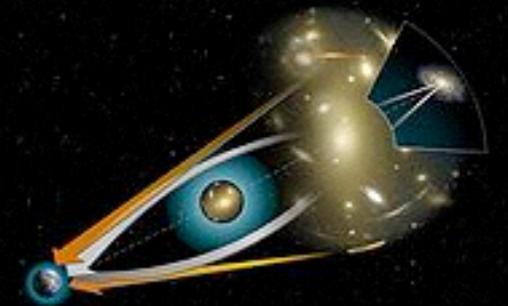
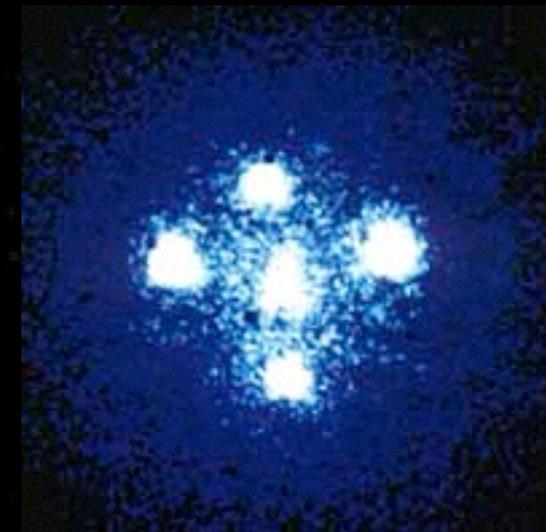
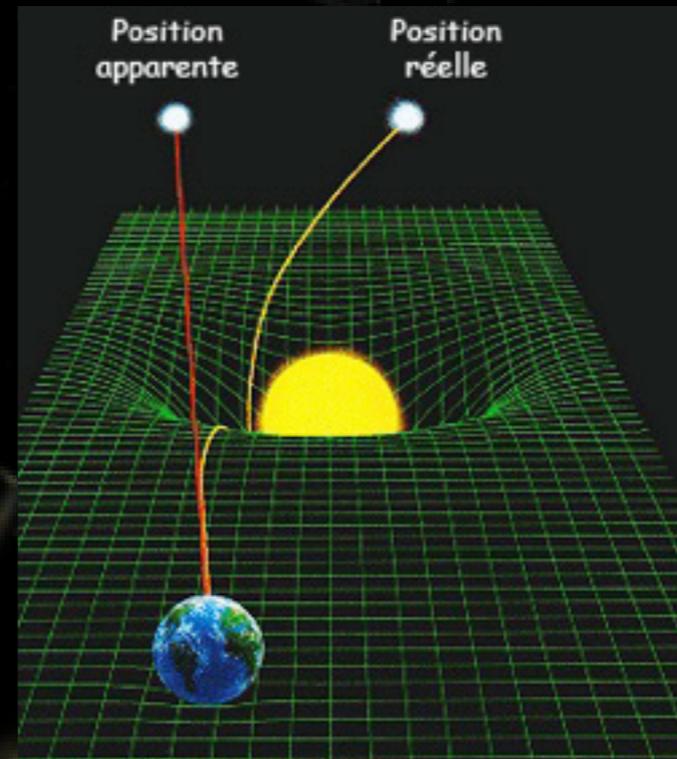
- Théorie qui décrit l'espace-temps de manière géométrique
 - ★ Géométrie différentielle : description des «variétés possédant une courbure»
 - ★ Au centre de cette description : l'élément de distance :
 - Géométrie Euclidienne : $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$
 - Géométrie non Euclidienne : $ds^2 = \sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$
 - ★ L'inconnue de la RG: la métrique $g_{\mu\nu}$
 - ★ L'équation d'Einstein exprime sa dépendance par rapport au contenu matériel de l'espace-temps

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R}_{\text{Espace-temps}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}}_{\text{Contenu matériel}}$$



