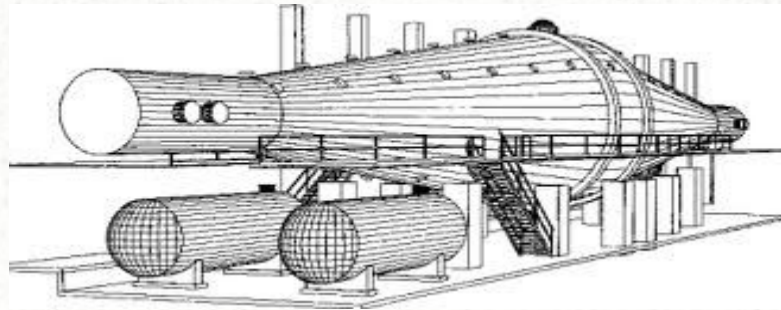




ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
Παράρτημα Χανίων
Τμήμα Ηλεκτρονικής

Ηλεκτροστατικοί Επιταχυντές Σωματιδίων



Μπουζιώτης Λέανδρος
Α.Μ. 3448

Περιεχόμενα

Επιταχυντές

- Ηλεκτροστατικοί
- Μεταβαλλόμενου πεδίου

Δομή ηλεκτροστατικών επιταχυντών

- Γεννήτρια υψηλού δυναμικού
- Πηγή ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων
- Σύστημα επιτάχυνσης σωματιδίων

Συνδεσμολογίες

- Tandem
- Tandem τριών σταδίων



Επιταχυντές σωματιδίων

Οι επιταχυντές σωματιδίων χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες σύμφωνα με την τάση την οποία χρησιμοποιούν για να επιταχύνουν τα σωματίδια.

- Αυτοί που χρησιμοποιούν συνεχή τάση ονομάζονται ηλεκτροστατικοί επιταχυντές (electrostatic accelerators)
- Ενώ αυτοί που χρησιμοποιούν εναλλασσόμενη τάση λέγονται επιταχυντές μεταβλητού πεδίου (oscillating field accelerators)

Οι πλέον διαδεδομένοι είναι οι ηλεκτροστατικοί επιταχυντές λόγω του χαμηλότερου κόστους κατασκευής έναντι των επιταχυντών μεταβλητού πεδίου, και του μικρού όγκου της συσκευής.

Οι επιταχυντές μεταβλητού πεδίου έχουν πολλές ονομασίες και κατηγορίες.

Μερικές από αυτές είναι:

- Cyclotron
- Betatron
- Synchrotron
- FFAG Accelerators

Εμείς θα εστιάσουμε, ευτυχώς, στους ηλεκτροστατικούς επιταχυντές !!!

Τι είναι οι ηλεκτροστατικοί επιταχυντές;

Ο ηλεκτροστατικός επιταχυντής είναι μια συσκευή που μας δίνει την δυνατότητα να επιταχύνουμε ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, με ένα ηλεκτρικό πεδίο που είναι σταθερό ή διαφοροποιείται ελάχιστα καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου επιτάχυνσης.

Από το σχέδιο του βασικού ηλεκτροστατικού επιταχυντή στα δεξιά, μπορούμε να διακρίνουμε τα βασικά μέρη τα οποία τον απαρτίζουν:

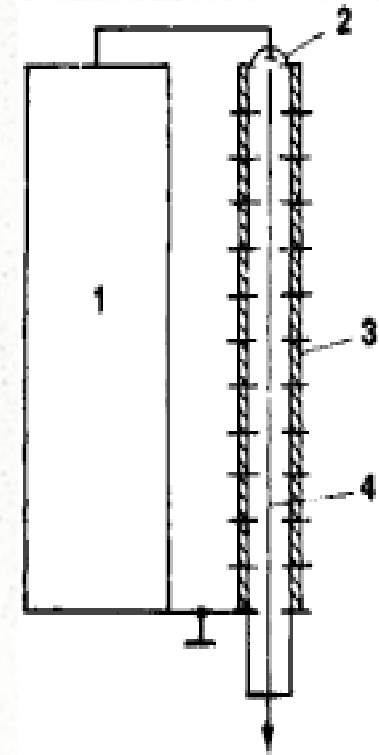
- 1) Γεννήτρια υψηλού δυναμικού (Van der Graaff, pelletron, Cascade)
- 2) Πηγή ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων
- 3) Σύστημα επιτάχυνσης σωματιδίων

Με τον αριθμό τέσσερα (4) απεικονίζεται η κατεύθυνση των επιταχυνόμενων σωματιδίων.

