AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
AGH UNIVERSITY OF KRAKOW

UCZELNIA BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

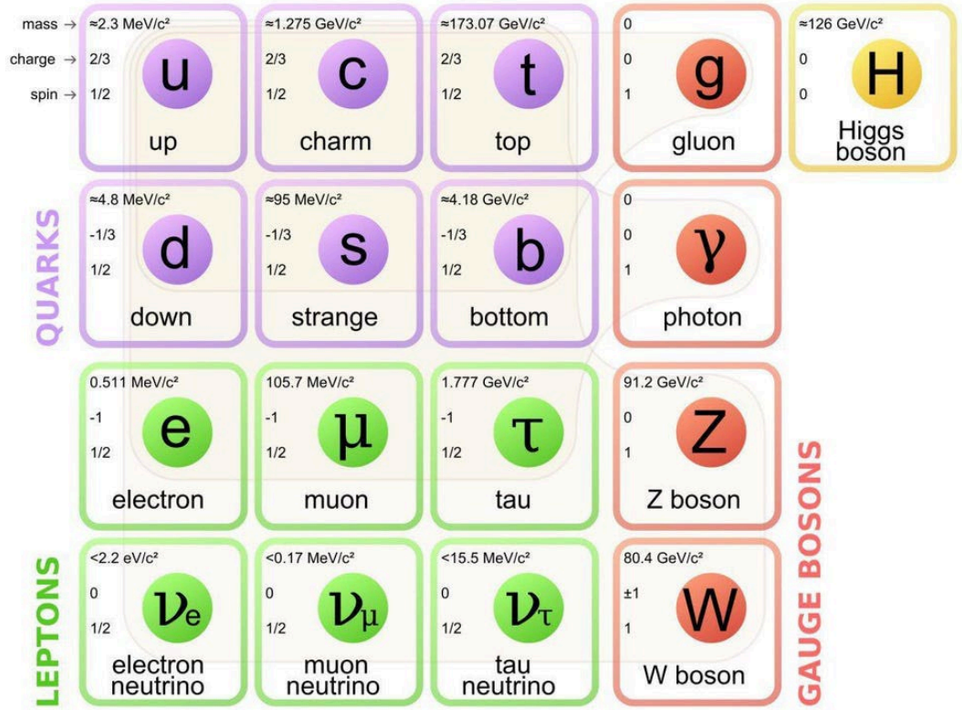
$$\mathcal{L}_{SM} = -\frac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu - \partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \frac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu 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 - 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)) - \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^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) - \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) - gMW^+_\mu W^-_\mu H - \frac{1}{2}g\frac{M}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu H - \frac{1}{2}ig\left(W^+_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^0) - W^-_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu\phi^0)\right) + \frac{1}{2}g\left(W^+_\mu(H\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu H) + W^-_\mu(H\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu H)\right) + \frac{1}{2}g\frac{1}{c_w}(Z^0_\mu(H\partial_\mu\phi^0 - \phi^0\partial_\mu H) + M\left(\frac{1}{c_w}Z^0_\mu\partial_\mu\phi^0 + W^+_\mu\partial_\mu\phi^- + W^-_\mu\partial_\mu\phi^+\right) - ig\frac{s_w^2}{c_w}MZ^0_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + igs_wMA_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - ig\frac{1-2c_w^2}{2c_w}Z^0_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) + igs_wA_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) - \frac{1}{4}g^2W^+_\mu W^-_\mu (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-) - \frac{1}{8}g^2\frac{1}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu (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^0_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + W^-_\mu\phi^+) - \frac{1}{2}ig^2\frac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu 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^0_\mu A_\mu\phi^+\phi^- - g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu\phi^+\phi^- + \frac{1}{2}ig_s\lambda^a_{ij}(\bar{q}^\sigma_i\gamma^\mu q^\sigma_j)g^a_\mu - \bar{e}^\lambda(\gamma\partial + m^\lambda_e)e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda(\gamma\partial + m^\lambda_\nu)\nu^\lambda - \bar{u}^\lambda_j(\gamma\partial + m^\lambda_u)u^\lambda_j - \bar{d}^\lambda_j(\gamma\partial + m^\lambda_d)d^\lambda_j + igs_wA_\mu\left(-(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu u^\lambda_j) - \frac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu