



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Ηλεκτρομαγνητική Μελέτη και Προσομοίωση
ενός Electron Beam Scanner για Μικρές Δέσμες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΟΡΦΕΑ ΑΝΤΩΝΙΟΥ

Επιβλέπων: Νικόλαος Κανταρτζής
Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2017

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Νικόλαο Κανταρτζή για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Dr. Adam Jeff, επιβλέποντα καθηγητή μου στο CERN, για την καθοδήγησή του και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την καθοδήγηση και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Η περίληψη θα συμπληρωθεί αργότερα. Αυτή είναι μια περίληψη άλλης εργασίας:

Ένα σύστημα ομότιμων κόμβων αποτελείται από ένα σύνολο αυτόνομων υπολογιστικών κόμβων στο Διαδίκτυο, οι οποίοι συνεργάζονται με σκοπό την ανταλλαγή δεδομένων. Στα συστήματα ομότιμων κόμβων που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα, η αναζήτηση πληροφορίας γίνεται με χρήση λέξεων κλειδιών. Η ανάγκη για πιο εκφραστικές λειτουργίες, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη του Σημασιολογικού Ιστού, οδήγησε στα συστήματα ομότιμων κόμβων βασισμένα σε σχήματα. Στα συστήματα αυτά κάθε κόμβος χρησιμοποιεί ένα σχήμα με βάση το οποίο οργανώνει τα τοπικά διαθέσιμα δεδομένα. Για να είναι δυνατή η αναζήτηση δεδομένων στα συστήματα αυτά υπάρχουν δύο τρόποι. Ο πρώτος είναι όλοι οι κόμβοι να χρησιμοποιούν το ίδιο σχήμα κάτι το οποίο δεν είναι ευέλικτο. Ο δεύτερος τρόπος δίνει την αυτονομία σε κάθε κόμβο να επιλέγει όποιο σχήμα θέλει και απαιτεί την ύπαρξη κανόνων αντιστοίχισης μεταξύ των σχημάτων για να μπορούν να αποτιμώνται οι ερωτήσεις. Αυτός ο τρόπος προσφέρει ευελιξία όμως δεν υποστηρίζει την αυτόματη δημιουργία και τη δυναμική ανανέωση των κανόνων, που είναι απαραίτητες για ένα σύστημα ομότιμων κόμβων.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος ομότιμων κόμβων βασισμένο σε σχήματα το οποίο (α) θα επιτρέπει μια σχετική ευελιξία στην χρήση των σχημάτων και (β) θα δίνει την δυνατότητα μετασχηματισμού ερωτήσεων χωρίς την ανάγκη διατύπωσης κανόνων αντιστοίχισης μεταξύ σχημάτων, ξρησιμοποιώντας κόμβους με σχήματα RDF που αποτελούν υποσύνολα-όψεις ενός βασικού σχήματος (καθολικό σχήμα).

Λέξεις Κλειδιά

Σύστημα ομότιμων κόμβων, Σύστημα ομότιμων κόμβων βασισμένο σε σχήματα, Σημασιολογικός Ιστός

Abstract

The Compact LInear Collider (CLIC) will use a novel acceleration scheme in which energy extracted from a very intense beam of relatively low-energy electrons (the Drive Beam) is used to accelerate a lower intensity Main Beam to very high energy. The high intensity of the Drive Beam, with pulses of more than 10^{15} electrons, poses a challenge for conventional profile measurements such as wire scanners. Thus, new non-invasive profile measurements are being investigated.

One candidate is the Electron Beam Scanner. A probe beam of low-energy electrons crosses the accelerator beam perpendicularly. The probe beam is deflected by the space-charge fields of the accelerator beam. By scanning the probe beam and measuring its deflection with respect to its initial position, the transverse profile of the accelerator beam can be reconstructed.

