

Επιταχυντές σωματιδίων

Η γνώση που έχουμε μέχρι σήμερα αποκτήσει για τον μικρόκοσμο, τη δομή της ύλης, την πυρηνοσύνθεση στα άστρα ή σε άλλα βίαια αστρικά φαινόμενα, αλλά ακόμη και για τις πρώτες στιγμές του σύμπαντος οφείλεται σε έναν πολύ μεγάλο βαθμό στην ύπαρξη των επιταχυντικών διατάξεων. Μέσω των επιταχυντών σωματιδίων μπορεί ο πειραματιστής να επιλέξει με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβειά το είδος των σωματιδίων που θα αλληλεπιδράσουν αλλά και τις συνθήκες όπου θα λάβει χώρα η υπό μελέτη αντίδραση. Πέραν του ελέγχου του είδους των σωματιδίων ένας επιταχυντής εξασφαλίζει στον πειραματικό φυσικό και τον απόλυτο έλεγχο της ενέργειας και της ορμής των αλληλεπιδρώντων σωματιδίων. Αυτό φυσικά διευκολύνει κατά πολύ την μελέτη και την κατανόηση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Σήμερα η χρήση των επιταχυντών στον τομέα της βασικής έρευνας είναι εκτεταμένη. Πιο συγκεκριμένα **στην φυσική υψηλών ενεργειών ολοένα και ισχυρότερες επιταχυντικές διατάξεις χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και την μελέτη νέων σωματιδίων. Στην πυρηνική φυσική η μελέτη της δυναμικής του πυρήνα αλλά και της δομής του βασίζεται πλέον στην χρήση του επιταχυντή.** Πέραν των εφαρμογών των επιταχυντών στην πυρηνική φυσική και την φυσική υψηλών ενεργειών η χρήση τους στην μελέτη του μικρόκοσμου και της δομής της ύλης είναι επίσης διαδεδομένη ενώ δεν είναι λίγα τα παραδείγματα χρήσης επιταχυντών για ιατρικές εφαρμογές, εφαρμογές αρχαιομετρίας, μη καταστρεπτικών μεθόδων στοιχειομετρικής ανάλυσης κτλ.

Μια σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει τους επιταχυντές - πέραν της μέγιστης ενέργειας επιτάχυνσης των σωματιδίων - είναι αυτή της **λαμπρότητας (luminosity)**. Η λαμπρότητα είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος -ιδιαίτερα για τα πειράματα της φυσικής υψηλών ενεργειών και της πυρηνικής φυσικής - διότι καθορίζει τον ρυθμό των γεγονότων της υπό μελέτη αντίδρασης. Με άλλα λόγια, είναι αυτή η παράμετρος όπου μαζί με την μέγιστη ενέργεια καθορίζει το αν ένα πείραμα είναι εφικτό να γίνει ή όχι. Η λαμπρότητα λοιπόν δίνεται από την πιο κάτω εξίσωση.:

$$L = \frac{N_1 N_2}{A} f$$

όπου N_1 , N_2 είναι ο αριθμός των σωματιδίων που συγκρούονται κατά την διάρκεια μιας περιόδου T ($f=1/T$). Στο παρονομαστή ο παράγοντας A αντιστοιχεί στην επιφάνεια της διατομής της δέσμης σωματιδίων.

Είδη επιταχυντών

Ένας από τους βασικούς διαχωρισμούς των επιταχυντών σε κατηγορίες είναι ανάλογα με την χρονική εξάρτηση του ηλεκτρικού πεδίου επιτάχυνσης. **Έτσι έχουμε επιταχυντές σταθερού ηλεκτρικού πεδίου (DC) και επιταχυντές εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου (AC).**

