

Le **BOSON de Brout-Englert-Higgs** est-il ...

UN Z SANS SPIN ?

Pierre FAYET

Académie des Sciences, Paris, 23 septembre 2014

il faudrait déjà savoir ce qu'est

un **BOSON de HIGGS**

spin 0

particule associée, notamment, à l'origine des masses

et à la brisure de la symétrie électrofaible

un **Z** ...

et

médiateur neutre de l'interaction faible

spin 1

responsable des diffusions de neutrinos par la matière, $\nu + p \rightarrow \nu + X \dots$

observées au CERN en 1973

Z se couple au “*courant neutre faible*”

(comme le photon au courant électromagnétique)

découverte du **Z** en 1983 (masse $91 \text{ GeV}/c^2$)

DEUX SORTES DE PARTICULES ...

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Bosons :} \quad \text{particules de spin entier, } 0, 1, 2, \dots, \text{ en unité } \hbar \\ \text{Fermions :} \quad \text{particules de spin demi-entier, } \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots, \text{ en unité } \hbar \end{array} \right.$$

Pour les particules fondamentales :

médiateurs des interactions

Bosons de spin 1 :

$W^+, W^-, Z, \text{ photon, gluons}$

(pas de boson de spin 0 pour le moment ...)

“constituants de la matière”

(au sens large)

 lectron, ..., neutrinos, quarks (\rightarrow proton = uud , neutron = ddu)

Fermions de spin $\frac{1}{2}$:

$$\begin{array}{ccc} \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \end{array}$$

Les **BOSONS** ...

(spin entier, 0, 1, 2, ..., en unité \hbar)

spin 1	{	Z : <u>médiateur neutre de l'interaction faible</u> $m_Z \simeq \underline{\underline{91 \text{ GeV}/c^2}}$
		W^+, W^- : médiateurs chargés de l'interaction faible $m_W \simeq 80 \text{ GeV}/c^2$
		photon (γ) : médiateur (neutre) de l'int. électromagnétique $m_\gamma = 0$

et le mécanisme de BROUT-ENGLERT-HIGGS

(1964)

Un électron dans un champ électromagnétique acquiert une énergie électrostatique $E = qV$

Il peut aussi **interagir avec un champ de spin 0 ϕ**

et **acquérir une masse $m_e = \lambda_e \phi$** (Weinberg, 1967)

(le champ ϕ étant ici supposé uniforme dans tout l'espace)

ondes \rightarrow **quanta** associés à ce champ =

BOSONS "de HIGGS" de spin 0

Un NOUVEAU BOSON ...

Comme chacun sait

Le **LHC** du CERN a découvert en **2012** **une nouvelle particule**

depuis longtemps activement recherchée – car nécessaire à la cohérence de la théorie

de masse \simeq **125** GeV/c²

Elle se désintègre en $\gamma\gamma$, WW^ , ZZ^* , $b\bar{b}$, $\tau^+\tau^-$, ...*

C'est un **BOSON**, presque sûrement de spin 0 (*plutôt que 2*)

que l'on pense être le (ou un)

Boson de Brout-Englert-Higgs

associé à la brisure spontanée de la symétrie électrofaible $SU(2) \times U(1)$

et à **l'origine des masses** (m_W , m_Z , m_e , ...)

Le boson de Brout-Englert-Higgs est la dernière pièce manquante du

MODÈLE STANDARD *de la physique des particules*

après les découvertes

des **courants faibles neutres** (1973)

du **quark charmé c** (1974-76)

des **gluons** (1979)

des bosons intermédiaires **W^\pm** et **Z** (1983)

et du **quark top t** (1995)

* * *

*Obtient-on alors, avec un **boson “de Higgs”** (2012)
et un Modèle Standard qui serait finalement complet,
une description satisfaisante de la physique des particules ?*

LE MODÈLE STANDARD

interactions fortes, électromagnétiques et faibles des quarks et leptons

$$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

bosons de jauge (spin 1) : gluons, W^+ , W^- , Z , photon

fermions (spin- $\frac{1}{2}$) : quarks, leptons

+ 1 boson de Brout-Englert-Higgs de spin 0

associé à la brisure spontanée de la symétrie électrofaible et à l'origine des masses

potentiel en "chapeau mexicain" ...

- *succès remarquables*
- *mais laisse de nombreuses questions sans réponse*

quelques questions

Est-ce bien le boson de Higgs du Modèle Standard ?

(et aurait-on alors tout compris ?)

*ou cette particule pourrait-elle avoir des propriétés légèrement différentes,
signes d'une “**nouvelle physique**” au delà du Modèle Standard ?*

Pas de tel signe pour l'instant. Les études se poursuivent ...

* * *

Est-il le seul ?

ou peut-il en exister d'autres – neutres ou chargés ?

comme dans les théories supersymétriques:

au moins 5 bosons de Higgs, deux chargés et 3 neutres:

SUSY \Rightarrow ***$H^+, H^-; H, h, A, \dots$***

Comment mieux ***comprendre et interpréter ce boson de B-E-Higgs ?***

Un seul champ de spin-0 ? ou plusieurs (comme en supersymétrie) ?

est-il fondamental, ou composé (*mais alors de quoi...*) ?

