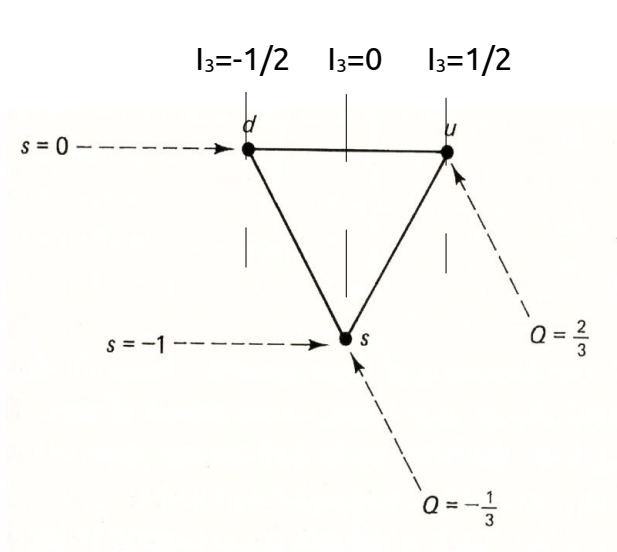


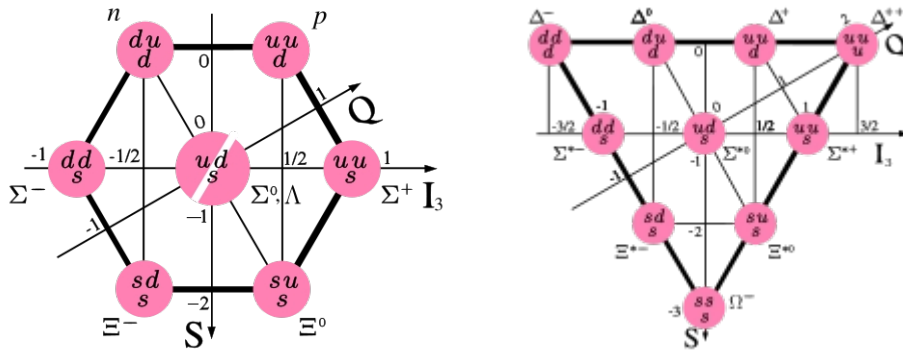
Διάλεξη 17: Το μοντέλο των κουάρκ

Από την επιτυχία της αναπαράστασης των σωματιδίων σε οκταπλέτες ή δεκαπλέτες προκύπτει ένα πολύ εύλογο ερώτημα. Τι συμβαίνει και οι ιδιότητες των σωματιδίων που έχουν ανακαλυφθεί και ανακαλύπτονται παρουσιάζουν τέτοιου είδους περιοδικότητα. Είναι ακριβώς ανάλογη κατάσταση με τον περιοδικό πίνακα του Mendeleev όπου αργότερα ανακαλύφθηκε ότι η περιοδικότητα στις ιδιότητες των ατόμων προκύπτει από το γεγονός ότι έχουν εσωτερική δομή – πυρήνας και ηλεκτρόνια τα οποία βάσει της απαγορευτικής αρχής του Pauli καταλαμβάνουν συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες. Με την παρατήρηση των διατάξεων που σχηματίζουν τα βαρυόνια και τα μεσόνια δεν άργησαν οι φυσικοί στοιχειωδών σωματιδίων να αποδείξουν ότι όλα τα **ως τότε γνωστά σωματίδια μπορούσαν να προκύψουν από τον συνδυασμό 3 μόνο κουάρκ**.



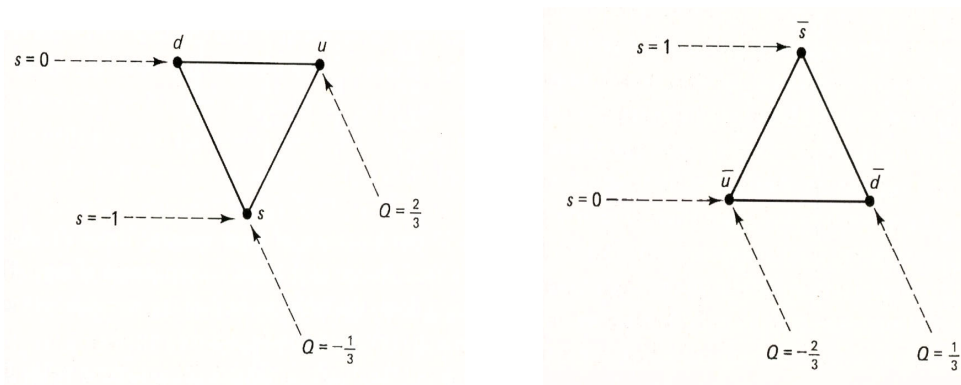
Σχήμα 1: Σχηματική αναπαράσταση των ιδιοτήτων των κουάρκ u, d, s .