d^\lambda_j)\right) + \frac{ig}{4c_w}Z^0_\mu\{(\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}^\lambda_j\gamma^\mu(\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5)d^\lambda_j) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5)u^\lambda_j)\} + \frac{ig}{2\sqrt{2}}W^+_\mu\left((\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)U^{lep}_{\lambda\kappa}e^\kappa) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1+\gamma^5)C_{\lambda\kappa}d^\kappa_j)\right) + \frac{ig}{2\sqrt{2}}W^-_\mu\left((\bar{e}^\kappa U^{lep\dagger}_{\kappa\lambda}\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{d}^\kappa_j C^\dagger_{\kappa\lambda}\gamma^\mu(1+\gamma^5)u^\lambda_j)\right) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+\left(-m^\kappa_e(\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)e^\kappa) + m^\lambda_\nu(\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)e^\kappa) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-\left(m^\lambda_e(\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)\nu^\kappa) - m^\kappa_\nu(\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)\nu^\kappa\right) - \frac{g}{2}\frac{m^\lambda_e}{M}H(\bar{\nu}^\lambda\nu^\lambda) - \frac{g}{2}\frac{m^\lambda_e}{M}H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2}\frac{m^\lambda_e}{M}\phi^0(\bar{\nu}^\lambda\gamma^5\nu^\lambda) - \frac{ig}{2}\frac{m^\lambda_e}{M}\phi^0(\bar{e}^\lambda\gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4}\bar{\nu}_\lambda M^R_{\lambda\kappa}(1-\gamma_5)\bar{\nu}_\kappa - \frac{1}{4}\bar{\nu}_\lambda M^R_{\lambda\kappa}(1-\gamma_5)\bar{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+\left(-m^\kappa_d(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)d^\kappa_j) + m^\lambda_u(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)d^\kappa_j) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-\left(m^\lambda_d(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)u^\kappa_j) - m^\kappa_u(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)u^\kappa_j\right) - \frac{g}{2}\frac{m^\lambda_u}{M}H(\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \frac{g}{2}\frac{m^\lambda_u}{M}H(\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \frac{ig}{2}\frac{m^\lambda_u}{M}\phi^0(\bar{u}^\lambda_j\gamma^5 u^\lambda_j) - \frac{ig}{2}\frac{m^\lambda_u}{M}\phi^0(\bar{d}^\lambda_j\gamma^5 d^\lambda_j) + \bar{G}^a\partial^2 G^a + g_s f^{abc}\partial_\mu\bar{G}^a G^b g^c_\mu + \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) + 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^0_\mu(\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\left(\bar{X}^+X^+H + \bar{X}^-X^-H + \frac{1}{c_w^2}\bar{X}^0X^0H\right) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w}igM\left(\bar{X}^+X^0\phi^+ - \bar{X}^-X^0\phi^-\right) + \frac{1}{2c_w}igM\left(\bar{X}^0X^-\phi^+ - \bar{X}^0X^+\phi^-\right) + igMs_w\left(\bar{X}^0X^-\phi^+ - \bar{X}^0X^+\phi^-\right) + \frac{1}{2}igM\left(\bar{X}^+X^+\phi^0 - \bar{X}^-X^-\phi^0\right).$$

