



***La constante cosmologique,
pour le meilleur et pour le pire***

André Füzfa

Professeur à l'Université de Namur (Belgique)

En collaboration avec Eve-Aline Dubois

Plan

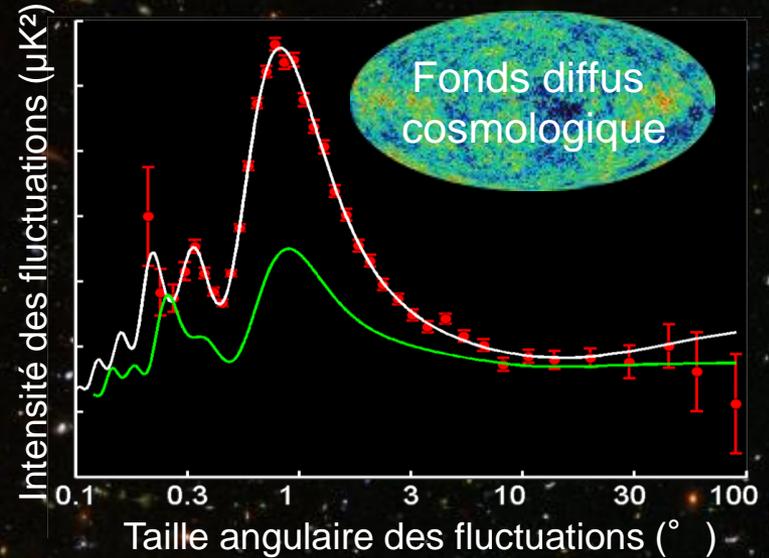
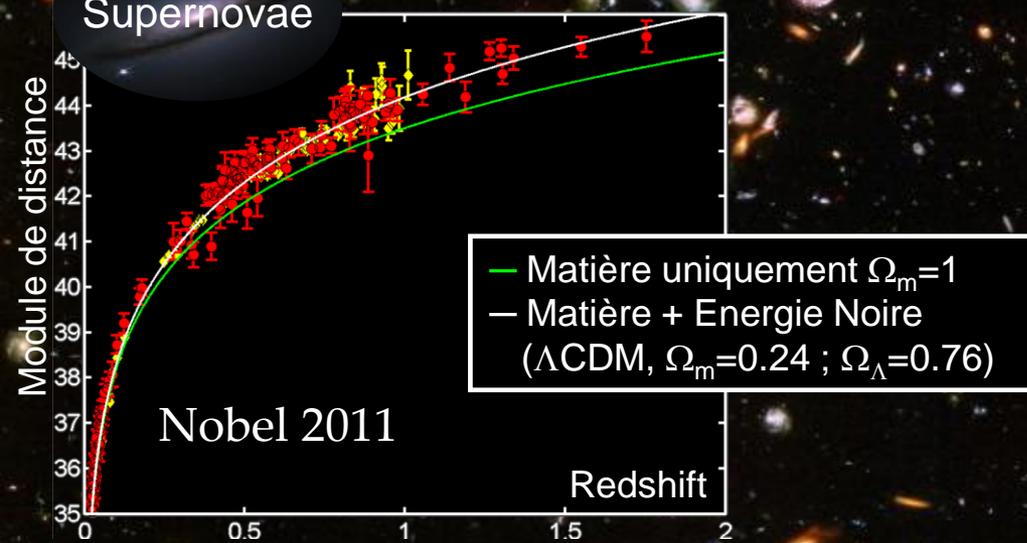
- La constante cosmologique Λ
 - Qu'est-ce que la Science?
- La constante cosmologique pour le meilleur?!
- La constante cosmologique pour le pire...
- Invitation au questionnement

Première partie:

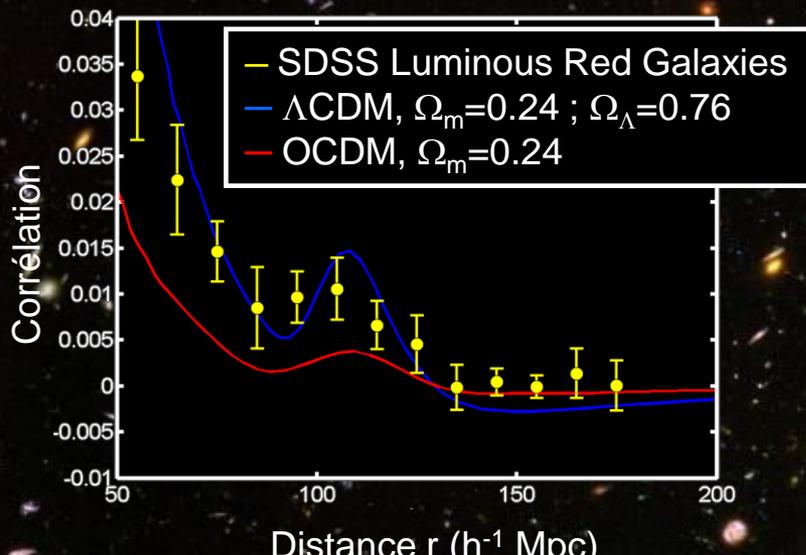
LA CONSTANTE COSMOLOGIQUE

L'Univers Invisible

Supernovae



Oscillation Acoustique des Baryons

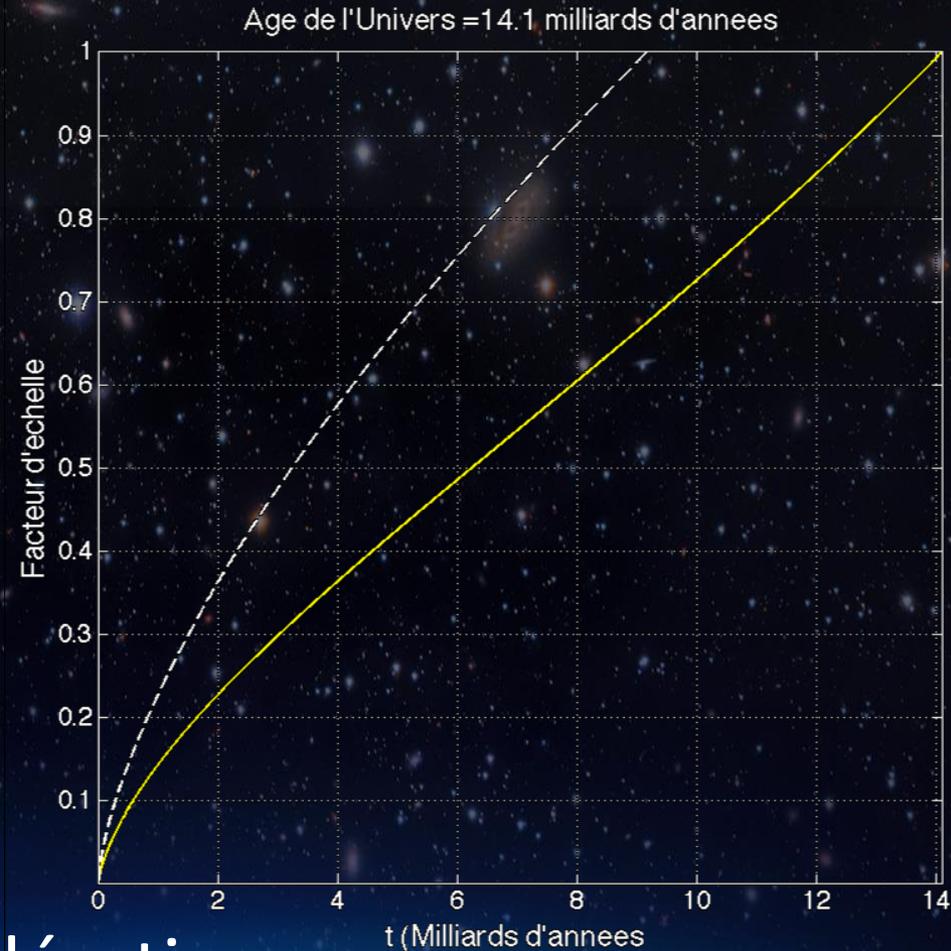
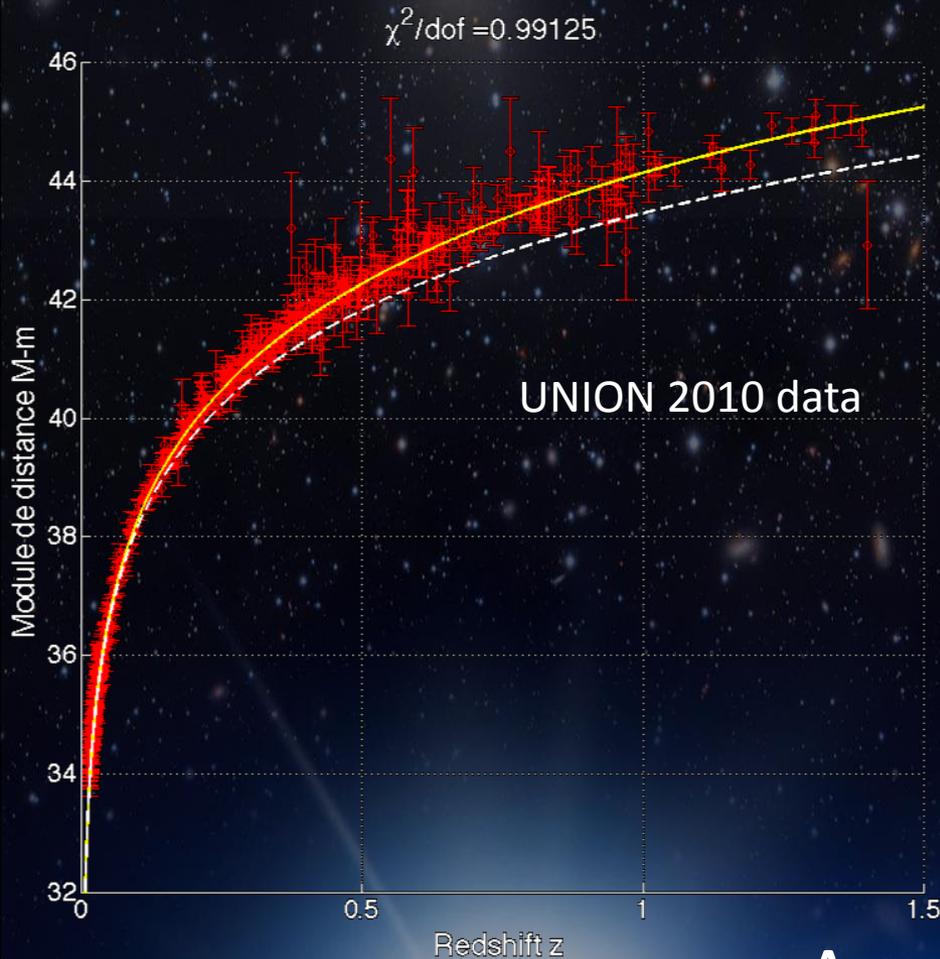


Lentilles gravitationnelles

Dynamique galactique

Formation des galaxies

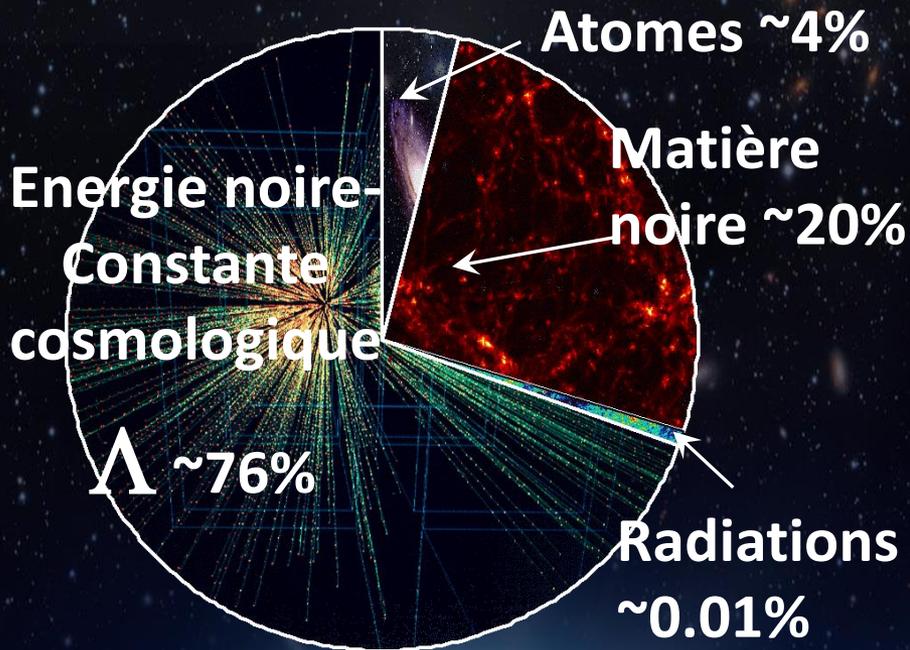
L'accélération de l'expansion cosmique



— Accélération
— Décélération

De quoi l'Univers est-il fait?

