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

UCZELNIA BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

Model Standardowy

$$\mathcal{L}_{SM} = -\tfrac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \tfrac{1}{4}g_s^2 f^{abc}f^{ade}g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu - \partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2c_w^2}M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w(\partial_\nu Z^0_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)) - igs_w(\partial_\nu A_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - A_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + A_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)) - \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu + \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2 (Z^0_\mu W^+_\nu Z^0_\mu 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) - \tfrac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \tfrac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \beta_h \left(\tfrac{2M^2}{g^2} + \tfrac{2M}{g}H + \tfrac{1}{2}(H^2 + \phi^0\phi^0 + 2\phi^+\phi^-)\right) + \tfrac{2M^4}{g^2}\alpha_h - g\alpha_h M (H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^-) - \tfrac{1}{8}g^2\alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+\phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2\phi^+\phi^- + 4H^2\phi^+\phi^- + 2(\phi^0)^2H^2) - gMW^+_\mu W^-_\mu H - \tfrac{1}{2}g\tfrac{M}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu H - \tfrac{1}{2}ig\,(W^+_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^0) - W^-_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu\phi^0)) + \tfrac{1}{2}g\,(W^+_\mu(H\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu H) + W^-_\mu(H\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu H)) + \tfrac{1}{2}g\tfrac{1}{c_w}(Z^0_\mu(H\partial_\mu\phi^0 - \phi^0\partial_\mu H) + M(\tfrac{1}{c_w}Z^0_\mu\partial_\mu\phi^0 + W^+_\mu\partial_\mu\phi^- + W^-_\mu\partial_\mu\phi^+) - ig\tfrac{s_w^2}{c_w}MZ^0_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + igs_wMA_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - ig\tfrac{1-2c_w^2}{2c_w}Z^0_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) + igs_wA_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) - \tfrac{1}{4}g^2W^+_\mu W^-_\mu\,(H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-) - \tfrac{1}{8}g^2\tfrac{1}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu\,(H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2\phi^+\phi^-) - \tfrac{1}{2}g^2\tfrac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + W^-_\mu\phi^+) - \tfrac{1}{2}ig^2\tfrac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + \tfrac{1}{2}g^2s_wA_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + W^-_\mu\phi^+) + \tfrac{1}{2}ig^2s_wA_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - g^2\tfrac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1)Z^0_\mu A_\mu\phi^+\phi^- - g^2s_w^2A_\mu A_\mu\phi^+\phi^- + \tfrac{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) + \tfrac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu u^\lambda_j) - \tfrac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu d^\lambda_j)\right) + \tfrac{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(\tfrac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5)d^\lambda_j) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1 - \tfrac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5)u^\lambda_j)\} + \tfrac{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) + \tfrac{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) + \tfrac{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) + \tfrac{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) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_\nu}{M}H(\bar{\nu}^\lambda\nu^\lambda) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_e}{M}H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_\nu}{M}\phi^0(\bar{\nu}^\lambda\gamma^5\nu^\lambda) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_e}{M}\phi^0(\bar{e}^\lambda\gamma^5 e^\lambda) - \tfrac{1}{4}\bar{\nu}_\lambda M^R_{\lambda\kappa}(1-\gamma_5)\hat{\nu}_\kappa - \tfrac{1}{4}\bar{\nu}_\lambda M^R_{\lambda\kappa}(1-\gamma_5)\hat{\nu}_\kappa + \tfrac{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\right) + \tfrac{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) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_u}{M}H(\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_d}{M}H(\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_u}{M}\phi^0(\bar{u}^\lambda_j\gamma^5 u^\lambda_j) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_d}{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 - \tfrac{M^2}{c_w^2})X^0 + \bar{Y}\partial^2 Y + igc_wW^+_\mu(\partial_\mu\bar{X}^0X^- - \partial_\mu\bar{X}^+X^0) + igs_wW^+_\mu(\partial_\mu\bar{Y}X^- - \partial_\mu\bar{X}^+Y) + igc_wW^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^-X^0 - \partial_\mu\bar{X}^0X^+) + igs_wW^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^-Y - \partial_\mu\bar{Y}X^+) + igc_wZ^0_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+X^+ - \partial_\mu\bar{X}^-X^-) + igs_wA_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+X^+ - \partial_\mu\bar{X}^-X^-) - \tfrac{1}{2}gM\left(\bar{X}^+X^+H + \bar{X}^-X^-H + \tfrac{1}{c_w^2}\bar{X}^0X^0H\right) + \tfrac{1-2c_w^2}{2c_w}igM\left(\bar{X}^+X^0\phi^+ - \bar{X}^-X^0\phi^-\right) + \tfrac{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) + \tfrac{1}{2}igM\left(\bar{X}^+X^+\phi^0 - \bar{X}^-X^-\phi^0\right).$$

