

## 2.7.5 Inflation et transport d'énergie par le boson de Higgs

Source : [B176]

A la suite d'idées émises par Georgy Gamow et quelques autres, la théorie de l'inflation (Inflationary Universe theory) a été précisée sous sa forme actuelle par Alan Guth [B176], [B199].

### 2.7.5.1 Explication de principe du déclenchement de l'inflation : théories de Grande unification et de Superunification

#### La baisse de température de l'Univers après le Big Bang

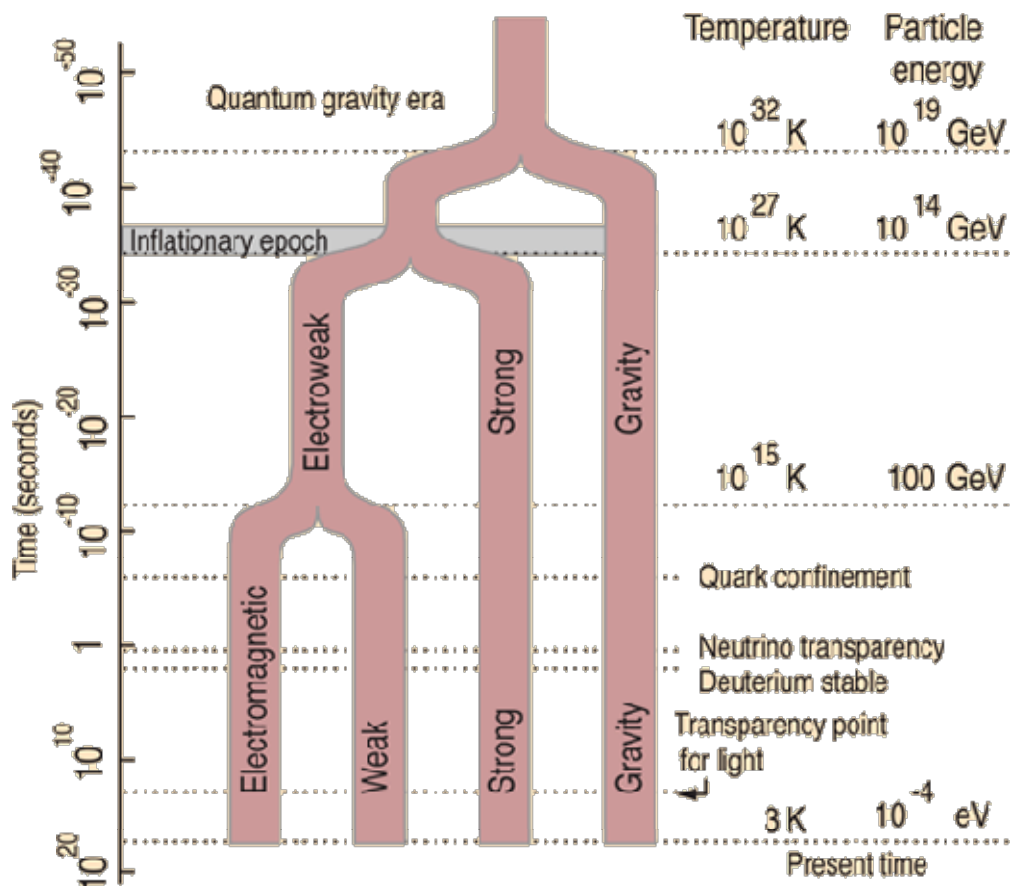
La température de l'Univers n'a pas cessé de baisser entre le Big Bang et l'inflation. L'explication physique du déclenchement de cette inflation est fournie par les *Théories de Grande unification* (sigle anglais : GUT) : à des températures suffisamment élevées, telles que l'énergie  $k_B T$  des particules atteint ou dépasse  $10^{16}$  GeV ( $\sim 10^6$  Joules), les trois interactions forte, faible et électromagnétique sont unifiées, identiques.

#### *Théories de Grande unification et de Superunification*

La force de gravitation, négligeable devant les autres forces lorsque l'énergie est de l'ordre de  $10^{16}$  GeV, devient comparable à elles à une énergie de l'ordre de  $10^{19}$  GeV appelée *énergie de Planck*. A l'*ère de Planck* (avant l'ère de Grande unification) les quatre forces (force de gravitation, force forte, force faible et force électromagnétique) pourraient donc, en principe, être unifiées en une *Théorie de Superunification*. Une telle théorie est annoncée par Vladimir Leonov (et apparemment par lui seul [B207]).

Selon [B176] pages 131-132 (note) il existe d'autres théories unificatrices basées sur la théorie des super-cordes (des cordes d'épaisseur nulle de  $10^{-35}$  mètres de long), mais sans confirmation expérimentale directe ou indirecte.

