The Standard Model of Particle Physics

19 April 2017

Srinakharinwirot University

"*What is the world made of?* "

and

"*What holds it together?*"

500 B.C.: Empedocles

Fire

Air

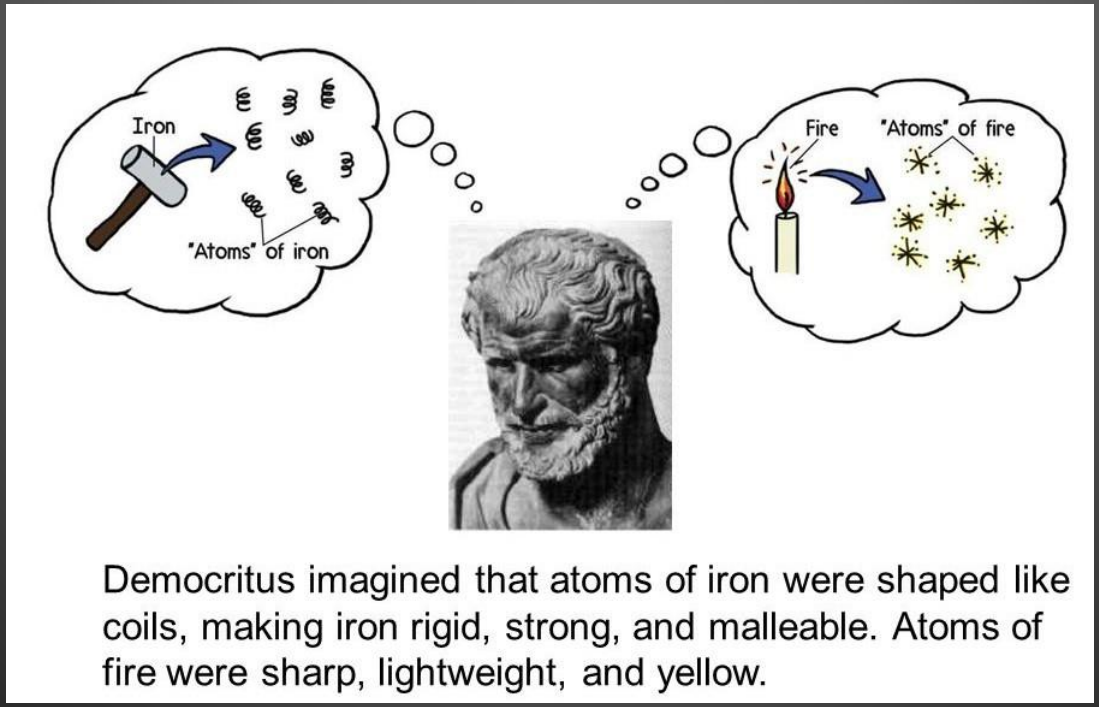
Earth

Water

500–400 B.C.: Democritus

ATOM

สิ่งที่ประกอบขึ้นมาเป็นโลกมี 2 อย่างคืออะตอม และที่ว่าง



Democritus imagined that atoms of iron were shaped like coils, making iron rigid, strong, and malleable. Atoms of fire were sharp, lightweight, and yellow.

A HISTORY OF THE ATOM: THEORIES AND MODELS

How have our ideas about atoms changed over the years? This graphic looks at atomic models and how they developed.

SOLID SPHERE MODEL

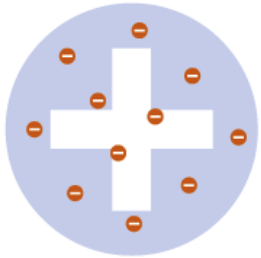
JOHN DALTON

1803

Dalton drew upon the Ancient Greek idea of atoms (the word 'atom' comes from the Greek '*atomos*' meaning indivisible). His theory stated that atoms are indivisible, those of a given element are identical, and compounds are combinations of different types of atoms.

- ⊕ RECOGNISED ATOMS OF A PARTICULAR ELEMENT DIFFER FROM OTHER ELEMENTS
- ⊖ ATOMS AREN'T INDIVISIBLE - THEY'RE COMPOSED FROM SUBATOMIC PARTICLES

PLUM PUDDING MODEL



J.J. THOMSON

1904

Thomson discovered electrons (which he called 'corpuscles') in atoms in 1897, for which he won a Nobel Prize. He subsequently produced the 'plum pudding' model of the atom. It shows the atom as composed of electrons scattered throughout a spherical cloud of positive charge.

- ⊕ RECOGNISED ELECTRONS AS COMPONENTS OF ATOMS
- ⊖ NO NUCLEUS; DIDN'T EXPLAIN LATER EXPERIMENTAL OBSERVATIONS

NUCLEAR MODEL

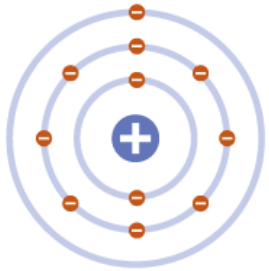
ERNEST RUTHERFORD

1911

Rutherford fired positively charged alpha particles at a thin sheet of gold foil. Most passed through with little deflection, but some deflected at large angles. This was only possible if the atom was mostly empty space, with the positive charge concentrated in the centre: the nucleus.

- ⊕ REALISED POSITIVE CHARGE WAS LOCALISED IN THE NUCLEUS OF AN ATOM
- ⊖ DID NOT EXPLAIN WHY ELECTRONS REMAIN IN ORBIT AROUND THE NUCLEUS

PLANETARY MODEL



NIELS BOHR

1913

Bohr modified Rutherford's model of the atom by stating that electrons moved around the nucleus in orbits of fixed sizes and energies. Electron energy in this model was quantised; electrons could not occupy values of energy between the fixed energy levels.

