



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

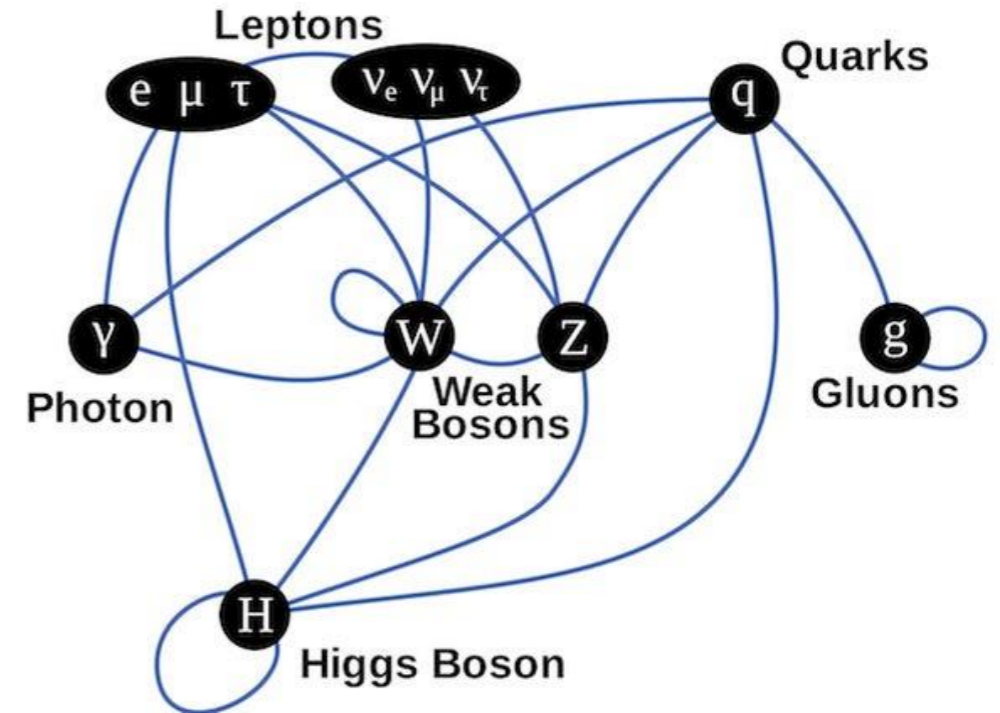
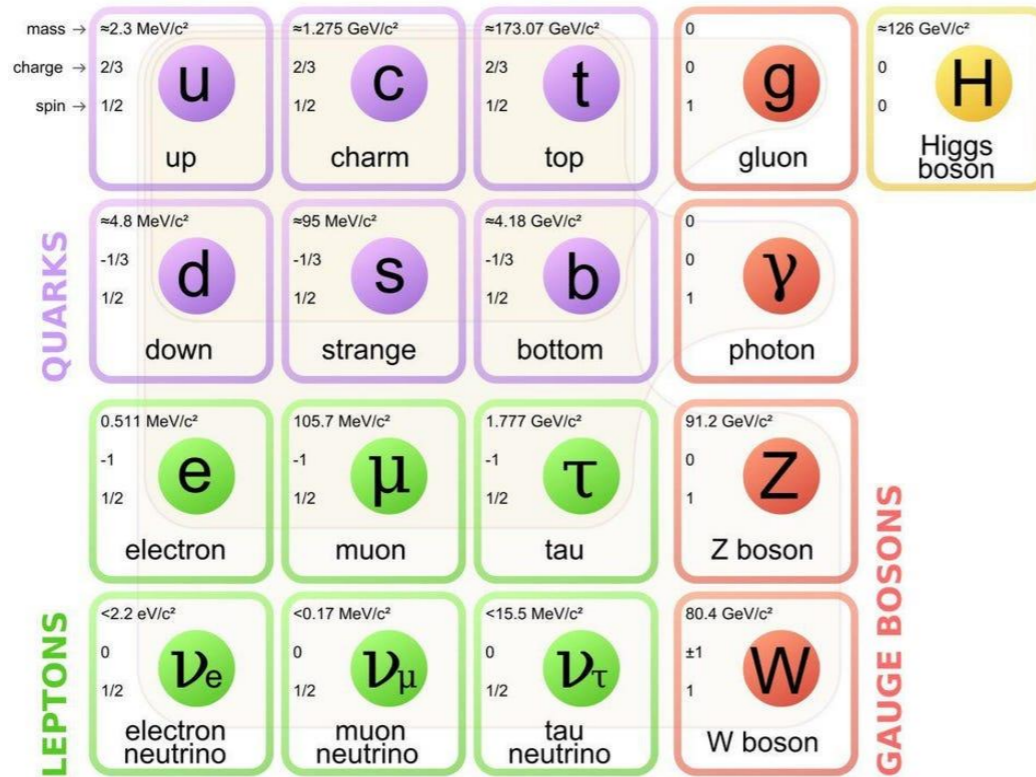
# Model Standardowy