Lorsque la température baisse en-dessous du seuil d'une énergie de  $10^{16}$  GeV, le plasma de l'Univers subit une transition de phase qui sépare l'interaction forte des deux autres interactions, qui restent unifiées en une interaction électrofaible.



Séparation des forces fondamentales - © Microsoft Bing Creative Commons

La température baissant toujours, lorsque l'énergie des particules passe en dessous de 100 GeV, l'interaction électrofaible se sépare à son tour en interaction faible et interaction électromagnétique (raison : les bosons vecteurs ( $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$ ) médiateurs de l'interaction faible ont des masses de l'ordre de 90 GeV, alors qu'un photon d'interaction électromagnétique a une masse nulle).

### Déclenchement de l'inflation

L'inflation de l'Univers est due à une énergie particulière et à son effet gravitationnel. Cette énergie doit avoir une densité colossale, disponible en quantité illimitée pour rester constante alors que l'Univers y puise la croissance exponentielle de sa quantité de matière. Et l'effet de cette énergie doit être une pression d'expansion de l'espace, une gravitation négative, répulsive. Voir dans le paragraphe *Equations d'état de l'Univers considéré comme un « gaz » de galaxies* le sous-titre *Les 3 types de densité d'énergie de l'Univers / L'énergie du vide*.

(Citation de [B176] pages 245-246)

"Nous allons voir, dans les paragraphes suivants, que la cause de l'inflation est un état particulier de la matière appelé « faux vide ». C'est un champ de type Higgs souvent appelé *inflaton*, champ scalaire dont l'état représentatif est au centre des diagrammes de densité d'énergie en forme de chapeau mexicain [décrit au paragraphe *Rupture spontanée de symétrie* ci-dessous]. Un tel état est métastable, c'est-à-dire stable pendant très peu de temps, avant d'évoluer vers la courbe de densité d'énergie minimum entre le bord du chapeau et son

renflement central ; l'état de « faux vide » à haute température aura alors changé de phase vers un état à température plus basse stable où les interactions fondamentales forte, faible et électromagnétique sont séparées. L'inflation aura alors pris fin."

(Fin de citation)

La qualification de « faux vide » vient de ce que dans cet état la densité d'énergie de l'espace due aux champs de Higgs nuls n'est pas nulle, alors qu'on s'attend à ce que l'énergie due à un champ nul soit nulle, comme c'est le cas pour la gravitation et les champs électromagnétiques.

Lorsque l'inflaton agit, les conditions qui satisfont l'équation de Friedmann (INFL) du paragraphe *Le Problème de l'horizon* sont satisfaites, et le facteur d'échelle  $a(t)$  de l'espace grandit à vitesse exponentielle : il y a inflation.

Pour comprendre ce phénomène, voyons d'abord les *Théories de Grande unification*.

### 2.7.5.2 Théories de Grande unification

#### Exemple de théorie de Grande unification

H. Georgi et S. L. Glashow ont proposé dans [B208] la théorie de Grande unification SU(5), qui a été vérifiée le 23/07/1982 par des expériences en Europe sous le Mont Blanc. Cette théorie, qui explique toutes les lois physiques, est confirmée par la constatation expérimentale au Mont Blanc de la désintégration d'un proton, dont la demi-vie supérieure à  $10^{32}$  ans est bien plus longue que l'âge de l'Univers ; car si une telle désintégration est observée, toute matière se désintègre plus ou moins vite.

La théorie proposée explique l'évolution de l'Univers à partir d'un état où l'énergie des particules (toutes identiques à l'époque) était colossale peu après le Big Bang. Elle prévoit l'existence d'un nouveau type de bosons, les bosons X, capables de transformer des quarks en leptons (électrons et neutrinos) et réciproquement, et explique la désintégration de protons et la formation de nombreuses particules.

#### Résultats prédits par la théorie

Source : [B176] pages 132 et suivantes.

Les interactions SU(\*) et U(1) sont définies un peu plus bas, au paragraphe *Rupture spontanée de symétrie*.

- Les théories de Grande unification sont les seules qui expliquent l'égalité des charges de l'électron et du proton en valeur absolue. Elles le font à partir de symétries reliant les propriétés des électrons et des quarks constitutifs du proton, symétries vérifiées avec une précision relative fantastique de  $10^{-21}$ .
- Les théories de Grande unification prédisent la force des interactions de particules connues à partir de trois interactions fondamentales, de forces différentes :
  - L'interaction de couleur de la *Chromodynamique quantique* appelée SU(3), intervenant dans l'interaction forte ;
  - Les interactions SU(2) et U(1) intervenant, respectivement, dans les forces faible et électromagnétique.

Bien que différentes, les forces de ces trois interactions tendent vers l'égalité quand la température augmente, à une énergie comprise entre  $10^{11}$  et  $10^{17}$  GeV ; les théories de Grande unification expliquent cette égalisation.

