

El Modelo Estándar

Avelino Vicente

[@AvelinoQuantum](#)

Instituto de Física Corpuscular (CSIC / U. Valencia)

IFIC Summer School 2026

Valencia

Julio 2026

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\
& ig s_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^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - \\
& Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
& \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
& g \alpha_h M (H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-) - \\
& \frac{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)^2 H^2) - \\
& g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\
& \frac{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)) + \\
& \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\
& M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\
& W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
& \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
& \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
& g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig_s \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^a \gamma^\mu q_j^a) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) \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 + ig s_w A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) + \\
& \frac{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{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
& (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda)\} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) + \\
& \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\kappa U^{lep\dagger}_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\
& \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa) + \\
& \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
& \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \hat{\nu}_\kappa - \\
& \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \hat{\nu}_\kappa + \frac{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) + \\
& \frac{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) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\
& \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c + \\
& \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}^0 X^- - \\
& \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_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}^0 X^+) + ig s_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^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
& \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM \left(\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H \right) + \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}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + igM s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\
& \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\
& ig s_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^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - \\
& Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
& \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
& g \alpha_h M (H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-) - \\
& \frac{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)^2 H^2) - \\
& g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\
& \frac{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)) + \\
& \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\
& M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\
& W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
& \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
& \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
& g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig_s \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^a \gamma^\mu q_j^a) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) \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 + ig s_w A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)) + \\
& \frac{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{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
& (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) + \\
& \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\kappa U^{lep\dagger}_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\
& \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa) + \\
& \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
& \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu \nu^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) \\
& \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \hat{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (\bar{\nu}_\lambda \gamma^\mu \nu^\lambda) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) \\
& \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) \\
& \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \partial_\mu \bar{X}^+ X^0 + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + \partial_\mu \bar{X}^0 X^+ + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + \partial_\mu \bar{X}^- X^0 + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0) + \partial_\mu \bar{X}^0 X^- + ig s_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} \bar{X}^0 X^0 H) + \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}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + igM s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
\end{aligned}$$

¡Gracias por vuestra atención!

El Modelo Estándar

Avelino Vicente

[@AvelinoQuantum](#)

Instituto de Física Corpuscular (CSIC / U. Valencia)

IFIC Summer School 2026

Valencia

Julio 2026

¿De qué va esta charla?

- Es una charla teórica

No obstante, se mencionarán algunos experimentos cruciales

- El objetivo es que los asistentes adquieran nociones sobre el Modelo Estándar y sus problemas

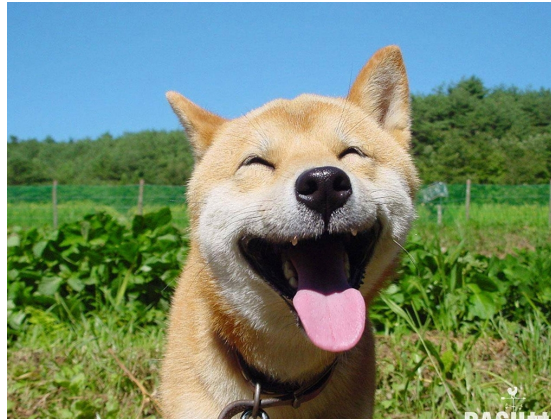
Los problemas del ME son los que motivan la investigación moderna

- El nivel será bajo, siendo más importante captar la esencia que los detalles técnicos

No hay que alarmarse si hay detalles que no se entienden

Plan

- **Parte 1** : Introducción al Modelo Estándar [75%]



- **Parte 2** : Los problemas del Modelo Estándar [25%]



Referencias avanzadas

Notas

“The Standard Model and beyond”, A. Vicente,
<https://avvicente.wordpress.com/courses/>



Libros

“Gauge theory of elementary particle physics”, Cheng & Li
“Gauge theories of the strong, weak and electromagnetic interactions”, Quigg
“Gauge theories in particle physics. A practical introduction”, Volumen 2,
Aitchison & Hey

Artículos

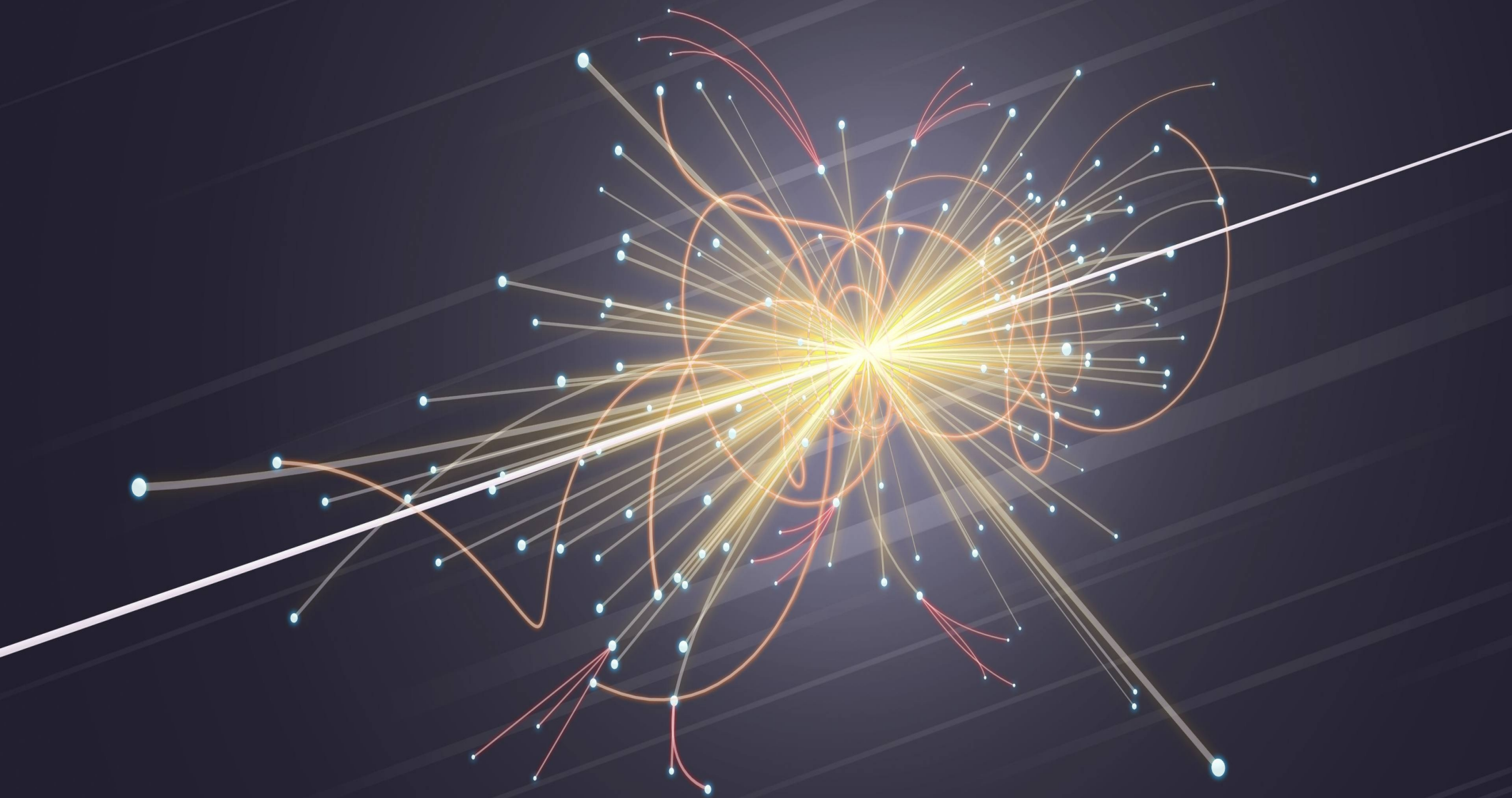
Standard Model: an introduction, S. F. Novaes [[arXiv:hep-ph/0001283](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0001283)]
The need for the Higgs boson in the SM, J. C. Romão [[arXiv:1603.04251](https://arxiv.org/abs/1603.04251)]
The making of the Standard Model, S. Weinberg [[arXiv:hep-ph/0401010](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0401010)]

¡Comencemos!



Reglas:

- Podéis (y debéis) hacer preguntas siempre que haya dudas
- Sugerencia: los estudiantes más avanzados pueden consultar las referencias para profundizar más
- Intentad siempre entender la idea fundamental aunque algún detalle técnico no haya quedado completamente claro



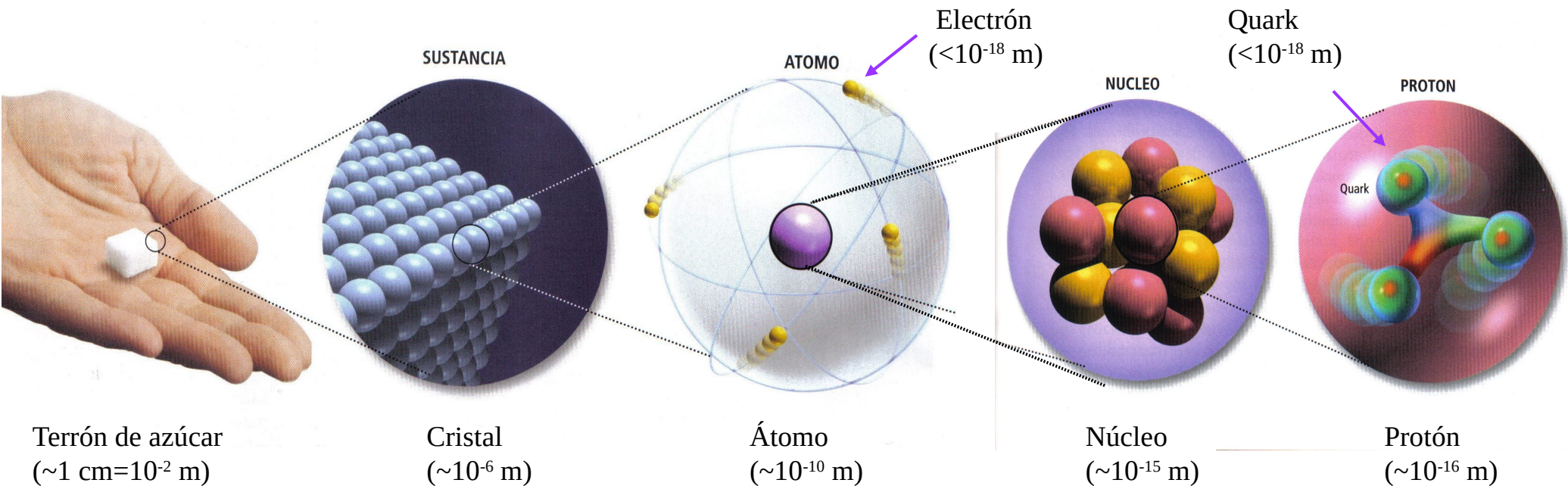
La física de partículas

¿De qué está hecho TODO?



Los constituyentes de la materia

Moléculas, átomos, protones, electrones, quarks...



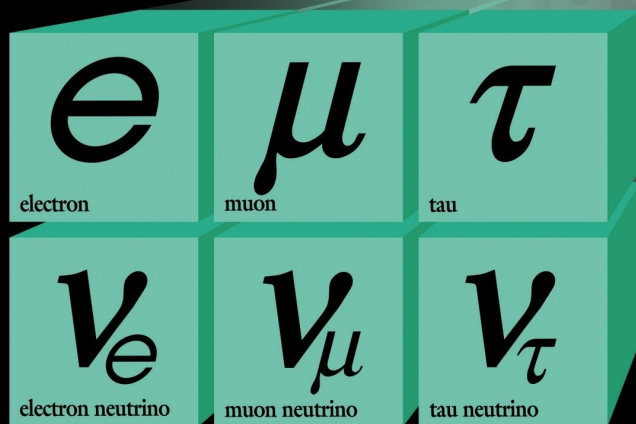
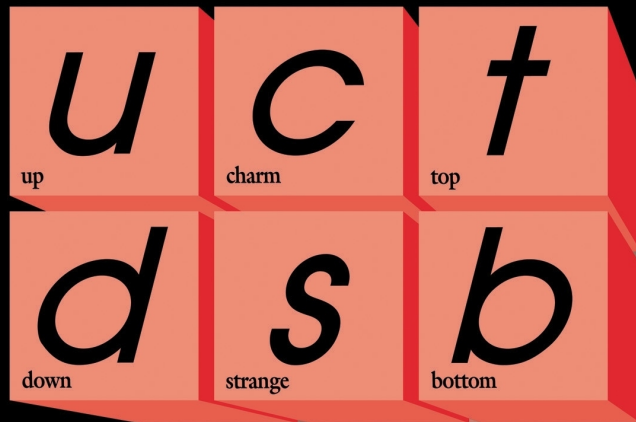
De mayor a ...

