

**Problemy Modelu Standardowego
oddziaływań fundamentalnych
oraz ich
możliwe rozwiązania**

Bohdan Grządkowski
Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki
Instytut Fizyki Teoretycznej

Plan

- Model Standardowy (MS) oddziaływań fundamentalnych
- Problemy MS:
 - brak kandydata na ciemną materię
 - naruszenie CP i asymetria barionowa
 - pozostałe trudności kosmologiczne
 - inne problemy
- Rozwiązania problemów MS
- Podsumowanie

Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych

- Cel: opis oddziaływań pomiędzy fundamentalnymi składnikami materii (kwarki, leptyony)
- Język MS: kwantowa teorii pola (na wzór elektrodynamiki)
- Założenia MS:
 - Niezmienniczość ze względu na transformację Lorenta: $x_\mu \rightarrow x'_\mu = \Lambda_\mu^\nu x_\nu$, $x_\mu x^\mu = x'_\mu x'^\mu$, $\mu = 0,1,2,3$
 - Symetria cechowania, np. w elektrodynamice $A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x) + \partial_\mu \lambda(x)$
 - Oddziaływania słabe „przenoszone” przez „masywne naładowane fotony $W^\pm$ ” (hipoteza naładowanych bozonów pośredniczących)

Konstruujemy MS (wzorem jest elektrodynamika)

$$S = \int d^4x \mathcal{L}(A_\mu, \psi, \phi)$$



kwantowanie



cząstki i ich oddziaływania

Konstruujemy MS

(wzorem jest elektrodynamika)

$$S = \int d^4x \mathcal{L} = \int d^4x \left[-\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} (i\gamma^\mu D_\mu - m) \psi \right]$$

$$F_{\mu\nu} \equiv \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu + ieqA_\mu$$

Symetria Lorentza:

$$x_\mu \rightarrow x'_\mu = \Lambda_\mu^\nu x_\nu$$

Symetria cechowania:

$$A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x) + \partial_\mu \lambda(x)$$

$$\psi(x) \rightarrow e^{-ieq\lambda(x)} \psi(x)$$

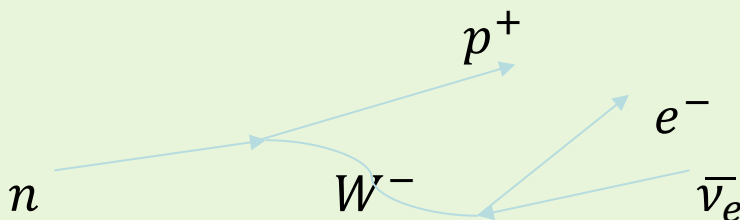
$$D_\mu \psi(x) \rightarrow e^{-ieq\lambda(x)} D_\mu \psi(x)$$

Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych

Konstruujemy MS

- potrzebujemy masywnych naładowanych bozonów $W^\pm$, które “przenosiłyby” oddziaływania słabe (rozpad beta)

$$n \rightarrow p^+ W^- \rightarrow p^+ e^- \bar{\nu}_e$$



- kłopot: fotony nie mają masy ($\frac{1}{2} m_\gamma^2 A_\mu A^\mu$)

$$S = \int d^4x \mathcal{L} = \int d^4x \left[-\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} (i\gamma^\mu D_\mu - m) \psi \right]$$

- $\frac{1}{2} m_V^2 A_\mu A^\mu$ jest zabronione przez symetrię cechowania: $A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x) + \partial_\mu \lambda(x)$

Konstruujemy MS

- potrzebujemy masywnych naładowanych bozonów $W^\pm$, które przenosiłyby oddziaływania słabe (rozpad beta)

$$n \rightarrow p^+ W^- \rightarrow p^+ e^- \bar{\nu}_e$$

- elektrodynamika jest renormalizowalna, a teoria masywnych wektorów nie jest

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{2}m_V^2 A_\mu A^\mu$$

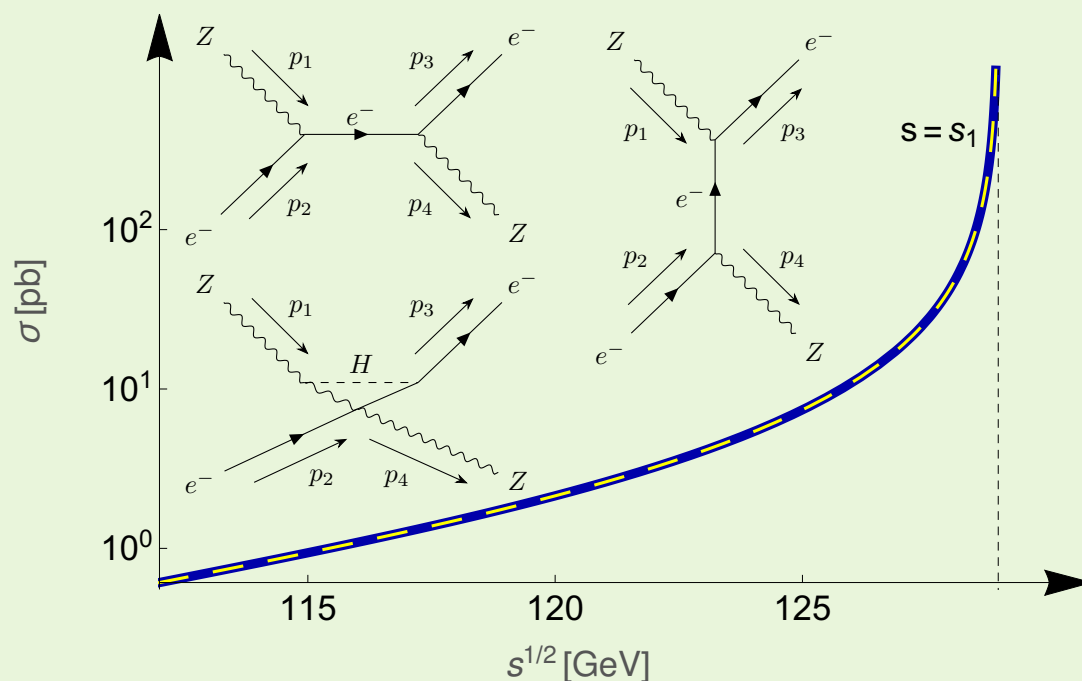
- renormalizowalność:

możliwość usunięcia rozbieżności (∞) przy pomocy przededefiniowania parametrów teorii

Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych

Konstruujemy MS – renormalizowalność

“Drzewowe” diagram Feynmana są zazwyczaj skończone



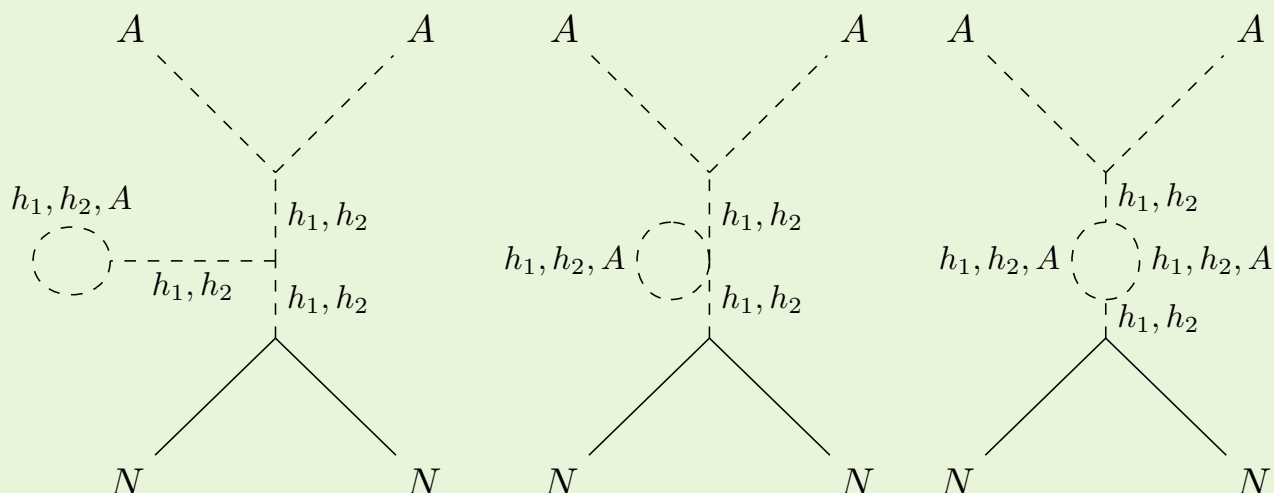
BG, M.Iglicki, S.Mrówczyński, „t-channel singularities in cosmology and particle physics”, *Nucl.Phys.B* 984 (2022)
M.Iglicki, „Thermal regularization of t-channel singularities in cosmology and particle physics: the general case”,
JHEP 06 (2023) 006

„Problemy Modelu Standardowego oddziaływań fundamentalnych oraz ich możliwe rozwiązania”,
48 Zjazd Fizyków Polskich, 7 września 2023, Gdańsk

Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych

Konstruujemy MS

“Pętlowe” diagramy Feynmana są zazwyczaj
rozbieżne (∞)



- chcemy zachować renormalizowalność -

D. Azevedo, M. Duch, BG, D. Huang, M. Iglicki, et al., „Testing scalar versus vector dark matter”,
Phys.Rev.D 99 (2019) 1, 015017;
„One-loop contribution to dark-matter-nucleon scattering in the pseudo-scalar dark matter model”
JHEP 01 (2019) 138

„Problemy Modelu Standardowego oddziaływań fundamentalnych oraz ich możliwe rozwiązania”,
48 Zjazd Fizyków Polskich, 7 września 2023, Gdańsk

Konstruujemy MS

1971 Veltman i t'Hooft dowodzą, że teorie ze spontanicznie złamaną symetrią cechowania są renormalizowalne
1999 Nagroda Nobla



Teorie z masywnymi wektorowymi cząstkami
pośredniczącymi mogą być renormalizowalne !

- „masywne fotony” -

Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych

Konstruujemy MS

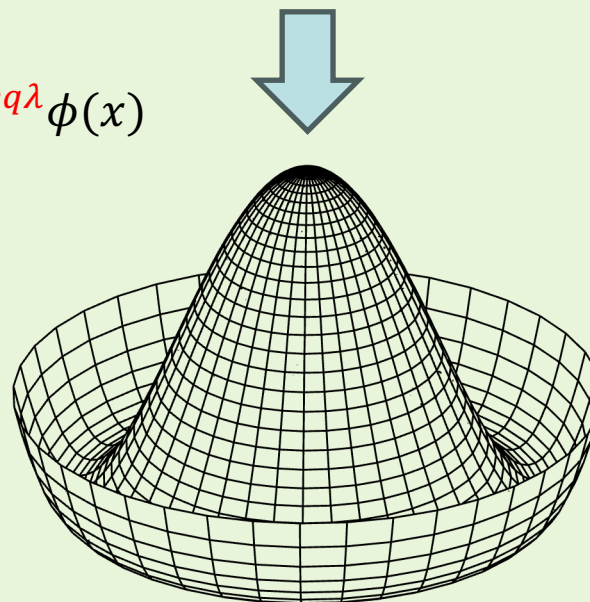
$$S = \int d^4x \boxed{\phantom{\text{Lagrangian}}} + \partial_\mu \phi^* \partial^\mu \phi - \lambda(|\phi|^2 - v^2)^2]$$

- **Globalna** symetria U(1):

$$\phi(x) \rightarrow e^{-ieq\lambda} \phi(x)$$

- Spontaniczne naruszenie globalnej ciągłej symetrii:

**Lagrangian jest niezmienniczy,
jego minimum nie jest**



- Twierdzenie Goldstona:

$$\phi(x) = (h(x) + v)e^{i\theta(x)},$$

$\theta(x)$ - bezmasowy bozon Goldstona,

$h(x)$ - masywny bozon Higgsa

Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych

Konstruujemy MS

$$S = \int d^4x \left[-\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + |D_\mu \phi|^2 - \lambda (|\phi|^2 - v^2)^2 \right]$$

- Lokalna symetria cechowania U(1):

$$A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x) + \partial_\mu \lambda(x)$$

$$\phi(x) \rightarrow e^{-ieq\lambda(x)} \phi(x)$$

$$D_\mu \phi \equiv (\partial_\mu + ieqA_\mu) \phi \rightarrow e^{-ieq\lambda(x)} D_\mu \phi$$

- Spontaniczne naruszenie symetrii cechowania:

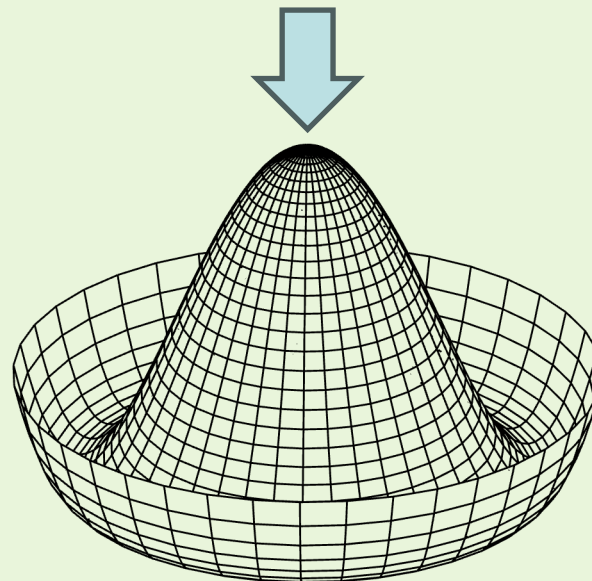
Potencjał jest niezmienniczy,
jego minimum nie jest.

- Mechanizm Higgsa:

$$\phi(x) = (h(x) + v) e^{i\theta(x)},$$

- Pojawia się wyraz masowy dla pola cechowania: $m_V^2 A_\mu A^\mu$, $m_V = ev$,
- $\theta(x)$ - bezmasowy bozon Goldstona znika – staje się podłużną składową masywnego bozonu cechowania,
- $h(x)$ - masywny bozon Higgsa

„Problemy Modelu Standardowego oddziaływań fundamentalnych oraz ich możliwe rozwiązania”,
48 Zjazd Fizyków Polskich, 7 września 2023, Gdańsk



Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych

Model Standardowy

- Teoria cechowania ze spontanicznie złamaną symetrią
- Opisuje oddziaływania elektromagnetyczne i słabe (i silne)
- Grupa symetrii: $SU(2)_L \times U(1)_Y$ (4 generatory)
- Bozony cechowania (wektorowe): $W^\pm, Z, \gamma$
- Pozostałe bozony (skalarne): h
- Fermiony: kwarki, leptony
- Transformacje ze względu na grupę symetrii (reprezentacje):
 - ❑ kwarki: $q_L \propto \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{3}\right)$, $u_R \propto \left(0, \frac{4}{3}\right)$, $d_R \propto \left(0, -\frac{2}{3}\right)$
 - ❑ leptony: $l_L \propto \left(\frac{1}{2}, -1\right)$, $l_R \propto (0, -2)$, $\nu_R \propto (0, 0)$
 - ❑ skalary (bozon Higgsa): $\phi \propto \left(\frac{1}{2}, 1\right)$

Jeden parametr o wymiarze masy: $v \cong 246 \text{ GeV}/c^2$

Wszystkie masy $\propto v$

THE STANDARD MODEL OF FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model is a quantum theory that summarizes our current knowledge of the physics of fundamental particles and fundamental interactions (interactions are manifested by forces and by decay rates of unstable particles).

FERMIONS

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

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_l lightest neutrino*	$(0-0.8) \times 10^{-9}$	0	u up	0.0022	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.0047	-1/3
ν_μ middle neutrino*	$(0.009-0.8) \times 10^{-9}$	0	c charm	1.27	2/3
μ muon	0.1057	-1	s strange	0.0934	-1/3
ν_τ heaviest neutrino*	$(0.05-0.8) \times 10^{-9}$	0	t top	172.7	2/3
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.18	-1/3

*See the neutrino paragraph below.

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of $\hbar$, which is the quantum unit of angular momentum where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$ GeV s $= 1.05 \times 10^{-34}$ J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c² (remember $E = mc^2$) where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10}$ joule. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

Neutrinos

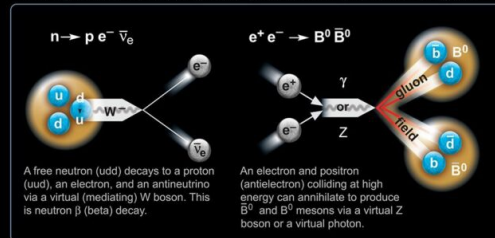
Neutrinos are produced in the sun, supernovae, reactors, accelerator collisions, and many other processes. Any produced neutrino can be described as one of three neutrino flavor states ν_e , ν_μ , or ν_τ , labelled by the type of charged lepton associated with its production. Each is a defined quantum mixture of the three definite-mass neutrinos ν_1 , ν_2 , and ν_3 for which currently allowed mass ranges are shown in the table. Further exploration of the properties of neutrinos may yield powerful clues to puzzles about matter and antimatter and the evolution of stars and galaxy structures.

Matter and Antimatter

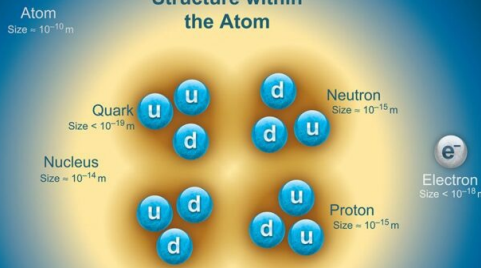
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$ but not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

Particle Processes

These diagrams are an artist's conception. Orange shaded areas represent the cloud of gluons.