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek

Sylabus kursu

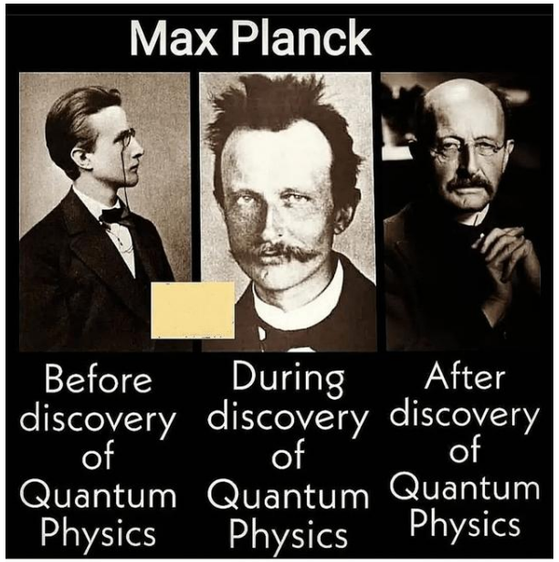
Wykład: 30
Ćwiczenia laboratoryjne: 14
od 13.05 wg Unitime, czy możemy zacząć 15.04?

Sposób obliczania oceny końcowej
Ocena końcowa = Ocena ćwiczeń laboratoryjnych + aktywność. Ocena końcowa uwzględnia aktywność studenta podczas wykładów

Plan kursu

1. Wprowadzenie
2. Z mechaniki klasycznej do MS
3. Relatywistyka
4. Grupy i symetrie
5. Lagrangiany i transformacja cechowania.
6. Oddziaływania elektromagnetyczne
7. Oddziaływania silne
8. Oddziaływania elektrosłabe
9. Spontaniczne łamanie symetrii i bozon Higgsa
10. Precyzyjne pomiary Modelu Standardowego

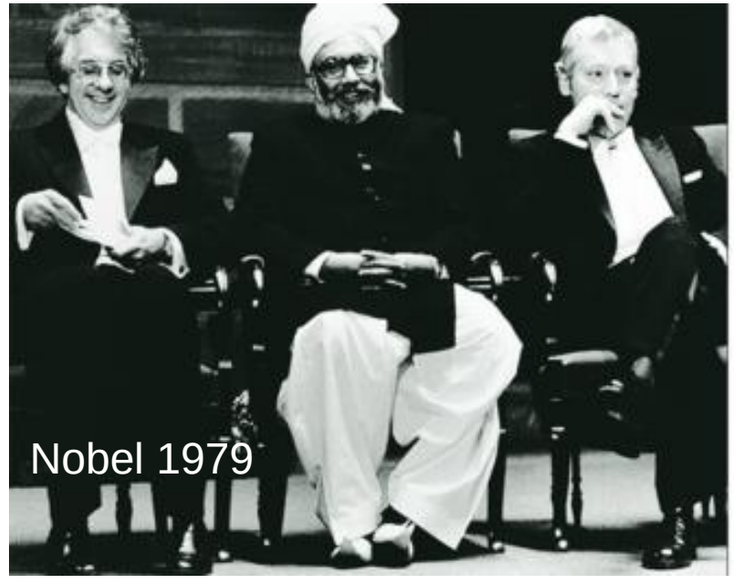
Krótka historia MS



Model Standardowy ma 50 lat, ale jego historia zaczyna się na początku XX wieku:

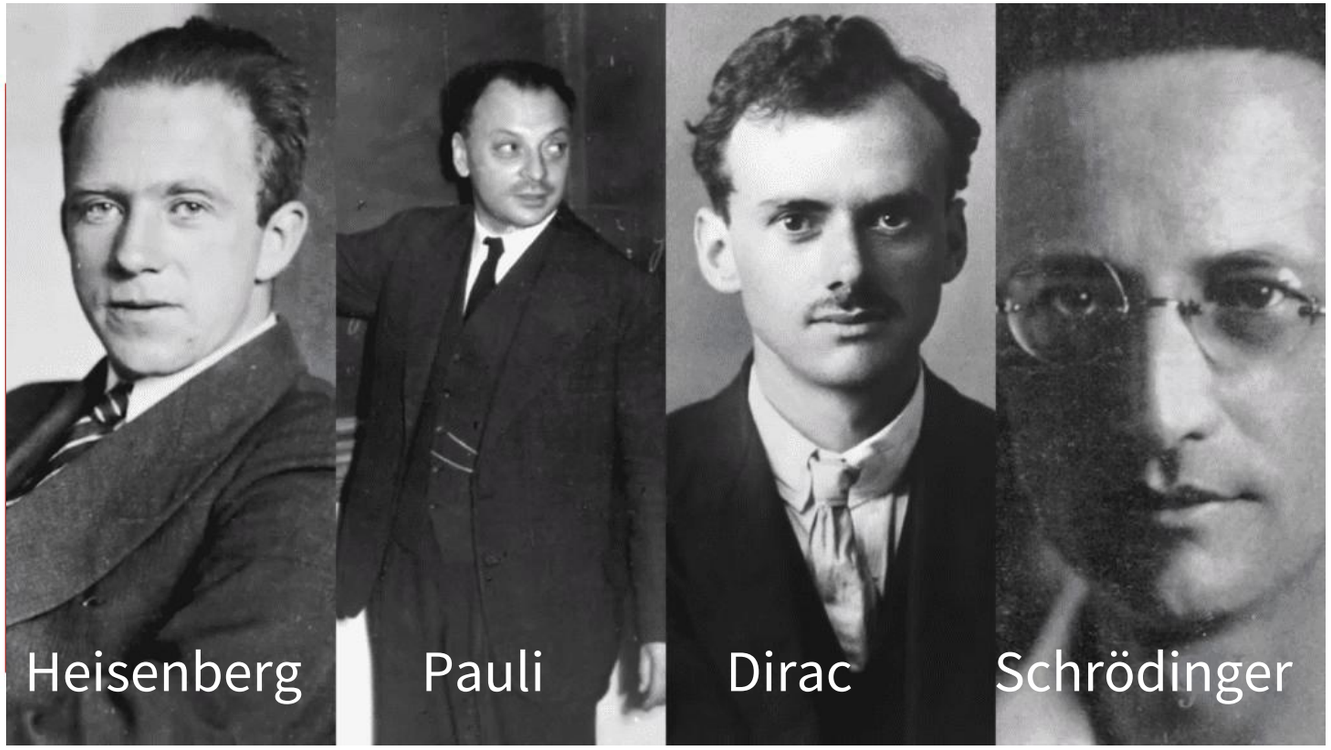
- **1900** – hipoteza kwantowania Planca
- **Lata 30. XX wieku** – odkrycie neutronu (Chadwick, 1932), początek badań nad cząstkami elementarnymi.
- **Lata 40.–50.** – rozwój kwantowej elektrodynamiki (QED) – Feynman, Schwinger, Tomonaga.
- **1964** – zaproponowanie kwarkowego modelu hadronów (Gell-Mann, Zweig).

- **1967–1968** – Sheldon Glashow, Abdus Salam i Steven Weinberg tworzą unifikację oddziaływań elektromagnetycznego i słabego – teoria elektrosłaba.
- **Lata 70.** – rozwój chromodynamiki kwantowej (QCD) – teoria silnych oddziaływań, opisująca kwarki i gluony.
- **1973** – potwierdzenie istnienia prądów neutralnych (eksperymenty w CERN) – kluczowy dowód na poprawność teorii elektrosłabej.
- **1974** – odkrycie cząstki J/ψ – dowód na istnienie kwarka powabnego.
- **1983** – odkrycie bozonów cechujących WWW i ZZZ w CERN.
- **1995** – odkrycie kwarka t (top) w Fermilab.
- **2012** – odkrycie bozonu Higgsa w CERN (eksperymenty ATLAS i CMS) – potwierdzenie mechanizmu nadawania masy.