... a menor tamaño



Fermions: spin = 1/2 particles

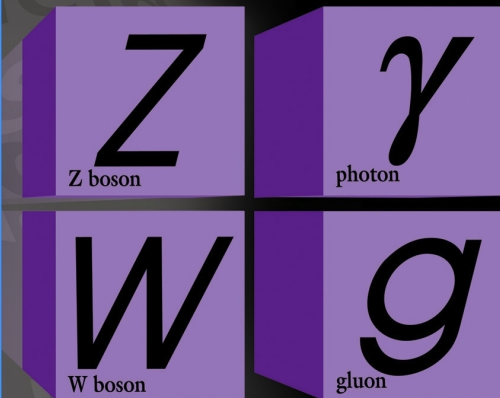
Quarks



Leptons

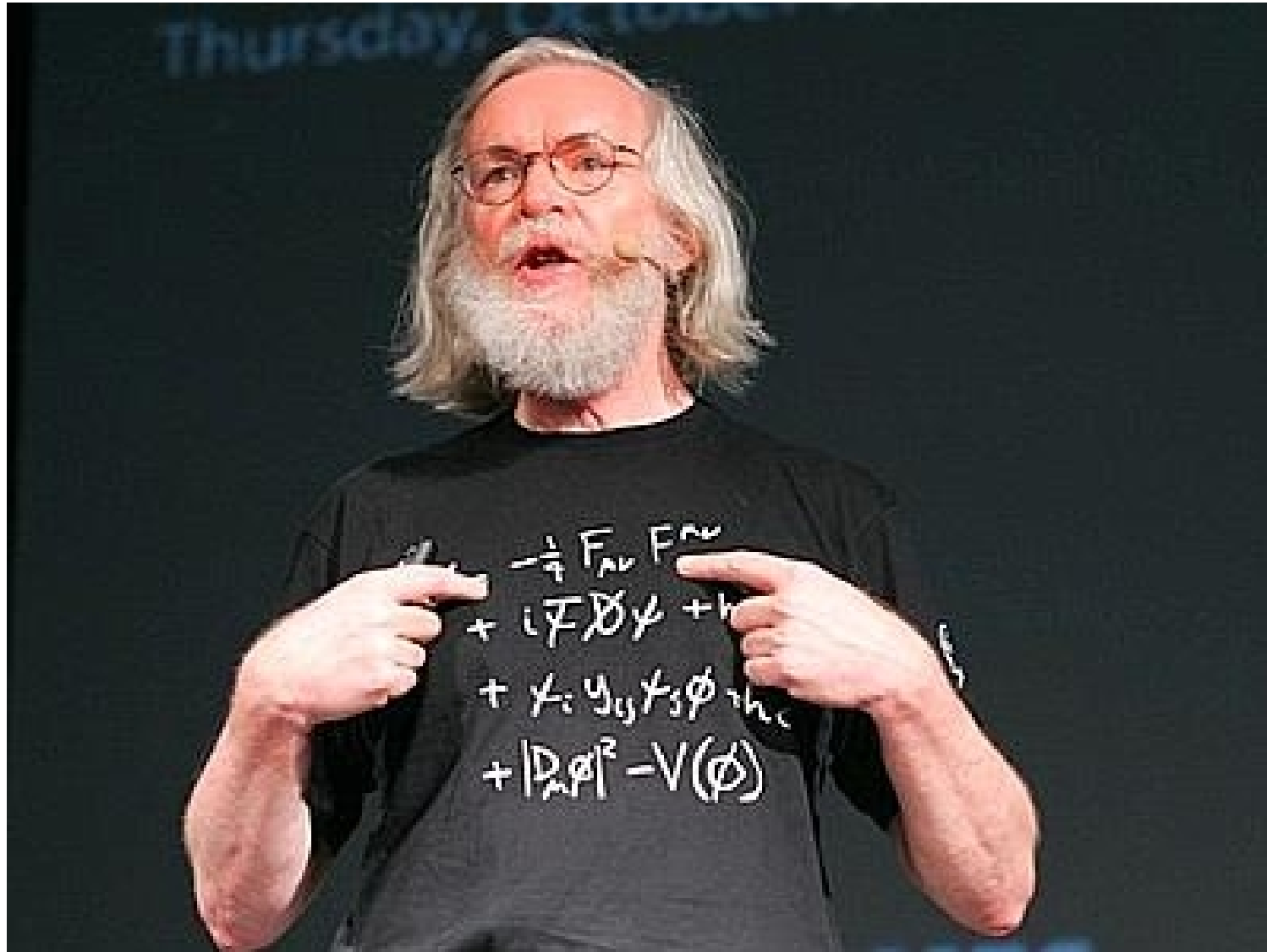
Vector Bosons: spin = 1 particles

Forces



Higgs Boson:
spin = 0
fundamental
scalar particle

John Ellis
King's College London



**Física
Experimental**

```
graph TD; A([Física Experimental]) <--> B[Física de partículas]; B <--> C([Física Teórica]);
```

The diagram illustrates the interconnectedness of three fields in physics. At the top, 'Física Experimental' is enclosed in an orange oval. In the center, 'Física de partículas' is contained within a blue rounded rectangle. At the bottom, 'Física Teórica' is enclosed in an orange oval. Double-headed blue arrows connect the top oval to the central rectangle, and the central rectangle to the bottom oval, indicating a reciprocal relationship between all three fields.

Física de partículas

**Física
Teórica**

**Física
Experimental**



Física de partículas



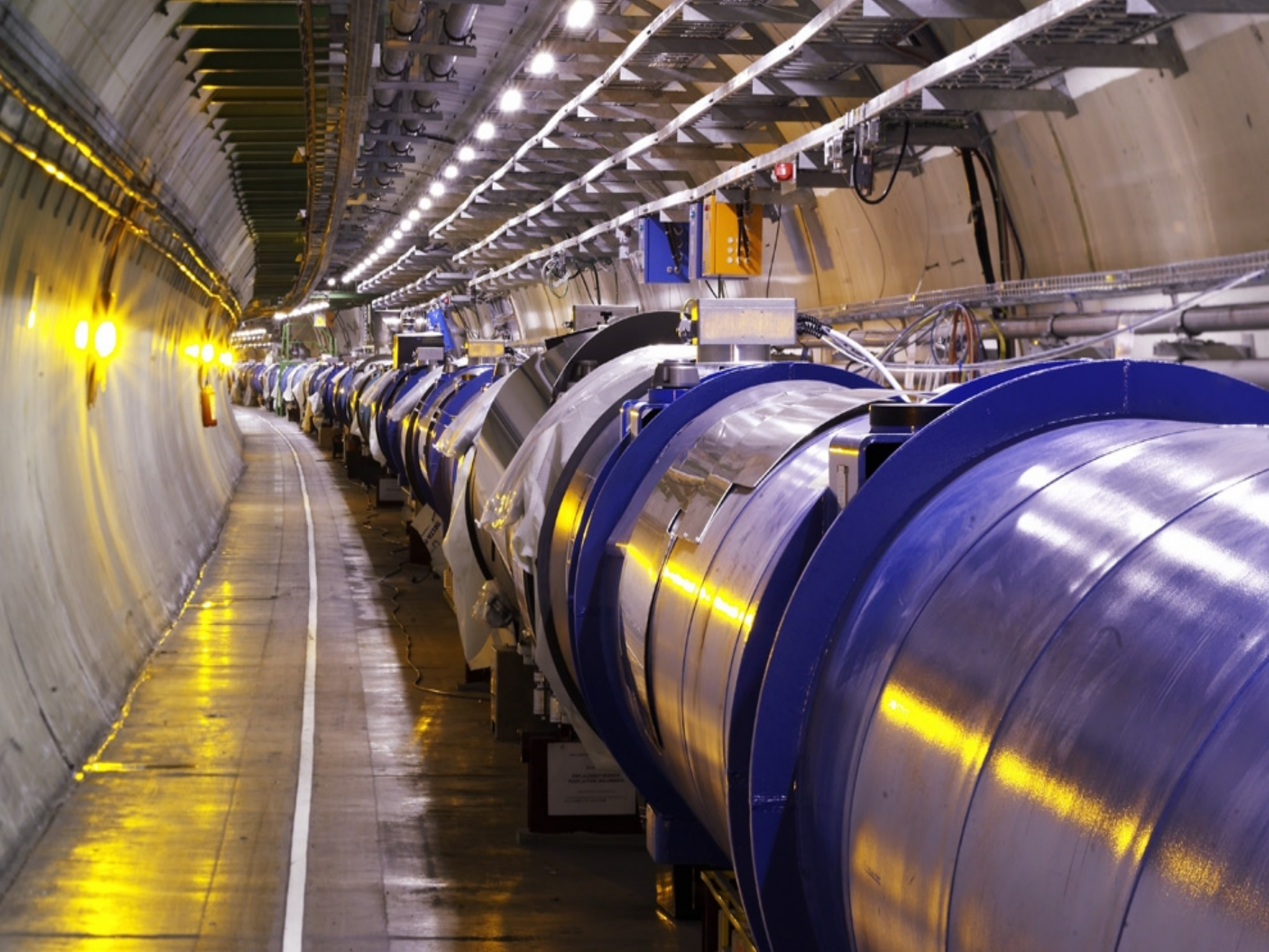
**Física
Teórica**



LHC

El instrumento científico más complejo jamás construido

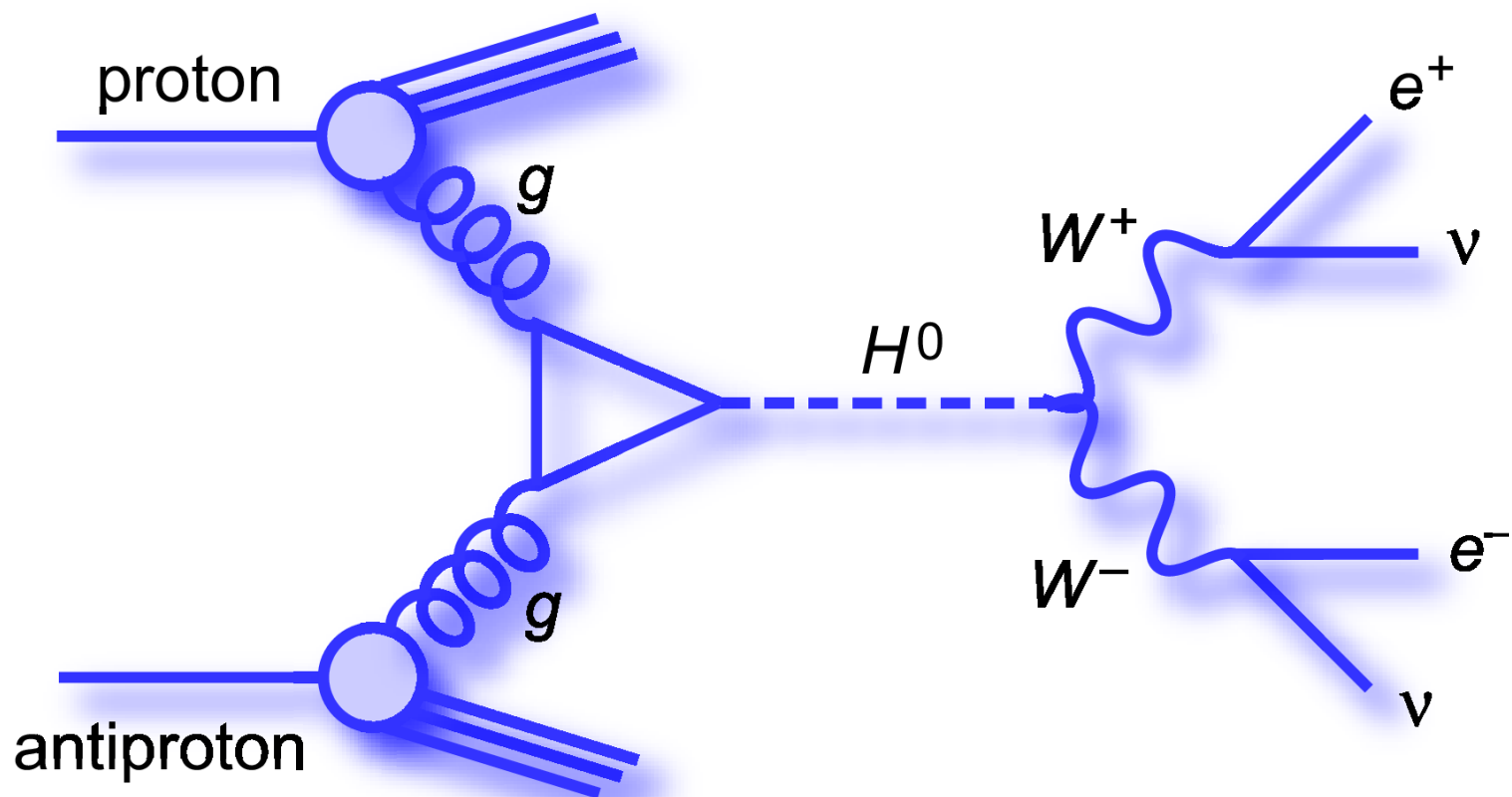






El LHC en números

Circunferencia	27 km	
Profundidad máxima	175 m	
Coste de construcción	~ 4000 millones de euros	
Tiempo de construcción	14 años	
Científicos e ingenieros	~ 10.000 personas de unos 100 países	
Velocidad máxima de los protones	299.789.760 m/s	99.9999991% de la velocidad de la luz, sólo 3 m/s más lento
Vueltas que da un protón cada segundo	11.000	En 10 horas, el haz recorre una distancia equivalente a ir Neptuno y volver
Número de protones por “paquete”	100.000 millones	El haz contiene unos 3000 paquetes
Temperatura	1,9 K	Más frío que el espacio exterior (que está a 2,7 K)
Presión	10^{-13} atmósferas	Más baja que la presión atmosférica en la Luna
Datos generados	30 petabytes/año	Unos 1,2 millones de discos blu-ray al año



El modelo estándar

El Modelo Estándar

¿Qué partículas (fundamentales) existen y qué propiedades tienen?

