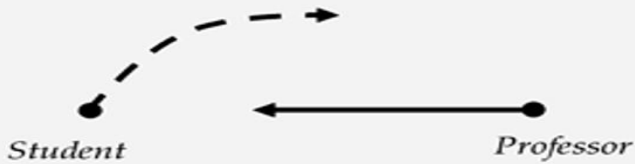


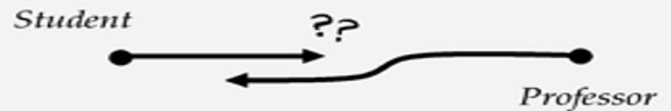


Academic Interaction FEYNMAN DIAGRAMS

Student avoids Professor



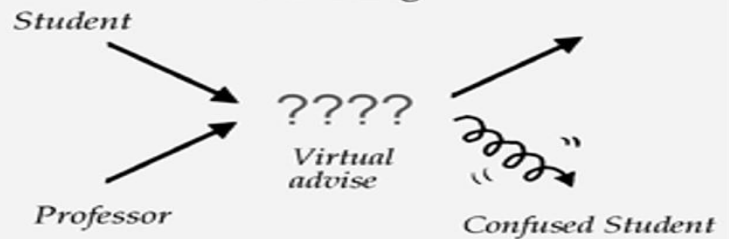
Professor Ignores Grad Student



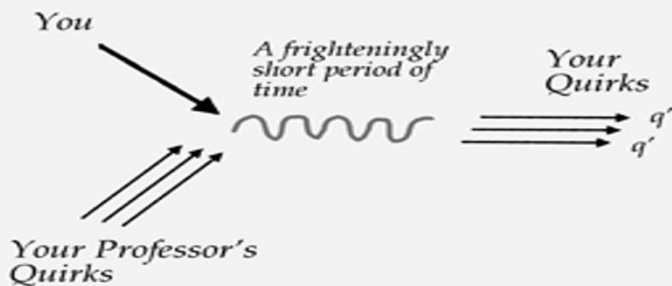
Mutual Avoidance



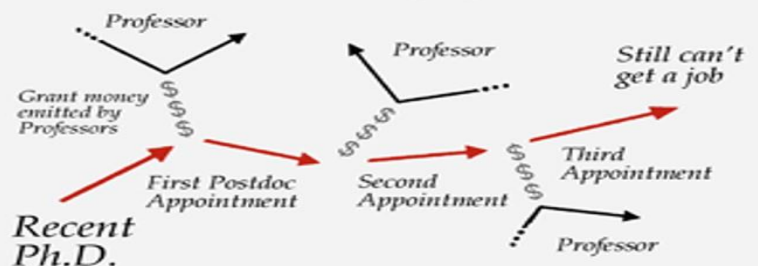
"Advising"



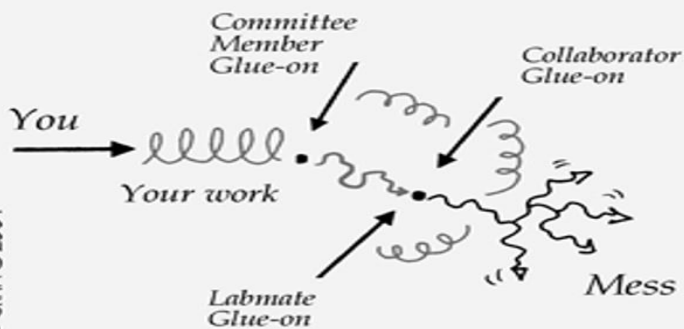
Quirk Exchange



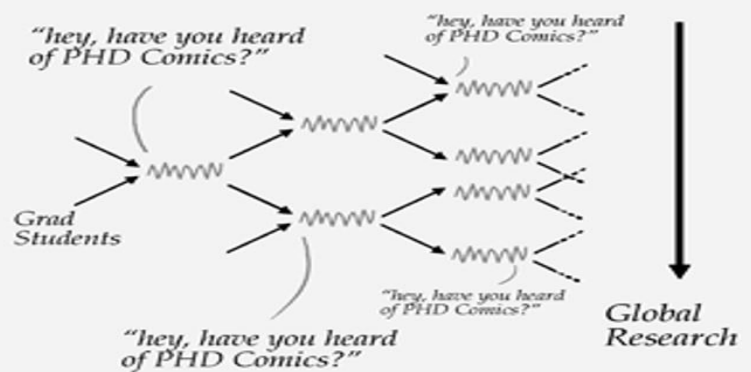
Postdoc Propagation



Graduation Annihilation



Productivity Decay



Επέλεξα να ξεκινήσω το άρθρο για τα διαγράμματα Feynman με το παραπάνω κόμικ για να ... «σπάσει λίγο ο πάγος», γνωρίζοντας ότι και από μόνος του ο τίτλος θα απωθούσε τον επίδοξο αναγνώστη για να συνεχίσει. Φυσικά δεν είμαι σίγουρος ότι με τον τρόπο αυτόν έχω καταφέρει και πολλά, αφού τα αστεία των Φυσικών και Μαθηματικών θεωρούνται κρύα, πλησιάζοντας σε θερμοκρασία το απόλυτο μηδέν (-273° C). Ωστόσο, εάν χαμογελάσει έστω και λίγο το χελάκι του αναγνώστη με το παραπάνω, αξίζει να προσπαθήσει να διεισδύσει και στο κυρίως άρθρο...

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ *FEYNMAN*

«...οι υπολογισμοί με τους οποίους κέρδισα το Νόμπελ Φυσικής του 2004, όπως και οι υπολογισμοί που καθιέρωσαν μια διαδρομή για την παραγωγή και την παρατήρηση του σωματιδίου *Higgs*, θα ήταν αδιανόητοι χωρίς τα διαγράμματα *Feynman*».
Frank Wilczek, Nobel Prize Physics (2004)¹

Στη θεωρητική φυσική, ένα διάγραμμα *Feynman* είναι μια εικονογραφική αναπαράσταση των μαθηματικών εκφράσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά και την αλληλεπίδραση των υποατομικών σωματιδίων.

Το σχήμα πήρε το όνομά του από τον Αμερικανό φυσικό Richard Feynman², ο οποίος εισήγαγε τα διαγράμματα το 1948. Τα διαγράμματα *Feynman* δίνουν μια απλή απεικόνιση της αλληλεπιδράσεως των υποατομικών σωματιδίων που διαφορετικά θα ήταν πολύπλοκη και δυσνόητη.

Από τα μέσα του 20ου αιώνα, οι θεωρητικοί φυσικοί στρέφονται όλο και περισσότερο στη χρήση αυτού του εργαλείου και στη βοήθειά του σε κρίσιμους υπολογισμούς.

Τα διαγράμματα *Feynman* έχουν φέρει επανάσταση σχεδόν σε κάθε πτυχή της θεωρητικής φυσικής. Ενώ εφαρμόζονται κατά κύριο λόγο στη θεωρία του κβαντικού πεδίου, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε άλλους τομείς της φυσικής, όπως η θεωρία στερεάς κατάστασης.

Η «Ασυμπτωτική Ελευθερία» στη θεωρία της Ισχυρής Αλληλεπιδράσεως

Στη θεωρία του κβαντικού πεδίου, η «ασυμπτωτική ελευθερία» είναι μια ιδιότητα ορισμένων θεωριών βαθμίδας που κάνει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων να γίνονται ασυμπτωτικά πιο αδύναμες καθώς αυξάνεται η κλίμακα ενέργειας και μειώνεται η αντίστοιχη κλίμακα μήκους.

Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο κοντά είναι τα κουάρκ μεταξύ τους, τόσο μικρότερη είναι η ισχυρή αλληλεπίδραση (χρωματικό φορτίο) μεταξύ τους. Όταν τα κουάρκ βρίσκονται σε εξαιρετική εγγύτητα, η πυρηνική δύναμη μεταξύ τους είναι τόσο αδύναμη που συμπεριφέρονται σχεδόν ως ελεύθερα σωματίδια.