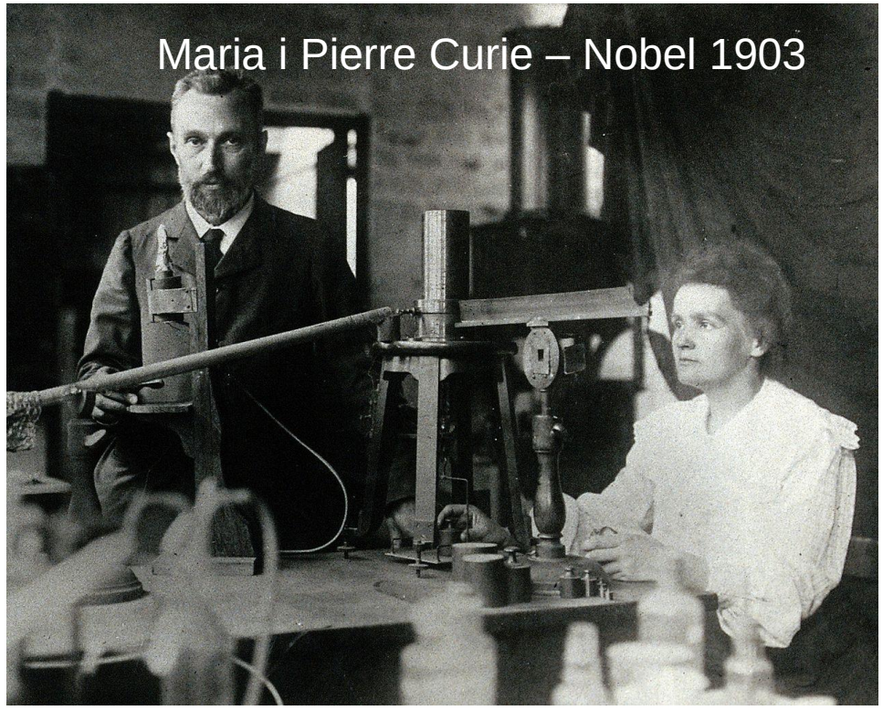


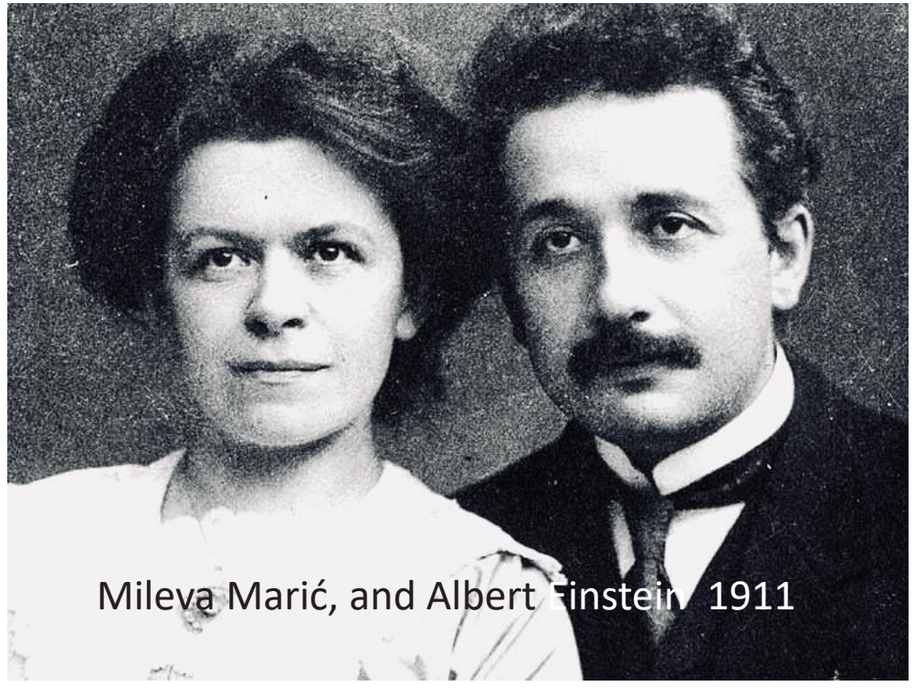
Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam, Steven Weinberg