La raison de l'existence de *plusieurs* théories de Grande unification est la complexité des phénomènes dont elles synthétisent le comportement : une théorie particulière est déterminée par plus de 20 paramètres à mesurer expérimentalement.

#### Raison sous-jacente de l'unification des trois interactions à haute énergie

La possibilité d'une description unifiée des trois interactions - forte SU(3), faible SU(2) et électromagnétique U(1) – est confirmée par un phénomène complexe de *rupture spontanée de symétrie*, exemple parfait de loi d'interruption (définie plus haut au paragraphe *Lois d'interruption*).

Voici ce qu'est cette rupture spontanée.

##### 2.7.5.2.1 Rupture spontanée de symétrie

Lire d'abord le paragraphe *Champ et boson de Higgs*.

La lecture du paragraphe suivant, assez technique, n'est pas indispensable à la compréhension de la *Théorie quantique des champs*, qu'il ne fait que compléter.

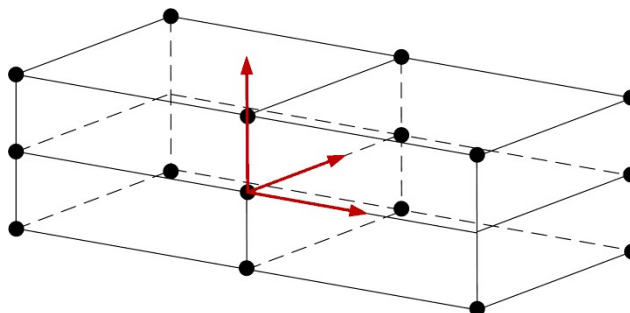
Source : [B176] pages 135 et suivantes.

La rupture spontanée de symétrie est le phénomène qui explique la possibilité d'unifier, dans la *Théorie de Grande unification*, les trois interactions forte, faible et électromagnétique. Il intervient aussi dans la construction de la Théorie électrofaible et dans le comportement de la particule de Higgs du *Modèle standard des particules élémentaires*.

#### Définition d'une symétrie qui se brise spontanément

Dans une théorie descriptive d'un système, une symétrie qui se brise spontanément est une symétrie invisible (qui ne se manifeste pas) tant que le système est dans un état d'équilibre thermodynamique.

Exemple : rupture spontanée de symétrie dans la structure cristalline d'une topaze (pierre semi-précieuse jaune vif) lors de sa formation par solidification. Cette structure est qualifiée d'*orthorhombique* : les atomes sont disposés aux sommets de parallélépipèdes rectangles dont les trois dimensions sont de longueurs différentes.



Dans un échantillon de topaze à l'état liquide la règle de symétrie est *l'invariance par rotation* : les lois physiques décrivant cette structure sont les mêmes dans

les trois directions axiales (en rouge) : le liquide est isotrope. La solidification (cristallisation) rompt spontanément cette symétrie en introduisant des différences de distance interatomique entre les trois directions.

### Symétrie de base de la Théorie de Grande unification

Dans le cas de la *Théorie de Grande unification* la symétrie est entre comportements de particules. Lorsque la température de l'espace confère à ses particules une énergie supérieure à  $10^{16}$  GeV, la symétrie *de base* de cette théorie se manifeste de deux manières :

- Les trois interactions du Modèle standard :
  - SU(3), interaction de la force nucléaire (force forte, agissant sur les quarks) ;
  - SU(2), interaction de la force faible (mettant en œuvre des neutrinos) ;
  - U(1), interaction de la force électromagnétique (mettant en œuvre des photons),sont impossibles à distinguer : il n'y a en fait qu'une seule type d'interaction ;
- La symétrie de la *Théorie de Grande unification* entraîne que les lois physiques qui s'appliquent ne font pas de distinction entre un électron, un neutrino ou un quark.

Ce refus de la nature de distinguer entre interactions et entre particules est une symétrie, analogue à la symétrie de rotation précédente refusant de distinguer entre directions de l'espace avant la formation du cristal de topaze.

### Mécanisme d'une rupture de symétrie

#### *Cas du cristal de topaze*

Dans le cas du cristal de topaze, les atomes se placent le long d'axes qui se définissent spontanément au début de la solidification, et qui se conservent ensuite pendant cette cristallisation. Les trois directions axiales du cristal se distinguent ainsi l'une de l'autre et de directions quelconques de la phase liquide : il y a rupture spontanée de symétrie pendant la solidification.

#### *Cas de la Théorie de Grande unification*

En construisant la *Théorie de Grande unification*, les théoriciens ont défini délibérément un ensemble de champs permettant une rupture de symétrie, les *champs scalaires de Higgs*, et un mécanisme de rupture, le *mécanisme de Higgs*.