Structure within the Atom



If the proton 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.

Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction	Electromagnetic Interaction (Electroweak)	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons
Strength at $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-16} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60

BOSONS

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

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W^-	80.38	-1	Higgs Boson spin = 0		
W^+	80.38	+1	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
Z^0 Z boson	91.188	0	H Higgs	125.25	0

Higgs Boson

The Higgs boson is a critical component of the Standard Model. The associated Higgs field provides the mechanism by which fundamental particles get mass. Particles that interact more strongly with the Higgs field are more massive.

Color Charge

Only quarks and gluons carry "strong charge" (also called "color charge") and can have strong interactions. Each quark carries three types of color charge. These charges have nothing to do with the colors of visible light. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions, color-charged particles interact by exchanging gluons.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

Quarks and gluons cannot be isolated – 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. 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 . Among the many types of baryons observed are the proton (uud), antiproton ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$), and neutron (udd). Quark charges add in such a way as to make the proton have charge 1 and the neutron charge 0. Among the many types of mesons are the pion π^+ ($u\bar{d}$), kaon K^+ ($u\bar{s}$), and B^0 ($d\bar{b}$).

Learn more at ParticleAdventure.org



Unsolved Mysteries

Driven by new puzzles in our understanding of the physical world, particle physicists are following paths to new wonders and startling discoveries. Experiments may even find extra dimensions of space, microscopic black holes, and/or evidence of string theory.

Why is the Universe Accelerating?



The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?

Why No Antimatter?



Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

What is Dark Matter?



Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?

Are there Extra Dimensions?



An indication for extra dimensions may be the extreme weakness of gravity compared with the other three fundamental forces (gravity is so weak that a small magnet can pick up a paper clip overwhelming Earth's gravity).

Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych

Sector pól skalarnych (bozon Higgsa) MS

$$SU(2)_L \times U(1)_Y : \phi \propto \left(\frac{1}{2}, 1\right)$$

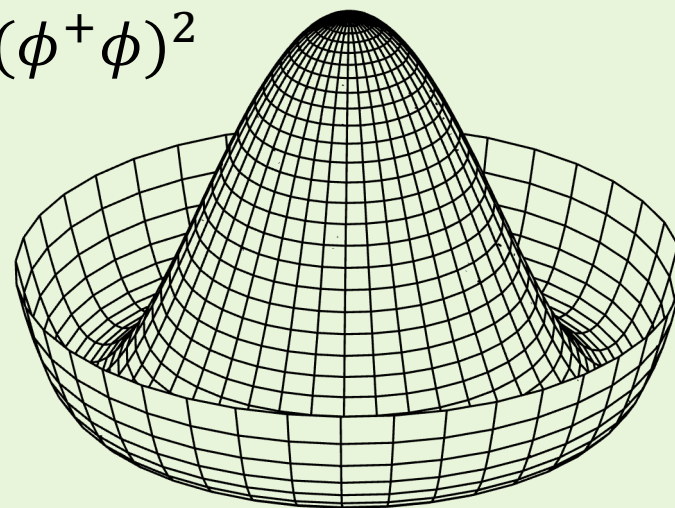
$$\phi(x) = \begin{pmatrix} G^+(x) \\ \frac{h(x) + v + i G^0(x)}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$V(\phi) = \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2$$

$G^{\pm,0}$ - bozony Goldstona

h - bozon Higgsa

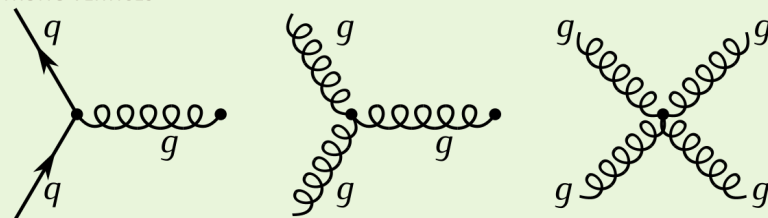
$v = 246 \text{ GeV}/c^2$ - vev



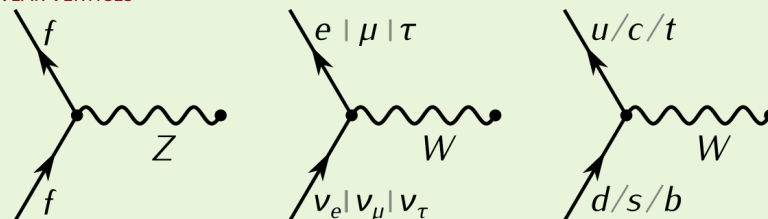
Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych

MS - oddziaływania

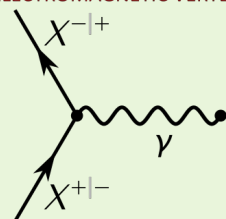
STRONG VERTICES



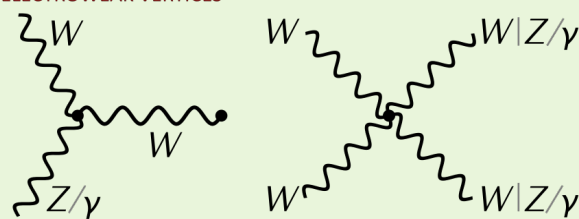
WEAK VERTICES



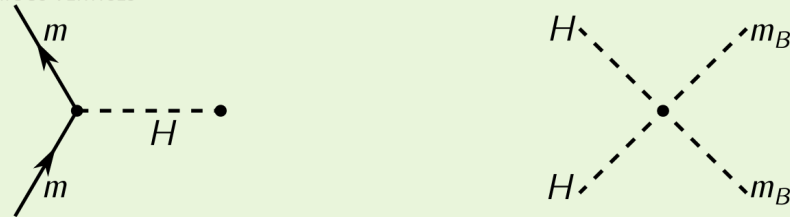
ELECTROMAGNETIC VERTEX



ELECTROWEAK VERTICES

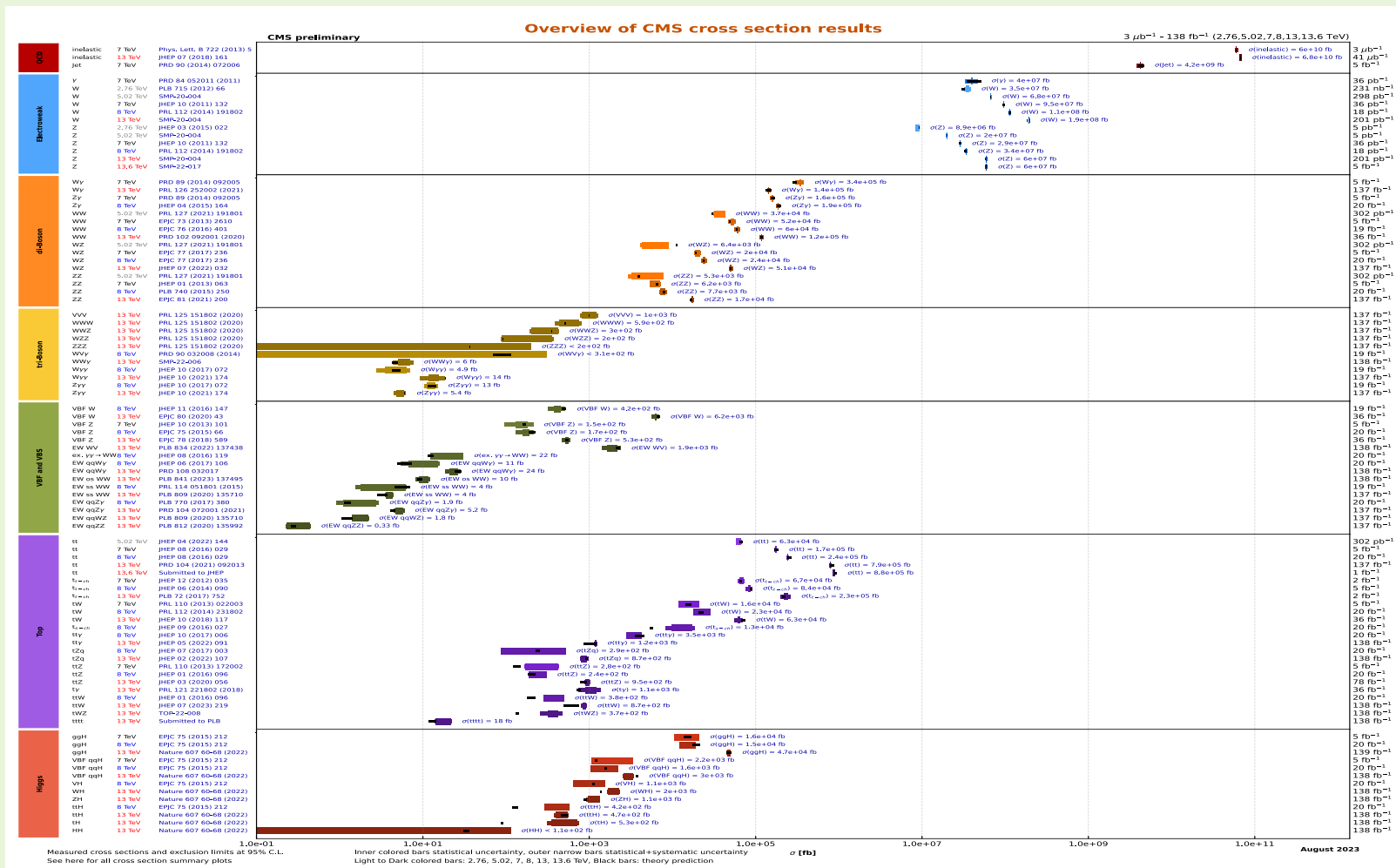


HIGGS VERTICES



Model Standardowy oddziaływań fundamentalalnych

Testy Modelu Standardowego



„Problemy Modelu Standardowego oddziaływań fundamentalnych oraz ich możliwe rozwiązania”

48 Zjazd Fizyków Polskich, 7 września 2023, Gdańsk

Testy Modelu Standardowego

4 lipca 2012 ogłoszone zostało odkrycie nowej cząstki elementarnej przez detektory ATLAS i CMS, w eksperymentach prowadzonych w Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC) w CERN. W kwietniu 2013 roku zespoły pracujące przy detektorach CMS i ATLAS ostatecznie stwierdziły, że cząstka ta jest bozonem Higgsa przewidzianym przez MS.

Inspiracją była chęć eleganckiego (renormalizowalnego) uogólnienia elektrodynamiki (masywne fotony) !!!

- Przewidywania MS zostały doświadczalnie potwierdzone w kilkudziesięciu (kilkuset?) pomiarach
- Największe odstępstwa od przewidywań MS obserwowane w pomiarach akceleratorowych:
 - masy bozonu $W^\pm$ CDF, Fermilab) : $\sim 7\sigma$ (duże niepewności teoretyczne)
 - anormalnego momentu magnetycznego mionu, a_μ (The Muon g-2 experiment, Fermilab) : 4.2σ (duże niepewności teoretyczne)

Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych

8 October 2013

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics for 2013 to

François Englert
Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium

and

Peter W. Higgs
University of Edinburgh, UK

“for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider”

Problemy Modelu Standardowego

1. Czy/Dlaczego istnieje tylko jeden bozon Higgsa?
2. Skąd się biorą masy cząstek i czemu są takie – jakie są?
3. Gdzie się podziała antymateria? Potrzebujemy dodatkowych źródeł naruszenia symetrii CP.
4. Problem silnego łamania CP.
5. Gdzie i czym jest niewidoczna część Wszechświata? („ciemna materia” i „ciemna energia”)
6. Jak formował się wczesny Wszechświat – „gdzie” jest inflaton?

