# Επιταχυντές Σωματιδίων

Μια πολυμεσική παρουσίαση

**Θεμιστοκλής Γεωργούλιας**
**ΣΕΜΦΕ**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή ..... 2

Ιστορική αναδρομή Επιταχυντών και Φυσικής Υψηλών Ενεργειών ..... 3

Ορισμός ..... 32

Γραμμικοί Επιταχυντές ..... 34

Κυκλικοί Επιταχυντές ..... 41

Ανιχνευτές ..... 61

Βασικές αρχές κυκλικών επιταχυντών και προσομοίωση κίνησης των σωματιδίων ..... 70

Καθοδήγηση δέσμης ..... 73

Phase Stability ..... 79

Εστίαση δέσμης – Αρχη Εναλλασσόμενης Απόκλισης (Alternating Gradient) ..... 81

Μεθοδολογία Flash ..... 87

Εφαρμογές και χρησιμότητα επιταχυντών ..... 110

## Εισαγωγή

Η εργασία «Επιταχυντές Σωματιδίων – Μια πολυμεσική παρουσίαση» έχει ως σκοπό να παρουσιάσει τα κυριότερα χαρακτηριστικά των επιταχυντών σωματιδίων, τις λειτουργίες τους, τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού και της οπτικής που συνδυάζονται για την οδήγηση των σωματιδίων καθως και το βασικό σκεπτικό της φυσικής υψηλών ενεργειων που αποτελεί βάση του όλου εγχειρήματος του ανθρώπου για να φτάσει, ορμώμενος από την επιθυμία του να ανακαλύψει τα συστατικά της φύσης, να κατασκευάσει τους επιταχυντές σωματιδίων. Και όλα αυτά μέσα από αφήγηση γεγονότων, θεωρία φυσικής, εικόνες και βίντεο.

Γίνεται μια ιστορική παρουσίαση των σημαντικότερων επιτευγμάτων της ιστορίας της φυσικής όσον αφορά τη γνώση για τη δομή της υλής και παρουσιάζονται τα βήματα αλλά και τα κυριότερα γεγονότα μέσα απο τα οποία ο άνθρωπος έφτασε να επινοήσει τους επιταχυντές σωματιδίων. Παρουσιάζεται η εξέλιξη των επιταχυντών σωματιδίων μέχρι τη σημερινή τους μορφή και χρήση και έπειτα αναλύονται τα είδη τους και τα χαρακτηριστικά κάθε έιδους επιταχυντών, όπως και τα κυριότερα συστατικά τους μέρη και η λειτουργία αυτών. Κυρίοτερο κομμάτι της εργασίας είναι η παρουσίαση των βασικότερων αρχών των κυκλικών επιταχυντων(καμπύλωση δέσμης, phase stability, ισχυρή εστίαση) μέσα από flash βίντεο όπου γίνεται μιά απλή προσομοίωση της κινησης των σωματιδίων. Εμπεριέχεται ανάλυση του περιεχομένου του κάθε βίντεο και όλα όσα θέλει να καταδέιξει, ενώ δίνονται και αναλυτικά τα βήματα της κατασκευής των flash βίντεο. Τέλος αναφέρονται οι εφαρμογές των επιταχυντών σωματιδίων στην καθημερινή ζωή.

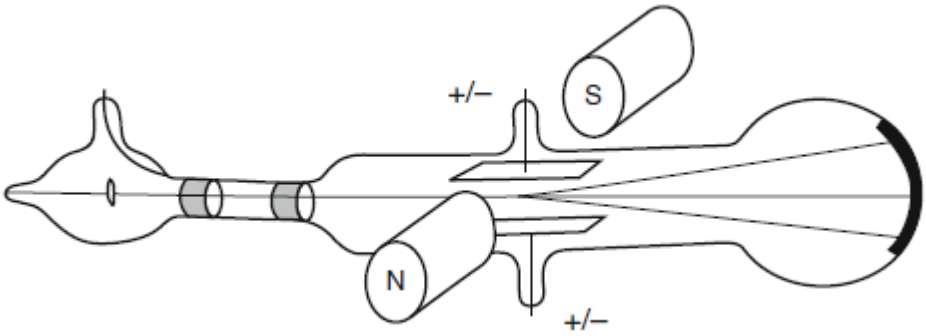
## Ιστορική αναδρομή Επιταχυντών και Φυσικής Υψηλών Ενεργειών

Ο Αριστοτέλης αποκαλούσε την κατανόηση της "phusis" (φύση) την Πρώτη Φιλοσοφία. Από τις πρώτες καταγεγραμμένες έρευνες σχετικά με τη φύση της φύσης, από τους φιλοσόφους στην πόλη της Μιλήτου στην Ελλάδα τον έκτο αιώνα π.Χ. μέχρι σήμερα από θεωρητικούς και πειραματιστές σε όλο τον κόσμο, πρωταρχικό ζήτημα της Πρώτης Φιλοσοφίας έχει να κάνει με το ερώτημα, «από τι αποτελείται;». Ελληνες και Ινδοί φιλόσοφοι της αρχαιότητας είχαν συλλάβει πως η ύλη αποτελείται από πέντε στοιχεία. Ενώ λοιπόν οι περισσότερες από αυτές τις θεωρίες άνηκαν στη σφαίρα του θρησκευτικου, ο Δημόκριτος περιέγραψε το ρόλο των ατόμων από τα οποία απότελειται η ύλη θέτωντας έτσι μία βάση στον κόσμο των φυσικών και των φιλοσόφων. Όλα αυτα μέχρι τον 18$^{o}$ αιώνα όταν νέες ανακαλύψεις έρχονται για να αλλάξουν τα δεδομένα. Μέχρι το 1863 το σύμπαν αποτελείται από 56 στοιχέια που έχουν ανακαλυφθεί και τα οποία αποτελούνται από άτομα. Η σύσταση του περιοδικού πίνακα των στοιχείων σύμφωνα με το ατομικό τους βάρος κατέδειξε την ατομική φύση της ύλης.

Από το 585 π.Χ. όταν ο Θαλής ο Μιλήσιος ανακάλυψε τον ηλεκτρισμό τρίβωντας κεχριμπάρι πάνω σε ύφασμα, χρειάστηκε να φτάσουμε στον 19$^{o}$ αιώνα όταν και η έρευνα πάνω στον ηλεκτρισμό προχώρησε πολύ μακρύτερα τις γνώσεις του ανθρώπου σχετικά με τον ηλεκτρισμό και τη σχέση του με τη μαγνητισμό.Τα πειράματα των Franklin, Fay κ.α., αλλά και οι θεωρίες των Faraday, Ohm, Ampere, κ.α. κατέληξαν στις εξισώσεις του Maxwell,

$$\nabla \times E = -\mathrm{d}B/\mathrm{d}t,$$

όπου E το ηλεκτρικό πεδίο και B το μαγητικό. Αναπόφευκτα όλες οι σκέψεις συγκεντρώθηκαν στο «τί είναι αυτό που μεταφέρει τον ηλεκτρισμό και δημιουργεί μαγνητικό πεδίο». Στο πείραμα του με τις ακτίνες καθόδου ο J.J. Thomson μίλησε για ένα σωματίδιο («ή ότι ήταν αυτό» όπως είπε) που ειναι μέρος όλων των ειδών της ύλης σε οποιεσδήποτε συνθήκες. Ονόμασε το σωματίδιο αυτό λοιπόν ηλεκτρόνιο αφού ήταν αυτό που έφερε τον ηλεκτρισμό! Η ανακάλυψη του ηλεκτρονίου οδήγησε στη βασική πλέον θεωρία για τη δομή του ατόμου και το ηλεκτρόνιο ήταν το πρώτο στοιχειώδες σωματίδιο!




Σωλήνας καθοδικών ακτίνων Thomson

Την ανακάλυψη αυτή ακολούθησαν στα τέλη του 19$^{ου}$ αιώνα οι έρευνες για τη αντινοβολία των σωματιδίων. Ο κόσμος μέχρι τότε αλλά ακόμα και τώρα πιστεύει πως η ακτινοβολία «κατασκευάζεται» αποκλειστικά από τον άνθρωπο. Κάτι που δεν είναι σωστό αφού το σώμα μας, για παράδειγμα, βομβαρδίζεται καθημερινά απο τόνους κοσμικής και ηλιακής ακτινοβολίας. Η κατανόηση αυτή της ακτινοβολίας απο τον κόσμο ήρθε με μία διαδεδομένη πλέον για την εποχή μεθοδο, τη φωτογραφία!

Ο Γερμανός φυσικός Rontgen που επίσης πειραματιζόταν με τον σωλήνα καθοδικών ακτινών του Thomson ανακάλυψε τυχαία πως κάποιες καλά διπλωμένες φωτογραφικές πλάκες που είχε αφήσει κόντά στον σωλήνα για μέρες είχαν θολώσει σα να είχαν εκτεθεί στο φώς. Επίσης παρατήρησε ότι ένα χαρτί με βάριο έλαμπε στο σκοτάδι όταν βρισκόταν κοντα στον σωλήνα. Θεώρησε λοιπον ότι θα μπορούσε να βγάλει κάποιες φωτογραφίες με αυτή την ακτινοβολία. Πρώτα τοποθέτησε κάποια συμπαγή αντικέιμενα μπροστά από φωτογραφικές πλάκες και τα εξέθεσε σε αυτή την ακτινοβολία του σωλήνα. Η ακτινοβολία όντως τα διαπερνούσε και το αποτέλεσμα στις πλάκες εξαρτιόταν από το πόσο χοντρά ήταν τα αντικείμενα. Αργότερα ζήτησε από τη γυναίκα του να τοποθετήσει το χέρι της μπροστά απο την φωτογραφική πλάκα. Το αποτέλεσμα ήταν να περάσει ακτινοβολία από τη σάρκα, λιγότερη από τα κόκκαλα και καθόλου από τη βέρα που φορούσε! Ηταν η πρώτη ακτινογραφία!

Ανάλογα πειράματα πραγματοποίησαν και άλλοι φυσικοί της εποχής. Η ακτινοβολία των αγνωστων αυτων ακτίνων ήταν πλεον γνωστη στον κόσμο και οι γυναίκες της Βικτωριανής εποχής ανησυχούσαν μήπως κάποιος τις φωτογραφήσει κάτω από τα ρούχα τους! Ο γάλλος φυσικός Becquerel, σε πειράματά του βρήκε πως άλατα ουρανίου έλαμπαν στο σκοτάδι έαν είχαν εκτεθεί στο φως του ήλιου. Δοκίμασε έτσι να τοποθετήσει άλατα ουρανίου πάνω σε τυλιγμένες με μαύρο χαρτί φωτογραφικές πλάκες για να δεί αν θα άφηναν ίχνος. Όπως και έγινε. Αργότερα δοκίμασε να τοποθετήσει έναν σταυρό ανάμεσα στα άλατα και τις πλάκες για να δεί εάν θα μείνει το ίχνος του σταύρου. Η έκθεση των αλάτων στον ήλιο καθυστερούσε λόγω κακοκαιρίας και έτσι αποφάσισε να δεί αν υπήρχε αποτέλεσμα από την όποια έκθεση είχαν υποστεί τα άλατα. Το ίχνος του σταυρού είχε μείνει κάτι που σήμαινε ότι εκτός από το φως τα άλατα εξέπεμπαν από μόνα τους ένα είδος ακτινοβολίας. Η απάντηση σ' αυτό το ερώτημα δόθηκε από ένα ζευγάρι στη Γαλλία.

Η Marya Sklodowska, πολωνή φυσικός, μετακόμισε στην Γαλλία για να σπουδάσει αφού στην πατρίδα της δεν επιτρέπονταν γυναίκες στο πανεπιστήμιο της Βαρσοβίας. Δύσκολες εποχές όπως έλεγε λόγω του κρύου στο σπίτι της, αργότερα παντρέυτηκε τον γάλλο Pierre Curie και έτσι η γνωστή πλέον Marie Curie αφοσιώθηκε στην έρευνα της ακτινοβολίας (ίσως διότι έψαψνε να βρει μία ατέρμονη πηγή θερμότητας, όπως χαρακτηριστικά λεγόταν, λόγω των κακουχιών της νεαρής της ηλικίας) από υλικά όπως το ουράνιο που παρήγαγαν ενέργεια από το τίποτα, τη ραδιενέργεια όπως την ονόμασε. Το ζευγάρι Curie είναι υπέυθυνο για την ανακάλυψη δύο πηγων ακτινοβολίας, το ράδιο και το πολώνιο όπως τα ονόμασαν. Ωστόσο αυτό όδηγησε και στην καταστροφή αφού δεν γνώριζαν τις επιβλαβείς για αυτούς ιδιότητες λόγω της επαναλαμβανόμενης έκθεσης.

Άλλος ένας επιστήμονας που αφιέρωσε την έρευνά του στις ακτίνες του Becquerel, ο Νεοζηλανδός φυσικός Ernest Rutherford, παρατήρησε ότι μπορούσε να ξεχωρίσει τις ακτίνες σε θετικά και αρνητικά φορτισμένες όταν αυτές περνούσαν από ένα μαγνητικό πεδίο. Οι δύο τύποι ακτινών απέκλιναν σε αντίθετες πορείες ενώ υπήρχε και μία τρίτη που δεν επηρεαζόταν καθόλου. Τις ονόμασε άλφα, βήτα και γάμμα ακτίνες. Δουλεύοντας με τον Άγγλο χημικό Frederick Soddy, ο Rutherford ανακάλυψε πως η ραδιενέργεια μπορούσε να παράγει μία συνεχή πηγή ενέργειας από το τίποτα. Αυτό γινόταν από τη μετατροπή ενός στοιχείου σε ένα άλλο. Για τις έρευνές του στον Rutherford απονεμήθηκε το βραβείο Nobel, ενώ ένα από τα συμπεράσματά του ήταν ότι η ενέργεια είναι ανάλογη με τη μάζα, τον νόμο που μόλις είχε προτείνει ο Einstein.

$$E=mc^2$$

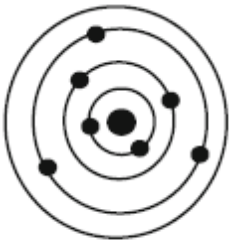
Ο Rutherford εργάστηκε πάνω στη βήτα και την άλφα διάσπαση ενώ το τρίτο είδος εκπομπής που πρότεινε ταυτοποιήθηκε αργότερα ως προιόν των δύο πρώτων όπου ένας πυρήνας επιστρέφοντας στην αρχική του κατάσταση εκπέμπει ένα φωτόνιο. Ο Rutherford (μαθητής του Thomson) στην έρευνά του τα επόμενα χρόνια στην Αγγλία, πίστευε ότι τα σωματίδια άλφα που προέρχονται από την άλφα διάσπαση είναι άτομα Ηλίου χωρίς τα ηλεκτρόνια τους, αλλά για να

το αποδείξει αυτό θα έπρεπε να μετρήσει το το φορτίο και τη μάζα τους όπως έκανε ο Thomson με το ηλεκτρόνιο. Αυτό το κατάφερε με τη συμβολή ενός συνεργάτη του και της μηχανής μετρησης αυτού Geiger-Muller αλλά και μίας άλλης συσκευής, του Σπινθιροσκοπίου. Αυτές αλλά και άλλες έρευνες τον οδήγησαν να προτείνει ένα νεο μοντέλο για τη δομή του ατόμου, όπου ένα νέφος ηλεκτρονιών περιτριγύριζε θετικά φορτισμένους πυρήνες, όπως στο πλανητικό σύστημα. Σε ξεχωριστή του έρευνα ο Rutherford ανακάλυψε ότι όταν αέριο άζωτο βομβαρδιζόταν με άλφα σωμάτια, απέδιδε ένα άτομο υδρογόνο χωρίς τα ηλεκτρόνια του, το οποίο ονόμασε πρωτόνιο. Πρόκειται για τον ιονισμό του υδρογόνου, την πηγή δηλαδή των σωματιδίων (αδρονιών) για τον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (LHC) του 21$^{ου}$ αιώνα! Το πρωτόνιο έδινε στον πυρήνα το θετικό του φορτίο. Το μοντέλο του Rutherford όμως με τα ηλεκτρόνια γύρω από τον πυρήνα συγκρατημένα από τη δύναμη Coulomb είχε ένα ψεγάδι αφού τα συνεχώς περιστρεφόμενα ηλεκτρόνια θα έπρεπε να χάνουν την ενέργεια τους και να πέφτουν πάνω στον πυρήνα. Η απάντηση για το τι ήταν αυτό που κρατούσε τα ηλεκτρόνια στη θέση τους ήταν ένας άλλος κλάδος της φυσικής που μόλις είχε κάνει την εμφάνιση του στις αρχές του 20$^{ού}$ αιώνα. Η Κβαντομηχανική!

Το 1900 ο Γερμανός φυσικός Max Planck ανακάλυψε με ένα μαθηματικό τρικ ότι η ενέργεια από την περιστροφή των ηλεκτρονιών δεν εκπέμπεται σε συνεχές φάσμα ώστε να εξαντληθει σε απειροελάχιστο χρόνο, αλλά το μοντέλο θα μπορούσε να παραμείνει σταθερό εαν υποθέταμε ότι η ενέργεια απελευθερώνεται σε ένα μεγάλο αριθμό πεπερασμένων αλλά πολύ μικρών πακέτων. Το μέγεθος των πακέτων καθορίστικε από έναν αριθμό γνωστό, τη σταθερά του Planck h.

$$\text{Planck's constant} = 6.62606957 \times 10^{-34}\ \text{Joule-second}$$

Τα άτομα λοιπόν μπορούσαν να εκπέμπουν ή να απορροφούν ενέργεια σε διακριτές μονάδες μεγέθους hν όπου ν η συχνότητα της ακτινοβολίας. Τα σωματίδια αυτής της ακτινοβολίας αργότερα ονομάστηκαν φωτόνια και η ενέργεια αποτελείτω από ενεργειακά κβάντα τοποθετημένα στο χώρο όπως έδειξε ο Einstein. Το 1912 ο δανός φυσικός Niels Bohr χρησιμοποιώντας το μοντελο του Rutherford αλλά και τις κβαντικές προσεγγίσεις, παρουσίασε ένα νέο μοντέλο όπου τα ηλεκτρόνια κινούνται γύρω απ΄τον πυρήνα αλλά δεν μπορούν να χάσουν ή να αποκτήσουν ενέργεια με συνεχή τρόπο αλλά μόνο με διακριτά κβάντα ακτινοβολίας πηδώντας από τη μία ενεργειακή τροχιά στην άλλη. Και ο λόγος για τον οποίο όλα τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να αλλάξουν τροχιά μονο μιάς είναι γιατι κάθε τροχιά επιτρέπει την συνύπαρξη μόνο συγκεκριμένου αριθμού ηλεκτρονιών σε αυτή, τέτοιον ώστε όταν συμπληρώνεται να απαγορέυεται η μεταπήδηση άλλων.



Bohr Model

Το 1924 ο Louis de Broglie πρότεινε ότι αν το φως μπορεί να συμπεριφέρεται σαν σωματίδιο τότε και ένα σωματίδιο μπορεί να μελετηθεί ώς κύμα, υπολογίζοντας αυτό που αργότερα περιγράφτηκε ώς καθορισμένες τροχιές κυματικής μορφής με μήκος κύματος λ=h/p, όπου p η ορμή του ηλεκτρονίου. Αυτή η κυματική εξίσωση αργότερα έγινε η βάση της εξίσωσης του Schrodinger η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να αντλήσει ιδιότητες των ατόμων και των σωματιδίων, τις ενεργειακές στάθμες, καθώς και την αλληλεπίδραση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Παράλληλα η περιγραφή των σωματιδίων ως κύματα έδωσε στον Dirac την απόδειξη για την ύπαρξη της αντιύλης αλλά και τη δημιουργία ύλης από την ενέργεια, βασικές άρχες δηλαδή και συστατικά των επερχόμενων επιταχυντών σωματιδίων!

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = E\psi = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + V(x,y,z)\psi$$

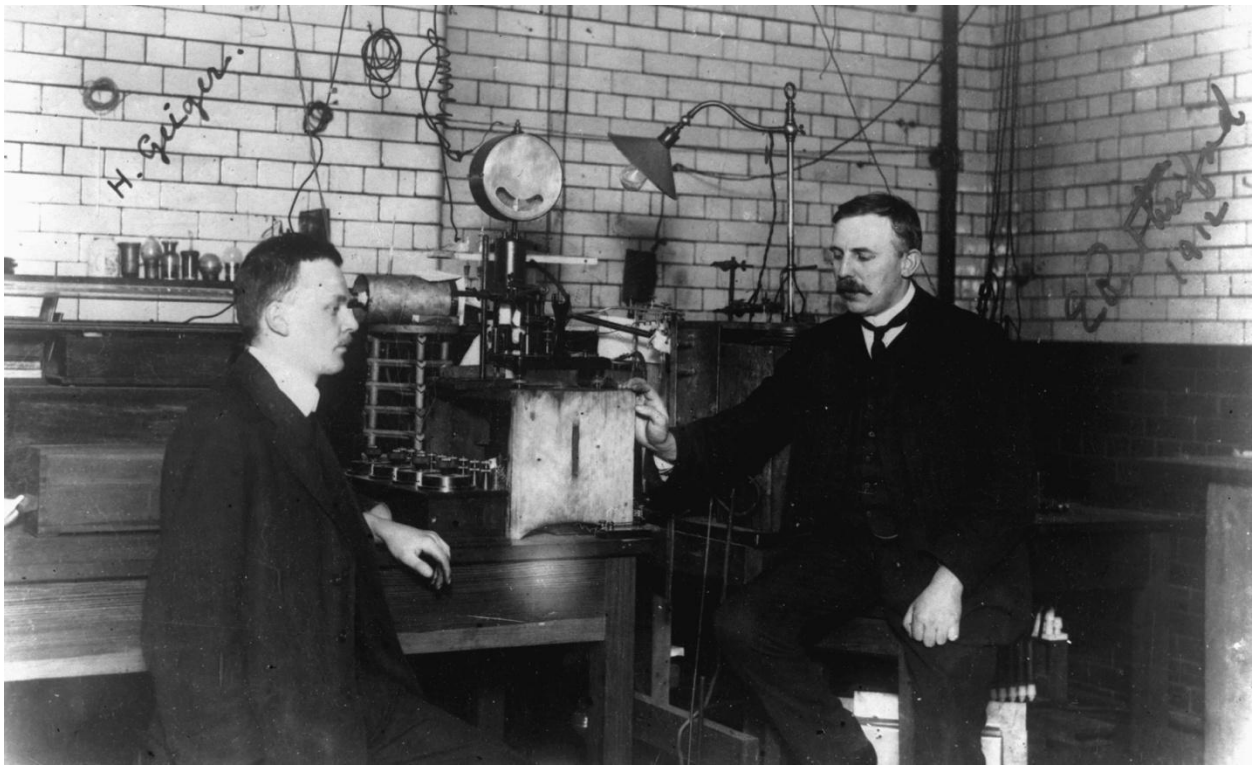
Εξίσωση Schrodinger

Ο Rutherford, που είχε ονομάσει το σωματίδιο στον πυρήνα του ατόμου πρωτόνιο, σε νεότερες έρευνές του υπέθεσε ότι υπάρχει ένα ακόμα, ουδέτερο αυτή τη φορά, σωματίδιο στον πυρήνα του ατόμου, το νετρόνιο. Ο λόγος ήταν ότι το ατομικό βάρος πολλών στοιχείων δεν μπορούσε να εξηγηθεί μόνο με τα πρωτόνια. Η υπόθεση του στην αρχή δύσκολα γινόταν πιστευή αφού όπως λεγόταν, «πως γίνεται να ανιχνευτεί ένα σωματίδιο που δεν έχει ούτε θετικό ούτε αρνητικό φορτίο;».

Οι πρώτες δεκαετίες του 20$^{ου}$ αιώνα είχαν ήδη αλλάξει την ανθρώπινη κατανόηση της φύσης της ύλης και των δυνάμεών της, πέρα από κάθε φαντασία. Ο πυρήνας του ατόμου που είχε ήδη περιγραφεί ήταν έτοιμος να αποκαλύψει τα μυστικά του. Η πυρηνική εποχή είχε ξημέρωσει. Πυρηνική βόμβες και αντιδραστήρες, με οικονομικές, κοινωνικές, και πολιτικές προεκτάσεις που ήταν πλέον αναπόφευκτες. Δύο γιγαντιαία άλματα, η θεωρία της σχετικότητας και η κβαντική μηχανική είχαν αλλάξει το τοπίο της φυσικής και της επιστήμης γενικότερα. Τα ρεύματα σωματιδίων όμως από επιταχυντές που εργάζονταν στο «υπόγειο της φύσης» ήταν ανεπαρκή για να εξετάσουν περαιτέρω το θέμα της ύλης.

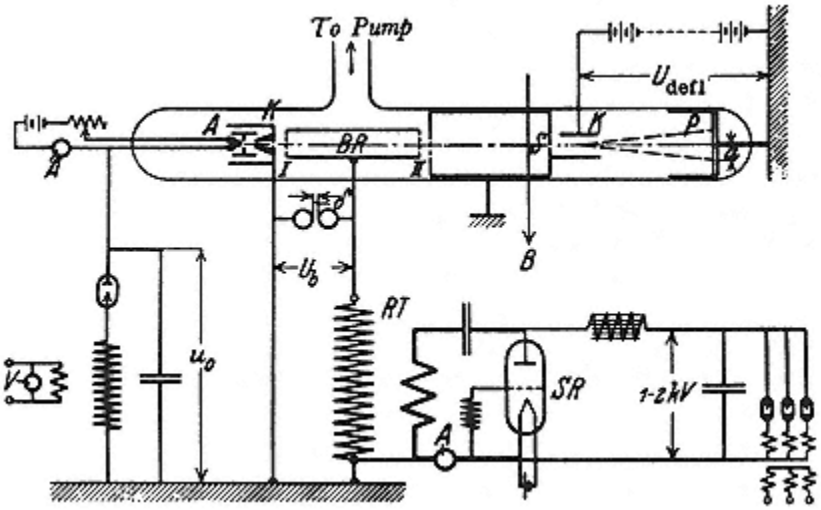
Και ενώ οι θεωρητικοί πειράζοντας τις εξισώσεις τους προσπαθούσαν να διεισδύσουν στο άτομο, οι πειραματικοί, όπως ο Rutherford, αναρωτιόντουσαν αν θα μπορούσαν να βρουν μια πιο άμεση λύση.Το πρόβλημα ήταν ότι τα σωματίδια από ραδιενεργές πηγές είχαν ένα σταθερό ποσό ενέργειας. Αλλά δεν υπήρχε κανένας λόγος σωματίδια να μην μπορούν να επιταχυνθούν σε μεγαλύτερες ενέργειες χρησιμοποιώντας τις νέες τεχνολογίες που αναπτύσσονταν για ηλεκτρική μετάδοση υψηλής τάσης. Το αποτέλεσμα θα είναι «μια άφθονη προσφορά ατόμων και ηλεκτρονίων που έχουν ατομική ενέργεια που υπερβαίνει κατά πολύ

αυτή των άλφα και βήτα σωματιδίων από ραδιενεργούς φορείς », όπως το έθεσε αργότερα ο Rutherford! Μία νέα εποχή, αυτή των επιταχυντών σωματιδίων έχει γεννηθεί!



Hans Geiger, Ernest Rutherford

Το 1924 ο Gustav Ising είναι αυτός που αναπτύσει το σκεπτικό ενός γραμμικού επιταχυντή σωματιδίων (linac). Τέσσερα χρόνια αργότερα, ο Rolf Wideroe κατασκευάζει τον πρώτο γραμμιμό επιταχυντή στον κόσμο σε ένα γυάλινο σωλήνα μήκους 88 εκατοστών στο Άαχεν της Γερμανίας.



Το 1929 ο Robert Van de Graaff εφευρίσκει τη γεννήτρια Van de Graaff, όπως ονομάστηκε, στο πανεπιστήμιο του Πρίνστον. Ο ίδιος θα κατασκευάσει αργότερα (1959) τον πρώτο παράλληλο επιταχυντή που αποτελούνταν από δύο γεννήτριες στη σειρά στα πυρηνικά εργαστήρια του Chalk River στο Οντάριο του Καναδά.

Van de Graaff

Η επίγεια ραδιενέργεια και οι κοσμικές ακτίνες  ήταν ένα δώρο για τους φυσικούς και ένα παράθυρο σε νέους τύπους σωματιδίων και τις ιδιότητες τους. Τα πειράματα έδειξαν ότι τα κύρια συστατικά των κοσμικών ακτίνων ήταν τα πρωτόνια και τα σωματίδια άλφα. Σήμερα πιστεύουμε ότι ενώ οι χαμηλότερες ακτίνες ενέργειας δημιουργούνται από τον ήλιο, οι υψηλής ενέργειας κοσμικές ακτίνες γεννιούνται στο διάστημα, κατά πάσα πιθανότητα από εκρήξεις αστεριών.

Οι κοσμικές ακτίνες έδωσαν την ώθηση για νέες ανακαλύψεις της φυσικής. Ακόμα και σήμερα, οι κοσμικές ακτίνες χρησιμοποιούνται τόσο για βασικά πειράματα φυσικής όσο και για αστρονομικές παρατηρήσεις. Πιστός όμως στην ανθρώπινη φύση του, ο άνθρωπος θα επιδιώξει να δημιουργήσει τη δική του παροχή τέτοιων εργαλείων έρευνας και να ελέγξει την παροχή των ενεργητικών σωματιδίων.

Αν μπορούσε κάποιος να ταξιδέψει στο παρελθόν περίπου στο 1930, θα παρατηρούσε ότι οι φυσικοί γνώριζαν ήδη πως τα στοιχεία διακρίνονται από το ποσό (αριθμός) του πυρηνικού φορτίου, το οποίο είναι ίσο με τον αριθμό των ηλεκτρονίων στο άτομο. Επίσης θα παρατηρούσε ότι τα ισότοπα, δηλαδή, τα στοιχεία με τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων, έχουν την ίδια ηλεκτρονική δομή και έχουν σχεδόν ταυτόσημες χημικές ιδιότητες (εκτός από την κινητική επίδραση ισοτόπων που επιβράδυνε τους ρυθμούς αντίδρασης). Ήξεραν ότι το φορτίο δίνεται από τον αριθμό των πρωτονίων ίσο με τον αριθμό των ηλεκτρονίων εκτός του πυρήνα. Αλλά, δεν ήξεραν τι να κάνουν με τον αριθμό των νετρονίων, που φαινομενικά προσθέτει μόνο μάζα και δημιουργεί ένα «ζωολογικό κήπο» από χημικώς όμοια ισότοπα. ‘Ηταν πολύ δυσαρεστημένοι με το γεγονός ότι δεν έχουν «σπάσει» ακόμα τον πυρήνα για να δουν στο εσωτερικό του και να παρακολουθήσουν τα νετρόνια και τα πρωτόνια. Ή όπως είπε ο Rutherford, «όπως τα παιδιά, χρειάζεται να διαλύσουν  ένα ρολόι στα κομμάτια του για να δούν πώς λειτουργεί».

Χρειαζόταν ενα σωματίδιο- σφαίρα να διεισδύσει στον πυρήνα. Ήταν λογικό να επιλέξουν ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο όπως το πρωτόνιο για σφαίρα, έτσι ώστε να η δύναμη Coulomb των ηλεκτρονίων που βρίσκονται έξω από τον πυρήνα να το προσελκύσει. Όμως, όπως το σωματίδιο διαπερνά το νέφος των ηλεκτρονίων και πλησιάζει το σημείο του θετικά φορτισμένου πυρήνα, το πρωτόνιο θα απωθείται από τη δύναμη Coulomb, η οποία αυξάνει όπως το αντίστροφο του τετραγώνου της φθίνουσας απόστασης του επικείμενου πρωτονίου. Η ηλεκτρική δύναμη απώθησης του πυρήνα δημιουργεί έναν «απότομο λόφο» δυναμικού για το πρωτόνιο, και το σωματίδιο χρειάζεται μια υψηλή ενέργεια για να τον ξεπεράσει. Ενώ μέχρι εκείνη τη στιγμή οι φυσικοί δεν γνωρίζαν την ισχυρή δύναμη που υπάρχει στο εσωτερικό του πυρήνα, ήξεραν ότι κάτι δένει τα πρωτόνια μεταξύ τους και έτσι το μόνο που χρειαζόταν ήταν να περάσει το εισερχόμενο σωματίδιο αυτό το «απωθητικό κέλυφος» και έτσι θα δράσει ως πυρηνικός ανιχνευτής.

Η κοινή λογική έλεγε ότι με το μικρό μέγεθος του πυρήνα και το ισχυρό φορτίο του,το πρωτόνιο για αυτή τη δουλειά θε έπρεπε να έχει την ενέργεια αρκετών εκατομμυρίων ηλεκτρονιοβόλτ. Αν και μια τέτοια ενέργεια τότε ήταν διαθέσιμη από ραδιενεργές πηγές, η δέσμη των σωματιδίων ήταν πολύ αδύναμη για τη διεξαγωγή ενός τέτοιου ποσοτικού πειράματος και ενέργειες λίγων MeV από πηγές σωματιδίων ήταν «υψηλές απαιτήσεις» για εκείνη την εποχή.

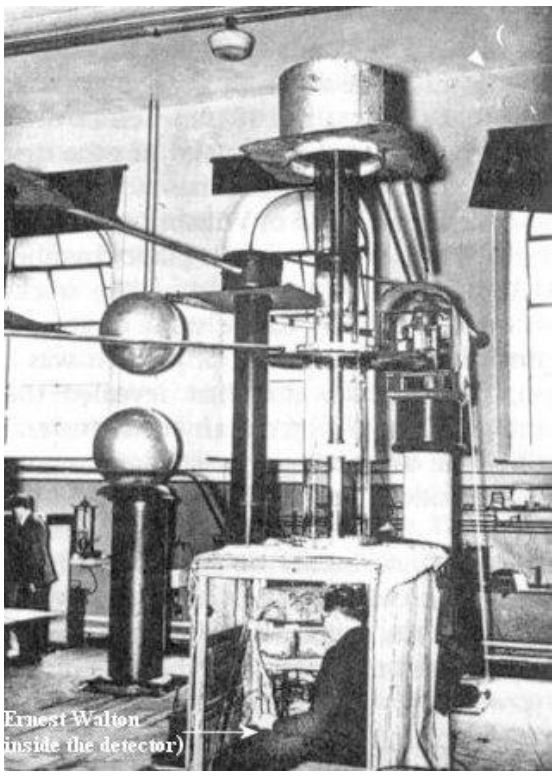
Όσο μεγαλύτερη η ορμή του πρωτονίου, τόσο μεγαλύτερη και η πιθανότητα ότι περισσότερα πρωτόνια θα βρεθούν στην άλλη πλευρά. Αυτό ήταν μεγάλη είδηση για τους πειραματιστές. Αν ήταν πιθανό ότι αν χαμηλής ενέργειας άλφα σωματίδια μπορούν να ανέβουν το «λόφο» και να βγούν από τον πυρήνα, έτσι και χαμηλότερης ενέργειας πρωτόνια έξω από το «λόφο» μπορούν

να αναρριχηθούν στον πυρήνα. Χρειάζονταν αρκετές πυρηνικές διεισδύσεις για την απόκτηση καλών στατιστικών δεδομένων. Χρειάζονταν, όπως λεγόταν, πολλά πρωτόνια να «επιτεθούν στο φρούριο», έτσι ώστε τουλάχιστον μερικά από αυτά τα πρωτόνια «πολεμιστές» να μπορέσουν να μπουν μέσα. Όσο χαμηλότερη η ενέργεια του πρωτονίου, τόσο πιο έντονη έπρεπε να είναι η ακτίνα πρωτονίων. Και δεν υπήρχε ραδιενεργός πηγή που θα μπορούσε να παρέχει μια υψηλής έντασης δέσμη πρωτονίων.

Το συμπέρασμα ήταν ότι οι πειραματιστές δεν ήταν ικανοποιημένοι με τα σωματίδια υψηλής ενέργειας που παρέχονται από τη φύση όπως σωματίδια άλφα που προέρχονται από ραδιενεργό διάσπαση ή κοσμικές ακτίνες σωματιδίων, αλλά χρειάζονταν επιταχυντές για να παράγουν έντονες ακτίνες σωματιδίων υψηλής ενέργειας. Αυτό ήταν ένα σημείο καμπής στην ιστορία της φυσικής, για τη σημερινή εποχή των επιταχυντών.

Οι επιταχυντές σωματιδίων εκείνη την εποχή ήταν πηγές υψηλής τάσης. Τέτοιες πηγές παρήγαγαν υψηλή τάση επιτάχυνσης σε ένα ηλεκτρόδιο. Οι πηγές σωματιδίων τοποθετούνταν στο άλλο ηλεκτρόδιο και επιταχύνονταν από την την τάση που εφαρμοζόταν.Το σωματίδιο υψηλή ενέργειας εξαγόταν μέσω μιας οπής ή ενός δικτύου στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης.

Το 1932. Είναι μια βαρυσήμαντη χρόνια αφού ο James Chadwick προσδιορίζει το νετρόνιο ως συστατικό του πυρήνα.Την ίδια χρονιά ο John Cockcroft και ο Ernest Walton εφευρίσκουν τον ηλεκτροστατικό επιταχυντή Cockcroft – Walton στο εργαστήριο Cavendish στο Cambridge της Αγγλίας, μια μέθοδο ώστε να διπλασιάζουν και  να τετραπλασιάζουν την αρχική τάση που παρέχεται στην είσοδο της γεννήτριας.

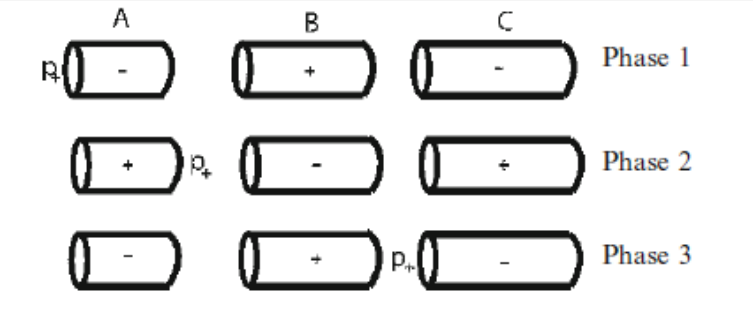


Είναι ο επιταχυντής που παράγει την πρώτη πυρηνική αντίδραση κατασκευασμένη από τον άνθρωπο. Ακόμα και σήμερα, η γεννήτρια CW χρησιμοποιείται για να επιταχύνει τα σωματίδια και να τα εγχύσει σε μεγαλύτερους επιταχυντές.

Επιταχυντής CW, Fermilab

Παρόλ' αυτά όλοι τότε αναγνώριζαν πώς μια τέτοια γεννήτρια θα περιορίζεται στο μέγιστο της επιταχυντικής της τάσης λόγω της χωρητικότητας των διακοπτών και των πυκνωτών της. Τέτοιοι επιταχυντές ήταν επίσης περιορισμένης ικανότητας επιτάχυνσης επειδή τα σωματίδια βιώναν την υψηλή τάση μονομιάς, και όχι σταδιακά. Ήταν τότε λοιπόν, τη δεκαετία του 1920, όταν ο νορβηγός μηχανικός με το όνομα Rolf Wideroe, ο οποίος εργαζόταν στην Καρλσρούη της Γερμανίας, είχε αναπτύξει την ιδέα για έναν επιταχυντή στον οποίο τα σωματίδια, αντί να επιταχύνονται από ένα μεγάλο ηλεκτρικό δυναμικό στο ένα άκρο, τους δίνεται ένα μικρό λάκτισμα ενέργειας κάθε φορά που περνούσαν μέσα από ένα μεταλλικό σωλήνα.

Καθώς ένα σωματίδιο εισέρχεται στον σωλήνα A (Φάση 1), η πολικότητα του σωλήνα θα είναι αρνητική για την επιτάχυνση του σωματιδίου. Καθώς αποχωρεί από τον σωλήνα A, η πολικότητα του σωλήνα θα συγχρονίζεται ώστε να αλλάζει σε θετική, έτσι ώστε το σωματίδιο να απωθείται προς τα εμπρός προς την κατεύθυνση του σωλήνα B, ο οποίος θα έχει μια ελκυστική τάση σε αυτό το χρονικό σημείο. Στη συνέχεια, καθώς το σωματίδιο αποχωρεί από τον σωλήνα (B) (Φάση 2), η τάση του σωλήνα B θα αλλάζει την πολικότητα της, θα μετατρέπεται σε απωθητική και ο σωλήνας μπροστά (C) θα είναι πάλι επιτάχυντικός (Φάση 3). Το σωματίδιο θα επιταχύνεται στα κενά και μόλις που θα (ως επί το πλείστον) παρασύρεται όταν βρίσκεται στο εσωτερικό του σωλήνα.




Η ιδέα για ένα συντονιζόμενο επιτάχυντη σωματιδίων με ένα εναλλασσόμενο πεδίο ήρθε στον Wideroe από τη συνήθη μετασχηματιστή. Τα ηλεκτρόνια σε ένα δευτερεύον κύκλωμα ενός βηματικού μετασχηματιστή μπορούν να επιταχύνονται σε υψηλή τάση, ενώ τα ηλεκτρόνια (ρεύματα) ρέουν σε ένα χάλκινο σύρμα.

Αντικαθιστώντας το χάλκινο σύρμα με ένα κυκλικό σωλήνα κενού, τα ηλεκτρόνια ή άλλα φορτισμένα σωματίδια θα κινούνταν σε κυκλική τροχιά. Το πρωτεύον κύκλωμα θα επιταχύνει στη συνέχεια το σωματίδιο σε κάθε στροφή. Φυσικά χρειάζεται και ένα μαγνητικό πεδίο για τον προσανατολισμό των σωματιδίων σε κυκλική τροχιά. Η ιδέα απορρίφθηκε αρχικά αφού οι τροχιές των ηλεκτρονίων ήταν ασταθείς. Η αρχές του Betatron για κίνηση σωματιδίων σε κυκλική τροχιά δεν είχαν ακόμη αναπτυχθεί και υπήρχαν αρκετά προβλήματα που σχετίζονταν με τα ηλεκτρόνια αφού χτυπούσαν τα τοιχώματα του σωλήνα, προκαλώντας εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων. Η θεωρία του Wideroe όμως ήταν η βάση τους.

Η μέθοδος αυτή, η οποία αρχικά σχεδιάστηκε από τον Wideroe το 1923 για γραμμική επιτάχυνση, χρησιμοποιεί έξυπνα τη βασική αρχή της επαγωγής ηλεκτρομαγνητισμού ώστε να δημιουργηθεί ένα ηλεκτρικό πεδίο με τη διατήρηση των σωματιδίων (ηλεκτρόνια) σε σφιχτή τροχιά με σταθερή ακτίνα σε σταθερό μαγνητικό πεδίο και την εφαρμογή ενός διαφοροποιημένου μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της τροχιάς.

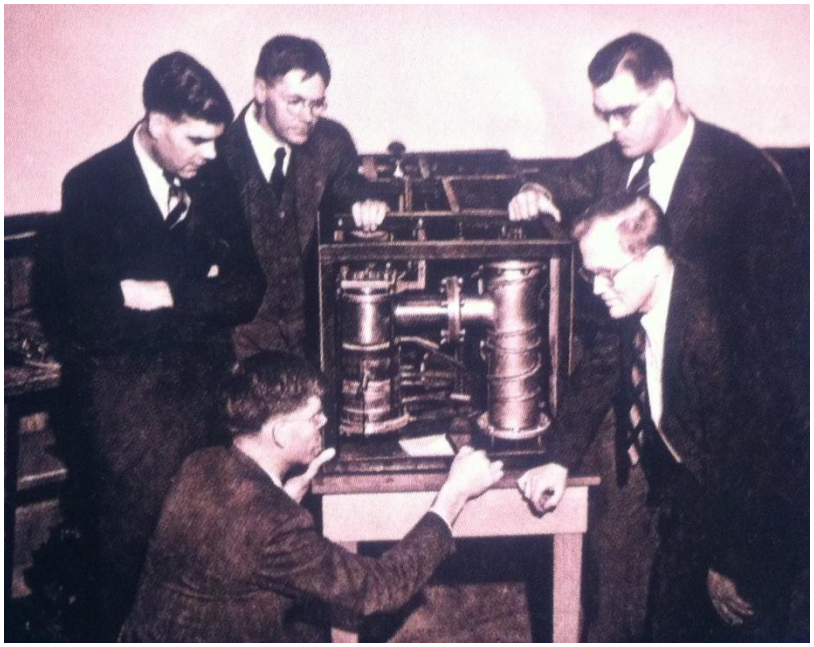
Σε αυτή την κατάσταση, το σωματίδιο βιώνει πάντα ένα επιταχυνόμενο ηλεκτρικό πεδίο σε όλο το μήκος τροχιακής διαδρομής του, οπότε δεν χρειαζεται υψηλής συχνότητας πηγή, όμως αυτό που χρειάζεται είναι να αλλάξει το μαγνητικό πεδίο καθώς το σωματίδιο επιταχύνεται.

Είναι γνωστό ότι όταν ένας μαγνήτης κινείται μέσα και έξω από ένα βρόγχο από σύρμα, δημιουργείται διαφορά δυναμικού σύμφωνα με το νόμο του Maxwell - που ονομάζεται επίσης επαγωγική τάση του Faraday, αφού αυτός ήταν που έδειξε αυτό το αποτέλεσμα. Όσο πιο γρήγορα κινείται ο μαγνήτης, τόσο μεγαλύτερη είναι η επαγόμενη τάση στο καλώδιο. Το ίδιο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται όταν η ισχύς του μαγνητικού πεδίου αλλάζει. Καθώς το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται, τα σωματίδια αντιμετωπίζουν αυτή την  επαγωγική τάση η οποία παράγει επιτάχυντική δύναμη στην εφαπτομενική διεύθυνση.

Όταν ένα σωματίδιο επιταχύνεται, πραγματοποιεί σπιροειδή κίνηση σε μεγαλύτερη ακτίνα για ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο. Όμως, ώς εκ θαύματος, στην περίπτωση της φυσικής Betatron, το αυξανόμενο μαγνητικό πεδίο αντισταθμίζει την επιτάχυνση, και το σωματίδιο παραμένει στην ίδια τροχιά.

Το 1930 λοιπόν, ο Ernest Lawrence βασιζόμενος στην ιδέα του Wideroe εφευρίσκει το κύκλοτρο, τον πρώτο κυκλικό επιταχυντή, στο πανεπιστήμιο Μπέρκλεϊ της Καλιφόρνια. Αυτός και ο μαθητής του Stanley Livingston κατασκευάζουν ένα κύκλοτρο με διάμετρο μόλις τέσσερις ίντσες.

Το 1937 οι Russell και Sigurd Varian και ο Willian Hansen εφευρίσκουν στο πανεπιστήμιο του Stanford το Klystron, έναν ενισχυτή υψηλών συχνοτήτων για την παραγωγή μικροκυμάτων. Μιά παρόμια συσκευή προτείνεται από την Agnesa Arsenjewa-Heil και τον Oskar Heil το 1935.



Klystron

Το 1940 ο Donald Kerst κατασκευάζει στο πανεπιστήμιο του Illinois το πρώτο Betatron, τον κυκλικό επιταχυντή που είχε προταθεί από τον Rolf Wideroe και άλλους επιστήμονες όπως ο Joseph Slepian τη δεκαετία του ’20.

Το Betatron του Kerst

Στην ασταμάτητη πρόσπάθεια για εύρεση νέων ειδών σωματιδίων σειρά πειραμάτων και αντιδράσεων με τους μέχρι τότε επιταχυντές οδηγούν στον προσδιορισμο των θετικών ηλεκτρονίων. Τα σωματίδια αυτά ονομάστηκαν «ποζιτρόνια» από τους Millikan και Anderson, ενώ αργότερα ήρθε η ανακάλυψη των μεσονίων.

Η επιθυμία να μεγαλώσει η ποικιλία των σωματιδίων αύξησε την ανάγκη να ωθηθούν τα όρια της ενέργειας προκειμένου να μελετήθούν τα πυρηνικά σωματίδια και να συνεχιστεί η αναζήτηση για τα δομικά στοιχεία της φύσης. Μεγαλύτεροι και καλύτεροι επιταχυντές ήταν αναγκαίοι.

Η επιτάχυνση Betatron με επαγωγικό μετασχηματιστή δεν ήταν πλέον προτιμητέα δίοτι καθώς η τροχιά γίνεται μεγαλύτερη σε ακτίνα για υψηλότερες ενέργειες, η αχρησιμοποίητη περιοχή που περικλείεται από την τροχιά γίνεται επίσης μεγάλη. Οπότε θα ήταν εξαιρετικά σπάταλο να οικοδομήσουμε ένα μεγάλο μαγνήτη για να καλύψει όλον αυτό τον αχρησιμοποίητο χώρο με το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Ήταν καλύτερα να εγκαταλειφθεί το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο και η επιτάχυνση να προκληθεί κάθε φορά που τα σωματίδια θα περνούν μέσα από μια κοιλότητα RF, όπως στον γραμμικό επιταχυντή του Wideroe.
Την μέχρι και σήμερα δηλαδή εκδοχή του επιταχυντή σταθερής τροχιάς, με τους μαγνήτες να κάνουν τη δουλειά της κάμψης της διαδρομής των σωματιδίων σε σταθερή τροχιά και της διατήρησης της δέσμης αυτων εστιασμένη καθ' όλη την πορεία της.

