Présentation Club Quasar 95

Bang ou pas il y a 13,8Md années?
''Saison 2''

Satellite Planck : Spectre de température du **CMB**
crédit E.S.A.

J.Couet, rev3 Dec 2023

(1) Mise à jour de la précédente présentation au club (2021)

1/20

To be or not to be, (to bang or not to bang) that is the question…

Quoi qu'il en soit, c'est l'image la plus précise de la lumière qui s'en est échappée 380 000 ans après cet évènement. Elle nous parvient de partout et a voyagé plus de 13milliards d'années.
Pendant tout ce temps la lumière s'est propagée dans toutes les directions et sa longueur d'onde s'est ''étendue'' de plus s'un facteur 1000 si bien que cette lumière violente nous arrive sous forme de micro-ondes correspondant à celui d'un corps qui a refroidi d'un facteur 1000 également. Alors à près de 3000K la température de ce rayonnement n'est plus que de 2,75K seulement au dessus du zéro absolu.
Ou que l'on soit on reçoit ce rayonnement de toutes les directions. En outre , ses variations d'intensité sont extraordinairement faibles (1/100000). On attribue à ces minuscules variations d'être les germes qui ont donné naissance aux étoiles et galaxies que l'on voit aujourd'hui dans nos chers télescopes. C'est une longue et belle histoire que raconte cette image à ceux qui s'interrogent. Une preuve diront beaucoup, ''ça dépend de quoi on parle'' diront d'autres. Alors essayons d'en apprendre un peu plus.

Agenda:

''Bang'' ? Peut être et ensuite?

- Petit rappel du modèle (concordance) actuel
- JWST nous dit déjà 2 - 3 trucs étranges, Euclid aussi

- Big-bang: comment en est on arrivé là?
  - ''OK docteur, c'est peut être BIG, mais ''BANG'' ou ''PAS bang'''' ?
  - Il était une fois un Bang-modèle dit ''de concordance'' …

''ΛCDM''

- Quelques variantes: univers et/ou multivers ?

Caractéristiques fondamentales (grande échelle)

- L'univers est plat (quasi)
- Isotrope
- Homogène

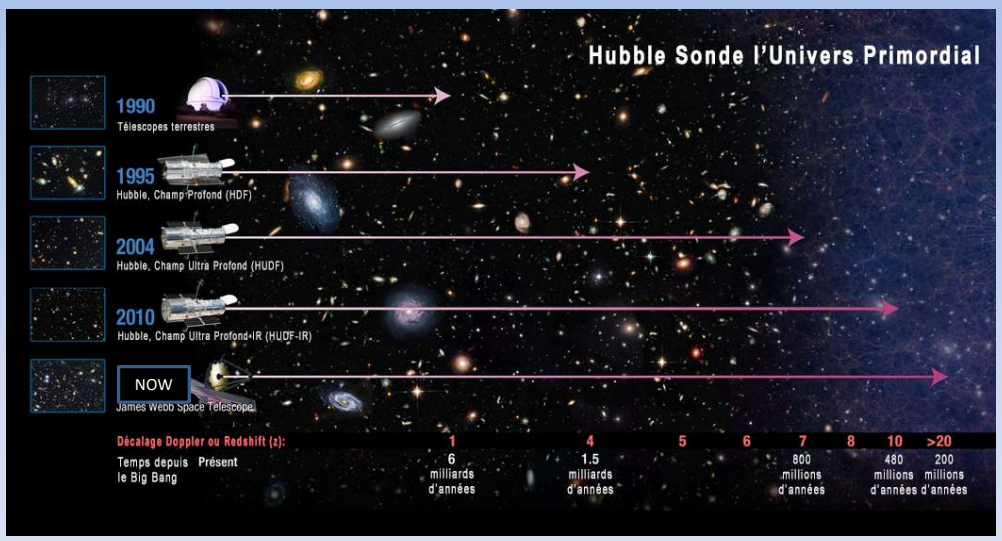
Même après plus de 13,8Md d'années d'expansion !

- Il n'est pas statique, mais en expansion (actuellement) accélérée
- Age calculé ~ 13,8M d'années

- Constitué de moins de 5% de matière connue,
- + energie inconnue:
  - matière noire: 27% (rôle complémentaire à gravité)
  - + énergie noire (répulsive) ~68% (expansion) (+ ..?)

3

Evolution: pour l'expliquer/vérifier on essaie de remonter aux premiers instants:



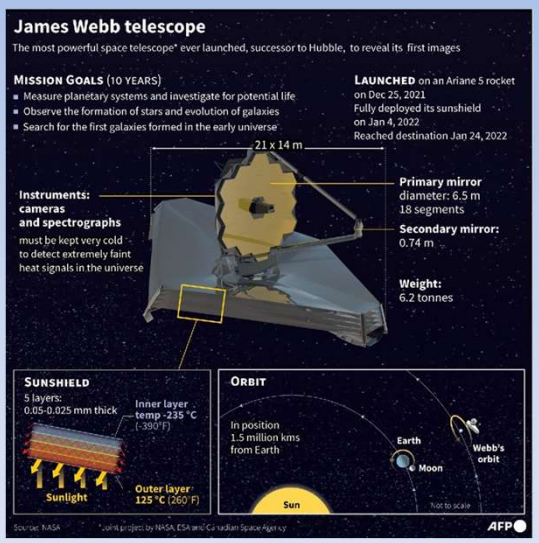
Source NASA/ESA/STSc (modifiée)

(I) Que nous dit le JWST aujourd'hui?

- Grâce à sa capacité de voir très loin et dans le passé (I.R.)
- À sa position loin de la pollution terrestre (L2)
- A ses capteurs et cameras très basse température,
- Et à l'expérience accumulée avec Hubble, Planck, Wmap, COBE et bien entendu les télescopes terrestres
- Compléments attendus avec le satellite Euclid etc.

Premiers éléments du JWST (1)

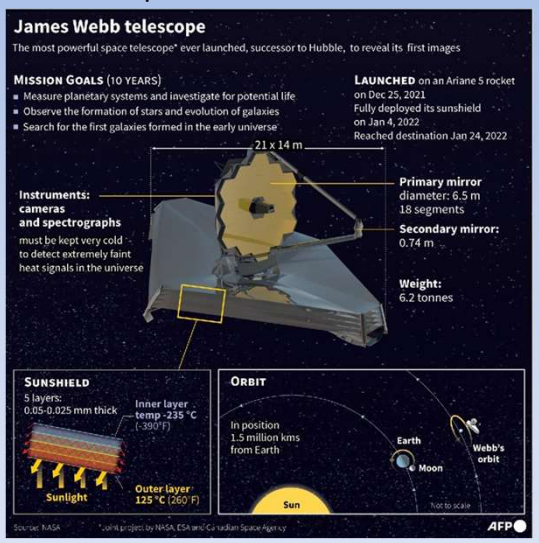
- **Problème:** on voit des galaxies ''là'' ou on ne devrait rien voir : en pleine période des 'Ages sombres''
  - Mais, questions sur la composition des premières galaxies (ex taille et type des premières étoiles)
  - Plus spécifiquement sur **la distribution des étoiles (masses /luminosité) dans les premières galaxies (IMF)**
  - Induit des questions sur la mesure et l'âge de l'Univers (son âge pourrait-il de 28Md années au lieu de 13,8)???
  - Donc questions sur la naissance de notre univers (i.e. Big Bang): faut il revoir profondément notre théorie?



Premiers éléments (2)

- **Mais : Ouverture prématurée à publications :** trop hâtives **et non validées** par les pairs.
- Course aux publications ''sensationnelles''
- A l'occasion , de vieilles idées/hypothèses abandonnées resurgissent aussi (ex ''doppler / expansion'' Vs ''lumière fatiguée'')
- ....

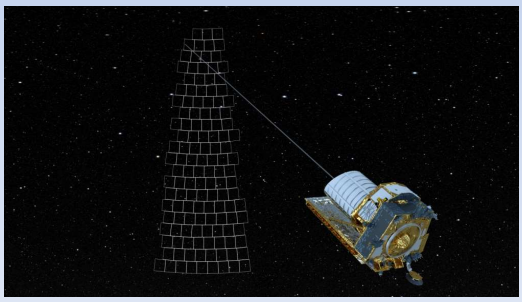
Encore un peu de patience!
Avant de conclure



La disponibilité immédiate ces données recueilles par le JWST a malheureusement donné lieu à une course aux publications, sans qu'elles soient validées de manière ouverte et contradictoire par les pairs, (alias peer review) comme c'est la règle habituellement pour toute publications scientifique. De ce fait un grand nombre de publications pour le moins hâtives, voire visant au sensationnel se sont trouvées exposées. La prudence a souvent été mise de coté.

Note: Le JWST n'est pas tout seul à fouiller loin. Le Satellite Euclid apporte aussi sa contribution

- Objectif: étude de l'expansion de l'Univers, et plus spécifiquement
  - Matière noire
  - Energie Noire
- ESA, lancé en Juillet 2023
- Positionné à L2
- Camera I.R. 600Mpix
- Objets jusqu'à Z=2
  - Reconstruction modèle 3D



Là aussi : un peu de patience!
Avant de conclure

Source ESA

8

Premières mesures JWST :
des galaxies (?) trop grosses, trop loin, trop tôt.

- De telles galaxies ne devraient pas exister à cette époque de l'univers (âges sombres)
- Alors que les premières étoiles devraient à peine avoir eu le temps de se former
- Oct 2023, Là: DES GALAXIES ? Mais (Nov 2023) peut être autres choses que des galaxies… Incertitude

Z=7.4
(15MdMʘ

Z=8.1
(13Md Mʘ)

Z=8
(12MdMʘ

Z=9,1
(25MdMʘ

Voir: Science étonnante https://www.youtube.com/watch?v=dZw31yMDokk&t=420s

9

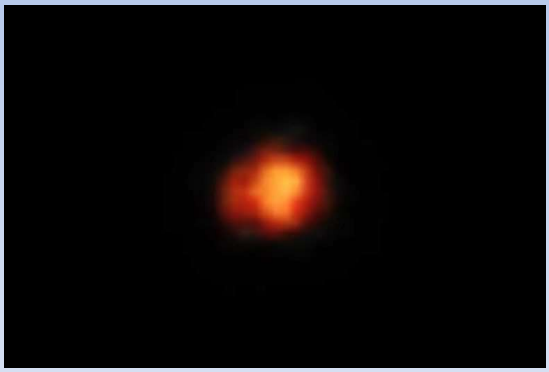
Si la mesure de leur distance donc position / big bang et époque est correcte, ce qui reste à confirmer (e.g. les peer reviews) comment ont elle eu le temps de se former?? Le modèle B.B. courant voudrait qu'à cette période, dite des ages sombres, il n'y ait que de la matière en cours de refroidissement. On est juste après la ''recombinaison'' (cf image du CMB), et il ne devrait y avoir que des atome d'Hydrogène, d'Hélium et quelques % de Lithium en train de refroidir (fin de la phase plasma et descente progressive bien en deçà des 3000K du plasma). Les atomes qui ont ainsi ''récupéré'' leurs électrons ne sont plus excités et ne rayonnent pas de lumière. Ce sont les ages sombres: bien avant que la gravité aidant des nuages se forment, se condensent puis s'allument en étoiles.. Il manquerait donc entre 500M et 1Md d'années. Ces structures arrivent en effet beaucoup trop tôt.
Mais est-on certain de la calibration, mesure de distance??
Si on confirmait il faudrait revoir la théorie du Bigbang et formation des étoiles/galaxies en profondeur pour cette époque.

