

Cosmologie Moderne

Cours 17-18



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



Multivers



Le(s) multivers

- Disclaimer

- ★ La communauté regarde cela avec beaucoup de prudence
- ★ Je ne suis pas un expert
- ★ Je ne suis pas particulièrement convaincu
- ★ Je vais essentiellement suivre le raisonnement de Tegmark (qui semble convaincu)
 - <http://arxiv.org/pdf/0905.2182v2.pdf>



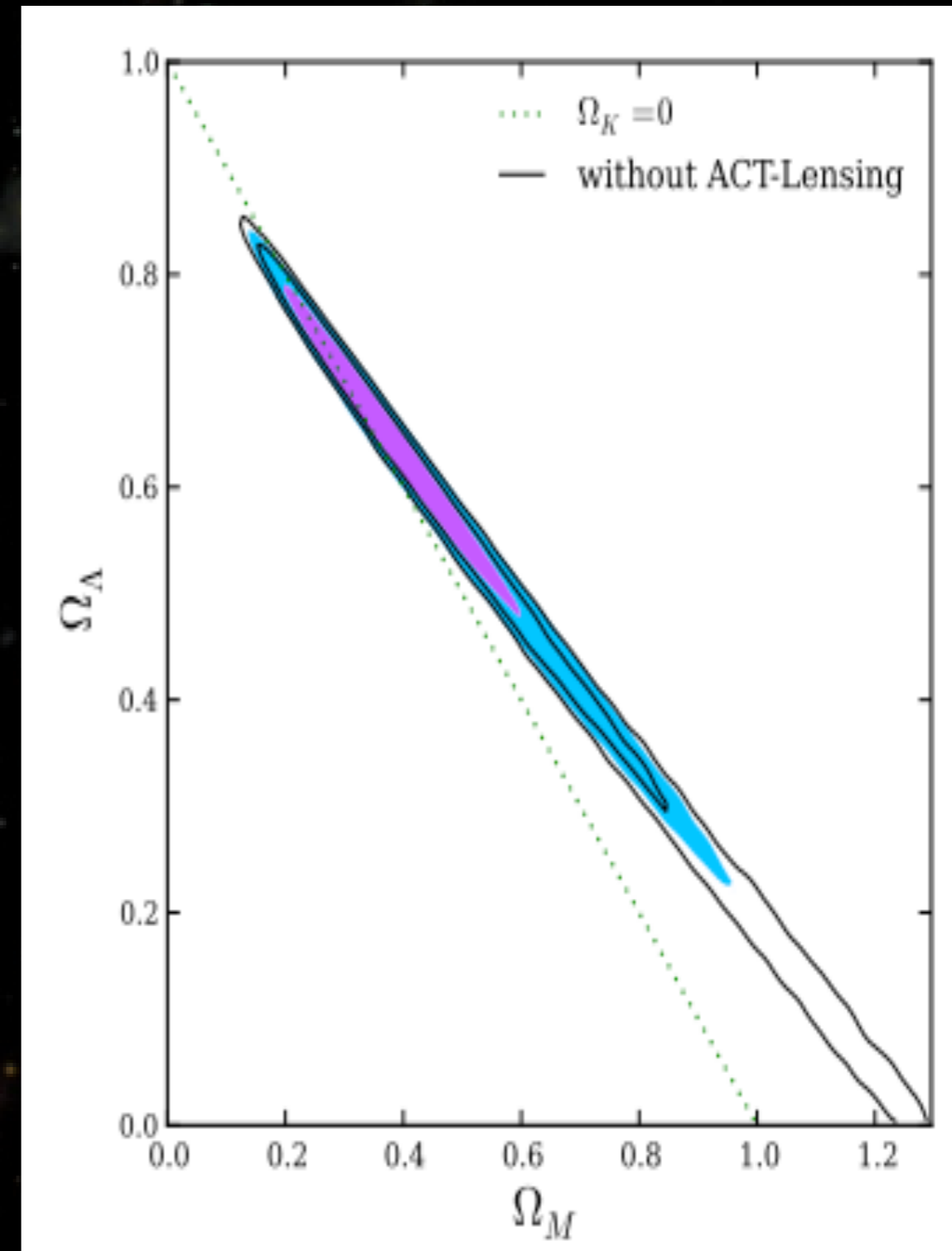
Univers fini ou infini ?

- Courbure ~ 0

- ★ CMB avec lensing
- ★ CMB + H0
- ★ SNIa + BAO + CMB

- Possibilités:

- ★ Courbure légèrement positive
 - Fermé, pas de problème particulier
- ★ Courbure légèrement négative ou nulle
 - soit l'Univers est infini
 - soit il est multiplement connexe et dans ce cas peut être fini



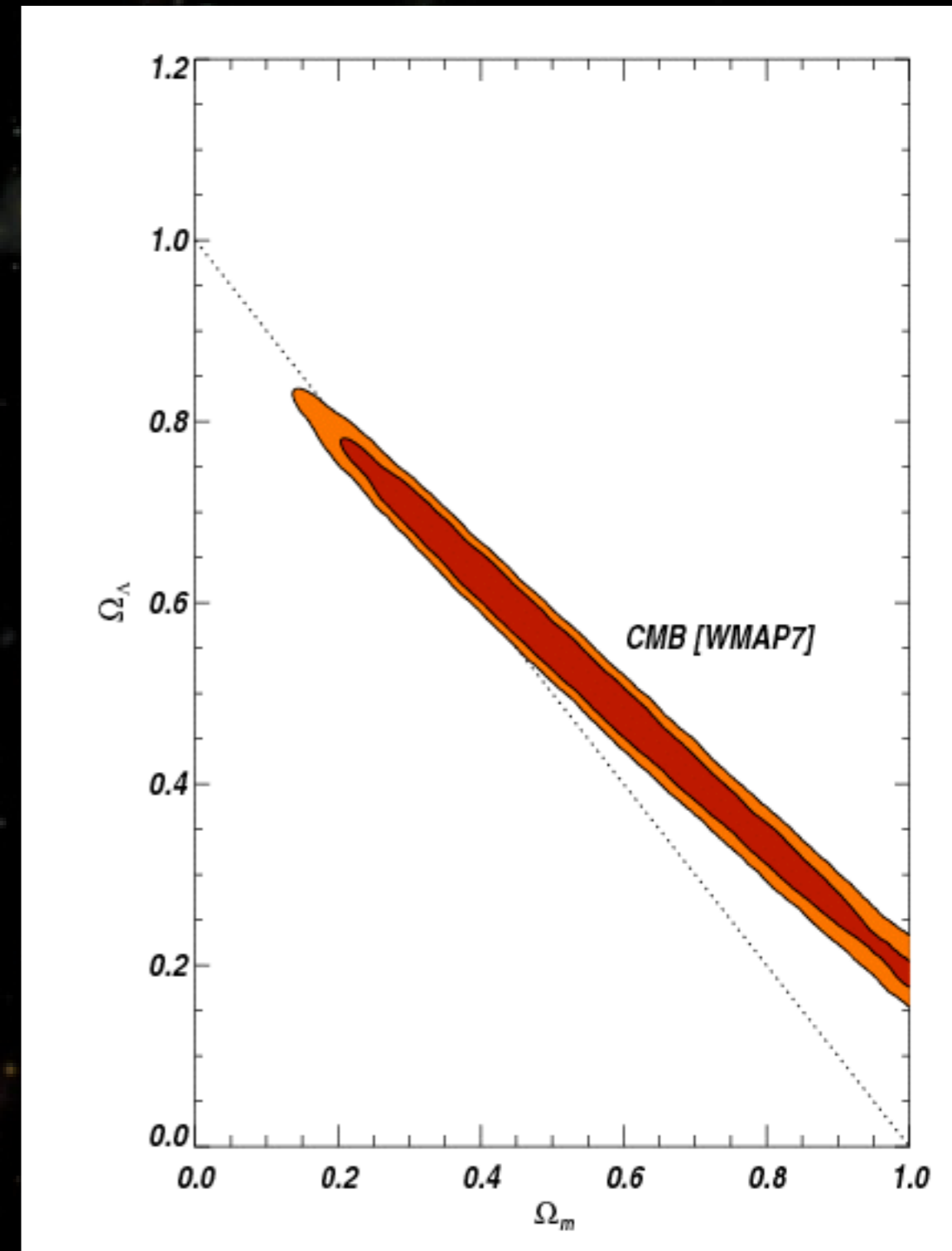
Univers fini ou infini ?

