

# **BOSONS SCALAIRES et SUPERSYMMÉTRIE**

Pierre FAYET

*Institut Henri Poincaré, Paris, 29 novembre 2014*

Après les deux exposés précédents

François Englert: “ Le boson de Brout-Englert-Higgs ”

Yves Sirois : “ La découverte du boson  $H$  au LHC ”

On sait beaucoup de choses sur les bosons scalaires

*mais pas tout encore ...*

On peut notamment se demander:

est-ce bien le **boson scalaire du Modèle Standard ?**

**y en a-t-il d'autres** { de la même sorte ?  
ou d'une autre sorte ?

et *quelle interprétation plus profonde pourrait-on aussi donner  
à celui qu'on vient de trouver ?*

Quelles réponses ?

**Le boson trouvé à 125 GeV présente bien, à ce stade,  
les caractéristiques attendues du boson de Brout-Englert-Higgs du Modèle Standard**

\* \*  
\*

Mais bien d'autres pourraient aussi exister ...

*notamment dans le cadre de la supersymétrie*

\* \*  
\*

et enfin ...

**Le BOSON BEH est-il ... UN Z SANS SPIN ?**

*il faut déjà savoir ce qu'est*

un **Boson de Brout-Englert-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 :

$W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ , **photon**, **gluons**

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

---

### *“constituants de la matière”*

(au sens large)

 lectron, ..., neutrinos, quarks (→ 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  $\hbar$ )

|               |   |                       |   |   |
|---------------|---|-----------------------|---|---|
| <b>spin 1</b> | { | <b>Z</b> :            | <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 ( $\gamma$ ) : | médiateur (neutre) de l'int. électromagnétique  | $m_\gamma = 0$  |

*le mécanisme de Brout-Englert-Higgs* (1964)

permet de donner des masses aux  $W^\pm$  et  $Z$  (Weinberg, 1967)

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

Il peut aussi **interagir avec un champ de spin 0**  $\phi$

et **acquérir une masse**  $m_e = \lambda_e \phi$

(le champ  $\phi$  étant ici supposé uniforme dans tout l'espace)

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

**BOSONS "de Brout-Englert-Higgs"** **de spin 0**

Plus précisément:

## LA THÉORIE ÉLECTROFAIBLE

(1967)

$\varphi$  doublet de champs de spin 0 complexe  $\Leftrightarrow$  4 composantes réelles (3 phases et 1 module)

Trois composantes éliminées par le **mécanisme BEH**, pour donner des masses aux  $W^\pm$  et  $Z$

Reste la quatrième,

$$\phi = \sqrt{2 \varphi^\dagger \varphi}$$

qui s'ajuste pour minimiser  $V(\varphi) = \lambda (\varphi^\dagger \varphi)^2 - \mu^2 \varphi^\dagger \varphi$

$$\phi = v = \sqrt{\mu^2 / \lambda}$$

quanta associés au champ  $\phi \rightarrow$  bosons BEH, de spin 0

*La symétrie de jauge reste exacte (et même non brisée) mais maintenant cachée*

(elle est dite ordinairement “spontanément brisée”)

*Différenciation entre interactions faibles* (courte portée) *et électromagnétique* (longue portée) :

$$m_W = \frac{gv}{2}, \quad m_Z = \frac{\sqrt{g^2 + g'^2} v}{2} = m_W / \cos \theta; \quad m_\gamma = 0; \quad \tan \theta = g'/g, \quad e = g \sin \theta$$

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8m_W^2} = \frac{1}{2v^2} \implies v = (G_F \sqrt{2})^{-1/2} \simeq 246 \text{ GeV.}$$

*Couplages scalaires aux quarks et aux leptons, proportionnels aux masses:*

$$\lambda_{q,l} = \frac{m_{q,l}}{v} = 2^{1/4} G_F^{1/2} m_{q,l}$$

## *Mais quelle est la masse du boson BEH ??*

comme chacun sait,  $m_H = \mu\sqrt{2} = \sqrt{2\lambda v^2}$  ....

mais que vaut  $\lambda$  ??