Φορτισμένα σωματίδια από την πηγή επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο με ενέργεια ίση με

$$E = n|e|V$$

Όπου: (e) είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο,
(n) είναι ο αριθμός των στοιχειωδών ηλεκτρικών φορτίων που απαρτίζουν το σωματίδιο, και
(V) είναι η τάση της γεννήτριας φουκουκλώματος



Εικόνα 1: Σχέδιο ηλεκτροστατικού επιταχυντή

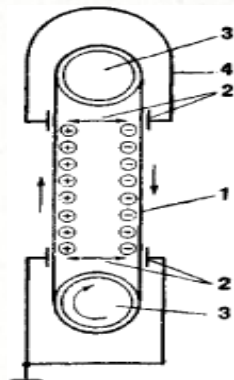
Γεννήτριες υψηλών δυναμικών

Στην πρώτη κατηγορία ηλεκτροστατικών γεννητριών ανήκουν οι γεννήτριες που βασίζουν την λειτουργία τους στην μεταφορά φορτίων δια μέσου ενός ιμάντα με μηχανικό τρόπο. Όπως είδαμε στην προηγούμενη παρουσίαση αυτές οι γεννήτριες ονομάζονται Van der Graaff.

Εκτός όμως της κοινής διάταξης με τον πλαστικό ιμάντα από την δεκαετία του 1960 και μετά εμφανίστηκαν κάποιες γεννήτριες που αντί του πλαστικού ιμάντα κάνανε χρήση ενός είδους αλυσίδας. Αυτή η αλυσίδα αποτελείτε από όμοια κομμάτια μετάλλου ,που χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια για την μεταφορά των φορτίων ενωμένα μεταξύ τους με το διηλεκτρικό υλικό. Οι επιταχυντές που χρησιμοποιούν αυτό το είδος γεννητριών ονομάζονται Pelletrons.

Σε σύγκριση με τους επιταχυντές Van der Graaff, αυτοί οι επιταχυντές μπορούν να δουλέψουν σε υψηλότερες ταχύτητες. Αυτό τους δίνει την δυνατότητα να παράξουν μεγαλύτερες διαφορές δυναμικού και ποσότητες ρεύματος. Επίσης λόγω κατασκευής έχουν καλύτερη απόδοση και μεγαλύτερο χρόνο λειτουργίας μεταξύ των επισκευών.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα ωστόσο είναι ότι λόγω της πιο ομοιόμορφης κατανομής των φορτίων, η τιμές των τάσεων και του ρεύματος είναι πολύ πιο σταθερές.



Εικόνα 2: Γεννήτρια Van de Graaff: (1) Ιμάντας φόρτισης, (2) συσκευή απόθεσης και απαγωγής φορτίων, (3) τροχοί κύλισης, (4) ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης της γεννήτριας

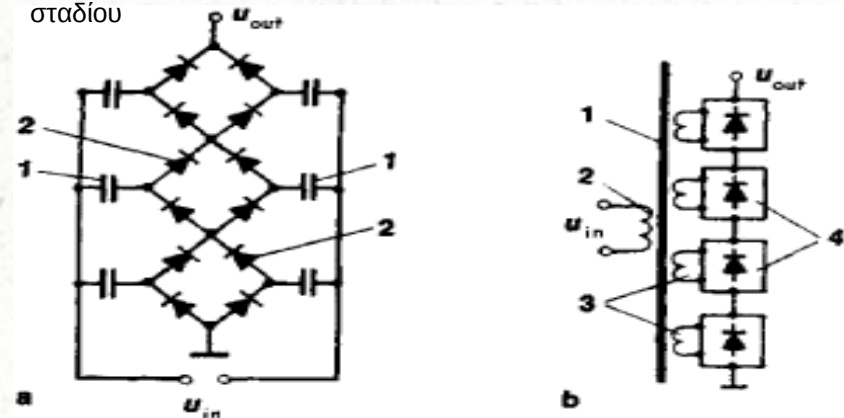
Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι γεννήτριες τύπου Cascade. Αυτές οι γεννήτριες παράγουν υψηλά συνεχόμενα (DC) ηλεκτρικά δυναμικά μέσω διαδοχικών μεταγωγών των συνεχών τάσεων που δημιουργούνται σε κάθε ξεχωριστό στάδιο του κυκλώματος.