* * *

articulation avec les champs de spin 1 ou $\frac{1}{2}$?

d'où provient **son potentiel** – et donc **sa masse** ?

comment l'échelle de masse associée (≈ 100 GeV) peut-elle rester modérée ?

* * *

Quoi qu'il en soit,

le Modèle Standard ne peut être la fin de l'histoire, il doit exister de la

Nouvelle Physique au delà du Modèle Standard

(*mais laquelle ... ?*)

NOMBREUSES QUESTIONS, dont

3 familles, masses et angles de mélange des quarks et leptons ...

P , CP , prépondérance de la matière sur l'antimatière, ...

la gravitation, et son inclusion dans le cadre quantique ...

→ rôle de l'espace-temps, et de sa généralisation à des coordonnées supplémentaires

(“ordinaires”: x^5, x^6 ; ou anticommutantes: θ^α , comme en supersymétrie)

→

Dimensions supplémentaires

$$x^{\hat{\mu}} = (x^\mu, x^5, x^6 \dots)$$

dim. spatiales, très petites

(x^5, x^6 typiquement $< 10^{-16}$ cm)

Superspace

$$(x^\mu, \theta)$$

dim. fermioniques, et anticommutantes

$$\theta^\alpha \theta^\beta = -\theta^\beta \theta^\alpha$$

⇒ **Supersymétrie**

(les deux approches peuvent être combinées)

Autres questions ...

l'éventuelle unification des interactions

La nature de la MATIÈRE SOMBRE (non-baryonique) de l'Univers

??

des **particules neutres**, suffisamment massives,
ayant survécu aux annihilations des premiers instants de l'Univers ... (?)

(mais pas dans le modèle standard ...)

alors, **une nouvelle sorte de particules** ?

pourquoi seraient-elles stables ?

il serait bien d'avoir une raison fondamentale ...

→

*... la supersymétrie → le **neutralino***

*... la **R-parité** → sa **stabilité***

nouvelles particules, et symétries ...

LA SUPERSYMÉTRIE

peut (*en principe*) **relier les bosons et les fermions**
en changeant le spin des particules d'une demi unité

Transformations géométriques dans le superspace

L'espace-temps $x^\mu = \begin{pmatrix} ct \\ \vec{x} \end{pmatrix}$ est étendu au **superspace** (x^μ, θ)

$\theta = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{pmatrix}$ *coordonnées anticommutantes* (de spin $\frac{1}{2}$): $\theta_1\theta_2 = -\theta_2\theta_1$, $(\theta_1)^2 = 0 \dots$

$$\text{Alg\`ebre : } \begin{cases} \{ Q, \bar{Q} \} = -2 \gamma_\mu P^\mu \\ [Q, P^\mu] = 0 \end{cases}$$

engendre les translations ...



*c'est aussi le cadre naturel pour discuter de **particules de spin 0 fondamentales** ...*

(les mal-aimées de la théorie des champs)

peut-on relier les Bosons, **messagers des interactions**

aux Fermions **constituants de la matière** ?

et arriver à une sorte d'unification

FORCES ↔ MATIÈRE ??

idée très attirante !

mais les choses ne se passent pas ainsi ... !!

(contrairement à ce qui est souvent écrit ...)

LES SUPERPARTENAIRES

Comment la Nature pourrait-elle être supersymétrique ???

il ne semble pas que ce puisse être le cas ...

Mais à chaque particule connue pourrait être associée
une particule image, son **reflet par supersymétrie** :

$$\left\{ \begin{array}{l} \textit{photon} \leftrightarrow \text{spin-}\frac{1}{2} \textit{ photino} \\ \textit{gluons} \leftrightarrow \text{spin-}\frac{1}{2} \textit{ gluinos} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \textit{leptons} \leftrightarrow \text{spin-0} \textit{ sleptons} \\ \textit{quarks} \leftrightarrow \text{spin-0} \textit{ squarks} \end{array} \right. \dots$$

alors:

$$\begin{array}{l} \text{bosons connus} \longleftrightarrow \text{nouveaux fermions} \\ \text{fermions connus} \longleftrightarrow \text{nouveaux bosons} \end{array}$$

(\rightarrow pas de relation directe entre les forces et particules connues ...)

longtemps moqué comme un signe de l'inutilité de la supersymétrie

mais maintenant considéré comme “*évident*” !

Le MODÈLE STANDARD SUPERSYMMÉTRIQUE

(contenu minimal)

Spin 1	Spin 1/2	Spin 0
gluons g photon γ	gluinos \tilde{g} photino $\tilde{\gamma}$	
W^\pm Z	winos $\tilde{W}_{1,2}^\pm$ zinos $\tilde{Z}_{1,2}$ higgsino \tilde{h}^0	H^\pm h H, A
		$\left. \begin{array}{l} H^\pm \\ h \\ H, A \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{bosons} \\ \text{B-E-Higgs} \end{array}$
	leptons l quarks q	sleptons \tilde{l} squarks \tilde{q}

4 neutralinos (au moins) qui se mélangent

le plus léger, stable \rightarrow **Matière Sombre** (?)