- Courbure ~ 0

- ★ CMB avec lensing
- ★ CMB + H0
- ★ SNIa + BAO + CMB

- Possibilités:

- ★ Courbure légèrement positive
 - Fermé, pas de problème particulier
- ★ Courbure légèrement négative ou nulle
 - soit l'Univers est infini
 - soit il est multiplement connexe et dans ce cas peut être fini



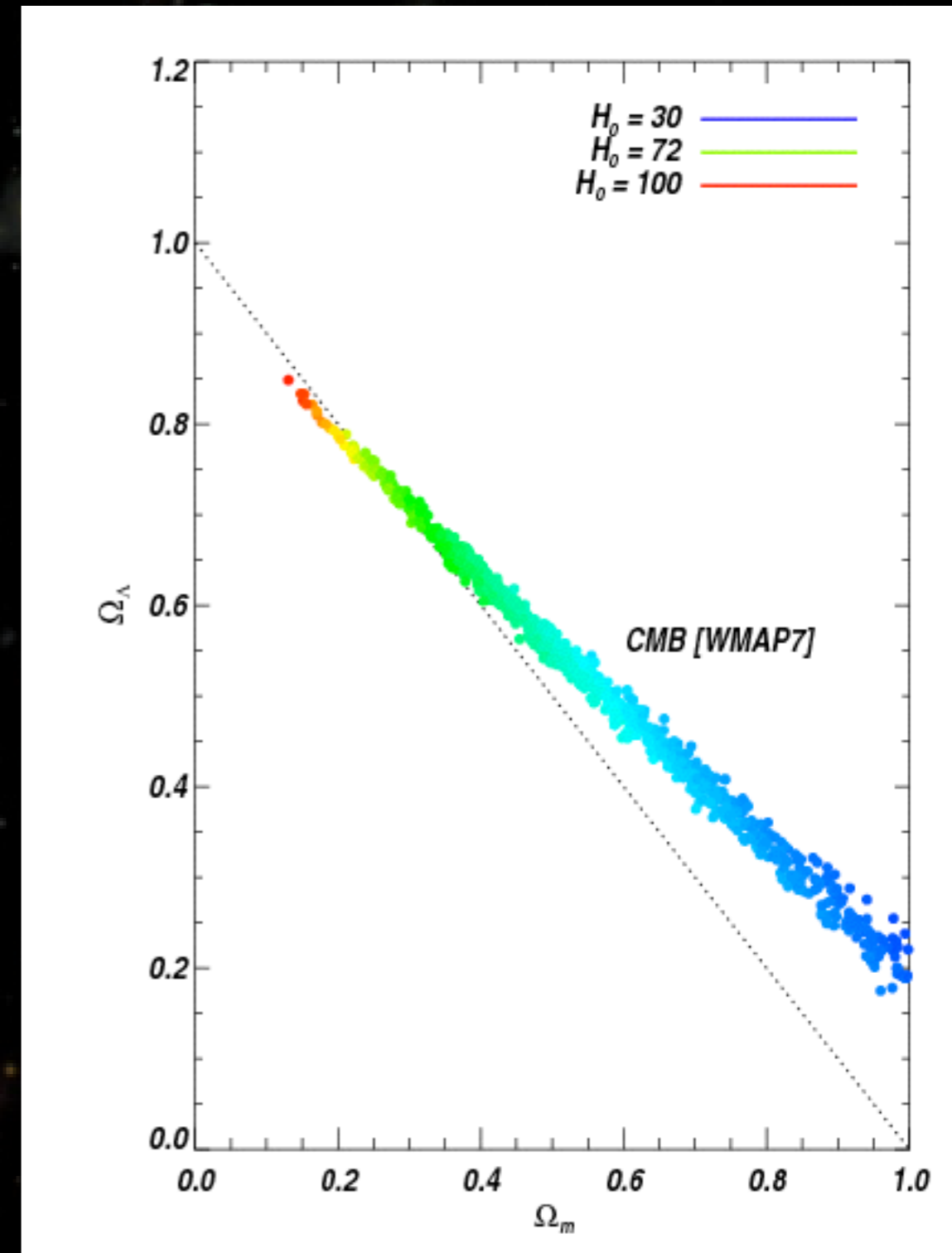
Univers fini ou infini ?

- Courbure ~ 0

- ★ CMB avec lensing
- ★ CMB + H0
- ★ SNIa + BAO + CMB

- Possibilités:

- ★ Courbure légèrement positive
 - Fermé, pas de problème particulier
- ★ Courbure légèrement négative ou nulle
 - soit l'Univers est infini
 - soit il est multiplement connexe et dans ce cas peut être fini



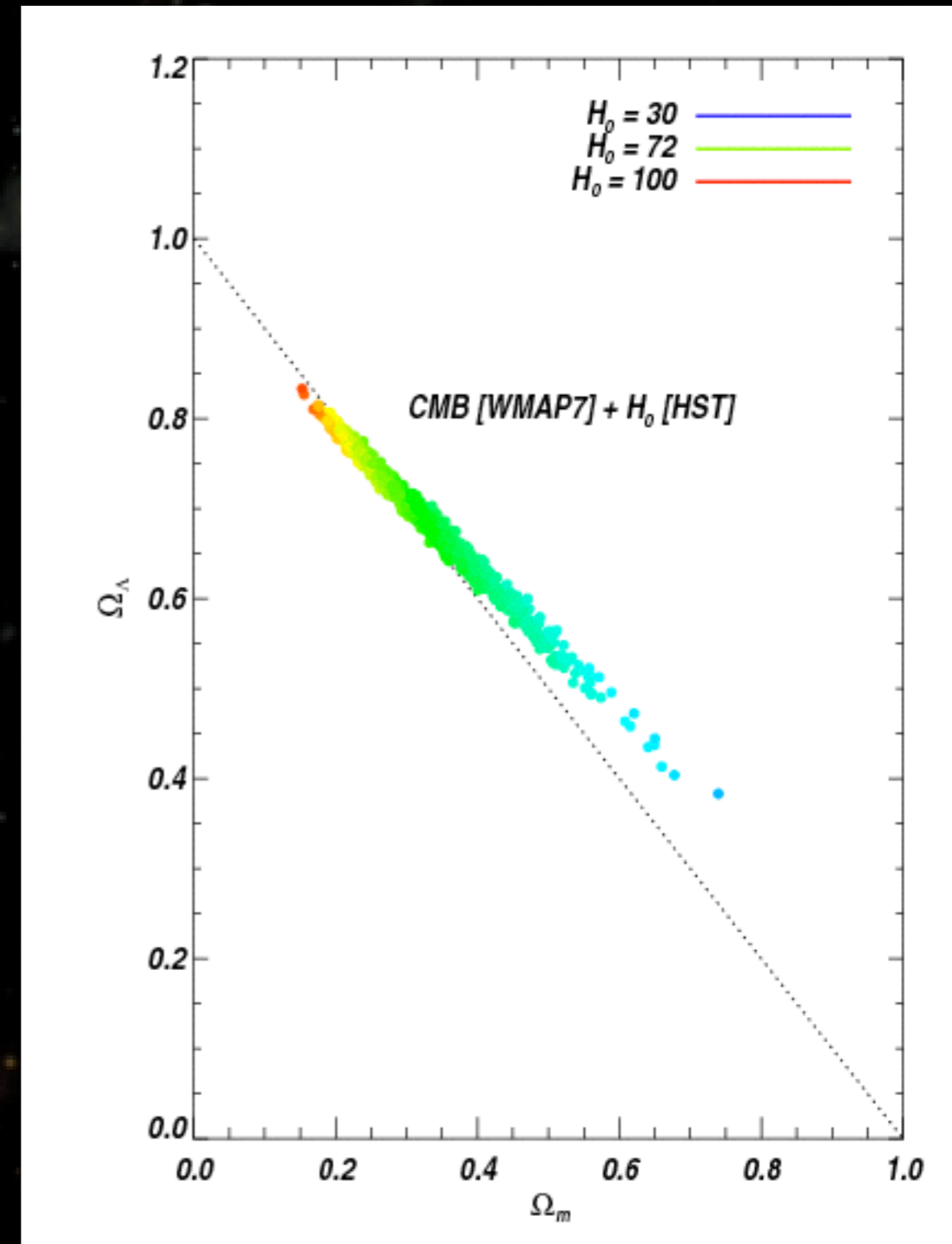
Univers fini ou infini ?

- Courbure ~ 0

- ★ CMB avec lensing
- ★ CMB + H_0
- ★ SNIa + BAO + CMB

- Possibilités:

- ★ Courbure légèrement positive
 - Fermé, pas de problème particulier
- ★ Courbure légèrement négative ou nulle
 - soit l'Univers est infini
 - soit il est multiplement connexe et dans ce cas peut être fini



