Chapitre 10

L'asymétrie matière-antimatière et son évolution cosmologique

Dans le cadre de notre analogie avec les grandes théories de la physique, on commence dans ce chapitre, *essentiellement qualitatif et prospectif*, par émettre quelques hypothèses en ce qui concerne la constitution de la matière et de l'anti-matière en supposant que particules et anti-particules sont constituées d'amas de singularités topologiques en boucles (de désinclinaison vis, de dislocation coin et de dislocation mixte) d'un réseau cosmologique parfait. La faible asymétrie existant entre matière et anti-matière est introduite en assumant que la matière est basée sur des boucles coin de nature interstitielle et que l'anti-matière est basée sur des boucles coin de nature lacunaire. En utilisant les résultats du chapitre 8, on verra que les interactions de nature gravitationnelle entre particules et anti-particules de l'Univers sont quasiment toutes attractives, tout en présentant une faible gradation des intensités d'interaction suivant le type de particules interagissant. Seules les forces qui font intervenir au moins une particule basée exclusivement sur un amas de boucles coin de nature interstitielle, qu'on interprétera comme des neutrinos, présentent quand à elles une nature répulsive.

Sur la base des comportements cosmologiques d'expansion du réseau et des interactions gravitationnelles entre singularités topologiques, on peut imaginer *un scénario très plausible d'évolution cosmologique des singularités topologiques* conduisant à la structure actuelle de notre Univers. Ce scénario se base entièrement sur le fait que, dans le cas des boucles de dislocation coin les plus simples, analogiquement similaires aux *neutrinos*, la *masse de courbure* domine la *masse d'inertie*, de sorte que les neutrinos devraient être les seules particules gravitationnellement répulsives, alors que les anti-neutrinos seraient quant à eux gravitationnellement attractifs. Cette assertion permet alors de donner une explication simple à plusieurs faits encore très mal compris dans l'évolution de la matière de l'Univers. *La formation des galaxies* pourrait correspondre à *un phénomène de précipitation* de la matière et de l'antimatière au sein d'*une mer de neutrinos répulsifs. La disparition de l'anti-matière* pourrait correspondre à *un phénomène de ségrégation* des particules et des antiparticules au sein des galaxies, due à leur légère différence de propriétés gravitationnelles, ségrégation au cours de laquelle les antiparticules se regrouperaient au centre des galaxies pour former finalement de *gigantesques trous noirs* au coeur des galaxies. Même la fameuse *«matière noire»* que les astrophysiciens ont dû inventer pour expliquer le comportement gravitationnel anormal de la périphérie des galaxies s'expliquerait alors très bien dans notre approche. En effet, la *«matière noire»* serait en fait la *mer de neutrinos répulsifs* dans laquelle auraient précipité et baigneraient les galaxies, qui, de par la force de compression qu'elle exerce sur la périphérie des galaxies, expliquerait le comportement gravitationnel anormal de celle-ci. Finalement, on montre aussi comment on peut aisément traiter la *constante de Hubble*, le *«redshift» des galaxies* et l'évolution du *fond diffus de rayonnement cosmologique* dans le cadre de notre approche.

De la constitution et de l'asymétrie de la matière et de l'anti-matière

L'existence de 15 forces d'interaction «gravitationnelles» différentes suivant la nature des singularités mises en jeu dans le tableau de la figure 8.9, ainsi que le comportement de ces forces en fonction de l'expansion de fond du réseau illustré dans la figure 8.10, permettent d'élaborer un scénario assez simple et tout à fait plausible de l'évolution cosmologique de notre Univers.

Partons de la conjecture 8, qui stipulait que les singularités de nature lacunaire correspondent par analogie à l'anti-matière et les singularités de nature interstitielle à la matière, pour introduire les hypothèses suivantes:

- les particules de matière (électron e^-, neutrino ν^0, neutron n^0, proton p^+, etc.) de l'Univers seraient constituées d'assemblages de boucles de désinclinaison vis, qui leur donnent leur charge électrique, de boucles de dislocation mixte, qui leur donnent leur champ électrique dipolaire, et de boucles de dislocation coin *de nature interstitielle*, qui leur donnent une *charge de courbure négative*,
- les particules d'anti-matière (positron $\overline{e}^+$, anti-neutrino $\overline{\nu}^0$, anti-neutron $\overline{n}^0$, anti-proton $\overline{p}^-$, etc.) de l'Univers seraient constituées d'assemblages de boucles de désinclinaison vis, qui leur donnent leur charge électrique, de boucles de dislocation mixte, qui leur donnent leur champ électrique dipolaire, et de boucles de dislocation coin *de nature lacunaire*, qui leur donnent une *charge de courbure positive*.

Si on accepte cette distinction entre particules et anti-particules, la charge de courbure positive ou négative due à la composante de boucles coin de nature interstitielle ou lacunaire, qui n'apparaît ni en Relativité Générale, ni dans le Modèle Standard des particules élémentaires, introduit une faible asymétrie entre particules et anti-particules *qui n'existe que dans notre approche*. Cette asymétrie n'est pas sans rappeler l'asymétrie observée expérimentalement entre particules et anti-particules en Physique des Particules, sans qu'on sache très bien quelle cause lui attribuée. Cette asymétrie affecte certaines propriétés des particules élémentaires (comme la violation de la symétrie ***CP***, action combinée d'une conjugaison de charge ***C*** et d'une symétrie par réflexion ***P***), mais pas la masse au repos de ces particules (liée à la non violation de la symétrie ***CPT***, action combinée d'une conjugaison de charge ***C***, d'une symétrie par réflexion ***P*** et d'une inversion du temps ***T***). Or, dans la physique actuelle, que ce soit la Physique des Particules ou la Gravitation Générale, il n'est jamais fait mention de la propriété de charge de courbure, puisque celle-ci ne peut apparaître que par l'approche des singularités topologiques de réseau que nous avons développée dans cet ouvrage. Cette propriété de charge de courbure propre aux singularités topologiques de réseau pourrait par conséquent être une excellente candidate pour expliquer l'asymétrie observée expérimentalement entre particules et anti-particules de matière.

Pour simplifier la suite de cet exposé, appelons donc dorénavant les diverses particules d'un nom générique suivant leur type:

- *particule* X ou Y une particule de matière comme un électron e^-, un muon μ^-, un tauon τ^-, un neutron n^0, un proton p^+ (ou toute autre particule élémentaire composée de quarks) qui fait intervenir des boucles de désinclinaison vis, donc des charges électriques, éventuellement des boucles de dislocation mixte en cas de champ électrique dipolaire et majoritairement des boucles de dislocation coin de nature interstitielle, donc *une charge de courbure négative*,
- *anti-particule* $\overline{X}$ ou $\overline{Y}$ une particule d'anti-matière comme un positron $\overline{e}^+$, un anti-muon $\overline{\mu}^+$,

un anti-tauon $\overline{\tau}^{+}$, un anti-neutron $\overline{n}^{0}$, un anti-proton $\overline{p}^{-}$ (ou toute autre particule composée de quarks) qui fait intervenir des boucles de désinclinaison vis, donc des charges électriques, éventuellement des boucles de dislocation mixte en cas de champ électrique dipolaire, et majoritairement des boucles de dislocation coin de nature lacunaire, donc *une charge de courbure positive*,

- *neutrino* ν^{0} une particule de matière correspondant au neutrino électronique ν_{e}, au neutrino muonique ν_{μ} ou au neutrino tauique ν_{τ}, qui ne fait pas intervenir de boucles de désinclinaison vis et de boucles de dislocation mixte, mais uniquement des boucles de dislocation coin de nature interstitielle, donc *une charge de courbure négative*,

- *anti-neutrino* $\overline{\nu}^{0}$ une particule d'anti-matière correspondant à l'anti-neutrino électronique $\overline{\nu}_{e}$, à l'anti-neutrino muonique $\overline{\nu}_{\mu}$ ou à l'anti-neutrino tauique $\overline{\nu}_{\tau}$, qui ne fait pas intervenir de boucles de désinclinaison vis et de boucles de dislocation mixte, mais uniquement des boucles de dislocation coin de nature lacunaire, donc *une charge de courbure positive*.

A ces 4 types de particules ou anti-particules, on peut, grâce aux chapitres précédents, attribuer des masses d'inertie et des masses de courbure équivalentes, qui satisfont les relations de masse indiquées dans la figure 10.1 dans le cas des particules et anti-particules, et dans le cas des neutrinos et anti-neutrinos.