- ⊕ PROPOSED STABLE ELECTRON ORBITS; EXPLAINED THE EMISSION SPECTRA OF SOME ELEMENTS
- ⊖ MOVING ELECTRONS SHOULD EMIT ENERGY AND COLLAPSE INTO THE NUCLEUS; MODEL DID NOT WORK WELL FOR HEAVIER ATOMS

QUANTUM MODEL

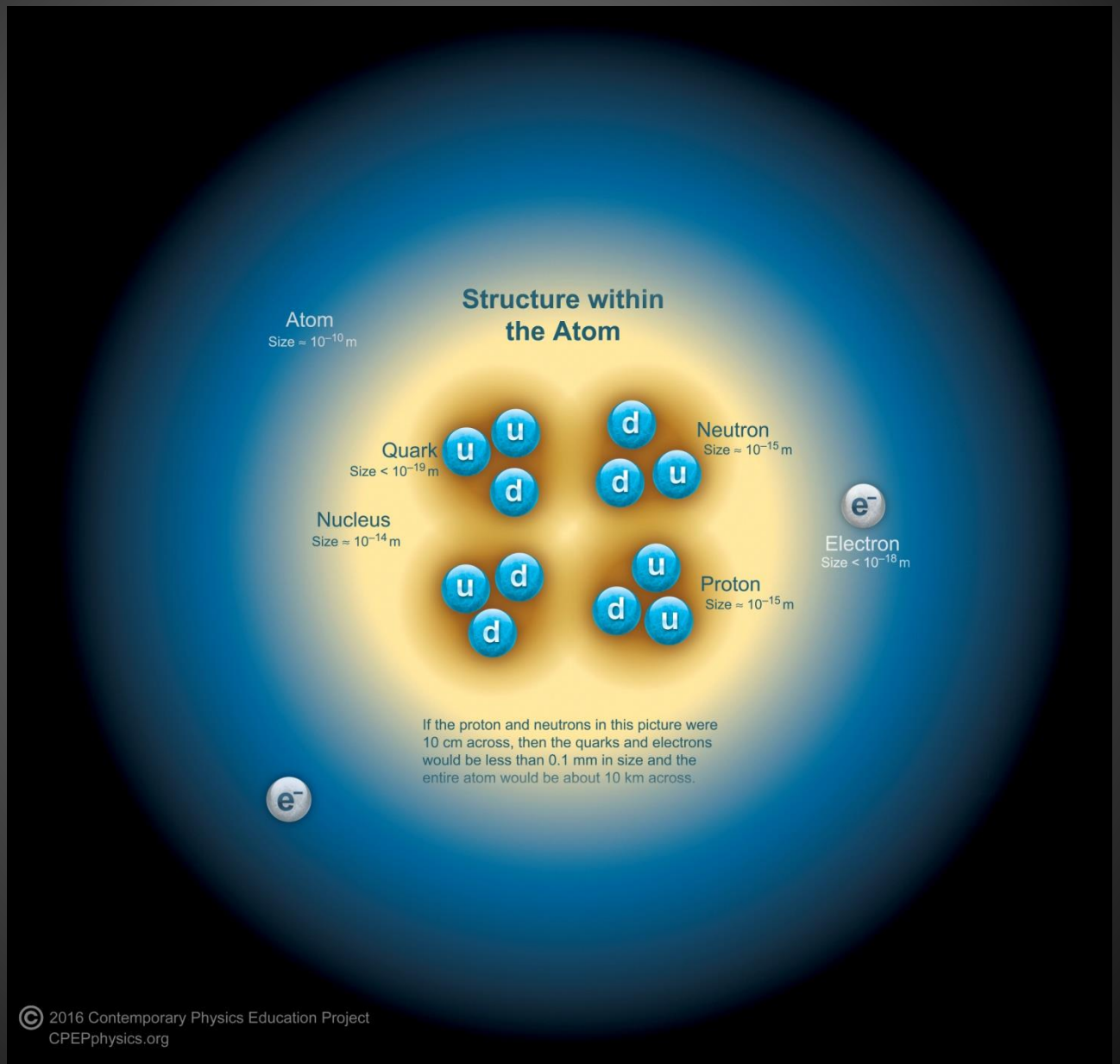
ERWIN SCHRÖDINGER

1926

Schrödinger stated that electrons do not move in set paths around the nucleus, but in waves. It is impossible to know the exact location of the electrons; instead, we have 'clouds of probability' called orbitals, in which we are more likely to find an electron.

- ⊕ SHOWS ELECTRONS DON'T MOVE AROUND THE NUCLEUS IN ORBITS, BUT IN CLOUDS WHERE THEIR POSITION IS UNCERTAIN
- ⊕ STILL WIDELY ACCEPTED AS THE MOST ACCURATE MODEL OF THE ATOM

© COMPOUND INTEREST 2016 - WWW.COMPOUNDCHEM.COM | Twitter: @compoundchem | Facebook: www.facebook.com/compoundchem
This graphic is shared under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives licence.