Dans le *Modèle standard des particules élémentaires* on définit un champ associé à chacune des particules fondamentales. C'est le photon qui sert de modèle de base (archétype) pour les autres modèles.

Pour tous ces champs on postule une existence et un comportement décrit par un ensemble d'équations. Le caractère quantique de ces champs et de ces particules affirme que leur énergie existe en « paquets » indécomposables ; par exemple, les champs de Higgs ont une énergie groupée en particules de Higgs.

Pour obtenir une rupture spontanée de symétrie, les théoriciens ont formulé les *Théories de Grande unification* de telle manière que la densité d'énergie des champs de Higgs ait un comportement particulier pour l'énergie la plus basse.

Pour la plupart des champs (par exemple le champ électrique et le champ magnétique) la densité d'énergie du champ a sa plus basse valeur possible, zéro, quand le champ disparaît. Mais dans un champ de Higgs les théories prévoient une densité d'énergie minimum quand il n'est pas nul : *les champs de Higgs de l'espace vide ont donc des valeurs non nulles lorsqu'ils se stabilisent dans l'état d'énergie minimum.*

Le diagramme de principe ci-dessous montre (selon l'axe vertical) l'évolution de la densité d'énergie résultant des densités d'énergie deux champs de Higgs *A* et *B* (selon les axes horizontaux) qui interagissent et ne s'ajoutent pas brutalement.

