

# Podstawowe składniki materii i ich oddziaływanie

Karol Kołodziej

Instytut Fizyki  
Uniwersytet Śląski, Katowice  
<http://kk.us.edu.pl>

Dziś dysponujemy kwantową teorią oddziaływania elektromagnetycznego - elektrodynamiką kwantową - najdokładniejszą teorią fizyczną.

⇒ Zakaz Pauliego jest konsekwencją odpowiednich reguł kwantyzacji pól (P.A.M. Dirac).

Dziś dysponujemy kwantową teorią oddziaływania elektromagnetycznego - elektrodynamiką kwantową - najdokładniejszą teorią fizyczną.

⇒ Zakaz Pauliego jest konsekwencją odpowiednich reguł kwantyzacji pól (P.A.M. Dirac).

⇒ Oddziaływanie elektromagnetyczne jest przenoszone przez fotony.

Dziś dysponujemy **kwantową teorią oddziaływania elektromagnetycznego** - **elektrodynamiką kwantową** - najdokładniejszą teorią fizyczną.

⇒ Zakaz Pauliego jest konsekwencją odpowiednich reguł kwantyzacji pól (**P.A.M. Dirac**).

⇒ Oddziaływanie elektromagnetyczne jest przenoszone przez **fotony**.

Ten obraz wynika z pewnej **wewnętrznej symetrii** teorii, nazywanej **symetrią cechowania**, która pozwala również opisać pozostałe dwa oddziaływania rządzące mikroświatem.

Dziś dysponujemy **kwantową teorią oddziaływania elektromagnetycznego** - **elektrodynamiką kwantową** - najdokładniejszą teorią fizyczną.

⇒ Zakaz Pauliego jest konsekwencją odpowiednich reguł kwantyzacji pól (**P.A.M. Dirac**).

⇒ Oddziaływanie elektromagnetyczne jest przenoszone przez **fotony**.

Ten obraz wynika z pewnej **wewnętrznej symetrii** teorii, nazywanej **symetrią cechowania**, która pozwala również opisać pozostałe dwa oddziaływania rządzące mikroświatem.

Ponieważ **fotony są bezmasowe** ⇒ **oddziaływanie elektromagnetyczne ma bardzo duży (nieskończony) zasięg**.

Dziś dysponujemy **kwantową teorią oddziaływania elektromagnetycznego** - **elektrodynamiką kwantową** - najdokładniejszą teorią fizyczną.

⇒ Zakaz Pauliego jest konsekwencją odpowiednich reguł kwantyzacji pól (**P.A.M. Dirac**).

⇒ Oddziaływanie elektromagnetyczne jest przenoszone przez **fotony**.

Ten obraz wynika z pewnej **wewnętrznej symetrii** teorii, nazywanej **symetrią cechowania**, która pozwala również opisać pozostałe dwa oddziaływania rządzące mikroświatem.

Ponieważ **fotony są bezmasowe** ⇒ **oddziaływanie elektromagnetyczne ma bardzo duży (nieskończony) zasięg**.

Proton i neutron nie są obiektami elementarnymi.

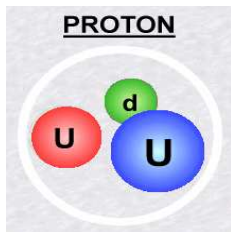
Każdy z nich składa się z trzech kwarków - cząstek o ułamkowym ładunku elektrycznym. (G. Zweig i M. Gell-Mann, 1964, nagroda Nobla dla Gell-Manna w 1969 r.)

# Kwarki

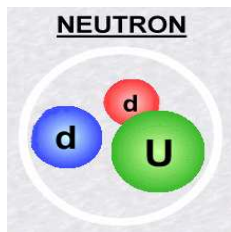
Proton i neutron nie są obiektami elementarnymi.

Każdy z nich składa się z trzech kwarków - cząstek o ułamkowym ładunku elektrycznym. (G. Zweig i M. Gell-Mann, 1964, nagroda Nobla dla Gell-Manna w 1969 r.)

Kwark  $u$  (górnny) ma ładunek  $+\frac{2}{3} e$ , a kwark  $d$  (dolny) ma ładunek  $-\frac{1}{3} e$ .



$$\frac{2}{3} e + \frac{2}{3} e - \frac{1}{3} e = e$$



$$\frac{2}{3} e - \frac{1}{3} e - \frac{1}{3} e = 0$$

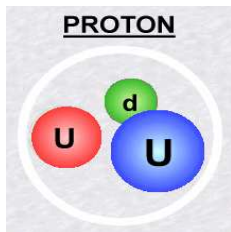


# Kwarki

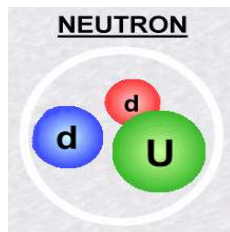
Proton i neutron nie są obiektami elementarnymi.

Każdy z nich składa się z trzech kwarków - cząstek o ułamkowym ładunku elektrycznym. (G. Zweig i M. Gell-Mann, 1964, nagroda Nobla dla Gell-Manna w 1969 r.)

Kwark  $u$  (górnny) ma ładunek  $+\frac{2}{3} e$ , a kwark  $d$  (dolny) ma ładunek  $-\frac{1}{3} e$ .

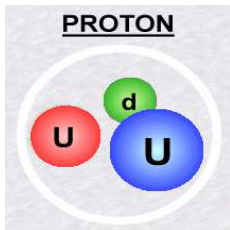


$$\frac{2}{3} e + \frac{2}{3} e - \frac{1}{3} e = e$$



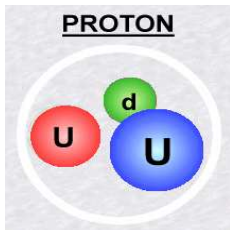
$$\frac{2}{3} e - \frac{1}{3} e - \frac{1}{3} e = 0$$

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami



Jednakowo naładowane kwarki  $u$  odpychają się elektrostatycznie znacznie bardziej niż są przyciągane przez kwark  $d$ .