¿Cómo interaccionan unas partículas con otras?

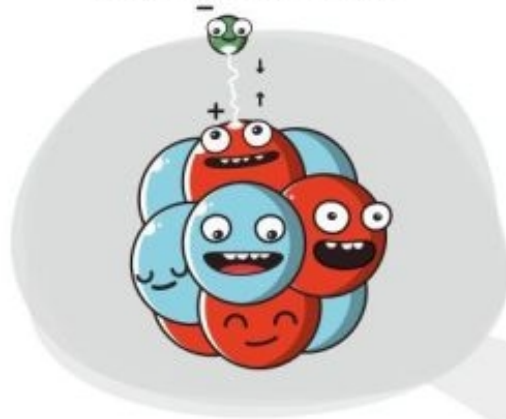
Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)					
	I	II	III		
mass	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 γ photon	SCALAR BOSONS
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e electron neutrino	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	GAUGE BOSONS

4 fuerzas en el universo

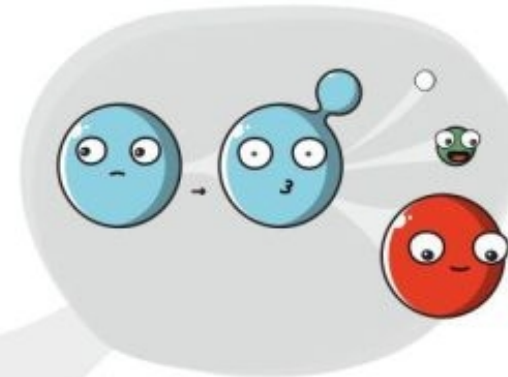
Electromagnetismo (Fotón)

Mantiene unido el átomo y las moléculas entre sí.



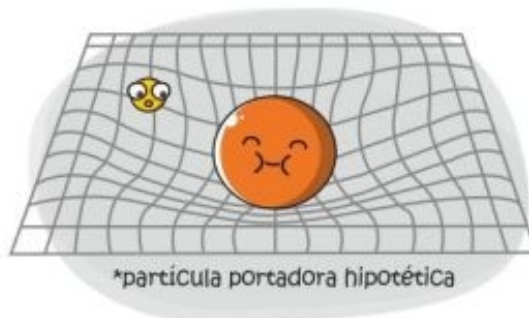
Nuclear Débil (Bosones W y Z)

Provoca algunos tipos de desintegraciones radioactivas, incluido el decaimiento Beta.



Gravedad (Gravitón*)

Afecta a todas las partículas y rige el movimiento de los astros.



*partícula portadora hipotética

Nuclear fuerte (Gluón)

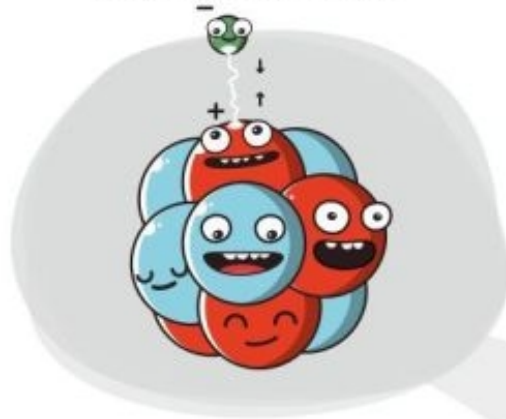
Mantiene unido, protones y neutrones, en el núcleo atómico.



4 fuerzas en el universo

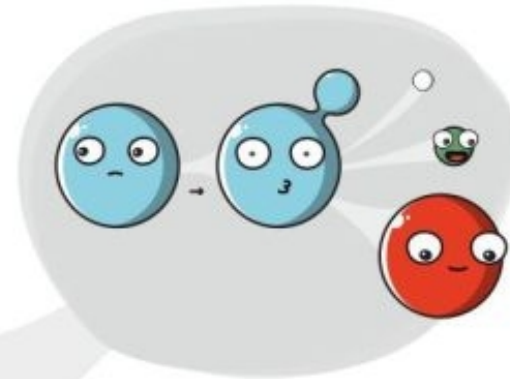
Electromagnetismo (Fotón)

Mantiene unido el átomo y las moléculas entre sí.



Nuclear Débil (Bosones W y Z)

Provoca algunos tipos de desintegraciones radioactivas, incluido el decaimiento Beta.



La gravedad no
está incluida en el
Modelo Estándar

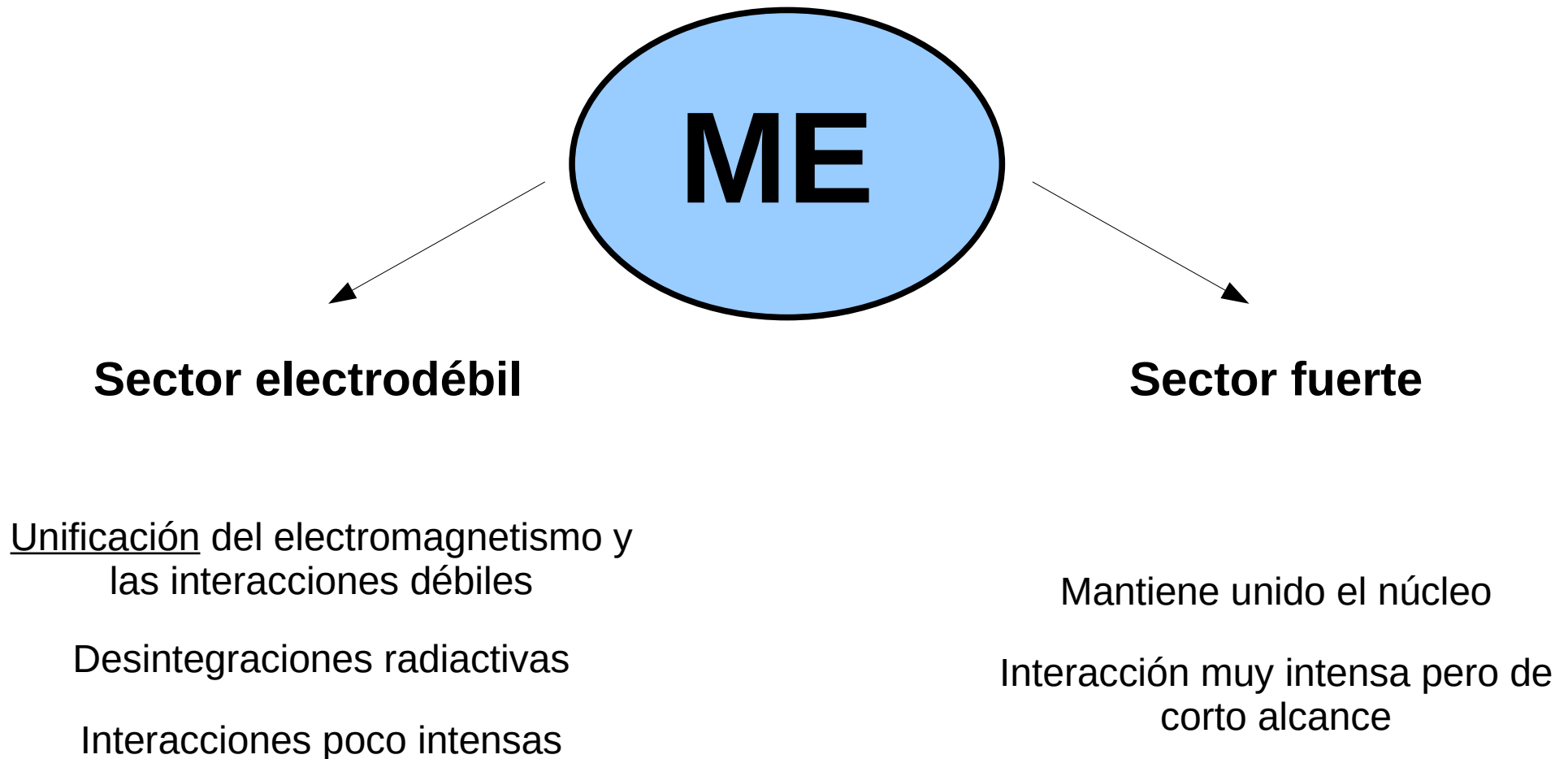


Nuclear fuerte (Gluón)

Mantiene unido, protones y neutrones,
en el núcleo atómico.



Electrodébil + Fuerte



Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)					
	I	II	III		
mass	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 γ photon	SCALAR BOSONS
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e electron neutrino	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	GAUGE BOSONS

Los quarks

¿Son los **protones** y **neutrones** partículas fundamentales
... o tienen estructura interna?

Los quarks

¿Son los **protones** y **neutrones** partículas fundamentales
... o tienen estructura interna?

Modelo de quarks

1964

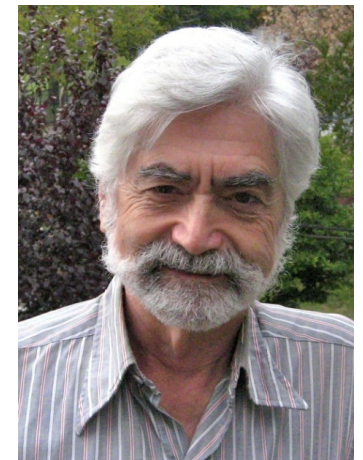
Clasificación del “zoo de partículas”

Regularidades que se pueden explicar si
protones y neutrones están formados por
quarks

¡Muy similar a la
tabla periódica de Mendeléyev!