Δεδομένου ότι η ακτίνα της τροχιάς είναι μεγάλη, τα σωματίδια συγκρατόνται μεταξύ των πόλων ενός μεγάλου αριθμού μαγνητών μικρού μήκους που τοποθετούνται σε όλο το μήκος της περιφέρειας της τροχιάς.

Το 1943 ο Marcus Oliphant αναπτύσει την ιδέα για ένα νέο τέτοιο τύπο επιταχυντή, που αργότερα οναμάστηκε Σύγχροτρο από τον Edwin McMillan.

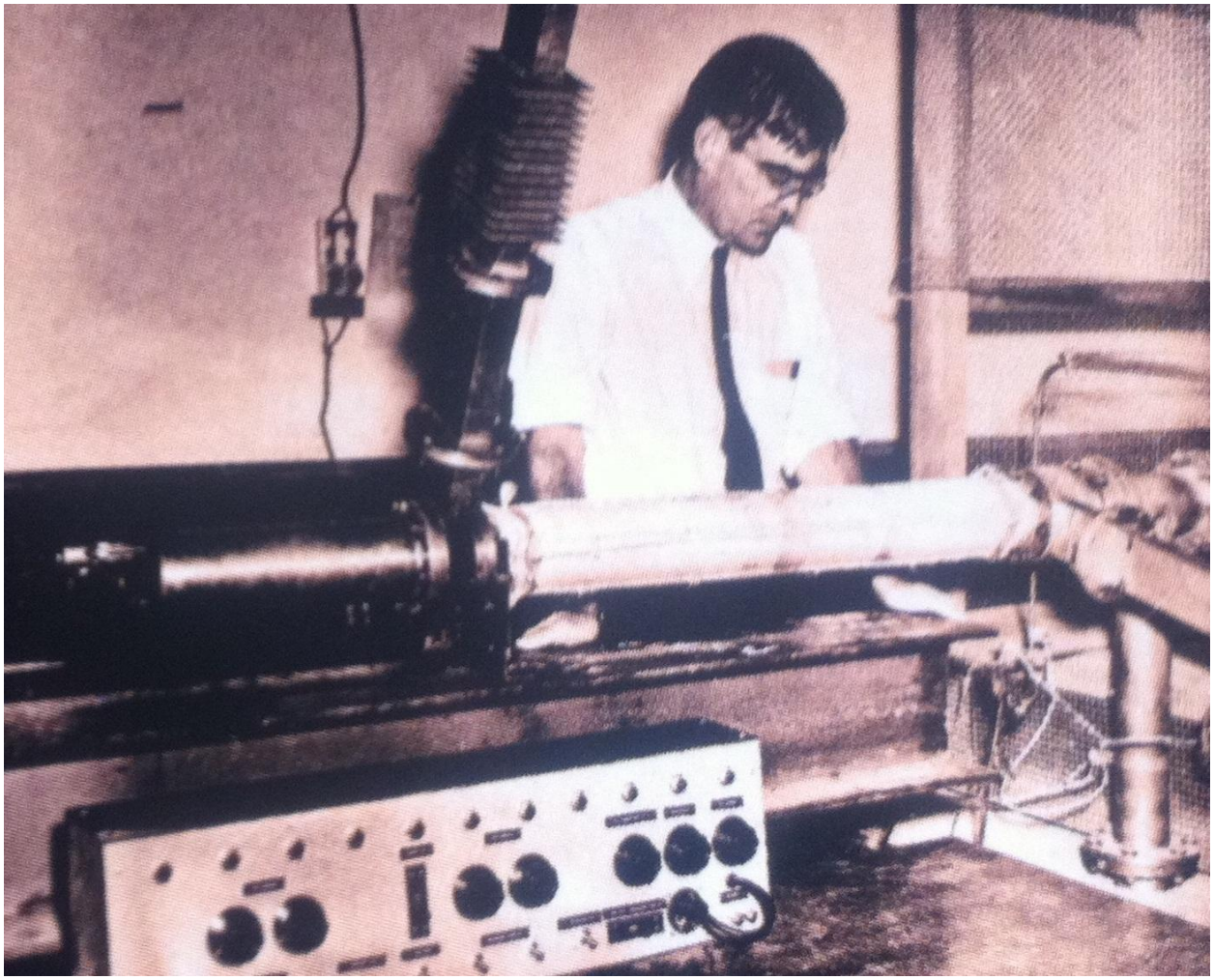
Marcus Oliphant, Edwin McMillan

Οι πυρήνες των μαγνητών περικλείουν ένα σωλήνα με κενό μέσα στο οποίο κυκλοφορεί η δέσμη των σωματιδίων. Τα αρχικά σύγχροτρα είχαν αυτους τους μαγνήτες «ασθενούς εστίασης" όπως ονομάστηκαν.

Το 1944 ο Vladimir Veksler στο ινστιτούτο φυσικής Lebedev και αργότερα ο Edwin McMillan στο πανεπιστήμιο του Μπέρκλεϊ ανακαλύπτουν την αρχή της σταθεροποίησης φάσης – phase stability, έναν ακρογωνιάιο λίθο των σύγχρονων επιταχυντών. Η αρχή παρουσιάστηκε πρώτα σε ένα τροποποιημένο κύκλοτρο το 1946 στο Μπέρκλεϊ.

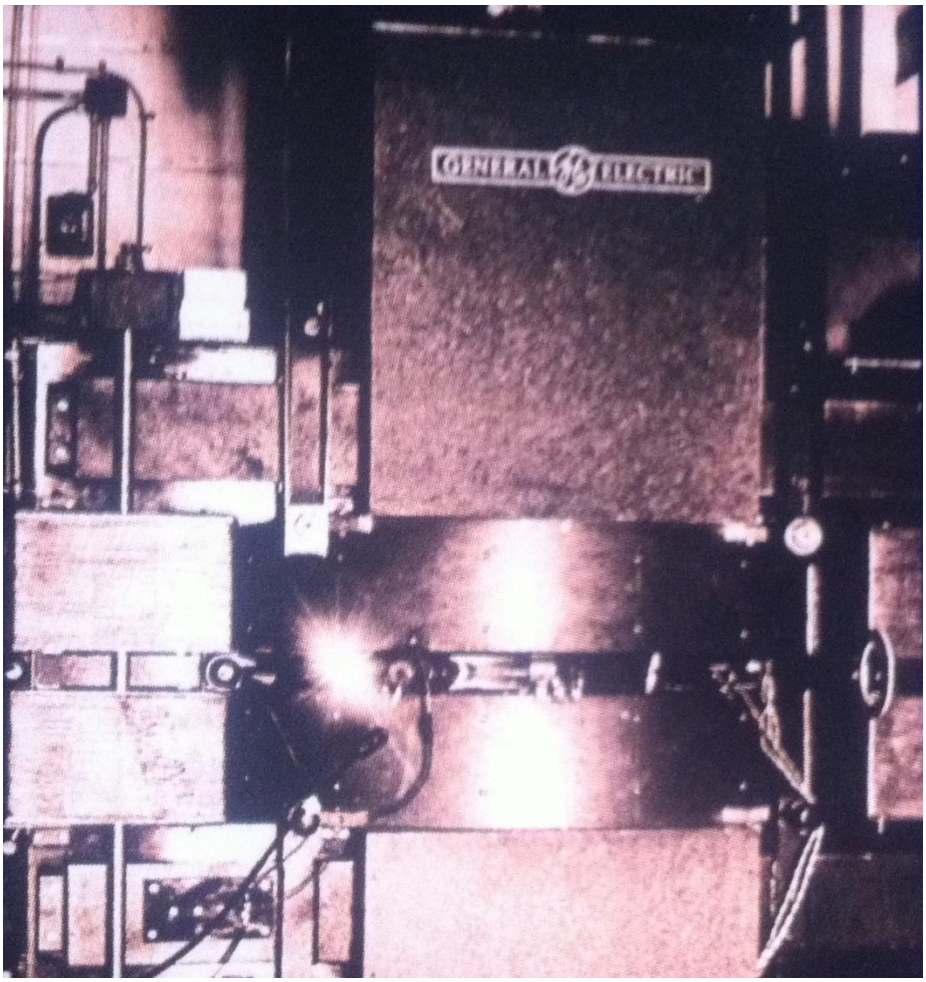
Από δεξιά: Edwin McMillan, Vladimir Veksler

Το 1946 επίσης ο William Walkinshaw και η ομάδα του στο Malvern του Ηνωμένου Βασιλείου κατασκευάζουντον πρώτο γραμμικό επιταχυντή ηλεκτρονιών που τροφοδοτείται από ένα μάγνητρο, ενώ το ίδιο συμβαίναι και από τον William Hansen και την ομάδα του που κατασκευάζουν έναν παρόμοιο επιταχυντή ηλεκτρονίων στο πανεπιστήμιο του Stanford λίγους μήνες αργότερα.



William Hansen

Την ίδια χρονιά ο Frank Goward κατασκευάζει το πρώτο σύγχροτρο ηλεκτρονίων στο Ηνωμένο Βασίλειο, ενώ η κατασκευή αυτή ακολουθείται από μία ακόμα στην Αμερική από την εταιρεία General Electric όπου και παρατηρήται για πρώτη φορά ακτινοβολία από το σύγχροτρο, κάτι που αποτελεί το ξεκίνημα μιας νέας εποχής στις ηλεκτρονικές πηγές φωτός που βασίζονται σε επιταχυντές.

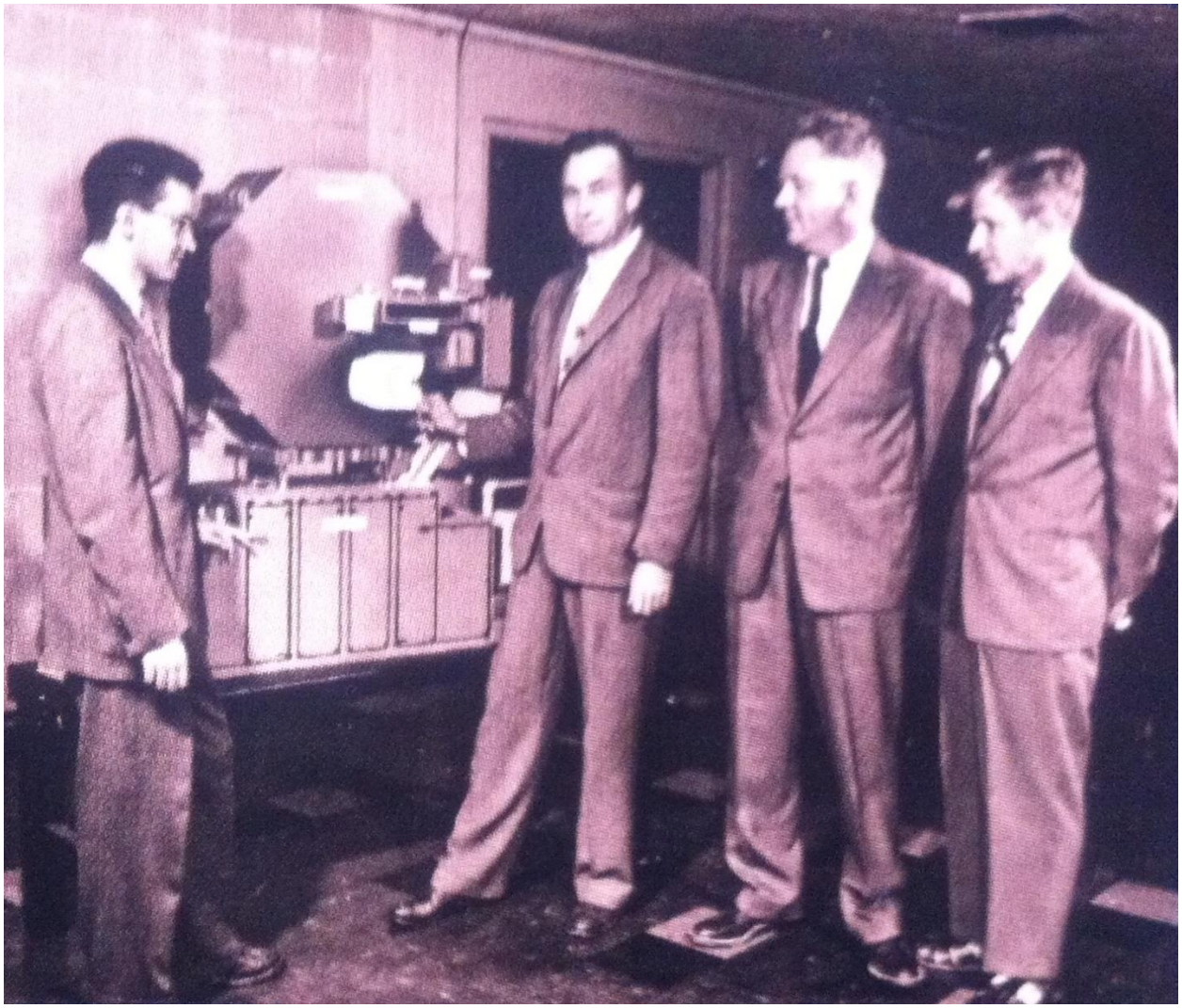



Σύγχροτρο της General Electric

Το 1947 ο Luis Alvarez κατασκευάζει τον πρώτο γραμμικό επιταχυντή με σωλήνες ολίσθησης για επιτάχυνση πρωτονίων στο πανεπιστήμιο του Μπέρκλεϊ.

Οι κατασκευαστές των σύγχροτρων ασθενούς εστίασης αναγνώριζαν ότι τα εν λόγω σύγχροτρα θα περιορίζονται στην ενέργεια, επειδή η σταθερότητα (εστίαση) των σωματιδίων στην οριζόντια κατεύθυνση είναι οριακή. Μια εξασφαλισμένη σταθερότητα στην κατακόρυφη κατεύθυνση απαιτούνταν για λόγους κόστους και μεγέθους. Τα κενά μεταξύ των πόλων των μαγνητών θα έπρεπε να ελαχιστοποιηθούν για να μειωθεί το μέγεθος του μαγνήτη και της δέσμης, κάτι που σήμαινε ότι η δέσμη θα έπρεπε να είναι καλά εστιασμένη στην κατακόρυφη διεύθυνση και όσο υψηλότερος είναι ο δείκτης πεδίου τόσο καλύτερη είναι η κάθετη εστίαση.

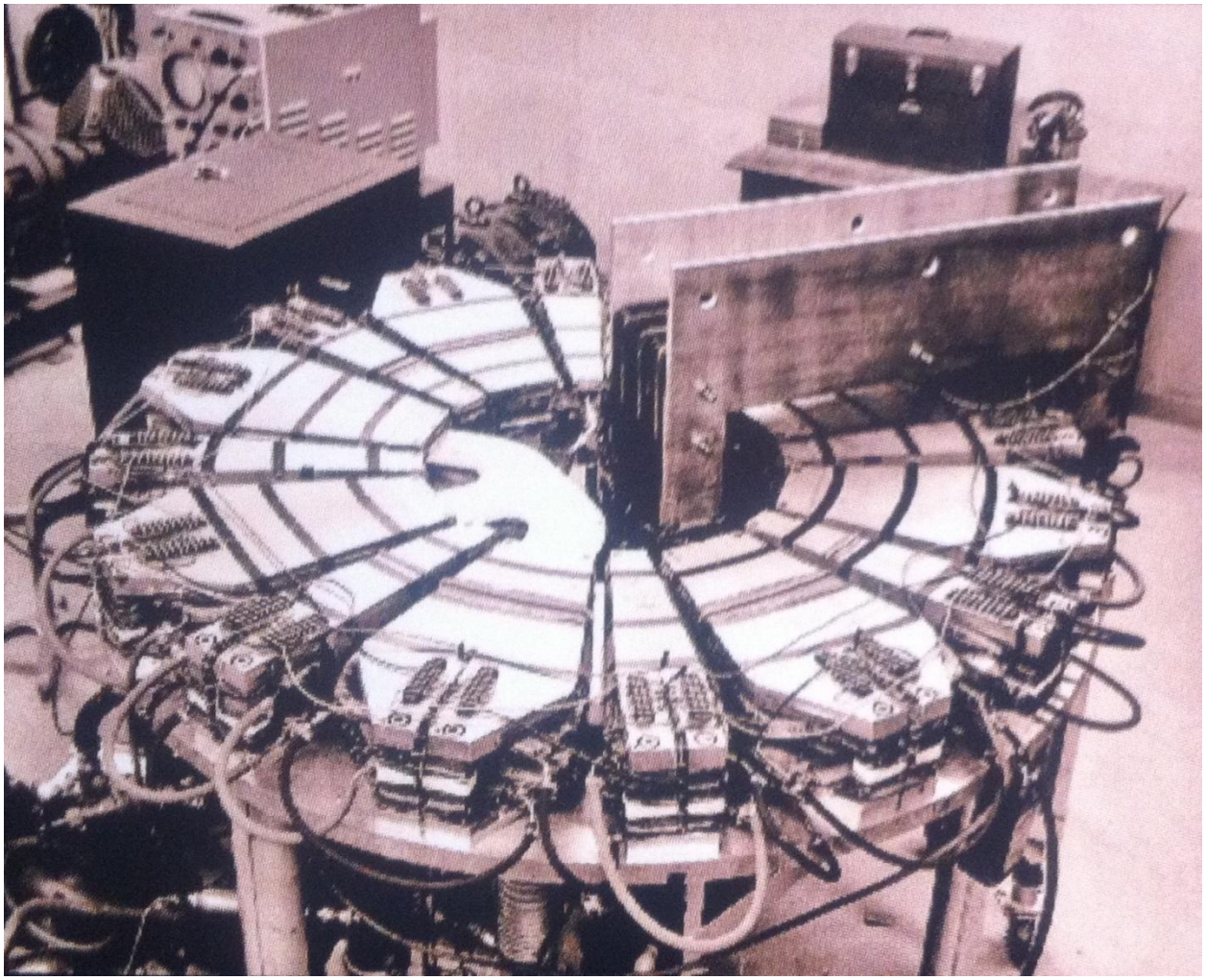
Μέχρι το 1952 οι Ernest Courant, Stanley Livingston και Hartland Snyder ξεχωριστά, ανακαλύπτουν  την αρχή της ισχυρής εστίασης για τις δέσμες σωματιδίων στους κυκλικούς επιταχυντές. Η ισχυρή εστίαση και η σταθεροποίηση φάσης συγκροτούν τα θεμέλια όλων των σύχρονων επιταχυντών υψηλής ενέργειας.



Ωστόσο,πίσω από την εφεύρεση υπάρχει μια ενδιαφέρουσα ανθρώπινη ιστορία αλλά και ενδιαφέρουσα για την εφεύρεση τη ίδια. Η εφεύρεση είχε ήδη πραγματοποιηθεί από τον Νικόλα Χριστόφιλο, έναν πολίτη των ΗΠΑ ελληνικής καταγωγής, που είχε βρεθεί στην Ελλάδα κατά τη διάρκεια του Β 'Παγκοσμίου Πολέμου και δίδαχτηκε φυσική από βιβλία που διανέμονταν από τους Γερμανούς. Γεννήθηκε στη Βοστόνη, από Έλληνες γονείς, μετακόμισε στην Αθήνα και εργάστηκε εκεί ως ηλεκτρολόγος μηχανικός σε μια εταιρεία ανελκυστήρων. Το 1940, αφού το ενδιαφέρον του για τα ραδιόφωνα και τη μετάδοση περιορίστηκε από τις απαγορεύσεις κατά τη διάρκεια της ναζιστικής εποχής, ο Χριστόφιλος απασχολούταν με την επισκευή στρατιωτικών φορτηγών.
Εκείνη την εποχή λοιπόν βρήκε πολύ χρόνο στα χέρια του, τον οποίο εκμεταλλευόταν μαθαίνοντας φυσική μέσω των Γερμανικών βιβλίων. Μετά τον πόλεμο, ο Χριστόφιλος ξεκίνησε τη δική του εταιρεία ανελκυστήρων, αλλά πλέον είχε γίνει ένας πεπειραμένος και εφευρετικός φυσικός. Το 1946, εφηύρε το σύγχροτρο ολομόναχος, αλλά φυσικά, μέχρι τότε είχε ήδη εφευρεθεί από άλλους.
Δικαιώματα ευρεσιτεχνίας του είχαν αναγνωριστεί και δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του απονεμήθηκε το 1956. Το 1949 έγραψε στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια στο Εργαστήριο Ακτινοβολίας (UCRL) στο Berkeley περιγράφοντας την εφεύρεση του για την Εναλλασσόμενη Απόκλιση – Εστιάση, που ο ίδιος ονόμασε «ισχυρή εστίαση» με τον όρο ισχυρή να αναφέρεται στο γεγονός ότι το μήκος κύματος ταλάντωσης είναι μικρό σε σύγκριση με την τροχιά (δακτύλιος) της περιφέρειας.

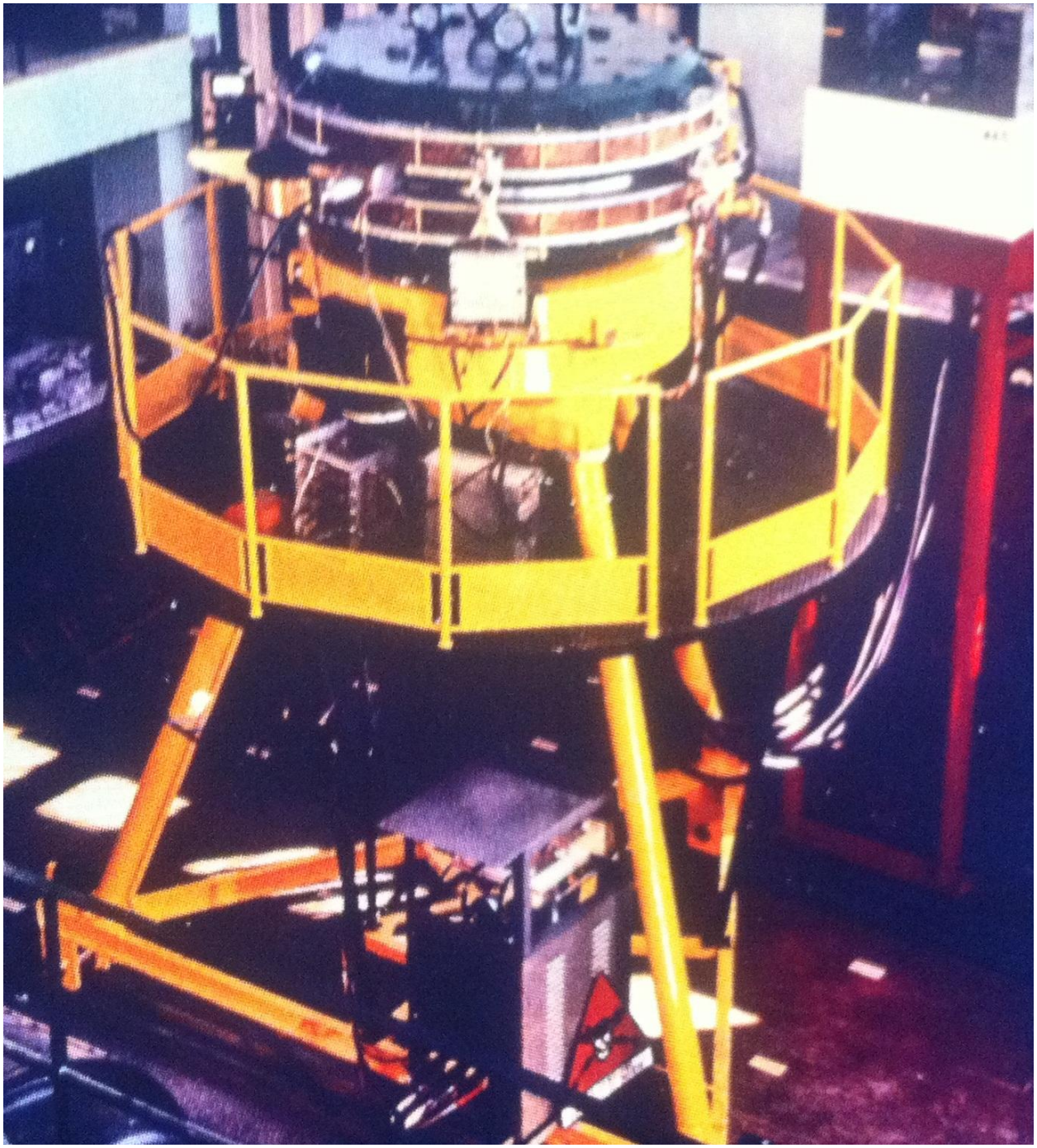
Το Εργαστήριο του Berkeley δεν έδωσε σημασία και αρχειοθέτησε την έκθεση του. Όταν η εφεύρεση της ίδιας αρχής, ανεξάρτητα από τους Courant, Livingston, και Snyder, χαιρετίστηκε ως μία από τις μεγαλύτερες ανακαλύψεις, ο Χριστόφιλος εξακολουθούσε να εργάζεται στην επιχείρηση ανελκυστήρων του στην Ελλάδα. Έτυχε λοιπόν να διαβάσει ένα άρθρο με λεπτομέρειες αυτής της έννοιας. Αμέσως αναγνώρισε ότι ήταν η δική του ιδέα της "ισχυρής εστίασης" και πίστευε ότι κάποιος είχε κλέψει την ιδέα του από την επιστολή του προς το UCRL. Όσο πιο γρήγορα μπορούσε, πέταξε για τις ΗΠΑ, για να δηλώσει την κυριότητα της ανακάλυψης, και παρουσίασε την ευρεσιτεχνία του για να το αποδείξει. Όταν τελικά συναντήθηκε με τους επιστήμονες και τα μέλη της Επιτροπής Ατομικής Ενέργιας (AEC), που παραδέχτηκε την αξίωσή του για την εφεύρεση, του καταβλήθηκε η αμοιβή των $ 10.000 για τη χρήση της ιδέας του. Τελικά, ο Χριστόφιλος εντάχθηκε στην ομάδα BNL και είχε αρκετές άλλες συνεισφορές στην επιστήμη, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης μιας συσκευής που ονομάζεται Astron στο Εργαστήριο Lawrence Livermore.

Το 1956 στον όμιλο ερευνών των Πανεπιστημιών Midwestern, ο πρώτος επιταχυντής σταθερού πεδίου εναλλασσόμενης απόκλισης FFAG (Fixed Field Alternating Gradient). Η ιδέα ανήκει εξίσου στους Tihiro Ohkawa, Andrei Kolomensky και Keith Symon. Μια διαφορετική εκδοχή επινοήθηκε νωρίτερα από τον Llewellyn Thomas, το 1938.



Το 1959 κατασκευάζεται το μοντέρνο συγχροτρο. Τα δύο πρώτα σύγχροτρα πρωτονίων που χρησιμοποιούν ισχυρή εστίαση( PS στο CERN και AGS στο BNL) είναι γεγονός. Ένα σύγχροτρο ηλεκτρονιών που χρησιμοποιεί ισχυρή εστίαση χτίστηκε επίσης 5 χρόνια νωρίτερα στο πανεπιστήμιο Cornell.

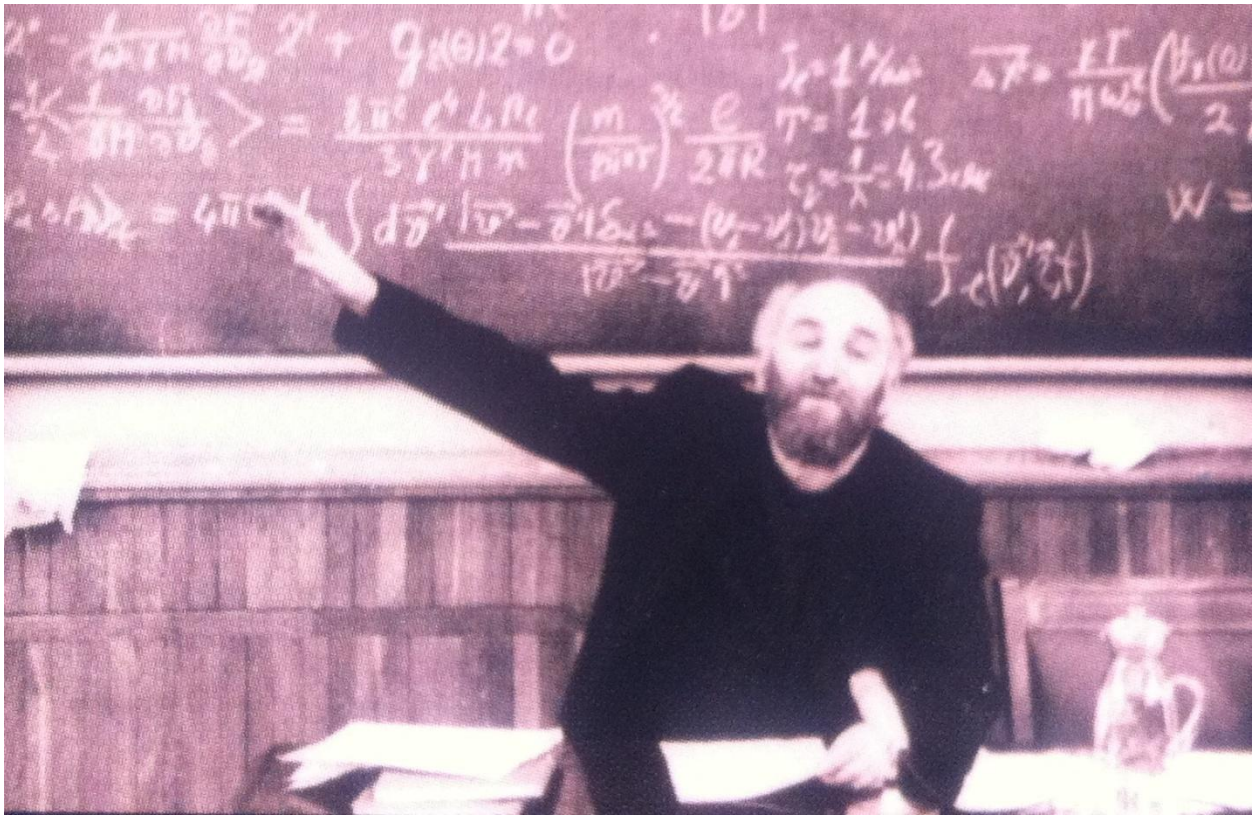
Το 1961 ο ADA (Anello Di Accumulazione), ο πρώτος επιταχυντής ηλεκτρονίων ποζιτρονίων κατασκευάζεται στο Frascati της Ιταλίας. Δύο ακόμα επιταχυντές ηλεκτρονίων ποζιτρονίων ακολουθούν, ο Princeton – Stanford Collider στις Ηνωμένες Πολιτείες και ο VEP-1 στη Ρωσία, κάτι που οδηγεί στην αυξανόμενη εξέλιξη των επιτάχυντών αυτού του είδους ανα τον κόσμο.



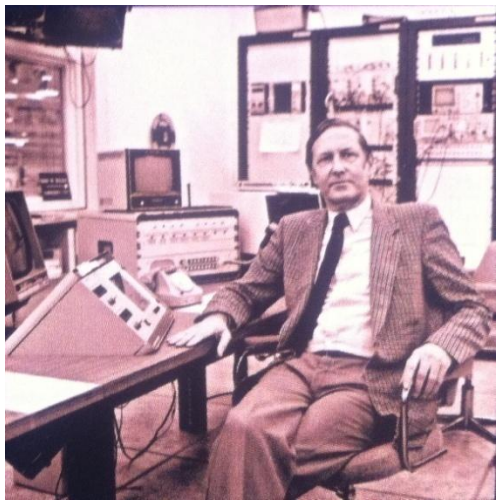
Το 1964 ο Astron, ο πρώτος γραμμικός επιταχυντής επαγωγής προτείνεται από τον Χριστόφιλο για πυρηνική σύντηξη. Η κατασκευή του γίνεται στο Εργαστήριο Ακτινοβολίας του Lawrence που αργότερα μετονομάστηκε σε Εθνικό Εργαστήριο Lawrence Livermore.

Νικόλας Χριστόφιλος

Το 1966 ο Gersh Budker εφευρίσκει την ψύξη δέσμης ηλεκτρονίων στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής στη Ρωσία, ενω το 1968 ο Simon van der Meer εφευρίσκει την ψύξη στοχαστικής δέσμης. Μια τεχνική που επιτρέπει την ψύξη δεσμών αντιπρωτονίων.

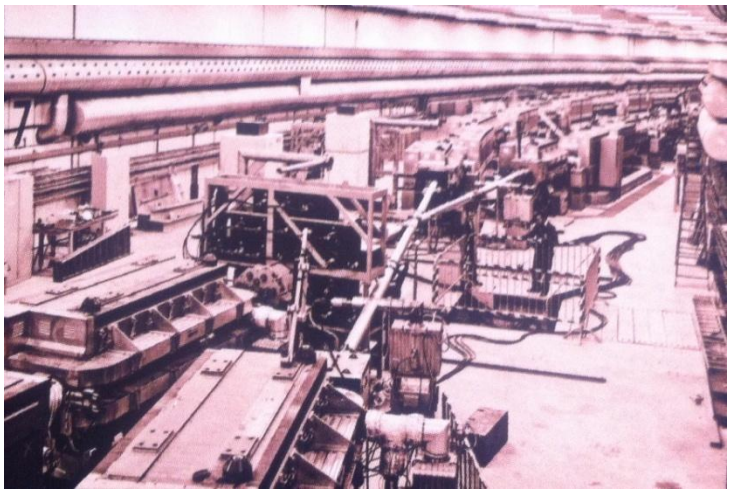


Gersh Budker

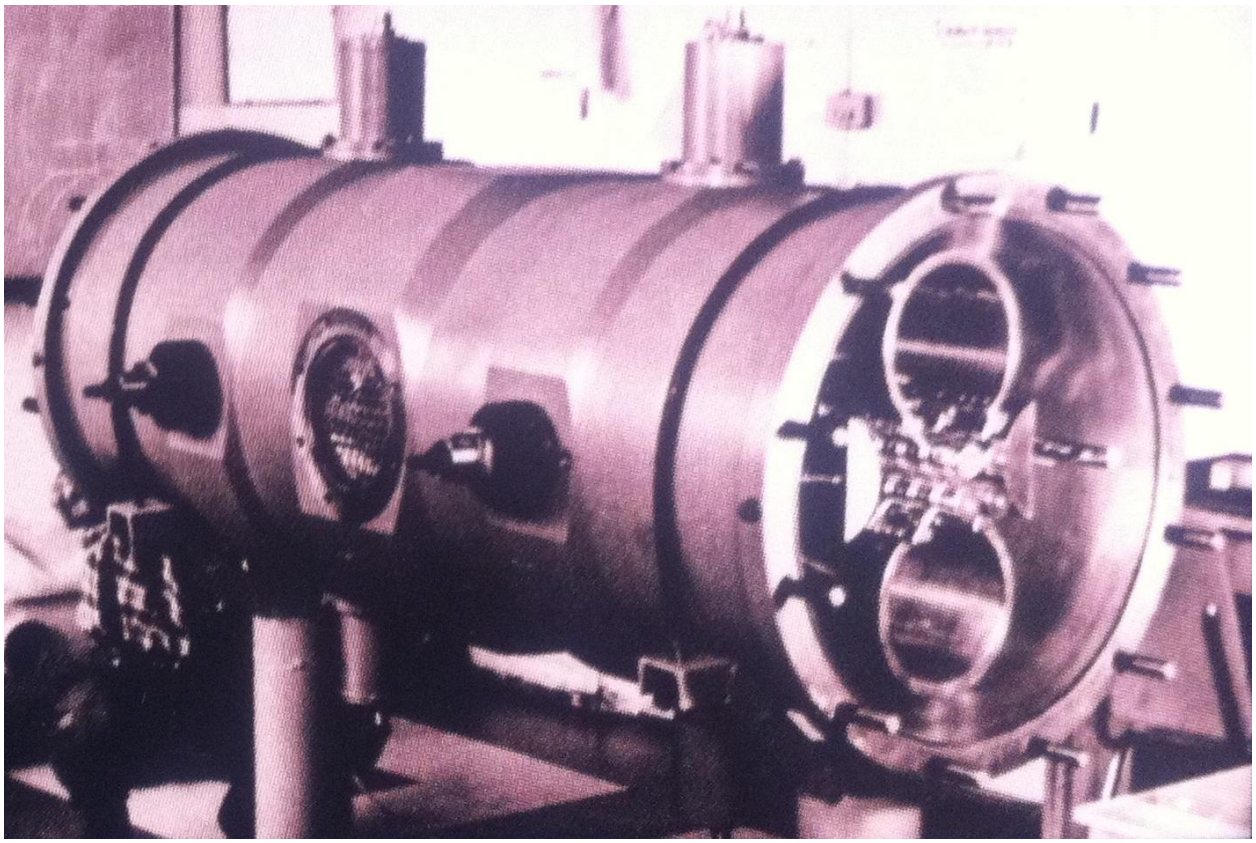


Simon van der Meer

Το 1969 τέμνοντας τα πρώτα «Αποθηκευτικά Δαχτυλιδιά» (Storage Rings), ξεκινά τη λειτουργία του ο πρώτος μεγάλος επιταχυντής πρωτονίων-πρωτονίων στο CERN.

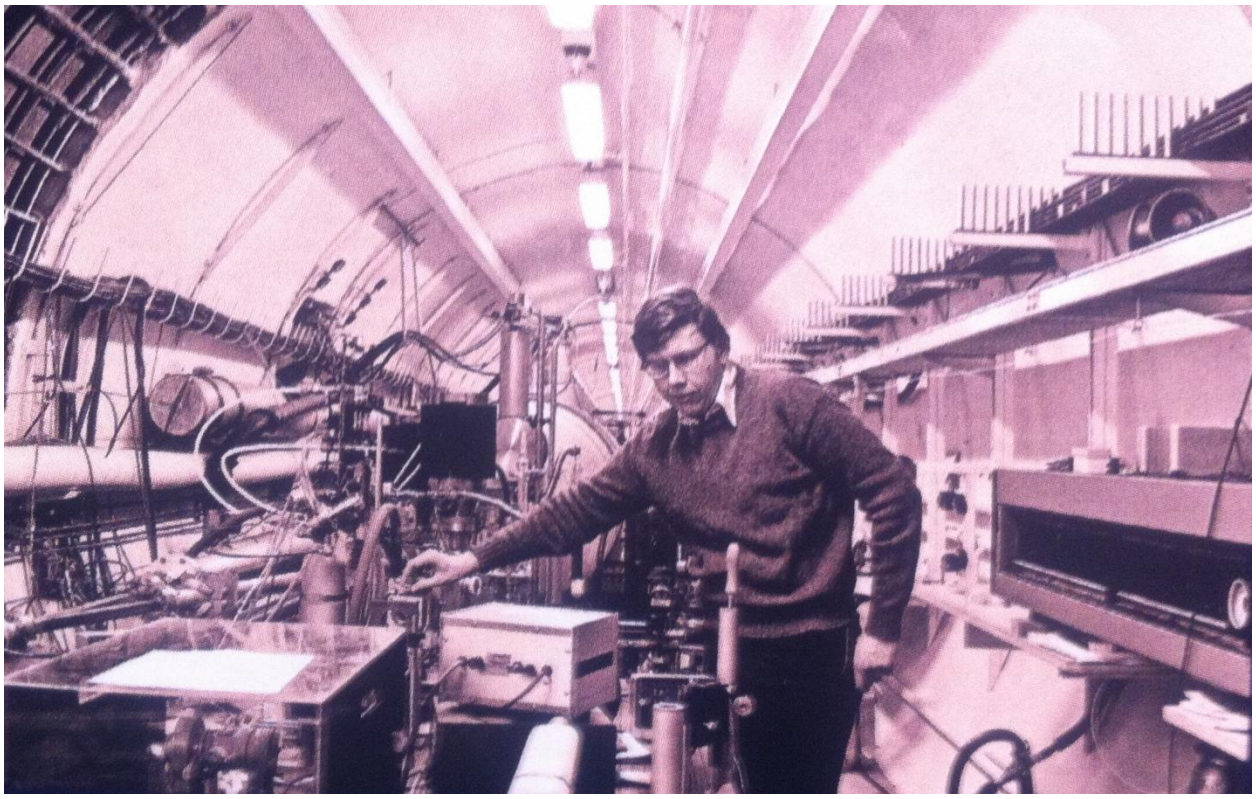


Το 1970 ο Vladimir Teplyakov και ο Ilya Kapchinskii εφευρίσκουν τον γραμμικό επιταχυντή ραδιοσυχνοτήτων με τετραπολικούς μαγνήτες. Ο πρώτος RFQ (Radio Frequency Quadrupole) κατασκευάζεται το 1972 στο ινστιτούτο Φυσικής Υψηλών Ενεργειών στη Ρωσία.



RFQ

Το 1971 ο John Madey εφευρίσκει και κατασκευάζει το πρώτο λέιζερ ελέυθερων ηλεκτρονίων στο πανεπιστήμιο του Stanford στην Καλιφόρνια της Αμερικής.



John Madey

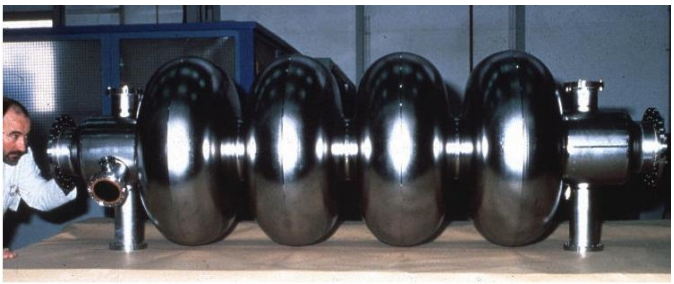
Το 1981 οι συγκρούσεις πρωτονίων – αντιπρωτονίων στο CERN οδηγούν στην ανακάλυψη των μποζονίων Z και W.

Το 1983 ο Tevatron, ο πρώτος μεγάλος επιταχυντής  που χρησιμοποιεί τεχνολογία υπεραγώγιμων μαγνητών για συγκρούσεις δεσμών πρωτονίων – αντιπρωτονίων ανατίθεται στο Fermilab.

Το 1989 ο πρώτος γραμμικός επιταχυντής συγκρούσεων δεσμών SLC, ιδέα που αναπτύχθηκε από τον Maury Tigner το 1965, προτείνεται από τον Burton Richter και κατασκευάζεται στο SLAC.

Το 1989 επίσης ξεκινά η κατασκευή του Superconducting Super Collider, που υπολογίζεται να είναι ο μεγαλύτερος επιταχυντής στον κόσμο, το πρόγραμμα αυτό όμως διακόπτεται από το κονγκέσο των Ηνωμένων Πολιτειών το 1993. Τα ερευνητικά κέντρα είχαν μεγαλώσει πλέον τόσο με το πέρασμα των δεκαετιών ώστε μόνο κυβερνήσεις μπορούσαν να χρηματοδοτήσουν τη λειτουργεία τους. Η ιστορία λοιπόν της φυσικής σωματιδίων υψηλής ενέργειας, όπως και οι μεγαλύτεροι κλάδοι της επιστήμης, ήταν ανεμιγμένοι με την πολιτική. Για καλό ή για κακό σκοπό.

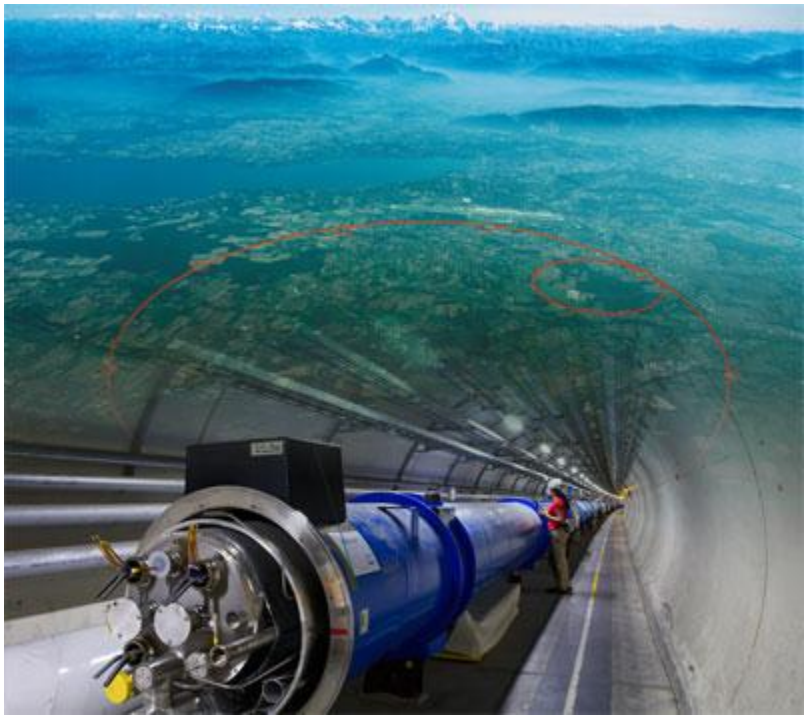
Το 1994 κατασκευάζεται ο CEBAF, ο πρώτος επιταχυντής που χρησιμοποιεί τεχνολογία υπεραγώγιμης ραδιοσυχνότητας, στο Εργαστήριο Jefferson, όπως ονομάστηκε αργότερα.



Το 2005 ο Flash, το πρώτο λέιζερ ελεύθερων ηλεκτρονίων ακτίνων χ κατασκευάζεται στο DESY της Γερμανίας.

DESY

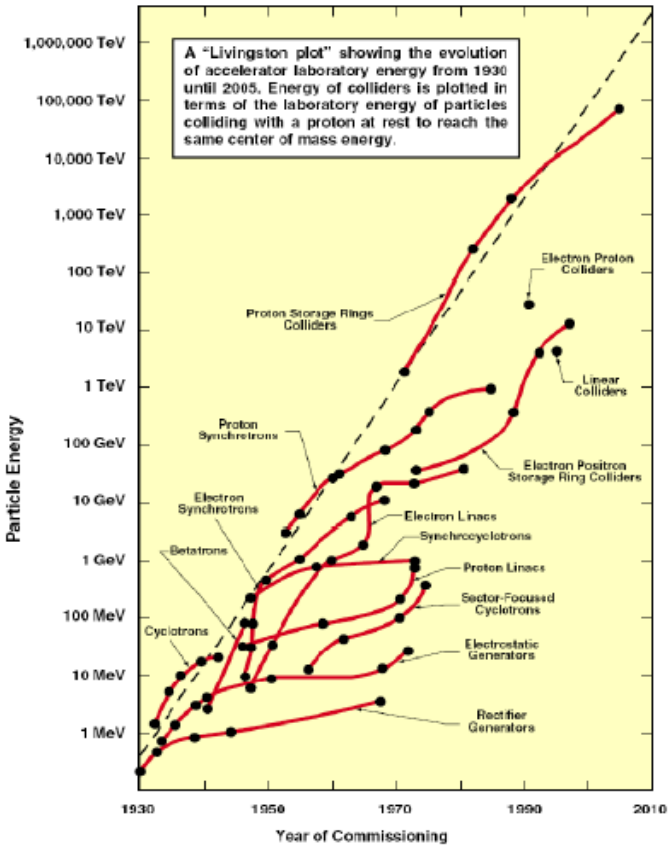
Το 2008 ο μεγαλύτερος επιταχυντής στον κόσμο  LHC (Large Hadron Collider), ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων αρχίζει τη λειτουργία του στο CERN της Ελβετίας. Η περιφέρεια του έχει μήκος 27 km!



Η επιταχυντές plasma και laser διεγείρουν τη φαντασία των επιστημόνων. Μια επιτάχυνση χίλιες φορές μεγαλύτερη από αυτές των συμβατικών μέχρι τώρα μέσων έχει επιδειχθεί. Αυτές οι προχωρημένες ιδέες προκαλούν τους κατασκευαστές επιταχυντών.

Εξέλιξη της ενέργειας των επιταχυντών

Το διάγραμμα “Livingston” δείχνει εκθετική αύξηση της ενέργειας με το χρόνο**.** Η ενέργεια αυξάνεται μία τάξη μεγέθους κάθε 6-10 χρόνια. Νέες τεχνολογίες αντικαθιστούν τις παλιές για επίτευξη υψηλότερων ενεργειών, έως ότου επέρχεται κορεσμός και αντικατάσταση με νέα τεχνολογία. Η ενέργεια δεν είναι το μόνο που απασχολεί τους επιστήμονες καθώς ενδιαφέρον μέγεθος είναι και η ένταση δέσμης αλλά και η διατομή της.