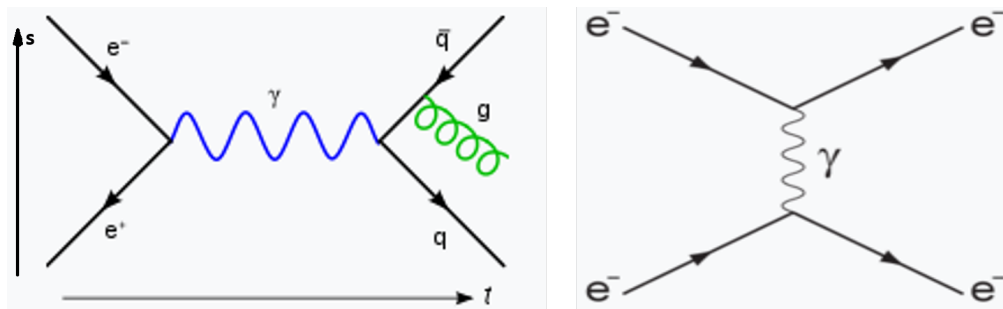
¹Ο Frank Wilczek (Αμερικανός θεωρητικός φυσικός και μαθηματικός, γεννημένος στις 15 Μαΐου 1951-σήμερα 73 ετών), μαζί με τους David Gross και H. David Politzer, τιμήθηκε με το Νόμπελ Φυσικής το 2004 για την ανακάλυψη της «ασυμπτωτικής ελευθερίας» στη θεωρία της ισχυρής αλληλεπίδρασης. Τον Μάιο του 2022, επίσης του απονεμήθηκε το βραβείο *Templeton* για τις έρευνές του στους θεμελιώδεις νόμους της φύσης, που έχουν συμβάλλει στην κατανόησή μας για τις δυνάμεις που κυβερνούν το σύμπαν και αποκάλυψαν ένα εμπνευσμένο όραμα ενός κόσμου που ενσαρκώνει τη μαθηματική ομορφιά.

²Ο Richard Phillips Feynman (11 Μαΐου 1918 – 15 Φεβρουαρίου 1988) Αμερικανός θεωρητικός φυσικός, που το 1965, για τη συμβολή του στην ανάπτυξη της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής, έλαβε το Νόμπελ Φυσικής από κοινού με τον Julian Schwinger και τον Shinichiro Tomonaga

Στα διαγράμματα *Feynman*, οι τροχιές των σωματιδίων αναπαρίστανται με γραμμές, που έχουν φορά στο χώρο και το χρόνο, ενώ οι αλληλεπιδράσεις με κόμβους, δηλαδή με τομές μεταξύ των χωροχρονικών γραμμών.

Τα διαγράμματα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του λεγόμενου «πλάτους σκέδασης», μιας μαθηματικής ποσότητας που συνδέεται με την πιθανότητα να συμβεί μια σωματιδιακή σκέδαση στα πλαίσια της κβαντικής μηχανικής. (βλέπε [12], Κεφ.2.2, σελ.15 και στο [18], διαφάνειες 27-29) Οι γραμμές των διαγραμμάτων δεν αναπαριστούν τις πραγματικές τροχιές των σωματιδίων στο χώρο, αλλά συνδέονται μέσω συγκεκριμένων κανόνων με μαθηματικές ποσότητες, ο συνδυασμός των οποίων δίνει τη μαθηματική έκφραση του κβαντομηχανικού πλάτους σκέδασης.[13]

Ένα διάγραμμα *Feynman* έχει δύο άξονες, έναν χωρικό και έναν χρονικό. Ο χωρικός συνήθως επιλέγεται ο κατακόρυφος άξονας ενώ ο χρονικός επιλέγεται ο οριζόντιος.³ [Εικόνα 1 (αριστερά)] Τα σωματίδια σε αυτό, παριστάνονται ως γραμμές με φορά, ενώ οι αλληλεπιδράσεις με έναν κόμβο τουλάχιστον τριών γραμμών, δύο του σωματιδίου (μία όταν το σωματίδιο εισέρχεται και μία όταν εξέρχεται) και μία του σωματιδίου της αλληλεπιδράσεως. Τα σωματίδια-κβάντα των ηλεκτρασθενών αλληλεπιδράσεων, δηλαδή τα φωτόνια, και τα μποζόνια Z και W , συμβολίζονται με μία κυματιστή γραμμή, ενώ τα γλουόνια της ισχυρής αλληλεπίδρασης με ελατήρια. [Εικόνα 1 (αριστερά)]



Εικόνα 1: (Αριστερά) Ο χρονικός άξονας (t) είναι ο οριζόντιος, ενώ ο χωρικός (s) είναι ο κατακόρυφος άξονας. Τα σωματίδια, (εδώ ηλεκτρόνια) εκφράζονται με μία συνεχή γραμμή με φορά, το φωτόνιο εκφράζεται με την κυματιστή γαλάζια γραμμή και το γκλουόνιο (g) με την πράσινη σπείρα. (Δεξιά) Το φωτόνιο εκφράζεται με την κατακόρυφη κυματιστή γραμμή. Αν αξιώναμε ακρίβεια στο διάγραμμα, αυτό θα σήμαινε ότι το φωτόνιο μετακινείται χωρικά (κατακόρυφη μετατόπιση) σε μηδενικό χρόνο (μηδενική οριζόντια μετατόπιση), πράγμα που δεν ισχύει αφού η ταχύτητά του φωτός είναι πεπερασμένη.

Σ' αυτό το σημείο πρέπει να τονισθεί ότι τα διαγράμματα *Feynman* είναι βοηθητικά εργαλεία για αυτό πολλές φορές δεν απαιτείται ακρίβεια στον σχηματισμό τους. Έτσι στην Εικόνα 1 (δεξιά) στην αλληλεπίδραση ηλεκτρονίου-ηλεκτρονίου, το φω-

³Είναι δυνατόν να συναντήσουμε διαγράμματα και με την αντίθετη επιλογή αξόνων.

τόνιο παρουσιάζεται στο διάγραμμα με κατακόρυφη κυματιστή γραμμή. Αν αυτό (διάγραμμα) ήταν απολύτως ακριβές, θα σήμαινε ότι το φωτόνιο αυτό έχει άπειρη ταχύτητα, αφού σε μηδενικό χρόνο, μετακινήθηκε σε άλλο σημείο του χώρου (κατακόρυφη μετατόπιση σημαίνει μετατόπιση στον χώρο), αλλά προφανώς αυτό δεν μπορεί να γίνει λόγω της αρχής της σχετικότητας. Η επιλογή να σχηματιστεί το φωτόνιο κατακόρυφα, υποδηλώνει εδώ την πληροφορία ότι δεν ξέρουμε (δεν μας ενδιαφέρει κιόλας) ποιο ηλεκτρόνιο εξέπεμψε το φωτόνιο.

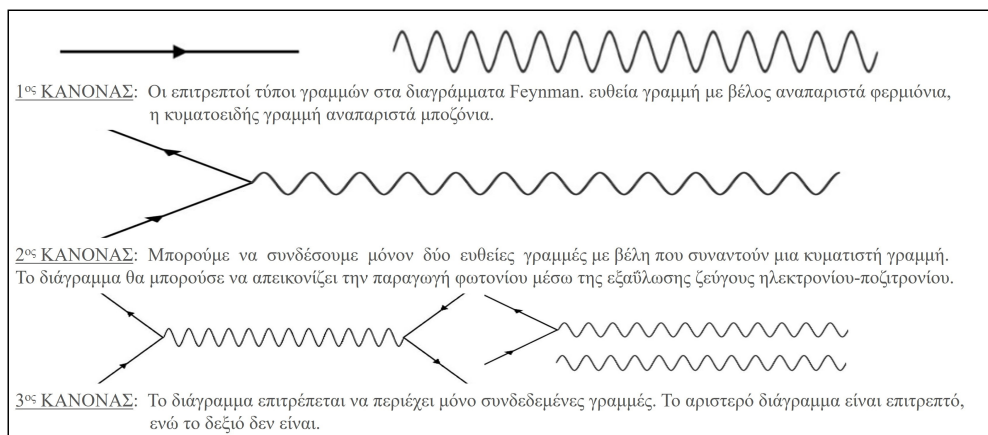
Για τη σχεδίαση των διαγραμμάτων *Feynman* ακολουθούμε τους παρακάτω κανόνες: (βλέπε και Εικόνα 2)[13]

(α) Μπορούμε να σχεδιάσουμε δύο ειδών γραμμές, είτε ευθύγραμμα τμήματα με βέλος, είτε κυματοειδείς γραμμές.

(β) Μπορούμε να συνδέσουμε αυτές τις γραμμές μόνον όταν δύο ευθείες γραμμές με βέλη να συναντούν μια κυματιστή γραμμή.

Προσοχή! Η κατεύθυνση του βέλους δεξιά δε σημαίνει ότι το σωματίδιο απομακρύνεται και αριστερά ότι πλησιάζει στον κόμβο (*vertex*-κορυφή). Φορά του βέλους δεξιά σημαίνει ότι πρόκειται για σωματίδιο ενώ αριστερά για αντισωματίδιο. Μπορούμε να έχουμε μόνο μία γραμμή με βέλος που πηγαίνει προς τον κόμβο και μία με βέλος που βγαίνει απ' αυτόν.

(γ) Το διάγραμμα επιτρέπεται να περιέχει μόνο συνδεδεμένες γραμμές.



