

L'univers

aux limites de l'éternité

Alain Riazuelo

Institut d'astrophysique de Paris

riazuelo@iap.fr

Plan

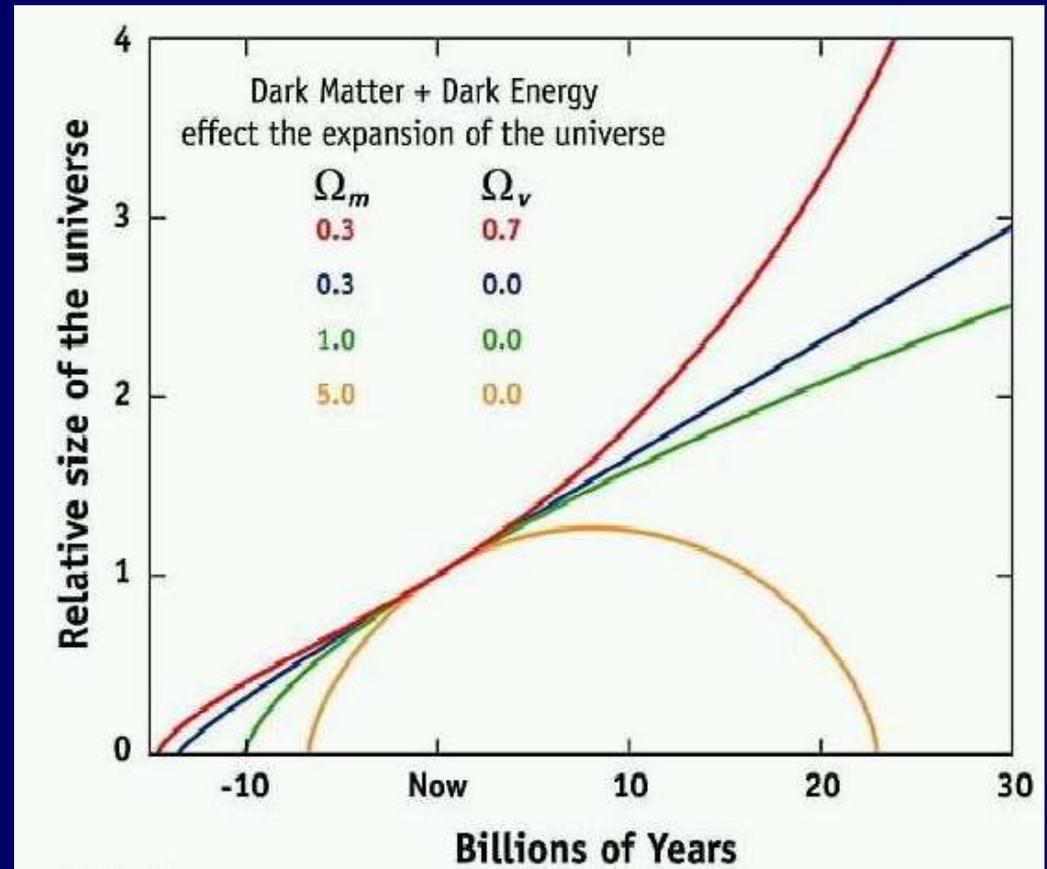
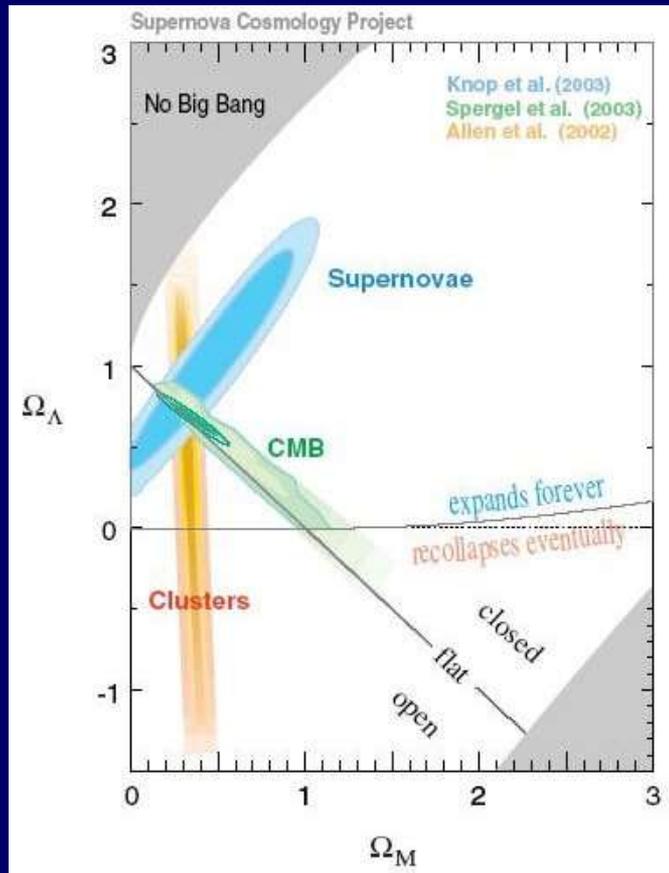
- Notations
- Les hypothèses sur l'évolution de l'Univers
- Futur proche
- Evénement certains
- Nouvelle physique et quelques conséquences
- L'hypothèse de l'accident
- Conclusion

Les hypothèses sur l'évolution de l'Univers

La dynamique de l'expansion

- L'Univers est en expansion
- Son taux d'expansion évolue suivant son contenu matériel
- Il peut décroître, voire s'annuler pour laisser place à une phase de contraction (Big Crunch)
- Il existe au moins trois composantes influençant l'expansion :
 - La matière ordinaire et la matière noire
 - L'énergie noire

Les trois dynamiques canoniques



A priori, l'expansion se poursuivra indéfiniment

- Sauf si les propriétés de l'énergie sombre changent radicalement au cours du temps
 1. soit parce que l'énergie sombre diffère de ce que l'on imagine,
 2. soit parce que nous l'interprétons en lieu et place d'une conséquence d'un univers inhomogène
- Hypothèse 2 assez peu populaire, pas forcément pour de bonnes raisons...

