

Πυρηνική δύναμη μεσόνια και Θεωρία Yukawa



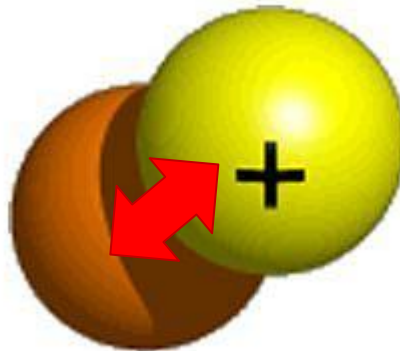
Τάσος Λιόλιος

Μάθημα Πυρηνικής Φυσικής

πυρηνική δύναμη

Η πυρηνική δύναμη

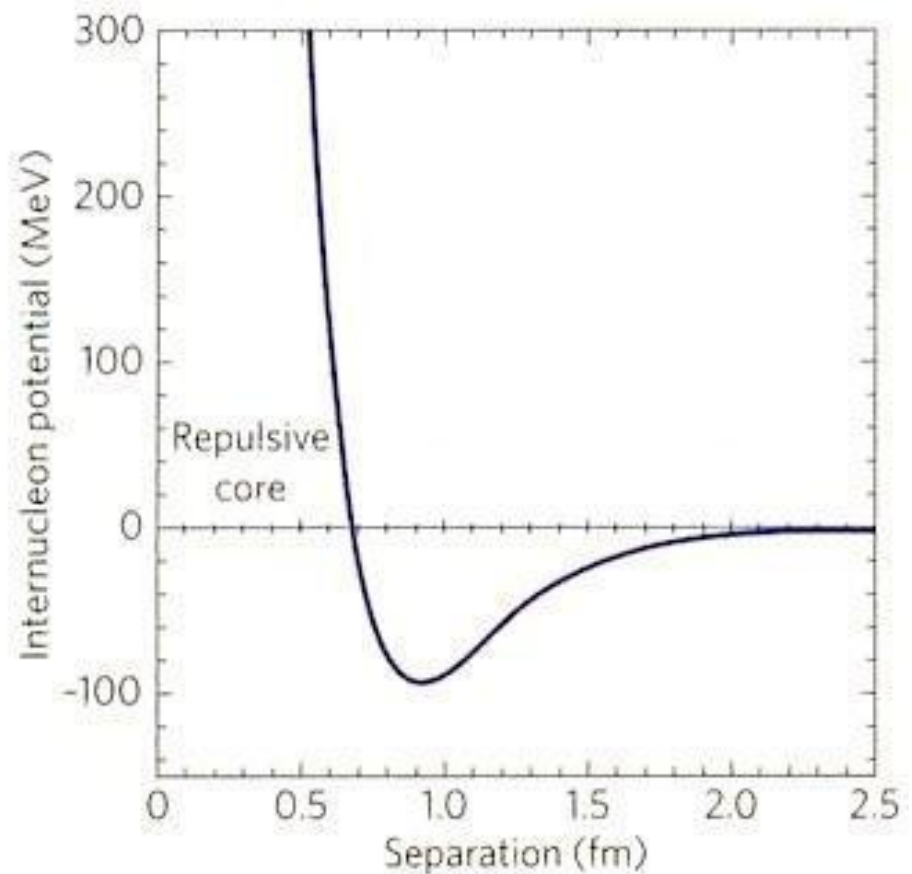
(ή *NN forces*, αλληλεπίδραση νουκλεονίου-νουκλεονίου, ή απομένουσα ισχυρή δύναμη) είναι η δύναμη μεταξύ δύο ή περισσότερων νουκλεονίων και είναι υπεύθυνη για την σύνδεση των πρωτονίων και νετρονίων στον πυρήνα των ατόμων.



Εμβέλεια της πυρηνικής δύναμης

Η πυρηνική δύναμη είναι ισχυρώς **ελκτική** για νουκλεόνια που τα κέντρα τους είναι σε απόσταση περίπου 1 fm, αλλά εξασθενεί απότομα μέχρι εξαλείψεως σε αποστάσεις πέρα από τα 2.5 fm περίπου.

Σε πολύ μικρές αποστάσεις, κάτω από 0.7 fm, γίνεται **απωστική** (repulsive core). Αυτό καθορίζει το **μέγεθος των πυρήνων** επειδή τα νουκλεόνια δεν μπορούν να έρθουν εγγύτερα από ό,τι επιτρέπει η απωστική αυτή συνιστώσα.