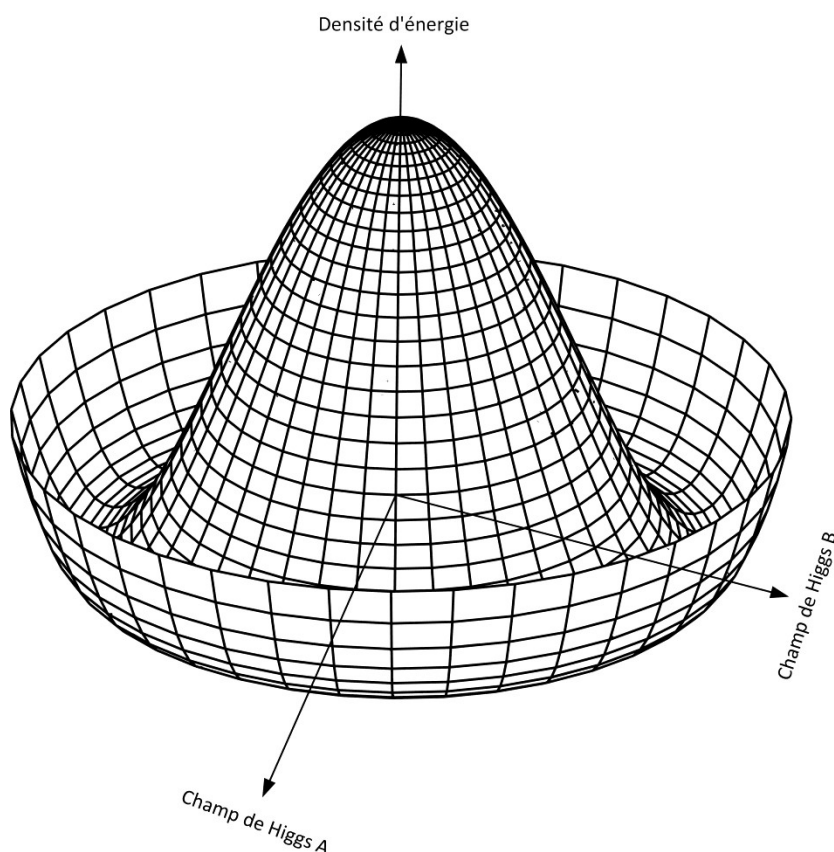


Diagramme en forme de chapeau mexicain

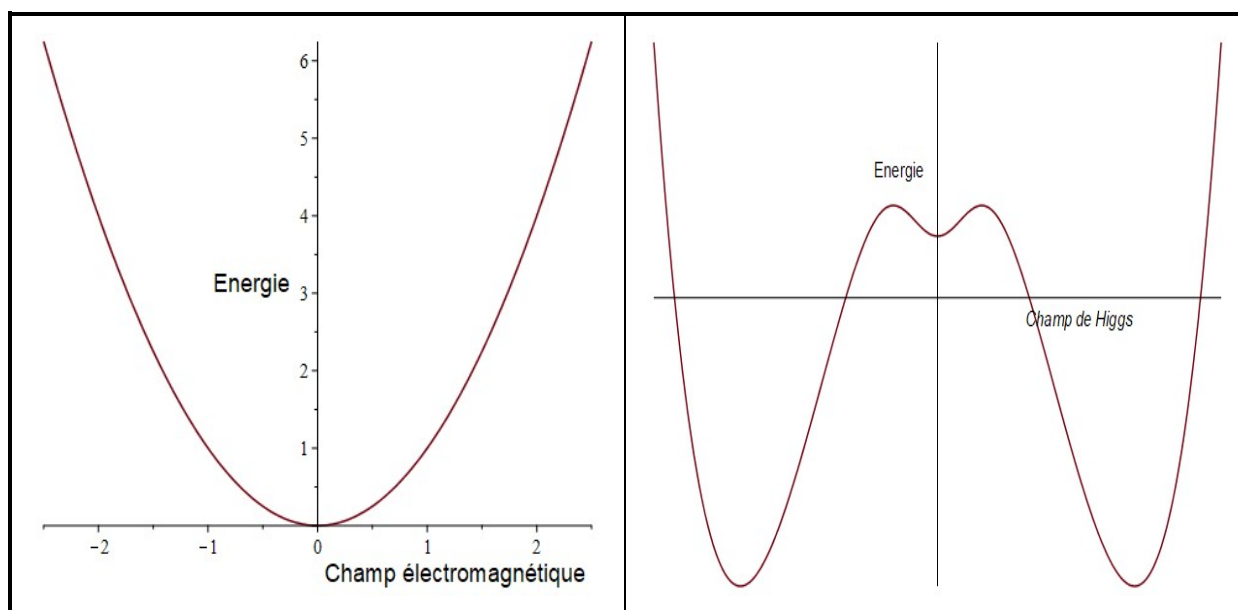
Pour comprendre ce qu'implique la forme de la surface ci-dessus (appelée *Mexican hat*, chapeau mexicain) imaginez une petite bille placée sur le renflement central près du sommet. Soumise à l'attraction gravitationnelle, la bille a une énergie potentielle qui croît avec son "altitude". Pour être stable, elle a donc tendance à descendre pour atteindre la plus basse énergie potentielle possible, sur la ligne horizontale de hauteur minimum séparant le renflement central du bord qui remonte.

Le diagramme ci-dessus a été délibérément « raboté » dans la partie « bord du chapeau » la plus éloignée de l'axe : on en a limité la hauteur pour montrer le renflement et la ligne la plus basse qui sépare celui-ci du bord ; en réalité, le bord remonte à l'infini.

Ce diagramme à deux variables de Higgs n'est qu'une illustration d'une réalité plus complexe mettant en œuvre bien plus de champs, dans le cadre d'une *Théorie de Grande unification* qui n'est encore qu'esquissée.

### *Notion de puits de potentiel*

Les diagrammes ci-dessous illustrent la notion de « puits de potentiel » : à gauche dans un champ électromagnétique, à droite dans un champ de Higgs. Dans ce dernier cas, une bille initialement dans le creux en haut du renflement doit vaincre une barrière de potentiel pour sortir du creux et pouvoir descendre vers la ligne d'énergie minimum. L'énergie nécessaire peut être fournie (en probabilité), par un *effet tunnel* (voir ce titre).



Puits de potentiel

Si les champs de Higgs  $A$  et  $B$  sont tous deux nuls, la densité d'énergie résultante est celle du point dans l'axe du chapeau, au centre creusé du renflement, et elle est assez élevée ; mais elle correspond à un état métastable.

Remarque : il peut paraître curieux qu'il faille une énergie non nulle pour que les deux champs  $A$  et  $B$  disparaissent, mais les mesures en théorie électrofaible ont confirmé que la nature se comporte bien ainsi.

L'état de densité d'énergie minimum d'un champ de Higgs n'est pas unique : il y en a autant que de points de la ligne d'énergie minimum précédente entre renflement et rebord : la bille pourrait s'y arrêter n'importe où. Les valeurs des champs de Higgs dans le vide ne sont donc pas déterminées par des considérations d'énergie, de même que les directions d'alignement des atomes d'un morceau de topaze sont choisies au hasard au début de sa solidification.

Ce choix aléatoire des valeurs non nulles des champs de Higgs rompt la symétrie des interactions de Grande unification, comme l'orientation initiale choisie au refroidissement rompt la symétrie rotationnelle de la topaze. Dans les deux cas les lois de base de la physique restent inchangées, leur symétrie étant brisée spontanément.

### *Considérations philosophiques sur le déterminisme de l'état final*

L'évolution de l'état d'un système relevant de la *Théorie de Grande unification* est, comme toutes les évolutions naturelles, dirigée vers l'énergie potentielle minimum, dont il existe une infinité de couples de champs de Higgs (*A*, *B*). Cette évolution est déterministe, mais le choix de l'état final dépend d'autres paramètres que les deux variables *A* et *B* précédentes, choisies pour faciliter l'exposé ; dans la mesure où on ne connaît pas *tous* ces paramètres, l'état final paraît aléatoire. Mais c'est là un hasard comme tous les autres que nous avons vus : un effet de notre ignorance, pas une évolution non-déterministe.