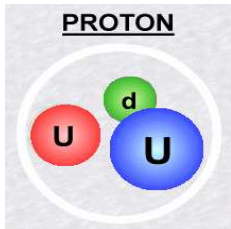
# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami



Jednakowo naładowane kwarki  $u$  odpychają się elektrostatycznie znacznie bardziej niż są przyciągane przez kwark  $d$ .

Jaka siła utrzymuje proton w całości?

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami

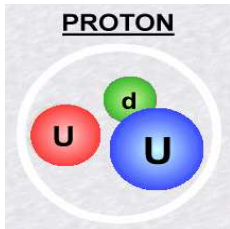


Jednakowo naładowane kwarki  $u$  odpychają się elektrostatycznie znacznie bardziej niż są przyciągane przez kwark  $d$ .

Jaka siła utrzymuje proton w całości?

Kwarki obdarzone są dodatkowym ładunkiem, który występuje w trzech odmianach.

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami

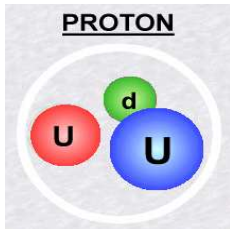


Jednakowo naładowane kwarki  $u$  odpychają się elektrostatycznie znacznie bardziej niż są przyciągane przez kwark  $d$ .

Jaka siła utrzymuje proton w całości?

Kwarki obdarzone są dodatkowym ładunkiem, który występuje w trzech odmianach. Przez analogię z podstawowymi kolorami: czerwonym, zielonym i niebieskim, nazywamy go kolorem.

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami



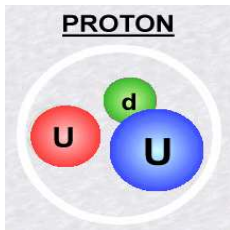
Jednakowo naładowane kwarki  $u$  odpychają się elektrostatycznie znacznie bardziej niż są przyciągane przez kwark  $d$ .

Jaka siła utrzymuje proton w całości?

Kwarki obdarzone są dodatkowym ładunkiem, który występuje w trzech odmianach. Przez analogię z podstawowymi kolorami: czerwonym, zielonym i niebieskim, nazywamy go kolorem.

Proton nie posiada koloru.

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami



Jednakowo naładowane kwarki  $u$  odpychają się elektrostatycznie znacznie bardziej niż są przyciągane przez kwark  $d$ .

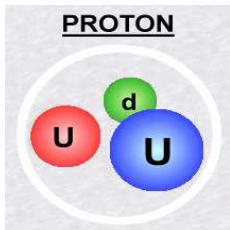
Jaka siła utrzymuje proton w całości?

Kwarki obdarzone są dodatkowym ładunkiem, który występuje w trzech odmianach. Przez analogię z podstawowymi kolorami: czerwonym, zielonym i niebieskim, nazywamy go kolorem.

Proton nie posiada koloru.

Kwarki oddziałują wymieniając pomiędzy sobą gluony.

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami



Jednakowo naładowane kwarki  $u$  odpychają się elektrostatycznie znacznie bardziej niż są przyciągane przez kwark  $d$ .

Jaka siła utrzymuje proton w całości?

Kwarki obdarzone są dodatkowym ładunkiem, który występuje w trzech odmianach. Przez analogię z podstawowymi kolorami: czerwonym, zielonym i niebieskim, nazywamy go kolorem.

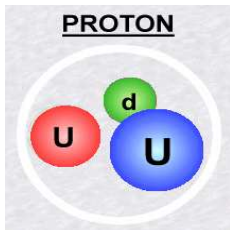
Proton nie posiada koloru.

Kwarki oddziałują wymieniając pomiędzy sobą gluony.

Gluony, tak jak foton, są bezmasowe i elektrycznie neutralne.



# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami



Jednakowo naładowane kwarki  $u$  odpychają się elektrostatycznie znacznie bardziej niż są przyciągane przez kwark  $d$ .

Jaka siła utrzymuje proton w całości?

Kwarki obdarzone są dodatkowym ładunkiem, który występuje w trzech odmianach. Przez analogię z podstawowymi kolorami: czerwonym, zielonym i niebieskim, nazywamy go kolorem.

Proton nie posiada koloru.

Kwarki oddziałują wymieniając pomiędzy sobą gluony.

Gluony, tak jak foton, są bezmasowe i elektrycznie neutralne.

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami

Gluony są jednak obdarzone ładunkiem kolorowym, a foton jest elektrycznie neutralny.

Gluony są jednak obdarzone ładunkiem kolorowym, a foton jest elektrycznie neutralny.

To sprawia, że oddziaływanie silne ma zupełnie inne własności niż oddziaływanie elektromagnetyczne.

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami

Gluony są jednak obdarzone ładunkiem kolorowym, a foton jest elektrycznie neutralny.

To sprawia, że oddziaływanie silne ma zupełnie inne własności niż oddziaływanie elektromagnetyczne.

Im większa odległość pomiędzy kwarkami,

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami

Gluony są jednak obdarzone ładunkiem kolorowym, a foton jest elektrycznie neutralny.

To sprawia, że oddziaływanie silne ma zupełnie inne własności niż oddziaływanie elektromagnetyczne.

Im większa odległość pomiędzy kwarkami, tym silniej się one przyciągają.

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami

Gluony są jednak obdarzone ładunkiem kolorowym, a foton jest elektrycznie neutralny.