Ainsi, sans connaître au préalable la constitution exacte en terme de boucles de singularités des diverses particules et anti-particules, on peut déduire grâce à ces relations entre masses d'inertie et masses de courbure, des informations très pertinentes à propos du comportement des forces d'interaction gravitationnelles entre ces diverses particules. En effet, dans le cas de l'interaction entre particules X et anti-particules $\overline{X}$, on a, grâce au tableau 10.1, les relations d'inégalité suivantes entre les forces d'interaction gravitationnelle $\boldsymbol{F}_{grav}^{X-X} < \boldsymbol{F}_{grav}^{X-\overline{X}} < \boldsymbol{F}_{grav}^{\overline{X}-\overline{X}}$. Comme la masse de courbure est beaucoup plus faible que la masse d'inertie $M_{courbure}^{\overline{X}} << M_{0}^{\overline{X}}$ dans le cas d'une particule ou d'une anti-particule qui ne soit pas un neutrino, la différence entre ces forces d'interaction reste faible, mais elle assure tout de même une asymétrie entre particules et anti-particules (gravitationnellement, les particules s'attirent un peu moins fort que les anti-particules) qui pourrait jouer un rôle important dans l'évolution cosmologique de l'Univers, comme nous le verrons dans la section suivante.

Dans le cas de l'interaction entre particules X et Y, on a les relations d'inégalité suivantes entre les forces d'interaction gravitationnelle $\boldsymbol{F}_{grav}^{X-Y} < \boldsymbol{F}_{grav}^{\overline{X}-Y} \cong \boldsymbol{F}_{grav}^{X-\overline{Y}} < \boldsymbol{F}_{grav}^{\overline{X}-\overline{Y}}$ qui montrent à nouveau que les particules s'attirent un peu moins fort que les anti-particules.

Quant aux cas qui font intervenir uniquement les neutrinos, on déduit les relations suivantes pour les forces d'interaction: $\boldsymbol{F}_{grav}^{\nu^{0}-\nu^{0}} < 0$, $\boldsymbol{F}_{grav}^{\overline{\nu}^{0}-\overline{\nu}^{0}} > 0$, $\boldsymbol{F}_{grav}^{\nu^{0}-\overline{\nu}^{0}} \cong 0$, $\boldsymbol{F}_{grav}^{\nu^{0}-\nu^{0}} = -\boldsymbol{F}_{grav}^{\overline{\nu}^{0}-\overline{\nu}^{0}}$. Autrement dit, les neutrinos se repoussent, avec une force de même ampleur que les anti-neutrinos s'attirent. Quant à l'interaction entre un neutrino et un anti-neutrino, elle est extrêmement faible puisqu'elle fait intervenir le produit $(M_{0}^{\nu^{0}})^{2}$.

Finalement, en ce qui concerne les interactions entre particules et neutrinos, on obtient les relations suivantes: $\boldsymbol{F}_{grav}^{X-\nu^{0}} < 0$, $\boldsymbol{F}_{grav}^{X-\overline{\nu}^{0}} \cong 0$, $\boldsymbol{F}_{grav}^{\overline{X}-\nu^{0}} \cong 0$, $\boldsymbol{F}_{grav}^{\overline{X}-\overline{\nu}^{0}} > 0$. Ainsi, l'interaction entre un neutrino et une particule est répulsive. Entre un anti-neutrino et une anti-particule, elle est attractive. Et entre un neutrino et une anti-particule, ou entre un anti-neutrino et une particule, l'interaction peut être légèrement positive ou négative, mais de moindre ampleur que dans les deux premiers cas.

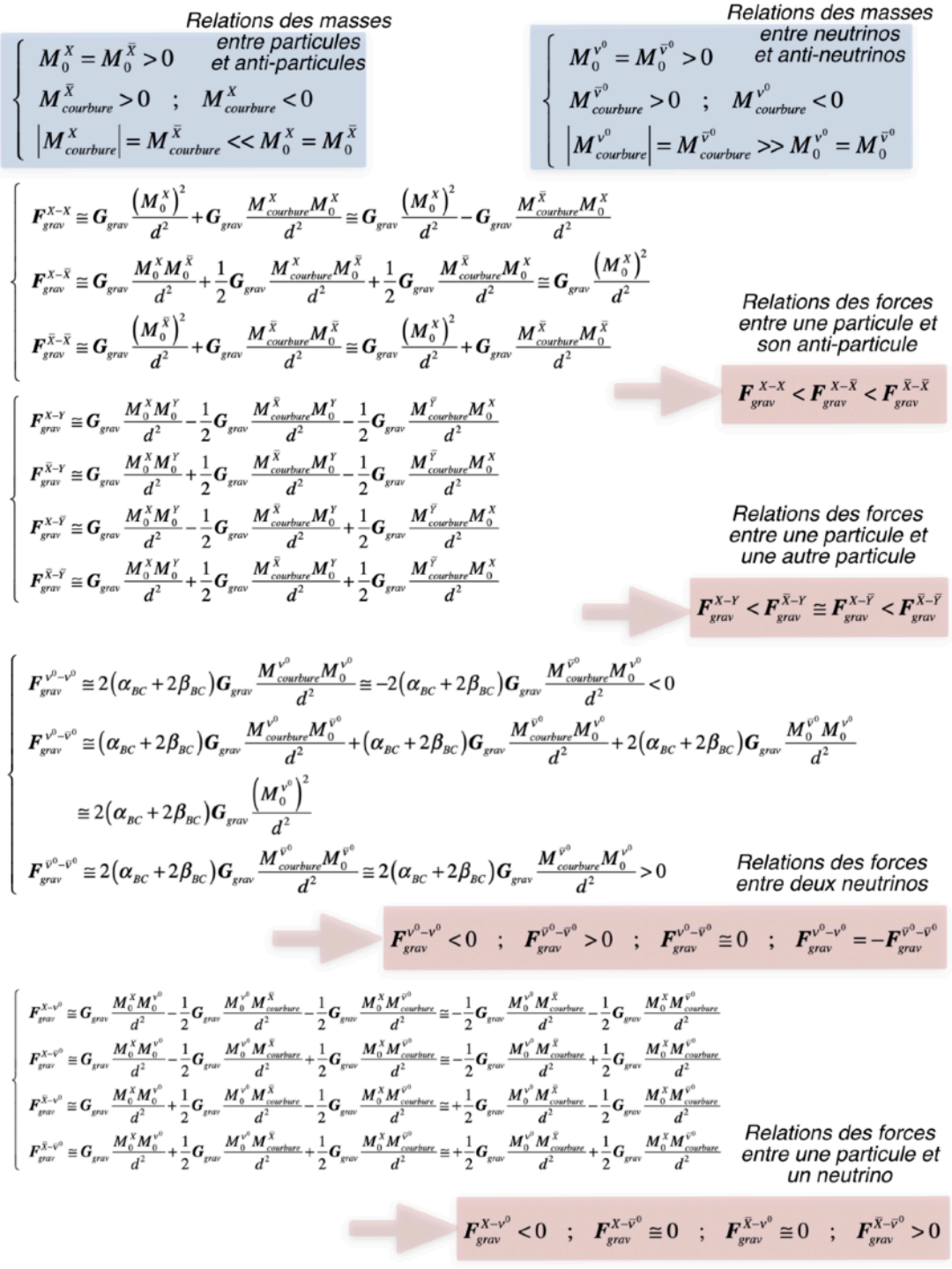

Figure 10.1 *- Relations de masses et de forces d'interaction entre particules (X ou Y), antiparticules ($\overline{X}$ ou $\overline{Y}$), neutrinos (ν^0) et antineutrinos ($\overline{\nu}^0$)*

Les effets de l'expansion cosmologique du réseau sur les interactions gravitationnelles

Avec les relations d'inégalité entre forces d'interaction gravitationnelle que nous venons d'obtenir pour les interactions entre particules, anti-particules, neutrinos et anti-neutrinos, on peut revenir à l'évolution cosmologique du réseau cosmologique parfait (figure 3.7 et 3.10), et y intégrer les comportements des forces gravitationnelles d'interaction entre particules. On obtient