Ο Hideki Yukawa και η θεωρία του για την πυρηνική δύναμη

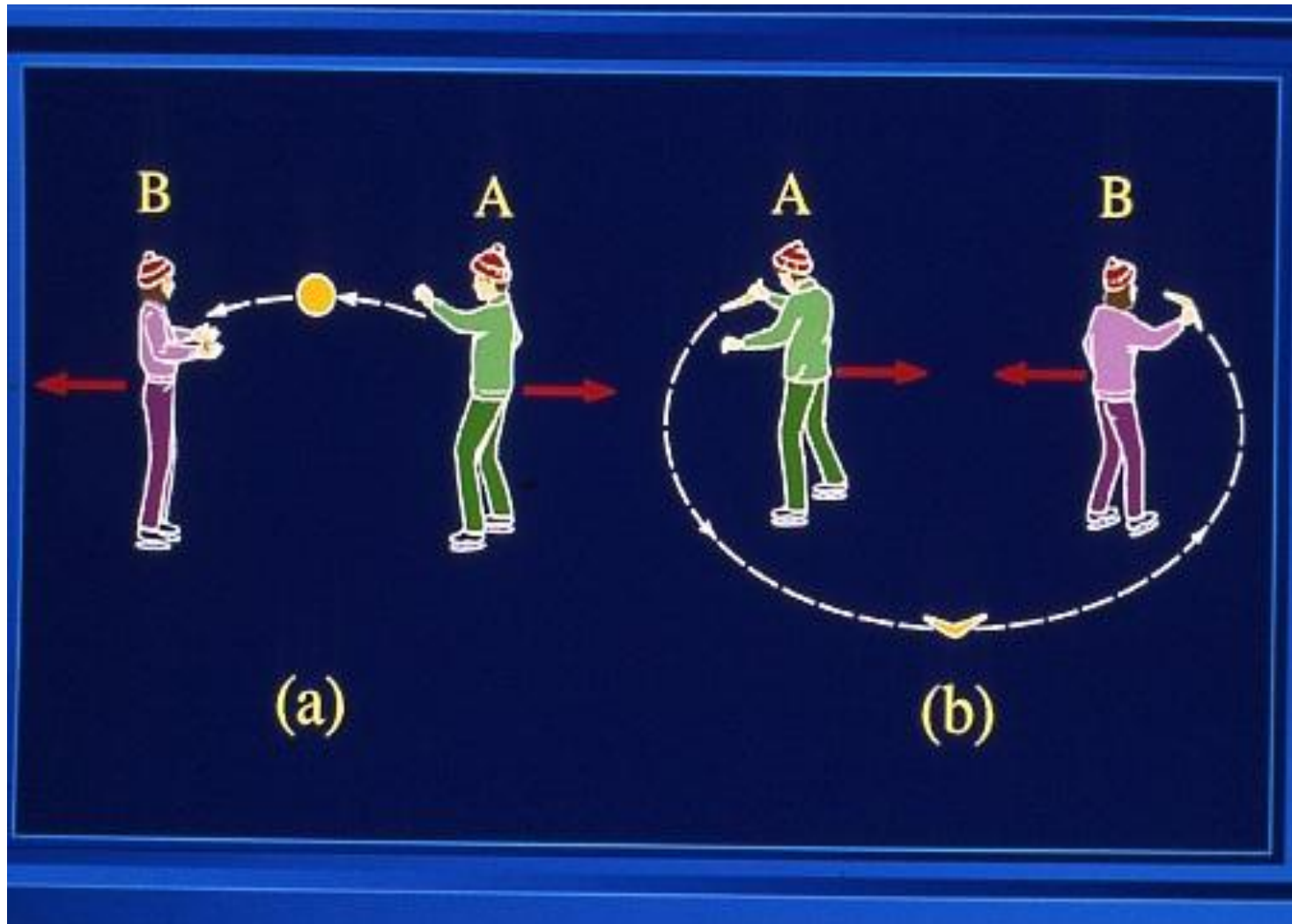


Hideki Yukawa
Τόκυο 1907 – Κυότο 1981



Η ιδέα του Yukawa:

Η ανταλλαγή ενός σώματος
ισοδυναμεί με άσκηση δύναμης

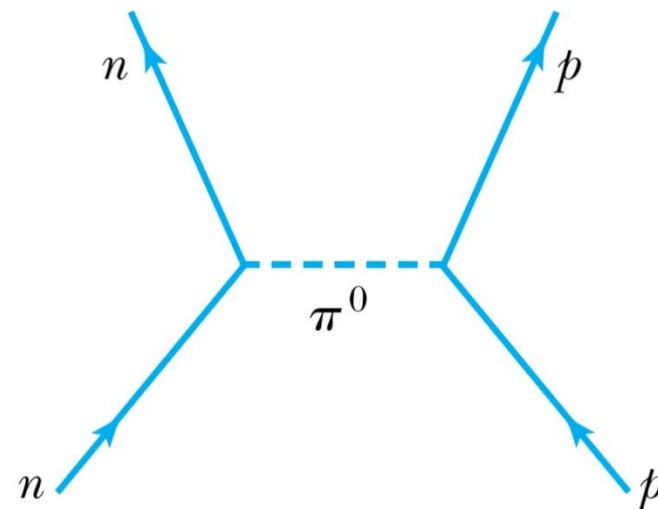


Το “μεσόνιο” του Yukawa

- Ο Hideki Yukawa στις αρχές της δεκαετίας του 1930, είχε την ιδέα να αναπτύξει μια κβαντική θεωρία πεδίου που θα περιέγραφε τη δύναμη μεταξύ νουκλεονίων με τρόπο ανάλογο της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης.
- Για να το κάνει αυτό, έπρεπε να βρει τον **φορέα της ισχυρής πυρηνικής δύναμης** κατά αναλογία προς το φωτόνιο της ΗΜ δύναμης. Τον φορέα της πυρηνικής δύναμης τον ονόμασε με την ελληνική λέξη **meson (μεσόνιο)**.
- Το μεσόνιο του Yukawa, ταυτοποιήθηκε με το **pion** (πιόνιο ή π-μεσόνιο), το οποίο ανακαλύφθηκε το 1947 από τους C. F. Powell (1903–1969) και G. P. Occhialini (1907–1993).
- Τα φορτισμένα πιόνια έχουν μάζα **140 MeV/c²**, και τα ουδέτερα πιόνια π^0 που ανακαλύφθηκαν λίγο μετά, έχουν μάζα **135 MeV/c²**.