To sprawia, że oddziaływanie silne ma zupełnie inne własności niż oddziaływanie elektromagnetyczne.

Im większa odległość pomiędzy kwarkami, tym silniej się one przyciągają.

Przy pewnej odległości, energia oddziaływania kwarków staje się na tyle duża, że wystarcza na wykreowanie nowej pary kwark-antykwar.

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami

Gluony są jednak obdarzone ładunkiem kolorowym, a foton jest elektrycznie neutralny.

To sprawia, że oddziaływanie silne ma zupełnie inne własności niż oddziaływanie elektromagnetyczne.

Im większa odległość pomiędzy kwarkami, tym silniej się one przyciągają.

Przy pewnej odległości, energia oddziaływania kwarków staje się na tyle duża, że wystarcza na wykreowanie nowej pary kwark-antykwar.

W ten sposób z oddziałujących kwarków powstają nowe, pozbawione koloru cząstki, takie jak proton, neutron, czy mezony, złożone z kwarka i antykwarka.

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami

Gluony są jednak obdarzone ładunkiem kolorowym, a foton jest elektrycznie neutralny.

To sprawia, że oddziaływanie silne ma zupełnie inne własności niż oddziaływanie elektromagnetyczne.

Im większa odległość pomiędzy kwarkami, tym silniej się one przyciągają.

Przy pewnej odległości, energia oddziaływania kwarków staje się na tyle duża, że wystarcza na wykreowanie nowej pary kwark-antykwar.

W ten sposób z oddziałujących kwarków powstają nowe, pozbawione koloru cząstki, takie jak proton, neutron, czy mezony, złożone z kwarka i antykwarka.

Zjawisko to nosi nazwę uwięzienia kwarków.



# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami

Gluony są jednak obdarzone ładunkiem kolorowym, a foton jest elektrycznie neutralny.

To sprawia, że oddziaływanie silne ma zupełnie inne własności niż oddziaływanie elektromagnetyczne.

Im większa odległość pomiędzy kwarkami, tym silniej się one przyciągają.

Przy pewnej odległości, energia oddziaływania kwarków staje się na tyle duża, że wystarcza na wykreowanie nowej pary kwark-antykwar.

W ten sposób z oddziałujących kwarków powstają nowe, pozbawione koloru cząstki, takie jak proton, neutron, czy mezony, złożone z kwarka i antykwarka.

Zjawisko to nosi nazwę uwięzienia kwarków.

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami

Jeżeli natomiast odległość pomiędzy kwarkami maleje, to maleje siła ich oddziaływania, tak że zachowują się one jak cząstki prawie swobodne.

Jeżeli natomiast odległość pomiędzy kwarkami maleje, to maleje siła ich oddziaływania, tak że zachowują się one jak cząstki prawie swobodne.

Zjawisko to nosi nazwę **swobody asymptotycznej**.

Jeżeli natomiast odległość pomiędzy kwarkami maleje, to maleje siła ich oddziaływania, tak że zachowują się one jak cząstki prawie swobodne.

Zjawisko to nosi nazwę **swobody asymptotycznej**.

Kwarki  $u$  i  $d$  są bardzo lekkie.

Jeżeli natomiast odległość pomiędzy kwarkami maleje, to maleje siła ich oddziaływania, tak że zachowują się one jak cząstki prawie swobodne.

Zjawisko to nosi nazwę **swobody asymptotycznej**.

Kwarki  $u$  i  $d$  są bardzo lekkie.

Suma ich mas stanowi zaledwie około 2% masy protonu.

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami

Jeżeli natomiast odległość pomiędzy kwarkami maleje, to maleje siła ich oddziaływania, tak że zachowują się one jak cząstki prawie swobodne.

Zjawisko to nosi nazwę **swobody asymptotycznej**.

Kwarki  $u$  i  $d$  są bardzo lekkie.

Suma ich mas stanowi zaledwie około 2% masy protonu.

Skąd bierze się pozostałe 98% masy protonu?

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami

Jeżeli natomiast odległość pomiędzy kwarkami maleje, to maleje siła ich oddziaływania, tak że zachowują się one jak cząstki prawie swobodne.

Zjawisko to nosi nazwę **swobody asymptotycznej**.

Kwarki  $u$  i  $d$  są bardzo lekkie.

Suma ich mas stanowi zaledwie około 2% masy protonu.

**Skąd bierze się pozostałe 98% masy protonu?**

Prawie cała masa protonu wynika z energii kinetycznej kwarków i gluonów oraz energii ich oddziaływania.

# Oddziaływania silne pomiędzy kwarkami

Jeżeli natomiast odległość pomiędzy kwarkami maleje, to maleje siła ich oddziaływania, tak że zachowują się one jak cząstki prawie swobodne.

Zjawisko to nosi nazwę **swobody asymptotycznej**.

Kwarki  $u$  i  $d$  są bardzo lekkie.

Suma ich mas stanowi zaledwie około 2% masy protonu.

**Skąd bierze się pozostałe 98% masy protonu?**

Prawie cała masa protonu wynika z energii kinetycznej kwarków i gluonów oraz energii ich oddziaływania.



# Oddziaływania słabe

Kwarki podlegają jeszcze jednemu rodzajowi oddziaływania, w wyniku którego kwark  $u$  może przejść w kwark  $d$  i odwrotnie. Nazywamy je oddziaływaniem słabym.

# Oddziaływania słabe

Kwarki podlegają jeszcze jednemu rodzajowi oddziaływania, w wyniku którego kwark  $u$  może przejść w kwark  $d$  i odwrotnie.

Nazywamy je oddziaływaniem słabym.