Les nombreuses autres particules de la théorie interagissent avec les champs de Higgs, dont les choix de valeurs initiales les affectent ; des particules distinctes interagissent avec des champs de Higgs distincts, ce qui permet à certaines de se différencier d'autres alors que sans les champs de Higgs on pourrait les confondre.

Ainsi, la masse d'une particule étant déterminée par son interaction avec des champs de Higgs, les masses de celles qui interagissent avec le champ de Higgs *A* deviendront différentes de celles qui interagissent avec le champ *B*. (Noter que *l'interaction d'une particule avec le champ de Higgs modifie sa masse.*)

### Effets des interactions de particules avec des champs de Higgs

Dans une *Théorie globale de Grande unification* prenant en compte beaucoup de champs de Higgs, l'action de ces champs fait que certaines particules se comportent comme des électrons, d'autres comme des neutrinos et d'autres encore comme des quarks.

De même, certains des bosons (particules porteuses de force, c'est-à-dire d'interaction) se comporteront comme les gluons de l'interaction forte, d'autres comme les particules  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$  de l'interaction faible, et d'autres enfin comme des photons de l'interaction électromagnétique.

C'est donc leur interaction avec différents champs de Higgs qui distingue la manière dont les particules de ces trois forces fondamentales se comportent ; ainsi, les masses importantes des particules  $W$  (80.4 GeV) et  $Z$  (91.2 GeV) sont dues à divers champs de Higgs.

### Lois physiques de *basse énergie* de la topaze et de la Théorie de Grande unification

Dans un cristal orthorhombique, dont les distances entre atomes sont différentes selon les 3 axes, la lumière se propage à 3 vitesses différentes, une pour chacune des directions axiales. Ces 3 vitesses sont des cas particuliers du même phénomène physique, la lumière.

### *Les propriétés des forces et particules sont dues aux champs de Higgs*

Dans notre Univers l'espace baigne dans des champs de Higgs, dont nous interprétons les effets comme des conséquences des lois physiques que nous avons adoptées.

- Nous interprétons les propriétés des forces électromagnétique, forte et faible comme nous interprétons les effets de la structure orthorhombique sur la vitesse de la lumière.



- De même, les propriétés différentes que nous trouvons aux électrons, aux neutrinos et aux quarks ne sont pas fondamentales : ce ne sont que des vues particulières de l'interaction de ces particules avec les champs de Higgs constants présents dans tout l'Univers.

### Lois physiques de *haute énergie* de la topaze et de la Théorie de Grande unification

Chauffé suffisamment, un cristal subit une *transition de phase* : il fond et devient liquide. Ce liquide est isotrope : la distribution des atomes a une symétrie de rotation. A des températures suffisamment élevées la symétrie de rotation est rétablie.

De même, dans les *Théories de Grande unification* une transition de phase se produit à des températures extrêmement élevées. Voici ce qui se passe.

- Au zéro absolu, les deux champs de Higgs *A* et *B* de notre exemple précédent sont dans un état d'énergie minimum, représenté par un point sur la ligne séparant le renflement du « chapeau » de son « bord ». L'état d'un système est représenté par un point  $P_0$  de cette ligne.
- Quand la température augmente, les champs de Higgs acquièrent de l'énergie thermique et commencent à osciller. Tant que la température est basse, les oscillations du point *P* représentant l'état sont de faible ampleur autour de  $P_0$  : la symétrie reste brisée.
- Lorsque la température dépasse une certaine valeur, le point *P* s'agite violemment, passant parfois par-dessus le sommet du renflement. Sa position moyenne devient le centre du « chapeau » et toute trace des valeurs initiales des champs de Higgs à température zéro est perdue. Chaque champ de Higgs ayant désormais une valeur moyenne nulle, la symétrie de Grande unification est rétablie. Les interactions SU(3), SU(2) et U(1) se confondent et il n'y a plus de distinction entre les électrons, les neutrinos et les quarks.

