Chapitre 13

Le Modèle Standard des particules et la Force Forte

On a montré précédemment que le réseau cosmologique parfait présente des analogies fortes avec toutes les grandes théories de la physique moderne, à savoir les équations de l'électromagnétisme, la relativité restreinte, la relativité générale, les trous noirs, la cosmologie, l'énergie noire et la physique quantique, y compris la notion de spin et de moment magnétique, et qu'il peut exister trois types de boucles de singularités topologiques de base possédant respectivement les attributs d'une charge électrique, d'un moment dipolaire électrique ou d'une charge de courbure par flexion (qui est l'apanage exclusif de notre approche du réseau cosmologique parfait, et qui explique assez simplement plusieurs phénomènes mystérieux à l'heure actuelle, comme la force faible de couplage de deux boucles topologiques, la masse noire, les trous noirs galactiques et la disparition de l'anti-matière).

Dans ce chapitre, on va s'attacher à trouver et décrire les ingrédients qui pourraient expliquer, sur la base des boucles de singularités topologiques de base, l'existence du modèle standard actuel des particules élémentaires. Autrement dit, on va essayer de trouver quelles mécanismes pourraient générer les familles de particules fondamentales comme les leptons et les quarks, quelles pourraient être les origines de l'existence de trois générations de ces particules élémentaires, et d'où pourrait provenir la force forte à comportement asymptotique qui lie ensemble les quarks pour former des baryons et des mésons.

Ce chapitre n'a pas du tout la prétention de fournir une théorie élaborée ou une solution définitive et quantitative pour expliquer le modèle standard de la physique des particules, mais plutôt de montrer par quelques arguments spécifiques que c'est assurément le choix d'une *structure microscopique particulière du réseau cosmologique parfait* qui pourrait apporter une réponse aux diverses questions qui se posent concernant le modèle standard. Ce chapitre va donc apporter quelques éléments de réflexion en montrant qu'il peut apparaître dans un solide de structure bien choisie toute une «zoologie» de boucles de singularités topologiques qui peuvent posséder un étrange air de famille avec les particules élémentaires du modèle standard. Il permettra aussi de présenter des comportements très similaires au comportements des particules élémentaires, comme la présence d'une force forte asymptotique pouvant participer à un couplage entre des boucles topologiques.

Le Modèle Standard actuel des particules élémentaires

A l'heure actuelle, la physique des particules explique la structure intime de la matière à l'aide d'un modèle appelé *Modèle Standard des particules élémentaires* (figure 13.1). Ce modèle fait apparaître des *fermions,* des particules de matière qui présentent deux familles assez différentes, la famille des *leptons* et la famille des *quarks*, ainsi que trois types d'interactions qui peuvent intervenir entre ces fermions: l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte.

Les interactions entre les *fermions* de matière interviennent par l'échange de particules appelées *bosons de jauge*, correspondant aux quanta des champs quantiques d'interaction concernés. L'interaction électromagnétique fait appel au *photon* γ , l'interaction faible à trois bosons de jauge Z^0 , W^+ et W^- , et l'interaction forte à 8 bosons de jauge appelés *gluons*.

Quant à la masse des particules, elle est introduite dans le modèle standard par une nouvelle interaction associée au champ quantique de Higgs, dont la particule médiatrice est appelée *boson de Higgs*.

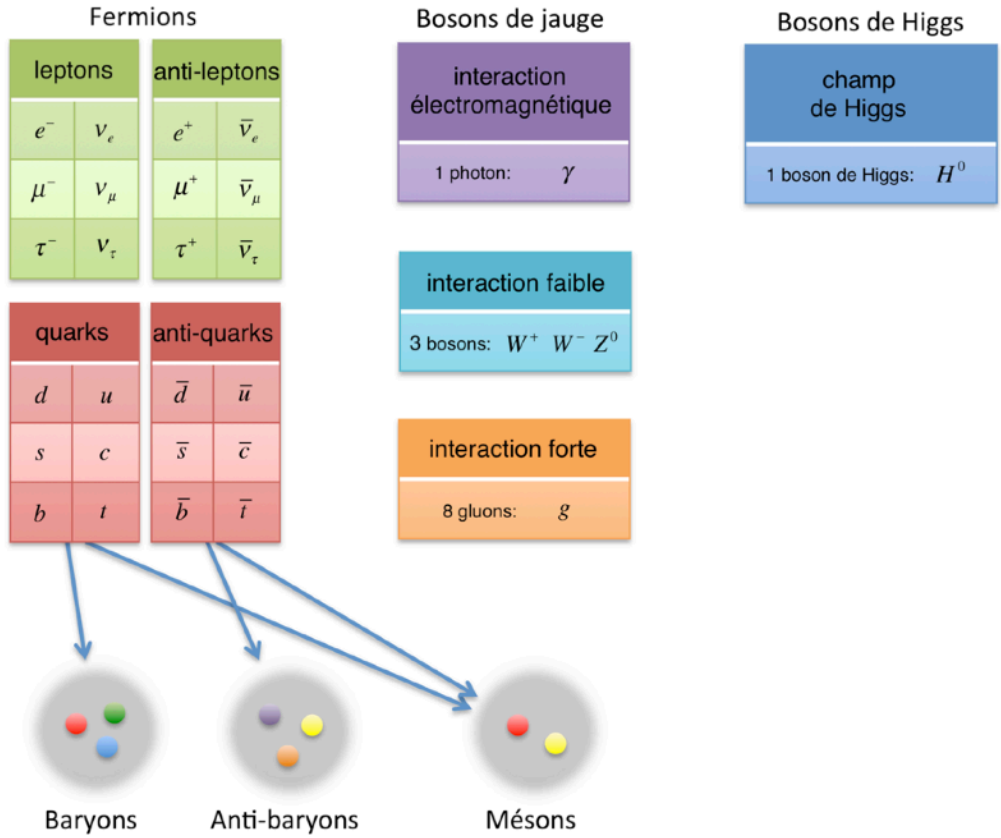


Figure 13.1 *- Les particules du Modèle Standard*

Les leptons et les quarks

La famille des *leptons* (figure 13.1) est composée de trois générations de deux types de particules: trois particules électriquement neutres appelées *neutrino électronique* (ν_e), *neutrino muonique* (ν_μ) et *neutrino tauique* (ν_τ), et trois particules électriquement chargées, appelées *électron* (e^-), *muon* (μ^-) *et tau* (τ^-). Chacune de ces six particules possède en principe une anti-particule ($\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$, $\bar{\nu}_\tau$, e^+, μ^+ et τ^+) qui se caractérise essentiellement par une charge électrique opposée, ce qui fait déjà apparaître une question en ce qui concerne l'existence des anti-particules des neutrinos. Les leptons sont des particules quasi-ponctuelles qui sont sensibles à l'interaction électromagnétique et à l'interaction faible, mais pas à l'interaction forte. On a longtemps pensé que les neutrinos ne possédaient pas de masse, mais des mesures récentes montrent que ce n'est pas le cas.

La famille des *quarks* est elle aussi composée de trois générations de deux types de particules électriquement chargées: une première génération est formée des quarks *down (d)* et *up (u)*, respectivement de charges électriques -1/3 et +2/3 de la charge électrique de l'électron, une deuxième génération composée des quarks *strange (s)* et *charm (c)*, respectivement de charges électriques -1/3 et +2/3 de la charge électrique de l'électron, et une troisième génération composée des quarks *bottom (b)* et *top (t)*, respectivement de charges électriques -1/3 et +2/3 de la charge électrique de l'électron. Chaque quark possède son anti-particule de charge électrique de signe opposé ($\overline{d}$, $\overline{u}$, $\overline{s}$, $\overline{c}$, $\overline{b}$ et $\overline{t}$). Les quarks sont sensibles à la fois à l'interaction électromagnétique, à l'interaction faible et à l'interaction forte. Les quarks ne sont pas des particules libres, mais ils existent sous la forme d'assemblage de quarks appelés *hadrons.* Les quarks sont liés au sein des hadrons par la force forte.

Les hadrons se présentent sous deux formes: les *mésons* composés d'un quark et d'un anti-quark, comme les particules $\Pi^{+}(u\overline{d})$, $\Pi^{-}(d\overline{u})$ ou $\Pi^{0}(u\overline{u})$, et les *baryons* composés de trois quarks, comme le *proton* (uud) et le *neutron* (ddu), ou de trois anti-quarks.

Chaque particule de matière, que ce soit un lepton ou un quark, possède une masse non nulle et un spin 1/2, ce qui lui confère le statut de *fermion*.

Les interactions fondamentales et les bosons de jauge

Dans le Modèle Standard, on considère les trois interactions possibles suivantes entre particules: *l'interaction électromagnétique*, *l'interaction faible* et *l'interaction forte*. Ces interactions sont décrites par des théories quantiques de champ, sauf l'interaction gravitationnelle qui n'a jamais pu être introduite dans le Modèle Standard, malgré une recherche intensive du boson de jauge *graviton* qui lui serait associé. Chaque interaction fait donc appel à un champ qui lui est propre, et se fait alors par l'échange d'une particule appelée *boson de jauge*, correspondant au quantum du champ concerné. L'interaction électromagnétique fait appel au *photon (γ),* boson de jauge de masse nulle. L'interaction faible fait appel aux trois bosons de jauge Z^{0}, W^{+} et W^{-}, particules de masse non nulle et de charge électrique respectivement nulle, positive et négative. Quant à l'interaction forte, elle fait appel à 8 bosons de jauge appelés *gluons*, en fait des particules de masse nulle.

Les bosons de jauge associés à ces interactions sont des particules de spin 1, ce qui explique leur dénomination de *bosons*.

L'interaction électromagnétique et l'électrodynamique quantique

La théorie quantique qui décrit l'interaction électromagnétique s'appelle *l'électrodynamique quantique*. Il s'agit d'une quantification du champ électromagnétique: les particules chargées y interagissent par l'échange de quanta du champ, les *photons*. C'est une théorie relativiste, car elle prend en compte le temps de propagation de l'interaction, à savoir la célérité du boson vecteur, le photon. Dans cette théorie, on peut représenter une interaction de manière simple et commode, grâce aux *diagrammes de Feynman*. Dans la figure 13.2, on a représenté l'exemple de l'interaction entre deux électrons par l'échange d'un *photon virtuel,* qualifié ici de virtuel car il ne peut pas être détecté expérimentalement.

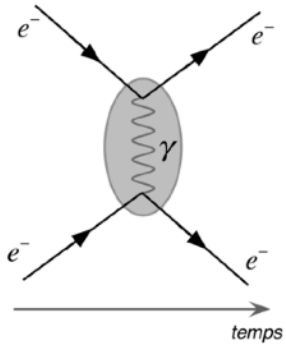


Figure 13.2 *- Diagramme de Feynman de l'interaction entre deux électrons via un photon*

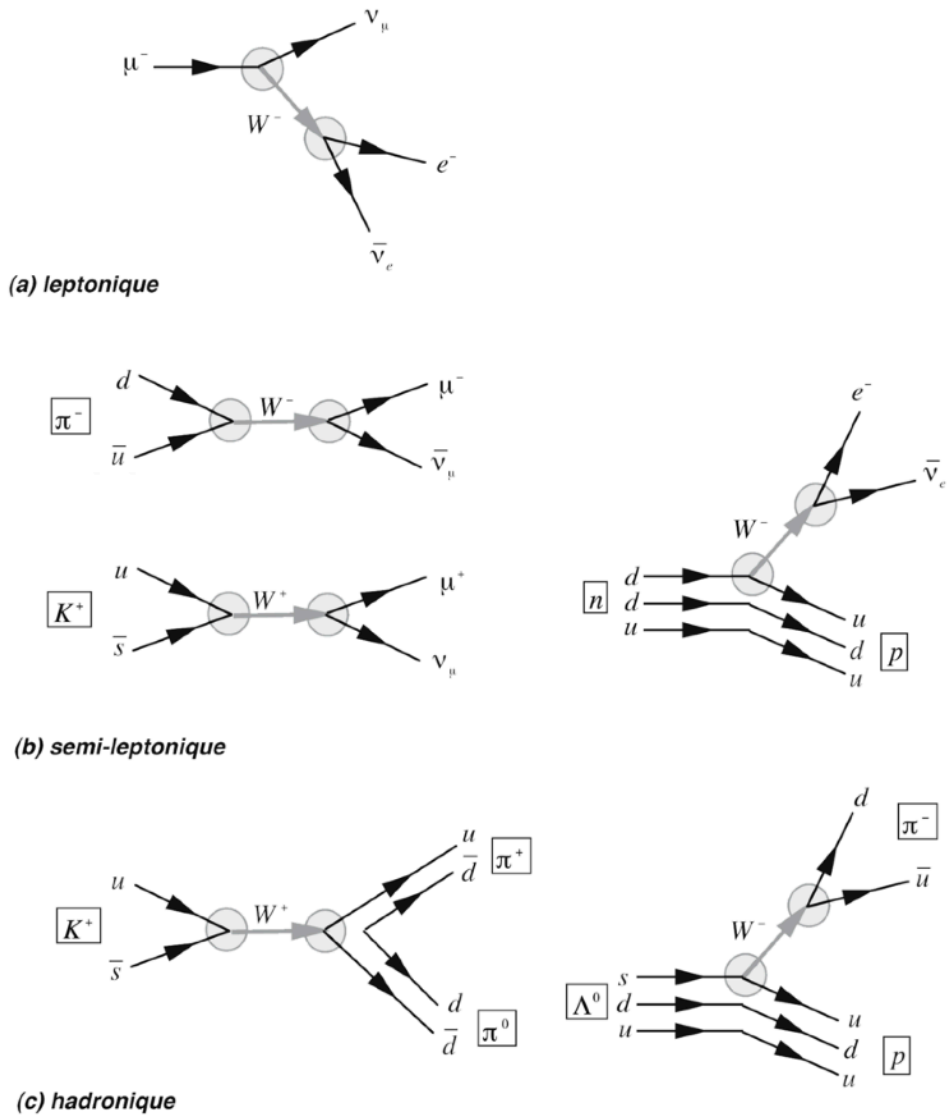


Figure 13.3 *- Exemples de diagrammes de Feynman d'interactions faibles leptoniques, semi-leptoniques et hadroniques*

L'interaction faible et la théorie électrofaible

L'interaction faible agit entre tous les fermions élémentaires, qu'ils soient des leptons ou des quarks (figure 13.3). C'est d'ailleurs la seule interaction qui agit sur les neutrinos. Elle est responsable des *désintégrations nucléaires*. Cette interaction présente deux aspects: l'interaction faible *par courants chargés*, dont les vecteurs sont les bosons de jauge W^+ et W^-, et l'interaction faible *par courant neutre*, dont le vecteur est le boson de jauge Z^0. Les bosons de jauge sont les seuls qui présentent des masses, et celles-ci sont très élevées, ce qui impose, en combinant la relation d'incertitude de Heisenberg $\Delta E \bullet \Delta t \approx \hbar$ et la relation d'Einstein $\Delta E = mc^2$, une durée de vie Δt très courte pour les bosons de jauge de l'interaction faible, et par conséquent, puisque la vitesse de lumière est une limite infranchissable, une portée de l'interaction faible via ces bosons extrêmement petite (de l'ordre de $10^{-15}\left[m\right]$), ce qui explique que cette interaction ne se manifeste qu'à l'échelle du noyau atomique.

Comme les bosons de jauge W^+ et W^- ont une charge électrique non nulle, les fermions peuvent changer de charge électrique lors d'une interaction par échange de W^+ ou W^-, ce qui change leur *saveur* (on appelle saveur d'un fermion sa nature: électron, neutrino, quark *u*, quark *d*, etc.). Par exemple, la radio-activité beta est expliquée par l'émission d'un W^- par un quark *d* du neutron, qui change alors de saveur et devient quark u. Ensuite, le W^- se matérialise sous la forme d'un électron et d'un anti-neutrino électronique (figure 13.3,b).

Le boson de jauge Z^0 ne possède pas de charge électrique, et ne peut donc pas induire de changement de saveur lors d'une interaction faible. L'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. Deux fermions qui peuvent échanger un photon peuvent aussi échanger un Z^0, à l'exception du neutrino qui peut échanger un Z^0 mais ne peut pas échanger un photon puisque c'est une particule neutre.

Il existe plusieurs types d'interaction faible suivant les fermions qui interagissent: les interactions leptoniques, les interactions semi-leptoniques et les interactions hadroniques, dont des exemples de diagrammes de Feynman sont reportés dans la figure 13.3.

A noter que l'interaction électromagnétique et l'interaction faible ont été unifiées dans une théorie quantique qui a été appelée *théorie électrofaible*.

L'interaction forte et la théorie de chromodynamique quantique

L'interaction forte est une interaction à courte portée entre les quarks par l'intermédiaire des gluons, bosons de jauge vecteurs de cette interaction. C'est cette interaction qui permet d'expliquer non seulement les *mésons* composés d'un quark et d'un anti-quark et les *baryons* composés de trois quarks, mais aussi comment les neutrons et les protons peuvent se lier pour former les noyaux atomiques.

Pour élaborer une théorie quantique de l'interaction forte, il a fallu faire appel à un nouveau type de charges, appelées *charges de couleur*, d'où le nom de *théorie de chromodynamique quantique.* Chaque quark possède une charge de couleur, rouge (R), vert (V) ou bleu (B), et les anti-quarks possèdent une charge d'une des couleurs complémentaires ($\overline{R}$), ($\overline{V}$) ou ($\overline{B}$).