**Composition actuelle
en énergie de l'Univers
(>95% C.L.)**



Equation des cosmologies (c=1):

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p)$$

Condition d'accélération:

$$\ddot{a} > 0 \text{ if } p < -\frac{\rho}{3}$$

Pour la constante cosmologique:

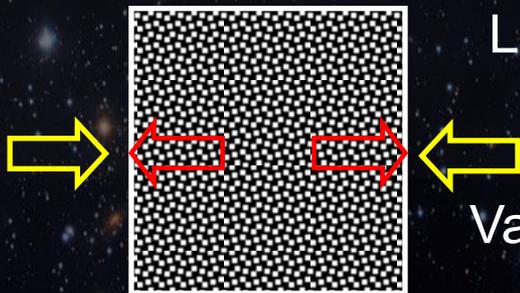
$$\rho_{\Lambda} = -p_{\Lambda} = cst$$

Accélération cosmique!

Qu'est-ce que l'énergie sombre?

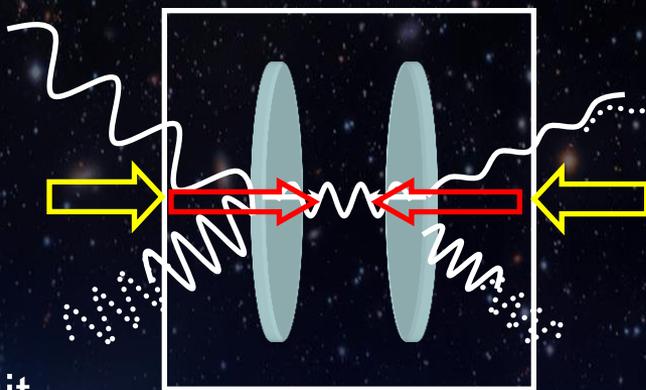
L'accélération cosmique requiert des pressions négatives!

Gaz ordinaire:
La pression est dirigée vers l'extérieur ($p > 0$)



Variation de l'énergie interne:
 $\Delta U = -p \Delta V < 0$ pendant l'expansion ($\Delta V > 0$)

Exemple de Pressions négatives!



Effet Casimir:
Fluctuations du vide quantique

Energie du vide?



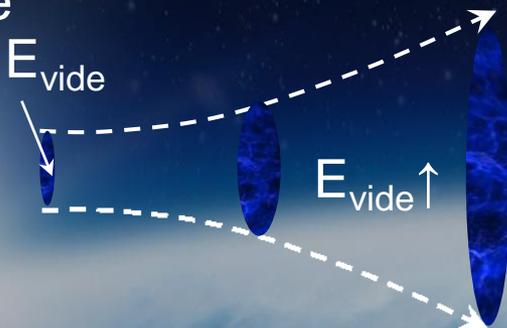
Constante cosmologique d'Einstein



Expansion cosmique produit davantage d'énergie du vide



Accélération Cosmique!

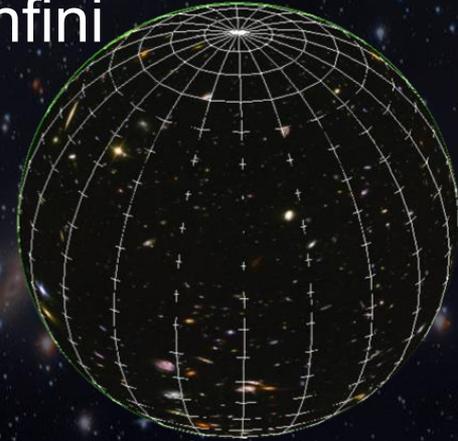


$E_{\text{vide}} \uparrow \uparrow \uparrow$

Petite histoire de la constante cosmologique

Einstein (1917) : propriétés de la gravitation à l'infini

- Univers immuable, fini et sans bord
- Introduction de la constante cosmologique Λ , compatible avec les hypothèses d'Einstein:
 - ★ le principe de relativité générale (covariance)
 - ★ le principe d'équivalence
- Souhait d'Einstein : introduire un principe de Mach (matière nécessaire pour définir un espace-temps courbe)
- Equilibre instable gravité (matière) – antigravité (Λ)



Equations d'Einstein
$$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}^{\text{mat}}$$

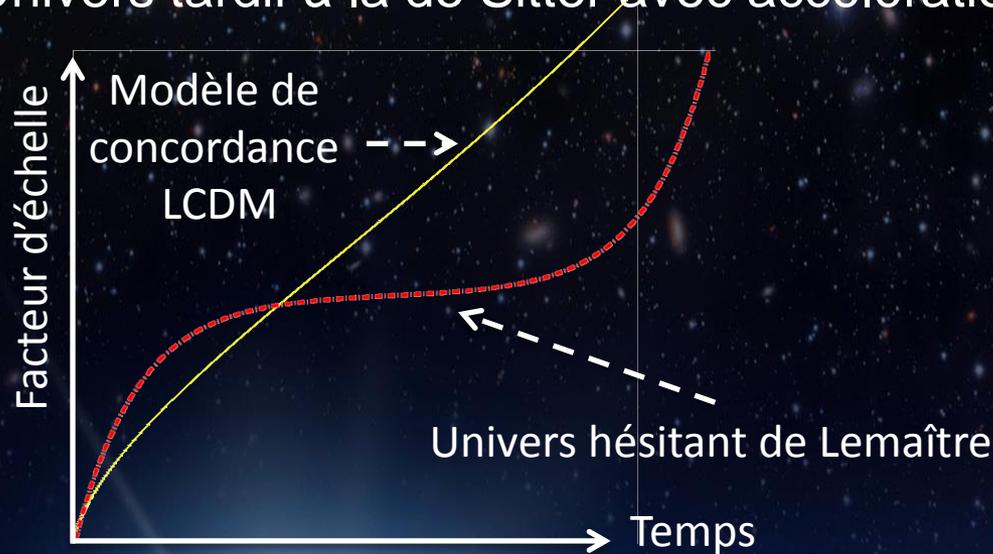
de Sitter (1917):

- Univers vide soumis à une force de répulsion due à $\Lambda > 0$
- La matière n'est pas nécessaire pour avoir un espace-temps courbe : Mach?!

Petite histoire de la constante cosmologique

Lemaître (1927): premier modèle du « Big Bang chaud » en 3 phases:

- Univers primordial dominé par la matière avec expansion décélérée
- Période transitoire quasi-statique : formation des grandes structures
- Univers tardif à la de Sitter avec accélération



Modèle de Lemaître visionnaire!
(dans LCDM:
formation des structures
durant l'ère dominée par la
matière)

Découverte de l'expansion cosmologique (années 1920):

- Einstein abandonne la constante cosmologique Λ (**rasoir d'Occam**)
- Λ devient une curiosité mathématique pour quelques décennies... jusqu'à son grand retour aujourd'hui!

