Φερμιόνια & Μποζόνια

Φερμιόνια

Στατιστική Fermi-Dirac

spin ημιακέραιο $\frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, \frac{5}{2}\hbar \cdots$

δύο ταυτόσημα φερμιόνια, 1 & 2 έχουν αντισυμμετρική κυματοσυνάρτηση στην εναλλαγή

$$\Psi(1,2) = -\Psi(2,1)$$

Μποζόνια

Στατιστική Bose-Einstein

spin ακέραιο $0\hbar, 1\hbar, 2\hbar \ldots$

δύο ταυτόσημα μποζόνια , 1 & 2 έχουν συμμετρική κυματοσυνάρτηση στην εναλλαγή

$$\Psi(1,2) = \Psi(2,1)$$

Γ. Τσιπολίτης

Φερμιόνια & Μποζόνια

- εξάρτηση της ολικής κυματοσυνάρτησης από χωρικές συντεταγμένες και spin

$$\Psi = \Psi_a(\chi\acute{\omega}\rho o\upsilon)\cdot\Psi_b(spin)$$

$\Psi_a(1,2)=(-1)^{\ell}\cdot\Psi_a(2,1)$ — ℓ: κβαντικός αριθμός στροφορμής

$\Psi_b(1,2)=+\Psi_b(2,1)$ — παράλληλα ομόρροπα spin

$\Psi_b(1,2)=-\Psi_b(2,1)$ — παράλληλα αντίρροπα spin

Φερμιόνια	Μποζόνια
ℓ άρτιο → παράλληλα αντίρροπα	ℓ άρτιο → παράλληλα ομόρροπα
ℓ περιττό → παράλληλα ομόρροπα	ℓ περιττό → παράλληλα αντίρροπα

Standard Model of

FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

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

Leptons spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1\times10^{-8}$	0
e electron	0.000511	–1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	–1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	–1

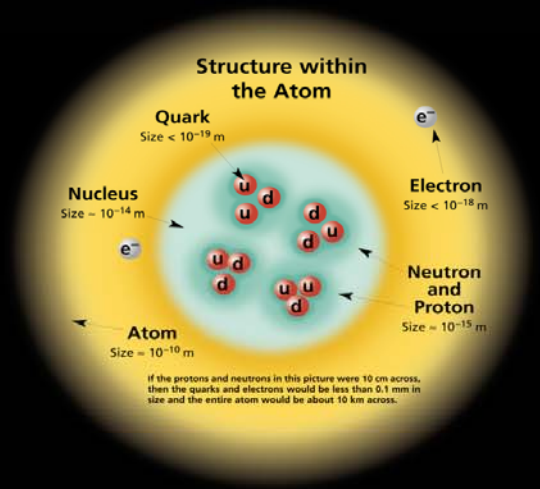
Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	–1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	–1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	–1/3

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 = 1.60×10^{-10} joule. The mass of the proton is 0.938 GeV/c^2 = 1.67×10^{-27} kg.



BOSONS

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

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	–1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1

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

Color Charge

Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and ***W*** and ***Z*** bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; 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 (see figure below). 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.

Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic (Electroweak)	Strong: Fundamental	Strong: Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at: 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
Strength relative to electromag for two u quarks at: 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
for two protons in nucleus	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$
Baryons are fermionic hadrons.
There are about 120 types of baryons.

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

Mesons $q\bar{q}$
Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 types of mesons.

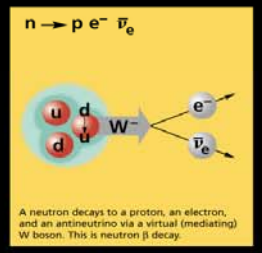
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	–1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Matter and Antimatter

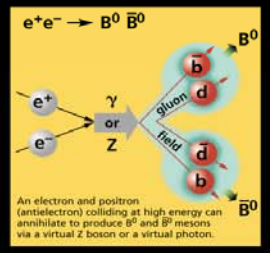
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or – charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0, γ, and $\eta_c = c\bar{c}$, but not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

Figures

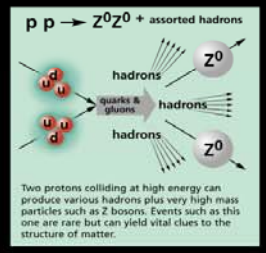
These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are ***not*** exact and have ***no*** meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



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



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



Two protons colliding at high energy can produce various hadrons plus very high mass particles such as Z bosons. Events such as this one are rare but can yield vital clues to the structure of matter.