Το μεγάλο ελάττωμα αυτών των διατάξεων είναι ότι το κάθε στάδιο πρέπει να είναι καλά μονωμένο από το κύκλωμα συνεχούς παροχής δυναμικού.

Από την διαφοροποίηση των μονωτικών διατάξεων γεννώνται δύο κατηγορίες:

a) Dynamitron: Χρησιμοποιεί πυκνωτές για την αποθήκευση της ενέργειας και διόδους για την απομόνωση του κάθε σταδίου

b) Inductive coupling: Χρησιμοποιεί τις ιδιότητες των μετασχηματιστών και χρησιμοποιεί πολλά ξεχωριστά τυλίγματα για την δημιουργία των ξεχωριστών σταδίων, διόδους για την απομόνωση κάθε σταδίου



Εικόνα 3: Σχέδια γεννήτριας Cascade με παράλληλα στάδια:

(U_{in}) Τάση εισόδου (U_{out}) τάση εξόδου

(a) Dynamitron: (1) πυκνωτές (2) διόδους

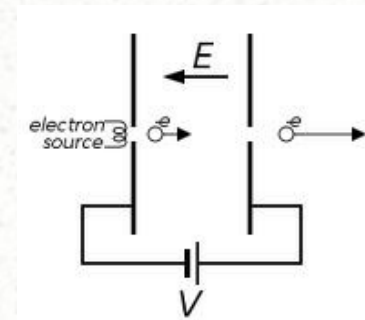
(b) Inductive coupling: (1) φερομαγνητικό πηνίο (2) πρωτεύων τυλίγμα (3) δευτερεύον τυλίγμα (4) διατάξεις φροντίδας

Πηγή ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων

Η πηγή των ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων είναι το κομμάτι του επιταχυντή στο οποίο δημιουργούνται τα σωματίδια τα οποία και θα επιταχύνουμε. Υπάρχουν αρκετοί τύποι πηγών. Οι πλέον διαδεδομένες πηγές σωματιδίων είναι:

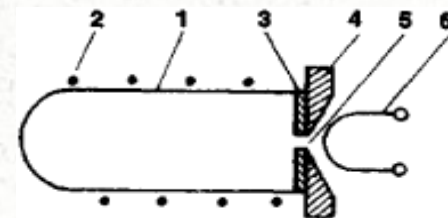
Η πηγές ηλεκτρονίων που συχνά καλούνται και κανόνια ηλεκτρονίων αποτελούνται από μία θερμαινόμενη κάθοδο (δημιουργία ηλεκτρονίων), και μία συστοιχία ηλεκτροδίων τα οποία διαμορφώνουν την δέσμη των ηλεκτρονίων. Η κάθοδος μπορεί να θερμαίνεται από το ρεύμα που την διαρρέει ή από μια ξεχωριστή διάταξη.

Βλέπουμε ότι η επιτάχυνση των ηλεκτρονίων έχει την αντίθετη διεύθυνση από το ηλεκτρικό πεδίο.



Εικόνα 4: Κανόνι Ηλεκτρονίων

Μία άλλη πηγή σωματιδίων είναι η πηγή ιόντων. Σε αυτόν τον τύπο πηγής τα φορτισμένα σωματίδια παράγονται μέσα σε έναν θάλαμο εκκένωσης (discharge chamber) στον οποίο περιέχονται σε αέρια μορφή άτομα του εκάστοτε στοιχείου. Ο ιονισμός των σωματιδίων συμβαίνει όταν θα υπάρξει μια ηλεκτρική εκκένωση, η οποία θα μπορούσε να είναι ένα υψίσυχνο βολταϊκό τόξο.



Εικόνα 5: Πηγή υψηλής συχνότητας:
(1) Θάλαμος εκκένωσης, (2) πλέγμα πεδίου απο την γεννήτρια, (3)μονωτικό, (4) Βάση, (5)Οπή διέλευσης ιόντων, (6) ηλεκτρόδιο συλλογής.