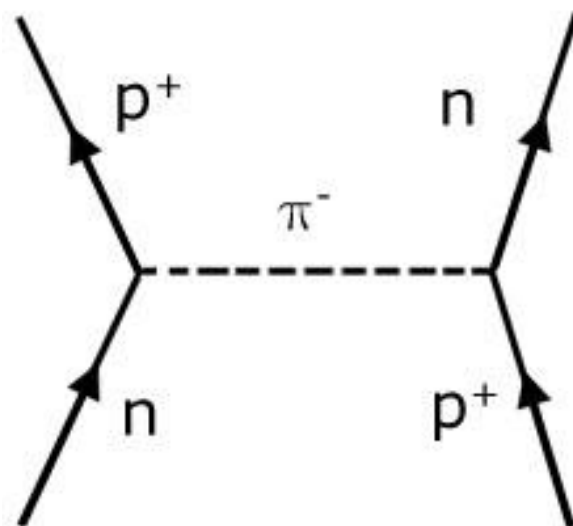
Το πιόνιο ως το σωματίδιο ανταλλαγής του Yukawa

Διάγραμματα Feynman που δείχνουν την ανταλλαγή ενός **ουδέτερου πιονίου** (πάνω) και ενός **φορτισμένου πιονίου** (κάτω) μεταξύ νετρονίου και πρωτονίου.

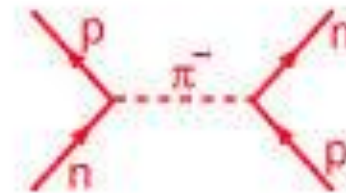
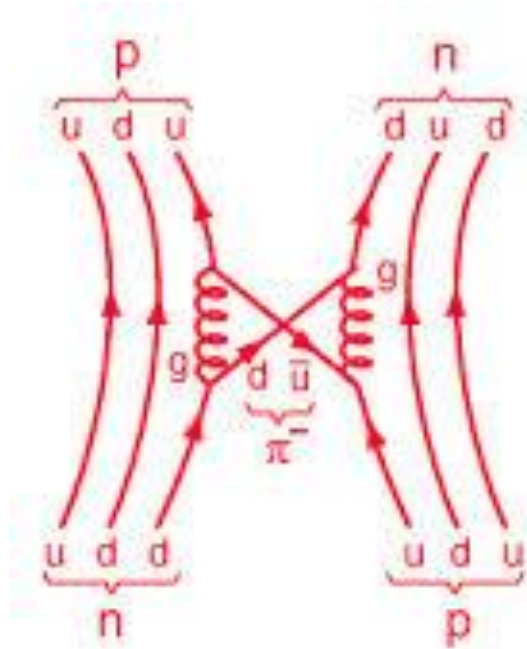


ΣΗΜΕΙΩΣΗ

Τα πιόνια που δρουν ως σωματίδια ανταλλαγής είναι **δυνητικά σωματίδια** (virtual particles) και όχι πραγματικά. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να εμφανίζονται με ενέργεια $\Delta E = mc^2$ μόνο όσο τους επιτρέπει η αρχή αβεβαιότητας του Heisenberg, δηλαδή για χρόνο $\Delta t = \hbar / 2\Delta E$. Κατά τον χρόνο αυτόν τα δυνητικά πιόνια, δεδομένης της ταχύτητάς τους c , ταξιδεύουν μέχρι απόσταση $d = c \cdot \Delta t$ που αντιπροσωπεύει την **εμβέλεια των δυνάμεων**.



Διάγραμμα Feynman για την ανταλλαγή πιονίου σε επίπεδο quark



From:

H. Yukawa,
Proc. Phys.
Math. Soc.
Japan 17,
48 (1935)

§ 2. Field describing the interaction

In analogy with the scalar potential of the electromagnetic field, a function $U(x, y, z, t)$ is introduced to describe the field between the neutron and the proton. This function will satisfy an equation similar to the wave equation for the electromagnetic potential.

Now the equation

$$\left\{ \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right\} U = 0 \quad (1)$$

has only static solution with central symmetry $\frac{1}{r}$, except the additive and the multiplicative constants. The potential of force between the neutron and the proton should, however, not be of Coulomb type, but decrease more rapidly with distance. It can be expressed, for example, by

$$+ \text{ or } -g^2 \frac{e^{-\lambda r}}{r}, \quad (2)$$

where g is a constant with the dimension of electric charge, i. e., $\text{cm}^{\frac{3}{2}} \text{sec}^{-1} \text{gr}^{\frac{1}{2}}$ and λ with the dimension cm^{-1} .

Since this function is a static solution with central symmetry of the wave equation

$$\left\{ \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \lambda^2 \right\} U = 0, \quad (3)$$

let this equation be assumed to be the correct equation for U in vacuum. In the presence of the heavy particles, the U -field interacts with them and causes the transition from neutron state to proton state.

Δυναμικό Yukawa

Ο Yukawa πρότεινε ένα δυναμικό της μορφής:

$$V_{\text{Yukawa}}(r) = -g^2 \frac{e^{-kmr}}{r},$$

όπου g είναι μια σταθερά σχετική με την ισχύ της αλληλεπίδρασης, m η μάζα του επηρεαζόμενου σωματιδίου, r η απόσταση από το σωματίδιο-πηγή, και k μια άλλη σταθερά, τέτοια ώστε το γινόμενο $\lambda = k \cdot m$ να είναι ποσότητα αντίστροφου μήκους. Η σταθερά k σχετίζεται με την εμβέλεια του δυναμικού και επιτρέπει την ταχεία μείωση του δυναμικού με την απόσταση.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Το δυναμικό Coulomb του ΗΜσμού είναι ένα παράδειγμα δυναμικού Yukawa στο οποίο το e^{-kmr} ισούται παντού με 1. Αυτό μπορεί να εκληφθεί ότι σημαίνει ότι η μάζα του φωτονίου είναι μηδέν.
- Στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενός μεσονικού πεδίου (π.χ. πεδίου πιονίων) με ένα πεδίο φερμιονίων (π.χ. νουκλεονίων), η σταθερά g ισούται με τη σταθερά σύζευξης μεταξύ αυτών των πεδίων. Στην περίπτωση της πυρηνικής δύναμης, τα φερμιόνια μπορεί να είναι π.χ. ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο.

Εξίσωση Klein–Gordon

Ο Yukawa πρότεινε ότι η κυματοσυνάρτηση του μεσονικού πεδίου ικανοποιεί μια εξίσωση του τύπου της **εξίσωσης Klein–Gordon**.