Εικόνα 2: Οι κανόνες που διέπουν τα διαγράμματα *Feynman*. (Image Credit: N. Συρράκος.)

Τα διαγράμματα *Feynman* λοιπόν είναι ένα βασικό εργαλείο για να περιγράψουμε τις σχεδιάσεις των στοιχειωδών σωματιδίων, η πρόβλεψη των οποίων απαιτεί μια μακρά λίστα μαθηματικών μεθόδων. Με την εισαγωγή των διαγραμμάτων *Feynman* οι μαθηματικές μέθοδοι μετατράπηκαν σε μια διαδικασία διαισθητική, παρακάμπτοντας έτσι τις δύσκολες εξισώσεις. Ακολουθεί το πιο απλό παράδειγμα διαγράμματος:

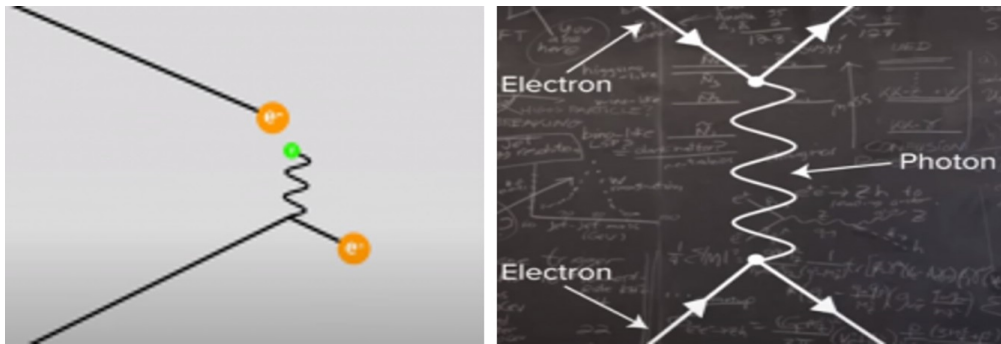
Ας σκεφτούμε την πιο απλή σύγκρουση σωματιδίων, αυτήν που δύο ηλεκτρόνια πλησιάζουν το ένα το άλλο.

Στην κλασική φυσική θα περιγράφαμε την αλληλεπίδραση αυτή με βάση το ηλεκτρικό πεδίο, τη διατήρηση της ενέργειας, κλπ. Εκτιμήσεις πάνω σε εξισώσεις όπως:

$$F = m_e \gamma, \quad F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}, \quad \frac{1}{2} m_e u^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad \text{και} \quad W = \int F, dr$$

θα αρκούσαν για να περιγράψουν τη σύγκρουση.

Στην κβαντική φυσική όμως δεν αρκεί να θεωρήσουμε ότι απλώς τα ηλεκτρόνια πλησιάζουν το ένα το άλλο, αλλά πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και τα φωτόνια που δημιουργούνται. (στην πραγματικότητα μια μορφή φωτονίων συνθέτουν το ηλεκτρικό πεδίο). Καθώς πλησιάζουν μεταξύ τους τα ηλεκτρόνια, ένα από αυτά εκπέμπει ένα φωτόνιο το οποίο (φωτόνιο) στη συνέχεια χτυπά το άλλο ηλεκτρόνιο. Μια αναπαράσταση αυτής της ανταλλαγής φωτονίου ανάμεσα στα ηλεκτρόνια, βλέπουμε στην Εικόνα 3 (αριστερά). Τα δύο ηλεκτρόνια σκεδάζονται (ουσιαστικά χωρίς να συγκρουστούν) υπό την τυπική φυσική ενέργειας-ορμής και παράγεται και ένα φωτόνιο (Εικόνα 3 δεξιά).



Εικόνα 3: (Αριστερά) Καθώς πλησιάζουν μεταξύ τους τα ηλεκτρόνια, ένα από αυτά εκπέμπει ένα φωτόνιο, το οποίο στη συνέχεια χτυπά το άλλο ηλεκτρόνιο. (Δεξιά) Το διάγραμμα *Feynman* του παραδείγματος της σκέδασης ηλεκτρονίων.

Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι το διάγραμμα *Feynman* της Εικόνας 3 (δεξιά) δεν είναι το μοναδικό που περιγράφει το φαινόμενο.

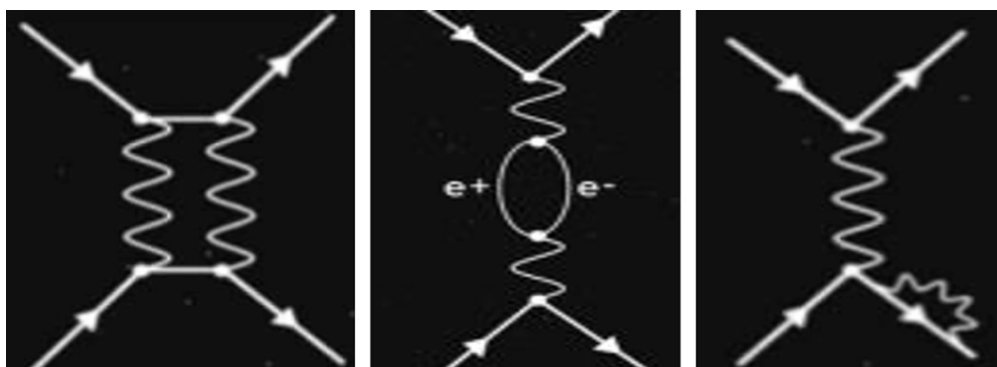
Κάτι άλλο που θα μπορούσε να συμβεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας θα ήταν η εκπομπή ενός επιπλέον φωτονίου από κάποιο ηλεκτρόνιο πριν ή μετά τη σκέδαση. (Εικόνα 4 αριστερά)

Επίσης θα μπορούσε το φωτόνιο, μετά την εκπομπή του από το ηλεκτρόνιο, να μετατραπεί σε ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου, και μετά να μετατραπεί ξανά σε φωτόνιο και να ολοκληρώσει τη σκέδαση χτυπώντας το άλλο ηλεκτρόνιο. (Εικόνα 4 κέντρο)

Τέλος το ένα από τα δύο προς σκέδαση ηλεκτρόνια πριν την εκπομπή του φωτονίου να εκπέμψει ένα άλλο φωτόνιο το οποίο στη συνέχεια θα επαναπορροφήσει.

Ή να συμβεί κάτι ακόμη πιο τρελό, με πολλαπλά φωτόνια να ανταλλάσσονται και μερικά απ' αυτά να δημιουργούν άλλα σωματίδια και τα φωτόνια να αλληλεπιδρούν με τα προσωρινά σωματίδια.⁴ (Εικόνα 4 δεξιά)

Υπάρχουν λοιπόν πολλές πιθανές δυνατότητες (άρα και διαγράμματα) κατά τη σκέδαση μεταξύ δύο ηλεκτρονίων. Κάθε μια από αυτές έχει και την αντίστοιχη πιθανότητα να συμβεί. Τελικά όμως μόνο ένα, το πιο απλό διάγραμμα επικρατεί, αυτό με τις περισσότερες πιθανότητες να συμβεί.⁵



Εικόνα 4: (Αριστερά) Το πρώτο ηλεκτρόνιο εκπέμπει και δεύτερο φωτόνιο που απορροφάται από το άλλο ηλεκτρόνιο. (Κέντρο) Το φωτόνιο μετά την εκπομπή του από το πρώτο ηλεκτρόνιο, μετατρέπεται προσωρινά σε ένα ζεύγος ποζιτρονίου-ηλεκτρονίου, το οποίο αυτόματα ξανασυγχωνεύεται σε φωτόνιο που συνεχίζει την πορεία του προς τη σύγκρουση με το δεύτερο ηλεκτρόνιο. (Δεξιά) Το ένα από τα δύο προς σκέδαση ηλεκτρόνια εκπέμπει πριν την εκπομπή του φωτονίου (ή μετά απ' αυτήν-στην εικόνα μας μετά την εκπομπή-) ένα άλλο φωτόνιο, το οποίο στη συνέχεια επαναπορροφάται. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Στα διαγράμματα *Feynman* της εικόνας μας ο χρονικός άξονας είναι οριζόντιος.

Η εικόνα του κάθε διαγράμματος *Feynman*, όπως έχουμε πει, αντιστοιχεί σε μία «εξίσωση». Κάθε σύμβολο στο διάγραμμα, αντιστοιχεί και σε ένα κομμάτι της εξίσωσης.

Στον πίνακα της Εικόνας 5 βρίσκονται οι αντιστοιχίες των συμβόλων του διαγράμματος με μαθηματικούς όρους στην αντίστοιχη εξίσωση.

