

# Corrigé de l'examen de cosmologie

F.-X. Désert (LAOG)

08/02/2005, 14-15h

1. Dans un espace plat, le tenseur de courbure est

- (a) forcément nul
- (b) **pas nécessairement nul**

Le tenseur de courbure fait appel aux 4 dimensions de l'espace-temps. C'est seulement la courbure à 3 dimensions spatiales qui est nulle dans un espace plat.

2. L'énergie-matière de l'Univers est actuellement dominée par

- (a) les baryons
- (b) la matière sombre froide
- (c) les photons du rayonnement fossile
- (d) **l'énergie noire**

La densité réduite de la constante cosmologique est d'environ 0,7, valeur la plus forte parmi les composantes de l'univers.

3. La densité d'énergie croît comme  $(1 + z)^4$  (où  $z$  est le redshift de la mesure)

- (a) pour les baryons
- (b) pour la matière sombre froide
- (c) **pour les photons du rayonnement fossile**
- (d) pour l'énergie noire

Seuls les photons, particules relativistes, ont une pression égale à un tiers de la densité d'énergie. Le cours 4.3.1.4 montre alors la dépendance en puissance quatrième du paramètre d'échelle.

4. Un objet en chute libre suit une géodésique de l'espace-temps :

- (a) **vrai**
- (b) faux

Uniquement soumis à la gravitation, un objet suit le plus court chemin, au sens de la métrique de l'espace-temps, c'est-à-dire une géodésique.

5. La théorie newtonienne de la gravitation est suffisante pour décrire les mouvements des planètes dans le système solaire :

- (a) vrai
- (b) **faux**

La précession de l'orbite de Mercure ne s'explique pas complètement avec la théorie newtonienne.

6. Les neutrinos ont sans doute une masse, disons  $0.1 \text{ eV}/c^2$ . Dans ce cas, les neutrinos fossiles (cousins du rayonnement fossile) se déplacent-ils encore à une vitesse proche de celle de la lumière ?

- (a) Oui
- (b) **Non**

Leur température est de 2 Kelvin environ (cours 7.5), soit  $kT = 2 \times 10^{-4} \text{ eV} \ll mc^2$ . Les neutrinos primordiaux sont donc maintenant non-relativistes.

7. Un univers d'Einstein-DeSitter est caractérisé par  $\Omega_m = 1$  et  $\Omega_\Lambda = 0$ . Dans ce cas, sera-t-il toujours en expansion ?

- (a) **Oui**
- (b) Non

Stricto sensu oui, puisque (d'après le cours en 4.3.4)  $R \propto t^{\frac{2}{3}}$ . Il est néanmoins à noter que c'est un point instable.

8. L'équation en 7.4.1

$$t = 2.2 \text{ s} \left( \frac{kT}{1 \text{ MeV}} \right)^{-2}.$$

est-elle encore valable dans l'univers présent ?

- (a) Oui
- (b) **Non**

Cette relation n'est pas valable que lorsque l'univers est dominé par les particules relativistes, alors que maintenant l'univers est dominé par l'énergie noire.

9.  $c$ ,  $G$ ,  $\Lambda$  sont les trois seules constantes intervenant dans la Relativité Générale :

- (a) **vrai**
- (b) faux

La RG fait le lien entre la gravitation newtonienne et la Relativité Restreinte mais pas encore la mécanique quantique (d'où l'absence de la constante de Planck).

10. La formation des grandes structures dans l'univers est liée à l'existence des anisotropies du rayonnement fossile :

- (a) **vrai**
- (b) faux

Les anisotropies révèlent l'empreinte sur les photons, par l'intermédiaire des baryons, des fluctuations de densité de la matière, fluctuations qui sont à l'origine des grandes structures, par effondrement gravitationnel.

11. Armés de la Relativité Générale et du principe cosmologique, nous déduisons  $N$  métriques possibles pour l'univers

- (a)  $N=1$
- (b)  $N=2$
- (c)  **$N=3$**
- (d)  $N=4$
- (e)  $N=5$

Seulement trois métriques sont possibles (Eq. 4.1.1) selon la valeur de  $k$  ( $-1$ ,  $0$ , ou  $+1$ ).

12. L'inflation ne se produit que si et seulement si l'équation d'état  $w$  est négative :

- (a) vrai
- (b) **faux**

Une croissance exponentielle du facteur d'échelle n'a lieu que pour une égalité stricte  $w = -1$ .

13. Le redshift d'une galaxie est directement lié au facteur d'échelle de l'univers au moment de l'émission du spectre.

- (a) **vrai**
- (b) faux

Mise à part sa vitesse particulière, la galaxie montre un redshift  $z$  tel que  $1 + z = \frac{R_0}{R}$ , donc directement lié au facteur d'échelle  $R$ .

14. Le fond diffus cosmologique à 3 K se distingue des autres fonds extragalactiques car :

- (a) **c'est le plus brillant**
- (b) **c'est le seul qui ne soit pas dû à l'émission intégrée de multiples sources ponctuelles**
- (c) ses photons sont les plus énergétiques
- (d) **il provient du plus lointain passé possible**
- (e) il est complètement isotrope

Les autres fonds sont partiellement résolus en de nombreuses galaxies par les instruments modernes, le reste étant laissé aux futurs instruments. Le fond 3 K provient de la surface de dernière diffusion. L'univers est donc opaque au-delà. On ne peut voir plus loin dans le passé avec des photons tout au moins.

15. En moyenne,  $1 \text{ m}^3$  d'univers contient

- (a) 400 millions d'électrons
- (b) 4000 électrons
- (c) **0,3 électron**

- (d) 0,03 électron
- (e) 0,003 électron

La neutralité électrique requiert autant d'électrons que de protons. La table 1 donne la densité de baryons, dominés par les protons.

16. Dans l'univers âgé d'une nanoseconde, il y a autant de protons que d'antiprotons :

- (a) **vrai**
- (b) faux

L'équilibre thermique matière-rayonnement a probablement eu lieu pour des températures  $kT \gg m_p c^2$ , atteintes durant la première nanoseconde de l'univers (Cours 7.4.1).

17. Le rapport nombre de baryons sur nombre de photons est

- (a) **un invariant pendant l'expansion de l'univers s'il n'y a pas d'interaction matière-rayonnement**
- (b) **a changé pendant l'annihilation de la plupart des baryons**
- (c) varie systématiquement avec le facteur d'échelle
- (d) a changé après le découplage
- (e) change depuis que la constante cosmologique est importante

Ce rapport de deux quantités qui sont  $\propto R^{-3}$  ne change pas avec le facteur d'échelle tant que le nombre d'espèces majeures ne change pas.

18. La pression de la matière non-relativiste est nulle

- (a) **vrai, mais c'est une approximation**
- (b) faux, sa pression de gaz parfait modifie considérablement son évolution

La pression  $\propto kT \sim mv^2$  est petite devant l'énergie de masse  $\propto mc^2$ . L'équation d'état  $w = 0$  est donc une bonne approximation.

19. L'univers, tel qu'on le connaît, va continuer à subir son expansion dans le futur

- (a) **vrai**
- (b) faux

Notre univers est apparemment dominé par une constante cosmologique positive qui entraîne une expansion exponentielle éternelle.

20. A des redshifts supérieurs à 10, la constante cosmologique ne joue plus aucun rôle

- (a) **vrai**
- (b) faux

A ce redshift, son influence se mesure par le facteur  $\frac{0,7}{0,3} 10^{-3}$  par rapport à l'influence de la matière non-relativiste (Eq. 4.3.27).