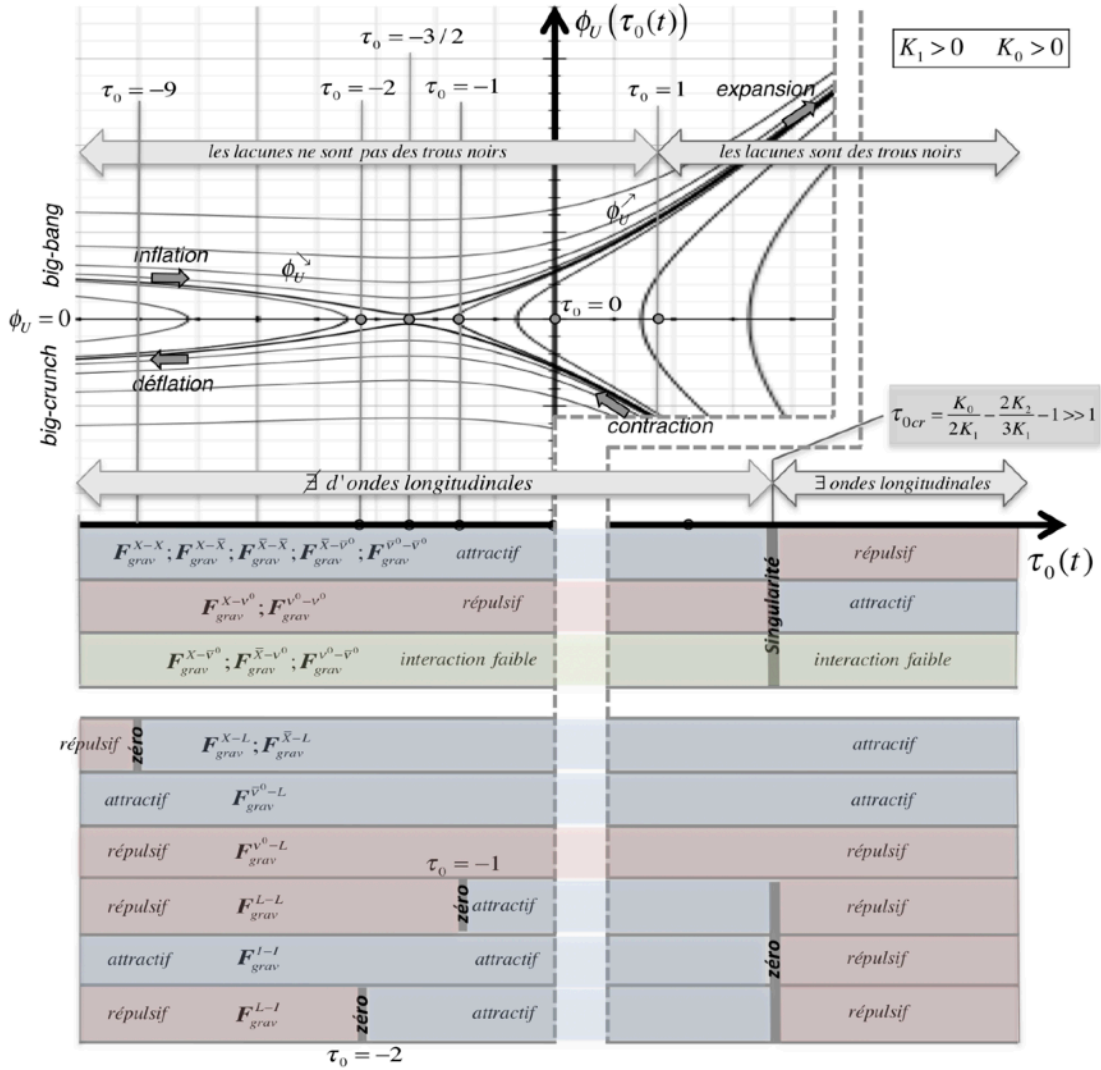

Figure 10.2 *- Comportement des forces d'interaction «gravitationnelles» en fonction de l'évolution cosmologique de l'expansion de fond du réseau*

le résultat de la figure 10.2.

Comme le montre cette figure, il apparaît une suite de valeurs caractéristiques de l'expansion $\tau_0(t)$ pour lesquelles il existe de soudaines modifications, soit du comportement de l'expansion cosmologique, soit du comportement des diverses forces d'interaction gravitationnelle. Dans cette figure, on a aussi reporté les forces d'interaction gravitationnelle faisant intervenir les lacunes macroscopiques (trous noirs dès que $\tau_0(t) \geq 1$) et les interstitiels macroscopiques (étoiles à neutrons). Parmi les valeurs caractéristiques importantes de l'expansion cosmologique du réseau, il y a:

- $\tau_0(t \to t_{init}) \to -\infty$, qui représente le *«big-bang»* initial du réseau au temps t_{init},
- $\tau_0(t) = -9$, qui représente la valeur d'expansion pour laquelle la force d'interaction entre une lacune macro et une particule ou une anti-particule passe de répulsive à attractive,
- $\tau_0(t) = -2$, qui représente la valeur d'expansion pour laquelle la force d'interaction entre une lacune macro et un interstitiel macro passe de répulsive à attractive,
- $\tau_0(t) = -3/2$, qui correspond au passage du stade de *l'inflation*, pendant laquelle la vitesse

d'expansion $\phi_U\left(\tau_0(t)\right)$ décroît, vers le stade de *l'expansion* pendant laquelle la vitesse d'expansion $\phi_U\left(\tau_0(t)\right)$ se remet à croître,

• $\tau_0(t)=-1$, qui correspond au passage du stade de répulsion entre lacunes macroscopiques au stade d'attraction entre lacunes macroscopiques,

• $\tau_0(t)=1$, qui représente la valeur d'expansion à partir de laquelle les lacunes macroscopiques deviennent des trous noirs,

• $\tau_0(t)=\tau_{0cr}$, qui représente *l'expansion critique* à partir de laquelle il apparaît des ondes longitudinales au sein du réseau au détriment des modes propres localisés de vibration de l'expansion, et qui représente aussi l'expansion critique pour laquelle plusieurs des forces d'interaction gravitationnelle changent de signe, soit en passant par une singularité infinie, soit en passant par une valeur nulle.

Au-delà de τ_{0cr}, l'évolution cosmologique du réseau passe du stade de *l'expansion*, pendant laquelle la vitesse d'expansion $\phi_U\left(\tau_0(t)\right)$ est positive, vers un stade de *contraction* pendant lequel la vitesse d'expansion $\phi_U\left(\tau_0(t)\right)$ devient négative, et qui se termine, après des stades de *contraction* et de *déflation*, par un *«big-crunch»* suivi d'un nouveau *«big-bang»* du réseau, donc par un *«big-bounce»* du réseau dû à l'énergie cinétique emmagasinée, comme le montrent bien les figures 3.7 et 3.10.

Un scénario plausible d'évolution cosmologique des singularités topologiques dans un réseau cosmologique parfait

Sur la base de la figure 10.2, un scénario plausible d'évolution des singularités topologiques du réseau cosmologique peut alors être imaginé, qui implique plusieurs étapes distincts pour arriver à l'état actuel de notre Univers:

(1) Hypothétique liquéfaction et solidification du réseau au cours du «big-bounce» et formation d'une «soupe chaude initiale» de boucles de singularités.

Dans le scénario d'un Univers «big-bounce» représenté aux figures 3.7 et 3.10, la contraction intense du réseau en fin de «big-crunch» doit assurément échauffer de manière extrême le réseau puisque sa compression devient gigantesque, ce qui pourrait amener à sa «liquéfaction». Il est évident qu'un tel phénomène, calqué sur notre connaissance de la matière usuel, n'est pas facile à imaginer, et présuppose qu'aux mailles du réseau soient associées des «particules étranges», qui seraient responsables de la masse associée au réseau (et qui correspondraient peut-être aux fameuses particules de Higgs du Modèle Standard). Pour que le réseau présente effectivement un phénomène de transition de phase par «liquéfaction», il faudrait que sa fonction d'état complète ne contienne pas seulement les termes d'énergie libre de déformation, mais aussi des termes thermiques conduisant à la transition de phase.

En supposant donc que le *«big-bang»* suivant le *«big-crunch»* se produise à partir d'un liquide très chaud de «particules étranges» massives, la phase d'inflation de l'évolution cosmologique devrait conduire à un refroidissement du liquide (à une diminution de son agitation thermique) et à une soudaine *«solidification»* du liquide sous la forme du *réseau cosmologique parfait* que nous avons introduit au chapitre 3. Au cours de cette transition de phase, il pourrait alors apparaître des *défauts de structure du réseau*, sous la forme de dislocations, de désinclinaisons, de boucles, de lacunes et d'interstitiels, et même de joints de grains, de façon très similaire à ce qu'il arrive par exemple lors de la solidification rapide d'un métal.

On pourrait parler d'une *«soupe chaude initiale»* de boucles de singularités, le terme de *soupe* incluant le fait d'une répartition initiale homogène des divers types de boucles de singularité et une mobilité très grande de ces boucles comme dans un liquide, alors que le terme *chaud* inclue la notion d'un réseau encore extrêmement chaud, autrement dit contenant une très grande quantité de *modes d'ondes transversales (photons)* et de *modes de vibrations longitudinales localisées (gravitons)*, impliquant une *très forte agitation thermique des boucles initiales*.