JWST: ''Maisie's'' Galaxy in ''Epoch 1''

- Confirmée l'une des 4 plus vieilles (*) @Z=11,4: (alias ''Epoch 1'')
- Image détectée (NIRSpec du JWST) l'été 2022 et positionnée à seulement 390M années après le BB (*)… beaucoup trop tot!

- CEERS (*)
- Extraordinairement active
  - Etoiles très jeunes
  - Formation intensive d'étoiles

''It might not look like much but this glowing orange blob is one of the most important galaxies in recent astronomical history''.



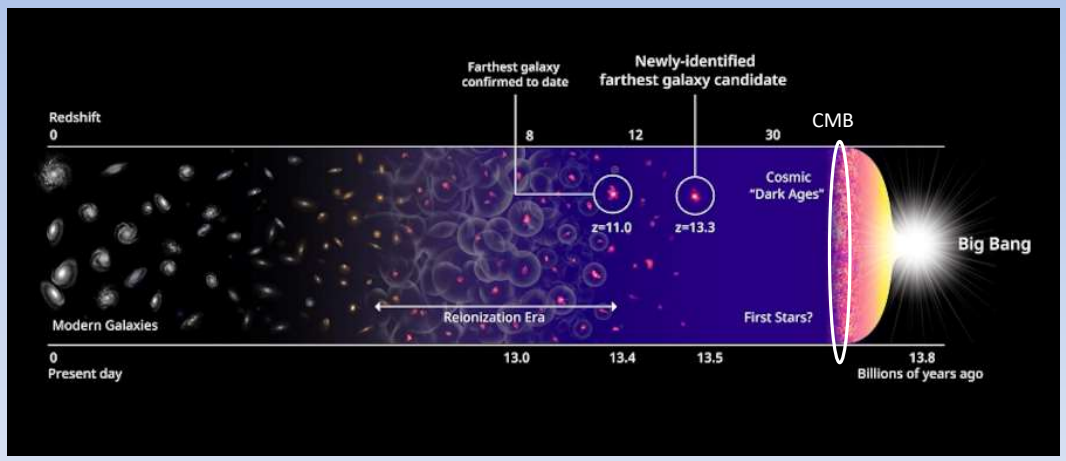
(Image credit: NASA/STScI/CEERS/TACC/ University of Texas at Austin/S. Finkelstein/M. Bagley)

*= CEERS : Cosmic Evolution Early Release Science Survey (D Finkelstein Université Austin TX)

10

''Galaxie de Maissie'' (fille de S Finkelstein qui a juste eu 10ans le jour de la découverte de cette galaxie.) Une des plus vielles qui soit, et dont le rythme de formation d'étoiles semble particulièrement élevé.

Des premières galaxies en pleine période des âges sombres = beaucoup trop tôt /modèle standard



Source: S&V: Chronologie illustrant l'histoire de l'Univers et la formation des premières galaxies. En 2022, une équipe du Centre d'astrophysique | Harvard & Smithsonian rapporte la découverte d'une galaxie candidate de redshift z =13,3. Crédits : Harikane et al, NASA, EST et P. Oesch/Yale

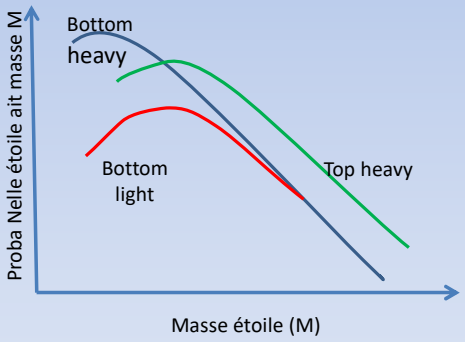
11

Cette slide montre le positionnement de quelques-unes des galaxies trouvées. La zone entre CMB et 13.5Md d'années-lumière devrait être quasi vide d'étoiles et surtout aucune galaxie ne devrait avoir eu le temps de rassembler des étoiles par milliards, or c'est ce qu'on voit si nos mesures se confirment. IL y a quelque chose qui ne va pas dans la théorie du BB, la théorie de l'évolution des galaxies ou dans les mesures...!

Mais de sérieuses incertitudes (question FMI)

- Impactent les mesures de distance (Luminosité, et spectre)
- Une des plus évidentes: La Fonction de Masse Initiale (alias IMF) des premières galaxies
  - IMF: Répartition des masses d'étoiles (grosses et petites) dans les premières galaxies.
  - Luminosité 1 galaxie résulte de toutes les émissions (spectres) à un instant donné, et cela dépend donc de la distribution des étoiles (types A, B, ….O. dans la galaxie)
  - On peut supposer la même que la voie lactée, mais… La distribution peut être très différente >>> erreurs
    - ✓ Statistiquement + de grosses étoiles (''top heavy'')
    - ✓ Ou plus de petites étoiles (''bottom heavy'')
    - ✓ Mais aussi ''Top light'', ''bottom light''
  - Gros impact sur les modèles et interprétation des mesures… (à suivre *)

Fonctions Masse Initiale (IMFs) : exemples de distributions de la masse (jeunes étoiles)dans une galaxie



(*) Source video Dr Becky : The early universe is different than we thought : HTTPS https://www.youtube.com/watch?v=FjWwQEDq0KU 7dec2023

12

La mesure des distances est effectuée à partir de la mesure de luminosité et du décalage doppler (Z) de ''chandelles standard'' en particulier de supernovae de type 1A que l'on sait reconnaitre avec une bonne précision.
En ce qui concerne la luminosité des galaxies, on est obligé d'estimer leur composition en % de grosses étoiles (extrêmement lumineuses, température élevée (e.g 30 000K) rayonnant dans l'UV mais ayant une courte durée de vie e.g. 0,1M années , et aussi moyennes et petites a étoiles bien moins lumineuses, qui elles peuvent durer extrêmement longtemps (bien plus que 50Md d'années) tant elles sont économes (et e.g. 3500K ont un rayonnement dans le rouge et infrarouge).

II) CE FAMEUX B. BANG : ON EN ETAIT OU DEJA?
LE MODÈLE DE ''CONCORDANCE''

Le soir autour du feu, les sages racontent que notre Univers tout entier était bien plus petit que le plus petit des grains de blé, et même des milliards de milliards de fois plus petit qu'un tout petit proton

''IL ÉTAIT UNE FOIS, IL Y A LONGTEMPS, LONGTEMPS… ''

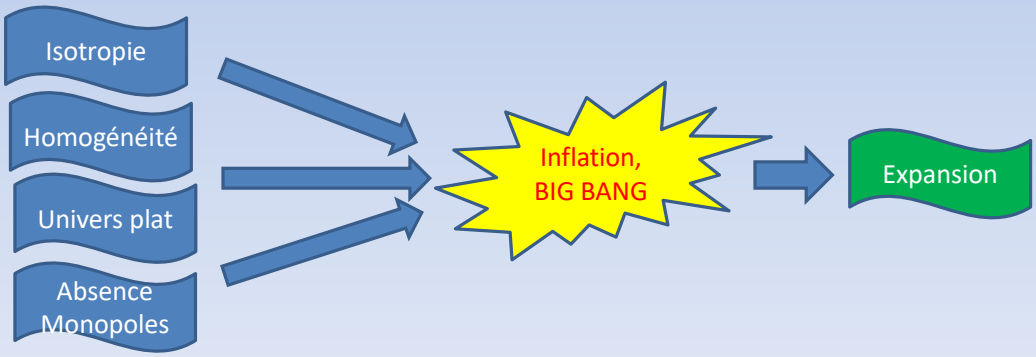
Est-ce que le JWST va

- confirmer tout ça?
- améliorer quelques points ?
- ou faudra-t-il ''tout'' (?)casser?

13

Rappel:

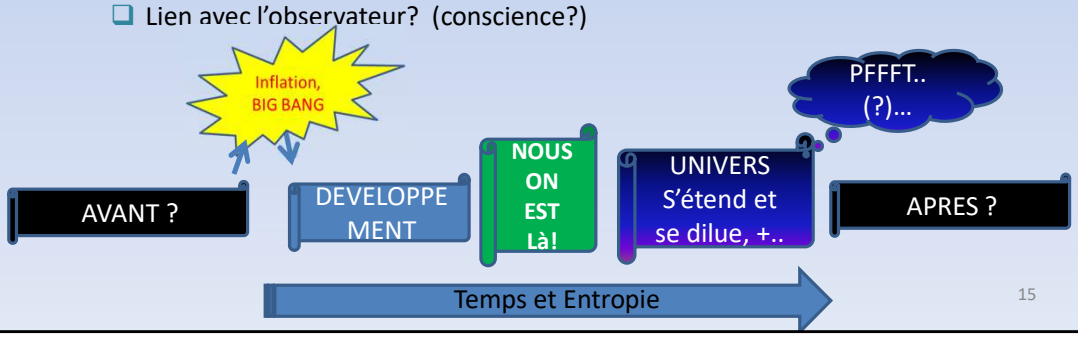
- Hubble-Lemaitre (1929-1927) : l'univers est en expansion
- A l'envers : si on remontait le temps l'univers se resserrerait: → jusqu'à ''l'Atome primitif''(*)



* Georges Lemaitre 1931, ou ''Big bang , ha ha!'' selon (F. Hoyles)

Bang: ce ''début'' en question

- Le temps et l'espace ont-ils commencé là?
  - Serait la ''naissance'' de notre ''Univers''. ''la''? ou ''une''?
- Avant?
  - Certains ont expliqué que ''avant'' n'a pas de sens (serait comme chercher à aller au nord du pôle nord)
- Après??
- Et quid ''en même temps'', (i.e. ''Pendant que nous observons notre univers''???
  - ''Pendant que''??
  - Lien avec l'observateur? (conscience?)



15

Est-on juste un petit intermède entre 2 grands vides éternels??? Sinon quid d'avant et quid d'après??????

Notre modèle actuel (Lambda CDM) : commencer avec un Bang près d'un horizon bien chaud

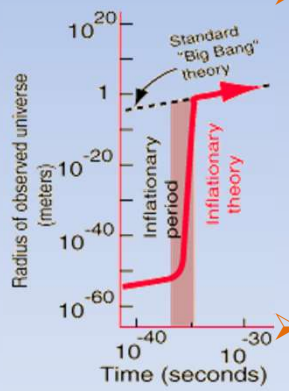
- Donc il y a quelques 13, 8 Md d'années, l'Univers a dû se trouver dans d'un état hyperdense compressé et à une température très élevée (10^{28} à 10^{30}K)
- Mais si sa taille avait effectivement été ponctuelle à t~0, alors sa densité aurait été infinie:
  - Et PAF!! ''singularité'' ??? si taille =0?!
  - Alors on a recherché une théorie qui puisse rendre compte de ce qui a pu se passer au-niveau de cet horizon (sans tomber dans les pièges infinis)
  - Et il y en a déjà quelques unes .....>

Oh, no! Please?

16

Alors remontant le temps: milliard d'années avant milliards d'années l'univers (visible devient de plus en plus compact, les galaxies se rapprochent en se resserrant les unes sur les autres jusqu'à ce qu'elles ne semblent plus former qu'un point, très dense. La compression aidant, la une température a dû être incroyablement élevée : plus de 1milliard de milliards de milliard de degrés.
S'il ne devait plus rester qu'un point alors la température aurait dû atteindre l'infini: une autre singularité embarrassante pour la physique. **Donc le modèle ne marche plus à ces dimensions . L**a physique connue est inapte à décrire ce qui se passe.
C'est un horizon: on ne sait pas, donc on imagine et essaie de trouver. ….

