



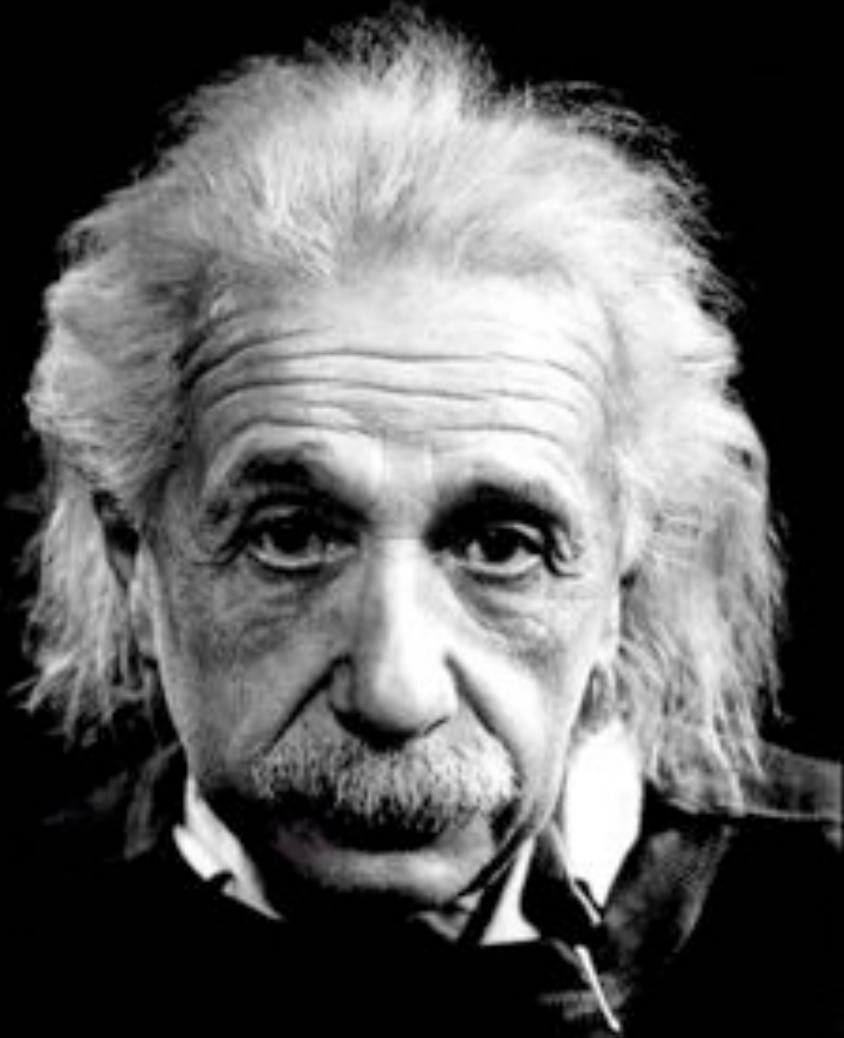
La plus grande erreur d'Einstein ?