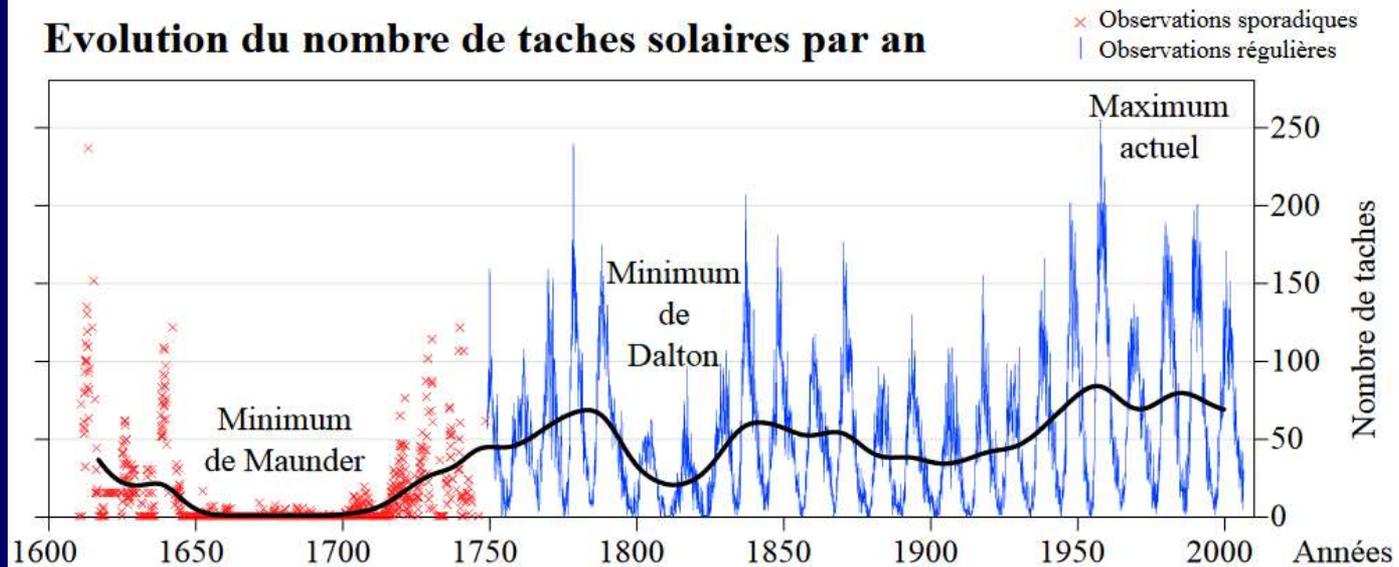
La fin de la cosmologie ?

- Dans le scénario canonique, l'expansion est sans cesse accélérée.
- L'univers observable acquiert une taille physique fixe (15 milliards d'al)
- Mais en 15 milliards d'années, les distances entre objets augmentent de 2,5 environ
- En 75 milliards d'années, elles ont augmenté de 100 et en 150 milliards de 10000
- Le nombre de galaxies présentes dans l'univers observable décroîtra de 10^{12} à 1 dans cet intervalle...

Sur l'universalité des lois de la physique (1)

- Les lois physiques sont difficilement testables en laboratoire sur de longues durées
- Deux exemples :

Evolution du nombre de taches solaires par an



Plus de 400 ans d'observation désormais

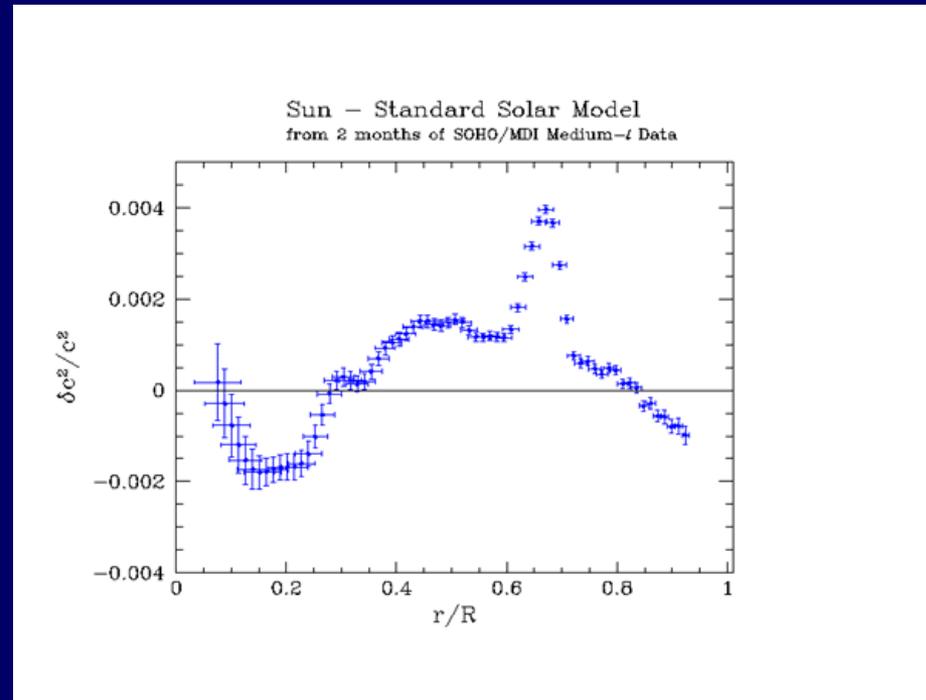
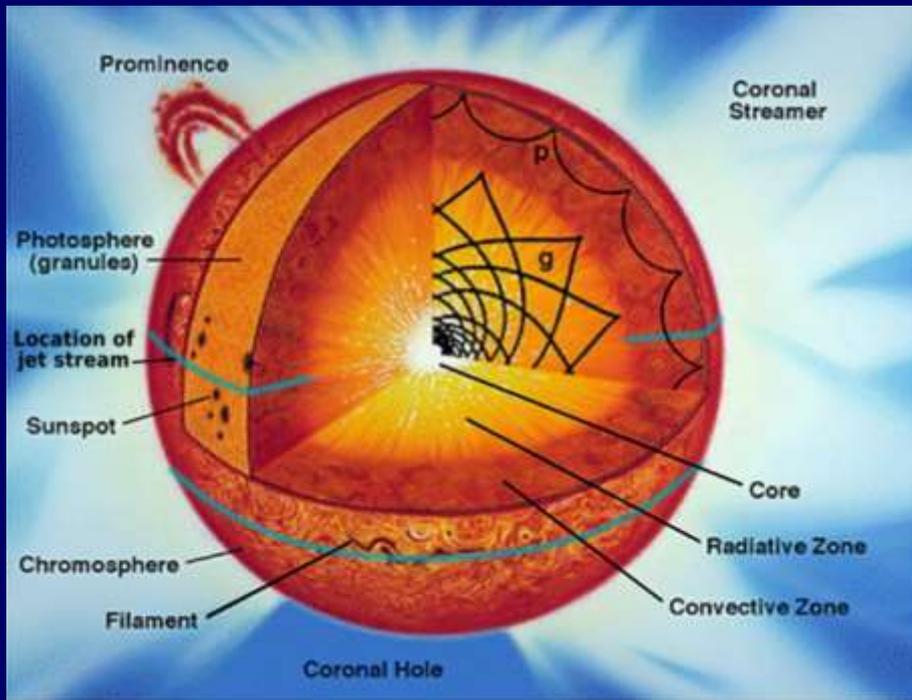


- Expérience de la goutte de poix, commencée en 1927. La huitième goutte était attendue pour 2013.