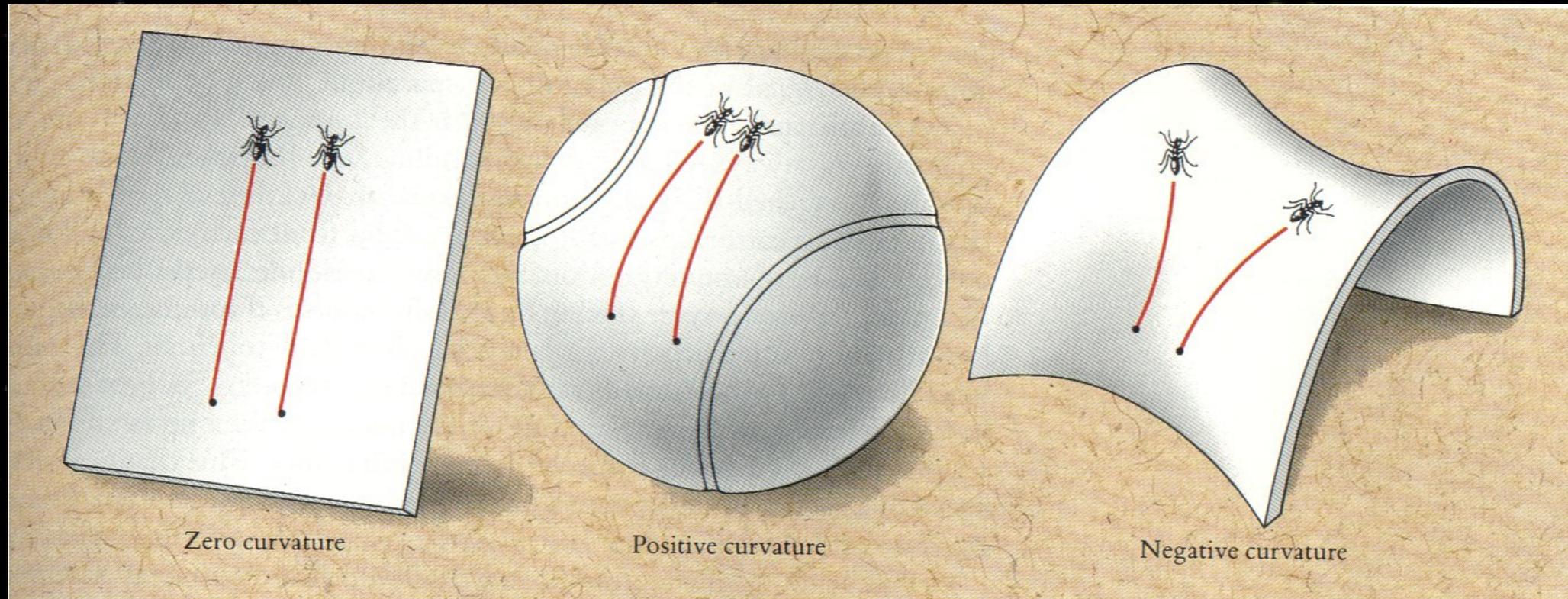
Vérifications

- Déplacement du périhélie de mercure
- Déplacement apparent des étoile - éclipse de soleil de 1919
- Lentilles gravitationnelles
- Décalage vers le rouge gravitationnel



RG et cosmologie

- L'Univers possède une courbure globale



- En appliquant les équations d'Einstein à la métrique de l'Univers, on peut en prédire l'évolution en fonction de son contenu
- La R.G. est l'outil mathématique et conceptuel de la cosmologie



Piliers de la cosmologie

- La relativité Générale (théorie)
- L'expansion de l'Univers (observation)
- Le principe cosmologique (hypothèse puis observation)



L'expansion de l'Univers

- E. Hubble (1929)

- ★ Observations spectroscopiques au mont Wilson

- ★ Spectroscopie:

- Observations de la brillance d'un objet en fonction de sa longueur d'onde
- Donne en général des informations sur
 - sa nature (étoiles, galaxie, ...)
 - sa température
 - sa composition chimique

- ★ Ici il va pour la première fois comparer les spectres d'objets à des (grandes) distances différentes