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej  
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek

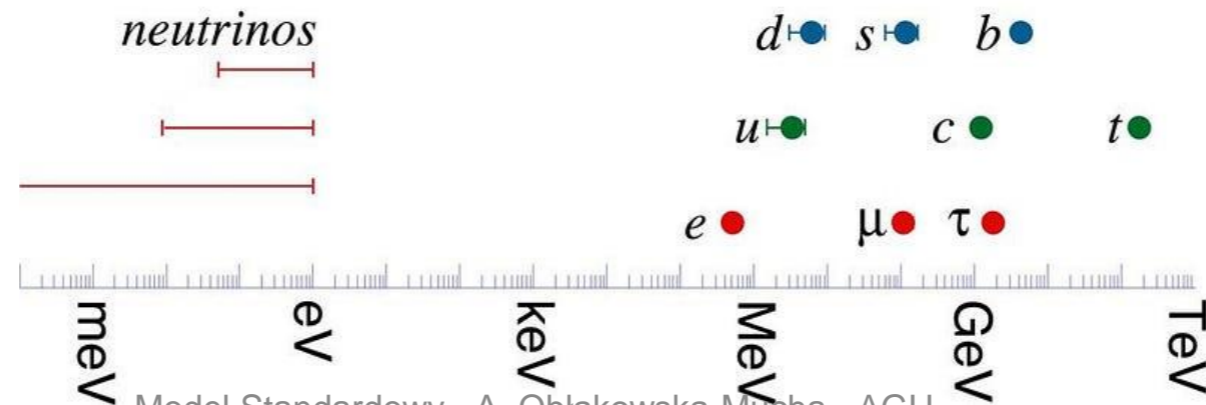
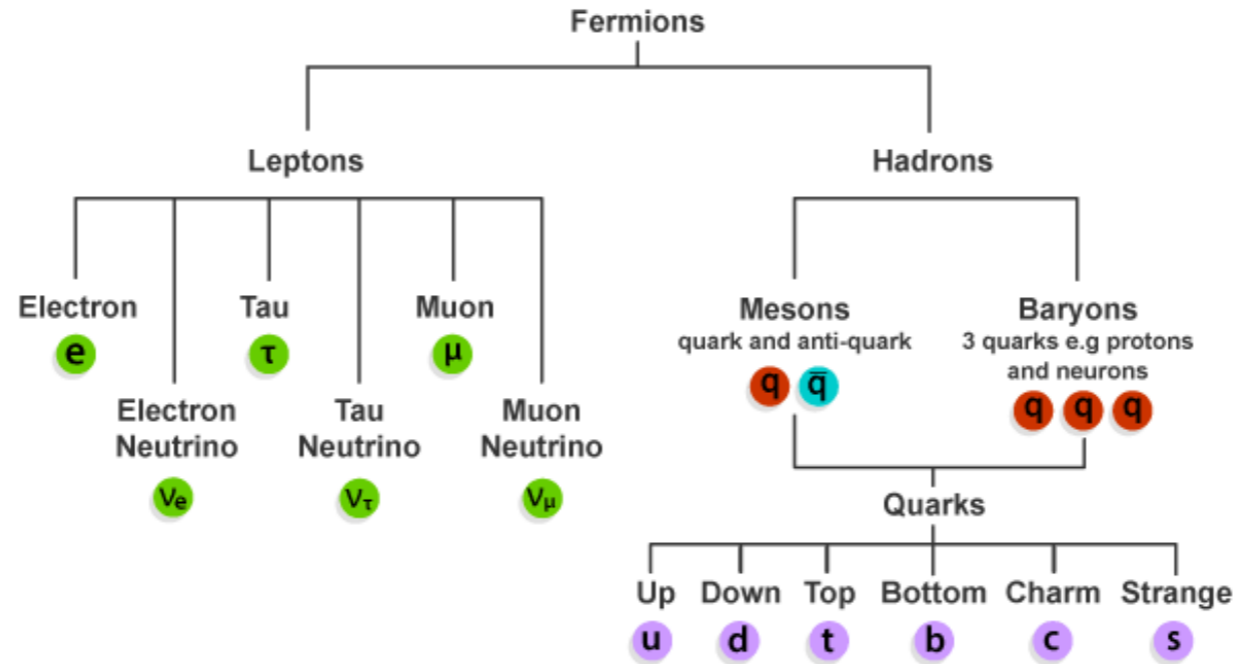
$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^a g_\nu^b g_\mu^c g_\nu^d g_\mu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu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