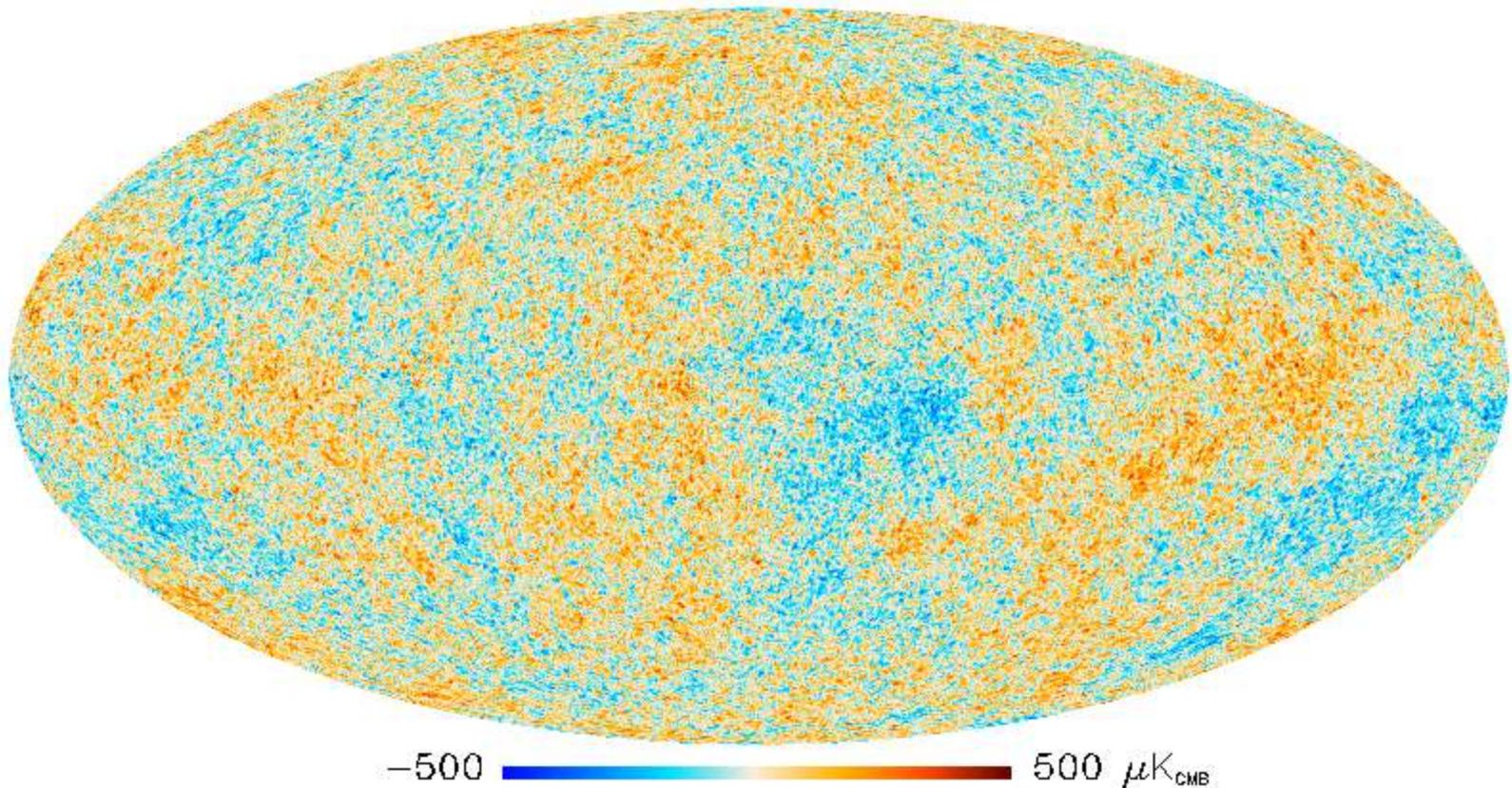
Sur l'universalité des lois de la physique (2)

- Nécessité de chercher dans la Nature des processus longs
- Mais souvent dépendants d'une modélisation complexe

Exemple : confrontation des propriétés observées du Soleil (SOHO) avec sa modélisation la plus précise



Autre exemple : le rayonnement fossile \rightarrow universalité des lois de la gravitation et de l'électromagnétisme entre 370 000 après le Big Bang et aujourd'hui... sous couvert que de la physique inconnue (matière noire) est à l'œuvre.



Un rare exemple propre : le réacteur nucléaire naturel d'Oklo (Gabon) → test extrêmement précis des lois de la physique nucléaire il y a 1,7 milliard d'années

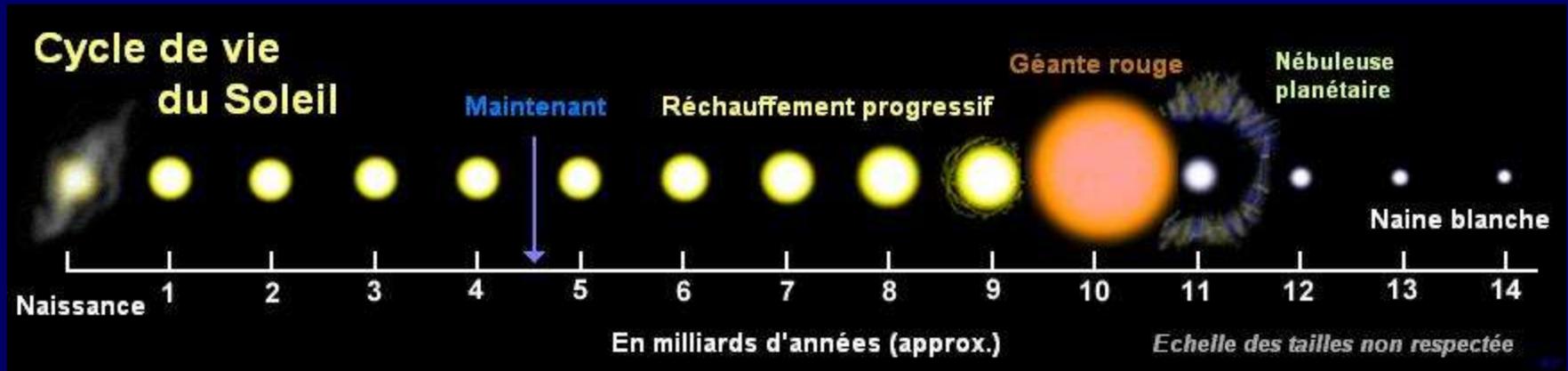


Futur proche

La fin de la vie sur Terre

- L'eau passe parfois par la haute atmosphère, où elle est partiellement dissociée par les UV du Soleil, de plus en plus intense du fait de son évolution
- L'hydrogène, très léger, est susceptible de s'évaporer de l'atmosphère
- $t_{\text{vie}} = 2$ milliards d'années