Wierzimy, że Model Standardowy nie jest ostateczną teorią oddziaływań fundamentalnych

Problemy Modelu Standardowego

Wierzmy, że Model Standardowy nie jest ostateczną teorią oddziaływań fundamentalnych

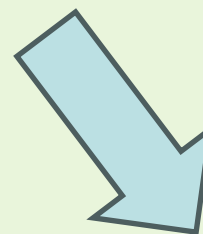


Efektywna teoria pola (EFT) o symetrii $SU(2)_L \times U(1)_Y$ zawierająca operatory wymiaru > 4 :

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \frac{c}{\Lambda} O_5 + \frac{1}{\Lambda^2} \sum_i c_i O_i$$

“Warsaw basis”: 59 operatorów O_i (dim 6) zbudowanych z pól MS

BG, M. Iskrzynski, M. Misiak, J. Rosiek, „Dimension-Six Terms in the Standard Model Lagrangian”, *JHEP* 10 (2010) 085



Konkretne modele/teorie uogólniające MS:

- Dodatkowe bozony cechowania, np. $U(1)'$,
- Dodatkowe fermiony, np. kwarki wektorowe,
- Dodatkowe bozony Higgsa, np. 2HDM, 3HDM

Problemy Modelu Standardowego

1. Skoro istnieje wiele fermionów (kwarki, leptony) oraz wiele bozonów wektorowych (fotony, $W^\pm$, Z , gluony), to czy nie byłoby naturalne żeby istniało wiele bozonów Higgsa, np. 3 dublety (rodziny), podobnie do 3 rodzin kwarków i leptonów?

2. MS nie zawiera pól odpowiedzialnych za inflację kosmologiczną. Czy cząstka Higgsa może być inflatonem?

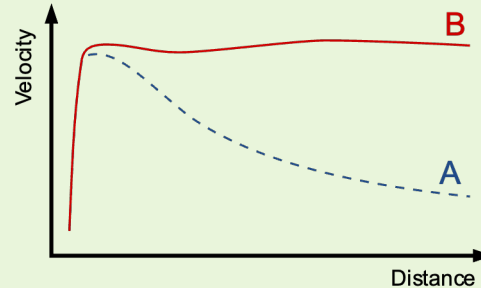
3. MS nie zawiera pól/cząstek tworzących ciemną materię. Czy inne cząstki typu bozonu Higgsa mogą być ciemną materią?

Jest bardzo prawdopodobne, że rozwiązanie problemów współczesnej kosmologii pozwoli „przy okazji” znaleźć „ostateczną” teorię oddziaływań fundamentalnych
- teorię wszystkiego -

Problemy Modelu Standardowego

Ciemna materia istnieje

- krzywe rotacyjne,
1933 Fritz Zwicky,



- soczewkowanie grawitacyjne,
- CMB, Planck Collaboration:
 $\Omega_c h^2 = 0.120 \pm 0.001$
- formowanie struktur



Hubble Space Telescope in
Abell 1689

MOND (zmodyfikowana dynamika newtonowska):

gdzie $a_0 \sim 10^{-10} m/s^2$

$$m\vec{a}\left(\frac{a}{a+a_0}\right)=\vec{F}$$

Problemy Modelu Standardowego

Asymetria barionowa:

Nie obserwujemy antymaterii we Wszechświecie

- Warunek konieczny do wyjaśnienia asymetrii: silne łamanie symetrii CP
- Łamanie CP w MS jest za słabe do wyjaśnienia asymetrii barionowej
- Zespolone parametry w Lagrangianie $\Rightarrow$ łamanie CP

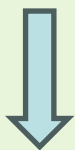
Problemy Modelu Standardowego

Problem ciemnej energii (problem stałej kosmologicznej)

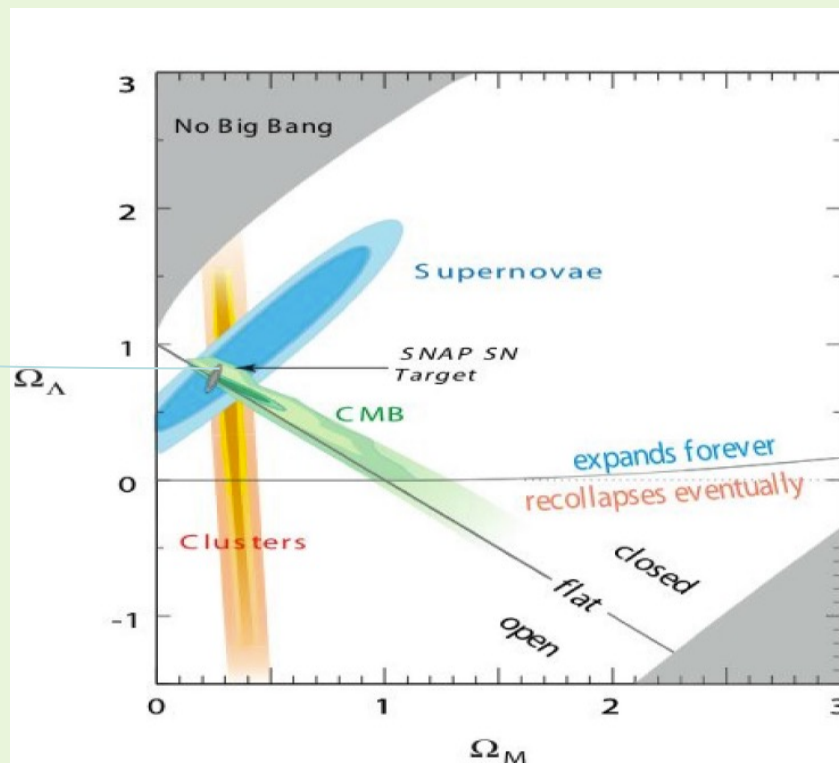
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi \frac{G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

$$\Omega_{\Lambda} \equiv \frac{\rho_{\Lambda}}{\rho_c}$$

$$\Omega_{\Lambda} \sim 0.7$$



$$\rho_{\Lambda} \sim 10^{-46} \text{ GeV}^4$$



Grawitacja



$$\rho_{\Lambda} \sim M_{Pl}^4 \sim 10^{76} \text{ GeV}^4$$

Rozwiązania problemów MS

Rozszerzenie sektora pól skalarnych (pól Higgsa):

- istnienie neutralnej elektrycznie i stabilnej cząstki (ciemna materia),
- istnienie nowych źródeł łamania symetrii CP

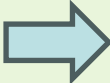
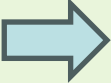
Postulaty:

- dodatkowe rzeczywiste pole skalarne, S , lub
- dodatkowe zespolone pole skalarne, S , lub
- dodatkowy dublet $SU(2)$ pól skalarnych, ϕ_2 , (2HDM), lub
- dodatkowe dwa dublety $SU(2)$ pól skalarnych, ϕ_2, ϕ_3 , (3HDM).

