

# Cosmologie et relativité générale

Activités pour les élèves du Secondaire II

Alice Gasparini, Andreas Müller

- Série 1 : Grandeurs
  - Série 2 : Expansion
  - Série 3 : Principe d'équivalence
  - Série 4 : Courbure
  - Série 5 : Lentilles gravitationnelles
  - Série 6 : Trous noirs
  - Série 7 : Equations cosmologiques
  - Série 8 : Chronologie du Big Bang
  - Série 9 : Ondes gravitationnelles
- 
- Activité expérimentale 1 : L'effet Doppler cosmologique
  - Activité expérimentale 2 : La courbure du cône



**SwissMAP**

The Mathematics of Physics  
National Centre of Competence in Research



**UNIVERSITÉ  
DE GENÈVE**

Didactique de la physique

*©Terms of use*

You are free to copy and redistribute the present material, as well as to adapt it and or build upon it in any medium or format under the following terms:

- You must give appropriate credit, provide a link to the original, and indicate if changes were made.
- You may not use the material for commercial purposes.
- If you adapt the material or build on, you must distribute your contribution under the same condition as this original

Suggested citation:

A. Gasparini (UniGE, SwissMAP) et A. Müller (UniGE, Didactique de la Physique)

***Cosmologie et relativité générale : Activités pour les élèves du Secondaire II,***

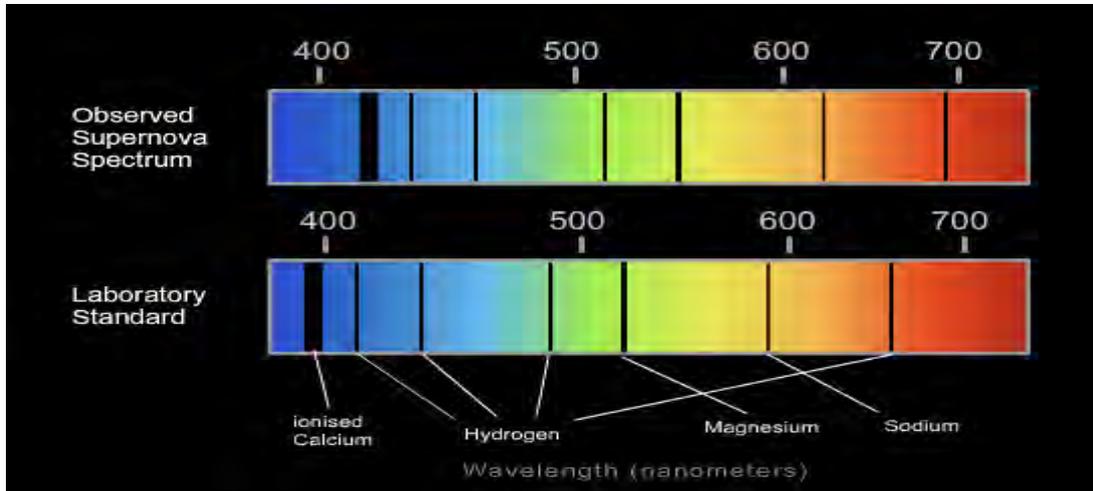
***Série 2 : Expansion***

(NCCR SwissMAP/Education, Genève 2016) ; <http://www.nccr-swissmap.ch/education>

## Série 2 : Expansion

### Exercice 1 : La supernova

La première bande de la figure suivante représente le spectre d'émission d'une supernova :



Crédit : <http://www.passmyexams.co.uk/GCSE/physics/the-expanding-universe-red-shift.html>

Les lignes verticales noires représentent des longueurs d'ondes  $\lambda$  que nous ne recevons pas, à cause de l'absorption de celles-ci par des atomes de calcium, d'hydrogène, de magnésium et sodium, dans l'espace interstellaire. Nous connaissons quelles sont ces longueurs dans nos laboratoires (deuxième bande), et elles sont décalées par rapport aux valeurs observés.

- En utilisant l'échelle de la figure ci-dessus, déterminer la différence entre la longueur d'onde observée ( $\lambda_0$ ) et celle émise ( $\lambda$ ) pour la ligne d'absorption du magnésium. En déduire le redshift de la supernova.
- Quelle est la vitesse de récession de cette supernova par rapport à nous? Donner le résultat en unités SI, ainsi que le *rapport* entre cette vitesse et celle de la lumière  $c$ .
- Si nous admettons que ce décalage est dû uniquement à l'expansion de l'univers, donner une estimation de la distance de la supernova en Mpc en utilisant la loi de Hubble.
- En déduire une estimation de la durée pendant laquelle la lumière de cette image a voyagé pour nous parvenir.