Το σχηματικό μιας υψίσυχνης πηγής ιόντων παρουσιάζεται στην εικόνα 5. Τα ιόντα που δημιουργούνται στο εσωτερικό του θαλάμου μεταφέρονται από το δυναμικό του ηλεκτροδίου συλλογής στο σύστημα επιτάχυνσης. Τα θετικά ιόντα (κατιόντα) συλλέγονται από την κεντρική περιοχή του θαλάμου, όπου και η συγκέντρωσή τους είναι μεγαλύτερη. Τα αρνητικά ιόντα (ανιόντα) συλλέγονται από την περιφέρεια του θαλάμου.

Σύστημα επιτάχυνσης σωματιδίων

Στούς περισσότερους επιταχυντές το σύστημα επιτάχυνσης είναι ένας κύλινδρος που αποτελείτε από δακτυλίους κατασκευασμένους από διηλεκτρικό υλικό χωρισμένους μεταξύ τους από μεταλλικά ηλεκτρόδια (Εικόνα 6). Τα ηλεκτρόδια έχουν μια τρύπα στην μέση από την οποία περνάει η δέσμη των φορτισμένων σωματιδίων, με συνέπεια τα σωματίδια που την αποτελούν να επιταχύνονται.

Επίσης μία ακόμη σημαντική λειτουργία του συστήματος επιτάχυνσης είναι η απορρόφηση των αερίων που δημιουργούνται από την πηγή (σε περίπτωση που χρησιμοποιείτε πηγή ιόντων) τα οποία απομακρύνονται διαμέσου της εσωτερικής δομής της διάταξης έτσι ώστε να διατηρηθούν οι συνθήκες που είναι απαραίτητες για την καλή λειτουργία του συστήματος.

Οι απαραίτητες αεροστεγείς ενώσεις μεταξύ των μεταλλικών ηλεκτροδίων και των κυλίνδρων μονωτικού υλικού γίνονται με διάφορες τεχνικές όπως, η χρήση ειδικευμένων συγκολλητικών ουσιών, η ηλεκτρική συγκόλληση, η θερμική κόλληση (thermodiffusion welding) και άλλες.

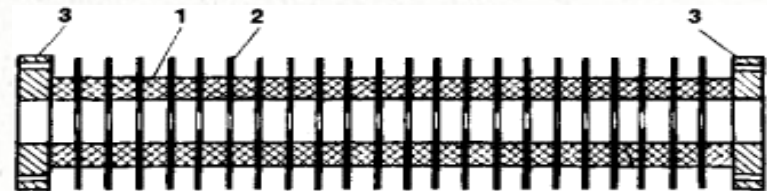
Καθώς το σύστημα επιτάχυνσης είναι από τα πλέον σημαντικά και με τον μεγαλύτερο συντελεστή στην ολική απόδοση του επιταχυντή, είναι λογικό πως η ποιότητα κατασκευής και τα χαρακτηριστικά του θα καθορίζουν την ολική συμπεριφορά του επιταχυντή.

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά για την απόδοση του συστήματος επιτάχυνσης είναι η διηλεκτρική αντοχή του διηλεκτρικού υλικού που τοποθετείτε ανάμεσα στα ηλεκτρόδια.

Σε περίπτωση που η διηλεκτρική αντοχή είναι ανεπαρκής, η ενέργεια που θα έχουν τα σωματίδια που θα επιταχυνθούν θα είναι περιορισμένη.

Διηλεκτρική αντοχή ενός μονωτικού ονομάζεται το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο που μπορεί να αντέξει το μονωτικό χωρίς να διαρραγεί, να χάσει δηλαδή τις μονωτικές του ιδιότητες.