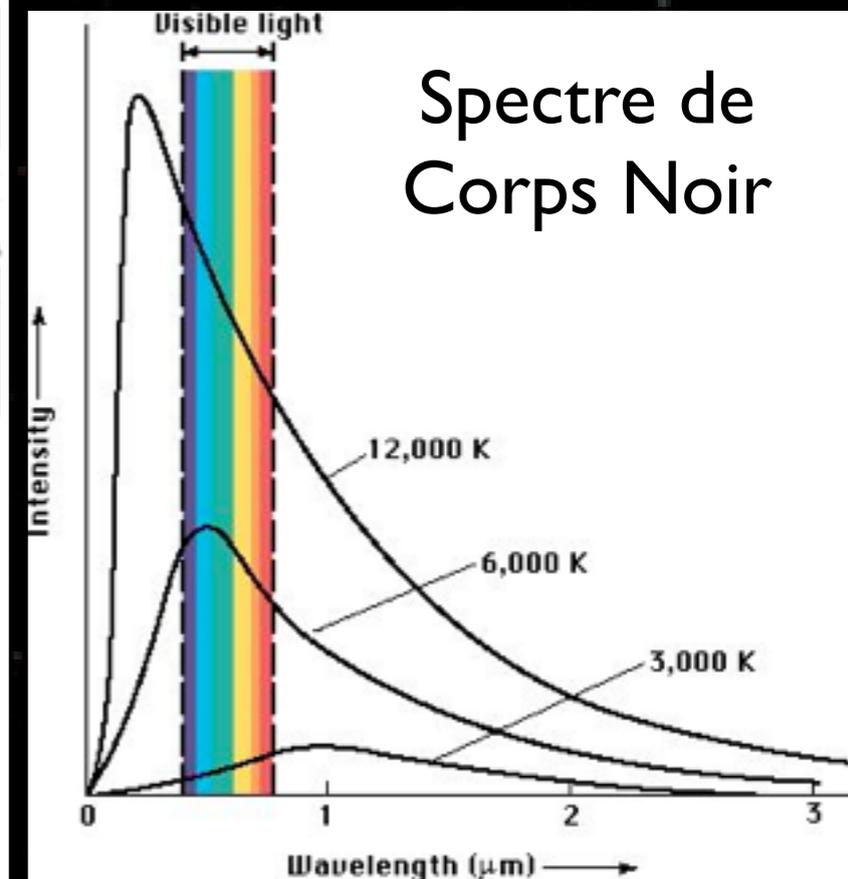
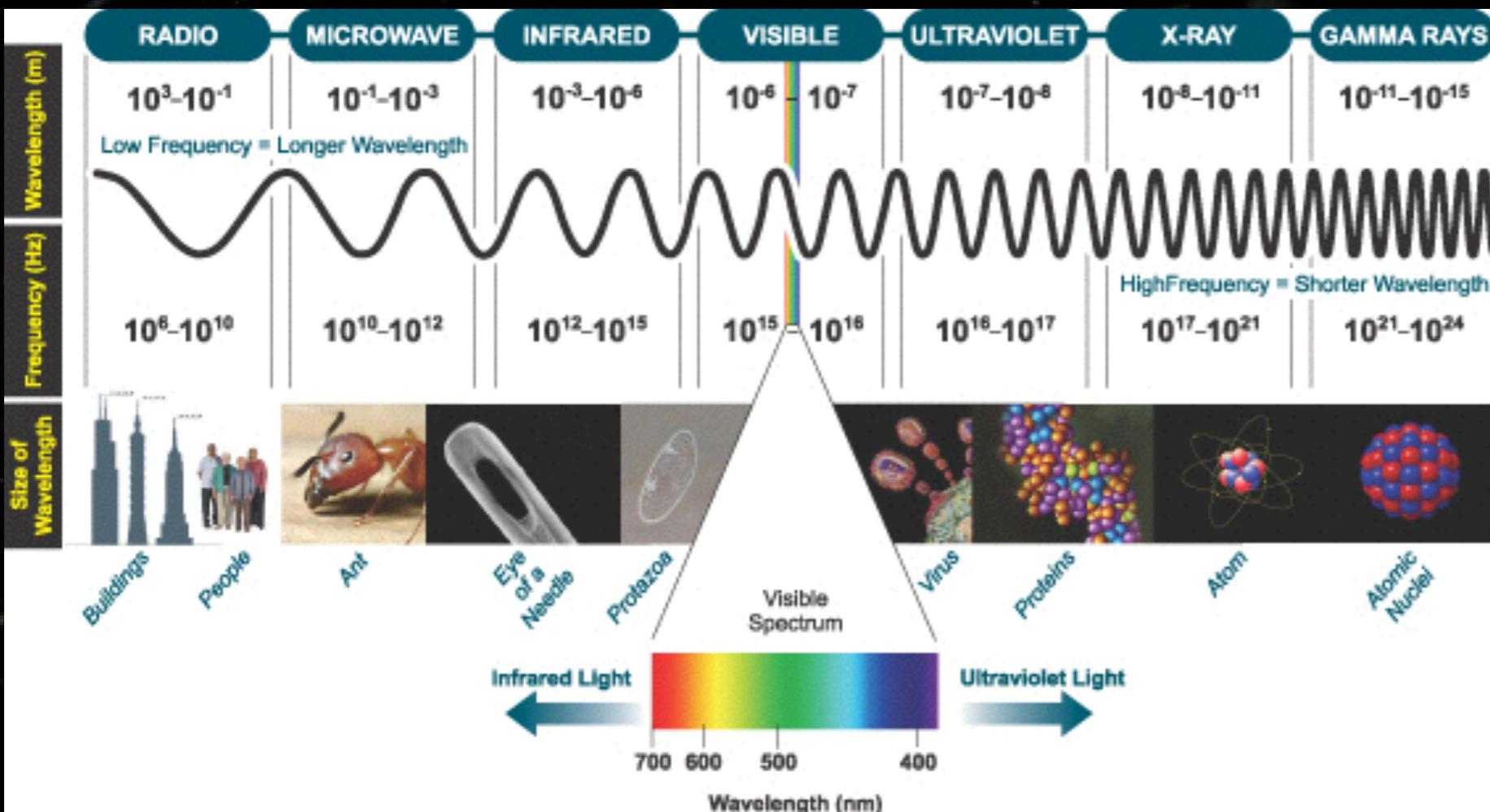
- ★ Il va trouver un résultat surprenant...