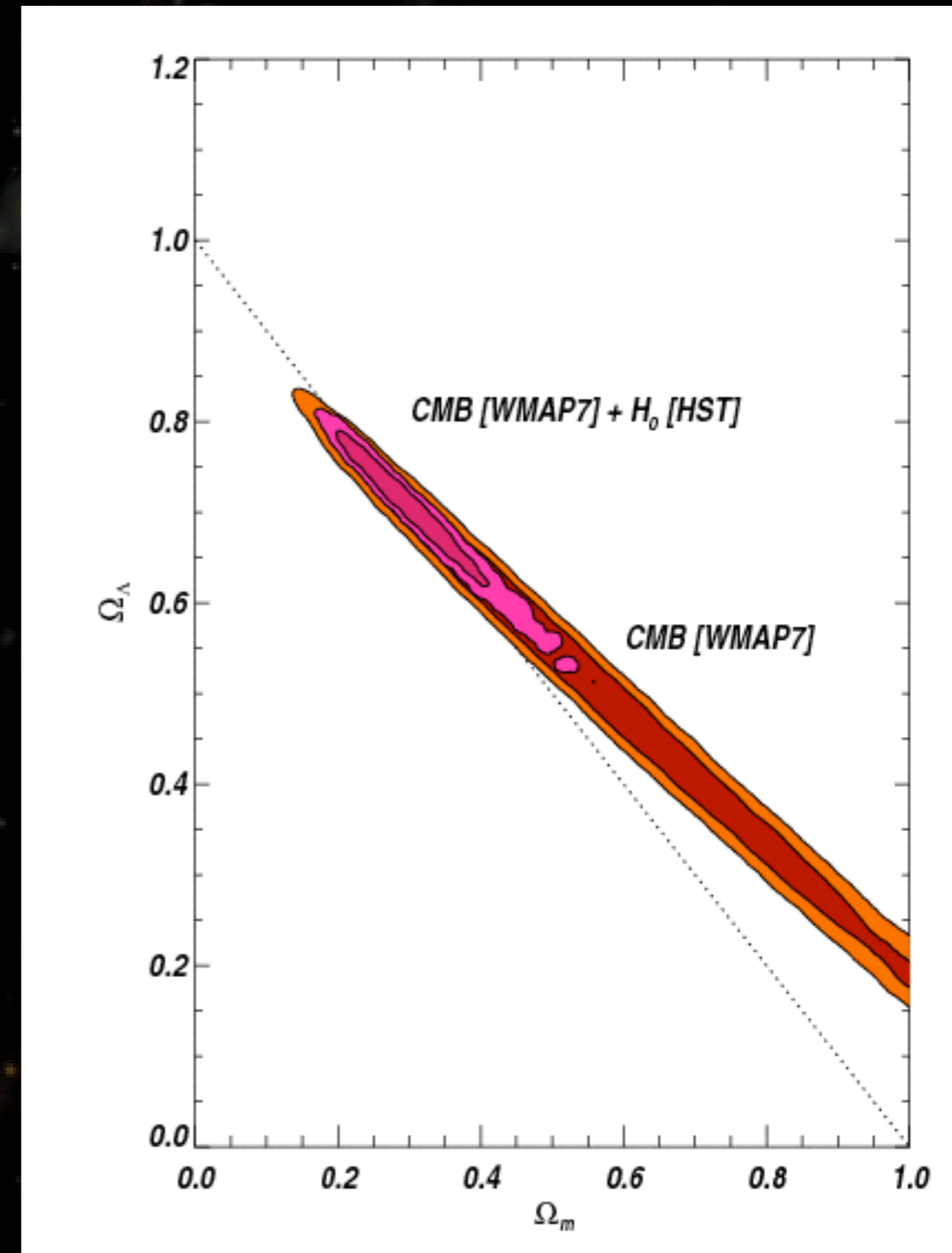
Univers fini ou infini ?

- Courbure ~ 0

- ★ CMB avec lensing
- ★ CMB + H_0
- ★ SNIa + BAO + CMB

- Possibilités:

- ★ Courbure légèrement positive
 - Fermé, pas de problème particulier
- ★ Courbure légèrement négative ou nulle
 - soit l'Univers est infini
 - soit il est multiplement connexe et dans ce cas peut être fini



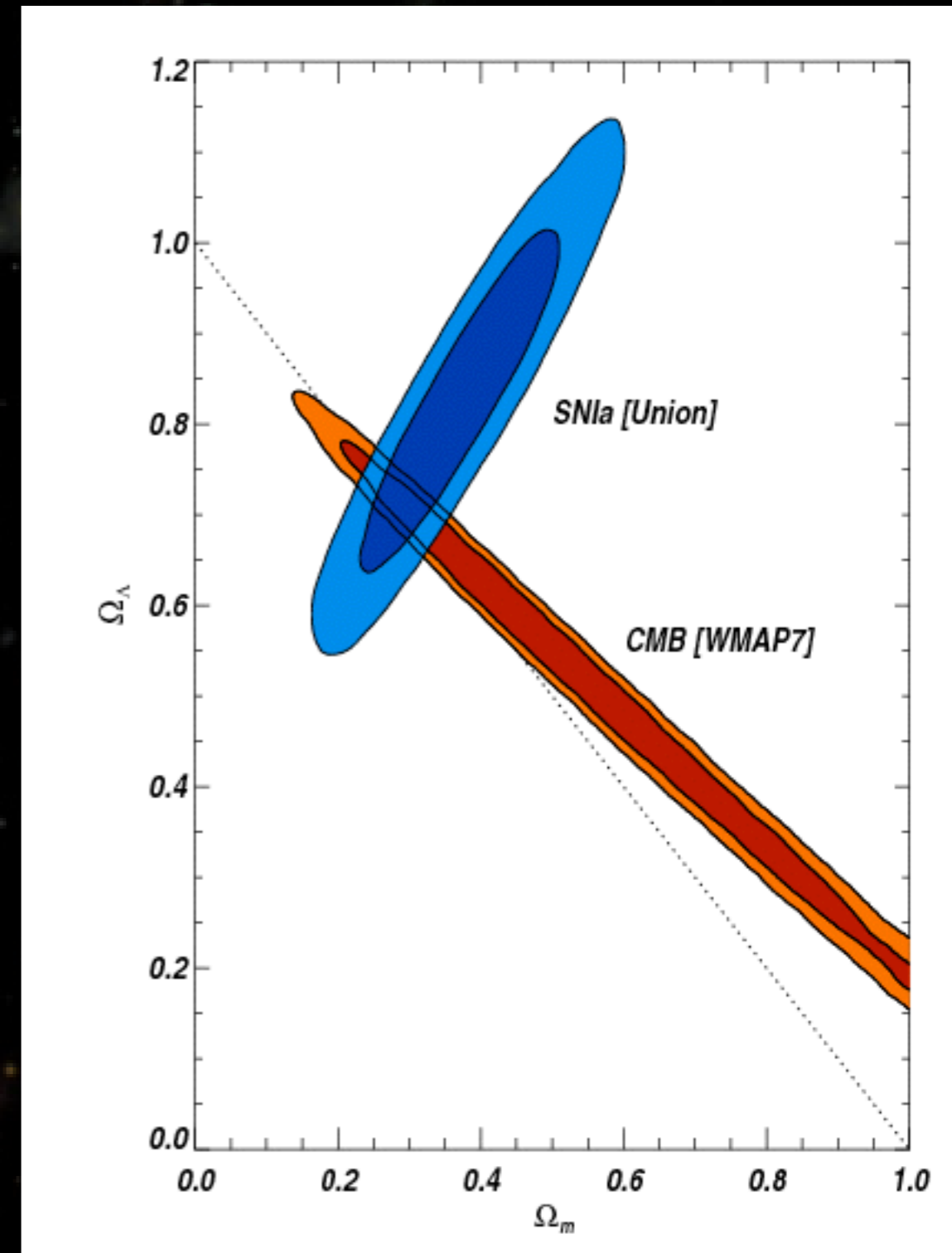
Univers fini ou infini ?

- Courbure ~ 0

- ★ CMB avec lensing
- ★ CMB + H0
- ★ SNIa + BAO + CMB

- Possibilités:

- ★ Courbure légèrement positive
 - Fermé, pas de problème particulier
- ★ Courbure légèrement négative ou nulle
 - soit l'Univers est infini
 - soit il est multiplement connexe et dans ce cas peut être fini



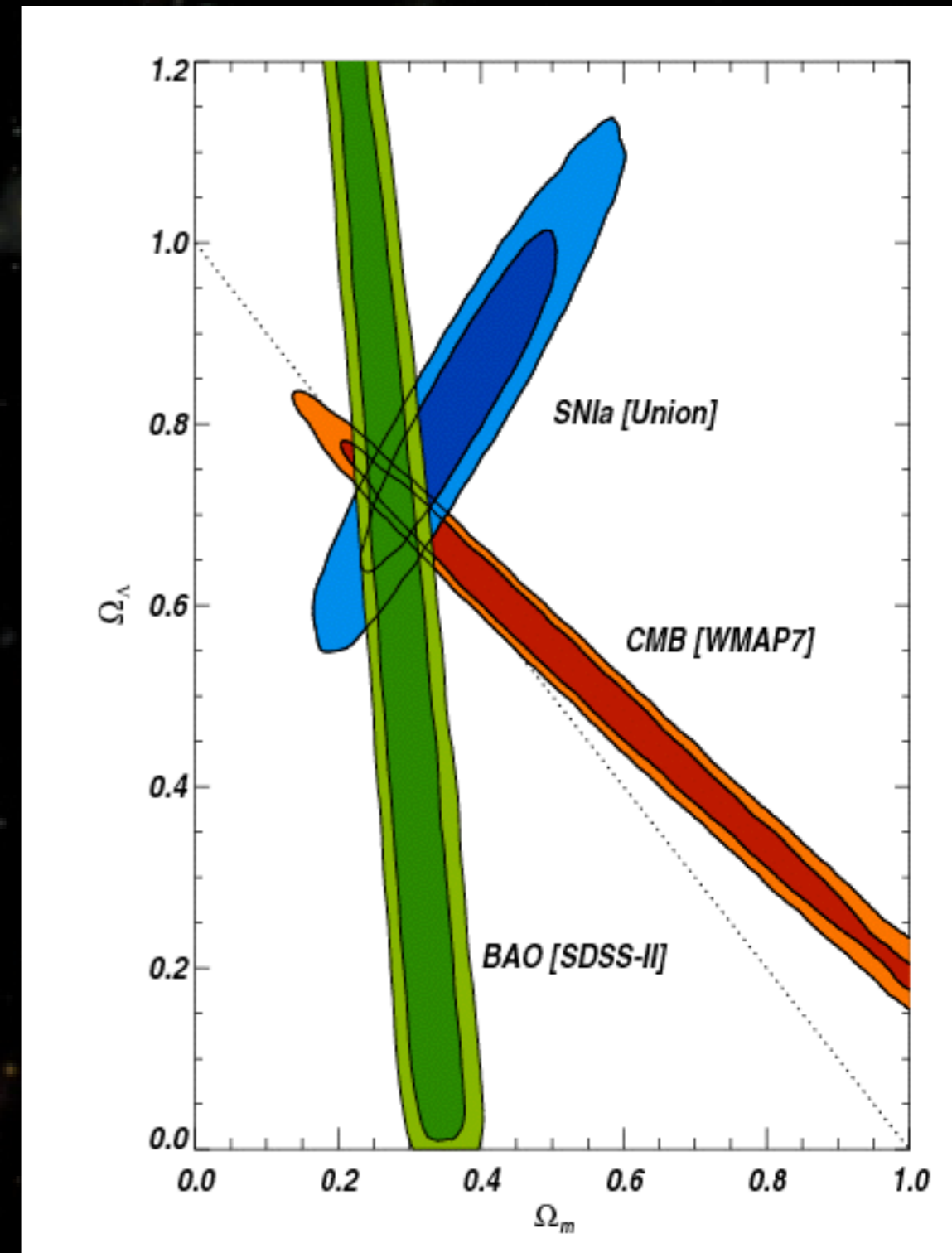
Univers fini ou infini ?