# 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. Oddziaływania silne
7. Oddziaływania elektroślabe
8. Spontaniczne łamanie symetrii i bozon Higgsa
9. Precyzyjne pomiary Modelu Standardowego

# MS - Lagranżian

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

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

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

$$\mathcal{L}' = \boxed{e\bar{\psi}\gamma^\mu A_\mu\psi} \quad \text{oddz. fermion-foton}$$

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

# Standard Model

[https://en.wikipedia.org/wiki/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](#).<sup>[46]</sup> 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\(3\) \times SU\(2\) \times 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

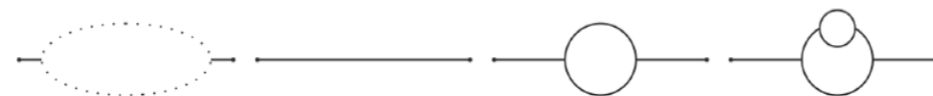
- MS jest to MODEL, a nie TEORIA.
- MS jest to efektywna teoria, w której istotną rolę odgrywają wyniki doświadczalne (np. masa elektronu, stałe sprzężenia, etc.).

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).



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

© OriginalArtist  
Reproduction rights obtainable from  
www.CartoonStock.com



"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

gluon

Bozony W i Z

słabe oddziaływanie cząstek

wirtualne duchy

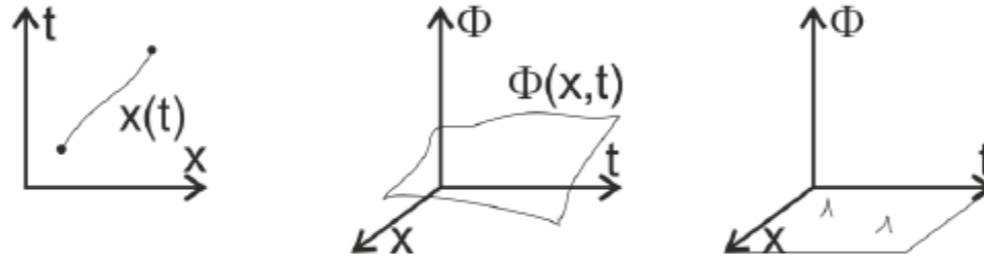
$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\alpha \gamma^\mu q_j^\alpha) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \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 - \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 \left[ \frac{2M^2}{g^2} + \right. \\
 & \left. \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - ig_c 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^-] - 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] - \\
 & 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) - 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}{4}g^2 \frac{1}{c_w} 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^4 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 + 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{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{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)] + \frac{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)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda^2}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
 & m_u^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\kappa (\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{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 + ig_c 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^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_c 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^+) + ig_c 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}g M [\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} ig M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} ig M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & ig M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}ig M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$