L'insoutenable légèreté du vide

- ★ Théorie quantique des champs et gravitation: le vide devrait avoir une **énorme** énergie

$$\rho_{\Lambda}^{th} \approx m_{Pl}^4 = 10^{94} \text{ g / cm}^3 \Rightarrow \text{galaxie} \times 10^{50} \text{ dans } 1 \text{ cm}^3$$

Echelle d'énergie de la gravitation quantique

- ★ Observations (modèle de concordance):

$$\rho_{\Lambda}^{obs} \approx \rho_{c,0} \approx 10^{-29} \text{ g / cm}^3 \Rightarrow \text{atome} \times 1 \text{ dans } 1 \text{ cm}^3$$

« Désaccord » d'un facteur 10^{123}

Problème de l'ajustement fin!

⇒ Pourquoi la constante cosmologique est-elle si petite?

⇒ Pourquoi l'énergie du vide (quantique) est-elle aussi grande que l'énergie critique (cosmologie) **aujourd'hui**?

(l'énergie noire est-elle vraiment constante?)

Problème de la Coïncidence!

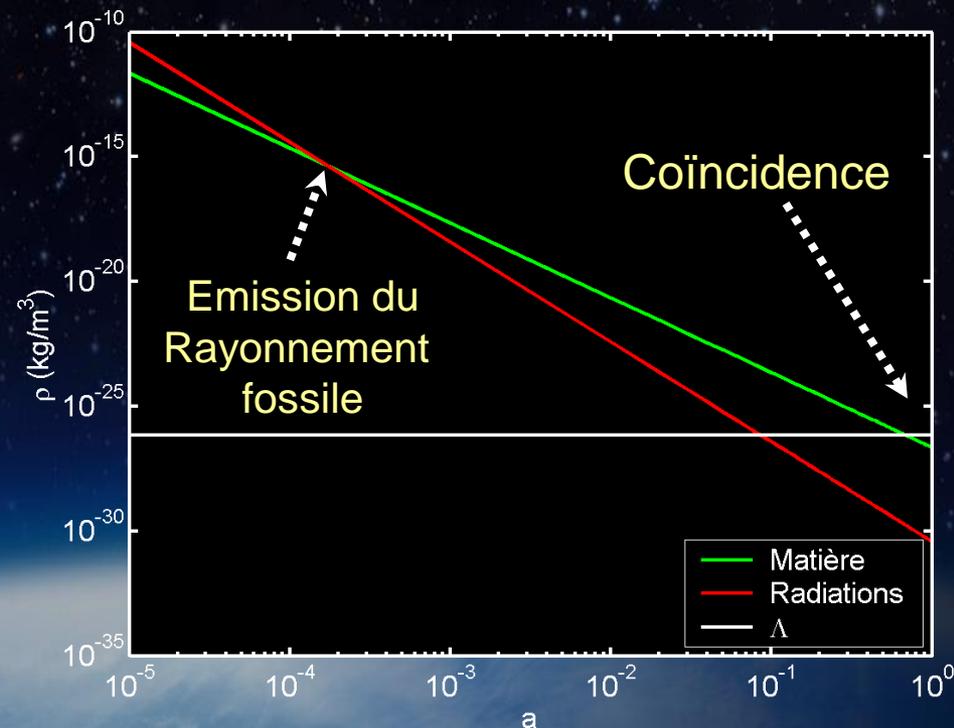
Les maux de la constante cosmologique Λ

Problème de l'ajustement fin:

- $\Lambda_{\text{obs}} \sim 10^{-52} \text{m}^{-2}$ et $\Lambda > 10^{-54} \text{m}^{-2}$ pour 1% d'énergie noire aujourd'hui
- Interprétation quantique: désaccord de 123 ordres de grandeur
- Origine de la constante cosmologique?

Problème de la coïncidence cosmique

$$H^2 = H_0^2 \left(\Omega_{m,0}(1+z)^3 + \Omega_{r,0}(1+z)^4 - \Omega_{k,0}(1+z)^2 + \Omega_\Lambda \right)$$



Deuxième partie:

QU'EST-CE QUE LA SCIENCE?

Qu'est-ce qu'une théorie scientifique?

Avertissements:

- Question du ressort de la philosophie des sciences
- Pas de définition arrêtée, critères non exhaustifs
- (Dé-)Ontologie personnelle, variable suivant les auteurs

Science:

- **Explication** de la Nature par la Nature sans recourir à l'arbitraire ni au surnaturel
- Deux piliers en échange permanent :
 - ★ Théorie (hypothèses, lois, modèle)
 - ★ Expérience

Remarques:

- Chez certains: science = reproduction des phénomènes et non explication
- Explication: élargissement de notre vision du monde, mais son caractère naturel reste subjectif (exemples: modèle héliocentrique, relativité)
- S'applique aussi aux mathématiques avec le calcul numérique comme

Science ou pseudo-science?

■ Karl Popper : scientifique si **falsifiabilité (réfutabilité)**

- Les hypothèses doivent être testables par l'expérience (même de pensée)
- Il est possible d'envisager une situation où l'hypothèse serait fausse
- En cas de désaccord, l'hypothèse est remise en question.

■ Thomas Kuhn: autres critères possibles :

- Cohérence interne (liens avec théories précédentes et construction logique)
- Cohérence externe (falsifiabilité)
- Reproduction des observations déjà expliquées et des non-expliquées
- Simplicité: le moins possible d'hypothèses et d'éléments non justifiables (**rasoir d'Occam**)
- Fécondité : nouvelles prédictions et conséquences non prévues a priori

■ Remarques:

- La falsification peut prendre du temps
- Certaines théories sont fausses mais peuvent contenir des éléments

Falsifiable ou pas ?

« Il ne pleut jamais le mercredi »

→ Falsifiable (surtout en Belgique...) et l'expérience est concevable

« On peut avoir de la chance au loto »

→ Soit on ne joue pas au loto: on ne peut pas décider si c'est vrai

→ Soit on joue: peu importe que l'on gagne ou pas on pourra dire que les gagnants ont eu de la chance

→ Non falsifiable car il n'y a aucun cas où ce serait faux

« Tous les points d'un cercle sont équidistants de son centre »

→ Définition du cercle en géométrie: axiome

→ Non falsifiable: il n'existe pas de cercle où les points seraient non équidistants par définition

→ Remarque: on peut utiliser les propriétés dérivées de celle du cercle (π par exemple) pour tester les axiomes d'Euclide

Quelles critères pour la Science?

Positions philosophiques subjectives mais qui participent au succès objectif d'une théorie, notamment technologique

- Falsification
- Reproduction efficace des phénomènes
- Caractère explicatif
- Fécondité et capacité prédictive
- Éléance mathématique ou conceptuelle
- Etc.