Συγκεκριμένα στο διάγραμμα *Feynman* της Εικόνας 5 υπάρχουν δύο εισερχόμενα

⁴Πράγματι όλα αυτά θα μπορούσαν να συμβούν, έχει όμως παρατηρηθεί και αποδειχθεί ότι κάθε φορά που ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα φορτισμένο σωματίδιο, η πιθανότητα να συμβεί αυτό είναι όλο και μικρότερη. Συγκεκριμένα κάθε μεμονωμένη εκπομπή φωτονίου μειώνει την πιθανότητα στο 1%, ενώ δύο εκπεμπόμενα φωτόνια μειώνουν την πιθανότητα στο 1% του 1% (δηλαδή στο 0,01%).

⁵Τα άλλα διαγράμματα εξετάζονται μόνο ως μαθηματικά πιθανά και για τη μελέτη τους απαιτούνται πάρα πολύ ακριβείς υπολογισμοί.

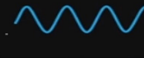
σωματίδια (πράσινη ευθεία γραμμή με βέλος), ένα παραγόμενο φωτόνιο (γαλάζια κυματιστή γραμμή και δύο εξερχόμενα σωματίδια (κόκκινη ευθεία γραμμή με βέλος). Ας δούμε τώρα τους μαθηματικούς όρους στους οποίους αντιστοιχεί κάθε σύμβολο του διαγράμματος.

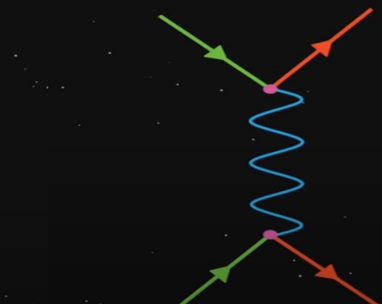
- Το εισερχόμενο (πράσινο) βέλος αντιστοιχεί στο γράμμα (I), το οποίο στην εξίσωση είναι χρωματισμένο πράσινο για λόγους αντιστοιχίας στο διάγραμμα. Ο κάτω δείκτης 1 δηλώνει το πρώτο (επάνω) εισερχόμενο, ενώ ο δείκτης 2 το δεύτερο (κάτω) εισερχόμενο σωματίδιο.

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ο όρος αυτός για ένα φορτισμένο φερμιόνιο είναι:

$$I_1 = \frac{i(p+m)}{p^2-m^2} [14]$$

- Το εξερχόμενο (κόκκινο) βέλος αντιστοιχεί στο γράμμα (O), το οποίο στην εξίσωση είναι χρωματισμένο κόκκινο για λόγους αντιστοιχίας στο διάγραμμα. Κι εδώ ο δείκτης 1 δηλώνει το πάνω, ενώ ο δείκτης 2 το κάτω εξερχόμενο σωματίδιο.

Object	Diagram	Symbol
Incoming particle		I
Outgoing particle		O
Photon		$\frac{-ig_{\mu\nu}}{p^2}$
Vertex		$ie\gamma^{\mu \text{ or } \nu}$

$$(O_1 ie\gamma^\mu I_1) \left(\frac{-ig_{\mu\nu}}{p^2} \right) (O_2 ie\gamma^\nu I_2)$$


Εικόνα 5: (Αριστερά) Ο πίνακας-λεξικό για την μαθηματική αποκρυπτογράφηση ενός διαγράμματος *Feynman*. (Δεξιά) Η εξίσωση που αντιστοιχεί στο κάτω διάγραμμα

- Η μωβ κορυφή (*vertex*), η οποία δηλώνει το γεγονός της αλληλεπιδράσεως, αντιστοιχεί στον επίσης χρωματισμένο μωβ όρο ($ie\gamma^{\mu \text{ or } \nu}$) της εξίσωσσεως. Ο άνω δείκτης μ ή ν δεν αποτελεί δύναμη αλλά είναι ένας αθροιστικός δείκτης ο οποίος δρα μαζί με τους δείκτες $\mu\nu$ του όρου g που δηλώνει το σπιν του φωτονίου όπως θα δούμε παρακάτω.

- Η κυματιστή γαλάζια γραμμή, η οποία δηλώνει φωτόνιο, αντιστοιχεί στον χρωματισμένο επίσης γαλάζιο όρο $\left(\frac{-ig_{\mu\nu}}{p^2} \right)$. Οι κάτω δείκτες μ, ν του g είναι αθροιστικοί δείκτες, όλων σχετικών υποατομικών σπιν για το φωτόνιο. Ο όρος p είναι ο γνωστός όρος της ορμής και εδώ δηλώνει την ενέργεια του φωτονίου.

Η εξίσωση λοιπόν στην οποία αντιστοιχεί το διάγραμμα της Εικ. 5 είναι η ακόλουθη:

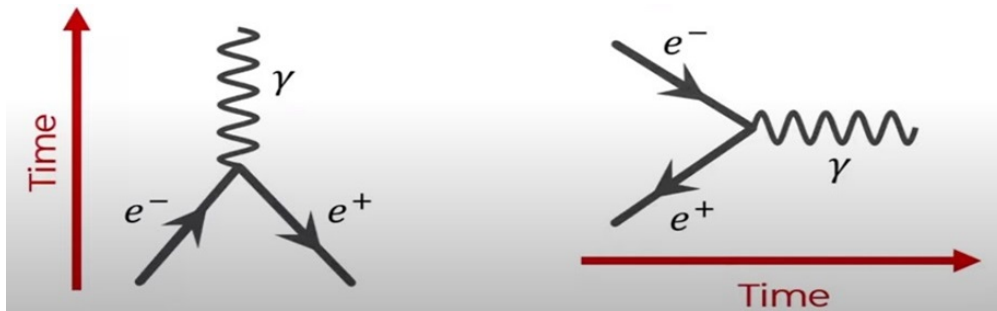
$$(O_1 i e \gamma^\mu I_1) \left(\frac{-i g_{\mu\nu}}{p^2} \right) (O_2 i e \gamma^\nu I_2)$$

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Δεν θα πρέπει να λησμονούμε στη μαθηματική αντιστοίχιση, ότι στις κορυφές (*vertex*) ισχύει πάντα η διατήρηση, ενέργειας, ορμής και φορτίου.

Θα επιστρέψουμε τώρα στην εικονική αναπαράσταση των διαγραμμάτων (που αποτελεί και το πλεονέκτημά τους) για να δούμε με παραδείγματα πως λειτουργούν, δηλαδή πως εκφράζουν τις αλληλεπιδράσεις στο χώρο της σωματιδιακής φυσικής.

Σύγκρουση Ηλεκτρονίου-Ποζιτρονίου (Εικόνα 6)

Θα ξεκινήσουμε με το παράδειγμα της σύγκρουσης ηλεκτρονίου με ποζιτρόνιο (αντι-ηλεκτρόνιο) και την εξαύλωσή τους με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου.



Εικόνα 6: Ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο (αντιηλεκτρόνιο) συγκρούονται και εξαυλώνονται εκπέμποντας ένα φωτόνιο. (Αριστερά) Ο χρόνος διατρέχει τον κατακόρυφο άξονα με θετική φορά την από κάτω προς τα επάνω. (Δεξιά) Ο χρόνος διατρέχει τον οριζόντιο άξονα με θετική φορά την από αριστερά προς δεξιά.

Τα δύο σχήματα της Εικόνας 6 αναπαριστούν το ίδιο γεγονός με την μόνη διαφορά να βρίσκεται στην επιλογή του χρονικού άξονα. Στην διερεύνηση που ακολουθεί θα αναφερόμαστε στο δεξιά σχήμα με τον χρονικό άξονα οριζόντια. Εδώ παρατηρούμε ότι ο χρόνος κυλά από αριστερά προς τα δεξιά. Και τα δύο σωματίδια κινούνται χωρικά με κατεύθυνση σύγκρουσης η οποία σύγκρουση θα γίνει στην κορυφή (*vertex*), το δε βέλος του ποζιτρονίου (e^+), που έχει αντίθετη φορά από εκείνη του ηλεκτρονίου (e^-), δεν σημαίνει ότι το ποζιτρόνιο απομακρύνεται από την κορυφή, αλλά ότι είναι αντισωματίδιο (ο χρόνος του είναι εκείνος που έχει την αντίθετη κατεύθυνση). Τέλος το αποτέλεσμα της σύγκρουσης θα είναι ένα φωτόνιο (γ).[16]

Ας δούμε αν διατηρούνται ενέργεια, φορτίο και σπιν στην κορυφή.