L'autre fin de la vie sur Terre

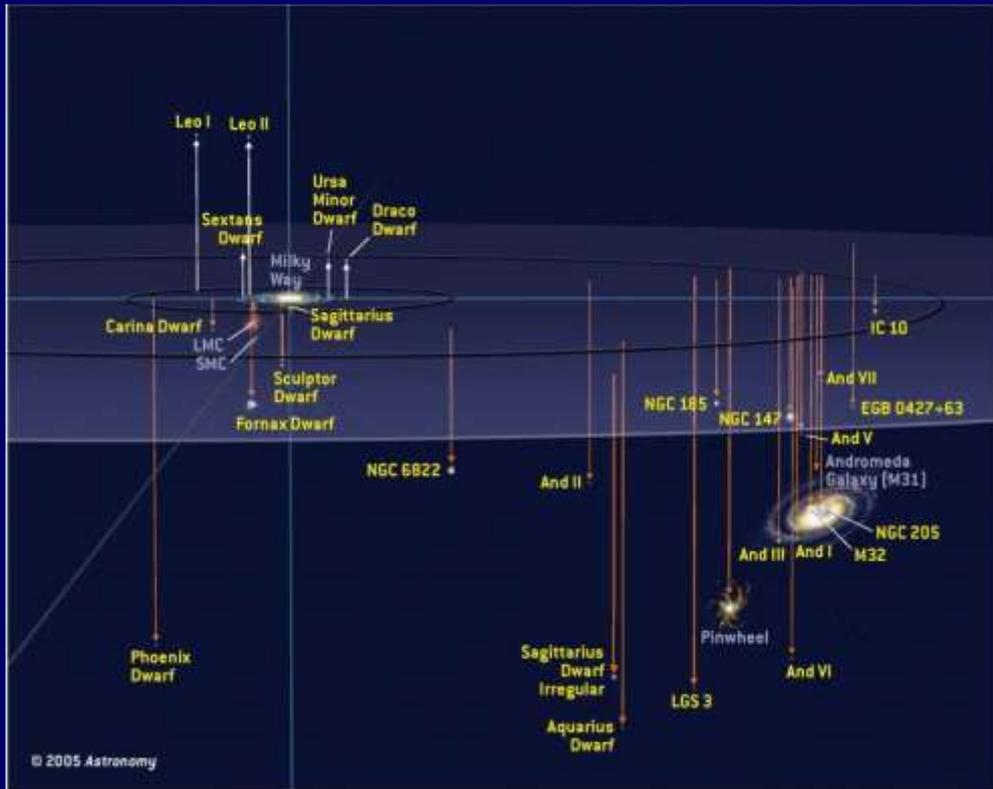


- L'évolution du Soleil va lui faire atteindre le stade de géante rouge, où son diamètre va augmenter considérablement
- Dans des proportions comparables à la taille de l'orbite terrestre
- Mais avec des pertes de masse qui vont diminuer son extension et augmenter le rayon terrestre
- Peu de chances que la Terre soit physiquement détruite, mais sa surface deviendra une fournaise

L'ère des fusions galactiques

- Contrairement aux étoiles dans les galaxies, la distance entre les galaxies n'est pas très grande par rapport à leur taille
- Ex. : taille Voie lactée = 100 000 al, distance Voie lactée M31 = 2 000 000 al
- Alors que $d_{\text{Proxima}} = 2,5 \times 10^7 D_{\text{Soleil}}$
- Une première rencontre rapprochée entre nous et M31 est prévue pour dans quelques milliards d'années

Le Groupe local aujourd'hui et demain



Quelques événements « certains »

L'ère des étoiles (1)

- La durée du vie des étoiles est donnée par le rapport de l'énergie disponible, c'est-à-dire leur masse, sur le taux auquel elle la consomme, c'est-à-dire leur luminosité
- Une étoile deux fois plus massive que le Soleil est (environ) huit fois plus lumineuse et vit donc quatre fois moins longtemps
- Les étoiles les moins massives sont plus de dix fois moins massives que le Soleil, brillent moins de mille fois moins et vivent cent fois plus longtemps = **plus de 1000 milliards d'années** (10^{12})
- Les étoiles de faible masse sont encore plus économes que cela, d'où un **âge maximal de 10^{13} ans**.

L'ère des étoiles (2)

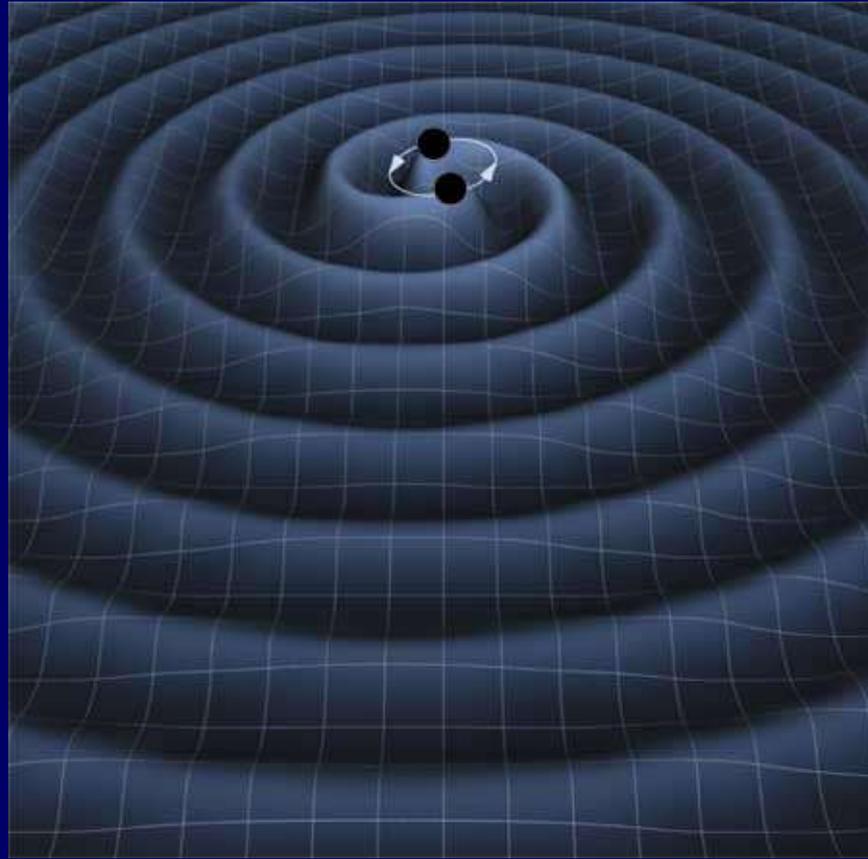
- Mais ce qui importe le plus, c'est de savoir pendant combien de temps les étoiles se forment.
- Cette formation est initiée par les ondes de choc des supernovae, qui sont issues d'étoiles massives, dont le tau de formation dépend de la composition du milieu interstellaire
- Les générations successives d'étoiles enrichissent le milieu interstellaire en éléments lourds, ce qui favorise la formation d'étoiles de moins en moins massives et ralentit donc ladite formation
- L'ère stellaire a peu de chances de durer beaucoup plus longtemps que la durée de vie des étoiles de faible masse
- Passé 10^{14} ans, les étoiles auront cessé de briller
- $f_{\text{Nb}} = 45\%$, $f_{\text{NB}} = 55\%$, $f_{\text{EN}} = 0,26\%$
- $M_{\text{Nb}} = 9,7\%$, $M_{\text{NB}} = 88\%$, $M_{\text{EN}} = 2,4\%$

La vraie naissance des planètes...