Alain Bouquet

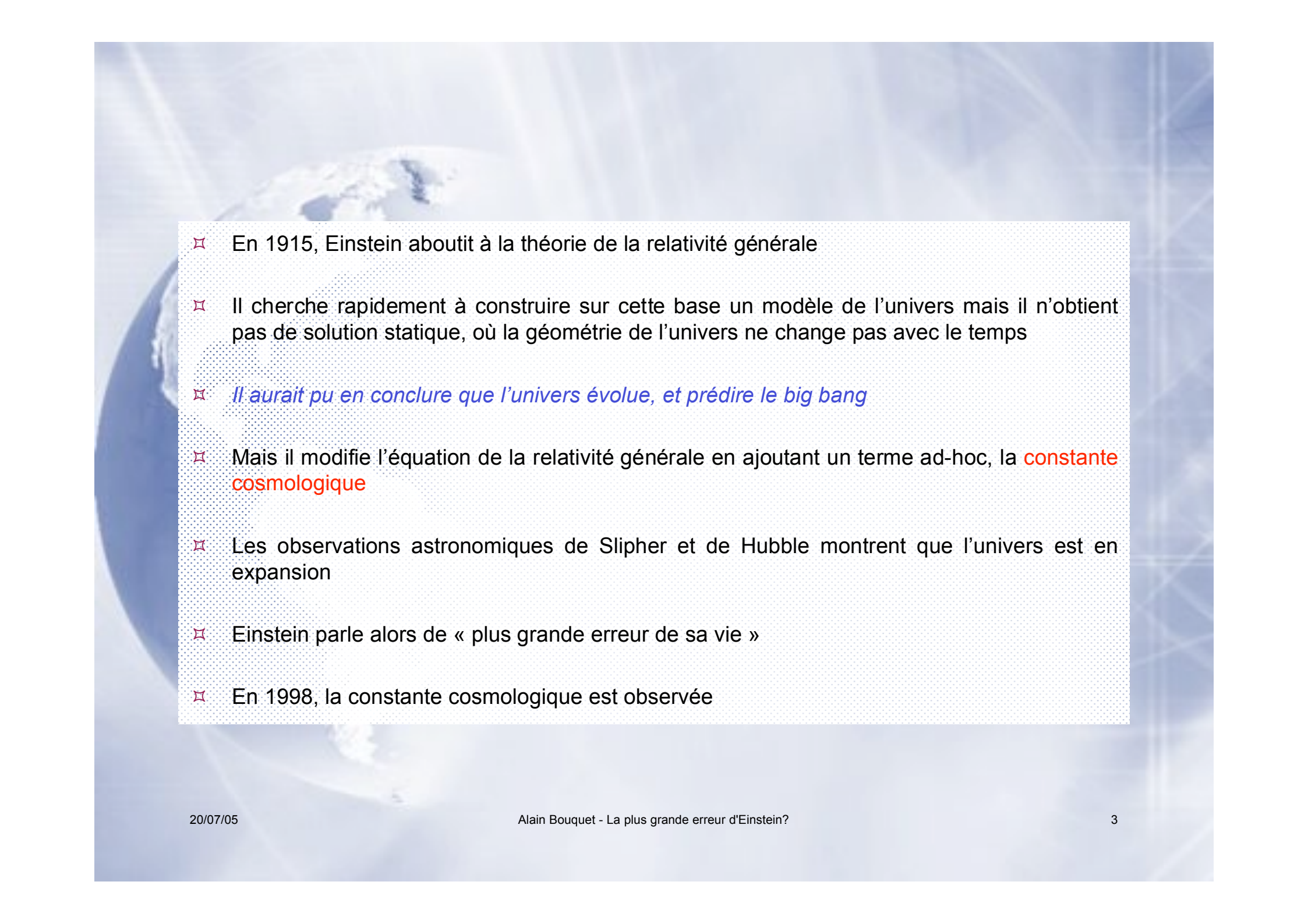
AstroParticule & Cosmologie

CNRS , Université Paris 7, CEA & Observatoire de Paris





La cosmologie a bientôt cent ans

- 
- ✧ En 1915, Einstein aboutit à la théorie de la relativité générale
 - ✧ Il cherche rapidement à construire sur cette base un modèle de l'univers mais il n'obtient pas de solution statique, où la géométrie de l'univers ne change pas avec le temps
 - ✧ *Il aurait pu en conclure que l'univers évolue, et prédire le big bang*
 - ✧ Mais il modifie l'équation de la relativité générale en ajoutant un terme ad-hoc, la **constante cosmologique**
 - ✧ Les observations astronomiques de Slipher et de Hubble montrent que l'univers est en expansion
 - ✧ Einstein parle alors de « plus grande erreur de sa vie »
 - ✧ En 1998, la constante cosmologique est observée

Albert Einstein



- ✧ 1905 : les trois coups
 - ✧ La relativité restreinte : l'espace-temps et la constance de la « vitesse de la lumière »
 - ✧ L'effet photoélectrique : quantification de la lumière, le photon
 - ✧ Le mouvement brownien : démonstration expérimentale de l'existence des atomes
- ✧ 1915 : la relativité générale
 - ✧ La gravitation comme manifestation de la courbure de l'espace-temps
 - ✧ Ce qui ouvre la possibilité d'une cosmologie physique
- ✧ 1917 : un modèle simple pour l'univers reliant sa géométrie à son contenu
- ✧ 1919 : « vérification » observationnelle de la relativité générale lors d'une éclipse de Soleil
- ✧ 1920...1955 : recherche infructueuse d'une théorie unitaire

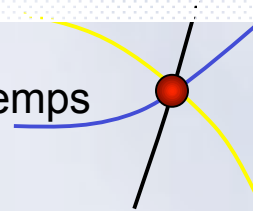
La relativité générale est un jeu d'enfant



La relativité générale (2)

- ✧ La matière - et l'énergie - n'exercent pas une force à distance sur d'autres objets, mais induisent une déformation locale de l'espace-temps, qui se propage de proche en proche

Un point $\mathbf{x} = \{x, y, z, t\}$ de l'espace-temps



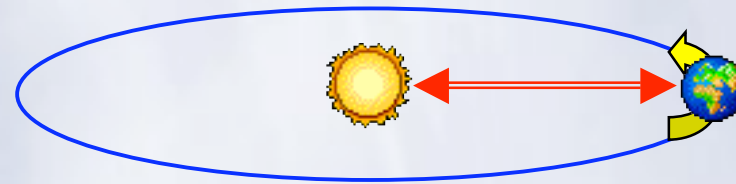
Une métrique $g(\mathbf{x})$ indique comment varient localement les angles et les distances

$$g(\mathbf{x}) \rightarrow G[g(\mathbf{x})] = T(\mathbf{x}) \leftarrow \text{matière}$$

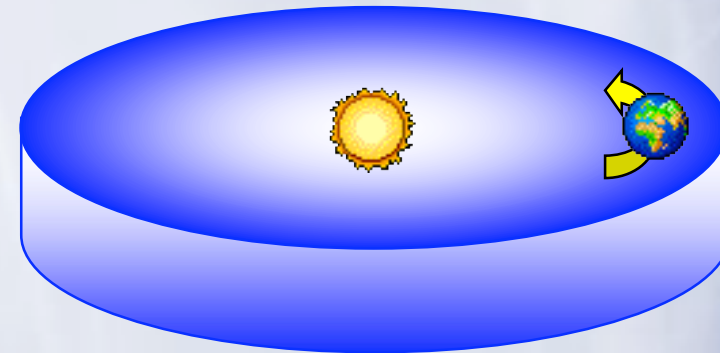
Equation d'Einstein

Newton et Einstein

✧ Pour Newton, le Soleil exerce sur la Terre une traction qui la maintient en orbite