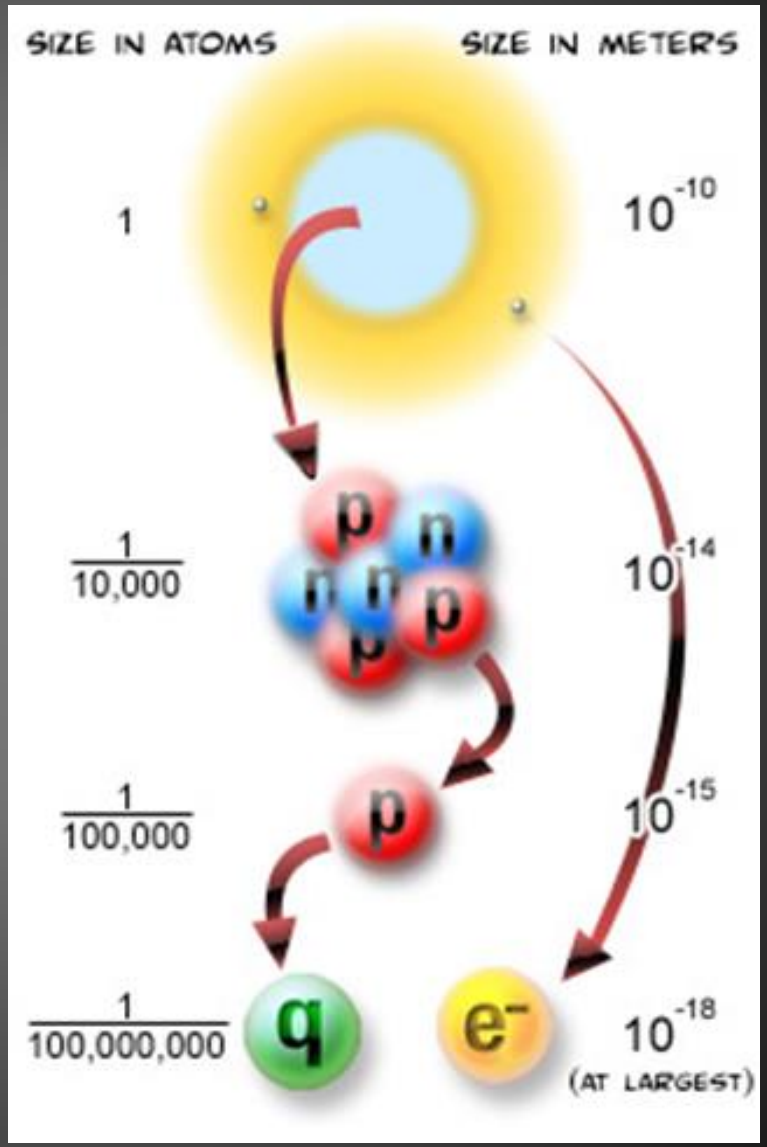


© 2016 Contemporary Physics Education Project
CPEPphysics.org

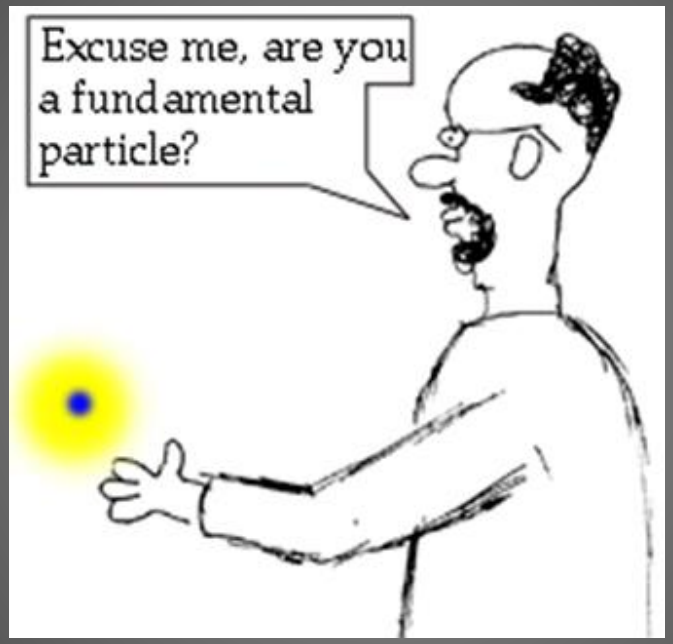
Scale of the atom

นิวเคลียสเล็กกว่าอะตอม **หมื่นเท่า**

ควาร์กและอิเล็กตรอนเล็กกว่านิวเคลียส **หมื่นเท่า**



What are we looking for?



อนุภาคใหม่ -> จัดกลุ่ม -> หาโครงสร้าง

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

Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-2)\times10^{-9}$	0
e electron	0.000511	−1
ν_M middle neutrino*	$(0.009-2)\times10^{-9}$	0
μ muon	0.106	−1
ν_H heaviest neutrino*	$(0.05-2)\times10^{-9}$	0
τ tau	1.777	−1

Quarks spin =1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
u up	0.002	2/3
d down	0.005	−1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	−1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	−1/3

*See the neutrino paragraph below.

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of ħ, which is the quantum unit of angular momentum where $\hbar = h/2\pi = 6.58\times10^{-25}$ GeV s $=1.05\times10^{-34}$ 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/c^2 (remember $E = mc^2$) where 1 GeV = 10^9 eV $=1.60\times10^{-10}$ joule. The mass of the proton is 0.938 GeV/c^2 $= 1.67\times10^{-27}$ kg.

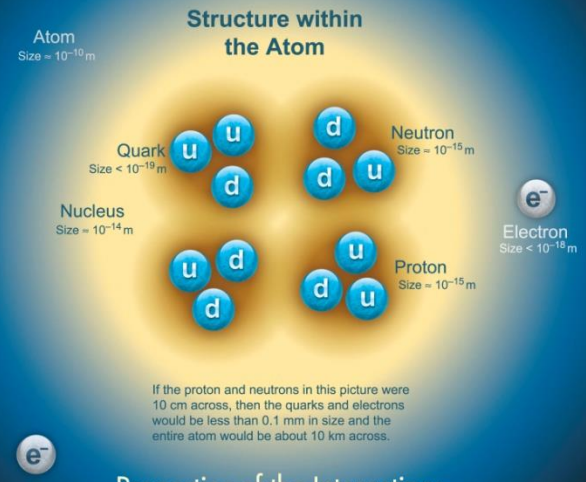
Neutrinos

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_L, ν_M, and ν_H 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.