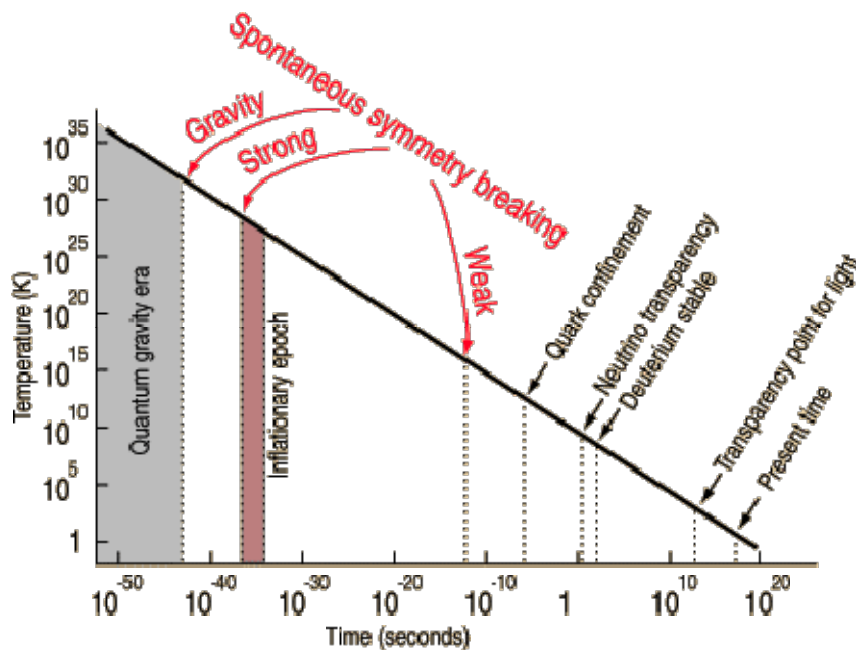
Dans une *Théorie de Grande unification* moyenne cette transition se produit à une température voisine de  $10^{29}$ °K, correspondant à une énergie thermique moyenne de  $10^{16}$ GeV.

Remarque : une telle température est fantastiquement élevée, même pour les objets étudiés en astrophysique. Le centre d'une étoile chaude, par exemple, est à environ  $10^7$  degrés.

L'énergie à laquelle la rupture de symétrie cesse et la Grande unification se produit est celle à laquelle les champs de Higgs agissent : on l'appelle *énergie d'unification*.

- A des énergies d'interaction des particules encore plus grandes, les valeurs des champs de Higgs sont sans effet. Les particules porteuses de force se comportent toutes de la même façon et les interactions ont une symétrie parfaite de Grande unification.
- Par contre, à des énergies d'interaction plus faibles que l'énergie d'unification, l'effet des champs de Higgs est important : certaines particules porteuses de force se comportent selon le modèle SU(3), d'autres selon SU(2) et d'autres enfin selon U(1) ; le *Modèle standard des particules élémentaires* s'applique.

## Conditions de survenance d'une rupture spontanée de symétrie



© Microsoft Bing Creative Commons

Le graphique montre la température et le temps depuis le Big Bang où chacune des forces de gravitation, d'interaction forte et d'interaction faible s'est séparée des autres forces.

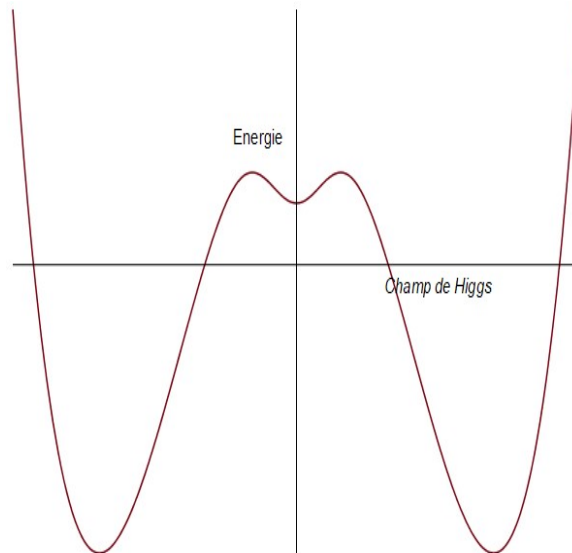
### 2.7.5.2.2 Modèle d'Alan Guth : la surfusion a créé les conditions de l'inflation

Le physicien américain Alan Guth a proposé un modèle de déclenchement de l'inflation (rupture de symétrie de l'état de Grande unification) basé sur l'existence postulée d'un « faux vide » métastable en haut du renflement de la surface d'énergie en forme de chapeau mexicain.

Selon ce modèle, le refroidissement de l'Univers en dessous de l'énergie d'unification de la *Théorie de Grande unification* a subi un phénomène de *surfusion*, les symétries de Grande unification persistant à une énergie plus basse de  $10^{16}$  GeV.

La surfusion est un état métastable (transitoire) d'un corps en train de passer de la phase liquide à la phase solide : malgré la baisse de température, il arrive que le corps reste à l'état liquide jusqu'à une température bien plus basse que sa température de solidification "normale" ; c'est ainsi que l'eau pure peut rester liquide jusqu'à environ  $-40^{\circ}\text{C}$ .