## Όρισμός

Αν θέλουμε να επιχειρήσουμε να δώσουμε έναν γενικό ορισμό, επιταχυντές σωματιδίων ονομάζονται ειδικές πειραματικές και μηχανικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την επιτάχυνση σωματιδίων σε μεγάλες ταχύτητες που πλησιάζουν την ταχύτητα του φωτός. Οι επιταχυντές αυτοί επιταχύνουν σωματίδια όπως ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, πρωτόνια κ.α. κατα μήκος μίας τροχιάς, ευθείας ή κυκλικής. Τα σωματίδια αφού έχουν φτάσει να έχουν μεγάλη ταχύτητα συγκρούονται με σταθερούς στόχους ή μεταξύ τους ανάλογα με το είδος τους επιταχυντή. Με αυτόν τον τρόπο οι επιστήμονες εξάγουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με μικρότερα συστατικά της ύλης. Από τις συγκρούσεις δημιουργούνται νέα σωματίδια των οποίων οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά (φορτίο, ορμή, μάζα, κλπ.) καταγράφονται από ειδικές ανιχνευτικές διατάξεις  που βρίσκονται στα σημεία των συγκρούσεων. Καθημερινές εφαρμογές βρίσκονται σε συσκευές τηλεόρασης, ραντάρ και γεννήτριες ακτίνων Χ. Τα σωματίδια που επιταχύνται περιέχονται σε έναν σωλήνα κενού έτσι ώστε να μην χάνουν ενέργεια χτυπώντας σε μόρια αέρα.

Η ιστορία των επιταχυντών ξεκινά με τους επιστήμονες να κατασκευάζουν μικρές συσκευες που επιταχύνουν σωματίδια γραμμικά. Αργότερα δημιουργούνται γεννήτριες που επιταχύνουν ηλεκτρόνια λόγω υψηλής τάσης και στη συνέχεια ανακαλύπτεται ο τρόπος για τη συνεχή επιτάχυνση των σωματιδίων σε ευθεία γραμμή. Η κοινή λογική του ανθρώπου τον οδήγησε στους κυκλικούς επιταχυντές αφού ήταν τόσο πρακτικοί όσο και οικονομικοί. Δεν χρειαζόταν αλλά ήταν και συνάμα αδύνατο να κατασκευάσουν την ίδια διάταξη ξανά και ξανά σε ευθεία γραμμή που δεν θα τελείωνε ποτε! Αρκούσε μόνο να της δώσουν κυκλικό σχήμα!

Όπως αναφέραμε λοιπόν, μια πρώτη βασική διάκριση στους επιταχυντές είναι ανάμεσα σε *γραμμικούς* και *κυκλικούς* επιταχυντές, που καθορίζεται απο τη γεωμετρία του επιταχυντή (ευθύγραμμος ή κυκλικός). Οι δεύτεροι έπονται των πρώτων ιστορικά αλλά ακόμα και σήμερα γραμμικοί επιταχυντές είναι αυτοί οι οποίοι δίνουν την αρχική επιτάχυνση στα σωματίδια για να εισέλθουν σε κυκλικές διατάξεις.

Έπειτα, υπάρχουν δύο μέθοδοι για να επιτευχθεί η σύγκρουση των σωματιδίων. Η πρώτη χρησιμοποιεί επιταχυνόμενα σωματίδια που προσπίπτουν σε κάποιο ακίνητο στόχο που μπορεί να είναι στερεός, υγρός, ή αέριο, π.χ. υγρό υδρογόνο. Αυτά είναι τα *πειράματα σταθερού στόχου*. Στη δεύτερη, δύο διαφορετικές επιταχυνόμενες δέσμες σωματιδίων συγκρούονται. Τα σωματίδια εδώ κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις σε ελαφρά διαφορετικές τροχιές. Ένας τέτοιος επιταχυντής ονομάζεται *επιταχυντής συγκρουομένων δεσμών*.

Σύμφωνα με τον τύπο του Einstein $E = mc^2$, η μάζα είναι ένα είδος ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε μάζα και αντίστροφα! Στους επιταχυντές, αυτό χρησιμοποιείται σε μια σύγκρουση σωματιδίων ώστε να μετατραπεί η κινητική ενέργεια σε μάζα. Με αυτόν τον τρόπο, νέα σωματίδια μπορούν να δημιουργηθούν στις συγκρούσεις των σωματιδίων με σχετικά υψηλές ταχύτητες.

Στην έρευνα νέων βαριών σωματιδίων, είναι σημαντικό να είμαστε ικανοί να επιταχύνουμε τα σωματίδια σε υψηλές ενέργειες. Όσο υψηλότερη είναι η ενέργεια του αρχικού σωματιδίου τόσο βαρύτερα είναι τα σωματίδια που μπορούν να παραχθούν στις συγκρούσεις των σωματιδίων.

Εαν θέλαμε να κατηγοριοποιήσουμε τους επιταχυντές και με άλλα κριτήρια άλλες διακρίσεις είναι οι ακόλουθες:

Με βάση τις αρχές λειτουργίας:

Βήτατρα (betatrons), κύκλοτρα (cyclotrons), μίκροτρα (microtrons), γραμμικοί επιταχυντες (linacs – **lin**ear **ac**celerators ), σύγχροτρα (synchrotrons), ενισχυτές (boosters), συσσώρευτικοί δακτύλιοι (accumulator rings), αποθηκευτικοί δακτύλιοι (storage rings), επιταχυντές διαμέσου πλάσματος (plasma driven accelerators)

Με βάση την ενέργεια:

Υψηλής (μερικά GeV), μέσης (μερικά MeV), χαμηλής (κάτω από MeV)

Με βάση την ένταση της δέσμης:

Υψηλής (μερικά Amps), μέσης (μερικά mA), χαμηλής (κάτω από mA)

Με βάση το είδος των σωματιδίων:

Λεπτονικοί (ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων, μυονίων), Αδρονικοί (πρωτονίων, βαρέων ιόντων)

Με βάση τον πειραματικό σκοπό:

Συγκρουστήρες (colliders), εργοστάσια σωματιδίων (factories), πηγές ακτινοβολίας σύγχροτρον (synchrotron light sources), πηγές νετρονίων διάσπασης (spallation neutron sources), ιατρικοί (medical accelerators),πολλαπλασιαστές ενέργειας (energy amplifiers)

Μπορούμε να επιταχύνουμε ηλεκτρόνια διότι είναι φορτισμένα σωματίδια και έλκονται από θετικά μεταλλικά επίπεδα που έχουν θετική τάση. Με την ίδια ιδέα, μπορούμε να επιταχύνουμε θετικά φορτία όπως πρωτόνια. Απλά αντιστρέφοντας τη θετική με αρνητική τάση. Επομένως, μπορούμε να επιταχύνουμε ποζιτρόνια (ηλεκτρόνια με θετικό φορτίο) με την τάση να είναι αντεστραμμένη. Σε έναν επιταχυντή όλα ξεκινάνε από την παραγωγή των σωματιδίων τα οποία στην συνέχεια θα επιταχυνθούν. Στους πρώτους επιταχυντές επιταχύνονταν ηλεκτρόνια. Στη συνέχεια και μέχρι και σήμερα ηλεκτρόνια ποζιτρόνια, πρωτόνια και αντιπρωτόνια και άλλα σωματίδια επιταχύνονται για να συγκρουστούν για τις ανάγκες των πειραμάτων.

Τα ηλεκτρόνια πρέπει να ξεφύγουν από το άτομο και για αυτό το λόγο σε ένα μεταλλικό σύρμα μεταφέρεται ενέργεια μέσω θερμότητας και έτσι τα ηλεκτρόνια του σύρματος αποκτούν αρκετή ενέργεια ώστε να ξεφύγουν από τα άτομα. Στη συνέχεια αυτά επιταχύνονται.

Για την παραγωγή ποζιτρονίων ηλεκτρόνια συγκρούονται με στόχο από βαρύ μέταλλο και από τη σύγκρουση παράγονται εκ νέου ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια. Σε επιταχυντές όπως ο LEP

(Large Electron Positron Collider) τα ηλεκτρόνια διαχωρίζονται από τα ποζιτρόνια με τη βοήθεια μαγνητών λόγω των αντίθετων φορτίων τους.

Παραγωγή πρωτονίων οι επιστήμονες επιτυγχάνουν με το ιονισμό ενός ατόμου υδρογόνου, ο πυρήνας δηλαδή χωρίς τα ηλεκτρόνια του.

Αντιπρωτόνια μπορούν να δημιουργηθούν μόνο σε συνδυασμό με ένα άλλο πρωτόνιο.Το εισερχόμενο πρωτόνιο συγκρούεται με ένα πυρήνα στόχου πρωτονίων ή ένα νετρόνιο και παραδίδει κάποια από την ενέργεια του και από αυτή την ενέργεια, ένα ζευγάρι πρωτονίων-αντιπρωτονίων παράγεται που φέρουν την ορμή.

Λειτουργία παρόμοια με αυτή των επιταχυντών όπου τα ηλεκτρόνια αφού παραχθούν από ένα μεταλλικό σύρμα επιταχύνονται για να συγκρουστούν με ένα σταθερό στόχο όπου εκεί υπάρχει ένας ανιχνευτής, βρίσκουμε στις τηλεοράσεις και τις οθόνες των υπολογιστών. Αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια βγαίνουν απ' το σύρμα που θερμαίνεται και επιταχύνονται μέσα στο κενό προς ένα θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο. Ηλεκτρομαγνητικά πεδία μετακινούν τη δέσμη πάνω στην οθόνη που στην περίπτωση της τηλεόρασης είναι ο ανιχνευτής. Τα σημεία όπου η δέσμη χτυπάει την οθόνη είναι φωτεινά και έτσι δημιουργείται η εικόνα. Ενα παρόμοιο νήμα χρησιμοποιείται και στους γραμμικούς επιταχυντές. Οι γραμμικοί επιταχυντές επιταχύνουν τα σωματίδια σε πολύ υψηλότερες ενέργειες απ' ότι η τηλεόραση, αλλά η αρχή λειτουργίας είναι η ίδια. Στο γραμμικό επιταχυντή, τα σωματίδια επιταχύνονται από από το ένα ηλεκτρόδιο στο επόμενο, κερδίζοντας ενέργεια από το κάθε ηλεκτρόδιο που περνούν.

## Γραμμικοί επιταχυντές

Χρησιμοποιούνται στα πειράματα σταθερού στόχου αλλά και για σύγκρουση δεσμών σωματιδίων που επιταχύνονται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Αποτελούν επίσης το πρώτο στάδιο επιτάχυνσης για τους κυκλικούς επιταχυντές.

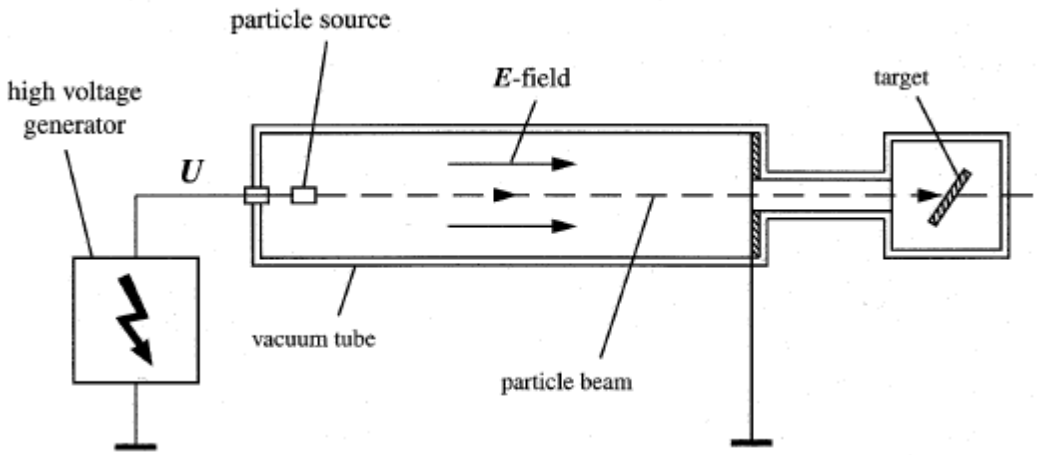
Σταθερός στόχος:

Τροφοδότης σ' ένα κυκλικό επιταχυντή:

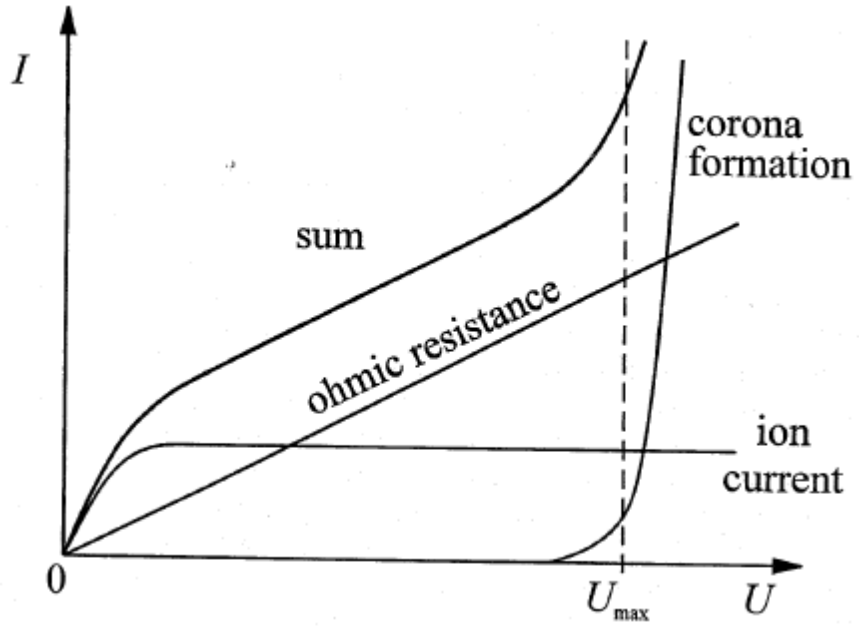
Γραμμικός επιταχυντής συγκρουομένων δεσμών (linac collider):

Ενα από τα πρωτα πειράματα σταθερού στόχου που αποτέλεσε στη συνέχεια πρότυπο για τη βασική λειτουργία των γραμμικών επιταχυντών ήταν το πείραμα με το χρυσόχαρτο του Rutherford, κατά το οποίο μία ραδιενεργή πηγή παρείχε τα σωματίδια άλφα με μεγάλη ενέργεια που συγκρούονται με ένα σταθερό στόχο από χρυσόχαρτο. Ο ανιχνευτής ήταν μία σπινθηρίζουσα οθόνη από θειούχο ψευδάργυρο.

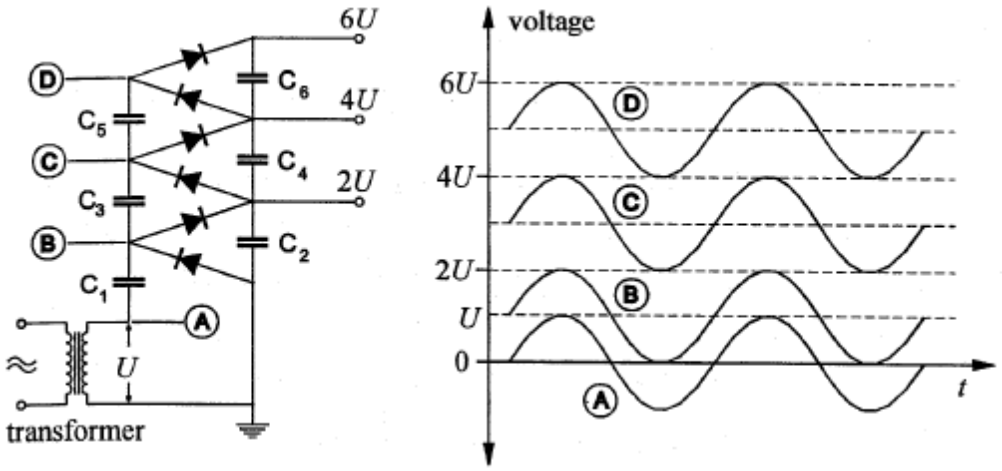
The direct Voltage Accelerator – Ηλεκτροστατικός Επιταχυντής.




Ο απλούστερος γραμμικός επιταχυντής ήταν ο επιταχυντής τάσης που αποτελείτω από δύο ηλεκτρόδια μεταξύ των οποίων εφαρμοζόταν μία διαφορά δυναμικού. Τα ηλεκτρόνια από το ένα ηλεκτρόδιο λόγω της τάσης μεταφέρονται στο άλλο όπου εκεί υπάρχει ένα σταθερός στόχος. Το μέγιστο δυναμικό που μπορεί να δημιουργηθεί δίνει τη μέγιστη ενέργεια που μπορεί να επιτευχθεί. Άρα η τάση είναι αυτή που καθορίζει το ενεργειακό όριο. Υψηλότερες ενέργειες ήταν αδύνατο να επιτευχθούν με αυτού του είδους τους επιταχυντες αφού το ρέυμα αυξάνεται εκθετικά για μεγάλες τάσεις δημιουργώντας σπινθήρες και συνάμα απώλεια της τάσης, ο σχηματισμός κορόνας (corona formation) όπως ονομάζεται.



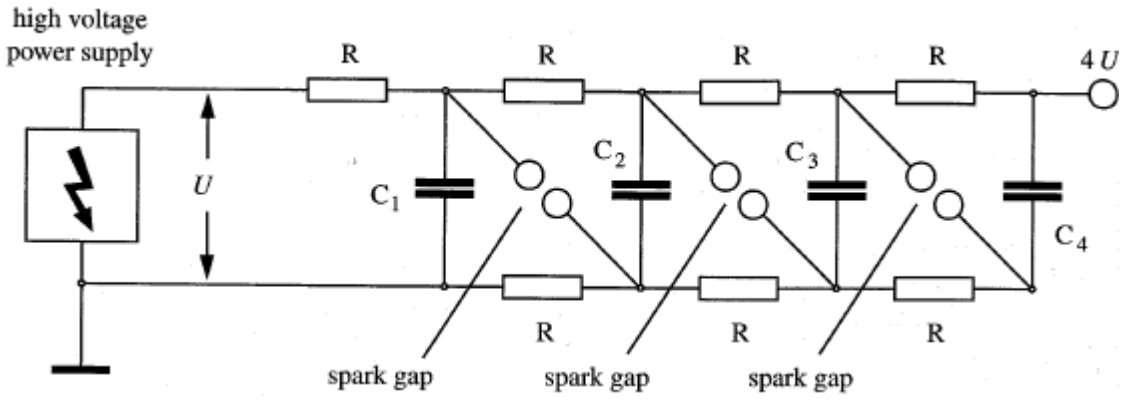

Επιταχυντής Cockroft – Walton




Ο επιταχυντής CW αποτελέιτω από ένα σύστημα ανορθωτών τάσης που διατηρεί το δυναμικό μεταξύ των διόδων ώστε να μην μειώνεται και το αυξάνει από τον ένα ανορθωτή στον άλλον. Έτσι διαδοχικά η τάση αυξάνεται απο U σε 2U, 4U κ.ο.κ. Τα πολλά επίπεδα ανόρθωσης της τάσης, το ένα μετά το άλλο δίνουν τάση 2nU, όπου n ο αριθμός των ανορθωτών. Δυναμικό μέχρι και 4MV είναι δυνατό να παραχθεί στον στη γεννήτρια CW.

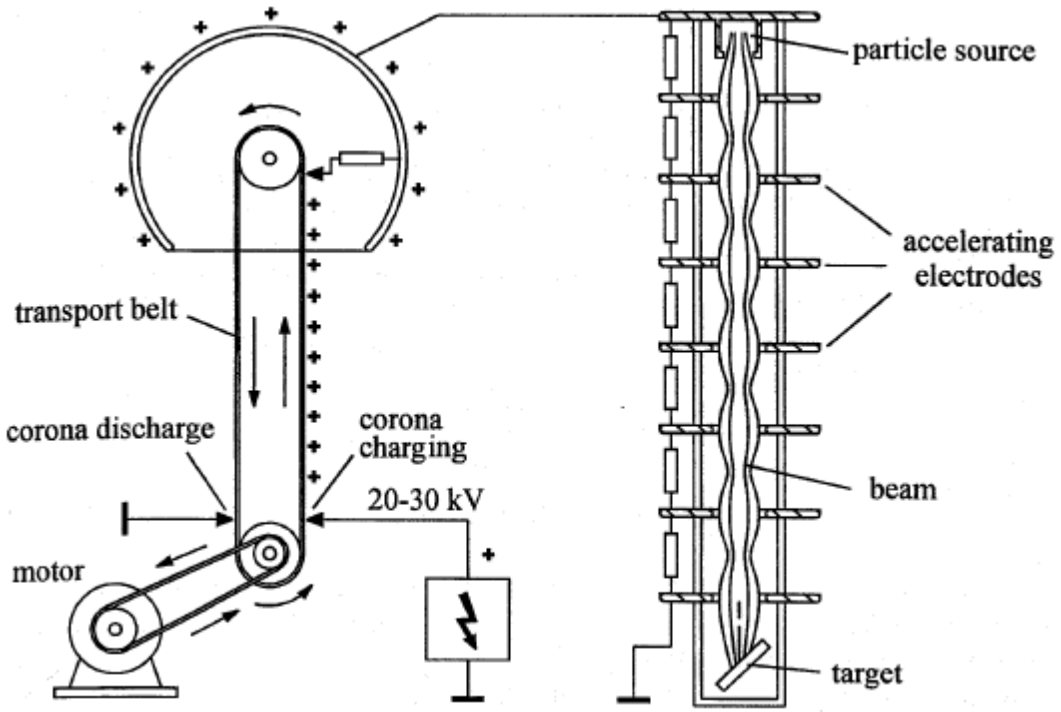
Γεννήτρια Marx

Η γεννήτρια Marx αποτελέιτω από μία σειρά αντιστάσεων και πυκνωτών υπό υψηλή συνεχή τάση V. Όταν δημιουργείτω αποφόρτιση με σπινθήρες λόγω υψηλής αντίστασης, οι n πυκνωτές συνδεδεμένοι δίνουν την ολική τάση nV.

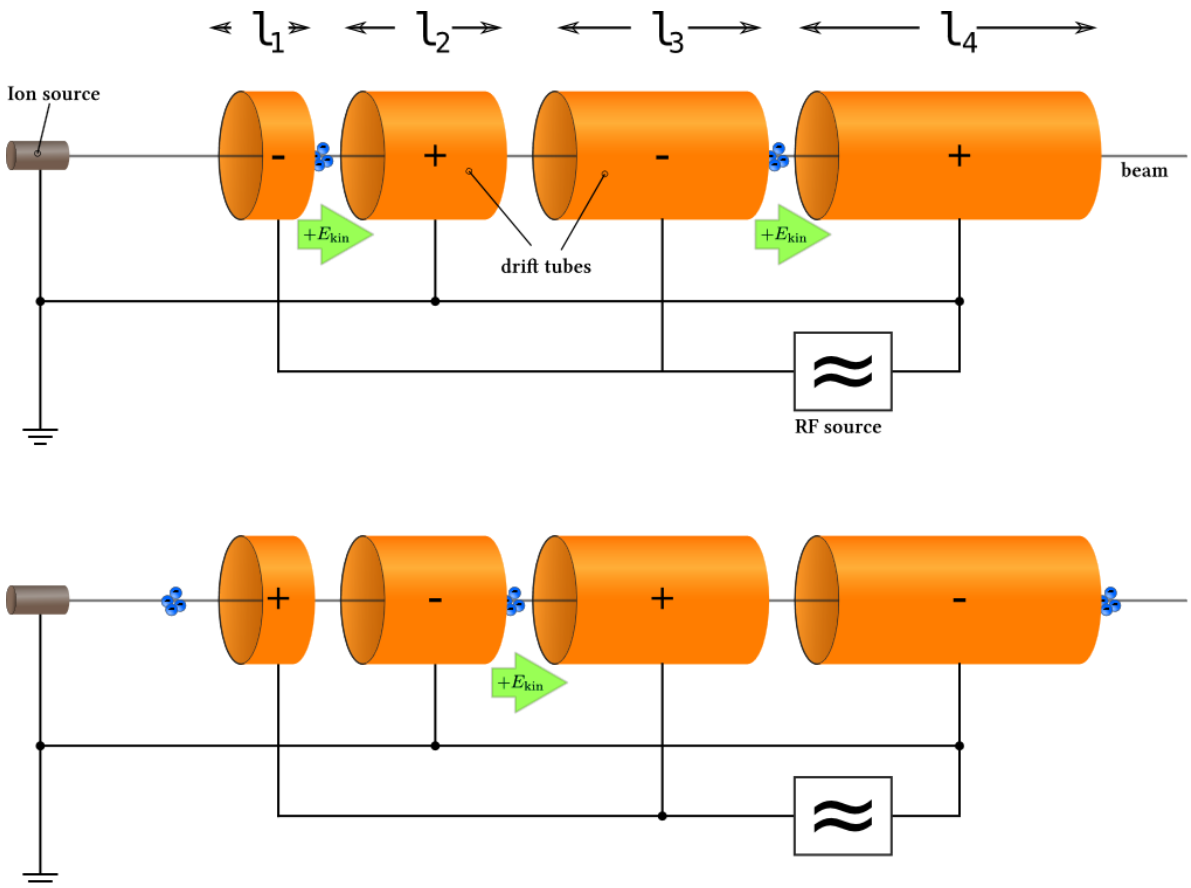


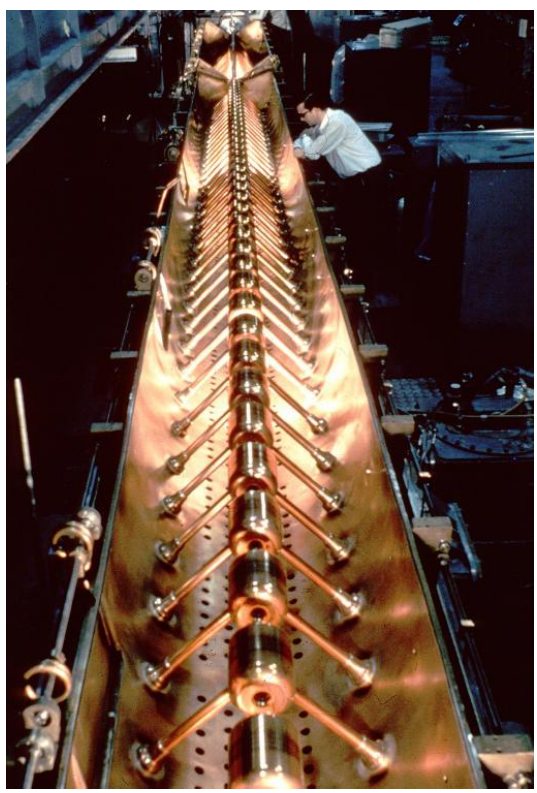

Επιταχυντής Van de Graaff

Κύριο συστατικό του επιταχυντή Van de Graaff ήταν η ζώνη από μονωτικό υλικό που μετέφερε το φορτίο από παραγωγή κορόνας σε έναν αγώγιμο θόλο εως ότου επιτευχθεί το όριο δυναμικού. Αυτος με τη σειρά του είναι συνδεδεμένος με ένα επιταχυντη με μία πηγή σωματιδίων στην αρχή του και πολλά ηλεκτρόδια επιτάχυνσης τοποθετημένα σε σειρά. Τα ηλεκτρόδια λειτουργούν και ώς φακοί εστίασης της δέσμης εώς ένα σημείο. Σε κανονικές συνθήκες ο επιταχυντής Van de Graaff μπορεί να παραγει τάση μέχρι και 2 MV και εάν τοποθετηθεί σε δεξαμενή με μονωτικό αέριο(φρεόν) μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 10 MV.

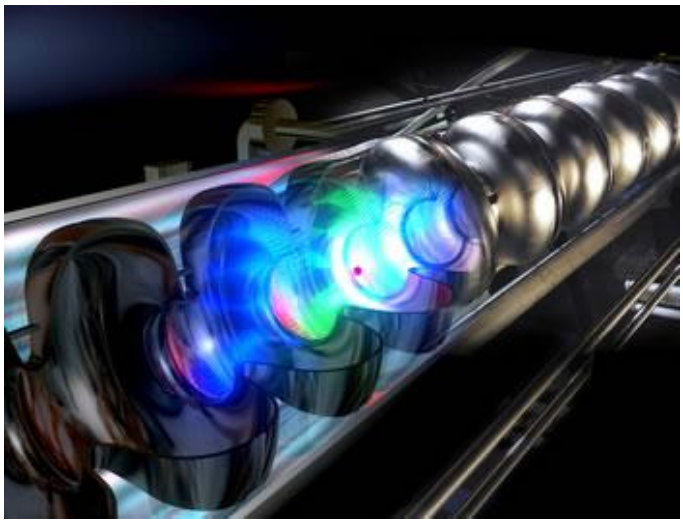



Οι γραμμικοί επιταχυντές όπως έχουμε ήδη αναφέρει νωρίτερα απέκτησαν νόημα όταν η κατέστη δυνατό η επιτάχυνση ενός σωματιδίου να δίνεται σταδιακά και όχι από το αρχικό «λάκτισμα». Με αυτόν τον τρόπο κατάφεραν οι επιστήμονες να επιταχύνουν σωματίδια σε πολύ μεγαλύτερες ενέργειες. Το αποτέλεσμα αυτό επιτυγχάνεται μέσα από πολλά επίπεδα επιτάχυνσης. Ιδίως όταν μιλάμε για γραμμικούς επιταχυντες με μήκος μεγαλύτερο και του ενός χιλιομέτρου. Ο επιταχυντής αποτελείται από πολλούς μικρούς σωλήνες τοποθετημένους στην διάταξη κατα σειρά κοντά ο ένας στον άλλον σε ευθεία γραμμή. Πρόκειται για σωλήνες κενού οπου στα άκρα τους εφαρμόζεται μία τάση. Το σωματίδιο κινείται λόγω της τάσης μέσα στον σωλήνα και την ώρα που θα εξέλθει από αυτόν η υψηλή τάση που θα είναι θετική μεταβάλλεται σε αρνητική την κατάλληλη στιγμή ώστε το σωματίδιο να απωθείται και να επιταχυνεται στιγμιαία από τον ένα σωλήνα στον επόμενο. Η ίδια διαδικασία συμβαίνει μόλις το σωματίδιο εξέλθει και από τον επόμενο σωλήνα. Ετσι μέσα στους σωλήνες το σωματίδιο απλά παρασύρεται λόγω του φορτίου του από τη διαφορα δυναμικού και επιταχύνεται ανάμεσα στους σωλήνες. Αυτα είναι τα επίπεδα επιτάχυνσης.


l1
l2
l3
l4
Ion source
beam
drift tubes
+Ekin
+Ekin
RF source
+Ekin



Οι σωλήνες ολίσθησης αργότερα αντικαταστάθηκαν με κοιλότητες ραδιοσυχνότητας ενω επίσης χρησιμοποιούνται και μαγνήτες που εστιάζουν τη δέσμη.



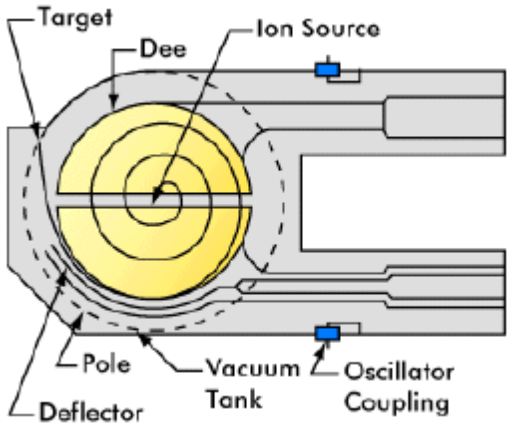
## Κυκλικοί επιταχυντές.

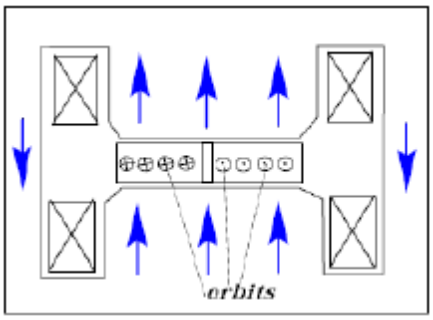
Οι κυκλικοί επιταχυντές βασίστηκαν στη λογική των επιπέδων επιτάχυνσης του γραμμικού επιταχυντή. Όπως στον γραμμικό επιταχυντή ένα σωματίδιο περνά από πολλά επίπεδα επιτάχυνσης έτσι και στους κυκλικούς το σωματίδιο δέχεται επιπλέον επιτάχυνση σε κάθε στροφή. Απλα η ευθεία διάταξη πήρε κυκλικό σχήμα αφού δεν ήταν δυνατόν από άποψη χωρου και χρήματος να κατασκευαστούν γραμμικοι επιταχυντές πολλών χιλιομέτρων.

Το κύκλοτρο, ήταν ο πρώτος κυκλικός επιταχυντής που ικανοποίησε την επιθυμία για κίνηση των σωματιδίων σε κυκλική τροχιά ώστε να χρησιμοποιούν την επιταχυντική διάταξη πολλές φορές. Αποτελείτω από ένα μαγνήτη σιδήρου με ομογενές μανγητικό πεδίο B=2T μεταξύ των πόλων του. Η βασική αρχή του κύκλοτρου ήταν η σταθερή συχνότητα του,

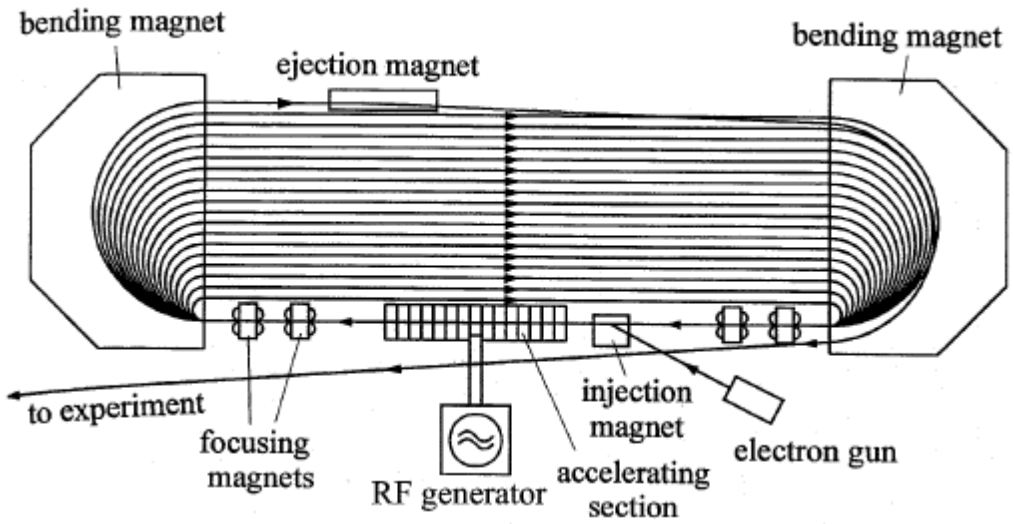
$$\omega_z = \frac{e}{m} B_z,$$

κατα την οποία τα σωματίδια ακολουθούσαν μία κυκλική τροχία ανάμεσα από τους πόλους του μαγνήτη. Το κύκλοτρο δούλευε κυρίως με βαριά σωματίδια τα οποία επιτάχυνε σε χαμηλές ενέργειες και όχι με σχετικιστικά σωματίδια, όπως ηλεκτρόνια που αποκτούν ταχύτητες περίπου ίσες με αυτή του φωτός πολυ γρήγορα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η μάζα και να μειώνεται η συχνότητα αναλογικά.

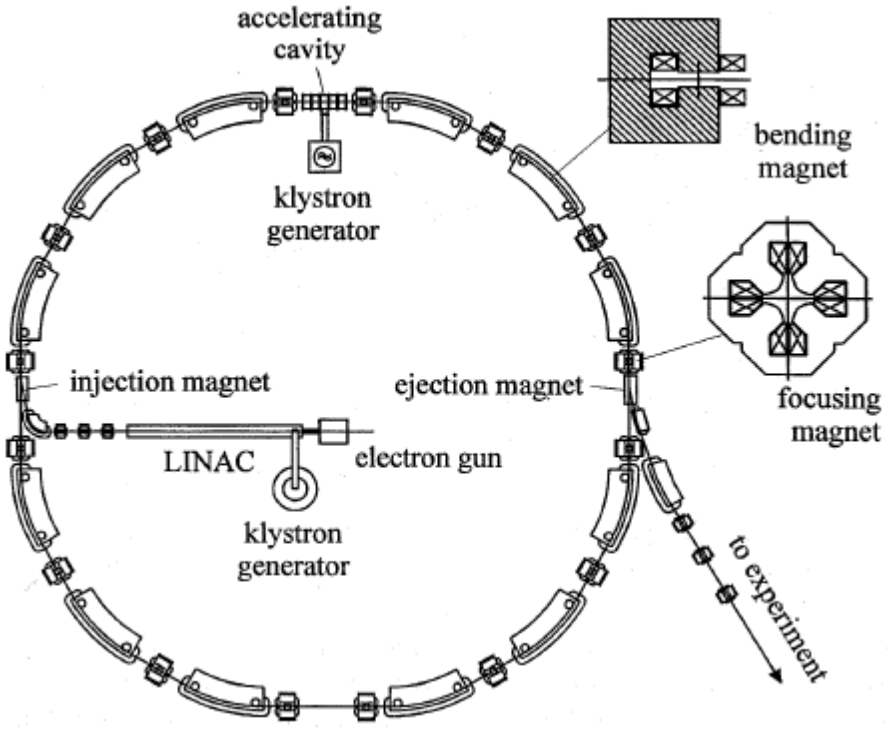



Ένας άλλος κυκλικός επιταχυντής ήταν το μίκροτρο με σχήμα σταδίου ή αγωνιστικής πίστας αποτελούμενος από δύο συμμετρικούς διπολικούς μαγνήτες που στρέφουν τα σωματίδια  και και ευθύγραμμα τμήματα με κοιλότητες ραδιοσυχνοτήτων που τα επιταχύνουν.




Ενω λοιπόν στους κυκλικούς επιταχυντές μέχρι τότε έχουμε σταθερό μαγνητικό πεδίο και η ακτίνα της τροχιάς αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειας, στο Betatron το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται όσο τα σωματίδια επιταχύνονται έτσι ώστε η κυκλική τροχιά να παραμένει στο ίδιο μέγεθος σύμφωνα με το νόμο της επαγωγής. Για ενέργειες όμως ανώτερες του 1 GeV είναι δύσκολο να κατασκευαστεί μαγνήτης τέτοιου μεγέθους, οπότε το μαγνητικό πεδίο έπρεπε να αυξάνεται σε συγχτρονισμό με την ενέργεια ανάγκη από την οποία προέκυψε το σύγχροτρο.



Η συχνότητα αλλάζει με την ενέργεια αλλά παράλληλα το πεδίο αυξάνεται **σύγχρονα** ώστε η ακτίνα των τροχιών να μένει σταθερή. Το μαγνητικό πεδίο παράγεται από αρκετούς διπολικούς μαγνήτες (bending magnets) και αυξάνεται με την ορμή των σωματιδίων. Με αυτούς επιτυγχάνεται και η καμπύλωση της τροχίας ενω τετραπολικοί μαγνήτες (focusing magnets) σχησιμοποιούνται για να εστιάζουν τη δέσμη. Κοιλότητες επιτάχυνσης επιταχύνουν τα σωματίδια.

Στο σύγχροτρο κυριότερο θέμα είναι η καμπύλωση της τροχιάς των σωματιδίων οπότε οι περιοχές επιτάχυνσης μπορούν να είναι λίγες (ακόμα και μία αρκεί).

Υπεραγώγιμοι μαγνήτες χρησιμοποιούνται πλέον για να διατηρήσουν την ακτίνα σε λογικά μεγέθη. Η σωματίδια αποκτούν την ενέργειά τους σταδιακά σε κάθε περιστροφή.

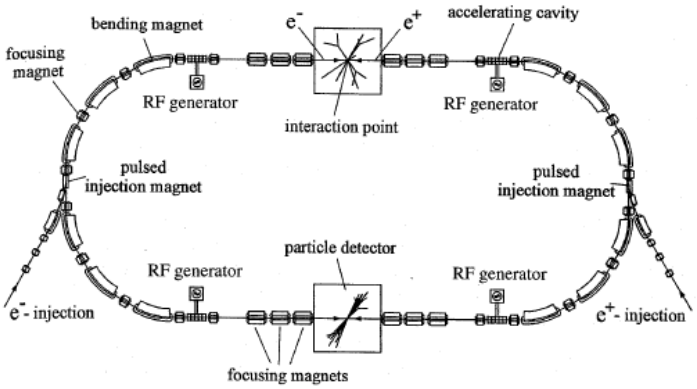
$$\Delta E_{\mathrm{beam}} = eU_{\max} \sin \Psi_0 - \Delta E_{\mathrm{loss}}.$$

Για πρωτόνια η απώλεια ενέργειας είναι ελάχιστη και έτσι υψηλές ενέργειες μπορούν να επιτευχθούν σε αντίθεση με τα ηλεκτρόνια, από τα οποία προκύπτει και η ακτινοβολία των συγχρότρων (synchrotron radiation).

Τα σύγχροτρα δεν μπορούν να επιταχύνουν σωματίδια από E=0 διότι χρησιμοποιώντας χαμηλά ρεύματα δεν γίνεται να παράγεις μαγνητικό πεδίο που θα ξεκινήσει από B=0 και θα αυξηθεί αναλογικά. Μία λύση είναι να ξεκινήσεις από ενέργεια E=200MeV, γιαυτό πάντα υπάρχουν γραμμικοί επιταχυντες ή μίκροτρα για να τα τροφοδοτήσουν.

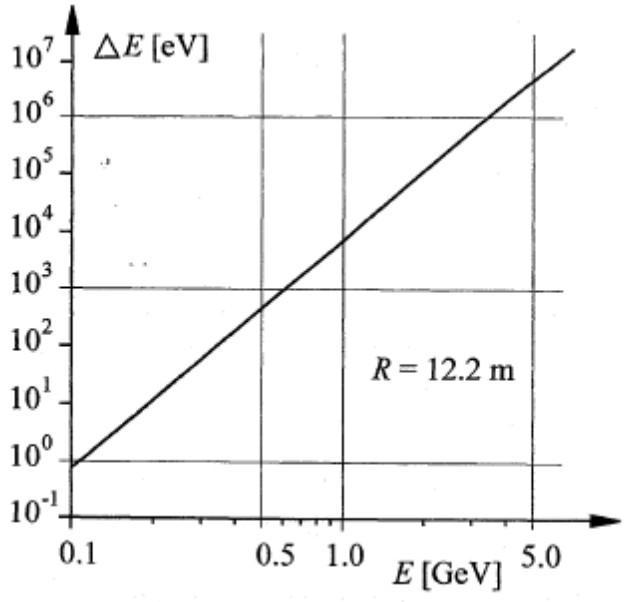
Κατά την κίνηση ενός σωματιδίου μέσα στον δακτύλιο στο τέλος κάθε περιστροφής το μαγνητικό πεδίο πρέπει να ανανεώνεται αλλιώς τα σωματίδια χτυπούν στα τοιχώματα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ένας μαγνήτης γρήγορου ρυθμού, εκτροπέας (kicker), όπως ονομάζεται με διάρκεια παλμού 1μs. Για τον ίδιο λόγο ένας ίδιος τύπος μαγνήτη χρησιμοποιείται για να βγάζει τη δέσμη από τον κύκλο.

Storage Rings – Αποθηκευτικά Δαχτυλίδια



Πρόκειται για παρόμοιες με τον επιταχυντή κυκλικές διατάξεις που η δουλεία τους όμως δεν είναι να επιταχύνουν τα σωματίδια αλλά να τα περιστρέφουν για αρκετές ώρες. Τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια μπορούν να κινούνται στον ίδιο θάλαμο με την ίδια διάταξη λόγω του αντίθετου φορτίου τους. Πολύ λίγα σωματίδια συγκρούονται στα αποθηκευτικά δαχτυλίδια όποτε η ένταση της δέσμης δεν μειώνεται. Σκοπός είναι η σύλλογή πληροφοριών (data-taking run) αλλά και η συγκέντρωση των σωματιδίων σε ομάδες.Τα σωματίδια κρατούν σταθερή ενέργεια χωρίς αναπλήρωση. Τα αποθηκευτικά δαχτυλίδια έχουν 3 φορές χαμηλότερη πίεση κενού από τον μεγάλο δακτύλιο του επιταχυντή (απαιτείται πίεση κάτω από $-10^7$Pa) ενώ απαιτείται πολύ προσεκτική καθοδήγηση της δέσμης. Η ύπαρξη τομέων επιτάχυνσης υψηλής συχνότητας είναι αναγκαία παρόλο που τα σωματίδια κινούνται με σταθερή ταχύτητα και αυτό διότι ακτινοβολούν ενέργεια (ιδίως τα ηλεκτρόνια) που πρέπει να αποκατασταθεί. Τα σωματίδια μπαίνουν στα αποθηκευτικά δαχτυλίδια με καθορισμένη ενέργεια απο τους γραμμικούς επιταχυντές μέσω ενός μαγνήτη βηματοδότη. Η δέσμη αποθηκεύεται για αρκετό διάστημα (stored), εξού και το όνομα τους.

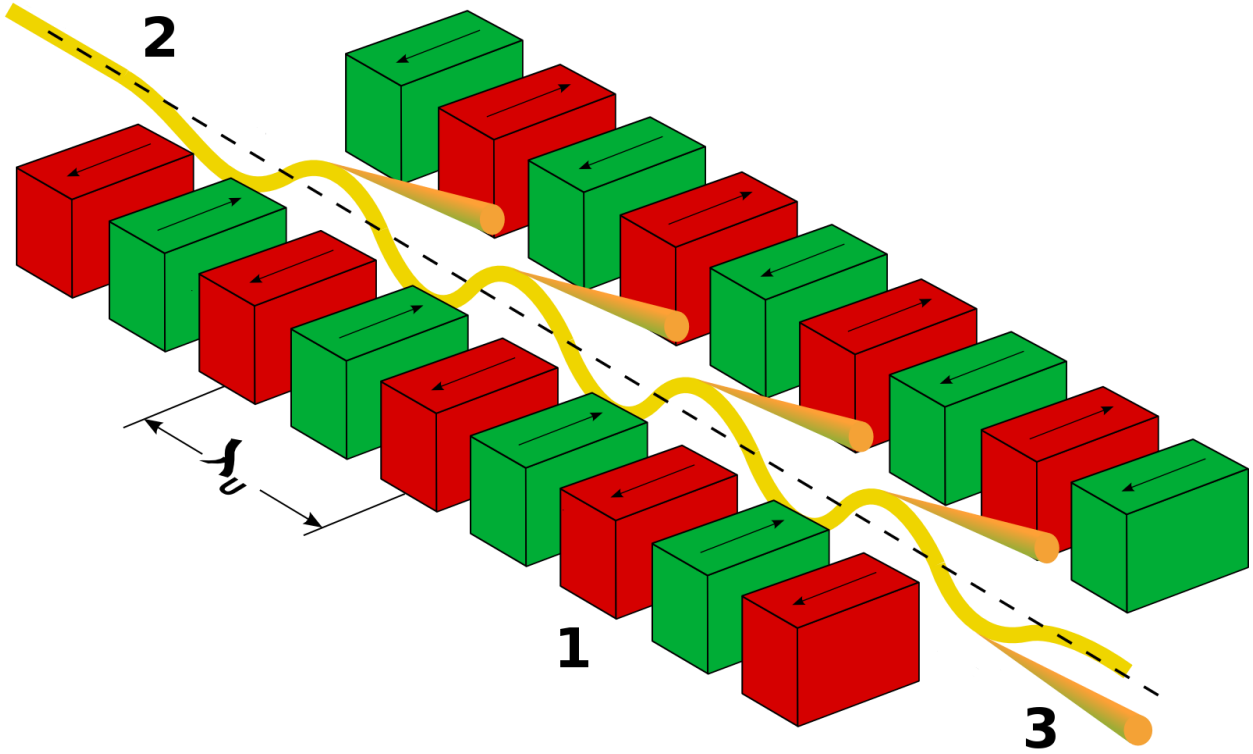
Synchrotron Radiation



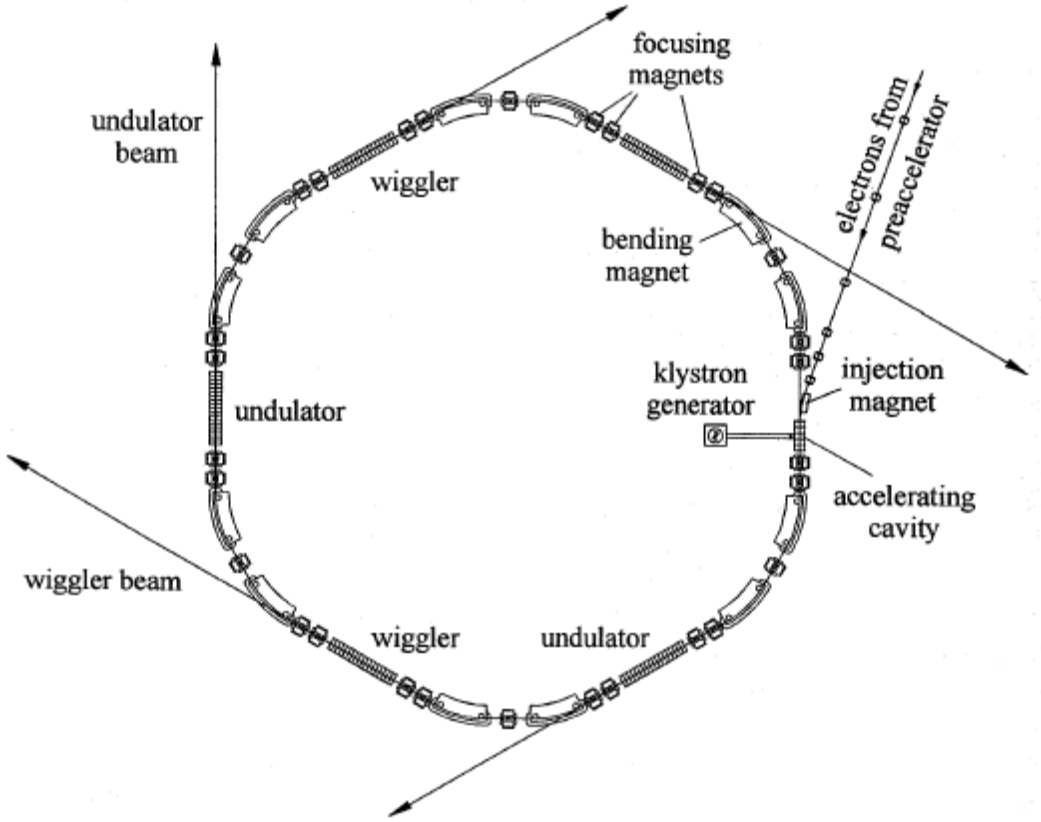

Σε κάθε περιστροφή των σωματιδίων σε ένα κυκλικό επιταχυντή η ενέργεια που χάνεται σε αναλογία με την ενέργεια του σωματιδίου και ποιο συγκεκριμένα του ηλεκτρονίου φάινεται στο παραπάνω διάγραμμα. Αυτή η ενέργεια ή ακτινοβολία ονομάζεται αντινοβολία συγχρότρου – synchrotron radiation. Η ενέργεια λοιπόν που χάνεται πρέπει να αντικατασταθεί από τις

κοιλότητες επιτάχυνσης αλλίως η δέσμη κινδυνεύει να χαθεί. Δεδομένου ότι η απώλεια είναι ανάλογη με $\frac{E^4}{R}$, η ακτίνα καμπύλωσης πρέπει να αυξηθεί γρηγορότερα από την ενέργεια, που σημαίνει ότι οι ασθενείς μαγνήτες καμπύλωσης είναι ικανοποιητικοί. Ως εκ τούτου η περιφέρεια μεγαλώνει  και αυτή γρηγορότερα από την ενέργεια. Σε ενέργειες γύρω στα 100 GeV η απώλεια από ακτινοβολία είναι τόσο μεγάλη που δεν έχει νόημα να αποκατασταθεί, άρα σε τετοιες ενέργειες πρέπει να χρησιμοποιήσουμε άλλα σωματίδια όπως πρωτόνια.