- Une rencontre proche entre deux étoiles ou cadavres stellaires est susceptible d'arracher une planète à son (cadavre d')étoile
- Pour une planète terrestre et une (ancienne) étoile de type solaire, $t_{\text{dét}} = 10^{15}$ ans

... et leur mort définitive

- Deux corps en orbite l'un autour de l'autre émettent des ondes gravitationnelles et perdent de l'énergie
- Cela use leur orbite et les fait se rapprocher
- C'est ce qui se passera pour les planètes qui seront restées liées à leur étoile parente



Pour la Terre et le Soleil, $t_{\text{coal}} = 10^{20}$ ans

L'ère des cadavres stellaires (1)

- Passée l'époque où mes étoiles brillent, les galaxies sont emplies de cadavres stellaires qui interagissent entre eux via la gravitation
- Le hasard des rencontres proches entre deux corps modifie les caractéristiques de leur orbite, donnant la possibilité à l'un des deux d'augmenter sa vitesse par rapport au centre galactique et s'en échapper



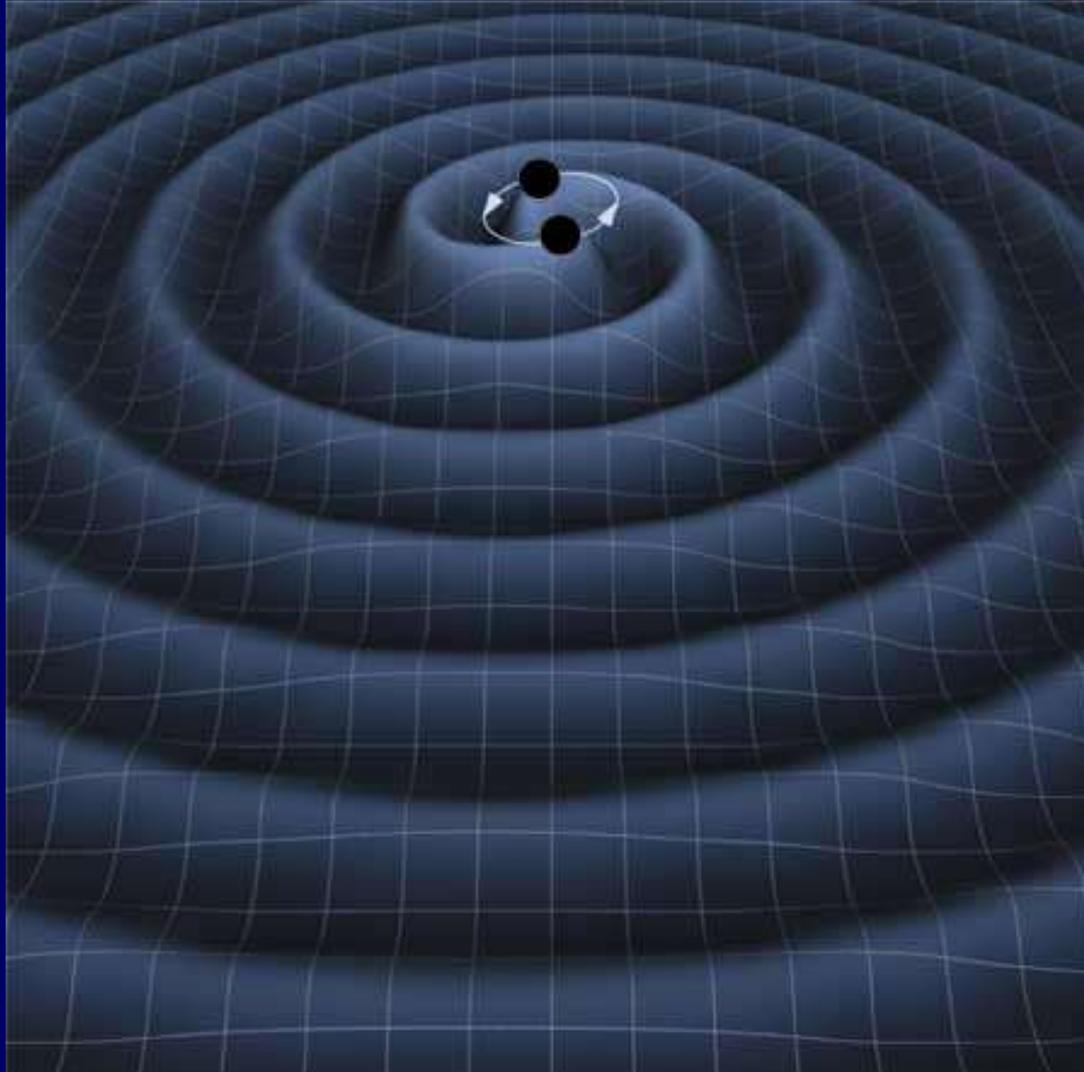
L'ère des cadavres stellaires (2)

- Le temps d'évaporation dépend du nombre d'étoiles, et de la taille de la galaxie, et de la présence ou non de matière noire
- Seule une petite fraction s'agglomère au centre (1% à 10%)
- Pour la Voie lactée et en l'absence de matière noire, le temps d'évaporation est de **10^{19} ans**
- En tenant compte de la matière noire, ce temps est (significativement?) plus long

La seconde ère stellaire (1)

- Passé 10^{14} ans, il n'y a plus d'étoiles, ni de possibilité d'en former de nouvelles par des moyens conventionnels
- Il reste cependant divers étoiles avortées, des naines brunes
- Certaines sont dans des systèmes binaires...

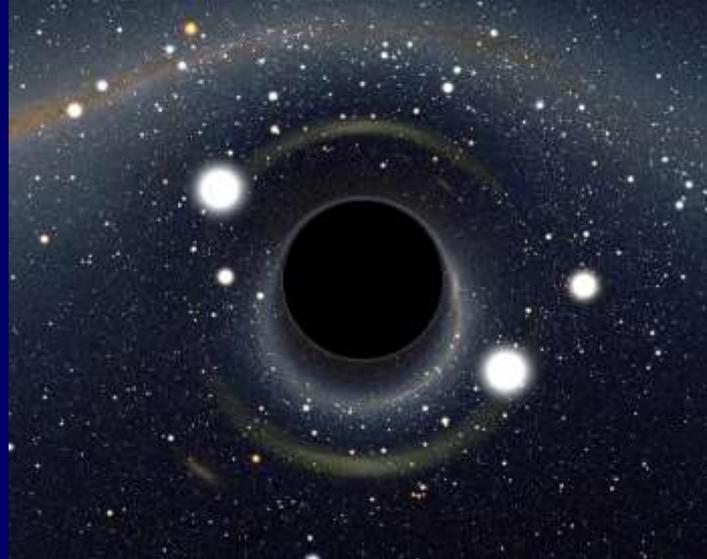
- ... qui vont finir par fusionner en (typiquement) 10^{22} ans



La seconde ère stellaire (2)

- Les coalescences de naines brunes sont trop lentes pour avoir lieu du vivant de la galaxie
- Au sein de la galaxie en cours d'évaporation, il faut espérer une rencontre très rapprochée donnant lieu à une collision
- Une telle collision finit par arriver en 10^{22} ans pour une naine brune donnée
- Mais il y a (sans doute) 10^{11} naines brunes, qui à l'issue de la collision peuvent vivre 10^{13} ans
- D'où une centaine de naines brunes devenues étoiles à un instant donné.