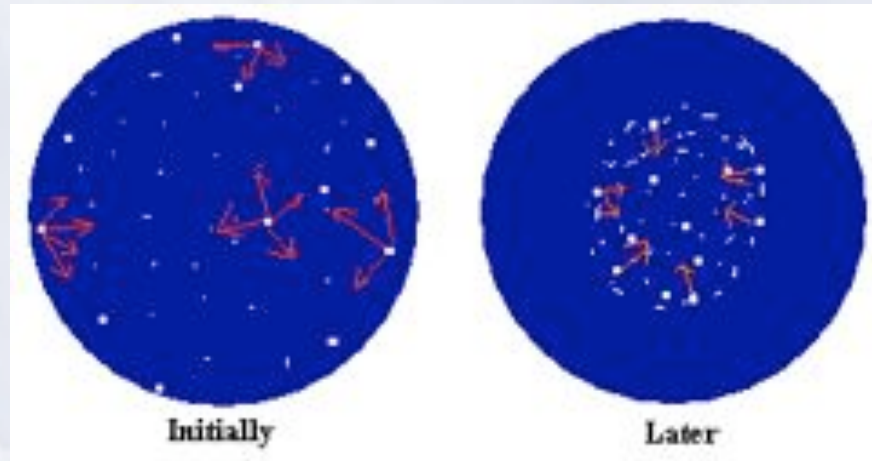
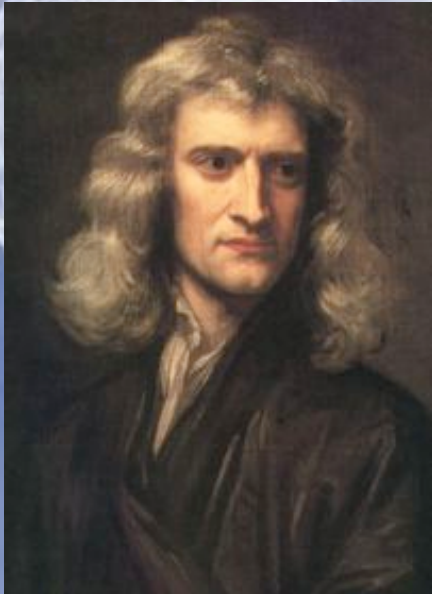
✧ Pour Einstein, le Soleil **déforme** l'espace autour de lui en orbite, et la Terre va « droit devant elle »



✧ Dans le système solaire, la théorie d'Einstein redonne, en première approximation, la théorie de Newton. Et à l'échelle de l'univers ?

La cosmologie avant Einstein

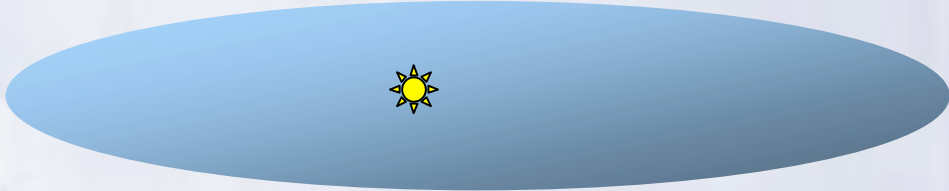
- ✧ Newton effleure la question d'une cosmologie
 - ✧ Une distribution finie d'étoiles serait instable :



- ✧ Un univers infini n'aurait pas de centre vers lequel « tomber »
- ✧ Mais le champ de gravitation serait alors **infini...**
- ✧ Et un espace infini uniformément peuplé d'étoiles éternelles conduit au paradoxe de Kepler-Olbers-de Chéseaux : **le ciel nocturne serait partout aussi brillant que la surface du Soleil**

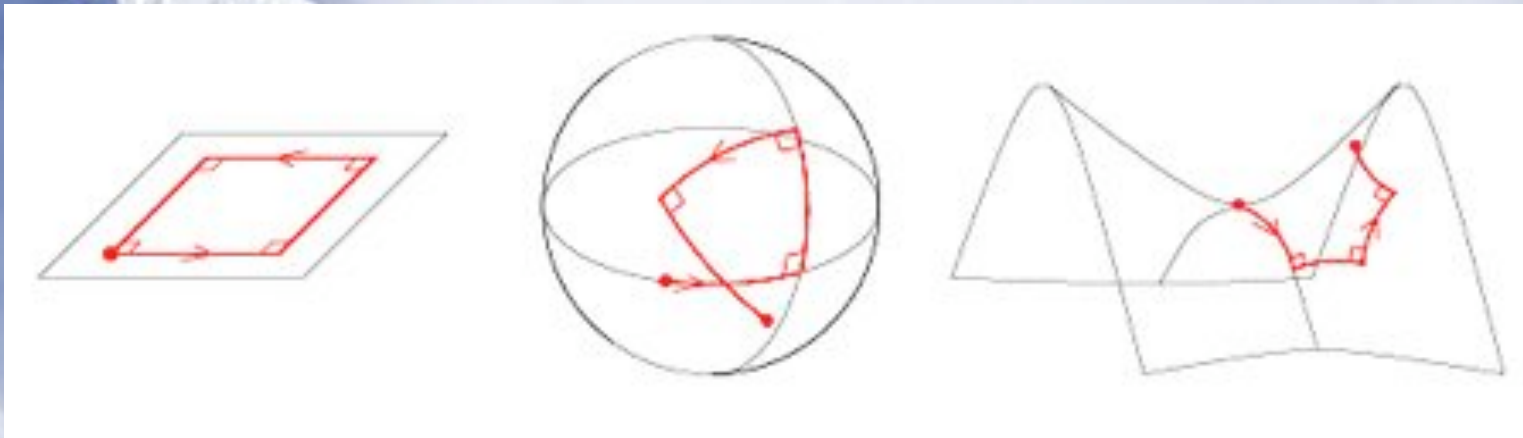
La cosmologie avant Einstein (2)