Ως προς την χρήση των επιταχυντών έχουμε έναν επίσης πολύ βασικό διαχωρισμό ο οποίος μάλιστα καθορίζει την διαθέσιμη ενέργεια στο σύστημα κέντρου μάζας. Πιο συγκεκριμένα **έχουμε πειράματα σταθερού στόχου όπου η δέσμη σωματιδίων του επιταχυντή προσπίπτει σε έναν ακίνητο στόχο** ενός υλικού ανάλογα με τις ανάγκες του πειράματος. Σε αυτή την περίπτωση η διαθέσιμη κινητική ενέργεια στο σύστημα κέντρου μάζας είναι:

$$E_{CM} = (m_b^2 \cdot c^4 + m_t^2 \cdot c^4 + 2 \cdot m_t \cdot c^2 E_L)^{1/2}$$

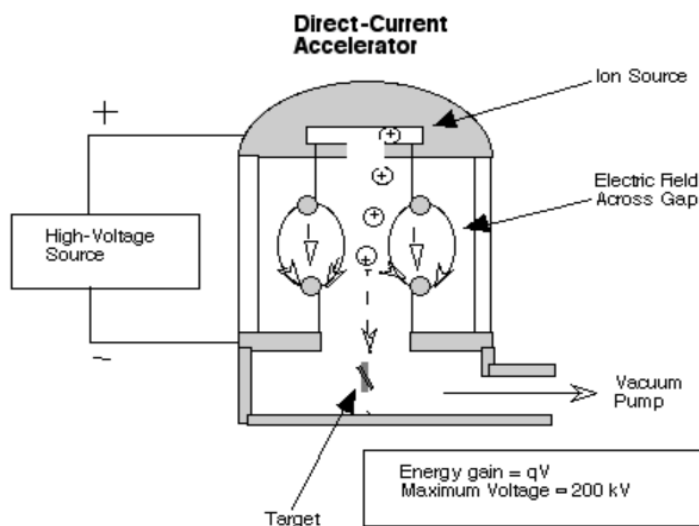
Στον αντίποδα των πειραμάτων σταθερού στόχου έχουμε **τα πειράματα συγκρουόμενων δεσμών** όπου δύο αντίθετα κινούμενες δέσμες σωματιδίων συγκρούονται σε προκαθορισμένα σημεία της τροχιάς τους. Σε αυτή την περίπτωση η διαθέσιμη ενέργεια στο σύστημα κέντρου μάζας είναι:

$$E_{CM} = 2 \cdot E_L$$

Για την περίπτωση συγκρουόμενων δεσμών παρατηρούμε ότι για την ίδια ενέργεια δέσμης E_L η διαθέσιμη ενέργεια στο σύστημα κέντρου μάζας είναι κατά πολύ μεγαλύτερη (θεωρούμε υψηλές ενέργειες επιτάχυνσης). Παρά την "αποδοτικότερη" μεταφορά ενέργειας στο σύστημα κέντρου μάζας τα πειράματα συγκρουόμενων δεσμών παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι ότι στα πειράματα αυτά ο αριθμός των συγκρουόμενων σωματιδίων είναι σαφώς μικρότερος, διότι ένας στόχος στερεάς κατάστασης παρέχει σίγουρα μεγαλύτερη συγκέντρωση πυρήνων από ότι μια δέσμη σωματιδίων.

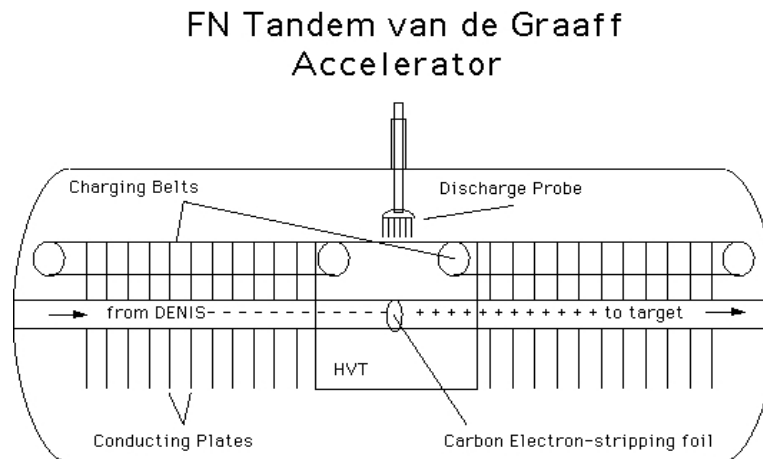
Επιταχυντές συνεχούς ηλεκτρικού πεδίου (DC)