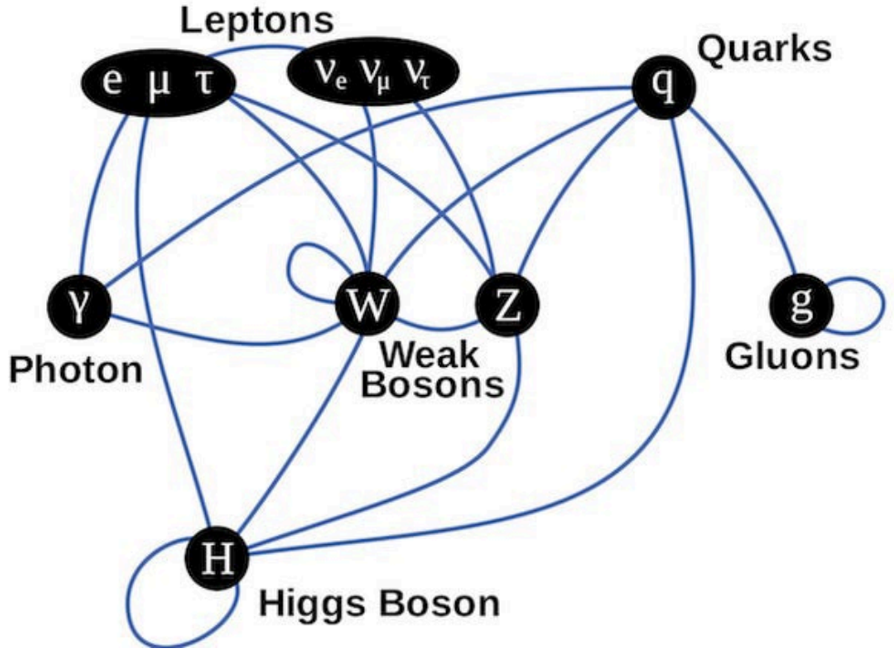
Model Standardowy- Wstęp

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek

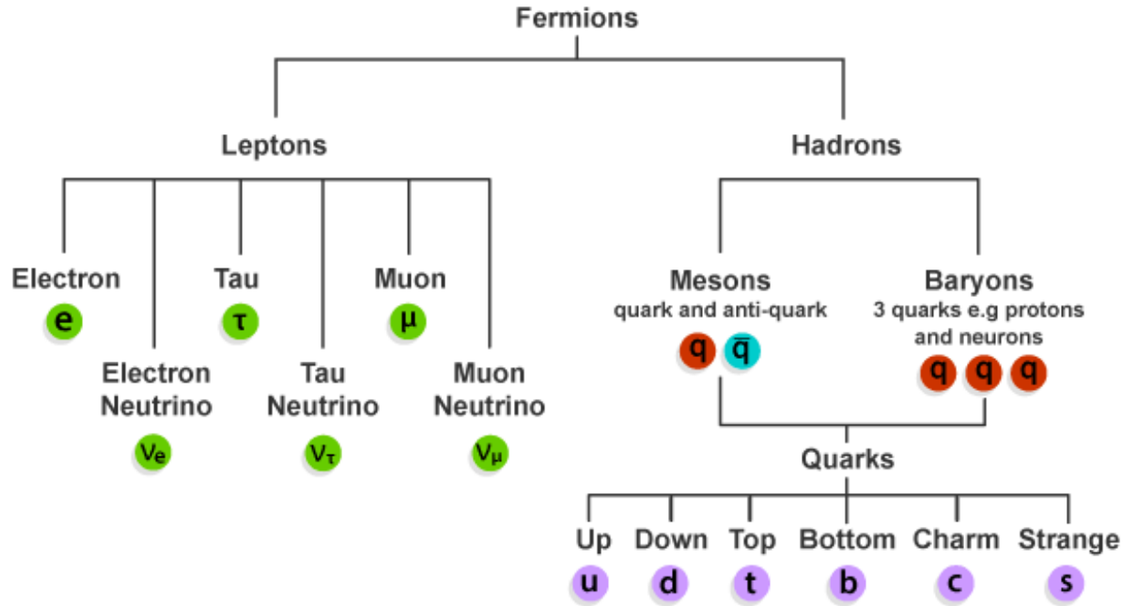
Model Standardowy na obrazkach

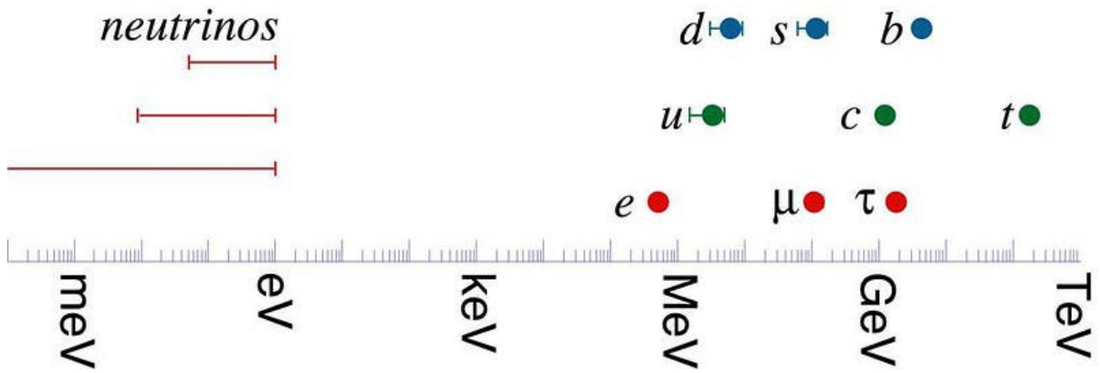




Model Standardowy ma już 50 lat!

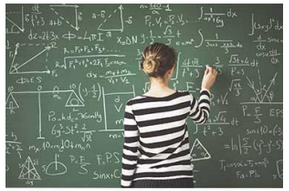
Masy w Modelu Standardowym (problem)





Plan kursu

1. Wprowadzenie
2. Grupy i symetrie
3. Relatywistyka
4. Lagrangiany i transformacja cechowania.
5. Oddziaływania elektromagnetyczne
6. Precyzyjne pomiary Modelu Standardowego



MS - Lagranżian

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}_0 + \mathcal{L}'$$

$\mathcal{L}_0$ - pola (cząstki) swobodne)
$\mathcal{L}'$ - odddziaływania

$$\mathcal{L}_0 = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\,\bar{\psi}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi$$

fermiony

$$\mathcal{L}' = e\bar{\psi}\gamma^{\mu}A_{\mu}\psi$$

oddz. fermion-foton

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{SM} = \; & \underbrace{\frac{1}{4}W_{\mu\nu}\cdot W^{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G^{\alpha}_{\mu\nu}G^{\mu\nu}_{\alpha}}_{\text{kinetic energies and self-interactions of the gauge bosons}} \\