- Courbure ~ 0

- ★ CMB avec lensing
- ★ CMB + H0
- ★ SNIa + BAO + CMB

- Possibilités:

- ★ Courbure légèrement positive
 - Fermé, pas de problème particulier
- ★ Courbure légèrement négative ou nulle
 - soit l'Univers est infini
 - soit il est multiplement connexe et dans ce cas peut être fini



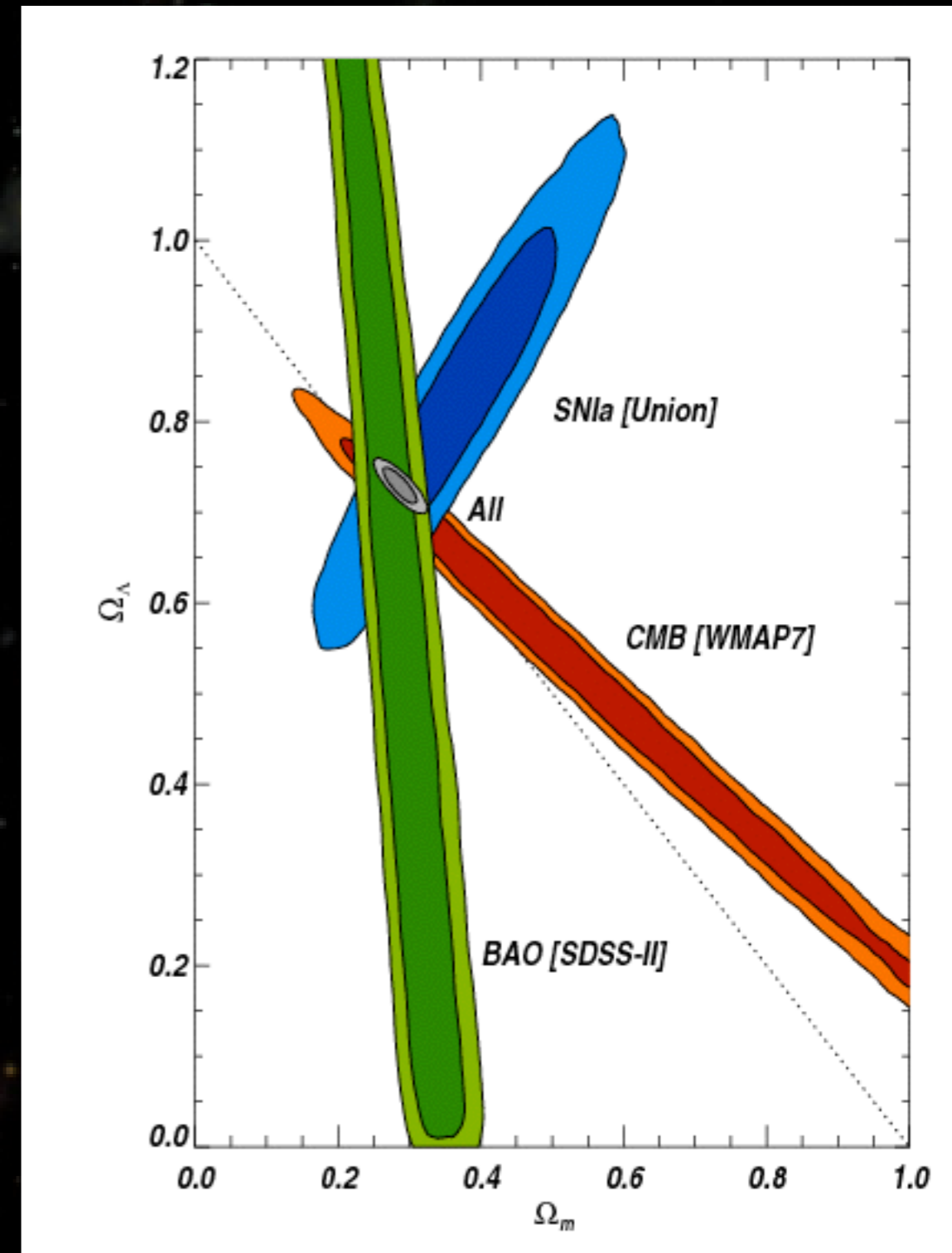
Univers fini ou infini ?

- Courbure ~ 0

- ★ CMB avec lensing
- ★ CMB + H0
- ★ SNIa + BAO + CMB

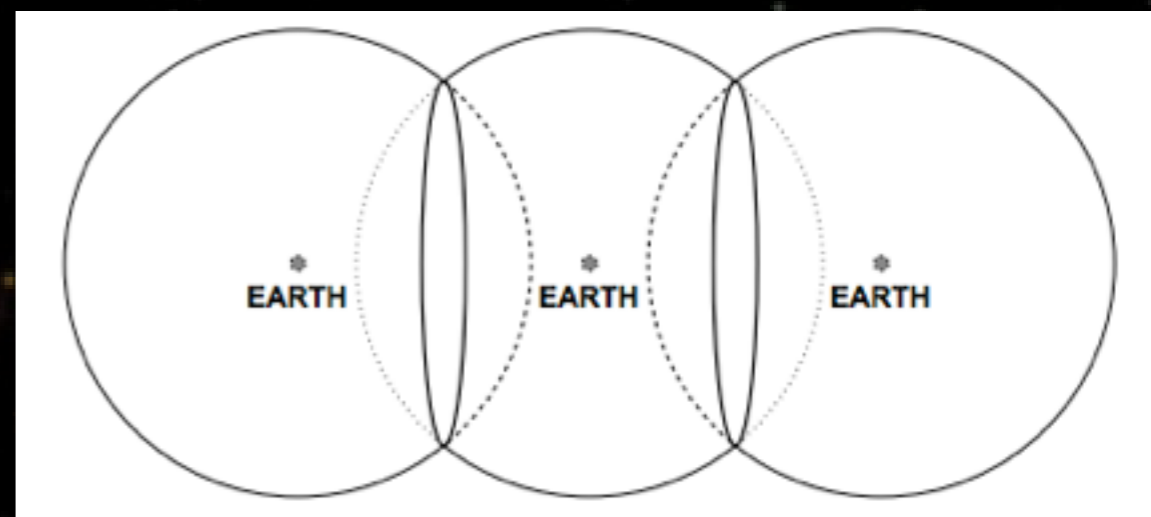
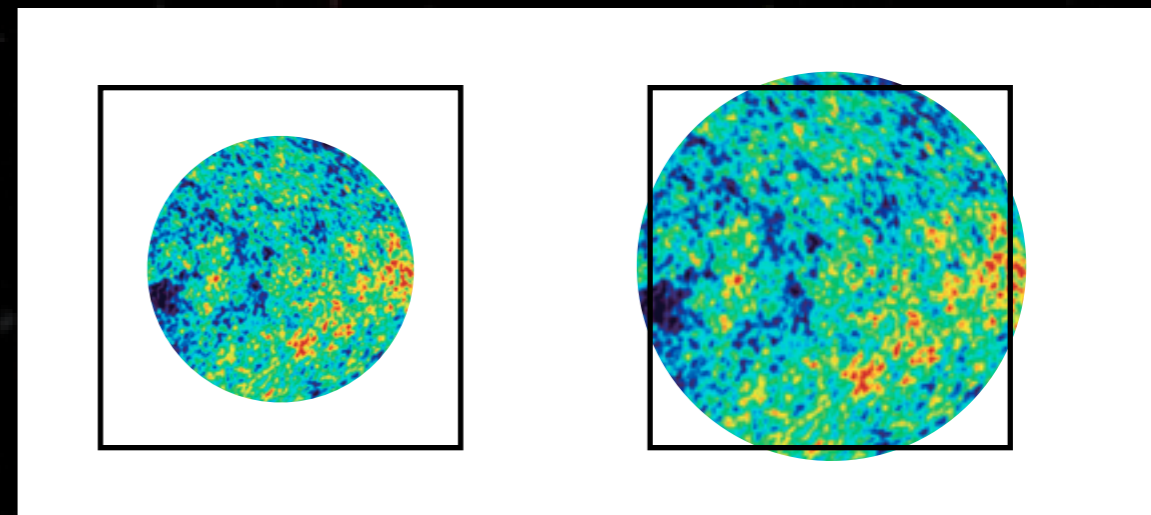
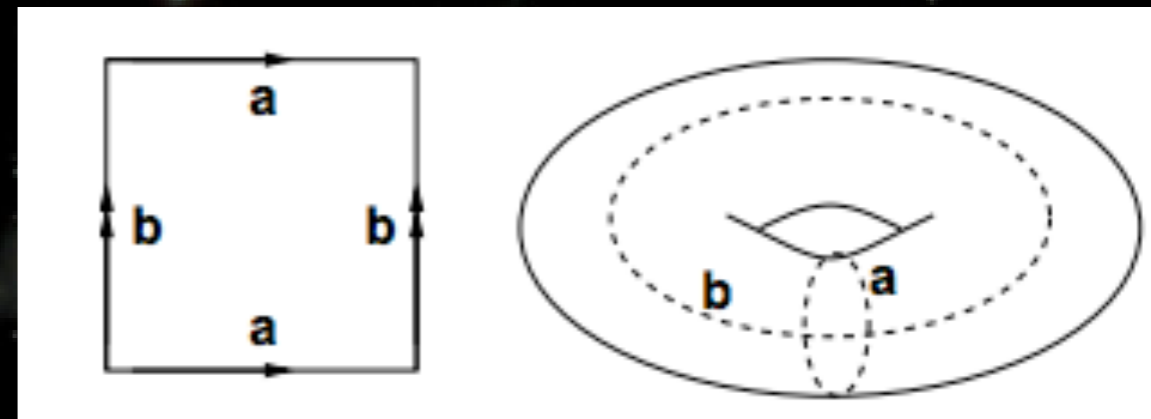
- Possibilités:

- ★ Courbure légèrement positive
 - Fermé, pas de problème particulier
- ★ Courbure légèrement négative ou nulle
 - soit l'Univers est infini
 - soit il est multiplement connexe et dans ce cas peut être fini



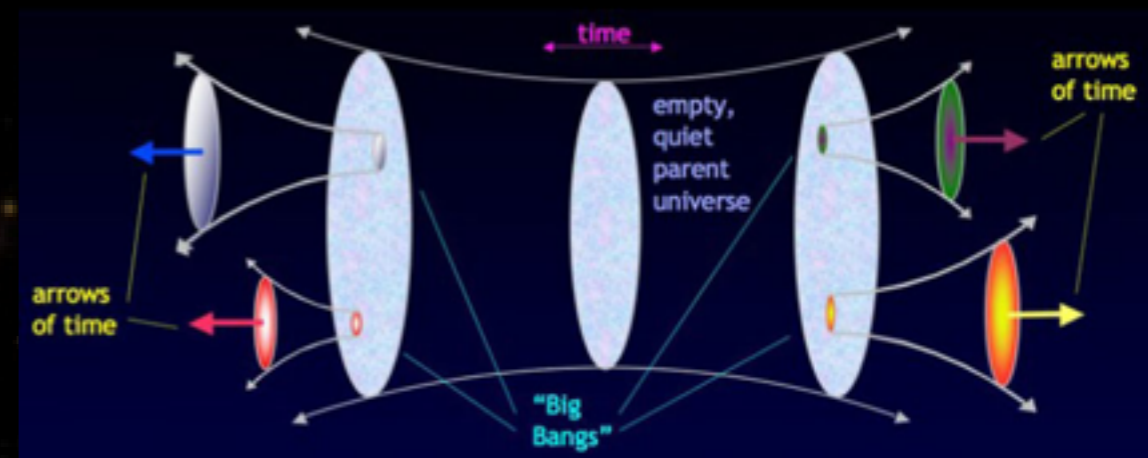
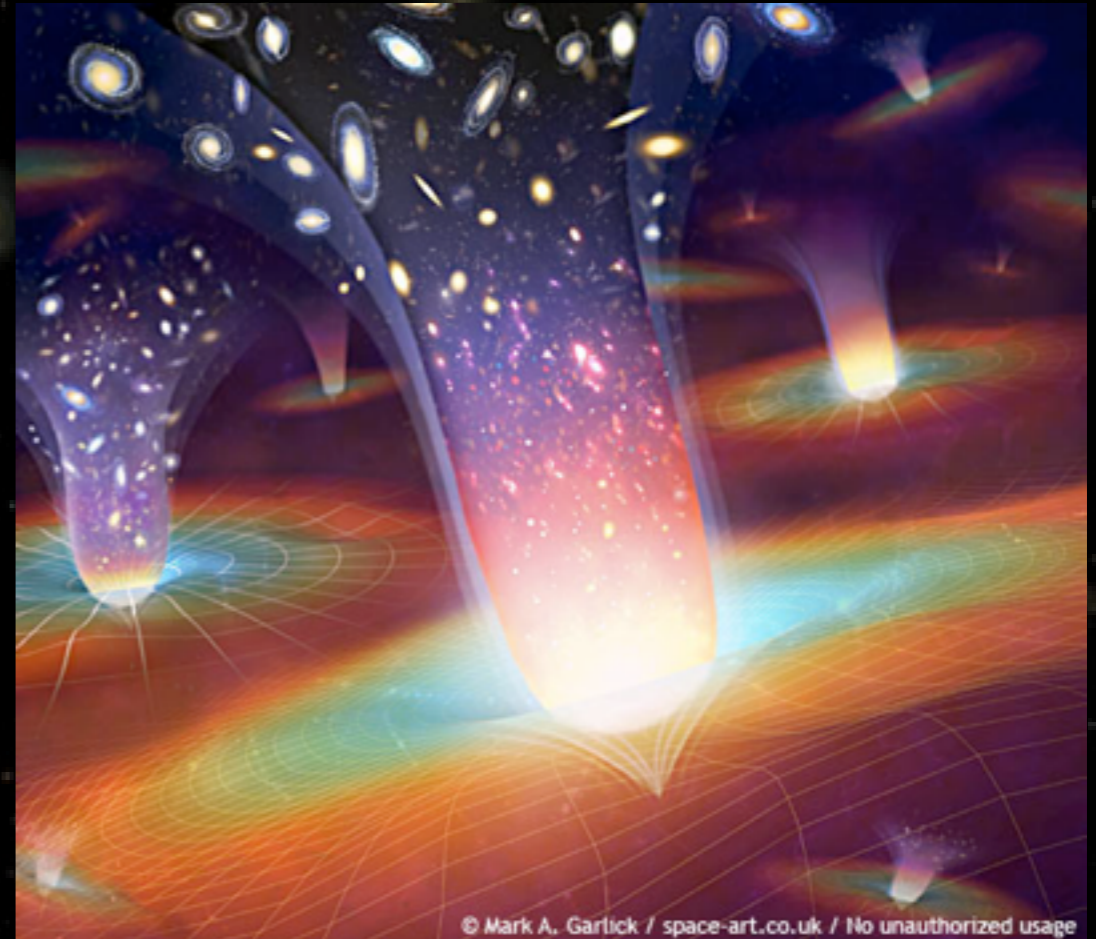
Topologie de l'Univers

- **Univers torique:**
 - ★ courbure nulle et volume fini
 - ★ la RG ne dit rien sur la topologie, elle ne parle que de métrique (locale)
- **Réplication à l'infini**
 - ★ Si la sphère du CMB est plus petite:
 - inobservable
 - ★ Si elle est plus grande
 - On devrait y observer des cercles identiques
- **Aucune indication observationnelle convaincante**



Inflation ?

- de nombreuses indications
 - ★ Platitude
 - ★ Horizon
 - ★ Pas de défauts topologiques
 - ★ Indice spectral légèrement < 1
 - ★ Fluctuations adiabatiques
 - ★ Gaussianité
 - ★ Modes tenseurs (BICEP2... à vérifier)
- Autres «bulles d'inflation» ?



Finalelement

- On ne peut pas exclure que le volume de l'Univers soit fini
 - ★ Soit simplement connexe et légèrement fermé
 - ★ Soit multiplement connexe avec une cellule de base plus grande que la distance au CMB
- On ne peut pas non plus exclure que l'Univers soit infini
 - ★ De nombreuses questions se posent alors
 - ★ Maths: si on fait une infinité de tirages, alors tout événement ayant une probabilité non nulle va être tiré un nombre infini de fois
 - Que se passe-t-il au delà de l'horizon ?
 - Sommes nous répliqués à l'infini ?
 - Que se passe-t-il dans les autres «bulles inflationnaires» ?
 - Quid des Univers parallèles de la mécanique quantique ?
 - ...



Multivers

- L'idée des «autres mondes» a plusieurs motivations

- ★ Cosmologie:

- Univers infini ?
- Inflation ?