L'interaction forte est alors expliquée par l'échange de gluons «colorés» entre les fermions élémentaires possédant une charge de couleur, ce qui permet d'échanger les charges de couleur entre fermions. Il existe 8 gluons de couleurs différentes, correspondant aux 8 combinai-

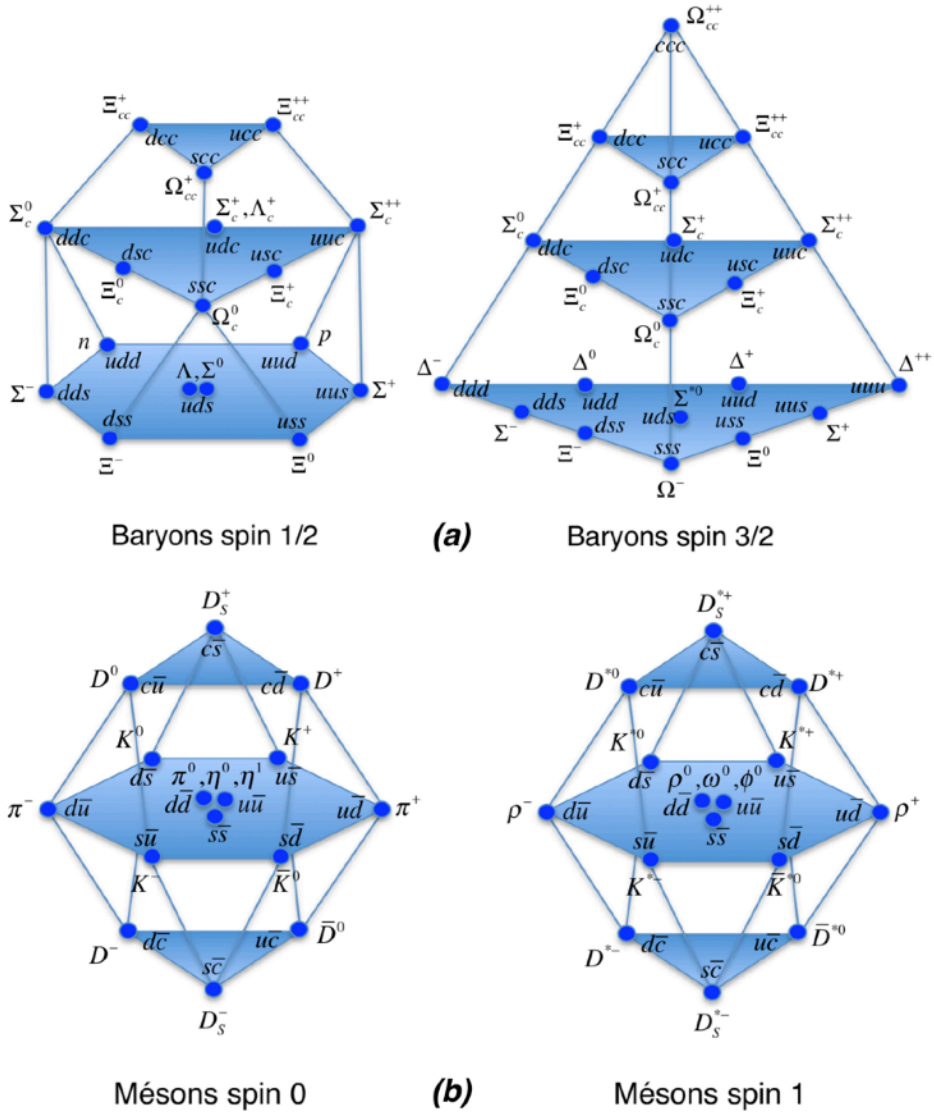


Figure 13.4 *- **(a)** les baryons composés de triplets de quarks (u, d, s ou c), **(b)** les mésons composés de doublets quark-antiquark (u, d, s ou c)*

sons différentes d'une couleur et d'une anti-couleur. Ainsi, lors de l'échange d'un gluon entre deux quarks, ceux-ci échangent leur couleur respective. De plus, comme les gluons portent une charge de couleur, ils peuvent aussi interagir entre eux, ce qui n'est pas le cas des autres bosons de jauge. Les leptons ne possèdant pas de charge de couleur, ils ne subissent pas l'interaction forte.

Bien que la masse des gluons soit nulle, l'interaction forte est de très courte portée, de l'ordre de $10^{-15}[m]$, et elle possède une caractéristique assez étrange: plus des quarks sont éloignés l'un de l'autre, plus la force d'interaction entre eux est forte. Et si ils sont infiniment proches, ils n'interagissent plus du tout. Cette propriété porte le nom de *liberté asymptotique*, et elle est responsable de ce qu'on appelle *le confinement des quarks* à l'intérieur des hadrons: ceci implique que *les quarks ne peuvent pas exister à l'état libre.*

Les particules formées de quarks sont donc des hadrons, c'est-à-dire des états liés de plusieurs quarks via les gluons. Les hadrons doivent nécessairement être «blancs», c'est-à-dire

posséder une combinaison de couleur nulle. On peut donc considérer:
- des *baryons*, combinaisons de trois quarks respectivement rouge, vert et bleu, ou bien des *anti-baryons*, combinaisons de trois anti-quarks respectivement anti-rouge anti-vert, et anti-bleu. Les triplets formés de trois quarks (parmi les quarks *u, d, s* ou *c*) sont représentés dans les diagrammes de la figure 13.4(a), dans les cas de spin global de $1/2$ et de $3/2$, avec le nom donné à la particule correspondant à ce triplet,
- des *mésons*, qui contiennent un quark de couleur (rouge, vert ou bleu) et un anti-quark de l'anti-couleur correspondante (anti-rouge, anti-vert ou anti-bleu). Les doublets formés d'un quark et d'un anti-quark (parmi les quarks *u, d, s* ou *c*) sont représentés dans le diagramme de la figure 13.4(b), dans le cas de spin global de 1 et de 0, avec le nom donné à la particule correspondant à ce doublet.

Fermions *(spin 1/2)*		**Charge électrique (q_e)**	**Masse (MeV/c²)**
lepton électron	e^-	-1	0,51
lepton muon	μ^-	-1	106
lepton tau	τ^-	-1	1777
lepton neutrino électronique	ν_e	0	< 0,0000022
lepton neutrino muonique	ν_μ	0	< 0,17
lepton neutrino tauique	ν_τ	0	< 15,5
quark Up	*u*	+2/3	2,55
quark Down	*d*	-1/3	5,04
quark Charm	*c*	+2/3	1270
quark Strange	*s*	-1/3	105
quark Top	*t*	+2/3	173100
quark Bottom	*b*	-1/3	4200

Bosons de jauge *(spin 1)*		**Charge électrique (q_e)**	**Masse (MeV/c²)**
photon	γ	0	0
boson intermédiaire	W^+	-1	80398
boson intermédiaire	W^-	+1	80398
boson intermédiaire	Z^0	0	90187
8 gluons	*g*	0	0

Bosons de jauge *(spin 0)*		**Charge électrique (q_e)**	**Masse (MeV/c²)**
boson de Higgs	H^0	0	125000

Figure 13.5 *- Les charges et les masses des diverses particules*

La masse des particules et le boson de Higgs

Dans une première version du Modèle Standard, toutes les particules décrites (leptons et quarks) devaient être de masse nulle, ce qui est évidemment faux comme le montre bien le tableau de la figure 13.5. Pour palier à cette lacune du Modèle Standard initial, les théoriciens ont imaginé une cinquième interaction, différente des quatre autres (électromagnétique, faible, forte et gravitationnelle), et faisant appel à un champ dont le quantum est une particule de spin 0: le *boson de Higgs* H^0 (figure 13.1). Ce sont alors les interactions entre les fermions élémentaires de masse nulle et le champ de Higgs via les bosons de Higgs qui fournissent une masse aux fermions du Modèle Standard. L'existence du boson de Higgs a été vérifiée expérimentalement au CERN, tout récemment.

Les problèmes du modèle standard qui possèdent déjà des solutions dans la théorie du réseau cosmologique parfait

Le modèle standard des particules, malgré ses succès indéniables, laisse de nombreuses questions non résolues. Dans la suite de ce chapitre, on va essayer de voir si une approche du modèle standard par notre approche du réseau cosmologique parfait peut apporter une réponse à ces diverses questions. Il ne s'agira pas ici de donner une réponse complète et quantitative à tous ces problèmes, mais d'esquisser, de façon très qualitative, autrement dit «avec les mains», comment le réseau cosmologique pourrait fournir une solution à ces problèmes. Certains des problèmes soulevés par le modèle standard possèdent d'ailleurs déjà une esquisse de solution explicitée dans les chapitres précédents.

Faisons donc un tour des problèmes posés par le modèle standard qui possèdent déjà une explication dans la théorie du réseau cosmologique et expliquons comment le réseau cosmologique apportent des réponse, au moins partielles, à ces divers problèmes:

- l'absence de l'interaction gravitationnelle dans le modèle standard:

L'interaction gravitationnelle fait directement partie des résultats obtenus avec le réseau cosmologique, comme solution statique de la deuxième équation partielle de Newton, et c'est d'ailleurs cette même équation sous sa forme dynamique qui a permis d'introduire et de donner une explication simple de la physique quantique et de la notion de spin des singularités topologiques en boucle.

- la nécessité du boson de Higgs et l'impossibilité de calculer les masses des divers fermions et bosons dans le modèle standard:

Dans le modèle standard de base, les fermions n'ont pas de masse, et les théoriciens ont dû introduire un mécanisme ad-hoc, l'interaction avec le champ de Higgs via le boson de Higgs, qui fournit la masse d'inertie aux particules élémentaires. Cependant, dans le modèle standard, il n'est pas possible d'obtenir des valeurs quantitatives des masses d'inertie des particules, qui doivent donc être «calées» sur les valeurs obtenues expérimentalement. La théorie du réseau cosmologique contient en fait un mécanisme assez analogue au champ de Higgs: c'est le champ des masses d'inertie des «corpuscules» du réseau (qui sont donc une sorte d'analogues des bosons de Higgs de spin 0) ainsi que l'énergie élastique de distorsion du réseau, qui sont responsables ensemble des propriétés relativistes d'inertie des singularités topologiques, et qui

permettent un calcul quantitatif des masses d'inertie des singularités topologiques, sans devoir «caler» ces valeurs sur des résultats expérimentaux.

- la nature physique de l'interaction électromagnétique dans le modèle standard:

L'interaction électromagnétique, ainsi que son boson vecteur, le photon, avec ses diverses propriétés quantiques, font partie intégrante de la théorie du réseau cosmologique, et y ont une explication physique simple et bien définie sur la base du champ de rotation au sein du réseau cosmologique.

- la nature physique de l'interaction faible dans le modèle standard:

Une interaction faible présentant une analogie avec l'interaction faible du modèle standard a été obtenue dans la théorie du réseau cosmologique (chapitre 9), sous la forme d'une force de liaison à très courte portée liant des «fermions topologiques» entre eux (les boucles de désinclinaison vis aux boucles de dislocation coin), via un couplage de leurs charges de rotation et de courbure.

*- la violation de l'invariance **CP** (charge/parité) dans le modèle standard:*

Dans l'univers actuel, on observe une violation de l'invariance ***CP*** (charge/parité) que les théoriciens estiment être la cause probable de l'asymétrie matière/anti-matière et du déséquilibre matière/anti-matière dans l'univers actuel. Dans la théorie du réseau cosmologique, cette faible asymétrie entre matière et anti-matière existe bien, et s'explique parfaitement par l'existence de la charge de courbure par flexion des boucles de dislocation coin, charge qui n'a absolument pas d'équivalent dans le modèle standard des particules. Ce même phénomène est d'ailleurs aussi à l'origine de l'explication de la fameuse *masse noire* des astrophysiciens et de la disparition de l'anti-matière au cours de l'évolution cosmologique de l'univers.

- l'absence d'explication de l'énergie noire et de la masse noire dans le modèle standard:

Ces deux concepts inventés par les théoriciens pour apporter des explications à l'accélération de l'expansion cosmologique et au comportement gravitationnel des galaxies possèdent les deux une explication dans la théorie du réseau cosmologique: l'énergie de distorsion élastique en ce qui concerne l'énergie noire et la force gravitationnelle répulsive des neutrinos en ce qui concerne la masse noire.

Les problèmes du modèle standard qui n'ont pas encore d'explications dans la théorie du réseau cosmologique parfait

Parmi les problèmes du modèle standard des particules élémentaires, il en est quelques-uns pour lesquels il n'est pas encore apparu d'explications plausibles dans la théorie du réseau cosmologique. Il s'agit entre autre de:

- l'existence de fermions sous la forme de trois générations de leptons et de quarks:

Si les fermions correspondent à des singularités topologiques dans la théorie du réseau cosmologique, l'existence de fermions sous la forme de leptons et de quarks, ainsi que l'existence de trois générations de ces fermions, devraient vraisemblablement trouver une explication par un choix judicieux de la structure du réseau cosmologique et de la constitution des particules élémentaires comme des singularités topologiques sous la forme de boucles de dispiration, assemblages judicieux de boucles de désinclinaison vis, de boucles de désinclinaison coin, de boucles de dislocation coin et de boucles de dislocation mixte.

- l'existence de trois bosons de jauge massifs dans l'interaction faible:

L'interaction faible étant déjà apparu dans notre approche comme la force liant les boucles de désinclinaison vis aux boucles de dislocation coin, il reste à trouver ce que sont les bosons de jauge massifs, vecteurs de cette interaction, dans la théorie du réseau cosmologique.

- l'existence d'une interaction forte liant les quarks par un mécanisme de confinement:

L'interaction forte, avec son mécanisme de confinement et ses bosons vecteurs, les gluons, est la seule interaction qui n'est pas encore apparue dans le cadre de la théorie du réseau cosmologique. Mais on a déjà rencontré des mécanismes qui pourraient être des candidats potentiels très intéressants pour expliquer cette force et son comportement asymptotique, comme par exemple les mécanismes générateurs d'une énergie de faute au sein du réseau, telle que la dissociation d'une dislocation par exemple.

- l'existence de charges électriques quantifiées, de valeurs relatives 1, 1/3 et 2/3:

Les charges électriques des fermions possèdent des valeurs relatives 1, 1/3 et 2/3 entre la charge des électrons et les charges des quarks. Ces valeurs quantifiées n'ont absolument aucune explication dans le modèle standard, mais il y a fort à parier que le choix d'une structure particulière du réseau cosmologique pourrait apporter une explication à ce problème.

Dans la suite de ce chapitre, on va essayer de trouver des réponses et des explications à ces interrogations du modèle standard, en jouant exclusivement sur la structure du réseau cosmologique et sur les propriétés des singularités topologiques qu'il peut contenir. Dans le modèle standard, 26 paramètres différents sont requis dans le cas où les neutrinos sont massifs pour obtenir une théorie fonctionnelle, telles que les masses des particules et les intensités des diverses forces, et ces paramètres doivent obligatoirement être «calés» sur les valeurs des résultats expérimentaux. Il y a fort à parier que le modèle du réseau cosmologique puisse permettre de réduire fortement le nombre des paramètres à ajuster, simplement par le fait qu'il peut apporter de nouvelles explications physiques à des phénomènes qui n'en ont pas dans le modèle standard.

Un réseau «coloré» de structure cubique à faces centrées pour expliquer la première famille de quarks et de leptons du modèle standard

Dans le réseau cosmologique parfait, nous avons vu que la singularité topologique la plus simple pour expliquer la charge électrique est la boucle de désinclinaison vis. Comme on l'a vu au chapitre 8, pour que l'interaction gravitationnelle des boucles de désinclinaison vis satisfasse des comportements similaires aux comportements expérimentalement observés (dilatation du temps, courbure des rayons d'onde), il suffit que les coefficients α_{BV} et β_{BV} dans les expressions $R_{BV} = R_{BV0}\,\mathrm{e}^{\alpha_{BV}\tau}$ et $\Omega_{BV} = \Omega_{BV0}\,\mathrm{e}^{\beta_{BV}\tau}$ donnant la dépendance du rayon et de l'angle de torsion de la boucle de désinclinaison vis en fonction de l'expansion de fond du réseau satisfassent la relation $3\alpha_{BV} + 2\beta_{BV} = 1/8$. Ceci implique que l'angle de torsion Ω_{BV} pourrait
(i) soit être une constante indépendante de l'expansion, auquel cas $\alpha_{BV} = 1/24$ et $\beta_{BV} = cste$, ce qui permet l'existence d'une raison topologique pour l'explication de l'existence de valeurs discrètes et indépendantes de l'expansion pour l'angle Ω_{BV},
(ii) soit dépendre en fait de l'expansion volumique, auquel cas Ω_{BV} ne peut pas prendre une valeur discrète qui soit directement liée à la structure du réseau puisque cet angle dépendrait

alors de manière continue de l'expansion volumique.

Ainsi, pour qu'il apparaisse des charges quantifiées comme la charge de l'électron, mais aussi des charges fractionnaires de 1/3 et 2/3 de la charge de l'électron comme c'est le cas des quarks du modèle standard, il faudrait que les boucles de désinclinaison vis soient obtenues par une rotation des deux plans intérieurs à la boucle d'un angle *correspondant à la symétrie du réseau*, par exemple $\pi/2$, π, $3\pi/2$, ... dans les directions perpendiculaires aux plans d'un réseau cubique simple, ou bien $2\pi/3$, $4\pi/3$, 2π, ... dans les directions perpendiculaires aux plans compacts d'un réseau hexagonal compact ou d'un réseau cubique à faces centrées.

Nous choisirons par conséquent une hypothèse sous la forme de la conjecture 12 explicitée à la figure 13.6 pour essayer de trouver un réseau cosmologique qui pourrait expliquer le modèle standard des particules élémentaires.