L'ère des trous noirs (1)



- Les trous noirs sont censés ne rien laisser échapper de la matière qu'ils engloutissent
- Mais les lois du monde microscopique indique que rien ne peut parfaitement être localisé dans l'espace
- Ce qui permet à la matière-énergie piégée par un trou noir de s'en échapper

L'ère des trous noirs (2)

- Le temps d'évaporation va comme le cube de la masse et pour un trou noir stellaire est de l'ordre de 10^{65} ans
- Les trous noirs supergalactiques ayant une masse de quelques pourcent de la masse d'un amas de galaxies (10^{14} masses solaires), le temps d'évaporation pour eux avoisine les 10^{100} ans

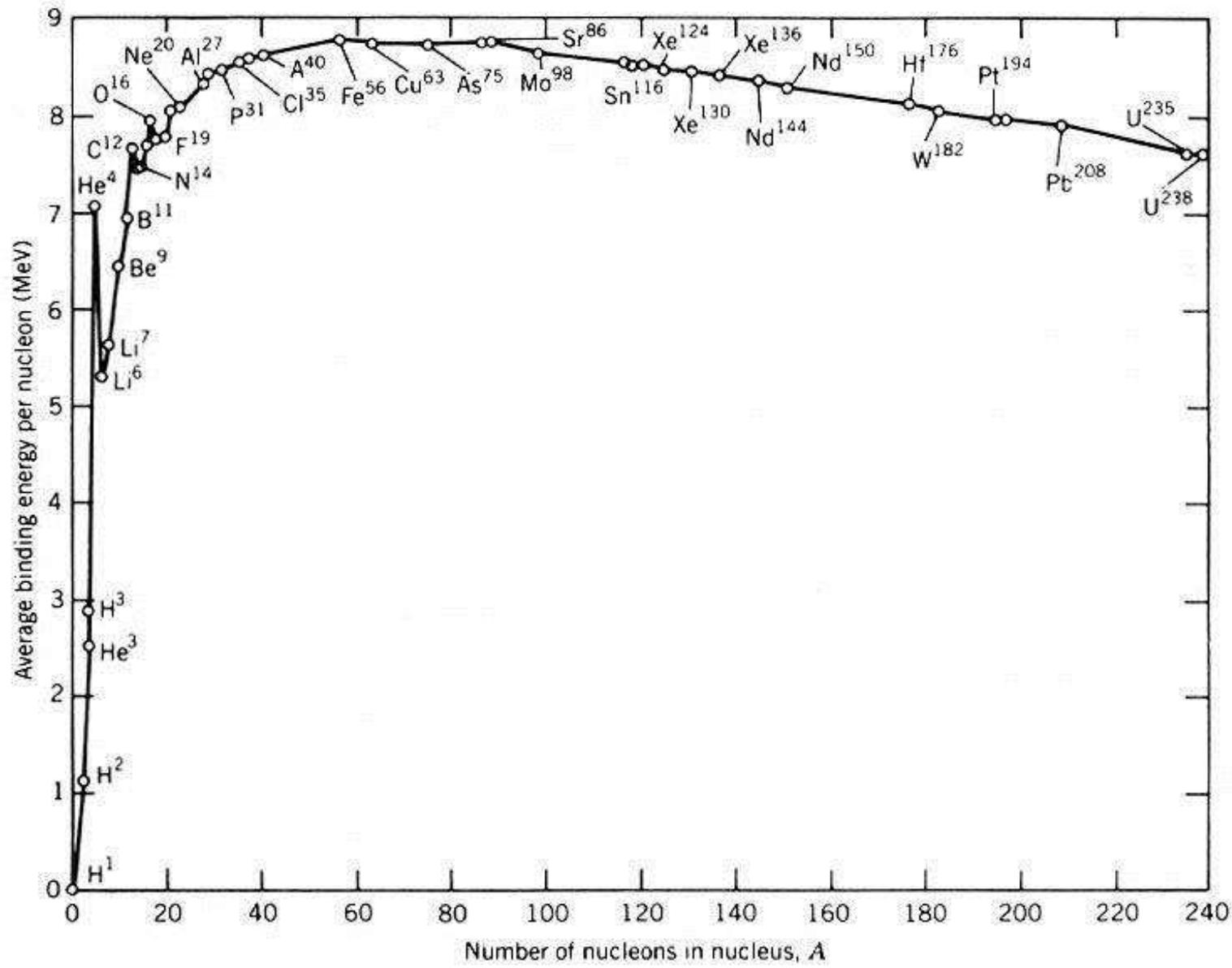
La matière solide est toujours... liquide



- La physique microscopique nous dit que même à température nulle, il y a toujours une probabilité non nulle de mouvements de matière
- Indépendamment de sa structure et de sa composition initiales, la matière en apesanteur finit par prendre une forme sphérique
- En un temps caractéristiques de 10^{65} ans (environ)

L'ère du fer (1)

- Le fer est l'élément le plus stable dans la Nature
- Les étoiles massives peuvent fusionner des éléments pour fabriquer du fer (fusion)
- Une centrale nucléaire casse des éléments plus lourds (fission)

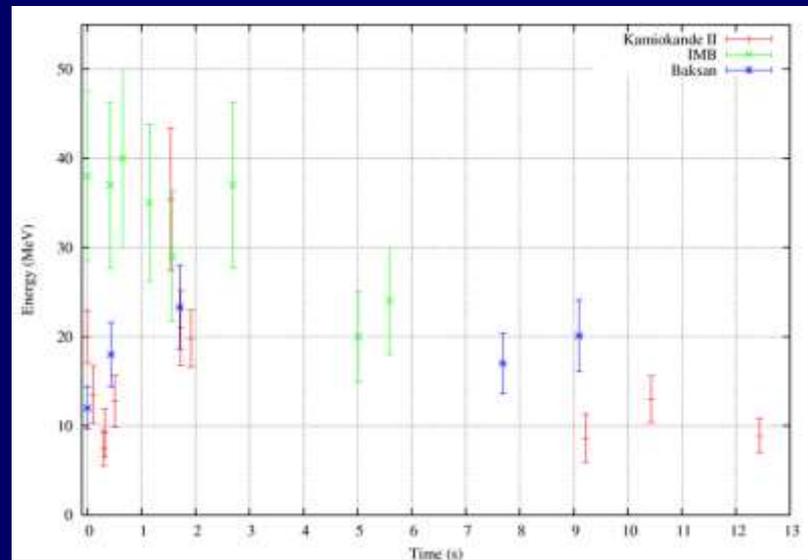


L'ère du fer (2)

- Ces réactions de fusion ou de fission nécessitent des conditions favorables (température et densité) pour se produire...
- Mais les lois du monde microscopique disent qu'il est toujours possible que même à température nulle deux noyaux atomiques légers se rapprochent suffisamment pour fusionner
- La fusion froide existe ! ...
- ... Mais c'est un processus désespérément lent, se produisant sur des échelles de 10^{1500} ans

La fin ultime de la matière (1)

- Si la matière ordinaire est stable, elle peut néanmoins libérer de l'énergie en s'effondrant en configurations de plus en plus compactes, NB \rightarrow EN \rightarrow TN



La fin ultime de la matière (2)

- A l'échelle de l'Univers actuel, ces effondrements ne se font que sous certaines conditions ($M_{\text{EN}} = 1,4 M_{\text{sol}}$, $M_{\text{TN}} > 3,8 M_{\text{sol}}$)
- Mais en toute rigueur ils peuvent avoir lieu spontanément pour les mêmes raisons que la transmutation de la matière en fer...
- Pourvu que l'on attende « assez longtemps »...