- ★ Supercordes:

- landscape

- ★ Mécanique Quantique:

- approche «Many worlds» de Everett

- Tegmark a proposé une description de ces multivers

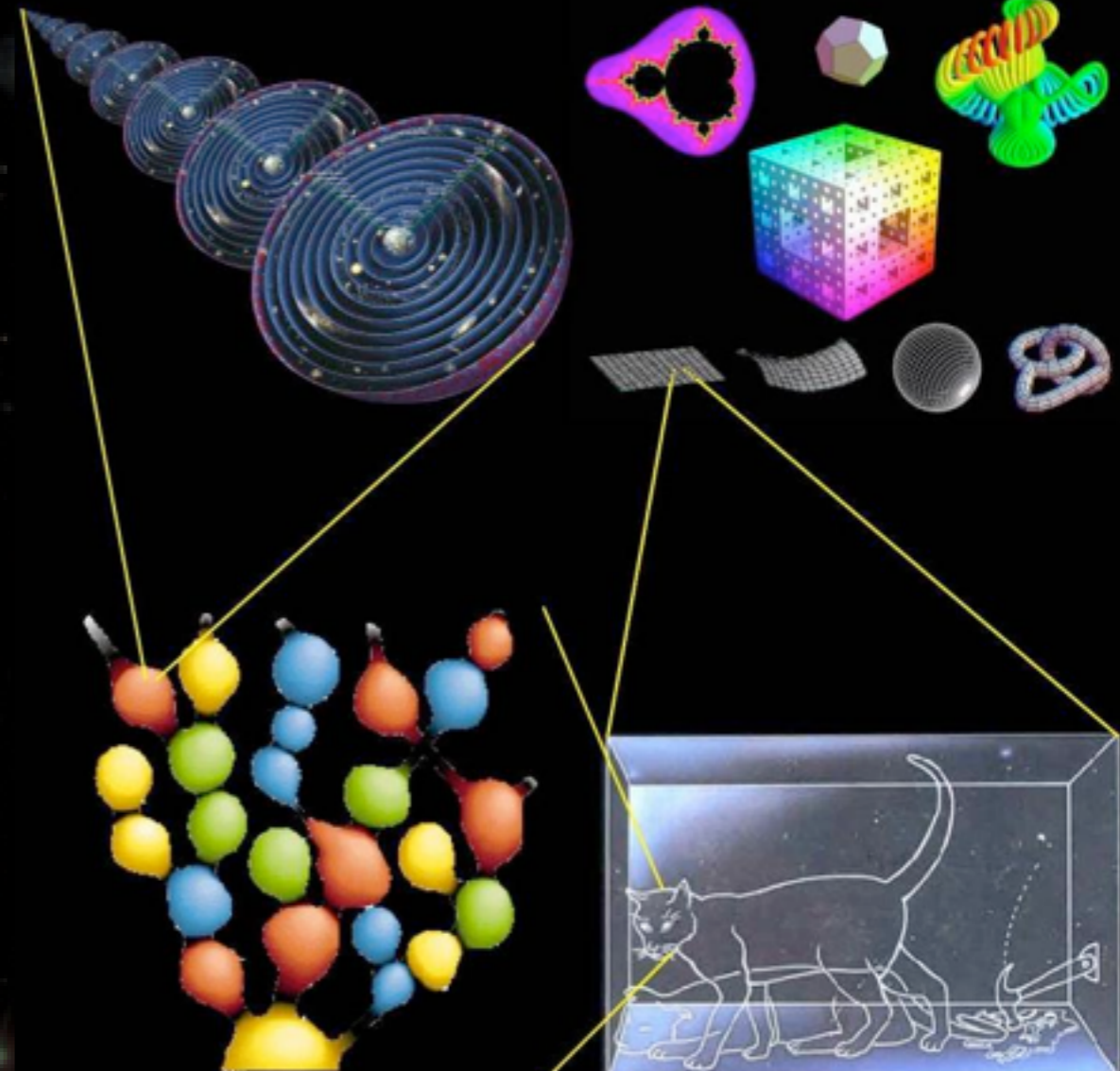
- ★ <http://arxiv.org/pdf/0905.2182v2.pdf>

- Attention:

- ★ Tout cela est TRÈS spéculatif
(euphémisme)

Level 1: Regions beyond our cosmic horizon
Features: Same laws of physics, different initial conditions
Assumptions: Infinite space, ergodic matter distribution
Evidence: - Microwave background measurements point to flat, infinite space, large-scale smoothness
- Simplest model

Level 4: Other mathematical structures
Features: Different fundamental equations of physics
Assumption: Mathematical existence = physical existence
Evidence: - Unreasonable effectiveness of math in physics
- Answers Wheeler/Hawking question: "why these equations, not others"



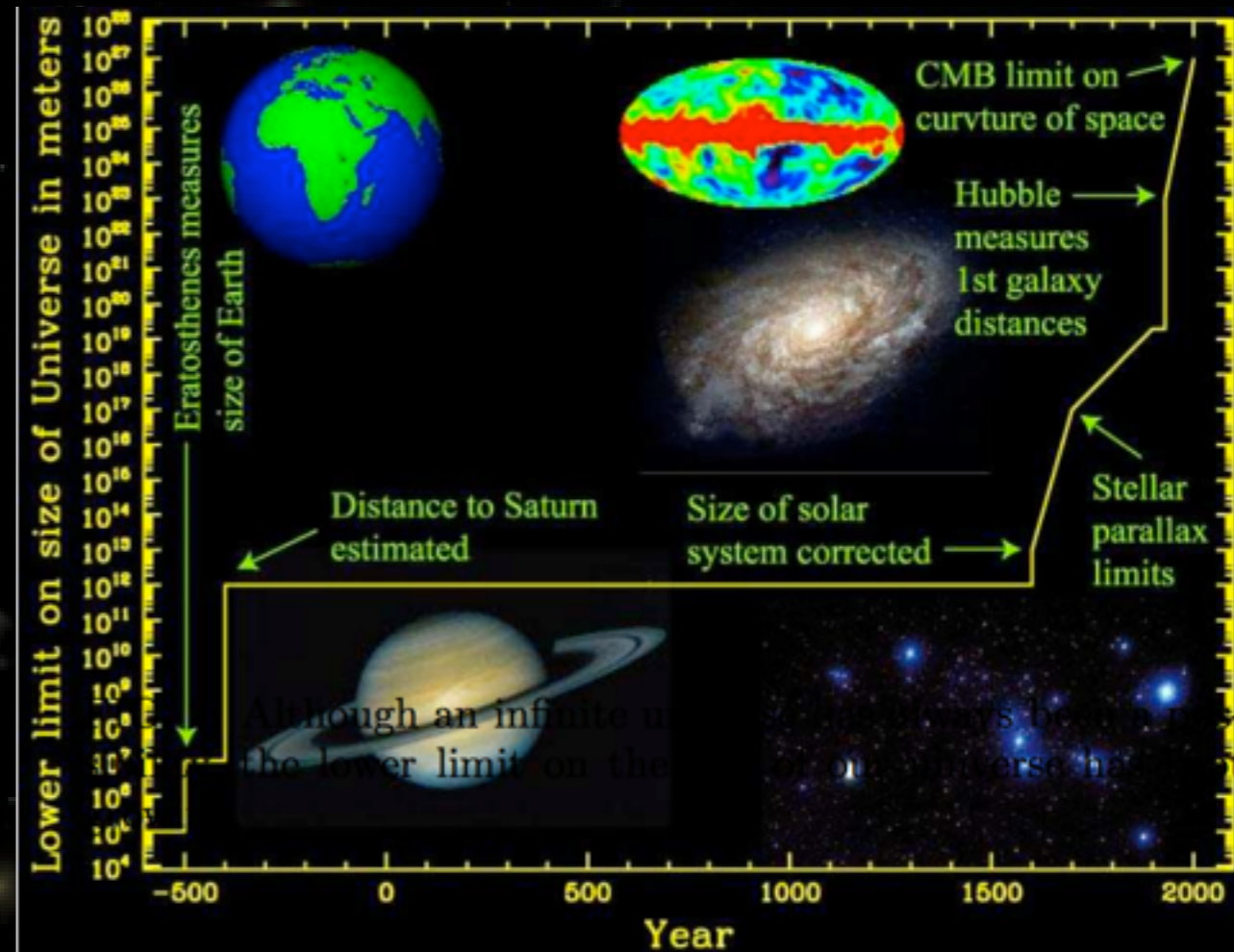
Level 2: Other post-inflation bubbles
Features: Same fundamental equations of physics, but perhaps different constants, particles and dimensionality
Assumption: Chaotic inflation occurred
Evidence: - Inflation theory explains flat space, scale-invariant fluctuations, solves horizon problem and monopole problems and can naturally explain such bubbles
- Explains fine-tuned parameters

Level 3: The Many Worlds of Quantum Physics
Features: Same as level 2
Assumption: Physics unitary
Evidence: - Experimental support for unitary physics
- AdS/CFT correspondence suggests that even quantum gravity is unitary
- Decoherence experimentally verified
- Mathematically simplest model



Niveau I

- Régions au delà de notre horizon
 - ★ C'est le cas de LCDM dans le cas où l'Univers serait infini et inflationnaire
 - ★ Toutes les conditions initiales possibles seraient réalisées
 - L'inflation prédit des conditions initiales ergodiques
 - Sampler des volumes différents de l'Univers revient à générer d'autres Univers
 - ★ Toutes les configurations arrivent (suffisamment loin)
 - copie de vous même à $\sim 10^{10^{29}}$ m
 - sphère identique de 100 a.l. à $\sim 10^{10^{91}}$ m
 - même volume de Hubble à $10^{10^{115}}$ m
 - ★ Tue un peu la notion de déterminisme...



Ce niveau est peu controversé mais pose des difficultés philosophiques



Problème avec le déterminisme

- Oublions l'indéterminisme Quantique
- Supposons que l'on connaisse l'état complet du multivers
 - ★ On peut écrire les équations décrivant notre futur
 - ★ Mais puisqu'on ne sait pas quelle copie est vraiment la notre...
 - ★ On ne peut décrire le futur que de manière probabiliste...
- Le déterminisme disparaît sans faire appel à l'aspect quantique.