-Πριν τη σύγκρουση η μάζα ηρεμίας του ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου ήταν ($m_{e^-} + m_{e^+} = -0,511\text{MeV}/c^2 + 0,511\text{MeV}/c^2 = 0$) (βλέπε Εικόνα 15 και [15])

ενώ η μάζα του φωτονίου (του παραγώγου της σύγκρουσης) είναι επίσης μηδέν. (βλέπε Εικόνα 15)

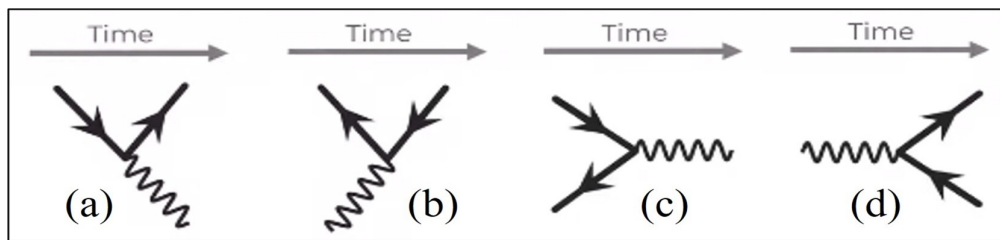
-Το άθροισμα του φορτίου των σωματιδίων πριν τη σύγκρουση ήταν ($q_{e-} + q_{e+} = -1 + 1 = 0$), όπως μηδέν είναι και το φορτίο του φωτονίου (του παραγώγου της σύγκρουσης).

-Το άθροισμα σπιν των σωματιδίων πριν τη σύγκρουση ήταν ($S_{e-} + S_{e+} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$) [θυμίζουμε ότι το σπιν των φερμιονίων είναι $\frac{1}{2}$] (Εικόνα 15) και όπως βλέπουμε πάλι στην Εικόνα 15 το σπιν του φωτονίου είναι επίσης 1.

Επομένως στην κορυφή του διαγράμματος της Εικόνας 6, διατηρούνται **μάζα** (άρα και ορμή) **φορτίο** και **σπιν**. Επίσης ικανοποιούνται οι κανόνες των διαγραμμάτων και ο κανόνας ότι: σε μία κορυφή αν εισέρχεται βέλος θα πρέπει και να εξέρχεται βέλος.

Διαγράμματα εκπομπής και απορρόφησης φωτονίου. (Εικόνα 7)

Εδώ απεικονίζονται 4 διαφορετικά διαγράμματα, τα οποία παρότι φαίνονται σχεδόν ίδια παριστάνουν διαφορετικές αλληλεπιδράσεις. Για να τις ξεχωρίσουμε είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε από τι ξεκινάμε και σε τι καταλήγουμε.



Εικόνα 7: (a) Ηλεκτρόνιο εκπέμπει ένα φωτόνιο και συνεχίζει. (b) Ένα ποζιτρόνιο απορροφά ένα φωτόνιο και συνεχίζει. (c) Ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο εξουδετερώνονται σε ένα φωτόνιο. (d) Ένα φωτόνιο παράγει ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου.

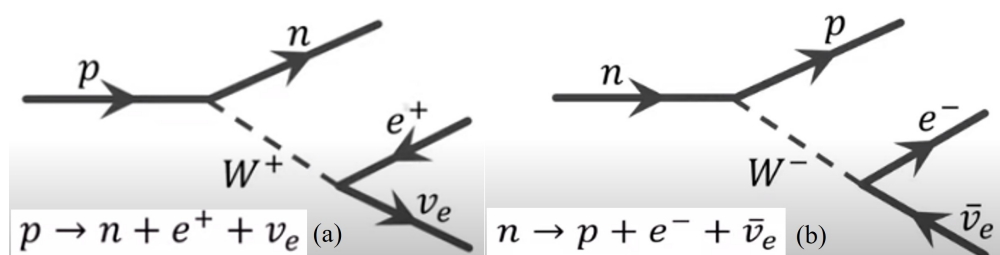
- Στο διάγραμμα (a) ένα ηλεκτρόνιο εκπέμπει ένα φωτόνιο και συνεχίζει. Μελετώντας το διάγραμμα όπως κάναμε στο παράδειγμα της Εικ. 6, παρατηρούμε ότι διατηρούνται ορμή (μάζα ηρεμίας), φορτίο και σπιν. Πράγματι το αρχικό ηλεκτρόνιο έχει την ίδια μάζα ηρεμίας με τα «παράγωγά» του (φωτόνιο+ηλεκτρόνιο) και το ίδιο φορτίο. Διατηρείται και ο κανόνας της εισόδου και της εξόδου βέλους στην κορυφή.

- Στο διάγραμμα (b) ένα ποζιτρόνιο απορροφά ένα φωτόνιο και συνεχίζει (εξέρχεται από τον κόμβο ως ποζιτρόνιο-χωρίς φωτόνιο). Σημειώνουμε πάλι ότι η αριστερή φορά του βέλους δεν σημαίνει ότι το δεξιό (παράγωγο ποζιτρόνιο) κινείται προς τον κόμβο, αφού χρονικά εξέρχεται απ' αυτόν, αλλά απλώς ότι πρόκειται για αντιηλεκτρόνιο (ποζιτρόνιο). Ομοίως και η αριστερή φορά του αριστερού βέλους δηλώνει ότι πρόκειται για ποζιτρόνιο και όχι ότι το σωματίδιο απομακρύνεται από τον κόμβο.

- Στο διάγραμμα (c) ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο εξουδετερώνονται σε ένα φωτόνιο. Είναι ακριβώς η περίπτωση της Εικόνας 6.
- Στο διάγραμμα (d) ένα φωτόνιο «αυθόρμητα» παράγει ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Εδώ χρονικά το φωτόνιο (πριν τον κόμβο) εξελίσσεται σε ηλεκτρόνιο και ποζιτρόνιο μετά τον κόμβο διατηρώντας μάζα ηρεμίας, φορτίο και σπιν.[16]

Βήτα θετική διάσπαση. (Εικόνα 8α)

Θα δώσουμε τώρα και ένα παράδειγμα διαγράμματος *Feynman* που απεικονίζει μια ολοκληρωμένη πυρηνική αντίδραση (π.χ την βήτα θετική διάσπαση).[16]



Εικόνα 8: (α) Η βήτα θετική διάσπαση. (β) Η βήτα αρνητική διάσπαση.

Κατά τη βήτα θετική διάσπαση ένα πρωτόνιο (p) μετατρέπεται σε νετρόνιο (n) και στη συνέχεια παράγει ένα ποζιτρόνιο (e^+) και ένα νεutrίνο (ν_e).

Στο διάγραμμα της εικόνας 8α στην πρώτη κορυφή διατηρείται ο κανόνας σύμφωνα με τον οποίον θα πρέπει να έχουμε ένα βέλος εισερχόμενο και ένα βέλος εξερχόμενο από αυτήν. Ταυτόχρονα όμως παίρνουμε και ένα είδος μποζονίου,⁶ το οποίο δεν φαίνεται στην πυρηνική αντίδραση, βοηθά όμως στην ολοκλήρωσή της ως σωματίδιο φορέας, δηλαδή βοηθά στη δημιουργία του ποζιτρονίου και του νετρίνο. Έτσι το διάγραμμα ολοκληρώνεται με δύο ακόμα βέλη (στη δεύτερη κορυφή που σχηματίζεται στην άλλη άκρη της διακεκομμένης γραμμής του μποζονίου W^+) το βέλος του ποζιτρονίου e^+ που (ως αντισωματίδιο) είναι στραμμένο προς τα πίσω στο χρόνο και το βέλος του νετρίνο ν_e που έχει τη θετική φορά του χρόνου (ως σωματίδιο).

Ας ελέγξουμε τώρα κάποια πράγματα στις διασταυρώσεις στο διάγραμμα της εικόνας 8α.

Κατ' αρχάς ο κανόνας της διασταύρωσης ικανοποιείται, αφού για κάθε βέλος που μπαίνει υπάρχει και ένα βέλος που βγαίνει και στις δύο κορυφές.

Ελέγχοντας το φορτίο στην πρώτη κορυφή, το πρωτόνιο p έχει θετικό φορτίο πριν την κορυφή και τα δύο σωματίδια (νετρόνιο n και μποζόνιο W^+) έχουν επίσης ένα θετικό φορτίο μετά την κορυφή, οπότε διατηρείται η ισορροπία φορτίου. Ομοίως δια-

⁶Τα μποζόνια, που είναι φορείς δυνάμεων, στα διαγράμματα *Feynman* παριστάνονται με μια διακεκομμένη γραμμή.

τηρείται η ισορροπία φορτίου και στη δεύτερη κορυφή, αφού πριν την κορυφή έχουμε ένα θετικό φορτίο (αυτό του μποζονίου W^+) ομοίως και μετά την κορυφή το θετικό φορτίο του ποζιτρονίου (το νεutrino δεν έχει φορτίο).⁷

Τέλος στην πρώτη κορυφή του διαγράμματος διατηρείται και ο αριθμός των βαρυονίων, καθώς το ένα βαρυόνιο (πρωτόνιο) πριν την κορυφή δίνει τη θέση του σε ένα άλλο βαρυόνιο (νεutrino) μετά την κορυφή.