Η απλούστερη εκδοχή επιταχυντών συνεχούς πεδίου είναι οι επιταχυντές Cockroft-Walton. Στους επιταχυντές αυτούς θετικά ή αρνητικά φορτισμένα ιόντα επιταχύνονται μέσω ενός ή περισσοτέρων ηλεκτρικών πεδίων, όπου η κάθε διαφορά δυναμικού δεν μπορεί να ξεπερνά τα 200 kV. Οι επιταχυντές αυτοί είναι οι απλούστεροι σε σύλληψη αλλά η ογκώδης κατασκευή τους καθιστά **πρακτικά αδύνατη την λειτουργία τους για ενέργειες επιτάχυνσης μεγαλύτερες του 1 MeV**. Ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός επιταχυντή Cockroft-Walton δίνεται στο πιο κάτω σχήμα



Σχήμα 1: Σχεδιάγραμμα ενός επιταχυντή Cockroft-Walton.

Η πιο διαδεδομένη μορφή επιταχυντή συνεχούς ηλεκτρικού πεδίου είναι ο **επιταχυντής Van de Graaff**. Στην περίπτωση αυτή η διαφορά δυναμικού προκαλείται από μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου με μηχανικό τρόπο (ιμάντας). Τα ιόντα εξέρχονται από την ιοντική πηγή και επιταχύνονται από ένα συνεχές ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος ενός σωλήνα (σε κενό) όπου η τάση αυξάνει σταδιακά μέσω μιας σειράς μεταλλικών πλακών. Η πιο διαδεδομένη μορφή επιταχυντή Van de Graaff είναι ο Tandem Van de Graaff.

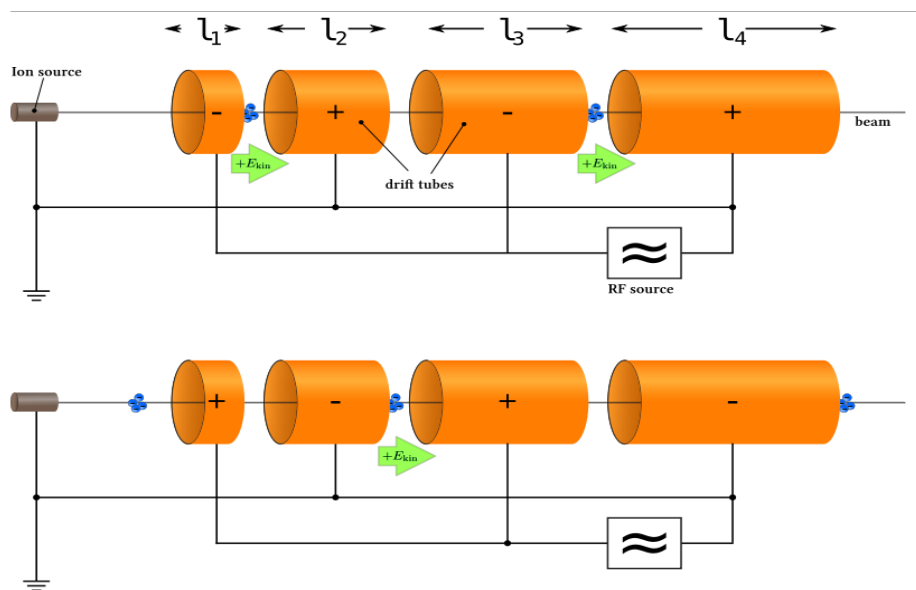


Σχήμα 2: Σχεδιάγραμμα ενός επιταχυντή Tandem Van de Graaff.