& + \underbrace{\bar{L}\gamma^{\mu}\left(i\partial_{\mu} - \frac{1}{2}g\tau\cdot W_{\mu} - \frac{1}{2}g'YB_{\mu}\right)L + \bar{R}\gamma^{\mu}\left(i\partial_{\mu} - \frac{1}{2}g'YB_{\mu}\right)R}_{\text{kinetic energies and electroweak interactions of fermions}} \\
& + \underbrace{\frac{1}{2}\left|\left(i\partial_{\mu} - \frac{1}{2}g\tau\cdot W_{\mu} - \frac{1}{2}g'YB_{\mu}\right)\phi\right|^2 - V(\phi)}_{W^{\pm},Z,\gamma \text{ and Higgs masses and couplings}} \\
& + \underbrace{g''\left(\bar{q}\gamma^{\mu}T_a q\right)G^{\alpha}_{\mu}}_{\text{interactions between quarks and gluons}} + \underbrace{\left(G_1\bar{L}\phi R + G_2\bar{L}\phi_c R + h.c.\right)}_{\text{fermion masses and couplings to Higgs}}
\end{aligned}$$

Standard Model

https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model

Technically, quantum field theory provides the mathematical framework for the Standard Model, in which a Lagrangian controls the dynamics and kinematics of the theory. Each kind of particle is described in terms of a dynamical field that pervades space-time.[46] The construction of the Standard Model proceeds following the modern method of constructing most field theories: by first postulating a set of symmetries of the system, and then by writing down the most general renormalizable Lagrangian from its particle (field) content that observes these symmetries.

