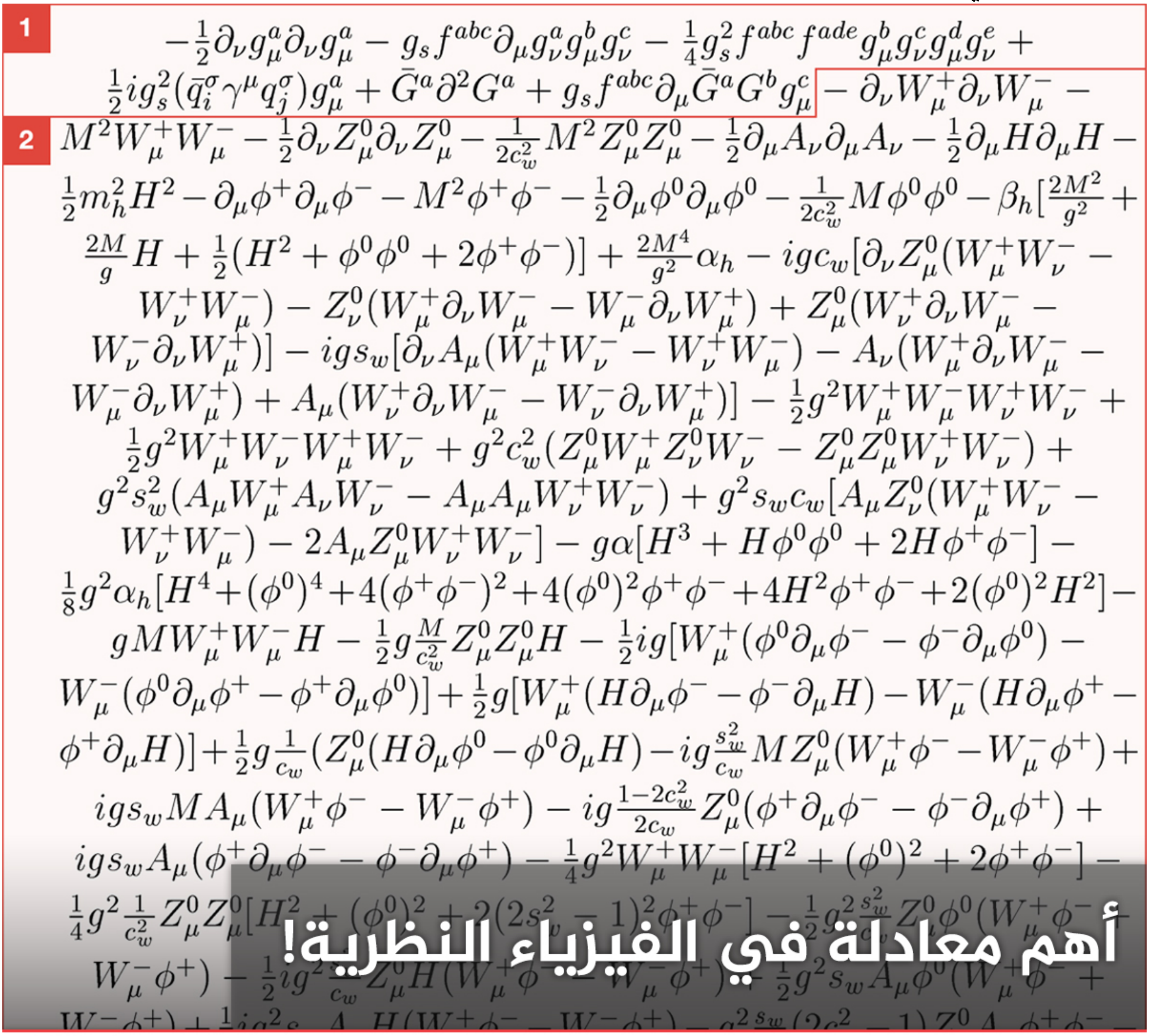
أهم معادلة في الفيزياء النظرية!



لاغرانجيان النموذج القياسي.