Στον πιο πάνω επιταχυντή με την χρήση του ίδιου πεδίου τα ιόντα επιταχύνονται **δύο φορές**. Στην αρχή αρνητικά φορτισμένα ιόντα επιταχύνονται προς το κέντρο του επιταχυντή – το οποίο είναι θετικά φορτισμένο. Εκεί μέσω ενός λεπτού υμενίου απογυμνώνονται ολικώς ή μερικώς από ηλεκτρόνια με αποτέλεσμα να μετατρέπονται σε θετικά φορτισμένα ιόντα τα οποία στην συνέχεια επιταχύνονται άλλη μία φορά από το θετικό φορτίο στο κέντρο του επιταχυντή.

Επιταχυντές εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου

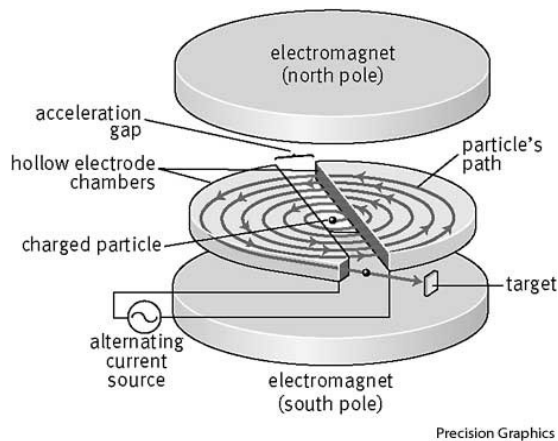
Η απλούστερη εκδοχή επιταχυντών εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου είναι οι γραμμικοί επιταχυντές. Όπως και σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις ιόντα εισέρχονται στον επιταχυντή. Στους γραμμικούς επιταχυντές τα ιόντα της δέσμης επιταχύνονται μεταξύ των κοιλότητων ολίσθησης. Δεδομένου ότι τα ιόντα επιταχύνονται, το μήκος της κάθε κοιλότητας αυξάνει σταδιακά ώστε στην επόμενη αντιστροφή φάσης του πεδίου το ιόν να έχει εξέλθει από την κοιλότητα όταν το πεδίο έχει εκείνη την φορά που οδηγεί σε αύξηση της κινητικής ενέργειας. Οι συχνότητες λειτουργίας των γραμμικών επιταχυντών είναι της τάξης των MHz και για τον λόγο αυτό οι επιταχυντές αυτού του είδους λέγονται και αλλιώς γραμμικοί επιταχυντές ραδιοσυχνότητας. Προφανώς εδώ **δεν υπάρχει συνεχής ροή ιόντων από την δέσμη αλλά παλμική**.



Σχήμα 3: Γραφική απεικόνιση ενός γραμμικού επιταχυντή και της αρχής λειτουργίας του. Στο συγκεκριμένο σχήμα ένα αρνητικά φορτισμένο ιόν επιταχύνεται μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης κοιλότητας ενώ στο κάτω σχήμα παριστάνεται η επιτάχυνση του ιόντος μεταξύ της δεύτερης και της τρίτης κοιλότητας. Αυτό φυσικά επιτυγχάνεται μόνο αν το πεδίο μεταβάλλεται αρμονικά (RF) και μόνο αν το μήκος των κοιλότητων σταδιακά αυξάνει.

Όπως και σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις ιόντα εισέρχονται στον επιταχυντή. Στους γραμμικούς επιταχυντές τα ιόντα της δέσμης επιταχύνονται μεταξύ των κοιλότητων ολίσθησης. Δεδομένου ότι τα ιόντα επιταχύνονται το μήκος της κάθε κοιλότητας αυξάνει σταδιακά ώστε στην επόμενη αντιστροφή φάσης του πεδίου το ιόν να έχει εξέλθει από την κοιλότητα όταν το πεδίο έχει εκείνη την φορά που οδηγεί σε αύξηση της κινητικής ενέργειας. Οι συχνότητες λειτουργίας των γραμμικών επιταχυντών είναι της τάξης των MHz και για τον λόγο αυτό οι επιταχυντές αυτού του είδους λέγονται και αλλιώς γραμμικοί επιταχυντές ραδιοσυχνότητας. Προφανώς εδώ δεν υπάρχει συνεχής ροή ιόντων από την δέσμη αλλά παλμική.