La surface descriptive de l'énergie des champs de Higgs présentait alors, au sommet du renflement de son chapeau mexicain, un puits de potentiel dont le profil a été illustré au paragraphe précédent *Rupture spontanée de symétrie* ; le revoici :



Métastabilité de l'état d'énergie appelé « faux vide »

Au fond de ce puits, la densité d'énergie était très élevée, comme le sont toutes les énergies d'une *Théorie de Grande unification* ; exprimée sous forme de masse, cette densité était de l'ordre de  $10^{83} \text{ kg/m}^3$ ,  $\sim 10^{65}$  fois plus que la densité d'un noyau atomique. Cette densité d'énergie n'était pas due aux particules elles-mêmes, mais au résultat de leur interaction avec les champs de Higgs ; nous verrons en décrivant l'inflation elle-même que *cette densité n'a pas varié* pendant la très courte durée de l'inflation,  $\sim 10^{-32} \text{ s}$ .

L'état « dans ce puits » de l'énergie des champs de Higgs, constamment perturbé par des fluctuations thermiques, a fini par sortir du puits par effet tunnel et dévaler la pente du renflement jusqu'à la ligne d'énergie minimum (selon [B212]). Mais il a duré suffisamment longtemps pour que se réalisent les conditions de l'inflation prévues par l'équation de Friedmann (INFL) : voir ci-dessus *Le Problème de l'horizon*.

Ces conditions « état de faux vide » « dans le puits », ont permis aux champs de Higgs de créer un champ de gravitation négative et une pression positive très intenses, équivalant à une constante cosmologique inimaginable de l'ordre de  $10^{100}$  fois plus forte que sa valeur actuelle. L'équation de Friedmann prévoit alors une *explosion exponentielle de l'espace qui dure jusqu'à ce que la surfusion cesse*.

### 2.7.5.3 Principe de l'inflation

Définition : le phénomène d'inflation est une dilatation (expansion, croissance du rayon) de l'Univers à une vitesse exponentielle pendant une minuscule fraction de seconde ( $\sim 10^{-32} \text{ s}$ ), commencée très peu de temps ( $\sim 10^{-35} \text{ s}$ ) après le Big Bang.

Aux très hautes énergies des ères de Superunification ( $10^{-43} \text{ s}$ ) et de Grande unification ( $10^{-35} \text{ s}$ ) le plasma de l'Univers est décrit le mieux par des champs.

Les découplages du paragraphe *Les transitions de phase séparent les forces fondamentales* sont dus à des champs de spin zéro dont les particules quantiques d'interaction sont des bosons de Higgs. *Quand un tel champ scalaire a une valeur non nulle, il interagit avec les bosons vecteurs, dont les particules se comportent*

*alors comme si elles étaient massives, alors que dans le cas des photons leur masse est nulle.*

Comme le photon du champ électromagnétique, le boson de Higgs (de masse 125 GeV) transporte de l'énergie ; mais il crée aussi une pression négative, équivalente à une antigravitation. Et à la différence du champ électromagnétique, son état de plus basse densité d'énergie n'est pas celui d'énergie nulle ; l'énergie transportée par le boson de Higgs scalaire se comporte alors comme une énergie du vide à une température  $T_{e\neq v}$  . D'après le principe d'incertitude de Heisenberg, lorsque cette énergie est suffisante pendant un temps suffisamment long, l'Univers dominé par l'énergie du vide se met à se dilater de manière exponentielle sous l'influence de la pression négative : *c'est l'inflation.*

La densité d'énergie du vide  $\Omega_v$  équivaut alors à une constante cosmologique  $\Lambda$  de l'ordre de  $10^{100}$  fois plus forte que celle qu'on constate de nos jours, et le rayon de l'Univers double toutes les  $\tau$  secondes, où  $10^{-43} < \tau < 10^{-35}$  seconde.

#### *Un refroidissement extrême suivi d'un réchauffement à haute température*

Après quelques 260 doublings, la température qui était au départ  $T_{e\neq vi}$  est descendue très bas, au voisinage du zéro absolu, plus bas que la température du « vide normal »  $T_{normale}$ , exactement comme de l'eau en surfusion est à une température largement inférieure à 0°C. Cette baisse de température libère de l'énergie, qui est alors disponible pour que la différence de température  $T_{normale} - T_{e\neq vid}$  réchauffe la matière-énergie à une haute température, engendrant le plasma de particules, antiparticules et photons de l'état qui suit l'inflation.

#### **2.7.5.4 Détails du déroulement de l'inflation**

Environ  $10^{-36}$  seconde après le Big Bang, l'énergie du vide de l'Univers avait dominé fortement les autres formes d'énergie pendant suffisamment longtemps pour que les équations de la Relativité générale (exactement : celles de Friedmann) admettent une solution particulière, instable, où *la dilatation de l'espace se produit à densité de matière-énergie constante : **au fur et à mesure qu'il augmente de volume, l'espace crée de la matière-énergie dans la même proportion, sa densité restant constante !***