The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at **http://ParticleAdventure.org**

This chart has been made possible by the generous support of:
U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

http://CPEPweb.org

Η Δομή του Ατόμου
Κουάρκ
μέγεθος <10^-18 m
Πυρήνας
μέγεθος≈10^-10 m
Ηλεκτρόνιο
μέγεθος <10^-18 m
Πρωτόνιο
και
Νετρόνιο
μέγεθος≈10^-15 m
Ατομο
μέγεθος ≈ 10^-10 m

Οι Ιδιότητες των Αλληλεπιδράσεων

Αλληλεπίδραση / Ιδιότητα	Βαρύτητα	Ισχυρή	
		θεμελιώδης	εναπομένουσα
επιδρά σε:	μάζα = ενέργεια	φορτίο χρώματος	Δες το σημείωμα για την Εναπομένουσα Ισχυρή δύναμη
σωματίδια που επιδρά:	όλα	κουάρκ, γλουόνια	αδρόνια
σωματίδια φορείς:	βαρυτόνια	γλουόνια	μεσόνια
ισχύς ως προς την Η-Μ για δύο u κουάρκ σε: 10^{-18} m	10^{-41}	25	δεν ισχύει για κουάρκ
ισχύς ως προς την Η-Μ για δύο u κουάρκ σε: $3\ 10^{-17}$ m	10^{-41}	60	
για δύο πρωτόνια σε:	10^{-36}	δεν ισχύει για αδρόνια	20

Αλληλεπίδραση / Ιδιότητα	Ασθενής (ηλεκτροασθενής)	Ηλεκτρομαγνητική
επιδρά σε:	γεύση	ηλεκτρικό φορτίο
σωματίδια που επιδρά:	κουάρκ, λεπτόνια	ηλεκτρικά φορτισμένα
σωματίδια φορείς	W W Z	γ
ισχύς ως προς την Η-Μ για δύο u κουάρκ σε: 10^{-18} m	0.8	1
ισχύς ως προς την Η-Μ για δύο u κουάρκ σε: $3\ 10^{-17}$ m	10^{-4}	1
για δύο πρωτόνια σε:	10^{-7}	1

Γ. Τσιπολίτης

Βασικά συστατικά φερμιονίων

- πειραματικά έχουν βρεθεί δύο θεμελιώδη φερμιόνια:

Κουάρκ & Λεπτόνια

Κουάρκ	Λεπτόνια
κλασματικά φορτία (+2/3|e|, -1/3|e|)	φορτία 0,+/-|e|
6 γεύσεις (flavor) – u,d,c,s,t,b	e,ν_e μ,ν_μ τ,ν_τ
Η/Μ, ισχυρές, ασθενείς	Η/Μ και ασθενείς

Γ. Τσιπολίτης

Fundamental Fermions

FERMIONS

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

Leptons spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1\times10^{-8}$	0
e electron	0.000511	−1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	−1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	−1

Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	−1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	−1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	−1/3

The word "quark" comes from Joyce's Finnegan's Wake: "Three quarks for Muster Mark". When Gell-Mann proposed quarks, only the u,d, and s quarks were thought to exist, and even then only as mathematical constructs.

10

Γ. Τσιπολίτης

Κβαντικοί αριθμοί

- Παραξενιά (strangeness)

  S=-1
- Χάρη (charm)

  C=+1
- Πυθμενικός (bottom)

  B=-1
- Κορυφαίος (top)

  T=+1

	S	C	B	T
d	0	0	0	0
u	0	0	0	0
s	-1	0	0	0
c	0	1	0	0
b	0	0	-1	0
t	0	0	0	1

Βαρυόνια & Μεσόνια

Βαρυόνια

συνδυασμός τριών κουάρκ

qqq

πρωτόνιο $p=(u\ u\ d)$

νετρόνιο $n=(u\ d\ d)$

Λάμδα $\Lambda=(u\ d\ s)$

Μεσόνια

συνδυασμός κουάρκ αντικουάρκ

$q\bar{q}$

πιόνιο (π^+) = $u\bar{d}$

καόνιο (K^0) = $\bar{s}d$

ψ-μεσόνιο = $c\bar{c}$

Βαρυόνια

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

Baryons are fermionic hadrons.
There are about 120 types of baryons.