Niveau II

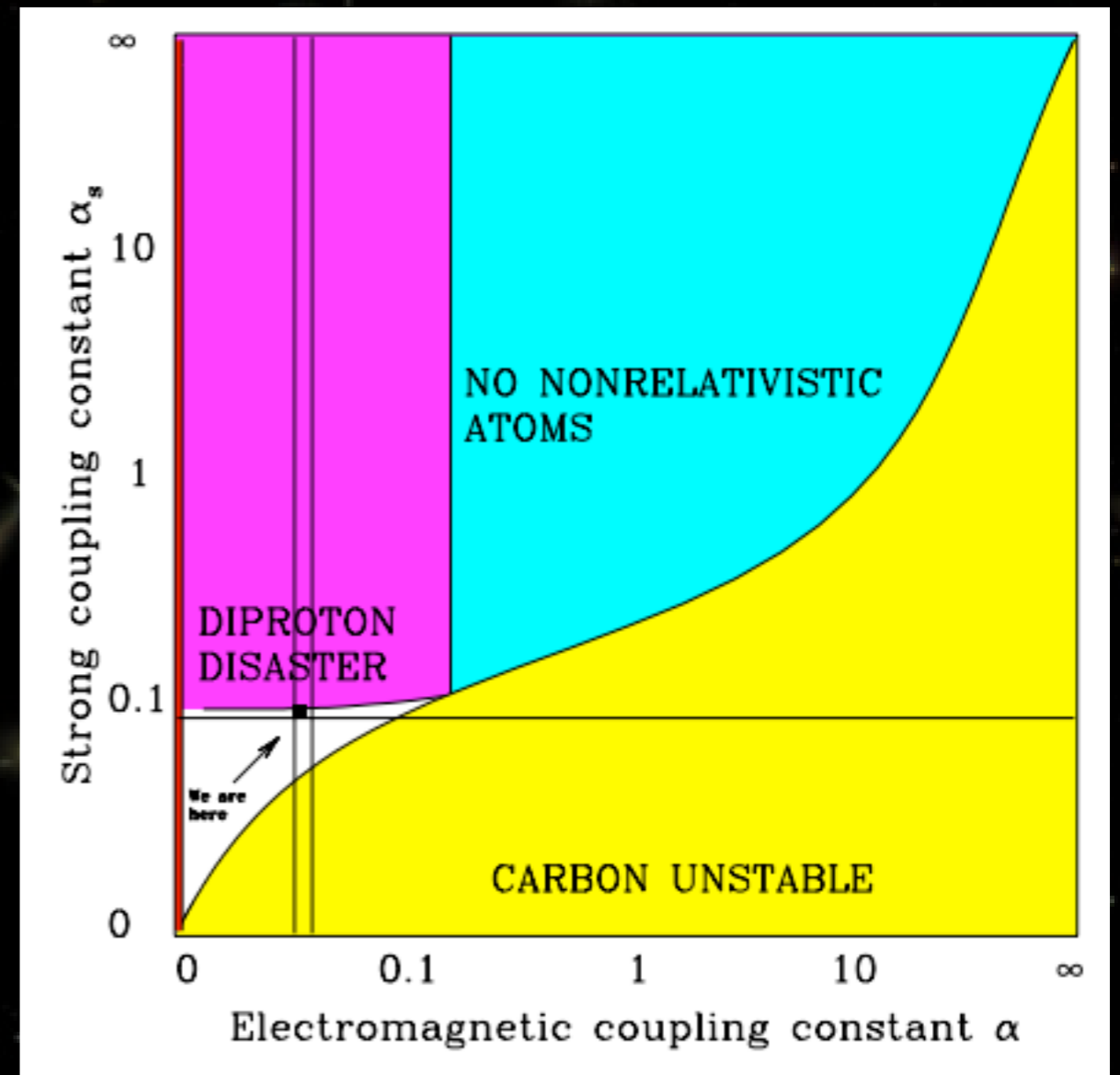
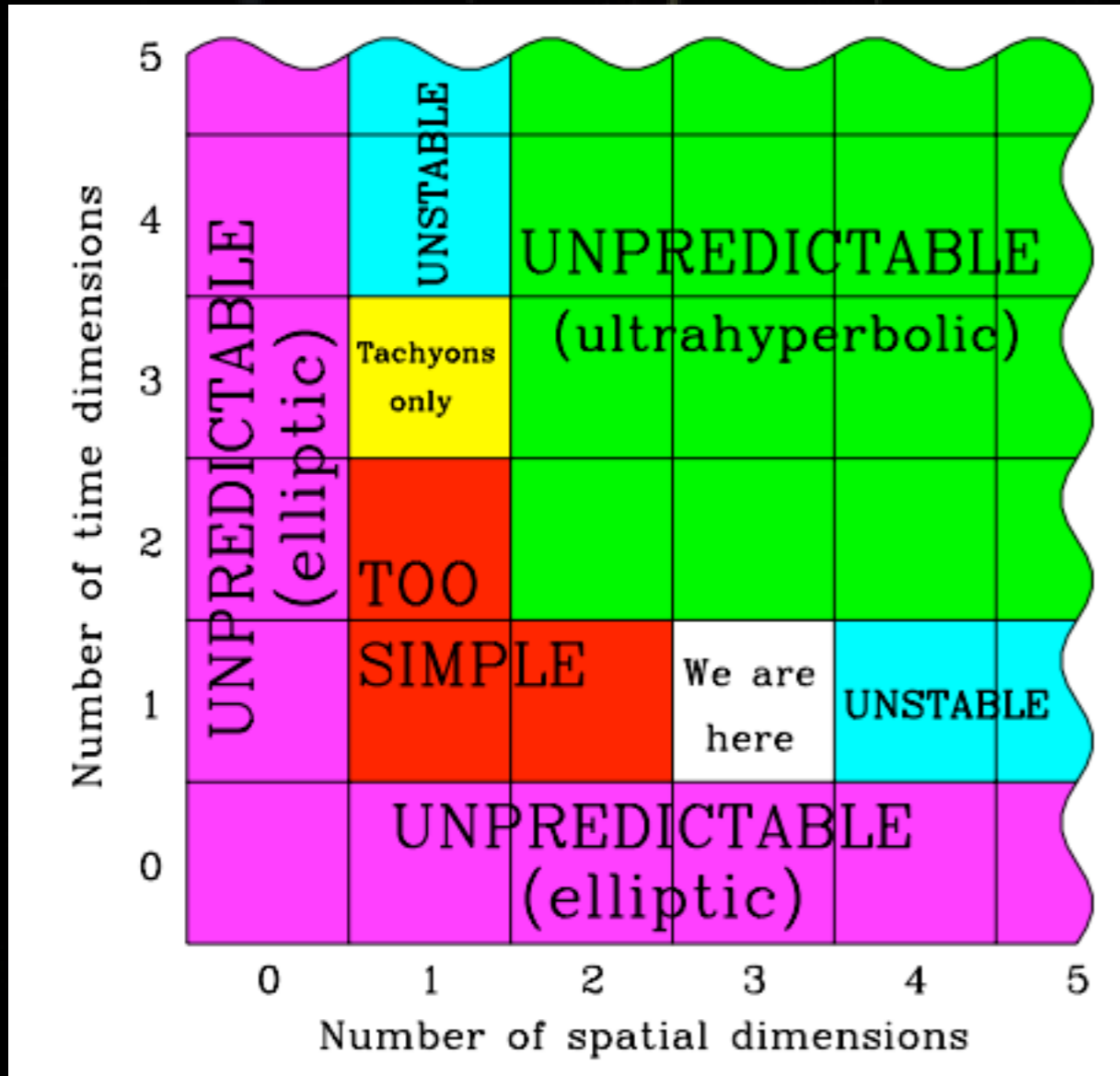
- **Infinité de bulles inflationnaires**
 - ★ L'inflation dure éternellement partout
 - ★ sauf dans certaines bulles où elle s'arrête avec un certain jeu de conditions initiales
 - ★ Chacune est un Univers de niveau I
- **Motivé par les théories de cordes**
 - ★ Globalement bcp de dimensions (10 ou +)
 - ★ Des tas de minimas possibles pour l'inflaton
 - «String Landscape» gigantesque (Infini ?)
 - Chacun correspond à des théories effectives différentes pour le monde à basse énergie
 - Dimensions différentes
 - Constantes fondamentales
 - Particules différentes
- **Difficultés:**
 - ★ Non testable ...
 - ★ Fin de la science ?
 - Si tout ce qui est imaginable est réalisé, alors ce que l'on entend par «théorie scientifique» n'a pas de sens



- **Avantages:**
 - ★ Fine-Tuning et effets de sélection



Fine tuning



Niveau III

- **Rappels de mécanique quantique**

- ★ Les états d'un système quantique sont des coordonnées dans un espace de Hilbert dont le nombre de dimensions (éventuellement infini) est le nombre d'états (de mesures) possibles. Ex/ ($|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$)

- ★ Ils sont décrits par une fonction d'onde $|\psi(t)\rangle$ qui est un vecteur de l'espace de Hilbert: $|\psi(t)\rangle = \alpha(t) |\uparrow\rangle + \beta(t) |\downarrow\rangle$

- ★ Pour un système isolé, celle-ci évolue selon l'équation de Schrödinger

$$\frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle = -\frac{i}{\hbar} H |\psi(t)\rangle$$

- qui préserve l'unitarité: $\sqrt{\alpha^2(t) + \beta^2(t)} = 1$ (autrement dit, un système ne fait que subir des rotations dans l'espace de Hilbert)

- ★ Lors d'une «mesure» le système n'est plus isolé et est projeté sur un des états avec des probabilités que l'on sait calculer.