The global Poincaré symmetry is postulated for all relativistic quantum field theories. It consists of the familiar translational symmetry, rotational symmetry and the inertial reference frame invariance central to the theory of special relativity. The local **SU(3)×SU(2)×U(1)** gauge symmetry is an internal symmetry that essentially defines the Standard Model. Roughly, the three factors of the gauge symmetry give rise to the three fundamental interactions. The fields fall into different representations of the various symmetry groups of the Standard Model (see table). Upon writing the most general Lagrangian, one finds that the dynamics depends on 19 parameters, whose numerical values are established by experiment. The parameters are summarized in the table (made visible by clicking "show") above.

Struktura Modelu Standardowego

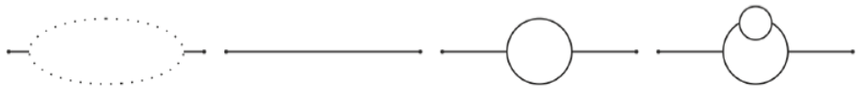
- MS jest to MODEL, a nie TEORIA.
- MS jest to efektywna teoria, w której istotną rolę odgrywają wyniki doświadczalne (np. masa elektronu, stałe sprzężenia, etc.).

  Teoria strun (dla odmiany) nie potrzebuje wyników – jest wyprowadzana z czysto matematycznych przesłanek.

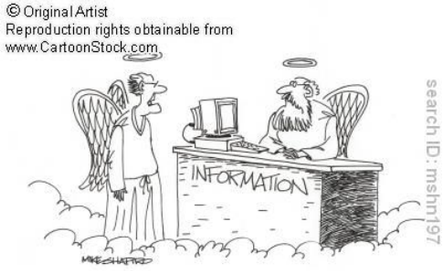
- MS oparty jest na teorii, w której liczba cząstek nie jest stała, ale są one nieustannie tworzone i ciągle anihilują.

  tą teorią nie jest Mechanika Kwantowa, ani Relatywistyczna MK

- MS oparty jest na Kwantowej Teorii Pola (QFT).



$$MS(QFT) = QM + RM$$



"I still don't understand quantum theory."

Struktura Modelu Standardowego

MS jest relatywistyczną kwantową teorią pola,

niezmienniczą względem lokalnej transformacji cechowania.

Symetrią MS jest grupa $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$

QCD

elektrosłabe

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

2 $M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \frac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H -$
$\frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h [\frac{2M^2}{g^2} +$
$\frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-)] + \frac{2M^4}{g^2}\alpha_h - igc_w[\partial_\nu Z^0_\mu (W^+_\mu W^-_\nu -$
$W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu -$
$W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)] - igs_w[\partial_\nu A_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - A_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu -$
$W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + A_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)] - \frac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu +$
$\frac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2 (Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) +$
$g^2 s_w^2 (A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z^0_\nu (W^+_\mu W^-_\nu -$
$W^+_\nu W^-_\mu) - 2A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu] - g\alpha[H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^-] -$
$\frac{1}{8}g^2\alpha_h[H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+\phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2\phi^+\phi^- + 4H^2\phi^+\phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] -$
$gMW^+_\mu W^-_\mu H - \frac{1}{2}g\frac{M}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu H - \frac{1}{2}ig[W^+_\mu (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) -$
$W^-_\mu (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g[W^+_\mu (H\partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W^-_\mu (H\partial_\mu \phi^+ -$
$\phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g\frac{1}{c_w}(Z^0_\mu (H\partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig\frac{s_w^2}{c_w} M Z^0_\mu (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) +$
$igs_w M A_\mu (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) - ig\frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z^0_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) +$
$igs_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W^+_\mu W^-_\mu [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-] -$
$\frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+\phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z^0_\mu \phi^0 (W^+_\mu \phi^- +$
$W^-_\mu \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z^0_\mu H (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W^+_\mu \phi^- +$
$W^-_\mu \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1) Z^0_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- -$
$g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m^\lambda_e) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}^\lambda_j (\gamma \partial + m^\lambda_u) u^\lambda_j -$

