

あもんノート

ユークリッド幾何学、ニュートン力学から、相対論、量子論、素粒子論、宇宙論、そして超ひも理論まで、理論物理学を簡潔にかつ幅広く網羅したノートです。TOP へは下の URL をクリックして行けます。専用の画像掲示板で、ご意見、ご質問等も受け付けております。

<http://amonphys.web.fc2.com/>

目次

第 30 章	光が質量を持つ模型	3
30.1	素粒子標準模型の復習	3
30.2	1 重項ヒッグスの導入	4
30.3	対称性の破れと質量の獲得	5
30.4	新しい相における電磁カレント	7
30.5	観測的可能性	8

第30章 光が質量を持つ模型

QED などの理論において光子の質量が厳密に 0 であるのは、その理論が $U(1)$ ゲージ対称性を持つためです。一方、素粒子標準模型においてこの $U(1)$ ゲージ対称性は、 $U(1)_Y \times SU(2)$ ゲージ対称性が自発的に破れた残りの対称性という位置づけであり、 $U(1)$ が残るのはひとえにヒッグス場が $SU(2)$ 2重項の1つしかないという仮定によるものです。例えば標準模型において、 $SU(2)$ 2重項のヒッグスに加えて1重項のヒッグスが存在すると仮定すると、 $U(1)$ も破ることが可能で、その結果、光子が質量を持ち、またニュートリノが帯電することがわかります。ここではこの模型の性質と現実世界における可能性を説明します。

30.1 素粒子標準模型の復習

まず標準模型を復習しておきましょう。簡単のため、カラー $SU(3)$ ゲージ (グルーオン) およびクォークのセクターは無視することにします。

そうすると、 $U(1)_Y$ のゲージ場を $B_\mu(x)$ 、また、 $SU(2)$ のゲージ場を $A_\mu^a(x)$ とし、ゲージ場のラグランジアン密度は、

$$\mathcal{L}_{\text{gauge}} = -\frac{1}{4} f_{\mu\nu} f^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu}$$

です。ここで、

$$f_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu, \quad F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a - g\epsilon_{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

は、それぞれのゲージ場の強さです。 g は $SU(2)$ の結合定数、 ϵ_{abc} は $SU(2)$ の構造定数で、3次元レビ・チビタです。一方、 $SU(2)$ 2重項で超電荷 $+1/2$ のスカラー場 $\Phi(x)$ があると、これをヒッグス場と呼びます。そのラグランジアン密度は、

$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = (D^\mu \Phi)^\dagger D_\mu \Phi - U(\Phi^\dagger \Phi).$$

であり、 $-U(\Phi^\dagger \Phi)$ はポテンシャル項です。共変微分は、

$$D_\mu \Phi = \partial_\mu \Phi + ig' \frac{1}{2} B_\mu \Phi + ig \frac{\sigma^a}{2} A_\mu^a \Phi$$

与えられます。 g' は $U(1)_Y$ の結合定数、 σ^a はパウリ行列です。

さらに、 $SU(2)$ 2重項の左手型ディラック場 $l_L(x)$, および2つの $SU(2)$ 1重項の右手型ディラック場 $l_R^u(x), l_R^d(x)$ があると、これらをレプトン場といいます。超電荷は順に、 $-1/2, 0, -1$ です。そのラグランジアン密度は、

$$\mathcal{L}_{\text{lepton}} = \bar{l}_L i\gamma \cdot D l_L + \bar{l}_R^u i\gamma \cdot D l_R^u + \bar{l}_R^d i\gamma \cdot D l_R^d$$

であり ($\gamma \cdot D = \gamma^\mu D_\mu$)、共変微分は、

$$D_\mu l_L = \partial_\mu l_L + ig' \left(-\frac{1}{2}\right) B_\mu l_L + ig \frac{\sigma^a}{2} A_\mu^a l_L,$$

$$D_\mu l_R^u = \partial_\mu l_R^u, \quad D_\mu l_R^d = \partial_\mu l_R^d + ig'(-1) B_\mu l_R^d$$

で与えられます。また、ヒッグス場との結合として、

$$\mathcal{L}_{1\text{-Higgs}} = -\bar{l}_L \tilde{\Phi} \lambda^u l_R^u - \bar{l}_L \Phi \lambda^d l_R^d + c.c., \quad \tilde{\Phi} = \epsilon \Phi^*$$