2 doublets de Higgs \Rightarrow **5 bosons de Higgs**, au moins

avec mélange H/h , l'un d'eux à $125 \text{ GeV}/c^2$

Le **NEUTRALINO** le plus léger

associé au photon, au Z, à un boson de Higgs (ou à tous à la fois)

doit être stable, par la symétrie de **R-parité**

$$R_p = (-1)^{2S} (-1)^{3B+L}$$

associée à une réflexion de la coordonnée anticommutante θ

$$\theta \rightarrow -\theta$$

candidat naturel pour la Matière Sombre de l'Univers

MATIÈRE SOMBRE reliée
aux médiateurs (γ et Z) des interactions
et/ou aux bosons de Higgs ?

\Rightarrow recherche de **matière sombre** aux collisionneurs de particules ...

Mais où sont les PARTICULES SUPERSYMMÉTRIQUES ... ?

toujours inobservées, même au LHC

expériences ATLAS, CMS \Rightarrow

Les **gluinos** et les **squarks** – s'ils existent – doivent être

plus lourds que $\approx \text{TeV}/c^2$ (dans la plupart des cas)

à suivre:

La montée en énergie du LHC, de 8 à 13 TeV

scénario optimiste:

découverte 😊

(implications considérables ...)

scénario pessimiste:

elles n'existent pas 😞

ou sont encore trop lourdes ... 😞

La MUSIQUE des SPARTICULES ... ?

Les particules supersymétriques pourraient “vibrer”

(\equiv sparticules, de R-parité -1)

le long de dimensions supplémentaires cachées ... ?

extrêmement petites ($\lesssim 10^{-17}$ cm)

Elles seraient alors très lourdes !!

Plus la dimension est petite, plus la vibration est aigüe, et plus la particule est lourde ...

\Rightarrow très grandes masses $\approx \frac{\pi \hbar}{Lc} \gtrsim$ quelques TeV/ c^2 (ou même bien plus ... ??)

perdrat-on alors l'espoir de voir des signes de la supersymétrie ?

pas forcément ...

*Des signes de **SUPERSYMETRIE** dans le secteur de **BE-HIGGS** ... ?*

Même si les particules supersymétriques demeurent invisibles:

deux doublets de spin 0, $\begin{pmatrix} h_1^0 \\ h_1^- \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} h_2^+ \\ h_2^0 \end{pmatrix}$

⇒ 2 bosons chargés H^+ , H^-
et 3 neutres H , h , A (au moins)

*auto-interactions fixées par les constantes de jauge électrofaibles g, g'
masses reliées à m_W et m_Z*

Le boson de BE-Higgs le plus léger ne doit pas être trop lourd ...

c'est une bonne chose pour la supersymétrie que :

- 1) trouver un tel boson de spin 0
- 2) semble fondamentale, plutôt que composé ⇒ ☺
- 3) à 125 GeV, et pas plus ...

... on pourrait s'arrêter là ...

Mais on peut encore aller plus loin:

associations entre bosons W^\pm , Z et bosons BEH de spin 0 :

spin-1 W^\pm \xleftrightarrow{SUSY} \xleftrightarrow{SUSY} *spin-0* H^\pm

et

spin-1 Z \xleftrightarrow{SUSY} \xleftrightarrow{SUSY} *spin-0* **BEH boson**

avec aussi des inos de spin- $\frac{1}{2}$

le **neutralino** le plus léger étant candidat pour la Matière Sombre de l'Univers

Les mêmes **superchamps** peuvent décrire à la fois
les bosons W^\pm et Z (de spin 1) et les bosons **BE-Higgs** (de spin 0) associés

“Gauge-Higgs unification” (1974)

relie des particules alors inconnues, par une symétrie hypothétique !!

(quand peu de physiciens prenaient vraiment au sérieux l'existence d'un boson BEH ...)

40 ans après, *la supersymétrie reste hypothétique, mais les particules sont là ...*

Z (1983) **h** (2012)

Possibilité d'interpréter (à un angle de mélange près, éventuellement petit)

le **boson BEH à 125 GeV** comme **un Z dépourvu de spin**
relié au Z par deux transformations de supersymétrie

(à discuter, selon les résultats des expériences, les propriétés de ce boson, l'angle de mélange et le mécanisme de brisure de supersymétrie)

Un premier signe de la supersymétrie ?

Les performances passées ne préjugent en rien des résultats futurs

arXiv:1403.5951 (EPJC) arXiv:1406.0093 (PRD)

*http://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/1993/04/refdp_bsfp-91.pdf
Sources et évolution de la physique quantique. Textes fondateurs (Masson; EDP-Sciences)*