Ένα άλλο είδος επιταχυντών εναλλασσόμενου πεδίου (AC) είναι τα κυκλοτρόνια. Η βασική αρχή είναι παρόμοια όπως στους γραμμικούς επιταχυντές όπου μέσω κατάλληλης εναλλαγής του ηλεκτρικού πεδίου το ιόν επιταχύνεται στο διάκενο μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Στην περίπτωση των κυκλοτρονίων ένα επιπλέον μαγνητικό πεδίο κάθετο στο επίπεδο τροχιάς των ιόντων τα εξαναγκάζει σε κυκλική κίνηση.

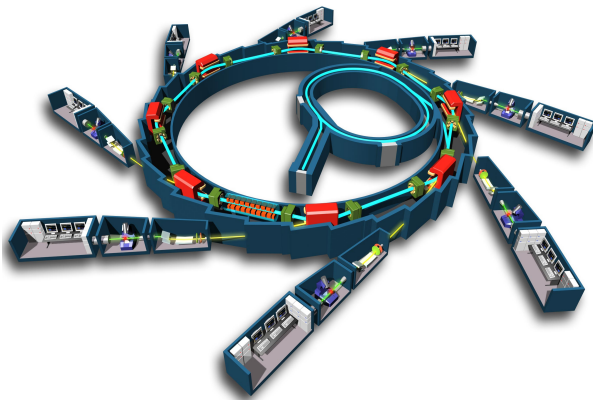


Σχήμα 4: Γραφική απεικόνιση της λειτουργίας του κυκλοτρονίου.

Όπως φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα διατηρώντας σταθερή συχνότητα RF το ιόν επιταχύνεται κάθε φορά που περνάει από το διάκενο μεταξύ των δύο ημικυκλικών ηλεκτροδίων σχήματος D. Όσο αυξάνει η ενέργεια του επιταχυνόμενου σωματιδίου τόσο αυξάνει και η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του. Αυτό το γεγονός περιορίζει σημαντικά την χρήση των κυκλοτρονίων για την κατασκευή ισχυρών επιταχυντικών διατάξεων.

Στην κατηγορία των κυκλικών επιταχυντών εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου ανήκουν και οι πλέον ισχυρότερες επιταχυντικές διατάξεις : τα συγχροτρόνια.