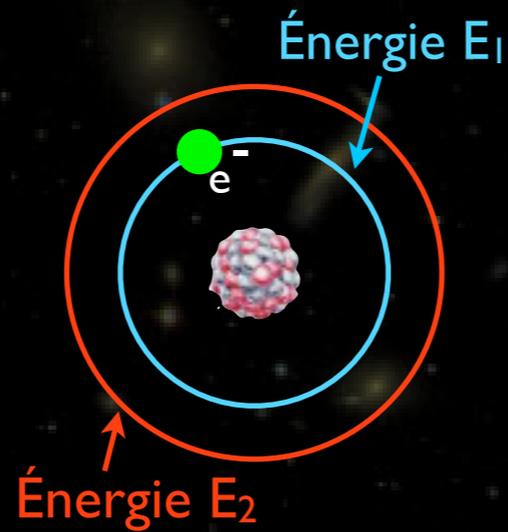
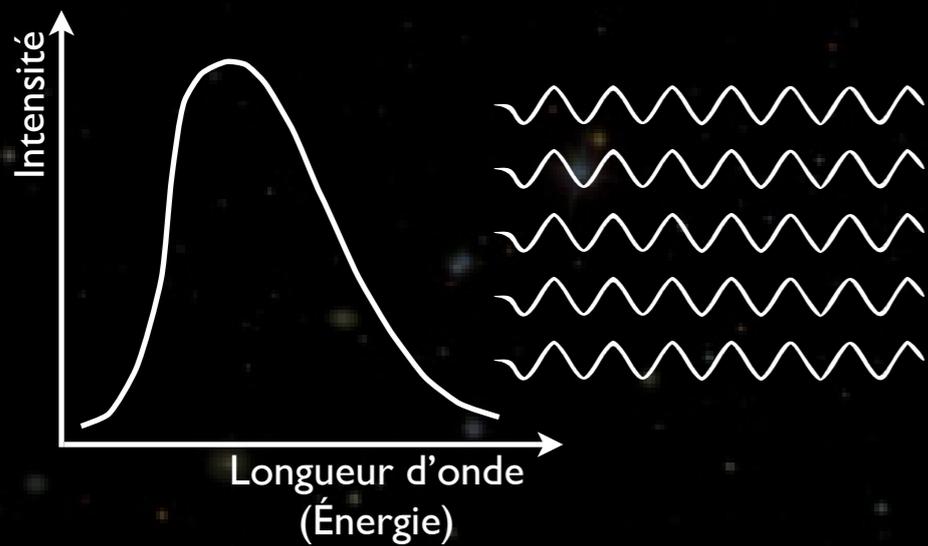
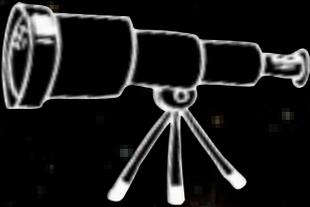
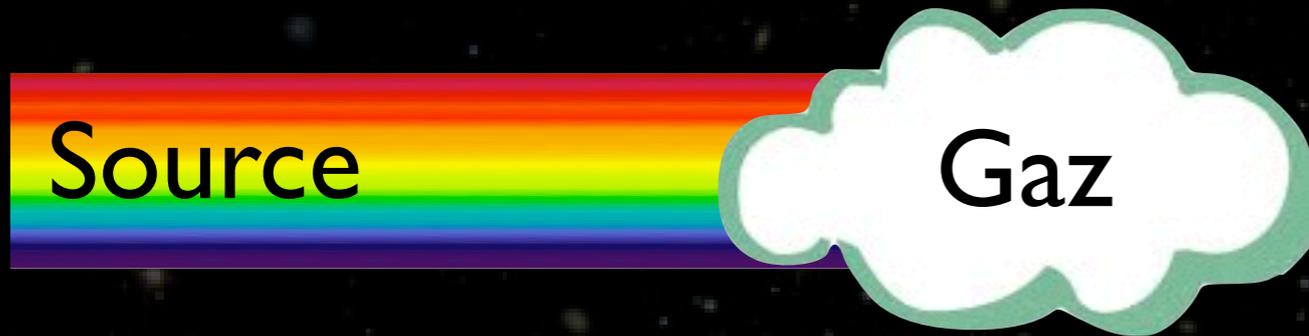
E. Hubble