La fin ultime de la matière (3)

- $t_{\text{NB} \rightarrow \text{EN}} (M_{\text{sol}}) = 10^{(10^{76})}$ ans
- Ce temps inimaginable est grand du fait que la masse en jeu est énorme
- Il serait plus court si la masse se transmutant en trou noir est plus petite...
- Sachant qu'il est probable que les trous noirs ont une limite inférieure à leur masse de 20 microgrammes (la masse de Planck)
- $t_{\text{Fe} \rightarrow \text{TN}} (M_{\text{Pl}}) = 10^{(10^{26})}$ ans

Les (petites) billes de fer sont éternelles



- 20 microgrammes de fer correspondent à une bille de 0,17 mm de diamètre
- Un tel objet ne semble pas pouvoir être altéré sur le très long terme dans le cadre des lois physique connues

Nouvelle physique et quelques conséquences

Quelle nouvelle physique ? (1)

On sait que :

- La matière noire existe
- L'énergie noire existe presque sûrement
- Un processus au-delà du modèle standard est nécessaire pour expliquer l'existence de la masse des neutrinos
- Un processus au-delà du modèle standard est nécessaire pour expliquer l'existence d'un surplus de matière par rapport à l'antimatière

Quelle nouvelle physique ? (2)

- De nombreux arguments théoriques suggèrent l'existence de théories dites « grand unifiées » qui se manifeste à des énergies estimées pouvant être 10^{12} fois plus grandes que celles du LHC
- Une conséquence majeure est que le proton devient une particule instable quoique à très longue durée de vie
- Expérimentalement, $t_p > 10^{32}$ ans, théoriquement, on s'attend à $t_p < 10^{41}$ ans dans les cas les plus simples, $t_p < 10^{200}$ ans sinon

L'autre fin des cadavres stellaires (1)

- Les protons se désintègrent, faisant disparaître les cadavres stellaires
- Energie à faire disparaître : $E = M c^2$
- Temps passé : 10^{37} ans
- Luminosité : qqes centaines de watts...
- Et les trous noirs vivent plus longtemps

L'autre fin des cadavres stellaires (2)

- Ou alors $t_p > 10^{100}$ ans
- Et les cadavres stellaires son plus pérennes que les trous noirs

L'ère du positronium

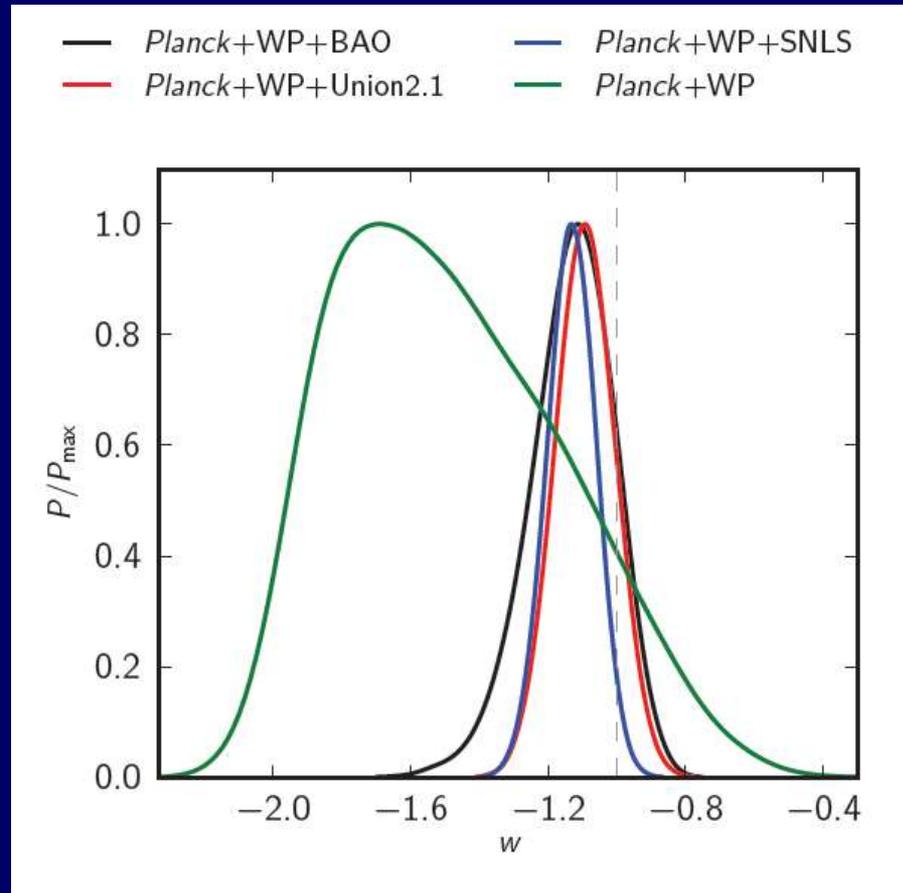
- La désintégration du proton produit des anti-électrons
- Si l'expansion n'est pas trop rapide (plus d'énergie noire), il peuvent se lier aux électrons pour former un simili-atome d'hydrogène instable, le positronium
- Sous diverses hypothèses,
 1. $t_{\text{form}} = 10^{85}$ ans
 2. $t_{\text{dés}} = 10^{141}$ ans
- Ce qui confère à ces derniers le statut de dernière structure existant dans l'Univers

L'hypothèse de l'accident

Le Big Rip

- L'Univers possède (presque certainement) une composante appelée énergie noire
- Elle se caractérise par le fait que sa densité d'énergie et peu voire pas diluée par l'expansion
- Mais observationnellement ou théoriquement, rien ne semble empêcher qu'elle puisse augmenter malgré l'expansion !

L'énergie noire vue par Planck



La dynamique du Big Rip

- L'expansion augmente la densité d'énergie fantôme
- L'augmentation d'énergie fantôme accélère encore plus l'expansion
- Le tout dans un effet boule de neige qui atteint une densité d'énergie fantôme et un taux d'expansion infinis en un temps fini...
- ... et qui expliquerait pourquoi nous vivons aujourd'hui