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω τα αποθηκευτικά δαχτυλίδια έχουν πάρει τη θέση των συγχρότρων ως πηγές ακτινοβολίας μέσα στα οποία ειδικοί μαγνήτες με πόλους εναλλάκτικής πολικότητας, που ονομάζονται wigglers και undulators, χρησιμοποιούνται για υψηλή πυκνότητα φωτονίων και συγκέντρωση αντινοβολίας.




Τρίτης γενιάς αποθηκευτικά δαχτυλίδια αποτελούν πλέον σημαντικό μέρος των επιταχυντών με μακριά ευθεία τμήματα για να χωράνε wigglers και undulators. Οι μαγνήτες καμπύλωσης χρησιμεύουν για να οδηγούν τη δέσμη από το ένα κομμάτι στο άλλο.




Οι undulators είναι ασθενέστεροι από τους wigglers και στην ουσία διαφέρουν στην ένταση του πεδίου καμπύλωσης. Επιπλέον υπάρχει διάκριση λόγω της διαφορετικής αντινοβόλίας που παράγουν. Ενας wiggler παράγει ίδιο φάσμα με ένα μαγνήτη καμπύλωσης, ενω ένας undulator εξαιτίας της ασθενέστερης καμπύλωσης παράγει ακτινοβολία συνοχής με μεγάλη ένταση γιαυτό είναι και τόσο χρήσιμοι και βρίσκουν εφαρμογή στον τομέα της ιατρικής.

Περίληψη κυκλικών επιταχυντων

| Επιταχυντής | Ραδιο-συχνότητα | Μαγνητικό πεδίο | Ακτίνα της τροχιάς | Σχόλιο |
|---|---|---|---|---|
| Κύκλοτρο | σταθερή | σταθερή | Αυξάνεται με την ενέργεια | Σωματίδια ασύγχρονα με ραδιοσυχνότητα για υψηλές ενέργειες |
| Ισο-Κύκλοτρο | σταθερή | μεταβλητό | Αυξάνεται με την ενέργεια | Σωματίδια σύγχρονα αλλά δύσκολη η ευστάθεια των τροχιών |
| Συγχρο-Κύκλοτρο | μεταβλητή | σταθερό | Αυξάνεται με την ενέργεια | Ευσταθής ταλαντώσεις , αλλά περιορισμός λόγω όγκου |
| Σύγχροτρο | μεταβλητή | μεταβλητό | σταθερή | Ευέλικτος επιταχυντής, δυνατή η επίτευξη πολύ υψηλών ενεργειών |

Σε ένα κυκλικό επιταχυντή λοιπόν το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι η καμπύλωση της τροχιάς του σωματιδίου μέσα στον σωλήνα του επιταχυντή. Αυτο πλεόν επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μαγνητών. Επιπλεόν πρόβλημα αποτελεί και η εστίαση της δέσμης, δηλαδή κατα πόσο τα σωματίδια παραμένουν στο κέντρο της διατομής του σωλήνα και δεν χτυπούν στα τοιχώματά.

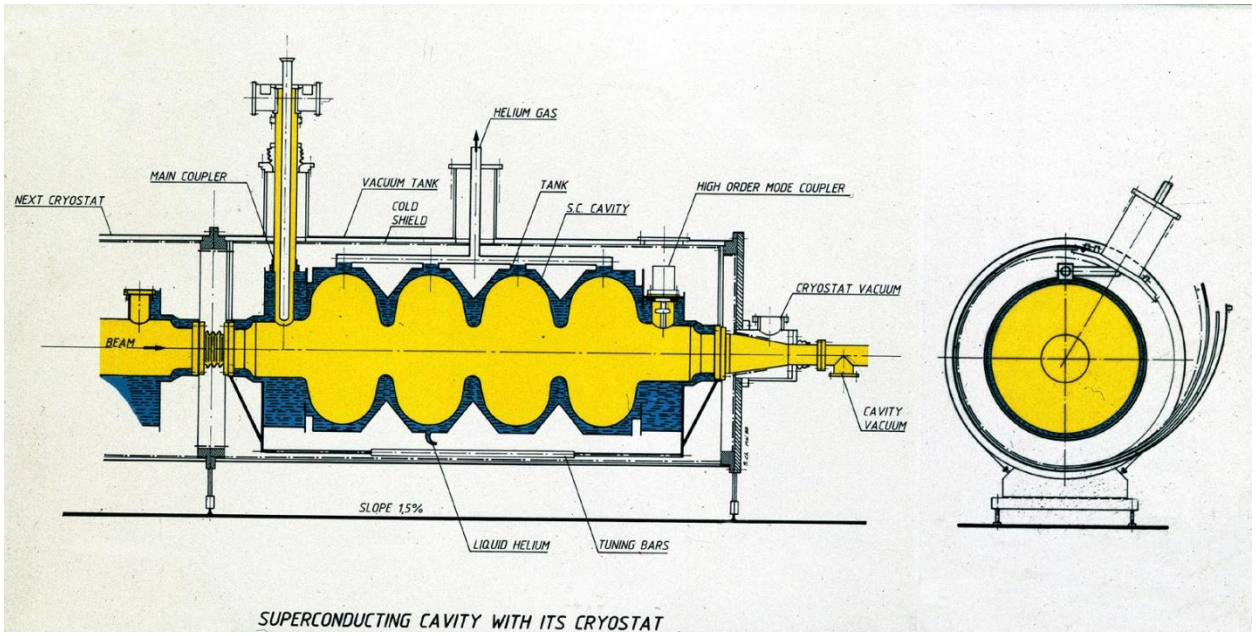
Τα κυριότερα και βασικά μέρη ενός κυκλικού επιταχυντή είναι τρία:

Α)Η κοιλότητες επιτάχυνσης

Β)Οι διπολικοί μαγνήτες καμπύλωσης

Γ)Οι τετραπολικοί μαγνήτες εστίασης

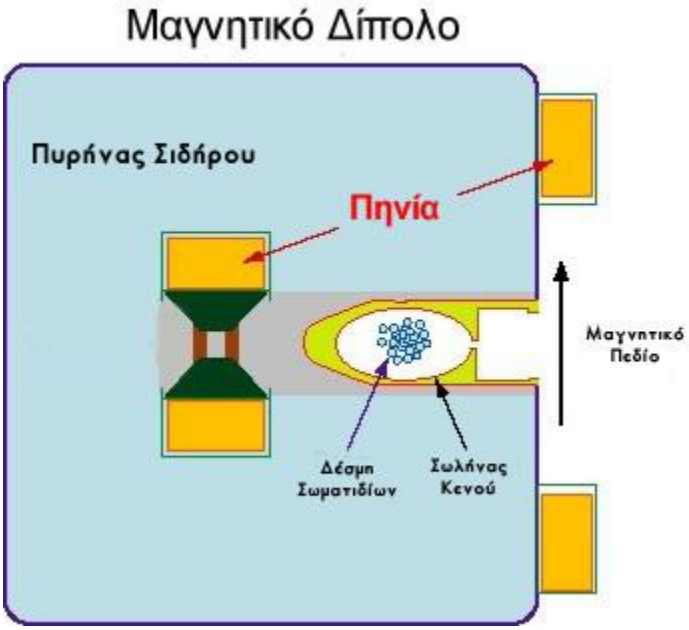
Κοιλοτητες επιτάχυνσης – Acceleration Cavities RF




Πρόκειται για κοιλότητες ηλεκτρομαγνητισμού που διαθέτουν αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια, και ένα μέρος αυτής μεταφέρεται στα σωματίδια κάθε φορά που περνούν μέσα απ' τις κοιλότητες. Τα φορτισμένα σωματίδια ουσιαστικά παρασύρονται από το ηλεκτρομαγνητικό κύμα και περιστρέφονται ενώ σε κάθε περιστροφή αυξάνεται η ενέργειά τους με τη βοήθεια αυτών των κοιλοτήτων επιτάχυνσης. Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο, π.χ. ένα ηλεκτρόνιο, επιταχύνεται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο 1 V αποκτάει κινητική ενέργεια ίση με ένα ηλεκτρονιοβόλτ (1eV). Ένας επιταχυντής έχει ένα ή και περισσότερα επιταχυντικά τμήματα με ταλαντούμενα ηλεκτρικά πεδία. Η συχνότητα των ταλαντώσεων ρυθμίζεται ώστε να δώσει στα σωματίδια επιπλέον κινητική ενέργεια, αυξάνοντας έτσι την ταχύτητά τους. Για αυτό το λόγο οι κοιλότητες επιτάχυνσης ονομάζονται κοιλώτητες ραδιοσυχνότητας – RF cavities. Οι κοιλότητες αυτές λειτουργούν ως ένα μικρό τμήμα γραμμικού επιταχυντή.

Τα σημερινά πειράματα στοιχειωδών σωματιδίων χρησιμοποιούν πολύ υψηλές ενέργειες, της τάξης των GeV. Σε αυτές τις υψηλές ενέργειες, τα σωματίδια μέσα στον επιταχυντή, αποκτούν ταχύτητες που είναι πολύ κοντά στην ταχύτητα του φωτός.

Διπολικοί μαγνήτες καμπύλωσης.




Είναι το στοιχείο που καμπυλώνει την τροχιά των σωματιδίων. Η καθοδήγηση των σωματιδίων μέσα στον επιταχυντή επιτυγχάνεται με μαγνητικά πεδία

Ένα φορτισμένο σωματίδιο κινούμενο σε ένα μαγνητικό πεδίο θα δεχτεί μια δύναμη που θα το κάνει να αποκλίνει από την αρχική κατεύθυνση της κίνησής του. Σε έναν κυκλικό επιταχυντή, οι διπολικοί ηλεκτρομαγνήτες χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν μαγνητικά πεδία που θα αναγκάσουν τα σωματίδια να κινηθούν σε κυκλική τροχιά. Πρόκειται για την αρχή της ασθενούς εστίασης. Καθώς τα σωματίδια επιταχύνονται αυξάνεται η ενέργεια τους και έτσι πρέπει να αυξάνεται και η ισχύς καμπύλωσης ωστε να παραμένουν τα σωματίδια σε κύκλο.

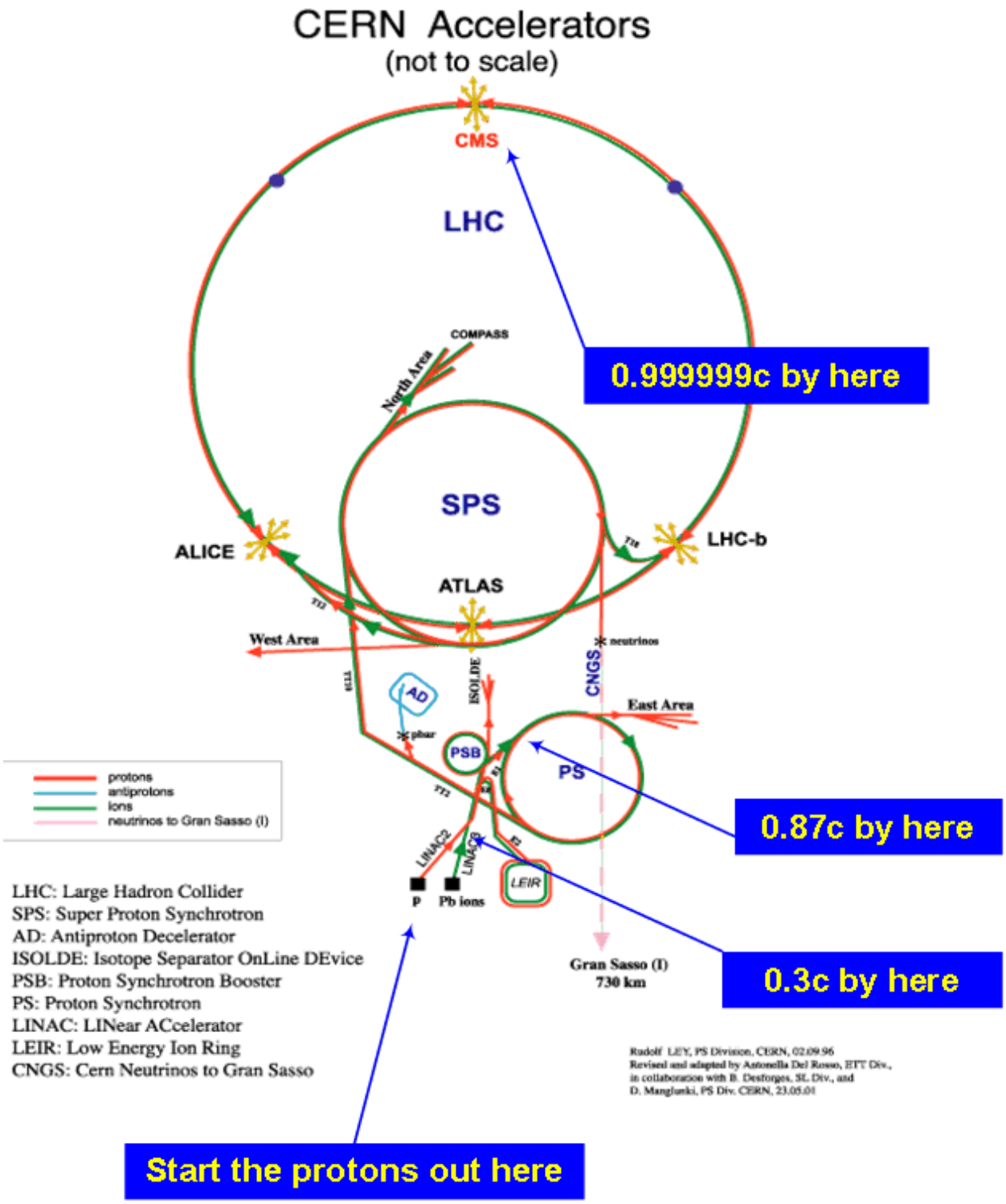
Τετραπολικοί μαγνήτες εστίασης.

Η αρχή της ισχυρής εστίασης του Νικόλα Χριστόφιλου βρίσκει εφαρμογή μέσων των τετραπολικών μαγνητών που συγκρατούν τη δέσμη των σωματιδίων εστιασμένη στο κέντρο. Για τον ίδιο σκοπό χρησιμοποιούνται και εξαπολικοί και οχταπολικοί μαγνήτες. Μέσα σε ένα τετραπολικό μαγνήτη η δέσμη εστιάζεται μέσα από μία σειρά μαγνητών focusing και defocusing με παρόμοιο τρόπο όπως εστιάζεται το φως μέσα από μία σειρά από φακούς. Ένας τετραπολικός μαγνήτης εστιάζει στη μία διάσταση, και αποκλίνει στην άλλη επιφέροντας ένα καθαρό αποτέλεσμα εστίασης.

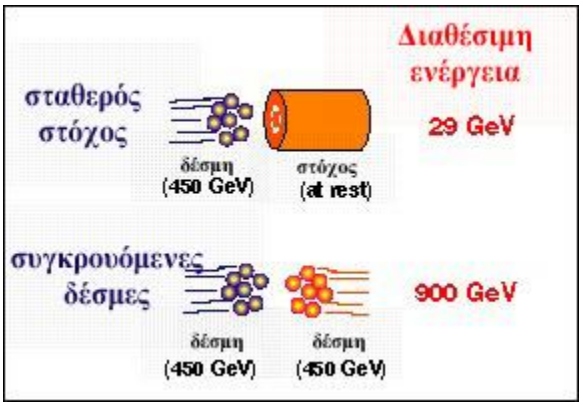
Σε όλους τους δακτύλιους επιταχυντών λοιπόν τα κύρια μέρη της διάταξης είναι τα τρία που περιγράψαμε παραπάνω τοποθετημένα αρκετές φορές το καθένα σε πολύ κοντινές αποστάσεις με την ακόλουθη σειρα.

Κοιλοτητες Επιτάχυνσης – Διπολικοί μαγνήτες – Τετραπολικοί μαγνήτες

Ενας κυκλικός επιταχυντής όπως έχουμε ήδη αναφέρει δεν είναι απλά ένας κυκλικός συνδεδεμενος με έναν γραμμικό που εγχυει τα σωματίδιο μέσα σε αυτόν. Μέχρι το βασικό δακτύλιο των κυκλικών επιταχυντων παρεμβάλονται δακτύλιοι αποθήκευσης ενέργειας και μικρότεροι δακτύλιοι που αποτελούν μέρος της σταδιακής επιτάχυνσης των σωματιδίων μέχρι να πλησιάσουν την ταχύτητα του φωτός.


CERN Accelerators
(not to scale)
CMS
LHC
COMPASS
North Area
0.999999c by here
SPS
ALICE
LHC-b
ATLAS
West Area
neutrinos
CNGS
ISOLDE
AD
East Area
PSB
PS
protons
antiprotons
ions
neutrinos to Gran Sasso (I)
0.87c by here
LINAC2
LINAC3
LEIR
P
Pb ions
LHC: Large Hadron Collider
SPS: Super Proton Synchrotron
AD: Antiproton Decelerator
ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice
PSB: Proton Synchrotron Booster
PS: Proton Synchrotron
LINAC: LINear ACcelerator
LEIR: Low Energy Ion Ring
CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso
Gran Sasso (I)
730 km
0.3c by here
Rudolf LEY, PS Division, CERN, 02.09.96
Revised and adapted by Antonella Del Rosso, ETT Div.,
in collaboration with B. Desforges, SL Div., and
D. Manglunki, PS Div. CERN, 23.05.01
Start the protons out here

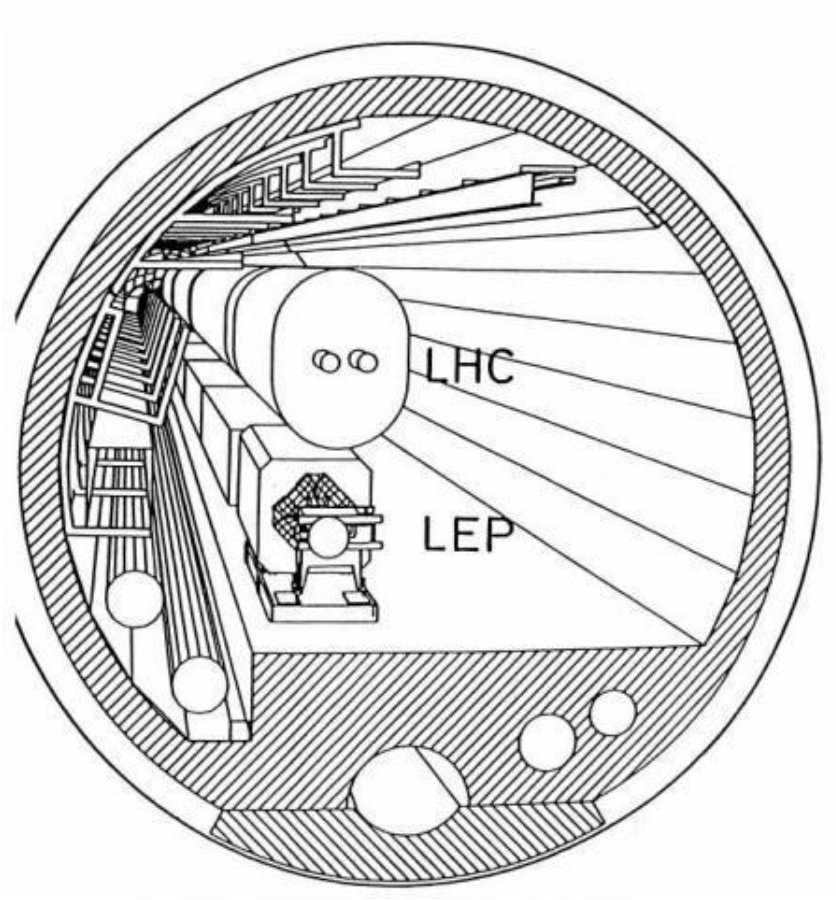
Επιταχυντές συγκρουόμενων δεσμών




Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, σύμφωνα με τη διάσημη εξίσωση του Αϊνστάιν $E=mc^2$, η ενέργεια και η μάζα είναι ισοδύναμες. Οταν μια δέσμη ηλεκτρονίων, για παράδειγμα συγκρουστεί με μία δέσμη ποζιτρονίων σχηματίζεται μια ενεργειακή έκρηξη. Σχεδόν αμέσως, αυτή η ενέργεια μετατρέπεται και πάλι σε σωματίδια ακριβώς όπως σχηματίσθηκε η ύλη, από ενέργεια, στο πρώιμο σύμπαν.Επομένως, η ενέργεια μιας δέσμης σωματιδίων μπορεί να μετατραπεί σε μάζα, δημιουργώντας μια εντυπωσιακή πληθώρα επιπλέον σωματιδίων, πολλά από τα οποία είναι ιδιαίτερα ασταθή και δεν απαντώνται συνήθως στη φύση. Ωστόσο, αν η εισερχόμενη δέσμη συγκρουσθεί απλώς με έναν ακίνητο στόχο, ένα μεγάλο ποσοστό της ενέργειας του βλήματος καταναλώνεται από την ανάκρουση του στόχου και δεν είναι εκμεταλλεύσιμο. Πολλή περισσότερη ενέργεια είναι διαθέσιμη για την παραγωγή νέων σωματιδίων κατά τη σύγκρουση δύο δεσμών οι οποίες κινούνται σε αντίθετες διευθύνσεις. Ολα τα κύρια, διεθνή προγράμματα φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων εστιάζουν σε τέτοιες μηχανές συγκρουόμενων δεσμών.

Τέτοιοι είναι οι πιο σύγχρονοι πλέον επιταχυντές ο LEP και ο LHC του CERN. Στο σύστημα επιταχυντών του CERN μπορούν να επιταχυνθούν ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, πρωτόνια και διάφορα είδη ιόντων.

Για την ακρίβεια ο LEP (Large Electron Positron collider) ήταν ο μεγαλύτερος επιταχυντής στον κόσμο με περιφέρεια 27 χμ., σε βάθος 100 μέτρων κάτω από το έδαφος και επιδιδόταν σε συγκρούσεις δεσμών ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων. Κατασκευάστηκε το 1989 και λειτούργησε μέχρι το 2000 όποτε και αποσυναρμολογήθηκε για να χτιστεί στη θέση του ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων LHC (Large Hadron Collider) που επιταχύνει πρωτόνια.



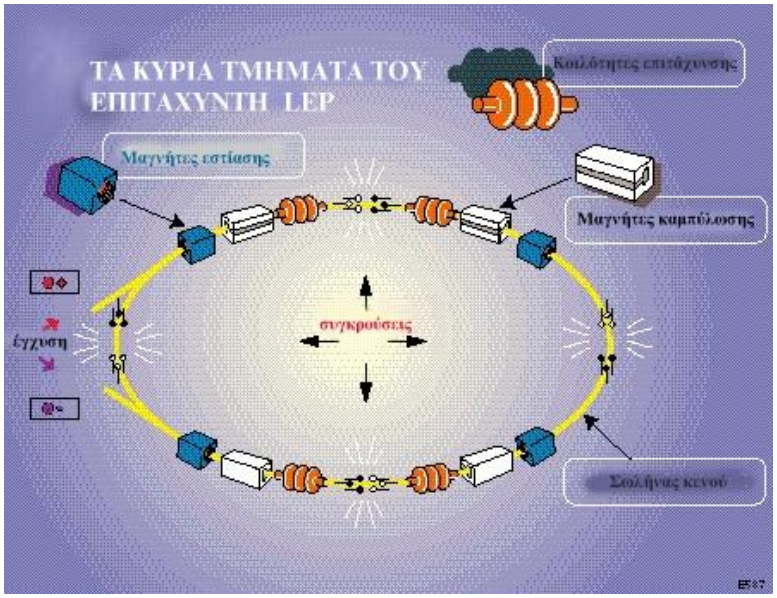

LEP

Ο LEP ήταν ένας επιταχυντής συγκρουόμενων δεσμών, όπου οι δύο δέσμες των σωματιδίων αποτελούνται από ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια (αντί-ηλεκτρόνια) αντίστοιχα. Οι δέσμες των σωματιδίων επιταχύνονται σε αντίθετες κατευθύνσεις, σε τροχιές πολύ κοντά η μία στην άλλη μέσα στον σωλήνα της δέσμης. Στη συνέχεια, οι δέσμες καθοδηγούνται σε σύγκρουση.

Για να επιτευχθεί αυτή η τόσο υψηλή ενέργεια που απαιτείται, τα σωματίδια επιταχύνονται σε κάθε στροφή μέσα στον κυκλικό επιταχυντή. Ειδικά επιταχυντικά πεδία αυξάνουν την ενέργεια των σωματιδίων σε κάθε περιφορά. Διαφορετικοί τύποι μαγνητών υποχρεώνουν τα σωματίδια να κινούνται σε αυστηρά καθορισμένες τροχιές.

Τα τέσσερα βήματα της επιτάχυνσης αυξάνουν τις ενέργειες των σωματιδίων έως και 400 MeV ανά στροφή, σε μία τελική ενέργεια περίπου 100 GeV. Τέσσερα πακέτα ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων μπορούν να περιστρέφονται μέσα στο δαχτυλίδι για ώρες, με μία ταχύτητα πολύ κοντά στην ταχύτητα του φωτός.

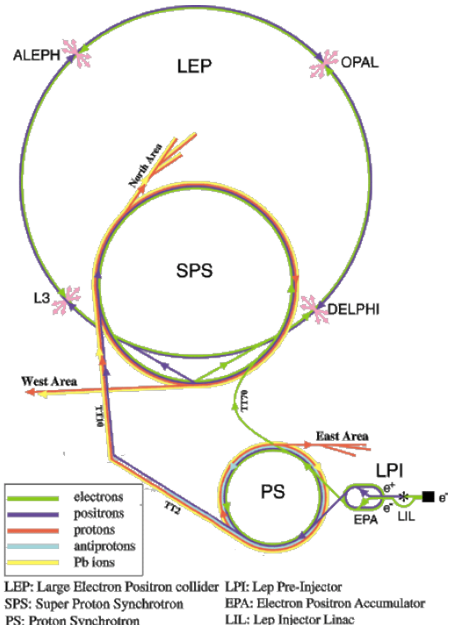
Μέσα στον LEP υπάρχουν 3368 μαγνήτες και 272 υπεραγώγιμα επιταχυντικά στάδια. Όλα αυτά τα τμήματα πρέπει να παραμείνουν παγωμένα σε μία θερμοκρασία κάτω των μείον 271 βαθμών Κελσίου.




Σε τέσσερα σημεία του επιταχυντικού δαχτυλιδιού, τα πακέτα των ηλεκτρονίων και των ποζιτρονίων μπορούν να οδηγηθούν σε πορεία σύγκρουσης, μεταξύ τους. Εδώ ακριβώς εκτελούνται τα πειράματα καταγράφοντας, με τη βοήθεια διαφόρων ειδών ανιχνευτών, τι συμβαίνει κατά τις διάφορες συγκρούσεις.

Με αυτούς τους ανιχνευτές, οι επιστήμονες μπορούν να ανακαλύψουν ποια σωματίδια έχουν παραχθεί και πόση είναι η ενέργεια και η ορμή τους.

Η πορεία των σωματιδίων ήταν η εξής:



Μέσω της θερμότητας, που μεταφέρεται ενέργεια σε ένα μεταλλικό σύρμα που βρίσκεται μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο, τα ηλεκτρόνια του σύρματος αποκτούν αρκετή ενέργεια ώστε να ξεφύγουν από τα άτομα που υπάρχουν μέσα στο σύρμα. Στη συνέχεια ένας γραμμικός επιταχυντής (LIL) χρησιμοποιείται ώστε να επιταχυνθούν τα, ελεύθερα πια, ηλεκτρόνια σε μια ενέργεια της τάξης των 200 MeV.

Μερικά από τα ηλεκτρόνια αποκλίνουν και συγκρούονται με στόχο από βαρύ μέταλλο. Αυτές οι συγκρούσεις δημιουργούν τα ποζιτρόνια που διοχετεύονται στο επιταχυντικό σύστημα.

Κατόπιν, ο γραμμικός επιταχυντής επιταχύνει τα ηλεκτρόνια καθώς και τα ποζιτρόνια, που μόλις έχουν δημιουργηθεί, σε μια ενέργεια των 600 MeV. Στη συνέχεια, τα σωματίδια οδηγούνται σε ένα "δαχτυλίδι αποθήκευσης" (EPA) όπου και συσσωρεύονται καθώς έρχοναι και άλλα σωματίδια.

Όταν ένας επαρκής αριθμός ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων έχει συγκεντρωθεί στο δαχτυλίδι αποθήκευσης, τα σωματίδια οδηγούνται σε έναν κυκλικό επιταχυντή, ο οποίος ονομάζεται PS. Εδώ τα σωματίδια επιταχύνονται εκ νέου σε μια ενέργεια των 3.5 GeV.

Μετά τον PS, τα σωματίδια οδηγούνται σε ένα μεγαλύτερο κυκλικό επιταχυντή, τον SPS, όπου εκεί επιταχύνονται στα 22 GeV. Τέλος, περνούν στο μεγαλύτερο κυκλικό επιταχυντή, τον LEP. Μέσα στον LEP, τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια μπορούν να επιταχυνθούν σε μία ενέργεια των 104 GeV, πριν συγκρουστούν μεταξύ τους.

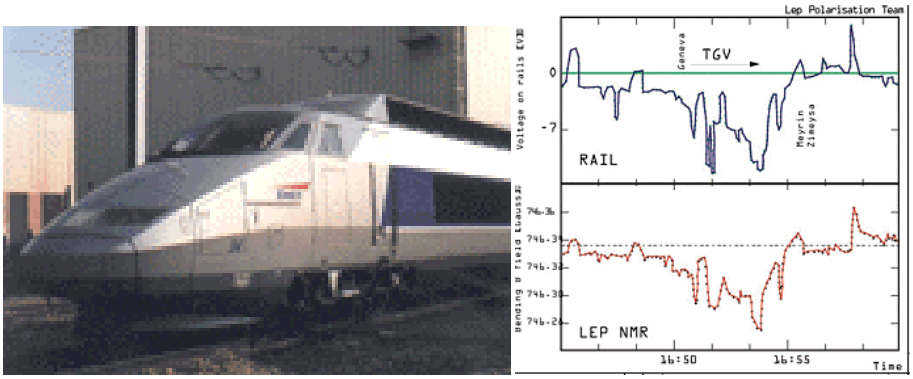
Η σήραγγα του LEP

Δεδομένου του μεγέθους τους και, ως εκ τούτου, της δυναμικής επίδρασής τους στο έδαφος, στα κτήρια, στο οδικό δίκτυο, ..., αυτές οι τεράστιες μηχανές είναι θαμμένες σε σήραγγες σε μεγάλο βάθος. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζουν ισχύ καθώς και το προστατευμένο περιβάλλον απαραίτητο για την τόσο περίπλοκη τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιείται στους επιταχυντές σωματιδίων.

Οι συνιστώσες των μεγάλων επιταχυντών απαιτούν ευθυγράμμιση ακριβείας σε μεγάλες αποστάσεις (της τάξης του 0,1mm για δεκάδες χιλιομέτρων). Εχει αναπτυχθεί ένα πλήθος οργάνων επισκόπησης και μεθόδων ακριβείας που χρησιμοποιούνται συνεχώς στα μεγαλύτερα προγράμματα τεχνικών έργων, όπως η κατασκευή της Σήραγγας που ενώνει το Ηνωμένο Βασίλειο με τη Γαλλία.

Παρά το γεγονός ότι βρίσκεται θαμμένος σε μεγάλο βάθος, ο LEP δεν είναι τυφλός σε ό,τι συμβαίνει στην επιφάνεια ή στη σελήνη όπως κατέδειξε η ομάδα ενέργειας του LEP μετά από εβδομάδες προβληματισμού που οφειλόταν σε "παράξενα" σχήματα των δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου καμπύλωσης, το οποίο μετρήθηκε από διατάξεις εξαιρετικής ευαισθησίας.

Λόγω του μεγάλου μεγέθους του, ο LEP αποτελεί μια πολύ ευαίσθητη μηχανή. Η ενέργεια της δέσμης του μπορεί να επηρεασθεί από πολλές παραμέτρους κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Εχει δειχθεί ότι πρέπει να ληφθούν υπόψη φαινόμενα όπως η τροχιά της σελήνης και το επίπεδο της επιφάνειας του νερού στη Λίμνη Leman, προκειμένου να κατανοηθεί η ενεργειακή συμπεριφορά του LEP.

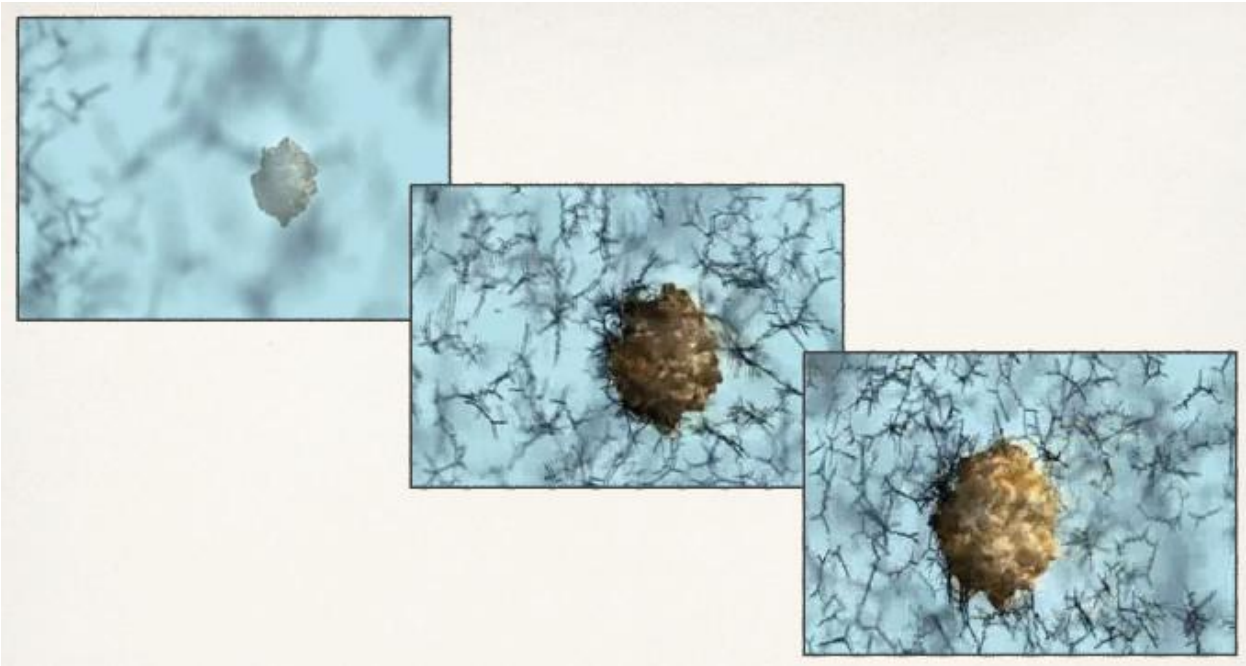



Το πάνω σχήμα δείχνει τη διαφορά του δυναμικού μεταξύ της Γης και της ράγας ενός υψηλής ταχύτητας τρένου TGV κοντά στο CERN, καθώς το TGV εγκαταλείπει τη Γενεύη με προορισμό το Παρίσι.

Στο κάτω σχήμα φαίνεται η μετατόπιση που παρατηρείται στους μαγνήτες καμπύλωσης του LEP της ίδια στιγμή. Υπάρχει μια προφανής συσχέτιση, η οποία δείχνει ότι η εκπληκτική ευαισθησία του LEP θα μπορεί να παρακολουθεί ακόμη και τα δρομολόγια των τρένων.

LHC

Κατασκευάστηκε στη θέση του LEP για σύγκουση πρωτονίων με κυριότερο σκοπό την πειραματική επιβεβαίωση του μόνου σωματιδίου που δεν είχε παρατηρηθεί, ενός σωματιδίου που προβλέπεται από το Καθιερωμένο Πρότυπο (Standard Model), ένα θεωρητικό μοντέλο που οι προβλέψεις του συμφωνούν πλήρως με όλα τα πειραματικά δεδομένα τις τελευταίας τριακονταετίας. Πρόκειται για το σωματιδίου Higgs, το σωματίδιο που μέσω των αλληλεπιδράσεων και τριβών δίνει μάζα στα υπόλοιπα θεμελιώδη σωματίδια. Εξυπηρετεί φυσικά και την προσπάθεια παρατήρησης νέων πειραματικών διεργασιών που θα δώσουν τα πρώτα στοιχεία υπέρ ή κατά μιας πληθώρας νέων θεωρητικών προτύπων που επεκτείνουν το Καθιερωμένο Πρότυπο.



Θεμελιώδη σωματίδια μέσα στη θάλασσα των σωματιδίων Higgs.

Το σωματίδιο Higgs ήταν ελέυθερο για 0,000000000001 sec μετά τη Μεγάλη Έκρηξη που προκάλεσε τη δημιουργία του σύμπαντος. Ετσι για να το εντοπίσουν οι επιστήμονες έπρεπε να πραγματοποιήσουν μία προσομοίωση του “Big Bang” στον LHC του CERN.

Ο LHC πραγματοποιεί μετωπικές συγκρούσεις ανάμεσα σε δύο δέσμες όμοιων σωματιδίων: πρωτονίων ή ιόντων μολύβδου. Οι δέσμες παράγονται στην ήδη υπάρχουσα αλυσίδα επιταχυντών του CERN και στην συνέχεια θα διοχετεύονται στον LHC, όπου επιταχύνονται μέσα σε κενό συγκρίσιμο με εκείνο του διαστήματος. Υπεραγώγιμοι μαγνήτες, που λειτουργούν σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, καθοδηγούν τις δέσμες κατά μήκος του δακτυλίου. Κάθε δέσμη αποτελείται από σχεδόν 3000 πακέτα σωματιδίων ενώ κάθε πακέτο περιλαμβάνει γύρω στα 100 δισεκατομμύρια σωματιδίων. Τα σωματίδια είναι τόσο μικροσκοπικά που η πιθανότητα δύο από αυτά να

συγκρουστούν είναι πολύ μικρή. Όταν δύο πακέτα διασταυρώνονται υπάρχουν μόνο 20 περίπου συγκρούσεις ανάμεσα στα 200 δις. σωματίδια. Ωστόσο, τα πακέτα διασταυρώνονται περίπου 30 εκατομμύρια φορές το δευτερόλεπτο και έτσι ο LHC παράγει ως και 600 εκατομμύρια συγκρούσεις ανά δευτερόλεπτο. Μέχρι τώρα ο LHC έθετε σε σύγκρουση 1200 δεσμίδες πρωτονίων που σημαίνει ότι χονδρικά είχαμε συγκρούσεις κάθε 75 Nsec. Ο αριθμός αυτός των δεσμίδων σύντομα σχεδόν θα διπλασιαστεί και περιπου 2300 δεσμίδες θα κινούνται μέσα στον επιταχυντή. Αν υποθέσουμε ότι τα σωματίδια απλώνονται κατα μήκος της περιφέρειας του LHC,

$$\frac{27 \times 10^3}{n} \times \frac{1}{c} = \frac{27 \times 10^3}{1{,}2 \times 10^3} \times \frac{1}{3 \times 10^8} = 7{,}5 \times 10^{-8} = 75 \times 10^{-9} = 75Nsec \ \ \gamma\iota\alpha\, n = 1200$$

Σε ταχύτητες κοντά σε αυτή του φωτός, ένα πρωτόνιο μέσα στον επιταχυντή LHC κάνει 11.245 περιφορές το δευτερόλεπτο. Η δέσμη μπορεί να περιστρέφεται για 10 ώρες και να καλύπτει περισσότερα από 10 δισεκατομμύρια χιλιόμετρα, απόσταση όση και η διαδρομή από τη Γη στον πλανήτη Ποσειδώνα μετ‘ επιστροφής.

Ο επιταχυντής LHC είναι μια μηχανή που μπορεί να συγκεντρώνει ενέργεια σε πολύ μικρό χώρο. Οι ενέργειες των σωματιδίων στον επιταχυντή LHC μετριούνται σε τερα-ηλεκτρονιοβόλτς (TeV). 1 TeV είναι χοντρικά η ενέργεια ενός κουνουπιού, αλλά ένα πρωτόνιο είναι ένα τρισεκατομμύριο φορές μικρότερο από ένα κουνούπι. Κάθε πρωτόνιο που κινείται στον LHC έχει τελική ενέργεια 7 TeV, έτσι όταν δύο πρωτόνια συγκρούονται η ενέργεια της σύγκρουσης θα είναι 14 TeV. Τα ιόντα μολύβδου έχουν πολλά πρωτόνια που μαζί έχουν ακόμα μεγαλύτερη ενέργεια. Οι δέσμες ιόντων μολύβδου θα έχουν ενέργεια σύγκρουσης 1150 TeV.

Οι δέσμες, αφού αποκτήσουν ενέργεια 0,45 TeV μέσα στην αλυσίδα επιταχυντών του CERN, οδηγούνται στο δακτύλιο του LHC, όπου πραγματοποιούν εκατομμύρια περιφορές. Ειδικές κοιλότητες προσφέρουν το κατάλληλο ηλεκτρικό πεδίο που ωθεί, σε κάθε περιφορά, τα σωματίδια κάθε δέσμης ως την τελική ενέργεια των 7 TeV. Για τον έλεγχο των δεσμών σε τόσο υψηλές ενέργειες, ο επιταχυντής LHC χρησιμοποιήσει 1800 υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα. Αυτοί οι ηλεκτρομαγνήτες κατασκευάζονται από υπεραγώγιμα υλικά τα οποία, σε χαμηλές θερμοκρασίες , άγουν τον ηλεκτρισμό χωρίς αντίστασηκαι έτσι μπορούν να δημιουργούν πολύ ισχυρότερα μαγνητικά πεδία συγκριτικά με τους συνήθεις ηλεκτρομαγνήτες. Οι μαγνήτες του επιταχυντή LHC, από νιόβιο-τιτάνιο, λειτουργούν σε θερμοκρασίες μόλις 1,9 K (-271 °C). Η μονάδα του μαγνητικού πεδίου είναι το tesla. Ο επιταχυντής LHC λειτουργεί σε περίπου 8 tesla, ενώ οι συνηθισμένοι μαγνήτες μπορούν να επιτύχουν μέγιστο μαγνητικό πεδίο περίπου 2 tesla.

Αν ο επιταχυντής LHC χρησιμοποιούσε συνηθισμένους μαγνήτες, αντί για υπεραγώγιμους, ο δακτύλιος θα έπρεπε να έχει περιφέρεια τουλάχιστον 120 km, ώστε να επιτευχθεί η ίδια ενέργεια σύγκρουσης, και θα κατανάλωνε 40 φορές περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια. Δέκα χιλιάδες επιστήμονες από 64 διαφορετικές χώρες, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας φυσικά, εργάζονται στο CERN, σε ένα πρότυπο διεθνούς συνεργασίας.

LEP vs LHC

Στον LEP και γενικά τα λεπτόνια σε μορφή δεσμών ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων που συγκρούονται, επειδή είναι θεμελιώδη σωματίδια, οι ενέργειες από τις συγκρούσεις τους καθορίζονται επακριβώς οπότε χρησιμέυουν για πειράματα υψηλής ακρίβειας.

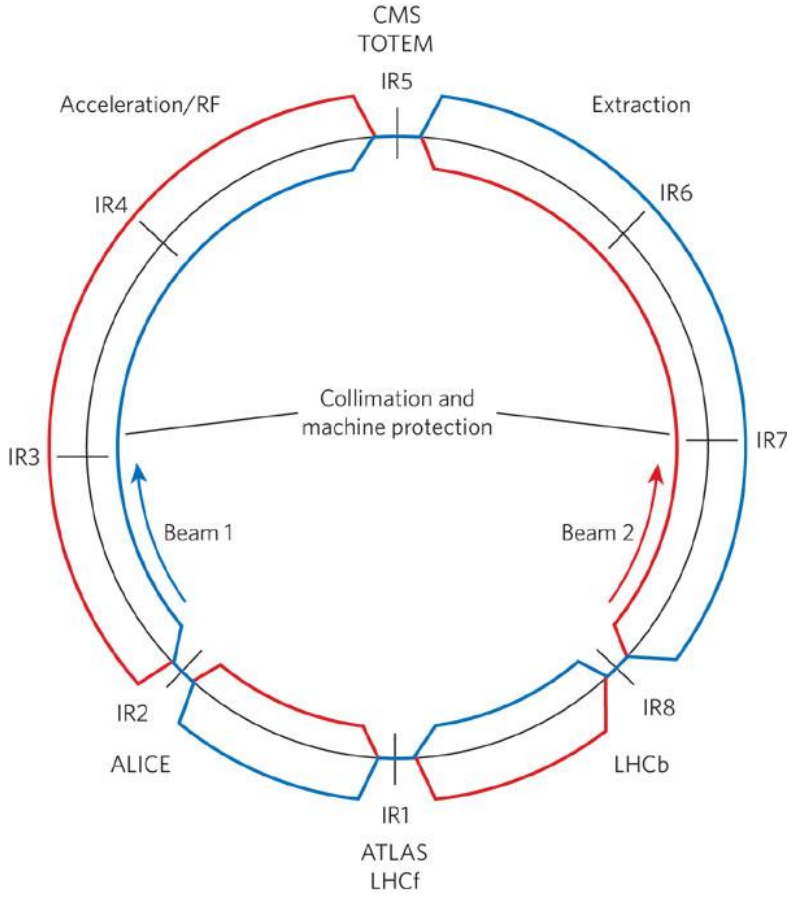
Τα αδρόνια, που χρησιμοποιούνται στον LHC είναι σύνθετα σωματίδια και οι συγκρούσεις γίνονται μεταξύ κουάρκς και γκλουωνίων που το καθένα κουβαλά μόνο μία ποσότητα της ολικής ενέργειας του πρωτονίου. Η ενέργεια λοιπόν αυτών των συγκρούσεων μπορεί να ποικίλει οπότε δεν χρησιμέυουν για πειράματα υψηλής ακρίβειας.