Krótka historia kwantów

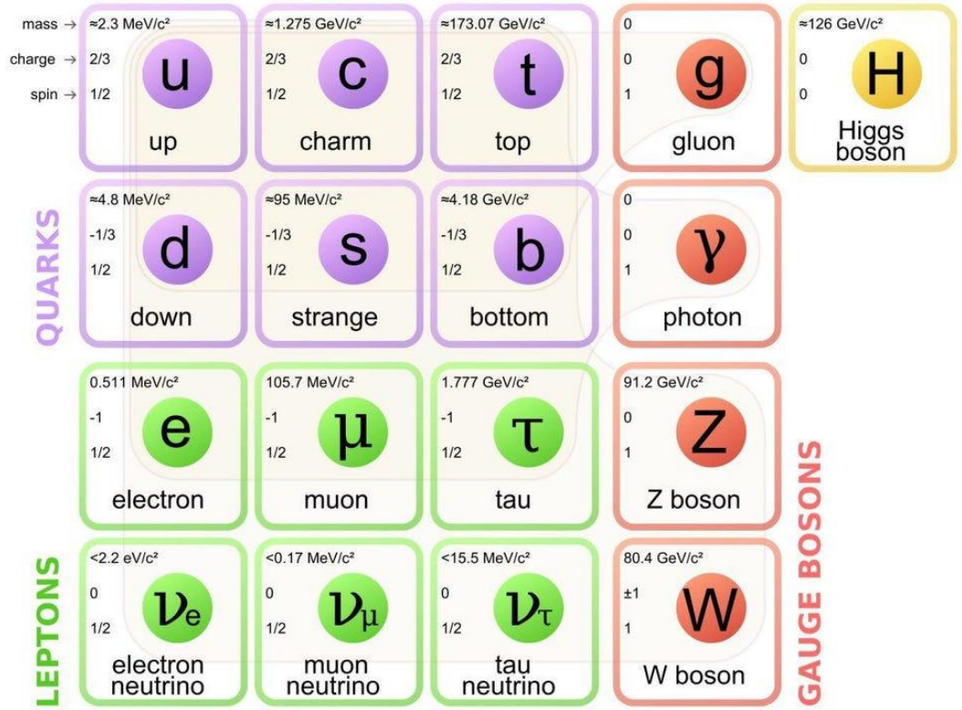


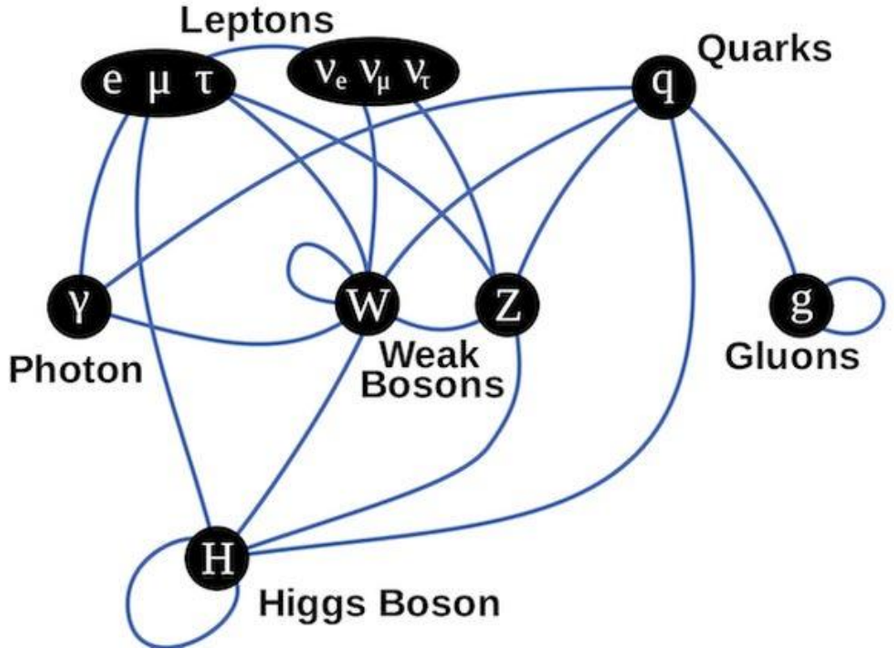
https://www.classcentral.com/report/review-quantum-mechanics/