- Είναι:
- Ευθέως ανάλογη με το πάχος του υλικού
 - Αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας λειτουργίας
 - Αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας λειτουργίας
 - Αντιστρόφως ανάλογη της υγρασίας



Εικόνα 6. Κύλινδρος επιτάχυνσης: (1) μονωτικοί δακτύλιοι, (2) μεταλλικά ηλεκτρόδια, (3) Σύνδεσμοι

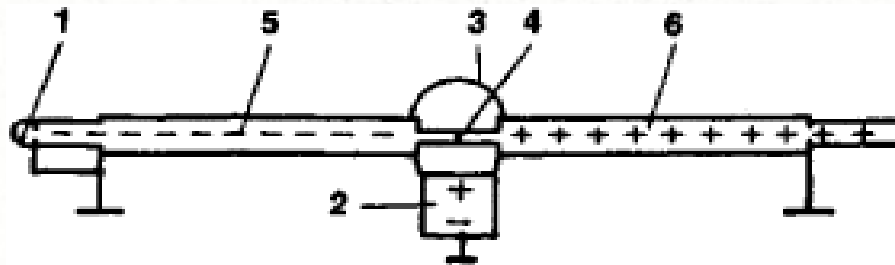
Επιταχυντής Tandem

Για να πετύχουμε μείωση στην απαιτούμενη διαφορά δυναμικού που θα παρέχει η γεννήτρια, άρα και στην ελάττωση των διαστάσεων του επιταχυντή, χρησιμοποιείται η τεχνική της αντιστροφής φορτίου κατά την διάρκεια της επιτάχυνσης.

Οι επιταχυντές αυτού του τύπου (εικόνα 7), ονομάζονται επιταχυντές Tandem.

Η λειτουργία αυτών των επιταχυντών αναλύεται σε τρία βήματα.

1. Αρνητικά φορτισμένα ιόντα από την πηγή (αριστερά) επιταχύνονται από το χαμηλό δυναμικό προς το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο της γεννήτριας.
2. Στο κέντρο του θετικού ηλεκτροδίου υπάρχει μια περιοχή ανταλλαγής φορτίων μεταξύ των ιόντων και του ηλεκτροδίου.
Αυτή η περιοχή ανταλλαγής φορτίων μπορεί να είναι, ένας σωλήνας που περιέχει κάποιο αέριο, ένας πίδακας ατμών ή ένα λεπτό στρώμα άνθρακα. Έτσι είναι δυνατό να γίνει απαγωγή των αρνητικών φορτίων χωρίς όμως να ανακοπή η κίνηση των ιόντων. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν έχουμε απώλειες στην ενέργεια των ιόντων.
3. Τα θετικά πλέον φορτισμένα ιόντα επιταχύνονται ξανά προς την δεξιά αρνητικά φορτισμένη πλευρά του συστήματος επιτάχυνσης, και εξέρχονται από τον επιταχυντή.



Εικόνα 7. Επιταχυντής Tandem:

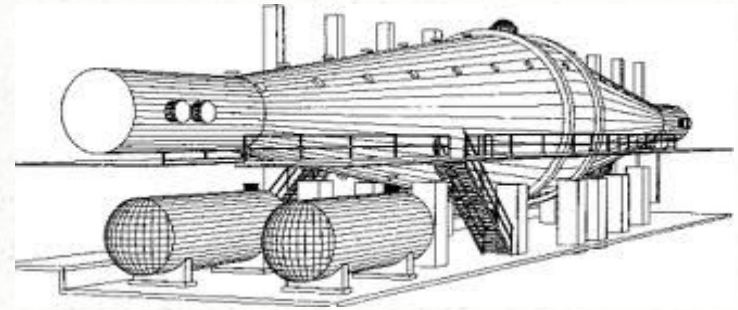
- (1) πηγή αρνητικών ιόντων,
- (2) γεννήτρια υψηλής τάσης,
- (3) ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης,
- (4) περιοχή ανταλλαγής φορτίων,
- (5) δέσμη αρνητικών ιόντων,
- (6) δέσμη θετικών ιόντων

Επιταχυντής Tandem τριών σταδίων:

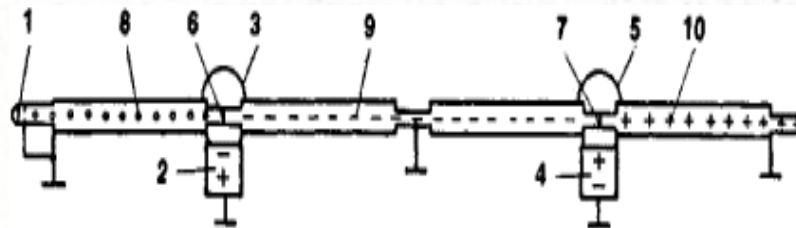
Για να καταφέρουμε να πάρουμε σωματίδια με υψηλότερες ενέργειες χρησιμοποιούμε διατάξεις που χρησιμοποιούν δύο επιταχυντές Tandem ενωμένους μεταξύ τους (Εικόνα 9). Η λειτουργία αυτού του τύπου επιταχυντών αναλύεται στα εξής βήματα.