- ✧ En 1915, l'univers des astronomes est limité à la Voie lactée
 - ✧ Les autres galaxies sont tenues pour des nuages locaux de gaz, d'étoiles et de poussières
 - ✧ De 1900 à 1920 Jacobus Kapteyn en trace le premier plan
 - ✧ La Voie lactée est un ellipsoïde aplati de 1 kpc d'épaisseur et 5 kpc de diamètre
 - ✧ Le Soleil n'est pas très loin du centre
- 
- ✧ Les étoiles ont des mouvements lents [~ 20 km/s] et apparemment **erratiques** : l'existence du disque galactique et sa rotation ne seront étudiés que dans les années 20, par Jan Oort en particulier
 - ✧ En première approximation, l'univers est un gaz froid d'étoiles

La cosmologie d'Einstein

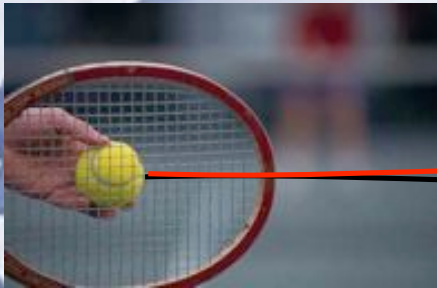
- ✧ Einstein suppose donc que l'univers est rempli d'un gaz froid, à peu près homogène et isotrope, **et que sa géométrie ne varie pas avec le temps**
- ✧ La possibilité que la géométrie change (= courbure temporelle) l'effleure bien, mais il la rejette, pour des raisons observationnelles et non pas philosophiques
- ✧ Une répartition **homogène** de matière dans l'espace implique une **courbure constante** de cet espace. Trois solutions sont possibles:



- ✧ Einstein choisit la solution de courbure positive, une hypersphère

La cosmologie d'Einstein (2)

- ✧ Son souci principal a trait aux conditions aux limites (son équation est une équation différentielle, dont les solutions dépendent des conditions aux limites)



- ✧ Quelles conditions aux limites prendre ?
 - ✧ Un espace euclidien à l'infini, comme pour le système solaire ?
 - ✧ Mais cela n'a de sens que si la matière est localisée
 - ✧ Et loin de la matière, une particule manifesterait de l'inertie, violant le principe de Mach [auquel Einstein tient alors beaucoup]
 - ✧ Einstein préfère supposer que la matière est diffuse dans tout l'espace
 - ✧ Et qu'elle impose donc à cet espace une courbure partout constante et positive

La cosmologie d'Einstein (3)

- ✧ L'équation d'Einstein

$$g(\mathbf{x}) \rightarrow G[g(\mathbf{x})] = T(\mathbf{x}) \leftarrow \text{matière}$$

devient beaucoup plus facile à résoudre, car elle se réduit à deux équations simples:

$$\begin{aligned} \text{Courbure spatiale} &= \text{densité de masse} \\ \text{Courbure spatiale} &= \text{pression} = 0 \end{aligned}$$

- ✧ Elle n'a pas d'autre solution qu'un espace vide et euclidien !

- ✧ Alors Einstein la modifie en $G[g(\mathbf{x})] - \Lambda g(\mathbf{x}) = T(\mathbf{x})$

La constante cosmologique Λ

- ✧ Einstein n'a qu'une issue possible : généraliser son équation, ajouter un terme
- ✧ Il la modifie en

$$G[g(\mathbf{x})] - \Lambda g(\mathbf{x}) = T(\mathbf{x})$$

- ✧ Le terme additionnel est la *constante cosmologique* Λ
- ✧ Maintenant, Einstein peut obtenir une solution statique de courbure spatiale positive. Ses équations deviennent en effet :

Courbure spatiale – constante cosmologique $\Lambda/3$ = densité de masse

Courbure spatiale – constante cosmologique Λ = pression = 0

- ✧ Einstein apprécie beaucoup la relation ainsi obtenue entre constantes fondamentales de la physique, géométrie de l'univers et contenu matériel :
 - ✧ Densité = $\Lambda [c^2/4 \pi G]$
 - ✧ Rayon de l'hypersphère = $1/\sqrt{\Lambda}$

Un résultat superbe...

- ✧ Le terme additionnel est la généralisation maximale de l'équation d'Einstein
- ✧ La relation entre constantes fondamentales, géométrie et matière rend l'univers logiquement nécessaire aux yeux d'Einstein
- ✧ Esthétiquement, c'est le couronnement de sa carrière

...que les faits s'empressent de réfuter !

- ✧ Tout le monde ne partage pas son sentiment esthétique
- ✧ Cet univers statique est aussi instable qu'un crayon posé sur la pointe
[Eddington le démontrera en 1930]
- ✧ Les astronomes commencent à rassembler des indices montrant que l'univers est beaucoup plus grand qu'on le pensait, et qu'il n'est pas statique
- ✧ Willem de Sitter publie dès 1917 un modèle d'univers statique, courbé **et sans matière**, détruisant la belle harmonie

Le modèle de de Sitter

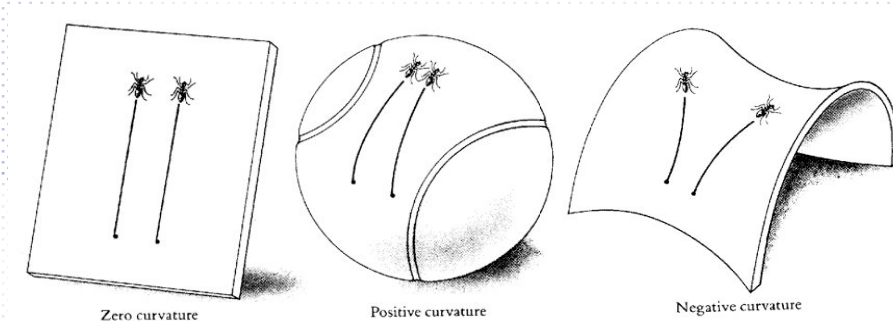
- ✧ En 1917, Willem de Sitter annonce avoir découvert une seconde solution de courbure positive, mais correspondant à un univers vide de matière