غالباً ما يُصور النموذج القياسي **(Standard Model)** في فيزياء الجسيمات كلائحة مشابهة للجدول الدوري للعناصر، ويُستخدم لوصف خواص الجسيمات مثل كتلتها، وشحنتها ولفها الذاتي "السبين" **(spin)**. وهذا الجدول منظمٌ أيضاً لتمثيل كيفية تفاعل هذه الأشياء الصغيرة جداً من المادة مع القوى الأساسية في الطبيعة.

لكنه لم يبدأ كجدول! النظرية الكبيرة لكل شيء تقريباً تُمثل مجموعة من النماذج الرياضية التي أثبتت أنها تفسيرات خالدة لقوانين الفيزياء. ونُقدم لك الآن رحلة مختصرة تُغطي المعادلة العملاقة التي تحكم هذا الأمر.

الأمر بأكمله

تُكتب هذه النسخة من النموذج القياسي بصيغة لاغرانجيان (**Lagrangian**). ويُمثل اللاغرانجيان طريقة بارعة لكتابة معادلة ما لتحديد حالة نظام متغير وشرح الطاقة القصوى التي يُمكن للنظام الحفاظ عليها.

يُمكن تقنياً كتابة النموذج القياسي بصياغات مختلفة. لكن وبصرف النظر عن المظهر، يُعتبر اللاغرانجيان واحداً من أسهل الطرق وأكثرها شمولية لتمثيل النظرية.

الجزء الأول من اللاغرانجيان

تُمثل هذه الخطوط الثلاث في النموذج القياسي تحديداً فائق الدقة للغلوون (**gluon**)، وهو البوزون (**boson**) الذي يحمل القوة النووية الشديدة (**strong force**). تأتي الغلوونات في ثمانية أنواع، وتتفاعل مع نفسها ولديها ما يُعرف بالشحنة اللونية (**color charge**).

$$-\frac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu + \frac{1}{2}ig_s^2(\bar{q}^\sigma_i \gamma^\mu q^\sigma_j)g^a_\mu + \bar{G}^a\partial^2 G^a + g_s f^{abc}\partial_\mu \bar{G}^a G^b g^c_\mu - \partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \frac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \frac{1}{2c_w^2}M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H -$$

تُمثل هذه الخطوط الثلاث في النموذج القياسي تحديداً فائق الدقة للغلوون (gluon)

الجزء الثاني من اللاغرانجيان

يُكرس نصف هذه المعادلة تقريباً لشرح التفاعلات الكائنة بين البوزونات، وتحديداً البوزونات **Z** و**W**.

البوزونات هي جسيمات حاملة للقوة، وهناك أربعة أنواع منها، وتتفاعل مع الجسيمات الأخرى بواسطة ثلاث قوى أساسية. تحمل الفوتونات (**Photons**) القوة الكهرومغناطيسية، في حين تحمل الغلوونات القوة النووية الشديدة، أما البوزونات **Z** و**W** فتحمل القوة النووية الضعيفة (**weak force**). يُعتبر بوزون هيغز (**Higgs boson**) المكتشف مؤخراً مختلفاً قليلاً، ويظهر تفاعله في الجزء التالي من المعادلة.