(2) Inflation du réseau et condensation des boucles de singularités en particules et en anti-particules.

Au cours de l'inflation du réseau cosmologique, et donc de son refroidissement, et dès que la température aura suffisamment baissé, les diverses boucles de dislocation et de désinclinaison vont se regrouper au sein de la «soupe chaude» pour former des dispirations topologiques localisées et complexes, formées de boucles de dislocation et de désinclinaison liées par la force d'interaction faible (chapitzre 9), et correspondant aux diverses particules élémentaires de matière (électron e^-, neutrino ν^0, neutron n^0, proton p^+, etc.) et d'anti-matière (positron $\overline{e}^+$, anti-neutrino $\overline{\nu}^0$, anti-neutron $\overline{n}^0$, anti-proton $\overline{p}^-$, etc.) de notre Univers. Quant à l'existence de telles combinaisons de boucles sous forme localisée, pouvant correspondre aux diverses particules élémentaires de notre Univers, elle sera discutée au chapitre 13 dans cet ouvrage.

(3) Formation des galaxies par précipitation de la matière et de l'anti-matière au sein d'une mer de neutrinos répulsifs.

Au sein de la soupe chaude, mélange initialement homogène de particules et d'anti-particules, il y a des particules et des anti-particules dont l'interaction gravitationnelle est attractive (électron e^-, neutron n^0, proton p^+, positron $\overline{e}^+$, anti-neutrino $\overline{\nu}^0$, anti-neutron $\overline{n}^0$, anti-proton $\overline{p}^-$, etc.), mais il y a aussi les divers neutrinos ν^0 dont l'interaction gravitationnelle avec les autres particules (tels que électron e^-, neutron n^0, proton p^+, positron $\overline{e}^+$, anti-neutron $\overline{n}^0$, anti-proton $\overline{p}^-$, etc.) est répulsive, ou alors quasi inexistante (avec les anti-neutrinos $\overline{\nu}^0$), et il y a évidemment aussi une mer de photons énergétiques interagissant fortement avec les particules et anti-particules chargées via le mécanisme de diffusion Compton. Cette situation liée à la composante de boucles de dislocation coin avec leur charge de courbure est tout à fait originale de notre approche, et va obligatoirement conduire à un phénomène connu, mais très difficile à expliquer à l'heure actuelle par les autres théories, à savoir *la formation initiale des galaxies*.

En effet, il est possible de faire un modèle extrêmement simplifié de la soupe chaude initiale et homogène de particules et anti-particules pour décrire la formation des galaxies. Considérons que la soupe chaude initiale forme une sorte de liquide composé des particules attractives X d'une part (électron e^-, neutron n^0, proton p^+, positron $\overline{e}^+$, anti-neutrino $\overline{\nu}^0$, anti-neutron $\overline{n}^0$, anti-proton $\overline{p}^-$, etc.) et des neutrinos ν^0 répulsifs d'autre part (neutrino électronique ν_e, neutrino muonique ν_μ et neutrino tauique ν_τ,), et essayons d'exprimer l'énergie libre d'interaction $f^{interaction}$ par particule au sein de ce mélange liquide. En introduisant les concentrations C_{ν^0} et $C_X = 1 - C_{\nu^0}$ de neutrinos ν^0 répulsifs et de particules attractives X au sein du mélange, l'énergie libre d'interaction peut s'écrire comme la somme d'un terme d'énergie interne d'interaction et d'un terme entropique de mélange, comme représenté dans la première formule de la figure 10.3, où z est le nombre de coordination moyen, qui représente le nombre moyen

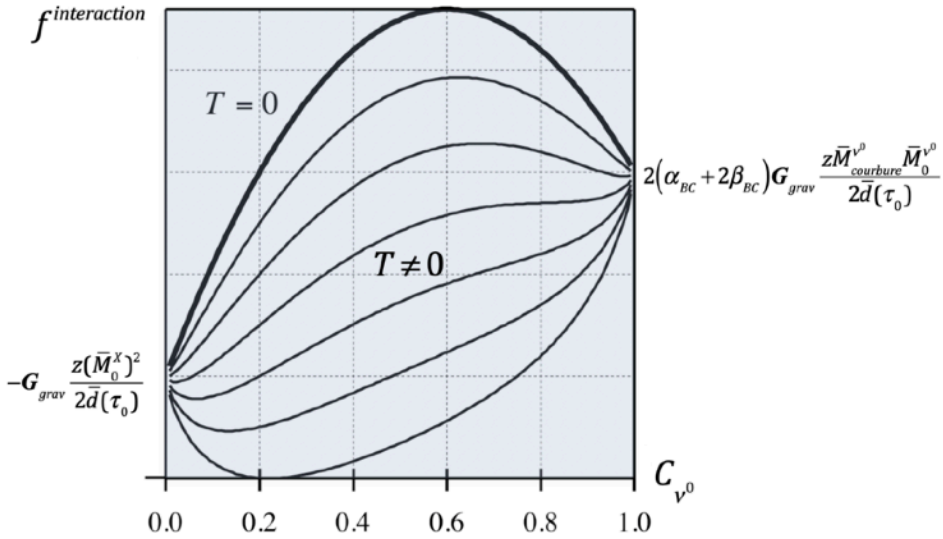

Figure 10.3 *- L'énergie libre d'interaction par particule au sein de la soupe chaude initiale de particules en fonction de la concentration C_{ν^0} de neutrinos répulsifs et pour différentes températures du réseau*

de particules voisines avec lesquelles une particule peut former une interaction de paire et où le facteur 1/2 est introduit pour ne pas compter deux fois chaque interaction[1].

En introduisant alors une valeur moyenne de la masse d'inertie des particules attractives $\bar{M}^{X}_{0} > 0$ et des neutrinos $\bar{M}^{\nu^0}_{0} > 0$, ainsi que la masse de courbure moyenne $\bar{M}^{\nu^0}_{courbure} < 0$ des neutrinos de matière, et en supposant une distance moyenne $\bar{d}(\tau_0)$ entre les particules dans la soupe chaude homogène initiale, on peut exprimer très approximativement l'énergie libre d'interaction par particule sous la forme de la deuxième relation de la figure 10.3. Si on représente cette énergie libre d'interaction en fonction de la concentration C_{ν^0} de neutrinos pour différentes températures du réseau, comme dans le diagramme de la figure 10.3, on constate qu'à haute température l'énergie libre minimum est obtenue par un mélange homogène des particules attractives X et des neutrinos répulsifs ν^0. Mais si la température du réseau baisse suffisamment, il apparaît deux minima d'énergie libre en fonction de la concentration C_{ν^0} : un minimum correspondant à une très faible concentration de neutrinos et un minimum correspondant à une très forte concentration de neutrinos. En fait, il apparaît une *transition de phase par précipitation*, qui tend à séparer les particules attractives X et les neutrinos répulsifs ν^0, comme représenté à la figure 10.4(a). Il va donc apparaître des *précipités*, sorte d'ilots constitués de particules attractives X, au sein d'une mer de neutrinos répulsifs ν^0. A

[1] *voir section 7.6 dans «Théorie eulérienne des milieux déformables: charges de dislocation et de désinclinaison dans les solides», G. Gremaud, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne 2013, ISBN 978-2-88074-964-4 (751 pages).*

