



HAL
open science

LA THEORIE ELECTROFAIBLE : DECOUVERTE ET PORTEE

Ismaël Omarjee

► **To cite this version:**

Ismaël Omarjee. LA THEORIE ELECTROFAIBLE : DECOUVERTE ET PORTEE : Aperçus historiques et épistémologiques de la démarche de recherche d'Abdus Salam, entre science et foi. 2022. halshs-03600880

HAL Id: halshs-03600880

<https://shs.hal.science/halshs-03600880>

Submitted on 7 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La théorie électrofaible : découverte et portée

Aperçus historiques et épistémologiques de la démarche de recherche d'Abdus Salam,
entre science et foi¹

Ismaël Omarjee

*Docteur en histoire et
philosophie des sciences*

Résumé

A l'instar de l'unification des forces électrique et magnétique, l'unification de forces électromagnétique et faible représente une étape marquante de l'histoire de la physique. Le concept mathématique de symétrie et ses développements en physique quantique, jusqu'au concept de brisure de symétrie, jouent un rôle déterminant dans cette avancée de la connaissance, que façonne, dans la démarche d'un de ses acteurs majeurs : Mohammed Abdus Salam, une réflexion épistémologique adossée à une pensée philosophico-religieuse. Nous retraçons ici les grandes lignes de cette riche aventure et réussite conceptuelle, qui fécondera la recherche en physique et la réflexion philosophique, en prenant pour point d'appui l'œuvre et le rôle de ce savant. Cette découverte représentait, chez lui, une étape vers un objectif ultime : une théorie unitaire des forces fondamentales.

Abstract

The unification of electromagnetic and weak forces constitutes a landmark step in the history of physics, in the manner of the unification of electric and magnetic forces. The mathematical concept of symmetry and its developments in quantum physics - including the concept of symmetry breaking - play a crucial role in this advancement in knowledge. This progress is shaped, in the approach of one of its key figures, Muhammad Abdus Salam, by an epistemological thinking linked with a philosophical and religious thought. Here we describe the outlines of this fruitful enterprise and conceptual success that will enrich research in physics and philosophical thinking, in the light of the work and role of this scholar. This discovery was, for him, a step towards an ultimate goal: an unitary theory of fundamental forces.

¹ Pour une vision plus complète de l'œuvre d'Abdus Salam, nous renvoyons le lecteur à notre ouvrage intitulé : *Abdus Salam : une œuvre entre science et islam*, Paris, l'Harmattan, 2021.

Les moments d'unification en physique représentent des jalons de l'histoire de la pensée. Unifier signifie mettre en évidence un principe unique sous-jacent permettant de saisir l'unité d'un certain nombre de phénomènes d'apparences distinctes. L'unification procure de ce fait une intelligence accrue du monde physique. Elle sert le développement de branches entières de la connaissance.

Mohammed Abdus Salam évoquait dans les dernières années de sa vie, à l'attention d'un large public, les forces fondamentales de la nature et la question de leur unification dans les termes suivants² :

Commençons par décrire des phénomènes que l'on rencontre couramment. D'une part, pour tirer des trains la motrice capte un courant électrique qui fait tourner son moteur. D'autre part, on fait des émissions de radio, on envoie des ondes qui sont captées par un récepteur. Le génie de Maxwell [...] a été de sentir le lien qui existait entre ces deux phénomènes. On l'explique maintenant à partir d'un principe unique. C'est ce type de raisonnement que l'on appelle une unification. Les forces que l'on rencontre dans la nature sont de quatre sortes : gravitationnelles [...], électromagnétiques [...], forces d'interaction faible (responsables de la désintégration des noyaux et de la radioactivité), forces d'interaction forte (les forces nucléaires qui lient les protons et neutrons dans le noyau de l'atome). La question qui se pose est : peut-on toutes les unifier ? C'est le problème de la grande unification.

Abdus Salam ne varia jamais dans l'idée selon laquelle l'unification des forces fondamentales représentait l'avenir de la physique. Les positions de physiciens importants comme Paul Dirac et Wolfgang Pauli, qui n'y croyaient pas, n'entamèrent pas sa conviction. Il poursuivit ce but sur près de quatre décennies. Sa carrière scientifique fut ponctuée et couronnée, en 1979, par le prix Nobel de physique pour ses travaux d'unification de deux forces fondamentales de la nature : la force électromagnétique et la force nucléaire faible³, en une force, dite électrofaible.

L'unification électrofaible se fonde sur des acquis conceptuels qu'il est utile de rappeler pour mieux saisir ce moment de l'histoire de la physique.⁴ En théorie quantique des champs⁵, les interactions fondamentales se ramènent à des champs échangés entre les particules élémentaires, en l'occurrence les fermions⁶.

La théorie quantique des champs

La théorie quantique des champs représente le cadre fondamental de description de la matière et de son comportement. Elle a pour objet d'identifier les constituants élémentaires de la matière et les forces d'interaction, ou champs d'interaction, fondamentales entre ces constituants : forte, faible, électromagnétique. Elle permet d'unifier les processus au sein de chaque interaction fondamentale, d'une part, et d'unifier les interactions fondamentales entre elles (jusqu'à un certain point du moins au regard de la situation théorique), d'autre part.

² Abdus Salam, in *Abdus Salam un physicien. Entretien avec Jacques Vauthier*, Paris, Beauchesne, 1990, p. 24.

³ Les récipiendaires du prix Nobel furent, outre Mohammed Abdus Salam, Steven Weinberg et Sheldon Lee Glashow.

⁴ Pour retracer les grandes lignes de l'histoire de la physique où s'inscrit l'œuvre d'Abdus Salam, nous nous référons en premier lieu à ses écrits, notamment son article récapitulatif d'un point de vue historique, paru en juillet 1980 dans *Reviews of Modern Physics* (Vol. 52, No. 3, July 1980), intitulé : « Gauge unification of fundamental forces », in *Selected papers of Abdus Salam (with commentary)*, p. 306-319, A. Ali, C. Isham, T. Kibble (éditeurs), Riazuddin, 1994. Cet article reprend les termes de sa conférence lors de la remise du prix Nobel 1979. S'agissant de cette période de l'histoire des sciences, le lecteur pourra consulter avec profit le livre de Michel Paty, physicien, historien et philosophe des sciences, intitulé *La physique du XX^e siècle* (EDP Sciences, 2003).

Les notions d'histoire de la physique nécessaires à la compréhension des sujets traités sont expliquées dans des encadrés afin de ne pas alourdir le corps du texte. Des notes de bas de page procurent des précisions supplémentaires, historiques et scientifiques.

⁵ Voir encadré ci-après.

⁶ Les constituants de la matière : électrons, neutrons, protons et quarks, sont des fermions. Un fermion est donc une particule élémentaire ou composite. Le terme « fermion » réfère au physicien Enrico Fermi.

La théorie quantique des champs et ses développements, de l'interaction électromagnétique aux deux autres, découvertes ultérieurement : les interactions forte et faible, procèdent du cadre conceptuel de la mécanique quantique. Les nouveaux principes de la physique constitutifs de cette dernière furent développés durant la période 1920-1927, dans le but de décrire correctement les phénomènes atomiques et subatomiques face aux limites des lois de Newton et de Maxwell.

En théorie quantique des champs, les particules élémentaires sont décrites comme des champs quantiques définis par des grandeurs physiques telles que la masse, le spin⁷, la charge électrique. Les interactions fondamentales entre particules élémentaires y sont aussi décrites au moyen de champs, définis, de même, par des grandeurs, dont la masse, le spin, la charge de leurs quanta, ou bosons d'interaction. Les interactions fondamentales se ramènent à l'échange de ces bosons, dits intermédiaires (par exemple, le boson du champ électromagnétique est le photon). Sur ces bases, l'ensemble des informations concernant une interaction se trouvent encodé dans le « lagrangien de l'interaction », qui se définit comme une fonction (mathématique) des variables dynamiques de celle-ci. Autrement dit, la « fonction lagrangienne » d'un champ d'interaction fondamentale exprime la « dynamique » qui caractérise ce champ⁸. Les propriétés de symétrie y jouent un rôle fondamental.

La portée d'une interaction dépend de la masse de la particule messagère : la portée de la force est d'autant plus grande que la masse de la particule messagère est faible. Une masse nulle signifie une portée infinie. Les symétries de jauge⁹ relatives aux « charges » engendrant ces interactions¹⁰, qui expriment la dynamique des champs correspondants, conduisent à l'introduction de particules messagères, ainsi dénommées « particules de jauge ». Dans le cadre de ces symétries, ces dernières sont de masses nulles et porteuses d'un spin d'une unité. La masse nulle des particules intermédiaires y représente une condition de l'invariance de jauge. Le nombre de celles-ci s'y trouve défini.

Les théories de jauge

En théorie quantique des champs, les interactions entre particules peuvent être décrites en termes de champs de jauge, qui se trouvent fondés sur l'idée de symétrie de jauge.

En mathématique, une symétrie signifie l'invariance de certains objets (figures géométriques, fonctions, ...) sous une transformation, de nature géométrique le plus souvent. Un cercle est invariant par rotation autour de son centre. La rotation est caractérisée, en l'occurrence, par un angle, dont la valeur peut être arbitraire. L'on parle de symétrie continue. Ceci ne vaut pas pour un carré ou un triangle équilatéral, par exemple, moins symétrique qu'un cercle, qui n'est invariant que sous des transformations discrètes : un carré est invariant uniquement sous des rotations d'un multiple de 90° et un triangle équilatéral uniquement sous des rotations d'un multiple de 120°. Dans un espace à deux dimensions, le cercle est la figure la plus géométrique qui soit. Il en est de même pour la sphère dans un espace à trois dimensions.