***40 ans plus tôt, en SUPERSYMETRIE, déjà ...***

*PF, NPB 90, 104 (1975)*

*il faut 2 doublets de champs de spin 0 pour la brisure électrofaible (+ éventuel singlet)*

$$h_1 = \begin{pmatrix} h_1^0 \\ h_1^- \end{pmatrix} \text{ et } h_2 = \begin{pmatrix} h_2^+ \\ h_2^0 \end{pmatrix}$$

$\Rightarrow$  *nouveaux bosons BEH, chargés et neutres  $H^\pm; H, h, A$  ...*

*couplages quartiques fixés par  $g^2$  et  $g'^2$ , en particulier  $(g^2 + g'^2)/8$*

$\Rightarrow$  *boson neutre de spin 0, de même masse que le Z*

$$m_h = \sqrt{2\lambda v^2} = \frac{\sqrt{g^2 + g'^2} v}{2} = m_Z \simeq 91 \text{ GeV}/c^2$$

*tant que les effets de brisure de supersymétrie ne se font pas sentir*



*La supersymétrie fournit un cadre naturel pour un boson scalaire de masse*

$$m_h = m_Z \simeq 91 \text{ GeV}/c^2$$

avant effets de brisure de supersymétrie

*un boson BEH, qui est aussi*

*un Z de spin 0*

\* \*  
\*

Le boson scalaire du modèle standard est longtemps resté

*sa dernière pièce manquante*

après la découverte du quark top en 1995

échappant jusqu'en 2012 à tous les recherches expérimentales

*notamment au LEP, qui a établi une borne inférieure de 114 GeV/c<sup>2</sup> sur sa masse*

\* \*  
\*

*Beaucoup ont longtemps mis en doute son existence réelle*

particulièrement à partir de la fin des années 1970

*mais pourquoi ?*

## Un boson scalaire, élémentaire ou pas ?

l'existence d'un tel scalaire a été beaucoup mise en question

de nombreux physiciens ayant longtemps eu

*des doutes sérieux sur l'existence même de champs de spin 0 fondamentaux*

En présence de grandes échelles d'énergie ( $\gg$  électrofaible)

telles  $m_{GUT} \approx 10^{16}$  GeV ou  $m_{\text{Planck}} \simeq 10^{19}$  GeV

ceux-ci devraient tendre à acquérir de grandes masses,

et disparaître de la théorie de basse énergie

*Nombreux efforts visant à remplacer les champs de spin 0 fondamentaux  
par des champs composés de champs de spin 1/2*

*e.g. des champs de **techniquarks** spécialement introduits dans ce but  
avec une nouvelle interaction de “**technicouleur**” ( $SU(4)_{TC}$ ), puis de “**technicouleur étendue**”  
dans l'espoir d'éviter les champs scalaires fondamentaux*

*(sans grand succès à ce jour)*

**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/c<sup>2</sup>

*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** ( $m_W, m_Z, m_e, \dots$ )

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  $H$**  scalaire (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 scalaire 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 tels bosons scalaires, deux chargés et 3 neutres:*

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

Comment mieux comprendre et interpréter ce boson H ?

*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 ( $\approx 100$  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***

pourquoi **3 familles de quarks et de leptons**

qu'est-ce qui détermine leurs masses, et angles de mélange

d'où proviennent les (très petites) masses des neutrinos ?