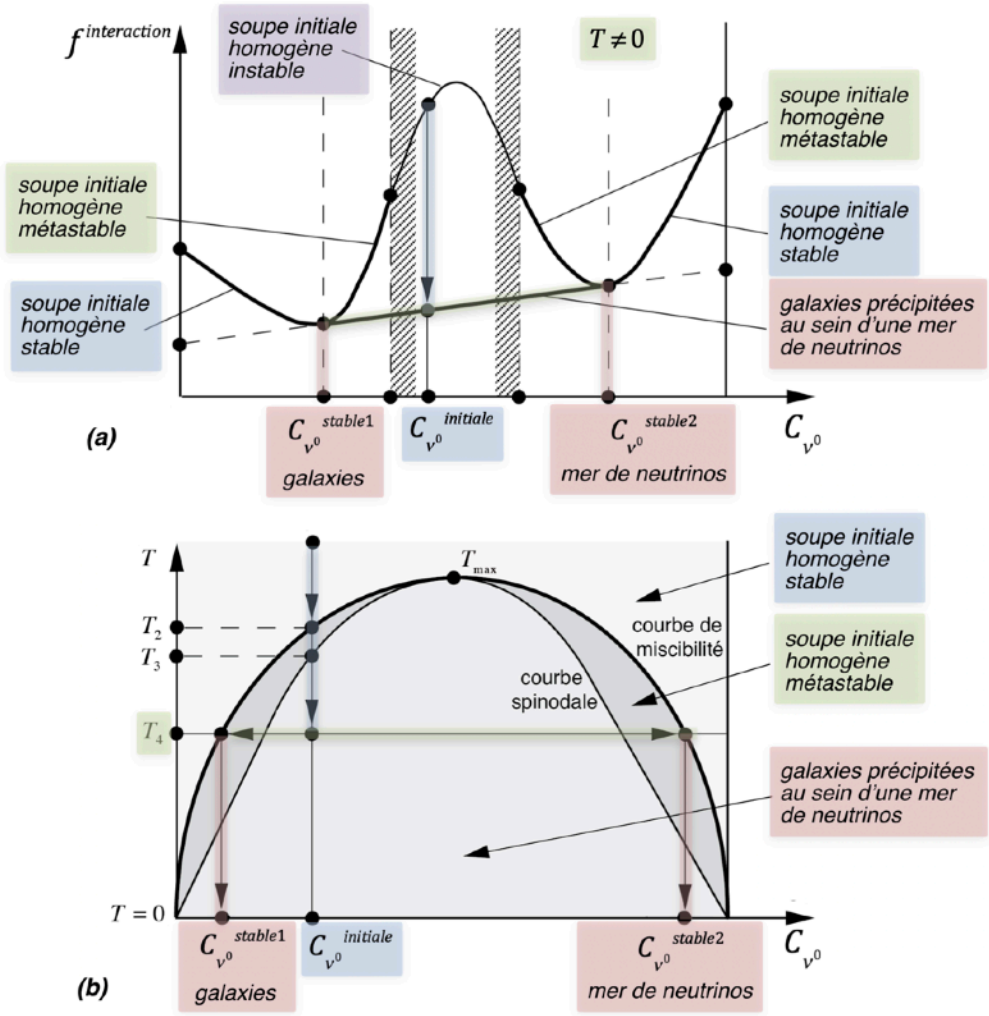

***Figure 10.4 - (a)** Précipitation des galaxies au sein de la soupe chaude initiale de concentration $C_{\nu^0}^{initiale}$ de neutrinos à une température donnée,*
***(b)** diagramme de phase de la matière dans l'Univers en fonction de la température*

faible température, les minima d'énergie libre correspondent aux concentrations $C_{\nu^0} = 0$ et $C_{\nu^0} = 1$, ce qui correspond à une séparation complète des particules attractives et des neutrinos répulsifs.

La *transition de phase par précipitation* des particules et anti-particules attractives sous forme d'amas localisés est représentable par un diagramme de phase de précipitation comme dans la figure 10.4(b), et il correspond parfaitement au phénomène de *formation des galaxies de notre Univers.* Dans ce modèle, c'est l'existence de neutrinos répulsifs qui devient le moteur de la formation des galaxies. Et il est très intéressant de noter que la répulsivité des neutrinos de matière est due exclusivement à la charge de courbure des neutrinos, concept qui n'existe pas en Relativité Générale ni dans le Modèle Standard des particules élémentaires. D'autre part, on sait déjà que la charge de courbure est aussi à l'origine de la faible asymétrie existant entre matière et anti-matière, ce qui confirme le lien fort existant entre cette asymétrie observée expérimentalement et la formation initiale des galaxies et structures de notre Univers actuel.

(4) Formation et ségrégation de la matière et de l'anti-matière au sein des galaxies.

Intéressons-nous maintenant à ce qui se passe au sein des galaxies naissantes, pendant le phénomène de précipitation des particules et anti-particules qui s'attirent. Au sein de cette phase liquide de particules qui précipite, les forces d'interaction gravitationnelle attractives présentent de faibles différences suivant qu'on a à faire à des particules ou des anti-particules. Considérons par exemple la famille des particules X et des anti-particules $\overline{X}$. Les forces d'interaction gravitationnelle entre ces particules sont exprimées dans la figure 10.1. Avec la masse d'inertie M_0^X de ces particules, on déduit, grâce à l'équation de Newton classique, l'accélération que subissent ces particules lors de leurs diverses interactions X - X , X - $\overline{X}$ et $\overline{X}$ - $\overline{X}$: $\boldsymbol{a}_{grav}^{X-X} \cong \boldsymbol{G}_{grav}\left(\boldsymbol{M}_0^X - \boldsymbol{M}_{courbure}^{\overline{X}}\right)/d^2$, $\boldsymbol{a}_{grav}^{X-\overline{X}} \cong \boldsymbol{G}_{grav}\boldsymbol{M}_0^X/d^2$ et $\boldsymbol{a}_{grav}^{\overline{X}-\overline{X}} \cong \boldsymbol{G}_{grav}\left(\boldsymbol{M}_0^X + \boldsymbol{M}_{courbure}^{\overline{X}}\right)/d^2$. On en déduit que $\boldsymbol{a}_{grav}^{X-X} < \boldsymbol{a}_{grav}^{X-\overline{X}} < \boldsymbol{a}_{grav}^{\overline{X}-\overline{X}}$, donc les anti-particules $\overline{X}$ s'attirent plus fortement que les particules X, et on doit par conséquent voir apparaître un *phénomène de ségrégation progressive* des anti-particules et des particules, au cours duquel les anti-particules auront tendance à se regrouper vers le centre de la galaxie naissante, laissant les particules dans la périphérie de la galaxie.

Il est clair que ce phénomène de ségrégation doit être accompagné d'une intense activité d'annihilation entre les particules et les anti-particules, dans une zone située autour du centre de la galaxie, et qui devrait forcément être *une source d'intense rayonnement gamma*. Mais il doit aussi y apparaître une activité de combinaisons entre particules et entre anti-particules pour former de la matière et de l'anti-matière (initialement des atomes d'hydrogène et d'anti-hydrogène et des atomes d'hélium et d'anti-hélium). Ces processus d'annihilation et de recombinaison doivent se poursuivre jusqu'à ce qu'il apparaisse une séparation effective entre un coeur de galaxie composé essentiellement d'anti-matière et une périphérie de galaxie composée essentiellement de matière. On constate à nouveau que ce *processus de ségrégation de la matière et de l'anti-matière* est à associer à la *charge de courbure des boucles de dislocation coin*, qui est une propriété exclusive de notre approche, puisque ce sont ces charges qui sont responsables de la masse équivalente de courbure $M_{courbure}^{\overline{X}}$, elle-même responsable de la faible différence d'interaction gravitationnelle attractive entre matière et anti-matière.

(5) Formation d'un fond diffus cosmologique de rayonnement.

Initialement, toutes les particules et anti-particules sont à l'équilibre thermique avec une mer de photons, via des interactions par diffusion Compton, et tant que leur température n'a pas diminué suffisamment pour former des atomes. Mais dès que la température passe en-dessous d'environ 3'000 K, il y a formation des atomes d'hélium, d'anti-hélium, d'hydrogène et d'anti-hydrogène qui assure la neutralité électrique de la matière et de l'anti-matière. A cet instant il y a aussi découplage des photons d'avec la matière et l'anti-matière neutres. L'Univers devient par conséquent transparent aux photons, qui remplissent alors tout l'espace sous la forme d'un *fond diffus cosmologique de rayonnement.* Ce fond diffus cosmologique de rayonnement a été observé et étudié expérimentalement: il est quasiment *isotrope* et présente le *spectre d'un corps noir parfait*, c'est-à-dire une *distribution de Planck de la densité d'énergie* $U(\nu)$ *de photons* (figure 10.5), centrée sur une température T qui est mesurée actuellement à la valeur de 2,7 K, avec c la vitesse de la lumière, h la constante de Planck, k la constante de Boltzmann, T la température du corps noir et ν la fréquence des photons. On reviendra dans la suite sur le processus qui conduit au «refroidissement» de ce fond diffus cosmologique de rayonnement.

(6) Effondrement gravitationnel et disparition de l'anti-matière par formation de gigantesques trous noirs au centre des galaxies.

La formation par précipitation de galaxies composées de particules et d'anti-particules attractives au sein de la mer de neutrinos répulsifs va conduire à des pressions énormes au coeur des galaxies au fur et à mesure de leur évolution. L'apparition d'un mouvement de tournoiement des galaxies permet d'équilibrer partiellement les forces d'attraction gravitationnelle au sein des galaxies et les forces de compression de la mer de neutrinos. Mais au centre même des galaxies, les forces de compression pourraient atteindre des valeurs suffisantes pour assister à un effondrement gravitationnel de leur coeur. Si un tel effondrement intervient, comme le coeur des galaxies est formé essentiellement d'anti-matière, il sera responsable de l'apparition de lacunes macroscopiques puisqu'au cours de l'effondrement les boucles de désinclinaison vis vont s'annihiler (si l'anti-matière était initialement neutre électriquement), alors que les boucles de dislocation coin lacunaires propres à l'anti-matière se combinent pour former des lacunes macroscopiques de réseau au centre des galaxies.