Η εξίσωση **Klein–Gordon** είναι η **σχετικιστική** εκδοχή της εξίσωσης Schrödinger. Είναι η εξίσωση κίνησης ενός βαθμωτού (scalar) ή ψευδοβαθμωτού (pseudoscalar) κβαντικού πεδίου, ενός πεδίου του οποίου τα κβάντα είναι **spinless particles** (όπως π.χ. τα πιόνια). Περιγράφει το κβαντικό πλάτος εύρεσης ενός τέτοιου σωματίου σε διάφορες θέσεις, ήτοι την σχετικιστική του κυματοσυνάρτηση.

Η εξίσωση Klein–Gordon για ένα ελεύθερο σωματίδιο μάζας m γράφεται:

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi = \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \psi$$

Μια λύση της εξίσωσης αυτής περιγράφει το πεδίο του π-μεσονίου μάζας m το οποίο σχετίζεται με τα νουκλεόνια και περιγράφει την δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ τους.

Κι άλλα
μεσόνια

from pdg
(Particle
Data
Group)

pdg.mxxx005-tab.dvi - rpp2013-tab-mesons-l...

pdg.lbl.gov/2013/tables/rpp2013-tab-mesons-light.pdf

Σελίδα: 1 23

Αυτόματη μεγέθυνση

Citation: J. Beringer et al. (Particle Data Group), PR **D86**, 010001 (2012) and 2013 partial update for the 2014 edition (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

LIGHT UNFLAVORED MESONS ($S = C = B = 0$)

For $I = 1$ (π, b, ρ, a): $u\bar{d}, (u\bar{u}-d\bar{d})/\sqrt{2}, d\bar{u};$
for $I = 0$ ($\eta, \eta', h, h', \omega, \phi, f, f'$): $c_1(u\bar{u} + d\bar{d}) + c_2(s\bar{s})$

$\pi^\pm$ $I^G(J^P) = 1^-(0^-)$

Mass $m = 139.57018 \pm 0.00035$ MeV ($S = 1.2$)
Mean life $\tau = (2.6033 \pm 0.0005) \times 10^{-8}$ s ($S = 1.2$)
 $c\tau = 7.8045$ m

$\pi^\pm \rightarrow \ell^\pm \nu \gamma$ form factors [a]

$F_V = 0.0254 \pm 0.0017$
 $F_A = 0.0119 \pm 0.0001$
 F_V slope parameter $a = 0.10 \pm 0.06$
 $R = 0.059^{+0.009}_{-0.008}$

π^- modes are charge conjugates of the modes below.

For decay limits to particles which are not established, see the section on Searches for Axions and Other Very Light Bosons.

π^+ DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level	p (MeV/c)
$\mu^+ \nu_\mu$	[b] $(99.98770 \pm 0.00004) \%$		30

Πίνακας μεσονίων (πιο αναλυτικά)

Mesons

Particle	Symbol	Anti-particle	Makeup	Rest mass MeV/c ²	S	C	B	Lifetime	Decay Modes
<u>Pion</u>	π^+	π^-	$u\bar{d}$	139.6	0	0	0	2.60×10^{-8}	$\mu^+ \nu_\mu$
<u>Pion</u>	π^0	Self	$\frac{u\bar{u} + d\bar{d}}{\sqrt{2}}$	135.0	0	0	0	0.83×10^{-16}	2γ
<u>Kaon</u>	K^+	K^-	$u\bar{s}$	493.7	+1	0	0	1.24×10^{-8}	$\mu^+ \nu_\mu, \pi^+ \pi^0$
<u>Kaon</u>	K_S^0	K_S^0	1^*	497.7	+1	0	0	0.89×10^{-10}	$\pi^+ \pi^-, 2\pi^0$
<u>Kaon</u>	K_L^0	K_L^0	1^*	497.7	+1	0	0	5.2×10^{-8}	$\pi^+ e^- \bar{\nu}_e$
<u>Eta</u>	η^0	Self	2^*	548.8	0	0	0	$< 10^{-18}$	$2\gamma, 3\mu$
<u>Eta prime</u>	η'^0	Self	2^*	958	0	0	0	...	...
<u>Rho</u>	ρ^+	ρ^-	$u\bar{d}$	770	0	0	0	0.4×10^{-23}	π, π
<u>Rho</u>	ρ^0	Self	$u\bar{u}, d\bar{d}$	770	0	0	0	...	...
<u>Omega</u>	ω^0	Self	$u\bar{u}, d\bar{d}$	782	0	0	0	...	...

π.χ.