$$
\begin{aligned}
&-\tfrac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \tfrac{1}{4}g_s^2 f^{abc}f^{ade}g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu + \\
&\tfrac{1}{2}ig_s^2(\bar{q}_i^\sigma\gamma^\mu q_j^\sigma)g^a_\mu + \bar{G}^a\partial^2 G^a + g_s f^{abc}\partial_\mu \bar{G}^a G^b g^c_\mu - \partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - \\
&M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2c_w^2}M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \tfrac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
&\tfrac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2\phi^+\phi^- - \tfrac{1}{2}\partial_\mu\phi^0\partial_\mu\phi^0 - \tfrac{1}{2c_w^2}M\phi^0\phi^0 - \beta_h[\tfrac{2M^2}{g^2} + \\
&\tfrac{2M}{g}H + \tfrac{1}{2}(H^2 + \phi^0\phi^0 + 2\phi^+\phi^-)] + \tfrac{2M^4}{g^2}\alpha_h - igc_w[\partial_\nu Z^0_\mu(W^+_\mu W^-_\nu - \\
&W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu(W^+_\mu\partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu\partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu(W^+_\nu\partial_\nu W^-_\mu - \\
&W^-_\nu\partial_\nu W^+_\mu)] - igs_w[\partial_\nu A_\mu(W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - A_\nu(W^+_\mu\partial_\nu W^-_\mu - \\
&W^-_\mu\partial_\nu W^+_\mu) + A_\mu(W^+_\nu\partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu\partial_\nu W^+_\mu)] - \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu + \\
&\tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2(Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + \\
&g^2 s_w^2(A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w c_w[A_\mu Z^0_\nu(W^+_\mu W^-_\nu - \\
&W^+_\nu W^-_\mu) - 2A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu] - g\alpha[H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^-] - \\
&\tfrac{1}{8}g^2\alpha_h[H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+\phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2\phi^+\phi^- + 4H^2\phi^+\phi^- + 2(\phi^0)^2H^2] - \\
&gMW^+_\mu W^-_\mu H - \tfrac{1}{2}g\tfrac{M}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu H - \tfrac{1}{2}ig[W^+_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^0) - \\
&W^-_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu\phi^0)] + \tfrac{1}{2}g[W^+_\mu(H\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu H) - W^-_\mu(H\partial_\mu\phi^+ - \\
&\phi^+\partial_\mu H)] + \tfrac{1}{2}g\tfrac{1}{c_w}(Z^0_\mu(H\partial_\mu\phi^0 - \phi^0\partial_\mu H) - ig\tfrac{s_w^2}{c_w}MZ^0_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + \\
&igs_w MA_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - ig\tfrac{1-2c_w^2}{2c_w}Z^0_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) + \\
&igs_w A_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) - \tfrac{1}{4}g^2 W^+_\mu W^-_\mu[H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-] - \\
&\tfrac{1}{4}g^2\tfrac{1}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu[H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2\phi^+\phi^-] - \tfrac{1}{2}g^2\tfrac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + \\
&W^-_\mu\phi^+) - \tfrac{1}{2}ig^2\tfrac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + \tfrac{1}{2}g^2 s_w A_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + \\
&W^-_\mu\phi^+) + \tfrac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - g^2\tfrac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1)Z^0_\mu A_\mu\phi^+\phi^- - \\
&g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu\phi^+\phi^- - \bar{e}^\lambda(\gamma\partial + m_e^\lambda)e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda\gamma\partial\nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda(\gamma\partial + m_u^\lambda)u_j^\lambda - \\
&\bar{d}_j^\lambda(\gamma\partial + m_d^\lambda)d_j^\lambda + igs_w A_\mu[-(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu e^\lambda) + \tfrac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda\gamma^\mu u_j^\lambda) - \tfrac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda\gamma^\mu d_j^\lambda)] +
\end{aligned}
$$

شرح التفاعلات الكائنة بين البوزونات، وتحديداً البوزونات Z وW.

الجزء الثالث من اللاغرانجيان

يصف هذا الجزء من المعادلة كيفية تفاعل جسيمات المادة الأساسية مع القوة الضعيفة. فوفقاً لهذه الصياغة، تأتي جسيمات المادة في ثلاثة أجيال، ولكلٍ منها كتل مختلفة. وتساعد القوة الضعيفة جسيمات المادة على التفكك إلى جسيمات كتلتها أصغر.

ويتضمن هذا الجزء من المعادلة التفاعلات الأساسية مع حقل هيغز (**Higgs field**)، الذي تحصل من خلاله الجسيمات على كتلها.