La lacune macroscopique créée au centre d'une galaxie par l'effondrement gravitationnel de l'anti-matière n'est en fait rien d'autre qu'une *gigantesque singularité topologique*, qui devient un *énorme trou noir* dès que l'expansion de fond du réseau dépasse l'unité ($\tau_0 \geq 1$). Ce phénomène d'effondrement gravitationnel de l'anti-matière ségrégée au coeur des galaxies expliquerait alors parfaitement, et fort simplement, les observations expérimentales de *l'existence de gigantesques trous noirs au centre de la plupart des galaxies* et de *la disparition de l'anti-matière dans notre univers actuel.*

(7) Coalescence de la matière dans les galaxies et formation des étoiles.

La matière qui compose les galaxies après l'effondrement du coeur d'anti-matière en un trou noir central va petit à petit coalescer sous l'effet de l'attraction gravifique pour former des nuages de gaz d'hydrogène et d'hélium, divers types d'étoiles et des systèmes planétaires, tels que ceux observés dans notre univers actuel.

(8) Effondrement gravitationnel des étoiles et formation des étoiles à neutrons.

Comme les galaxies sont alors constituées essentiellement de matière, basée sur des *boucles de dislocation coin de nature interstitielle*, tout effondrement gravitationnel d'une très grosse étoile sous l'effet de sa gravité propre doit conduire à une *singularité topologique localisée du type interstitiel macroscopique*, et non du type lacune macroscopique. Il ne peut par conséquent pas apparaître de *trous noirs lacunaires* après effondrement gravitationnel d'une étoile massive composée de matière.

Expérimentalement, on observe parfois et soudainement ce phénomène d'effondrement gravitationnel d'étoiles massives de matière sous la forme d'une *supernova* (d'un nuage de gaz résiduels de l'explosion initiale de l'étoile, qui s'étend à très grande vitesse), avec, au centre de la supernova, un objet relativement petit et très massif, qui devrait correspondre à une singularité interstitielle macroscopique résiduelle, qu'on qualifie communément de *pulsar* (de par ses propriétés d'émission de pulses électromagnétiques dont la fréquence correspond à la fréquence très rapide de rotation de l'objet sur lui-même) ou d'*étoile à neutrons* (de par la densité massique énorme de l'objet).

La suite de l'histoire est alors bien connue et bien décrite par les astrophysiciens, avec la formation d'atomes de masse de plus en plus grande par la fusion nucléaire de l'hydrogène et

des éléments légers au coeur des étoiles et par la dispersion de ces éléments par les supernovae, conduisant finalement à l'apparition de tous les éléments de la table de Mendeleïev et à la formation d'étoiles de plus en plus complexes, de systèmes planétaires, etc.

(9) Du futur de notre univers.

Dans le scénario de l'u*nivers «big-bounce»* représenté aux figures 3.7 et 3.10, qui correspond en fait au mieux à notre propre univers, la phase d'expansion à vitesse croissante, dans les conditions où il n'existe pas de propagation d'ondes longitudinales, se situe entre les valeurs $\tau_0 = -3/2$ et $\tau_0 = \tau_{0cr} >> 1$. Notre Univers actuel doit donc se situer dans ce domaine d'expansion de fond puisque des observations récentes ont montré que l'expansion de l'univers se fait fort probablement à vitesse croissante. On peut même dire que l'expansion de fond actuelle devrait en fait être comprise dans le domaine $1 < \tau_0 < \tau_{0cr}$, puisque des trous noirs massifs semblent bien avoir été observés au centre de la plupart des galaxies, notamment au centre de notre galaxie, la Voie Lactée.

Comme cette plage d'expansion ($1 < \tau_0 < \tau_{0cr} >> 1$) est très grande, il est difficile de savoir où se situe actuellement notre Univers et combien de temps il lui faudra pour atteindre l'expansion critique τ_{0cr}. Mais on peut par contre affirmer que lorsque celui-ci approchera la valeur critique τ_{0cr}, il apparaîtra forcément des phénomènes titanesques de remaniement des objets célestes, de la matière, des trous noirs et de la mer de neutrinos répulsifs puisqu'à ce moment on aura essentiellement que:

- la constante de gravitation G_{grav} deviendra négative en passant par une singularité à τ_{0cr},
- les modes propres de vibrations localisées disparaîtront au profit de la propagation d'ondes longitudinales, ce qui devrait en fait correspondre à la disparition de la physique quantique comme nous le verrons dans la suite de cet ouvrage.

Rien que ces deux phénomènes devraient être cataclysmiques. Mais on pourrait encore pousser plus loin en considérant les phénomènes qui devraient intervenir lors de la phase de re-contraction du réseau cosmologique, surtout lors du passage inverse par la valeur critique τ_{0cr} où la constante de gravitation redeviendrait positive et où il réapparaîtrait des modes propres de vibrations localisées à la place de la propagation d'ondes longitudinales. Ces prédictions sont très probablement du domaine du possible avec notre approche, quoiqu'assurément très difficiles et très approximatives. En fait, on nage là en pleine science-prédiction, pour ne pas dire en pleine science-fiction.

Il n'en reste pas moins que notre approche va nettement plus loin dans les explications et les prédictions que la relativité générale, et que nombre de phénomènes exotiques tels que le déplacement instantané dans l'espace et le temps via les fameux trous de ver décrits à partir de la relativité générale, qui font le bonheur des physiciens théoriciens et des écrivains de science-fiction, ne devraient être que pures élucubrations à la lumière de notre approche.

De la fameuse «matière noire» des astrophysiciens

La formation d'une *«mer de neutrinos répulsifs»* dans laquelle baignent les galaxies explique parfaitement le phénomène attribué à la *«matière noire»* par les astrophysiciens. En effet, lorsqu'on observe une galaxie et qu'on mesure expérimentalement les vitesses des étoiles la composant en fonction de leur distance au centre de la galaxie, on constate que les vitesses des étoiles situées en périphérie de la galaxie sont trop élevées par rapport aux vitesses calculées

en appliquant la loi de gravitation de Newton avec la densité de masse des étoiles (qu'on peut mesurer expérimentalement via leur brillance). Tout se passe comme s'il existait un halo de matière invisible à nos yeux aux alentours de la galaxie, qui, par son effet gravifique, force les étoiles à tourner plus vite pour compenser cet effet attractif. Cet halo de matière invisible a été appelé *matière noire* par les astrophysiciens, et la recherche de la nature même de cette matière noire est actuellement un des grands sujets de la recherche fondamentale, ayant généré pléthore d'explications diverses, mais dont aucune ne donne satisfaction.

Dans notre approche, le concept de matière noire n'est plus nécessaire, car il est simplement remplacé par le concept de *«mer de neutrinos répulsifs»* dans laquelle baignent toutes les galaxies, les amas globulaires, et les autres structures de l'Univers visible. En effet, considérons une galaxie soumise à la force répulsive de la mer de neutrinos dans laquelle elle baigne. Cette force répulsive correspond en fait à une force de compression qui s'applique sur les étoiles de la banlieue de la galaxie. Pour résister à cette force de compression, les étoiles de la périphérie de la galaxie doivent forcément tourner plus vite que ce qu'on calcule sur la base de la masse visible, de telle sorte à équilibrer la force de compression de la mer de neutrinos par une force centripète additionnelle de rotation.

De la constante de Hubble

Expérimentalement, on constate que la lumière des galaxies présente un décalage vers le rouge (redshift des raies spectrales d'émission des atomes). Ce décalage a été attribué par Hubble à la vitesse de récession apparente $\boldsymbol{v}$ des galaxies en fonction de leur éloignement d dû à l'expansion de l'Univers, effet expliqué initialement par l'effet Doppler-Fizeau dû au mouvement de fuite des galaxies dans l'espace. La relation expérimentale entre la vitesse de récession et l'éloignement d a été mesurée par Hubble, qui a trouvé que $\boldsymbol{v} = H_0 d$, où H_0 est la *constante de Hubble* qui vaut approximativement 70 (km/s)/Mpc (70 kilomètre par seconde, par mégaparsec). L'interprétation initiale de cette observation comme un effet Doppler-Fizeau dû à la vitesse d'éloignement des galaxies dans l'espace conduit en fait à ce que des galaxies qui seraient situées à des distances supérieures à 4'000 mégaparsecs s'éloigneraient de nous à des vitesses supérieures à celle de la lumière, ce qui est évidemment un non-sens d'après la relativité restreinte. La solution à ce problème peut être déduite de la relativité générale, pour laquelle l'expansion de l'univers ne doit pas s'interpréter par un mouvement des galaxies dans l'espace, mais plutôt par un gonflement de l'espace lui-même, qui implique un éloignement progressif des objets qu'il contient (un peu de même façon que dans notre approche où c'est le réseau cosmologique parfait qui s'étend).