Στα κουάρκ αυτά δόθηκαν οι ονομασίες: πάνω (u), κάτω (d) και το παράδοξο (s). Τα κουάρκ u και d έχουν παραδοξότητα $S=0$ ενώ το s έχει παραδοξότητα $S=-1$. Τα κουάρκ d και s έχουν φορτίο $-1/3e$ ενώ το u έχει φορτίο $Q=2/3e$. Να σημειωθεί ότι μέχρι τώρα δεν έχει γίνει ποτέ ξανά αναφορά σε ηλεκτρικό φορτίο υποπολλαπλάσιο του φορτίου του ηλεκτρονίου. Έτσι λοιπόν από την παρατήρηση των ιδιοτήτων των αδρονίων προέκυψε το συμπέρασμα ότι δεν πρόκειται για στοιχειώδη σωματίδια αλλά ότι αποτελούνται από κουάρκ. Μάλιστα από την παρατήρηση των αποδιεγέρσεων των σωματιδίων και των επιτρεπτών αντιδράσεων τους πολύ γρήγορα προέκυψε το συμπέρασμα ότι τα βαρυόνια αποτελούνται από τρία κουάρκ ενώ τα μεσόνια από ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ. Με βάση λοιπόν το παρατηρούμενο φορτίο αλλά και τους άλλους κβαντικούς αριθμούς όπως η παραδοξότητα πολύ εύκολα μπορεί κανείς να αποδείξει και να βρει τους συνδυασμούς των κουάρκ τα οποία αποτελούν το κάθε σωματίδιο της οκταπλέτας και της δεκαπλέτας όπως στο πιο κάτω σχήμα.



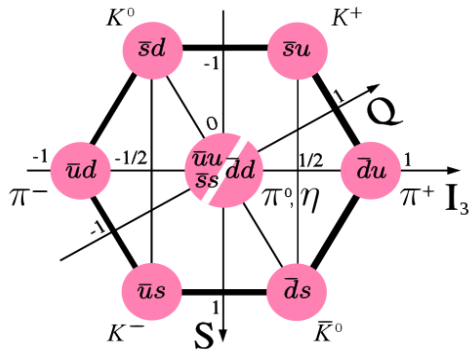
Σχήμα 2: Η περιεκτικότητα σε κουάρκ της οκταπλέτας και της δεκαπλέτας των βαρυονίων.

Το ίδιο μπορεί φυσικά να εφαρμοστεί και στην περίπτωση των μεσονίων λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα μεσόνιο αποτελείται από ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ. Βέβαια στην περίπτωση των μεσονίων θα πρέπει να επαναλάβουμε ότι τα αντισωματία των κουάρκ έχουν ίδιο σπιν αλλά αντίθετο φορτίο και κβαντικούς αριθμούς από τα κουάρκ σύμφωνα με το σχήμα 3.



Σχήμα 3: Σχηματική αναπαράσταση των ιδιοτήτων των κουάρκ και των αντισωματίων τους

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω αλλά και τις ιδιότητες των μεσονίων μπορεί να προσδιοριστεί η σύσταση τους σε κουάρκ σύμφωνα με το σχήμα 4.