Rozwiązania problemów MS

Dodatkowe rzeczywiste pole skalarne S

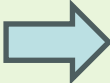
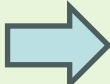
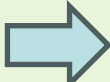
$$V(\phi, S) = -\mu_\phi^2 |\phi|^2 + \lambda_\phi |\phi|^4 - \mu_S^2 S^2 + \lambda_S S^4 + \kappa S^2 |\phi|^2$$

- ϕ - Bozon Higgsa z MS
- Z_2 - niezłamana symetria: $S \rightarrow -S$,  stabilność
- S – kandydat na ciemną materię
- parametry rzeczywiste  brak dodatkowego łamania CP

Rozwiązania problemów MS

Dodatkowe zespolone pole skalarne S

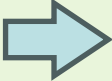
$$V(\phi, S) = \underbrace{-\mu_\phi^2 |\phi|^2 + \lambda_\phi |\phi|^4 - \mu_S^2 |S|^2 + \lambda_S |S|^4 + \kappa |S|^2 |\phi|^2}_{U(1) - \text{symetryczne}} \underbrace{- \mu^2 (S^2 + S^{*2})}_{\text{miękkie łamanie } U(1)}$$

- ϕ - Bozon Higgsa z MS
- Z_2 - dokładna symetria: $S \rightarrow -S$,  stabilność $\text{Im } S$
- $U(1)$ miętko złamana przez $\mu^2 (S^2 + S^{*2})$  pGDM
- Naturalne tłumienie rozpraszania na jądrach w bezpośrednich poszukiwaniach ciemnej materii (direct detection)
- parametry rzeczywiste  **brak dodatkowego łamania CP**

Rozwiązania problemów MS

Dodatkowe dublet $SU(2)$ pól skalarnych

$$V(\phi_1, \phi_2) = -\frac{1}{2}\{m_{11}^2|\phi_1|^2 + m_{22}^2|\phi_2|^2 + [m_{12}^2 \phi_1^\dagger \phi_2 + H.c.]\} + \\ \frac{1}{2}\lambda_1|\phi_1|^4 + \frac{1}{2}\lambda_2|\phi_2|^4 + \lambda_3|\phi_1|^2|\phi_2|^2 + \lambda_4\phi_1^\dagger\phi_2\phi_2^\dagger\phi_1 + \\ \left\{\frac{1}{2}\lambda_5(\phi_1^\dagger\phi_2)^2 + [\lambda_6|\phi_1|^2 + \lambda_7|\phi_2|^2]\phi_1^\dagger\phi_2 + H.c.\right\}$$

- $m_{12}^2, \lambda_{5,6,7}$ - zespolone  dodatkowe łamanie CP
- brak kandydata na ciemną materię

Rozwiązania problemów MS

Minimalny model zawierający kandydata na ciemną materię i
dodatkowe źródło łamania CP

Rozwiązania problemów MS

Minimalny model zawierający kandydata na ciemną materię i dodatkowe źródło łamania CP

- $\phi_{1,2} \Rightarrow$ zespolone parametry $\Rightarrow$ łamanie CP
- singlet $SU(2)$, rzeczywisty lub zespolony, symetria $Z_2 \Rightarrow$ kandydat na ciemną materię

N. Darvishi, BG, „Pseudo-Goldstone dark matter model with CP violation”, *JHEP* 06 (2022) 092

Rozwiązania problemów MS

Minimalny model zawierający kandydata na ciemną materię i dodatkowe źródło łamania CP

- $\phi_{1,2} \Rightarrow$ zespolone parametry $\Rightarrow$ łamanie CP
- singlet $SU(2)$, rzeczywisty lub zespolony, symetria $Z_2 \Rightarrow$ kandydat na ciemną materię