- ✧ Puisqu'il n'y a pas de matière, Einstein y voit un pur jeu mathématique sans signification physique
 - ✧ *Mais le lien entre géométrie et contenu matériel n'est plus aussi inévitable qu'il le pensait*
- ✧ de Sitter signale, en note, que dans son modèle la métrique tend vers zéro à l'infini et remarque que les longueurs d'onde tendent alors aussi vers l'infini
 - ✧ *Autrement dit, les objets lointains ont des couleurs décalées « vers le rouge »*
 - ✧ *Il fait même allusion à de faibles indices observationnels en ce sens*

Le modèle de de Sitter (2)

- ✧ Le modèle de de Sitter suscite immédiatement beaucoup d'intérêt parmi les théoriciens
- ✧ Il n'y a pas de matière, ou plus exactement la matière ne domine pas la géométrie. Mais le comportement de ce peu de matière est bien étrange.
- ✧ Weyl remarque dès 1923 que deux particules s'écartent d'autant plus vite qu'elles sont distantes



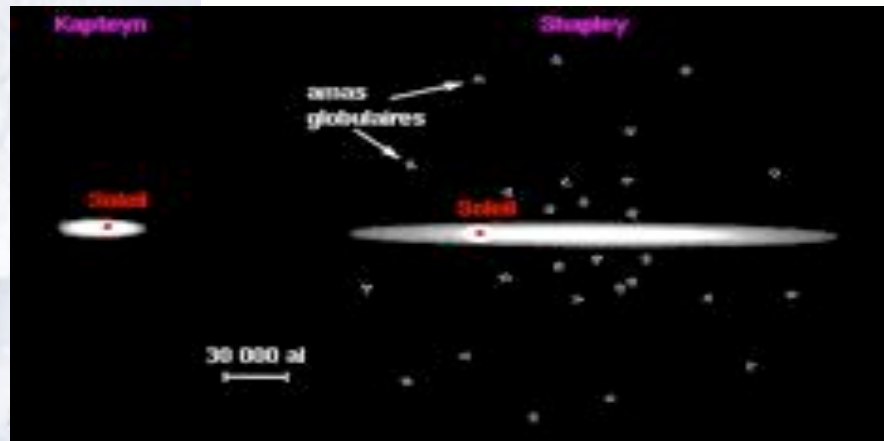
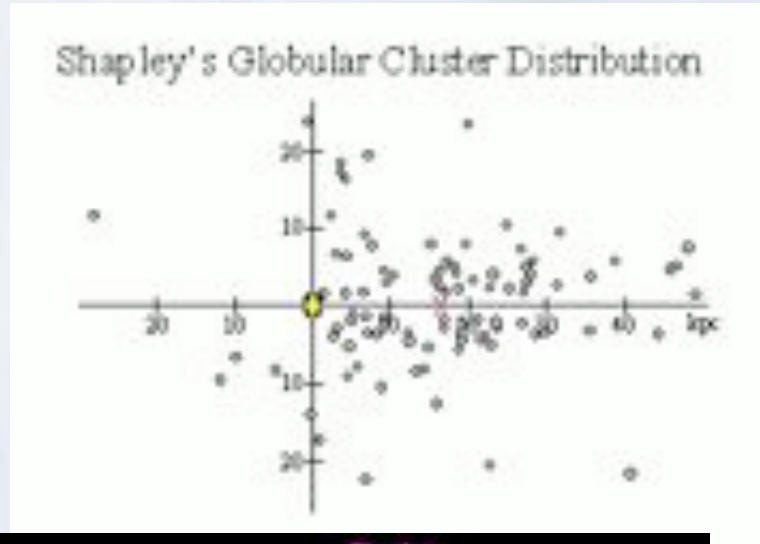
- ✧ Cet univers peut en fait être considéré comme en **expansion** !
- ✧ Friedmann, puis Lemaître montreront qu'une redéfinition des coordonnées $\{x,y,z,t\}$ en fait un cas particulier des modèles d'univers en expansion qu'ils construisent
- ✧ En fait l'expansion y est accélérée (exponentielle) et « notre » univers a peut-être traversé plusieurs de ces « phases de de Sitter »

Mais l'image de l'univers change brutalement



La cosmologie au temps d'Einstein

- ✧ Shapley : le Soleil n'est pas au centre de la Voie lactée :



La cosmologie au temps d'Einstein (2)

- ✧ 1920 : le « grand débat » entre Shapley et Curtis
 - ✧ Les « nébuleuses » sont-elles *dans* la Voie lactée (Shapley), ou *en dehors* (Curtis)?
 - ✧ L'univers se limite-t-il à la Voie lactée, ou est-il peuplé d'une nombre immense de **galaxies?**
 - ✧ La question est résolue par la découverte en 1924, par Hubble, de céphéides dans M31



- ✧ Les Céphéides sont des étoiles variables périodiques, dont la période augmente avec la luminosité absolue
- ✧ Elles permettent ainsi de mesurer la distance des galaxies proches
- ✧ Hubble démontre ainsi que M31, la grande galaxie d'Andromède, est complètement en dehors de la Voie lactée
- ✧ La taille de l'univers augmente brutalement : les briques de base ne sont pas les étoiles mais les galaxies