π^+

140 MeV

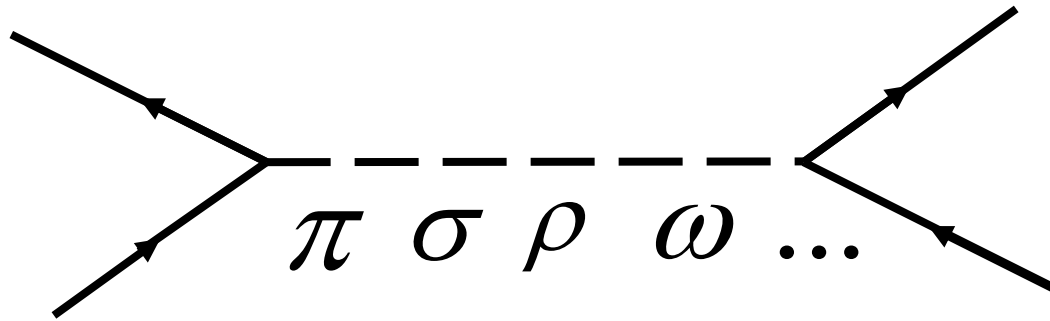


ρ^+

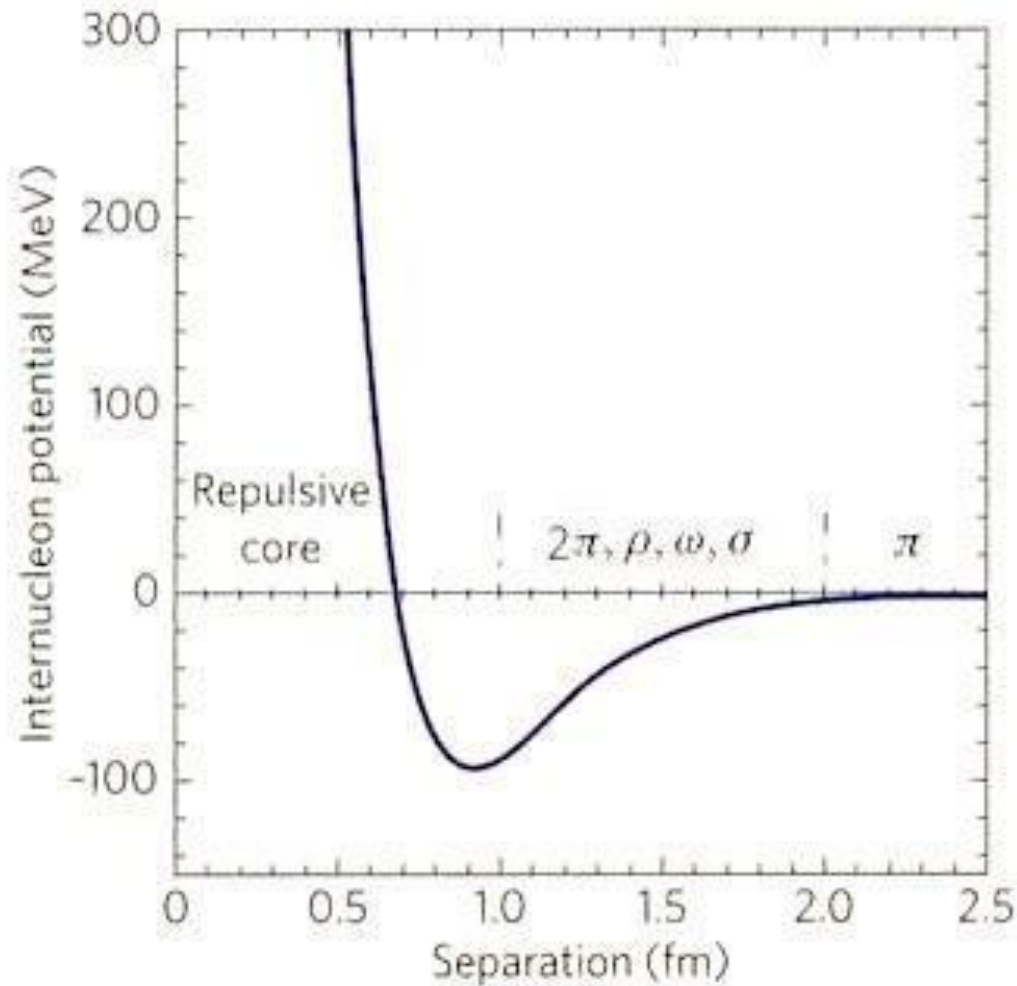
770 MeV

<u>Phi</u>	ϕ	Self	$s\bar{s}$	1020	0	0	0	20×10^{-23}	$K^+ K^-; K^0 \bar{K}^0$
<u>D</u>	D^+	D^-	$c\bar{d}$	1869.4	0	+1	0	10.6×10^{-13}	$K + _, e + _$
<u>D</u>	D^0	$\bar{D}^0$	$c\bar{u}$	1864.6	0	+1	0	4.2×10^{-13}	$[K, \mu, e] + _$
<u>D</u>	D_s^+	D_s^-	$c\bar{s}$	1969	+1	+1	0	4.7×10^{-13}	$K + _$
<u>J/Psi</u>	J/ψ	Self	$c\bar{c}$	3096.9	0	0	0	0.8×10^{-20}	$e^+ e^-, \mu^+ \mu^-, \dots$
<u>B</u>	B^-	B^+	$b\bar{u}$	5279	0	0	-1	1.5×10^{-12}	$D^0 + _$
<u>B</u>	B^0	$\bar{B}^0$	$d\bar{b}$	5279	0	0	-1	1.5×10^{-12}	$D^0 + _$
<u>B_s</u>	B_s^0	$\bar{B}_s^0$	$s\bar{b}$	5375	0	0	-1	...	...
<u>Upsilon</u>	Y	Self	$b\bar{b}$	9460.4	0	0	0	1.3×10^{-20}	$e^+ e^-, \mu^+ \mu^-, \dots$