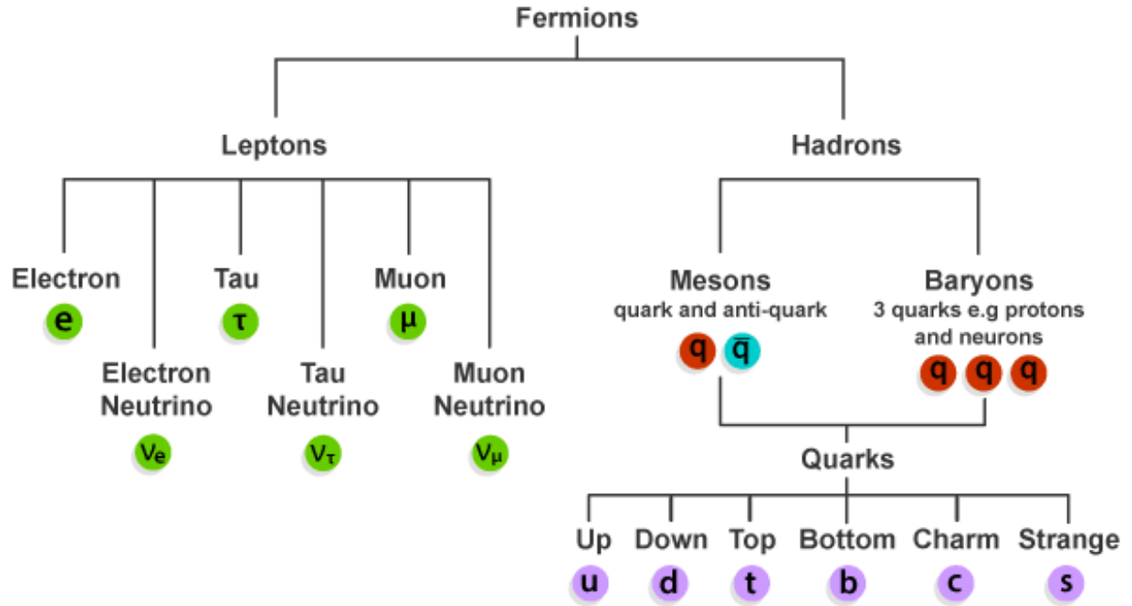
Model Standardowy na obrazkach

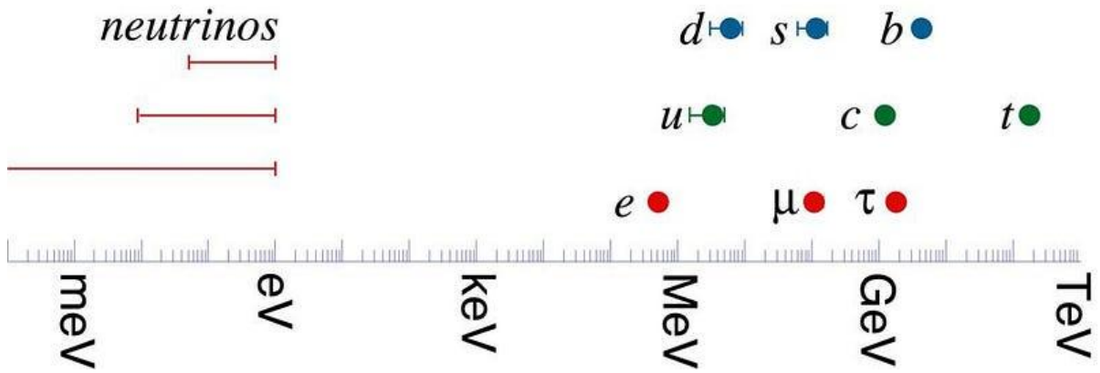




Model Standardowy ma już 50 lat!