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.

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

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.39	−1
W^+ W bosons	80.39	+1
Z^0 Z boson	91.188	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
g gluon	0	0

Higgs Boson spin = 0

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
H Higgs	126	0

Higgs Boson

The Higgs boson is a critical component of the Standard Model. Its discovery helps confirm the mechanism by which fundamental particles get mass.

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^- ($s\bar{u}$), and B^0 ($d\bar{b}$).

Properties of the Interactions

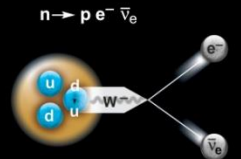
The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	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 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25
Strength at 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60

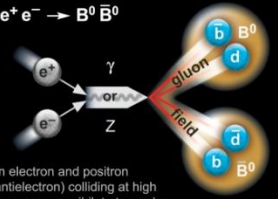
Learn more at **ParticleAdventure.org**

Particle Processes

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



A free neutron (udd) decays to a proton (uud), an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β (beta) decay.

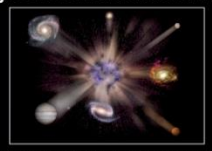


An electron and positron (antielectron) colliding at high energy can annihilate to produce $\bar{B}^0$ and B^0 mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.

Unsolved Mysteries

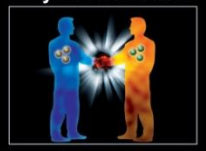
Driven by new puzzles in our understanding of the physical world, particle physicists are following paths to new wonders and startling discoveries. Experiments may even find extra dimensions of space, microscopic black holes, and/or evidence of string theory.

Why is the Universe Accelerating?



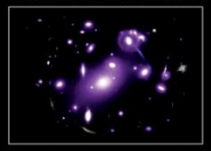
The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?

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).

©2014 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Learn more about CPEP products and websites at **CPEPphysics.org**. Made possible by the generous support of:
U.S. Department of Energy, U.S. National Science Foundation, & Lawrence Berkeley National Laboratory.

Quarks and Leptons

ทุกๆอย่างตั้งแต่กาแล็กซี ภูเขา ไปจนโมเลกุล
ประกอบขึ้นมาจากควาร์กและเลปตอน

ควาร์กและเลปตอนจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน
ซึ่งแต่ละอนุภาคสสารก็จะมีอนุภาคปฏิสสารที่สอดคล้องกัน

Matter and antimatter/antiparticle

ปฏิสสารหรือปฏิอนุภาค จะมีพฤติกรรมเหมือนกันกับอนุภาคหรือสสารที่สอดคล้องกัน แต่จะมี**ประจุตรงกันข้าม**

ตัวอย่างเช่น โปรตอนมีประจุเป็นบวก ในขณะที่แอนไทโปรตอนที่มีประจุเป็นลบ และแรงโน้มถ่วงจะมีผลต่อสสารและปฏิสสารเหมือนกัน เนื่องจากแรงโน้มถ่วงไม่ได้มีผลกับประจุ และสสารและปฏิสสารก็มีมวลเท่ากัน