があります。 ϵ は2次元レビ・チビタ、 $c.c.$ は前の項の複素共役を意味し、これはラグランジアン密度が実数であるために必要です。また、 λ^u, λ^d は結合定数で、これらは世代空間における 3×3 複素行列です。

以上のラグランジアン密度を全て加えた、

$$\mathcal{L}_{\text{GWS}} = \mathcal{L}_{\text{gauge}} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}} + \mathcal{L}_{\text{lepton}} + \mathcal{L}_{1\text{-Higgs}}$$

がクォークセクターを無視した標準模型のラグランジアン密度で、グラシヨウ・ワインバーグ・サラム模型 (GWS) とも呼ばれます。この理論は $U(1)_Y \times SU(2)$ ゲージ対称性を持ちます。詳しくは素粒子論の章を参照してください。

30.2 1重項ヒッグスの導入

ここでは GWS に $SU(2)$ 1重項で超電荷 y のスカラー場 $S(x)$ を加えた理論を考えます。この場を1重項ヒッグス場と呼ぶことにします。そのラグランジアン密度は、

$$\mathcal{L}_S = (D^\mu S)^* D_\mu S - U_S(S^* S)$$

であり、 $-U_S(S^* S)$ はポテンシャル項です。また、共変微分は、超電荷が y なので、

$$D_\mu S = \partial_\mu S + ig' y B_\mu S$$

となります。2重項ヒッグスとは異なり、この1重項ヒッグスはレプトンと結合できません。なぜなら、もしそのような結合があるなら、ローレンツ対称性および $SU(2)$ ゲージ対称性の要請から、 $S \bar{l}_L l_L$ や $S \bar{l}_R^{u(d)} l_R^{u(d)}$ のような形しかあり得ませんが、一般にディラック場 $\psi(x)$ に対し $\bar{\psi}_L \psi_L = \bar{\psi}_R \psi_R = 0$ だからです^(*)。

GWS の理念からすると、1重項ヒッグス $S(x)$ の存在は極めて自然であることに注意してください。レプトンやクォークに $SU(2)$ 2重項と1重項がそれぞれあるのに対し、ヒッグスだけが2重項だけというのは、どちらかといえば不自然であり、また一般的ではありません。1重項ヒッグスもあるのだが、しかしその存在は現在の宇宙では観測されにくいと考えた方が自然です。

理論のラグランジアンは、全体で、

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{GWS}} + \mathcal{L}_S = \mathcal{L}_{\text{gauge}} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}} + \mathcal{L}_S + \mathcal{L}_{\text{lepton}} + \mathcal{L}_{1\text{-Higgs}}$$

となります。

(*注) 厳密には、 $S \bar{l}_R^{u(d)C} l_R^{u(d)}$ という結合だけは上の対称性の要求を満たし、また y の値次第では $U(1)_Y$ ゲージ対称性も保持しますが、マヨラナ質量項と同様、このような結合は粒子数 (レプトン数) を破るので、ここでは考えないことにします。カイラリティ γ_5 やディラック場の右手型・左手型については量子電磁気学の章を参照してください。

30.3 対称性の破れと質量の獲得

現在の宇宙 (その真空 $|0\rangle$) においては、2重項ヒッグス場は、

$$\Phi(x) = \frac{v}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \phi(x), \quad \langle 0|\phi(x)|0\rangle = 0$$

と展開され、真空が $U(1)_Y \times SU(2)$ 対称性を破っています。 v は観測から $\sim 246\text{GeV}$ であり、このことから対称性が回復する温度は極めて高温で、くりこみ群によるおおざっぱな考察から $\sim 10^2\text{ GeV} \sim 10^{15}\text{ K}$ と予想されています。

一方、1重項ヒッグス場については、その存在が現在観測的に認められないため、 $\langle 0|S(x)|0\rangle = 0$ であり、なおかつその量子が現在の高エネルギー加速器で発見できない程に大きな質量を持つものと考えられます。しかしもし“超低温領域”が大域的に実現されれば、1重項ヒッグスの (くりこまれた) 質量が小さくなり、さらに低温では真空が相転移し、

$$S(x) = \frac{u}{\sqrt{2}} + s(x), \quad \langle 0|s(x)|0\rangle = 0$$

が実現される可能性があります。この超低温の相において何が起こるのかを考えてみましょう。

上の相において、2つのヒッグス場のラグランジアン密度は、それぞれ、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{Higgs}} &= \frac{v^2}{8} (g'B - gA^3)^2 + (B_\mu, A_\mu^3 \text{ を含まない項}) \\ \mathcal{L}_S &= \frac{(ug'y)^2}{2} B \cdot B + (B_\mu, A_\mu^3 \text{ を含まない項}) \end{aligned}$$