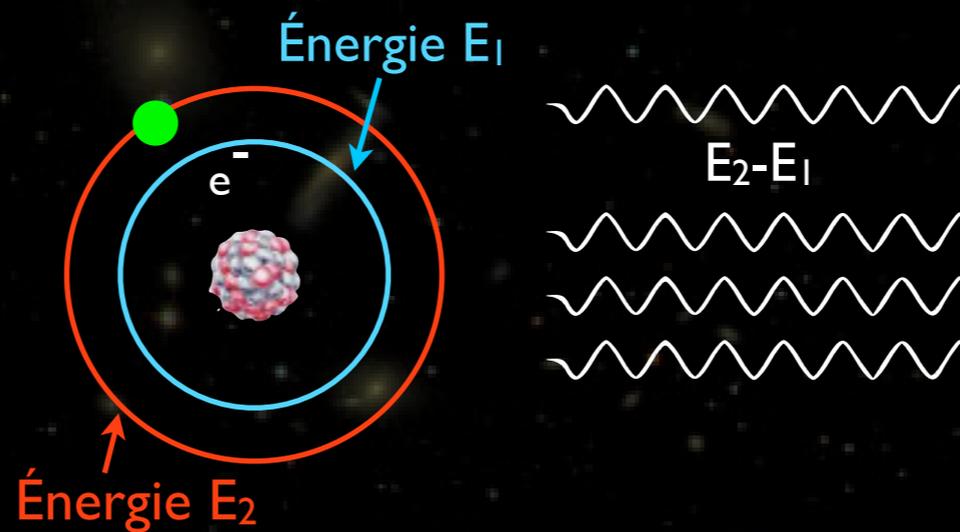
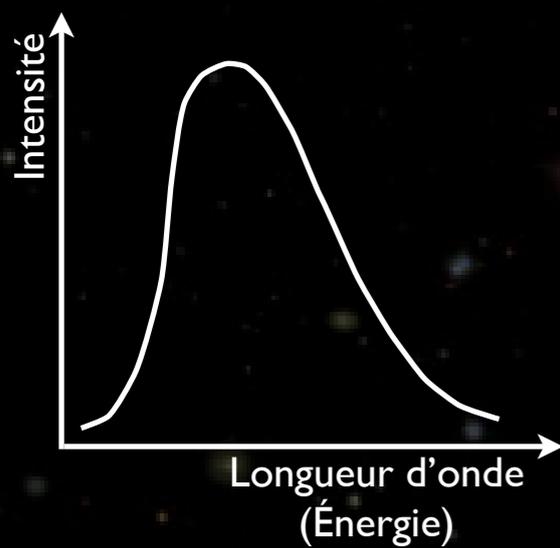
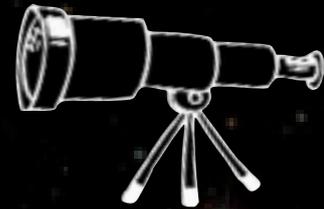
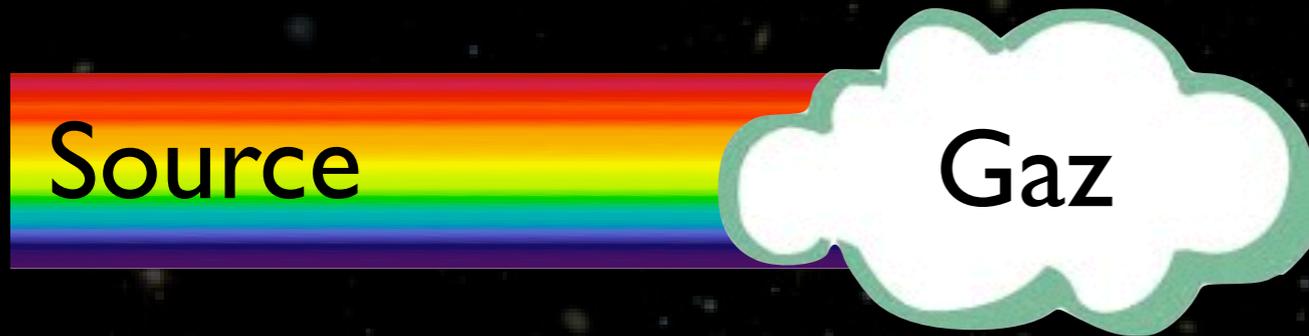
Spectre électromagnétique