Un univers de galaxies

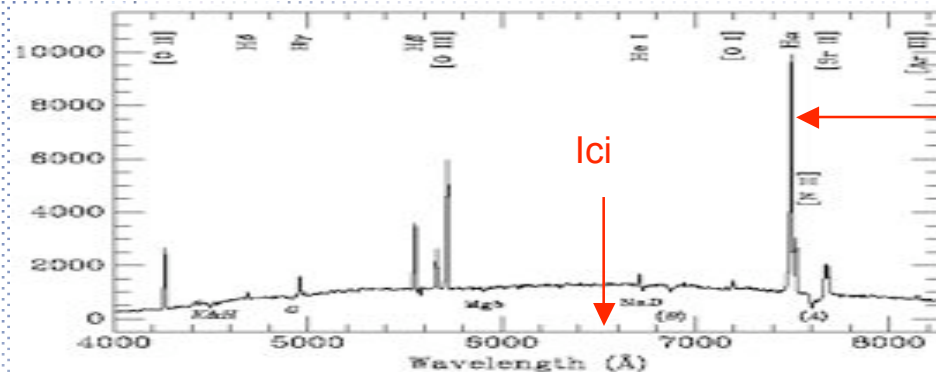
*Une partie du
« champ profond »
de l'ESO*

*On n'y voit guère
que des galaxies*



La cosmologie au temps d'Einstein (3)

- ✧ Vesto Slipher : les spectres des galaxies sont le plus souvent décalés « vers le rouge »
 - ✧ 11 sur 15 en 1915
 - ✧ 36 sur 42 en 1925
- ✧ Le décalage z mesure la variation des échelles de longueur entre émission et détection
 - ✧ il est le même pour *tous* les rayonnements et *toutes* les longueurs d'onde



Normalement la raie H α est à 656 nm

$$z = (750-656)/656 = 0.14$$

- ✧ Il a longtemps été interprété – par les observateurs – comme un effet Doppler et exprimé en km/s ($V \sim cz$)

La cosmologie au temps d'Einstein (4)

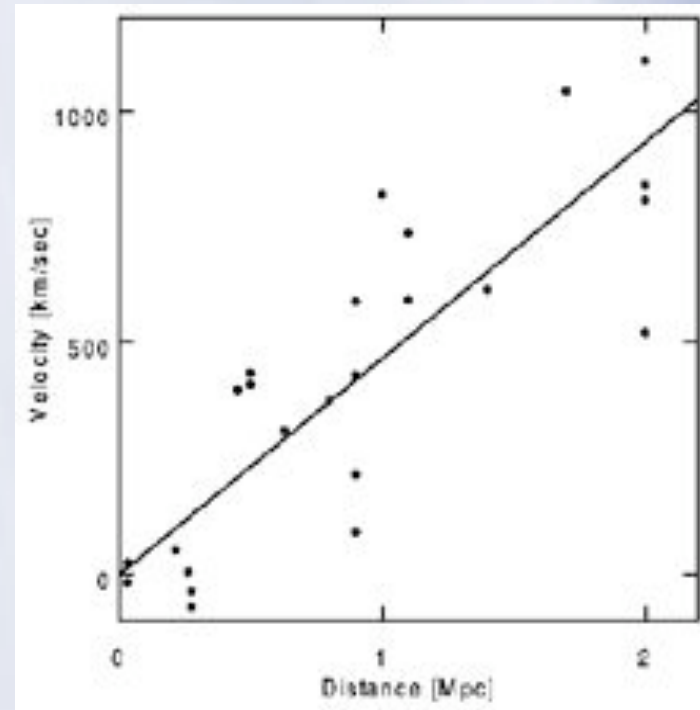
- ✧ Les données de Slipher montraient que les «nébuleuses » les moins lumineuses avaient les décalages les plus grands
- ✧ La mesure par Hubble des distances galactiques permet de quantifier cette relation

- ✧ Le décalage « vers le rouge » z d'une galaxie est proportionnel à sa distance D :

$$z \sim H D / c$$

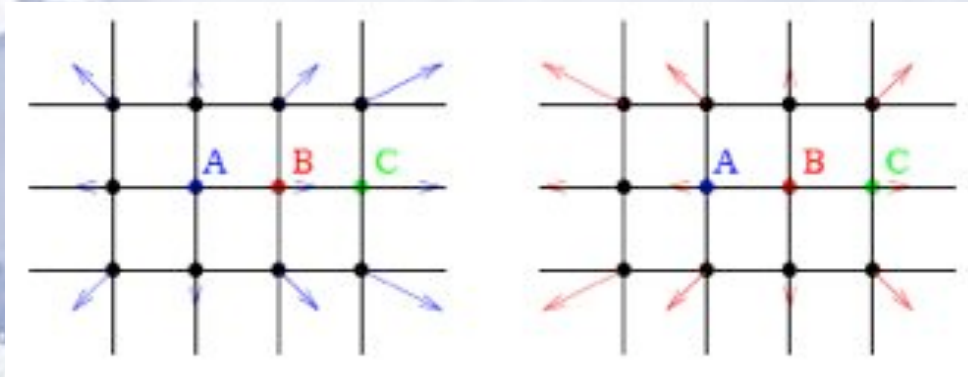
La constante H porte le nom de Hubble

- ✧ Etablir cette relation n'est pas simple
 - ✧ Le mouvement propre des galaxies (de 100 à 500 km/s) ajoute une contribution Doppler
 - ✧ Mesurer la distance d'une galaxie est difficile : la valeur de H estimée par Hubble était trop grande d'un facteur 7



Interprétations

- ✧ Les galaxies s'écartent les unes des autres dans un espace-temps statique



- ✧ Un phénomène physique diminue l'énergie de la lumière le long du parcours (« lumière fatiguée »)
- ✧ L'univers était plus petit au moment de l'émission de la lumière