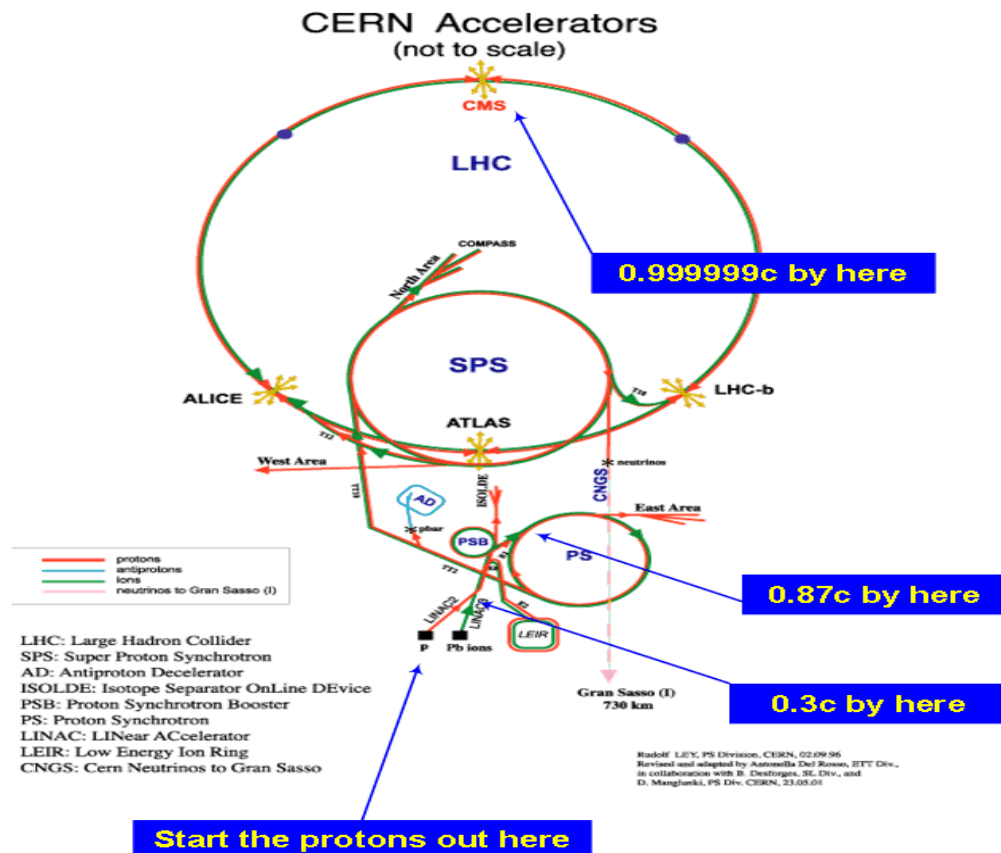
Πρόκειται για ένα συνδυασμό κυκλοτρονίου και γραμμικού επιταχυντή εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 5: Το συγχροτρόνιο. Πιο πάνω παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη συγχροτρονίου όπου κατά μήκος της τροχιάς των σωματιδίων υπάρχουν διάφοροι "σταθμοί" μέτρησης.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα στα σύγχροτρα κατά μήκος της κυκλικής τροχιάς υπάρχουν διάφορες κοιλότητες όπου ηλεκτρικό πεδίο βρίσκεται σε φάση τέτοια ώστε να προκαλεί την επιτάχυνση των ιόντων της δέσμης ενώ η κυκλική τροχιά εξασφαλίζεται από μια σειρά μαγνητικών διπόλων. Φυσικά, αν θέλουμε να πετύχουμε μεγάλες κινητικές ενέργειες θα πρέπει η διάμετρος της κυκλικής τροχιάς να είναι μεγάλη ώστε να έχουμε την μικρότερη δυνατή απώλεια ενέργειας από την ακτινοβολία συγχροτρονίου. Δηλαδή την ακτινοβολία που εκπέμπει κάθε επιταχυνόμενο φορτισμένο σωματίδιο ή κάθε

σωματίδιο που αλλάζει φορά κίνησης.

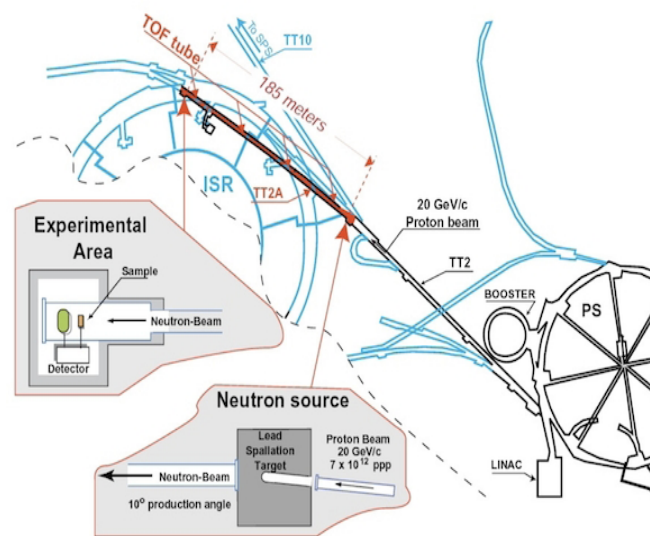


Σχήμα 6: Το σύμπλεγμα επιταχυντών του Ευρωπαϊκού Ιδρύματος Πυρηνικών Ερευνών (CERN). Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται πως ο ένας επιταχυντής τροφοδοτεί τον άλλο μέχρι τα πρωτόνια να διοχετευθούν τελικά στο LHC (Large Hadron Collider).