BANG? Inflation: bang de quoi ?



Modèle Inflationnaire

- L'idée : On part de ''l'atome initial'' de G.Lemaitre ….
  - Ex Une transition brutale de (phase?)
- **Idée: Le BANG = Revised INFLATION (Alan Guth /MIT 1979 Andrei Linde, Steinhart)**
  - Phénomène d'expansion exponentiel hyper court (Inflation), et permis par la R.G.
  - Double en taille plus de 100 fois de suite (x 10^{28}) en 10^{-35}s
  - L'inflation permet **d'aplanir** l'Univers très efficacement
  - Evite aussi la formation de ''monopoles'' (particules) qui auraient forcé l'univers à se replier rapidement)
  - Mais: d'autres modèles en compétition
  - ''Singularité'' à t=0… un problème résiduel
- Bang…. : une seule fois ou plusieurs ?? (vers mécanisme d'inflation éternelle)
  - Successifs?? Pourquoi pas aussi en parallèle?
  - Rappel proposition (L.Krauss) Energie Nécessaire @t->0 ~ **O** : The ''Ultimate free lunch''

17

Plusieurs modèles théoriques aboutissant à l'émergence de notre univers sont toujours en compétition. Une fois la première micro-pico-seconde passée de nombreux ouvrages montrent un bel d'accord. L'un des plus célèbres étant ''les 3 premières minutes'' de Steven Wienberg (Prix Nobel) qui décrit en particulier la nucléosynthèse des premiers éléments, photons, protons, neutrons, électrons, noyaux d'hydrogène, d'hélium, Lithium.

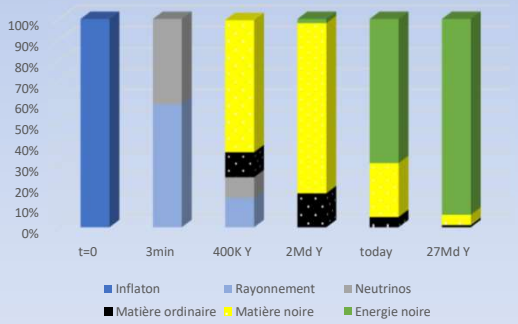
Le modèle d'inflation a été proposé initialement par Alan Guth (MIT 1979) et a complétée avec Andreï Linde (Stanford), Paul Steinhardt, Andreas Albrecht et quelques autres. L'idée a consisté à considérer un mécanisme exponentiel autorisé par la RG (espace vide dit ''deSittter Space'') concernant la physique de cet espace temps vide et ses modes d'expansions possibles (exponentiel en raison de l'énergie du vide). Et d'essayer de définir un mécanisme ayant donné pu donner lieu à une telle éclosion, (ex un peu similaire à ce qu'on connait aujourd'hui sous le nom de transition d'état, rupture de symétrie, etc..)

L'idée est qu'une extension très brutale des dimensions de l'espace n'a pu que l'aplanir et également par sa brutalité éviter que la formation de particules exotiques ne le fasse avorter (ex se replier sur lui même prématurément). Cette période a donc dû être très violente et brève (voir graphique) (moins de 10^{-35}s) et pendant ce temps sa taille a été multipliée d'un facteur >2^{100} au minimum pour obtenir un univers aussi plat que celui dans lequel on se trouve.

Evolution du contenu selon modèle ''ΛCDM''

- Relativité Générale: la matière (l'énergie) dicte comment l'espace se courbe et sa courbure dicte comment la matière (l'énergie) s'y déplace.
- Evolution du mix : selon ''ΛCDM'' de base (*) **dicte de quelle manière et à quelle vitesse l'univers s'étend**

Variation des constituants de l'Univers / temps



- Les constituants:
  - Rayonnement (photons, i.e. ondes radio)
  - La matière ordinaire (Baryons etc..)
  - Matière dite ''noire''
  - Et d'énergie noire Λ (Lambda)

Grace à tout ça la géométrie de l'Univers reste ''étonnamment plate''

Source: Public planck.fr/notre univers/contenu-univers

(*)= Hyp. densité énergétique du vide = constante

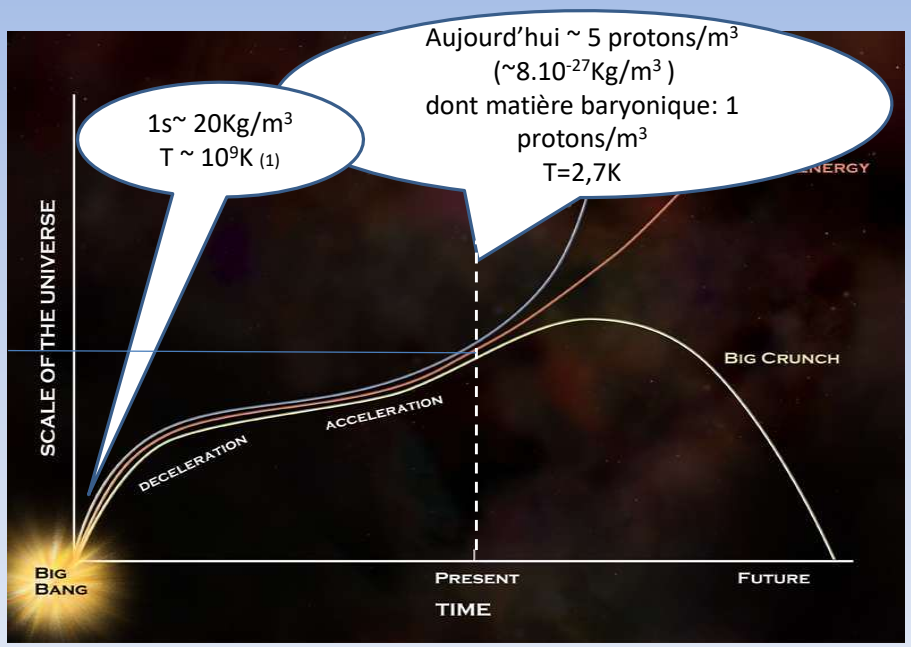
18

La ''densité critique'' se calcule bien, c'est celle pour laquelle la géométrie de l'univers est plate.

Une analogie peut être faite avec la vitesse de libération v_{lib} : si la vitesse v d'un astéroïde ou d'une lune passant près de la terre est supérieure à v_{lib} alors cet astéroïde (ou lune) restera captif (ex la lune ou un satellite de la terre). Si sa vitesse est $<v_{lib}$ alors il aura une trajectoire hyperbolique (L'astéroïde sera dévié mais poursuivra son chemin en s'éloignant à jamais). Si $v=v_{lib}$ alors le corps ralentira toujours mais continuera à s'éloigner… sa vitesse ne deviendra nulle qu'à l'infini.

Il est intéressant de constater que la combinaison des différentes composantes de l'univers résulte en un mélange qui a permis à l'univers de **rester proche d'une platitude quasi parfaite**, et ce en dépit de règles de dilution assez différentes de ces composantes, et d'un impact gravité très différent également. La constate de Hubble s'adapte quasi parfaitement aux différentes époques en conservant cette quasi planéité.

Inflation, expansion/ modèle standard: une histoire de 13.8 Md d'années



Adaptation source Wikipedia

1: S&V fev2021

19

L'évolution de l'Univers dépend des équations d'Einstein, et plus précisément de celles dérivées par Friedmann qui donnent l'accélération relative du facteur d'échelle (a) en fonction du contenu de 'Univers (par définition a =1 aujourd'hui). Ces équations permettent de calculer trois scenarii principaux suivant que la courbure de l'espace est >o (ex une sphère dans un espace à 2 dimensions, hypersphère en 3 dim), nulle (notre situation idéale), négative (eg selle de cheval). Les trois géométries possibles sont restées très proches les unes de autres jusqu'à nos jours, mais l'avenir pourrait théoriquement conduire à une situation différente:

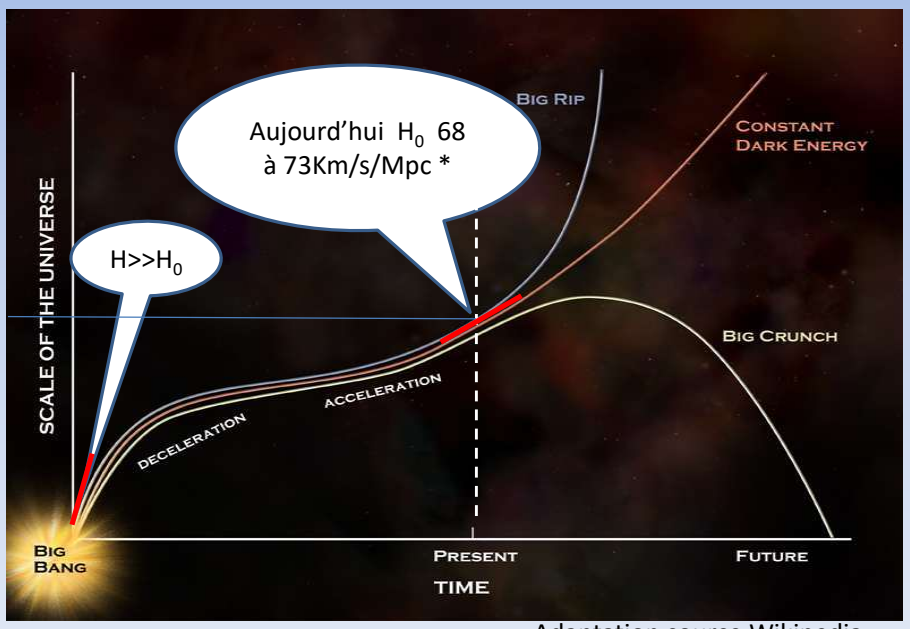
1. Si l'univers est courbé positivement, alors arrivera ou ce dernier commencera à se contracter de plus en plus pour aboutir à un point (''big crunch'')
2. Si l'univers a une courbure nulle, et en supposant que l'énergie noire garde ses caractéristiques (constante par Km^3) alors sous l'effet de cette énergie, l'accélération de l'expansion continuera , (a) continuera à augmenter de manière exponentielle, on aboutit à une dispersion de l'univers, les galaxies s'éloignant de plu en plus rapidement jusqu'à disparaitre à la vue l'une de l'autre, pour s'évanouir petit à petit, voire à terme se désintégrer, et les trous noirs s'évaporer.
3. Si l'Univers a une courbure négative, l'effet de dispersion sera encore bien plus rapide: on sera dans une situation de ''BIG RIP''. Déchirure rapide de L'Univers dans un avenir beacoup plus proche que dans le cas d'un univers plat.

Autant que l'on puisse mesurer l'univers est très plat (grande échelle), mais on est réduit aux supposition concernant nature et caractéristiques de l'énergie noire (répulsive), peut etre varie-telle en fait avec le temps ou son environnement dans espace, auquel cas on ne peut assurer (aujourd'hui) quel scénario sera effectif.

1.