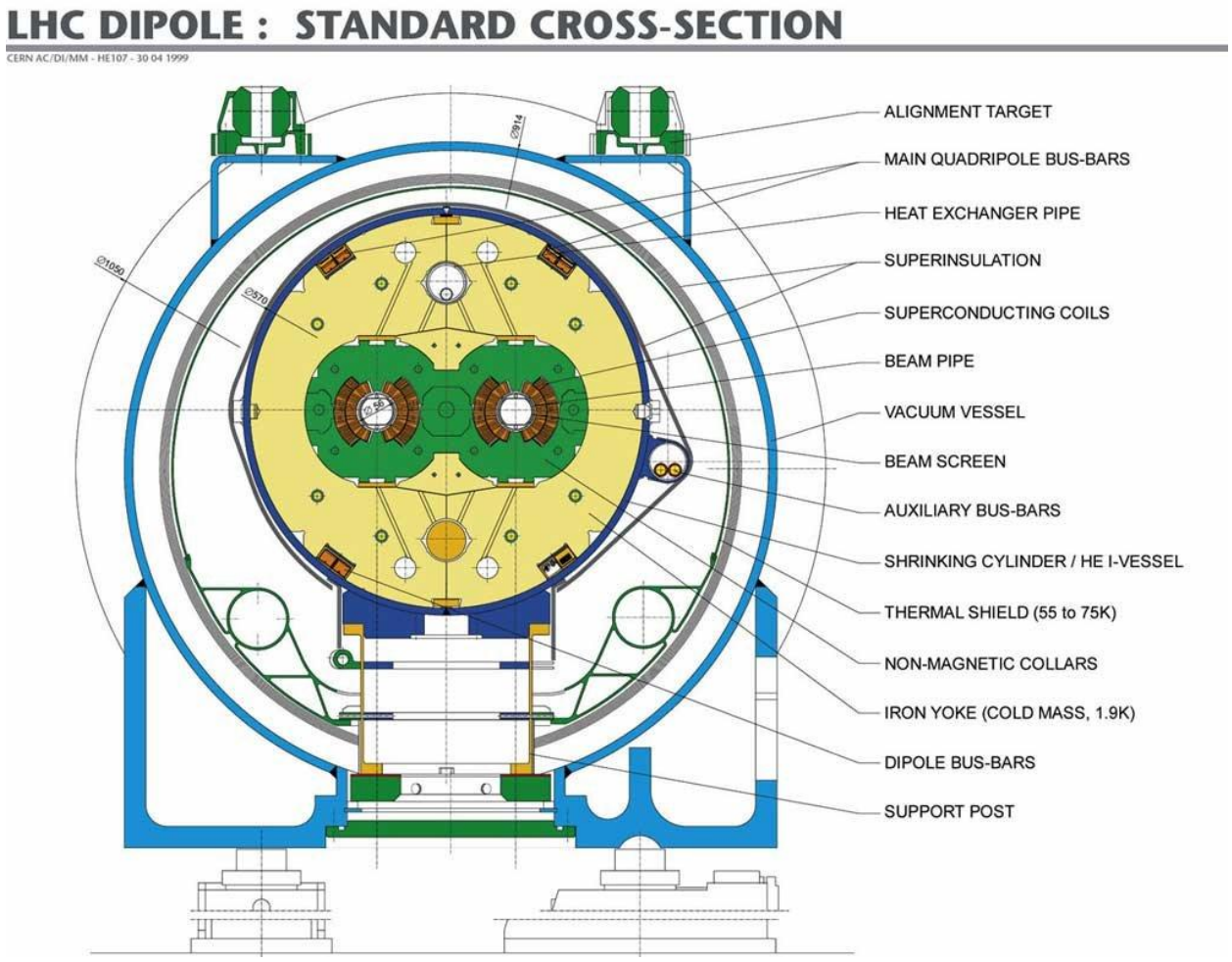
Οι επιταχυντές συγκρουόμενων δεσμών αδρονίων (Hadron colliders) λοιπόν προσφέρουν στην ανακάλυψη αγνωστων σωματιδίων επείδή είναι βαρία σωματίδια και οι συγκρούσεις αποφέρουν πολύ περισσότερη ενέργεια δίοτι χάνουν πολύ λιγότερη ενέργεια από τα λεπτόνια όταν ακολουθούν καμπυλωτή τροχιά σε ισχυρό μανγητικό πεδίο. Αυτό σε συνδυασμό με την υπεραγώγιμη τεχνολογία μαγνητών, προσφέρει μια πολύ αποδοτική και λειτουργική μηχανή.

Στον LEP τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια που έχουν ίδια μάζα μπορούσαν να κινούνται στον ίδιο θάλαμο λόγω του αντίθετου φορτίου τους. Γενικά σωματίδια αντίθετων φορτίων όπως ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια και πρωτόνια με αντίπρωτόνια (Tevatron) μπορούν να κινούνται αντίθετα στον ίδιο θάλαμο ενός επιταχυντή, αφού δέχονται την ίδια δύναμη.

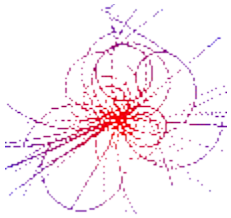
$$F=e(u \times B)= -e(-u \times B)$$

Στον LHC αντίθετα που συγκρούονται δέσμες πρωτονίων-πρωτονίων, η κίνηση γίνεται σε δύο ξεχωριστούς σωλήνες κενού με μαγνητικά πεδία αντίθετης πολικότητας και οι δέσμες που κινούνται αντίθετα συναντιώνται μόνο στα σημεία που συγκρούονται. Τα νέα σωματίδια που παράγονται εντρέπονται για να συνεχίσουν την πορεία τους μέχρι την επόμενη σύγκρουση.






## Ανιχνευτες.



Αφού ο επιταχυντής έχει δώσει αρκετή ενέργεια στα σωματίδια που επιταχύνει, αυτά συγκρούονται μ' ένα στόχο ή μεταξύ τους. Κάθε μια από αυτές τις συγκρούσεις ονομάζεται **γεγονός**. Ο σκοπός του φυσικού είναι να απομονώσει το κάθε γεγονός, να καταγράψει τα δεδομένα του και να ελέγξει αν το τι συνέβη κατά την σύγκρουση συμφωνεί με την θεωρία την οποία ελέγχει. Το κάθε γεγονός είναι αρκετά πολύπλοκο μια και παράγονται πολλά σωματίδια. Τα περισσότερα από αυτά τα σωματίδια έχουν τόσο μικρούς χρόνους ημίσειας ζωής ώστε διανύουν μια πάρα πολύ μικρή απόσταση πριν διασπασθούν σε άλλα σωματίδια και γι' αυτό δεν αφήνουν ανιχνεύσιμες τροχιές.

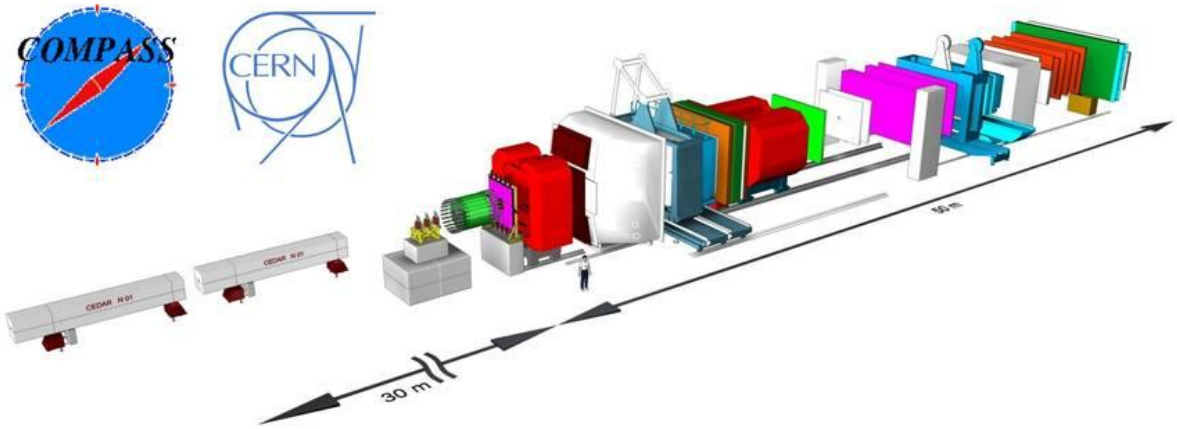
Όπως ακριβώς ο Rutherford χρησιμοποίησε τον θειούχο ψευδάργυρο για να ελέγξει την παρουσία των αόρατων σωματιδίων άλφα και μ' αυτό τον τρόπο μπόρεσε να καθορίσει την τροχιά τους, έτσι και οι σύγχρονοι φυσικοί πρέπει να δούνε τα προϊόντα της διάσπασης των σωματιδίων και από εκεί να συμπεράνουν την ύπαρξη τους.

Για να μπορέσουν να δούνε αυτά τα σωματίδια και τα προϊόντα των διασπάσεων οι φυσικοί έχουν σχεδιάσει πολύπλοκους ανιχνευτές (detectors) που αποτελούνται από πολλά μέρη το καθένα από τα οποία εξετάζει κάποια διαφορετική πλευρά του γεγονότος. Κάθε μέρος ενός σύγχρονου ανιχνευτή χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ενέργειας και της ορμής των σωματιδίων καθώς επίσης μπορεί να έχει την δυνατότητα να ξεχωρίσει τα διαφορετικά σωματίδια μεταξύ τους. Όταν όλα αυτά τα εξαρτήματα συνεργάζονται για την ανίχνευση ενός γεγονότος τα διαφορετικά σωματίδια μπορούν να ξεχωρίσουν από όλη την πολυπλοκότητα του γεγονότος και να αναλυθούν ιδιαιτέρως.

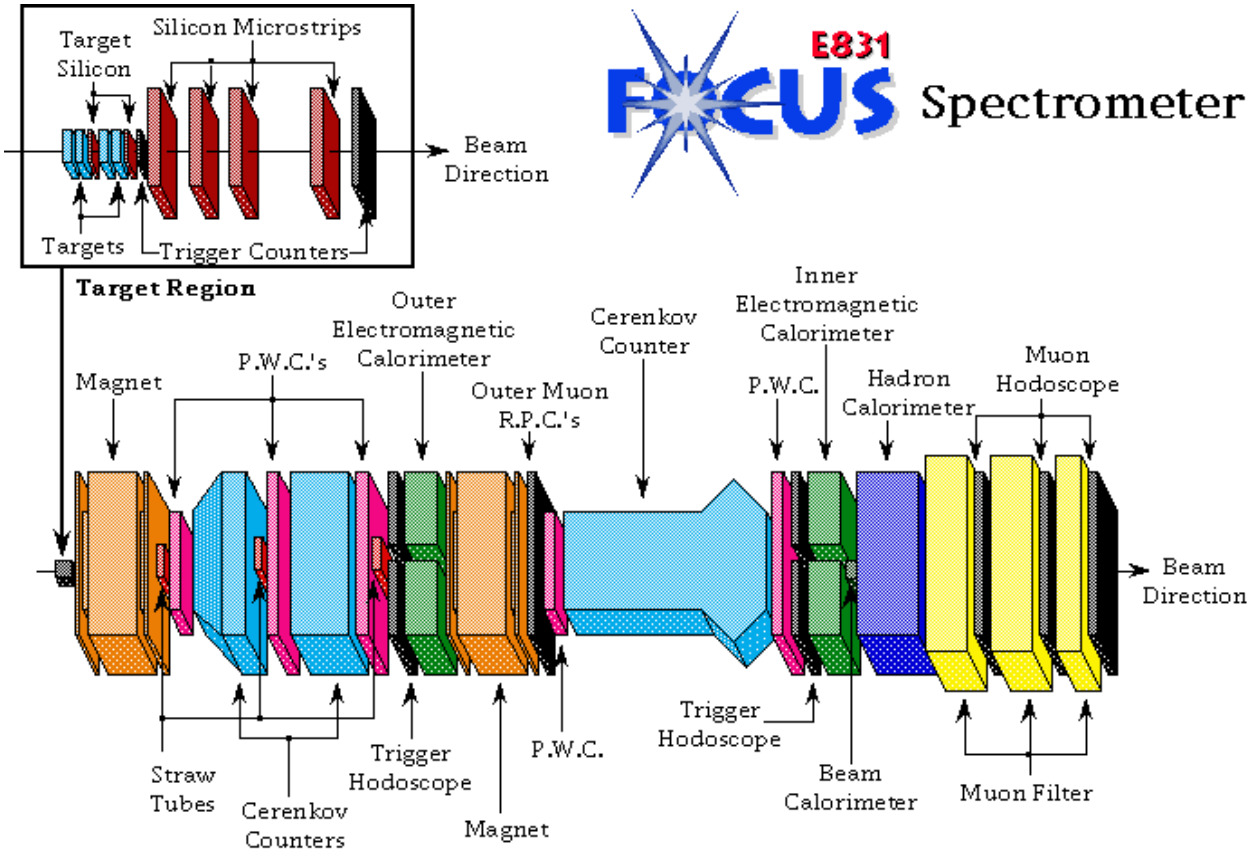
Κατόπιν το κάθε γεγονός αναλύεται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές οι οποίοι εξηγούν τα περισσότερα από τα δεδομένα και παρουσιάζουν τα αποτελέσματα τους στους φυσικούς για περαιτέρω ανάλυση.

Οι ανιχνευτές τοποθετούνται σε σημεία πάνω στην τροχιά των επιταχυνών και συγκεκριμένα στα σημεία όπου γίνονται οι συγκρούσεις των σωματιδίων. Επειδή λοιπόν έχουμε δύο είδη συγκρούσεων, αυτές των σταθερών στόχων και αυτές των συγκρουώμενων δεσμών, στις οποίες οι τροχιές των παραγόμενων σωματιδίων είναι διαφορετικές, έτσι διαφορετικά είναι και τα σχήματα και οι όγκοι των ανιχνευτών.

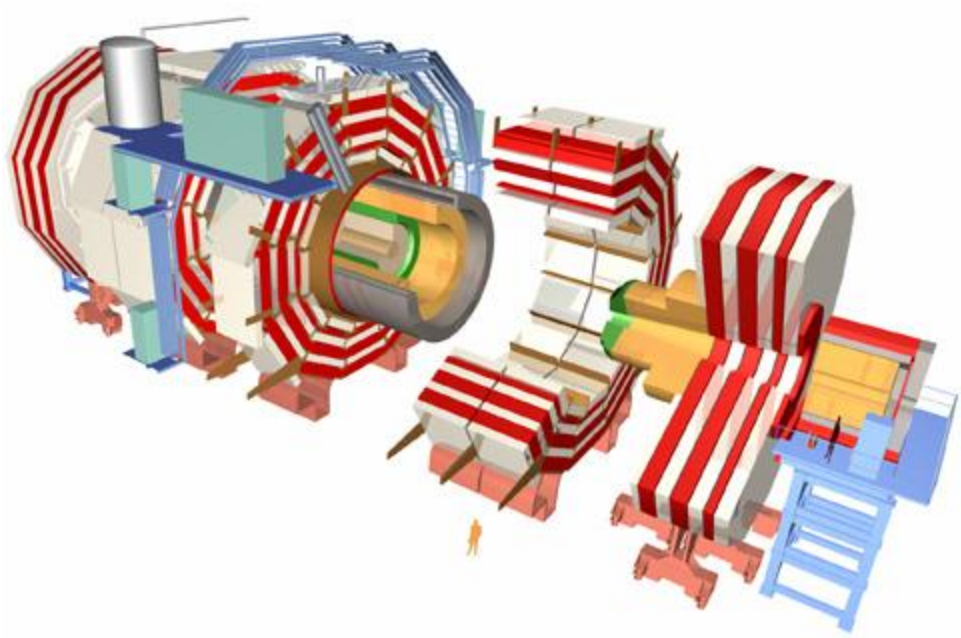
Στα πειράματα σταθερού στόχου, μία δέσμη επιταχύνεται πρός μία κατέυθυνση και προσκρούει πάνω σε ένα στόχο. Έτσι οι ανιχνευτές σε αυτή την περίπτωση έχουν κωνικό περίπου σχήμα με το άνοιγμα προς την κατέυθυνση της κίνησης αφου τέτοιες είναι και οι τροχίες των νέων σωματιδίων που προκύπτουν.



Οι ανιχνευτές αυτοί έχουν πολλά και διαφορετικά επίπεδα που καθένα από αυτά χρησιμεύει για την ανίχνευση διαφορετικών ιδιοτήτων των σωματιδίων.



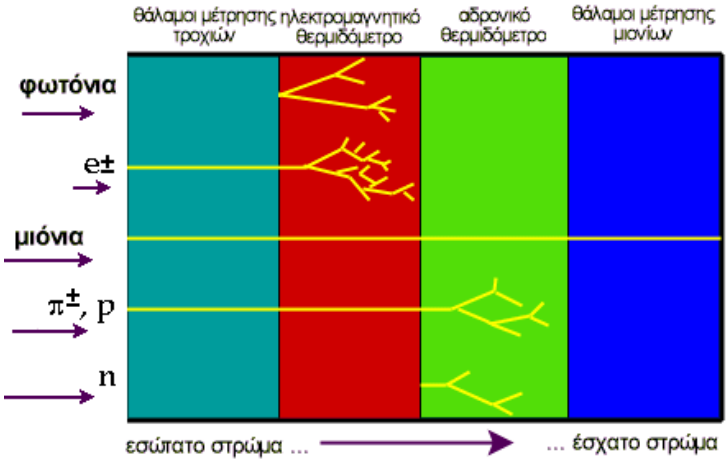

Ανάλογη είναι και οι λειτουργία των ανιχνευτών στους επιταχυντές συγκρουόμενων δεσμών. Σε αυτή την περίπτωση όμως αλλάζει το σχήμα τους. Οι περισσότεροι από αυτούς έχουν κυλινδικό σχήμα αφού οι τροχίες των παραγόμενων σωματιδίων όταν συγκρούονται δύο δέσμές με αντίθετες φορές είναι προς κάθε κατεύθυνση. Τα επίπεδα ανάλυσης των ανιχνευτών αυτών δεν είναι τοποθετημένα γραμμικά αλλά σε διαδοχικούς κυλίνδρους σχηματικά.



Ο λόγος  λοιπόν που οι ανιχνευτές διαιρούνται σε τόσα πολλά τμήματα είναι επειδή το κάθε τμήμα εξετάζει μία ειδική ομάδα των ιδιοτήτων των σωματιδίων. Αυτά τα τμήματα είναι τοποθετημένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα σωματίδια να περάσουν από τα διάφορα στρώματα διαδοχικά. Η ύπαρξη ενός σωματιδίου δεν είναι προφανής μέχρι την στιγμή που θα αντιδράσει με τον ανιχνευτή με κάποιο αναγνωρίσιμο τρόπο ή διασπάται σε ανιχνεύσιμα σωματίδια.

Τα κυριότερα μέρη ενός ανιχνευτή είναι:

Α) Θάλαμος ανίχνευσης σωματιδίων. Ανιχνεύει τις τροχίες των σωματιδίων με μεγάλη ακρίβεια.
Β) Ηλεκτρονικό θερμιδόμετρο. Μετρά την ολική ενέργεια ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων και φωτονίων.
Γ) Αδρονικό θερμιδόμετρο. Μετρά την ολική ενέργεια των αδρονίων.
Δ) Θάλαμος ανίχνευσης μιονίων. Ανιχνεύει μόνο μιόνια και τα νετρίνο αφού αυτα μόνο μπορούν να φτάσουν τόσο μακρυά.



Τα φορτισμένα σωματίδια, όπως για παράδειγμα τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια, ανιχνεύονται και στους θαλάμους μέτρησης φορτισμένων σωματιδίων και στο ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο

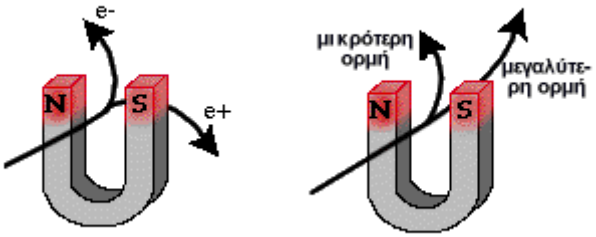
Τα φορτισμένα σωματίδια, όπως για παράδειγμα τα νετρόνια και τα φωτόνια, δεν είναι ανιχνεύσιμα στους θαλάμους μέτρησης φορτισμένων σωματιδίων και τα "βλέπουμε" μόνο όταν αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή. Τα φωτόνια ανιχνεύονται από το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο, ενώ τα νετρόνια από την ενέργεια που εναποθέτουν στο αδρονικό θερμιδόμετρο.

Τα νετρίνο δεν εμφανίζονται σ' αυτό τον πίνακα διότι σπάνια αλληλεπιδρούν με την ύλη και μπορούν να ανιχνευτούν μόνο από την συνολική έλλειψη ενέργειας.

Το κάθε σωματίδιο έχει την δική του "υπογραφή" μέσα στον ανιχνευτή. Για παράδειγμα, αν ανιχνεύσουμε ένα σωματίδιο μόνο στο ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο, τότε είναι σχεδόν σίγουρο ότι έχουμε παρατηρήσει ένα φωτόνιο.

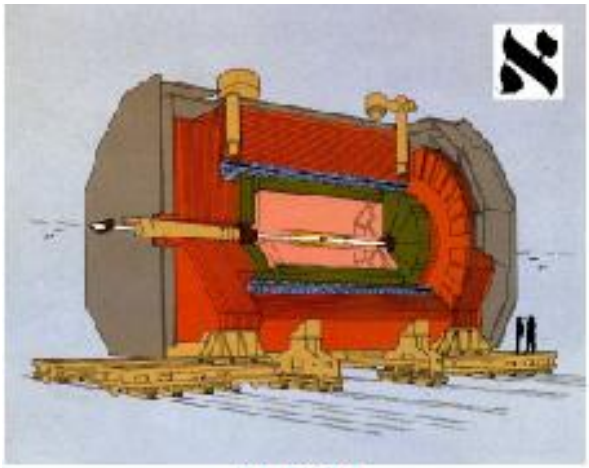
Οι ανιχνευτές αυτοί φυσικά διαθέτουν και μαγνήτες, οι οποίοι εκτρέπουν τα παραγόμενα σωματίδια για να συνεχίσουν την πορεία τους στο δακτύλιο του επιταχυντή για να συγκρουστούν εκ νέου στον επόμενο ανιχνευτη.

Μία σημαντική λειτουργία του ανιχνευτή είναι η μέτρηση του φορτίου και της ορμής ενός σωματιδίου. Γι' αυτό τον λόγο το εσωτερικό τμήμα του ανιχνευτή και ιδιαίτερα το σύστημα ανίχνευσης φορτισμένων σωματιδίων βρίσκεται μέσα σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Το φορτίο του σωματιδίου αναγνωρίζεται από την τροχιά τους, μιά και η τροχιά των θετικά φορτισμένων σωματιδίων καμπυλώνεται από το μαγνητικό πεδίο κατά την αντίθετη φορά από αυτή των αρνητικά φορτισμένων.

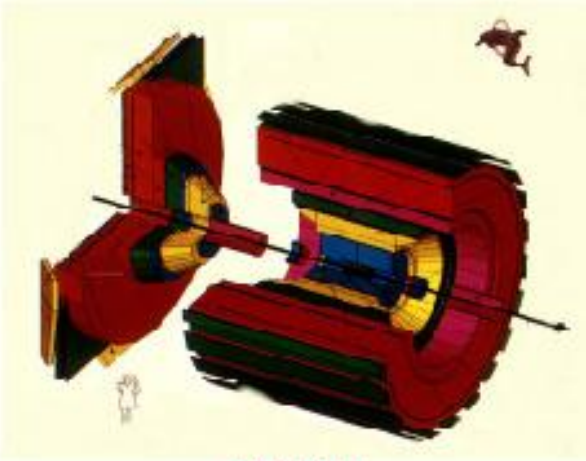



Η ορμή μπορεί να υπολογισθεί λαμβάνοντας υπ' όψιν το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ορμή του σωματιδίου τόσο μικρότερη είναι η καμπύλωση της τροχιάς του από το μαγνητικό πεδίο.

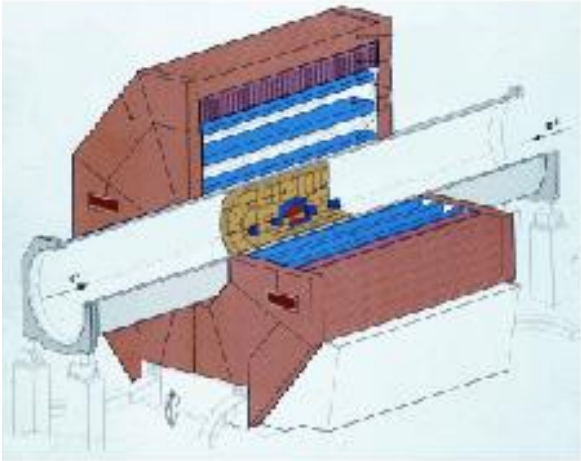
Ο LEP διέθετε 4 ανιχνευτές, τους ALEPH, DELPHI, L3 και OPAL.



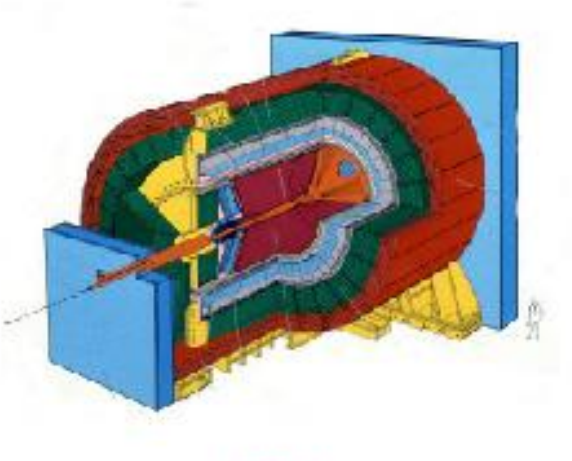
ALEPH



DELPHI

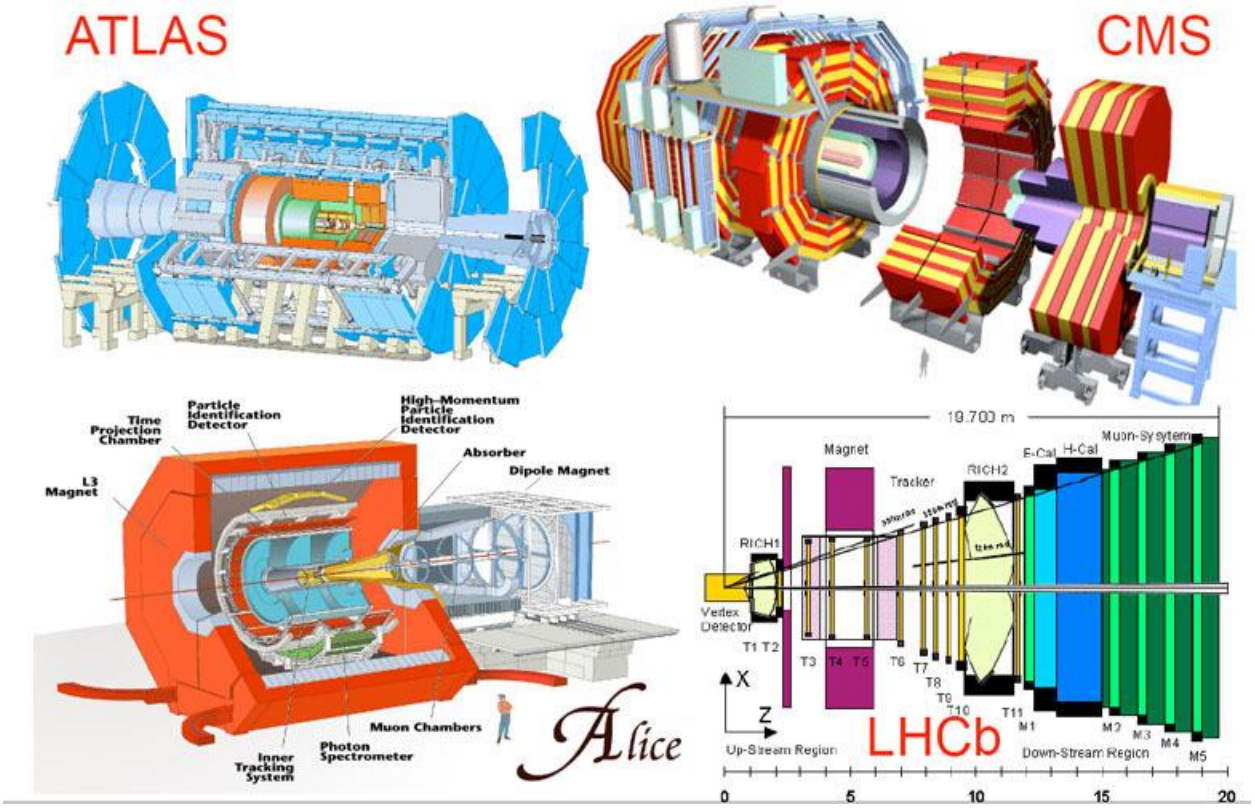


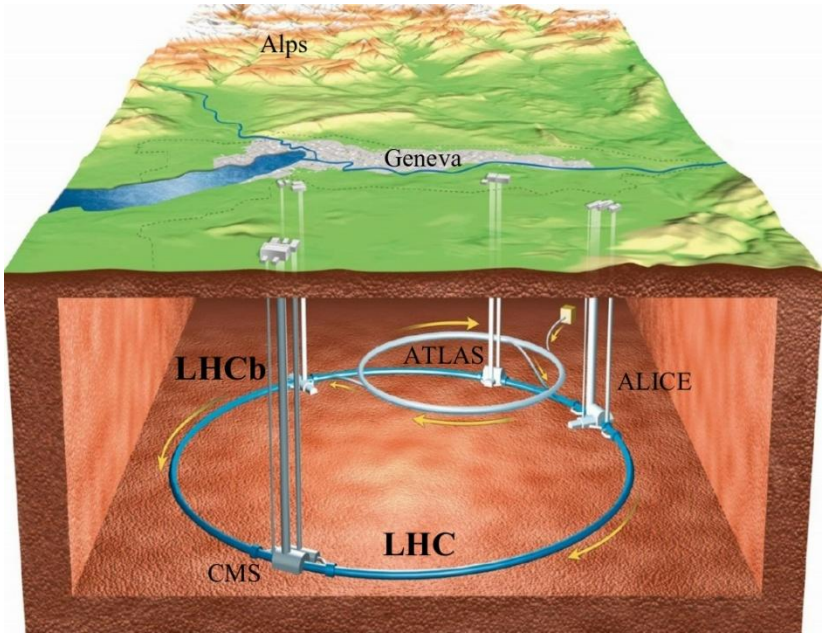
L3

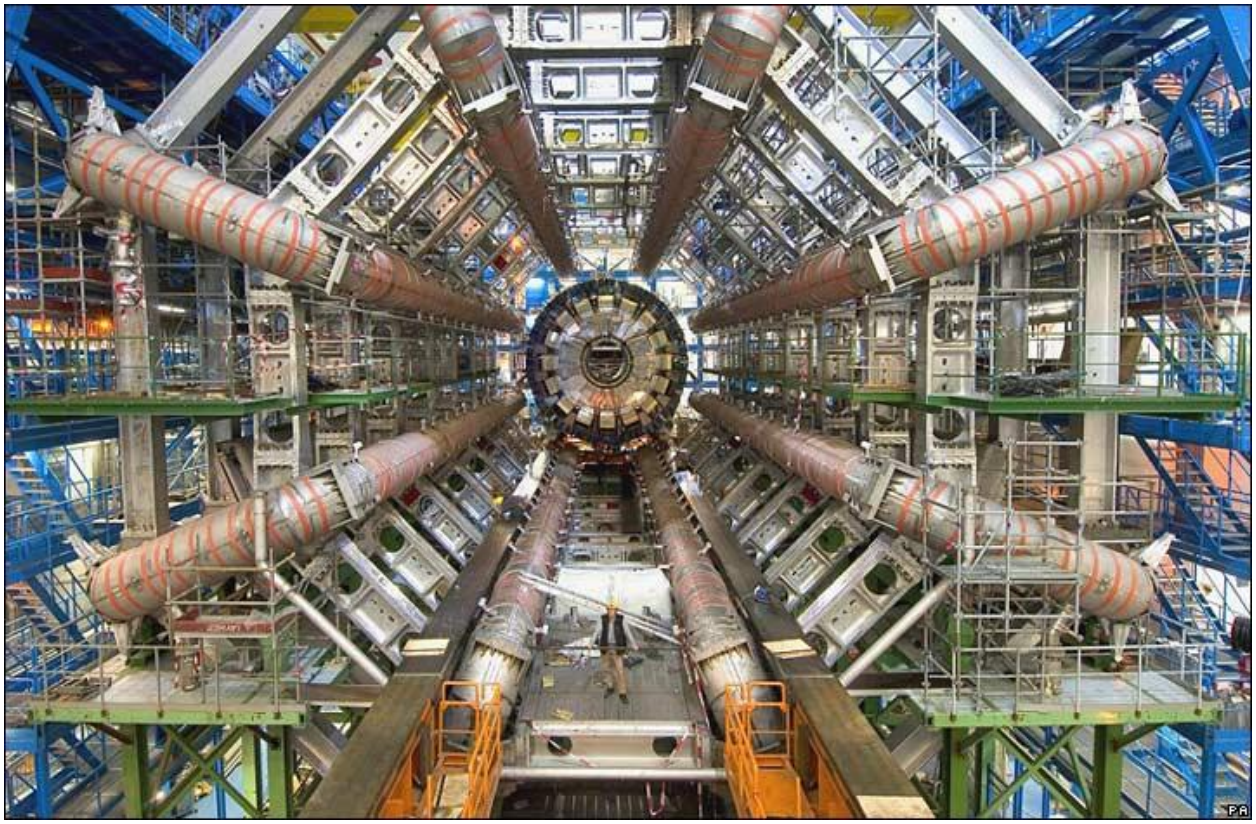


OPAL

Ο LHC διαθέτει και αυτός τέσσερις ανιχνευτες, τους ATLAS, CMS, ALICE και LHCb. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ανιχνευτές αυτοί έχουν ύψος 3 όροφων κτιρίων και μήκος και πλάτος μικρών οικοδομικών τετραγώνων. Και όλα αυτά 100 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της γης!


ATLAS
CMS
Time Projection Chamber
Particle Identification Detector
High-Momentum Particle Identification Detector
Absorber
Dipole Magnet
L3 Magnet
Muon Chambers
Photon Spectrometer
Inner Tracking System
Alice
19.700 m
Magnet
Tracker
RICH1
RICH2
E-Cal
H-Cal
Muon-System
Vertex Detector
T1 T2
T3
T4 T5
T6
T7
T8
T9
T10
T11
M1
M2
M3
M4
M5
X
Z
Up-Stream Region
Down-Stream Region
LHCb
0
5
10
15
20


Alps
Geneva
LHCb
ATLAS
ALICE
LHC
CMS



Γραμμικοί και κυκλικοί επιταχυντές πλεόν συνδυάζονται. Ένας γραμμικός επιταχυντής είναι το πρωτο στάδιο επιτάχυνσης των σωματιδίων που τα εγχύει στη συνέχεια στους δακτυλίους των κυκλικών. Είναι όμως και το τελευταίο στάδιο σε περιπτώσεις όπου δέσμες επιταχύνονται και στη συνέχεια χτυπούν σε σταθερούς στόχους.

Το πλεονέκτημα των κυκλικών επιταχυντών σε σχέση με τους γραμμικούς επιταχυντές, είναι ότι τα σωματίδια στους κυκλικούς επιταχυντές (π.χ. τα σύγχροτρα) περιστρέφονται πολλές φορές και κερδίζουν ενέργεια σε κάθε φορά περιστροφή. Γι' αυτό τον λόγο τα σύγχροτρα μπορούν να παράγουν σωματίδια με πολύ μεγάλη ενέργεια χωρίς να χρειάζεται να έχουν τεράστιο μήκος. Επιπλέον, το γεγονός ότι τα σωματίδια περιστρέφονται πολλές φορές σημαίνει ότι υπάρχουν ευκαιρίες για πολλές συγκρούσεις στα σημεία που οι δέσμες διασταυρώνονται.

Οι γραμμικοί επιταχυντές, όμως, είναι πιό εύκολο να κατασκευαστούν διότι δεν χρειάζονται τους μεγάλους μαγνήτες που απαιτούνται για εξαναγκάζουν τα σωματίδια να περιστρέφονται σε μία κυκλική τροχιά. Οι κυκλικοί επιταχυντές χρειάζεται να έχουν τεράστια ακτίνα για να μπορέσουν να επιταχύνουν τα σωματίδια σε πολύ μεγάλες ενέργειες και αυτό τους κάνει πολύ δαπανηρούς στην κατασκευή τους αφού χρειάζεται να κατασκευαστούν σε υπόγεια τούνελ καθώς δεν υπάρχει τόσος διαθέσιμος χώρος στην επιφάνεια της γης.

Ένα άλλο σημείο που πρέπει οι φυσικοί να λάβουν υπ' όψιν, είναι το γεγονός ότι κατά την επιτάχυνση ενός φορτισμένου σωματιδίου, αυτό ακτινοβολεί ενέργεια. Στις μεγάλες ενέργειες η

απώλεια ενέργειας από ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη κατά την διάρκεια κυκλικής απ' ότι γραμμικής επιτάχυνσης. Επιπλέον, η απώλεια ενέργειας λόγω ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη κατά την επιτάχυνση των ελαφρών ηλεκτρονίων απ' ότι των βαρέων πρωτονίων. Τα ηλεκτρόνια και τα αντι-ηλεκτρόνια (ποζιτρόνια) μπορούν να επιταχυνθούν σε μεγάλες ενέργειες μόνο με γραμμικούς επιταχυντές ή με κυκλικούς επιταχυντές μεγάλης ακτίνας.

Κυριότεροι επιταχυντές

SLAC: Stanford Linear Accelerator Center (Κέντρο του Γραμμικού Επιταχυντή του Στάνφορντ), στην California, ΗΠΑ, ανακάλυψε το λεπτόνιο τ και μαζί με το Brookhaven το κουάρκ c.

Fermilab: Fermi National Laboratory Accelerator (Εθνικό Επιταχυντικό Εργαστήριο του Fermi), στο Illinois, ΗΠΑ. Εδώ ανακαλύφθηκαν τα κουάρκ b και t.

CERN: European Laboratory for Particle Physics (το Ευρωπαϊκό Εργαστήριο για την Φυσική των Στοιχειωδών Σωματιδίων), στα σύνορα Ελβετίας και Γαλλίας. Εδώ ανακαλύφθηκαν τα σωματίδια W και Z .

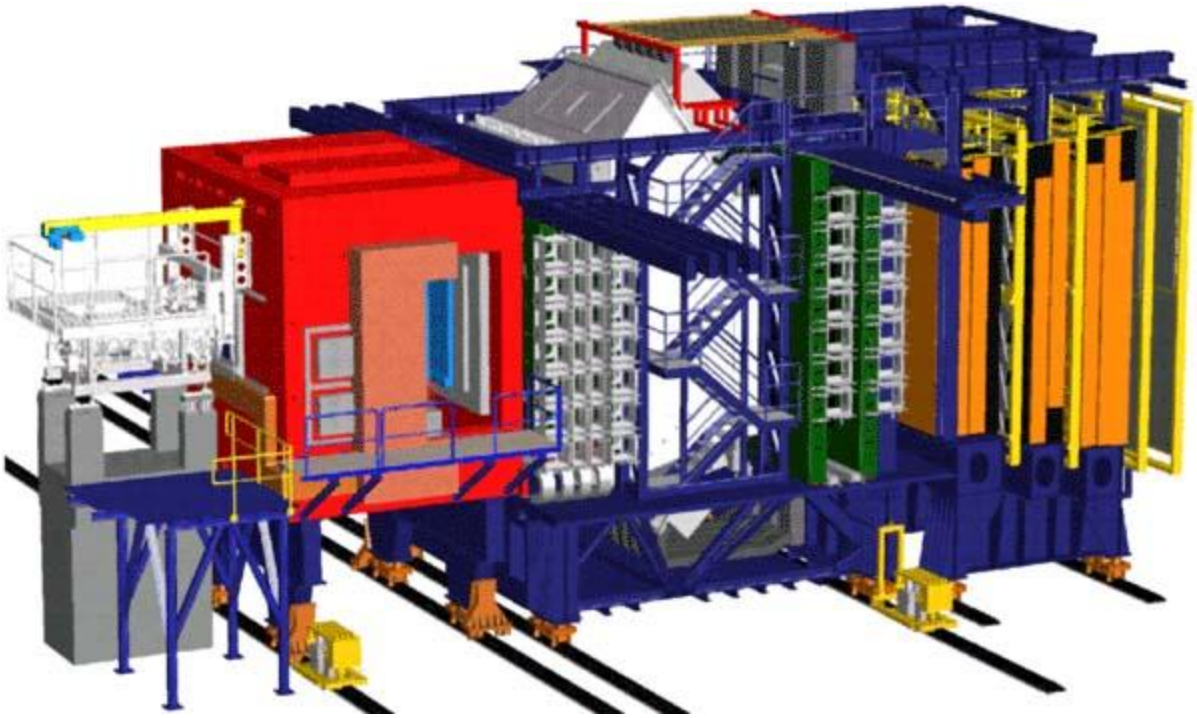
Brookhaven National Lab: (Εθνικό Εργαστήριο Brookhaven), στην Νέα Υόρκη, ΗΠΑ όπου συγχρόνως με το SLAC ανακάλυψε το κουάρκ c.

CESR: Cornell Electron-Positron Storage Ring (Δακτύλιος Αποθήκευσης Ηλεκτρονίων-Ποζιτρονίων στο Cornell), στην Νέα Υόρκη, ΗΠΑ. Το CESR μελετά με ακρίβεια τις ιδιότητες του κουάρκ b.

DESY: (Γερμανικό Σύγχροτρο Ηλεκτρονίων) στο Αμβούργο, Γερμανία. Εδώ ανακαλύφθηκε το γκλουόνιο.

KEK: στην Ιαπωνία, κατασκευάζει ένα "εργοστάσιο" b κουάρκ.
IHEP: Institute for High-Energy Physics (Ινστιτούτο για τις Υψηλές Ενέργειες), στην Κίνα, μελετά με ακρίβεια τις ιδιότητες του κουάρκ c και του λεπτονίου τ.

Αξίζει να αναφερθεί ότι υπήρχε και ένας επιταχυντής στον οποίο νέα σωματίδια δεν προέκυπταν με τους γνωστούς τρόπους συγκρουόμενων δεσμών ή σταθερού στόχου αλλά με το να κινείται ένας στόχος που αποτελείτω από ενα λεπτό σύρμα κατευθείαν μέσα στην περιστρεφόμενη δέσμη. Αυτός ο επιταχυντής ονομαζόταν HERA που ήταν ένας πρωτοποριακός επιταχυντής στο DESY της Γερμανίας και ο ανιχνευτής του που παρήγαγε τα σωματίδια με αυτόν τον τρόπο, ο HERA-b, στην εικόνα που ακολουθεί.

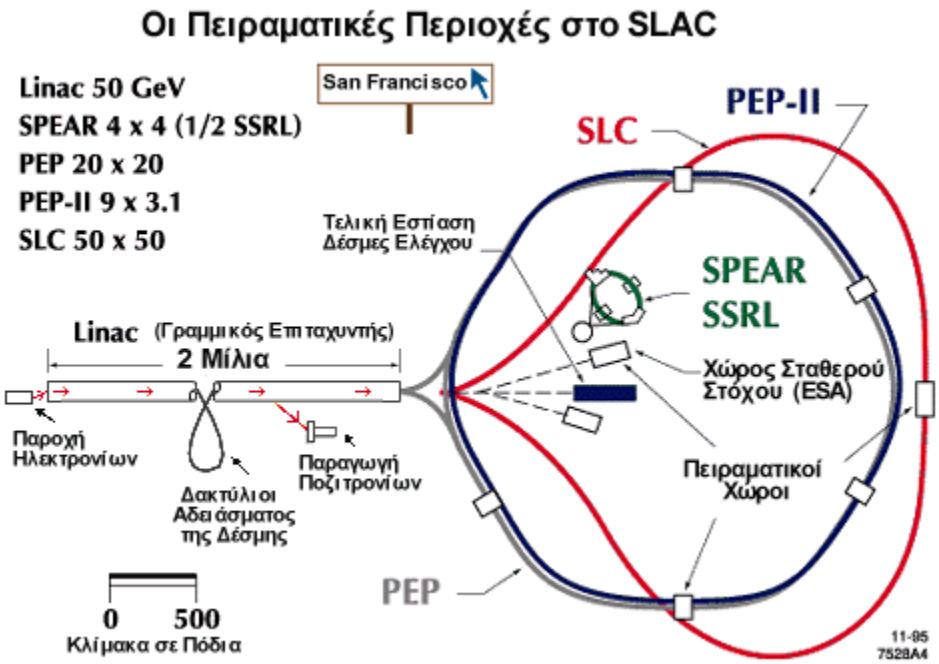


## Βασικές αρχές κυκλικών επιταχυντών και προσομοίωση κίνησης των σωματιδίων

Κύριο μέρος της εργασίας «Επιταχυντές Σωματιδίων – Μια πολυμεσική παρουσίαση» είναι τέσσερα φλας βίντεο που επιδεικνύουν τις κινήσεις των σωματιδίων σε έναν κυκλικό επιταχυντή σύμφωνα με τις βασικές του λειτουργίες που είναι, α) η καμπύλωση της δέσμης, β) η σταθεροποίηση ή εστίαση φάσης των σωματιδίων και γ) η εστίασης της δέσμης. Η αρχές δηλαδή που άλλαξαν την ιστορία και αποτέλεσαν τα θεμέλια για τους επιταχυντές σωματιδίων όπως τους ξέρουμε σήμερα. Επιπλέον όσον αφορά την καμπύλωση της δέσμης παρουσιάζονται περιπτώσεις όπου ο επιταχυντής δεν λειτουργεί σωστά και η δέσμη δεν καμπυλώνεται όπως πρέπει με συνέπεια να διαγράφει διαφορετικές τροχιές και να χάνεται.

Ενας κυκλικός επιταχυντής όπως έχουμε αναφέτρει αποτελείται από περισσότερους από εναν δακτύλιο, περισσότερα απο ένα συγχροτρα δηλαδή και τα σωματίδια από την παραγωγή τους και την πρώτη τους επιτάχυνση από τον γραμμικό επιταχυντή μέχρι τον τελικό δακτύλιο περνούν μεσα από αυτούς τους μικρότερους δακτύλιους που μπορούν να λειτουργούν και αυτοί ως επιταχυντές ή να είναι δαχτυλίδια αποθήκευσης ενέργειας η ακτινοβολίας σύγχροτρου (synchrotron radiation). Όλοι αυτοί οι δακτύλιοι εχουν την ίδια διάταξη και τα ίδια συστατικά μερη. Κοιλότητες επιτάχυνσης, διπολικούς μαγνήτες καμπύλωσης και τετραπολικούς μαγνήτες εστίασης (ή και εξαπολικούς ή οχταπολικούς). Για περιφέρεια 27 χιλιομέτρων όπως είναι του

LHC αλλά και για άλλους σύγχρονους επιταχυντές με μεγάλες περιφέρειες τα κομμάτια που απαρτίζουν τη διάταξη είναι σχεδόν ευθεία. Γιαυτό το λόγο δεν εχουν και όλοι οι επιταχυντές αυστηρά κυκλικό σχήμα αλλά διαθέτουν καμπυλωτά τμήματα και τμήματα με ευθείες ώς ένα μέρος από την συνολική διάταξη. Επιπλέον η εικόνα μέσα απο το τούνελ των επιταχυντών μοιάζει περισσότερο σαν να βρίσκεται κάποιος δίπλα σε έναν γραμμικό επιταχυντή παρά διπλα σε έναν κυκλικό.



Συγκριτικά μεταξύ τους οι μαγνήτες καμπύλωσης εχουν μεγαλύτερο μήκος από αυτους της εστίασης αφού η καμπύλωση της δέσμης είναι το πρωτεύον ζήτημα όταν πρόκειται για κυκλικό επιταχυντή και πρέπει η δέσμη να κινηθεί σε κυκλική τροχιά. Για αυτό το λόγο η εστίαση της δέσμης μέσα από τους μαγνήτες εστίασης γίνεται σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό ώστε στην απόσταση που πρέπει να διανύσει η δέσμη από τον ένα μαγνήτη εστίασης μέχρι τον επόμενο η εστίαση να μην χαθεί.