## 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

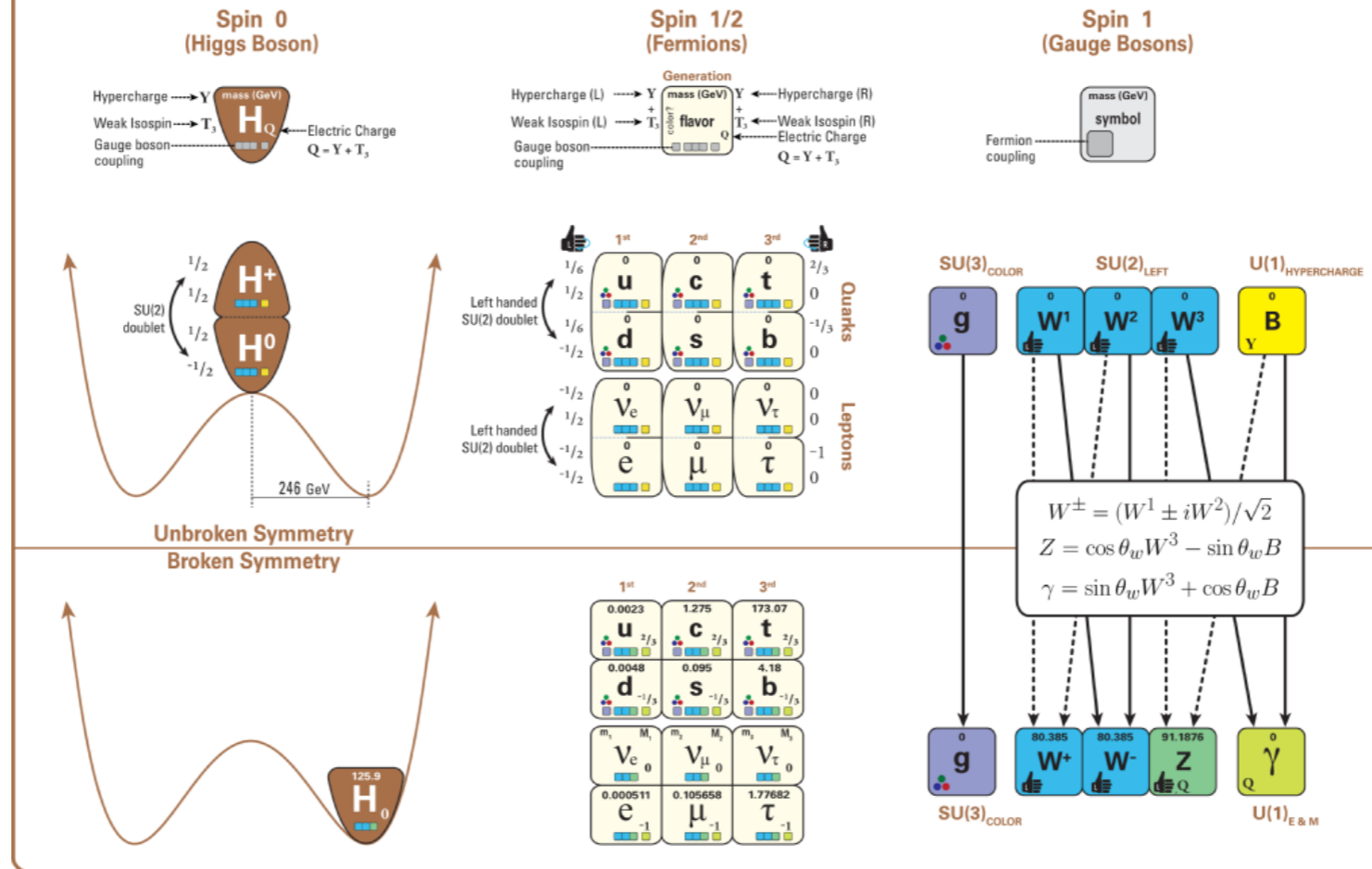
Pole elektromagnetyczne, lokalna  
symetria cechowania