- Cela viole l'unitarité, c'est le problème de la «mesure»

- La «décohérence» permet de mieux comprendre le passage au classique

- ★ Difficulté avec la fonction de l'Univers: elle est toujours isolée, donc elle doit rester unitaire...



Niveau III

- «Many Worlds Interpretation» de Everett

- ★ Exemple: mesure du spin d'un atome

- $|\uparrow\rangle$ ou $|\downarrow\rangle$
- avant la mesure, l'observateur est dans l'état $|\ddot{\cdot}\rangle$
- après la mesure: $|\smile\rangle$ ou $|\frown\rangle$

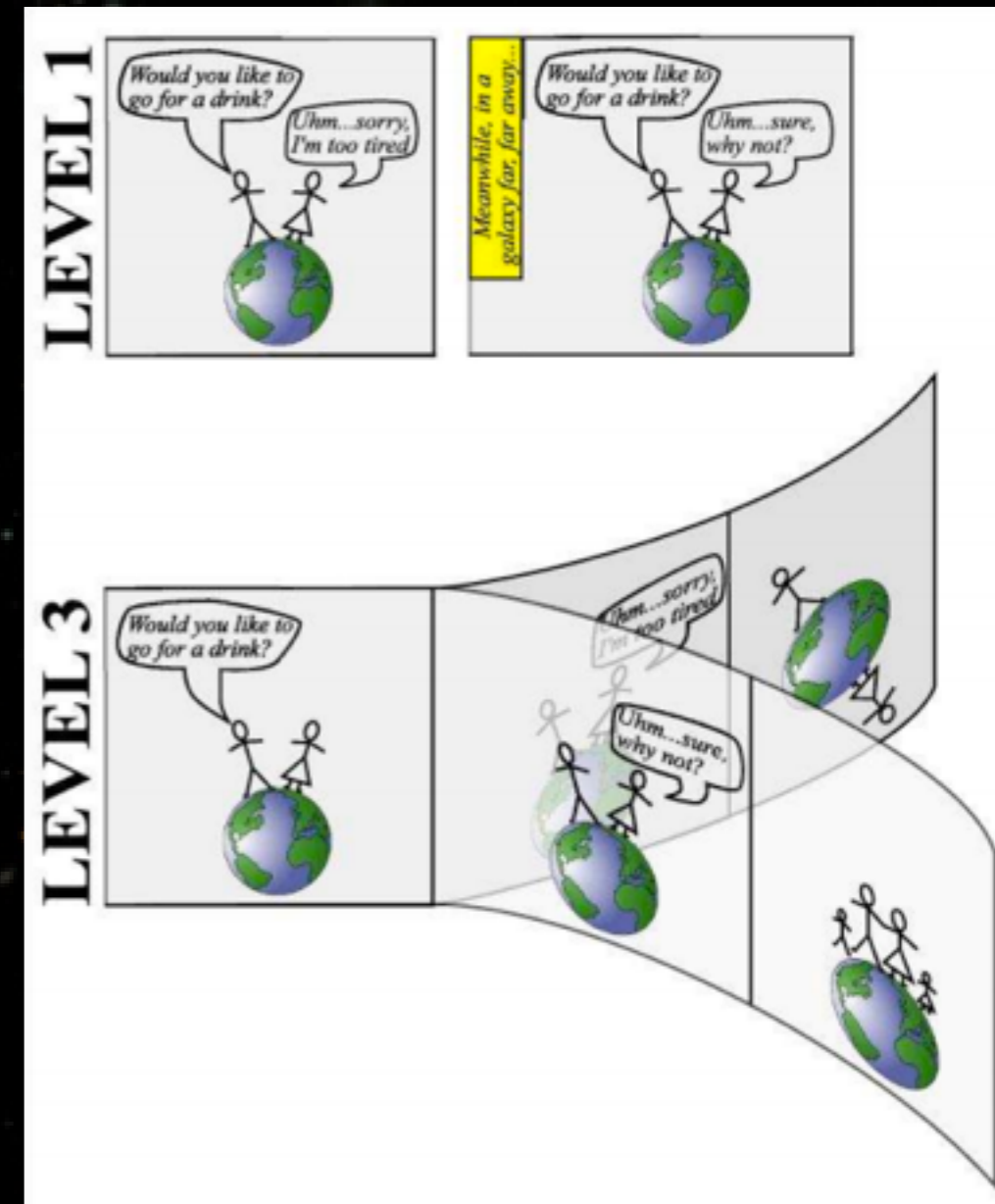
On a forcément:

$$U|\uparrow\rangle \otimes |\ddot{\cdot}\rangle = |\uparrow\rangle \otimes |\smile\rangle \quad \text{and} \quad U|\downarrow\rangle \otimes |\ddot{\cdot}\rangle = |\downarrow\rangle \otimes |\frown\rangle.$$

Donc :

$$U(\alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle) \otimes |\ddot{\cdot}\rangle = \alpha|\uparrow\rangle \otimes |\smile\rangle + \beta|\downarrow\rangle \otimes |\frown\rangle.$$

- D'où l'interprétation de la coexistence de ces résultats dans plusieurs mondes avec des probas identiques à celles de l'interprétation classique
- Les deux états pourraient éventuellement interférer plus tard (une seule fonction d'onde) sauf si pour des raisons de décohérence on peut considérer comme une bonne approximation de les séparer
- Intérêt: pas besoin de faire d'interprétation de la «mesure», pas de réduction du paquet d'onde...
- Les probabilités d'être dans chacun des mondes suivent exactement les probabilités des états prédits habituellement.



NB: très controversé

Mais en pratique assez similaire aux niveaux I et II



Niveau IV

- Rappel sur deux postures scientifiques:

- ★ Aristotélicienne:

- Notre expérience quotidienne est la «réalité», les modèles et théories pour la décrire sont des constructions de notre pensée, et n'ont rien de réel.
- *comme une grenouille vivant dans un champ, sans vision globale de son Univers*
- Il ne peut pas exister de «théorie du tout» car ce ne sont que des mots décrits par des mots
- L'idée des multivers semble tordue...

- ★ Platonicienne:

- Ce sont les mathématiques et les théories qui sont réelles, notre expérience n'est qu'une approximation réductrice d'une réalité plus profonde que les maths décrivent.
- *Comme un oiseau volant au dessus du champ, observant la grenouille et le paysage dans son ensemble*
- Il doit exister une «théorie du tout» ultime
- Alors l'idée des multivers semble beaucoup plus naturelle

- Supposons que nous sommes platoniciens

- ★ Pourquoi ces équations plutôt que d'autres ? [Wheeler]

- ★ Il pourrait y avoir d'autres structures mathématiques qui correspondraient à d'autres réalités



Niveau IV

- Qu'entend-on par «structure mathématique» ?
 - ★ Physique Classique : la physique est décrite par des champs dans \mathbb{R}^3
 - C'est une structure mathématique: la réalité est «isomorphe» à une théorie des champs dans \mathbb{R}^3
 - En fait on sait que c'est incomplet: il manque la mécanique quantique, la gravitation, le modèle standard de la physique des particules, etc...
 - ★ Une future «théorie du tout» (dans une vision Platonicienne) pourrait être une structure mathématique isomorphe à notre multivers (niveau I, II et III)
 - ★ D'autres structures mathématiques complètes et cohérentes pourraient exister. Elle ne correspondraient pas à notre réalité mais pourraient exister quand même.
- Si l'on fait le postulat que:
 - ★ Existence mathématique \Leftrightarrow existence physique (Platonicien radical)
- \Rightarrow Il existe un niveau IV de multivers
 - ★ Intérêt: résout la question de «pourquoi les mathématiques fonctionnent ?»



Résumé

- Plusieurs niveaux de multivers semblent possibles dans le cadre de nos théories modernes:
 - ★ Niveau I: directement issu de FLRW dans le cas infini
 - conditions initiales différentes de notre volume de Hubble
 - ★ Niveau II: issu de l'inflation
 - Différentes loi physiques effectives
 - ★ Niveau III: une certaine interprétation de la MQ (un peu radicale)
 - seulement différent des deux autres par sa localisation
 - ★ Niveau IV: issu d'un platonisme radical
 - Les lois fondamentales y seraient différentes
- Toutes ces idées demeurent très spéculatives
 - ★ Si l'Univers n'est pas infini elle n'ont même pas lieu d'être (sauf peut-être le niveau III, qui correspond à une interprétation radicale de la MQ)



Conséquences des multivers

- **Avantages:**

- ★ donnent de la structure aux arguments anthropiques:

- tous les multivers ne sont pas «hospitaliers»
- ils existent tous
- Il n'est pas surprenant de trouver des coïncidences, fine-tuning et autres du fait des effets de sélection.

- **Problèmes:**

- ★ Quid de la démarche scientifique ?

- Si tout ce qui pourrait arriver arrive, alors comment interpréter le résultat d'une mesure ?
Peut-on confirmer une hypothèse par une mesure ?
- En quoi les multivers sont-ils plus «Scientifiques» qu'une croyance religieuse ?

- ★ Pour l'essentiel les multivers ne sont pas falsifiables au sens de Popper et ne devraient donc pas constituer une théorie scientifique (on peut dire la même chose des cordes).

- ★ Ils constituent un bond philosophique très osé.

- ★ Ils reposent tous sur une interprétation platonicienne extrême

- nos théories sont elles la réalité ? si ce n'est pas exactement le cas alors ils n'ont pas de sens.