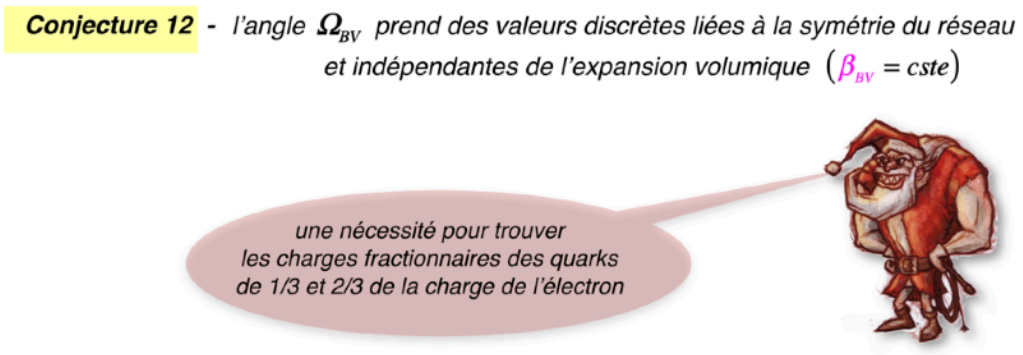


Figure 13.6 *- La douzième conjecture sur la quantification des angles de rotation de la boucle de désinclinaison vis*

Pour satisfaire cette hypothèse, il semble à priori préférable de choisir un réseau à empilement compact, à savoir un réseau hexagonal compact ou un réseau cubique à faces centrées. Pour des raisons qui s'expliqueront par la suite, nous allons choisir *le réseau cubique à faces centrées (CFC)*, tel que nous l'avons illustré à la figure 13.7.

Dans le réseau *CFC*, il existe quatre familles de plans denses, illustrées dans la figure 13.7(a). Les quatre axes perpendiculaires respectivement à ces quatre familles de plans denses sont des axes de symétrie de rotation d'ordre 3 passant par deux sommets opposés de la maille *CFC*. Seules les rotations de $2\pi/3$, $4\pi/3$, 2π, … autour de ces axes respectent l'empilement dense du réseau *CFC*.

Imaginons *à priori* que ce réseau *CFC* soit de plus *un réseau axial,* c'est-à-dire que chaque plan de «corpuscules» possède une direction préférentielle représentée dans la figure 13.7(b) par des flèches faisant un angle de $2\pi/3$ entre chaque couche dense. Cette propriété axiale peur être représentée par des *«plans colorés de corpuscules»* avec une alternance de trois couleurs fondamentales ***R***, ***B***, ***V***. Chacune de ces couleurs représente une des trois directions préférentielles des plans denses, comme représenté à la figure 13.7(b). Ces «couleurs» imaginaires ne sont choisies que par commodité et n'ont *pour l'instant* aucun rapport avec les «couleurs» utilisées dans le modèle standard pour expliquer la charge de couleur des quarks et gluons. Même si on ne connaît pas la raison physique de l'existence de cette propriété axiale

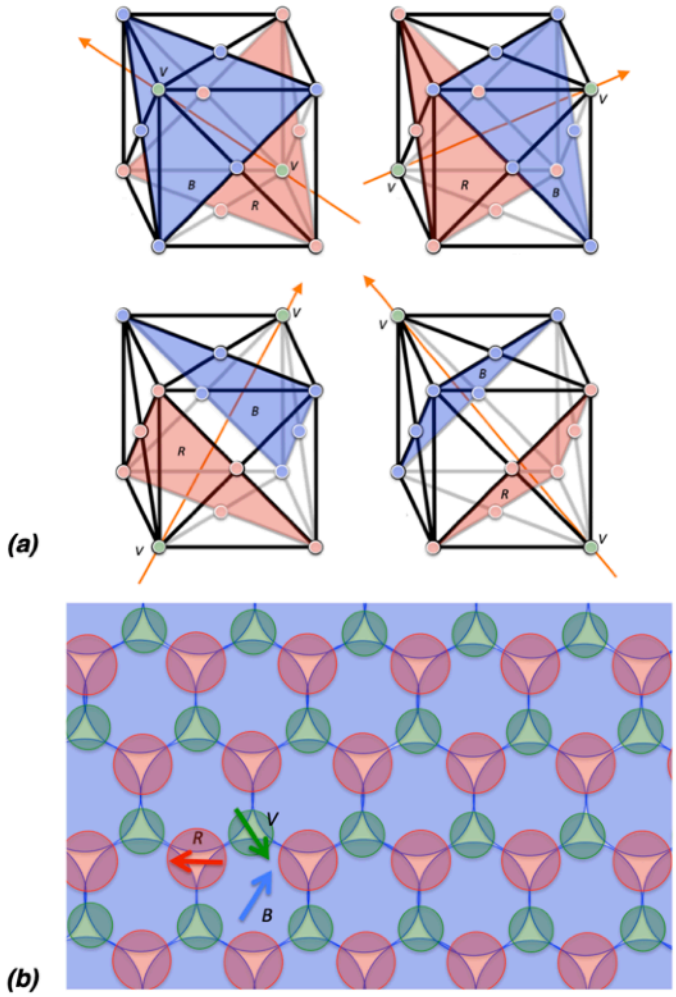


Figure 13.7 - *Un réseau cosmologique imaginaire, «axial», cubique à faces centrées:* ***(a)*** *maille CFC avec les plans denses* ***R,B,V*** *présentant un empilement compact régulier dans les quatre directions de l'espace perpendiculaires aux quatre familles de plans denses,* ***(b)*** *représentation en plan de l'empilement* ***R,B,V*** *de trois plans denses successifs, avec les directions préférentielles des couches associées aux propriétés axiales du réseau.*

représentée par ces «plans colorés», on peut supposer que cette alternance de couleurs des plans corpusculaires puisse être une condition d'existence d'un réseau cosmologique parfait en l'absence de singularités topologiques, et que, si l'alternance ***R***, ***B***, ***V*** des plans du réseau est rompue par la présence d'une singularité topologique, il puisse apparaître des énergies de faute si un plan «corpusculaire» ne suit pas l'arrangement ***R***, ***B***, ***V***. Postulons alors *à priori* des règles d'empilement et de rotation des plans colorés dans ce réseau très particulier, sous la forme d'une treizième conjecture reportée dans la figure 13.8. Dans cette conjecture, il y a trois règles qui sont toutes les trois associées à la *propriété axiale du réseau CFC* que nous avons postulée:

- *La première règle* stipule que l'alternance ***R***, ***B***, ***V*** des plans denses du réseau ne peut pas être cassée, sous peine d'une importante énergie de faute d'empilement, autrement dit que les directions préférentielles associées aux «corpuscules» doivent *si possible* s'alterner avec un angle de $\pm 2\pi/3$ d'une couche dense à l'autre.

La deuxième règle stipule qu'il peut exister des plans perpendiculaires aux plans denses qui séparent deux domaines du réseau présentant un décalage de la succession des plans ***R***, ***B***, ***V***. Ces joints correspondent donc à des sortes de *plans de faute d'empilement*, et on suppose que ces joints possèdent *une énergie surfacique de faute de raccordement* γ_0 *non nulle.*
La troisième règle stipule que si un plan dense subit une rotation d'un angle $\pm 2\pi/3$, $\pm 4\pi/3$ ou $\pm 2\pi$ autour d'un axe perpendiculaire à cette famille de plans denses, et qui laisse donc la structure *CFC* intacte, c'est la direction préférentielle de ce plan dense représentée par les flèches dans la figure 13.7(b) qui change, et c'est donc la «couleur» de ce plan qui change puisque la couleur représente cette direction préférentielle.

Conjecture 13 - l'empilement des plans ***R***, ***B***, ***V*** suit trois règles élémentaires en ce qui concerne *les propriétés axiales du réseau CFC:*

Règle 1: l'alternance des plans ***R***, ***B***, ***V*** ne peut pas être rompue, soit par impossibilité, soit par pénalité *d'une énergie surfacique de faute d'empilement extrêmement élevée*,

Règle 2: il peut apparaître un décalage de la succession des plans ***R***, ***B***, ***V*** selon un plan de faute de raccordement perpendiculaire aux plans denses, et ce décalage possède *une énergie surfacique de faute de raccordement* γ_0 *non nulle*,

Règle 3: si un plan de couleur donnée subit une rotation d'un angle $\pm 2\pi/3$, $\pm 4\pi/3$ ou $\pm 2\pi$, *il change de couleur* selon le tableau ci-dessous

angle de rotation Ω_{BV}	*changement de couleur*	*couleurs R, V, B et anti-couleurs* $\bar{R}$, $\bar{V}$, $\bar{B}$
$+2\pi$, 0, -2π	$R \to R$, $V \to V$, $B \to B$	
$+2\pi/3$, $-4\pi/3$	$R \to V$, $V \to B$, $B \to R$	
$+4\pi/3$, $-2\pi/3$	$R \to B$, $V \to R$, $B \to V$	

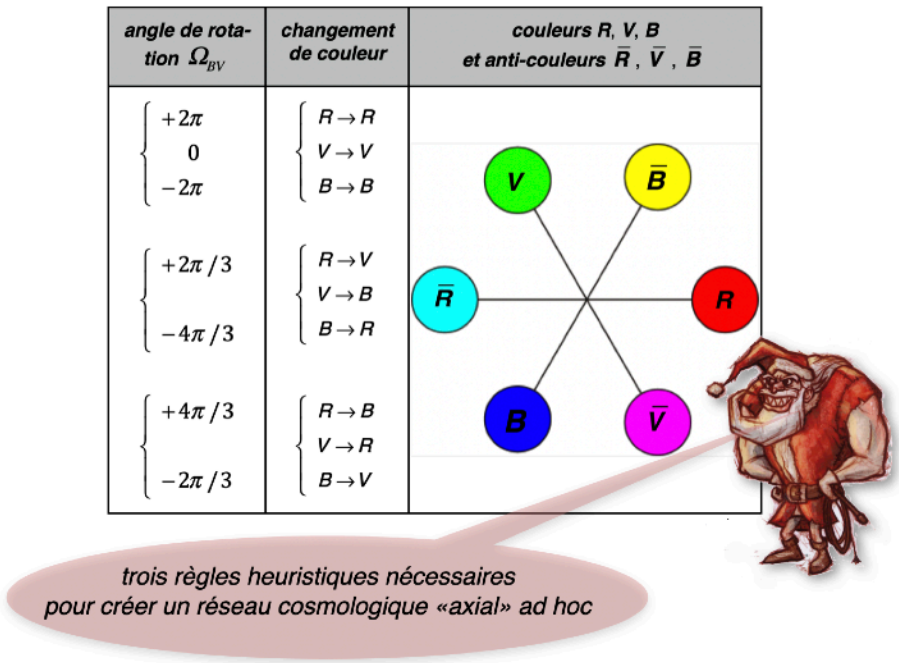


Figure 13.8 - *La treizième conjecture sur les règles d'empilement et de rotation des plans* ***R***, ***B***, ***V*** *du réseau cosmologique CFC axial*

De l'existence des quarks de par la nécessité de combiner une boucle de désinclinaison vis avec une boucle de dislocation coin

On peut introduire une boucle de désinclinaison vis dans notre réseau particulier, représentée symboliquement dans la figure 13.10d, avec un angle de rotation du plan inférieur de $\pm 2\pi/3$ ou $\pm 4\pi/3$ ou $\pm\pi$. Mais d'après la règle 3, une rotation de $\pm 2\pi/3$ ou $\pm 4\pi/3$ va changer la couleur du plan intérieur de la boucle de désinclinaison vis. De la sorte, la règle 1 ne serait plus satisfaite. Il faut donc d'une part ajouter une boucle coin interstitielle ou lacunaire pour satisfaire la règle 1 avec le plan dense supérieur, et d'autre part induire un cylindre dans lequel tous les plans denses inférieurs à la boucle de désinclinaison vis changent de couleur pour satisfaire la règle 1. Alors, d'après la règle 2, il y a génération *d'un cylindre de fautes de raccordement présentant l'énergie surfacique de faute* γ_0, comme représenté schématiquement dans les figures 13.9a à 13.9d.

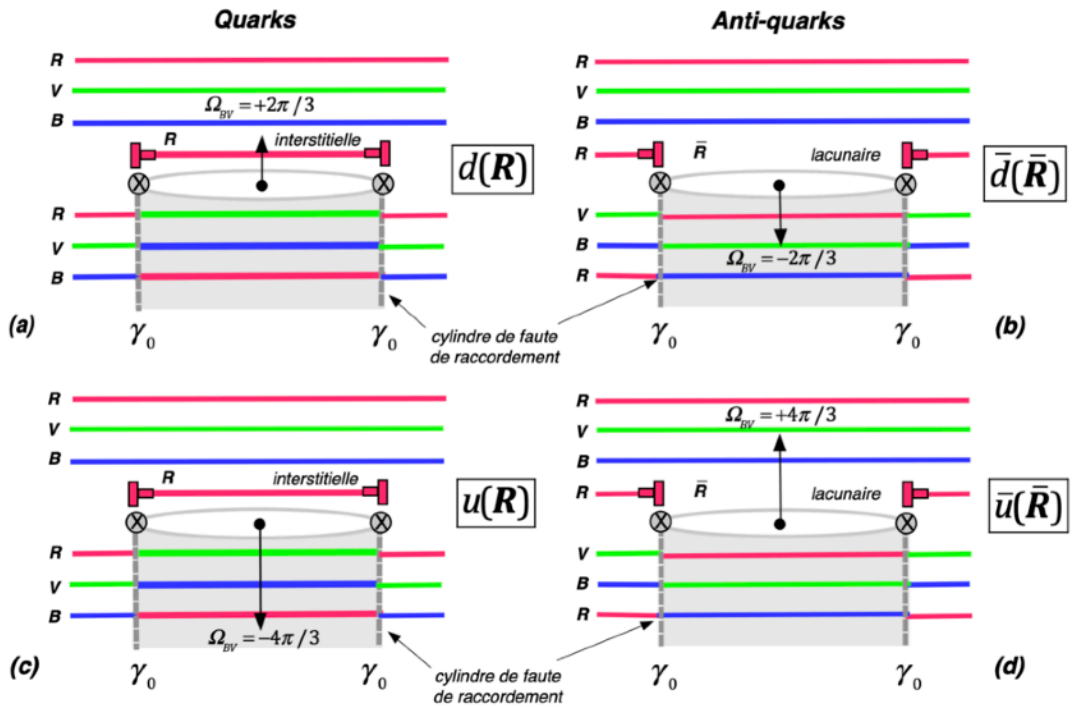


Figure 13.9 *- quarks et antiquarks formée par des combinaisons de boucles de désinclinaison vis d'angles quantifiés avec des boucles de dislocation coin qui assurent la continuité de succession des plans* ***R,B,V.***

Le plan intercalaire dans le cas de la boucle coin interstitielle possède une des trois couleurs ***R***, ***B***, ***V,*** alors que le plan manquant dans le cas de la boucle coin lacunaire possède l'anti-couleur de la couleur du plan interrompu, à savoir une des couleurs $\bar{R}$, $\bar{B}$ ou $\bar{V}$. On utilise en effet dans les figures les couleurs complémentaires de ***R***, ***B***, ***V,*** qui sont les couleurs *cyan, magenta et jaune*, comme représenté dans la figure 13.8. Dans les quatre cas (figures 13.9a à 13.9d), la boucle de désinclinaison vis est évidemment liée à la boucle de dislocation coin par la *force faible* décrite au chapitre 9, mais aussi par la nécessité d'introduire la boucle coin pour assurer la succession des couleurs des plans au niveau de la boucle de désinclinaison vis.

Les dispirations ainsi formées possèdent une «couleur», qui correspond à la couleur du plan de la boucle interstitielle ou à l'anti-couleur du plan lacunaire (l'anti-couleur ou couleur complémentaire de la couleur du plan corpusculaire dans lequel apparaît la boucle lacunaire).

De l'existence des bosons de jauge intermédiaires

Quant aux boucles de désinclinaison d'angle $\pm 2\pi$ (figures 13.10a à 13.10c), elles n'ont pas besoin d'être combinées avec des boucles coin puisque ces rotations n'entraînent aucun changement de couleur dans les plans inférieurs, et par conséquent aussi aucun cylindre de fautes de raccordement en-dessous de la boucle.

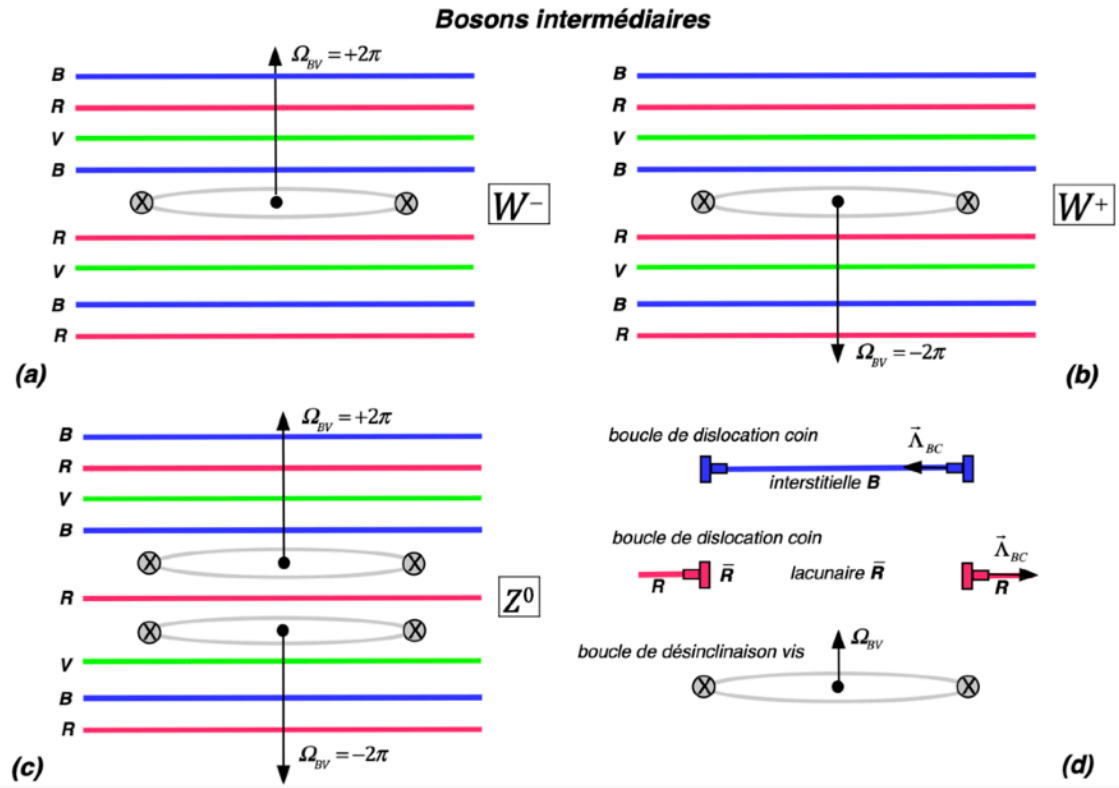


Figure 13.10 *- Bosons intermédiaires formés de boucles de désinclinaison vis d'angle* $\pm 2\pi$ *qui n'ont pas besoin de boucles de dislocation coin pour assurer la continuité de succession des plans* ***R,B,V.***

Dans le tableau de la figure 13.11, on a reporté les propriétés des différentes singularités topologiques ainsi formées, en leur donnant, comme dans les figures 13.9 et 13.10, un nom choisi *«par hasard»*, et en utilisant le fait que les deux dispirations de droite (a et c) dans la figure 13.9 sont clairement les anti-boucles des boucles de gauche (b et d).