H_0 (vitesse d'expansion) dépend du contenu de l'Univers: évolution future = liée à l'Energie Noire (Λ)

- Le rythme d'expansion (**H_0**)dépend du contenu et est donc variable



Ref: Tension sur la mesure de H_0

Adaptation source Wikipedia

20

On voit ici comment varie la ''constante de Hubble'' qui n'est supposée constante qu'entre (tous) les points de l'univers à un moment donné. Juste après le Big bang sa valeur était élevée (H>>H0 en rouge) même avec une gravité dominante , puis sa valeur a commencé à diminuer et l'Univers a entamé une phase de décélération (effet combiné de la gravité matière ''normale'' et matière ''noire'').
Puis avec l'augmentation du volume d'espace, l'énergie noire (répulsive) a commencé à s'accumuler, puis équilibrer la gravité pour il y a quelques 4 milliards d'années passer en mode de croissance accélérée. On est dans cette phase d'accélération de l'expansion (valeur disputée 68 ou 73Km/s /Mpc) (section rouge)

Equations de Friedmann: → une fin d'enfer qui dépend de la courbure de L'espace-temps

- Si courbure positive (ex bulle): Fin = Big crunch
- Si courbure négative (ex ''selle de cheval'')= Big Rip (univers finit déchiré)
- Si courbure nulle (univers reste plat): Univers se déchire mais beaucoup plus lentement

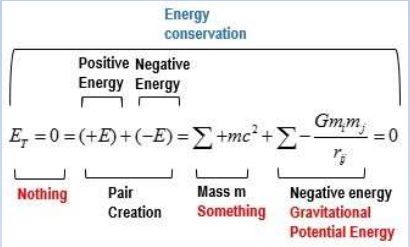
- Question : Autres scenarios possibles? Ex avec densité d'énergie noire non constante ?

21

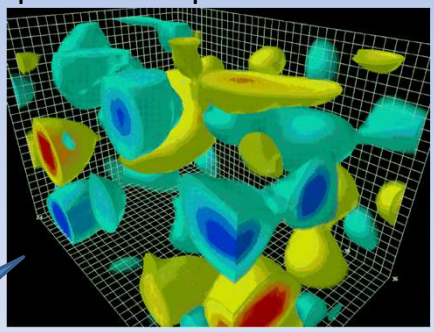
Amorce : Energie totale = 0?

On n'est bien peu de choses, et mon amie la rose…

- Rien, mais rien!
- Comment ça rien? ……Trois fois rien c'est tout de même quelque chose non? … Oui, à une ''poussière'' près



Reste

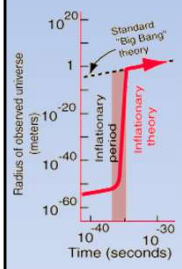


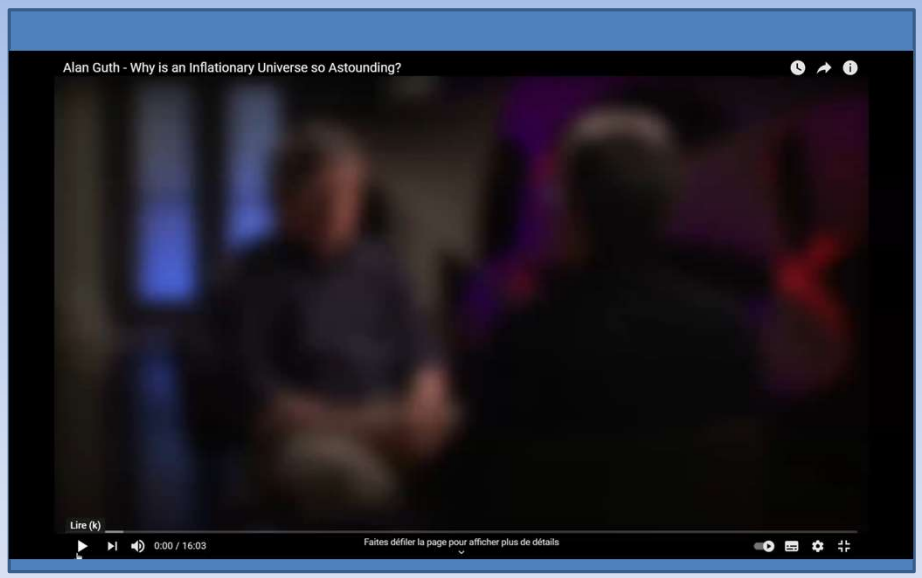
Eh! Nous on est quantiques! Pas vous?

$$\Delta E . \Delta t \sim \frac{h}{2\pi}$$

Une lecture intéressante parmi bien d'autres: « A Universe from nothing » (Laurence M. Krauss)

Interview d'Alan Guth : Bang = Inflation





Crédit & abstract ''closer to the truth''
https://www.youtube.com/watch?v=xJCX2NlhdTc&t=13s

23

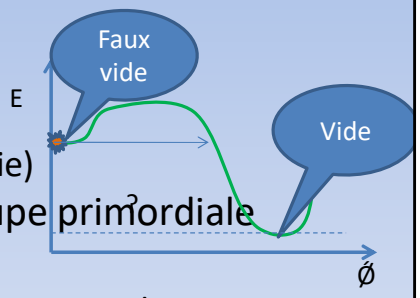
Durée inflation <10^{-30}s
Inflation est certes bien + rapide que la vitesse de la lumière. Et ce n'est pas contradictoire avec la R.G. car la limitation de vitesse à ''c'' s'applique aux objets les uns /aux autres et à l'intérieur de l'univers. **Mais pas à l'univers lui-même**.

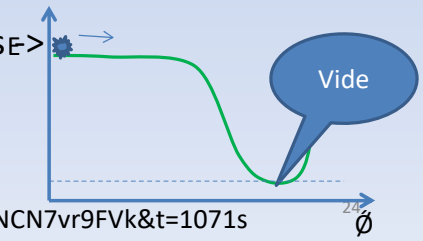
Cette phase rapide permet d'expliquer que l'univers soit plat (il a été tendu), et aussi évite la formation de particules de type monopoles magnétiques (qui n'ont pas eu le temps de se former, ce qui aurait obligé l'univers à se recontracter immédiatement)

On notera qu'une fois l'inflation engagée, elle ne s'arrête pas sauf à cristalliser de temps en temps partiellement c.a.d. de place en place. Ainsi des ''pocket universes'' distincts émergent ainsi de manière quasi aléatoire avec des caractéristiques potentiellement différentes. Nous serions l'un d'eux .
L'idée d'un Multivers était alors naturellement posée.

Rien, et un Bang dans le vide...

- Le vide n'est pas ''rien''
  - Mais seulement le niveau d'énergie le plus bas possible
- Ce niveau est agité
  - Incertitude d'Heisenberg
  - Histoire d'inflaton et de ''slow roll''
  - L'Inflaton est instable désintègre (1/2 vie)
- Partie désintégrée Inflaton -> vers soupe primordiale
- Le reste ''poursuit son chemin''
  - L'Espace resultant est (en moyenne) beaucoup plus grand
  - Place pour désintégrations successives
  - Multiplication d'univers ad infinitum…





MIT open course: https://www.youtube.com/watch?v=ANCN7vr9FVk&t=1071s

Inflation et multivers: d'autres univers aussi? :

- ''Inflation éternelle '' de A. Guth : la substance Inflationnaire (l'inflaton) est instable.
  - Un peu comme les matériaux radioactifs: ''demie-vie'' au bout de laquelle statistiquement en moyenne 50% se ''désintègre'': (transition)
  - Inflation s'arrête dans la partie ''désintégrée'' . Cette transition donne naissance à un nouvel univers (''Pocket Universe'')
- La partie non désintégrée poursuit son processus d'inflation (exponentiel !!)
  - ➡ Volume disponible lors de la ''désintégration'' suivante est considérablement plus grand
  - Alors, une fois engagée **l'inflation ne s'arrêterait jamais** : ''Once it starts it never stops''
  - Conséquence: Génération de ''pocket universes ad infinitum''
- Les paramètres associés à chaque univers seraient figés lors de la désintégration…?
  - Conditions environnantes??
  - Pourraient donc différer de l'un à l'autre??.
- Ces univers seraient ils connectés ?
  - Pas de raison!

Source: Image Wikipedia

Vers un Multivers

25

Certains univers seront viables, et d'autres non, et pourraient subir une contraction immédiate, et/ou rapide, ou au contraire se disperser/volatiliser de manière instantanée (mauvais équilibre des paramètres, impossibilité de générer de particules ou éléments stables etc.. Les possibilités sont extrêmement nombreuses).

Probablement (????) une faible (??) proportion devrait pouvoir atteindre une phase ou de la vie aurait une chance de se développer, et peut être au sens où on la connait.

Le fait que de TRES très nombreux univers puissent éclore à quasiment à tout instant participe à une explication anthropique (certes) pas nécessairement totalement déraisonnable quant à notre existence aujourd'hui: ici et maintenant.

III) Ah Bang (non?) alors
Juste quelques exemples
(d'autres,… un autre jour peut être?)

Tous résolvent en principe:

- La question piège de densité initiale, et la quasi platitude de l'espace-temps
- Evitent la génération de particules-catastrophes (e.g. monopoles)
- Bien entendu respectent le principe cosmologique: d'homogénéité et isotropie de l'espace à grande échelle
- Permettent en général la formation **de multivers**, et/ou d'un modèle cyclique (e.g. CCC, univers à rebond, etc..)

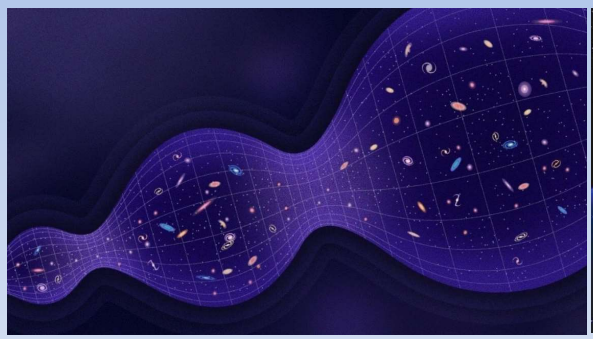
Bien d'autres modèles en compétition

- Difficultés initiales du modèle du Big Bang = (''The old Inflation model'') liées au bang lui même et à son origine.
  - Nouvelle Inflation: (A. Guth, Steinhardt, Albrecht, A.Linde)
- Et nombreux autres modèles proposés depuis, en particulier:
  - **Univers à rebonds: ekpyrotic (Steinhardt & Turok..)**
  - **CCC: Conformal Cyclic Cosmology, (S. Roger Penrose)**
  - **No boundary proposal (S. Hawking, J.Hartle.)**
  - **LQG: gravitation quantique à boucles** (Abhay Ashtekar ,Lee Smolin & Carlo Rovelli, Aurélien Barrau)
  - …
- D'autres modèles séparément remettent en cause le contenu de L'Univers en particulier la matière noire : Modèle dit de MOND : Modified Newtonian Dynamics.
- QUI a RAISON? 1er juge de paix: démonter qu'on retrouve les caractéristiques connues (e.g. CMB) <u>ET QUE les futures mesures restent compatibles:</u>
  - ex Satellites Gaia, JWST , Euclid .
  - ..

→ Amélioration des modèles, et/ou nouvelle théories

27

En route vers les Multivers:
Suites ‘’en séquence’’ et/ou ‘’parallèles’’



Source Image: Big Bang, Cosmologie, Inès Urdanta (Nov 2020) Resonance Science Foundation

Source Image Wiki

Gravitation Quantique à boucles (1)

- Suite à reformulation de la R.G par Abhay Ashtekar (Penn State), Lee Smolin, Carlo Rovelli, A. Barrau,..
- Nouvelle conception: élément de base de l'espace-temps (alias réseaux de spins et mousse de spin) permet d'éviter l'apparition de singularités (des artifacts dus à l'absence de prise en compte de la mécanique quantique)
- Conséquence : Il y a une taille minimale pour tout élément d'espace temps (style ''atome d'espace-temps'')
- Impossibilité de créer des singularités dans l'espace temps: si Espace-temps comprimé → alors **rebond** avant d'atteindre le mur de Planck (1) et/ou singularités.