FERMIONS

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

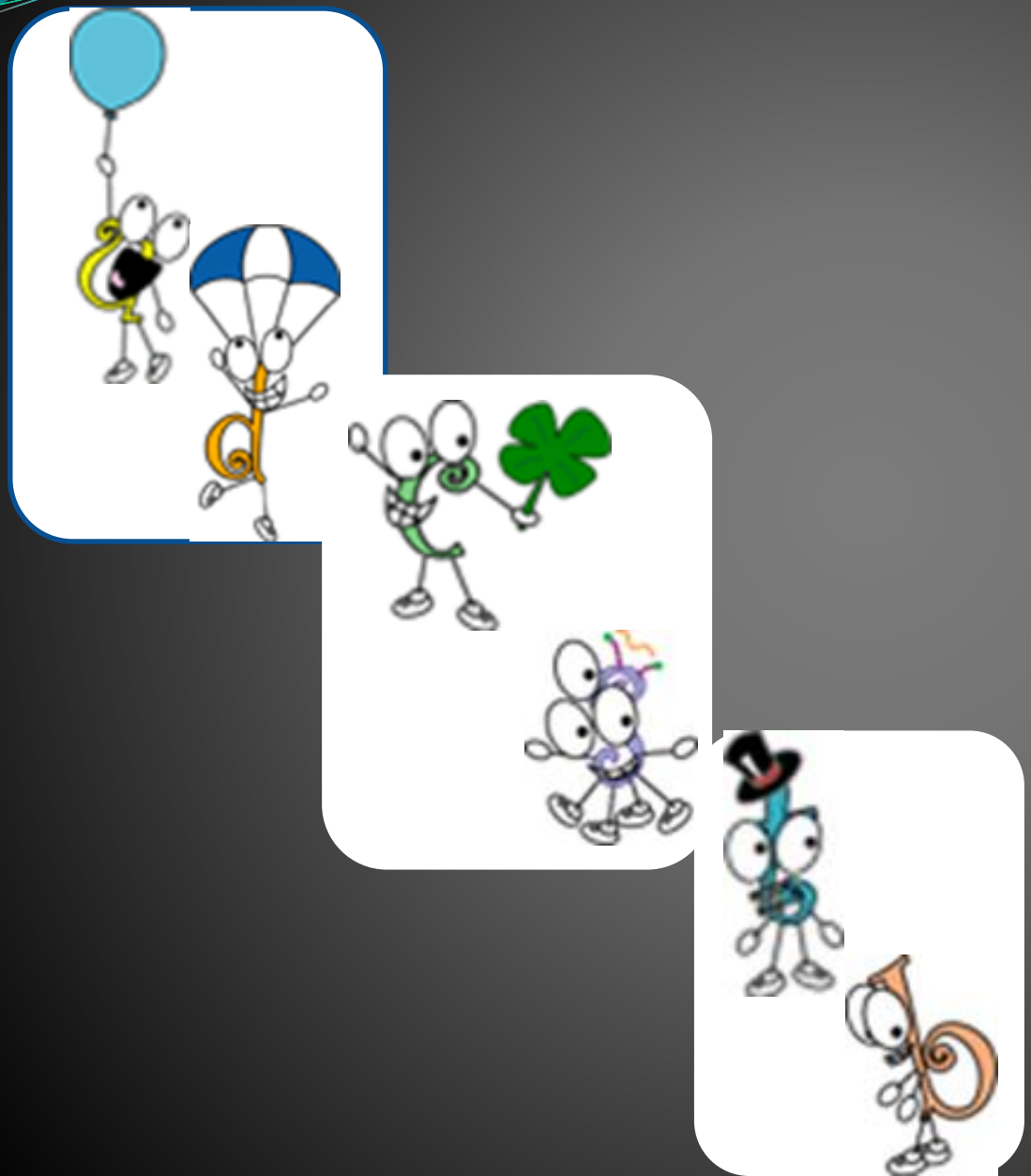
Leptons spin =1/2

Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-2)\times10^{-9}$	0
e electron	0.000511	–1
ν_M middle neutrino*	$(0.009-2)\times10^{-9}$	0
μ muon	0.106	–1
ν_H heaviest neutrino*	$(0.05-2)\times10^{-9}$	0
τ tau	1.777	–1

Quarks spin =1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
u up	0.002	2/3
d down	0.005	–1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	–1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	–1/3

© 2016 Contemporary Physics Education Project
CPEPphysics.org



Quarks spin =1/2			
Flavor		Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
u	up	0.002	2/3
d	down	0.005	–1/3
c	charm	1.3	2/3
s	strange	0.1	–1/3
t	top	173	2/3
b	bottom	4.2	–1/3

Hadrons, Baryons and Mesons

ควาร์กจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม จะไม่พบตัวเดียว และเรียกอนุภาคที่ประกอบขึ้นมาจากควาร์กว่า แฮดรอน (Hadrons)

ควาร์กเดี่ยวๆจะมีประจุเป็นเศษส่วน และเมื่อรวมเป็นแฮดรอนจะมีประจุเป็นจำนวนเต็ม สมบัติอีกอย่างของแฮดรอนคือไม่มีสี

แฮดรอนแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

1. แบริออน (Baryons) ประกอบด้วยควาร์ก 3 ตัว
2. เมซอน (Mesons) ประกอบด้วยควาร์ก 1 ตัว และแอนไทควาร์ก 1 ตัว

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.

There are a few of the many types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	GeV/c^2	Spin
p	proton	**uud**	1	0.938	1/2
$\bar{\mathbf{p}}$	antiproton	$\bar{\mathbf{u}}\bar{\mathbf{u}}\bar{\mathbf{d}}$	–1	0.938	1/2
n	neutron	**udd**	0	0.940	1/2
Λ	lambda	**uds**	0	1.116	1/2
$\mathbf{\Omega^-}$	omega	**sss**	–1	1.672	3/2