\* \*

\*

problèmes liés à la conservation ou non-conservation des symétries ***P*** et ***CP*** ...

origine de la **prépondérance de la matière sur l'antimatière**

\* \*

\*

nature de la **matière sombre** (non-baryonique) de l'Univers ( $\simeq 26\%$ )

et de l'**énergie sombre** qui semble responsable de l'accélération de son expansion ( $\simeq 69\%$ )

provient-elle d'une **constante cosmologique  $\Lambda$**  ?

mais pourquoi celle-ci serait-elle aussi incroyablement petite ? ( $\Lambda < 10^{-121} L_{\text{Planck}}^{-2}$ )

\* \*

\*

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:  $\theta^\alpha$ , 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**  $(x^\mu, \theta)$

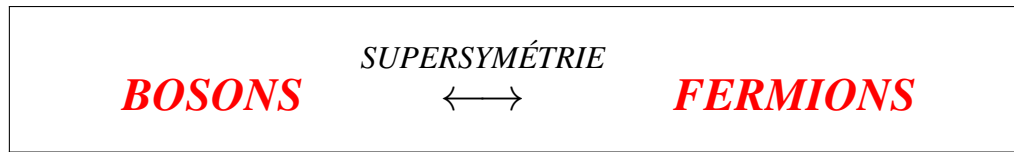
$$\theta = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{pmatrix} \text{ coordonnées anticommutantes (de spin } \frac{1}{2} \text{): } \theta_i \theta_j = -\theta_j \theta_i, \quad (\theta_i)^2 = 0$$

↑

(cf. Principe de Pauli: deux fermions identiques ne peuvent être dans le même état quantique)

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

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 alors relier les Bosons, **messagers des interactions**

aux Fermions **constituants de la matière** ?

*et arriver à une sorte d'unification*

|                            |
|----------------------------|
| <b>FORCES ↔ MATIÈRE ??</b> |
|----------------------------|

*idée très attirante !*

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

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

***Comment la Nature pourrait-elle être supersymétrique ???***

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

*Comment briser spontanément la supersymétrie ?*

alors qu'un état supersymétrique a toujours moins d'énergie qu'un autre qui ne l'est pas ...

et si l'on y arrive, pourquoi le fermion de Goldstone associé n'est-il pas observé ?

*Que faire des fermions de Majorana de ces théories ?*

alors que les quarks et les leptons sont de Dirac ?

*Comment définir des nombres quantiques "fermioniques"  $B$  et  $L$  conservés*

comment éviter des échanges de particules de spin 0, rendant le proton très instable ?

et déjà, ***quels bosons et fermions relier ?***

$$\left\{ \begin{array}{lll} \textit{photon} & \longleftrightarrow & \textit{neutrino} \\ W^\pm & \longleftrightarrow & e^\pm \\ \textit{gluons} & \longleftrightarrow & \textit{quarks} \\ & \dots & \end{array} \right.$$

*ne convient pas ...*

## LES SUPERPARTENAIRES

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*” !

## *Les BOSONS de SPIN 0*

*squarks et sleptons: nouveaux bosons de spin-0*

*pas de la même nature que les bosons BEH*

*associés à la brisure électrofaible et à l'origine des masses*

*Distingués par le nouveau nombre quantique de R-parité*

*(aussi à l'origine de la stabilité de la matière sombre)*

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{squarks et sleptons:} & R\text{-parité} - 1 \\ \text{bosons BEH (et autres):} & R\text{-parité} + 1 \end{array} \right.$$

*interactions quartiques des champs BEH = interactions de jauge électrofaibles*

$$V_{\text{quartic}} = \frac{g^2 + g'^2}{8} (h_1^\dagger h_1 - h_2^\dagger h_2)^2 + \frac{g^2}{2} |h_1^\dagger h_2|^2$$

*potential quartique du MSSM*

# *Le MODÈLE STANDARD SUPERSYMETRIQUE*

(1974-77)

(contenu minimal)

| Spin 1                        | Spin 1/2   | Spin 0                                      |
|-------------------------------|--|---|
| gluons $g$<br>photon $\gamma$ | gluinos $\tilde{g}$<br>photino $\tilde{\gamma}$                                  |   |
| $W^\pm$<br>$Z$                | winos $\tilde{W}_{1,2}^\pm$<br>zinos $\tilde{Z}_{1,2}$<br>higgsino $\tilde{h}^0$ | $H^\pm$<br>$h$<br>$H, A$                    |
|                               |  | } bosons<br>BEH                             |
|                               | leptons $l$<br>quarks $q$  | sleptons $\tilde{l}$<br>squarks $\tilde{q}$ |

**4 neutralinos** (au moins) qui se mélangent

*le plus léger, stable* → **Matière Sombre** (?)