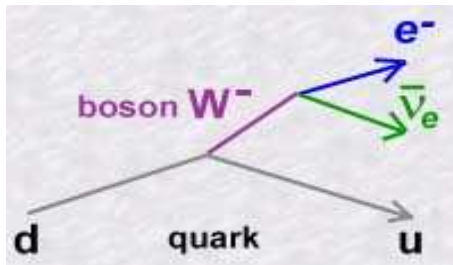
Podlega mu również elektron, który może zamienić się w bardzo lekką cząstkę obojętną zwaną neutrinem elektronowym  $\nu_e$ .

# Oddziaływania słabe

Kwarki podlegają jeszcze jednemu rodzajowi oddziaływania, w wyniku którego kwark  $u$  może przejść w kwark  $d$  i odwrotnie.

Nazywamy je oddziaływaniem słabym.

Podlega mu również elektron, który może zamienić się w bardzo lekką cząstkę obojętną zwaną neutrinem elektronowym  $\nu_e$ .



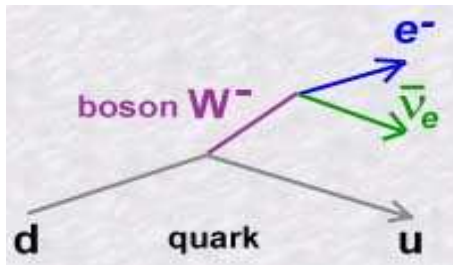
Cząstki pośredniczące:  
bozony elektroslabe  
 $W^+$ ,  $W^-$  i  $Z^0$ .

# Oddziaływania słabe

Kwarki podlegają jeszcze jednemu rodzajowi oddziaływania, w wyniku którego kwark  $u$  może przejść w kwark  $d$  i odwrotnie.

Nazywamy je oddziaływaniem słabym.

Podlega mu również elektron, który może zamienić się w bardzo lekką cząstkę obojętną zwaną neutrinem elektronowym  $\nu_e$ .



Cząstki pośredniczące:  
bozony elektroslabe  
 $W^+$ ,  $W^-$  i  $Z^0$ .

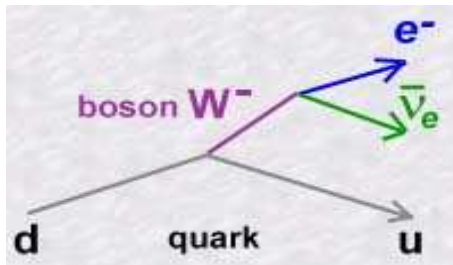
Masy bozonów  $W$  i  $Z$   
wynoszą około 80.4 GeV  
i 91.2 GeV.

# Oddziaływania słabe

Kwarki podlegają jeszcze jednemu rodzajowi oddziaływania, w wyniku którego kwark  $u$  może przejść w kwark  $d$  i odwrotnie.

Nazywamy je oddziaływaniem słabym.

Podlega mu również elektron, który może zamienić się w bardzo lekką cząstkę obojętną zwaną neutrinem elektronowym  $\nu_e$ .



Cząstki pośredniczące:  
bozony elektroslabe  
 $W^+$ ,  $W^-$  i  $Z^0$ .

Masy bozonów  $W$  i  $Z$   
wynoszą około 80.4 GeV  
i 91.2 GeV.

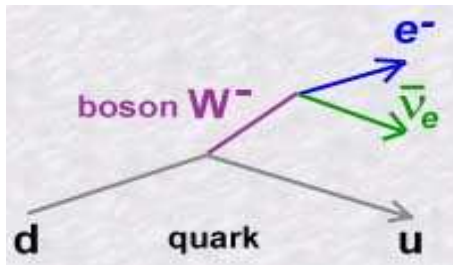
Dlatego oddziaływanie słabe jest krótkozasięgowe i słabsze od oddziaływania silnego i elektromagnetycznego.

# Oddziaływania słabe

Kwarki podlegają jeszcze jednemu rodzajowi oddziaływania, w wyniku którego kwark  $u$  może przejść w kwark  $d$  i odwrotnie.

Nazywamy je oddziaływaniem słabym.

Podlega mu również elektron, który może zamienić się w bardzo lekką cząstkę obojętną zwaną neutrinem elektronowym  $\nu_e$ .



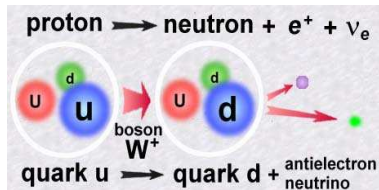
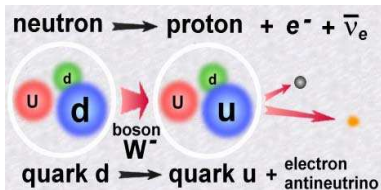
Cząstki pośredniczące:  
bozony elektroslabe  
 $W^+$ ,  $W^-$  i  $Z^0$ .

Masy bozonów  $W$  i  $Z$   
wynoszą około 80.4 GeV  
i 91.2 GeV.

Dlatego oddziaływanie słabe jest krótkozasięgowe i słabsze od oddziaływania silnego i elektromagnetycznego.