وبشكل مثير للاهتمام، يطرح هذا الجزء من المعادلة فرضية تتناقض مع اكتشافات أنجزها علماء فيزياء في السنوات الأخيرة، فهو يفترض مخطئاً أنّ جسيمات تُعرف بالنيوترينو (**neutrinos**) ليس لديها كتلة.

$$
\begin{aligned}
&W_\mu^-\phi^+) + \tfrac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H(W_\mu^+\phi^- - W_\mu^-\phi^+) - g^2\tfrac{s_w}{c_w}(2c_w^2-1)Z_\mu^0 A_\mu\phi^+\phi^- - \\
&g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu\phi^+\phi^- - \bar{e}^\lambda(\gamma\partial + m_e^\lambda)e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda\gamma\partial\nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda(\gamma\partial + m_u^\lambda)u_j^\lambda - \\
&\bar{d}_j^\lambda(\gamma\partial + m_d^\lambda)d_j^\lambda + igs_w A_\mu[-(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu e^\lambda) + \tfrac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda\gamma^\mu u_j^\lambda) - \tfrac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda\gamma^\mu d_j^\lambda)] + \\
&\tfrac{ig}{4c_w}Z_\mu^0[(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(4s_w^2 - 1 - \gamma^5)e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda\gamma^\mu(\tfrac{4}{3}s_w^2 - \\
&1 - \gamma^5)u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda\gamma^\mu(1 - \tfrac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5)d_j^\lambda)] + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}}W_\mu^+[(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)e^\lambda) + \\
&(\bar{u}_j^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)C_{\lambda\kappa}d_j^\kappa)] + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}}W_\mu^-[(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger\gamma^\mu(1+ \\
&\gamma^5)u_j^\lambda)] + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}}\tfrac{m_e^\lambda}{M}[-\phi^+(\bar{\nu}^\lambda(1-\gamma^5)e^\lambda) + \phi^-(\bar{e}^\lambda(1+\gamma^5)\nu^\lambda)] - \\
&\tfrac{g}{2}\tfrac{m_e^\lambda}{M}[H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0(\bar{e}^\lambda\gamma^5 e^\lambda)] + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+[-m_d^\kappa(\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)d_j^\kappa) +
\end{aligned}
$$

يصف هذا الجزء من المعادلة كيفية تفاعل جسيمات المادة الأساسية مع القوة الضعيفة

الجزء الرابع من المعادلة

في ميكانيكا الكم لا وجود لمسار أو طريق وحيد يُمكن للجسيم اتباعه، مما يعني في بعض الأحيان أن التكرار يظهر في هذا النوع من الصياغة الرياضية. ولتنظيف ذلك، يستخدم العلماء النظريون جسيمات افتراضية تُعرف بالأشباح (**ghosts**).

يصف هذا الجزء من المعادلة كيفية تفاعل جسيمات المادة مع أشباح هيغز ـ ناتج اصطناعي وافتراضي لحقل هيغز.

$$
\begin{aligned}
&(\bar{u}_j^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)C_{\lambda\kappa}d_j^\kappa)] + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}}W_\mu^-[(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger\gamma^\mu(1+ \\
&\gamma^5)u_j^\lambda)] + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}}\tfrac{m_e^\lambda}{M}[-\phi^+(\bar{\nu}^\lambda(1-\gamma^5)e^\lambda) + \phi^-(\bar{e}^\lambda(1+\gamma^5)\nu^\lambda)] - \\
&\tfrac{g}{2}\tfrac{m_e^\lambda}{M}[H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0(\bar{e}^\lambda\gamma^5 e^\lambda)] + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+[-m_d^\kappa(\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)d_j^\kappa) + \\
&m_u^\lambda(\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)d_j^\kappa] + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-[m_d^\lambda(\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger(1+\gamma^5)u_j^\kappa) - m_u^\kappa(\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger(1- \\
&\gamma^5)u_j^\kappa] - \tfrac{g}{2}\tfrac{m_u^\lambda}{M}H(\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m_d^\lambda}{M}H(\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m_u^\lambda}{M}\phi^0(\bar{u}_j^\lambda\gamma^5 u_j^\lambda) - \\
&\tfrac{ig}{2}\tfrac{m_d^\lambda}{M}\phi^0(\bar{d}_j^\lambda\gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+(\partial^2 - M^2)X^+ + \bar{X}^-(\partial^2 - M^2)X^- + \bar{X}^0(\partial^2 - \\
&\tfrac{M^2}{c_w^2})X^0 + \bar{Y}\partial^2 Y + igc_w W_\mu^+(\partial_\mu\bar{X}^0 X^- - \partial_\mu\bar{X}^+ X^0) + igs_w W_\mu^+(\partial_\mu\bar{Y}X^- -
\end{aligned}
$$

يصف هذا الجزء من المعادلة كيفية تفاعل جسيمات المادة مع أشباح هيغز ـناتج اصطناعي وافتراضي لحقل هيغز.