Regardons ce qu'il en est de la constante de Hubble dans notre approche, qui se distingue très nettement de la relativité générale, ne serait-ce que pas l'existence du scalaire d'expansion volumique τ qui est directement concerné par une expansion cosmologique du réseau cosmologique parfait. Supposons donc une évolution cosmologique du réseau cosmologique parfait comme celle décrite aux figures 3.7 et 3.10. Au cours de l'évolution, supposons que le ***GO*** observe une certaine région dans le graphe 3.10, dans laquelle le réseau cosmologique est en expansion, et même en expansion à vitesse croissante. Supposons que le ***GO*** observe deux galaxies qui sont initialement distantes de d_0 à l'instant $t = 0$. Si ces galaxies *ne se meuvent pas* par rapport au réseau cosmologique en expansion, la distance d_0 initiale va évoluer au

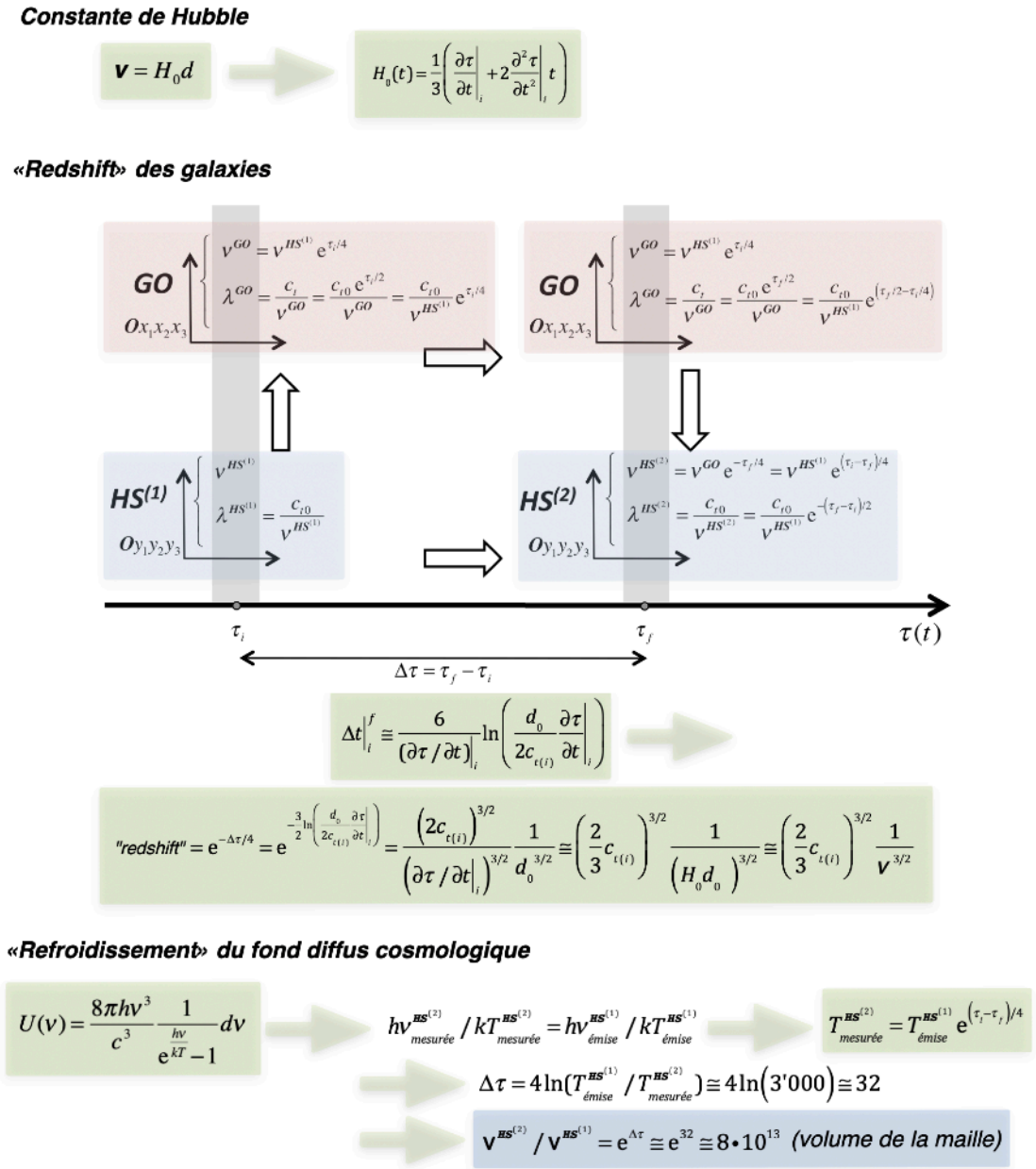

Figure 10.5 *- Constante de Hubble, «redshift» des galaxies et «refroidissement» du fond diffus cosmologique*

cours du temps, et le ***GO*** observera que la distance entre les deux galaxies va augmenter exponentiellement comme $d(t) = d_0 \exp\left[\left(\tau(t) - \tau_i\right)/3\right]$, de sorte que les deux galaxies s'éloigneront l'une par rapport à l'autre avec la vitesse relative $\boldsymbol{v}(t) = \partial d(t)/\partial t$. La valeur de cette vitesse peut être approchée par un développement de deuxième ordre de l'expansion $\tau(t)$ en le temps, ce qui permet de déduire la valeur $H_0 = \boldsymbol{v}/\boldsymbol{d}$ de la constante de Hubble reportée ci-contre. Si le ***GO*** mesure alors cette vitesse à un instant $t \neq 0$, il trouvera que la constante de Hubble devient dépendante de l'instant auquel il observe l'univers au cours de son évolution cosmologique, et notamment que celle-ci augmente si on se trouve dans un domaine où la vitesse d'expansion de l'univers s'accroît.

Du «redshift» des galaxies

Considérons maintenant deux galaxies distantes initialement de d_0 à l'instant $t = 0$ pour le ***GO***. Si, à cet instant $t = 0$, la galaxie 1 émet un signal vers la galaxie 2, le signal va parcourir une distance dx pendant le laps de temps dt tel que $dx = c_t dt$. Mais comme le réseau est en expansion, et en négligeant l'accélération de cette expansion, on a que la célérité des ondes transversales dépend de l'instant t, de sorte que $c_t(t) = c_{t(i)} \exp\left[(\partial\tau / \partial t\big|_i) t / 2 \right]$, où $c_{t(i)}$ est la vitesse des ondes transversales à l'instant $t = 0$. La distance d entre les deux galaxies sera alors parcourue en le laps de temps $\Delta t\Big|_i^f$ reporté dans la figure 10.5, qui peut se calculer approximativement grâce à la relation donnant $c_t(t)$.

Lors de la réception du signal par la galaxie 2, l'expansion de l'univers aura alors atteint une valeur τ_f valant $\tau_f \cong \tau_i + (\partial\tau / \partial t)\big|_i T$. Supposons que le signal émis dans la galaxie 1 à l'instant $t = 0$ est mesuré par un observateur local ***HS(1)*** à la fréquence $\nu_{émise}^{HS^{(1)}}$ d'une certaine raie spectrale d'un atome donné, la fréquence du signal reçu $\nu_{reçue}^{HS^{(2)}}$ et mesuré par un observateur ***HS(2)*** dans la galaxie 2 à l'instant $t = T$ sera différente à cause de l'accroissement d'expansion $\Delta\tau = \tau_f - \tau_i$ de l'Univers intervenu au cours de la propagation. Ainsi, un observateur ***HS(2)*** situé dans la galaxie 2 pourra comparer la fréquence $\nu_{reçue}^{HS^{(2)}}$ de ce signal reçu avec la fréquence $\nu_{émise}^{HS^{(2)}}$ de la même raie spectrale du même atome émise dans son propre laboratoire, et il appellera *«redshift» de la galaxie 1* le rapport entre ces deux fréquences: $redshift = \nu_{reçue}^{HS^{(2)}} / \nu_{émise}^{HS^{(2)}}$. Pour calculer ce redshift, il faut représenter schématiquement comment sont reliées les valeurs physiques mesurées par l'observateur ***HS(1)*** dans la galaxie 1 à l'instant $t = 0$ avec les mêmes valeurs physiques mesurées par le ***GO*** à l'instant $t = 0$ et à l'instant $t = T$ ainsi que par l'observateur ***HS(2)*** dans la galaxie 2 à l'instant $t = T$. Pour cela, on se rappelle que les laps de temps Δt_y mesurés par un ***HS*** dans son référentiel propre $Oy_1y_2y_3$ sont perçus par le ***GO*** dans son référentiel local $Ox_1x_2x_3$ comme des laps de temps Δt reliés par l'expression $\Delta t_y^{HS} = \Delta t^{GO} \, e^{\tau/4}$ dans laquelle τ est l'expansion du réseau à l'endroit où se trouve ***HS***. Cette expression permet aussi de relier aussi les mesures de fréquence faites par un ***HS*** et par le ***GO*** sous la forme $\nu_y^{HS} = \nu^{GO} \, e^{-\tau/4}$. Avec cette relation, on peut représenter schématiquement dans la figure 10.5 comment se comportent les mesures de fréquences et de longueurs d'onde faites au cours de l'expérience de transmission du signal entre les galaxies 1 et 2.