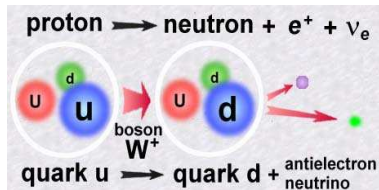
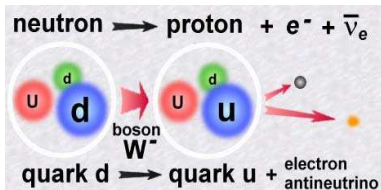
# Oddziaływania słabe

W wyniku oddziaływania słabego neutron i proton znajdujące się w jądrze mogą ulegać wzajemnym przemianom



# Oddziaływania słabe

W wyniku oddziaływania słabego neutron i proton znajdujące się w jądrze mogą ulegać wzajemnym przemianom

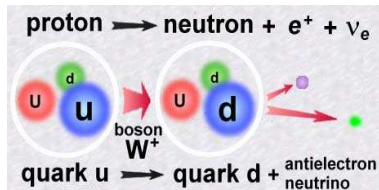
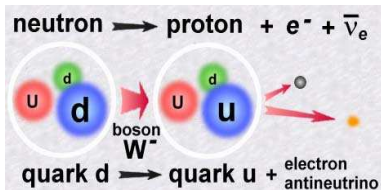


co prowadzi do promieniotwórczych przemian jąder

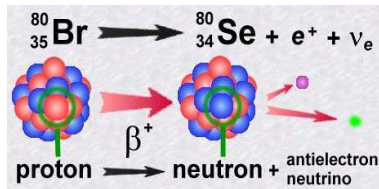
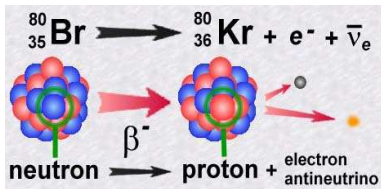


# Oddziaływania słabe

W wyniku oddziaływania słabego neutron i proton znajdujące się w jądrze mogą ulegać wzajemnym przemianom

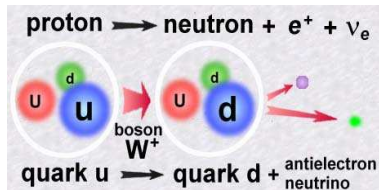
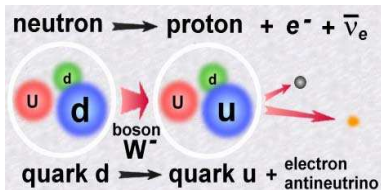


co prowadzi do promieniotwórczych przemian jąder

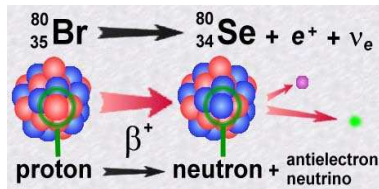
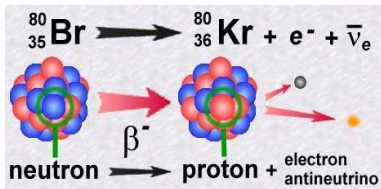


# Oddziaływania słabe

W wyniku oddziaływania słabego neutron i proton znajdujące się w jądrze mogą ulegać wzajemnym przemianom

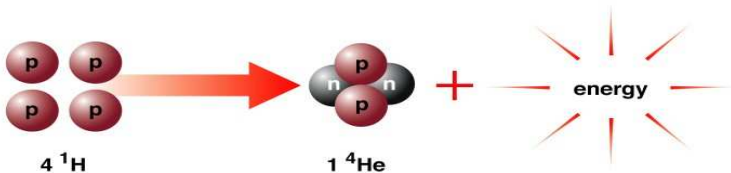


co prowadzi do promieniotwórczych przemian jąder



# Oddziaływania słabe

Podstawowe źródło energii słonecznej:

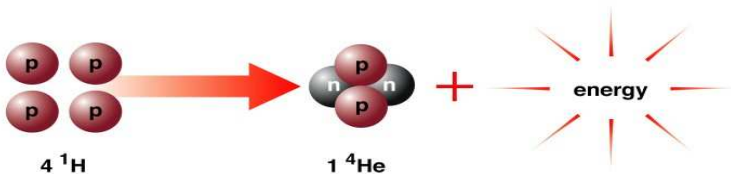


Copyright © Addison Wesley

**Bez oddziaływania słabego nie moglibyśmy istnieć.**

# Oddziaływania słabe

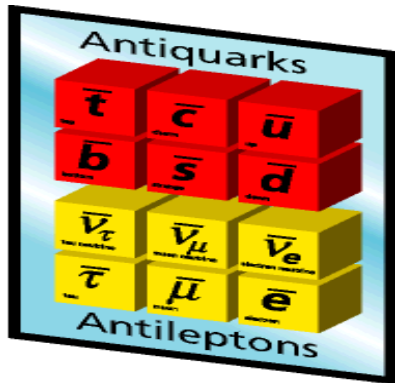
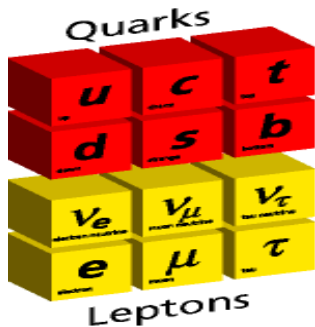
Podstawowe źródło energii słonecznej:



Copyright © Addison Wesley

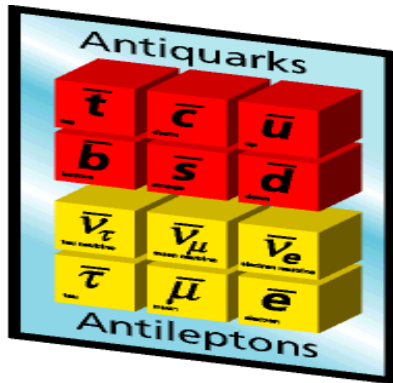
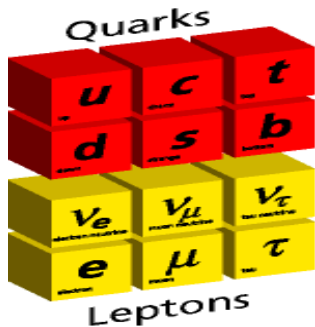
**Bez oddziaływania słabego nie moglibyśmy istnieć.**

# Podstawowe składniki materii są fermionami




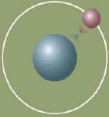
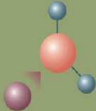
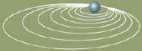
Kwarki i antykwarki  $\times 3$  kolory  $\Leftarrow$  chromodynamika kwantowa  
Dlaczego jest ich tak dużo i dlaczego są 3 rodziny, skoro "zwykła" materia składa się z cząstek pierwszej rodziny?