Murray Gell-Mann

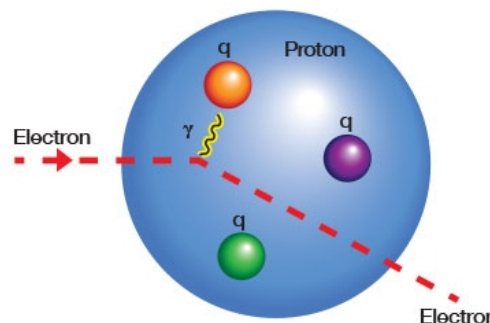


George Zweig



James Bjorken

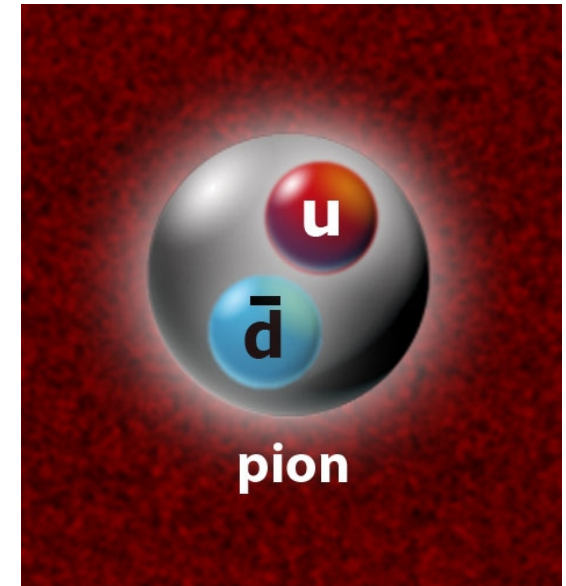
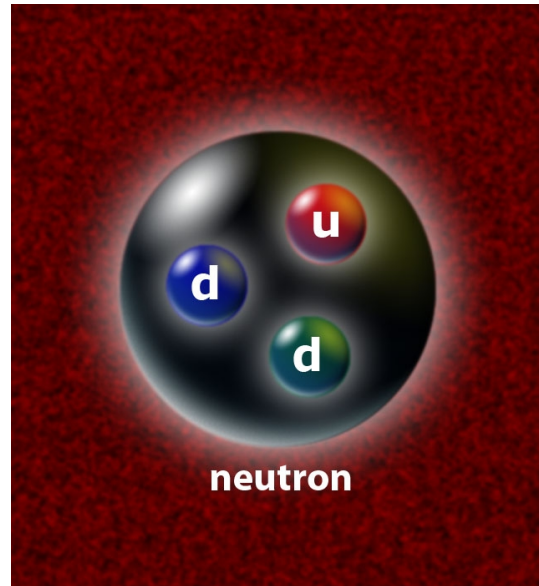
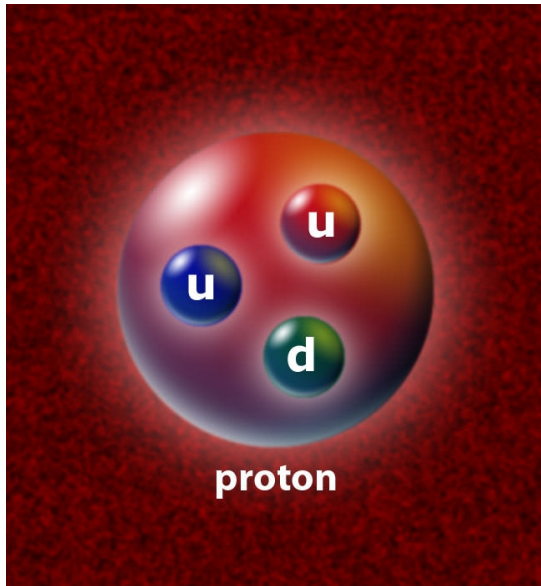
Dispersión inelástica profunda



**SLAC
1968**

¡Muy similar al
**experimento de
Rutherford!**

Los quarks



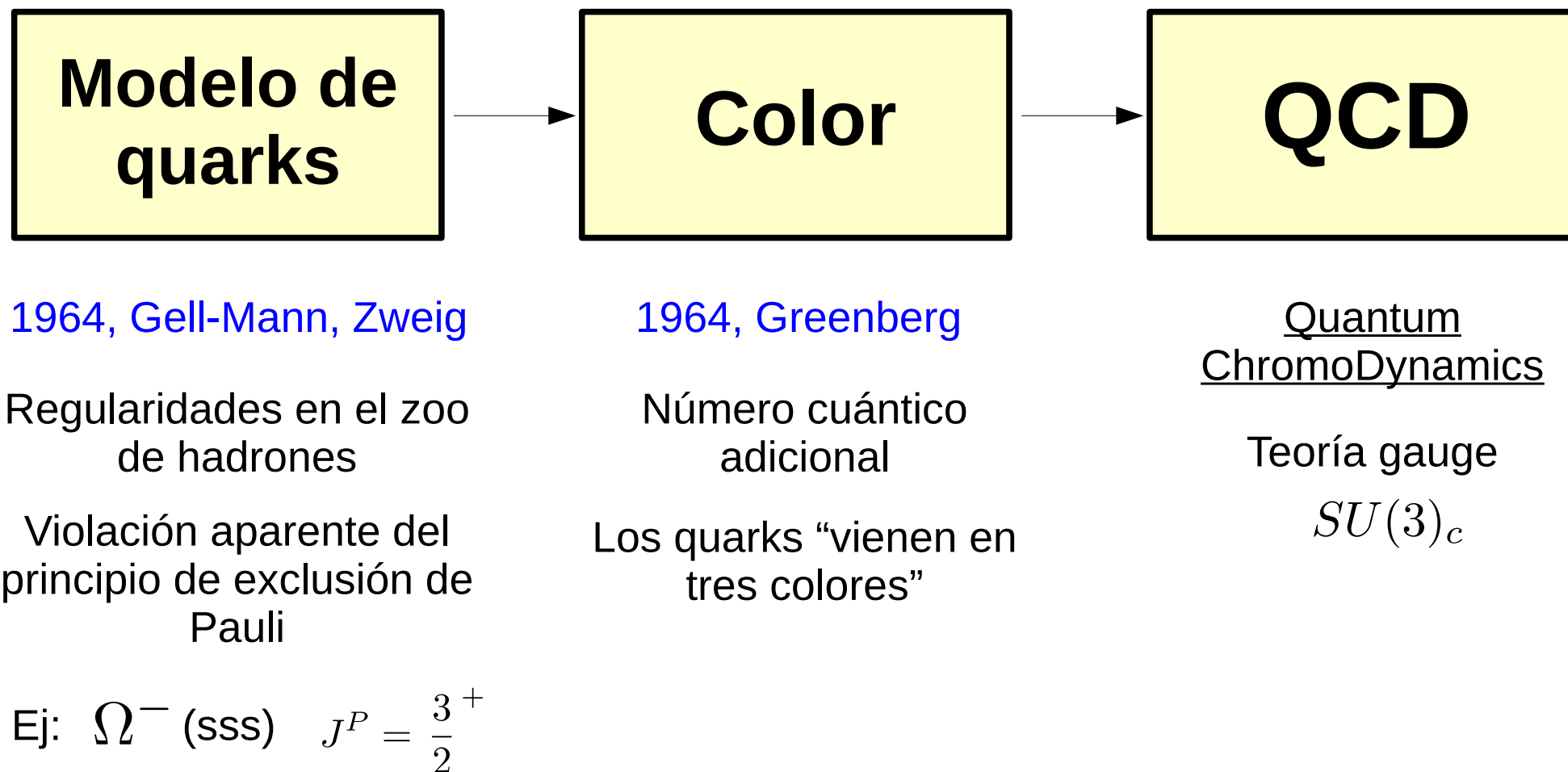
Hadrones: partículas formadas por quarks

Ejemplos

Bariones = 3 quarks —————> protones y neutrones

Mesones = quark + antiquark —————> piones

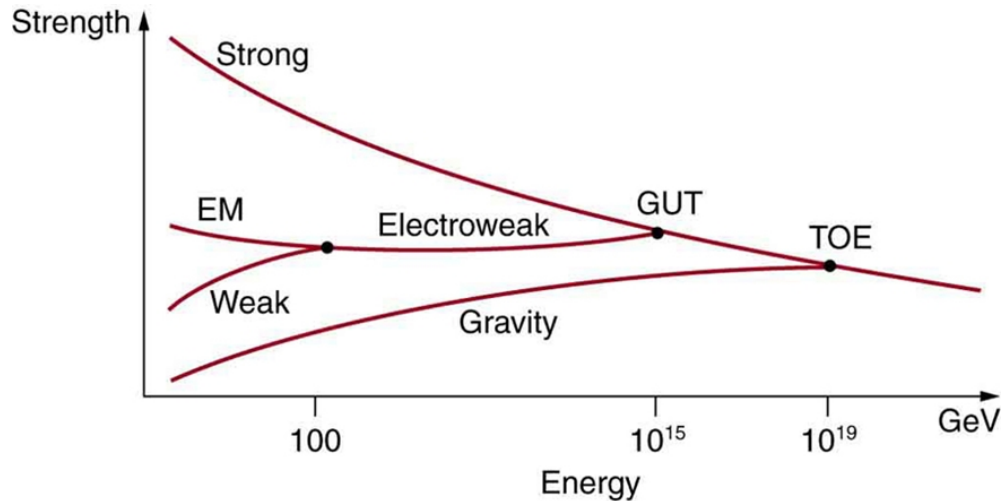
El sector fuerte



Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)					
	I	II	III		
mass	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 γ photon	SCALAR BOSONS
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e electron neutrino	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	GAUGE BOSONS

El sector electrodébil



Unificación del
electromagnetismo y las
interacciones débiles

La teoría estándar de la
interacción electrodébil

60's
Glashow, Weinberg, Salam



Sheldon Lee
Glashow

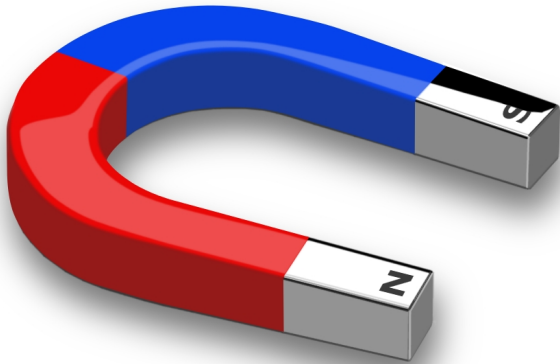


Steven
Weinberg



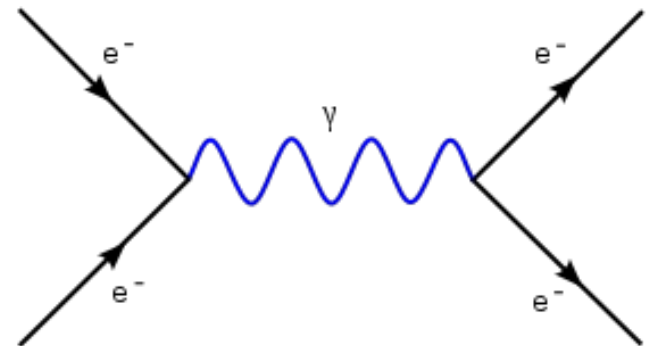
Abdus
Salam

El electromagnetismo



Electricidad, magnetismo, óptica...

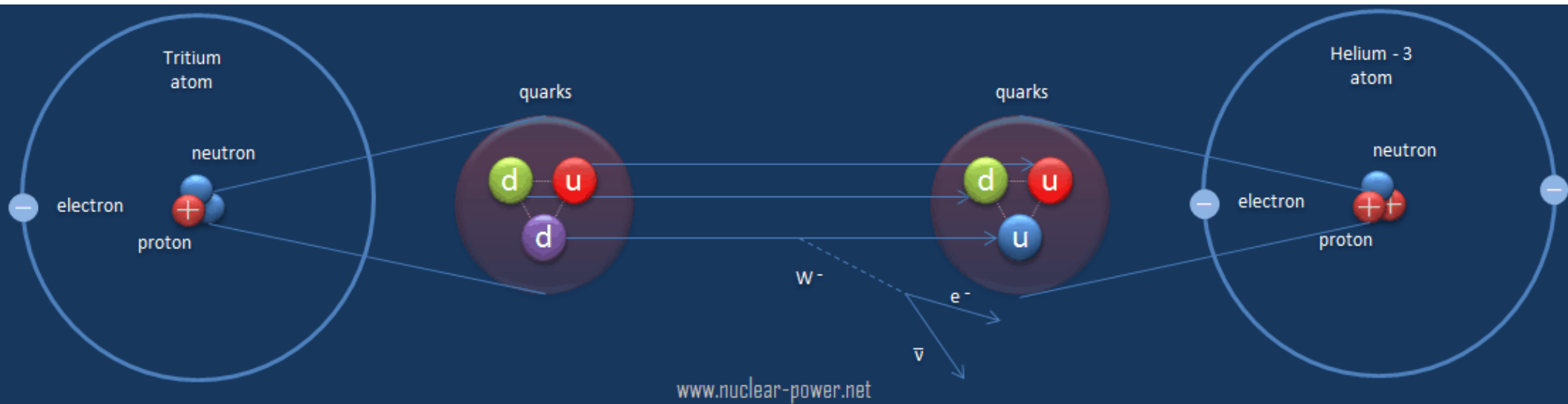
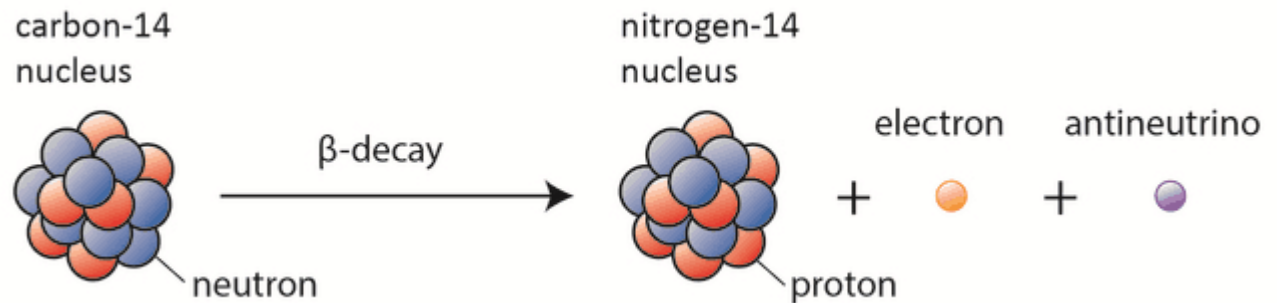
... caras diferentes de la misma moneda