Masy w Modelu Standardowym (problem)





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

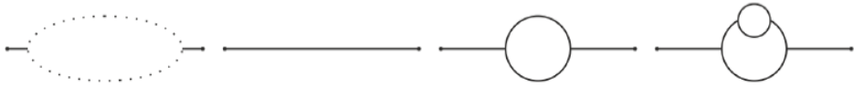
- MS jest to MODEL, a nie TEORIA.
- MS jest to efektywna teoria, w której istotną rolę odgrywają wyniki doświadczalne (np. masa elektronu, stałe sprzężenia, etc.).

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

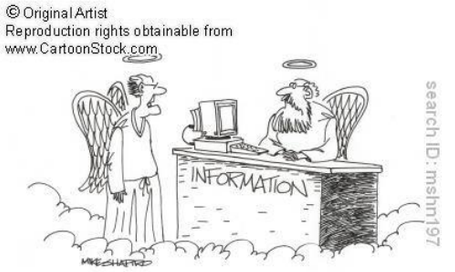
- MS oparty jest na teorii, w której liczba cząstek nie jest stała, ale są one nieustannie tworzone i ciągle anihilują.

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

2 $M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \frac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H -$
$\frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h [\frac{2M^2}{g^2} +$
$\frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-)] + \frac{2M^4}{g^2}\alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z^0_\mu (W^+_\mu W^-_\nu -$
$W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu -$
$W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)] - igs_w [\partial_\nu A_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - A_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu -$
$W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + A_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)] - \frac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu +$
$\frac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2 (Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) +$
$g^2 s_w^2 (A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z^0_\nu (W^+_\mu W^-_\nu -$
$W^+_\nu W^-_\mu) - 2A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] -$
$\frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] -$
$gMW^+_\mu W^-_\mu H - \frac{1}{2}g\frac{M}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu H - \frac{1}{2}ig[W^+_\mu (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) -$
$W^-_\mu (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g[W^+_\mu (H\partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W^-_\mu (H\partial_\mu \phi^+ -$
$\phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g\frac{1}{c_w}(Z^0_\mu (H\partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig\frac{s_w^2}{c_w} M Z^0_\mu (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) +$
$igs_w M A_\mu (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) - ig\frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z^0_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) +$
$igs_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W^+_\mu W^-_\mu [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] -$
$\frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z^0_\mu \phi^0 (W^+_\mu \phi^- +$
$W^-_\mu \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z^0_\mu H (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W^+_\mu \phi^- +$
$W^-_\mu \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1) Z^0_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- -$
$g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^-$

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

4 $\frac{g}{2}\frac{m_e^\lambda}{M} [H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa} (1-\gamma^5) d^\kappa_j) +$
$m_u^\lambda (\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa} (1+\gamma^5) d^\kappa_j] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa} (1+\gamma^5) u^\kappa_j) - m_u^\kappa (\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa} (1 -$
$\gamma^5) u^\kappa_j] - \frac{g}{2}\frac{m_u^\lambda}{M} H(\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \frac{g}{2}\frac{m_d^\lambda}{M} H(\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \frac{ig}{2}\frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}^\lambda_j \gamma^5 u^\lambda_j) -$
$\frac{ig}{2}\frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}^\lambda_j \gamma^5 d^\lambda_j) +$

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

gluon

Bozony W i Z

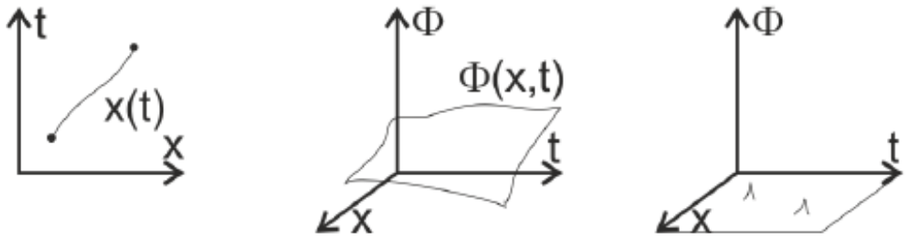
słabe oddziaływanie cząstek

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.