### Exercice 2 : Le redshift

Considérons une source lointaine qui émet une radiation avec longueur d'onde  $\lambda$ .

- Quel est son redshift si nous observons aujourd'hui cette radiation avec une longueur d'onde double:  $\lambda_0 = 2\lambda$  ?
- Même question, mais si nous observons  $\lambda_0 = 3\lambda$ , puis  $\lambda_0 = 10\lambda$ .
- Quel doit être le redshift d'une source pour qu'une lumière émise dans le vert soit observée dans le rouge ?

### Exercice 3 : La constante de Hubble

À un chiffre significatif près, les estimations actuelles de la constante de Hubble donnent

$$H_0 \approx 7 \cdot 10^4 \frac{\text{m/s}}{\text{Mpc}}.$$

a) Convertir cette valeur en  $\frac{\text{nm/année}}{\text{km}}$ . Pouvons nous ressentir cette expansion à notre échelle?

b) Quelle est la vitesse de l'expansion à l'échelle du Système Solaire? Comparer son ordre de grandeur (ODG) avec celui de la vitesse de Pluton autour du Soleil  $v_p = 18000\text{km/h}$ .

c) Quelle est la vitesse de l'expansion à l'échelle de notre galaxie? Comparer son ODG à celui de la vitesse de rotation du Soleil autour du noyau galactique  $v_{\text{Soleil}} = 220\text{km/s}$ .

d) Quelle est la vitesse de l'expansion à l'échelle de la taille moyenne des groupes de galaxies? La comparer avec la vitesse à laquelle Andromède (image ci-contre) se rapproche de notre galaxie  $v_A = 111\text{km/s}$ .



Crédit : Nicolas Outters.

### Exercice 4 : Univers jumeaux

Lire la BD « Cosmic Story » :

[http://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables/Francais/cosmic\\_story.htm](http://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables/Francais/cosmic_story.htm)



À la lumière de vos connaissances sur le Big Bang, quel est le problème dans le modèle d'« univers à deux pôles » (p. 57 à 60 de la BD) ?



## Exercice 5 : Redshift du fond diffus cosmologique (CMB)

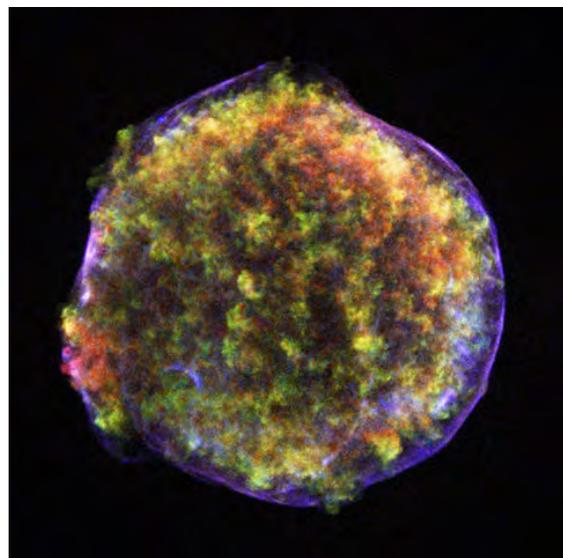
- En sachant que l'univers au découplage avait une température  $T = 3000\text{K}$ , déterminer la longueur d'onde du pic de spectre d'émission  $\lambda_{max}$  du CMB à l'époque. Utiliser la loi de Wien (Annexe D.1 de la théorie, sur la radiation du corps noir).
- On sait qu'aujourd'hui le CMB a une température d'environ  $2,7\text{K}$ . Quel est son redshift ?
- En utilisant la loi de Hubble, peut-on déterminer la distance qui nous sépare du découplage ? Si oui, le faire. Sinon, expliquer pourquoi.

## Exercice 6 : Distance lumineuse

Dans l'exercice 1 nous avons vu qu'il est possible de déterminer la distance de certaines sources à partir du redshift.

Néanmoins, pour certaines sources appelées **chandelles standard**, dont nous connaissons la luminosité absolue  $L$  (sa puissance radiative, en  $\text{W}$ ) nous pouvons déterminer leur distance en mesurant le flux reçu  $f$  (la puissance par unité de surface, en  $\text{W}/\text{m}^2$ ). La distance déterminée de cette manière s'appelle **distance lumineuse**, indiquée  $D_L$  (Annexe D.2).