Alexandre Alexandrovitch Friedmann

- ✧ Friedmann, mathématicien et météorologue, publie en 1922 un article dans lequel il généralise les modèles d'Einstein et de de Sitter, **sans faire l'hypothèse que l'univers soit statique.**



- ✧ Il obtient ainsi tout un éventail de solutions dans lesquelles la courbure spatiale augmente au cours du temps, diminue, ou oscille, selon la valeur de la **constante cosmologique.**
- ✧ Il retrouve les solutions d'Einstein et de de Sitter comme des cas particuliers.
- ✧ Il remarque qu'il existe des solutions où la dimension de l'univers s'annule à certains moments (*singularité*).
- ✧ En 1924, il étend son travail aux univers de courbure négative ou nulle. **Il meurt en 1925.**

- ✧ *Einstein commence par juger que l'article de 1922 est faux, avant de se rétracter, mais de le déclarer alors sans intérêt. Les travaux de Friedmann ne seront appréciés qu'après sa mort.*

Georges Lemaître

- ✧ Lemaître reçoit une solide formation d'astronome théoricien avec Eddington, puis rencontre Shapley, Slipher et Hubble lors de séjours aux USA en 1925 et 1927 : il connaît *et* le modèle de de Sitter *et* les plus récentes observations



- ✧ Lemaître ignore les travaux de Friedmann, mais lui aussi veut unifier le modèle d'Einstein (parce qu'il contient de la matière) et celui de de Sitter (parce qu'il prévoit un décalage vers le rouge proportionnel à la distance)
- ✧ Il redécouvre toutes les solutions possibles
 - ✧ avec et sans constante cosmologique
 - ✧ avec et sans matière
 - ✧ avec et sans rayonnement.
- ✧ Il calcule dès 1927 la valeur de la constante ***H*** et obtient la même valeur que Hubble en 1929.

- ✧ Il publie la solution générale en 1927 dans *les Annales de la Société scientifique de Bruxelles* et elle passe totalement inaperçue. Eddington la découvrira en 1930.

Lemaître & Einstein



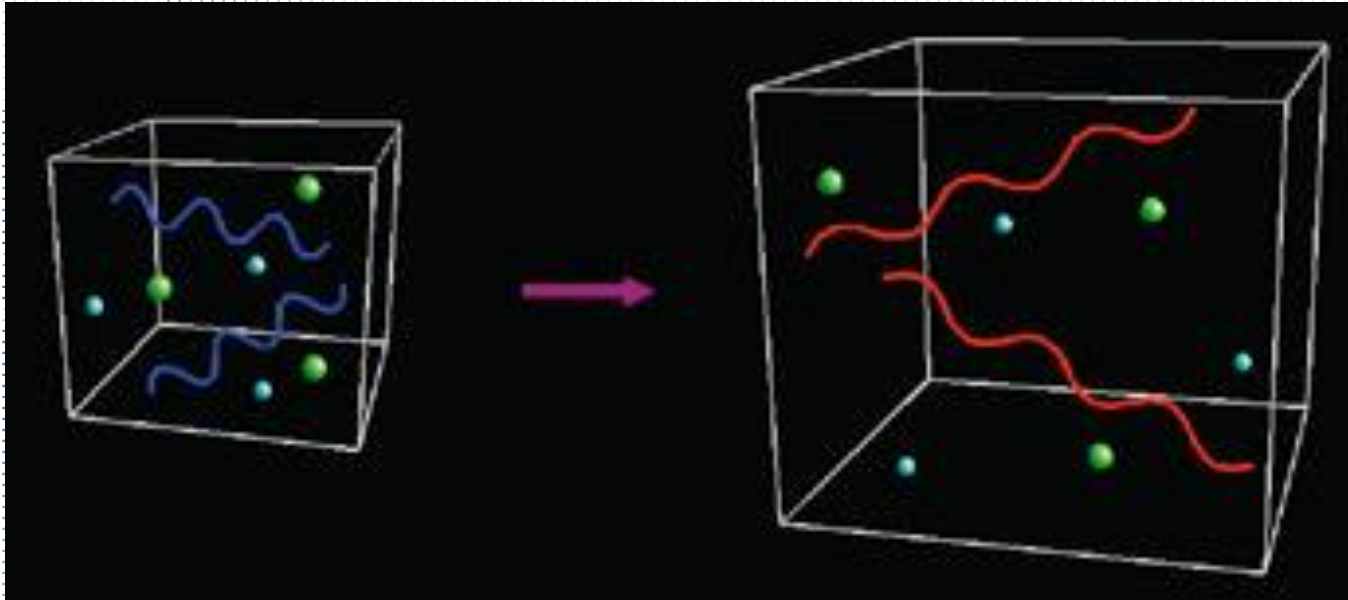
✧ « Vos calculs sont justes, mais votre sens physique est abominable! » (Einstein à Lemaître)

L'atome primordial

- ✧ Mais Lemaître ne s'arrête pas là
- ✧ Les années 1925-1930 voient le développement de la théorie quantique, les débuts de la physique nucléaire
- ✧ Lemaître a compris que l'expansion de l'univers implique qu'il ait été plus petit et plus dense dans le passé
- ✧ Il imagine donc que tout l'univers visible a été contenu dans un volume plus petit qu'un atome
- ✧ La physique quantique doit donc s'appliquer, et expliquer l'*origine* de l'expansion
- ✧ mais Lemaître ne peut que rester qualitatif dans son image d'un **atome primordial** à l'origine de l'univers
- ✧ *Le terme de **big bang** ne sera inventé que 20 ans plus tard par Fred Hoyle*