© 2016 Contemporary Physics Education Project
CPEPphysics.org

Mesons $q\bar{q}$

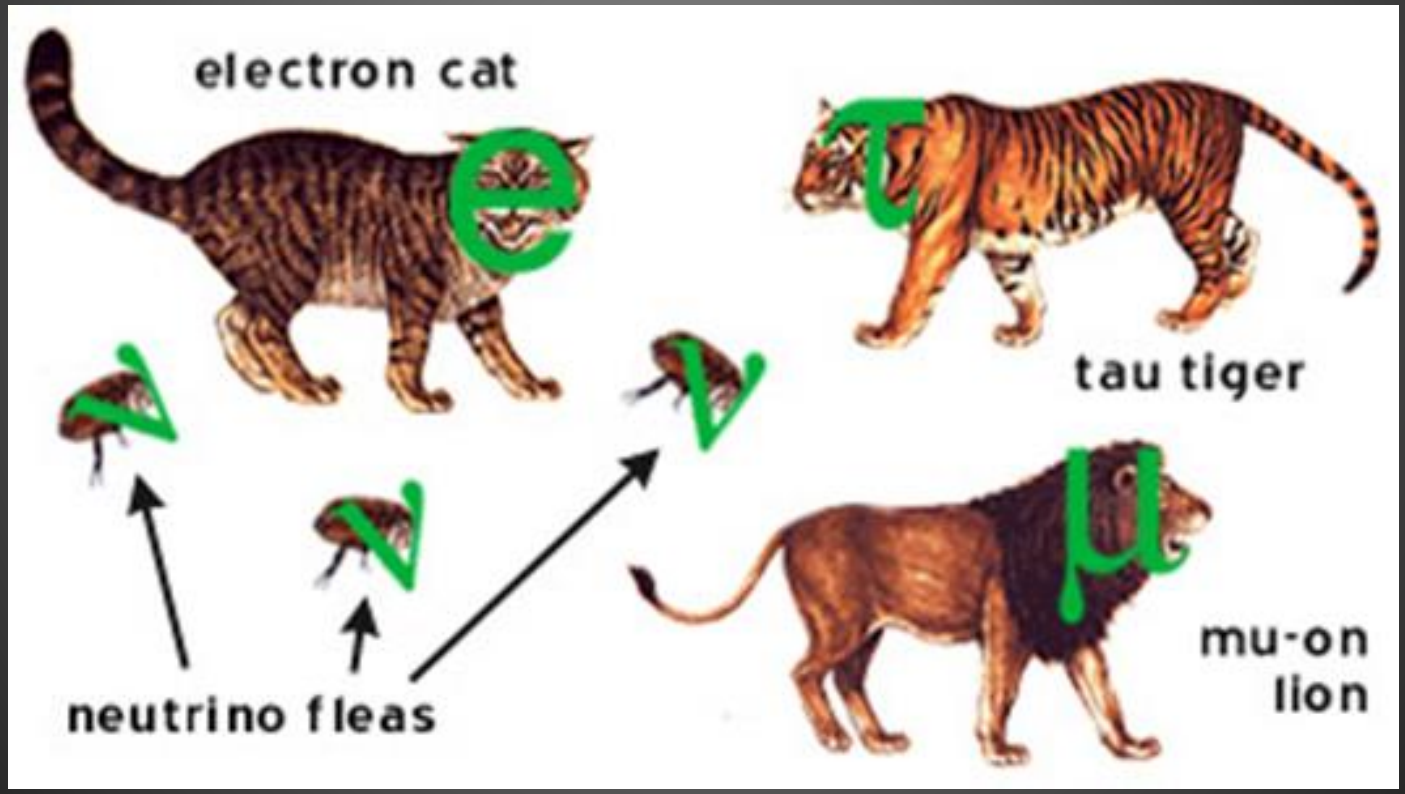
Mesons are bosonic hadrons

There are a few of the many types of mesons.

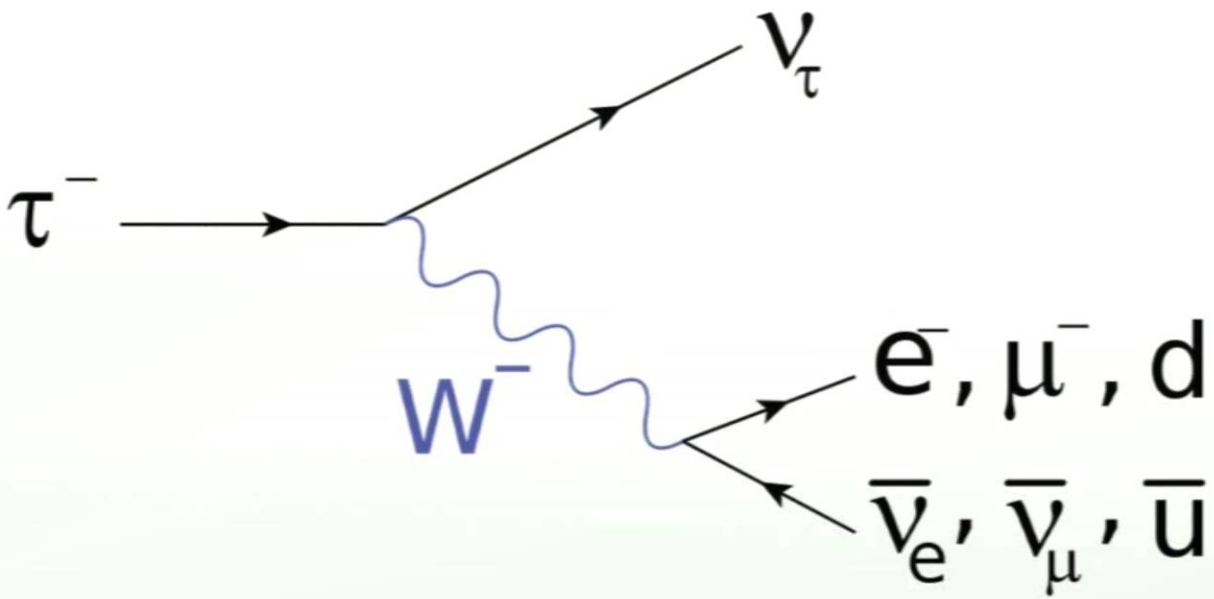
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	–1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

© 2016 Contemporary Physics Education Project
CPEPphysics.org

Leptons spin =1/2			
Flavor		Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_L	lightest neutrino*	$(0-2)\times10^{-9}$	0
e	electron	0.000511	–1
ν_M	middle neutrino*	$(0.009-2)\times10^{-9}$	0
μ	muon	0.106	–1
ν_H	heaviest neutrino*	$(0.05-2)\times10^{-9}$	0
τ	tau	1.777	–1


electron cat
tau tiger
neutrino fleas
mu-on
lion

Tau (particle)



https://en.wikipedia.org/wiki/File:Feynman_diagram_of_decay_of_tau_lepton.svg

เลปตอนแบ่งเป็น 3 กลุ่ม หรือ 3 families

Leptons spin =1/2			
Flavor		Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_L	lightest neutrino*	$(0-2)\times10^{-9}$	0
e	electron	0.000511	–1
ν_M	middle neutrino*	$(0.009-2)\times10^{-9}$	0
μ	muon	0.106	–1
ν_H	heaviest neutrino*	$(0.05-2)\times10^{-9}$	0
τ	tau	1.777	–1