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

Μεσόνια

Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass 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

Παράδειγμα

- Παραγωγή ζεύγους παράξενων σωματιδίων
- αντίδραση $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$
- περιγραφή με κουάρκ $\bar{u}d + uud \rightarrow \bar{s}d + usd$
- παραξενιά $0 + 0 \rightarrow +1 \quad -1$

διατήρηση παραξενιάς

Μποζόνια

BOSONS

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

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	−1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
g gluon	0	0

Γ. Τσιπολίτης

Σωματίδια & Αντισωματίδια

- Σε κάθε σωματίδιο αντιστοιχεί ένα αντισωματίδιο που έχει:

ίδια μάζα, αντίθετο φορτίο και αντίθετη μαγνητική ροπή

αυτή είναι μια γενικευμένη ιδιότητα ανεξάρτητα από φερμιόνιο ή μποζόνιο.

- Φερμιόνιο → φερμιονικός αριθμός +1
- Αντιφερμιόνιο → φερμιονικός αριθμός -1

Ο Φερμιονικός αριθμός διατηρείται

$$\gamma \rightarrow e^{+} + e^{-}$$

$$0 \rightarrow (-1) + (+1)$$

Για τα μποζόνια δεν υπάρχει αντίστοιχος νόμος διατήρησης

Λεπτονικός Αριθμός

	e^-	ν_e	μ^-	ν_μ	τ^-	ν_τ
L_e	+1	+1	0	0	0	0
L_μ	0	0	+1	+1	0	0
L_τ	0	0	0	0	+1	+1

	e^+	$\bar{\nu}_e$	μ^+	$\bar{\nu}_\mu$	τ^+	$\bar{\nu}_\tau$
L_e	-1	-1	0	0	0	0
L_μ	0	0	-1	-1	0	0
L_τ	0	0	0	0	-1	-1

Διατήρηση Λεπτονικού Αριθμού

$$\gamma \rightarrow e^{+} + e^{-}$$

- L_e: $0 = (-1) + (+1)$

$$\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu}$$

L_μ: $0 = (-1) + (+1)$

$$\mu^{+} \rightarrow e^{+} + \nu_{e} + \bar{\nu}_{\mu}$$

- L_μ: $(-1) = 0 + 0 + (-1)$
- L_e: $0 = (-1) + (+1) + 0$

$$\mu^{+} \rightarrow e^{+} + \gamma$$

L_μ: $(-1) \neq 0 + 0$

L_e: $0 \neq (-1) + 0$

Βαρυονικός αριθμός Β

- τα κουάρκ έχουν Β=+1/3
- τα αντικουάρκ έχουν Β=-1/3
- όλα τα άλλα έχουν Β=0

ή

- Βαρυόνια Β=+1
- αντιβαρυόνια Β=-1
- όλα τα άλλα Β=0

Βαρυόνια = qqq → Β = 1/3 + 1/3 + 1/3 = 1

Μεσόνια = $q\bar{q}$ → 1/3 -1/3 =0

Ο βαρυονικός αριθμός διατηρείται στις ισχυρές, ασθενείς και Η/Μ αλληλεπιδράσεις

Σύνολο (κουάρκ – αντικουάρκ) = 0

Παραδείγματα Βαρυονικού αριθμού

$$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$$

B: 0 + +1 = 0 + +1

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$$

B: +1 = +1 + 0

Το ελαφρύτερο βαρυόνιο (p) εξαιτίας της διατήρησης του B δεν διασπάται

B: +1 ≠ 0 + 0

$$p \not\rightarrow e^+ + \pi^0$$

$\tau_p > 10^{32}$ years

Γ. Τσιπολίτης

Κβαντικοί αριθμοί των κουάρκ

	B	Q	S	C	B	T
u	+1/3	+2/3	0	0	0	0
d	+1/3	-1/3	0	0	0	0
s	+1/3	-1/3	-1	0	0	0
c	+1/3	+2/3	0	+1	0	0
b	+1/3	-1/3	0	0	-1	0
t	+1/3	+2/3	0	0	0	+1