3 $d^\lambda_j (\gamma \partial + m^\lambda_d) d^\lambda_j + igs_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j \gamma^\mu u^\lambda_j) - \frac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j \gamma^\mu d^\lambda_j)] +$
$\frac{ig}{4c_w} Z^0_\mu [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}^\lambda_j \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 -$
$1 - \gamma^5) u^\lambda_j) + (\bar{d}^\lambda_j \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d^\lambda_j)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W^+_\mu [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) +$
$(\bar{u}^\lambda_j \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d^\kappa_j)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W^-_\mu [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}^\kappa_j C^\dagger_{\lambda\kappa} \gamma^\mu (1 +$
$\gamma^5) u^\lambda_j)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m^\lambda_e}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] -$

4 $\frac{g}{2}\frac{m^\lambda_e}{M}[H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m^\kappa_d (\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d^\kappa_j) +$
$m^\lambda_u (\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d^\kappa_j] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m^\lambda_d (\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) u^\kappa_j) - m^\kappa_u (\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa} (1 -$
$\gamma^5) u^\kappa_j] - \frac{g}{2}\frac{m^\lambda_u}{M} H(\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \frac{g}{2}\frac{m^\lambda_d}{M} H(\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \frac{ig}{2}\frac{m^\lambda_u}{M} \phi^0 (\bar{u}^\lambda_j \gamma^5 u^\lambda_j) -$
$\frac{ig}{2}\frac{m^\lambda_d}{M} \phi^0 (\bar{d}^\lambda_j \gamma^5 d^\lambda_j) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 -$

5 $\frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W^+_\mu (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + igs_w W^+_\mu (\partial_\mu \bar{Y} X^- -$
$\partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W^-_\mu (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + igs_w W^-_\mu (\partial_\mu \bar{X}^- Y -$
$\partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z^0_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + igs_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ -$
$\partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM[\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] +$
$\frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM[\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] +$
$igMs_w[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM[\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]$

gluon

Bozony W i Z

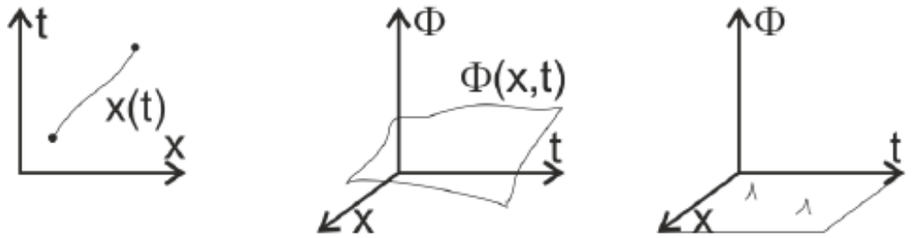
słabe oddziaływanie cząstek

wirtualne duchy

QFT – zwiastuny

QFT czerpie z mechaniki klasycznej, mechaniki kwantowej i mechaniki relatywistycznej

1. Cząstka porusza się po czasoprzestrzennej trajektorii opisanej funkcją $x(t)$, czas jest tu parametrem.
2. Pole to obiekt opisany funkcją $\Phi(x,t)$. Zupełnie różny od cząstek.
3. Ale czasem występują małe fluktuacje tego pola, i je przypiszemy powstaniu cząstek.



4. QFT to teoria uwzględniająca spin, identyczność cząstek, zjawiska perturbacyjne i nieperturbacyjne.
5. QFT opisuje cząstki o spinie 0 (skalary), 1/2 (fermiony) oraz 1 (cząstki wektorowe – bozony cechowania, czyli przenoszące oddziaływania).