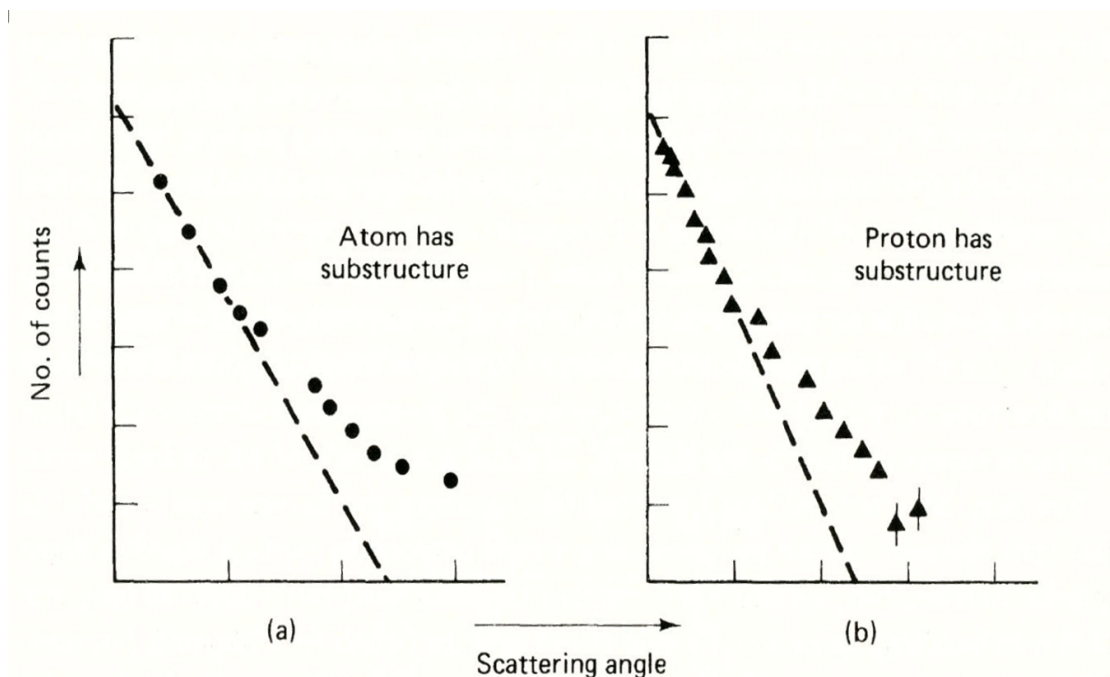


Σχήμα 4: Η σύσταση της οκταπλέτας μεσονίων σε κουάρκ

Φαινομενικά με την θεώρηση των κουάρκ ως στοιχειωδών σωματιδίων μπορέσαμε να "κατασκευάσουμε" τα μέχρι τότε γνωστά μεσόνια και βαρυόνια, οπότε τα τότε προβλήματα της φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων (κατά κάποια έννοια) λύθηκαν. Γρήγορα όμως παρουσιάστηκαν κάποια ερωτήματα τα οποία ήταν ζωτικής σημασίας για το πρότυπο των κουάρκ και στα οποία έπρεπε οπωσδήποτε να δοθεί απάντηση. Το πρώτο από αυτά τα ερωτήματα αφορούσε στο σωματίο Δ^+ το οποίο σύμφωνα με το πρότυπο των κουάρκ αποτελείται από από τα ίδια τρία κουάρκ (uud) που αποτελείται και το πρωτόνιο. Στο μοντέλο των κουάρκ είναι γενικότερο πρόβλημα ότι πολλά διαφορετικά σωματίδια έχουν την ίδια σύσταση σε κουάρκ. Η εξήγηση σε αυτό δεν άρχισε να έρθει με την απλή σκέψη ότι **οι ίδιες τριάδες κουάρκ μπορεί να έχουν διαφορετικές ενεργειακές καταστάσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικά σωματίδια με προφανώς διαφορετικές μάζες**. Αυτό ποιοτικά μπορούμε να το καταλάβουμε ως εξής: Στο άτομο του υδρογόνου για παράδειγμα η ενέργεια ηρεμίας είναι 10^9 eV ενώ οι διεγερμένες καταστάσεις του απέχουν μερικά eV. Είναι λοιπόν προφανές ότι στην περίπτωση των ατόμων η διεγερση δεν αλλάζει την εικόνα του συστήματος. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο στην περίπτωση των δέσμιων καταστάσεων των κουάρκ. Εδώ οι διεγερμένες καταστάσεις διαφέρουν σημαντικά επομένως θεωρούνται ως διαφορετικά σωματίδια.