En physique, mathématisée, l'on considère l'invariance d'objets physiques (particules, forces, lois, ...) par rapport à des transformations physiques exprimées dans une forme géométrique. Les forces fondamentales sont associées à des symétries locales, ou symétries par rapport à des transformations différentes en chaque point de l'espace-temps. Les symétries concernées, les

⁷ To spin signifie tourner sur soi-même, à l'image d'une toupie. Le spin d'une particule renvoie à l'idée d'un mouvement de rotation continue autour d'un axe interne. Il s'agit d'une sorte de moment cinétique intrinsèque (non orbital) caractérisant les particules atomiques et nucléaires. Le « dictionnaire de physique » définit le spin de la manière suivante : « Moment cinétique intrinsèque d'origine quantique, de nature différente du moment cinétique orbital. La valeur S de ce moment cinétique est quantifiée, elle s'écrit nécessairement sous la forme $S = \hbar \sqrt{s(s+1)}$ où \hbar désigne la constante de Planck réduite et s un nombre entier ou demi-entier, nommé nombre quantique de spin. On utilise souvent s pour désigner le spin, en parlant par exemple d'une particule de spin $\frac{1}{2}$ lorsque $s = \frac{1}{2}$. » (Richard Taïllet, Loïc Villain, Pascal Febvre, de boeck, *Dictionnaire de physique*, 3ème édition, Bruxelles, 2013, p. 638).

⁸ Michel Paty précise : « L'une des directions privilégiées de l'élaboration d'une dynamique des systèmes quantiques fut la théorie quantique des champs, dont les premières approches furent proposées dès la fin des années 1920, par Dirac, Oskar Klein (1894-1977), Jordan, Eugene Wigner (1902-1995) et d'autres. » (*La physique du XX^e siècle*, op. cit., p. 34)

⁹ Voir encadré ci-après.

¹⁰ Charge électrique, saveurs, couleurs (notions traitées plus bas), pour, respectivement, les champs électrique, faible et fort.

symétries de jauge, s'expriment comme des invariances sous des transformations faisant appel à une géométrie élargie à des espaces abstraits. Chaque théorie à invariance locale de jauge se fonde sur une symétrie de jauge particulière. De la mathématique à la physique, la notion de symétrie se conçoit par celle d'invariance.

Selon le principe d'invariance locale de jauge, les interactions fondamentales sont invariantes sous l'effet d'opérations de symétrie effectuées sur les champs permettant de les décrire. En d'autres termes, une théorie de jauge est telle si son lagrangien est invariant sous les transformations d'un groupe de symétrie agissant localement sur les champs quantiques.

Le champ des possibles était largement ouvert quant à la forme à donner aux forces fondamentales. Le problème a pu être abordé de manière efficace sur la base du travail des mathématiciens, qui ont établi, dans le cadre de la théorie dite des groupes, une classification de ces symétries. En effet, cette théorie est l'outil mathématique permettant de décrire une symétrie en physique. Par distinction avec la théorie des groupes dits discrets, la théorie des groupes dits continus, développée par Sophus Lie à la fin du XIX^{ème} siècle, fut d'un emploi systématique en physique quantique.

Les équations fondamentales de l'électromagnétisme satisfont une symétrie de jauge dénommée U(1). L'électrodynamique requiert une seule particule messagère, sans masse, de l'interaction : le photon. Cette masse nulle signifie une portée infinie de la force électromagnétique. Le photon est électriquement neutre. La parité¹¹ est conservée dans les processus électromagnétiques.

Parité

Selon la loi de conservation de la parité, si un processus survient dans la nature avec une certaine probabilité, son « image miroir » survient aussi, avec une probabilité égale. L'expression « image miroir » signifie que les quantités se rapportant au processus sont inversées : la gauche devient la droite, le haut devient le bas, un objet se mouvant dans une direction se meut dans la direction opposée avec la même vitesse, ... Plus précisément, la parité est un opérateur quantique de symétrie spatiale en miroir qui agit sur les états des particules.

Les physiciens Chen Ning Yang et Tsung Dao Lee avancèrent, en 1956, sur la base d'expériences, l'hypothèse inédite de « la non-conservation de la parité », selon laquelle le principe de symétrie droite-gauche se trouvait violé dans certains processus gouvernés par la force faible, en l'occurrence la désintégration β .

La force faible semble, en apparence, très différente de la force électromagnétique, puisque dix mille fois plus faible en puissance et de très courte portée, de l'ordre de 10^{-16} cm. Par ailleurs, les particules soumises à la force faible sont celles qui se trouvent en rotation dans l'état d'hélicité¹² gauche. Abdus Salam écrit¹³ : « Le problème majeur était que la force faible était de nature purement gauche, alors que la force électromagnétique était à la fois gauche et droite. »

Hélicité

Abdus Salam explique¹⁴ :

L'hélicité ou « chiralité » [handedness en anglais] est [...] la composante du spin de la particule sur la direction de son mouvement. Les seules valeurs que l'hélicité puisse prendre

¹¹ Sur le concept de parité, voir encadré ci-après. Ce concept se relie à celui d'hélicité (voir encadré suivant).

¹² On dit que l'hélicité est droite si elle est positive et gauche si elle est négative. L'hélicité gauche signifie un spin opposé au mouvement.

¹³ Abdus Salam, « L'unification des interactions fondamentales », in Abdus Salam, Heisenberg W., Dirac P.A.M., *La Grande Unification. Vers une théorie des forces fondamentales*, Paris, Seuil, 1991, p. 46.

¹⁴ *La Grande Unification, op. cit.*, p. 34-35.

sont $0, \pm 1/2, \pm 1, \pm 3/2, \pm 2 \dots$ (en unité de \hbar , la constante de Planck). Les spins correspondants sont $0, \hbar/2, \hbar, 3\hbar/2, 2\hbar \dots$

D'où vient le spin ? Dirac répond : de l'unification de la relativité restreinte [...] avec la mécanique quantique ! L'équation de Dirac ne décrit que des objets de spin $\hbar/2$ (avec [...] deux hélicités, $1/2$ et $-1/2$). On peut les imaginer comme des toupies en rotation – soit dans le sens des aiguilles d'une montre (objet droit) autour de la direction de leur mouvement, soit dans le sens inverse (objet gauche). Ce mouvement de rotation, le « spin », avec sa grandeur correcte et ses deux hélicités, émerge de façon naturelle de l'équation de Dirac [...] et c'est l'un des triomphes de cette équation.

Le deuxième point à souligner à propos de l'équation de Dirac est qu'elle prédit que chaque particule a une anti-particule – avec la même masse, le même spin et une charge électrique opposée (si la particule a une charge). De plus une particule et son antiparticule peuvent s'annihiler mutuellement, le surplus d'énergie est alors converti en photons (rayons γ).

Il fut parmi les premiers à réaliser, à la fin des années 50, que la symétrie de jauge non-abélienne¹⁵, SU(2), était susceptible de se trouver en rapport avec la force faible et l'unification de celle-ci et de la force électromagnétique. SU(2) requiert trois particules messagères dénuées de masse. Trois particules messagères de la force faible furent donc postulées, deux électriquement chargées et une neutre¹⁶ : W^+ , W^- , W_0 . Cependant les messagères sans masse signifient des forces de portée infinie, alors que la force faible est de très faible portée, signifiant des bosons dotés de masse. Le problème consistant à générer des masses pour les particules messagères en préservant la symétrie de jauge des équations fondamentales ne sera résolu qu'en 1967.

Groupes abéliens et non-abéliens

En matière de théorie des groupes de transformation, le qualificatif d'« abélien », du nom du mathématicien norvégien Niels Abel (1802-1829), signifie la propriété de commutation au sein de l'algèbre du groupe. Les groupes caractérisés par une algèbre non-commutative sont qualifiés de « non-abéliens ». L'invariance de jauge non-abélienne, qui sera découverte ultérieurement, représente une généralisation des symétries de jauge¹⁷. Abdus Salam précisera :

Pour généraliser les forces de jauge, il faut introduire la théorie mathématique des symétries de Lie qui correspondent à des rotations dans l'espace « interne ». L'électromagnétisme est fondé sur U(1), la plus simple des symétries « de Lie ». En utilisant d'autres symétries, on peut obtenir d'autres théories de jauge plus élaborées. [...] au lieu d'un seul messenger de jauge (par exemple le photon de l'électromagnétisme), il peut y avoir plusieurs messagers de jauge de masses égales rassemblés dans un multiplet ([...] ou famille de particules quantiques). La taille du multiplet dépend de la taille de la « représentation singulière » de la symétrie de Lie concernée. Il ne peut y avoir qu'un messenger pour U(1), trois pour SU(2), huit pour SU(3), etc. Un autre point important est que les messagers doivent avoir des masses nulles¹⁸.

La symétrie unitaire réfère à l'invariance des équations fondamentales pour une interaction, sous un ensemble infini de transformations. La lettre U dans U(1) ou dans SU(2), etc, signifie unitaire tandis que la lettre S signifie « spécial » pour indiquer une condition additionnelle. Par conséquent, SU(2) signifie le groupe de transformation spécial unitaire en deux dimensions, etc.

¹⁵ Voir encadré ci-après.

¹⁶ Le terme W_0 apparaît par exemple dans l'article d'Abdus Salam et John Ward, de 1964 : « Electromagnetic and weak interactions », *Physics Letters*, Vol. 13, n° 2, 15 novembre 1964.

¹⁷ Observons ici qu'Abdus Salam dirigea l'importante thèse de Ronald Shaw, soutenue en septembre 1955, qui contenait le concept d'« invariance de jauge non-abélienne ». Il était donc très tôt au fait des idées à ce sujet.

¹⁸ *La Grande Unification*, op. cit., p. 43-44.