Dans le tableau 13.11, on constate alors que les charges $q_{\lambda BV}$ de rotation, analogues à la charge électrique, présentent trois valeurs différentes, correspondant respectivement à 1/3x, 2/3x et 1x la charge des boucles W^- ou W^+. D'autre part, seules les dispirations d, u, $\bar{d}$ et $\bar{u}$ présentent une charge $q_{\theta BC}$ de courbure par flexion non nulle, et le signe de ces charges, positif dans le cas de la boucle coin lacunaire et négatif dans le cas de la boucle coin

interstitielle, implique comme on l'a déjà postulé avec la conjecture 8, que les particules d et u correspondent par analogie à de la matière et que leurs anti-particules $\overline{d}$ et $\overline{u}$ correspondent à de l'anti-matière. Le paramètre a est en ce cas la distance entre deux plans denses du réseau. Quant aux particules W^-, W^+ et Z^0 qui ne possèdent pas de charge de courbure $q_{\theta BC}$, elles doivent assurément présenter une masse importante puisque ce sont des boucles de désinclinaison vis avec un angle de rotation $\Omega_{BV} = -2\pi$ très élevé.

nom	Ω_{BV}	$q_{\lambda BV}$	*boucle coin*	$q_{\theta BC}$	*couleur*
d	$+2\pi/3$	$-2\pi^2 R_{BV}^2/3$	*interstitielle*	$-2\pi a$	***R***, ***V*** ou ***B***
u	$-4\pi/3$	$+4\pi^2 R_{BV}^2/3$	*interstitielle*	$-2\pi a$	***R***, ***V*** ou ***B***
$\overline{d}$	$-2\pi/3$	$+2\pi^2 R_{BV}^2/3$	*lacunaire*	$+2\pi a$	$\overline{\boldsymbol{R}}$, $\overline{\boldsymbol{V}}$ ou $\overline{\boldsymbol{B}}$
$\overline{u}$	$+4\pi/3$	$-4\pi^2 R_{BV}^2/3$	*lacunaire*	$+2\pi a$	$\overline{\boldsymbol{R}}$, $\overline{\boldsymbol{V}}$ ou $\overline{\boldsymbol{B}}$
W^-	$+2\pi$	$-2\pi^2 R_{BV}^2$	-	0	-
W^+	-2π	$+2\pi^2 R_{BV}^2$	-	0	-
Z^0	$(+2\pi)+(-2\pi)$	0	-	0	-

Figure 13.11 - *Les sept singularités composées d'une boucle de désinclinaison vis combinées ou non avec des boucles de dislocation coin interstitielles ou lacunaires*

De l'interaction faible entre quarks via les bosons intermédiaires

Il est intéressant de remarquer ici que la combinaison de deux dispirations d et $\overline{u}$, ou $\overline{d}$ et u contribue à créer une boucle de désinclinaison vis pure W^- ou W^+, qui peut à nouveau se transformer en paire d et $\overline{u}$, ou $\overline{d}$ et u. On peut aussi imaginer un échange d'une boucle W^- ou W^+ entre deux dispirations d et $\overline{u}$, ou $\overline{d}$ et u, ce qui va changer leur nature, ou pour parler de façon plus imagée ou poétique, leur *«goût»* ou leur *«saveur».*

Ces combinaisons et ces échanges sont illustrés dans la figure 13.12 sous forme de *diagrammes de Feynman*. Ils sont caractérisés par le fait que la rotation totale Ω_{BV} est conservée, ce qui assure en même temps la conservation de la charge de rotation $q_{\lambda BV}$. On constate aussi que la charge totale $q_{\theta BC}$ est conservée elle aussi dans ces réactions. Il est alors indéniable que ces réactions ont une étrange similitude avec les interactions faibles du modèle standard reportées dans la figure 13.3.

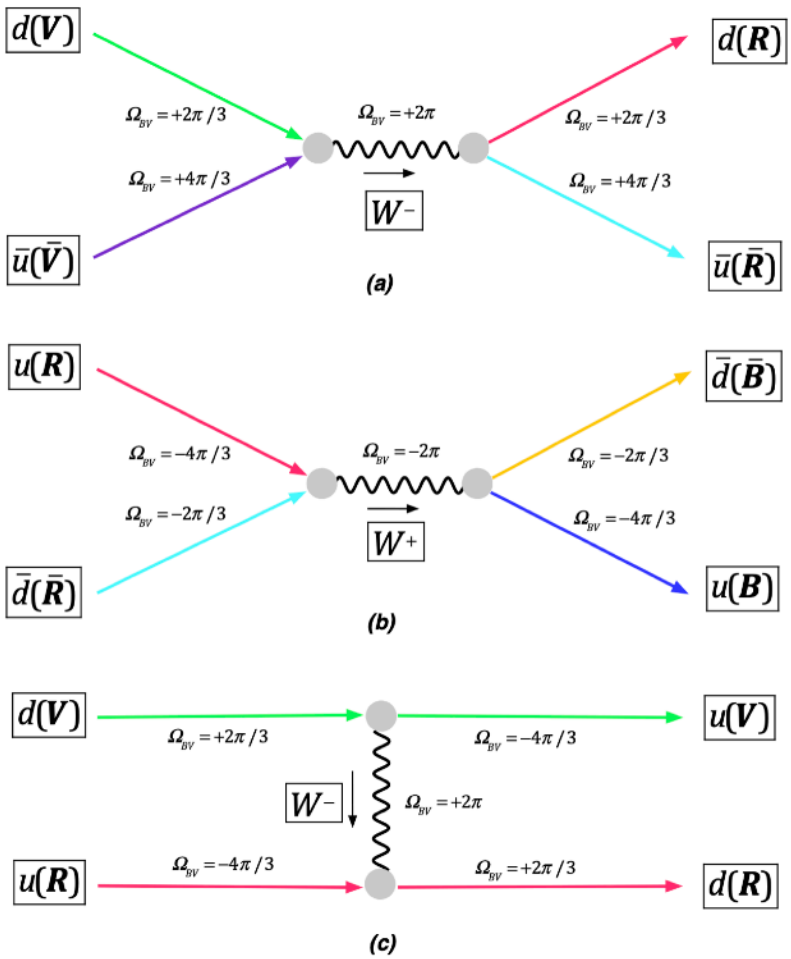


Figure 13.12 - *Diagrammes de Feynman de mécanismes de combinaisons et d'échanges de bosons intermédiaires entre les quarks du tableau 13.10*

De l'existence de «baryons» et de «mésons» localisés, formés de 3 et 2 dispirations

Chacune des dispirations des figures 13.9a à 13.9d génère un cylindre de faute de raccordement qui possède une énergie proportionnelle à la surface latérale du cylindre. Par conséquent, il est impossible que ces dispirations apparaissent de manière isolée, car le cylindre de faute de raccordement serait alors de longueur $\sim R_\infty$, et par conséquent d'énergie gigantesque. On peut alors se demander comment générer des singularités composées de telles dispirations, et qui soient d'énergie raisonnable.

En fait, il existe trois façons de combiner les quatre dispirations de la figure 13.9 pour que la singularité topologique ainsi formée soit parfaitement localisée, à savoir que le tube de faute de raccordement soit de longueur finie:

- *la combinaison de trois singularités* u *ou* d représentée à la figure 13.13a,
- *la combinaison de trois anti-singularités* $\overline{u}$ *ou* $\overline{d}$ représentée à la la figure 13.13b,
- *la combinaison d'une singularité* u *ou* d *avec une anti-singularité* $\overline{u}$ *ou* $\overline{d}$ représentée à la figure 13.13c.

Pour que les trois règles émises précédemment soient toutes parfaitement satisfaites dans

ces diverses combinaisons, il faut que:

- *la somme des angles* Ω_{BV} *de rotation de toutes les dispirations de la combinaison soit nulle ou un multiple de* 2π , ce qui permet au tube de faute de raccordement d'être de longueur finie,
- *la couleur de l'assemblage ainsi formé soit «blanche»*, donc que l'assemblage présente la somme des 3 couleurs ***R***, ***V***, ***B*** (figure 13.13a), ou la somme des 3 anti-couleurs $\overline{\boldsymbol{R}}$, $\overline{\boldsymbol{V}}$, $\overline{\boldsymbol{B}}$ (figure 13.13b), ou la somme d'une des couleurs ***R***, ***V***, ***B*** avec son anti-couleur respective $\overline{\boldsymbol{R}}$, $\overline{\boldsymbol{V}}$, $\overline{\boldsymbol{B}}$ (figure 13.13c).

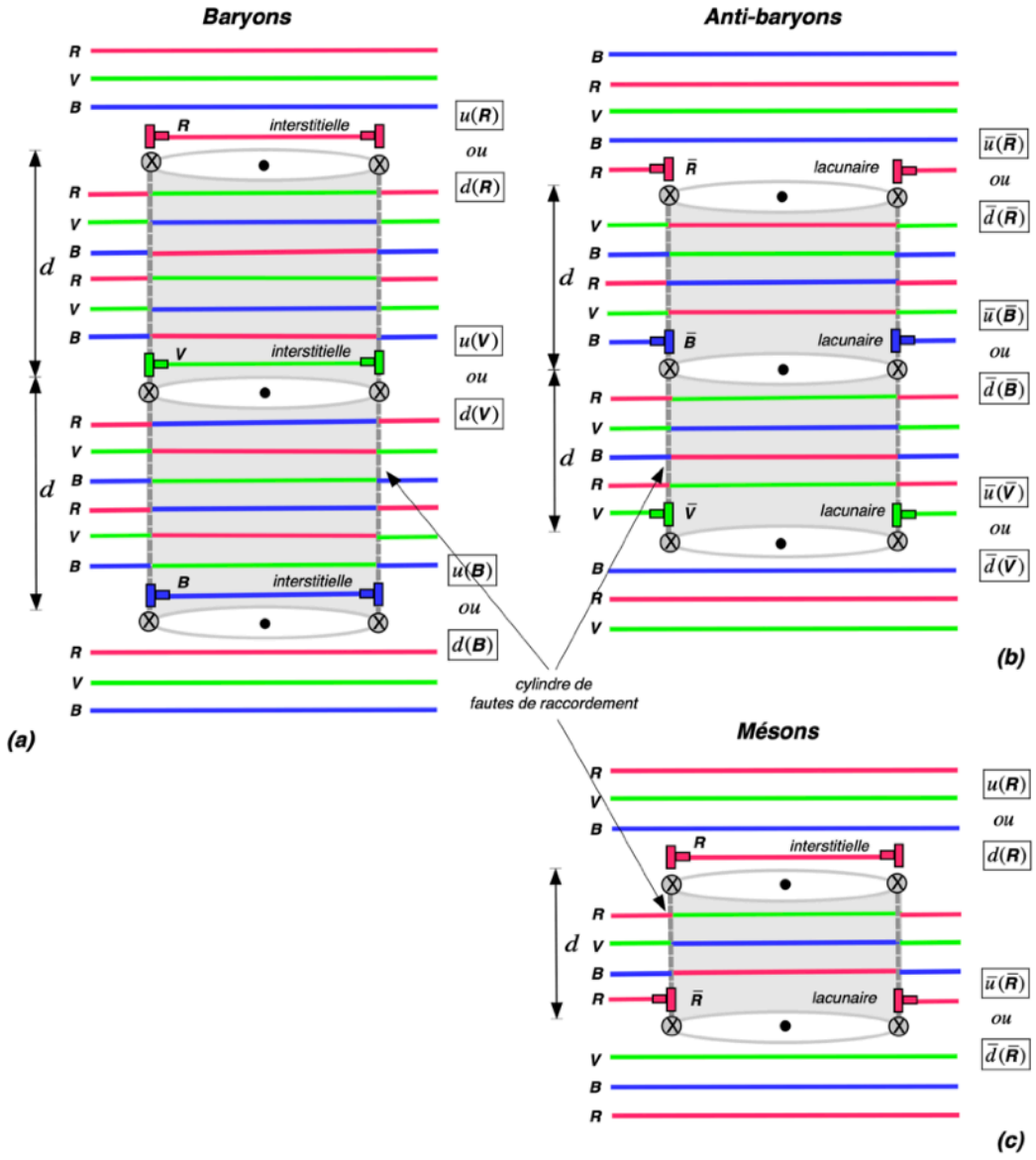


Figure 13.13 - *Les trois possibilités de combinaisons de 2 ou 3 dispirations permettant de former des singularités topologiques parfaitement localisées*

Dans le tableau de la figure 13.14, on a reporté les 8 différentes combinaisons possibles de 3 dispirations du tableau de la figure 13.11 avec leur propriété, en leur donnant un symbole et en les appelant des *baryons* par analogie avec le modèle standard.

combinaison	symbole spin 1/2	symbole spin 3/2	Ω_{BV}	$q_{\lambda BV}$	boucle coin	$q_{\theta BC}$
ddd	e^- (?) *électron*	Δ^-	$+2\pi$	$-2\pi^2 R_{BV}^2$	*interstitielle*	$-6\pi a$
dud	n *neutron*	Δ^0	0	0	*interstitielle*	$-6\pi a$
udu	p *proton*	Δ^+	-2π	$+2\pi^2 R_{BV}^2$	*interstitielle*	$-6\pi a$
uuu	e^{++} (???) *lepton ?*	Δ^{++}	-4π	$+4\pi^2 R_{BV}^2$	*interstitielle*	$-6\pi a$
$\overline{d}\,\overline{d}\,\overline{d}$	$\overline{e}^+$ (?) *positron*	$\overline{\Delta}^+$	-2π	$+2\pi^2 R_{BV}^2$	*lacunaire*	$6\pi a$
$\overline{d}\,\overline{u}\,\overline{d}$	$\overline{n}$ *antineutron*	$\overline{\Delta}^0$	0	0	*lacunaire*	$6\pi a$
$\overline{u}\,\overline{d}\,\overline{u}$	$\overline{p}$ *antiproton*	$\overline{\Delta}^-$	$+2\pi$	$-2\pi^2 R_{BV}^2$	*lacunaire*	$6\pi a$
$\overline{u}\,\overline{u}\,\overline{u}$	$\overline{e}^{--}$ (???) *anti-lepton ?*	$\overline{\Delta}^{--}$	$+4\pi$	$-4\pi^2 R_{BV}^2$	*lacunaire*	$6\pi a$

Figure 13.14 - *Les baryons de couleur «blanche» formés de 3 dispirations, et les quatre leptons obtenus par collapse des combinaisons de quarks* ddd , $\overline{ddd}$, uuu *et* $\overline{u}\,\overline{u}\,\overline{u}$

Dans ce tableau, l'analogie avec les baryons du modèle standard des particules élémentaires, composés de triplets de *quarks* u et d ou de triplets d'anti-quarks $\overline{u}$ et $\overline{d}$, est flagrante et parfaite. Non seulement on y voit apparaître des particules composées de *quarks* avec des charges de rotation $q_{\lambda BV}$ fractionnaires correspondant aux charges électriques du modèle standard, mais il s'ajoute ici la charge de courbure par flexion $q_{\theta BC}$ qui n'a pas d'équivalent dans le modèle standard, et qui correspond parfaitement avec notre conjecture 8, à savoir que *les singularités de nature lacunaire correspondent par analogie à de l'anti-matière et les singularités de nature interstitielle à de la matière.* Le fait que les particules du modèle standard apparaissent avec deux symboles différents dans ce tableau pour les combinaisons dud , udu , $\overline{d}\,\overline{u}\,\overline{d}$ et $\overline{u}\,\overline{d}\,\overline{u}$ s'explique par la notion de spin des boucles de désinclinaison vis, développée au chapitre 12. En effet, si chaque quark possède un spin $\pm 1/2$, alors la composition des spins peut créer un spin globale de $\pm 1/2$ dans le cas des particules n *(neutron)* et p *(proton)* et des anti-particules $\overline{n}$ *(anti-neutron)* et $\overline{p}$ *(anti-proton)*, ou bien un spin $\pm 3/2$ dans le cas des particules Δ^0 et Δ^+ et des anti-particules $\overline{\Delta}^0$ et $\overline{\Delta}^-$. Dans le cas

des combinaisons $d\,d\,d$, $u\,u\,u$, $\overline{d}\,\overline{d}\,\overline{d}$ et $\overline{u}\,\overline{u}\,\overline{u}$, les spins des 3 quarks sont obligatoirement alignés (pour une raison qui reste encore à expliquer, mais qui est fort probablement liée avec le principe d'exclusion) et la composition des spins ne peut alors fournir qu'un spin global de $\pm 3/2$ dans le cas des particules Δ^- et Δ^{++} et des anti-particules $\overline{\Delta}^+$ et $\overline{\Delta}^{--}$. Dans le cas des combinaisons $d\,d\,d$ et $\overline{d}\,\overline{d}\,\overline{d}$, le collapse complet des quarks avec spin $\pm 1/2$ présente alors exactement la configuration des leptons «électron» et «positron» comme représenté à la figure 13.17. On reviendra sur ce sujet dans la suite de ce chapitre.