Σήμερα οι ισχυρότερες επιταχυντικές διατάξεις επιτυγχάνουν τεράστιες ενέργειες σωματιδίων, της τάξης των TeV. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις η επιτάχυνση των σωματιδίων επιτυγχάνεται με την χρήση πολλών ειδών επιταχυντών. Στο πιο πάνω σχήμα φαίνεται το σύμπλεγμα επιταχυντών στο CERN, οι οποίοι αποτελούν διαφορετικά στάδια προεπιτάχυνσης προς τον τελικό και μεγαλύτερο στον κόσμο επιταχυντή, το LHC (Large Hadron Collider). Το LHC ή στα ελληνικά ο μεγάλος επιταχυντής συγκρουόμενων δεσμών αδρονίων αυτή την στιγμή (Μάιος 2015) λειτουργεί στην ενέργεια των 6.5 TeV ενώ η μέγιστη δυνατή ενέργεια ανά δέσμη που πρόκειται να φτάσει είναι 7 TeV. Το LHC έχει περιφέρεια 27 km και εξυπηρετεί αρκετά πειράματα. Τα κυριότερα πειράματα στο LHC είναι: το CMS, το ATLAS, το ALICE και το LHCb.

Δέσμες νετρονίων

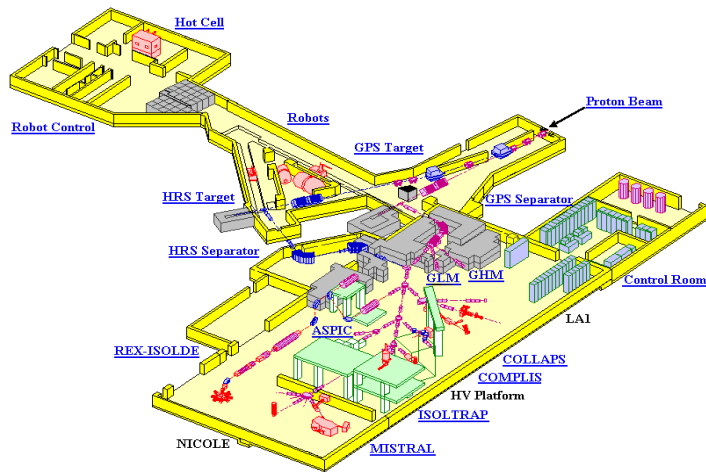
Κλείνοντας την συζήτηση στο πεδίο των επιταχυντών και των δεσμών σωματιδίων θα πρέπει να αναφερθούμε στις δέσμες νετρονίων. Τα νετρόνια όπως γνωρίζουμε δεν υπάρχουν ελεύθερα στην φύση ($T_{1/2} \sim 15 \text{ min}$). Επιπλέον λόγω του ότι δεν έχουν φορτίο, ο μόνος τρόπος να έχουμε δέσμες νετρονίων είναι με την χρήση αντιδράσεων όπου ένα από τα προϊόντα είναι το νετρόνιο. **Οι κυριότερες αντιδράσεις παραγωγής νετρονίων είναι: ${}^2\text{H}({}^2\text{H},n){}^3\text{He}$, ${}^3\text{H}({}^2\text{H},n){}^4\text{He}$, ${}^3\text{H}(\rho,n){}^3\text{He}$, ${}^7\text{Li}(\rho,n){}^7\text{Be}$, αντιδράσεις θρυμματισμού, αντιδράσεις πυρηνικής σχάσης, κτλ** Αυτή την στιγμή διάφορες εγκαταστάσεις στον κόσμο εξειδικεύονται στην φυσική νετρονίων με κορυφαίο παράδειγμα τις εγκαταστάσεις nTOF στο CERN όπου νετρόνια λευκού ενεργειακού φάσματος παράγονται μέσω αντιδράσεων θρυμματισμού. Ο χαρακτηρισμός της ενέργειας τους προκύπτει μέσω του χρόνου πτήσης των νετρονίων κατά μήκος μια διαδρομής 185m.