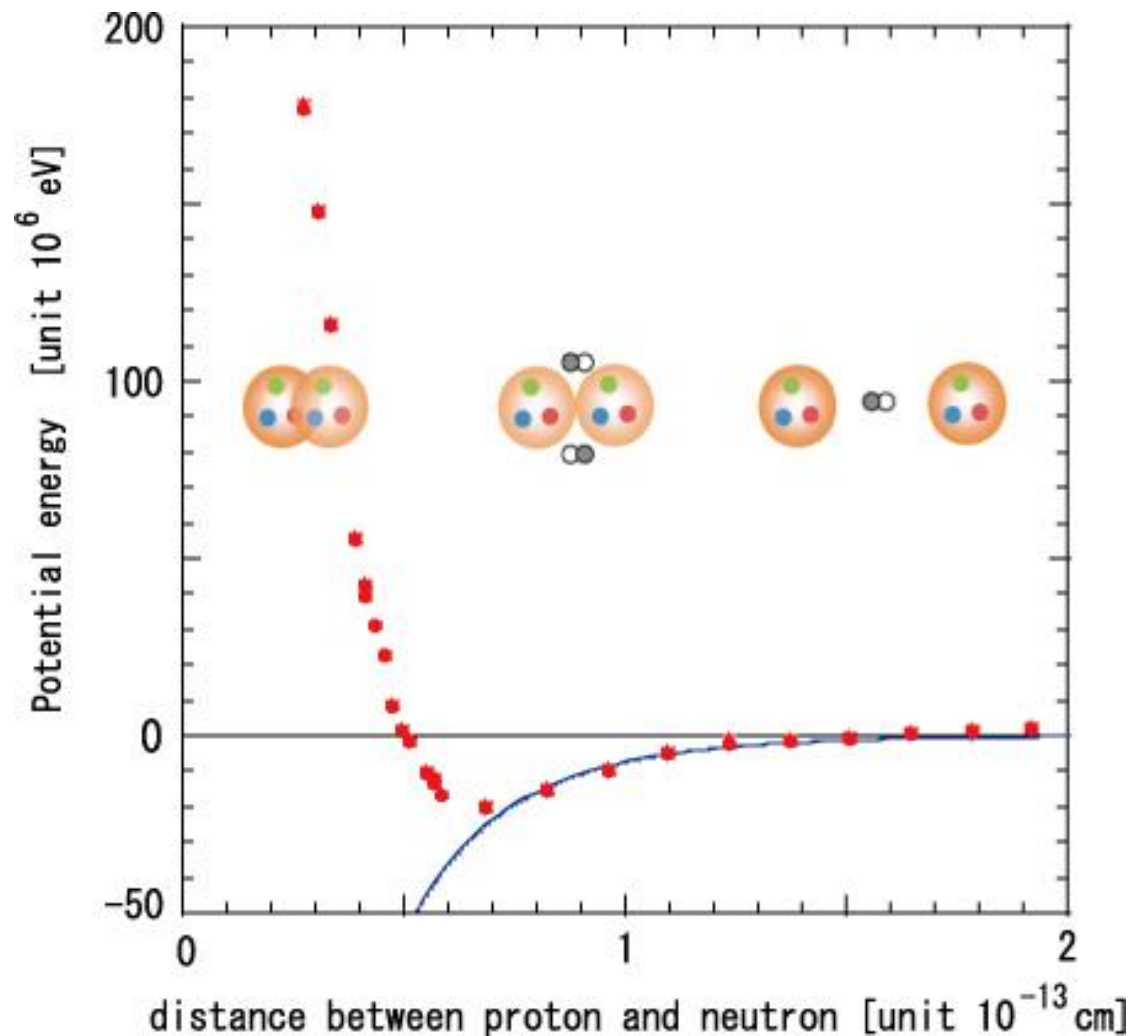
Και άλλα μεσόνια μπορεί να θεωρηθούν ότι
δρουν ως σωματίδια ανταλλαγής της
πυρηνικής δύναμης



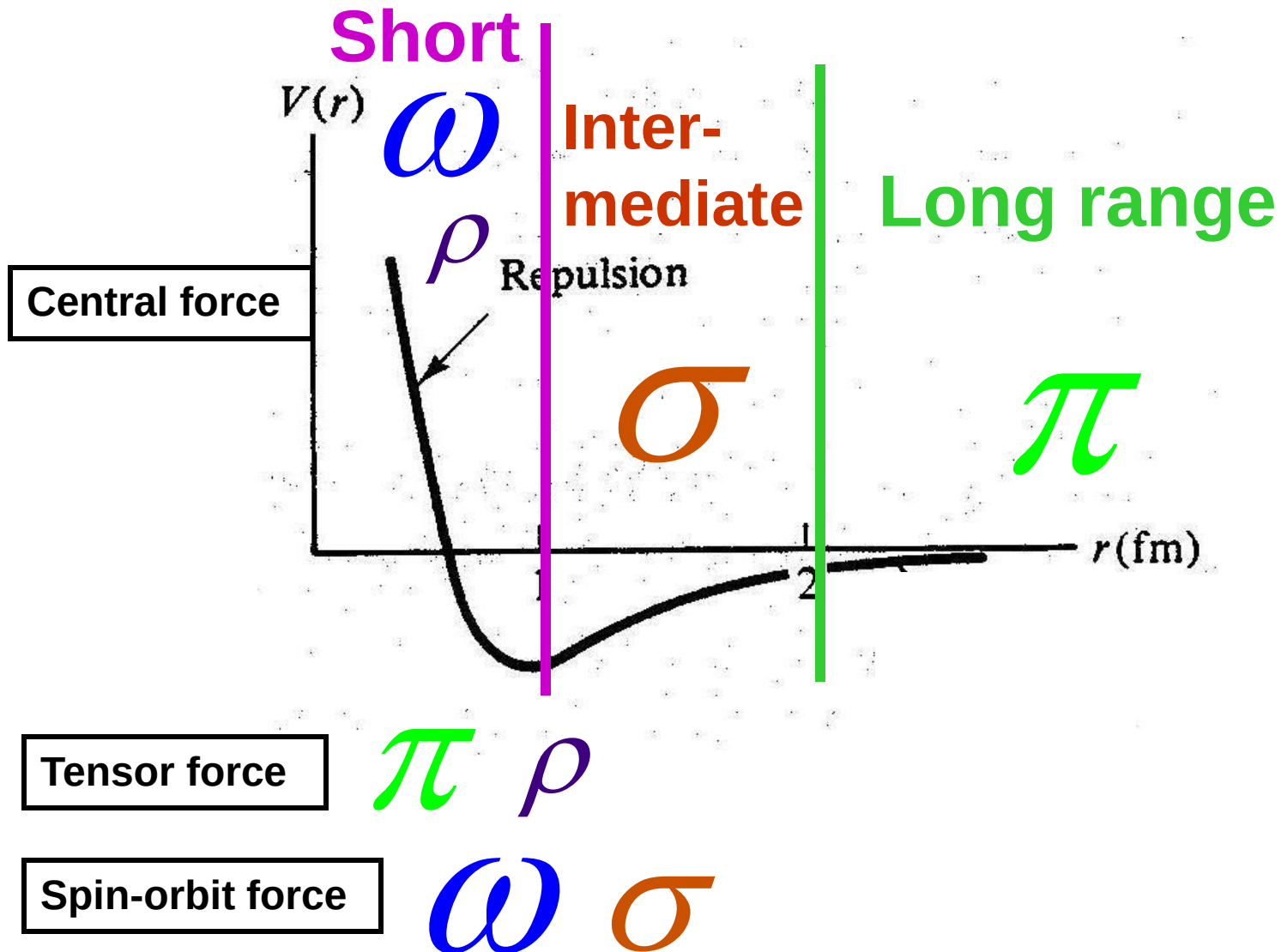
Και άλλα μεσόνια μπορεί να θεωρηθούν ότι
δρουν ως σωματίδια ανταλλαγής