1 même type de situation que pour la fameuse singularité au centre d'un trou noir de base

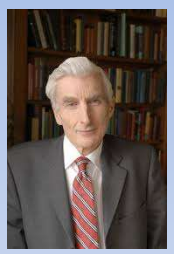
2. Voir https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronomie-cosmologie-quantique-boucles-bientot-demontree-explications-abhay-ashtekar-101743/

Gravitation quantique à Boucles (2)

(On avait écouté D. Louapre et A. Barrau)

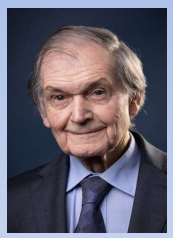
Crédit La science étonnante: D_Louapre
https://www.youtube.com/watch?v=3MJJvXGuDag

Et longtemps, longtemps, longtemps après ce Bang ?..



Voir super Interview de Lord Martin Rees:

- https://www.youtube.com/watch?v=fkCxpdKaWwg
- https://www.youtube.com/watch?v=47YBtGC1Omg

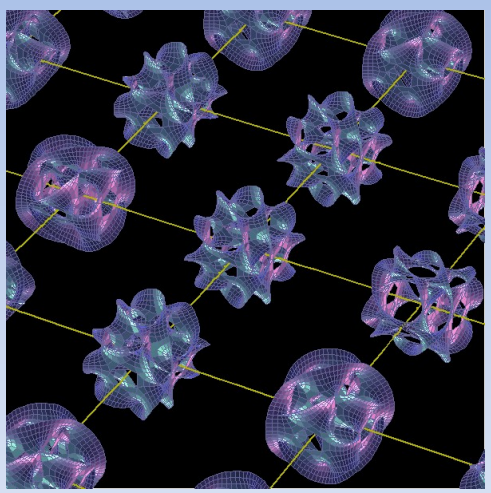


Sir Roger Penrose introduit la Conformal Cyclic Cosmology (CCC)

- Seul l'ordre des choses compte. Alors temps, espace et univers renaissent de leur dilutions successives
- Fins et débuts successifs se reconnectent en séquence

La théorie des cordes a aussi son mot à dire (pour mention seulement)

- Des cordes qui vibrent (résonnances) suivant des modes privilégiés correspondraient aux particules les plus élémentaires et aux échanges entre ces particules (idée séduisante).
- Nécessite un espace-temps avec au moins 11 dimensions (voire 23) dont 1 de temps pour avoir un sens .
- On peut travailler sur des sous espaces appelés (''branes'') utilisant un nombre limité des 11 (voire des 23) dimensions
- Une partie des différentes dimensions peuvent être repliées sur elles mêmes, potentiellement de manière différentes. C'est d'ailleurs ce qu'elle feraient.
- **Résultat: on aboutit à de très nombreuses combinaisons (>10^{500}),** voire bien plus, et donc de type d'univers (valides ou non)
- Théorie très puissante, mais d'une complexité ''extrêmement extrême''
- Reproche fréquent: ''elle prévoit tout et n'importe quoi''.(??)



Dimensions repliées: Ex Espace de Calabi Yau

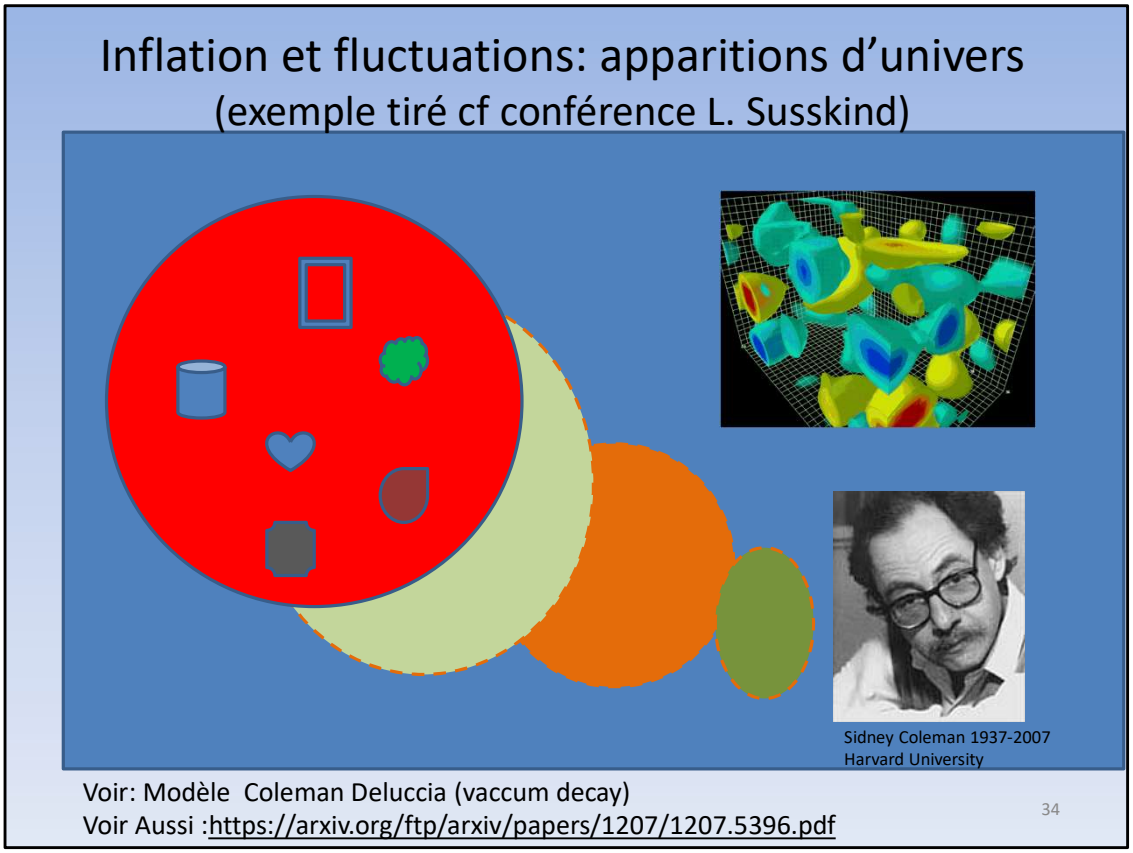
Et quid de la fin des haricots alors? Evolutions à très long terme, quelques pistes

- Avec l'expansion, et si elle se poursuit: toute la matière devrait finir par disparaitre (évaporée, déchirée,…)
  - Il ne resterait plus de matière (baryonique ou noire: donc densité ρ=0
  - A terme il ne resterait alors que du vide
  - Mais si vide (type bien vide) → $(H = \sqrt{\frac{\Lambda c^2}{3}} = \frac{\dot{a}}{a})$
  - C'est toujours une croissance exponentielle? (*) :
  - Vide = fluctuations de ce vide, et statistiquement apparitions de ''bulles'' (durée en x Aeons??)
  - Si ces ''bulles'' sont créée, alors ça repartirait de rien…….. (???):
  - Dépendrait des paramètres environnants
  - Alors des univers devraient réapparaitre (spéculatif) et le temps aussi
  - etc..

(*)= un espace dit de ''de Sitter''

33

Rappel le temps de trajet (temps propre) pour un photon est toujours zéro, comme la distance propre parcourue..



En 1970 Sidney Coleman et son équipe mettent en évidence que dans de telles conditions: de temps en temps, même si c'est très rare et donc peut prendre beaucoup de temps en moyenne, une bulle, peut se former (à partir des variations quantiques du vide), voire plusieurs de ces bulles.

Dans cette bulle les propriétés de l'espace sont un peu voire assez différentes de celle de l'environnement. Ainsi des ''bulles'' aux caractéristiques variées sont appelées à se former, certaines à se développer plus ou moins, d'autres disparaitront plus ou moins rapidement. Dans un tel environnement on peut s'intéresser à ce qui peut se passer en appliquant un ''principe de médiocrité'' à un ensemble quasi infini de tels univers.
Pour être observés il faut que ces univers permettent l'apparition d'observateurs donc en particulier que l'ajustement des paramètres ait été particulièrement fin (alias ''the fine tune problem / infinite multiverse'') mais aussi dans un modèle de ''médiocrité'' qu'émerge '' une ''motivation'' pour de telles observations (voir discussion sur Multivers médiocre dans l'article mentionné ci-dessus). Par construction, le principe d'un multivers non fini semble permettre à de telles conditions de se produire naturellement voire même partiellement puisque nous humains ne pouvons observer qu'une partie de notre univers appelé Univers visible. .

Exemple: évolution long terme Univers vers type CCC

- Expansion, à long terme l'univers observable se vide + ou- rapidement:
  - Si courbure positive: ->> Ecrabouillés (Crunch…)
  - Si courbure négative: ->> Dispersés (Pfttt…)
  - Si courbure plate: Expansion accélérée continue (Pfttt aussi? ..)
- Ultime évolution probable (si pas de changement dans le modèle)
  - Galaxies s'éloignent au delà de leur sphère de Hubble "on les perd de vue" (et causalité)
  - Les étoiles consomment leur énergie , formation de trous noirs
  - Les trous noirs finissent par s'évaporer
  - L'univers se trouve vidé

Alors il ne resterait rien !!! (??)

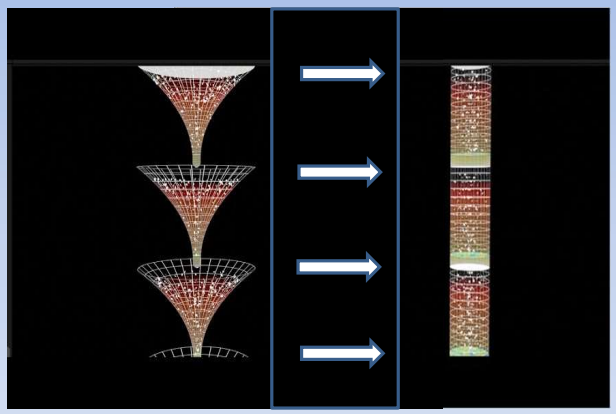
- PAS TOUT A FAIT.. ! Il resterait au moins le vide (cf pl 25) … et ses fluctuations
  - R. Penrose -→ AEONs & AEONs of time -> la masse disparait donc le temps et les échelles (et les distances) aussi.
    - ✓ Goggle year (10^{100} ans)
    - ✓ Goggleplex ($10^{10^{100}}$ans)
  - **Seul l'ordre des choses devrait garder un sens**, et les échelles elles peuvent donc disparaitre (Conformal Cosmology..)

35

Rappel le temps de trajet (temps propre) pour un photon est toujours zéro, comme la distance propre parcourue..