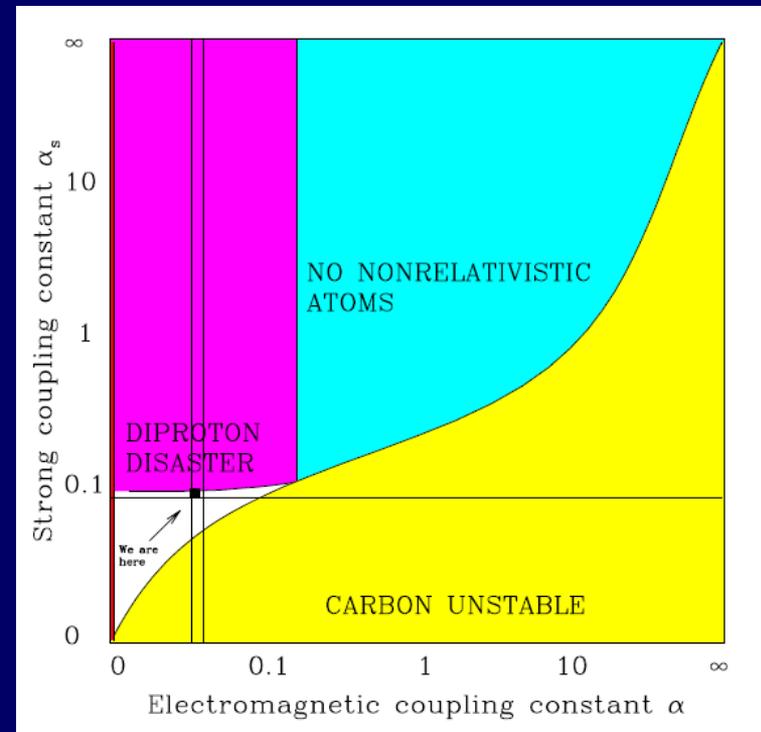
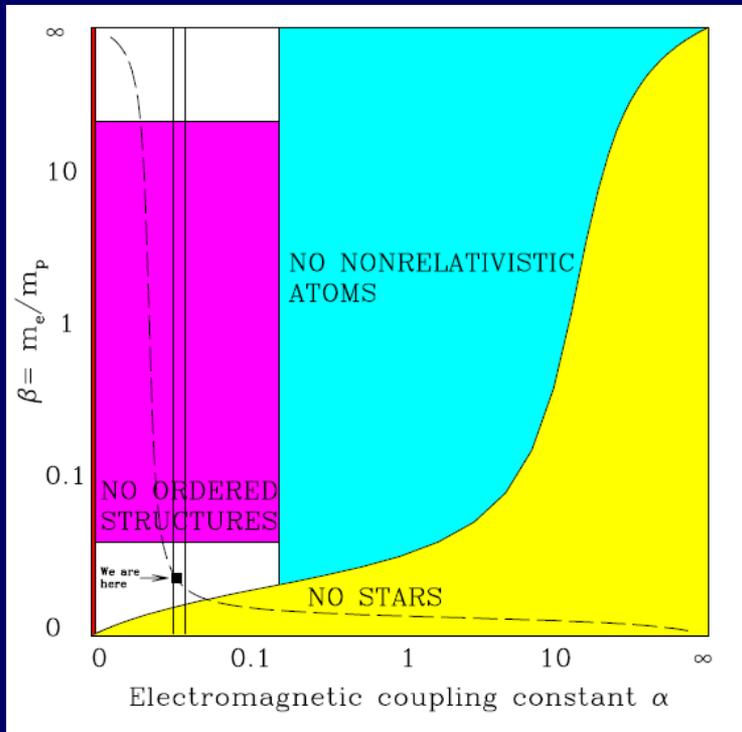
La fin de toute choses avec le Big Rip

- Les objets finissent tous par être disloqués par l'expansion elle-même
- Les plus gros objets (galaxies et amas de galaxies) le sont en premier :
- $t_{\text{fin}} - 10^9$ ans : dislocation des superamas
- $t_{\text{fin}} - 60$ Man : dislocation de la Voie lactée
- $t_{\text{fin}} - 3$ mois : La Terre quitte son orbite
- $t_{\text{fin}} - 30$ minutes : Destruction de la Terre
- $t_{\text{fin}} - 10^{-19}$ seconde : Dissociation des atomes

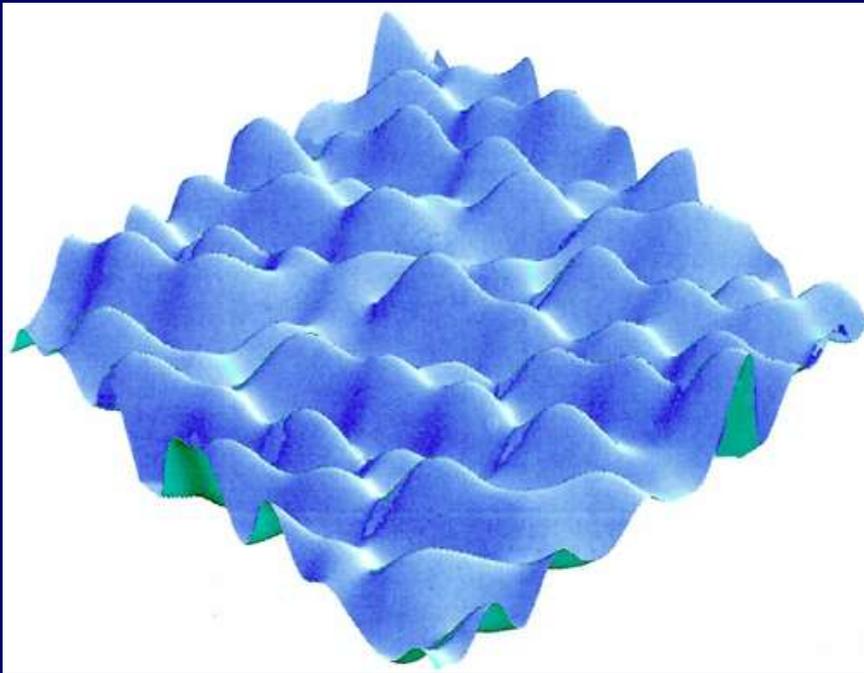
Le changement radical des lois physiques

- Le modèle standard de la physique des particules marche, mais nous ne savons pas pourquoi il a la forme précise qu'on observe
- Ex. : pourquoi $m_p / m_{e^-} = 1835$??
- Plus généralement, pourquoi l'Univers permet-il l'apparition de la vie ?

L'heureux hasard qui préside à notre existence



Une possible solution : le « Landscape »



- Le modèle standard n'est pas l'alpha et l'omega des lois physiques
- Il n'est qu'une théorie effective d'un objet plus complexe
- Qui lui-même possède plusieurs configurations possibles à basse énergie

Le « Landscape »

- En supersymétrie, plusieurs centaines de paramètres libres existent
- En théorie des cordes, le nombre de jeux de lois physique est incommensurablement grand (10^{500} ?)
- Nous ne sommes que les observateur d'une de ces configurations, pas forcément représentative de l'ensemble (peu d'énergie noire)

Quel rapport ?

- Rien ne nous assure que notre configuration est la plus stable de toutes
- Il existe une probabilité non nulle que l'on bascule vers une configuration plus stable
- Et où donc l'Univers tel que nous le connaissons cesserait d'exister, sans signe avant coureur cette fois

Conclusion

« L'éternité, c'est long,
surtout vers la fin »

(A. Allais)

Deux types de fins possibles

1. Absence d'interactions entre les résidus de l'évolution cosmique
 - Physique à l'œuvre connue
 - La stabilité du proton est le facteur déterminant pour distinguer les scénarios « courts » (10^{100} ans) et « longs » ($10^{(10^{26})}$ ans)
2. Destruction de l'Univers lui-même
 - La variété des scénarios rend un échancier impossible