Σε συγκρόυσεις σωματιδίων όταν η ταχύτητες πλησιάζουν αυτή του φωτός c τότε η ενέργεια του σωματιδίου δίνεται από τον τύπο,

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$$

όπου $mo$ η μάζα ηρεμίας. Η αύξηση της ενέργειας λοιπόν εξαρτάται αποκλειστικά από την αυξηση της ορμής p. Αλλαγή στην ορμή του σωματιδίου λοιπόν μπορεί να επέλθει αν του ασκηθεί μία δύναμη F. Η φύση μας προσφέρει τέσσερις δυνάμεις των οποίων η επίδραση φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

| force | relative strength | range [m] | particles affected |
|---|---|---|---|
| gravity | $6 \times 10^{-39}$ | $\infty$ | all particles |
| electromagnetism | $1/137$ | $\infty$ | charged particles |
| strong force | $\approx 1$ | $10^{-15} - 10^{-16}$ | hadrons |
| weak force | $10^{-5}$ | $\ll 10^{-16}$ | hadrons & leptons |

Καταλληλότερη δύναμη λοιπόν που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η ηλεκτρομαγνητική. Ετσι όταν ένα σωματίδιο με ταχύτυτα $v$ περάσει μέσα από μία περιοχή όπου υπάρχει ηλεκτρικό πεδιό E και μανγητικό πεδίο B, δέχεται δύναμη Lorentz

$$\boxed{\boldsymbol{F} = e(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} + \boldsymbol{E}).}$$

Όταν ένα σωματίδιο κινηθεί από το σημείο $r1$ στο σημείο $r2$, η ενέργεια που θα δεχτεί δίνεται από τον τύπο,

$$\Delta E = \int_{\boldsymbol{r}_1}^{\boldsymbol{r}_2} \boldsymbol{F} \cdot d\boldsymbol{r} = e \int_{\boldsymbol{r}_1}^{\boldsymbol{r}_2} (\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} + \boldsymbol{E}) \cdot d\boldsymbol{r}.$$

Το $dr$ είναι παράλληλο με την ταχύτητα και εφόσον το διάνυσμα $vxB$ είναι κάθετο με το $dr$,

$$(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}) \cdot d\boldsymbol{r} \equiv 0$$

‘Αρα το μαγνητικό πεδίο δεν επηρεάζει καθόλου την ενέργεια, όπότε αύξηση της ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί μόνο από τα ηλεκτρικά πεδία.

$$\Delta E = e \int_{\boldsymbol{r}_1}^{\boldsymbol{r}_2} \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{r} = eU,$$

Όπου $U$ το δυναμικό που διασχίζει το σωματίδιο. Φυσικά το μανγητικό πεδίο μπορεί να μην βοηθά στην αύξηση της ενέργειας (κινητική) αλλά παίζει το σημαντικό ρόλο όταν θέλουμε να οδηγήσουμε το σωματίδιο σε κυκλική τροχιά ή διαφορετική της ευθείας σε κάθε περίπτωση. Τέτοιες δυνάμεις χρησιμοποιούνται λοιπόν για να καμπυλώσουν και να εστιάσουν τις δέσμες των σωματιδίων. Συγκεκριμένα, για την κίνηση του σωματιδίου στη διεύθυνση z, αν θεωρήσουμε πως x και y είναι η κάθετη και η οριζόντια συνιστώσα της διατομής του σωλήνα αντίστοιχα, το σωματίδιο θα δέχεται δύναμη,

$$\frac{dp_x}{dt} = \mathbf{F_x} = q(E_x - v_z B_y)$$

και για σχετικιστικά σωματίδια που η ταχύτητα στον αξονα z είναι περίπου ίση με την ταχήτητα του φωτός,

$$\upsilon_z B_y >> E_x$$

άρα βλέπουμε πως το μαγνητικό πεδίο μεσω της δύναμης Lorentz είναι πολυ πιο αποτελεσματικό στην καθοδήγηση της δέσμης.

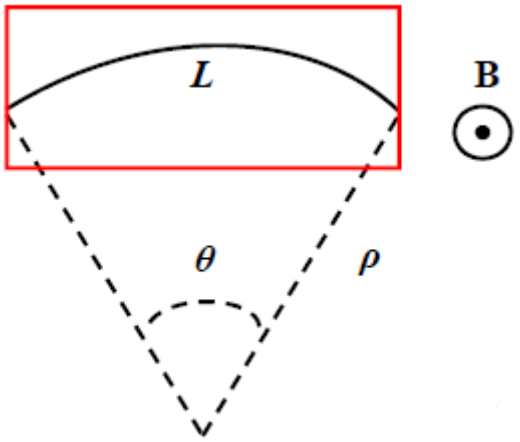
## Καθοδήγηση δέσμης.

Αν θεωρήσουμε ότι ο αγωγός διαρέεται από σταθερό ηλεκτρικό ρεύμα αλλά έχει μία κυκλική οπή, όπως στο σχήμα που ακολουθεί,

τότε εάν εφαρμοστεί ρεύμα με την αντίθετη φορά και οι δύο κυκλικές διατομές διασταυρωθούν, στην κοινη περιοχή έχουμε ομογενές μαγνητικό πεδίο κάθετο στην κίνηση του σωματιδίου. Με αυτόν τον τρόπο και σύμφωνα με τη δύναμη του Lorentz το σωματίδιο καμπυλώνει την τροχιά της κίνησης του προς το εσωτερικό του δακτυλίου. Το ομογενές αυτό μαγνητικό πεδίο δημιουργείται με τη βοήθεια των διπολικών μαγνητών που τοποθετούνται κατά μήκος του σωλήνα. Ένα σωματίδιο λοιπόν εκτελεί κυκλική κίνηση με κυκλοτρονική συχνότητα,

$$\omega_c = \frac{v}{r} = \frac{qvB}{p} \approx \frac{qB}{m}$$

Αν θεωρήσουμε κυκλικό επιταχυντή σωματιδίων ενέργειας E με N δίπολα, μήκους L,




τότε η γωνία κάμψης είναι,

$$\theta = \frac{2\pi}{N}$$

η ακτίνα κάμψης,

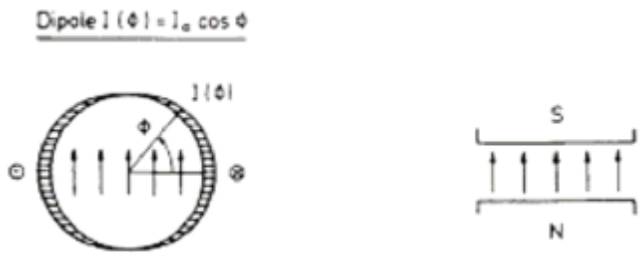
$$\rho = \frac{L}{\theta}$$

και το ολοκληρωμένο διπολικό πεδίο,

$$BL = \frac{2\pi}{N}\frac{\beta E}{q}$$

Επιλέγοντας ένα διπολικό μαγνητικό πεδίο λοιπόν, καθορίζεται και το μήκος του, και αντιστρόφως. Για υψηλότερα πεδία, μικρότερα και λιγότερα δίπολα μπορούν να χρησιμοποιήθουν. Έτσι η περιφέρεια του δακτυλίου (κόστος) επηρεάζεται από την επιλογή του

πεδίου. Διπολικοί μαγνήτες σιδήρου μπορούν να δημιουργήσουν μαγνητικό πεδίο μέχρι 2T, ενω με τους υπεραγώγιμους μαγνήτες με άκρες πηνίων που χρησιμοποιούνται πλεον μπορούμε να έχουμε πεδίο μεγαλύτερο από 2T.

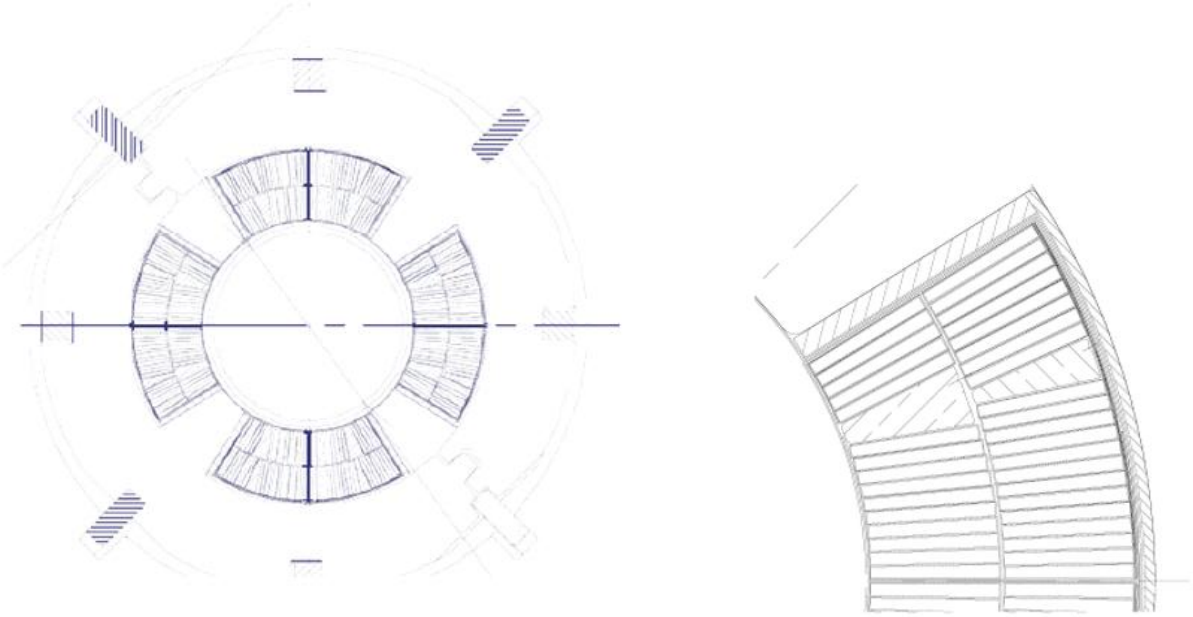



Για m=1, δηλαδή διανομή ρεύματος τάξεως ένα για το δίπολο, απο τον τύπο

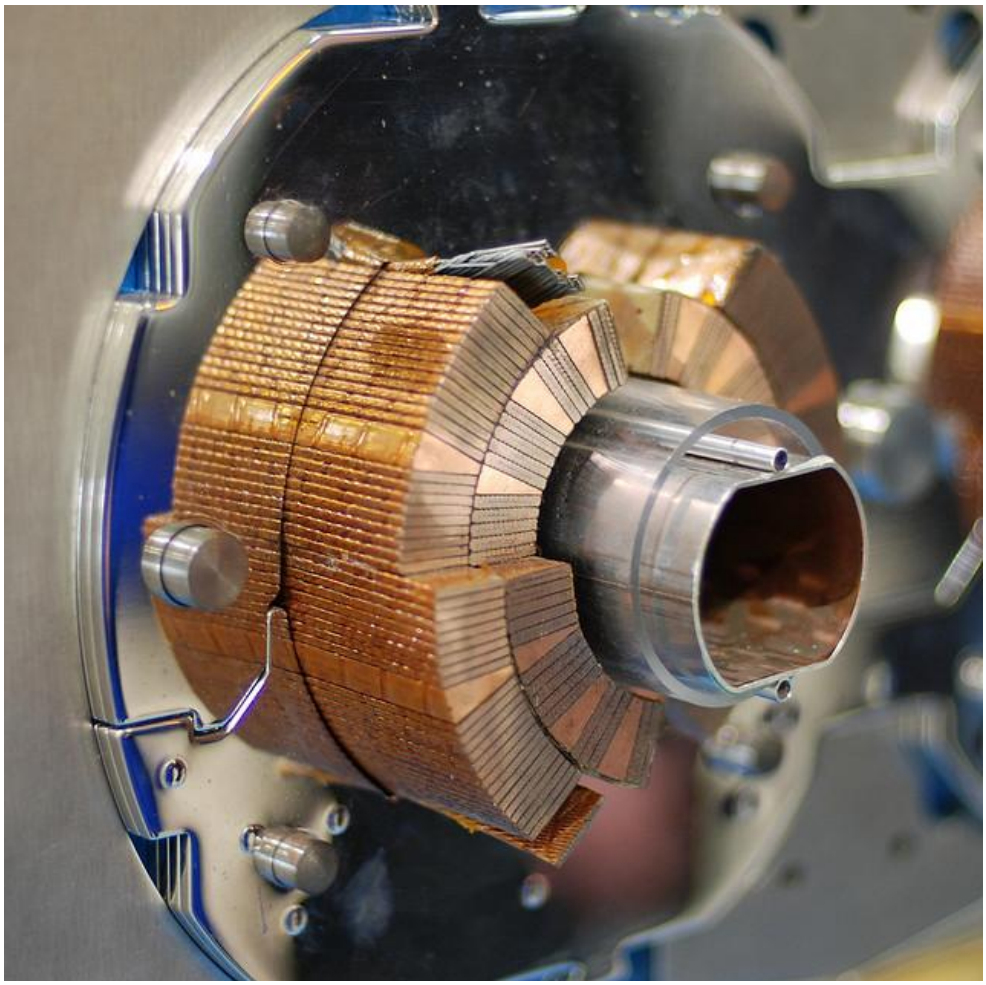
$$I(\phi) = I_0 \cos(m\phi)$$

Ομοίως έχουμε m=2 για τετράπολα, m=3 για εξάπολα κ.ο.κ., που θα δούμε στη συνέχεια.

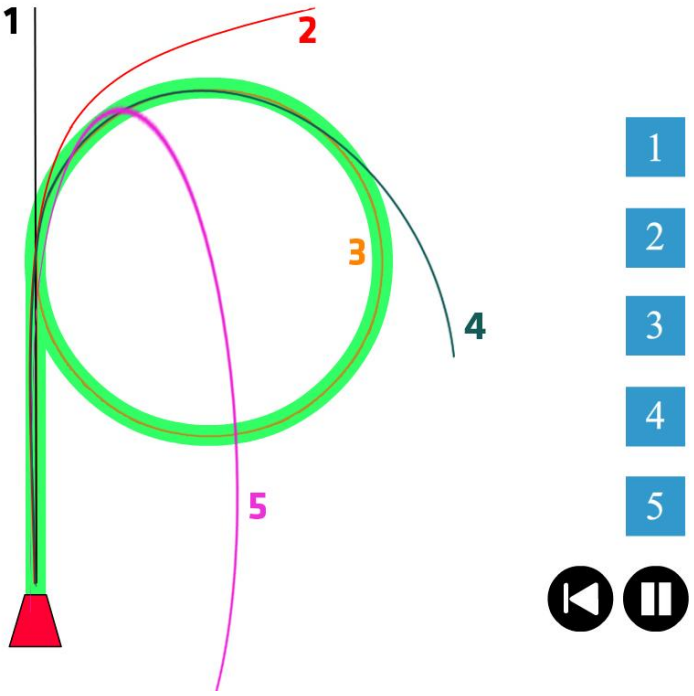
| index | field distribution | multipole |
|---|---|---|
| $m = 1$ | $B_z = -\frac{\mu_0 I_0}{2a} = \text{const}$ | dipole |
| $m = 2$ | $B_z = -\frac{\mu_0 I_0}{2a^2} x$ | quadrupole |
| $m = 3$ | $B_z = -\frac{\mu_0 I_0}{2a^3} x^2$ | sextupole |
| etc. | | |



Η δύναμη Lorentz δρα στις ακρες των πηνίων όταν διαρρέονται από ρεύμα.



Το πρώτο βίντεο λοιπόν της εργασίας απεικονίζει έναν κυκλικό επιταχυντή με ένα γραμμικό εγχυτήρα σωματιδίων από μία πήγη. Ενα απλό σχήμα ενός συγχροτρου. Σκοπός του βίντεο είναι η παρουσίαση της καμπύλωσης της τροχιάς ενός σωματιδίου στον κυκλικό επιταχυντή. Ενα σωματίδιο λοιπόν ξεκινώντας απο μία πηγη επιταχύνεται απο ένα γραμμικό επιταχυντή για να εισέλθει στη συνέχεια στον δακτύλιο του κυκλικού. Το βίντεο είναι φτιαγμένο σε flash μορφή και παρέχει διαδραστικότητα. Ο θεατής έχει τη δυνατότητα να δει πέντε πιθανές περιπτώσεις καμπύλωσης του σωματιδίου με δυνατότητα «πάγωματος» της εικόνας και επαναλήψης. Για την ακρίβεια πρόκειται για τέσσερις περιπτώσεις λάθους και μία πέριπτωση, τη μοναδική εξάλλου, που το σωματίδιο ακολουθεί κυκλική πορεία στο σωλήνα του επιταχυντή. Στις υπολοιπές περιπτώσεις, λόγω λαθών που θα εξηγηθούν παρακάτω, η δέσμη παρεκλίνει της επιθυμητής πορείας και χάνεται.




Πατώντας το κουμπί 1 βλέπουμε την πρώτη περίπτωση που παρουσιάζεται. Ενα σωματίδιο μετά την επιτάχυνση του από τον γραμμικό επιταχυντή συνεχίζει ευθεία την πορεία του χωρίς να μπαίνει στον δακτύλιο.

Πατώντας το κουμπί 2 βλεπουμε το σωματίδιο να μπαίνει στον κυκλικό επιταχυντή αλλά ακολούθως να χάνεται.

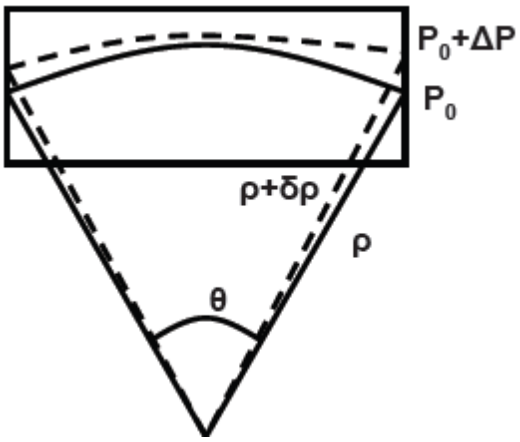
Στην 3$^{η}$ περίπτωση πατώντας το κουμπί 3, βλέπουμε το σωματίδιο να μπαίνει στη διάταξη του κυκλικού επιταχυντή και να εκτελεί κυκλική κίνηση.

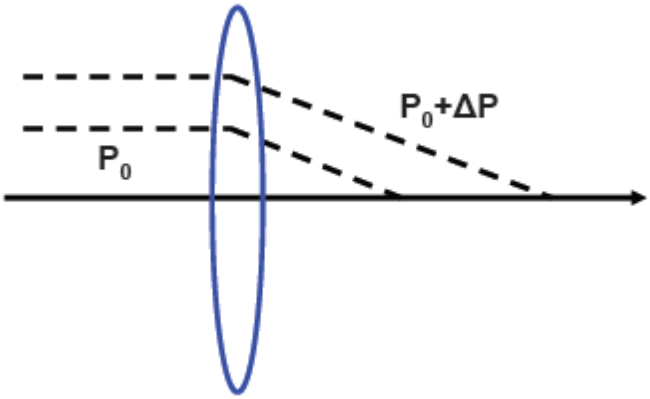
Η 4$^{η}$ περίπτωση που παρουσιάζεται πατώντας το κουμπί 4 δείχνει το σωματίδιο να μπαίνει μέσα στον κύκλο του επιταχυντή και να μικραίνει η ακτίνα της κυκλικής του κίνησης κάτι που το οδηγεί εκτός διάταξης με αποτέλεσμα να χαθεί.

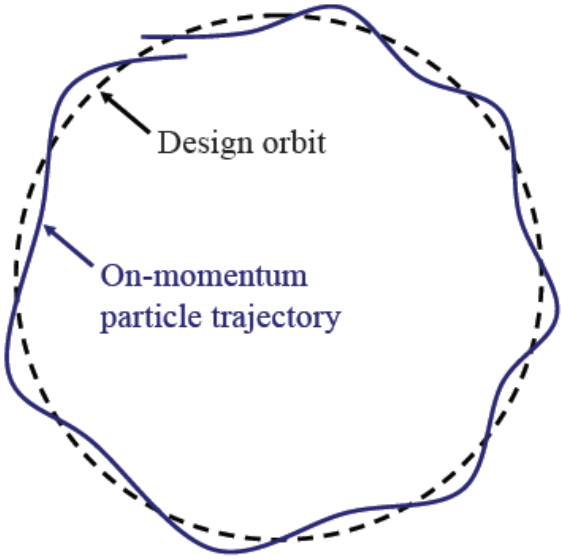
Τέλος στην 5η περίπτωση, πατώντας το κουμπί 5, βλέπουμε το σωματίδιο ενώ μόλις έχει αρχίσει να εκτελεί κυκλική κίνηση, ξαφνικά εκτρέπεται τελείως απο την πορεία του σε αντίθετη σχεδόν κατεύθυνση οδηγούμενο εκτός της διάταξης και μακρία από τον δακτύλιο του επιταχυντή.

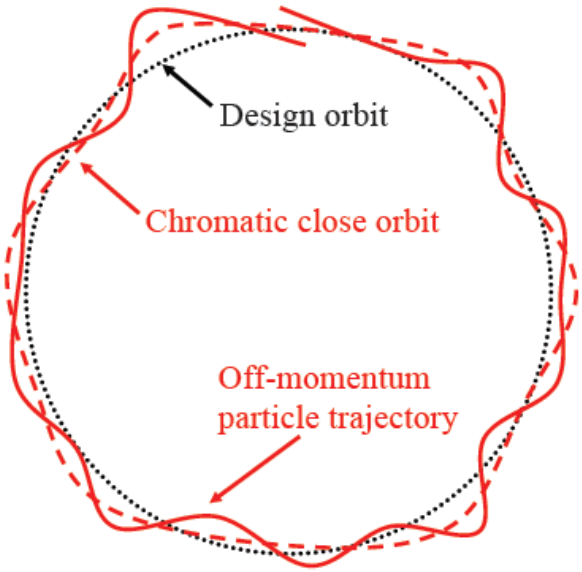
Πολλοί και διάφοροι οι λόγοι λοιπόν που μπορεί ενα σωματίδιο ή μία δέσμη σωματιδίων να εκτροχιαστεί. Στην 1η περίπτωση πιθανός λόγος για τον οποίο το σωματίδιο δεν μπαίνει κάν στην κυκλική διάταξη είναι να μην λειτουργεί σωστά ο εκτροπέας, ο μαγνήτης kicker, που υπάρχει εκεί για αυτή ακριβως τη δουλειά. Ενας από τους κυριότερους λόγους που ευθύνεται για τις περιπτώσεις 2 και 4 είναι η μετατόπιση από τη σωστή τους θέση των μαγνητών που οδηγούν τη δέσμη (misalignment). Οι διπολικοί ή οι τετραπολικοί μαγνητες δηλαδή δεν είναι σωστά ευθυγραμμισμένοι. Τέτοια λάθη διορθόνωνται συνήθως με την τοποθέτηση διορθωτών (correctors) που είναι συνήθως εξαπολικοί ή οκταπολικοί μαγνήτες.

Ενα δεδομένο που μπορεί να επιφέρει λάθη στην τροχιά ενός σωματιδίου ή μίας δέσμης και να τα οδηγήσει στα τοιχώματα του σωλήνα είναι και το γεγονός ότι δεν έχουν όλα τα σωματίδια πάντα την ίδια ορμή (off-momentum particles). Στην θεωρία δηλαδή παίρνουμε ως δεδομένο ότι τα σωματίδια έχουν όλα την ίδια όρμη. Στην πράξη όμως η ορμή των σωματιδίων διαφέρει κάτι που προκαλέι προβλήματα στα δίπολα και τα τετράπολα.



Επίσης σημαντικό πρόβλημα με απροσδιόριστες συνέπειες όπως στην περίπτωση 5, μπορεί να προκύψει από πρόβλημα στο μέτρο του μαγνητικού πεδίου που κατα κύριο λόγο οφείλεται στην παροχή του ρευματός. Όταν μιλάμε για τροφοδοσία ρεύματος τεραστίου μεγέθους όπως για ένα πείραμα σαν αυτό ενός κυκλικού επιταχυντή που απαιτεί και προετοιμασία ετών, τότε καταλαβαίνουμε ότι λάθη στην τροφοδοσία του ρευματός ή άλλα απροσδιόριστα λάθη μπορουν να συμβούν σε μικρή ή μεγάλη κλίμακα και είτε να διορθώνονται αμέσως είτε να απαίτειται η διακοπή του πειράματος.

## Phase Stability

Ένας από τους ακρογωνιαίους λίθους των κυκλικών επιταχυντών σωματιδίων μαζί με την αρχή της ισχυρής εστίασης όπως έχουμε αναφέρει ήταν και η ανακάλυχη της αρχης της σταθεροποίησης ή εστίασης φάσης, phase stability.

Κατά την επιτάχυνση λοιπόν ενός σωματιδίου, το φορτισμένο αυτό σωματίδιο έλκεται ή απωθείται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Το ηλεκτρόμανγητικό κύμα λοιπόν κινείται κατα μήκος του επιταχυντή παρασύροντας το σωματίδιο μαζί του.

Η κοιλότητα ραδιοσυχνοτήτων (RF cavity) ρυθμίζεται έτσι ώστε το σωματίδιο στο κέντρο του πακέτου (bunch) σωματιδίων (το επονομαζόμενο «σύγχρονο» σωματίδιο) λαμβάνει ακριβώς την ενέργεια που χρειάζεται

Τα σωματίδια βλέπουν δυναμικό,

$$V = V_0 \sin(2\pi\omega_{RF} t) = V_0 \sin(\phi(t))$$

Χωρίς επιτάχυνχη το σύγχρονο σωματίδιο βρίσκεται στην κοιλότητα σε φάση,

$$\varphi_s = 0$$

Για επιτάχυνση, το σύγχρονο σωματίδιο πρέπει να έχει φάση

$$0 < \varphi_s < \pi$$

έτσι ώστε να αυξήσει την ενέργεια του κατά

$$\Delta E = qV_0 \sin(\phi_s)$$

Σωματίδια που φθάνουν **νωρίς** έχουν φάση

$$\varphi < \varphi_s$$

άρα παίρνουν **λιγότερη** ενέργεια σε σχέση με το σύγχρονο σωματίδιο.

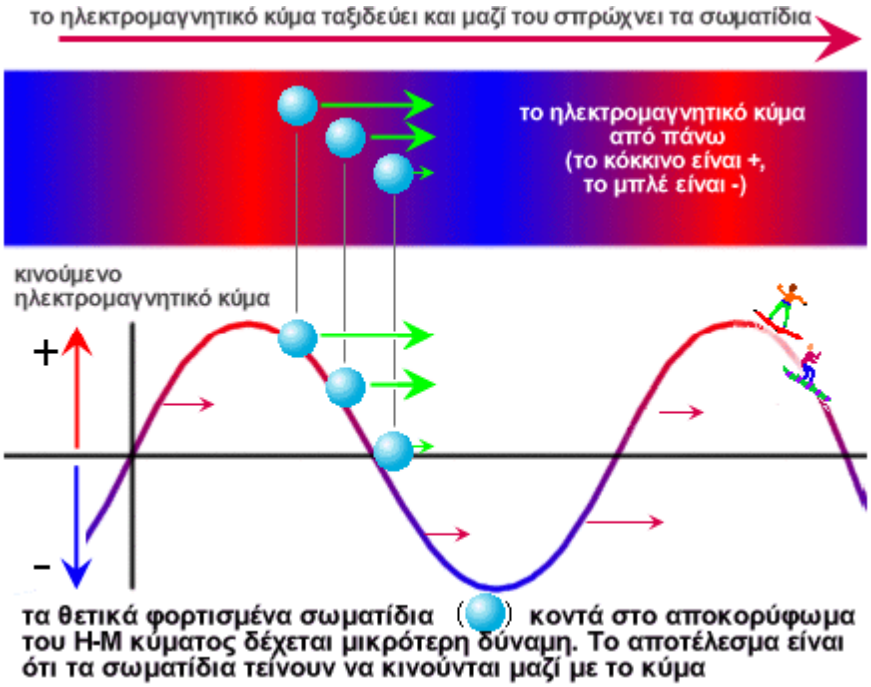
Σωματίδια που φθάνουν **αργά**, έχουν φάση

$$\varphi > \varphi_s$$

άρα παίρνουν **περισσότερη** ενέργεια σε σχέση με το σύγχρονο σωματίδιο.

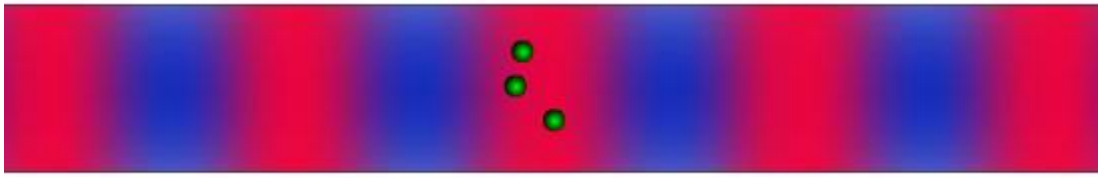
Ετσι τα σωματίδια **ομαδοποιούνται.**

Το 2$^{o}$ βίντεο της εργασίας παρουσιάζει αυτή την λειτουργία. Τα σωματίδια εισέρχονται στον θάλαμο σε διαφορετικές ταχύτητες και ενέργειες. Κατα μήκος του θαλάμου κινείται και το ηλεκτρόμαγνητικό κύμα που παρασύρει τα σωματίδια, με το κόκκινο μέρος να είναι το θετικό και το μπλε το αρνητικό



Τα σωματίδια εισέρχονται στον θάλαμο

Το κύμα ξεκινά να τα παρασύρει

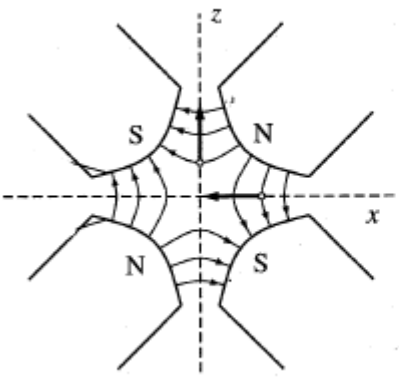


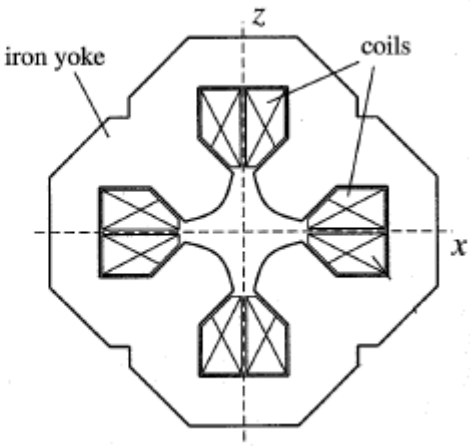
Σταδιακά αποκτούν ίδιες ενέργειες

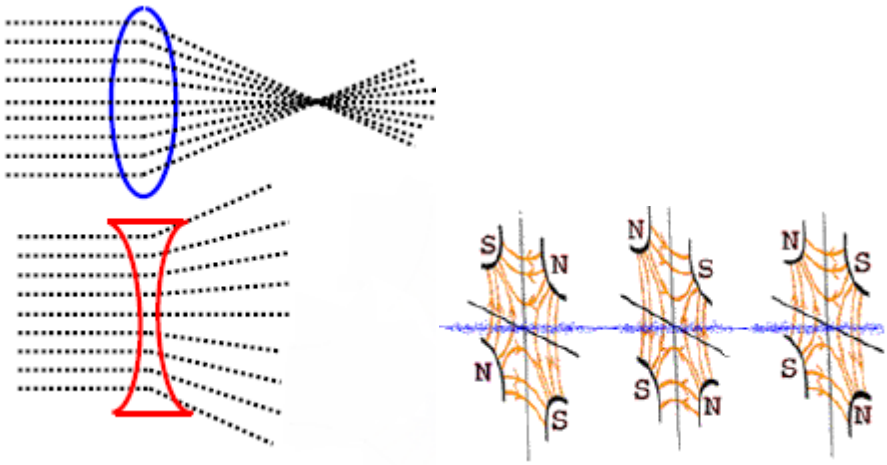
Ομαδοποιούνται

## Εστίαση δέσμης – Αρχη Εναλλασσόμενης απόκλισης (Alternating Gradient)

Λόγω της φύσης των εξισώσεων Maxwell είναι αδύνατη η ύπαρξη πεδίων εστίασης και στα δύο επίπεδα, π.χ. τα τετράπολα που εστιάζουν **οριζόντια**, αποεστιάζουν **κάθετα** και το αντίστροφο. Μια αλληλουχία από εστιακά και αποεστιακά πεδία μπορεί να δώσει ισχυρότερη καθαρή εστίαση. Η δυνάμεις είναι ανάλογες της απόστασης από τον άξονα της δέσμης. Διαδοχή αντιθέτων εστιακά στοιχείων επιτρέπουν στα σωματίδια να ακολουθήσουν ευσταθείς τροχιές, εκτελώντας μικρές βητατρονικές ταλαντώσεις γύρω από την κυκλική περιοδική τροχιά. Αυτη είναι η βασική αρχή λειτουργίας ενός τετραπολικού μαγνήτη που χρησιμοποιείται για αυτή τη δουλειά.



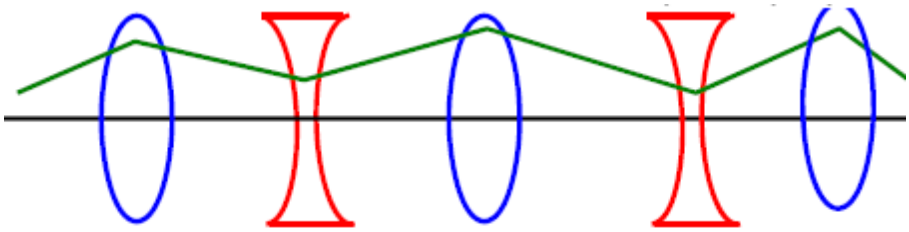



Τα εναλλασσόμενα εστιακά στοιχεία λειτουργούν σαν φακοί εστιάζοντας την δέσμη. Απο την οπτική γνωρίζουμε ότι συνδυασμός δύο φακών με εστιακές αποστάσεις $f1$και $f2$ που σε απόσταση $d$ δίνει ολική εστιακή απόσταση

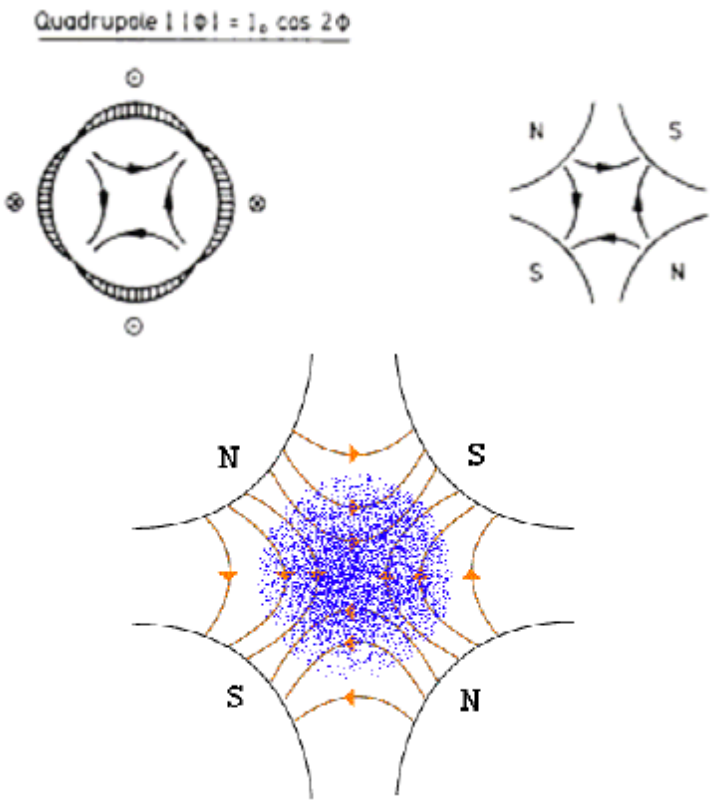
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1\ f_2}$$

Εάν $f1$ = -$f2$,υπάρχει ένα καθαρό φαινόμενο εστίασης

$$\frac{1}{f} = |\frac{d}{f_1\ f_2}|$$

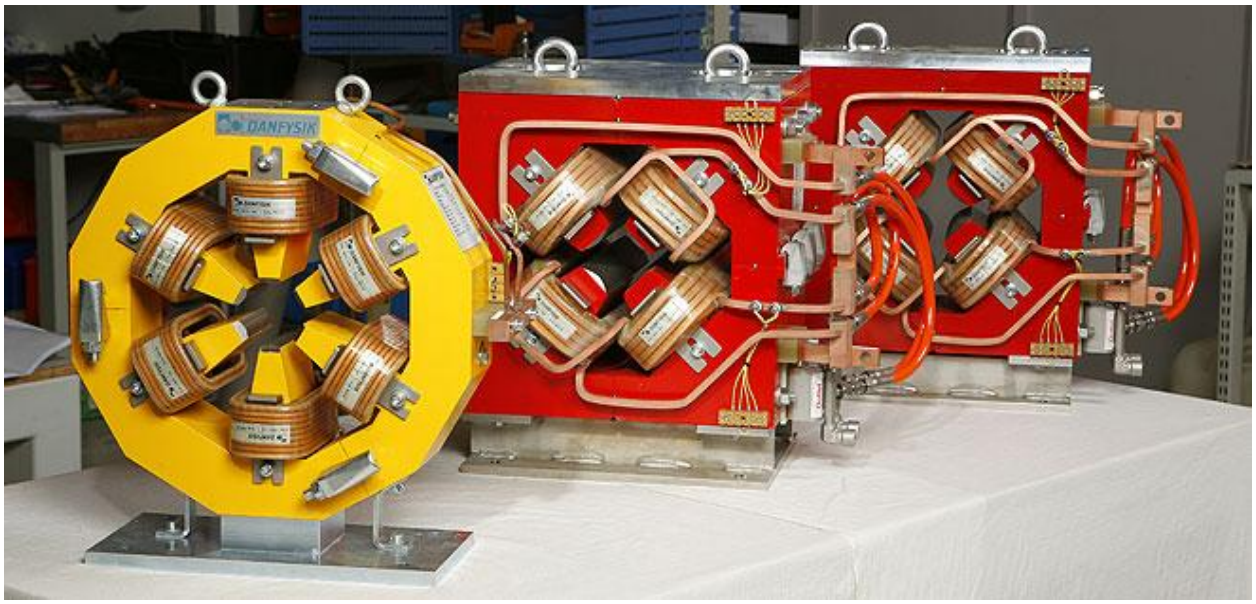


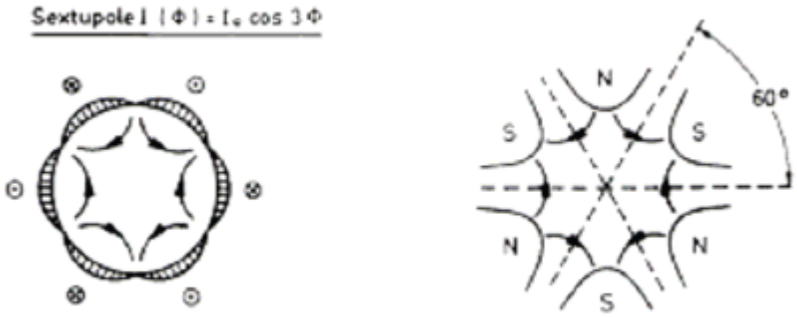
Ενας τετραπολικός μαγνήτης εστιάζει στη μία διάσταση και αποκλίνει στην άλλη, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.



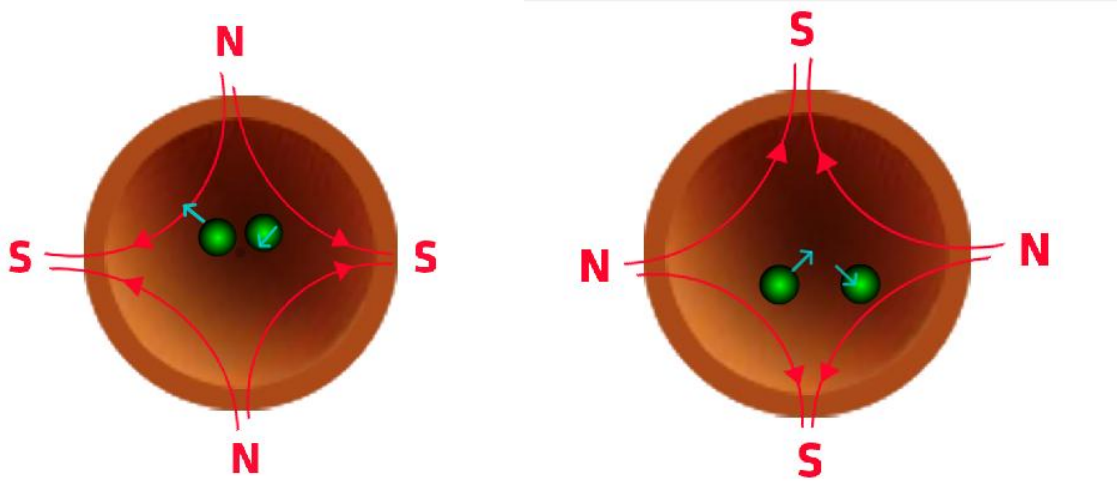

Στο σύστημα εστιακών – αποεστιακών μαγνητών ενός τετραπολικού μαγνήτη η δέσμη βγαίνει ελαφρώς εστιασμένη, δηλαδή το τελευταίο εστιακό στοιχείο βρίσκεται πολύ κοντα στην έξοδο ώστε να μην είναι τελείως εστιασμένη η δέσμη όταν θα εξέλθει του μαγνήτη με αποτέλεσμα να χτυπήσουν τα σωματίδια  στα τοιχώματα μέχρι τον επόμενο τετραπολικό μαγνήτη εστίασης.

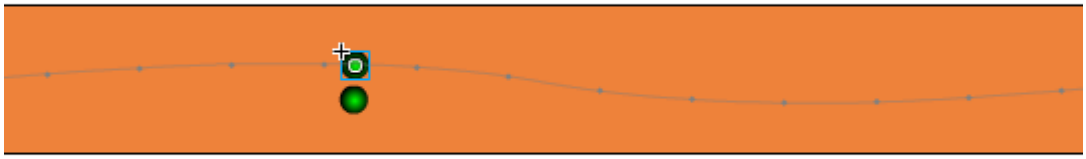
Πέρα από τον τετραπολικό μαγνήτη λοιπόν που χρησιμοποιείται για εστίαση και αποεστίαση, υπάρχουν και εξαπολικοί μανγήτες που χρησιμεύουν στην χρωματική διόρθωση της δέσμης αλλά και οχταπολικοί  ή δεκαπολικοί, γενικά πολύπολα όπως λέγονται, για διόρθωση της τροχιάς της δέσμης.



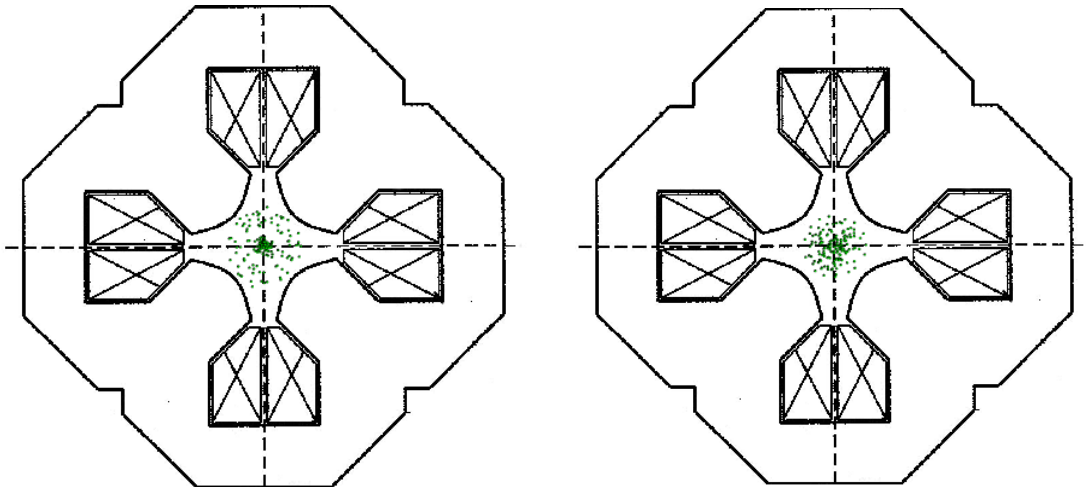



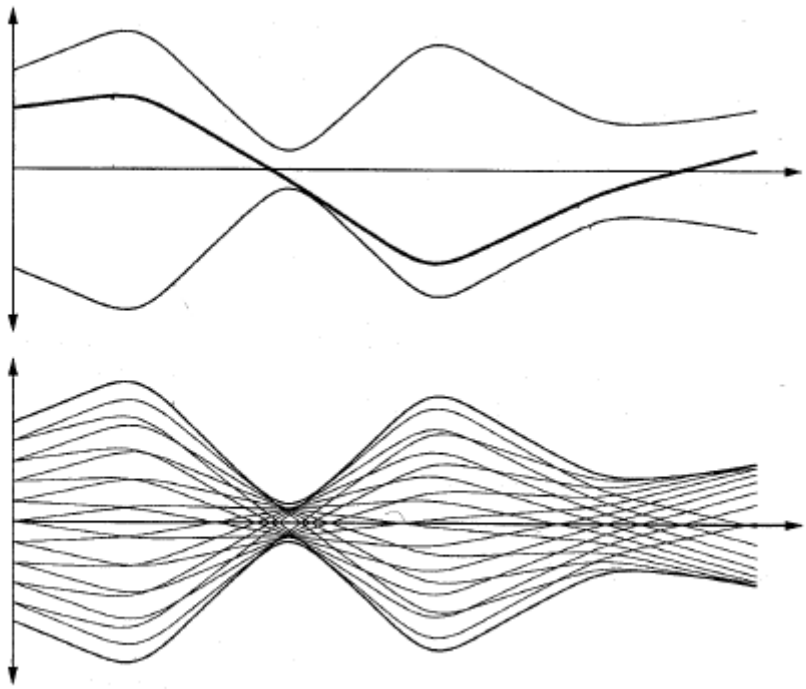

Στο 3$^{o}$ βίντεο της εργασίας παρουσιάζεται η αρχή της ισχυρής εστίασης. Η διατομή ενός σωλήνα σε απλή μορφή απεικονίζεται στην αρχή με δύο σωματίδια να εστιάζουν και να αποεστιάζουν απο το κέντρο λόγω των μαγνητικών πεδίων που δημιουργούν οι μαγνητες. Στη συνέχεια η οπτική γωνία αλλάζει και βλέπουμε την κίνηση που πραγματοποιούν τα σωματίδια από την κάτοψη του σωλήνα.



Στο 4$^{o}$ βίντεο της εργασίας παρουσιάζεται η πραγματική εικόνα της διατομής ενός τετραπολικού μαγνήτη και πολλά σωματίδια ή δέσμες, αυτή τη φορά, που εστιάζουν και αποεστιάζουν.