จำนวนของสมาชิกในแต่ละ family จะต้อง**คงที่** ในการสลายตัวครั้งหนึ่งๆ

Lepton type conservation

Electron number

= +1 for electrons and their neutrinos

= -1 for positrons and their neutrinos

= 0 for other particles

Muon number

= +1 for muons and their neutrinos

= -1 for anti-muon and their neutrinos

= 0 for other particles

Tau number

= +1 for taus and their neutrinos

= -1 for anti-tau and their neutrinos

= 0 for other particles

When a massive lepton decays into smaller ones

Electron number, muon number and tau number are

always conserved

Example Muon decay

	muon		muon neutrino		electron		e^- antineutrino
equation:	μ	$\rightarrow$	ν_μ	+	e^-	+	$\bar{\nu}_e$
electron number:	0	=	0	+	1	+	-1
muon number:	1	=	1	+	0	+	0
tau number:	0	=	0	+	0	+	0

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, …

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.39	–1
W^+ W bosons	80.39	+1
Z^0 Z boson	91.188	0

Strong (color) spin = 1

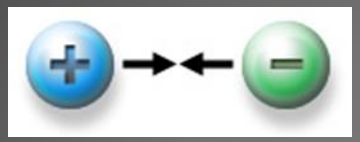
Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
g gluon	0	0

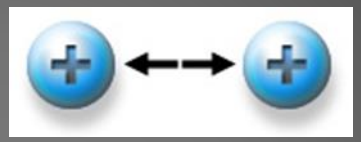
Higgs Boson spin = 0

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
H Higgs	126	0

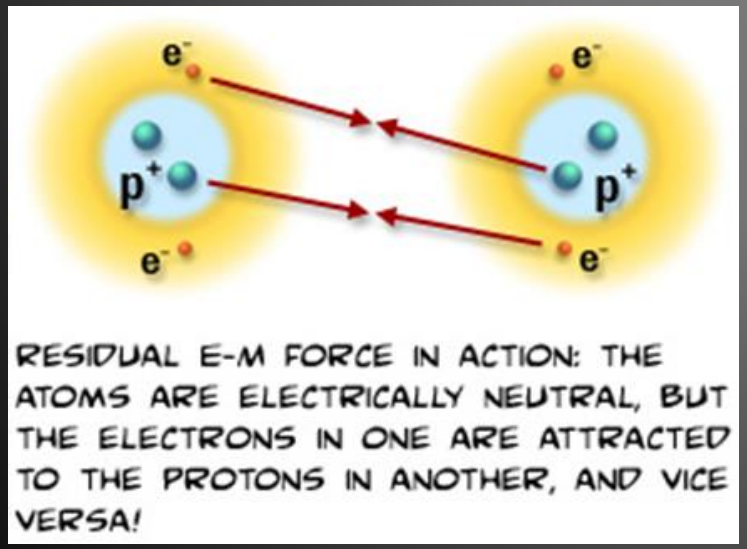
© 2016 Contemporary Physics Education Project
CPEPphysics.org

Electromagnetism





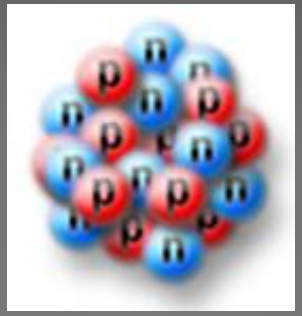
Force carrier particle ของ EM force คือ โฟตอน (photon)



EM force เป็นตัวทำให้อะตอมแต่ละอะตอมยึดเหนี่ยวกัน เกิดเป็นโมเลกุล

โครงสร้างของสิ่งต่างๆในโลกของเราเกิดขึ้นได้เพราะ โปรตอนและอิเล็กตรอนมีประจุตรงข้ามกัน

อะไรที่ยึดเหนี่ยวโปรตอนและนิวตรอนในนิวเคลียสไว้ด้วยกัน ??



เนื่องจากนิวตรอนไม่มีประจุ และโปรตอนมีประจุบวก ซึ่งจะผลักกันกับโปรตอนตัวอื่น ทำไมนิวเคลียสจึงไม่ระเบิดออก??

Strong

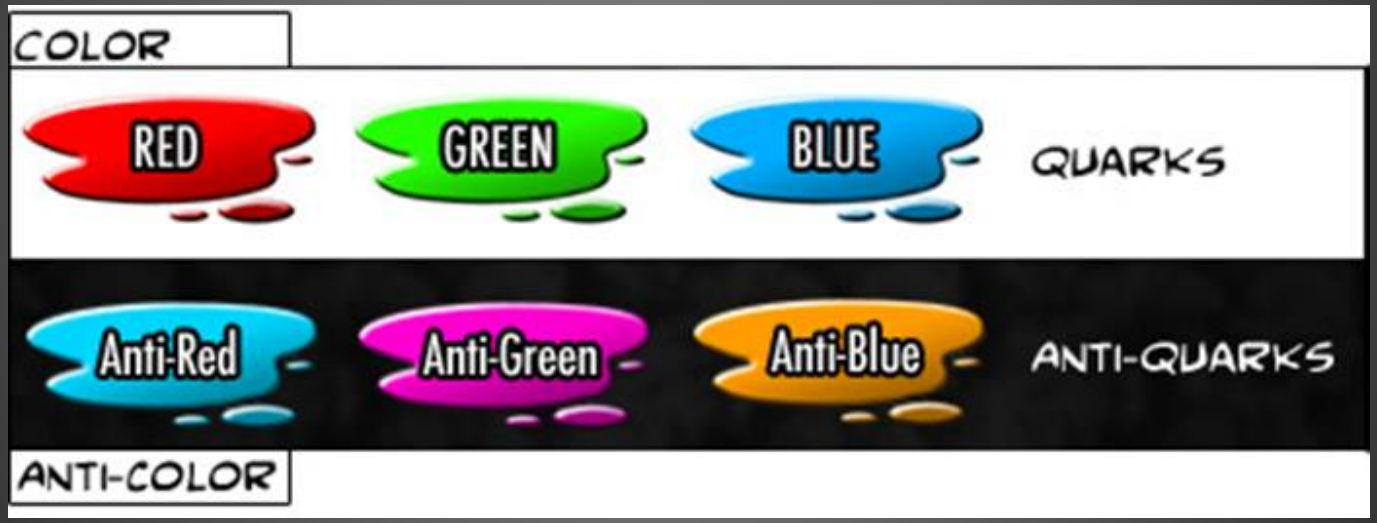
ในการทำความเข้าใจว่ามีอะไรเกิดขึ้นในนิวเคลียส เราต้องทำความเข้าใจถึงควาร์กที่รวมกันทำให้เกิดโปรตอนและนิวตรอนก่อน