Dans l'article susmentionné, publié en 1964¹⁹, Abdus Salam et Ward introduisirent une particule lourde, Z^0 , sorte de « photon lourd », et en considérant le troisième membre, électriquement neutre, du triplet de messagers de jauge de la force faible comme un mélange du photon et de Z^0 , ont montré comment rendre compte de la parité en conservant le comportement de la force faible. Z^0 rend compte de l'hélicité gauche relative à la force faible. Mais le problème de la génération des masses des particules W, au nombre de deux, et de Z^0 , demeurait. Glashow avait réalisé la combinaison du photon et de Z^0 dans un article de 1961, dont Abdus Salam et Ward n'étaient pas informés. La même chose fut faite par Weinberg en 1967, qui ignorait aussi l'article de Glashow. Mêler les messagers des deux forces était devenu une nécessité afin de se débarrasser des incohérences et des infinis, et d'aboutir à une version « renormalisable » de la théorie. « Pourquoi cette rage d'unifier ? » lance Abdus Salam, lorsqu'il relate cette étape de la recherche dans son texte intitulé « L'unification des interactions fondamentales »²⁰. Il répond : « Nous voulions satisfaire à la première exigence de Dirac : la théorie devait être exempte d'incohérences et d'infinis »²¹.

Dans le mécanisme de brisure spontanée de symétrie, développé durant la période 1961-64, les équations fondamentales de la théorie continuent à satisfaire les conditions de la symétrie de jauge, mais l'état correspondant à la plus faible énergie possible viole la symétrie, tel que le montrèrent Yoichiro Nambu et Jeffrey Goldstone dans des articles importants, en 1961. L'idée sera ensuite explorée de manière plus poussée par Goldstone, Abdus Salam et Weinberg. Un article co-écrit par ces derniers, publié dans la *Physical Review* le 1^{er} août 1962²², s'intitule « Broken Symmetries ». Il débute ainsi :

In the past few years several authors²³ have developed an idea which might offer hope of understanding the broken symmetries that seem to be characteristic of elementary particle physics. Perhaps the fundamental Lagrangian is invariant under all symmetries, but the vacuum state is not.

L'introduction de l'article s'achève de la manière suivante :

Here again²⁴ there appeared a spinless particle of zero mass. Goldstone was led to conjecture that this will always happen whenever a continuous symmetry group leaves the Lagrangian but not the vacuum invariant.

We will present here three proofs of this result. The first uses perturbation theory ; the other two are much more general.

En 1964, Peter Higgs, de l'Université d'Edimbourg, fut en mesure de montrer comment, en se servant d'une astuce mathématique, l'on pouvait utiliser la brisure « spontanée » de symétrie²⁵ pour générer les masses non nulles de particules messagères, par interaction avec un champ scalaire hypothétique²⁶. François Englert et Robert Brout arrivèrent au même résultat indépendamment, presque au même moment²⁷. Ils n'appliquèrent cependant pas cette découverte à la théorie électrofaible. L'hypothèse que cela puisse concerner toutes les forces de courte portée, c'est-à-dire les forces nucléaires forte et faible, allait venir naturellement puisqu'une force de courte portée nécessite une particule messagère de masse non nulle.²⁸

¹⁹ « Electromagnetic and weak interactions », *op. cit.*

²⁰ *La Grande Unification, op. cit.*, p. 47.

²¹ Ibid.

²² Article reçu par la revue le 16 mars 1962 (*The Physical Review*, Vol. 127, No. 3, 965-970, 1^{er} Août 1962).

²³ Sont mentionnés ensuite dans l'article Nambu et Goldstone.

²⁴ « à nouveau », sachant que le travail de Nambu, procurant le même résultat, est évoqué juste avant celui de Goldstone, dans l'introduction.

²⁵ Cf. encadré, ci-après.

²⁶ Un champ scalaire est doté d'un quantum d'échange de spin nul.

²⁷ Le mécanisme dit de « Higgs » est aussi connu sous le nom de « mécanisme BEH », initiales des trois codécouvreurs, plus juste du point de vue historique.

²⁸ A l'*Imperial College*, Tom Kibble généralisa le mécanisme de Higgs pour tenir compte des conditions de la théorie de la relativité, et exposa ses recherches à Abdus Salam. Il est intéressant de rappeler, à titre d'anecdote historique, que Glashow et Higgs étaient présents à l'université d'été qui se tenait en Ecosse en 1961. Glashow travaillait alors sur l'unification et Higgs sur la brisure spontanée de symétrie.

Brisure spontanée de symétrie

Abdus Salam explique²⁹ :

il fallait comprendre dans quel environnement la symétrie se brisait spontanément. Les grandes masses du Z et des W devaient provenir d'une transition de phase semblable à celle qui se produit entre la glace et l'eau à une température critique de 0°C. Une pellicule d'eau présente des symétries que les cristaux de glace ne partagent pas. En dessous de 0°C, la symétrie est brisée – au-dessus [...] la symétrie est restaurée [...]

En physique des particules, on peut obtenir une telle transition de phase si l'on suppose l'existence de nouvelles particules de spin 0 (qui ne sont pas des particules de jauge) – connues sous le nom de « bosons de Higgs ».

Il procure une autre image pour illustrer le phénomène de brisure de symétrie³⁰ :

Une barre aimantée, comme chacun sait, a un pôle nord et un pôle sud, chacun des pôles étant situé à une extrémité de la barre. Si vous exposez votre barre à une chaleur intense, elle perd ses propriétés d'aimant : il n'y a plus de pôles, elle est totalement symétrique. Mais la température baisse, elle se remagnétise spontanément et recouvre ses deux pôles. On dit que la symétrie est brisée spontanément ou est cachée.

Dans le mécanisme de brisure « spontanée » de symétrie, les équations fondamentales du mouvement sont inchangées (autrement dit, le Lagrangien est invariant) par les transformations de jauge auxquelles elles sont soumises. Mais l'état de vide (« vacuum state »), l'état de plus faible énergie possible, est modifié par les transformations. Les équations du mouvement sont donc invariantes sous les transformations mais l'état de vide ne l'est pas. Si les équations du mouvement et l'état de vide étaient tous deux invariants, alors les particules messagères seraient nécessairement sans masse. Autrement dit, les symétries brisées sont basées sur la non-invariance du vide. Le mécanisme précité se trouve expliqué par un nouveau champ : le champ de Higgs. Le quantum de ce champ est une particule de spin nul (qui n'est pas une particule de jauge), dont la masse n'était pas fixée par la théorie. L'on savait simplement que le « boson de Higgs » devait avoir une masse inférieure à 1 000 GeV/c². Cela rendit la recherche de la particule de Higgs très difficile. Après des recherches qui durèrent près de trois décennies, la particule de Higgs fut mise en évidence au Grand Collisionneur d'Hadrons (LHC) du CERN (Centre Européen pour la Recherche Nucléaire). Sa découverte y fut annoncée le 4 juillet 2012, avec une masse de 126 GeV i.e. il est d'environ 134 fois plus lourd que le proton. La particule de Higgs est aussi connue sous le nom de « particule de Dieu », en raison de sa nature insaisissable et de sa fonction clé, explicative de la masse des particules messagères, par conséquent de la portée de la force qu'elles produisent.

Au début des années 60, avec la découverte d'un grand nombre de particules hadroniques et les développements cruciaux qui intervinrent autour de la symétrie unitaire SU(3), instrument de classification des hadrons, ce furent les particules soumises à l'interaction forte qui représentaient le principal objet d'attention des physiciens. Le succès de la prédiction d'Oméga moins, Ω^- , baryon supplémentaire dont l'existence fut avancée à partir de la classification SU(3) des hadrons, renforça l'attention portée à cette interaction, et, par conséquent, aux quarks. Celle-ci apparaissait séduisante du fait de la mise en évidence, via l'utilisation de rayons de particules sélectionnés, d'espèces subnucléaires exotiques permettant de remplir les familles de SU(3). L'interaction nucléaire faible semblait moins intéressante. A la suite de l'épisode de violation de la parité, en 1956, elle n'avait plus fait l'objet des grands titres³¹.

²⁹ La Grande Unification, op. cit., p. 47-48.

³⁰ Abdus Salam un physicien, op. cit., p. 23.

³¹ Abdus Salam déclare à ce propos :

Au début des années soixante, un groupe important de théoriciens commença à douter de la théorie quantique des champs et à dire que des idées totalement nouvelles devaient être cherchées. Ainsi Geoffrey Chew pensait que la théorie des champs était morte et qu'il fallait la remplacer par des relations de dispersion. (Abdus Salam un physicien, op. cit., p. 25)

Les atomes liés ensemble par l'électromagnétisme pouvaient perdre des électrons. La force faible, qui opère profondément dans les atomes, à l'intérieur des noyaux, libère des particules β , des électrons. Les mêmes particules, les électrons, émergent de deux mondes différents. Cela suscitait et entretenait naturellement la question du lien entre électromagnétisme et force faible.

Weinberg et Abdus Salam arrivèrent³² indépendamment à la conclusion suivante : la symétrie de jauge relative à la force électrofaible était $SU(2)_L \times U(1)$, où L signifie état d'hélicité gauche. Dans ce modèle, le photon n'est pas directement identifié comme le messager U(1). Ce dernier était interprété comme étant une particule dénommée B. Le B et le W_0 ne sont pas observés dans la nature. Le photon et le Z^0 se concevaient comme des entités physiquement observables de ces particules inobservables : mélange électrofaible.

Les calculs effectués sur la base du mécanisme de brisure spontanée de cette symétrie de jauge conduisirent à une prédiction concernant les masses des particules W^+ , W^- et Z^0 . Les deux particules W sont de charges opposées, tout en ayant une masse identique. Weinberg avait montré que la théorie prédisait que leur masse était environ 80 fois celle du proton. La masse de la particule électriquement neutre Z^0 était évaluée à environ 90 fois celle du proton. En outre, l'existence de Z^0 impliquait l'existence de processus, non observés, de courant neutre, signifiant que lorsqu'une particule émet ou absorbe un Z^0 , sa charge ne change pas.