# Podstawowe składniki materii są fermionami




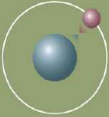
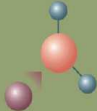
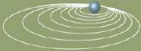
Kwarki i antykwarki  $\times 3$  kolory  $\Leftarrow$  chromodynamika kwantowa  
Dlaczego jest ich tak dużo i dlaczego są 3 rodziny, skoro "zwykła" materia składa się z cząstek pierwszej rodziny?

# 4 podstawowe oddziaływania

Gluons	Photon	W and Z bosons	Graviton
<b>Carrier of the:</b>			
Strong force	Electromagnetic force	Weak force	Gravitational force
<b>Affects:</b>			
Quarks, gluons	Quarks, charged leptons and W bosons	Quarks and leptons	All particles
<b>Responsible for:</b>			
Holding together the proton, the neutron and the atomic nucleus	Chemistry, electricity and magnetism	Radioactivity, solar energy	Holding together the earth, the sun, the solar system ...
			

Brak kwantowej teorii grawitacji.

# 4 podstawowe oddziaływania

Gluons	Photon	W and Z bosons	Graviton
<b>Carrier of the:</b>			
Strong force	Electromagnetic force	Weak force	Gravitational force
<b>Affects:</b>			
Quarks, gluons	Quarks, charged leptons and W bosons	Quarks and leptons	All particles
<b>Responsible for:</b>			
Holding together the proton, the neutron and the atomic nucleus	Chemistry, electricity and magnetism	Radioactivity, solar energy	Holding together the earth, the sun, the solar system ...
			

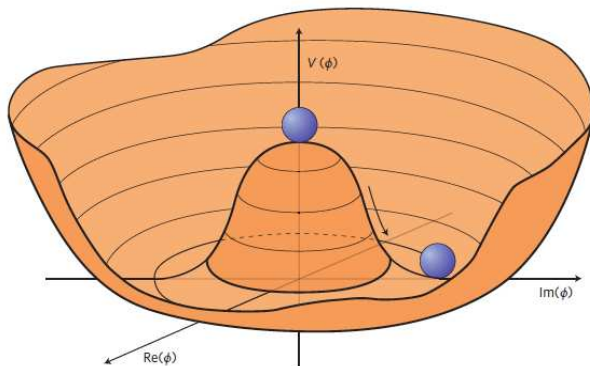
**Brak kwantowej teorii grawitacji.**



# Cząstka Higgsa

Skąd biorą się masy cząstek elementarnych?

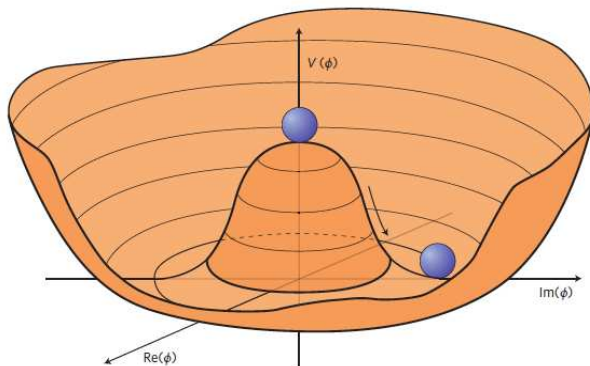
W Modelu Standardowym cząstki nabierają masy przez tzw. mechanizm Higgsa.



# Cząstka Higgsa

Skąd biorą się masy cząstek elementarnych?

W Modelu Standardowym cząstki nabierają masy przez tzw. **mechanizm Higgsa**.

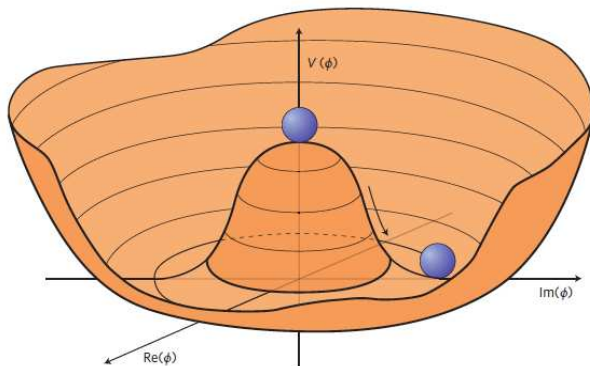


⇒ Pole Higgsa wypełnia cały wszechświat, a **jego kwantem jest właśnie cząstka Higgsa**.

# Cząstka Higgsa

Skąd biorą się masy cząstek elementarnych?

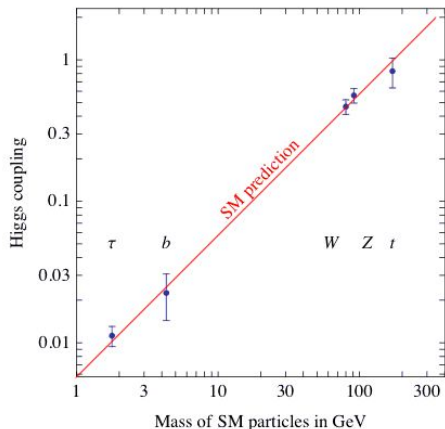
W Modelu Standardowym cząstki nabierają masy przez tzw. mechanizm Higgsa.



⇒ Pole Higgsa wypełnia cały wszechświat, a jego kwantem jest właśnie cząstka Higgsa.