ควาร์กมีประจุไฟฟ้า และนอกจากนี้ยังมีประจุแบบอื่นอีก เราเรียกว่า ประจุสี (color charge) ซึ่งแรงระหว่างอนุภาคที่มีประจุสีจะแรงมากๆ เราเรียกแรงนี้ว่า strong force

Strong force นี้ยึดเหนี่ยวควาร์กไว้ด้วยกันทำให้เกิดเป็นแฮดรอน ซึ่ง force carrier particles จะเรียกว่า กลูออน (gluon)

EM interactions มีการแลกเปลี่ยนโฟตอน

Strong interactions มีการแลกเปลี่ยนกลูออน เมื่อควาร์กสองตัวเข้าใกล้กัน และเกิด color force field ที่ยึดเหนี่ยวควาร์กไว้ด้วยกัน



อนุภาคที่เกิดจากการรวมตัวกันของควาร์ก ต้องมีประจุสีเป็นกลาง (color neutral)

เมื่อผสมแสงสีแดง เขียว และน้ำเงินเข้าด้วยกันจะได้แสงขาว

แบริออน เป็นการรวมควาร์กที่มีประจุสีแดง เขียวและน้ำเงินเข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้ color neutral

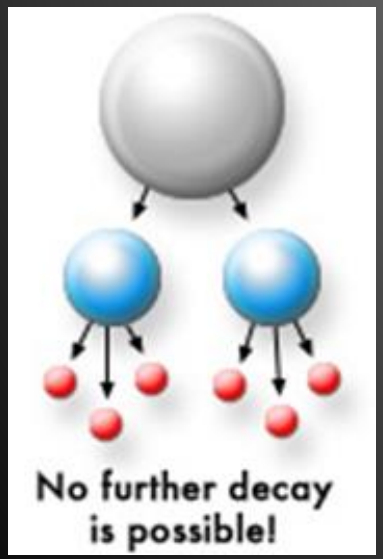
เมซอน เป็น color neutral เนื่องจากเป็นการรวมควาร์กที่มี color และ แอนไทควาร์ก ที่มี anti-color เข้าด้วยกัน เช่น red กับ anti-red หรือ green กับ anti-green

Strong force ระหว่างควาร์กในโปรตอนตัวหนึ่งกับควาร์กในโปรตอนอีกตัวหนึ่ง **มากพอ** ที่จะเอาชนะแรงผลักที่เกิดจากแรงทางไฟฟ้า

Weak

ถึงแม้ว่าเราจะมีควาร์กอยู่ 6 ชนิด และเลปตอนอยู่อีก 6 ชนิด แต่สสารที่มีความเสถียรนั้น ล้วนแล้วแต่ประกอบด้วยควาร์กเพียง 2 ชนิดคือ up กับ down และเลปตอนซึ่งคืออิเล็กตรอน และนิวตริโน

Weak force หรือ weak interaction จะเกิดขึ้นในการสลายตัวของควาร์กหนักและเลปตอน ให้กลายเป็นควาร์กที่เบาขึ้นและเลปตอน



เนื่องจากสสารที่มีความเสถียรเกิดจากควาร์กที่เล็กที่สุด และเลปตอน จะไม่สามารถสลายตัวให้เล็กกว่านี้ได้อีก

เมื่อควาร์กและเลปตอนเปลี่ยนชนิด เช่น จาก muon ไปเป็น electron เราพูดได้อีกอย่างว่า มีการเปลี่ยน **flavor** และการเปลี่ยน flavor นี้เองทำให้เกิด weak interaction

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.39	–1
W^+ W bosons	80.39	+1
Z^0 Z boson	91.188	0

Force carrier particles ของ weak interactions คือ W^+ , W^- และ Z particles

ใน Standard Model จะรวม EM force และ Weak interactions เข้าด้วยกันเรียกว่า **Electroweak**

Gravity

เป็นแรงพื้นฐานแต่ Standard model ยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างน่าพอใจ ซึ่งยังคือเป็นปัญหาที่ยังหาคำตอบไม่ได้ในทางฟิสิกส์ทุกๆวันนี้

นอกจากนี้ force carrier particles ของ gravity ซึ่งมีการตั้งชื่อว่า graviton ยังไม่สามารถค้นพบได้ แต่มีการตั้งสมมติฐานว่ามีอยู่จริงและคงจะเจอในซักวัน

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 (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	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 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25
Strength at 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60

© 2016 Contemporary Physics Education Project
CPEPphysics.org