Las interacciones débiles: la desintegración beta

Radiactividad (1896, Becquerel)

Desintegración β



Los neutrinos

Radiactividad (1896, Becquerel)

Desintegración β

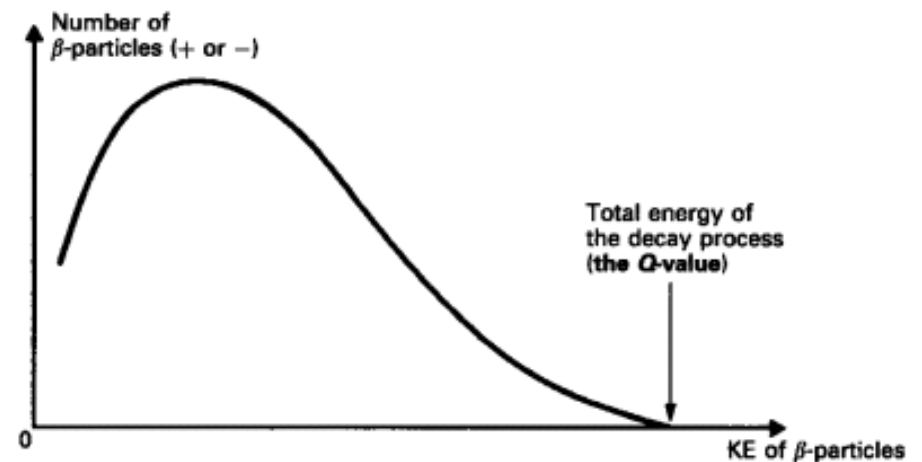
1914, Chadwick

Los electrones emitidos tienen un espectro continuo

Los electrones pueden tener **cualquier energía** entre 0 y un determinado valor máximo

¿Interpretación?

$n \rightarrow p^+ e^-$?



¡Problema!

¡No respeta la ley de conservación de la energía!



Los neutrinos

Estimadas damas y caballeros radiactivos...

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Oloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen dürfte von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.



4 de diciembre de 1930
Carta a sus colegas en Tübingen

1930
Wolfgang Pauli

Zürich, 4 de diciembre de 1930

Instituto de Física de la ETH
Gloriastrasse
Zürich

Estimadas damas y caballeros radiactivos,

Tal y como el portador de estas líneas, al que graciosamente les pido que escuchen, les explicará en más detalle, motivado por las “erróneas” estadísticas de los núcleos de N y Li-6 y al espectro beta continuo, he encontrado un remedio desesperado para salvar el “teorema de intercambio” de la estadística y la ley de conservación de la energía. A saber, la posibilidad de que en el núcleo puedan existir partículas eléctricamente neutras, a las cuales llamo neutrones, que tienen espín $1/2$, que obedecen el principio de exclusión y que difieren de los cuantos de luz en que no viajan a la velocidad de la luz.

(.../...)

De momento no me atrevo a publicar nada sobre esta idea, y confiadamente vuelvo primero hacia ustedes, estimada gente radiactiva, con la cuestión sobre cómo de fácil sería encontrar evidencia experimental para dicho neutrón si tuviera una habilidad para atravesar [material] igual o tal vez 10 veces superior a un rayo gamma.

Admito que mi remedio puede parecer casi improbable puesto que estos neutrones habrían sido vistos ya, si existen, desde hace mucho tiempo. (.../...) Por lo tanto, estimada gente radiactiva, escruten y juzguen. Desafortunadamente, yo no puedo estar personalmente en Tübingen puesto que soy indispensable aquí en Zürich debido a un baile en la noche del 6 al 7 de diciembre. Con mis mejores deseos para ustedes, y también para el Sr. Back, su humilde servidor

firmado W. Pauli

Zürich, 4 de diciembre de 1930

Instituto de Física de la ETH
Gloriastrasse
Zürich

Estimadas damas y caballeros radiactivos,

Tal y como el portador de estas líneas, al que graciosamente les pido que escuchen, les explicará en más detalle, motivado por las “erróneas” estadísticas de los núcleos de N y Li-6 y al espectro beta continuo, he encontrado un neutrino para salvar la conservación de la energía y la ley de conservación de la energía. A saber, la posibilidad de que en el núcleo puedan existir partículas eléctricamente neutras, a las cuales llamo neutrinos, que tienen espín 1/2, que obedecen el principio de exclusión y que difieren de los cuantos de luz en que moviéndose a la velocidad de la luz.

**Los neutrinos fueron descubiertos en 1956.
A día de hoy siguen siendo unas partículas
muy elusivas de las que todavía
desconocemos muchas propiedades.**

(.../...)

De momento no me atrevo a publicar nada sobre esta idea, y confiadamente vuelvo primero hacia ustedes, estimada gente radiactiva, con la cuestión sobre cómo de fácil sería encontrar evidencia experimental para dicho neutrón si tuviera una habilidad para atravesar [material] igual o tal vez 10 veces superior a un rayo gamma.

Admito que mi remedio puede parecer casi improbable **V**uesto que estos neutrones habrían sido vistos ya, si existen, desde hace mucho tiempo. (.../...) Por lo tanto, estimada gente radiactiva, escruten y juzguen. Desafortunadamente, yo no puedo estar personalmente en Tübingen puesto que soy indispensable aquí en Zürich debido a un baile en la noche del 6 al 7 de diciembre. Con mis mejores deseos para ustedes, y también para el Sr. Back, su humilde servidor

firmado W. Pauli

A portrait of Jennifer Lopez dressed as Queen Guinevere from the 2006 film 'The Knight's Tale'. She is wearing a crown with a large diamond, a gold chainmail collar, and a gold shawl. The background is a gold, ornate pattern.

¿Y el anillo Higgs pa' cuándo?

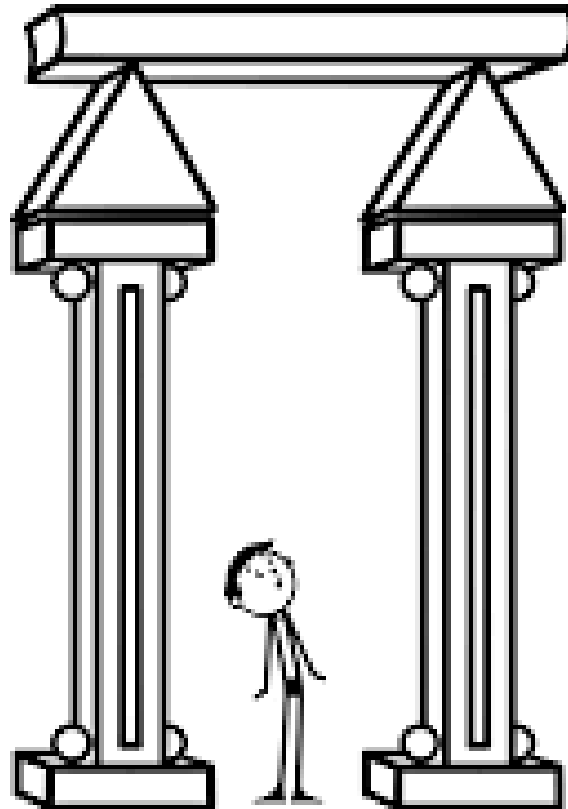
ME

Teorías gauge

Simetría

Bosones W y Z

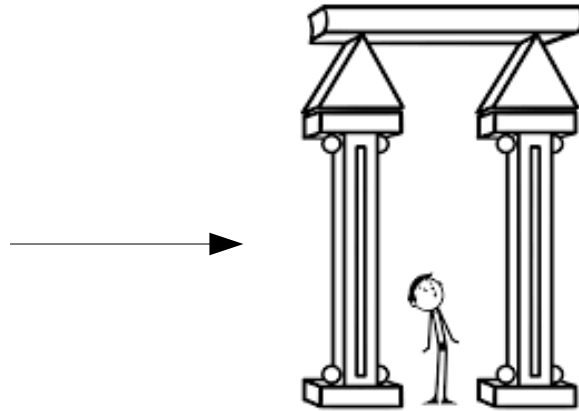
Unificación



Ruptura espontánea de la simetría

Mecanismo de Higgs

Bosón de Higgs



Simetrías

Hecho diario de Chuck Norris

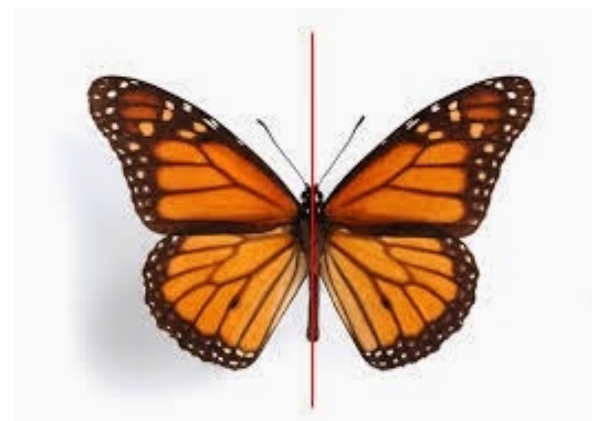
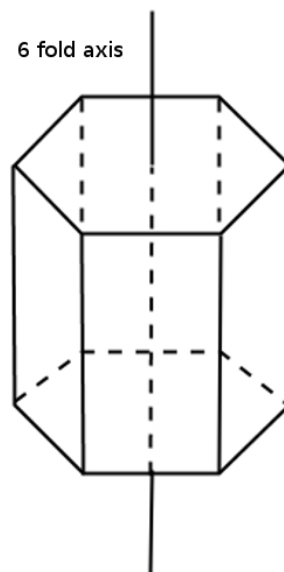
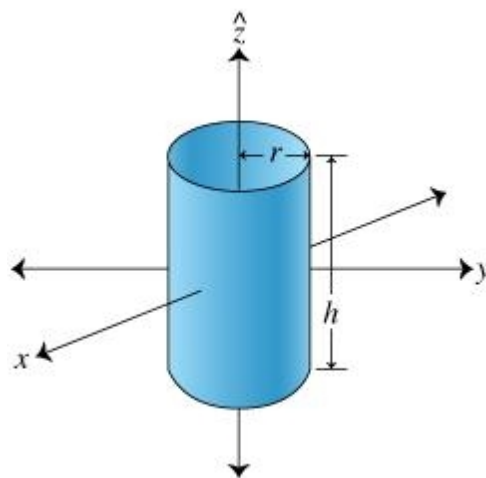
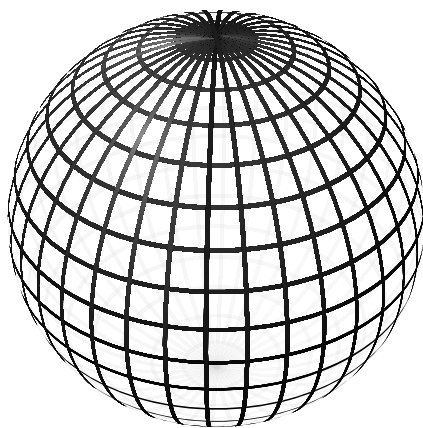
*Chuck Norris perdió la virginidad
antes que su padre*



¿Qué es una simetría?

¿Qué es una simetría?