Symétrie et brisure de symétrie - Unification électrofaible et cosmologie primordiale

Abdus Salam résumera le phénomène de transition de phase, entraînant l'état de symétrie brisée spontanément, et les prédictions associées, de la manière suivante³³ :

En physique des particules, on peut obtenir une telle transition de phase si l'on suppose l'existence de nouvelles particules de spin 0 (qui ne sont pas des particules de jauge) – connues sous le nom de « bosons de Higgs ». Notre proposition prévoyait précisément d'ajouter un doublet de Higgs (H^+ , H^0) et son antidoublet (H^- , H^0), soit quatre particules d'hélicité nulle. Avant la transition de phase, les W, le Z et le g étaient sans masse. Après [...], lors de la brisure spontanée de symétrie, le photon restait sans masse, mais les bosons W^+ et W^- et le boson Z^0 devenaient massifs : les W^+ et W^- en s'incorporant les particules de Higgs chargées, le boson Z^0 en avalant la combinaison ($H^+ + H^0$) des bosons de Higgs neutres, laissant l'autre, ($H^0 - H^0$), survivre comme un objet indépendant, susceptible d'être découvert expérimentalement. C'est le processus que nous venons de décrire qui donnait des nombres [...] comme 87 masses du proton pour la masse des bosons W^+ et W^- et 97 pour celle du Z^0 . (L'émergence de ces masses non nulles pour les W et le Z est la conséquence essentielle de la brisure « spontanée » de la symétrie.)

Le nombre total de degrés de liberté du système constitué par les W, Z et bosons de Higgs restait le même avant et après la transition de phase. Avant la transition, les W^+ et W^- et le Z^0 étaient sans masse et n'avaient chacun que deux états d'hélicité (± 1), et les quatre Higgs correspondaient à quatre états d'hélicité nulle, si bien que l'on arrivait à un total de $6 + 4 = 10$ degrés de liberté. Après [...] (à température plus basse), les W et le Z, devenus massifs, avaient chacun trois états d'hélicité (1, 0, -1), et le Higgs neutre survivant, un seul (soit encore $3 \times 3 + 1 = 10$). La température critique à laquelle devait se produire la transition de phase électrofaible s'avérait être de 300 masses du proton³⁴. Cette valeur résultait de notre volonté d'unifier l'électromagnétisme avec les forces faibles. D'après les travaux de Friedmann, l'univers passait [...] par cette température quelque 10^{-12} seconde après le « Hot Bang ».

Avant [...] la transition de phase [...] ([...] quand la température était supérieure à 300 masses du proton), il n'y avait qu'une force électrofaible unique. Immédiatement après, elle se

³² Tel qu'indiqué ci-avant.

³³ *La Grande Unification, op. cit.*, p. 48-50.

³⁴ Abdus Salam précise ici :

J'utilise un système d'unités où les températures sont mesurées en unités de masse. Si j'utilisais des degrés, une masse du proton serait équivalente à 10^{13} °C. Ainsi la température critique (de 300 masses du proton) est d'environ 3×10^{15} °C. La symétrie est restaurée et les W^+ et W^- ainsi que le Z^0 deviennent sans masse à des températures supérieures, c'est-à-dire avant que l'univers ne soit parvenu à l'âge respectable de 10^{-12} seconde.

séparait en deux forces distinctes, l'électromagnétisme et la force nucléaire faible – tandis que les bosons W^+ , W^- et Z^0 acquéraient des masses.

La physique des particules rejoignait donc la cosmologie primordiale, sur laquelle avait travaillé Alexandre Friedmann (auquel fait référence Abdus Salam) dans le cadre de la théorie de la relativité générale, puis Georges Lemaître. Ce dernier écrivit l'article, fondamental, du 9 mai 1931, intitulé « L'origine du monde du point de vue de la théorie quantique »³⁵, « charte »³⁶ de la théorie dite « du Big Bang ».

Abdus Salam déclare, s'agissant de la relation entre physique des particules et cosmologie primordiale, de la rencontre féconde de ces deux domaines de la physique³⁷ :

Un [...] domaine où la physique des particules nous a fourni des données d'importance est la cosmologie primordiale ; c'est si vrai que cosmologie primordiale est [...] devenue synonyme de physique des particules. [...] les transitions de phase qui séparent une ère cosmologique de la suivante sont aussi les mécanismes qui convertissent la force unifiée ultime en deux forces (gravitationnelle et électro nucléaire), puis trois (électrofaible, nucléaire forte, gravitationnelle), au fur et à mesure que la température de l'univers décroît. Ces transitions se produisent à des températures élevées (de 300 jusqu'à 10^{20} fois la masse du proton) [...] il est peu probable que des températures supérieures à 10^6 fois la masse du proton soient jamais atteintes avec des accélérateurs [...]. Cette situation rend l'univers et la cosmologie primordiaux passionnants pour les physiciens expérimentateurs des particules car ils fournissent les seuls laboratoires capables, au moins indirectement, de tester nos théories (en détectant des reliques d'ères plus anciennes qui auraient survécu jusqu'à nos jours)

La théorie électrofaible fut présentée en 1967-68 mais passa inaperçue. Aucun article ne mentionna les travaux de Weinberg et d'Abdus Salam trois années durant. Peter Higgs n'avait pas non plus noté l'article important de Weinberg réalisant l'unification électrofaible. Cela s'expliquait en partie par l'expression mathématique de la théorie, qui n'était ni simple, ni esthétique, en décalage avec la conviction partagée par les plus grands physiciens et largement admise selon laquelle les critères de simplicité et de beauté devaient s'appliquer en matière de lois physiques. Tom Kibble, se rappelait, dans les termes suivants, de ses premières impressions à la lecture de l'article de Weinberg en 1967 : « C'était très intrigant qu'on puisse réaliser quelque chose de ce genre. Ce fut une théorie si extraordinairement ad hoc et repoussante qu'elle en venait à représenter clairement un non-sens ». Weinberg lui-même employa l'expression « repoussante » pour sa théorie en 1971³⁸. Cependant, derrière cet aspect apparemment repoussant se cache la beauté d'une symétrie plus profonde, dirait Abdus Salam³⁹. Il allait ainsi au bout de sa logique. Il avait eu raison d'y croire dans sa démarche d'intelligence, malgré les « apparences ».

Les événements, en l'occurrence les travaux et expériences ultérieurs, allaient conforter et confirmer la théorie, et contribuer à asseoir le concept de symétrie comme concept clé de la physique théorique. François Englert écrira s'agissant de la portée de l'intelligence de l'univers en termes de symétrie et de brisure de symétrie⁴⁰ : « tous les objets connus, du niveau subnucléaire aux galaxies, paraissent obéir

³⁵ *Nature*, vol. 127, 9 mai 1931, p. 706.

³⁶ Selon la formule de Jean-Pierre Luminet (*Alexandre Friedmann, Georges Lemaître, Essais de cosmologie*, précédé de « L'invention du Big Bang » par Jean-Pierre Luminet. Textes choisis, présentés, traduits du russe et de l'anglais et annotés par J.-P. Luminet et A. Grib. Editions du Seuil. 1997. p.66). Partant de l'idée d'un univers en expansion, à partir de ses recherches menées sur la base de la physique relativiste, Lemaître, faisant appel aux principes de la thermodynamique et à la « théorie des quanta », domaine alors émergent de la physique, aboutissait à l'hypothèse, traduite dans l'article de mai 1931, d'un début de l'univers dans l'infime, en l'occurrence dénommé « quantum originel » ou encore « atome unique ». L'apport théorique de Lemaître ouvrit la voie de la cosmologie primordiale à la physique des particules. George Gamow fut un acteur important de ce domaine de recherche. La théorie du Big Bang se trouvera confirmée, en 1965, grâce à la détection, par Arno Penzias et Robert Wilson, du rayonnement fossile de l'Univers. La physique quantique, domaine dès lors bien constitué et établi, offrait la possibilité d'appréhender d'un point de vue théorique les interactions fondamentales, par conséquent d'approcher la question des origines cosmologiques, autrement dit de progresser dans la connaissance de l'Univers, de son histoire. A cet égard, la théorie électrofaible représente une étape de l'histoire de la physique et de la pensée.

³⁷ *La Grande Unification*, op. cit., p.66.

³⁸ Mujahid Kamran, *The Inspiring life of Abdus Salam*, University of the Punjab, Lahore, 2013, p. 156.

³⁹ Nous référons ici aux aspects épistémologiques et philosophiques de la pensée d'Abdus Salam, autour de l'idée de symétrie, évoqués plus bas.

⁴⁰ François Englert, « Brisure spontanée de symétrie et unité des lois de la nature », in *Symétrie et brisure de symétrie*, Edité par Gilles Cohen-Tannoudji et Yves Sacquin, EDP Sciences, Les Ulis, 1999.

aux lois physiques connues. Cet état de la connaissance, sans précédent dans toute l'histoire de l'humanité, repose sur la notion de brisure spontanée de symétrie. »

La « lecture de l'organisation de la nature » par Abdus Salam⁴¹, sa réflexion sur le concept de symétrie, axe constant de ses recherches, se trouve enrichie au fil de son cheminement scientifique. Il déclare, par exemple, en lien avec le phénomène de brisure de symétrie, en l'illustrant par un raisonnement appliqué à une barre aimantée⁴² :

quand l'aimant refroidit, sa magnétisation réapparaît spontanément et il retrouve un pôle Nord et un pôle Sud. On dit que la symétrie est brisée spontanément, ou qu'elle est cachée. Elle est apparente quand la barre est chauffée au rouge, et reste dissimulée quand l'aimant est froid. Techniquement, on appelle l'état où le magnétisme se manifeste, l'état ordonné, ou l'état de symétrie spontanément brisée. Il nous fallait, nous physiciens des particules, apprendre combien l'opposition entre ordre⁴³ et symétrie est importante pour l'unification de jauge entre forces de courte et longue portée.⁴⁴

Le terme « cachée » est intéressant à noter d'un point de vue philosophique : sous-jacente, déterminante, présente. Elle ne disparaît aucunement à l'occasion de sa « brisure ». La symétrie ne saurait être « brisée », car sinon la nature ne serait pas telle. Elle se révèle fondatrice de niveaux de réalités subséquents, émergents, manifestant la richesse de ses potentialités. La symétrie, source de beauté et d'harmonie, ne signifie pas, intrinsèquement, l'ordre. Mais il ne saurait y avoir d'ordre, ici associé à la brisure de symétrie, sans une symétrie fondamentale, d'où celle-ci émerge. En ce sens, la brisure de symétrie est une dimension de la beauté caractérisant la nature, révélant une profonde harmonie et unité, objet de la quête scientifique. Cette dernière conduit jusqu'à un niveau antérieur, originel, intégré, unifié de la réalité. L'ordre, qui provient de l'unité, des « racines » du réel, du ciel, entraîne, ramène vers celles-ci, vers la recherche des fondements de la physique et de la nature. La beauté révèle une beauté plus profonde, inobservable.