と展開されるので、 $B_\mu(x)$ と $A_\mu^3(x)$ が混合しています。これを対角化するために、 $Z_\mu(x)$, $A_\mu(x)$ を、

$$\begin{pmatrix} A_\mu^3(x) \\ B_\mu(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_\mu(x) \\ A_\mu(x) \end{pmatrix}$$

で定義します。 θ は、通常、ワインバーグ角と呼ばれるものです。そうすると、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{Higgs}} &= \frac{v^2}{8} (g' \cos \theta - g \sin \theta)^2 A \cdot A \\ &\quad - \frac{v^2}{4} (g' \sin \theta + g \cos \theta)(g' \cos \theta - g \sin \theta) A \cdot Z \\ &\quad + \frac{v^2}{8} (g' \sin \theta + g \cos \theta)^2 Z \cdot Z + (A_\mu, Z_\mu \text{ を含まない項}). \end{aligned}$$

および、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_S &= \frac{(g'yu)^2}{2} \cos^2 \theta A \cdot A \\ &\quad - (g'yu)^2 \sin \theta \cos \theta A \cdot Z \\ &\quad + \frac{(g'yu)^2}{2} \sin^2 \theta Z \cdot Z + (A_\mu, Z_\mu \text{ を含まない項}) \end{aligned}$$

を得るので、非対角項 ($A \cdot Z$ を含む項) が消える条件は、

$$\frac{v^2}{4} (g' \tan \theta + g)(g' - g \tan \theta) + (g'yu)^2 \tan \theta = 0$$

となり、これがワインバーグ角 θ の条件式になります。もし1重項ヒッグス場の真空期待値が0で、 $u = 0$ なら、この式は $\tan \theta = g'/g$ を与え、これは通常のGWSのワインバーグ角です。しかし $u \neq 0$ においては、そうはならなくなります。

いま、少なくとも相転移直後 (臨界点近く) では $(u/v)^2 \ll 1$ が妥当と考えられるので、これを仮定し、また、

$$\tan \theta = \frac{g'}{g} (1 + 4\alpha)$$

とおきます。ただし α は $(u/v)^2$ と同程度の十分小さな摂動とし、これらの高次項は無視するものとします。そうすると、

$$\alpha = \frac{(g'yu/v)^2}{g'^2 + g^2}$$

を得るでしょう。これが通常のワインバーグ角からのずれを意味する、オーダーパラメータになります。この結果、ラグランジアン密度における $A \cdot A$ の項の係数は、やはり α と $(u/v)^2$ の高次項を無視し、

$$\frac{v^2}{8} (g' \cos \theta - g \sin \theta)^2 + \frac{(g'yu)^2}{2} \cos^2 \theta = \frac{\alpha(gv)^2}{2}$$

となります。すなわち、4元ポテンシャル $A_\mu(x)$ が質量項を持ち、よって光子が質量、

$$m_\gamma = \sqrt{\alpha}gv = \frac{g'gyu}{\sqrt{g'^2 + g^2}}$$

を持つこととなります。1重項ヒッグスによる相転移で、 $U(1)$ ゲージ対称性も破れ、光子が質量を獲得するというわけです。

30.4 新しい相における電磁カレント

レプトンのラグランジアン密度は、共変微分を展開して、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{lepton}} = & \bar{l}_L i\gamma \cdot \partial l_L + \bar{l}_R^u i\gamma \cdot \partial l_R^u + \bar{l}_R^d i\gamma \cdot \partial l_R^d \\ & - \bar{l}_L \gamma^\mu \left(g' \left(-\frac{1}{2} \right) B_\mu + g \frac{\sigma^a}{2} A_\mu^a \right) l_L - \bar{l}_R^d \gamma^\mu (g'(-1)B_\mu) l_R^d \end{aligned}$$