Un exemple important de chandelle standard utilisée en cosmologie est celui des explosions de **supernovae Ia**. Vidéo sur le site : [https://it.wikipedia.org/wiki/Supernova\\_di\\_tipo\\_Ia](https://it.wikipedia.org/wiki/Supernova_di_tipo_Ia)



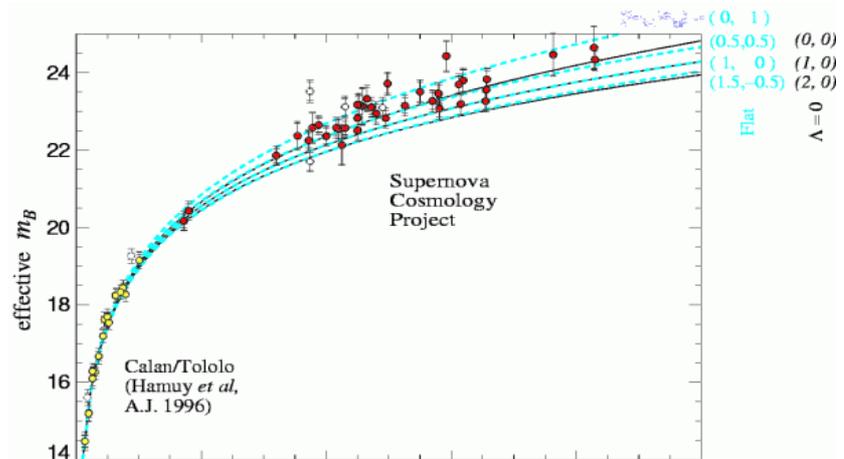
Crédit : NASA/CXC/Rutgers/J.Warren & J.Hughes et al.

Cette photo est une image dans les rayons X des restes de la supernova Ia, observée en 1572 par l'astronome danois Tycho Brhae.

- Donner la formule exprimant la distance  $D_L$  entre un observateur et une source en fonction de sa luminosité absolue  $L$  et du flux mesuré  $f$ . Admettre que l'émission de la source a une symétrie sphérique.
- En sachant que la luminosité d'une supernova Ia est de l'ordre de dix milliards de fois plus grande que celle du Soleil ( $L_{Soleil} = 4 \cdot 10^{26}\text{W}$ ), quel est l'ODG de sa distance si on mesure un flux de  $10^{-13}\text{W}/\text{m}^2$  ? Donner la réponse en m et en Mpc.
- En mesurant leur éclat, et en le comparant avec le redshift, nous observons que, pour les sources les plus lointaines, les distances correspondantes devraient être beaucoup plus grandes que celles attendues si l'univers était composé uniquement de matière – qu'elle soit ordinaire ou noire – car celle-ci devrait ralentir son expansion par attraction gravitationnelle (graphique ci-dessous). Comment expliquer cela ?

Le graphique ci-contre montre les mesures publiées dans un article scientifique en 1998 (Perlmutter et al., Prix Nobel en 2011).

Il s'agit de la magnitude des supernovae Ia,  $m_s$  (qui est une fonction de l'éclat :  $m_s = -2,5 \cdot \log f_s + \text{constante}$ ) en fonction du redshift.



Crédit : Perlmutter & al. , *Astrophysical Journal* 517, 565-586, juin 1999.

### Exercice 7 : Vrai ou faux ?

Justifier chaque réponse.

- 1) Les galaxies spirales sont plus anciennes que les galaxies elliptiques.
- 2) Les baryons sont des particules qui interagissent uniquement gravitationnellement.
- 3) A cause de l'expansion de l'univers, la vitesse de récession entre deux galaxies très éloignées peut dépasser la vitesse de la lumière, même si la relativité restreinte affirme que rien ne peut aller plus vite que  $c$  (Annexe C).
- 4) En relativité restreinte la matière est une forme d'énergie (Annexe C). Donc la matière noire et l'énergie noire sont deux manières de nommer la même chose.
- 5) Juste avant le découplage, la matière noire était libre de s'effondrer par attraction gravitationnelle, car elle n'interagissait pas avec le rayonnement électromagnétique.
- 6) Le Big Bang est une explosion qui a eu lieu à un certain instant, qui a donné naissance à l'univers.