QFT – narzędzia

Relatywistyka

Równanie Schrödingera

Równanie Kleina-Gordona

Równanie Eulera-Lagrange'a

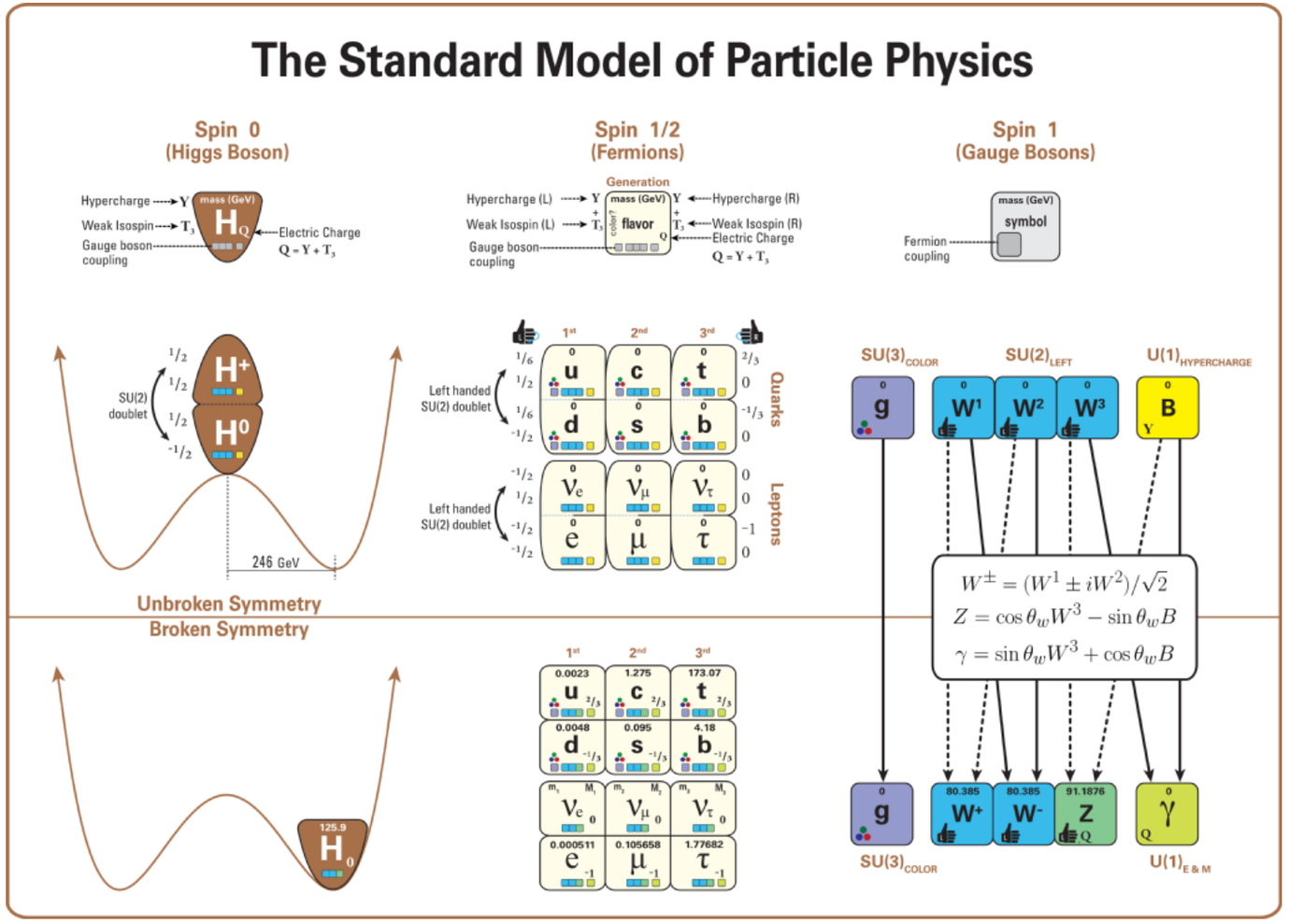
Zasada najmniejszego działania

Pole elektromagnetyczne, lokalna symetria cechowania

Teoria grup – grupy Lie, nieabelowe

Czterowektory
Interwał czasoprzestrzenny
Tensor metryczny
Operatory różniczkowania