となりますが、今の場合、

$$g'YB_\mu = g' \cos \theta Y A_\mu + (A_\mu \text{ を含まない項})$$

$$g'YB_\mu + g \frac{\sigma^a}{2} A_\mu^a = g' \cos \theta \left(Y + \frac{\sigma^3}{2}(1 + 4\alpha) \right) A_\mu + (A_\mu \text{ を含まない項})$$

であることに注意して(*)、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{lepton}} = & \bar{l}_L^u i\gamma \cdot \partial l_L^u + \bar{l}_L^d i\gamma \cdot \partial l_L^d + \bar{l}_R^u i\gamma \cdot \partial l_R^u + \bar{l}_R^d i\gamma \cdot \partial l_R^d \\ & - g' \cos \theta A_\mu J^\mu + (A_\mu \text{ を含まない項}). \end{aligned}$$

ここで、

$$J^\mu = 2\alpha \bar{l}_L^u \gamma^\mu l_L^u + (-1 - 2\alpha) \bar{l}_L^d \gamma^\mu l_L^d + (-1) \bar{l}_R^d \gamma^\mu l_R^d$$

は電磁カレントです。また、 $SU(2)$ 2重項のレプトン $l_L(x)$ の成分を、

$$l_L = \begin{pmatrix} l_L^u \\ l_L^d \end{pmatrix}$$

とおきました。さらに完全なディラック場、 $l^u(x)$, $l^d(x)$ を、

$$l^{u(d)} = l_L^{u(d)} + l_R^{u(d)}, \quad l_L^{u(d)} = \frac{1 - \gamma_5}{2} l^{u(d)}, \quad l_R^{u(d)} = \frac{1 + \gamma_5}{2} l^{u(d)}$$

で構成すると、電磁カレントは、

$$J^\mu = \bar{l}^u (\alpha - \alpha\gamma_5) l^u + \bar{l}^d (-1 - \alpha + \alpha\gamma_5) l^d$$

と書けます。 $l^u(x)$ はニュートリノ族の場を、 $l^d(x)$ は電子族の場を意味することに注意。

すなわち、今考えている相においては、ニュートリノ族が帯電し、また、電子族についても軸性部分 (γ_5 を含む項) が存在し、QED のレベルでパリティが破れることがわかります。

(*注) $SU(2)$ 1重項を $I_3 = 0$, $SU(2)$ 2重項の上成分を $I_3 = +1/2$, 下成分を $I_3 = -1/2$ とし、アイソスピン (その第3成分) I_3 を定義することがあります。このとき GWS において電荷は、

$$Q = Y + I_3$$

で表され、これを中野・西島・ゲルマンの法則といいます。1重項ヒッグスによる相転移は、この法則を $Q = Y + (1 + 4\alpha)I_3$ に変えます。

30.5 観測的可能性

このように、現在の宇宙とはまったく異なる相が超低温において実現される可能性があるというのは興味深いでしょう。現在における宇宙の輻射温度は 2.7 K で、大域的に実現された低温としては銅の電子系において $\sim 10^{-5}$ K といった記録があります。ここで述べたモデルは、さらにもっと低温において、真空の相転移が起こり、光子が質量を獲得し、光の到達距離が有限になり、ニュートリノが帯電することがあり得ることを示唆しているわけです。

また、低温の実現でなくても、高エネルギー加速器により1重項ヒッグス粒子を発見することによっても、この理論の検証は可能です。検証のために、超低温と超高エネルギーという相対する二つのアプローチがあるというのも、なかなか面白いことです。

ちなみに1重項ヒッグスの超電荷 y が 0 の場合、新しい相においても、オーダーパラメータ α が恒等的に 0 になるため、何ら新しい現象は起こらないことになります。この場合、1重項ヒッグス場が他のゲージ場や物質場と相互作用していないため、重力以外において認識することができないと考えられます。このような場の粒子はコールドダークマター (CDM) の候補になり得るものです。

(余談) 1重項ヒッグスを含むモデルの研究は独自に行ったものですが、素朴で簡単なモデルなので、一部では知られている可能性が高いと思われます。同様なことを述べている文献がありましたら、すみませんがご紹介ください。

索引

あ	<hr/>	
1 重項ヒッグス場	4	
か	<hr/>	
グラショウ・ワインバーグ・サラム模型 ...	4	
な	<hr/>	
中野・西島・ゲルマンの法則	8	