Utilisons ces critères pour examiner des argumentaires sur l'ajustement fin de la constante cosmologique

- Mécanismes cosmologiques (quintessence, etc.)
- Argumentaires anthropiques: les multivers et le dessein intelligent

Troisième partie:

LA CONSTANTE COSMOLOGIQUE, POUR LE MEILLEUR?!

Mécanismes cosmologiques

On ne considère pas le problème de l'ajustement fin

Coïncidence cosmique:

- explicable si l'énergie noire est reliée à un mécanisme cosmologique
- La densité d'énergie noire évolue au cours de l'expansion cosmique
- La proportion d'énergie noire est reliée à celle des autres ingrédients

Une « constante » cosmologique variable ? $\Lambda(x^\mu)$? NON!

- Violation de la conservation d'énergie
- Principe de relativité générale: une dynamique pour $\Lambda(x^\mu)$!

Solution: modification des équations d'Einstein

Equations d'Einstein
sans constante cosmologique
 $\Lambda=0$

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}^{\text{mat}}$$

- Membre de gauche: modification de la gravitation
- Membre de droite: modification de la matière
- Les deux points de vue sont équivalents

Exemple: la quintessence

Ingrédient supplémentaire de la soupe cosmique (avec les radiations, la matière ordinaire, la matière noire, etc.)

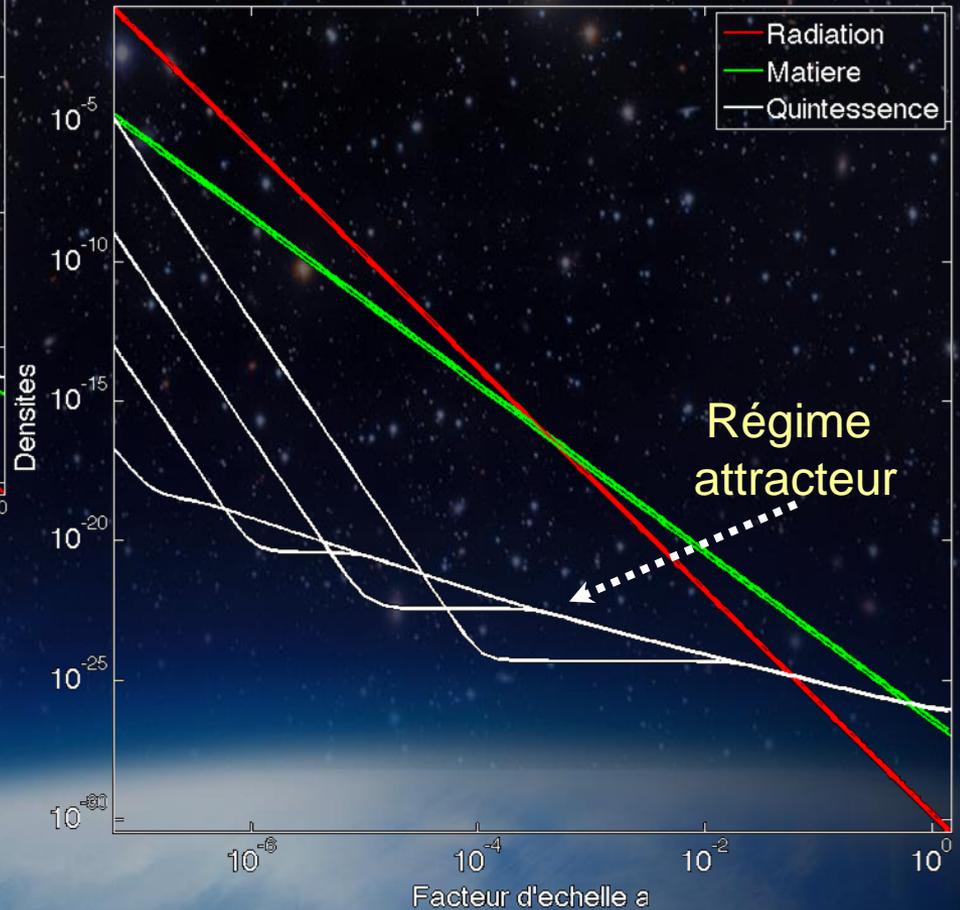
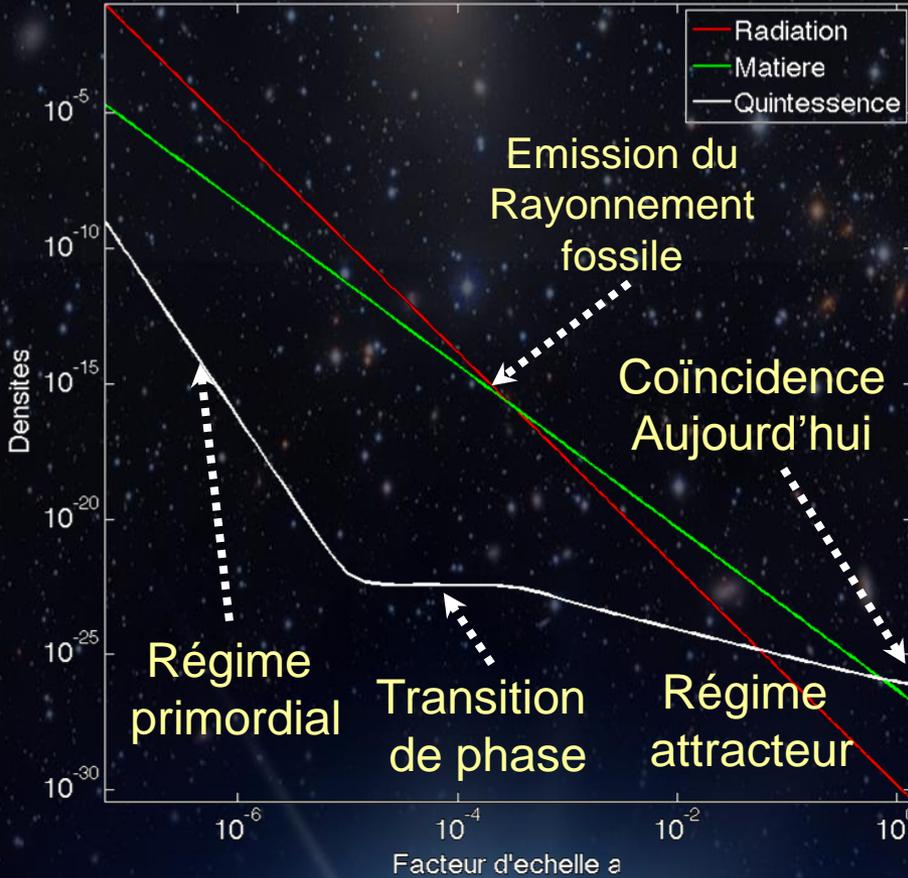
Propriétés:

- Noire: interaction uniquement via la gravitation standard
- Nouveau type de matière donnant des pressions négatives (accélération)
- Gravitation n'est pas modifiée (relativité générale)
- Sa densité d'énergie évolue au cours du temps
- Elle peut se concentrer par effondrement gravitationnel

Avantages:

- Dynamique cosmologique riche (théorie des systèmes dynamiques)
- Modélisation en physique des particules (candidats de champs scalaires)
- Densité d'énergie de quintessence peut être importante même dans l'univers primordial à l'opposé du scénario constante cosmologique
- Existence d'attracteurs expliquant naturellement la coïncidence

Quintessence et attracteurs cosmologiques



La convergence vers l'attracteur se fait depuis un large domaine de conditions initiales dans l'univers primordial

Réfutabilité de la quintessence

Variation temporelle

→ À l'opposé de Λ , le rapport pression sur densité de la quintessence varie au cours du temps, ce qui laisse une trace sur les observables cosmologiques (expansion cosmologique, formation des grandes structures, etc.)