Βήτα αρνητική διάσπαση. (Εικόνα 8b)

Κατά τη βήτα αρνητική διάσπαση ένα νεutrino (n) μετατρέπεται σε πρωτόνιο (p) και στη συνέχεια παράγει ένα ηλεκτρόνιο (e^-) και ένα αντineutrino ($\bar{\nu}_e$).

Όπως και στην Βήτα θετική διάσπαση, έτσι κι εδώ παράγεται ένα ενδιάμεσο μποζόνιο φορέας W με αρνητικό αυτή τη φορά φορτίο για δύο λόγους. Ο πρώτος για να εξουδετερώσει το θετικό φορτίο του πρωτονίου που παράγεται μετά την κορυφή (διάσπαση του νεutrionίου) και να διατηρηθεί η ισορροπία φορτίου (συνολικό φορτίο μηδέν) πριν και μετά την κορυφή. Ο δεύτερος λόγος που το μποζόνιο W πρέπει να είναι αρνητικά φορτισμένο είναι για να δημιουργήσει το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόνιο μετά τη δεύτερη κορυφή (και να διατηρηθεί έτσι η ισορροπία φορτίου πριν και μετά την δεύτερη κορυφή (θυμίζουμε ότι το αντineutrino ($\bar{\nu}_e$) δεν έχει φορτίο)). Ικανοποιείται λοιπόν και στην Βήτα αρνητική διάσπαση ο κανόνας της διατήρησης φορτίου, ή με άλλα λόγια επιβάλλεται η παραγωγή του αρνητικού μποζονίου W^- για να ικανοποιείται ο κανόνας αυτός. Φανερόν είναι ότι και ο κανόνας της διασυντήρησης ικανοποιείται και στις δύο κορυφές, αφού όσα βέλη εισέρχονται τόσα και εξέρχονται σ' αυτές (εδώ να επισημάνουμε το στραμμένο πίσω στο χρόνο βέλος του αντineutrino, ως αντισωματίδιο). Αλλά και αριθμός των βαρυονίων διατηρείται στο διάγραμμα της Βήτα αρνητικής διάσπασης (βλέπε Εικόνα 8b).

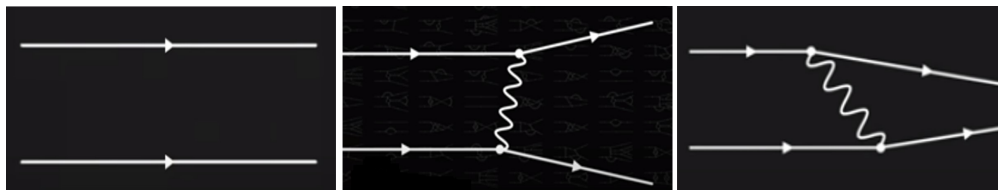
Περαιτέρω ανάλυση των διαγραμμάτων από την Κβαντική Ηλεκτροδυναμική⁸

Η κβαντική ηλεκτροδυναμική, για να περιγράψει πώς τα σωματίδια εξελίσσονται κβαντικά, επιτρέπει στα δύο πεδία (κβαντικό και ηλεκτρομαγνητικό) να αλληλεπιδρούν χρησιμοποιώντας σ' ένα διάγραμμα *Feynman* κορυφές αλληλεπιδράσεως στις οποίες συμβάλλουν ή αποκλίνουν γραμμές με βέλη (σωματίδια), διακεκομμένες (ενδιάμεσα μποζόνια, φορείς) και κυματοειδείς γραμμές (φωτόνια). Ανάλογα με τον προσανατολισμό τους σε σχέση με τον χρόνο, αυτά τα διαγράμματα περιγράφουν και διαφορετική

⁷ Στην πραγματικότητα το φορτίο του μποζονίου το επιβάλλει ο κανόνας της διατήρησης φορτίου στις κορυφές-δεν «μαντεύουμε» πρώτα το μποζόνιο και έπειτα επαληθεύουμε τον κανόνα-έτσι το μποζόνιο W στην βήτα θετική διάσπαση επιβάλλεται να είναι θετικό για να ισορροπήσει το θετικό φορτίο του πρωτονίου πριν την πρώτη κορυφή. Για τον ίδιο λόγο και στη δεύτερη κορυφή το μποζόνιο W πρέπει να είναι θετικό για να εξισορροπεί το θετικό φορτίο του ποζιτρονίου μετά την κορυφή.

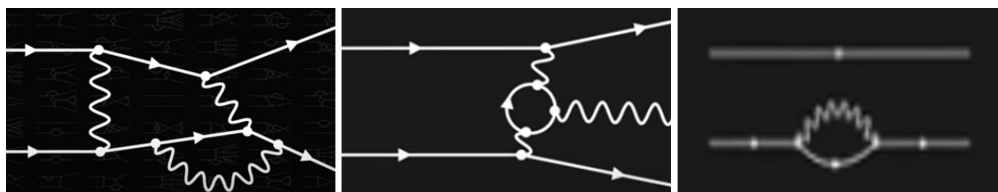
⁸ Στη φυσική, η κβαντική ηλεκτροδυναμική (QED - Quantum electrodynamics) είναι η σχετικιστική κβαντική θεωρία πεδίου της ηλεκτροδυναμικής. Στην ουσία, περιγράφει πώς το φως και η ύλη αλληλεπιδρούν και είναι η πρώτη θεωρία, όπου επιτυγχάνεται πλήρης συμφωνία μεταξύ κβαντομηχανικής και ειδικής θεωρίας της σχετικότητας.

διαδικασία. Για παράδειγμα ένα ηλεκτρόνιο εκπέμπει φωτόνιο, ένα ποζιτρόνιο απορροφά ένα φωτόνιο, ένα ποζιτρόνιο κι ένα ηλεκτρόνιο εξουδετερώνονται σε ένα φωτόνιο ή ένα φωτόνιο δημιουργεί ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου κ.λ.π (βλέπε εικόνα 7).



Εικόνα 9: (Αριστερά) Τα δύο ηλεκτρόνια δεν αλληλοεπηρεάζονται και συνεχίζουν σε παράλληλες γραμμές στο διάγραμμα Feynman. (Κέντρο-Δεξιά) Τα ηλεκτρόνια ανταλλάσσουν ένα φωτόνιο που λειτουργεί ως «αγγελιοφόρος», μεταφέροντας μέρος της ορμής του πάνω ηλεκτρονίου στο κάτω.

Όπως έχουμε πει, όλες αυτές οι αλληλεπιδράσεις επιτρέπονται (δηλαδή είναι δυνατά όλα τα διαγράμματα της εικόνας 7) υπό τον όρο: σε κάθε κορυφή η συνολική ορμή, τα σωματίδια στον χώρο και στον χρόνο, και το συνολικό φορτίο, να διατηρούνται μετά την αλληλεπίδραση (κορυφή). Και αφού είναι επιτρεπτές όλες αυτές οι αλληλεπιδράσεις, μπορούμε να φανταστούμε μια ολόκληρη ποικιλία διαφορετικών «σεναρίων», από το απλούστερο τέτοιο σενάριο: με τα δύο σωματίδια (ηλεκτρόνια) να συνεχίζουν σε παράλληλες γραμμές, σ' ένα άλλο πιο ενδιαφέρον (και πιο σύνθετο) σενάριο: με τα δύο ηλεκτρόνια να ανταλλάσσουν ένα φωτόνιο που λειτουργεί ως «αγγελιοφόρος» και μεταφέρει μέρος της ορμής του πρώτου ηλεκτρονίου στο δεύτερο⁹ (Εικόνα 9).



Εικόνα 10: (Αριστερά) Σύνθετο διάγραμμα με περισσότερες κορυφές και δημιουργία περισσότερων φωτονίων. (Κέντρο) «Βρόγχος»: αυθόρμητη δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου και εξαΰλωσή του εκ νέου σε φωτόνιο. (Δεξιά) Αυθόρμητη δημιουργία και απορρόφηση φωτονίου.

Τέλος ακόμη πιο σύνθετα «σενάρια» είναι δυνατόν να υπάρξουν, με περισσότερα από ένα σημεία αλληλεπιδράσεων (κορυφές) και με τα ηλεκτρόνια να μπορούν να

⁹Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα φωτόνια με την ιδιότητά τους ως κύματα μπορούν να μεταφέρουν μέρος της ορμής τους σε σωματίδια κατά μήκος μιας κατεύθυνσης, παρόλο που φέρουν ορμή διαφορετικά προσανατολισμένη. Με αυτόν τον τρόπο σε κάποια «σενάρια» η ανταλλαγή αυτή μπορεί να φέρει τα ηλεκτρόνια πιο κοντά και σε άλλα «σενάρια» να τα απομακρύνει.