Ένα δεύτερο ερώτημα που απαιτούσε μια σίγουρα πειστική απάντηση αφορούσε στο Δ^{++} σωματίδιο το οποίο αποτελείται από τρία ίδια κουάρκ (uuu). Αυτό δεν έρχεται σε αντίφαση με την αρχή απροσδιοριστίας του Pauli; Σε αυτό το βασικό ζήτημα δεν άργησαν πάλι οι θεωρητικοί φυσικοί να δώσουν μια απάντηση. **Τα κουάρκ εκτός από "γεύση" (u, d, s, \dots) έχουν και "χρώμα"**. Μάλιστα προχώρησαν ένα βήμα παραπέρα και διατυπώθηκε η εξής πολύ κομψή θεωρία. **Τα κουάρκ διαθέτουν τρία χρώματα**. Το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε. **Όλες οι δέσμιες καταστάσεις των κουάρκ θα πρέπει να είναι άχρωμες**. Έτσι τα μεσόνια είναι άχρωμα διότι αποτελούνται για παράδειγμα από ένα κουάρκ με μονάδα κόκκινου +1 και ένα αντικουάρκ με μονάδα κόκκινου -1. Τα βαρυόνια από την άλλη θα πρέπει να διαθέτουν και τα τρία βασικά χρώματα (μπλε, κόκκινο και πράσινο) ώστε το άθροισμα να είναι άχρωμο. Όπως ακριβώς συμβαίνει και

στην οπτική όταν αναμείξουμε τα βασικά χρώματα προκύπτει το λευκό. Ένα επιπλέον βασικό ερώτημα το οποίο φαινόταν μάλλον ανυπέρβλητο ήταν το εξής: Αφού τα κουάρκ αποτελούν στοιχειώδη σωματίδια και είναι συστατικά των πρωτονίων και των άλλων σωματιδίων γιατί ποτέ δεν καταφέραμε να παράγουμε ένα μεμονωμένο κουάρκ. Μέχρι σήμερα δεν έχει παρατηρηθεί ούτε μια φορά ένα κουάρκ και αυτό σίγουρα είναι κάτι που γεννά δεύτερες σκέψεις για την ύπαρξη τους ή όχι. Αυτές οι σκέψεις πολύ γρήγορα απομακρύνθηκαν με την χρήση ολοένα και ισχυρότερων επιταχυντικών διατάξεων. Όπως ειπώθηκε προηγουμένως ποτέ δεν σημειώθηκε παρατήρηση ενός μεμονωμένου κουάρκ αλλά από πειράματα σκέδασης πρωτονίου αποδείχθηκε η ύπαρξη των κουάρκ ως συστατικών του πρωτονίου το ίδιο πειστικά όπως αποδείχθηκε αρκετά χρόνια νωρίτερα από τον Rutherford η ύπαρξη του πυρήνα ως συστατικού του ατόμου.

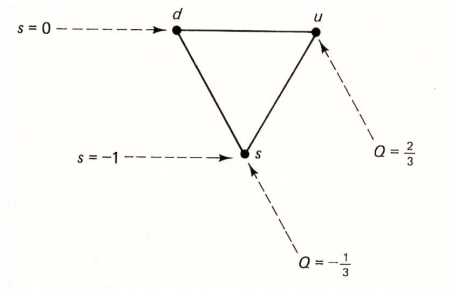


Σχήμα 5: Πειραματική επιβεβαίωση της εσωτερικής δομής του πρωτονίου. Στο δεξιό σχήμα η απόκλιση της γωνιακής κατανομής σκέδασης ηλεκτρονίων από την διακεκομμένη γραμμή αποδεικνύει την ύπαρξη εσωτερικής δομής για το πρωτόνιο.

Στο σχήμα 5 παρουσιάζονται δύο ανεξάρτητα πειράματα σκέδασης. Και στα δύο σχήματα οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στην αναμενόμενη γωνιακή κατανομή σε περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής φορτίου για το άτομο αριστερά, και για το πρωτόνιο δεξιά. Και στις δύο περιπτώσεις βλέπουμε ότι **τα πειραματικά αποτελέσματα και ιδιαιτέρως σε μεγάλες γωνίες παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση από την θεώρηση της ομογενούς κατανομής φορτίου**. Πιο συγκεκριμένα στο δεξί μέρος του σχήματος 5 η πειραματικά καταγεγραμμένη γωνιακή κατανομή ανελαστικής σκέδασης ηλεκτρονίων δείχνει σαφέστατα την ύπαρξη δομής στην περίπτωση του του πρωτονίου. Μάλιστα από **εκτενείς υπολογισμούς προκύπτει ότι η πειραματική κατανομή μπορεί να αποδοθεί θεωρητικά αν θεωρήσουμε ότι το πρωτόνιο αποτελείται από τρία στοιχειώδη δωματίδια, δηλαδή τρία κουάρκ**.