Teoria grup – grupy Lie, nieabelowe

Czterowektory  
Interwał czasoprzestrzenny  
Tensor metryczny  
Operatory różniczkowania

Równanie ciągłości.  
Gęstość prawdopodobieństwa

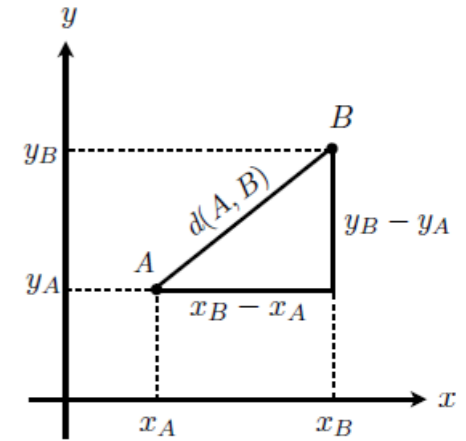
# The Standard Model of Particle Physics



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>

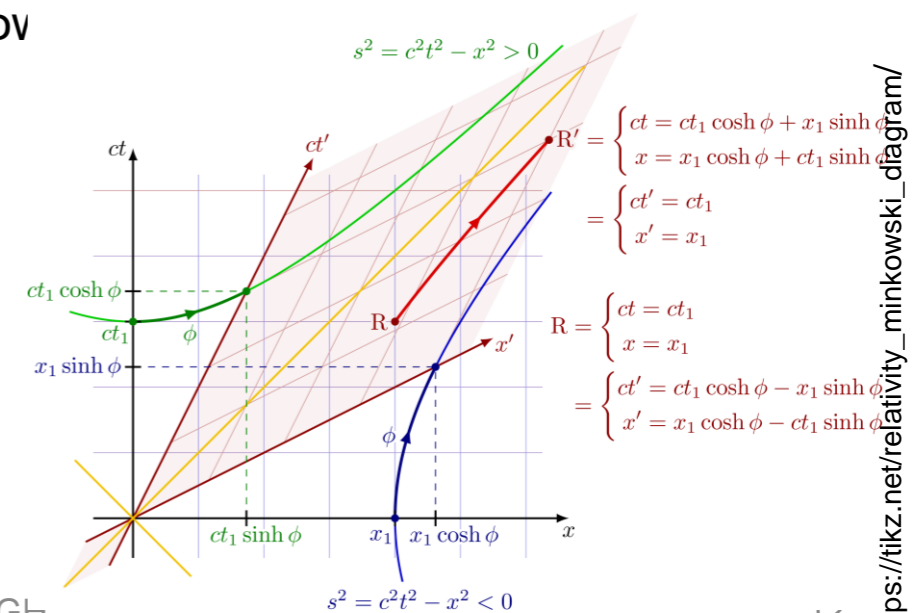
# Symetrie geometryczne

- Starożytni (Arystoteles, Galileo) zauważali związek symetrii z prawami fizyki:
- np. symetria pustej przestrzeni  $\Rightarrow$  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 zastosow 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.



$$x^i = R^i_j x^j + a^i$$

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



## Przekształcenia i zasady zachowania

### Symetrie

Translacje w czasie i przestrzeni  
( $t, x$ )

Obroty w przestrzeni

Odbicie lustrzane

Transformacja cechowania

### Zachowane

Energia i pęd ( $E, p$ )

Moment Pędu

Parzystość przestrzenna

Ładunek

Uwaga:

Odbicie w czasie i obroty w czasoprzestrzeni nie są opisane transformacją unitarną i nie prowadzą do zachowanych parametrów

## Przekształcenia i zasady zachowania

### Symetrie

Translacje w czasie i przestrzeni  
( $t, x$ )

Obroty w przestrzeni

Odbicie lustrzane

Transformacja cechowania

### Zachowane

Energia i pęd ( $E, p$ )

Moment Pędu

Parzystość przestrzenna

Ładunek

Uwaga:

Odbicie w czasie i obroty w czasoprzestrzeni nie są opisane transformacją unitarną i nie prowadzą do zachowanych parametrów