ανταλλάσσουν περισσότερα φωτόνια, σε διαφορετικά σημεία και σε διαφορετικούς χρόνους. (Εικόνα 10 Αριστερά)

Άλλες φορές ένα φωτόνιο μετατρέπεται σε ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου το οποίο σχεδόν ακαριαία να εκμηδενίζεται για να σχηματιστεί εκ νέου άλλο φωτόνιο¹⁰ (Εικόνα 10 Κέντρο) ή ένα ηλεκτρόνιο να εκπέμπει αυθόρμητα ένα φωτόνιο και στη συνέχεια αμέσως να το επαναπορροφά. (Εικόνα 10 Δεξιά)

Εφόσον διατηρείται η συνολική ορμή και το φορτίο, όλα αυτά τα πιθανά «σενάρια» είναι επιτρεπτά να προκύψουν, με διαφορετικές για το καθένα πιθανότητες.

Αν μπορούσαμε να «παγώσουμε» τον χρόνο σε μια συγκεκριμένη στιγμή (ενδιάμεση της αρχικής και τελικής καταστάσεως των δύο ηλεκτρονίων), θα ήταν δυνατόν να εμφανιστούν περισσότερα και διαφορετικά σωματίδια (εν δυνάμει ή οιωνεί σωματίδια) τα οποία εμφανίζονται μεταξύ των δύο καταστάσεων ως δημιουργήματα αυτών των υπερθέσεων των διαφόρων «σεναρίων» (βλέπε Εικόνα 11).



Εικόνα 11: Δύο παγωμένες χρονικές στιγμές ενός σεναρίου του διαγράμματος αλληλεπίδρασης δύο ηλεκτρονίων. Στην κάθεμία από τις παγωμένες στιγμές φαίνεται να έχουν δημιουργηθεί ενδιάμεσα σωματίδια (πιο έντονα λαμπερά στις εικόνες) τα οποία όμως δεν είναι πραγματικά αλλά, όπως συνηθίζουμε να τα ονομάζουμε: «εν δυνάμει» ή «οιωνεί» σωματίδια.

Τα σωματίδια αυτά δημιουργούνται και εξαφανίζονται αυτόματα σε κάθε «σενάριο», όμως ουσιαστικά δεν είναι υπαρκτά αλλά αποτέλεσμα στατιστικών πιθανοτήτων.

Καθένα από τα «σενάρια» αυτά, τα οποία ξεκινούν από μία αρχική και καταλήγουν σε μία τελική κατάσταση, αποτελούν ουσιαστικά και ένα διάγραμμα *Feynman*.

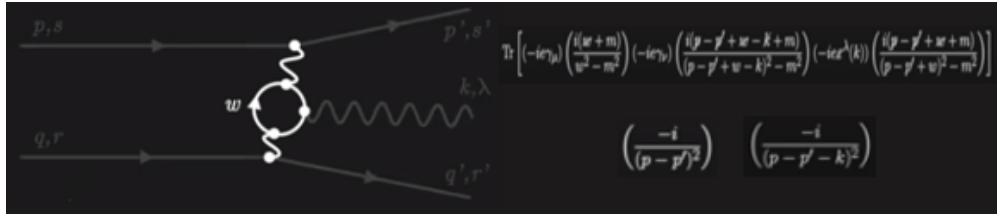
Έτσι τα διαγράμματα *Feynman* δεν είναι άλλο από μια **υπέρθωση**, μια **επαλληλία**¹¹, [11] διαφορετικών «σεναρίων» που περιγράφουν μια αλληλεπίδραση, της οποίας η τελική μορφή προκύπτει από την πιθανότητα να συμβεί το κάθε «σενάριο».

Εκτός από τα αρχικά και τελικά σωματίδια (εδώ ηλεκτρόνια), τα οποία είναι πραγματικά και ανιχνεύονται, υπάρχουν και τα ενδιάμεσα σωματίδια που λειτουργούν ως «αγγελιοφόροι» ενέργειας ή ορμής, είναι εικονικά και δεν μπορούν να ανιχνευτούν διότι ο χρόνος που διαρκούν είναι μη παρατηρήσιμος.

¹⁰Η διαδικασία αυτή ονομάζεται «βρόγχος».

¹¹Για την επαλληλία-υπέρθωση κβαντομηχανικών καταστάσεων βλέπε στο κεφάλαιο «Χρονοεξαρτημένη εξίσωση *Schrodinger*», σελ.143-146 του [11] της βιβλιογραφίας

Μαθηματικώς κάθε τέτοιο «σενάριο», κάθε πιθανό διάγραμμα, αντιστοιχεί σε μια πολύπλοκη εξίσωση και τα εικονικά σωματίδια είναι απλώς ένας τρόπος να ερμηνεύσουμε διαισθητικά ορισμένα μέρη αυτών των εξισώσεων. (Εικόνα 12)



Εικόνα 12: Τα εικονικά σωματίδια και φωτόνια που παράγονται στο διάγραμμα και παριστάνονται πιο έντονα λευκά στην εικόνα αντιστοιχούν σε πολύπλοκες εξισώσεις, στην επάνω εξίσωση αντιστοιχεί ο βρόγχος και στις δύο κάτω τα δύο φωτόνια πριν και μετά το βρόγχο.

Αυτό όμως σημαίνει πως, αν και δεν είναι παρά μόνον ενδιάμεσοι που προκύπτουν από το μαθηματικό μοντέλο των εξισώσεων, τα εικονικά σωματίδια είναι απαραίτητο να τα λαμβάνουμε υπ' όψιν επειδή καταδεικνύουν τον τρόπο με τον οποίο διεκπεραιώνονται οι αλληλεπιδράσεις και προκύπτουν τα τελικά σωματίδια.

Συνοψίζοντας ένα διάγραμμα *Feynman* δεν είναι άλλο από το αποτέλεσμα των πιθανοτήτων μιας λίστας επιμέρους τέτοιων διαγραμμάτων με διαφορετική πιθανότητα το καθένα.

Άλλα είναι απλά και περιέχουν λίγες αλληλεπιδράσεις, και άλλα είναι πιο πολύπλοκα και περιέχουν περισσότερες αλληλεπιδράσεις.

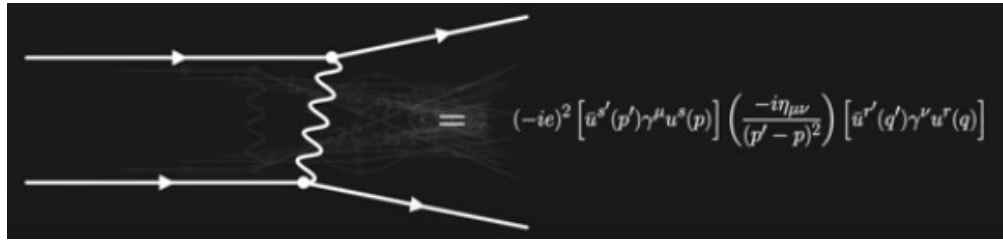
Αυτό θα μπορούσε να ισχυριστεί κανείς ότι δεν βοηθάει πολύ στην πρόβλεψη της πραγματικής συμπεριφοράς των σωματιδίων, αφού είναι δύσκολο να επιλέξουμε πιο από τα «σενάρια» συμβαίνει πραγματικά. Μπορεί να φαντάζει αντιφατικό αλλά αυτό ακριβώς είναι που κάνει την κβαντική θεωρία τόσο ισχυρή!

Με την «αποκρυπτογράφηση» και κατανόηση της Κβαντομηχανικής, κατανοήσαμε ταυτόχρονα ότι το Σύμπαν δεν ακολουθεί μόνον ένα από αυτά τα «σενάρια».

Αντιθέτως εξελίσσεται ταυτόχρονα σύμφωνα με όλα τα πιθανά «σενάρια» και με βάση την πιθανότητα που αντιστοιχεί στο καθένα από αυτά. Έτσι ανάμεσα στην αρχική και τελική κατάσταση, όλα τα «σενάρια» συμβαίνουν ταυτόχρονα και παράλληλα, ως υπέρθεση (βλέπε [11]) κάθε «σεναρίου», με την πιθανότητά του να συμβεί.