La théorie était donc loin d'être repoussante dans la pensée pluridimensionnelle d'Abdus Salam. Elle signifiait d'ores et déjà la beauté de la réalité physique. Elle n'allait pas tarder à mieux la refléter dans sa formulation même.

La raison majeure de la lente reconnaissance de la théorie était liée à la question de sa renormalisabilité. Tant Abdus Salam que Weinberg avaient avancé que la théorie était probablement renormalisable : elle apporterait des réponses finies si elle était résolue avec exactitude. En 1971, un jeune étudiant néerlandais, Gerard 't Hooft, prouva que la théorie était renormalisable⁴⁵. L'attitude générale changea alors vis-à-vis de la théorie électrofaible, qui ne fut plus considérée comme obscure ou repoussante, et les expérimentateurs s'en saisirent. Abdus Salam écrit dans son article⁴⁶ : « Selon la

⁴¹ Il déclarait à Jacques Vauthier :

La lecture de l'organisation de la nature m'a toujours fasciné : mettre en ordre des faits expérimentaux disparates d'une façon économique et élégante, grâce au langage mathématique et à sa logique. (Abdus Salam un physicien, op. cit., p. 12)

⁴² *La Grande Unification, op. cit., p. 47-48.*

⁴³ Abdus Salam ajoute ici la note de bas de page suivante :

Ordonner consiste à choisir entre plusieurs états symétriques possibles. L'exemple le plus simple d'une symétrie opposée à un ordre est celui d'une table de banquet circulaire

Soit plus précisément en anglais, et dans la version intégrale :

Order is the act of choice among possible symmetrical states. The simplest example of symmetry versus order is a circular dining table, in a country where dining manners have not been standardised. The table is laid out, with a napkin and a piece of bread for each guest in a symmetrical fashion.

The guests sit down, from the corner of their eyes they glance at their neighbours, trying to decide which napkin to choose – the one symmetrically placed on their right or their left. Suddenly one bold spirit makes his (her) choice and instantly [...] an ORDER is established around the table.

In a gauge field theory, order – the state when W^+ , W^- and Z^0 acquire masses – comes to be established through the postulation of Higgs particles with specified parameters of their mutual interactions. (Unification of Fundamental Forces, Cambridge University Press, 1990, p. 48)

⁴⁴ Selon la formulation originale, en anglais :

Technically one calls a state when magnetism is manifest the state of order or the state of spontaneously broken symmetry. We particle physicists had to learn the importance of order versus symmetry so far as gauge unification of short-range and long-range forces are concerned. (Unification of Fundamental Forces, op. cit., p. 47-48)

⁴⁵ Vingt ans plutôt, Abdus Salam, au même âge que 't Hooft, avait accompli pour la théorie du méson ce que 't Hooft accomplissait pour la théorie électrofaible.

⁴⁶ "Gauge unification of fundamental forces", *op. cit.*, p. 310.

phrase éloquente de Coleman : « le travail de 't Hooft transforma la grenouille de Weinberg-Salam en un prince enchanté » ».

Abdus Salam résume le cheminement vers la théorie électrofaible⁴⁷ :

La succession des idées [...] était [...] la suivante. On part de deux messagers, W^+ et W^- , qui doivent avoir un spin 1 d'après les expériences de violation de la parité suggérées par Lee et Yang. Si ces messagers sont des messagers de jauge, il faut en postuler un troisième, analogue au photon, le Z^0 . Ce Z^0 donne naissance à des forces faibles nouvelles. Ces quatre particules, le W^+ , le W^- , le Z^0 et le photon, sont, à ce stade, sans masse. Pour donner des masses aux messagers de jauge (le W^+ , le W^- et le Z^0), [...] en préservant la théorie de l'irruption d'infinis et d'incohérences [...], ces masses doivent apparaître au cours d'une transition de phase. Celle-ci se produirait vers une température de 300 masses du proton, tôt dans la vie de l'univers. Après cette transition de phase, le photon γ et son nouveau frère le Z^0 se retrouvent inextricablement mélangés. Pour que cette transition de phase puisse avoir lieu, il faut disposer au départ d'un doublet et d'un antidoublet de particules de spin nul, dites « de Higgs » (qui ne sont pas des messagers de jauge).

Aspects épistémologiques de l'idée de symétrie chez Abdus Salam : suite

La leçon inaugurale d'Abdus Salam à l'*Imperial College*, à l'occasion de sa nomination à la chaire de physique théorique, au début de l'année 1957, comportait, à la suite d'un résumé de la situation à propos des particules élémentaires et des problèmes qu'il restait à résoudre, la déclaration suivante : « Ô combien notre génération a-t-elle été privilégiée du fait de s'être trouvée confrontée à ce fascinant défi... paver la voie à la découverte d'une harmonie interne, d'une profonde symétrie située au cœur du monde physique, que nous découvrirons »⁴⁸.

Un article publié en 1961, écrit par Abdus Salam et Ward, intitulé : « On a Gauge Theory of Elementary Interactions »⁴⁹, situait leurs travaux de l'époque⁵⁰ dans une quête plus vaste. L'objet de l'article était alors extrêmement ambitieux, et signifiait l'ampleur de leur programme de recherche :

Notre postulat de base est qu'il doit être possible de générer des termes d'interaction forte, faible et électromagnétique (avec toutes leurs propriétés correctes de symétrie et aussi des indications sur leurs forces relatives), en faisant des transformations de jauge locales sur les termes d'énergie cinétique dans le Lagrangien pour toutes les particules. C'est l'affirmation d'un idéal qui n'est, dans cet article du moins, que très partiellement réalisé.

L'idée « d'une harmonie interne, d'une profonde symétrie située au cœur du monde physique, que nous découvrirons », que fécondent les avancées dans le domaine des symétries de jauge, l'amène à envisager l'unification théorique. Arianna Borrelli commente le passage précité de l'article de Ward et Abdus Salam en insistant sur la réalité de cette dimension esthétique dans les recherches qu'ils menèrent, et que ce dernier poursuivit⁵¹ :

Eventually, Ward abandoned the project, but Salam kept on working on it. In reporting his and Ward's results he explicitly linked them to aesthetic intuition : « We [Ward and Salam] are greatly struck by the sheer beauty of the gauge [symmetry] way of generating interaction. »⁵² He also stated that determining the form of the interaction by imposing local gauge invariance meant that the forces arose « naturally »⁵³.

La fécondité épistémologique de la pensée d'Abdus Salam représente une dimension de l'importance de son œuvre. Arianna Borrelli l'évoque⁵⁴ :

⁴⁷ *La Grande Unification, op. cit.*, p. 50.

⁴⁸ Gordon Fraser, *Cosmic Anger, Abdus Salam – The First Muslim Nobel Scientist*, Oxford University Press, 2008, p. 139.

⁴⁹ Article publié le 1er janvier 1961 par la revue *Il Nuovo Cimento*, Série X, Vol. 19, p. 165-170 (reçu le 15 septembre 1960).

⁵⁰ Le résumé figurant en tête de l'article était le suivant : « A theory of strong as well as weak interactions is proposed using the idea of having only such interactions which arise from generalized gauge transformations. »

⁵¹ A. Borrelli, *Ann. Phys.* (Berlin) 2018, 530, page 3 (sur 5).

⁵² A. Salam, *Review of Modern Physics* 1961, 33, 426.

⁵³ *Ibid.*

⁵⁴ A. Borrelli, *Ann. Phys.* (Berlin) 2018, 530, page 4 (sur 5).

The beauty of symmetry started being praised in the 1960s, and in the following decades references to beauty and naturalness would become mainstream in research writings. Salam's reference to the beauty of gauge symmetries was an early expression of this trend

Pour ces raisons, nous ne souscrivons pas à l'idée de Tom Kibble, scindant et hiérarchisant les aspects de la pensée du chercheur, qui s'avère de nature unitaire dans le champ scientifique, dans la continuité de la nature de l'ensemble de son œuvre⁵⁵ :

Salam lui-même avait apporté de nombreuses contributions importantes à l'étude de ces symétries, mais je crois qu'elles ne constituaient pas vraiment son sujet de prédilection. Son objectif réel était de découvrir la théorie ultime décrivant les interactions faible, électromagnétique et forte, et même la gravitation – dans ce que nous appellerions maintenant une théorie universelle.