# Odkrycie cząstki Higgsa

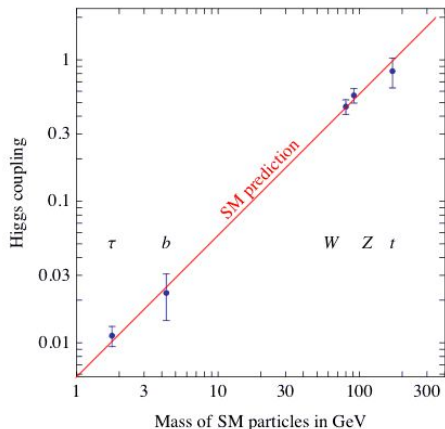
4 lipca 2012 r. największe grupy doświadczalne w LHC – ATLAS i CMS – ogłosiły odkrycie nowej cząstki o masie około 126 GeV.



[P.P. Giardino et al., arXiv:1303.3570]

# Odkrycie cząstki Higgsa

4 lipca 2012 r. największe grupy doświadczalne w LHC – ATLAS i CMS – ogłosiły odkrycie nowej cząstki o masie około 126 GeV.

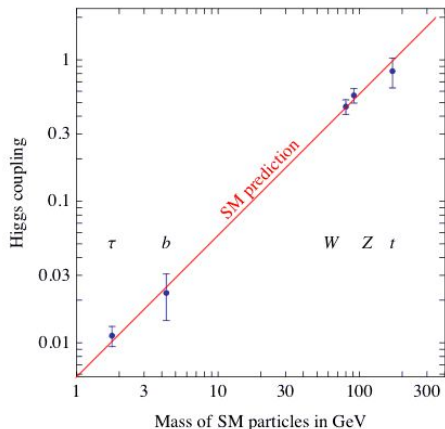


Jej oddziaływania z pozostałymi cząstkami, masa i zerowy spin są zgodne z przewidywaniami.

[P.P. Giardino et al., arXiv:1303.3570]

# Odkrycie cząstki Higgsa

4 lipca 2012 r. największe grupy doświadczalne w LHC – ATLAS i CMS – ogłosiły odkrycie nowej cząstki o masie około 126 GeV.



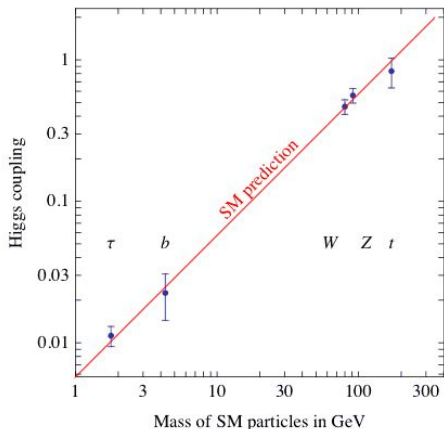
Jej oddziaływania z pozostałymi cząstkami, masa i zerowy spin są zgodne z przewidywaniami.

⇒ Odkryto cząstkę Higgsa - ostatnie brakujące ogniwo Modelu Standardowego.

[P.P. Giardino et al., arXiv:1303.3570]

# Odkrycie cząstki Higgsa

4 lipca 2012 r. największe grupy doświadczalne w LHC – ATLAS i CMS – ogłosiły odkrycie nowej cząstki o masie około 126 GeV.



Jej oddziaływania z pozostałymi cząstkami, masa i zerowy spin są zgodne z przewidywaniami.

⇒ Odkryto cząstkę Higgsa - ostatnie brakujące ogniwo Modelu Standardowego.

[P.P. Giardino et al., arXiv:1303.3570]

Model Standardowy jest kompletny. (Nagroda Nobla dla F. Englerta i P. Higgsa w 2013 r.)

Dlaczego poszczególne cząstki materii oddziałują z cząstką Higgsa z różną siłą, tak że

$$m_e = 0.511 \frac{\text{MeV}}{c^2}, \quad m_t = 173 \frac{\text{GeV}}{c^2},$$

a neutrina są jeszcze lżejsze?



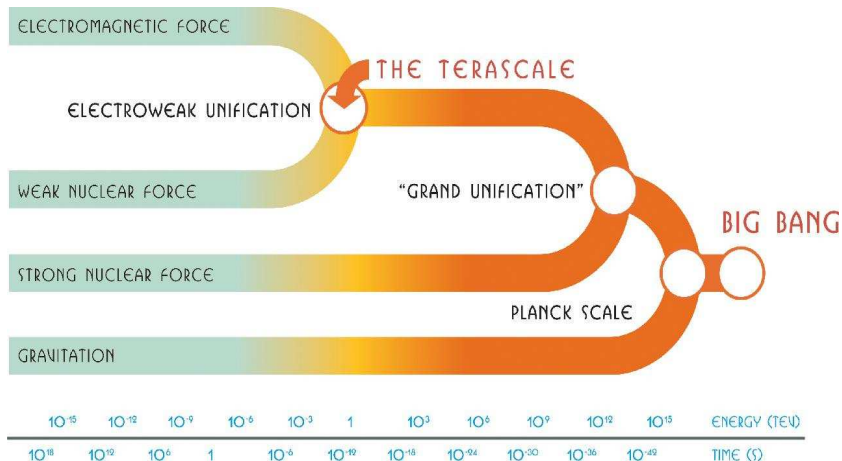
Model Standardowy jest kompletny. (Nagroda Nobla dla F. Englerta i P. Higgsa w 2013 r.)