On constate alors que le «redshift» mesuré par l'observateur ***HS(2)*** est relié très simplement l'accroissement d'expansion $\Delta\tau = \tau_f - \tau_i$ de l'Univers intervenu au cours de la propagation puisque $"redshift" = \nu_{émise}^{HS^{(1)}} \, e^{(\tau_i - \tau_f)/4} / \nu_{émise}^{HS^{(2)}} = e^{-\Delta\tau/4}$. En calculant la valeur de $\Delta\tau$ grâce à l'expression du laps de temps $\Delta t\Big|_i^f$ utilisé par la lumière pour parcourir la distance séparant les deux galaxies, on obtient l'expression reportée dans la figure 10.5 pour le «redshift» mesuré par l'observateur ***HS(2),*** qui dépend à la fois de la vitesse instantanée d'expansion $\partial\tau / \partial t\big|_i$ et de la distance initiale d_0 entre les deux galaxies. Mais on peut aussi relier le «redshift» à la constante de Hubble instantanée H_0 ou à la vitesse relative ***V*** de récession des galaxies comme reporté ci-dessous.

Le «redshift» observé par l'observateur ***HS(2)*** sera donc proportionnel à $1 / d_0^{3/2}$ ce qui signifie que le rapport des fréquences est d'autant plus petit que la distance initiale d_0 entre les galaxies est grande, et donc que le «décalage vers le rouge» de la raie spectrale augmente avec l'accroissement de la distance initiale d_0. Le «redshift» est aussi proportionnel à $1 / \left(H_0\right)^{3/2}$, ce

qui signifie qu'il diminue si la constante de Hubble augmente. Et finalement il est aussi proportionnel à $1/\boldsymbol{v}^{3/2}$. Or la vitesse d'éloignement réciproque de deux galaxies n'est pas limitée par la vitesse des ondes transversales dans notre approche puisque cette vitesse est associée à *la vitesse du réseau dans l'espace absolu du* ***GO,*** qui satisfait *une dynamique purement newtonienne*. Ainsi, le «redshift» mesuré peut tendre vers 0 si la vitesse de récession $\boldsymbol{v}$ d'expansion tend vers l'infini.

A noter encore que ces calculs ont été faits en faisant deux suppositions restrictives:
- qu'on se trouve dans une région limitée dans le graphe 3.10 dans laquelle le réseau cosmologique est en expansion, et qui peut être approchée par un développement au deuxième ordre de l'expansion $\tau(t)$ en le temps. Pour des phénomènes qui s'étaleraient sur des temps beaucoup plus longs, les calculs se compliqueraient singulièrement puisqu'il faudrait alors connaître exactement la fonction $\tau(t)$ de l'expansion cosmologique du réseau.
- que les galaxies *ne se meuvent pas* par rapport au réseau cosmologique en expansion. Si tel n'était pas le cas, par exemple à cause des interactions gravitationnelles entre les galaxies, il faudrait ajouter au «redshift» dû à l'expansion du réseau un effet Doppler-Fizeau dû *aux déplacements des galaxies par rapport au réseau*, tel que celui décrit dans la figure 6.12.

Du mécanisme de «refroidissement» du fond diffus cosmologique

Le fond diffus cosmologique de rayonnement est observé actuellement comme un *spectre de corps noir parfait*, suivant très précisément la *distribution de Planck de la densité d'énergie* $U(\nu)$ *de photons* (figure 10.5), centrée sur une température T valant 2,7 K. On suppose que ce rayonnement est fossile du big-bang, qui s'est formé lors du découplage des photons d'avec les particules lors de la formation des atomes neutres d'hélium et d'hydrogène, et que, par conséquent, il a été émis initialement avec une température de l'ordre de 3'000 K. On peut alors se demander quel est le mécanisme de «refroidissement» de ce rayonnement à la lumière de notre approche. Pour cela, il suffit de regarder la figure 10.5. Si on suppose que le découplage photon-matière est intervenu lorsque l'Univers possédait une expansion τ_i et que l'expansion actuelle de l'Univers est τ_f, la fréquence d'émission du rayonnement diffus est donné par $\nu_{émise}^{HS^{(1)}}$ et la fréquence observé actuellement par un observateur $\boldsymbol{HS^{(2)}}$ vaut $\nu_{mesurée}^{HS^{(2)}} = \nu_{émise}^{HS^{(1)}} \mathrm{e}^{(\tau_i - \tau_f)/4}$. D'après la distribution de Planck (figure 10.5), il existe le rapport suivant $h\nu_{mesurée}^{HS^{(2)}} / kT_{mesurée}^{HS^{(2)}} = h\nu_{émise}^{HS^{(1)}} / kT_{émise}^{HS^{(1)}}$ entre la fréquence du rayonnement du corps noir et sa température de couleur, mesurées aux expansions τ_f et τ_i. On en déduit donc que $T_{mesurée}^{HS^{(2)}} = T_{émise}^{HS^{(1)}} \mathrm{e}^{-\Delta\tau/4}$, de sorte qu'une valeur numérique de la variation d'expansion du réseau entre le moment du découplage photon-matière et l'heure actuelle peut se calculer comme $\Delta\tau = 4\ln(T_{émise}^{HS^{(1)}} / T_{mesurée}^{HS^{(2)}}) \cong 4\ln(3'000) \cong 32$. Cette augmentation d'expansion correspond en fait à *une augmentation du volume* $\mathbf{v}$ *de la maille élémentaire du réseau* valant approximativement $\mathbf{v}^{HS^{(2)}} / \mathbf{v}^{HS^{(1)}} = \mathrm{e}^{\Delta\tau} \cong \mathrm{e}^{32} \cong 8 \cdot 10^{13}$, qui doit assurément avoir lieu lors de la phase d'inflation du réseau cosmologique (figure 3.10).

On constate donc que le «refroidissement» apparent du fond de rayonnement diffus cosmologique est un effet direct de l'expansion du réseau, qui modifie énormément les règles et les horloges des référentiels locaux $\boldsymbol{O}y_1y_2y_3$.

Il est intéressant aussi de constater que, pour le ***GO***, la fréquence $\nu_{mesurée}^{GO}$ du fond de rayonnement diffus ne change pas au cours de l'expansion puisqu'elle vaut toujours la même

valeur qu'au moment de son émission $\nu^{GO}_{mesurée} = \nu^{HS^{(1)}}_{émise}\, e^{\tau_i/4}$. Mais par contre, pour le ***GO***, c'est la longueur d'onde $\lambda^{GO}_{mesurée}$ qui va évoluer avec l'expansion, puisque celle-ci est alors égale à $\lambda^{GO}_{mesurée} = c_t / \nu^{GO}_{mesurée} = c_{t0}\, e^{\tau(t)/2} / \nu^{GO}_{mesurée} = c_{t0}\, e^{\tau(t)/2-\tau_i/4} / \nu^{HS^{(1)}}_{émise}$. Les points de vue des observateurs locaux ***HS(i)*** et de l'observateur externe ***GO*** sont donc très différents, et cela est dû au fait que la vitesse des ondes transversales de rotation (vitesse de la lumière) est une constante universelle valant toujours c_{t0} pour les observateurs ***HS(i)*** quelle que soit l'état d'expansion du réseau dans lequel ils sont placés, alors que la célérité des ondes transversales de rotation $c_t = c_{t0}\, e^{\tau(t)/2}$ varie énormément en fonction de l'expansion instantanée $\tau(t)$ du réseau pour l'observateur externe ***GO.***