N. Darvishi, BG, „Pseudo-Goldstone dark matter model with CP violation”, *JHEP* 06 (2022) 092

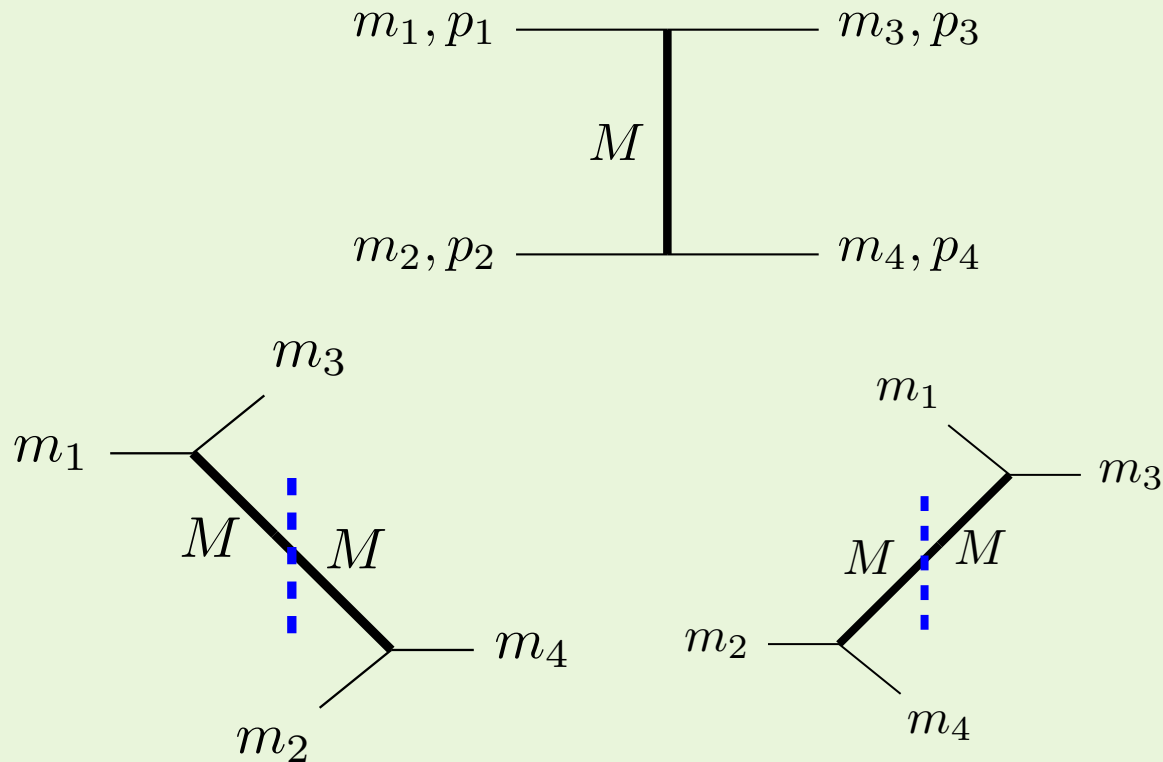
- $\phi_{1,2} \Rightarrow$ zespolone parametry $\Rightarrow$ łamanie CP
- ϕ_3 - dublet $SU(2)$, symetria $Z_2 \Rightarrow$ kandydat na ciemną materię

BG, O.M. Ogreid, P. Osland, et al., „Exploring the CP-Violating Inert-Doublet Model”, *JHEP* 06 (2011) 003

Podsumowanie

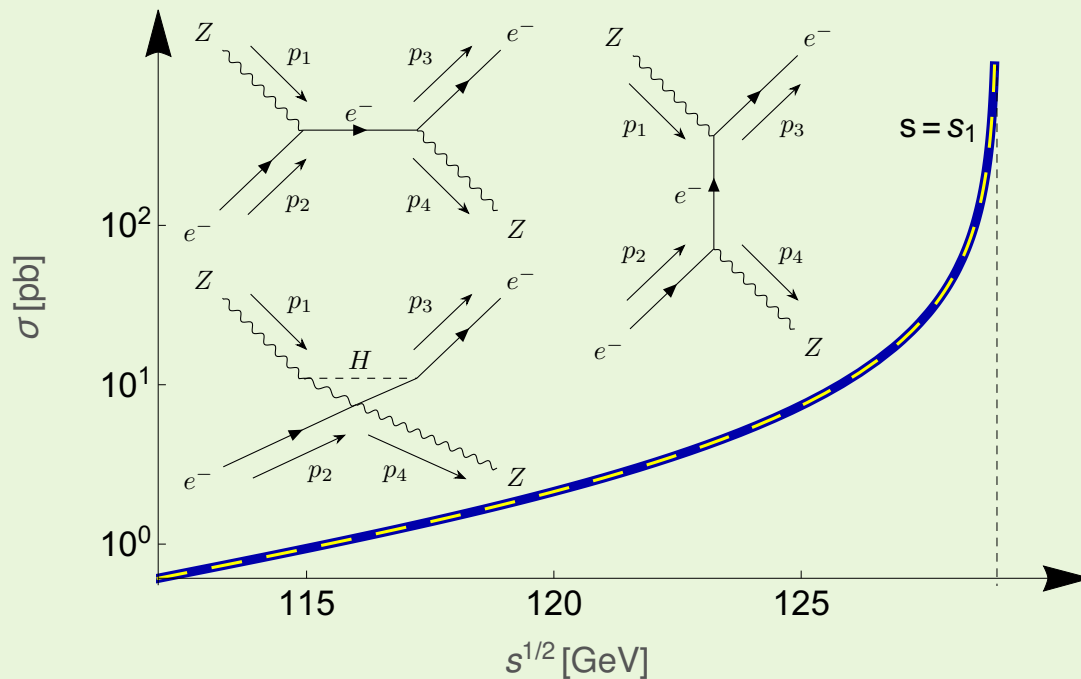
- MS nie jest doskonały (ciemna materia, asymetria barionowa, ciemna energia, silne łamanie CP) i wymaga naprawy/rozszerzenia.
- Modele zawierające dodatkowe dublety i singlety pól skalarnych oferują atrakcyjne uogólnienia MS.
- 3HDM dostarcza kandydata na ciemną materię i dodatkowych źródeł łamania CP

Dygresja: „osobliwość w kanale t ”



Jeśli mediator M is stabilny ($\Gamma_M = 0$) może pojawić się osobliwość w $t = M^2$.

Dygresja: „osobliwość w kanale t ”



Problemy Modelu Standardowego

1. Parametry MS (z 3. ν_R):

- masy(stałe Yukawy) fermionów: 6(kwarki)+6(naładowane leptony i neutrino)+3(masy Majorany)
- stałe sprzężenia ($g, g', g_s, \lambda, U_{CKM}$): 4+4
- parametr masowy (μ^2): 1

W sumie : 24

2. Czy/Dlaczego istnieje tylko jeden bozon Higgsa?

3. Skąd się biorą masy cząstek i czemu są takie – jakie są?

4. Gdzie się podziała antymateria? Potrzebujemy dodatkowych źródeł naruszenia symetrii CP.

5. Problem silnego łamania CP.

6. Gdzie i czym jest niewidoczna część Wszechświata? („ciemna materia” i „ciemna energia”)

7. Jak formował się wczesny Wszechświat – „gdzie” jest inflaton?

Wierzimy, że Model Standardowy nie jest ostateczną teorią oddziaływań fundamentalnych