Dans le tableau de la figure 13.15, on a reporté les différentes combinaisons possibles de 2 dispirations du tableau de la figure 13.11 avec leur propriété, en leur donnant un symbole et en les appelant des *mésons* par analogie avec le modèle standard.

combinaison	***symbole spin 0***	***symbole spin 1***	Ω_{BV}	$q_{\lambda BV}$	***boucle coin***	$q_{\theta BC}$
$d\,\overline{d}$	π^0	ρ^0	0	0	-	0
$d\,\overline{u}$	π^-	ρ^-	$+2\pi$	$-2\pi^2 R_{BV}^2$	-	0
$\overline{d}\,u$	π^+	ρ^+	-2π	$+2\pi^2 R_{BV}^2$	-	0
$u\,\overline{u}$	η^0	ω^0	0	0	-	0

Tableau 13.15 - *Les mésons de couleur «blanche» formés de 2 dispirations*

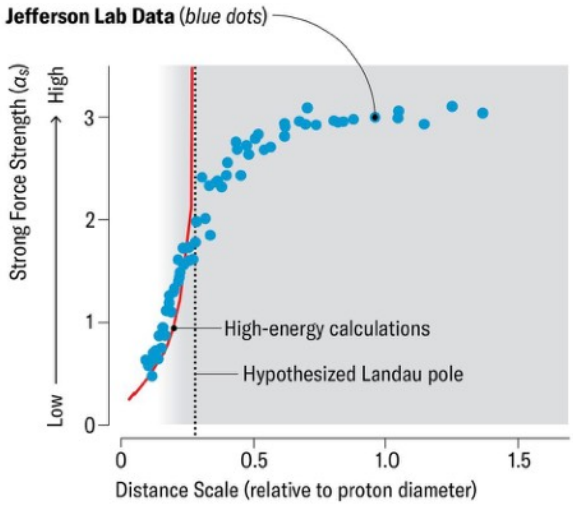
Dans ce tableau, l'analogie avec les mésons du modèle standard des particules élémentaires, composés de doublet de *quarks* u ou d avec des anti-quarks $\overline{u}$ ou $\overline{d}$, est flagrante et parfaite. On y voit apparaître des particules composées de *quarks* avec des charges de rotation $q_{\lambda BV}$ fractionnaires, qui correspondent aux mésons du modèle standard, mais avec une charge de courbure par flexion $q_{\theta BC}$ nulle, ce qui signifie que ces singularités topologiques ne peuvent pas être cataloguées comme de l'anti-matière (singularités de nature lacunaire) ou de la matière (singularités de nature interstitielle).

Le fait que les particules du modèle standard apparaissent avec deux symboles différents dans ce tableau s'explique aussi par la notion de spin des boucles de désinclinaison vis, développée au chapitre 12. En effet, si chaque quark possède un spin $\pm 1/2$, alors la composition des spins peut créer un spin globale de 0 dans le cas des particules π^0, π^-, π^+ et η^0, ou bien un spin ± 1 dans le cas des particules ρ^0, ρ^-, ρ^+ et ω^0.

De la force forte et de son comportement asymptotique

Les quarks composant les particules des tableaux des figures 31.9 et 31.10 sont liés par un

cylindre de fautes de raccordement, de sorte que l'énergie de la singularité topologique augmente comme $E_\gamma \sim \gamma_0 2\pi R_{BV} d \sim \alpha d$ si la distance d séparant deux dispirations augmente. D'autre part, lorsqu'on essaie de rapprocher les quarks composant les particules des tableaux des figures 31.9 et 31.10, c'est une force de répulsion qui apparaît. Par exemple, dans le cas de la particule π^-, les quarks d et $\overline{u}$ sont de charges électriques $-2\pi^2 R_{BV}^2/3$ et $-4\pi^2 R_{BV}^2/3$ respectivement, de même signe, de sorte que l'énergie d'interaction électrique entre les deux quarks augmente comme $E_{élect} \sim \beta/d$. L'énergie d'interaction totale due au cylindre de faute d'empilement ainsi qu'à la répulsion électrique entre les quarks, à savoir $E_{\text{int}} = E_\gamma + E_{élect} \sim \alpha d + \beta/d$, présente donc un minimum en $d_{\min} = (\beta/\alpha)^{1/2}$, qui correspond à la distance d'équilibre entre les quarks. La force forte d'interaction se déduit par la dérivé de l'énergie d'interaction par rapport à d comme $F_{forte} = \partial E_{\text{int}}/\partial d \sim \alpha d - \beta/d^2$. Cette force est donc répulsive en-dessous de $d_{\min}$, nulle pour $d = d_{\min}$ et attractive au-dessus de $d_{\min}$.



La force de liaison des dispirations est donc une *force forte,* au sens que *la force de liaison augmente si on tente de séparer les dispirations*. C'est un phénomène similaire au cas de l'énergie de faute d'empilement entre deux dislocations partielles dans un réseau *CFC* ou au cas de l'énergie de faute de raccordement entre trois dislocations partielles dans un réseau cubique axial (voir chapitre 2). La distance d'équilibre $d_{\min}$ entre les dispirations est alors contrôlée par un mécanisme de compétition entre l'énergie d'interaction répulsive entre les boucles composant la particule et l'énergie de la faute d'empilement entre les boucles, mécanisme tout-à-fait similaire à celui décrit dans le cas de la figure 2.16.

Il est remarquable de constater que la force d'interaction attractive au-dessus de $d_{\min}$ augmente jusqu'à tendre vers une valeur limite constante égale à $F_{forte} \to \alpha$. Ce comportement «asymptotique» original de la force forte a bien été mesuré au Thomas Jefferson Lab en Virginie[1], et il est reporté dans la figure ci-dessus. On constate que le comportement mesuré de la force forte correspond parfaitement à l'existence d'un cylindre de fautes d'empilement!

De l'interaction forte entre quarks via les bosons de jauge gluons

Dans le modèle standard, le traitement quantique des «couleurs» des quarks est assuré par la *chromodynamique quantique,* dans laquelle il existe 8 bosons de jauge colorés, vecteurs de la force forte, appelés *gluons.*

Et c'est l'échange d'un gluon coloré entre deux quarks qui permet alors d'échanger la couleur de ces deux quarks, par une interaction qui peut être représentée, comme dans la figure

[1] *S. J. Brodky, A. Deur, C.D. Roberts, «The secrets of the Strongest Force in the Universe» Scientific American Magazine, Vol. 330, No. 5, May 2024, p. 32*

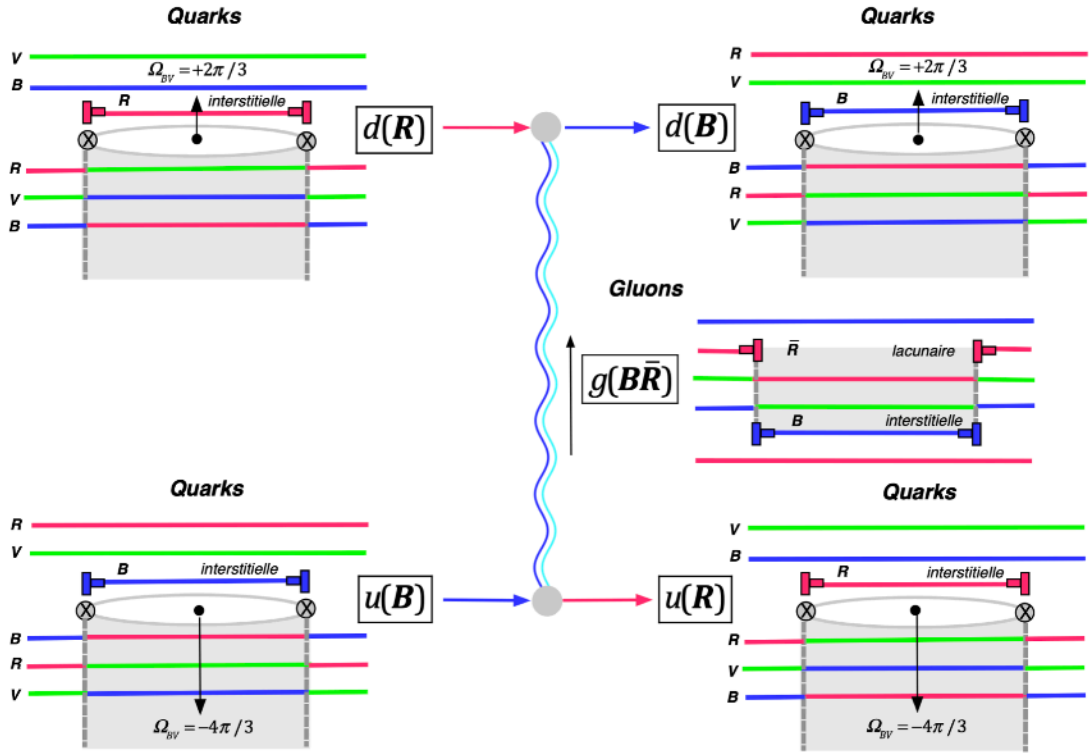


Figure 13.16 - *Diagramme de Feynman de l'échange des couleurs de deux quarks par l'échange d'un gluon bicolore*

13.16, sous la forme d'un *diagramme de Feynman* illustré par la configuration des singularités topologiques impliquées.

Les gluons colorés correspondent alors à deux boucles coin associées, une de nature interstitielle et une de nature lacunaire, et leur charge de rotation $q_{\lambda BC}$ est nulle. Les boucles coin sont liées entre elles par l'existence d'un cylindre de faute de raccordement, et sont par conséquent soumises à la force forte. Quant à leur charge de courbure $q_{\theta BC}$, elle est nulle puisque qu'on a $q_{\theta BC} = (+2\pi a) + (-2\pi a)$, de sorte que *l'énergie associée aux distorsions de cette paire de boucles doit être extrêmement faible*, et que, par conséquent, *la masse des gluons doit être quasiment nulle, alors qu'il possède une énergie non nulle provenant du cylindre de faute de raccordement.* De ce point de vue, les gluons s'apparentent aux photons.

En chromodynamique quantique, on pense que c'est ce mécanisme d'échange de gluons entre les neutrons et les protons du noyau atomique qui explique la cohésion des noyaux atomiques. Il s'agit donc là d'un effet secondaire de la force forte puisque ces échanges de gluons colorés perturbent les distances d entre les dispirations composant les neutrons et les protons, et par conséquent perturbent les énergies des protons et des neutrons.

De la constitution des leptons neutrinos et anti-neutrinos

Dans le modèle standard, il existe aussi une première famille de particules quasi-ponctuelles qu'on appelle des leptons et qui sont représentés par l'électron e^-, l'anti-électron ou positron

e^+ , le neutrino électronique ν_e et l'anti-neutrino électronique $\overline{\nu}_e$.

Dans le réseau cosmologique, nous avons déjà postulé l'existence du neutrino sous la forme d'une boucle de dislocation coin de nature interstitielle, alors que l'anti-neutrino correspondait à une boucle de dislocation coin de nature lacunaire. C'est d'ailleurs ce qui nous avait permis de

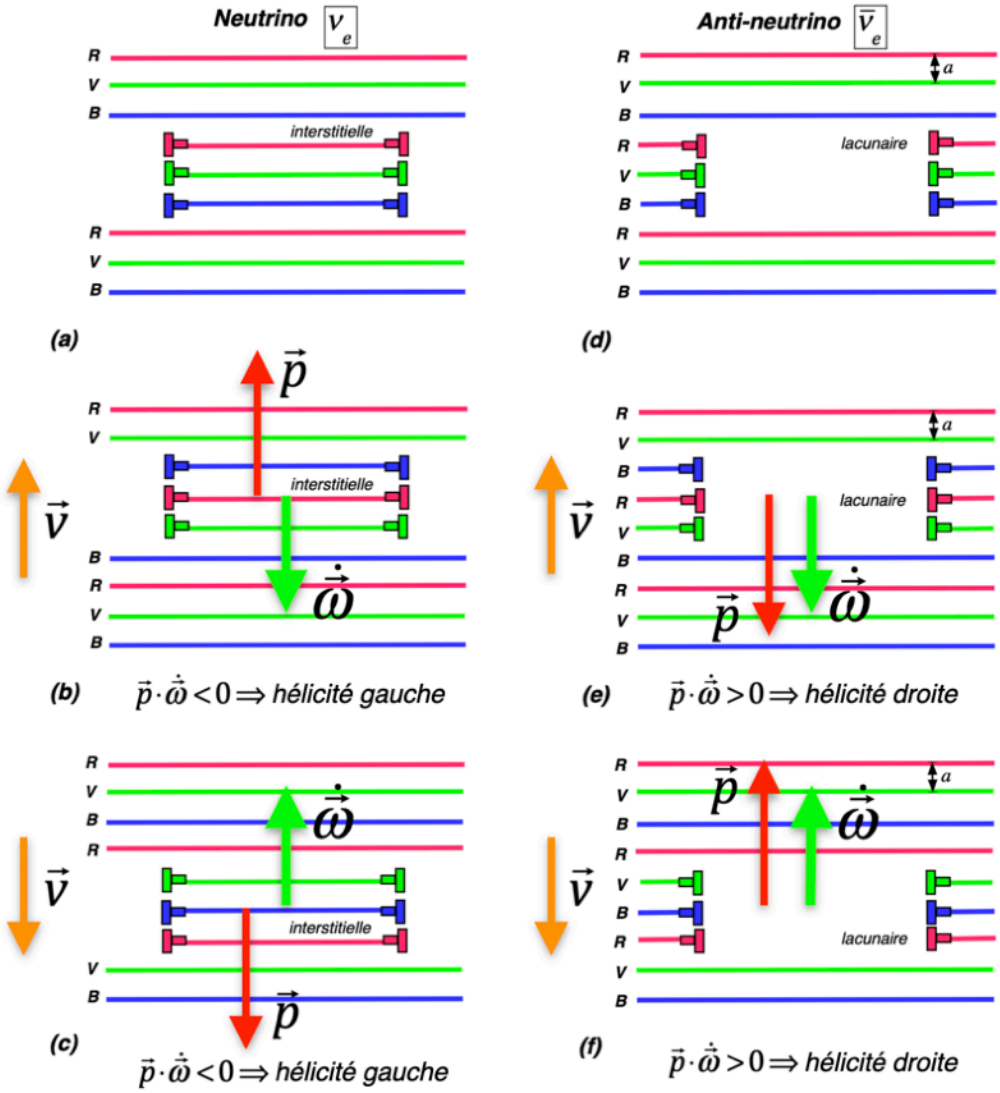


Figure 13.17 - *Le neutrino et l'antineutrino et leur hélicité négative et positive comme le produit scalaire de leur quantité de mouvement $\vec{p}$ et de la vitesse de rotation $\dot{\vec{\omega}}$ de leurs plans axiaux.*

déduire des propriétés gravitationnelles répulsives tout à fait exceptionnelles pour le neutrino, dues à sa charge de courbure par flexion qui domine largement les effets gravitationnels attractifs dus à sa masse d'inertie. Dans le cas du «réseau cosmologique coloré» de la figure 13.7, pour respecter les trois règles auxquelles ce réseau doit satisfaire, le neutrino ne peut correspondre qu'à l'insertion de trois plans consécutifs de couleur ***R***, ***V***, ***B,*** et l'anti-neutrino à la soustraction de trois plans consécutifs $\overline{\boldsymbol{R}}$, $\overline{\boldsymbol{V}}$, $\overline{\boldsymbol{B}}$, comme représenté dans les figures 13.17a et

13.17d, de sorte à former une inclusion ou un trou qui n'a pas de couleur, c'est-à-dire de couleur blanche. Sous cette forme, les neutrinos et anti-neutrinos ont exactement les propriétés que nous avons déduites dans les chapitres précédents pour les boucles de dislocation coin prismatiques, à condition que leur vecteur de Burgers ait une norme telle que $\left|\vec{B}_{BC}\right| = 3a$, de sorte que leur charge de courbure par flexion a une norme égale à $\left|\boldsymbol{q}_{\theta BC}\right| = 6\pi a$.

En physique des particules, on définit *l'hélicité* $\vec{S}\cdot\vec{p}\,/\left|\vec{p}\right|$ *d'une particule* comme la projection de son spin $\vec{S}$ sur la direction $\vec{p}\,/\left|\vec{p}\right|$ de sa quantité de mouvement $\vec{p}$ (cette projection correspond donc à la composante du spin suivant la direction de propagation). On dira d'une particule que son *hélicité est droite (positive) ou gauche (négative)* selon que son spin est orienté dans le même sens ou dans le sens opposé à son mouvement. Dans le cas du neutrino et de l'anti-neutrino, l'observation expérimentale montre que *tous les neutrinos ont toujours une hélicité gauche*, et que *tous les antineutrinos ont toujours une hélicité droite*. Et le fait que les neutrinos soient toujours gauches est très important, car c'est lui qui explique *le phénomène de violation de la parité dans l'interaction faible*.

On peut ici donner une explication de ce comportement de l'hélicité en considérant de manière classique le mouvement des neutrinos et des anti-neutrinos de la figure 13.17. En effet, si on considère que ces particules se déplacent dans le réseau perpendiculairement aux plans denses à vitesse $\vec{v}$ comme illustré dans les figures 13.17, on constate que la direction de la quantité de mouvement $\vec{p}$ associée aux déplacements des plans massifs est dans la direction de la vitesse $\vec{v}$ de déplacement du neutrino, mais dans dans la direction opposée à la direction de la vitesse $\vec{v}$ de déplacement dans le cas de l'anti-neutrino. Quant à la direction de la rotation des neutrinos et des anti-neutrinos, représentée par le vecteur de vitesse angulaire $\dot{\vec{\omega}}$ des plans de «corpuscules» concernés, on constate qu'elle est toujours opposée à la direction de la vitesse $\vec{v}$. Si on qualifie de manière classique l'hélicité de ces mouvements par le signe du produit scalaire $\vec{p}\cdot\dot{\vec{\omega}}$ de la quantité de mouvement $\vec{p}$ par la vitesse angulaire $\dot{\vec{\omega}}$, on constate bien que l'hélicité du neutrino est toujours négative, donc que *le mouvement du neutrino est toujours d'hélicité gauche*, alors que ce même produit dans le cas de l'anti-neutrino est toujours positif, et donc que *le mouvement de l'anti-neutrino est toujours d'hélicité droite*.