Le big bang

- ✧ L'expansion de l'univers dilue son contenu matériel et augmente la longueur d'onde du rayonnement (décalage vers le rouge)



- ✧ Dans le passé, l'univers était plus dense et plus chaud : **big bang** il y a 14 milliards d'années

La théorie du big bang

L'univers est identique en tout point de l'espace

La gravitation est la force dominante

Univers en expansion se refroidissant

Décalages vers le rouge

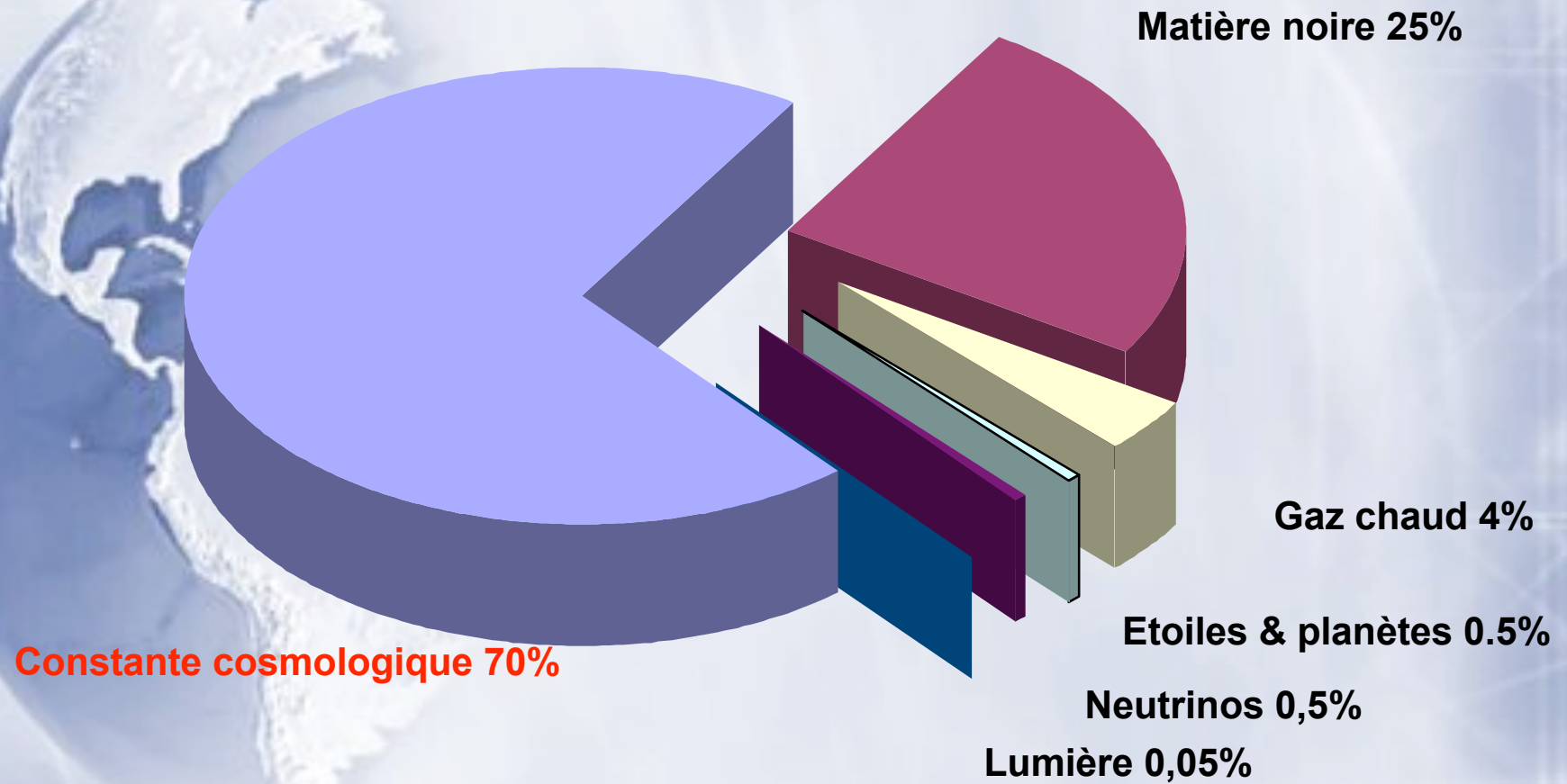
Abondance des éléments légers

Fond de rayonnement millimétrique (CMB)

Mais que faisait donc Einstein?

- ✧ En 1930
 - ✧ Les théoriciens se rallient au modèle de Friedmann-Lemaître et à l'idée d'un univers en expansion [Hubble, lui, reste sceptique]
 - ✧ Mais, comme l'avait écrit Friedmann en 1922, la **constante cosmologique** est alors une hypothèse superflue
 - ✧ **Einstein en parle comme de la plus grande erreur de sa vie: s'il n'avait pas voulu à tout prix obtenir un univers statique, il aurait fait ce qu'ont fait Friedmann et Lemaître : prédire l'expansion de l'univers**
- ✧ En 1931, les deux anciens, Einstein et de Sitter, décrivent dans un très bref article un modèle de Friedmann-Lemaître ultra-simplifié, sans constante cosmologique et sans courbure de l'espace
 - ✧ Il est compatible avec les observations de l'époque
 - ✧ Leur prestige est tel que cette version minimaliste passera pour LA théorie du big bang
- ✧ Lemaître pourtant ne cessera pas d'insister – contre l'avis d'Einstein – sur la nécessité, théorique et observationnelle, d'une **constante cosmologique**

Aujourd'hui...



Merci de votre attention

et de votre patience !