CCC: ''Conformal Cyclic Cosmology''
Sir Roger Penrose

https://www.youtube.com/watch?v=sM47acQ7pEQ



- Phase initiale de chaque ''Aeon'' (temps et espace) sont indistinctes dans la même géométrie: t=0 non matérialisé)

(Tentative)

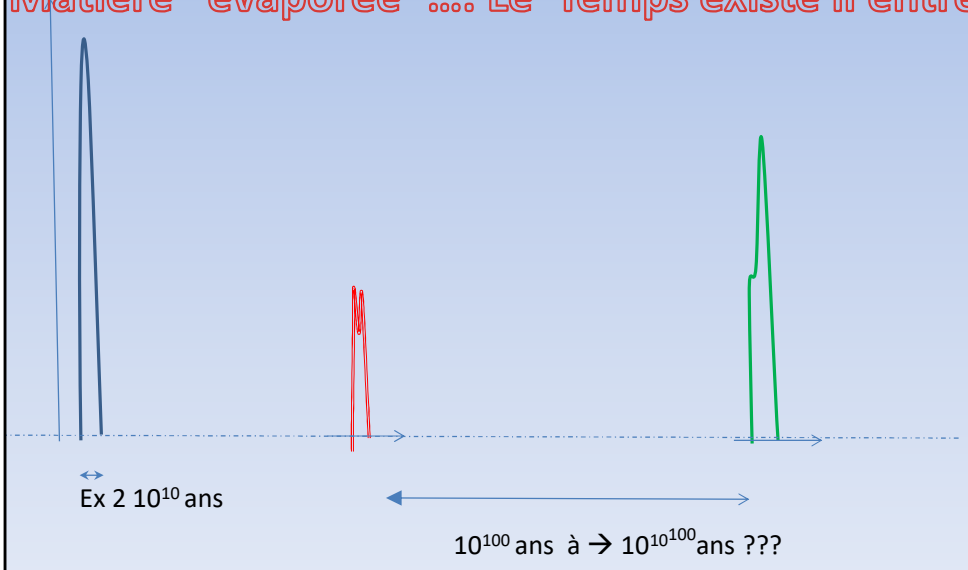
- Etape finale de l'expansion: la matière disparait => Bouleversement temps et espace: *l'énergie/ le temps disparaissent. Les distances perdent leur signification. Alors:*
- Reste une structure ''conforme'' d'Univers (seul l'ordre conservé)
  - Temps: Succession temporelle
  - Espace: Ordre des positions
- CCC= Evolution cyclique (durée des cycles =''Aeons'').
- Chaque période (Aeon) se ''raccorde'' ici à la précédente de manière plutôt sympathique (partie gauche). Ceci est dû à la transformation ''conforme'' et de la géométrie proposée .

$a(t) \sim e^{\left(\frac{\Lambda}{3}\right)^{\frac{1}{2}} t}$

Rappel au passage: Leibniz (1646-1716): l'espace est l'ordre des choses qui coexistent, le temps est la succession des choses qui coexistent''

CCC: successions aléatoires dans et entre de longs vides??

Matière "évaporée"…. Le Temps existe il entre??????

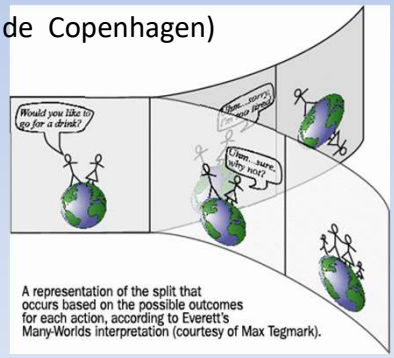


37

''Many-worlds Interpretation'' : l'univers quantique d'Hugh Everett (in 1957)

- Mécanique quantique, superposition d'états: l'Interprétation de H.Everett (''Wave functions don't collapse''):
- Des Univers distincts se séparent chaque fois qu'un choix (expérience) est effectué parmi les possibles, **et ils continuent leur chemin séparément**
- Nota: l'observateur/ témoin fait aussi partie de l'expérience
- On aboutit aussi à une infinité d'univers //
- Contraire = Interprétation habituelle (dite de Copenhagen)

Source: planète animale



Many-worlds d'Everett

Une autre façon, non exclusive, de regarder le Multivers.

Cf: Arvin Ash https://www.youtube.com/watch?v=OjrEudqgZ1M&t=508s

Une fantaisie perso inspirée assez librement d'une conférence de L.Susskind (*)

Multivers et nous (1)

''500 million de petits univers et moi et moi et moi. Je suis..''

Source: L.Susskind
(Conference « Time is a one way street » Santa Fe 26/06/2013)

https://www.youtube.com/results?search_query=Leonard+Susskind+Santafe

(1) Plus un dénommé J. Dutronc

39

Retour en Phase zéro: mode style expansion:

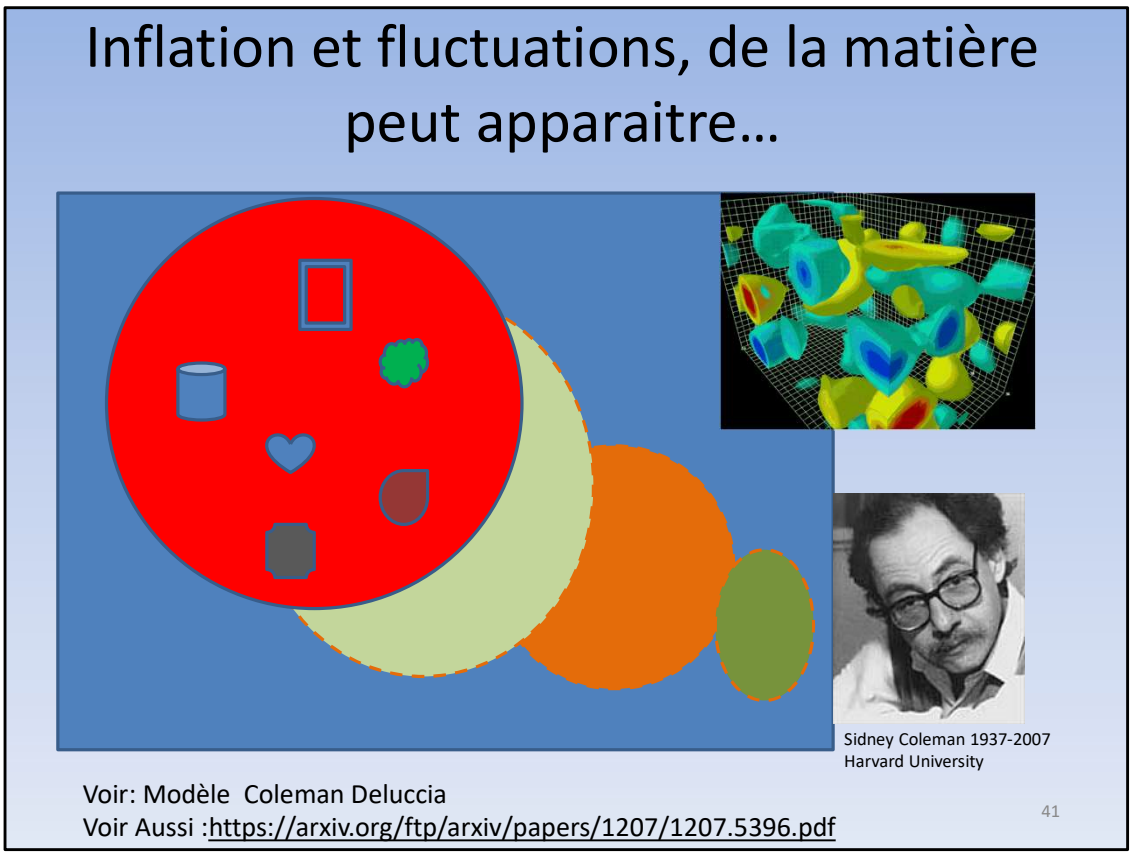
L'espace vide en expansion **exponentielle** rapide et continue (Λ : ''constante cosmologique'' non nulle)

On rappelle que cela veut dire que la taille de l'Univers double à intervalles réguliers (même s'il est complètement vide) (si!)

Universe from nothing (ou presque) → Pocket Universes

40

On se place dans une hypothèse multivers. Donc pendant une phase inflationnaire , exponentielle.



En 1970 Sidney Coleman et son équipe mettent en évidence que dans de telles conditions: de temps en temps, même si c'est très rare et donc peut prendre beaucoup de temps en moyenne, une bulle, peut se former (à partir des variations quantiques du vide), voire plusieurs de ces bulles.

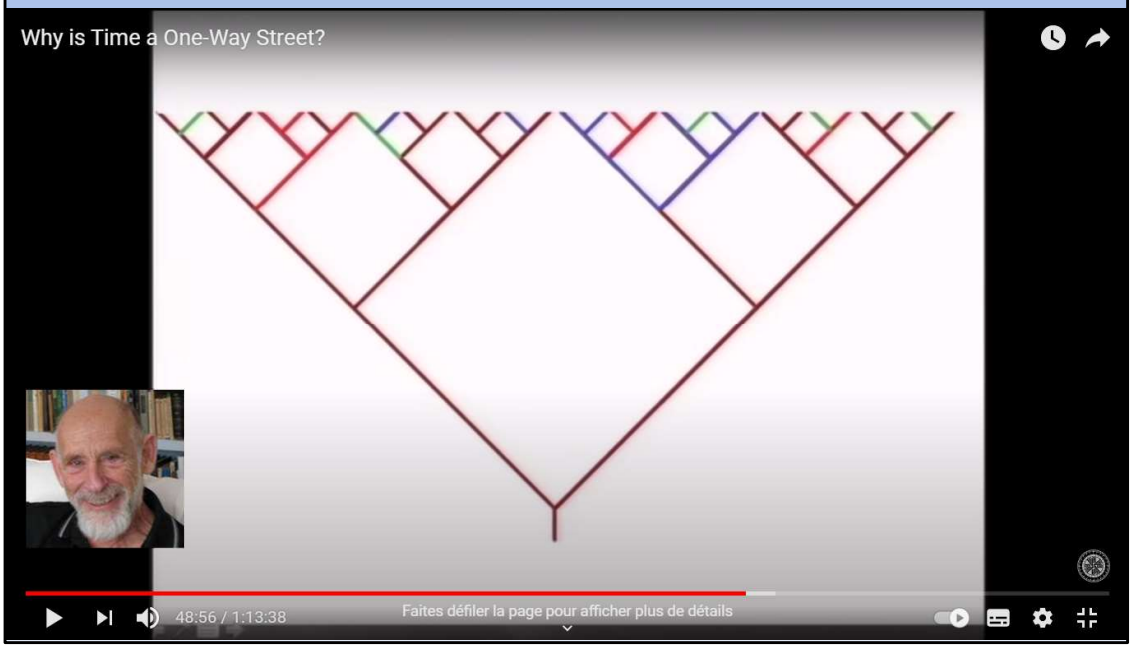
Dans cette bulle les propriétés de l'espace sont un peu (voire assez) différentes de celle de l'environnement. Ainsi des ''bulles'' aux caractéristiques variées sont appelées à se former, certaines à se développer plus ou moins, d'autres à disparaitre plus ou moins rapidement.

Dans un tel environnement on peut s'intéresser à ce qui peut se passer en appliquant un ''principe de médiocrité'' à un ensemble quasi infini de tels univers.

Pour être ''observés'' il faut que ces univers permettent l'apparition d'observateurs donc en particulier que l'ajustement des paramètres ait été particulièrement fin (alias ''the fine tune problem / infinite multiverse'') mais aussi dans ce modèle de ''médiocrité'' qu'émerge '' une ''motivation'' pour de telles observations (voir discussion sur Multivers médiocre dans l'article mentionné ci-dessus). Par construction, le principe d'un multivers non fini semble permettre à de telles conditions de se produire naturellement voire même partiellement puisque nous humains ne pouvons observer qu'une partie de notre univers appelé Univers visible. .

