

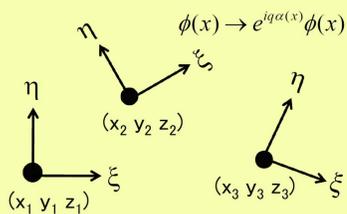
BEHメカニズムとヒッグス粒子

2013年ノーベル物理学賞

授賞理由は「**質量の起源の解明に貢献したメカニズムの理論を発見した**」功績である。このメカニズムは1964年に最初に発見した3名 (R. Brout, F. Englert, P.W. Higgs) の頭文字をとって**BEHメカニズム**と呼ばれる。



2013年のノーベル物理学賞授賞式で講演するフランソワ・アンブレールとピーター・ヒッグス(右)



[1] 量子電磁力学(QED)の成功

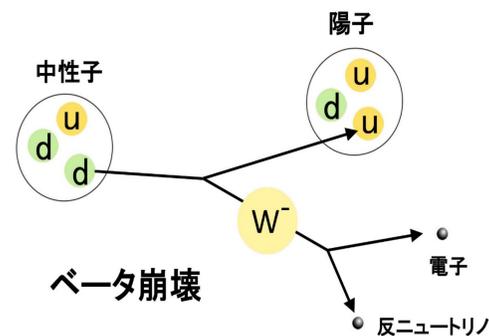
朝永振一郎らのくりこみ理論で無限大を回避でき非常に高い精度で物理量を計算することに成功した。根底には**局所ゲージ対称性**が原理としてあり、それが相互作用の形を決めている。

局所ゲージ不変性: 粒子の内部座標を任意の場所で勝手に回転しても理論は不変である。

[2] 質量の問題

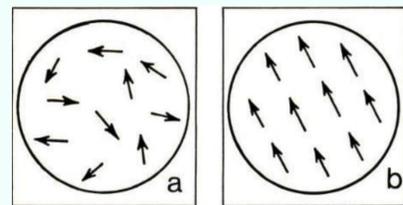
その1 ベータ崩壊などを起こす**弱い力**も**局所ゲージ対称性**に従う。**局所ゲージ対称性**は力を交換するボゾン(W,Z粒子)の質量が(QEDの光子のように)**ゼロ**であることを要求する。ところがW,Z粒子の質量はそれぞれ80, 91GeVであることが実験で観測されている。

その2 1957年に発見された**パリティ非保存**によると**弱い力**は左巻きスピンを持つ粒子にしか作用しない。この左右非対称性を運動方程式に入れるにはクォークや電子などの質量が**ゼロ**でなくてはならない。しかし電子は 0.5 MeV, u,dクォークは数MeVの質量を持っている。



[3] 自発的対称性の破れ:

運動方程式がある対称性を持っていても実際の物理状態はその対称性が破れてみえる場合のこと。南部は超伝導現象の類推から1960年にこの概念を素粒子物理学に持ち込んだ。強い力の世界でカイラル対称性の自発的対称性の破れによってπ中間子の性質を説明することに成功した。



自発的対称性の破れの例: 強磁性体 (a) キューリー温度T_c以上 (b) T_c以下



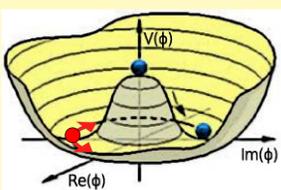
南部洋一郎:



2008年ノーベル物理学賞

[4] 質量ゼロの粒子の出現問題:

連続な対称性が自発的に破れると質量がゼロの粒子(南部・ゴールドストーン粒子)が原理的に現れてしまう。

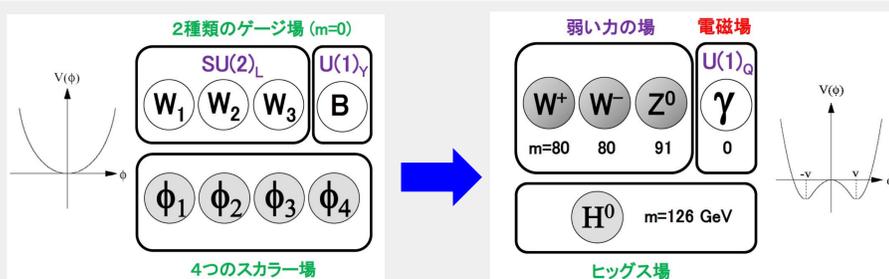


場がゼロでない有限なところでエネルギーが最低になる場合、真空(青丸)は最低エネルギー状態のどこかに移動する。最低エネルギー状態の円周方向は自由に動き回れるので**質量ゼロのゴールドストーン粒子(赤丸)**が必ず現れる

現実には質量ゼロの粒子は光子以外は発見されていない。

[5] BEHメカニズムの発見:

1964年にR. ブラウト, F. アンブレールとP. ヒッグスは、**スカラー場**と**局所ゲージ場**が混在していてスカラー場によって自発的に対称性が破れた場合、出てくる質量ゼロの南部・ゴールドストーン粒子がゲージ場に吸収されて(喰われて)ゲージ場に伴う粒子が質量を獲得できることを証明した。これをBEHメカニズムと呼ぶ。ヒッグスはこの結果として有限質量のスカラー粒子(ヒッグス粒子)が出現する事を予言した。



対称性のある時

自発的対称性の破れた後

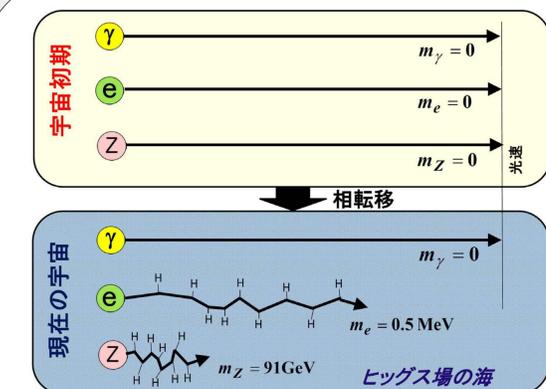


S. ワインバーグ, A. サラム

[6] 電弱統一理論の成功:

1967年にワインバーグとサラムはBEHメカニズムを弱い力に応用し、2種類の局所ゲージ場(SU_L(2)とU_Y(1))と4個のスカラー場が存在する時、スカラー場の対称性が自発的に破れると、W, Zボゾンが質量を獲得し光子が質量ゼロのまま残る**電弱統一理論**を提案した。同時に電子やクォークの有限質量も説明できると指摘した。

- 1972年にG. トフーフはこの電弱統一理論がくりこみ可能であることを証明し理論として完成した。
- 1970年代に数多くの実験により電弱統一理論が厳密に正しいと実証された。
- 2012年LHC加速器実験でヒッグス粒子が発見された。

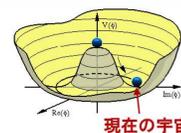


光子以外は現宇宙に一樣に存在する弱い力を持つ**ヒッグス場の海**に引きずられて質量を持つ。

ワインバーグ・サラムの電弱理論

$$L = \bar{L}i\gamma^\mu D_\mu L + \bar{R}i\gamma^\mu D_\mu R - \frac{1}{4}\bar{W}^{\mu\nu}\bar{W}_{\mu\nu} - \frac{1}{4}B^{\mu\nu}B_{\mu\nu} + [D_\mu\Phi]^\dagger [D_\mu\Phi] - [\mu^2\Phi^\dagger\Phi + \lambda(\Phi^\dagger\Phi)^2] - G_e[\bar{R}\Phi^\dagger L + \bar{L}\Phi R]$$

where $D_\mu \equiv \partial_\mu + ig_2\bar{W}_\mu + ig_1\frac{1}{2}B_\mu Y$, $B_{\mu\nu} \equiv \partial_\nu B_\mu - \partial_\mu B_\nu$, $L \equiv \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L$, $R \equiv e^-_R$



現在の宇宙

$$L_\Phi = \frac{1}{2}(\partial h)^2 + \frac{1}{4}g_2^2 W^+ W^- (v+h)^2 + \frac{1}{8} \frac{g_2^2}{\cos^2\theta_w} ZZ(v+h)^2 - \frac{1}{2}(-2\mu^2)h^2 + \frac{1}{4}\mu^2 v^2 [-1 + \frac{4h^3}{v^3} + \frac{h^4}{v^4}] - \frac{G_e v}{\sqrt{2}} \bar{e}e - \frac{G_e h}{\sqrt{2}} \bar{e}e$$

$$= -\frac{1}{4}\mu^2 v^2 + \frac{1}{2}(\partial h)^2 + \frac{1}{4}g_2^2 v^2 W^+ W^- + \frac{1}{8} \frac{g_2^2 v^2}{\cos^2\theta_w} ZZ - \frac{G_e v}{\sqrt{2}} \bar{e}e - \frac{G_e}{\sqrt{2}} h \bar{e}e + c_1 W W h + c_2 Z Z h + c_3 h^3 + c_4 h^4 + \dots$$

真空の最低エネルギー値 (真空期待値) $v = 246 \text{ GeV}$	質量 m_h のヒッグス粒子の運動方程式 $m_h = \sqrt{-2\mu^2}$	W粒子の質量項 $m_W = \frac{g_2 v}{2}$	Z粒子の質量項 $m_Z = \frac{g_2 v}{2 \cos\theta_w}$, $\cos\theta_w = \frac{g_1}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}}$	電子の質量項 $m_e = \frac{G_e v}{\sqrt{2}}$	電子とヒッグス粒子の相互作用 (湯川結合) $G_e = \frac{\sqrt{2}m_e}{v}$	W,Z粒子とヒッグス粒子の間相互作用 (湯川結合)	ヒッグス粒子同士自己結合
---	---	---------------------------------	--	---------------------------------------	---	---------------------------	--------------

電子の質量 m_e に比例する!!