Simetría = transformación que deja al sistema invariante



Simetrías

Las simetrías tienen un papel protagonista en la **física moderna**

Continuas

Traslaciones
Rotaciones
Lorentz
Gauge
Sabor

Galleria Vittorio Emanuele II



Discretas

Paridad
Conjugación de carga
CP
CPT
 Z_2

Milán

Simetrías

Teorema de Noether

Las simetrías implican
cantidades conservadas

Emmy Noether



Invariancia bajo traslaciones temporales



Conservación de la **energía**

Invariancia bajo traslaciones espaciales



Conservación del **momento lineal**

Invariancia bajo rotaciones



Conservación del **momento angular**



La simetría del ME

$$\underbrace{SU(3)_c}_{\uparrow} \times \underbrace{SU(2)_L \times U(1)_Y}_{\uparrow}$$

Sector fuerte (QCD) **Sector electrodébil**
Mediadores: **gluones** Mediadores: **W**, **Z**, **fotón**

La simetría gauge impone **reglas de transformación** sobre las partículas del modelo y exige que dichas transformaciones dejen el sistema **invariante**

Determina la forma de las interacciones, es decir, sus mediadores:
W y **Z**, **gluones**, **fotón**

Restringe enormemente las propiedades de las partículas (como su masa)

Leptones

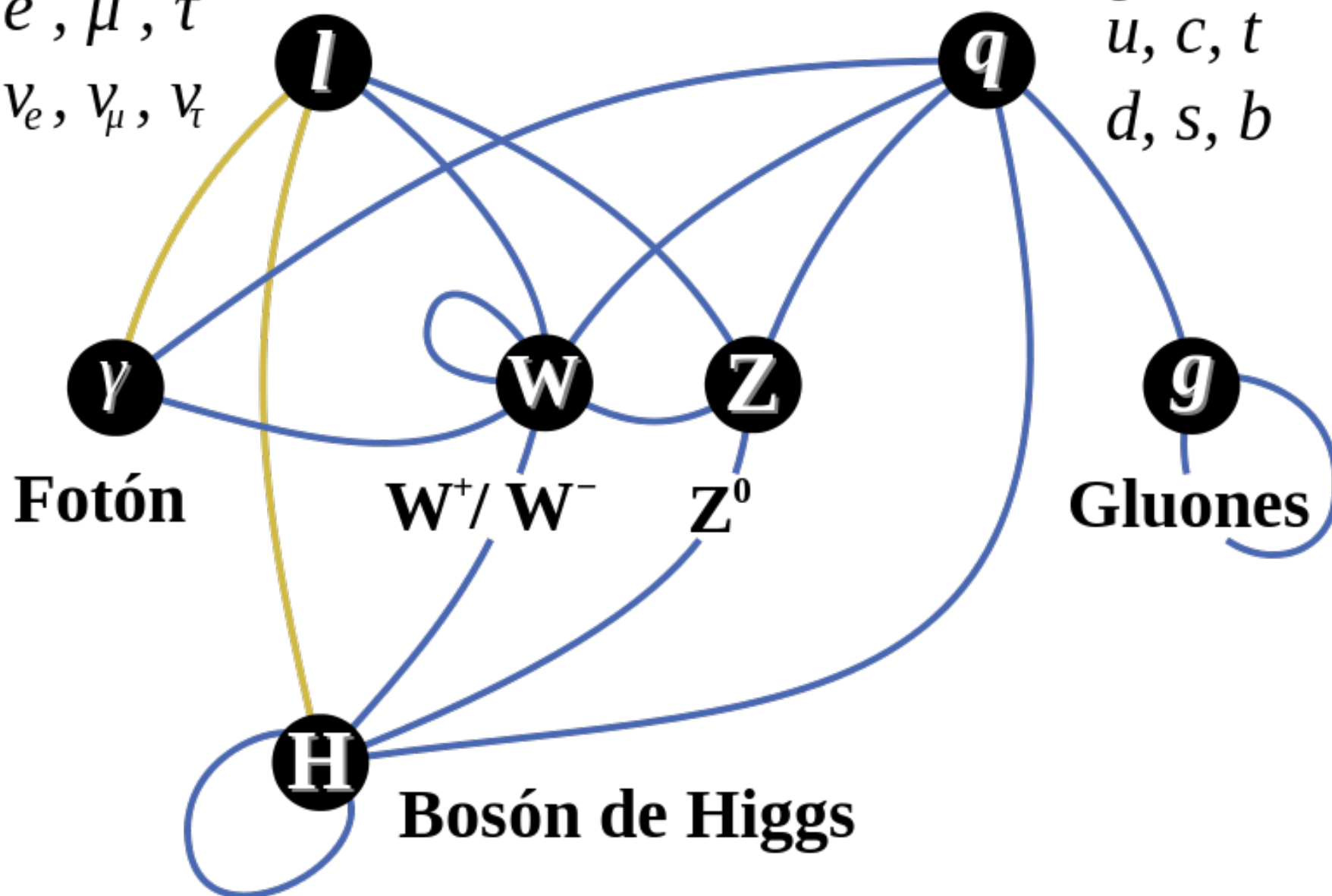
e, μ, τ

ν_e, ν_μ, ν_τ

Quarks

u, c, t

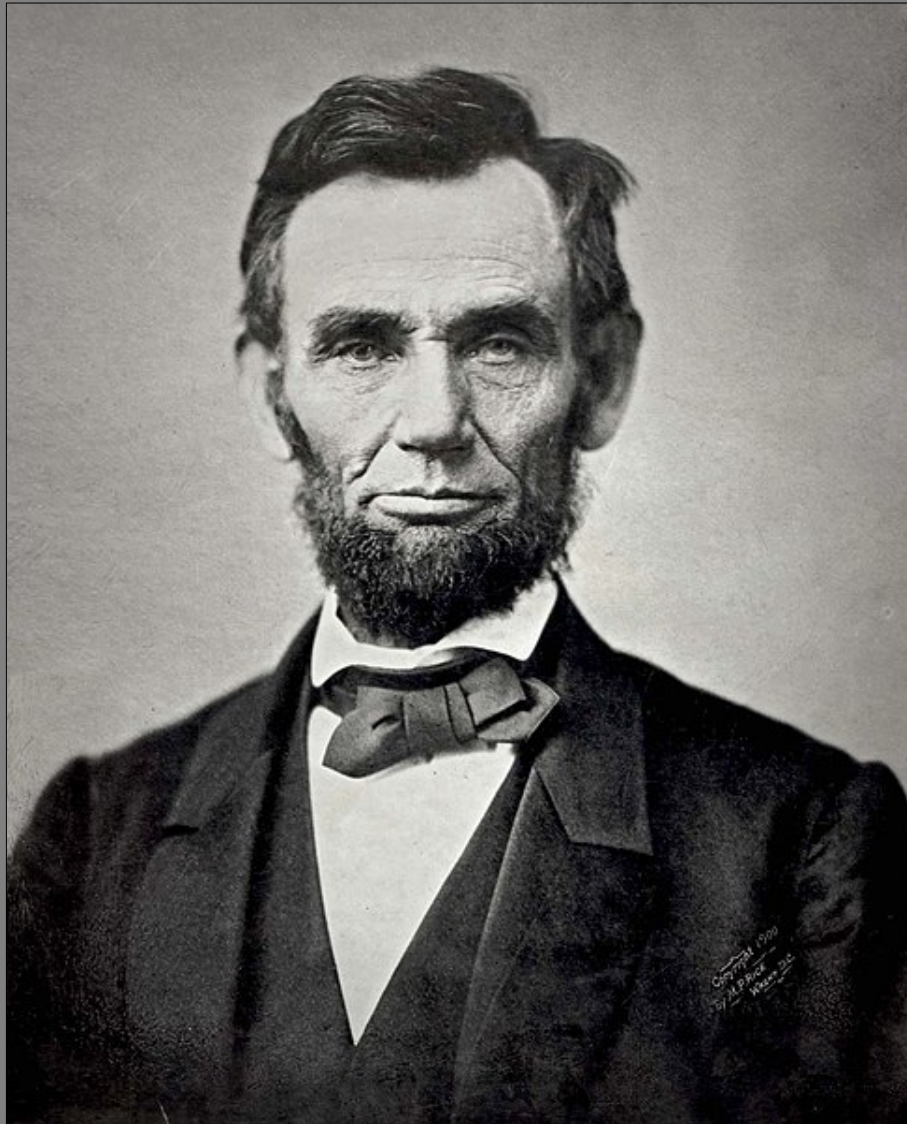
d, s, b





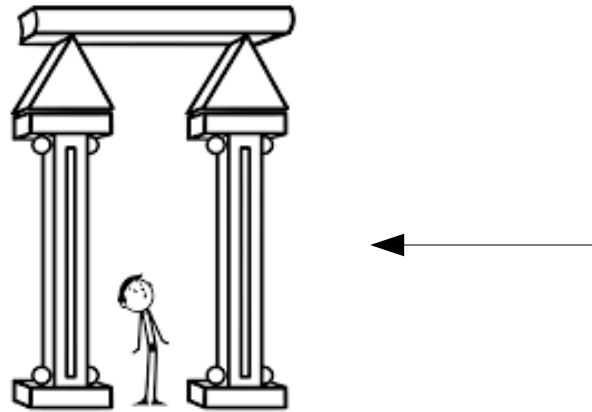
**“Tal vez la Naturaleza
sea fundamentalmente
fea, caótica y
complicada. Pero si es
así, yo me bajo.”**

Steven Weinberg



**“No te creas todo lo que
leas en un PowerPoint
sólo porque tengas una
foto con una frase al
lado.”**

Abraham Lincoln

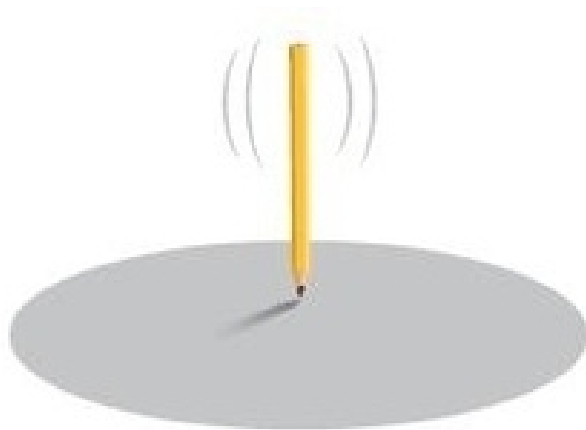


Ruptura espontánea de la simetría

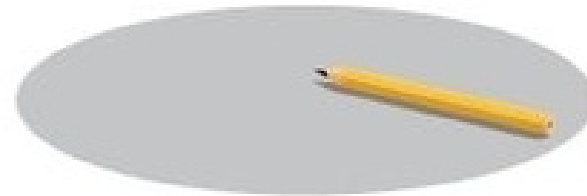
Ruptura espontánea de la simetría

La ruptura espontánea de la simetría (RES) es un fenómeno conocido en varias áreas de la **física**

Tiene lugar cuando un sistema es **invariante bajo una simetría** que **no se preserva en su estado fundamental**



Un lápiz sobre su punta es un sistema con una simetría axial perfecta. Todas las direcciones son equivalentes.



Finalmente, el lápiz cae, eligiendo una dirección concreta. La simetría ha quedado **espontáneamente rota**.

¿Es necesaria la RES en el ME?

La simetría del Modelo Estándar es muy restrictiva...
¡predice que todas las partículas tienen **masa cero**!

Yes, this is a **problem**



Fermion				Mass (MeV)			
u	d	e	ν_e	2.3	4.8	0.5	$< 10^{-6}$
c	s	μ	ν_μ	1275	95	105	< 0.2
t	b	τ	ν_τ	173000	4180	1777	< 15.0

Boson				Mass (MeV)			
λ	g	W	Z	0	0	80400	91200

⇒ ¡RES al rescate!

La ruptura espontánea de la simetría deja una huella: el **bosón de Higgs**

Predicho en 1964



Tom Kibble, Gerald Guralnik, Carl Hagen,
François Englert y Robert Brout



Peter Higgs

¿Existe realmente? ¿lo encontraremos?