Multivers: Exemple simplifié (d'après conf L. Susskind)

https://www.youtube.com/results?search_query=Leonard+Susskind+Santafe (à env 48 minutes)

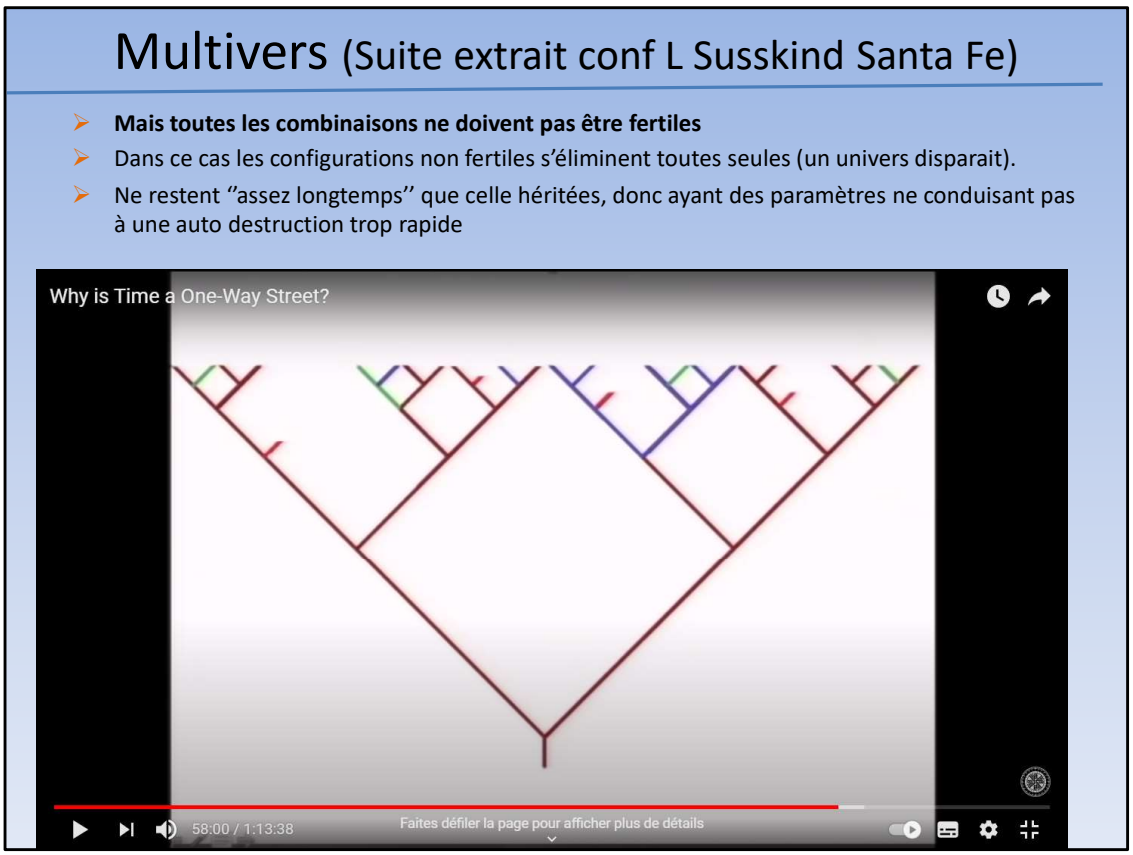


Prenons un modèle simple dans lequel au cours de la phase d'inflation l'espace double en moyenne toutes les τ secondes (c.a.d.un processus exponentiel). Les caractéristiques de chaque nouvel univers (chaque partie ainsi créée) dépendent des conditions physiques au moment de sa ''matérialisation'': (de nouveaux équilibres physiques, lois. Les couleurs représentent donc ces variations de paramètres physiques fondamentaux (e.g. charge de l'électron, masse du proton, neutrino,… courbure de cet espace etc..)….

Partons d'une situation initiale (en bas) partie d'un tel univers. Dans ce multivers simplifié des bulles d'univers se forment les unes après les autres (la succession correspondant au temps évoluant vers le haut).
Des branches apparaissent donc de manière aléatoire (trop difficile à représenter donc dessin simplifié), et chaque branche a des caractéristiques propres ou héritées (un peu comme nos enfants) ce que ne représente pas le schéma qui n'a volontairement pas d'échelle de temps non plus (durées entre désintégrations/ruptures de symétries successives donnant lieu à une nouvelle branche sont en principe bien aléatoires).

Multivers: des univers à ne plus savoir qu'en faire?

- Evolution des paramètres spécifiques à chaque matérialisation possible à chaque embranchement:
  - Suivant conditions antérieures et conditions au moment de l'embranchement (e.g. naissance de la bulle)
  - On aboutit ainsi a une multiplication exponentielle des types d'univers
- Au bout de n fois on a → $(2^n -1)$ univers (progression exponentielle)
  - C'est une vraie machine à variations, et à priori sans limite…
  - Une telle dispersion statistique aboutit à une dispersion et un désordre maximal.
  - Que peut on en déduire? INTERET ??? (RIEN)
- Il manque clairement quelque chose….

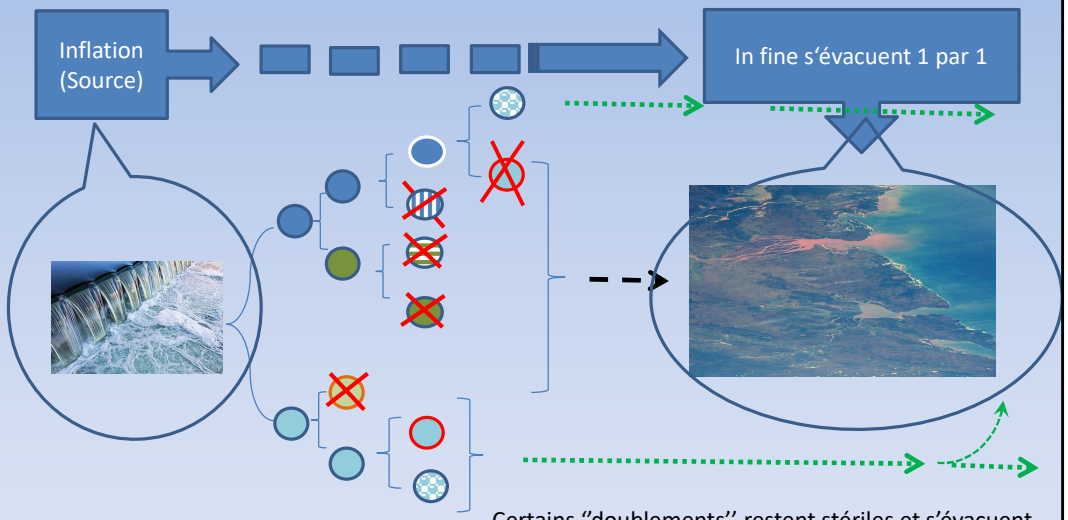


Tous les univers ne sont pas viables, certains disparaissent, se replient, se dispersent quasi instantanément au moment de leur naissance (Pffft!) ou s'écrasent prématurément (crunch), d'autres s'auto détruisent en raison de leur contenu ou d'une évolution hasardeuse, (ex en jouant avec des bombes H, ou parce que des monopoles auraient eu le temps de se former au moment même de leur éclosion).

Si on met tout ça sous forme d'équations, on obtient celles d'un processus connu dit de ''Markov'' qui décrit un flux sélectif (bas vers le haut) ou seule une partie des possibilités se matérialise et pour un temps déterminé. (voir la vidéo Léonard Susskind)

Un Flux et des variations

- Ex: Doublement de l'espace toutes τ(?) époques en moyenne: **(l'Inflation + Instabilités)** devient une ''Source'' de création



Les combinaisons ''stables'' perdurent quelques temps, et peuvent permettre l'apparition des nouvelles formations..

Certains ''doublements'' restent stériles et s'évacuent rapidement
D'autres conditions sont plus stables, et perdurent, et/ou peuvent ne pas être stériles

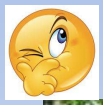
Multivers: Source + embouchure = courant:
des variations, un sens unique vers le futur (entropie) et de multiples tourbillons générateurs d'aléas

On trouve ainsi (L.Susskind) une source qui ruisselle et des turbulences multiples qui s'écoulent au cours du temps. Ces turbulences peuvent être uniques, et/ou **se répliquer de manière fractale**.

Une note en passant: rien ne remonte ce courant de bout en bout (''time is a one-way street ''), un temps qui s'écoule de manière globalement continue, des aléas variés et très nombreux (''fractal flow''): Une diversité quasi auto entretenue.

Et un challenge: trouver une certaine stabilité, au moins au processus car le reste semble avoir une durée bien précaire.

Alors ces Univers pourraient aussi pousser ‘’comme ils peuvent’’ au grès de conditions (x,y,z..)



- **même si ces conditions sont exceptionnellement rares**
- Si et quand elles se présentent
- Tant qu’elles restent favorables voire supportables (**principe de médiocrité**)

- Aléas et diversité
- Opportunisme quasi certain
- Dynamique,
- Stabilité vraisemblablement limitée dans le temps, quel ‘’temps’’ au fait?

47

Complexité, et évolution dynamique, tri de solutions viables (même très temporairement)..

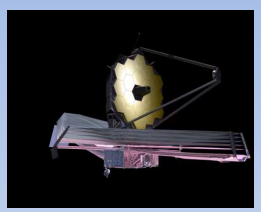
- Se développer lorsque les conditions sont favorables, même très lentement
- Conditions différentes = univers différents, viables ou pas, périssables?
- Conditions défavorables = au mieux passer son tour, disparaitre?

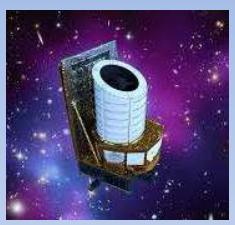
Alors (interprétation libre 10000% spéculative) ''somewhere in a galaxy far far away…'' **;-)** et dans ce multivers…

des fous-rescapés (d'un Bang ou d'un autre) prennent grand plaisir à titiller ''leur curiosité et leurs jouets''

Photo Quasar 95

IV) Pour conclure... JWST/Euclid etc..: Heureusement que l'on trouve des choses inexpliquées



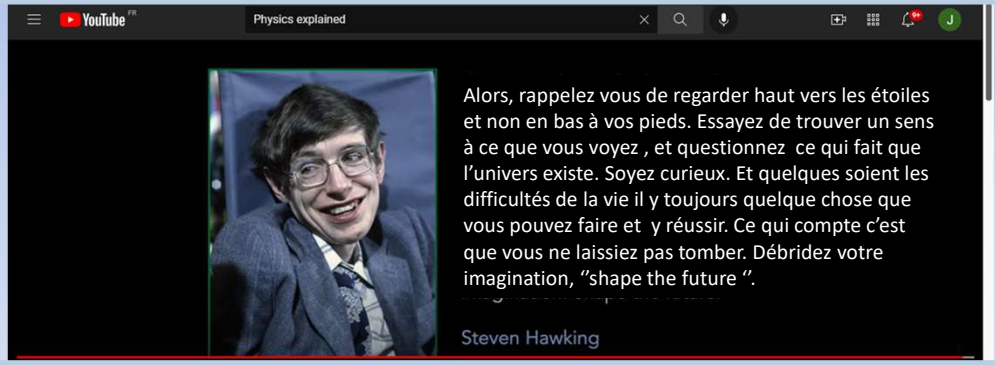


- Conçus et lancés pour vérifier les théories et ce qui doit se passer dans une zone jusque là inexplorable
- Questions quant à l'exactitude/ corrections nécessaires à notre ''modèle standard'' en dépit de ses prévisions extraordinaires ''hot Big bang''
  - Expliquer les tensions / expansion de l'univers (H_0)
  - Anomalies concernant l'existence même, et la formation rapide (???) de premières galaxies massives pendant la période des âges sombres (rythme ?)
  - Besoin de consolider/réviser ce modèle en particulier période des ''âges sombres''/mesures
  - L'âge de l'Univers est il en question? Ex Λ, … variable?
  - Plusieurs théories s'affrontent toujours
- **On apprend**

Des tendances …..?