Σχήμα 7: Η πειραματική διάταξη nTOF στο CERN. Ο χαρακτηριστικός της ενέργειας των νετρονίων γίνεται από τον χρόνο πτήσης τους (TOF).

Ραδιενεργές δέσμες

Πέρα από τις δέσμες σταθερών σωματιδίων και τις δέσμες νετρονίων μια άλλη **σημαντική κατηγορία δεσμών είναι αυτή των δεσμών ραδιενεργών σωματιδίων**. Οι ραδιενεργές δέσμες καθιστούν δυνατή την μελέτη ασταθών πυρηνικών συστημάτων με εξαιρετικό ενδιαφέρον τόσο στην βασική έρευνα της πυρηνικής φυσικής όσο και σε διάφορες εφαρμογές στην αστροφυσική, την ιατρική, την φυσική στερεάς κατάστασης και αλλού. **Ο τομέας έρευνας στην περιοχή των ασταθών πυρηνικών συστημάτων μόλις ξεκίνησε την προηγούμενη δεκαετία και βρίσκεται ακόμα στην αρχή δεδομένου ότι σήμερα πιστεύουμε ότι υπάρχουν 6000 πυρήνες και από αυτούς μόνο 86 βρίσκονται στην κοιλάδα σταθερότητας** (και έχουν μερικώς μελετηθεί μέχρι σήμερα). Ασταθείς πυρήνες παράγονται μέσω αντιδράσεων και εν συνεχεία συλλέγονται-επιλέγονται με διαφορετικές τεχνικές προς τον σχηματισμό μιας καλά ορισμένης δέσμης σωματιδίων τόσο ως προς το είδος του σωματιδίου όσο και από την άποψη της ενέργειας. Στόχος των πειραματικών φυσικών είναι η μελέτη των εξωτικών αυτών πυρηνικών συστημάτων και των αντιδράσεων που συμμετέχουν. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η διάταξη ISOLDE στο CERN.



Σχήμα 8: Η διάταξη της δραστηριότητας ISOLDE στο CERN.

Παράδειγματα

1) Να υπολογιστεί η λαμπρότητα για τον επιταχυντή LHC αν θεωρήσουμε ότι η κάθε συγκρούμενη δέσμη σωματιδίων περιέχει $1.15 \cdot 10^{11}$ πρωτόνια. Επίσης θεωρήστε ότι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών συγκρούσεων είναι 25 ns. Η διατομή όπου εστιάζονται οι αντίθετα κινούμενες δέσμες είναι κυκλική με ακτίνα 16 μm .

$$L = \frac{N_1 N_2}{A} f$$

Το f είναι (1/25 ns). Επομένως η πιο πάνω σχέση γίνεται:

$$L = \frac{N^2}{A} f = \frac{(1.15 \cdot 10^{11})^2}{2\pi(16 \cdot 10^{-4})^2 \text{ cm}^2} (1/25 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}) = 3.3 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

2) Να υπολογιστεί η κινητική ενέργεια στο σύστημα κέντρου μάζας δύο συγκρουόμενων δεσμών πρωτονίων όταν η κάθε δέσμη έχει ενέργεια 50 GeV. Ποια θα πρέπει να είναι η ενέργεια δέσμης αν θέλουμε να πετύχουμε την ίδια διαθέσιμη ενέργεια στο σύστημα κέντρου μάζας για ένα πείραμα ακίνητου στόχου;

$$E_{CM} = 2 \cdot E_L = 2 \cdot 50 = 100 \text{ GeV}$$

Δεδομένου ότι η μάζα του πρωτονίου είναι περίπου ίση με 1 GeV έχουμε:

$$E_{CM} = (m_b^2 \cdot c^4 + m_t^2 \cdot c^4 + 2 \cdot m_t \cdot c^2 E_L)^{1/2}$$

$$E_{CM} = (1 + 1 + 2 \cdot 1 \cdot E_L)^{1/2} = 100$$

$$2 + 2 \cdot E_L = 10^4 \Rightarrow E_L \approx \frac{10^4}{2} = 500 \text{ GeV}$$