En termes épistémologique et historique, il est nécessaire de souligner la présence, au fondement de son orientation d'esprit et de recherche, de la pensée religieuse, de la foi du croyant, que rejoint, et qui appuie, celle du physicien⁵⁶ :

J'ai toujours été fasciné par la symétrie et l'harmonie du monde. Ceci peut venir de l'Islam car, dans l'Islam, on contemple l'univers créé par Dieu avec des idées de beauté, de symétrie, d'harmonie. Le Coran insiste beaucoup sur les lois de la nature.⁵⁷

et⁵⁸

Dans le Saint Livre de L'Islam, Allah dit : « Vous ne voyez rien dans la création du Très Miséricordieux qui ne soit parfait. Tournez votre regard, voyez-vous quelque défaut ? Puis, tournez votre regard, encore et encore. [...] »⁵⁹

Ceci est en fait la foi de tous les physiciens, [...] qui nous motive et nous aide. Plus profondément nous cherchons, plus notre étonnement est grand, plus notre regard est ébloui.⁶⁰

Et encore

Le fait que nous cherchions une unité à travers les forces apparemment disparates de la nature représente une partie de notre foi comme physiciens et de la mienne comme musulman. Et d'être ainsi gratifié de la compréhension d'une partie du dessein de Dieu représente une grâce et un privilège pour lesquels je suis humblement reconnaissant à Allah.

« Ceci est la grâce de Dieu. Il l'accorde à qui Il veut et Dieu est plein de grâce, immense. »⁶¹

La confirmation expérimentale de l'unification électrofaible

La théorie électrofaible n'allait cesser de rencontrer d'éclatants succès. L'observation de l'existence de courants neutres, prédiction de la théorie, en représenta le premier. Dans les processus impliquant la force nucléaire faible connus jusqu'en 1973, lorsqu'un neutrino ou un antineutrino interagit avec un proton ou un neutron, il altère leur charge électrique : un proton se transforme en neutron ou inversement. Et le neutrino ou l'antineutrino se transforme, dans les mêmes processus, en particule électriquement chargée : l'électron ou le muon ou leur antiparticule. Cette transformation du neutrino en particule électriquement chargée caractérise les processus dits de courant chargé. La question était dès lors de savoir si un neutrino pouvait ou non interagir sans être altéré. A la différence de la théorie de la force faible de Fermi, la théorie de Glashow-Salam-Weinberg permettait la non altération, autrement dit les processus de courant neutre, en raison de l'existence de Z^0 , les deux autres particules messagères, W^+ et W^- , étant responsables des processus de courant chargé. Abdus Salam explique⁶² :

⁵⁵ Tom Kibble, « La genèse des théories de jauge unifiées », Courrier CERN, juin 1993.

⁵⁶ Sur la pensée et l'œuvre (pluridimensionnelles) d'Abdus Salam, voir notre ouvrage *Abdus Salam : une œuvre entre science et islam*, op. cit.

⁵⁷ Abdus Salam un physicien, op. cit., p. 12.

⁵⁸ Ibid., p. 31-33.

⁵⁹ Ce passage réfère aux versets 3 et 4 de la sourate 67 du Coran.

⁶⁰ Cette partie de la traduction réfère à une version plus complète de l'idée, figurant dans l'ouvrage *Renaissance of sciences in islamic countries*, op. cit., p. 16.

⁶¹ Mohammed Abdus Salam, « Renaissance of sciences in Arab and islamic lands », in *Renaissance of sciences in Islamic countries*, Edité par H.R. Dalafi and M.H.A. Hassan (International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy) ; World Scientific Publishing, 1994, p. 16. Le passage coranique cité l'est en arabe dans le texte.

⁶² *La Grande Unification*, op. cit., p. 50.

Nous avons prédit un nouveau type de particule messagère, le Z^0 , sans charge électrique, qui était responsable d'une nouvelle force faible. Précisément à cause de cette neutralité électrique, lors d'une interaction par échange d'un Z^0 , les particules devaient être identiques dans les états initial et final.

En 1973, les expériences menées dans l'accélérateur de particules du CERN confirmèrent l'existence des processus de courant neutre.

D'autres expériences permirent de tester des implications de la théorie, et la confirmer. Des mesures effectuées au *Stanford Linear Accelerator Centre* (SLAC) en 1978, afin de mettre en lumière l'interférence Z^0 -photon, s'avèrent conformes aux prédictions. Elles conduisirent, l'année suivante, à l'octroi du Prix Nobel de physique aux trois théoriciens de l'unification électrofaible⁶³.

En 1980, Abdus Salam présentait la situation expérimentale de la manière suivante⁶⁴ :

(4) En ce qui concerne l'électrofaible $SU(2) \times U(1)$, [...] les expérimentations connues, [...] menées sur les phénomènes faibles et électromagnétiques en dessous de 100 GeV confirment la théorie qui contient le paramètre théoriquement non déterminé $\sin^2 \theta = 0,230 \pm 0,009$ [...]. Les valeurs prédites des masses de bosons de jauge associés (W^\pm et Z^0) sont :

$$m_w \approx 77 - 84 \text{ GeV},$$

$$m_z \approx 89 - 95 \text{ GeV}, \text{ si } 0,25 \geq \sin^2 \theta \geq 0,21.$$

(5) Peut-être la mesure la plus remarquable en physique électrofaible est-elle celle du paramètre $\rho = (m_w/m_z \cos \theta)^2$. Il a été [...] déterminé comme le rapport de sections efficaces de courants neutres sur leurs analogues chargés. La valeur prédite $\rho = 1$ des iso-doublets de Higgs faibles est à comparer avec la valeur expérimentale $\rho = 1.00 \pm 0.02$.

(6) Pourquoi la nature favorise-t-elle, dans la théorie $SU(2) \times U(1)$, la proposition la plus simple selon laquelle les scalaires de Higgs sont des iso-doublets ? N'y a-t-il qu'un Higgs physique ? De quelle masse ?

L'existence de trois messagers, ou bosons intermédiaires, lourds de la force électrofaible, chargés (W^+ et W^-) et neutre (Z^0), dont les masses avaient été calculées, représentait la prédiction la plus frappante de la théorie. En 1979, leur existence apparaissait comme évidente aux physiciens. Ils furent détectés et identifiés quelques années plus tard, en 1983, par leurs désintégrations lors d'interactions de particules à très haute énergie, au sein de l'anneau de collisions protons-antiprotons du CERN. Les deux bosons chargés furent identifiés tout d'abord à partir de désintégrations caractéristiques : $W^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e (\bar{\nu}_e)$. L'identification du boson neutre intervint peu après à partir de sa désintégration caractéristique : $Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$. Les masses prédites étaient conformes aux valeurs obtenues. Les expériences furent menées dans le cadre d'une collaboration internationale dirigée par Carlo Rubbia. Ce dernier obtint, avec Simon van der Meer, le Prix Nobel en 1984⁶⁵.

L'unification électrofaible au-delà des leptons

L'unification électrofaible, développée durant la période 1960-70, s'appliquait uniquement aux leptons⁶⁶. Cependant, la majeure partie de la matière visible dans l'Univers est composée de hadrons, soumis tant à la force nucléaire forte qu'à la force nucléaire faible⁶⁷.

L'incorporation des hadrons dans le schéma de l'unification électrofaible dut attendre le travail de Sheldon Glashow, Jean Iliopoulos et Luciano Maiani en 1970, peu avant l'apport de Gerard 't Hooft

⁶³ C'est en 1978, à l'occasion d'un congrès international de physique à Tokyo, intitulé « Unification et Idées Nouvelles », qu'Abdus Salam prononça, pour la première fois en public, le terme « électrofaible ».

⁶⁴ "Gauge unification of fundamental forces", p. 312, 1^{ère} colonne, *op.cit.* (traduction dans *Abdus Salam un physicien, op. cit.*, p. 120).

⁶⁵ La découverte fut considérée comme équivalente à celle des ondes électromagnétiques (par Hertz, en 1888) prédites par Maxwell comme une conséquence de l'unification des forces électrique et magnétique. Par analogie, fut évoquée la notion d'ondes électrofaibles, dont l'énergie est transmise par les trois messagers précités.

⁶⁶ Parmi les leptons, les neutrinos ne sont sensibles qu'aux interactions faibles, alors que les autres leptons (électron, muon et tauon), particules chargées, sont sujets aux interactions électromagnétiques et faibles. D'une manière générale, le terme lepton désigne les fermions élémentaires sensibles à l'interaction faible mais pas à l'interaction forte.

⁶⁷ C'est, rappelons-le, par les hadrons, à travers la désintégration β , dans laquelle les neutrons et les protons échangent les rôles, que la force faible fut reconnue.

prouvant la renormalisabilité de la théorie. Le mécanisme GIM⁶⁸ fut avancé sur la base des progrès réalisés dans la connaissance de la structure interne des hadrons⁶⁹.

En 1964, Murray Gell-Mann, et George Zweig⁷⁰ indépendamment, avaient avancé l'idée que les hadrons étaient composés de trois types d'entités élémentaires, ou quarks, définies par leur nombre quantique caractéristique (saveur) : up, down et strange⁷¹. Grâce à ces entités, il serait possible d'expliquer les propriétés de tous les hadrons connus⁷².

Dans un article publié en 1964, Sheldon Lee Glashow et James Bjorken avancèrent l'existence d'un quatrième quark. Leur motivation était avant tout esthétique : si les quarks et les leptons sont les entités fondamentales de la nature, il devrait y avoir parallélisme entre eux. Le nombre de leptons étant de quatre⁷³, il devait en être de même des quarks. Les auteurs nommèrent le quatrième quark « charmed », « charmé », ou c. Ultérieurement, le mécanisme GIM faisait ressortir l'existence de ce quatrième quark comme « indispensable à la résolution naturelle du dilemme posé par l'absence de courants violant l'étrangeté »⁷⁴, indique Abdus Salam. L'idée d'égalité des leptons et des quarks s'avéra cruciale au sens où elle permit de résoudre le problème des incohérences affectant le modèle électrofaible proposé pour les leptons et les quarks.