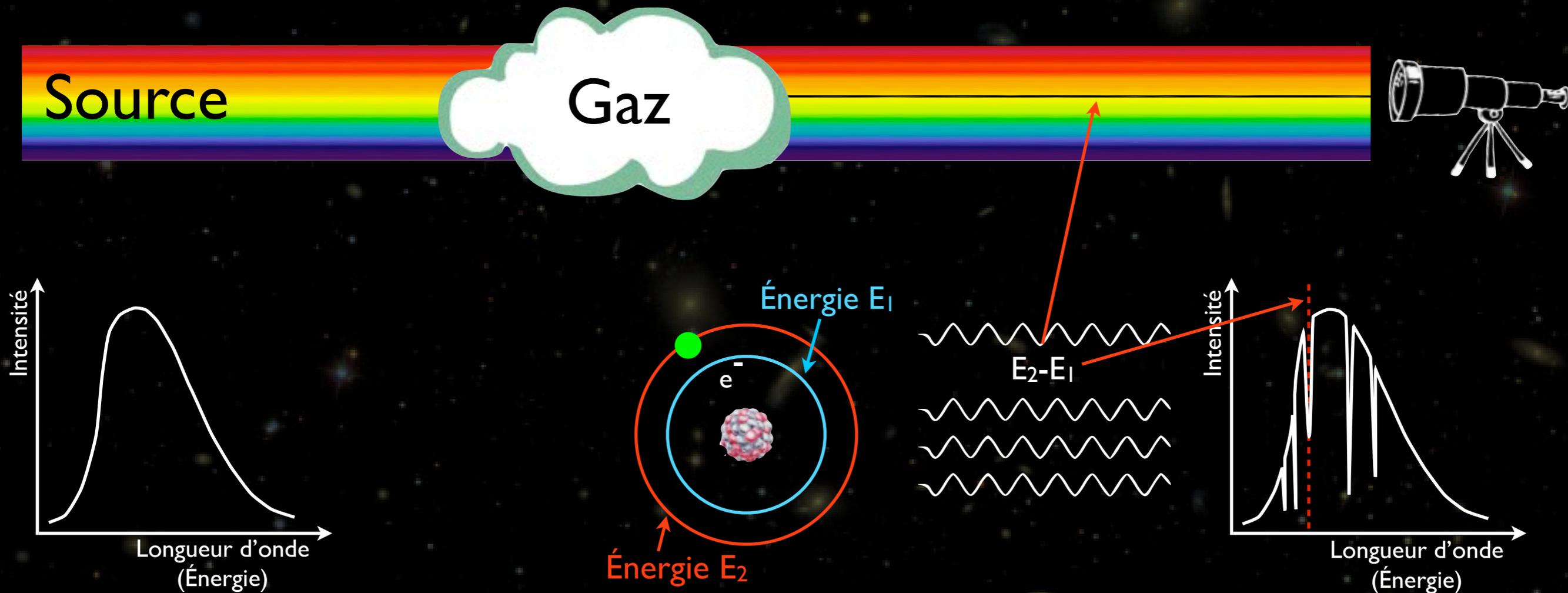
Raies d'absorption/d'émission



Raies d'absorption/d'émission



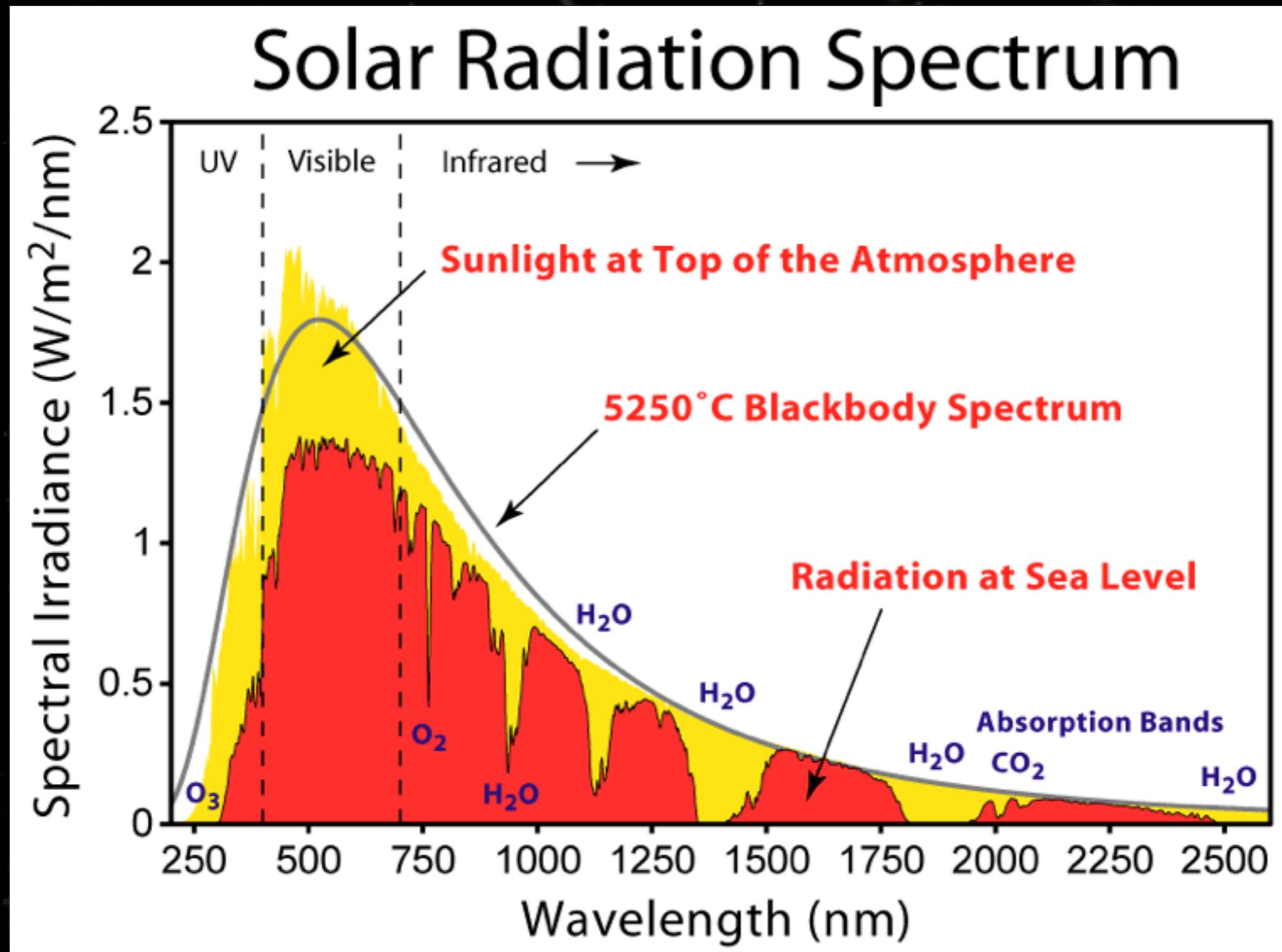
Raies d'absorption/d'émission