Και άλλα μεσόνια μπορεί να θεωρηθούν ότι
δρουν ως σωματίδια ανταλλαγής



Περιοχές του πυρηνικού δυναμικού και σωματίδια ανταλλαγής



Η πυρηνική δύναμη ως “απομένουσα” ισχυρή δύναμη

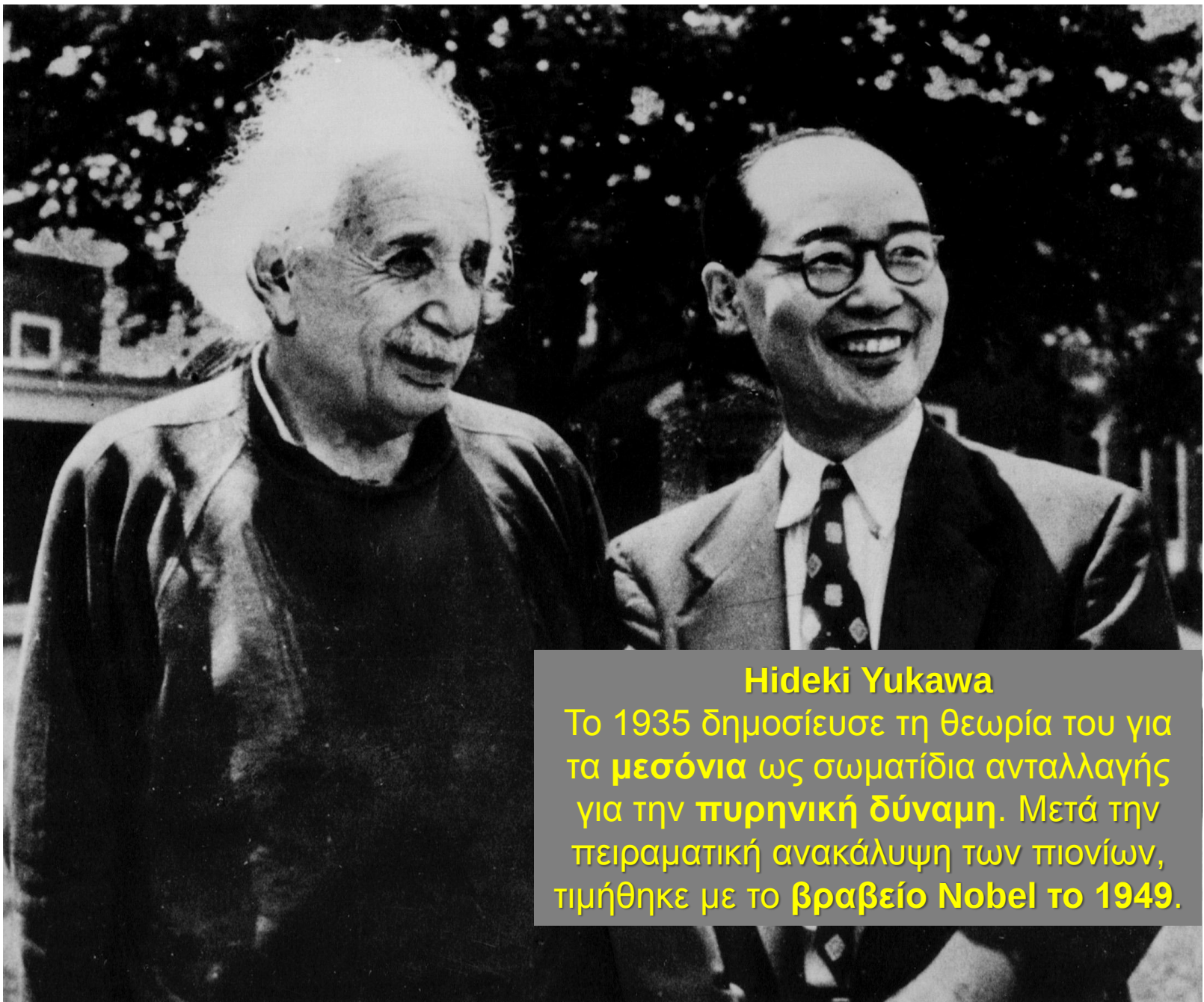
Η ιδέα της πυρηνικής δύναμης προτάθηκε το 1934 αμέσως μετά την ανακάλυψη του νετρονίου. Η αρχική ιδέα τότε ήταν ότι η δύναμη μεταξύ των νουκλεονίων διαδίδεται μέσω μαζικών σωματιδίων που ονομάστηκαν **μεσόνια**. Τα μεσόνια ανακαλύφθηκαν πειραματικά το 1947, ενώ την δεκαετία του 1970 έγινε κατανοητό ότι και τα μεσόνια αποτελούνται από κουάρκ και γκουλόνια, όπως και τα νουκλεόνια.