Variation spatiale

→ La densité de quintessence est variable et peut influencer les puits de potentiel dans lesquels se forment les amas de galaxies

Candidat en physique des hautes énergies

→ Nombreux champs scalaires (« cousins » du Higgs)

→ Possibilité de détecter la particule de quintessence en laboratoire

Couplage direct ou indirect avec la matière ordinaire

→ Énergie sombre et non plus noire

→ Violation du principe d'équivalence, variation des constantes fondamentales...

La quintessence: panacée universelle?

- Report du problème de l'ajustement fin de paramètres sur celui de l'ajustement de la dynamique (fonctions arbitraires)

- Mécanismes d'attraction encore non complètement satisfaisants

- Candidat sérieux en physique des hautes énergies encore manquant (très basses énergies) et aucun candidat attracteur

- Quintessence : ajout d'une nouvelle particule au modèle standard, mais indépendante des autres (contrainte très forte)

Au-delà d'Einstein avec l'énergie noire...

Constante Cosmologique



Quintessence

Nouvelle physique?

Modification de la gravitation?

Dimensions supplémentaires?

Nouveau paradigme cosmologique?

Gravité d'Einstein:
Energie sombre gelée

? Ajustement fin/ coincidence

Energie sombre variable
(avec uniquement des interactions gravitationnelles)

? Autres empreintes physiques
que l'expansion cosmique

Energie noire couplée (Not so dark)

? Principe d'Equivalence

Ouverture sur une nouvelle
physique!

Quatrième partie:

LA CONSTANTE COSMOLOGIQUE, POUR LE PIRE

Principes anthropiques (1/2)

Postulat:

→ L'existence de la vie sur Terre est un fait non trivial sinon unique

Idée:

→ Théories physiques doivent prendre en compte ce fait comme observation



Principe anthropique faible

→ la présence d'observateurs dans l'Univers impose des contraintes sur les paramètres cosmologiques et les constantes fondamentales

→ Toutes les univers possibles ne sont pas compatibles avec notre existence

→ Conditions nécessaires à l'existence de la vie

(exemple de condition nécessaire : il est nécessaire de jouer pour gagner)

Arguments anthropiques pour Λ

■ Si Λ avait été trop grande, il n'y aurait pas pu y avoir de structures cosmiques gravitationnellement liées comme les galaxies.

■ Si Λ avait été trop négative, l'Univers aurait connu une contraction précoce vers un Big Crunch

■ La densité d'énergie due à Λ , ρ_Λ , est alors anthropiquement contrainte par

$$-10^{-123} m_{\text{Pl}}^4 < \rho_\Lambda < 10^{-121} m_{\text{Pl}}^4$$

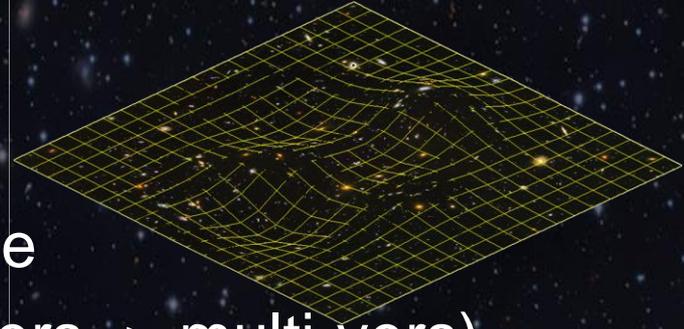
(où m_{Pl} est l'échelle de Planck)

■ Les contraintes expérimentales sur ρ_Λ sont plus fortes:

$$\rho_\Lambda \sim 10^{-123} m_{\text{Pl}}^4$$



Les multivers



Apparentés au principe anthropique faible

Mondes multiples au lieu d'unique (uni-vers -> multi-vers)

→ En relativité générale:

★ « Univers observables »: bulles de régions causales dans un univers d'étendue infinie

★ Différentes valeurs de Λ peuvent être produites comme reliquat de l'inflation

→ En théorie des cordes:

★ Branes à 3D dans un univers à 10 dimensions spatiales

★ « Paysage des cordes »: lois de la physique variables suivant les branes, y compris la valeur de Λ

Valeur de Λ justifiée par sélection anthropique:

→ Les observateurs n'existent que dans les « univers » avec une valeur de Λ compatible avec leur existence

→ Biais: nous ne pouvons observer que certaines valeurs particulières de Λ

→ Le gagnant du Loto doit-il s'étonner d'être riche?



Quelques critiques des multivers



Falsification? Peut-être si

- les univers multiples ne sont pas indépendants entre eux ou pas inaccessibles (univers pas si parallèles)...
- il existe d'autres prédictions reliées non ambiguës testables

Élégance et simplicité? (c'est trop facile un seul univers ?)

Fécondité et capacité prédictive?

« Syndrome du gagnant du Loto » (I. Hacking) :

- lorsqu'un événement rare se produit lors d'un processus aléatoire, on peut conclure, à tort, que le processus s'est déjà produit plusieurs fois avec un résultat négatif
- Faux: les résultats d'un processus aléatoire sont indépendants entre eux

Théorie des probabilités:

- Pour utiliser un caractère aléatoire, il faut la possibilité de pouvoir reproduire l'expérience
- Inapplicable en cosmologie: une seule réalisation de l'Univers nous est accessible!