Analytical expressions for the deflection exist in the case of long bunches, where the charge distribution can be considered constant during the measurement. In this paper we consider the performance of an electron beam scanner in an accelerator where the bunch length is much smaller than the probe-beam scanning time. In particular, the case in which the bunch length is shorter than the time taken for a particle of the probe beam to cross the main beam is difficult to model analytically. We have developed a simulation framework allowing this situation to be modelled.

Keywords

Fill in

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	3
Abstract	5
Περιεχόμενα	8
1 Εισαγωγή	9
1.1 Κίνητρο	9
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής	9
1.3 Στόχοι της διπλωματικής	9
1.4 Μεθοδολογία	9
1.5 Διάρθρωση	9
2 Θεωρητικό υπόβαθρο	11
2.1 Υπόβαθρο	11
2.1.1 To CERN	11
2.1.2 Ο επιταχυντής CLIC	12
2.2 Ο Electron Beam Scanner	13
2.2.1 Εισαγωγή	13
2.2.2 Σχετική βιβλιογραφία	14
2.2.3 Θεωρητική ανάλυση του Electron Beam Scanner	17
3 Μέθοδοι προσομοίωσης	21
3.1 Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν	21
3.1.1 To CST Particle Studio	21
3.1.2 To MATLAB	22
3.2 Επιρροή μεταβλητών σε έναν Electron Beam Scanner	22
3.2.1 Μελέτη θεωρητικού μοντέλου με το MATLAB	23
3.2.2 Αποτελέσματα ανάλυσης με το CST	23
3.3 Εκτίμηση του προφίλ δέσμης στο CST	23
3.3.1 Δημιουργία Gaussian δέσμης στο CST	23

3.3.2 Τρόπος δημιουργίας Gaussian κατανομών σωματιδίων στο CST	26
3.3.3 Υπολογισμός του κατάλληλου συντελεστή κλιμακοποίησης για Gaussian δέσμη	28
3.4 Ανάλυση δεσμών στο MATLAB	29
3.4.1 Προσομοίωση του κύριου σωλήνα του επιταχυντή στο CST	31
3.4.2 Εξαγωγή των αποτελεσμάτων του CST	31
3.4.3 Μετατροπή των αποτελεσμάτων	34
3.4.4 Εισαγωγή των δεδομένων στο MATLAB	34
3.4.5 Υπολογισμός των τροχιών της δέσμης ανίχνευσης	34
4 Αποτελέσματα	37
4.1 Επίδραση παραμέτρων του επιταχυντή στην ανίχνευση της δέσμης	37
4.1.1 Αποτελέσματα ψεωρητικού μοντέλου	37
4.1.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης	39
4.1.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων	39
4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης της μεθόδου στο CST	39
4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης με χρήση CST και MATLAB	39
5 Επίλογος	41
5.1 Συμπεράσματα	41
5.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις	41
Βιβλιογραφία	42
Α' Μεταφράσεις Ξένων όρων	45
Β' Το μοντέλο στο CST Particle Studio	47
B'.1 Λίστα παραμέτρων	47
B'.2 Template Based Post Processing	50
B'.3 Μονάδες Μέτρησης (Units)	53
Κατάλογος Σχημάτων	55
Κατάλογος Πινάκων	57

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής

Σκοπός είναι να δούμε αν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον Electron Beam Scanner για να πάρουμε την εικόνα της δέσμη του CLIC.

1.3 Στόχοι της διπλωματικής

1.4 Μεθοδολογία

1.5 Διάρθρωση

Η εργασία αυτή είναι οργανωμένη σε πέντε κεφάλαια: Στο Κεφάλαιο 2 δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο των βασικών τεχνολογιών που σχετίζονται με τη διπλωματική αυτή. Αρχικά περιγράφονται ..., στη συνέχεια το ... και τέλος Στο Κεφάλαιο 3 αρχικά παρουσιάζεται ανάλυση και η σχεδίαση του συστήματος Τέλος στο Κεφάλαιο 5 δίνονται τα συμπεράσματα, η συνεισφορά αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και μελλοντικές επεκτάσεις.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Υπόβαθρο