Η πυρηνική δύναμη γίνεται σήμερα κατανοητή ως το αποτέλεσμα που απομένει από την κατά πολύ ισχυρότερη δύναμη που δρα μεταξύ των κουάρκ (ισχυρή αλληλεπίδραση, QCD forces) συνδέοντάς τα μεταξύ τους προς σχηματισμό των νουκλεονίων. Η ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ των κουάρκ έχει ως σωματίδια ανταλλαγής τα **γκλουόνια**, που είναι ένας τύπος μποζονίων βαθμίδας.

Η πυρηνική δύναμη είναι ανάλογη αυτών που θεωρούνται στη χημεία ότι ασκούνται μεταξύ ουδετέρων ατόμων ή μορίων λόγω στιγμιαίας επαγωγικής δημιουργίας διπόλων ή πολυπόλων, τις **δυνάμεις London** (ένα είδος δυνάμεων van der Waals). Οι δυνάμεις αυτές είναι μικρής εμβέλειας, δρουν μόνο μεταξύ γειτονικών οντοτήτων και γίνονται απωστικές σε υπερβολικά κοντινές αποστάσεις.

Σχόλιο: πραγματικά και δυνητικά σωματίδια

Η πρόταση Yukawa για την θεώρηση άσκησης της δύναμης μέσω σωματιδίων ανταλλαγής ήταν πρωτοποριακή και πολύ ενδιαφέρουσα. Αλλά πως επαληθεύεται πειραματικά; Προφανώς με την παρατήρηση της ύπαρξης των προτεινομένων σωματιδίων. Τα σωματίδια για να παρατηρούνται στους ανιχνευτές πρέπει να είναι **πραγματικά** και **όχι δυνητικά**. Αυτό σημαίνει ότι δεν περιορίζεται η ύπαρξή τους μόνο στον περιορισμένο χρόνο της αρχής απροσδιοριστίας, αλλά ζουν πολύ περισσότερο. Για να γίνει αυτό, πρέπει να τους παρασχεθεί με κάποιο τρόπο η **ενέργεια** που αντιστοιχεί στη μάζα τους για να “υλοποιηθούν”. Αυτό γίνεται με συγκρούσεις άλλων σωματιδίων αρκετής ενέργειας (π.χ. στους επιταχυντές ή στην κοσμική ακτινοβολία), έτσι ώστε να διατηρείται τελικά η ενέργεια και η ορμή.



Hideki Yukawa

Το 1935 δημοσίευσε τη θεωρία του για τα **μεσόνια** ως σωματίδια ανταλλαγής για την **πυρηνική δύναμη**. Μετά την πειραματική ανακάλυψη των πιονίων, τιμήθηκε με το **βραβείο Nobel το 1949**.

ΑΣΚΗΣΗ:

μάζα πιονίων και εμβέλεια της πυρηνικής δύναμης

Θεωρώντας ότι η εμβέλεια της πυρηνικής δύναμης είναι της τάξης του 1 fermi, και ότι φορέας της είναι τα πιόνια, να υπολογίσετε τη μάζα των πιονίων υποθέτοντας ότι κινούνται με την ταχύτητα του φωτός.

Λύση

Ο υπολογισμός είναι προσεγγιστικός λόγω των υποθέσεων που κάνουμε για την εμβέλεια της πυρηνικής δύναμης και την ταχύτητα των πιονίων αλλά και διότι δεν θα χρησιμοποιήσουμε τους ακριβείς υπολογισμούς της κβαντικής μηχανικής.

Θα χρησιμοποιήσουμε την αρχή αβεβαιότητας του Heisenberg. Πρώτα θα βρούμε τον χρόνο Δt κατά τον οποίο υπάρχουν τα δυνητικά πιόνια (virtual pions), δεδομένης της ταχύτητάς τους c και της απόστασης που ταξιδεύουν (εμβέλειας των δυνάμεων), δηλ. το 1 fm.

ΑΣΚΗΣΗ (συνέχεια)

Τα δυνητικά πιόνια ταξιδεύουν απόσταση $d \approx c\Delta t$, και επομένως ο χρόνος ύπαρξής τους είναι περίπου:

$$\Delta t \approx d/c = (10^{-15} \text{ m}) / (3.0 \times 10^8 \text{ m/s}) = 3.3 \times 10^{-24} \text{ s}$$

Λύνοντας τη σχέση Heisenberg ως προς ΔE , έχουμε:

$$\Delta E \approx (h/4\pi)/\Delta t \approx (6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) / (4\pi) / (3.3 \times 10^{-24} \text{ s}) = 100 \text{ MeV}$$

και η αντίστοιχη μάζα είναι:

$$m = \Delta E/c^2 = 100 \text{ MeV}/c^2.$$

Αυτή η μάζα είναι περίπου 200 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου και το 1/10 της μάζας του πρωτονίου. Τέτοιας μάζας σωματίδια ανακαλύφθηκαν πράγματι το 1947 στην κοσμική ακτινοβολία. Είναι τα 3 πιόνια π^+ , π^- , π^0 . Οι ακριβείς μάζες των φορτισμένων πιονίων είναι $139.6 \text{ MeV}/c^2$, ενώ του ουδέτερου π^0 είναι $135.0 \text{ MeV}/c^2$.

ΑΣΚΗΣΗ

Μια συνιστώσα της ισχυρής πυρηνικής δύναμης υποτίθεται ότι διαδίδεται μέσω δυνητικών ω^0 -μεσονίων. Λαμβάνοντας για τη μάζα τους την τιμή $782 \text{ MeV}/c^2$, βρείτε την εμβέλεια αυτής της συνιστώσας της ισχυρής πυρηνικής δύναμης.