En novembre 1974, de nouveaux hadrons comprenant le quark c prédit étaient observés⁷⁵. Le scénario relatif à l'extension du modèle électrofaible était à cette date le suivant. Les quatre leptons et les quatre quarks identifiés sont tous des particules-points, c'est-à-dire sans substructure. Tous les quarks et les leptons peuvent interagir de manière électrofaible. Leurs interactions électrofaibles obéissent à la symétrie de jauge précédemment exposée : $SU(2)_L \times U(1)$, signifiant que les quarks et les leptons vont par paires, au nombre de deux dans chaque cas, W^+ , W^- , Z^0 et le photon étant les messagers électrofaibles. Cela demandait que le nombre de paires de leptons soit égal au nombre de paires de quarks. Avec la découverte du quatrième quark, la théorie électrofaible parvenait à un stade ultérieur de son histoire, marqué de cohérence logique.

L'évolution des connaissances amènera le nombre de paires de leptons à trois, avec la découverte deux leptons supplémentaire, dénommés tau (τ) et neutrino de tau (ν_τ), et le nombre de paires de quarks à trois également, avec la découverte de deux quarks supplémentaires, de saveurs b (bottom ou fond) et t (top ou dessus)⁷⁶. La cohérence de la physique se manifestait à nouveau, au fil de ses prédictions. Dès lors, la seule pièce manquante de la théorie était la particule de Higgs. En permettant de rendre les particules massives, elle apparaît comme la clé de voûte du modèle standard de la physique des particules.

Au bout de la vingtaine d'années ayant vu l'émergence de $SU(2) \times U(1)$, qu'il s'attache à décrire dans le cadre de son article de 1980, Abdus Salam résume l'état des fruits récoltés de la recherche, à l'aide d'une table des entités élémentaires de la matière :

⁶⁸ Initiales des trois noms. Le mécanisme est évoqué ci-après.

⁶⁹ A la différence des hadrons, les leptons ne sont pas dotés de structure interne (du moins en l'état actuel des connaissances) : ce sont des éléments simples ne révélant pas de substructure ou d'extension spatiale. En ce sens, ce sont des particules proprement élémentaires.

⁷⁰ Le texte de Zweig, qui fit l'objet d'un prêtirage, ne fut pas publié, mais demeura une référence.

⁷¹ Les quarks sont nommés par des symboles correspondant aux premières lettres de leur nom : u pour up (ou « haut »), d pour down (ou « bas »), s pour strange (ou « étrange »).

⁷² Particules désormais définies comme formées de trois quarks (pour les baryons), ou d'un quark et d'un antiquark (pour les mésons), c'est-à-dire composites.

⁷³ Les quatre leptons connus étaient l'électron, le muon, et deux types de neutrino : neutrino d'électron (ν_e , ou neutrino de Pauli) et neutrino de muon (ν_μ).

⁷⁴ « Gauge unification of fundamental forces », *op. cit.*, p. 310. Autrement dit, le mécanisme permet d'expliquer l'absence de courants neutres hadroniques (avec changement d'étrangeté). Il se trouvera appuyé par la découverte du quark c.

⁷⁵ La découverte de ce quark est connue comme la « Révolution de Novembre » en physique des particules.

⁷⁶ Le quark b sera identifié et ajouté à la table des hadrons en 1980, et le quark top au milieu des années 90.

1/ Au niveau des énergies explorées, nous croyons que les ensembles suivants de particules sont « sans structure » (dans un sens de théorie des champs) et [...] constituent les entités élémentaires avec lesquelles tous les autres objets sont faits.

<i>SU_c(3)-triplets</i>						
<i>Family I quarks</i>	<i>u_R</i>	<i>u_Y</i>	<i>u_B</i>	<i>leptons</i>	<i>ν_e</i>	<i>SU(2)-doublet</i>
	<i>d_R</i>	<i>d_Y</i>	<i>d_B</i>		<i>e</i>	
<i>Family II quarks</i>	<i>c_R</i>	<i>c_Y</i>	<i>c_B</i>	<i>leptons</i>	<i>ν_μ</i>	<i>SU(2)-doublet</i>
	<i>s_R</i>	<i>s_Y</i>	<i>s_B</i>		<i>μ</i>	
<i>Family III quarks</i>	<i>t_R</i>	<i>t_Y</i>	<i>t_B</i>	<i>leptons</i>	<i>ν_τ</i>	<i>SU(2)-doublet</i>
	<i>b_R</i>	<i>b_Y</i>	<i>b_B</i>		<i>τ</i>	

*Avec leurs antiparticules, chaque famille est constituée de 15 ou 16 fermions à deux composantes [...] ⁷⁷. La troisième famille demeure conjecturale car le quark top (*t_R, t_Y, t_B*) n'a pas encore été découvert ⁷⁸. Est-ce que cette famille suit [...] le même modèle que les deux autres ? Y-a-t-il un nombre plus grand de familles ? Le fait que les familles soient les répliques les unes des autres signifie-t-il que la nature ait découvert une stabilité dynamique à travers un système de 15 (ou 16) objets, et que, de ce fait, il y ait une strate plus fondamentale de structure en-dessous ?*

2 / [...] les quarks se présentent sous trois couleurs : Rouge (R), Jaune (Y) et Bleue (B) ⁷⁹. En parallèle à la théorie électrofaible SU(2) × U(1), une théorie de champ de jauge SU_c(3) ⁸⁰ d'interactions fortes de quarks (chromodynamique quantique, QCD) est apparue, permettant de mesurer les trois couleurs. La découverte indirecte des huit bosons de jauge associés à la QCD (les gluons) a déjà été soumise par les groupes au DESY ⁸¹.

Il est intéressant de noter que la mention de la double émergence de la théorie électrofaible et de la chromodynamique quantique ⁸², fait l'objet d'une note de bas de page où Abdus Salam rapporte l'idée suivante, datant de 1963, de Res Jost :

« A mon avis, le trait le plus marquant de la physique théorique des trente-six dernières années réside dans le fait qu'aucune idée théorique de nature fondamentale n'a été un succès. Les notions de théorie quantique relativiste [...] se sont révélées, dans chaque cas, plus fortes que les idées révolutionnaires [...] d'un grand nombre de physiciens talentueux. Nous vivons dans une maison délabrée et nous paraissions incapables d'en sortir. Cette maison ne se distingue guère d'une prison. » - Res Jost (1963), « In Praise of Quantum Field Theory » (Siena European Conference).

La pensée de Jost précède de quelques années les avancées décisives qui se préparaient déjà, à, dans, l'ombre... de la recherche fondamentale, en termes d'intelligence des forces fondamentales de la nature, jusqu'à l'unification, accomplissement de ample portée, philosophique comme scientifique. Jost n'imaginait pas non plus une autre avancée majeure, qui allait bientôt dominer un autre champ de la

⁷⁷ Abdus Salam ajoute ici : « le nombre de fermions dépend de l'existence d'une masse pour le neutrino ».

⁷⁸ Prédit, il sera découvert une quinzaine d'années après cette assertion.

⁷⁹ R pour red, y pour yellow et b pour blue.

⁸⁰ C pour couleur. Voir ci-après pour plus de précisions sur SU_c(3) et la charge de couleur.

⁸¹ Centre de recherche en physique des particules situé en Allemagne. L'existence des gluons y a été mise en évidence, en 1979, sur le collisionneur électron-positron de 19 GeV PETRA.

⁸² Abdus Salam précise, s'agissant de l'évolution des idées en physique :

Parallèlement à la force « électrofaible », [...] la force nucléaire forte révélait aussi, peu à peu, ses aspects de jauge, utilisant elle aussi comme médiateurs des messagers de spin 1 (appelés gluons), de sorte que l'on a été conduit à croire de plus en plus à la validité de l'idée de jauge. (La Grande Unification, op. cit., p.56)

recherche en physique théorique, et dont les graines avaient été semées quelques décennies plus tôt. Cette « révolution scientifique » s'affirma avec force à l'occasion d'une éclatante confirmation observationnelle⁸³. Elle imprima alors une inflexion à l'histoire de la pensée, en raison du changement qu'elle provoqua dans la représentation que l'humanité se faisait du cosmos. Ce fut l'ère de la théorie du Big Bang⁸⁴. Les deux grands domaines de la physique : la physique relativiste et la physique quantique, allaient dès lors opérer une forme de jonction, aux frontières premières de l'Univers, au service d'une connaissance accrue de celui-ci.

Fécondité de l'unification électrofaible

Au succès expérimental de la théorie électrofaible s'ajoutait donc sa fécondité théorique, dont certains aspects sont mentionnés ci-avant. Michel Paty l'évoque de la manière suivante⁸⁵ :

Marquant un « retour en force » de la théorie quantique des champs, le grand succès de la théorie électrofaible ne pouvait qu'encourager les tentatives de traiter d'une manière plus ou moins semblable le champ des interactions fortes et de tenter de trouver une perspective unifiée sur l'ensemble des champs électrofaible et fort.

Partant de la réduction des hadrons aux quarks, il ajoute ⁸⁶:

Cette représentation des hadrons (comme étant constitués physiquement de quarks, liés entre eux par des gluons) ouvrit une voie simplifiée pour formuler une théorie du champ d'interaction forte⁸⁷. Il faut revenir en arrière [...] (avant les derniers développements indiqués sur les quarks) pour comprendre comment s'est développée l'approche théorique des champs fondamentaux, longtemps considérée comme impossible. La première circonstance décisive fut la formulation, en 1967-68 par Abdus Salam et Steven Weinberg, d'une théorie du « champ d'interaction électrofaible unifié ».

Paty explique, au plan conceptuel⁸⁸ :

Avec les quarks comme source du champ de couleur, et les gluons comme quanta du champ échangés entre les quarks pris deux à deux, on disposait [...] de tous les ingrédients pour traiter l'interaction forte fondamentale par la théorie quantique des champs de jauge non-abélien⁸⁹, portant sur la charge de couleur. (L'interaction forte est indifférente à la saveur, dans la mesure où elle conserve la symétrie SU_6 de cette dernière, ce qu'elle fait à 20% près.) La couleur définit aussi, quant à elle, un groupe de symétrie dit « de la couleur » et dénoté $SU_c(3)$.