2.1.1 To CERN

To CERN, διατηρώντας το ακρωνύμιο της αρχικής Γαλλικής ονομασίας του “Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire”, είναι το μεγαλύτερο σε έκταση πειραματικό κέντρο πυρηνικών ερευνών και ειδικότερα επί της σωματιδιωκής φυσικής στον κόσμο. Βρίσκεται δυτικά της Γενεύης, στα σύνορα Ελβετίας και Γαλλίας και ιδρύθηκε το 1954 από 12 ευρωπαϊκές χώρες. Σήμερα αριθμεί 20 κράτη-μέλη, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα, η οποία είναι και ιδρυτικό μέλος.



Σχήμα 2.1: Το λογότυπο του CERN

Η βασική λειτουργία του CERN είναι η παροχή επιταχυντών σωματιδίων και άλλων υποδομών απαραίτητων για την έρευνα στον τομέα της φυσικής υψηλών ενεργειών και ως αποτέλεσμα έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμα πειράματα στο CERN μέσω διεθνών συνεργασιών.

Επίσης, το CERN αποτελεί τη γενέτειρα του Παγκόσμιου Ιστού (World Wide Web). Στην κύρια τοποθεσία του στο Meyrin βρίσκεται μεγάλη εγκατάσταση ηλεκτρονικών υπολογιστών με ισχυρές υποδομές επεξεργασίας δεδομένων, κυρίως για την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων. Λόγω της ανάγκης να καταστούν αυτές διαθέσιμες σε εξωτερικούς ερευνητές, υπήρξε ιστορικά ένας σημαντικός κόμβος δικτύου ευρείας περιοχής (Wide Area Network).

Αρκετά σημαντικά επιτεύγματα στο πεδίο της φυσικής των σωματιδίων έγιναν μέσω πειραμάτων στο CERN. Αυτά περιλαμβάνουν:

- 1973: Ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων στο θάλαμο φυσαλίδων Gargamelle.
- 1983: Ανακάλυψη των μποζονίων W και Z στα πειράματα UA1 και UA2.
- 1995: Πρώτη δημιουργία ατόμων αντιυδρογόνου στο πείραμα PS210.
- 1999: Ανακάλυψη της άμεσης παραβίασης CP στο πείραμα NA48.
- 2010: Απομόνωση 38 ατόμων αντιυδρογόνου.
- 2011: Διατήρηση αντιυδρογόνου για πάνω από 15 λεπτά.
- 2012: Ένα μποζόνιο με μάζα περίπου $125 \text{ GeV}/c_0^2$ συνάδει με τον πολυπόθητο μποζόνιο Higgs.

2.1.2 Ο επιταχυντής CLIC

Ο CLIC — Compact Linear Collider — αποτελεί μια μελέτη για ένα μελλοντικό επιταχυντή που θα φτάσει σε πρωτοφανή επίπεδα ενέργειας ηλεκτρόνια και αντισωμάτια τους, ποζιτρόνια. Όταν θα έρχονται σε επαφή μέσω σύγχρουσης, θα αλληλοκαταστρέφονται, απελευθερώνοντας όλη τους την ενέργεια για την παραγωγή νέων σωματίδων.

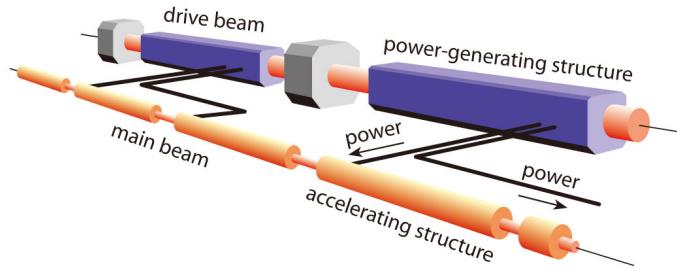
Τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια είναι θεμελιώδη σωματίδια και οι συγκρούσεις τους μπορούν να προσφέρουν εξαιρετικά λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τους νόμους της φύσης. Έτσι ο CLIC θα προσφέρει σημαντικές θεμελιώδεις γνώσεις φυσικής, πέρα από αυτές που είναι διαθέσιμες από το Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (Large Hadron Collider — LHC) ή από ένα γραμμικό επιταχυντή ηλεκτρονίων/ποζιτρονίων χαμηλότερης ενέργειας, λόγω του μοναδικού συνδυασμού πειραματικής ακρίβειας και υψηλής ενέργειας.