De la constitution des leptons électrons et positrons

Quant à l'électron et à l'anti-électron ou positron, nous avons déjà émis l'hypothèse que la boucle de désinclinaison vis était un bon candidat pour les représenter. En ce cas, pour assurer que la charge de rotation corresponde bien, il faut que l'angle de rotation $\boldsymbol{\Omega}_{BV}$ entre deux plans consécutifs soit égal à $\pm 2\pi$, pour que la norme de la charge de rotation satisfasse la relation $\left|\boldsymbol{q}_{\lambda BV}\right| = 2\pi^2 R_{BV}^2$. Cependant, sous cette forme pure, la boucle de désinclinaison vis a déjà été identifiée comme la particule W^- ou W^+ dans les figures 13.10a et 13.10b. De plus, l'électron et le positron doivent présenter la dissymétrie entre matière et anti-matière, et ils doivent satisfaire les interactions faibles leptoniques de la figure 13.3. Pour satisfaire ces desiderata, on doit à nouveau faire appel à une combinaison d'une boucle de désinclinaison vis d'angle $\pm 2\pi$, qui satisfait la règle 3 et qui ne possède donc pas de couleur, avec une boucle de dislocation coin correspondant à l'insertion de trois plans consécutifs de couleur ***R***, ***V***, ***B***, ou à la soustraction de trois plans consécutifs $\overline{\boldsymbol{R}}$, $\overline{\boldsymbol{V}}$, $\overline{\boldsymbol{B}}$.

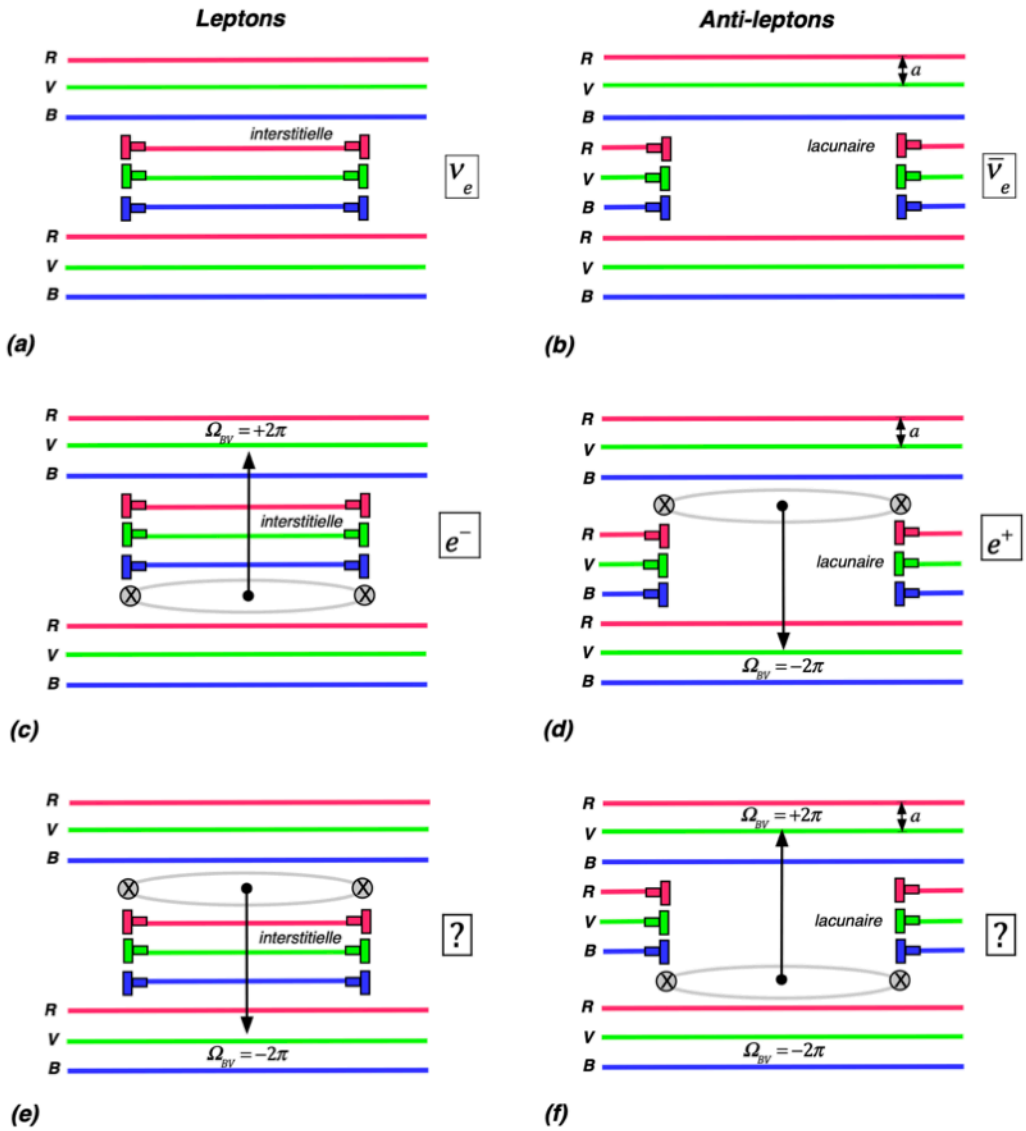


Figure 13.18 - *Structure du neutrino, de l'anti-neutrino, de l'électron, du positron, et de deux «leptons inconnus», comme assemblages de boucles de dislocation coin et de boucles de désinclinaison vis*

En principe, il devrait donc y avoir quatre électrons différents, de charges $q_{\lambda BV} = \pm 2\pi^2 R_{BV}^2$ et $q_{\theta BC} = \pm 6\pi a$ comme représentés dans les figures 13.18c à 13.18f. Mais en réalité, on n'observe dans la nature que *l'électron* e^- *et l'anti-électron ou positron* $\bar{e}^+$. Les «leptons inconnus» représentés dans les figures 13.18e et 13.18f pourraient être considérés en fait comme un électron positif de matière et un anti-électron négatif, mais ils ne sont pas observés dans la nature, alors que rien ne semble à priori en montrer la raison dans les figures 13.17.

Cependant, il pourrait y avoir une explication assez simple, quoique difficile à justifier. On pourrait en effet imaginer que les leptons chargés seraient en fait les résultats de collapses de baryons à trois quarks. Considérons le cas le plus simple, à savoir la compression d'assemblages de quarks $d\,d\,d$ et $\bar{d}\,\bar{d}\,\bar{d}$, de sorte à collapser les trois boucle vis en une seule, et de collapser les trois boucles coin en une seule. On obtient alors directement l'électron et le posi-

tron représentés dans les figures 13.18c et 13.18d. Mais il faudrait que ces collapses conduisent à des leptons de spin 1/2 puisque l'électron et le positron sont de spin 1/2. Or, dans le tableau 13.14, on constate que les assemblages de quarks $d\,d\,d$ et $\overline{d}\,\overline{d}\,\overline{d}$ conduisent exclusivement aux baryons Δ^- et $\overline{\Delta}^+$ de spin 3/2, et qu'il n'existe pas de baryons $d\,d\,d$ et $\overline{d}\,\overline{d}\,\overline{d}$ avec un spin 1/2. On peut donc imaginer que les assemblages de quarks $d\,d\,d$ et $\overline{d}\,\overline{d}\,\overline{d}$ avec spin 1/2 doivent forcément devenir des leptons, donc des électrons et des positrons, comme on l'a suggéré dans le tableau 13.14.

En admettant cette explication, il devient assez simple d'expliquer la non observation des «leptons inconnus» des figures 13.18e et 13.18f. Il suffit en effet de constater qu'il n'y a aucun assemblage de trois quarks dans le tableau 13.14 qui pourrait conduire par collapse aux deux leptons «imaginaires» des figures 13.18e et 13.18f, d'où l'explication de la non-existence de ces deux leptons.

En regardant le tableau de la figure 13.14, on constate aussi qu'il n'existe pas de baryons de spin 1/2 obtenus par combinaison des quarks $u\,u\,u$ et $\overline{u}\,\overline{u}\,\overline{u}$, et on pourrait alors se demander s'il n'existerait pas un lepton positif e^{++} de spin 1/2 et de charge double provenant du collapse de l'assemblage de quarks $u\,u\,u$ et un anti-lepton négatif $\overline{e}^{--}$ de spin 1/2 et de charge double provenant du collapse de l'assemblage de quarks $\overline{u}\,\overline{u}\,\overline{u}$. L'existence de ces deux leptons aurait l'avantage de combler les deux vides laissés dans le tableau 13.14. A noter que dans la littérature[2], des états leptoniques doublement chargés apparaissent dans des mécanismes de bascule de type II, dans des modèles de rupture forte de symétrie électrofaible, dans certaines extensions de modèles supersymétriques, dans des modèles de saveurs dans des dimensions supplémentaires déformées et dans des modèles encore plus généraux, dans des modèles inspirés de la théorie des cordes et dans des modèles 3-3-1. En outre, les leptons stables doublement chargés sont aussi considérés par certains comme un candidat acceptable pour la matière noire froide.

De l'interaction faible des leptons et des bosons intermédiaires du modèle standard

Dans le modèle standard, les interactions faibles correspondent à échanger des bosons intermédiaires $W^{\pm}$ ou Z^0, qui permettent d'échanger la charge électrique entre deux particules, comme reporté dans les figures 13.3 et 13.11. Pour que les diagrammes de Feynman de ces figures fonctionnent avec les dispirations de notre modèle, il faut nécessairement que les bosons intermédiaires soient des boucles de désinclinaison vis pures d'angles de rotation $\boldsymbol{\Omega}_{BV}$ valant respectivement $\pm 2\pi$ ou 0, comme représentés à la figure 13.9e à 13.9g.

Les bosons intermédiaires sont alors les seules bosons de jauge massifs, ce qui se comprend bien si ce sont effectivement de pures boucles de désinclinaison vis. Expérimentalement, on a trouvé que leur masse est beaucoup plus élevée que celles de l'électron et du positron, ce qui pourrait se comprendre par le fait que la rotation de $\pm 2\pi$ doit entièrement être faite sur une distance de a dans le cas des bosons intermédiaires, alors que dans le cas de l'électron et du positron, la rotation de $\pm 2\pi$ peut se répartir sur 3 plans successifs, donc sur une distance de

---

[2] *A. Ozansoy, «Doubly Charged Lepton Search Potential of the FCC base Energy-Frontier Electron-Proton Colliders», Advances in High Energy Physics, Volume 2020, Article ID 9234130, 13 pages, https://doi.org/10.1155/2020/9234130*

$3a$, ce qui doit diminuer très considérablement les distorsions locales du réseau, et donc l'énergie de la particule. Ceci pourrait aussi être la raison pour laquelle un boson de jauge s'associerait extrêmement vite avec 3 boucles coins interstitielles ou lacunaires pour diminuer fortement son énergie, ce qui expliquerait parfaitement les interactions faibles de la figure 13.3.

symbole	Ω_{BV}	$q_{\lambda BV}$	**boucle coin**	$q_{\theta BC}$
ν_e	0	0	*interstitielle*	$-6\pi a$
e^-	$+2\pi$	$-2\pi^2 R_{BV}^2$	*interstitielle*	$-6\pi a$
$\bar{\nu}_e$	0	0	*lacunaire*	$6\pi a$
e^+	-2π	$+2\pi^2 R_{BV}^2$	*lacunaire*	$6\pi a$
W^-	$+2\pi$	$-2\pi^2 R_{BV}^2$	-	0
W^+	-2π	$+2\pi^2 R_{BV}^2$	-	0
Z^0	$(+2\pi)+(-2\pi)$	0	-	0

Figure 13.19 - *Les leptons de la première famille et les bosons intermédiaires de jauge*

A noter aussi que, dans le modèle standard des particules, les bosons de jauge W^+ et Z^0 sont de spin 1, et donc qu'ils ne satisfont pas le principe d'exclusion, ce qui signifie que deux bosons de jauge peuvent occuper un même état, donc se superposer, ce qui crée en fait une boucle de désinclinaison vis d'angle Ω_{BV} égal par exemple à $\pm 4\pi$. Par contre, l'électron et le positron sont des particules de spin 1/2, qui satisfont le principe d'exclusion de Pauli. Ils ne peuvent par conséquent pas occuper le même état, ce qui signifie qu'on ne peut pas les superposer, ce qui devient naïvement presque une évidence si on considère la structure en boucle des électrons et des positrons représentée à la figure 13.15. On peut alors reporter les propriétés des leptons et des bosons de jauge dans le tableau de la figure 13.19.

Tentative d'explication des trois familles de quarks et de leptons du modèle standard

Dans le modèle standard, il existe non seulement les quarks et les leptons que nous venons de décrire, mais il existe encore deux familles supplémentaires de quarks et de leptons (figure 13.1), qui se distinguent surtout par les masses nettement plus élevées observées expérimentalement chaque fois qu'on passe d'une famille à la suivante. On a reporté dans la figure 13.20 la

progression des masses au sein du tableau des particules élémentaires du modèle standard, en donnant le facteur multiplicatif approximatif des masses, dans le sens horizontal du tableau et dans le sens vertical du tableau. On constate que les facteurs multiplicatifs moyens reportés

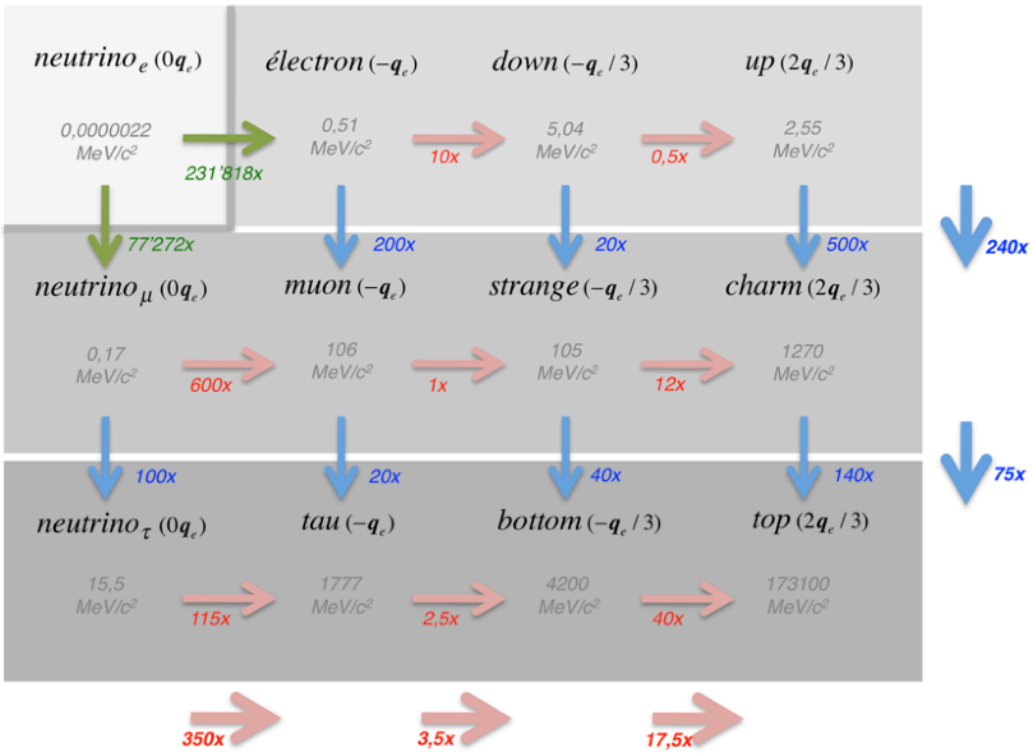


Figure 13.20 *- les masses des particules du modèle standard, mesurées expérimentalement et exprimées en MeV/c², avec les facteurs multiplicatifs approximatifs*

en-dehors du tableau sont effectivement très élevés en passant d'une famille à l'autre, alors que les facteurs multiplicatifs pour passer d'une particule à l'autre dans chaque famille ne sont pas si élevés, sauf dans le cas du passage du neutrino à l'électron, ce qui tendrait à faire penser que la structure topologique responsable de la forte augmentation de masse change très probablement d'une famille à l'autre mais reste fort probablement la même au sein d'une même famille. Il est aussi remarquable que les facteurs multiplicatifs associés au neutrino ν_e sont colossalement plus élevés que tous les autres facteurs, ce qui tend à faire penser que c'est probablement la structure des boucles coin qui changent d'une famille à l'autre.

Quant au facteur multiplicatif colossal pour passer du neutrino ν_e à l'électron e^-, il s'explique par la différence d'énergie énorme entre une boucle de dislocation coin et une boucle de désinclinaison vis, comme nous l'avons expliqué au chapitre 5.

De la possibilité de faire intervenir l'énergie de faute d'empilement entre plans denses axiaux

Le fait qu'il existe deux familles additionnelles avec des énergies beaucoup plus élevées pourrait peut-être être attribué à l'apparition de fautes d'empilement entre plans denses axiaux,

des fautes qu'on a éliminées initialement par la règle 1 dans la conjecture 13. En effet, nous avons construit la première famille de particules en tenant compte de cette règle, c'est-à-dire en s'assurant que la succession ***R***, ***V***, ***B*** des plans denses n'est jamais prise en défaut. Pour cela, nous avons dû introduire des boucles de dislocation coin de la bonne couleur pour décrire les quarks, et introduire une triple boucle coin de trois couleurs pour décrire les leptons.