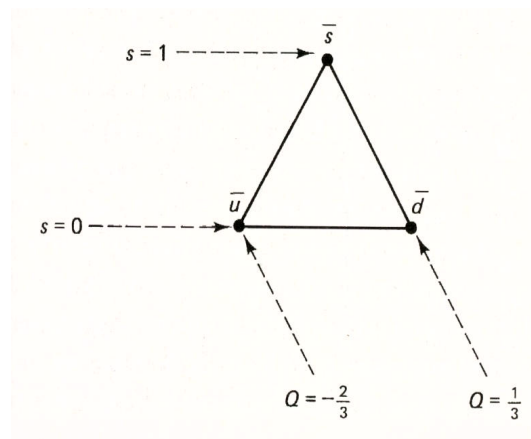
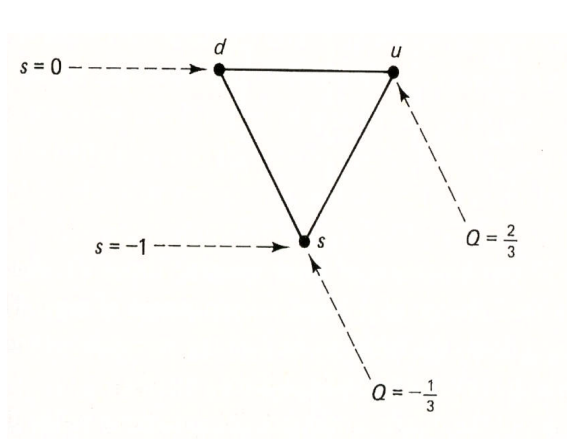
Παραδείγματα

1) Με δεδομένα το φορτίο, το ισοσπιν και τον κβαντικό αριθμό της παραδοξότητας να βρεθεί η σύσταση σε κουάρκ των βαρυονίων της δεκαπλέτας με βάση τα κουάρκ u, d, s .



qqq	Q	S	βαρυόνιο
uuu	2	0	Δ^{++}
uud	1	0	Δ^+
udd	0	0	Δ^0
ddd	-1	0	Δ^-
uus	1	-1	Σ^{*+}
uds	0	-1	Σ^{*0}
dds	-1	-1	Σ^{*-}
uss	0	-2	Ξ^{*0}
dss	-1	-2	Ξ^{*-}
sss	-1	-3	Ω^-

2) Με δεδομένα το φορτίο και τον κβαντικό αριθμό της παραδοξότητας να βρεθεί η σύσταση σε κουάρκ των μεσονίων της οκταπλέτας με βάση τα κουάρκ u, d, s .



$q\bar{q}$	Q	S	μεσόνιο
$u\bar{u}$	0	0	π^0
$u\bar{d}$	1	0	π^+
$d\bar{u}$	-1	0	π^-
$d\bar{d}$	0	0	η
$u\bar{s}$	1	1	K^+
$d\bar{s}$	0	1	K^0
$s\bar{u}$	-1	-1	K^-
$s\bar{d}$	0	-1	K^0
$s\bar{s}$	0	0	η'

3) Με δεδομένα το φορτίο, το ισοσπιν και τον κβαντικό αριθμό της παραδοξότητας να βρεθεί η σύσταση σε κουάρκ της οκταπλέτας των βαρυονίων του σχήματος 2.

qqq	Q	S	I_z	βαρυόνιο
dds	-1	-1	-1	Σ^-
ddu	0	0	-1/2	n
ssd	-1	-2	-1/2	Ξ^-
uds	0	-1	0	Σ^0, Λ
ssu	0	-2	1/2	Ξ^0
uud	1	0	1/2	p
uus	1	-1	1	Σ^+