- 1) Ουδέτερα σωματίδια χαμηλής ενέργειας εισέρχονται από την πηγή παραγωγής σωματιδίων. Επιταχύνονται μέχρι το ηλεκτρόδιο της πρώτης γεννήτριας, όπου και φορτίζονται αρνητικά.
- 2) Στην συνέχεια επιταχύνονται προς το ηλεκτρόδιο της δεύτερης γεννήτριας, όπου αλλάζουν ξανά το φορτίο τους σε θετικό.
- 3) Τέλος επιταχύνονται για μια τελευταία φορά προς την έξοδο του επιταχυντή.

Αυτή η συνδεσμολογία μας επιτρέπει να πάρουμε ιόντα που έχουν την τριπλή ενέργεια από ότι αν είχαμε έναν μόνο Tandem επιταχυντή.



Εικόνα 8: Σχέδιο των εγκαταστάσεων του Vivitron. Είναι ένας Tandem επιταχυντής των 25 MeV που ανήκει στο Ινστιτούτο Ires στο Στρασβούργο.



Εικόνα 9: Επιταχυντής Tandem τριών σταδίων:

- (1) Πηγή ουδέτερων σωματιδίων,
- (2) και (4) γεννήτριες υψηλής τάσεως πρώτου και δεύτερου επιταχυντή,
- (3) και (5) ηλεκτρόδια υψηλής τάσης,
- (6) περιοχή δημιουργίας ιόντων,
- (7) περιοχή ανταλλαγής φορτίου,
- (8) δέσμη ουδέτερων σωματιδίων,
- (9) δέσμη αρνητικών ιόντων,
- (10) δέσμη θετικών ιόντων

Σήμερα

Στις μέρες μας τα καλύτερα συστήματα επιτάχυνσης είναι αυτά που χρησιμοποιούν κεκλιμένα πεδία (sloped field) στους οποίους τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα με μία μικρή γωνία μεταξύ τους. Αυτή η κλίση αντιστρέφεται περιοδικά.

Τα σωματίδια που έχουν αποκτήσει αρκετή ενέργεια ταξιδεύουν κατά μήκος του καναλιού του κυλίνδρου χωρίς να ακουμπούν τα τοιχώματά του. Ενώ τα σωματίδια που δεν έχουν αρκετή ενέργεια “καθιστερούνται” από τα ηλεκτρόδια και τελικά απορροφούνται.

Η πρόοδος στον σχεδιασμό καινούριων γεννητριών υψηλής τάσης και συστημάτων επιτάχυνσης έχουν κάνει εφικτή την αύξηση της ενέργειας των πρωτονίων σε tandem επιταχυντές μέχρι και 40 MeV. Σε περίπτωση που έχουμε πολλαπλά φορτισμένα ιόντα, μπορούμε να φτάσουμε σε πολύ υψηλότερες ενέργειες.

Το ρεύμα της δέσμης που παράγεται σε αυτούς τους υψηλής τάσης επιταχυντές ιόντων κημένεται από λίγα μικροαμπέρ μέχρι μερικές δεκάδες μικροαμπέρ. Σε αυτούς τους επιταχυντές η διατομή της δέσμης στο σημείο του στόχου έχει διάμετρο λίγα χιλιοστά και η διαφορά φάσης είναι μικρότερη από $(10)^{-3}$ rad.

Άρα έχουμε μία πολύ καλά συγκεντρωμένη δέσμη, και όσο το δυνατό πιο μονοχρωματική.



Εικόνα 10: Εγκατάσταση επιταχυντή Tandem

Πηγές

<http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/High-Voltage+Accelerator>

<http://www.phy.ornl.gov/hribf/accelerator/tandemweb/index.html>

<http://ireswww.in2p3.fr/>

<http://www.phy.ornl.gov/hribf/accelerator/tandemweb/index.html>

<http://www.bnl.gov/bnlweb/facilities/TVdG.asp>

http://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_nuclear_accelerator