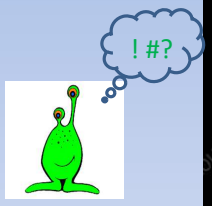
- Question existentielle de ‘’Avant’’ et aussi ‘’Après’’
- Pourquoi ‘’nous maintenant’’? Alors que la probabilité est infinitésimale
  - Qu’est-ce que ‘’maintenant’’ peut avoir de si spécial que nous y appartenions?
- Les idées de Multivers apportent de nombreuses ouvertures et pistes de réflexion
  - Des univers séquentiels?
  - Parallèles?
  - Les deux ?
  - Ad infinitum?
- A confirmer/infirmer

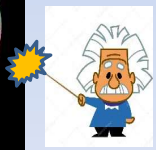
Encouragements et petit mot de Steven pour terminer



Source : Physics Explained https://www.youtube.com/watch?v=5kuRatz2rj0
The Planck scale: is there a limit to space and time?

Merci!





53

Annexe:
Quelques planches de support

54

Modèle dit ΛCDM: l'Univers et son contenu

- La constante de Hubble exprime la variation relative de cette échelle a(t))

$$H(t) = \frac{\dot{\boldsymbol{a}}\,(t)}{a(t)}$$

Km/s

MParsec

- H(t) dépend du contenu de l'univers
- Pour le modèle dit ΛCDM les constituants sont
  - Les photons
  - La matière (baryonique et la matière noire)
  - Et l'énergie dite ''noire'' (Λ)
  - + (…?)
  - Et H(t) varie dans le temps selon le contenu de l'Univers

55

Les deux premières composantes tendent à ralentir l'expansion (ex de la balle qu'on lance en l'air)
La 3 eme accèlère l'expansion (1998 A Riess & al.) . Assimilée à l'énergie du vide elle serait donc cumulative : plus deux galaxies sont éloignées plus il y a de vide entre elles et donc plus cette énergie les repousserait. A partir d'une certaine distance cette répulsion compense , puis dépasse la gravité, l'accumulation de vide augmente la répulsion de + en +.

Des modèles pour essayer d'expliquer cette accélération
La R.G. au cœur de la question

Géométrie (courbure, etc)

$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

Masse et Energie

2×10^{-43}

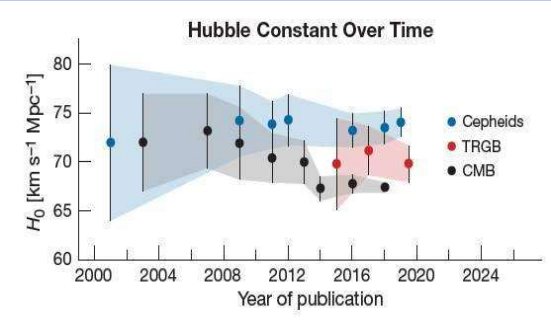
Géométrie ⟷ Répartition contenu (Energie)

56

MAIS Oct. 2019 **Première Tension** sur la mesure de la vitesse d'expansion de l'univers (H)

- Initialement: plusieurs méthodes, résultats se recouvrent bien
  - Mais incertitudes initiales (ex des mesure directes de distances (SN1a))
- Mais après améliorations successives des mesures, les résultats/marges d'erreurs deviennent incompatibles

- Nouvelles méthodes de mesure considérées
  - Ondes gravitationnelles?
  - Quasars ?
- Et/ou modification du modèle? (incomplétude et/ou nouveaux éléments)

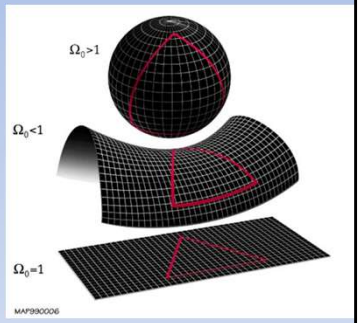


Source: Hubble tension Wikipedia

Adam Riess 2019: New Measurements of the Expansion Rate of the Universe
https://www.google.com/search?q=adam+riess+univers+mesure+expansion+univers&sca_esv=578775818&rlz=1C1PRFC_enFR756FR756&sxsrf=AM9HkKlcUsyFRL9jys1kAhw0as0RlQ0gzA%3A1698920167348&ei=53ZDZaDZFISYkdUP4ryVYA&oq=Adam+Riess+mesure+expansion+univers&gs_lp=Egxnd3Mtd2l6LXNlcnAiI0FkYW0gUmllc3MgbWVzdXJlIGV4cGFuc2lvbiB1bml2ZXJzKgIIADIKECEYoAEYwwQYCkjlVVC_C1jELnABeAGQAQCYAYQBoAHHB6oBBDEwLjG4AQHIAQD4AQHCAgoQABhHGNYEGLADwgIIECEYoAEYwwTCAgUQABiiBOIDBBgAIEGIBgGQBgg&sclient=gws-wiz-serp#fpstate=ive&vld=cid:dc08a686,vid:pSQ8tY7YNlU,st:0

Notre Univers: est il plat ou courbe??

- Un univers ''plat'' est un univers dans lequel:
  - Pythagore ''marche'' (cf maths de 4ème 3ème)
  - La somme des angles d'un triangle fait 180°
  - La circonférence d'un cercle fait $2\pi R$
  - *Mais aussi: le ''transport parallèle'' est invariant.*
- Dans les autres cas on constate une ''courbure''
  - A) positive (cas de la sphère en 2 dimensions)
  - B) négative (cas de la selle de cheval en 2 dimensions)
  - Nulle (ex une feuille de papier A4, même enroulée). La courbure peut être locale (ex mouvement des planètes autour du soleil)
- Si elle existe, la courbure d'Univers est invisible à notre échelle.



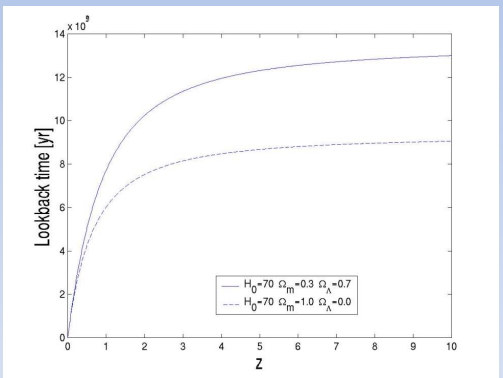
- Attention Challenge: valeur de la courbure aux tous premiers instants et l'évolution aujourd'hui (1)

(1) Voir P.J.E Peebles: Principles of Physical Cosmology

58

Par définition un **univers ''plat''** a une **courbure nulle :** Pythagore marche, la somme des angles d'un triangle fait 180° etc etc..etc.. On a pu vérifier que notre univers est très plat. Il reste que les mesures de courbures à partir du CMB sont délicates. Les dernières mesures seraient en faveur d'une courbure très légèrement positive. Cela signifierait que l'Univers aurait une taille finie, cependant bien plus grande que la partie visible de notre univers (Univers observable).

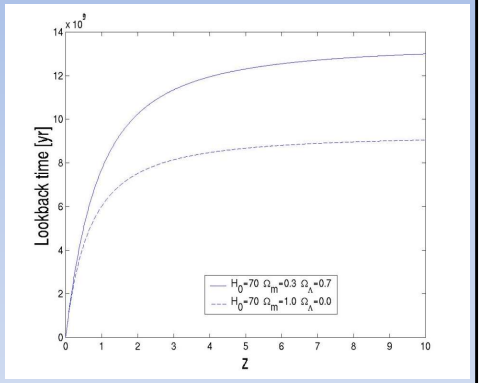
Redshift Vs distance



- Age calculé de l'Univers dépend de son contenu
- Noter que le CMB est autour de Z =1000
  - Signal du CMB: décalage d'un facteur 1000
  - Lumière (optique) -> ondes millimétriques

Mesurer avec Z (Doppler dû à l'Expansion)

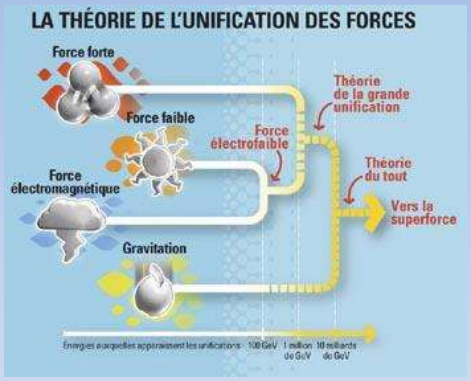
- Redshift est dû à l'expansion (*)
- Mesures de distances des Etoiles et galaxies lointaines et de leur redshift
- Traduction en distance (a.l.) dépend du contenu (voir figure)
- JWST permet une exploration + profonde (I.R étendu) des débuts de l'univers
  - I.R.
  - Meilleure définition (images)
  - Période dite de Réionisation
  - Voire des ''ages sombres'', alias ''dark ages''
- Euclid: Focalisation effets matière noire et énergie noire

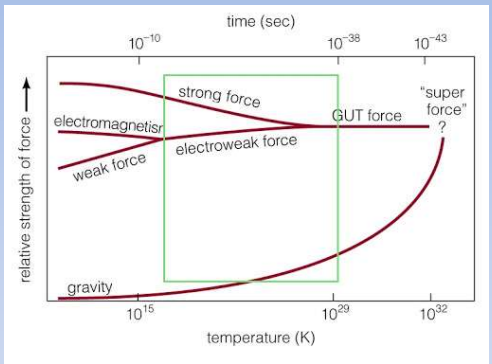


Redshift et distance (lookback time) dépend aussi du contenu

(*) Même si certains reviennent à l'idée de lumière ''fatiguée'' introduite par F.Zwicky

GUT & TOE: La physique des particules nous dit qu'à très haute énergie: leptons, gluons, quarks avaient unifié leurs forces puis se sont séparés



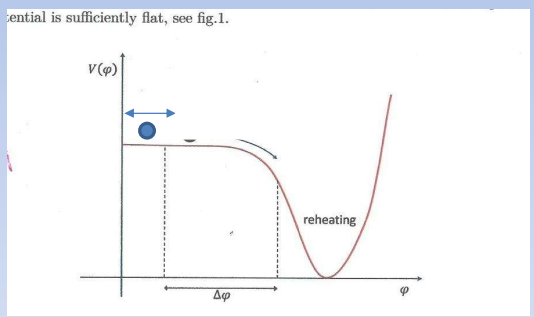


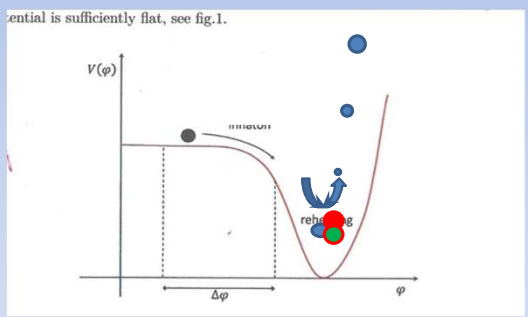
- On ne sait pas recréer de telles conditions en laboratoire:
  - CERN: Il manque au moins un facteur 10^{15} (1 000 000 000 000 000)
  - TOE(Théorie du tout): L'anneau du CERN loin de faire les 1000 années lumière de diamètre nécessaires aux expérimentations à ce niveau d'énergie.

Difficile de tester des modèles sauf à faire des simulations sur des super calculateurs

Inflation: Le modèle ‘’Slow roll’’ / Inflaton Field (Extrait simplifié)

matière





Source: Guzetti & all: Gravitational waves from Inflation