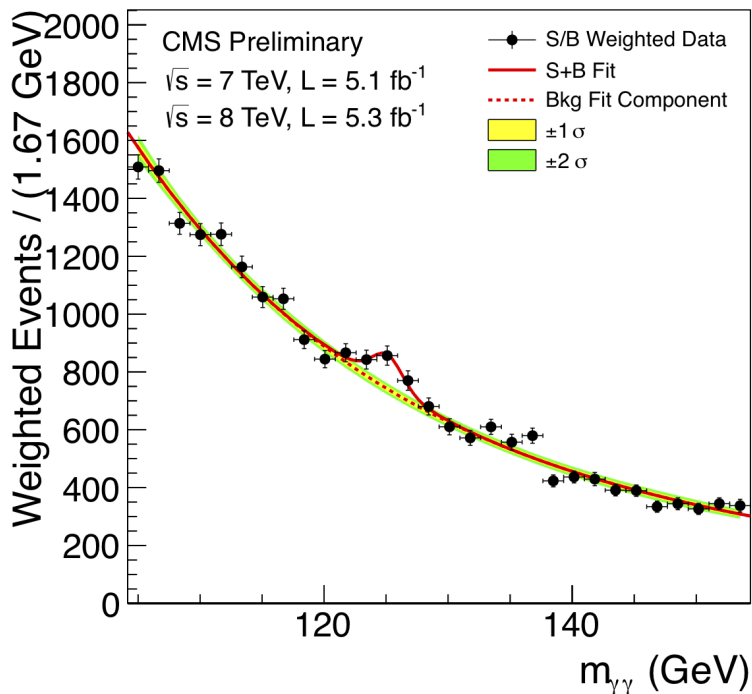




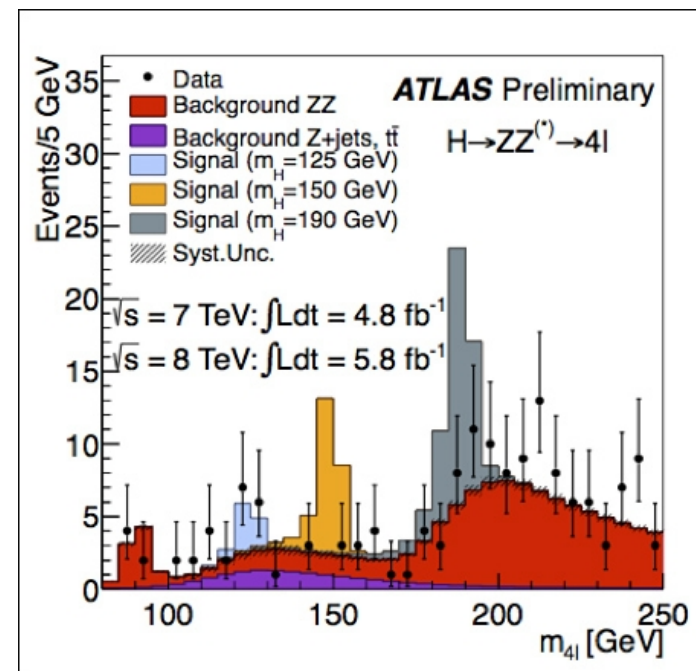
Descubrimiento del bosón de Higgs

- 4 de julio de 2012:

¡El bosón de Higgs descubierto por **ATLAS** y **CMS**!



CMS : $(125.3 \pm 0.6) \text{ GeV}$

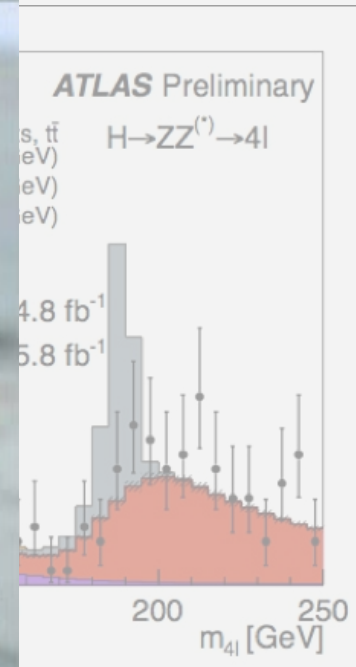
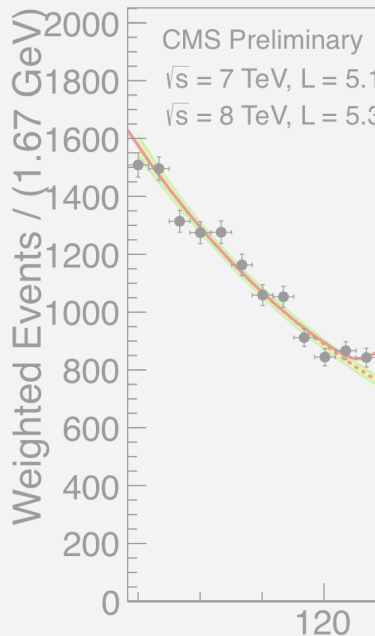


ATLAS : 126.5 GeV

Descubrimiento del bosón de Higgs

- 4 de julio de 2012:

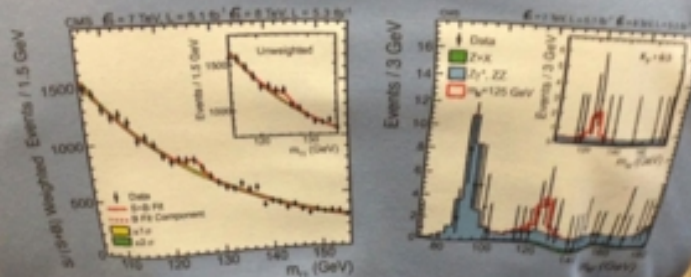
¡El bosón de Higgs descubierto por **ATLAS** y **CMS**!



CMS : $(125.3 \pm 0.6) \text{ GeV}$

ATLAS : 126.5 GeV

WE FOUND A NEW PARTICLE



No nos
pudimos
resistir...

Los problemas del Modelo Estándar



Razones experimentales y teóricas

Señales experimentales

Masas de neutrinos

Materia oscura

Asimetría bariónica del universo

Especulación teórica

Cualquier cosa que puedas imaginar:

Problema de la jerarquía

Unificación

El problema del sabor

...

Más allá del ME

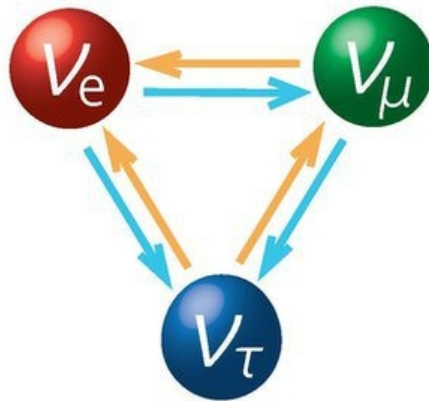
The diagram illustrates the motivations for physics beyond the Standard Model (ME). It features two yellow boxes at the top: 'Señales experimentales' (Experimental signals) on the left and 'Especulación teórica' (Theoretical speculation) on the right. Two large, white, downward-pointing arrows originate from the space between these boxes and converge towards a central blue oval. The oval contains the text 'Más allá del ME' (Beyond the Standard Model). Below the 'Señales experimentales' box, three specific experimental signals are listed: 'Masas de neutrinos' (Neutrino masses), 'Materia oscura' (Dark matter), and 'Asimetría bariónica del universo' (Baryonic asymmetry of the universe). Below the 'Especulación teórica' box, a list of theoretical speculations is provided, starting with 'Cualquier cosa que puedas imaginar:' (Anything you can imagine:), followed by 'Problema de la jerarquía' (Hierarchy problem), 'Unificación' (Unification), 'El problema del sabor' (Flavor problem), and an ellipsis '...'.

Razones experimentales

- 1) Masas de neutrinos**
- 2) Materia oscura**
- 3) Asimetría bariónica del universo**

Razón experimental 1

Masas de neutrinos



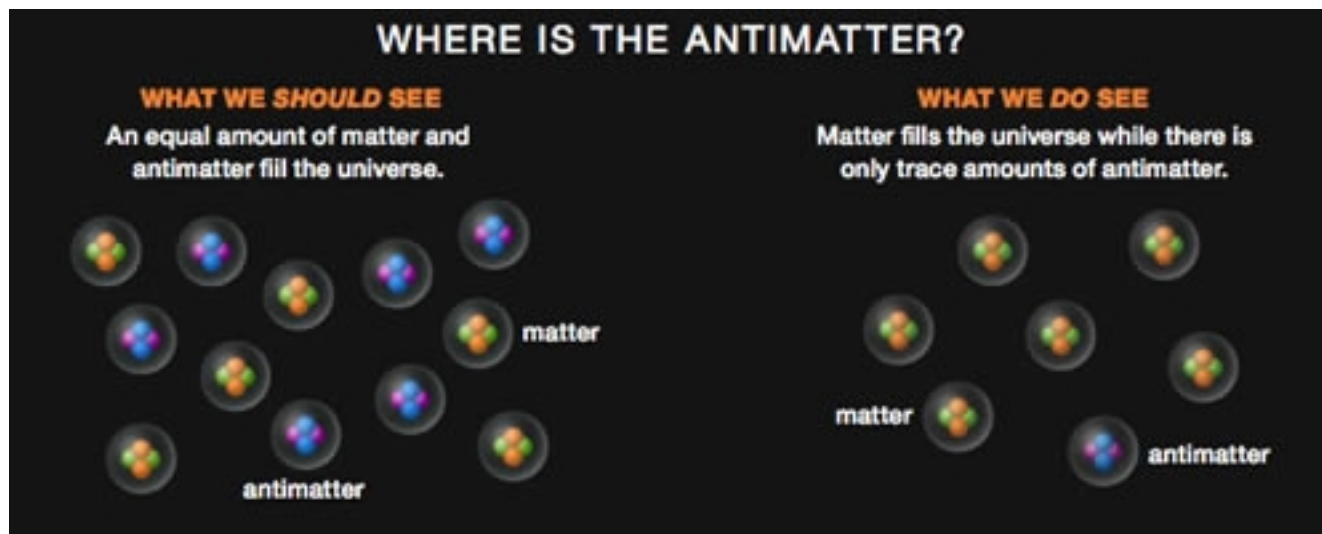
Razón experimental 2

Materia oscura



Razón experimental 3

Asimetría bariónica del universo



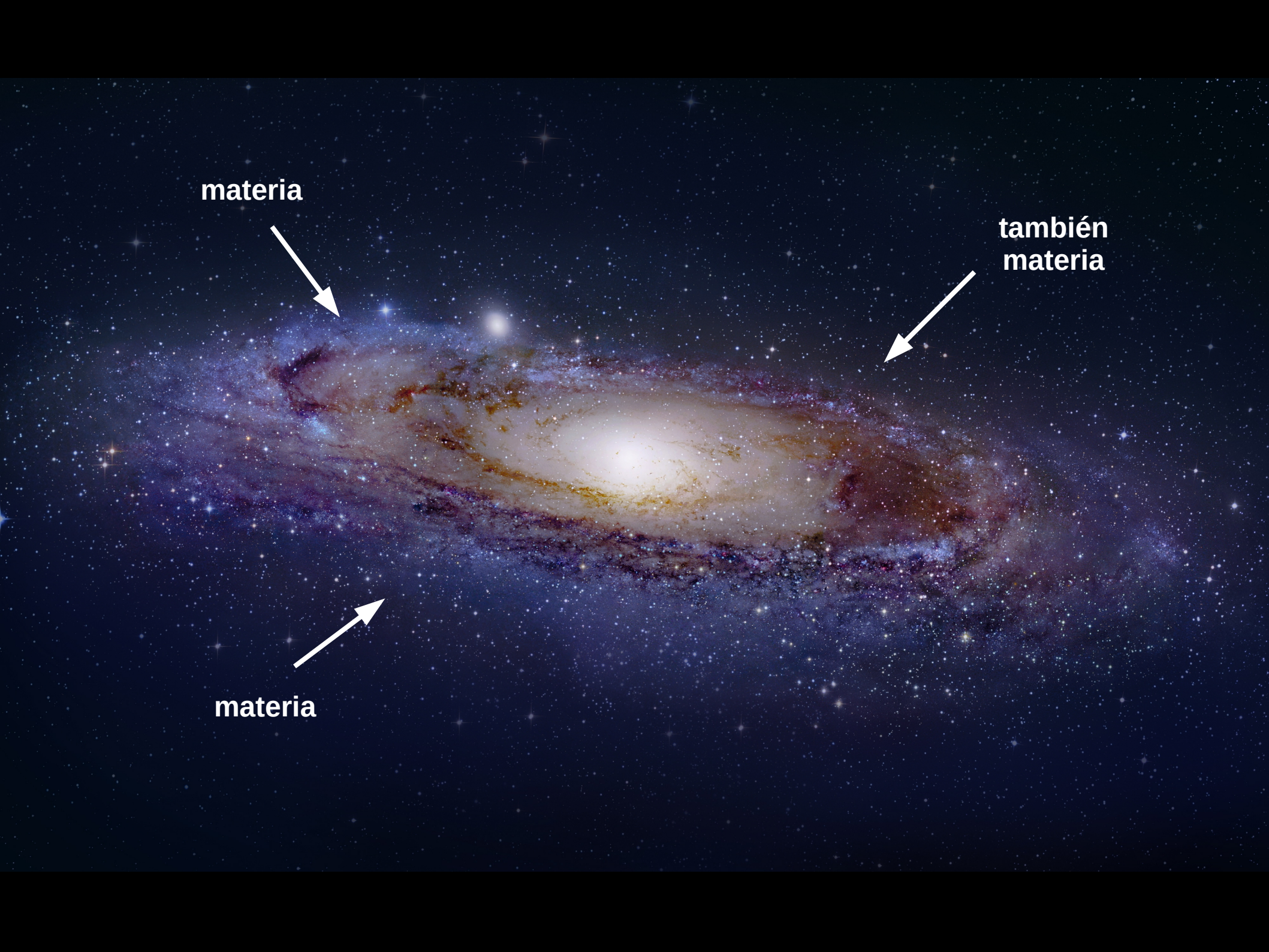
materia



**también
materia**



materia



Condiciones de Sakharov

[1967, Sakharov]

En el ME

- **Violación de B:** el número bariónico debe violarse para partir de un estado con $Y_B = 0$ y llegar al universo actual con $Y_B \neq 0$.
- **Violación de C y CP:** Estas simetrías sirven para distinguir partículas y antipartículas. Si se conservaran, los efectos inversos darían lugar a un efecto neto completamente nulo.
- **Sálida del equilibrio térmico:** En equilibrio térmico no es posible generar una asimetría dado que el proceso directo ($A \rightarrow B$) y el inverso ($A \leftarrow B$) tendrían lugar al mismo ritmo.