Dlaczego poszczególne cząstki materii oddziałują z cząstką Higgsa z różną siłą, tak że

$$m_e = 0.511 \frac{\text{MeV}}{c^2}, \quad m_t = 173 \frac{\text{GeV}}{c^2},$$

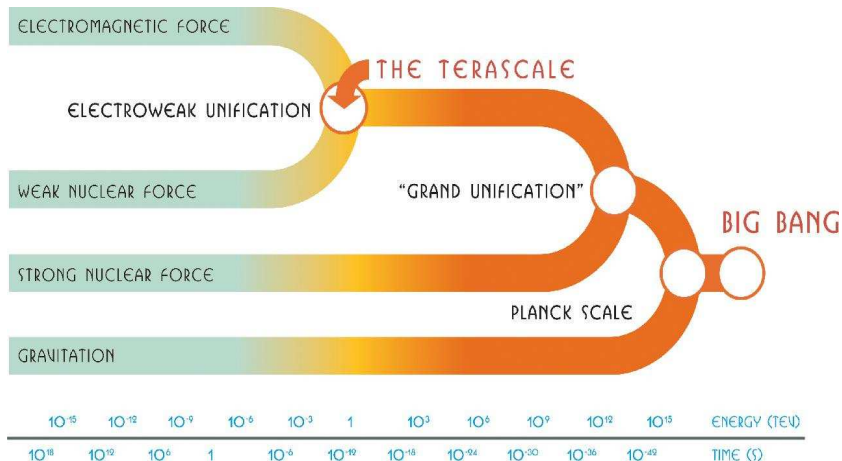
a neutrina są jeszcze lżejsze?

# Unifikacja oddziaływań

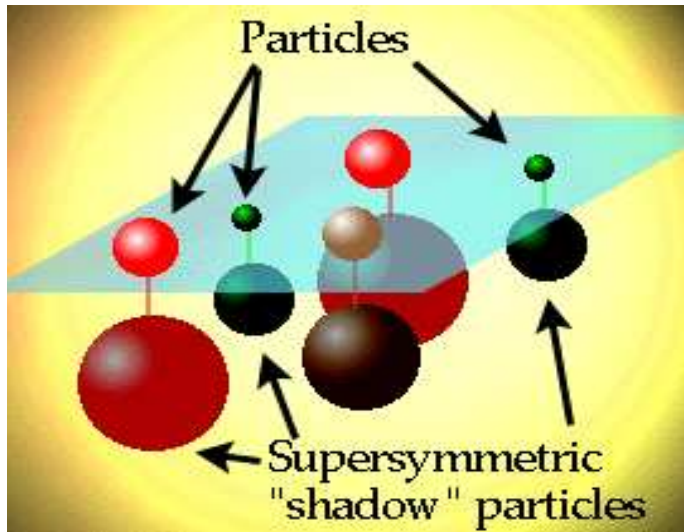


Czy wszystkie siły łączą się w jedną?

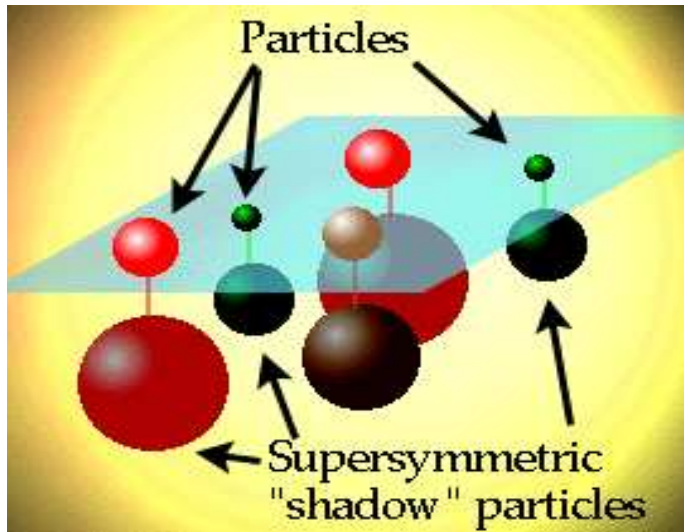
# Unifikacja oddziaływań



**Czy wszystkie siły łączą się w jedną?**



Czy supersymetria istnieje?



**Czy supersymetria istnieje?**

Teorii fizycznej nie można udowodnić, tak jak dowodzi się twierdzeń matematycznych.

Teorię fizyczną uważamy za poprawną dopóki nie odkryjemy zjawiska, które nie jest przez nią opisywane, mimo że mieści się w zakresie jej stosowalności.

Teorii fizycznej nie można udowodnić, tak jak dowodzi się twierdzeń matematycznych.

Teorię fizyczną uważamy za poprawną dopóki nie odkryjemy zjawiska, które nie jest przez nią opisywane, mimo że mieści się w zakresie jej stosowalności.

W jaki sposób sprawdzamy czy nasze wyobrażenia o świecie cząstek elementarnych są poprawne?

Teorii fizycznej nie można udowodnić, tak jak dowodzi się twierdzeń matematycznych.

Teorię fizyczną uważamy za poprawną dopóki nie odkryjemy zjawiska, które nie jest przez nią opisywane, mimo że mieści się w zakresie jej stosowalności.

W jaki sposób sprawdzamy czy nasze wyobrażenia o świecie cząstek elementarnych są poprawne?

Jednym z najlepszych sposobów badania własności cząstek elementarnych i ich oddziaływań są eksperymenty akceleratorowe, w których badamy zderzenia cząstek, na ogół rozpędzonych do bardzo dużych energii.



Teorii fizycznej nie można udowodnić, tak jak dowodzi się twierdzeń matematycznych.

Teorię fizyczną uważamy za poprawną dopóki nie odkryjemy zjawiska, które nie jest przez nią opisywane, mimo że mieści się w zakresie jej stosowalności.

W jaki sposób sprawdzamy czy nasze wyobrażenia o świecie cząstek elementarnych są poprawne?

Jednym z najlepszych sposobów badania własności cząstek elementarnych i ich oddziaływań są **eksperymenty akceleratorowe**, w których badamy zderzenia cząstek, na ogół rozpędzonych do bardzo dużych energii.