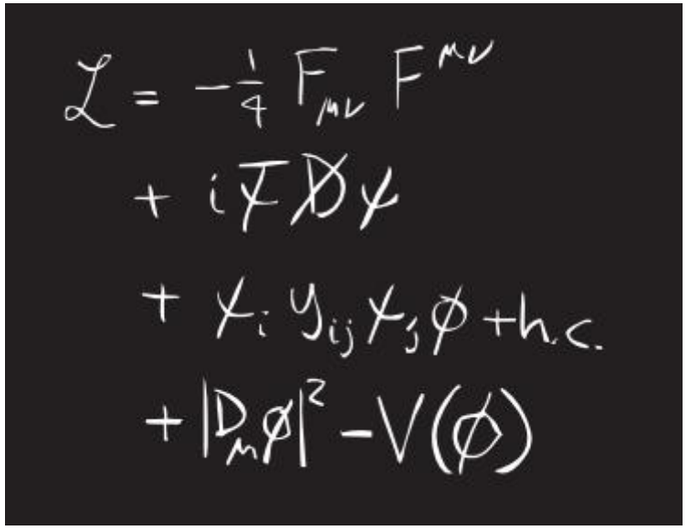


4. QFT to teoria uwzględniająca spin, identyczność cząstek, zjawiska perturbacyjne i nieperturbacyjne.
5. QFT opisuje cząstki o spinie 0 (skalary), 1/2 (fermiony) oraz 1 (cząstki wektorowe – bozony cechowania, czyli przenoszące oddziaływania).

QFT – zwiastuny

QFT czerpie z mechaniki klasycznej, mechaniki kwantowej i mechaniki relatywistycznej

1. W QFT cząstki są stanami wzbudzonymi pola (kwantami pola). Pole jest bardziej fundamentalne niż cząstka.
2. Równania ruchu znajduje się w wyniku minimalizacji lagranżjanu.
3. Oddziaływania pomiędzy cząstkami występują w lagranżjanie jako człony z kwantami pola (np. A_μ)



Model Standardowy

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek

Lagranżjany
klasycznie i kwantowo

Funkcja Lagrange’a

- Model Standardowy opiera się na Kwantowej Teorii Pola (QFT).
- Zarówno w mechanice klasycznej, jak i QFT w opisie dynamiki układu pomocna jest funkcja Lagrange’a (tzw. Lagranżian)

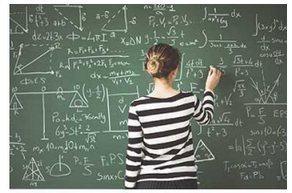
Mechanika klasyczna:

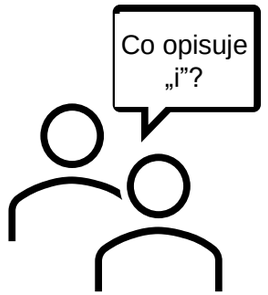
- Równanie ruchu: $\vec{F} = m\vec{a} = m\frac{d\vec{v}}{dt}$ wyprowadzić można znając lagranżian i równania Eulera-Lagrange’a.
- Dla sił zachowawczych mamy: $\vec{F} = -\nabla U$.
- Lagrażian to funkcja uogólnionych współrzędnych q_i i ich pochodnych czasowych $\dot{q}_i$ (brak jawnej zależności od czasu)
- Lagranżian to różnica energii kinetycznej i potencjalnej:

$$L(q_i, \dot{q}_i) = T - U$$

- Równania Eulera-Lagrange’a:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

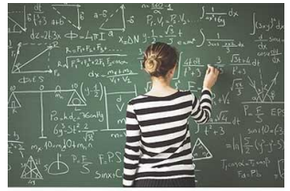




QFT – narzędzia

Maechanika klasyczna:

- Lagranżjan i hamiltonian
- Równanie Eulera-Lagrange’a
- Zasada najmniejszego działania



Relatywistyka

Równanie Schrödingera

Równanie Kleina-Gordona

Pole elektromagnetyczne, lokalna symetria cechowania

Teoria grup – grupy Lie, nieabelowe

Czterowektory
Interwał czasoprzestrzenny
Tensor metryczny
Operatory różniczkowania

Równanie ciągłości.
Gęstość prawdopodobieństwa