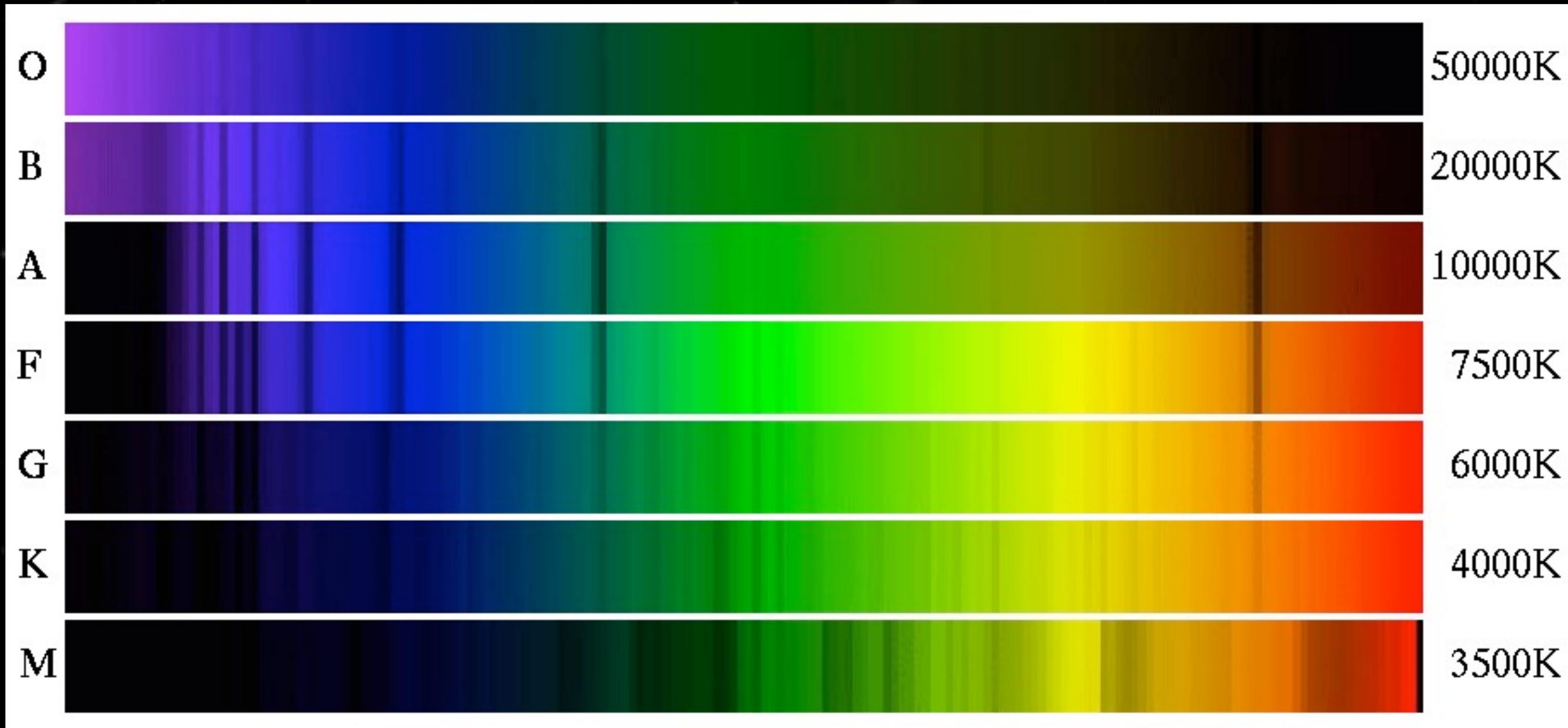
- La position des raies correspond à des transitions observées en laboratoire.
- On sait les reconnaître (doublets, triplets, ...)