Στην κβαντική ηλεκτροδυναμική κάθε διάγραμμα *Feynman* αντιστοιχεί σε μία εξίσωση που μας επιτρέπει να υπολογίσουμε έναν αριθμό για κάθε «σενάριο», έναν αριθμό που δηλώνει πόσο πιθανό είναι να συμβεί το σενάριο αυτό.¹² (βλέπε Εικόνα 13)

¹²Τα πιο σύνθετα «σενάρια» αντιπροσωπεύουν, μικρότερο αριθμό και συμμετέχουν στη διαμόρφωση της τελικής κατάστασης με μικρότερες πιθανότητες. Σε προσέγγιση μπορούμε να παραλείψουμε

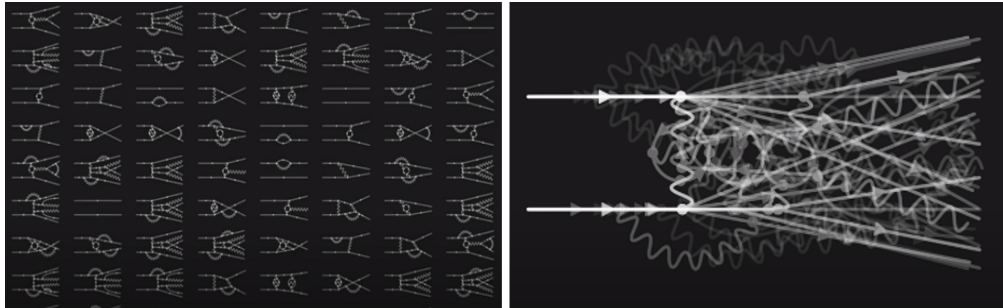


Εικόνα 13: Κάθε διάγραμμα *Feynman* αντιστοιχεί σε μία εξίσωση που μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την πιθανότητα να συμβεί το συγκεκριμένο «σενάριο».

Η πιθανολογική σύνθεση όλων αυτών των πιθανών αλληλεπιδράσεων, στις οποίες τα σωματίδια (ηλεκτρόνια) ανταλλάσσουν κίνηση μέσω των εικονικών σωματιδίων, οδηγεί στην αποκρυπτογράφηση της παρατηρούμενης αλληλεπιδράσεως.

Με άλλα λόγια δεν υπάρχουν μοναδικά διαγράμματα *Feynman* που να περιγράφουν μία αλληλεπίδραση. Στην πραγματικότητα μια αλληλεπίδραση περιγράφεται από μία επαλληλία πολλών διαφορετικών διαγραμμάτων στην οποία το κάθε διάγραμμα εμφανίζεται με την δική του πιθανότητα, και το άθροισμα των πιθανοτήτων των διαγραμμάτων αυτών δίνει ως τελικό αποτέλεσμα την αλληλεπίδραση. [11],[17]

(Εικόνα 14)



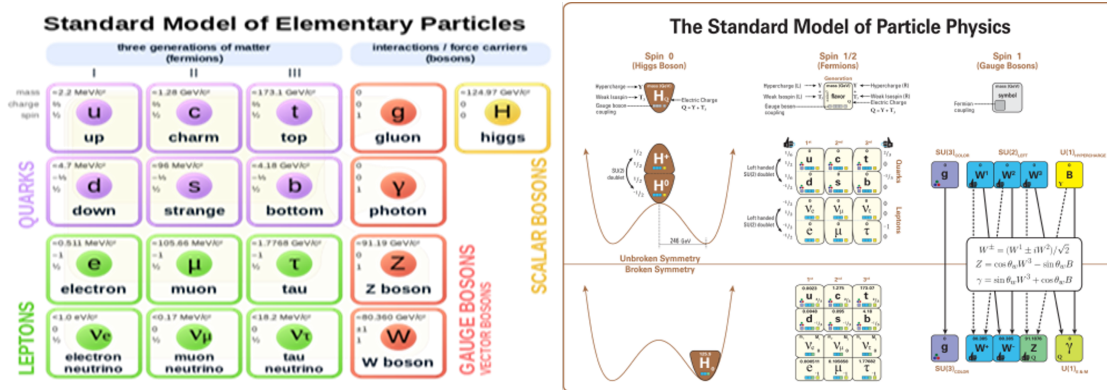
Εικόνα 14: (Αριστερά) Τα διαφορετικά «σενάρια» (διαγράμματα) μιας αλληλεπιδράσεως.

(Δεξιά) Η επαλληλία των διαφορετικών σεναρίων η οποία, μετά την πιθανολογική σύνθεσή τους, οδηγεί στην τελική κατάσταση των σωματιδίων (ηλεκτρονίων).

τα πιο σύνθετα «σενάρια» και να λάβουμε υπ' όψιν μόνο τα απλά διαγράμματα, τα οποία και συμμετέχουν στην επαλληλία με μεγαλύτερη πιθανότητα. Έτσι παίρνοντας το επαλληλικό άθροισμα των απλών μόνο «σεναρίων» μπορούμε να καταλήξουμε σε μια ικανοποιητική προσέγγιση της πραγματικής εξέλιξης των αλληλεπιδράσεων.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ

Απαραίτητο κρίθηκε να συμπεριληφθεί η παρακάτω Εικόνα 15, στην οποία παρουσιάζεται πολύ περιεκτικά η σύνθεση του καθιερωμένου προτύπου, αφού αυτό δεν θα μπορούσε να λείπει από ένα άρθρο, όπως το παρόν, το οποίο πραγματεύεται θέματα σωματιδιακής φυσικής. Η χρησιμότητά του ήταν ενδεικτική, όταν παραπάνω χρειάστηκαν οι πληροφορίες για τη μάζα, το φορτίο και το σπιν των σωματιδίων και φορέων.



Εικόνα 15: (Αριστερά) Το Καθιερωμένο Πρότυπο. (Δεξιά) Ένα αναλυτικότερο διάγραμμα δείχνει τις 3 γενιές κουάρκ, 3 γενιές λεπτονίων, και τα μποζόνια βαθμίδος, περιέχοντας ονόματα, μάζες, σπιν, φορτία, χρωματικότητα και αλληλεπιδράσεις με ισχυρές, ασθενείς και ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις. Απεικονίζει επίσης τον κρίσιμο ρόλο του μποζονίου Higgs στο σπάσιμο της ηλεκτροασθενούς συμμετρίας και δείχνει πώς οι ιδιότητες των διαφόρων σωματιδίων διαφέρουν στη συμμετρική φάση (υψηλής ενέργειας) και στη φάση διακεκομμένης συμμετρίας (χαμηλής ενέργειας).

Ιωάννης Χρ. Αγαπάκης
Θεσσαλονίκη, 9 Φεβρουαρίου 2024

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Feynman R. P. (1949) «The Theory of Positrons Physical Review, vol.76, Issue 6, pp. 749-759
- [2] Penco R., Mauro D. (2006) «Perturbation theory via Feynman diagrams in classical mechanics», European Journal of Physics, vol.27, pp.1241–1250
- [3] Martinus Veltman (1994) «Diagrammatica: The Path to Feynman Diagrams, Cambridge Lecture Notes in Physics, Series Number 4», Cambridge University Press
- [4] Gribbin John, Gribbin Mary (1997) «Richard Feynman: A Life in Science» Penguin-Putnam
- [5] Mlodinow Leonard (2011) «Feynman’s Rainbow», Vintage
- [6] Kaiser David (2005) «Physics and Feynman’s Diagrams» American Scientist, vol.93, pp.156-165
- [7] Wilczek Frank (2016) «Why Feynman Diagrams Are So Important» Quanta Magazine, Article 5 July 2016
- [8] Δανίλιας Ν. (1996) «Ένα Εισαγωγικό Μάθημα στις Μιγαδικές Συναρτήσεις», University Studio Press , Θεσσαλονίκη
- [9] Οικονομίδης Ν.Π. (1978) «Ασκήσεις Θεωρίας Μιγαδικών Συναρτήσεων», (Τόμος Πρώτος) Αυτοέκδοση, Θεσσαλονίκη
- [10] Marsden J. E., Tromba A. J. (2001) «Διανυσματικός Λογισμός» Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο
- [11] Τραχανάς Στ. (2005) «Κβαντομηχανική Ι», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο
- [12] Μάσεν Στ. (2004) «Σημειώσεις Υπολογιστικής Κβαντικής Μηχανικής ΙΙ», Σπουδαστήριο Θεωρητικής Φυσικής ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη

Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

- [13] <https://2science.gr/feynman-diagrams>
- [14] <https://www.youtube.com/watch?v=BCBDclSOuxU>
- [15] <http://physics.nist.gov/constants>
- [16] <https://www.youtube.com/watch?v=5aurHaxeOGM>
- [17] <https://www.youtube.com/watch?v=X-FEU4mQWtE&t=21s>
- [18] <https://skiathos.physics.auth.gr/atlas/Nuclear-Physics/2013/T1/Stoix-Feynman-14jan2014.pdf>
- [19] <https://en.wikipedia.org/wiki/Feynman-diagram>