Κβαντικοί αριθμοί των αντικουάρκ

	B	Q	S	C	B	T
$\bar{u}$	-1/3	-2/3	0	0	0	0
$\bar{d}$	-1/3	+1/3	0	0	0	0
$\bar{s}$	-1/3	+1/3	+1	0	0	0
$\bar{c}$	-1/3	-2/3	0	-1	0	0
$\bar{b}$	-1/3	+1/3	0	0	+1	0
$\bar{t}$	-1/3	-2/3	0	0	0	-1

Παράδειγμα

- Παραγωγή ζεύγους παράξενων σωματιδίων
- αντίδραση $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$
- περιγραφή με κουάρκ $\bar{u}d + uud \rightarrow \bar{s}d + usd$
- Βαρυονικός αριθμός $\left(-\frac{1}{3}+\frac{1}{3}\right)+\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{3}+\frac{1}{3}\right)=\left(-\frac{1}{3}+\frac{1}{3}\right)+\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{3}+\frac{1}{3}\right)$
- παραξενιά $0 + 0 \rightarrow +1 \quad -1$

Παραδείγματα αντιδράσεων

- Ποιες από τις επόμενες αντιδράσεις επιτρέπονται και γιατί;

$n \rightarrow p + \gamma$ Μη διατήρηση ηλεκτρικού φορτίου

$p \rightarrow e^{+} + \gamma$ Μη διατήρηση βαρυονικού αριθμού

Μη διατήρηση λεπτονικού αριθμου

$p \rightarrow \pi^{+} + \gamma$ Μη διατήρηση βαρυονικού αριθμού

$\bar{p} + n \rightarrow \pi^{-} + \pi^{0}$ επιτρεπτή

$n \rightarrow \mu^{+} + e^{-} + \gamma$ Μη διατήρηση βαρυονικού αριθμού

Μη διατήρηση λεπτονικών (e,μ) αριθμών

Παραδείγματα αντιδράσεων

$\mu^+ \rightarrow \pi^+ + \bar{\nu}_\mu$ Μη διατήρηση ενέργειας

$e^- \rightarrow \nu_e + \gamma$ Μη διατήρηση ηλεκτρικού φορτίου

$e^+ + e^- \rightarrow \nu_e + \pi^-$ Μη διατήρηση ηλεκτρικού φορτίου

$\pi^- + p \rightarrow n + \pi^0$ Επιτρεπτή

$p + \mu^- \rightarrow n + \nu_\mu$ Επιτρεπτή

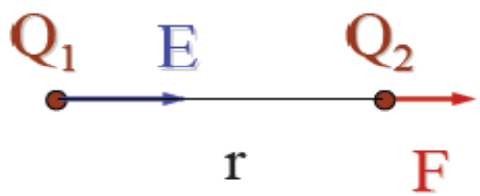
Αλληλεπίδραση & Πεδίο

- Σύμφωνα με την κλασσική εικόνα η αλληλεπίδραση σε κάποια απόσταση χρησιμοποιώντας την έννοια του πεδίου

- Στην κβαντομηχανική θεωρούμε ότι η αλληλεπίδραση γίνεται με την ανταλλαγή κβάντων (μποζονίων). Τα κβάντα έχουν ορμή/ενέργεια τα οποία διατηρούνται μόνο αν η αλληλεπίδραση γίνεται σε ένα χρονικό διάστημα που καθορίζεται από την αρχή της αβεβαιότητας $\Delta E \Delta t \approx \hbar$. Τα κβάντα λέγονται δυνητικά (virtual).

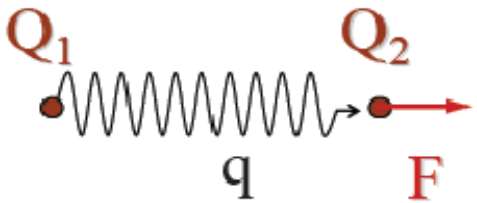
Παράδειγμα (Η/Μ)

- κλασσικά:



$$\vec{F} = \frac{Q_1 Q_2}{r^2}\hat{r}$$

- κβαντομηχανικά:



- ανταλλαγή φωτονίων ορμής q → αβεβαιότητα θέσης $qr \approx \hbar$
- ανταλλαγή φωτονίου σε $t=r/c \Rightarrow dq/dt = \hbar c/r^2$