الجزء الخامس من المعادلة

يتضمن الجزء الأخير من المعادلة أشباحاً أكثر. تُعرف هذه الأشباح بأشباح فاديف-بوبوف (**Faddeev-Popov ghosts**)، وهي تُلغي الزيادات غير اللازمة والتي تحصل في التفاعلات جرّاء القوة الضعيفة.

$$\gamma^5)u_j^\lambda] - \frac{g}{2}\frac{m_u^\lambda}{M}H(\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2}\frac{m_d^\lambda}{M}H(\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2}\frac{m_u^\lambda}{M}\phi^0(\bar{u}_j^\lambda\gamma^5 u_j^\lambda) -$$
$$\frac{ig}{2}\frac{m_d^\lambda}{M}\phi^0(\bar{d}_j^\lambda\gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+(\partial^2 - M^2)X^+ + \bar{X}^-(\partial^2 - M^2)X^- + \bar{X}^0(\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2})X^0 + \bar{Y}\partial^2 Y + igc_w W_\mu^+(\partial_\mu\bar{X}^0X^- - \partial_\mu\bar{X}^+X^0) + igs_w W_\mu^+(\partial_\mu\bar{Y}X^- - \partial_\mu\bar{X}^+Y) + igc_w W_\mu^-(\partial_\mu\bar{X}^-X^0 - \partial_\mu\bar{X}^0X^+) + igs_w W_\mu^-(\partial_\mu\bar{X}^-Y - \partial_\mu\bar{Y}X^+) + igc_w Z_\mu^0(\partial_\mu\bar{X}^+X^+ - \partial_\mu\bar{X}^-X^-) + igs_w A_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+X^+ - \partial_\mu\bar{X}^-X^-) - \frac{1}{2}gM[\bar{X}^+X^+H + \bar{X}^-X^-H + \frac{1}{c_w^2}\bar{X}^0X^0H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w}igM[\bar{X}^+X^0\phi^+ - \bar{X}^-X^0\phi^-] + \frac{1}{2c_w}igM[\bar{X}^0X^-\phi^+ - \bar{X}^0X^+\phi^-] + igMs_w[\bar{X}^0X^-\phi^+ - \bar{X}^0X^+\phi^-] + \frac{1}{2}igM[\bar{X}^+X^+\phi^0 - \bar{X}^-X^-\phi^0]$$

بأشباح فاديف-بوبوف (Faddeev-Popov ghosts)

ملاحظة

توماس غوتيريز **Thomas Gutierrez** هو أستاذ مساعد للفيزياء في قسم البوليتكنيك بجامعة ولاية كاليفورنيا، وهو من كتب لاغرانجيان النموذج القياسي للإنترنت، وقد اشتقه من كتاب "**Diagrammatica**" الذي يُعتبر مرجعا في الفيزياء النظرية كتبه مارتينيوس فيلتمان **Martinus Veltman** الحائز على جائزة نوبل. أشار غوتيريز في منشوره إلى وجود خطأ في الإشارة في مكانٍ ما من المعادلة. حظاً جيداً في إيجاد هذا الخطأ!

- التاريخ: 2018-03-27
- التصنيف: أسئلة كُبرى

#البوزونات #بوزون هيغز #النموذج القياسي #الطبيعة #فيزياء الجسيمات الاولية

المصادر

- symmetrymagazine

المساهمون

- ترجمة
  - همام بيطار
- مُراجعة
  - سومر عادلة
- تصميم
  - نادر النوري
- نشر
  - مي الشاهد