Principes anthropiques (2/2)

Principe anthropique fort

- Les propriétés de l'Univers et les constantes fondamentales **sont justes comme il faut** de sorte que la vie apparaisse (conditions nécessaires et suffisantes: y a rien à jeter...)
- Principe de cohérence: : il existerait une description unifiée de tout l'Univers dont le fil conducteur est l'existence d'observateurs
- Notre existence ne serait donc ni un accident ni un fruit du hasard



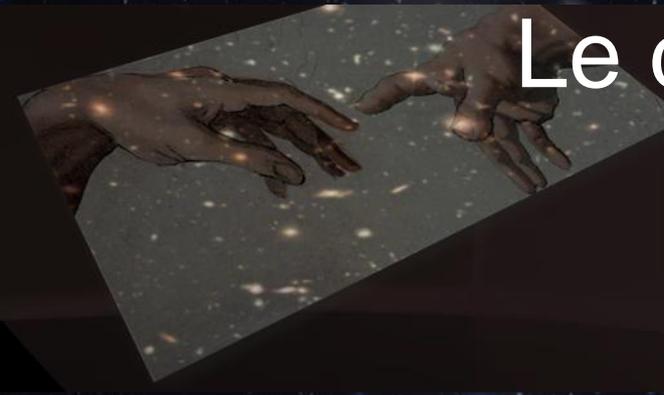
Principe anthropique intentionnel (ou finaliste):

- L'Univers et les lois fondamentales **sont ainsi sont pour** que la vie apparaisse
- Notre existence serait la « meilleure explication » de l'Univers

« Les gens qui n'ont pas d'idées peuvent
quand même avoir des principes »

Edward Kolb,
à propos des adeptes
du principe anthropique

Le dessein intelligent



Position finaliste apparentée au principe anthropique intentionnel

Thèse du « Discovery Institute » :

« Certaines observations de l'univers et du monde vivant sont mieux expliquées par une cause intelligente que par des processus non-dirigés tels que la sélection naturelle »

Selon cette thèse, la valeur de Λ est directement imputable à une intelligence extérieure au Monde

- Bienveillante car valeur de Λ conforme aux exigences anthropiques
- Aux desseins mystérieux puisque $\Lambda \neq 0$ pour une raison encore obscure (eschatologique?)

Le dessein intelligent se prétend scientifique mais...

Les dangers du dessein intelligent

Non-scientifique:

- interprétation par une cause extérieure arbitraire « sur-naturelle » ou artificielle
- Inconsistance logique (ne pas avoir d'autre explication que l'arbitraire n'est pas une « meilleure explication »)
- Non-falsifiable car non prédictif puisque purement arbitraire
- **Fin de la science car renoncement à l'explication**

Nature de l'agent intelligent?

- Si Dieu: créationnisme = position concordiste réfutable en science comme en théologie
- Sinon: êtres pentadimensionnels? (des suggestions?)

Dangereux:

- Pour la science: plus de questionnement => fanatisme
- Pour la société: montée en force de la pseudo-science et de la superstition

Conclusions

☛ L'énergie noire: un défi pour la Science

☛ Mécanismes cosmologiques

→ Scientifique: cohérent, réfutable, prédictif et testable

→ Ouverture à de la nouvelle physique et potentiel d'enrichissement de notre vision du monde

☛ Argumentaires anthropiques:

→ Multivers: pas scientifiques si pas réfutables ou testables

→ Dessein intelligent: pas scientifique et dangereux

☛ La science, cet exercice périlleux ... Qui est aussi le vôtre!

**« Ce n'est pas le monde qui
est le lieu de la question,
mais la question qui est le lieu du
monde. »**

Nahman de Braslav

Notes de cours fil de 2011 à 2013:

<http://perso.fundp.ac.be/~afuzfa/Fleurance/>

Plan

● Motivation: modèle de concordance et réflexion sur la science

● La constante cosmo: kesako?

- Motivations historiques
- L et fondements de la RG
- Statuts théorique et observationnels (accélération)
- Problèmes associés à la valeur de L (fine-tuning et coincidence)

● épistémologie autour de Lambda

- Critères épistémologiques de science et de pseudo-science
- Réfutabilité, cohérence, falsifiabilité, rasoir d'Occam, élégance, etc.
- Exemples d'énoncés falsifiables, parallèle avec géométrie euclidienne

● Revue critique des arguments autour de Lambda

- Multivers et sélection anthropique (syndrome du gagnant du Lotto)
- Intelligent design, interprétations finalistes et pseudo science
- Quintessence et autres mécanismes cosmologiques

● Conclusion:

- qu'est-ce que la Science? Science et bon sens
- Science, intelligible et questionnement
- Appel au scientifique en chacun de nous

« Encore un modèle d'énergie sombre?! »

De nombreuses interprétations de l'accélération cosmique ont été proposées...

CERTES, MAIS

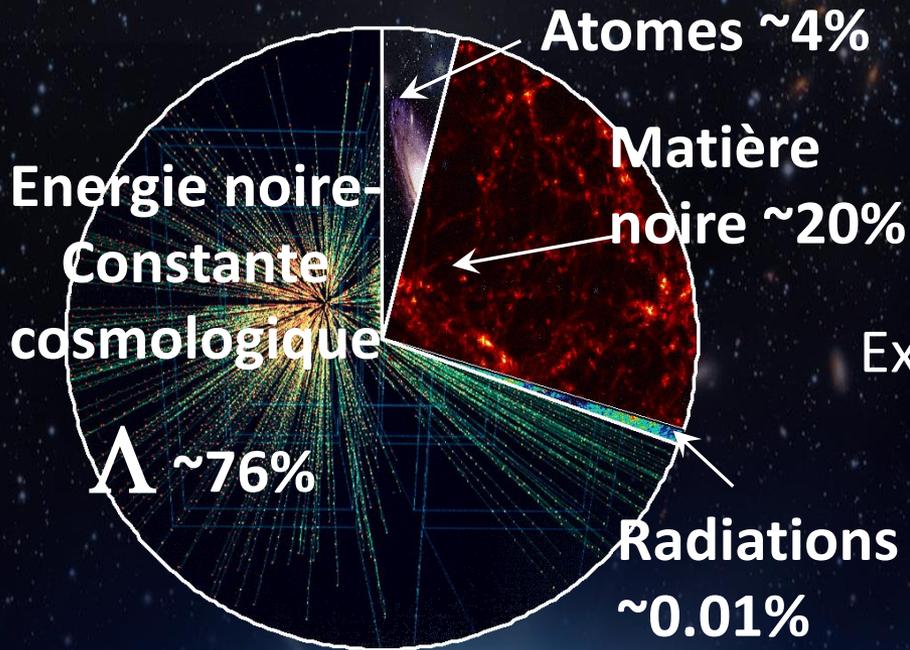
Filiation avec de vieilles et profondes idées en physique

- Λ : idées de Mach en relativité générale
- **Quintessence** : champ scalaire inspiré par la physique des particules
- **Coupled DE** : variation des constantes de la physique
- **Backreactions**: modèles d'Univers inhomogènes de Lemaître-Tolman
- **Brane cosmology**: extra-dimensions à la Kaluza-Klein
- **F(R)-gravity** : théorie du champ unitaire d'Einstein
- **AWE**: approche de Brans-Dicke du principe de Mach

Opportunité unique d'éprouver enfin ces idées...