Esfalerones



No suficiente



No suficiente
(transición
de fase)



Andrei
Sakharov



Más allá del ME

Razones teóricas

- 1) El problema de la jerarquía**
- 2) Unificación**
- 3) El problema del sabor**

Razón teórica 1

El problema de la jerarquía



El problema de la jerarquía

Tal vez la principal fuerza motora en la física de partículas teórica de las últimas décadas

En el mundo cuántico todo el mundo habla con todo el mundo
De forma indirecta, todas las partículas se afectan entre sí

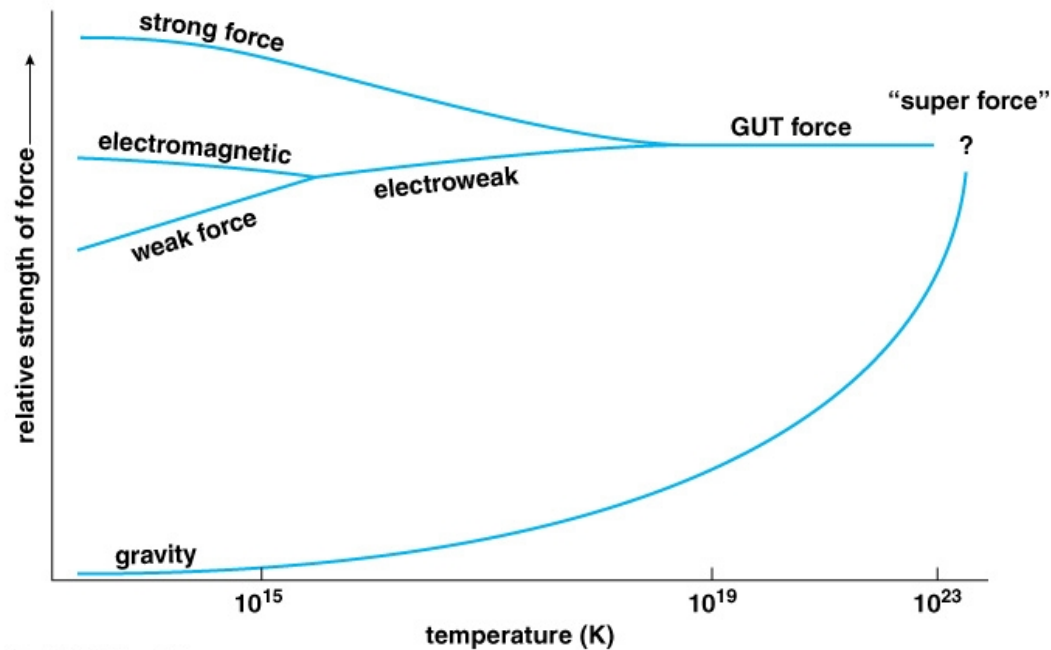
En particular, el **bosón de Higgs** “siente” al resto de partículas, incluyendo las partículas que no conocemos todavía. El resultado es que su **masa** se debería ver afectada y ser MUCHO mayor.

- Supersimetría
- Dimensiones extra
- “Compositeness”
- ...

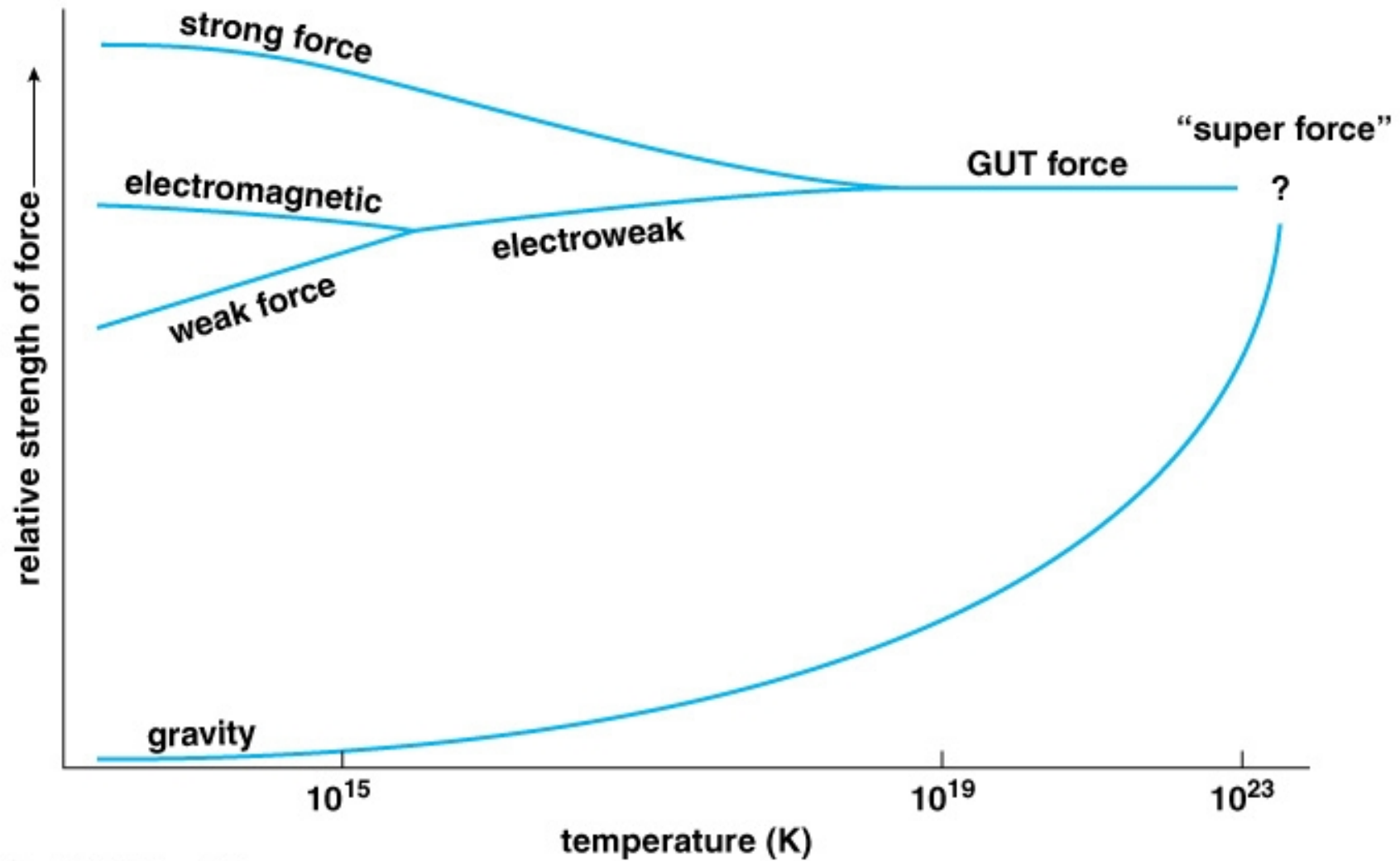
Problema de naturalidad

Razón teórica 2

Unificación



Unificación



Copyright © Addison Wesley.

Razón teórica 3

El problema del sabor



Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)					
	I	II	III		
mass	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 γ photon	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e electron neutrino	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	
					SCALAR BOSONS
				GAUGE BOSONS	

A person with a backpack is walking away from the viewer on a long, straight path that stretches towards a bright sunset. The path is flanked by a calm body of water that reflects the golden light of the sun and the surrounding landscape. In the background, there are rolling hills and mountains under a sky filled with dramatic, colorful clouds. The overall mood is one of adventure and the end of a journey.

¡El viaje sigue!

¡Gracias por vuestra atención!

Por si os ha quedado alguna
duda o inquietud:

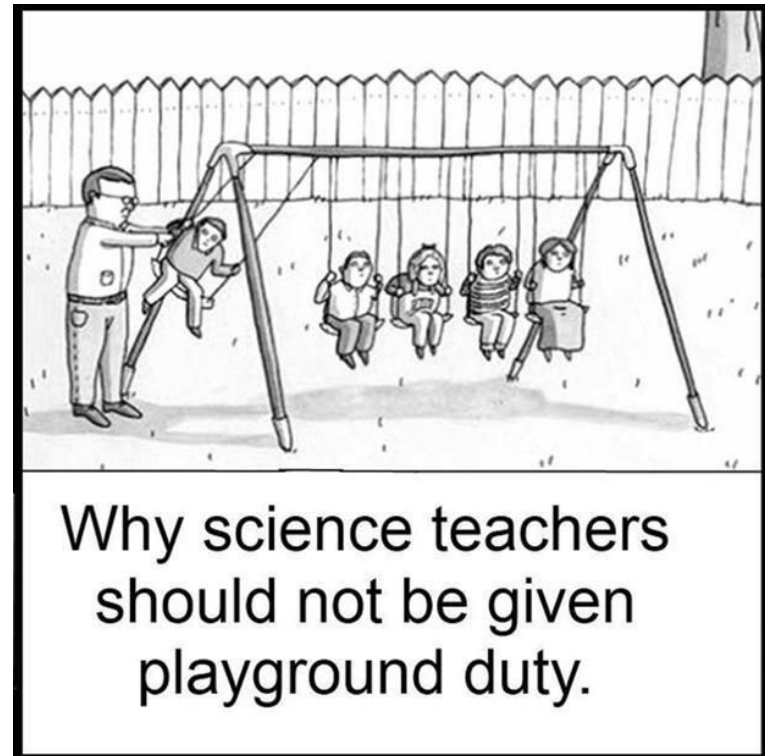
Avelino Vicente

Instituto de Física Corpuscular
Despacho B-6-6

Avelino.Vicente@ific.uv.es

<https://avvicente.wordpress.com/>

[@AvelinoQuantum](#)



¡Disfrutad de vuestra
estancia en el **IFIC**!

Por si acaso

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

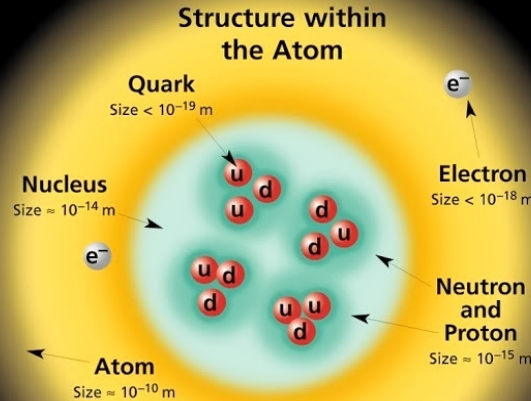
The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

Color Charge
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** $q\bar{q}$ and **baryons** qqq .

Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong	
				Fundamental	Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

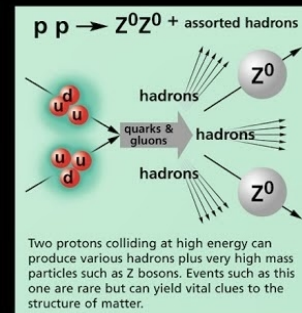
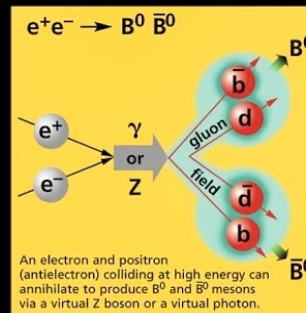
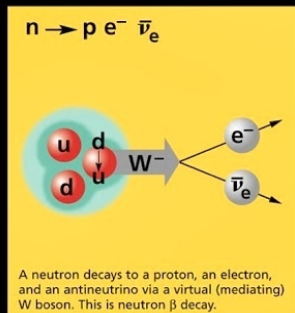
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$, but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are **not** exact and have **no** meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines trace the quark paths.



The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>



Viñeta de **Alberto Montt**, <http://www.dosisdiarias.com/>

Teoría de cuerdas

Fuente

<https://xkcd.com/171/>