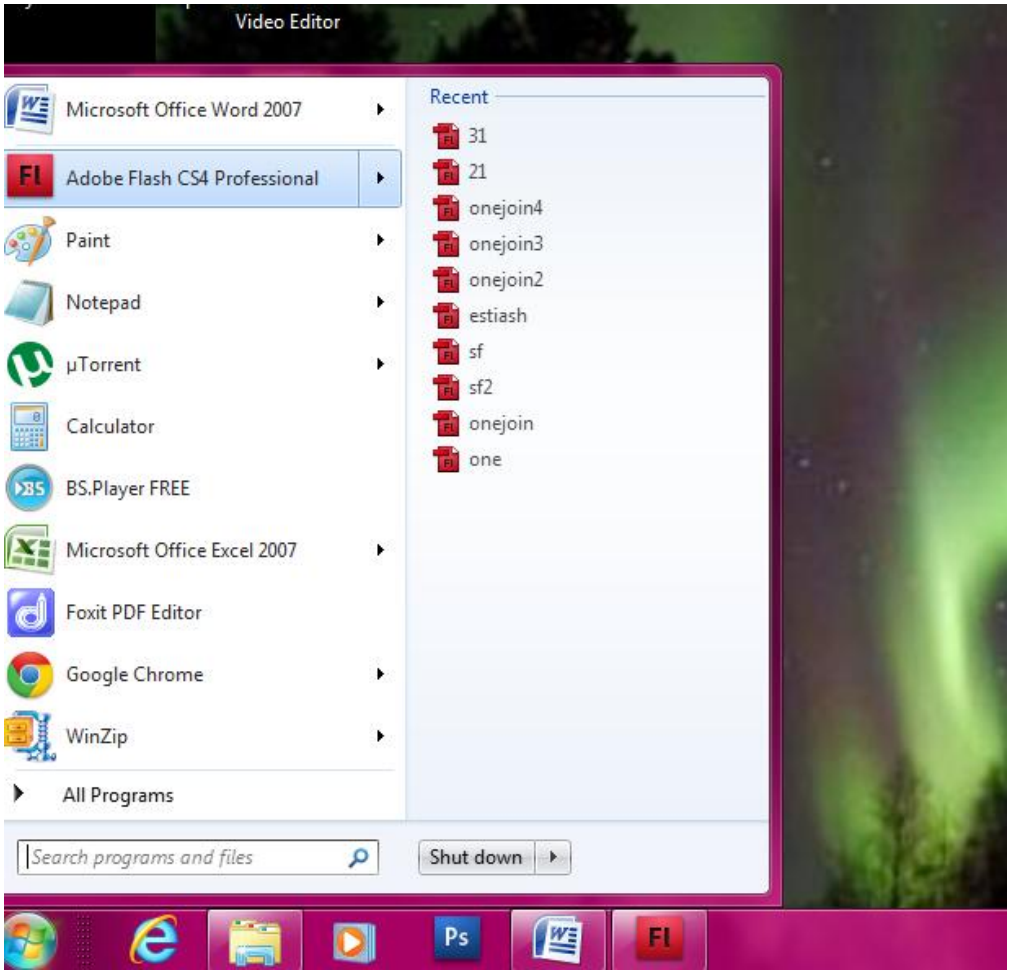


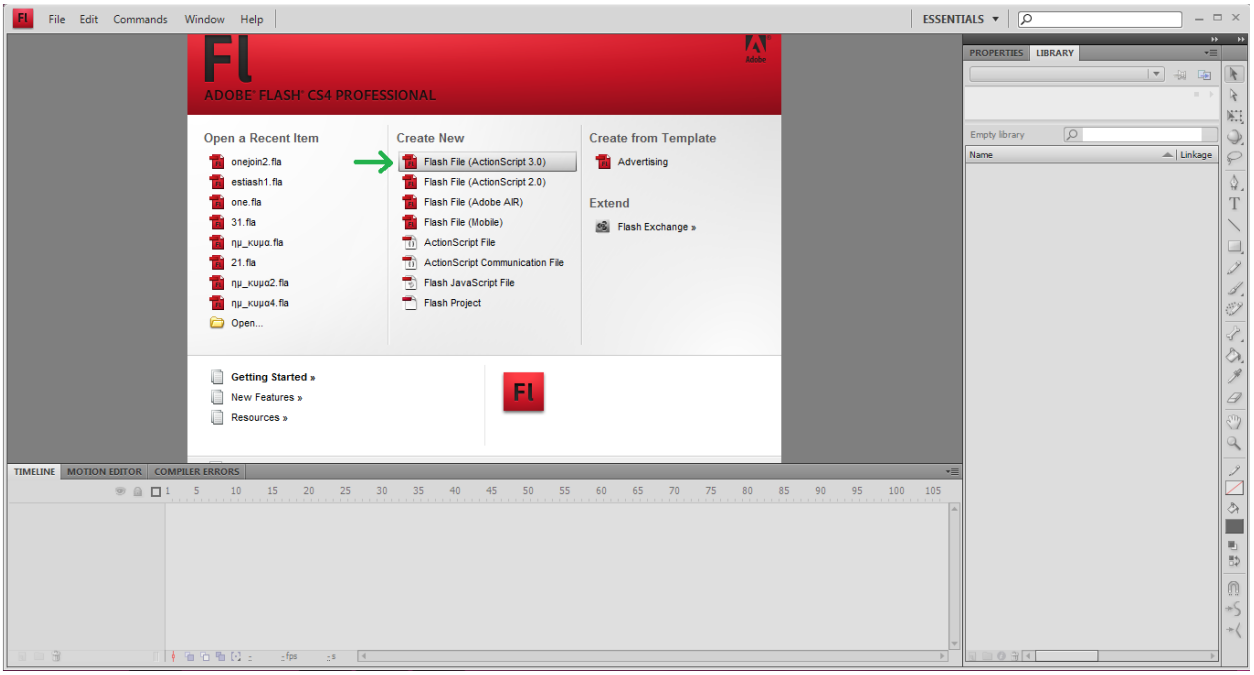
## Μεθοδολογία Flash

Τα τέσσερα βίντεο της εργασίας δημιουργήθηκαν στο πρόγραμμα Flash CS4 της Adobe που ειδικεύεται σε πολυμεσικά προγράμμα για υπολογιστές που αφορούν εικόνα, ήχο και κίνηση. Το Flash CS4 προσφέρει πολλά εργαλεία για εικαστική δημιουργία, ωστόσο πολλές από τις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στα βίντεο δημιουργήθηκαν στο προγραμμα Photoshop CS3 Extended της ίδιας εταιρίας, που ειναι ένα πρόγραμμα γραφιστικής και επεξεργασίας φωτογραφιών. Το Flash CS4 είναι ενα πρόγραμμα στο οποίο ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει απλά έως σύνθετα animations, βίντεο κίνησης δηλαδή. Προσφέρει δημιουργία frame by frame, δηλαδή ο χρήστης έχει τη δυνατοτητα να δημιουργήσει ενα βίντεο κίνησης καρε-καρέ. Το ιδιαίτερο στοιχείο για το Flash CS4 είναι ότι μπορεί να συμπεριλάβει στα καρέ ενός βίντεο έναν υπολογιστικό κώδικα που λέγεται ActionScript και ο οποίος προσφέρει διαδραστικότητα στον χρήστη αλλα και στους θεατές.

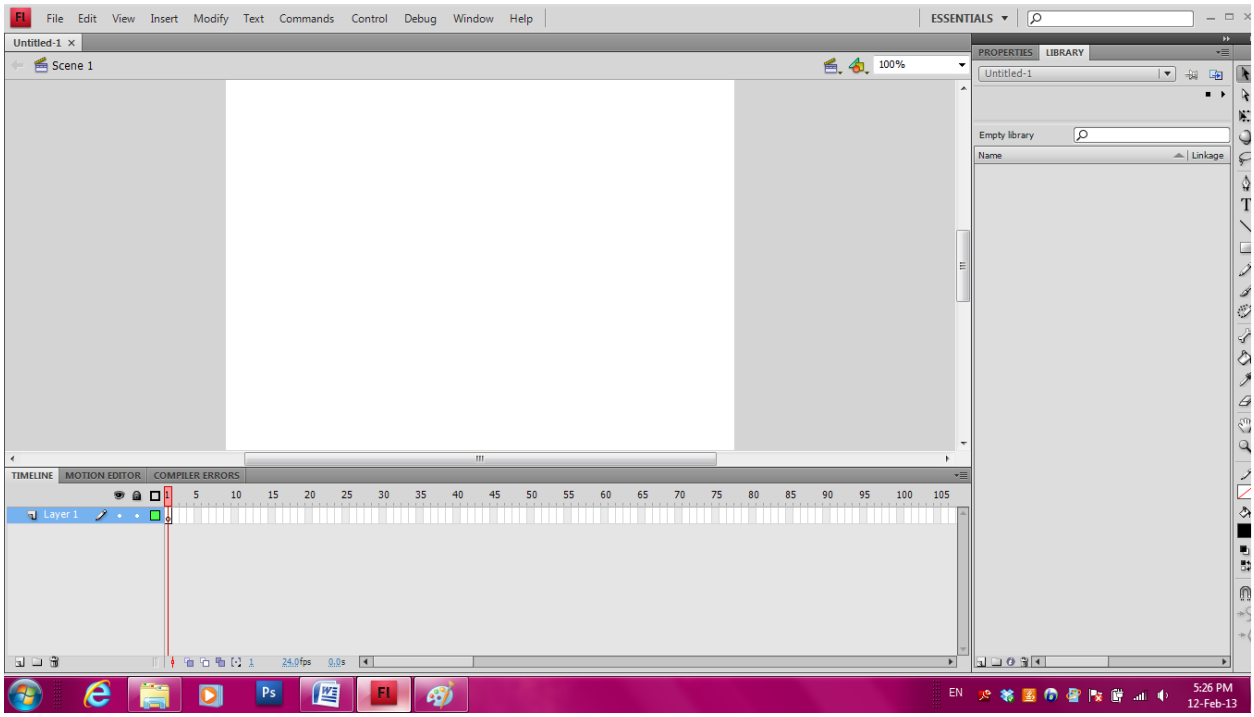
Το πρώτο βίντεο δημιουργήθηκε ως εξής:

Καταρχάς πρώτη κίνηση αφού έχεις εγκαταστήσει το Flash CS4 και το έχεις ανοίξει με διπλό κλίκ στην επιφάνεια εργασίας είναι να ανοίξεις δημιουργήσεις ένα καινούριο αρχείο.





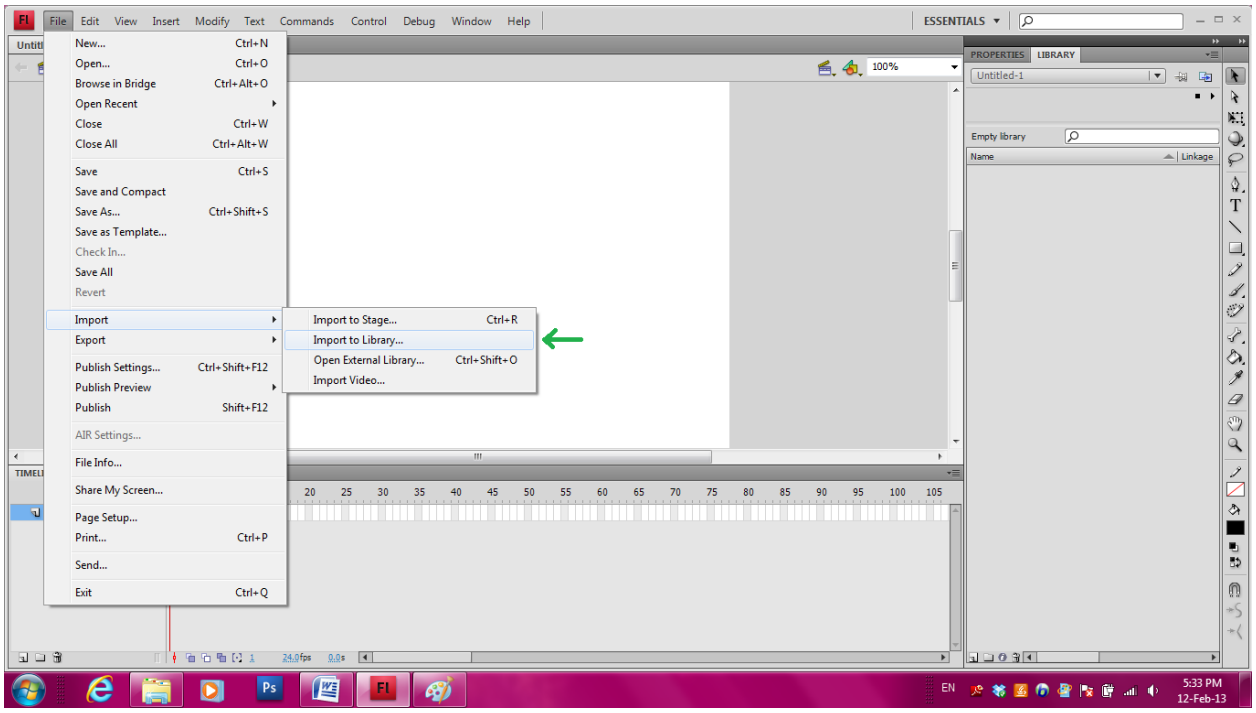

Η εικόνα που αντικρίζεις είναι η παρακάτω.




Η ασπρή παραλληλόγραμμη περιοχή λέγεται stage και απο κάτω βρισκεται η Timeline, εκεί που υπάρχουν τα διαθέσιμα καρέ ανα δευτερόλεπτο, ενώ δέξια είναι η γραμμή εργαλειών και η βιβλιοθήκη, ο χωρός δηλαδή που συλλέγονται όσα δημιουργήσεις. Σε αυτό το χώρο είναι που μπορείς να εισάγεις εικόνες εκτός προγράμματος. Εικόνες δηλαδή που εχεις δημιουργήσει σε

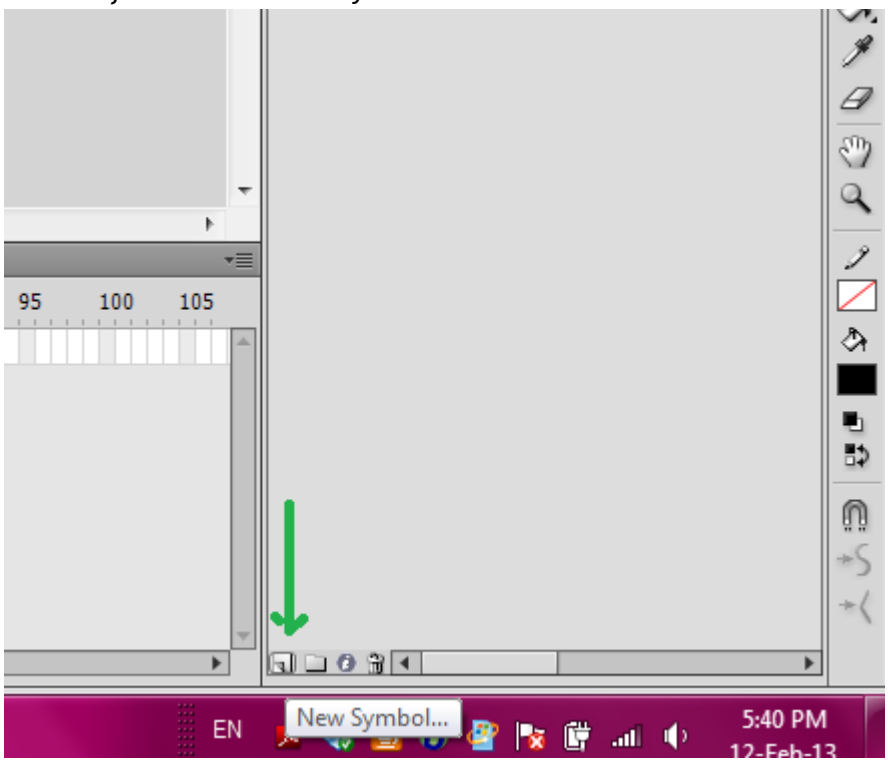
αλλα προγράμματα ή εχέις αποθηκευμένες στον υπολογιστή σου. Αυτό γίνεται με την παρακάτω κίνηση. Απο την γραμμή ενεργειών στο πάνω μέρος του προγράμματος,

File > Import > Import to Library.



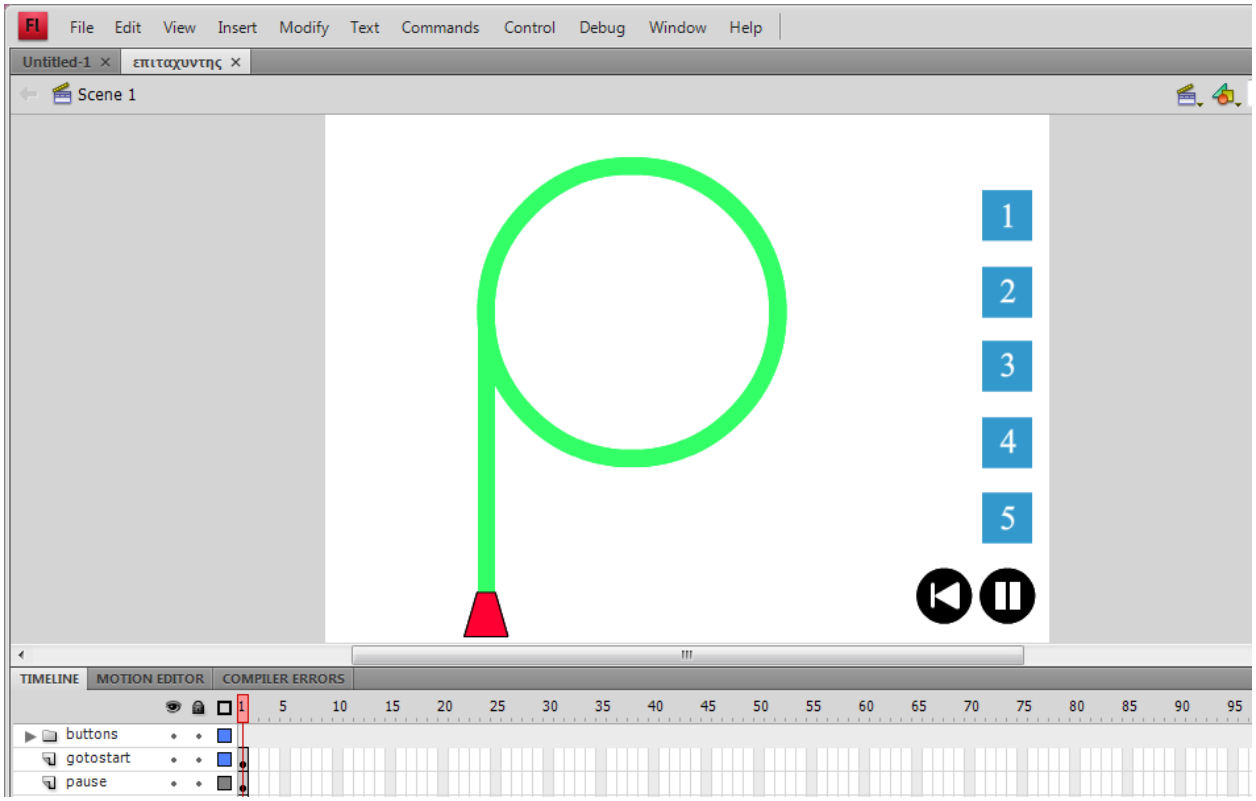

Είτε διαφορετικά Import to Stage που τοποθετεί τις εικόνες που θέλεις κατευθείαν στην επιφάνεια που μπορείς να δημιουργήσεις και που θα φαίνεται το αποτέλεσμα που θα φτιάξεις. Είναι καλύτερο όμως να τα τοποθετήσεις στην βιβλιοθήκη γιατί με αυτό τον τρόπο εχείς πιο τακτοποιημένα και ξεχωριστά όλα τα στοιχεία του αρχείου σου. Για να δημιουγήσεις λοιπόν ενα βίντεό κίνησης όπως το πρώτο βίντεο της εργασίας πρέπει τα διάφορα στοιχεία που υπάρχουν στο stage να τα δημιουργήσεις ξεχωριστά. Όλα αυτά τα στοιχεία στο Flash CS4 λέγονται symbols, οπότε όταν θέλεις να δημιουρργήσεις ένα το κάνεις μέσω του κουμπιού που υπάρχει

κάτω δεξια που λέει New Symbol.



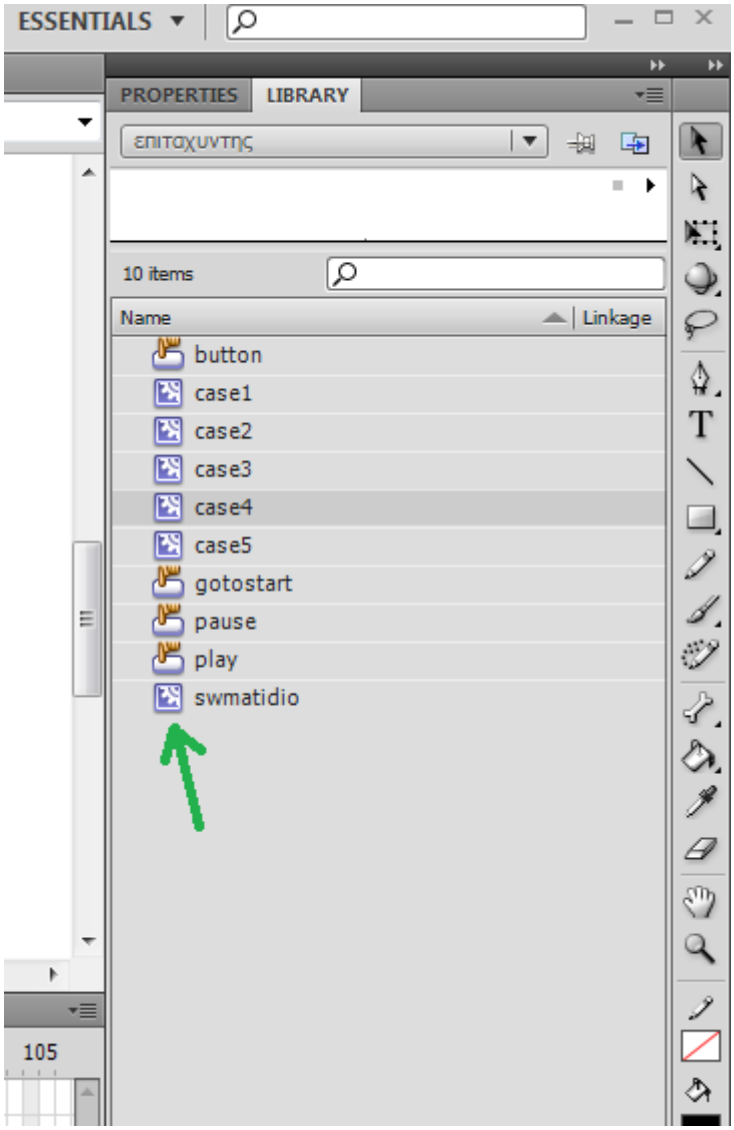

Πατώντας το κουμπί αυτό το το Flash σου ζητά να δώσεις ένα όνομα και να καθορίσεις τον τύπο του συμβόλου σου. Αυτός μπορεί να είναι Movie Clip, Button ή Graphic. Οταν θέλεις να δημιουργήσεις κάποια ζωγραφιά απλά πατάς Graphic, όταν θέλεις να φτιάξεις ένα κουμπί πατάς Button, ενώ όταν θέλεις να φτιάξεις ένα αντικείμενο που θα κινείται ή θα αλλάζει μορφή πατας Movie Clip. Το πλεονέκτηκα αυτής της εφαρμογής είναι ότι το αντικέιμενο που θα φτιάξεις θα το έχεις αποθηκευμένο στην βιβλιοθήκη και μετά μπορείς να χρησιμοποιήσεις όσες φορές θέλεις.

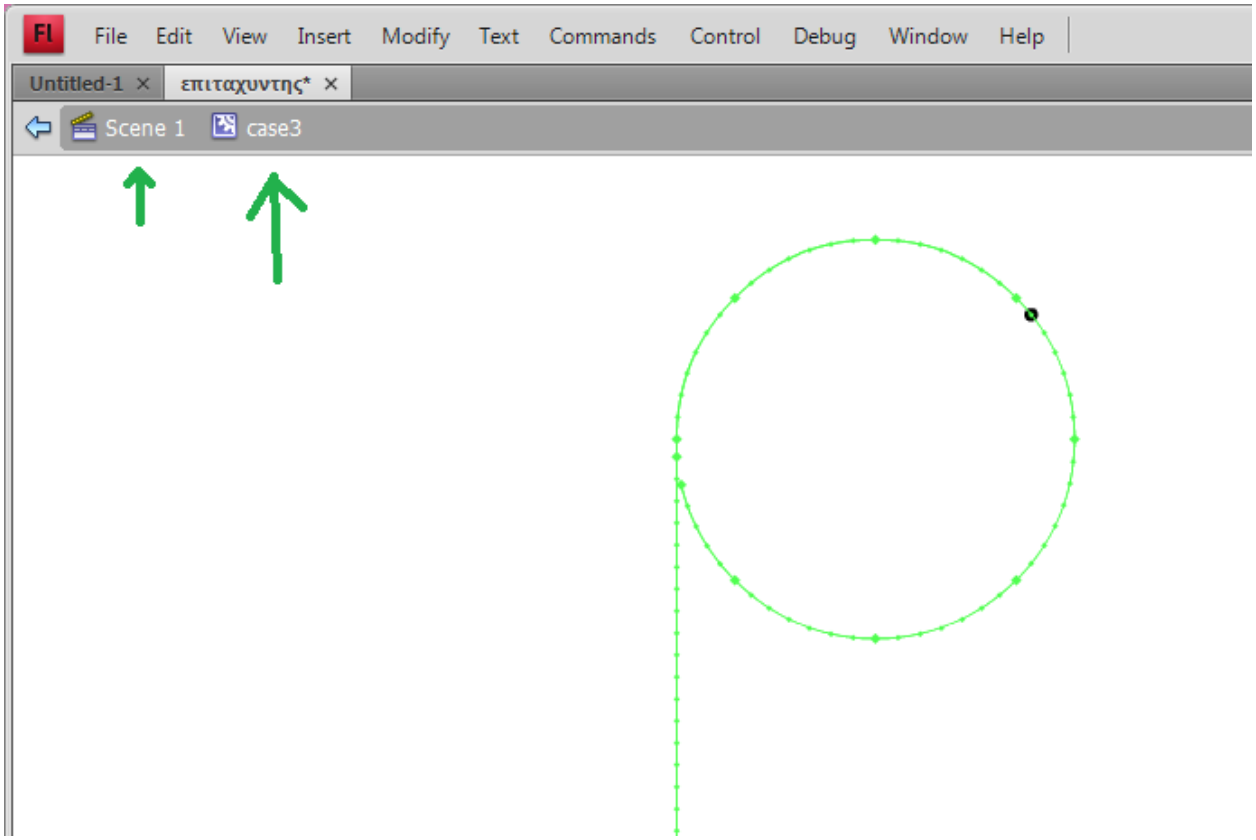
Για το πρώτο βίνεο λοιπόν η αρχική κίνηση ήταν να δημιουργηθεί ενα σχέδιο που να μοιάζει με κυκλικό επιταχυντή σωματιδίων με ένα γραμμικό τομέα που εγχύει τα σωματίδια μέσα σε αυτόν από μία πηγή. Όλα αυτά τα ξεχωριστά σχέδια τοποθετήθηκαν σε layers, στρώματα, για να μπορείς να τα ξεχωρίζεις και να τα διαχειρίζεσαι. Η μέθοδος είναι απλή. Στην Timeline πατάς το κουμπάκι κάτω αριστερά που λέει Add New Layer. Η λειτουργία του βίντεο εχεί περιγραφεί προηγουμένως οπότε στο σχέδιο που ακολουθεί παρατηρούμε και τα κουμπιά που δειχνουν τις 5 διαφορετικές περιπτώσεις αλλά και τα κουμπιά pause και go_to_start που σταματούν το βίντεο και το πηγαίνουν στην αρχική του κατάσταση αντίστοιχα. Το σχεδιο φαίνεται παρακάτω.



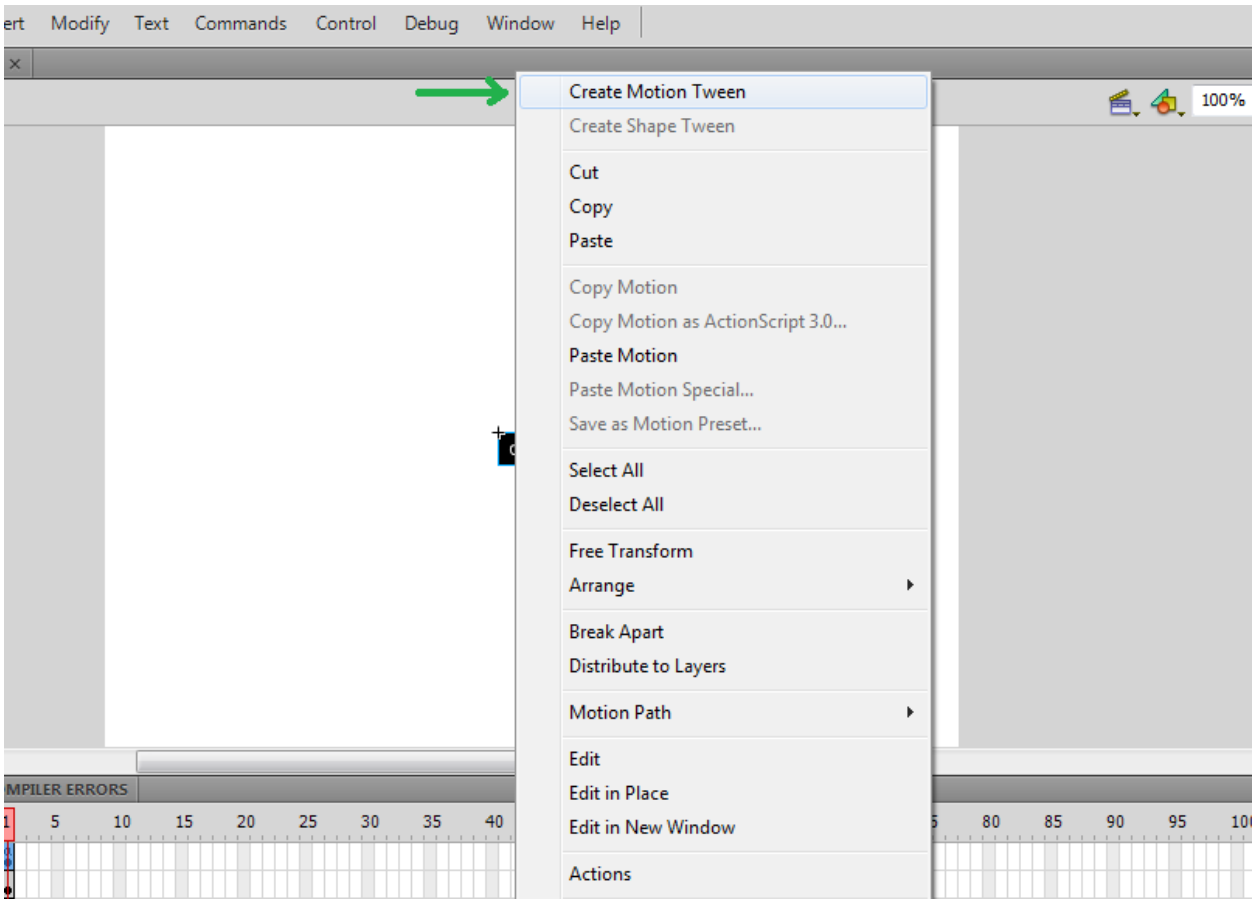

Αυτό που ακουλουθήσε ήταν να σχεδιαστεί ένα καινούριο σύμβολο ενός σωματιδίου που ήταν μία απλή μαύρη κουκίδα και να γίνει movie clip. Για τις 5 περιπτωσεις το σωματίδιο έπρεπε να ακολουθεί διαφορέτικές πορείες ωστόσο. Οπότε το σωματίδιο σχεδιάστηκε πολύ απλά με το εργαλείο του κύκλου Oval Tool στην εργαλειοθήκη με το οποίο μπορείς να σχεδιάσεις κυκλικά σχηματα με ή χωρίς περίγραμμα.

Ο τρόπος τώρα με το οποίο δημιουργείς την κίνηση ενός σχεδίου, του σωματιδίου στην προκειμένη περίπτωση είναι ο εξής. Αν κάνεις διπλό κλίκ στο εικονίδιο του σωματιδίου που έχεις δημιουγήσει στη βιβλιοθήκη βρίσκεσαι μέσα σε ένα νέο stage του συμβόλου αυτή τη φορά όπου εκεί μπορείς να να δημιουργήσεις ότι θέλεις και μετά απλα να προσθέτεις το σύμβολο στο καρε που θέλεις του αρχικού stage. Αυτό φυσικά γίνεται και στον αρχικό κανβά αλλά όπως είπαμε είναι καλύτερο να έχεις τα πραγματα σου τακτοποιημένα στην βιβλιοθήκη και να τα αφαιρείς ή να τα προσθέτεις στον αρχικό κανβα όσες φορες θέλεις χωρίς να επηρεάζονται τα καρέ σου.

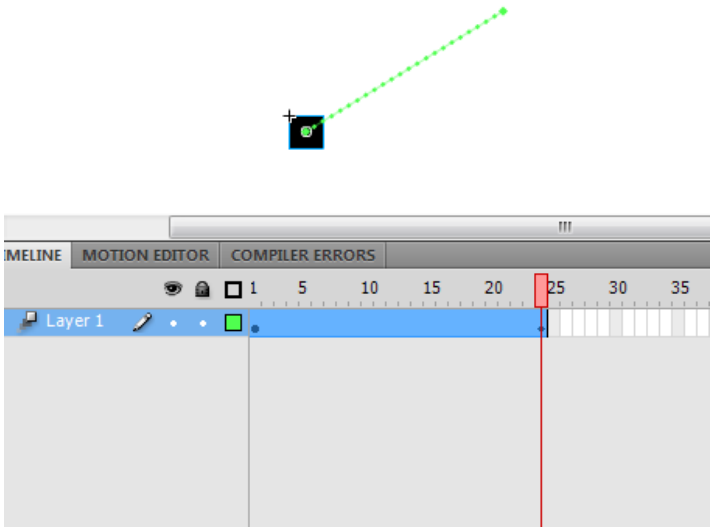

ESSENTIALS
PROPERTIES
LIBRARY
επιταχυντης
10 items
Name
Linkage
button
case1
case2
case3
case4
case5
gotostart
pause
play
swmatidio
105



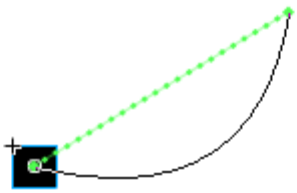

Στον νέο καμβα λοιπόν μπορείς να δημιουργήσεις. Ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείς ένα κινούμενο σωματίδιο είναι πηγαίνοντας επάνω στο σωματίδιο και πατώντας δεξί κλικ και επιλέγοντας την επιλογή create motion tween. Ετσι δημιουργείται μια κίνηση ενός δευτερολέπτου που αντιστοιχεί σε 25 frames και το μόνο που μένει είναι να καθορίσεις εσύ το μονοπάτι της κίνησης.

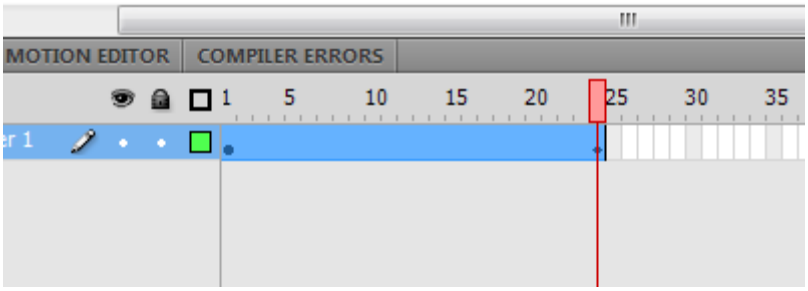



Αυτο γίνεται με το να πας στο 25$^{o}$ καρε και να μετακινήσεις το σωματίδιο σε όποια θέση θέλεις. Αυτοματως το Flash CS4 δημιουργεί τα ενδιάμεσα καρε για εσένα λαμβάνοντας υποψη την αρχική και την τελική θέση του σωματιδίου. Το αρχικό μονοπάτι της κίνησης που δημιουργεί λοιπόν είναι μια ευθεία που ενώνει τα δύο σημεία. Το μονοπάτι εμφανίζεται αν κλικάρεις το σωματίδιο σου με τον κέρσορα αφου έχεις πατήσει το Selection Tool στην εργαλειοθήκη.



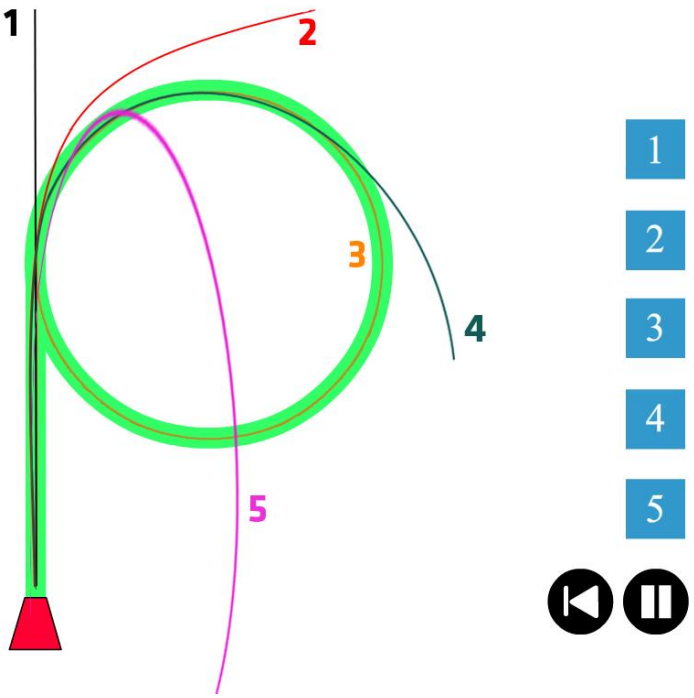
Αν μετακινήσεις τον κέρσορά σου πάνω στην γραμμή αυτή θα δείς ότι εμφανίζεται μία μικρή καμπυλωτή γραμμή κοντά του. Αυτό σημαίνει ότι μπορείς να τραβήξεις με το ποντίκι την γραμμή του μονοπατιού και να τις δώσεις ότι σχήμα θέλείς.






Επειδή δεν είναι πάντα εύκολο να δημιουργήσεις το μονοπάτι που θέλεις απλα τραβώντας το υπάρχει ένας τρόπος για δημιουργεία custom μονοπατιού δηλαδή με το σχέδιο και την πορεία που θέλεις. Ο τρόπος αυτός είναι να σχεδιάσεις στον κανβα με τα εργαλεία που διαθέτεις την πορεία που θέλεις να ακολουθήσει το σωματίδιο, στην προκειμένη περίπτωση, με μία γραμμή. Αυτό γίνεται με τα Line Tool, Pencil και Oval και Rectangle Tool που μπορείς να δημιουγήσεις γραμμές και σχήματα.

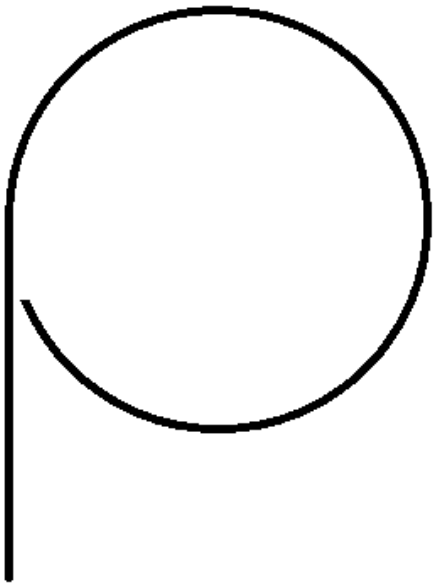
Έτσι ανάλογα με τις πέντε περιπτώσεις του βίντεο τα σχέδια του μονοπατιού της κίνησης ήταν, στην 1η μία ευθεία γραμμή, στη δεύτερη μιά ευθεία και μια καμπύλη, στην 3η μια ευθεία και ένας κύκλος, στην 4η μιά ευθεία και μια καμπύλη, όπως και στην 5η, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.




Αφου σχεδιάσεις λοιπόν σε ξεχωριστό κανβά τις γραμμές αυτές που θέλεις, κάθε φορά πρέπει να κάνεις copy αυτα τα σχέδια και να πηγαίνεις στο πρώτο ή το τελευταίο καρε της κίνησης του σωματιδίου που έχεις δημιουργήσει και να πατάς πάνω στο σωματίδιο χωρίς να το μετακινήσεις δεξί κλικ και paste. Το flash έτσι δημιουργεί το ενδιάμεσο μονοπάτι από το πρώτο στο τελευταίο καρέ με το σχήμα που ζωγράφισες πριν.

Στις τέσσερις από τις 5 κινήσεις του 1ου βίντεο το σωματίδιο χάνεται από την εικόνα αφου εκτελέσει την κίνηση του μία φορα. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια του κώδικα actionscript. Στην Timeline του συμβόλου δημιουργώντας ένα καινούριο κενό στρώμα – Layer, που δίνεις το όνομα actions αν θέλεις, μπορείς να γράψεις κώδικα που να εκτελεί εντολές σε όποιο καρε θέλεις. Για να γίνει αυτό πρέπει πρώτα δημιουργήσεις εκεί ένα Keyframe που δίνει σημαντικότητα δηλαδή στο συγκεκριμένο καρε και λέει στο flash να προσέξει γιατι κάτι υπάχει εκεί. Πατώντας λοιπόν δεξί κλικ και Insert Keyframe γίνεται η παραπάνω ενέργεια. Στην συνέχεια με τον ίδιο τρόπο, δεξί κλικ και πατώντας το Actions, ανοίγει το παράθυρο οπου γράφεις τον κώδικα του actionscript. Το flash λοιπόν αν δεν δώσεις εντολή να σταματήσει κάτι το επαναλαμβάνει συνεχώς. Γράφωντας έτσι στο τελευταίο καρε την εντολη gotoAndStop(1); Το το προγραμμα σταματαει και βρίσκεται στο πρωτο καρε της κίνησης ωστε αν θέλεις να το ξαναξεκινήσεις. Επίσης στο πρώτο καρέ του κάθε συμβόλου πρέπει να δώσεις την εντολή stop();, ώστε το κάθε σωματίδιο να είναι σταματημένο και έτοιμο στην αφετηρία για να ξεκινήσει όταν πατησεις το ανάλογο κουμπί. Το flash όπως είπαμε αν δεν του πεις να σταματησει επαναλαμβάνει την κίνηση έτσι με την εντολή stop(); Στην αρχή κάθε κίνησης μπορεί να παραληφθεί η εντολη gotoAndStop(1); στο τέλος αφού απο μόνο του το flash θα πάει στο πρώτο καρε. Εκεί όμως πρέπει να το έχεις ρυθμίσει να σταματάει με την εντολή stop(); στην αρχή. Αν για παράδειγμα βάλεις εντολή να σταματήσει μονο στο τέλος και όχι στην αρχή το flash θα εκτελέσει την κίνηση μία φορά και μετα θα σταματήσει, ενω εμείς θέλουμε να εκτελεί την κινηση μόνο ότνα πατίεται ένα κουμπί και όταν δεν πατάμε κάτι να μην κινείται τίποτα.

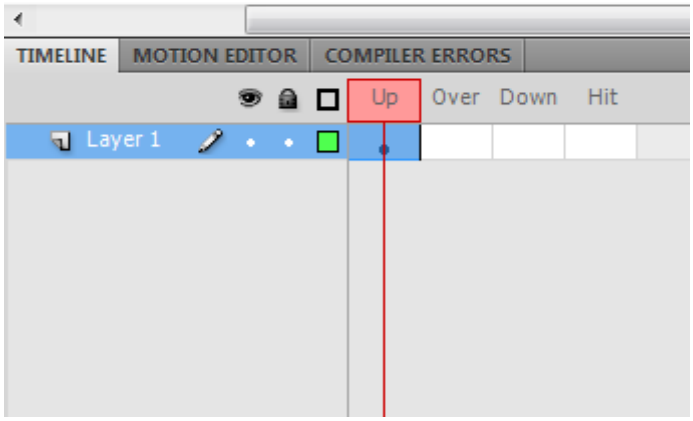
Στην 3η περίπτωση υπάρχει όμως μία διαφορά αφού έχουμε συνεχή κίνηση του σωματιδίου στον δακτύλιο του επιταχυντή και αυτό έγινε ως εξής. Ένα μονοπάτι κίνησης πρέπει να έχει αρχή και τέλος. Δεν γίνεται λοιπόν να είναι κλειστό. Έτσι στο μονοπάτι ευθεία και κύκλος που δημιουργήσαμε και ενώσαμε, στο σημείο στο οποίο ο κύκλός ερχεται να κλείσει δημιουργήσαμε ενα κενό στο σχέδιο. Έτσι ώστε να είναι η αρχή του στην αρχή της ευθείας και το τέλος του στο τέλος του κύκλου πολύ κοντά όμως στην ευθεία και στο σημείο που αρχίζει πάλι ο κύκλος.



‘Ετσι με εντολή στο παράθυρο εντολών για actionscript όπως εξηγήσαμε πριν gotoAndPlay(20); το flash αφότου το βίντεο ολοκληρωθεί μία φορά το ξαναρχίζει από το 20ο καρε στο οποίο το σωματίδιο βρίσκεται στην αρχή του κύκλου. Αυτο λοιπόν επαναλαμβανεται καθε φορα που τελειώνει το βίντεο και έτσι φαίνεται μετά την αρχική ευθεία το σωματίδιο να γυρνα συνεχώς γύρω γύρω στον κύκλο. Το κενό στο σχέδιο του μονοπατιού δεν είναι πρόβλημα αν σκεφτουμε ότι η όλη κίνηση αποτελείται απο πολλά καρε. Πολλές διαδοχικές εικονες μαζί δηλαδη. Αν λοιπον το κενό στο σχέδιο έιναι όσο περιπου και η απόσταση του σωματιδίου ανάμεσα σε δυο καρε, τότε δεν εχουμε προβλημα, ενω αν ήταν μεγαλύτερο θα φαινόταν ότι το σωματίδιο πηδαει απο μία θέση και μετά. Ετσι λοιπον έχουμε δημιουργήσει τις πέντε κινήσεις.

Το άλλο κομμάτι του πρώτου βίντεο είναι η διαδρατικότητα. Δηλαδή κάθε κίνηση να πραγματοποιείται όποτε ο θεατής πατάει το ανάλογο κουμπί. Αυτο γίνεται δημιουργώντας κουμπιά και προσθέτοντας κώδικα actionscript.

Αν θέλεις να δημιουργήσεις ενα κουμπί, το κάνεις μεσώ νέου συμβόλου όπως εξηγήσαμε παραπάνω. Στον κανβά του κουμπιού όμως δεν υπάρχουν πολλά καρε όπως στο movie clip αλλά μόνο τεσσερα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.




Το καρέ up δηλώνει την όψη του κουμπιού όταν δεν γίνεται τίποτα. Δεν το πατας ή δεν εχεις το ποντικι πάνω στο κουμπι. Το καρέ over, τη μορφή οταν έχεις το ποντίκι πάνω στο κουμπί, πάνω από τη μορφή του up δηλαδή. Το καρε down όταν πατάς το κουμπί, τη μορφή του over δηλαδή, ενώ το καρε hit δηλώνει την περιοχή που μπορείς να πατήσεις και να ενεργοποιηθεί το κουμπί. Συνήθως δηλώνεται με το σχήμα του κουμπιού εκτός αν αυτό έχει κάποιο περίεργο σχημα όποτε είναι προτιμητέο να σχεδιάσεις μια περιοχή γύρω από το κουμπί που θα το περιλαμβάνει. Το καρέ hit συνδέεται άμεσα με το over άφου η περιοχή που το κουμπί πατιέται είναι η περιοχή στην οποία αν περάσεις το ποντικι απο πάνω θα εμφανιστεί η όψη του over. Την όψη κάθε καρέ μπορείς να την φτιάξεις με τα εργαλεία όπως όταν σχεδιάζεις οτιδήποτε άλλο και για να δημιουργήσεις σε κάθε καρέ πρέπει πρώτα να εισάγεις Keyframe. Ο κώδικας τώρα που μπαίνει στα κουμπιά πρέπει να είναι τέτοιος ωστε κάθε φορά που θα πατάς ένα κουμπί να παίζει η ανάλογη περίπτωση και ταυτόχρονα να σταματάει η πέριπτωση που παίζει ήδη, αν συμβαίνει κάτι τέτοιο. Και συγκεκριμένα να μην σταματάει εκεί που είναι αλλά να πηγαίνει στην άρχη και να σταματάει εκεί ώστε να καθε περίπτωση να είναι έτοιμη να παίξει κάθε φορα που πατάς το αντίστοιχο κουμπί. Ο κώδικας λοιπόν που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ακόλουθος.

```
btn1.addEventListener(MouseEvent.CLICK,periptwsh1);

function periptwsh1(event:MouseEvent):void {

        swma2.gotoAndStop(1);
```

```
        swma3.gotoAndStop(1);
        swma4.gotoAndStop(1);
        swma5.gotoAndStop(1);
        swma1.play();
}

btn2.addEventListener(MouseEvent.CLICK,periptwsh2);

function periptwsh2(event:MouseEvent):void {
        swma1.gotoAndStop(1);
        swma3.gotoAndStop(1);
        swma4.gotoAndStop(1);
        swma5.gotoAndStop(1);
        swma2.play();
}

btn3.addEventListener(MouseEvent.CLICK,periptwsh3);

function periptwsh3(event:MouseEvent):void {
        swma1.gotoAndStop(1);
        swma2.gotoAndStop(1);
        swma4.gotoAndStop(1);
        swma5.gotoAndStop(1);
        swma3.play();
}
```

```
btn4.addEventListener(MouseEvent.CLICK,periptwsh4);

function periptwsh4(event:MouseEvent):void {
	swma1.gotoAndStop(1);
	swma2.gotoAndStop(1);
	swma3.gotoAndStop(1);
	swma5.gotoAndStop(1);
	swma4.play();
}

btn5.addEventListener(MouseEvent.CLICK,periptwsh5);

function periptwsh5(event:MouseEvent):void {
	swma1.gotoAndStop(1);
	swma2.gotoAndStop(1);
	swma3.gotoAndStop(1);
	swma4.gotoAndStop(1);
	swma5.play();
}
```

Σε κάθε κουμπί πρέπει να δώσεις ένα όνομα που εδώ είναι btn1, btn2 κ.ο.κ., ένα όνομα στην λειτουργια που γίνεται κάθε φορά, function, εδώ είναι periptwsh1, periptwsh2 κ.ο.κ. και ένα όνομα στις κινήσεις των συμβόλων, των σωματιδίων δηλαδή. Εδω swma1, swma2, κ.ο.κ. Αυτό είναι το Instance name που συμπληρώνεις στο πάνω μέρος του τομέα properties στη βιβλιοθήκη όταν κλικάρεις πάνω στο σωματίδιο. Με τον ίδιο τρόπο ονομάζεις και τα κουμπιά και όλα αυτά αφού τα τοποθετήσεις στον αρχικό καμβα, στο stage. Φτιαχνεις δηλαδή τα κουμπιά σου και τα σωματίδια που θέλεις να κινούνται και αφού τα τοποθετήσεις στο stage σε ξεχωριστά στρωματα – layers, για να τα ξεχωρίζεις, τότε τα όνομάζεις. Αυτό γίνεται γιατι μπορεί να χρησιμοποιήσεις το ίδιο κουμπί ή το ίδιο σωματίδιο πολλές φόρες σαν σχεδιάστική μορφή αλλά

αλλάζοντας το ονόμα κάθε φορά δηλώνεις οτι κάθε ένα είναι ξεχωριστό και έτσι ελέγχεις κάθε περίπτωση μέσω του κώδικα actionscript.