2 doublets ⇒ **5 bosons BEH**, 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  $\theta$*

$$\theta \rightarrow -\theta$$

candidat naturel pour la Matière Sombre de l'Univers

**MATIÈRE SOMBRE** reliée  
**aux médiateurs ( $\gamma$  et Z) des interactions**  
**et/ou aux bosons BEH ?**

$\Rightarrow$  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)

(*R-parité* alors associée au fait de parcourir un cycle le long d’une dimension supplémentaire)

Elles seraient alors très lourdes !!

$$(L \lesssim 10^{-17} \text{ cm} \leftrightarrow mc^2 \approx \frac{\pi \hbar c}{L} \gtrsim 6 \text{ TeV})$$

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<sup>2</sup>** (ou même bien plus ... ??)

*perdrait-on alors l’espoir de voir des signes de la supersymétrie ?*

*pas forcément ...*

*Des signes de **SUPERSYMETRIE** dans le secteur de **B-E-H** ... ?*

*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 BEH 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 *fondamental*, plutôt que composé ⇒ ☺
- 3) à 125 GeV, *et pas plus ...*

## Un **BOSON** $h$ à $125 \text{ GeV}/c^2$ ?

### MSSM usuel

avant brisure de SUSY: *pas de brisure électrofaible* ☹️

après brisure de SUSY:  $m_h \leq m_Z \cos \beta + \underbrace{\text{grandes (?) corrections radiatives}}_{\text{dépendant de } m_{\tilde{t}}}$

(potentiellement problématique ...) ☹️

### N/nMSSM

singulet  $S$  avec interaction (superpotentiel) trilineaire  $\lambda H_1 H_2 S$

(introduit il y a 40 ans, et pas pour “coller” aux résultats expérimentaux ...)

avant brisure de SUSY: *brisure électrofaible* +  $m_h = m_Z$  ☺️ (nMSSM)

après brisure de SUSY:

beaucoup plus facile d'avoir le boson scalaire le plus léger à  $125 \text{ GeV}/c^2$  ☺️

Mais on peut aller plus loin:

**“Gauge - BEH UNIFICATION”**

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{spin-1 } Z \xleftrightarrow{\text{SUSY}} \xleftrightarrow{\text{SUSY}} \text{spin-0 BEH boson} \\ \text{et} \\ \text{spin-1 } W^\pm \xleftrightarrow{\text{SUSY}} \xleftrightarrow{\text{SUSY}} \text{spin-0 } H^\pm \end{array} \right.$$

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**  $W^\pm(x, \theta, \bar{\theta})$ ,  $Z(x, \theta, \bar{\theta})$  peuvent décrire à la fois les bosons  $W^\pm$  et  $Z$  (de spin 1) et les bosons **BEH** (de spin 0) associés

dans les notations usuelles le partenaire de spin-0 du  $Z$  est

$$z = \sqrt{2} \operatorname{Re} (h_2^0 \sin \beta - h_1^0 \cos \beta), \quad \text{voisin de } h \text{ à grand } \tan \beta$$

comportement très voisin de celui d'un  $H$  du modèle Standard !!

“Gauge-BEH 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**  
lié 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 ?**

---

EPJC 74 (2014) 2837 (arXiv:1403.5951)

PRD 90 (2014) 015033 (arXiv:1406.0093)

[http://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/1993/04/refdp\\_bsfp-91.pdf](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) ]