Imaginons donc qu'il puisse exister des fautes d'empilement entre les plans denses du réseau. Il y a seulement deux types de fautes d'empilement réalisables, soit par une alternance fautive de plan du type ***X-Y-X***, soit par une alternance fautive du type ***X-X***. Supposons que les énergies de faute associées à ces deux types de faute d'empilement soient essentiellement dues aux propriétés axiales de ces plans, et présentent donc *des énergies de faute surfaciques axiales* γ_{1a} *et* γ_{1b} respectivement. L'énergie de faute γ_{1a} est associée à une faute d'empilement du type ***X-Y-X***, alors que l'énergie de faute γ_{1b} est due à une faute d'empilement du type ***X-X***. L'énergie de faute γ_{1a} est donc liée à une erreur d'empilement avec le plan deuxième voisin, alors que γ_{1b} est liée à une erreur d'empilement avec le plan premier voisin. Il y a donc de fortes chances pour que l'énergie γ_{1b} *soit nettement plus élevée que l'énergie* γ_{1a} *,* et donc que $\gamma_{1b} >> \gamma_{1a}$.

De la constitution possible des familles de neutrinos

Prenons le cas des neutrinos, dont on on sait qu'ils existent sous trois états différents ou trois « saveurs», comme le disent les physiciens : électronique, muonique et tauique. En retirant ou en ajoutant un ou deux plans au neutrino et à l'anti-neutrino électronique dans les figures 13.18a et 13.18b, on peut construire les six leptons neutres représentés dans la figure 13.21.

L'ajout ou le retrait de 2 plans denses axiaux correspond à deux énergies de faute γ_{1a} et pourrait donc correspondre aux neutrinos et anti-neutrinos muoniques de la 2ème famille, alors que l'ajout ou le retrait de un plan dense axial correspond à des énergies de faute γ_{1b} et pourrait donc correspondre aux neutrinos et anti-neutrinos tauiques de la 3ème famille.

Expérimentalement, on a constaté, chose étonnante, que les neutrinos sont capables de passer spontanément d'une saveur à l'autre au cours de leur déplacement. Ce sont même les seules particules élémentaires douées de cette propriété, appelée « oscillation ». Le résultat majeur de ces expériences est que ce transformisme des neutrinos ne peut s'expliquer que parce qu'ils ont des masses différentes, ce qui est le cas puisqu'ils diffèrent d'une famille à l'autre (d'une saveur à l'autre) par leur énergie de déformation du réseau et par leur énergie de faute d'empilement des plans denses axiaux.

Quant au mécanisme qui conduit à cette oscillation, on suppose qu'au moment de la création et de l'émission de neutrinos ou d'antineutrinos par l'interaction faible (par exemple dans les désintégrations bêta de noyaux radio-actifs), on ne peut pas séparer les états de masses. Il se forme alors une superposition cohérente d'états de masses définies, et la fonction d'onde contient maintenant tous les types de neutrinos. Il existe alors une probabilité d'observation de chaque type de neutrinos qui peut être déduite de la fonction d'onde, et cette fonction de probabilité exhibe un magnifique comportement oscillatoire. Les oscillations de neutrinos ne peuvent être observées qui si les masses m_1, m_2 et m_3 ne sont pas toutes identiques, ce qui conduit à des vitesses légèrement différentes d'une saveur à l'autre, d'où le phénomène d'oscillation, et si le neutrino initial (émis dans un processus d'interaction faible) est créé dans une

superposition cohérente d'états propres de masse.

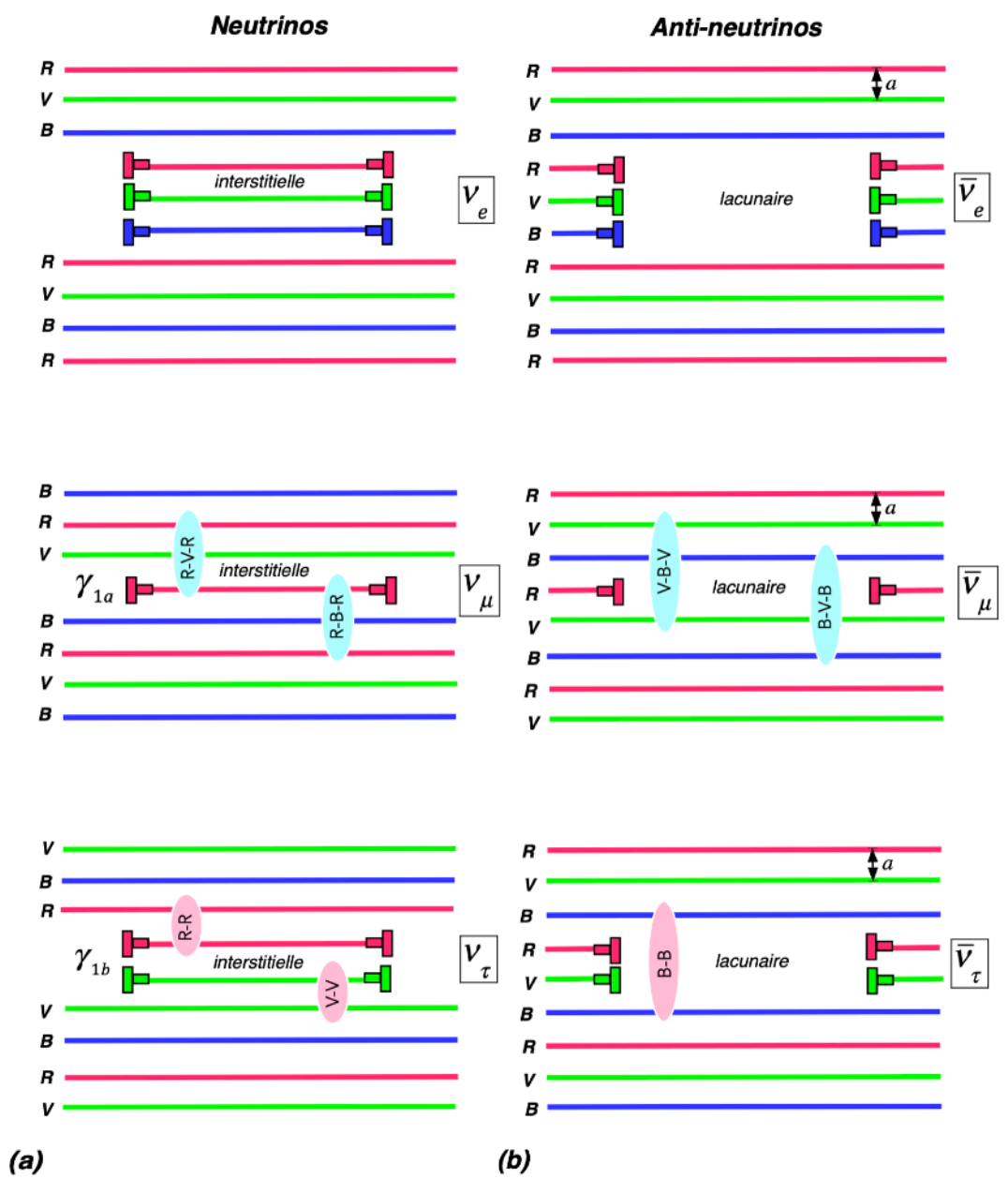


Figure 13.21 - *les trois familles de neutrinos et d'anti-neutrinos, obtenues par retrait ou par ajout de un ou deux plans denses, avec l'apparition de fautes d'empilement du type X-Y-X et X-X.*

De la constitution possible des familles d'électrons

Dans le cas des électrons et anti-électrons de la figure 13.18c et 13.18d, il suffit d'adjoindre aux neutrinos de la figure 13.21 les boucles de désinclinaison vis avec un angle de rotation Ω_{BV} valant respectivement $\pm 2\pi$. On obtient en ces cas respectivement les électrons et anti-électrons de la 1ère famille, les muons et anti-muons de la 2ème famille, et les taus et anti-taus de la 3ème famille représentés dans la figure 13.22.

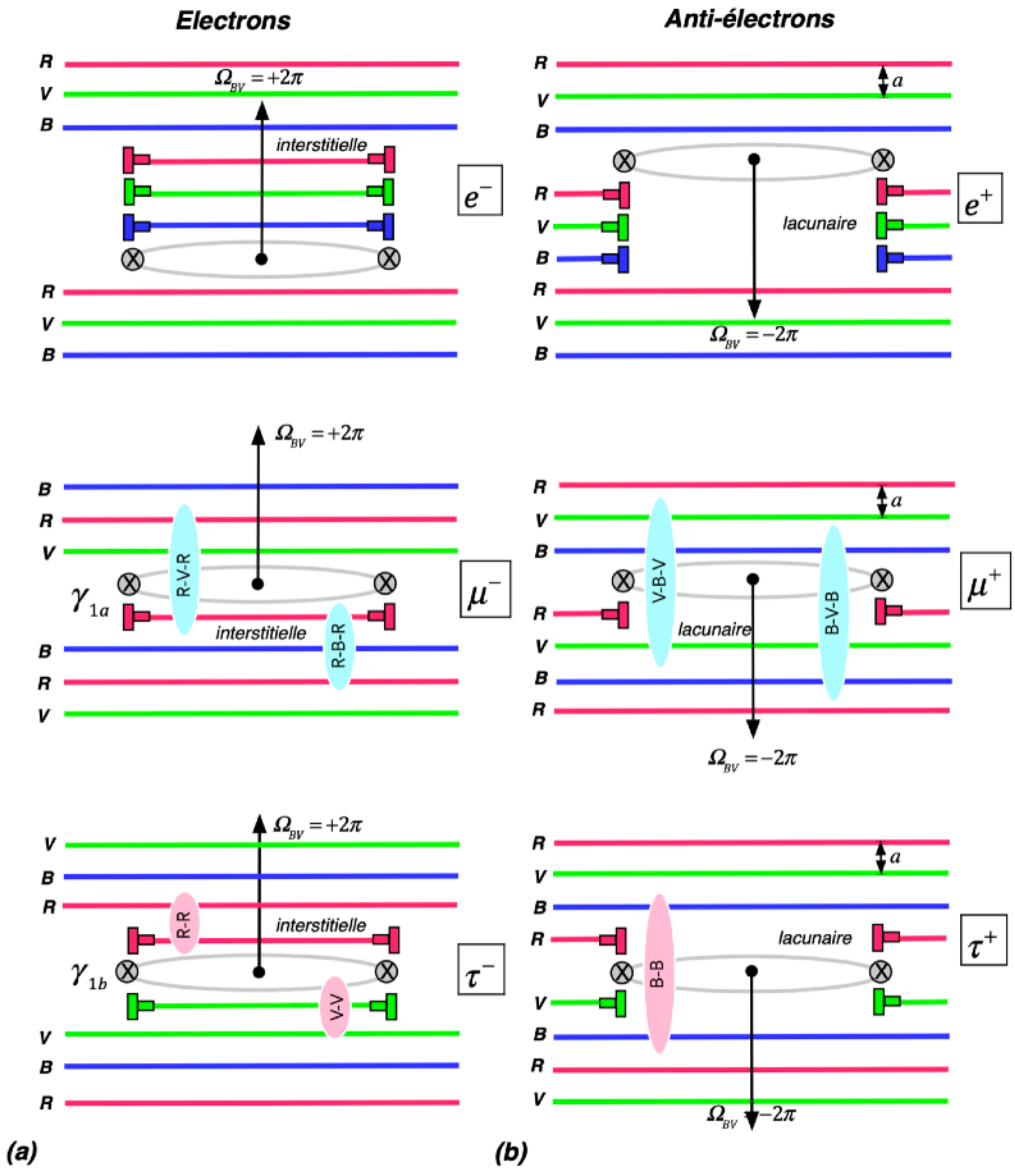


Figure 13.22 - *les trois familles d'électrons et d'anti-électrons, obtenues par retrait ou par ajout de deux ou d'un plan dense, en combinaison avec la boucle de désinclinaison vis*

De la constitution possible des familles de quarks

Dans le cas des quarks, on peut ajouter ou soustraire 1 ou 2 plans denses axiaux aux quarks u et d ou aux anti-quarks $\overline{u}$ et $\overline{d}$, de sorte à faire apparaître des fautes d'empilement des plans denses axiaux avec des énergies γ_{1a} ou γ_{1b}. On obtient alors la famille des *quarks* représentés dans la figure 13.24, qui est elle aussi composée de trois générations de deux types de particules électriquement chargées: une première génération est formée des quarks *down (d)* et *up (u)*, respectivement de charges électriques -1/3 et +2/3 de la charge électrique de l'électron, une deuxième génération composée des quarks *strange (s)* et *charm (c)*, respectivement de charges électriques -1/3 et +2/3 de la charge électrique de l'électron, et une

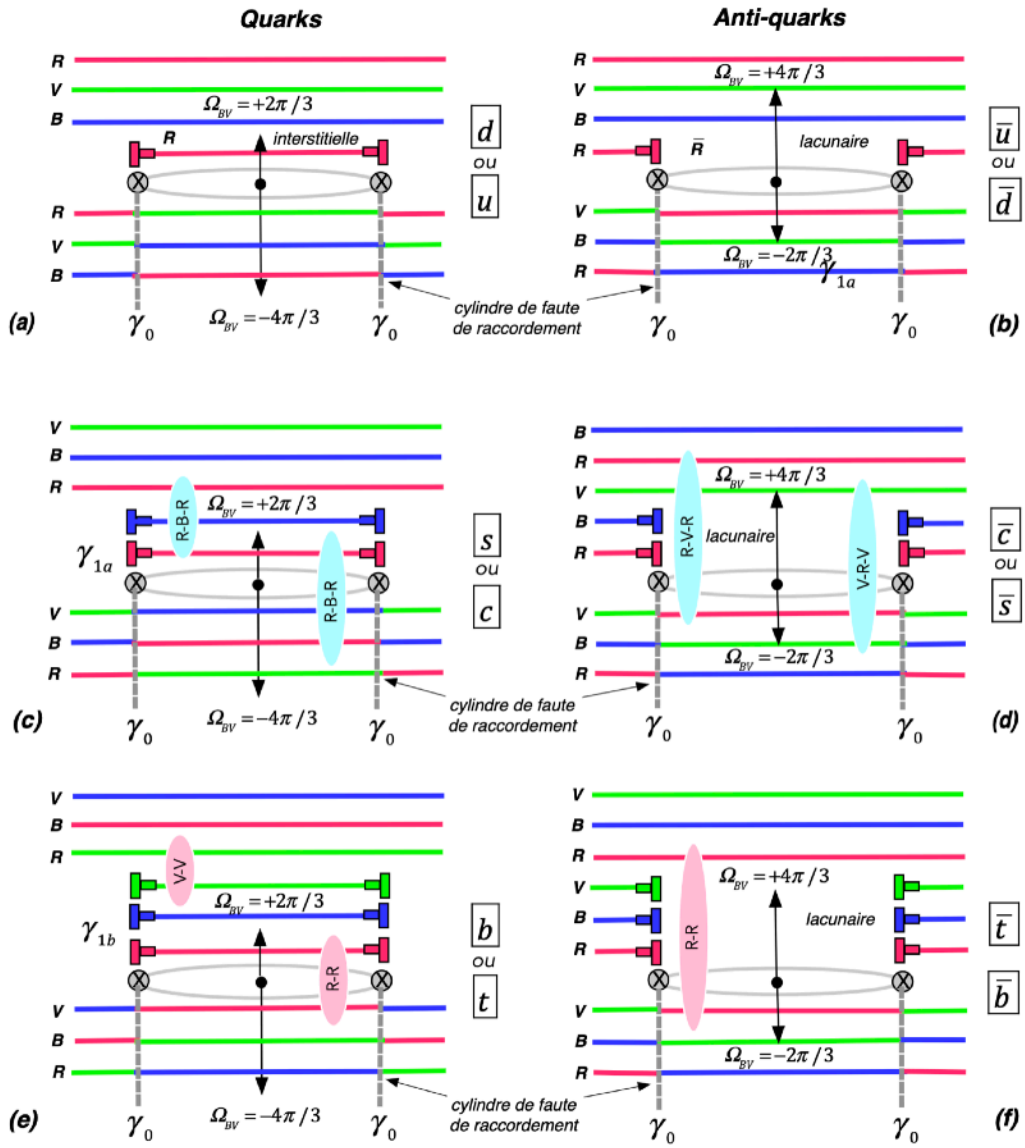


Figure 13.23 - *les trois familles de quarks et d'anti-quarks, obtenues par retrait ou ajout de deux ou d'un plan dense, en combinaison avec une boucle de désinclinaison vis*

troisième génération composée des quarks *bottom (b)* et *top (t)*, respectivement de charges électriques -1/3 et +2/3 de la charge électrique de l'électron. Et chaque quark possède aussi son anti-particule de charge électrique de signe opposé ($\bar{d}$, $\bar{u}$, $\bar{s}$, $\bar{c}$, $\bar{b}$ et $\bar{t}$).

De la désintégrations des quarks via l'interaction faible

D'après cet hypothétique modèle pour décrire les trois familles de quarks et leur saveurs respectives *d, u, s, c, b* et *t*, sur la base de l'existence de fautes d'empilement de types ***X-Y-X*** et ***X-X*** entre les plans denses, on peut déduire par quelles voies devraient se désintégrer les quarks. Le schéma des désintégrations possibles est reporté à la figure 13.24.

Avec ce modèle hypothétique, on retrouve les désintégrations pures usuelles via l'interaction

faible lors des transformations *u-> d, c-> s* et *t-> b* au sein de la même famille. Par contre, les désintégrations d'une famille à l'autre *c-> d, s-> u, t-> s, b-> c, t-> d* et *b->u* ne correspondent pas exactement aux désintégrations décrites dans la littérature puisque, en plus de l'émission d'un boson usuel W^+ ou W^-, *il faut adjoindre l'émission d'un lepton* ν_μ *ou* ν_τ *pour respecter le nombre de plans axiaux au cours de la désintégration*.