De quoi l'Univers est-il fait?

**Composition actuelle
en énergie de l'Univers
(>95% C.L.)**



Que se cache-t-il
derrière l'énergie noire?

Explication, interprétation ou modèle?

Regard critique sur 3 approches
des problèmes de la
constante cosmologique

Science ou pseudo-science?

La coïncidence cosmique

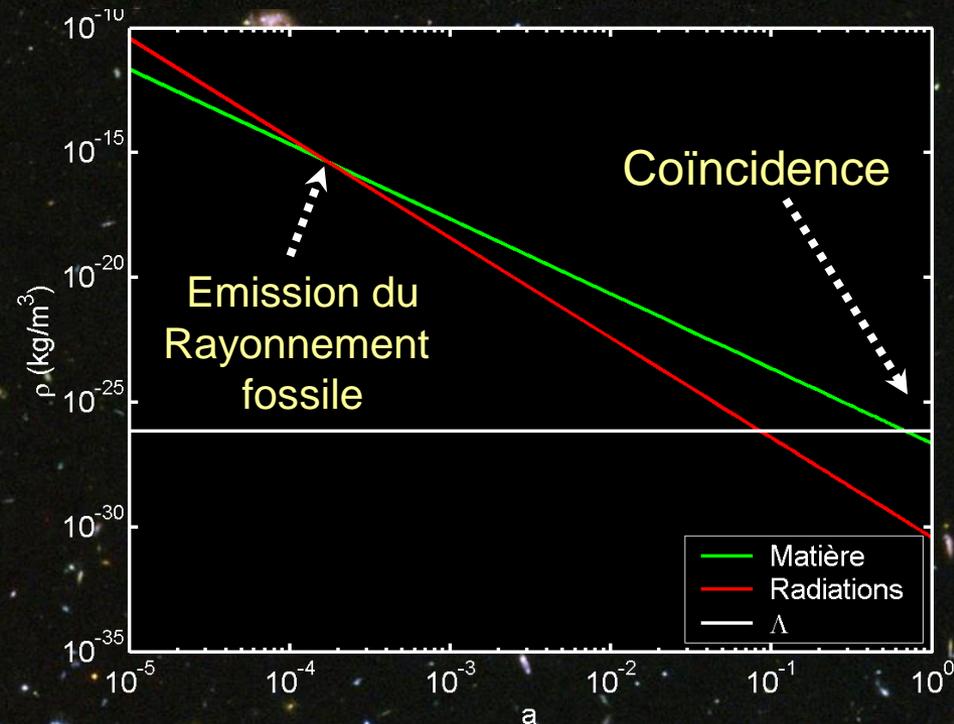
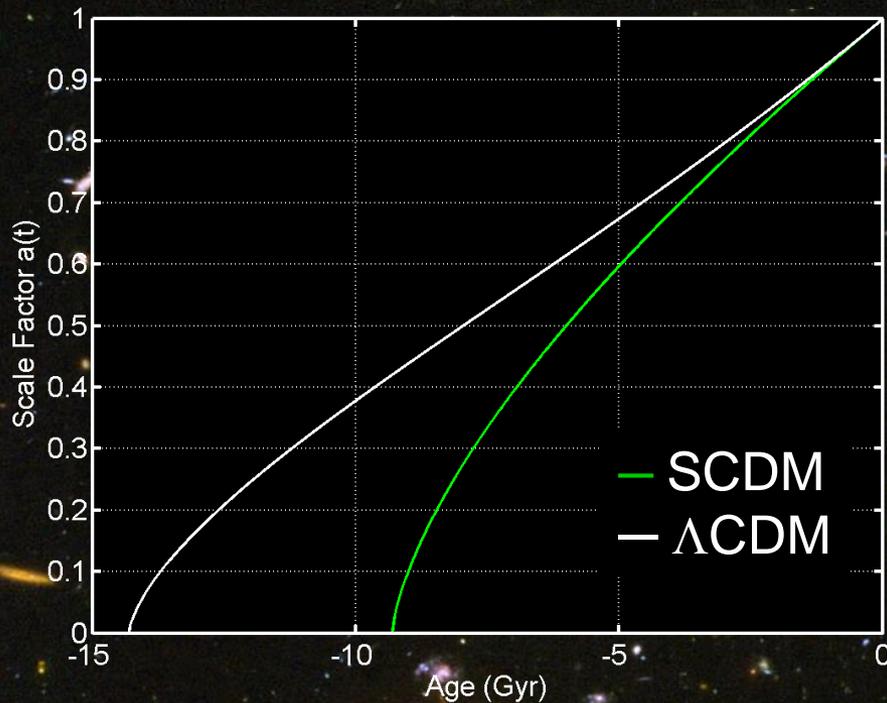
★ Interprétation de Λ comme énergie du vide

→ La covariance (invariance sous Lorentz) impose que la valeur dans le vide quantique de l'énergie vaille

$$\langle T_{\mu\nu} \rangle_Q = - \langle \rho \rangle_Q g_{\mu\nu} \quad \Lambda_{\text{tot}} = \Lambda + \frac{8\pi G}{c^2} \langle \rho \rangle_Q$$

★ Evolution cosmologique de Λ CDM et coïncidence cosmique

$$H^2 = H_0^2 \left(\Omega_{m,0}(1+z)^3 + \Omega_{r,0}(1+z)^4 - \Omega_{k,0}(1+z)^2 + \Omega_\Lambda \right)$$



L'être humain est-il au centre de l'Univers?



Face à ces constatations, un argumentaire anthropique, centré sur l'existence de l'être humain, s'est développé en cosmologie.

Le **principe anthropique faible** consiste à dire que la présence d'observateurs dans l'Univers impose des contraintes sur les paramètres cosmologiques. Toutes les cosmologies possibles ne sont pas compatibles avec notre existence, nous sommes les grands gagnants de la loterie cosmique.



Loterie Nationale

Le **principe anthropique faible** est généralement bien accepté même si les conditions de notre existence sont souvent moins contraignantes que les contraintes expérimentales.

Le cosmos est-il intelligent?



Le **principe anthropique fort** va plus loin en postulant que l'Univers est tel que les observateurs puissent y apparaître.

On peut le voir soit comme un principe de cohérence : il existe une description unifiée de tout l'Univers dont le fil conducteur est l'existence d'observateurs. Notre existence n'est alors pas considérée comme un accident ou un fruit du hasard.



Mais ce principe peut aussi se concevoir de façon finaliste ou intentionnelle. Notre existence serait la « meilleure explication » de l'ajustement fin. Cette vision non scientifique (car non réfutable) est celle du créationnisme ou du dessein intelligent.