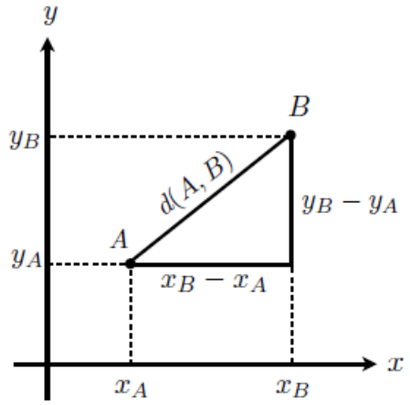
Równanie ciągłości.
Gęstość prawdopodobieństwa



By Latham Boyle - Converted to PNG from File:Standard Model Of Particle Physics, Most Complete Diagram.jpg, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45839544

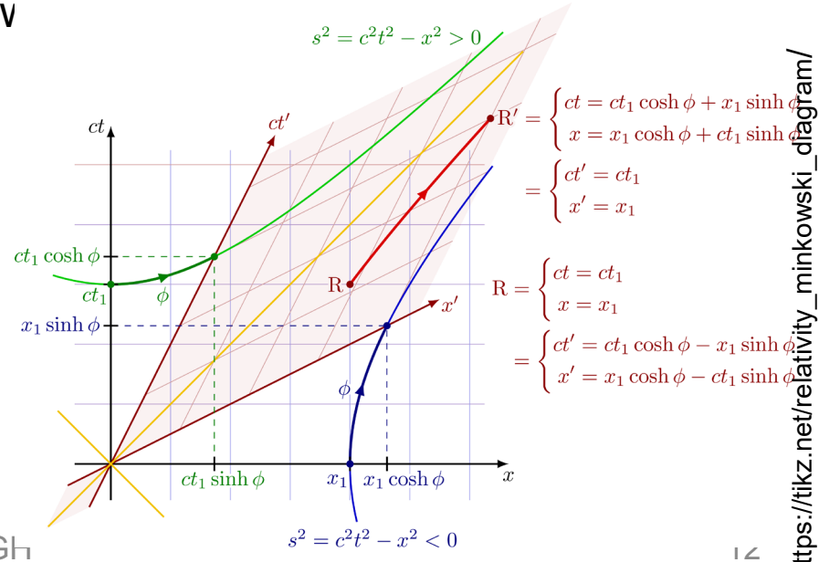
Symetrie geometryczne

- Starożytni (Arystoteles, Galileo) zauważali związek symetrii z prawami fizyki:
- np. symetria pustej przestrzeni ⇒ bezwładność, odwrócenie kierunku ruchu prowadzi do takiego samego ruchu
- XIX wiek – teoria grup – różne własności geometryczne układów można uzyskać wykonując proste transformacje,
- Geometria Euklidesowa – niezmienniczość odległości pomiędzy punktami względem obrotu i przesunięcia.
- Pierre Curie – matematyczny opis oparty teorię grup zastosov krystalografii.
- Pomysł Emmy Noether – związek symetrii z zachowanym ładunkiem.
- Hermann Minkowski – geometryczna interpretacja STW, niezmienniczość zdarzeń w różnych układach pozostawia niezmiennik $x^2 + y^2 + z^2 - (ict)^2 = const$ i podaje własności transformacji Lorentza.



$$x'^i = R^i{}_j x^j + a^i$$

$$d(A,B) = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}$$



https://tikz.net/relativity_minkowski_diagram/

Przekształcenia i zasady zachowania

Symetrie	Zachowane
Translacje w czasie i przestrzeni (t,x)	Energia i pęd (E,p)
Obroty w przestrzeni	Moment Pędu
Odbicie lustrzane	Parzystość przestrzenna
Transformacja cechowania	Ładunek

Uwaga:
Odbicie w czasie i obroty w czasoprzestrzenie nie są opisane transformacją unitarną i nie prowadzą do zachowanych parametrów

Przekształcenia i zasady zachowania

Symetrie	Zachowane
Translacje w czasie i przestrzeni (t,x)	Energia i pęd (E,p)
Obroty w przestrzeni	Moment Pędu
Odbicie lustrzane	Parzystość przestrzenna
Transformacja cechowania	Ładunek

Uwaga:
Odbicie w czasie i obroty w czasoprzestrzenie nie są opisane transformacją unitarną i nie prowadzą do zachowanych parametrów