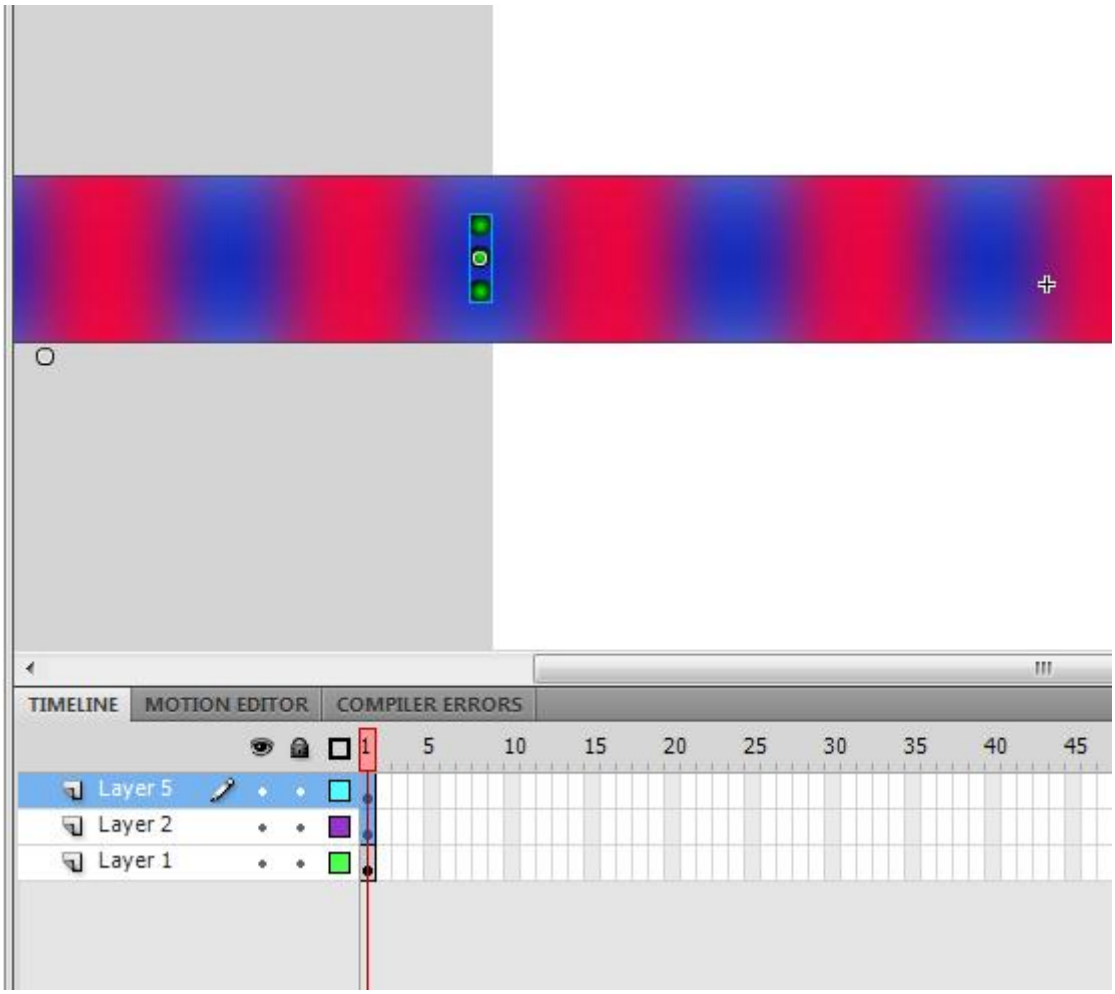
Εκτός από τα κουμπιά των περιπτώσεων έχουμε και δύο κουμπιά, ένα που σταματά την κίνηση σαν πάυση και άλλο ένα που επαναφέρει το σωματίδιο στην αρχη της κίνησής του σε οποιαδήποτε στιγμη και κατάσταση που μπορεί να είναι, σε κίνηση δηλαδή ή σε παύση. Ο κώδικας για αυτά τα κουμπιά είναι ο παρακάτω.

```
halt.addEventListener(MouseEvent.CLICK,stamata);


function stamata(event:MouseEvent):void {
	swma1.stop();
	swma2.stop();
	swma3.stop();
	swma4.stop();
	swma5.stop();
}


arxh.addEventListener(MouseEvent.CLICK,apthnarxh);


function apthnarxh(event:MouseEvent):void {
	swma1.gotoAndStop(1);
	swma2.gotoAndStop(1);
	swma3.gotoAndStop(1);
	swma4.gotoAndStop(1);
	swma5.gotoAndStop(1);
}
```

Τέλος να αναφέρουμε ότι τα ονόματα που δίνουμε είναι τελειως θέμα της επιλογής του χρήστη. Αρκει να είναι όλα γραμμένα με λατινικούς χαρακτήρες. Επίσης εφόσον όλα τα σύμβολα, κουμπιά και σωματίδια, τοποθετούνται στον αρχικό κανβα, στο πρώτο καρε, τότε και ο κώδικας actionscript στο πάνελ actions όπως έχουμε εξηγήσει νωρίτερα, τοποθετείται και αυτός σε ξεχωριστό layer στον αρχικό κανβα.

Στο 2$^{ο}$ βίντεο το ζήτουμενο ήταν πέρα από τη μία δέσμη σωματιδίων, που παρουσιάζεται ενδεικτικά με τα 3 σωματίδια, να φαίνεται ότι συνεχως μπαίνουν καινούρια σωματίδια στην οθόνη και στον θάλαμο του επιταχυντή κατα προέκταση, που παρασύρονται από το ηλεκτρομανγητικό κύμα και ομαδοποιούνται. Το flash όπως είπαμε προηγουμένως δημιουργεί από μόνο του loops, επαναλήψεις δηλαδη. Όταν φτιάξεις ένα βίντεο, αν δεν του δώσεις εντολή στο τέλος να σταματήσει μέσω actionscript, αυτό θα επαναλαμβάνεται. Επιθυμώντας πιο αληθοφανές αποτέλεσμα λοιπόν δεν θα ήταν ωραίο τα νέα σωματίδια να φαίνεται ότι μπαίνουν στην οθόνη επείδη εχει τελειώσει το βίντεο και απλά επαναμβάνεται.

Στο βίντεο αυτό λοιπόν έχουμε 4 motion tweens. Το πρώτο είναι του κύματος, που έχει σχεδιαστεί με μπλε και κόκκινες ρήγες εναλλάξ, και κινείται από αρίστερά προς τα δεξιά. Ενα παραλληλόγραμμο λοιπόν μπλέ-κόκκινο κινείται απο ένα σημείο σε ένα αλλο και έτσι δίνεται ή αίσθηση ενός κύματος που διαρρέει ένα σωλήνα. Το κύμα είναι ένα ξεχωριστό σύμβολο που έχει δημιουργήθει με τη μέθοδο που εξηγήσαμε στο βιντεο 1 και έχει τοποθετηθεί από τη βιβλιοθήκη μία φορα στο stage. Το ίδιο έχει γίνει και με τα σωματίδια. Κάθε σωματίδιο είναι ενα ξεχωριστό tween γιατι όπως φαίνεται τα σωματίδια μπαίνοντας στην οθόνη έχουν διαφορετικές ταχύτητες το καθένα. Ωστοσο ίδιος είναι ο σχεδιασμός για να μοιάζουν. Τα 3 σωματίδια λοιπόν έχουν κατασκευαστεί το καθένα στον κανβά του και έχουν τοποθετηθεί στο stage σε ένα layer και τα τρια μαζι. Σε ένα αλλο layer εχει τοποθετηθεί το κύμα και στο 3$^{ο}$ layer τα νέα σωματίδια που μπαίνουν στην οθόνη.




Μέχρι να φτάσουμε έκεί όμως πρέπει να αναλυθεί πως τα σωματίδια συγχρονίζονται με το μέγιστο του κύματος που είναι το κόκκινο χρώμα. Τα σωματίδια έχουν 2 διαφορετικά tweens στη συνολική τους κίνηση. Ένα είναι από την αρχή που μπάινουν με διαφορετική ταχύτητα το καθένα, διαφορετικό αριθμό καρε δηλαδή και ένα αλλο έιναι μέχρι να συμπέσουν όλα μαζι στο τέλος. Αυτο δημιουργήθηκε με το να καθορίσουμε και για τα 3 σωματίδια το ίδιο σημείο στο οποίο θα τέλειωναν την κίνηση τους την ίδια χρονική στιγμή στο ίδιο καρε δηλαδή. Έτσι ξεκινούν απο διαφορετικές θέσεις όταν τα παρασύρει το κύμα αλλα φαίνεται σαν να προσαρμόζονται οι ταχύτητες τους καταλήγοντας να κινούνται ομαδικά. Ο συγχρονισμός του κόκκινου του κύματος με την στιγμή που αλλάζουν ταχύτητα τα σωματίδια για να φαίνεται σαν να τα παρασύρει το κύμα, έχει επιτευχθεί με συνεχόμενες δοκιμές και αλλαγές της αρχικής θεσής του κύματος και των καρε που έχεί η κίνησή του, δηλάδη το πόσο γρήγορα ή πόσο πιο αργα πρέπει να κινηθεί έτσι ώστε τη στιγμή που το πρώτο tween των σωματιδίων τελειώνει και αρχίζει το δέυτερο που ομαδοποιούνται εκείνη τη στιγμή το κόκκινο του κύματος που φάινεται σαν φόντο και να βρίσκεται κάτω από τα σωματίδια την ώρα που αλλάζουν ταχύτητες. Και εν συνεχεία να πραγματοποιεί κίνηση με τέτοια ταχύτητα που να παραμένει στο ίδιο σημείο που βρίσκονται και τα ομαδοποιημένα σωματίδια ωστε να φαίνεται ότι τα παρασύρει.

Απο εκει και πέρα το πιο δύσκολο κομμάτι του βίντεο ήταν να βρέθει τρόπος να μπαίνουν νέα σωματίδια στην οθόνη πριν ομαδοποιηθούν τελείως τα πρώτα και εξαφανιστούν. Ο τρόπος που επετεύχθεί αυτό ήταν ο εξής.

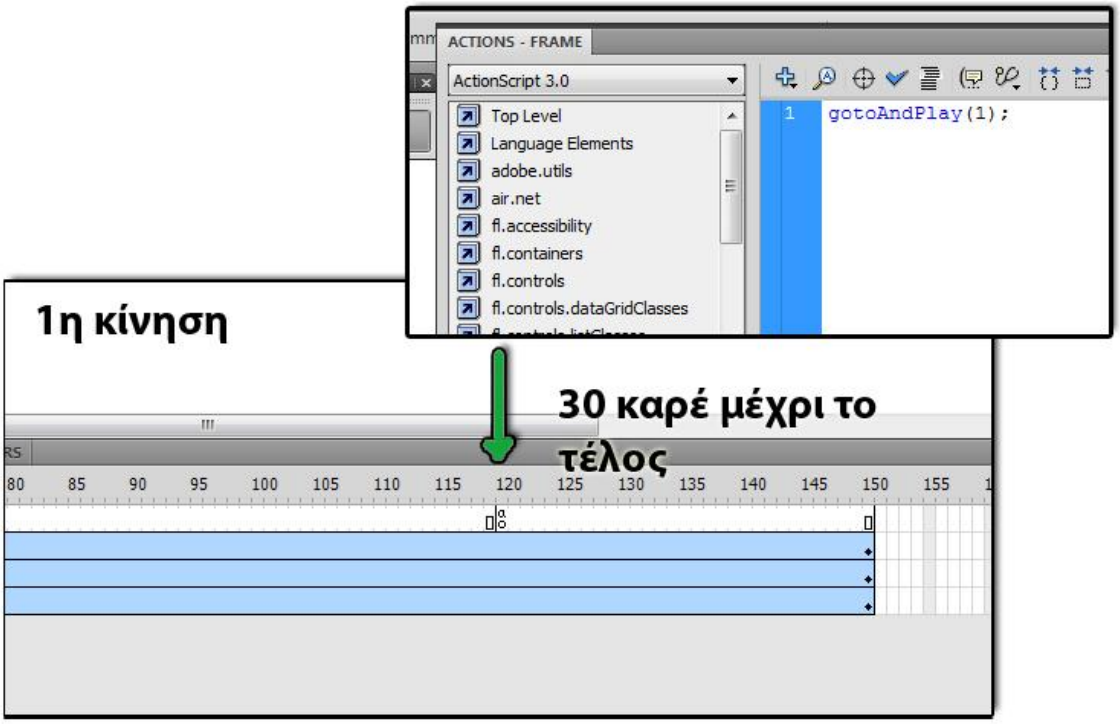
Τα πρώτα σωματίδια μπαίνουν στην οθόνη, αρχίσουν να ομαδοποιούνται και λίγο πριν εξαφανιστούν εμφανίζονται τα αλλα. Στο καρε στο οποιο εμφανίζονται τα αλλά, αυτά που ήδη υπάρχουν εξαφανίζονται. Αυτο γίνεται γιατί έχουμε τοποθετησει στο καρε αυτό την εντολή gotoAndPlay(1); ωστε να ξαναρχίζει η κίνηση από την αρχή ουσιαστικα. Έτσι εμφανίζονται τα δέυτερα σωματίδια. Τα πρώτα σωματίδια πρέπει όμως να ολοκληρωσουν την κίνηση τους. Ετσι δημιουργήθηκε ένα αντίγραφο της κίνησης των πρώτων σωματιδίων με μερικες τροποποιήσεις.

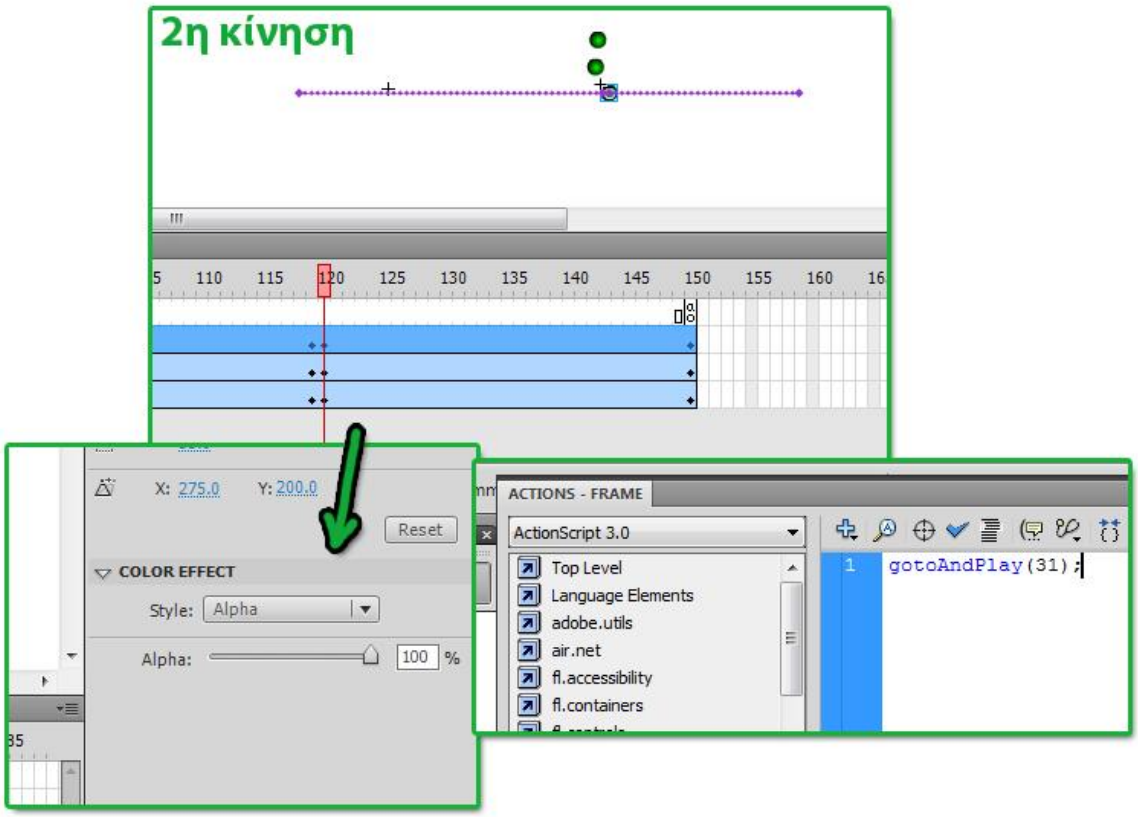
Ενα motion tween μπορει να είναι και ενα βίντεο όπου ενα σωματίδιο εμφανίζεται και εξαφανίζεται ακόμα και χωρις να κουνιέται. Αυτό το motion tween γίνεται με τον κλασσικό τρόπο, δηλαδή με δεξί κλίκ πάνω στο σωματίδιο και μετά create motion tween. Έτσι αφού δημιουργήσεις το tween μετακινείς ή όχι το σωματίδιο στις θέσεις που θέλεις και ενώ είναι ήδη επιλεγμένο πηγαίνεις δεξιά στον τομέα properties και επιλέγεις την επιλογή Alpha στο Style. Αυτό έχει να κάνει με το πόσο ορατό είναι το αντικείμενο, ή πόσο διαφανές αλλιώς. Αν μειώσεις λοιπόν το alpha σε 0% τότε το αντικείμενο που κάνεις tween σε εκείνο το καρέ εξαφανίζεται. Όχι ακαριαία όμως αλλά σταδιακά με βάση την αρχική του κατάσταση. Μπορείς έτσι να κάνεις αντικέιμενα να εμφανίζονται ή να εξαφανίζονται σταδιακά ή και ακαριαία, αρκεί να ορίζεις σε κάθε καρέ τις ιδιότητες του αντικειμένου.

Υπάρχουν λοιπόν δύο κινήσεις αντικειμένων που συνθέτων την εικόνα των επαναλαμβανομένων σωματιδίων που μπαίνουν στον θάλαμο.

Στην πρώτη κίνηση, που είναι μόνη της ένα σύμβολο αποτελούμενο από τρία σωματίδια, τα σωματίδια κινούνται μέχρι ένα καρε και μετά εξαφανίζονται και ξεκινούν απ’ την αρχή όπως είπαμε παραπάνω. Στην άλλη κίνηση που είναι και αυτή ένα σύμβολο αντίγραφό του πρώτου, τα σωματίδια δεν είναι ορατα με τον τρόπο που εξηγήσαμε μέχρι το κάρε που εξαφανίζονται αυτά στην πρώτη κίνηση. Ετσι συνδυάζοντας τα δύο σύμβολα και τοποθετώντας τα στο stage στην ίδια αρχική θέση έχουμε το συνδυασμό που ζητάμε. Υπάρχει όμως μιά λεπτομέρεια ακόμα. Η δύο κίνήσεις είναι συγχρονισμένες ώστε όταν εξαφανίζονται τα πρώτα σωματίδια να εμφανίζονται τα δεύτερα και να φαίνεται έτσι συνολικά ότι τα σωματίδια κινούνται κανονικά από τη μία ακρη της οθόνης στην άλλη. Αυτό επιτυγχάνεται όμως μόνο την πρώτη φορά. Και αυτό γιατί ενώ είναι συγχρονισμένα με το ξεκίνημα, όταν τα πρώτα εξαφανίζονται ο συγχρονισμός χαλάει. Τα πρώτα δηλαδή ξεκινούν απ’ την αρχή και τα δεύτερα συνεχίζουν κανονικά μέχρι να ολοκληρώσουν την κινησή τους. Για να συγχρονιστούν ξανά πρέπει κατα κάποιο τρόπο να τα προλάβουν. Δηλαδή τα καρε που ξόδεψαν τα δεύτερα σωματίδια για να τελείωσουν την κίνηση τους θα είναι τα καρε που θα έχουν προβάδισμα τα πρώτα. Έτσι αυτό που χρειάζεται είναι τα δέυτερα σωματίδια να «πηδήξουν» κάποια καρέ και να βρέθουν μαζί με τα άλλα. Τα καρέ λοιπόν που χρειάζεται να πηδήξουν είναι τα καρε που ξόδεψαν για να φτάσουν στο τέλος της κίνησης τους όταν ξεσυγχρονίστηκαν με τα πρώτα. Αυτό γίνεται με την εντολή gotoAndPlay(31); Αφού 30 ήταν τα εναπομείναντα καρε της 2$^{ης}$ κίνησης. Όλα τα παραπάνω φαίνονται σχηματικά στις παρακάτω εικόνες. Το καρέ με τα ελλήνικα μικρά «α» είναι τα καρέ που τοποθετούμε τις

εντολες του actionscript, ενω στη 2η κίνηση τα καρέ που στην Timeline υπάρχουν κάποια μαυρα διαμαντάκια, είναι τα καρέ που αλλάζει η ορατότητα Alpha των αντικειμένων, από 0% σε 100%.



Εκτός από τα motion tweens που έχουμε περιγράψει μέχρι τώρα ένα άλλο είδος που είναι διαθέσιμο στο flash ειναι το 3D Tween. Σε αυτό αφού δημιουργήσεις και τον κλασσικό τρόπο ένα motion tween έχεις τη δυνατότητα να δώσεις στο αντικείμενο σου τρισδιάστατη εικόνα με το εργαλείο 3D Tool από την εργαλειοθήκη και η μεταμόρφωση ή η αλλαγή οπτικής γωνίας του αντίκειμένου όπως το βλέπει ο θεατής γίνεται ενα motion tween, που ονομάζεται 3D Tween. Ένα τέτοιο έχει χρησιμοποιηθεί στο 3$^{o}$ βίντεο της εργασίας όπου από την διατομή ενός σωλήνα του επιταχυντή περνάμε στην κάτοψη.

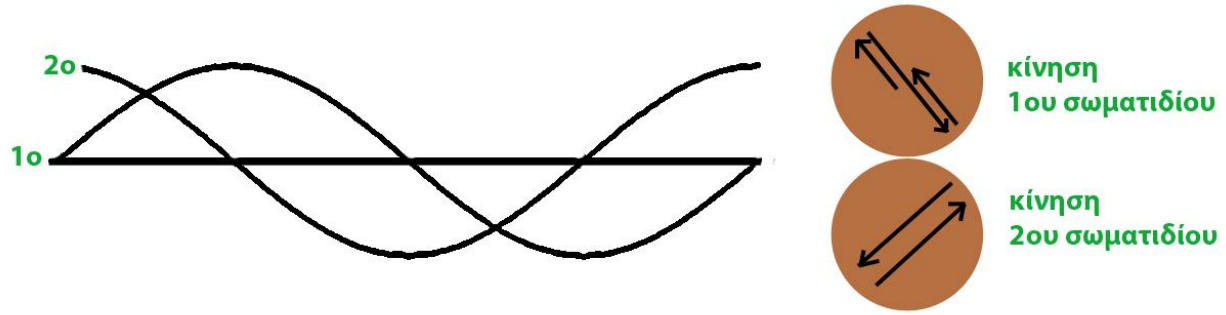
Στο 3$^{o}$ βίντεο λοιπόν υπάρχει στην αρχή η εικόνα της διατομής ενός σωλήνα όπως περίπου είναι ο σωλήνας του επιταχυντή. Η εικόνα έχει δημιουργηθεί στο πρόγραμμα Photoshop με το οποίο είμαι πιο εξοικειομένος γραφιστικά. Το flash προσφέρει πολλά εργαλέια και αυτό για σχεδίαση τα οποία μπορείς να συνδυάσεις με κίνηση, όπως για παράδειγμα να κάνεις ένα αντικέιμενο να εμφανίζεται και να μετά να λάμπει. Τις ίδιες ιδιότητες δίνει και το photoshop σε ότι αντικέιμενο χρησιμοποιήσεις οπότε στην περίπτωση που η εικόνα δεν αλλάζει όψη, όπως εδώ, μπορείς να χρησιμοποιήσεις όποιο πρόγραμμα σε βολέυει περισσότερο. Μπρόστα από τη διατομή του σωλήνα λοιπόν υπάρχουν δύο σωματίδια που ταλαντώνονται γύρω από το κέντρο της διατομής λόγω της επίδρασης των εναλλάσσόμενων μαγνητικών πεδίων. Τα σωματίδια είναι δύο ξεχωριστά motion tweens. Αυτή τη φορά όλα τα tweens έχουν τοποθετηθεί σε layers κατα μήκος της timeline στο αρχικό stage. Δεν εχουν γίνει δηλαδή πρώτα σύμβολα (αν και ακόμα και όταν κατασκευάζεις ένα tween στο αρχικό stage, to flash παντα μετατρέπει σε σύμβολα τα αντικέιμενα που έκανες tween). Αυτό διότι υπάρχει μία συνέχεια χρονική στο βίντεο δηλαδή δεν γίνονται όλα τα tweens ταυτόχρονα, αλλα παρουσιάζονται το ένα μετά το άλλο. Συνήθως η λειτουργία με τα σύμβολα χρησιμεύει όταν οι κινήσεις γίνονται ταυτόχρονα και έτσι μπορείς να τα φτιάξεις ξεχωριστά και απλά να τα προσθέσεις στο πρώτο καρε ενός layer.

Δύο tweens λοιπόν όπως είπαμε είναι τα σωματίδια. Αλλα δύο είναι η εμφάνιση και η εξαφάνιση των γραμμων των μαγνητικών πεδίων που έγινε με τη μέθοδο που περιγράψαμε στο βίντεο 2 με την opacity Alpha. Και δύο ακόμα με την ίδια μέθοδο είναι τα γαλάζια βελάκια που δέιχνουν την κατεύθυνση των σωματιδίων. Στα πρώτα tweens που αναφερθήκαμε αυτά των σωματιδίων έχουν δημιουργηθεί από τρία επιμέρους tweens το ένα και δύο το αλλο. Στο πρώτο έχουμε ένα motion tween από το κέντρο προς τα έξω, ένα απο αυτό το σημέιο μέχρι το ακριβως αντιθετο με βάση το κέντρο της διατομής του σωλήνα και άλλο ένα από εκείνο το σημείο μέχρι πάλι το κέντρο. Για το άλλο σωματίδιο έιναι ένα motion tween από τη μία ακρη στην άλλη και το 2$^{o}$ ειναι η επιστροφή. Όι κινήσεις αυτές εχουν επιλεγεί σα να μας δινόταν εικόνα σε τυχαία στιγμή στη διατομή του επιταχυντή με δύο σωματίδια μέσα σε αυτόν. Και η εικόνα αυτή ακολουθεί τα σωματίδια στην κίνηση τους προς τα μέσα γιατί αλλιώς αν απλά κοιτάγαμε από τη διατομή ενός κομμένου σωλήνα τα σωματίδια θα έπρεπε να μικραίνουν καθώς οπτικά απομακρύνονται. Δεν είναι όμως αυτός ο σκοπός του βίντεο, να δώσει δηλαδή μιά άκρως ρεαλιστική οπτικά εικόνα της κίνησης των σωματιδίων αλλα μιά επιδειξη του τρόπου με τον οποίο ταλαντώνονται καθως ο τετραπολικός μαγνήτης προσπαθεί να τα εστιάσει. Για αυτό το λόγο και τα γραφικά είναι απλά.

Στην συνέχεια ακολουθεί το 3D Tween που εξηγήσαμε. Ο σωλήνας δηλαδή καθώς τον κοιτάμε απο τη διατομή του περιστρέφεται για να τον κοιτάξουμε απο την κάτοψή του. Το 3D tween δεν είναι και τόσο αποτελεσματικό όπως φάινεται στο βίντεο για όλα τα έιδη σχημάτων και για πραγματικό τρισδιάσταο animation χρησιμοποιούνται άλλα προγράμματα.Όμως για απλά

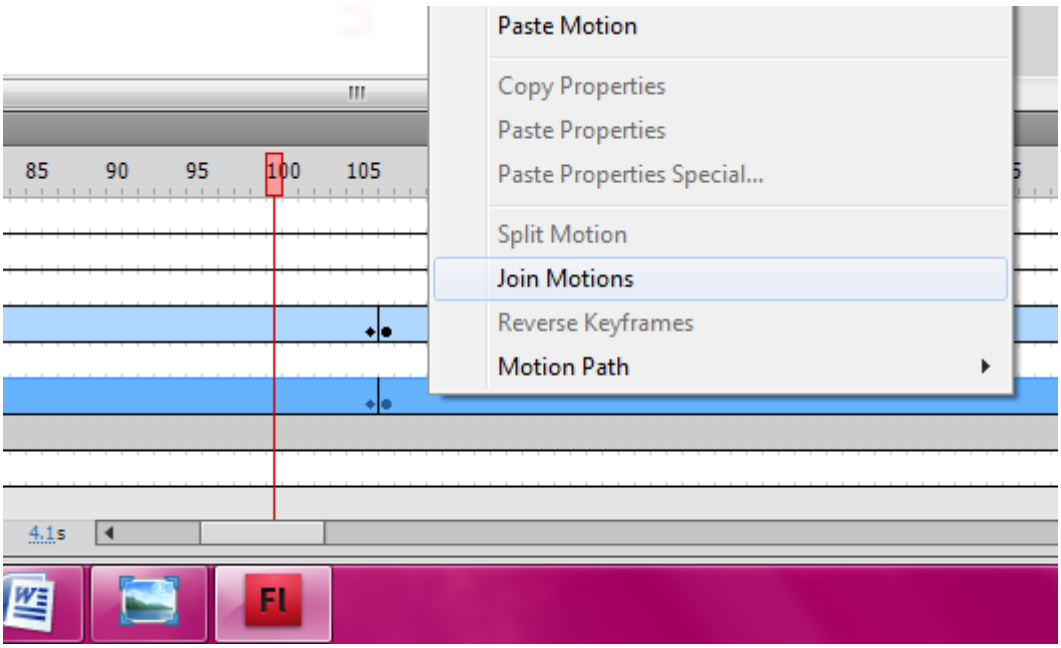
σχέδια, όπως ένα σωλήνας στην περίπτωση μας και με τα «άσχημα» σήμεια που δεν αλλάζει όπως θα θέλαμε το flash να μη φαίνονται στην όθόνη αφού βρίσκονται εκτός stage, πετυχαίνουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αφού λοιπόν φτάσουμε να κοιτάμε την κάτοψη εξαφανίζεται το 3d tween και έπεται η κίνηση των δύο σωματίδίων που είχαμε πρίν, όπως θα την βλέπαμε αν κοιτάζαμε απο ψηλά. Η κινήσεις θυμίζουν ημιτονοείδες και συνημιτονοειδές κύμα και έχουν φτιαχτεί με απλά motion tweens με custom motion path (μονοπάτι κίνησης) με το τρόπο που εξηγήθηκε στο βίντεο 1.

Το παρακάτω σχήμα εξήγεί και σχηματικά την σύνδεση των κινήσεων  των σωματιδίων στις δύο όψεις του σωλήνα (τα σωματίδια έχουν αριθμηθεί ως 1$^{ο}$ και 2$^{ο}$ τύχαια και η αρίθμησή τους δεν έχει να κάνει με το χρόνο κατα τον οποίο μφανίζονται όπως βλέπουμε στο βίντεο, αφού εμφανίζονται μαζί).

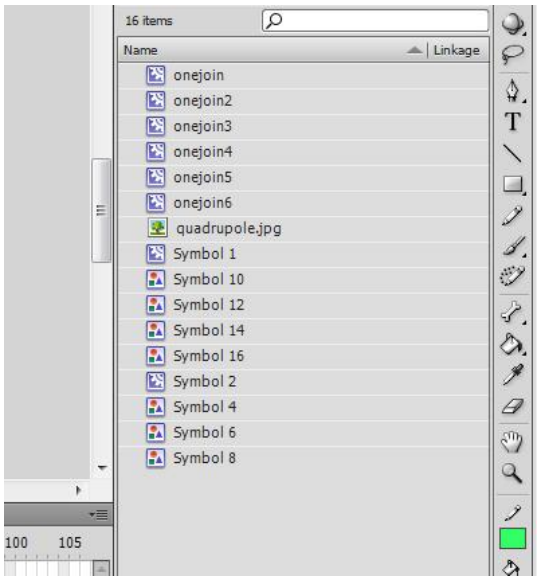


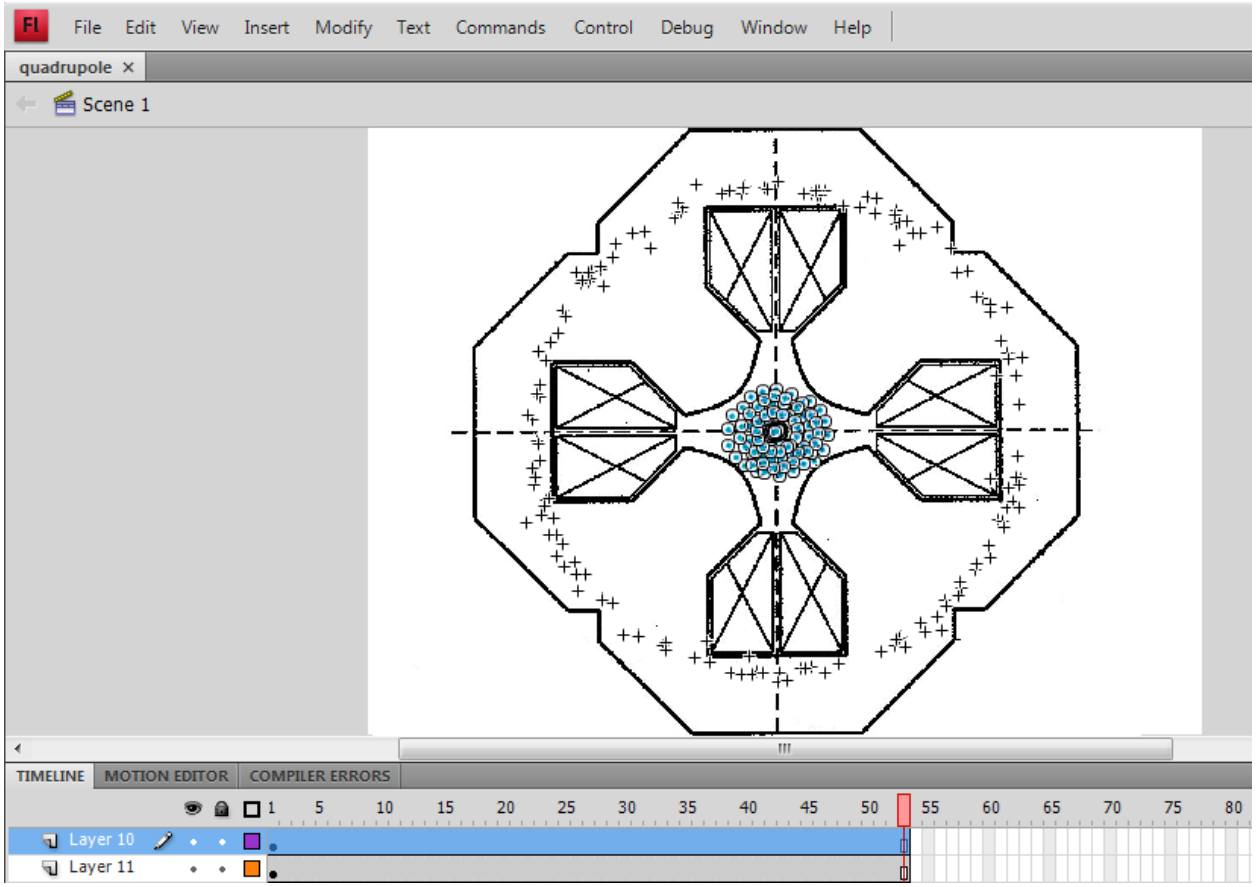

Τέλος στο 4$^{ο}$ βίντεο της εργασίας εμφανίζεται όπως ακριβώς είναι στην πραγματικότητα, η διατομή ενός τετραπολικού μαγνήτη με μερικές απλές γραμμές. Το σχέδιο αυτό έχει δημιουργηθεί στο Photoshop και έχει προστεθεί στο stage σε ξεχωριστό layer.Τα σωματίδια ταλαντώνονται γύρω από το κέντρο της διατομής άλλα με μεγάλο πλάτος και άλλα με μικρότερο συνθέτοντας την εικόνα μίας δέσμης.

Οι κινήσεις των σωματιδίων είναι σύμβολα, movie clips, που έχουν δημιουργηθεί ξεχωριστά και υπάρχουν στη βιβλιοθήκη. Ο τρόπος με τον οποίο δημιουργήθηκαν είναι ίδιος με αυτόν του βίντεο 3. Υπάρχει όμως μία διαφορά. Στο βίντεο 4 τα ξεχωριστά tweens που έχουν δημιουργηθεί για τη μία ταλάντωση, όπως για παράδειγμα του σωματιδίου 1 στην παραπάνω εικόνα έχουν ένωθεί επιλέγοντας όλα τα tweens στην timeline με πατημένο το πληκτρο Shift και κλικ σε καθένα απο αυτά και μετά πατώντας δεξί κλικ και Join motions σε ένα από αυτά, όσο είναι επιλεγμένα.

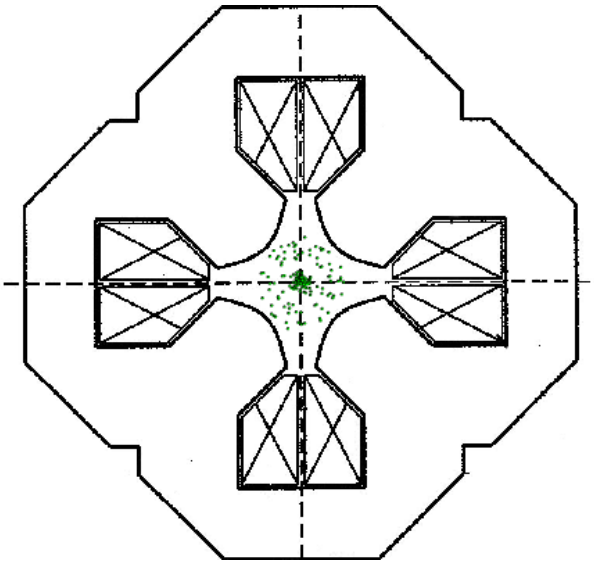



Αυτή η ένωση λοιπόν έγινε ώστε η κίνηση να αποτελείται από ένα tween. Έτσι μετά με το Free Tranform Tool επιλέγοντας το σωματίδιο και μετά επιλέγοντας το μονοπάτι κίνησης μπορούμε να του αλλάξουμε το μέγεθος. Με αυτόν τον τρόπο αφού δημιουργήθηκαν οι δύο πρώτες κινήσεις όπως στο βίντεο 3 και μετά αποτελούνταν από ένα tween, όπως γράψαμε παραπάνω, δημιουργήθηκαν και 2 ακόμα περιπτώσεις για το καθένα με μικρότερη διάμετρο ταλάντωσης. Αρα σύνολο 6 διαφορετικά σύμβολα του ίδιου σωματιδίου που διαφέρουν στη διάμετρο και στην αρχική φορά κατα την οποία το σωματίδιο ταλαντώνεται. Τους δώθηκε το ονομα onejoin, onejoin2, κ.ο.κ. επειδή κάθε σύμβολο έχει ένα σωματίδιο και έχουν γίνει joined τα tweens. Αυτα τα σύμβολα λοιπόν βρίσκονταν στη βιβλιοθήκη και μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν όσες φόρες θέλαμε.





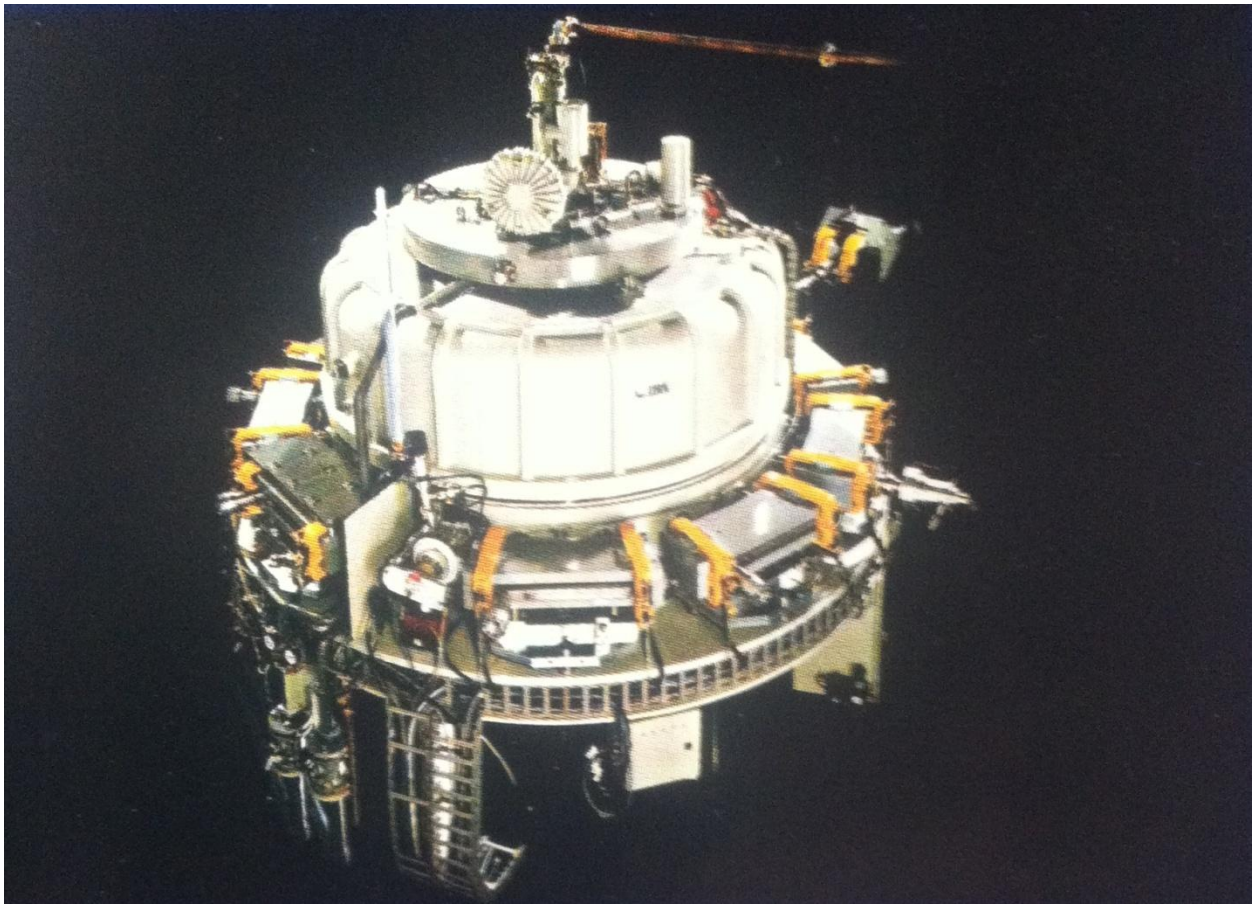

Τα σύμβολα λοιπόν έχουν τοποθετηθεί πολλές φορές το καθένα, σε ένα Laye όλα μαζίr. Η εικόνα που βλέπουμε με τις διαμέτρους της κίνησης των σωματιδίων, που δηλώνονται απο τους σταυρούς, να σχηματίζουν ένα κύκλο έχει δημιουργηθεί περιστρέφοντας (με το Free Transform Tool) τα συμβολά που προσθέσαμε, το καθένα όσο χρειαζόταν, ώστε να γεμίσει η περιφέρεια του θαλάμου του μαγνήτη. Και αυτό διότι αν τα προσθέταμε και τα αφήναμε απλά έτσι όπως είχαν φτιαχτεί θα είχαμε την εικόνα όλων των σωματιδίων να ταλαντεύονται με την ίδια γωνία σε σχέση με τον άξονα x και y. Επιπλέον τα σωματίδια δεν έχουν τοποθετηθεί το ένα ακριβώς επάνω στο άλλο ή σε έντελώς διαφορετικά σημεία, αλλά σε πολύ κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους κοντά στο κέντρο, έτσι ώστε όταν εστιάζεται η δέσμη δηλαδή τα σωματίδια τείνουν προς το κέντρο να εχουμε το σωστό οπτικά αποτέλεσμα. Τέλος όλα τα σωματίδια αφού επιλέχθηκαν με το Free Tranform Tool, μίκρυναν όλα μαζί ώστε τα άκρα της κίνησης τους να βρίσκονται μέσα στον θάλαμο του μαγνήτη.



## Εφαρμογές και χρησιμότητα επιταχυντών

Οι επιταχυντές σωματιδίων πέρα από την έρευνα και τη μελέτη για τη φύση δομικών στοιχείων της ύλης, τη φυσική στοιχειωδών σωματιδίων αλλά και τη φασματοσκοπία, τις ακτίνες Χ και την παραγωγή δεσμών νετρονίων από μηχανές υψηλής έντασης, βρίσκουν εφαρμογή και σε τομείς της καθημερινής μας ζωής και αποτελούν κομμάτι της πιο εξελιγμένης τεχνολογίας για το συμφέρον του ανθρώπου. Κυριότερες εφαρμογές είναι στις εφαρμοσμένες επιστήμες λοιπον, όπως η ιατρική, η χημεία και η βιολογία καθώς επίσης εμπλέκονται και στην παραγωγή ενέργειας.

Στην ιατρική εφαρμόζονται στην τομογραφία και τη χειρουργική, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό, περίπου 85% των κατά προσέγγιση 26 χιλιάδων επιταχυντών που υπάρχουν αυτή την στιγμή στον κόσμο χρησιμοποιείται για θεραπευτικούς λόγους (καρκίνος, μηχανήματα που βομβαρδίζουν όγκους με τεράσια ακρίβρεια) και εμφύτευση. Οι τομογράφοι λειτουργούν με εκπομπή ποζιτρονίων για έγκυρη διάγνωση μεταβολών σε ιστούς πριν εμφανιστούν σοβαρά συμπτώματα. Προσφέρουν πλέον καλύτερες συσκευές ακτινογραφίας όπου, η απορρόφηση ακτινοβολίας απο τους ιστούς είναι δέκα φορές λιγότερη.Οι χημικές εφαρμογές των επιταχυντών έχουν να κάνουν με διαδικασίες αποστέιρωσης τροφών αλλά και αλλαγή των ιδιοτήτων υλικών όπως πυρηνικών αποβλήτων που είναι επιβλαβή για τον άνθρωπο. Και φυσικά δεν θα μπορουσαν να λήψουν από την παραγωγή ενέργειας όπως αναφέρθηκε, αφού χρησιμοποιούνται ώς πολλαπλασιαστές ενέργειας, όπως και στην διαδικασία της αδρανειακής σύντηξης με επιταχυντές βαρέων ιόντων. Μόνο το 1% των επιταχυντών που υπάρχουν είναι μηχανές έρευνας με ενέργεια πάνω από 1 GeV αφού το κόστος για τέτοια πειράματα είναι τεράστιο, ενώ το υπόλοιπο 14% που απομένει έχει να κάνει με έρευνα χαμηλών ενεργειών στον εργοστασιακό τομέα, στη βιοιατρική κ.α.



Βιομηχανικός επιταχυντης

Οι επιταχυντές σωματιδίων συγκαταλέγονται ανάμεσα στα σημαντικότερα επιτέυγματα του ανθρώπου και αποτέλεσαν το κυριότερο εργαλείο στην προσπάθειά εύρεσης και κατανόησης της δομής της υλής, ενώ πλέον βρίσκονται στην υπηρεσία του ανθρώπου για να καλυτερεύσουν τη ζωή μας.

Προσωπικά η Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων ήταν για μένα ένα απο τα πιο ενδιαφέροντα μαθηματα μαζί με τα μαθήματα της ροής της Οπτοηλεκτρονικής και Λέιζερ, στην κατευθυνση Φυσικού Εφαρμογών που ακολούθησα. Ανακαλύπτωντας λοιπόν μέσα απο τη διπλώματική που μου ανέθεσε ο κ. Τρακας ότι στοιχεία των δύο αυτών τομέων της Φυσικής συνδυάζονται, με έκανε να ασχοληθώ με ακόμα περισσότερο ενδιαφέρον πάνω στο αντικέιμενο της εργασίας μου. Τέλος η εργασία αυτή ήταν μιά ευκαιρία για έμενα που ασχολούμαι πολύ με τον τομέα της γραφιστικής και των εικαστικών γενικότερα, να μάθω να χειρίζομαι το προγραμμα Flash για δημιουργία βίντεο, κάτι που διέυρυνε τις γνώσεις μου κα γιαυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τράκα καθώς επίσης και για τις πολυτιμές συμβουλές και οδηγίες που μου έδωσε και το υλικό που μου παρείχε.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ


- Ιστοσελίδα Νικόλαου Τράκα, «ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΟΜΑΔΑ ΕΚΛΑΪΚΕΥΣΗΣ», http://www.physics.ntua.gr/POPPHYS/

  -Hands-on CERN (ελληνική μετάφραση)

  -Η περιπέτεια των σωματιδίων (ελληνική μετάφραση του λογισμικού The Particle Adventure από τον Γιώργο Τσιπολίτη)

- Raghavan Jayakumar - Particle Accelerators, Colliders, and the Story of High Energy Physics - Charming the Cosmic Snake, Springer(2011)
- Klaus Wille – The Physics of Particle Accelerators - An Introduction, Oxford University Press, USA(2001)
- Atomic Physics Accelerators, Volume 17 (Methods in Experimental Physics)-Academic Press(1980)
- In Beam Physics and Accelerator Technology) D. A. Edwards, M. J. Syphers - An Introduction to the Physics of High Energy Accelerators – Wiley Interscience(1992)
- Ιστοσελιδα Γιάννη Παπαφιλίππου, http://yannis.web.cern.ch
- Φωτογραφίες, www.cern.ch
- Wikipedia, *The Free Encyclopedia,* http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page