Ο αριθμός των φωτονίων ανάλογος των φορτίων

$$\Rightarrow F=Q_1Q_2/r^2$$

Γ. Τσιπολίτης

Θεωρία Yukawa

- Yukawa: στην προσπάθεια να εξηγήσει τις δυνάμεις μεταξύ n-p στον πυρήνα έφτασε στο συμπέρασμα ότι η εμβέλεια της δύναμης εξαρτάται από τη μάζα, m, του κβάντου. $\Delta t \leq \hbar/mc^2 \Rightarrow R \approx c\Delta t \leq \hbar/mc$
- Η εξίσωση Klein-Gordon περιγράφει τη διάδοση στο κενό σωματιδίου μάζας m χωρίς spin.

$$\nabla^2\Psi - \frac{m^2c^2}{\hbar^2}\Psi - \hbar^2\frac{\partial^2\Psi}{\partial t^2} = 0$$

για m=0 → κυματική εξίσωση Η/Μ κύματος. Ψ δυναμικό σημείου στο χώρο ή πλάτος κύματος (φωτονίου)

Αγνοώντας το χρονοεξαρτώμενο μέρος → σφαιρικά συμμετρική εξίσωση για στατικό δυναμικό U(r) για r>0 και πηγή στο r=0

$$\nabla^2 U(r) = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial U}{\partial r}\right) = \frac{mc^2}{\hbar^2}U(r)$$

ολοκληρώνοντας έχουμε:

$$U(r) = \frac{g_0}{4\pi r}e^{-r/R} \quad \text{όπου} \quad R = \frac{\hbar}{mc}$$

Θεωρία Yukawa

$$U(r) = \frac{g_0}{4\pi r} e^{-r/R} \qquad \text{όπου} \qquad R = \frac{\hbar}{mc}$$

- Η σταθερά g_0 προκύπτει ως σταθερά ολοκλήρωσης και ταυτίζεται με την ισχύ σημειακής πηγής στο κέντρο.
- Ανάλογα στον Η/Μ έχουμε $\nabla^2 U(r)=0$ με λύση $U(r)=Q/4\pi r$
- Θα μπορούσαμε να πούμε ότι το g_0 της θεωρίας Yukawa παίζει το ρόλο του Q του Η/Μ → το μέτρο του "ισχυρού πυρηνικού φορτίου".
- R η εμβέλεια του πεδίου

- Γνωρίζοντας ότι $R \approx 10^{-15}$ m μπορούμε να προβλέψουμε τη μάζα του διαδότη.

$$R = \frac{\hbar}{mc} \Rightarrow mc = \frac{\hbar}{R} \Rightarrow mc^2 = \frac{\hbar c}{R} \Rightarrow mc^2 \approx \frac{197\,MeV \cdot fm}{1.4\,fm} \approx 140\,MeV$$

Θεωρία Yukawa

1935

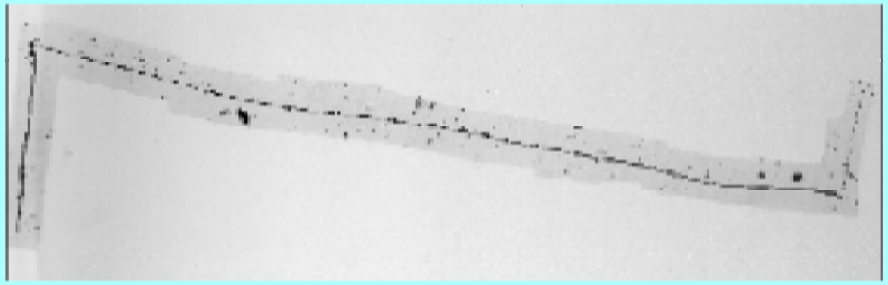
Yukawa's meson hypothesis – nuclear force due to exchange of particles with mass (mesons).

1937

μ lepton (muon) discovered by Carl Anderson and Seth Nedermeyer. Initially assumed to be Yukawa's meson but it was too penetrating.

1946

Charged π meson (pion) discovered by Cecil Powell. The previous μ produced from π decays via $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$.



1950

Neutral pion (π^0) discovered via $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$.

Hideki Yukawa

Cecil Powell