Spectre du Soleil

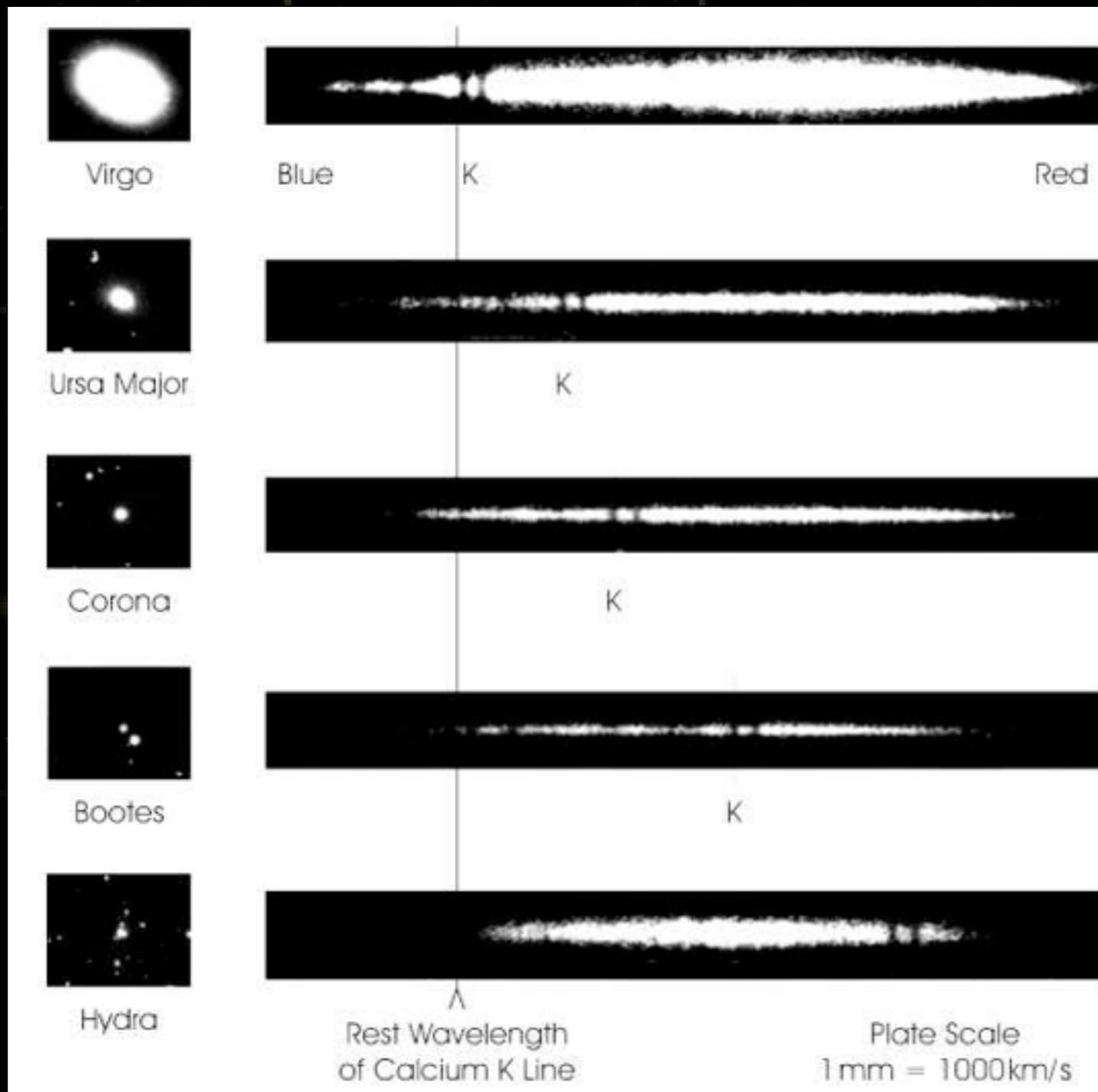


Spectres d'étoiles



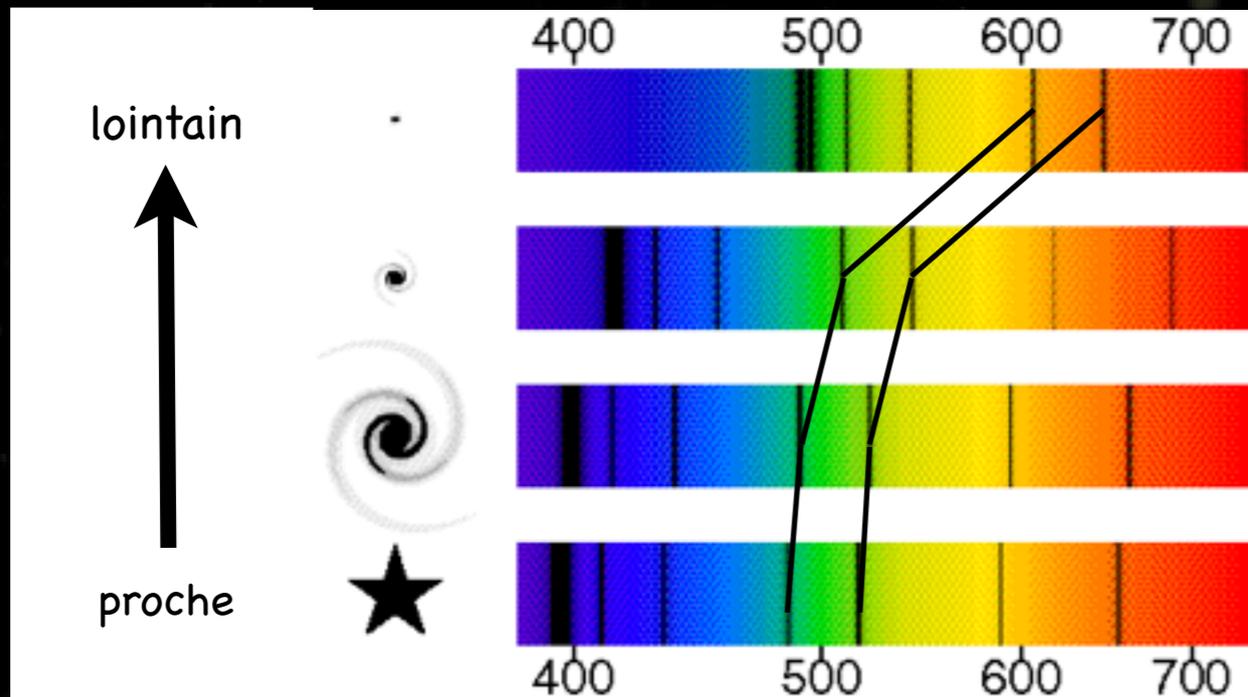
L'Univers en expansion

- Hubble observe les raies de galaxies (1929):



L'Univers en expansion

- Hubble observe les raies de galaxies (1929):
 - Le décalage vers le rouge des galaxies est proportionnel à leur distance



- Si ce décalage vers le rouge est interprété comme un effet Doppler :
 - La vitesse radiale des galaxies est proportionnelle à leur distance : loi de Hubble $v = H_0 \times d$
- Explication naturelle dans le cadre de la R.G.