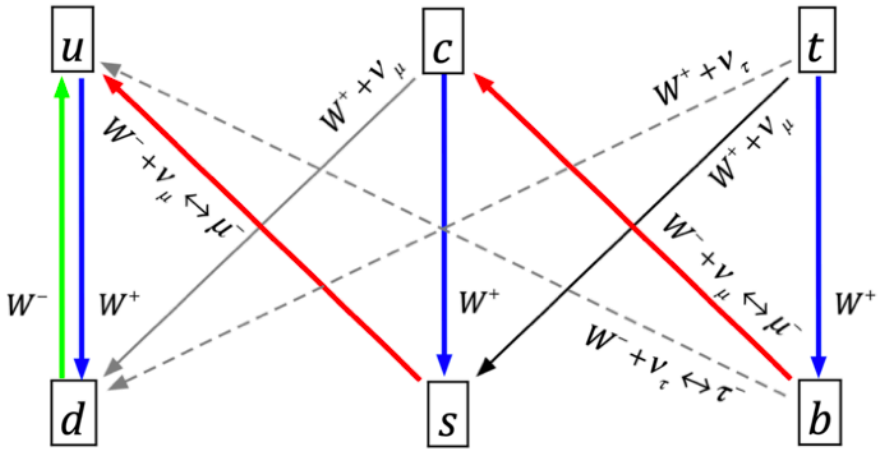


Figure 13.24 - *Schéma des désintégrations possibles de quarks, via l'interaction faible, avec les particules produites selon chacune des voies de désintégration.*

Ce désaccord avec la théorie usuelle du modèle standard devrait permettre de vérifier ou d'infirmer expérimentalement l'idée que l'existence de trois familles de particules élémentaires pourrait être due aux énergies γ_{1a} et γ_{1b} de fautes d'empilement de plans denses dans un réseau *CFC* «coloré».

De l'intérêt de l'analogie entre le réseau cosmologique «coloré» et le modèle standard

L'analogie entre notre modèle de réseau cosmologique «coloré», avec les singularités topologiques élémentaires qu'il peut contenir, et le modèle standard des particules élémentaires est excellente, et elle est très féconde pour fournir des explications à plusieurs facettes assez mystérieuses du modèle standard que nous allons énumérer ici.

- *De la structure des particules du modèle standard en trois familles de quarks et leptons:*

Les structures topologiques de boucles de dislocation coin et de boucles de désinclinason vis introduites dans un réseau *CFC* «coloré» possédant des règles strictes d'arrangement et de rotation des plans corpusculaires «colorés», avec des énergies de faute de raccordement et d'empilement γ_0, γ_{1a} et γ_{1b}, permettent de reconstituer toutes les particules du modèle standard des particules élémentaires, à savoir les quarks et les leptons. Ces particules présentent une structure en trois familles dont les masses très différentes peuvent s'expliquer par les énergies de faute d'empilement γ_{1a} et γ_{1b}. Ces divers quarks et leptons satisfont aussi *toutes les propriétés de l'interaction faible* et de *l'interaction forte* utilisant respectivement les bosons de jauge intermédiaires $W^\pm$ et Z^0 et les gluons, qui possèdent aussi leurs propres structures topologiques dans le réseau cosmologique «coloré», *hormis l'adjonction de l'émission d'un lepton*

ν_μ *ou* ν_τ *lors de la désintégration des quarks d'une famille à l'autre* (figure 13.24). Quant à la force forte, elle possède bien les bonnes propriétés asymptotiques dues au fait qu'elle est générée par un cylindre de fautes de raccordement dont l'énergie de faute liée à γ_0 s'accroît s'il est allongé, et elle est responsable de l'existence des baryons et des mésons, qui sont des structures topologiques localisées et «non colorées» qu'il est possible de former sur la base des quarks. De la sorte, on peut reconstituer toutes les particules du modèle standard, comme par exemple les baryons et les mésons de la figure 13.4, composés des quarks et anti-quarks u, d, s et/ou c.

- *Des champs d'interaction par force faible et par force forte:*

Quant aux champs de force agissant entre les boucles topologiques, ils ont des *explications topologiques simples*:

(i) la force faible est essentiellement due à la diminution de l'énergie de formation d'une boucle de dispiration lorsqu'on associe une boucle de dislocation coin avec une boucle de désinclinaison vis, comme on l'a vu au chapitre 9. C'est la portée très faible du potentiel d'interaction de capture de cette force qui explique alors la désintégration radio-active des particules élémentaires, par le franchissement du potentiel d'interaction par effet tunnel quantique. En fait, *la force faible est une interaction entre la charge de rotation d'une boucle de désinclinaison vis avec la charge de courbure d'une boucle de dislocation coin*.

Et il existe bien des bosons de jauge échangés au cours de l'interaction faible: ce sont les bosons intermédiaires $W^\pm$ et Z^0, qui ont une structure topologique bien définie, reportée dans la figure 13.10.

(ii) la force forte, qui lie deux ou trois quarks ensemble, est due *au cylindre de fautes de raccordement généré par le fait que les boucles de désinclinaison vis associées aux quarks ont des charges* $\boldsymbol{q}_{\lambda BV}$ *qui ne sont que le 1/3 ou les 2/3 de la charge de la boucle de désinclinaison vis parfaite associée à l'électron*. La distance de dissociation entre boucles d'un doublet ou d'un triplet de quarks dépend essentiellement de *l'énergie de fautes de raccordement par unité de surface*. Si cette énergie est très forte, on peut imaginer que les boucles seront très proches, comme on l'a illustré dans les figures de ce chapitre. Mais si cette énergie est faible, on pourrait aussi imaginer des tubes de faute constituant des membranes dont le diamètre (égal au diamètre des boucles topologiques) est beaucoup plus faible que la longueur, de sorte que les singularités topologique en doublet et triplet pourraient alors avoir l'aspect de *«longs brins»* terminés à chaque extrémité par des boucles topologiques.

Et il existe bien des bosons de jauge échangés au cours de l'interaction forte: ce sont les gluons bicolores, qui ont une structure topologique bien définie, reportée dans la figure 13.16.

- Des possibilités de calcul de l'énergie des particules du modèle standard:

Une première conséquence très intéressante de cette explication des particules du modèle standard est liée au fait que, dans le cas des boucles de dispiration et de leurs interactions via les forces faible et forte, les énergies mises en jeu pour la *formation* des multiplets de boucles a une origine connue puisque c'est en fait la somme des diverses énergies suivantes:

(i) les énergies de formation associées aux très fortes distorsions locales du réseau générées par ces objets, et stockées dans le réseau au voisinage de ces objets,

(ii) les énergies de fautes de raccordement (liées à γ_0) et d'empilement (liées à γ_{1a} et γ_{1b}) apparaissant du fait que le réseau cosmologique imaginaire considéré ici est un réseau «colo-

ré» qui doit posséder des propriétés axiales,
(iii) les énergies mises en jeu par *la force faible* dans les couplages gravitationnels entre les boucles de dislocation coin et les boucles de désinclinaison vis, telles que décrites dans le chapitre 9,
(iv) les énergies stockées à plus grande distance, qui sont dues aux distorsions à longue portée du réseau reliées à la charge globale $\boldsymbol{q}_\theta$ de courbure par flexion et à la charge globale $\boldsymbol{q}_\lambda$ de rotation par torsion de multiplets de boucles, qui sont contenues dans les calculs des énergies que nous avons faits dans les chapitres précédents, ainsi que des énergies de vibration propre et de rotation propre des boucles que nous avons obtenus respectivement aux chapitres 11 et 12.

L'énergie totale de formation des multiplets de boucles pourrait donc être calculée de manière rigoureuse, à condition de connaître les propriétés élastiques exactes (les modules K_0, K_1, K_2 et K_3) ainsi que les énergies surfaciques de faute γ_0, γ_{1a} et γ_{1b} du réseau cosmologique dans lequel ces objets apparaissent. Cet aspect énergétique est très important car, dans le cas du modèle standard des particules, l'origine et la valeur de l'énergie des particules élémentaires (leur masse) restent encore très mystérieuses, et sont introduites comme des paramètres du modèle standard, qui doivent être mesurés expérimentalement.

- *De l'«élémentarité» des particules du modèle standard:*

Une autre conséquence intéressante de notre conception du modèle standard est l'existence d'une différence *«d'élémentarité»* entre les boucles topologiques de dispiration de notre réseau cosmologique imaginaire et les leptons et les quarks du modèle standard. En effet, les boucles de dispiration que nous avons décrites, au contraire des leptons et des quarks élémentaires du modèle standard, ne sont pas à proprement parler des particules élémentaires, mais sont déjà des assemblages de boucles de désinclinaison vis et de boucles de dislocation coin lacunaires ou interstitielles.

Pour juger des autres potentialités de cette idée de constitution des particules du modèle standard, il faudrait vérifier si cette approche permettrait de justifier et d'expliquer l'ensemble compliqué de règles de sélection qui a dû être introduit en physique des particules pour décrire toutes les interactions observées expérimentalement. Ceci n'est évidemment qu'une suggestion, et son développement détaillé n'est pas du ressort de ce traité. A noter que d'autres approches similaires de décomposition des particules du modèle standard ont déjà été proposées en physique des particules, mais sous des formes différentes, comme par exemple le modèle basé sur des pré-quarks appelés *«rishons»*. Mais ces modèles se sont montrés infructueux.

- *Du rôle de la charge de courbure dans le modèle standard:*

La charge de courbure $\boldsymbol{q}_\theta$ joue un rôle important dans l'élaboration d'un modèle de «singularités topologiques élémentaires» pour expliquer le modèle standard des particules. On constate assez facilement que cette charge, dont on ne voit à priori pas d'analogie directe dans le modèle standard, satisfait un principe de conservation au cours des interactions entre boucles, aussi bien lors des interactions faibles que lors des interactions fortes.

Mais cette charge a un autre intérêt majeur lié à la nature bosonique ou fermionique des particules. En effet, on constate que *toutes les particules auxquelles est associé une charge de courbure (les leptons, les quarks et les baryons) sont des fermions avec un spin demi-entier, qui satisfont le principe d'exclusion de Pauli*, alors que *toutes les particules qui n'ont pas de charge*

de courbure (les photons, les bosons de jauge, les gluons et les mésons) sont des bosons avec un spin entier, non soumis au principe d'exclusion de Pauli. Il y a très probablement là un rôle crucial joué par la charge de courbure, qui reste à élucider, mais qui n'est pas du ressort de ce traité.

La question est aussi de savoir si la charge q_θ, qui est conservée lors des interactions entre boucles, a une corrélation avec une des grandeurs caractéristiques ou avec une des relations de conservation du modèle standard, telle que la relation de Gell-Mann-Nishijima par exemple. La réponse à cette question pourrait assurément présenter des potentialités très importantes pour la physique des particules, d'autant plus que nous avons déjà maintes fois montré que *c'est la charge de courbure q_θ qui est responsable des faibles asymétrie entre matière et anti-matière*, et conséquemment de l'évolution cosmologique de la matière et de l'anti-matière au sein de l'univers, et de la présence d'une *«masse noire»* sous la forme d'une mer de neutrinos répulsifs entourant les galaxies.

Des questions encore en suspens concernant le modèle du réseau cosmologique «coloré» et son analogie avec le modèle standard

L'analogie développée dans ce chapitre entre les boucles topologiques de dispiration dans un réseau cosmologique cubique imaginaire «coloré» et le modèle standard des particules élémentaires s'avère très fructueuse pour essayer de comprendre certains points encore non éclaircis en physique des particules, comme la nature topologique des particules élémentaires, ainsi que des forces forte et faible, ou bien l'origine de la masse des particules élémentaires.

Mais il existe cependant plusieurs questions encore en suspens, qui mériteraient d'être étudiées en détail, parmi lesquelles les principales sont les suivantes:

- *De l'application du concept de spin:*

Comme nous l'avons déjà évoqué au chapitre 12, la notion de spin semble bien correspondre à une rotation réelle des boucles topologiques. Mais il se pose encore bien des questions qui demanderaient à être étudiées en détail.

La première question est évidemment d'essayer d'imaginer comment une boucle de dislocation coin, et/ou une boucle de désinclinaison vis peuvent tourner sur elle-même dans un réseau cosmologique *CFC* «coloré», sachant de plus qu'il existe un tube de faute d'empilement responsable de la force forte dans le cas des baryons et des mésons. Y a-t-il une explication topologique possible pour un tel mouvement de rotation, ou faut-il alors imaginer un réseau avec des propriétés «encore plus étranges»?

La deuxième question est évidemment liée à la valeur qu'il faut attribuer au spin d'une boucle topologique. Par exemple, pourquoi l'électron, qui correspondrait à un couplage faible entre une boucle de dislocation coin et une boucle de désinclinaison vis, possède un spin 1/2, alors que le boson de jauge $W^{\pm}$, qui correspondrait à une boucle de désinclinaison vis isolée, possède un spin 1? C'est là que la constatation importante que nous avons faite va probablement jouer un rôle essentiel dans l'explication de la valeur du spin d'une particule, à savoir que toutes les particules auxquelles est associé une charge de courbure (les leptons, les quarks et les baryons) sont des fermions avec un spin demi-entier, alors que toutes les particules qui n'ont pas de charge de courbure (les photons, les bosons de jauge, les gluons et les mésons)

sont des bosons avec un spin entier.

La troisième question serait de savoir comment appliquer plus soigneusement le concept de spin développé au chapitre 12 au modèle de réseau cosmologique «coloré» que nous avons décrit dans ce chapitre. La réponse à cette question pourrait permettre de trouver une explication à l'existence de particules composées de mêmes quarks, mais de spin différent, comme les mésons π^+ et ρ^+ composés tous deux des quarks $u\overline{d}$, mais de spins respectifs 0 et 1, ou bien les baryons p (proton) et Δ^+ composés tous deux des quarks uud, mais de spin respectifs valant 1/2 et 3/2. Une telle étude permettrait peut-être aussi d'expliquer l'origine exacte du spin 1/2 des baryons et du spin 1 des mésons, qui est encore un point assez obscur du modèle standard des particules, mais qui pourrait peut-être trouver une explication dans le cas du réseau cosmologique «coloré» en supposant que c'est l'existence ou non d'une charge de courbure qui impose un comportement de boson ou de fermion à une particule donnée.

- *De la théorie de la chromodynamique quantique:*

Il serait évidemment très instructif et intéressant de développer une étude nettement plus fouillée de l'application des calculs *d'équation d'onde*, des concepts *de bosons et de fermions*, du *principe d'exclusion de Pauli* développés au chapitre 11, ainsi que de la notion de spin introduite au chapitre 12, aux singularités topologiques en boucles analogues des particules du modèle standard, et d'essayer de voir si une telle étude ne nous amènerait pas finalement à une explication physique compréhensible de la fameuse théorie de «chromodynamique quantique»?

- *De l'existence de modèles supersymétriques:*

Une étude plus fouillée au sujet de l'existence de la charge de courbure pourrait non seulement (peut-être) expliquer pourquoi il existe dans le modèle standard des *fermions* (particules de spin 1/2 comme les quarks et les leptons) et des *bosons* (particules de spin 1 comme les bosons de jauge intermédiaires et les gluons), mais elle pourrait aussi répondre à la question de savoir si (par hasard) il était possible de créer une zoologie de particules identiques à celles que nous avons obtenues dans ce chapitre, mais dont on intervertirait les spins 1/2 et 1, ce qui pourrait faire apparaître un *«modèle supersymétrique»*. Mais on constate que dans le cadre de notre modèle des particules, il apparaît fort difficile, si ce n'est impossible, d'imaginer de telles particules supersymétriques.

- De l'existence de leptons «exotiques»:

Dans notre description des quarks de la figure 13.24, le fait que les quarks possèdent des charges électriques -1/3 et +2/3 de la charge de l'électron, alors que les anti-quarks possèdent des charges électriques +1/3 et -2/3 de la charge de l'électron s'explique facilement par les *règles de succession des couleurs* des plans corpusculaires que ne vous avons émises. Par contre, pour les leptons que nous avons introduits aux figures 13.22 et 13.23, nous avons choisi *arbitrairement* d'associer au neutrino une charge électrique -1 pour obtenir *l'électron de matière* et d'associer à l'anti-neutrino une charge électrique +1 pour obtenir *le positron d'anti-matière*. Mais en fait les règles de couleur que nous avons introduites n'empêcheraient pas à priori d'associer une charge électrique +1 au neutrino pour obtenir *un positron exotique de matière* et une charge électrique -1 à l'anti-neutrino pour obtenir *un électron exotique d'anti-matière*, comme reporté à la figure 13.18. Il y a là un sujet de réflexion que nous avons déjà abordé en commentant le tableau 13.14, où nous avons proposé que l'électron et le positron pourraient être consi-

dérés comme le résultat de la compression d'assemblages de quarks $d\,d\,d$ et $\overline{d}\,\overline{d}\,\overline{d}$, ce qui expliquerait l'existence des électrons de matière et des positrons d'anti-matière et l'absence des électrons d'anti-matière et des positrons de matière. Mais cette «explication» de pouvoir collapser les assemblages de trois quarks identiques $d\,d\,d$ et $\overline{d}\,\overline{d}\,\overline{d}$ pour former les électrons et les positrons nous a aussi entraîné à nous demander s'il était aussi possible de collapser de la même manière trois quarks identiques $u\,u\,u$ et $\overline{u}\,\overline{u}\,\overline{u}$, pour former des leptons exotiques, à savoir *un lepton positif* e^{++} de spin 1/2 et de charge double et *un anti-lepton négatif* $\overline{e}^{--}$ de spin 1/2 et de charge double. L'existence de ces deux leptons exotiques aurait l'avantage de combler les deux vides laissés dans le tableau 13.14.

Il y a là matière à réfléchir pour confirmer ou infirmer la formation des leptons par collapse de trois quarks identiques.

- *Conclusion:*

Pour conclure cette section, on se doit de constater que notre modèle de réseau cosmologique *CFC* "coloré" soulève encore de nombreuses questions non résolues, et qu'il pourrait donc être à l'origine d'un nouveau domaine de recherche passionnant, surtout si on cherchait à élucider le rôle prépondérant que doit assurément jouer *l'élément nouveau et original de notre approche, à savoir la charge de courbure.*