Il poursuit⁹⁰ :

A partir de 1974, une théorie quantique du champ d'interactions fortes put [...] être constituée [...] en considérant les interactions entre quarks comme étant les processus élémentaires de transport du champ. Ce dernier fut abordé, comme le champ électrofaible, à partir des symétries de jauge non-abéliennes. Au lieu de porter sur les saveurs des quarks, comme [...] pour le champ électrofaible, ces symétries portent sur une autre qualification des quarks (découverte entre-temps) leur « charge forte » dénommée « couleur ». La théorie du champ d'interaction forte fut en conséquence appelée la chromodynamique quantique (selon une analogie [...] avec l'électrodynamique quantique). Le nombre quantique de « couleur » avait été formulé en 1964, en relation au modèle des quarks pour constituer les hadrons : il était apparu nécessaire de doter les quarks d'un « degré de liberté » supplémentaire à côté de la saveur pour rendre compte le plus simplement possible des arrangements de quarks dans les hadrons.

En 1999, Gerard 't Hooft et Martinus Veltman partagèrent le Prix Nobel de Physique « pour avoir élucidé la structure quantique des interactions électrofaibles en physique ». Leur travail couronnait la

⁸³ Mentionnée plus haut.

⁸⁴ Ce sujet est traité en détail dans notre ouvrage intitulé : *Aspects de la relation entre science de l'univers et spiritualité dans l'histoire de la pensée : Isaac Newton et Georges Lemaitre. La quête de la vérité*, ANRT, Villeneuve d'Ascq, 2012.

⁸⁵ *La physique du XX^e siècle*, op. cit., p.119.

⁸⁶ Ibid., p. 112-113.

⁸⁷ Ou chromodynamique quantique.

⁸⁸ Ibid., p. 121.

⁸⁹ Michel Paty ajoute ici en note de bas de page :

Les bosons d'échange transportent la charge de couleur, et leurs opérateurs de champ de jauge sont non-commutatifs : la symétrie de jauge correspondante est « non-abélienne ».

⁹⁰ Ibid., p. 119.

renaissance de la théorie des champs, qui passa, au cours des années 70, de l'ombre à la lumière, en pénétrant de nombreux domaines de la science, de la physique des particules élémentaires à la cosmologie. Pour Veltman cependant, ce qu'Abdus Salam et Weinberg avait fait demeurait repoussant. Il déclara en 1992, lors d'une rencontre d'histoire de la physique, que si quelqu'un lui avait alors parlé (en 1971) du prix Nobel 1979, il aurait rigolé⁹¹.

Michel Paty intègre les résultats obtenus à partir du boson Z^0 aux aspects de la fécondité scientifique de la théorie électrofaible⁹²:

Le boson Z^0 constitue, par les déterminations très précises qu'il rend possible sur de multiples processus, un véritable laboratoire de physique des particules élémentaires. Des résultats importants ont ainsi été obtenus : limitation à trois des neutrinos et donc des familles de leptons, connaissance des particules comportant un quark lourd ; d'autres sont espérés, sur le boson de Higgs, par exemple.

Paty écrivait cela en 2003. La détection et l'identification du boson dit de Higgs intervint une dizaine d'années plus tard.

La vingtaine d'années allant de la fin des années 50 à la fin des années 70 fut la période d'émergence, et de confirmation, de la théorie $SU(2) \times U(1)$, à partir d'un double développement : celui de la théorie de jauge des interactions fondamentales, liées aux symétries internes, et celui de la brisure spontanée de ces symétries, résume Abdus Salam⁹³. Mais la théorie était-elle complètement satisfaisante ? Le travail n'était pas terminé pour le théoricien. Il lui apparaissait nécessaire d'étendre la théorie⁹⁴ :

Pourquoi faut-il étendre la théorie ? se demande Abdus Salam. [...] parce que [...] cette théorie contient au moins 18 paramètres indépendants et qui doivent être déterminés par l'expérience. Ce n'est pas satisfaisant pour une théorie fondamentale qui devrait prédire naturellement tous ces nombres à partir d'une seule masse fondamentale (disons la masse de Planck) – l'unique paramètre libre qui déterminerait la taille de notre univers et tout ce qu'il contient.

L'ambitieux programme de recherche d'Abdus Salam, tel que retracé dans l'article rédigé en 1960, « On a gauge theory of elementary interactions », se trouvait conforté et encouragé par les avancées ultérieures, auxquelles ses recherches, et celles d'autres scientifiques, contribuèrent.

La fécondité scientifique de cette période de l'histoire de la physique du XX^{ème} siècle se trouve accompagnée d'un enrichissement remarquable de la pensée philosophique et épistémologique. Chez le savant musulman, l'esprit et la pensée scientifique revêtent une dimension humaine supplémentaire, en permettant de cultiver le sentiment religieux.

Il est intéressant d'observer, au plan des aspects philosophico-religieux de la pensée d'Abdus Salam, que le texte scientifique où il relate « L'unification des interactions fondamentales » se termine par le verset coranique suivant, encourageant, dans la continuité du premier verset⁹⁵ et commandement coranique : « Lis », et de l'idée d'une parole-science divine inépuisable, à une étude sans fin et sans bornes d'une création de toute beauté et richesse⁹⁶:

En vous quittant, j'aimerais que ces dernières réflexions résonnent en écho des mots de l'un des plus grands livres de l'humanité :

*« Si tous les arbres étaient des roseaux et la mer un encrier,
avec sept mers encore pour l'emplier,
les paroles de Dieu ne s'épuiseraient pas.
Dieu est certainement tout-puissant et sage. »*

*(Coran XXXI, 27)*⁹⁷

⁹¹ *Cosmic Anger, op. cit.*, p. 228.

⁹² *La physique du XX^e siècle, op. cit.*, p. 119.

⁹³ "Gauge unification of fundamental forces", *op. cit.*, p. 311.

⁹⁴ *La Grande Unification, op. cit.*, p. 54.

⁹⁵ Selon l'ordre chronologique.

⁹⁶ *La Grande Unification, op. cit.*, p. 72.

⁹⁷ Ce passage coranique est mentionné en arabe à la suite de sa mention en anglais dans le texte d'Abdus Salam. Plus généralement, ses textes, en physique ou en d'autres matières, comportent parfois, outre des traductions de versets (en anglais), leur mention en langue originale : la langue coranique revêt une haute valeur symbolique chez le religieux.

Le succès de l'unification des forces électromagnétique et nucléaire faible amena Abdus Salam, dans la continuité d'une idée de l'univers conçue sur la base de la cosmologie relativiste, celle d'un moment où, aux origines de l'espace-temps, toutes les forces fondamentales se trouvaient unifiées, à proposer l'idée d'une théorie totalement unificatrice, « théorie de tout », « véritable fossile théorique du Big Bang »⁹⁸ :

*La tentative, si elle doit aboutir, représentera pour nous la « théorie de tout », c'est-à-dire la grande unification. Ce qui nous fait penser à cela, c'est la situation qui existait au début de l'Univers. Tout était unifié au départ avant de se déployer. Il y a donc vraisemblablement une unification, un trait d'union possible, véritable fossile théorique du Big Bang.*⁹⁹

La « grande unification des forces électrofaible et forte » représentait la première étape dans cette direction, et l'unification de la gravitation et des forces électronucléaires l'étape ultérieure et ultime, avance-t-il.

L'état atteint de connaissance relatif aux trois champs fondamentaux subnucléaires suggérait que ceux-ci ne seraient, aux énergies présentes, que les manifestations distinctes, en raison de ruptures de symétrie caractérisant l'évolution de l'Univers, d'un champ unifié, encore plus « profond ». C'est donc l'idée d'invariance ou de symétrie qui appelle celle d'unification, comme le montrent de manière éloquente les développements ayant conduit aux théories invariantes de jauge des champs fondamentaux de la matière, électrofaible et de chromodynamique, fait remarquer Michel Paty, en précisant : « Une part importante de la physique fondamentale, celle qui est la plus mathématisée, semble se diriger ainsi vers une *théorie unitaire*. »¹⁰⁰ L'alliance de la physique et de la mathématique, en et à travers leurs développements historiques respectifs, conduit à l'idée d'unité, profonde et originelle.

Le physicien Tom Kibble déclarait en 1993, confirmant la pérennité et faisant part de l'ampleur du but poursuivi par Abdus Salam, situé au-delà de l'unification électronucléaire¹⁰¹ :

Son but réel était de trouver la théorie ultime qui décrirait les interactions faible, électromagnétique et forte, et même la gravité – ce que nous appellerions maintenant la théorie de tout...

Salam, naturellement, poursuivit vers une unification plus poussée, par exemple dans son travail sur l'unification lepton-hadron avec Pati, sur la supersymétrie et les superchamps avec Strathdee et sur la théorie de Kaluza-Klein. Je pourrais en mentionner d'autres.

⁹⁸ *Abdus Salam un physicien, op. cit.*, p.82.

⁹⁹ Rappelons ici, sous un angle analogique, le verset coranique selon lequel « les cieux et la terre » n'étaient pas séparés à l'origine : « [...] les cieux et la terre étaient compacts, alors Nous les avons séparés et Nous avons Formé à partir d'eau toute chose vivante [...] » (sourate 21, verset 30). Le Coran mentionne là, au-delà de toute science physique, l'idée de non séparation originelle des éléments, et d'un déploiement de création. Ce verset ramène à la réflexion suivante de Abdus Salam : « le Saint Coran me parle en ce qu'il encourage la réflexion sur les lois de la nature, avec des exemples tirés de la cosmologie, de la physique, de la biologie [...] comme signes pour [...] les hommes ».

¹⁰⁰ Sur ces aspects, cf. *La physique du XX^e siècle, op. cit.*, p. 123 et p. 260.

¹⁰¹ *The inspiring life of Abdus Salam, op. cit.*, p. 167-168.