Σε αυτές τις υψηλές ενέργειες, τα ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια θα έχαναν ένα τεράστιο μέρος της ενέργειάς τους επιταχυνόμενα σε έναν κυκλικό επιταχυντή σαν τον LHC. Επομένως, τα σωματίδια πρέπει να επιταχυνθούν σε δύο γραμμικούς επιταχυντές που αντικρίζουν ο ένας τον άλλο έτσι, ώστε οι δέσμες να συγκρούονται στον κεντρικό ανιχνευτή. Αυτό συνεπάγεται ότι τα σωματίδια πρέπει να αποκτήσουν την ενέργειά τους από ένα και μόνο πέρασμα τους μέσα από τις κοιλότητες επιτάχυνσης.

Ο CLIC έχει σχεδιαστεί για να κατασκευαστεί σε στάδια αυξανόμενης ενέργειας για σύγχρουση: ξεκινώντας από 360 GeV , περίπου 1.4 TeV , και μέχρι την τελική ενέργεια των



Σχήμα 2.2: Το λογότυπο του CLIC

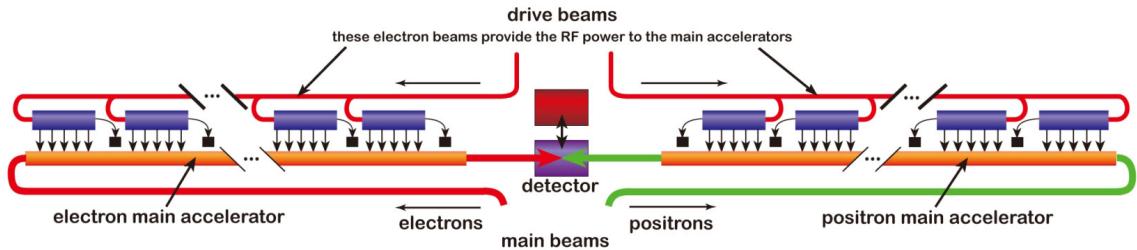


Σχήμα 2.3: Το σύστημα δύο δεσμών του CLIC

3 TeV. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η ενέργεια με ένα ρεαλιστικό και οικονομικά αποδοτικό τρόπο, η αύξηση της επιτάχυνσης πρέπει να είναι πολύ υψηλή. Ο CLIC αποσκοπεί σε επιτάχυνση των 100 MV/m, 20 φορές υψηλότερη από αυτή του LHC.

Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται μια καινοτόμα μέθοδος επιτάχυνσης, όπου εξάγεται ενέργεια από μια δέσμη πολύ μεγάλης έντασης που περιέχει σχετικά χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια (Δέσμη Οδηγός) και χρησιμοποιείται για την επιτάχυνση της χαμηλότερης σε ένταση Κύρια Δέσμης (Main Beam) σε πολύ μεγάλη ενέργεια.

Αυτή η Δέσμη Οδηγός (Drive Beam) επιβραδύνεται σε ειδικές Διατάξεις Εξαγωγής και Μεταφοράς Ισχύος — Power Extraction and Transfer Structures (PETS), και η παραγόμενη RF ισχύς μεταφέρεται στην κύρια δέσμη. Αυτό οδηγεί σε μια πολύ απλή διάταξη σήραγγας χωρίς ενεργά RF μέρη (δηλ. klystrons).



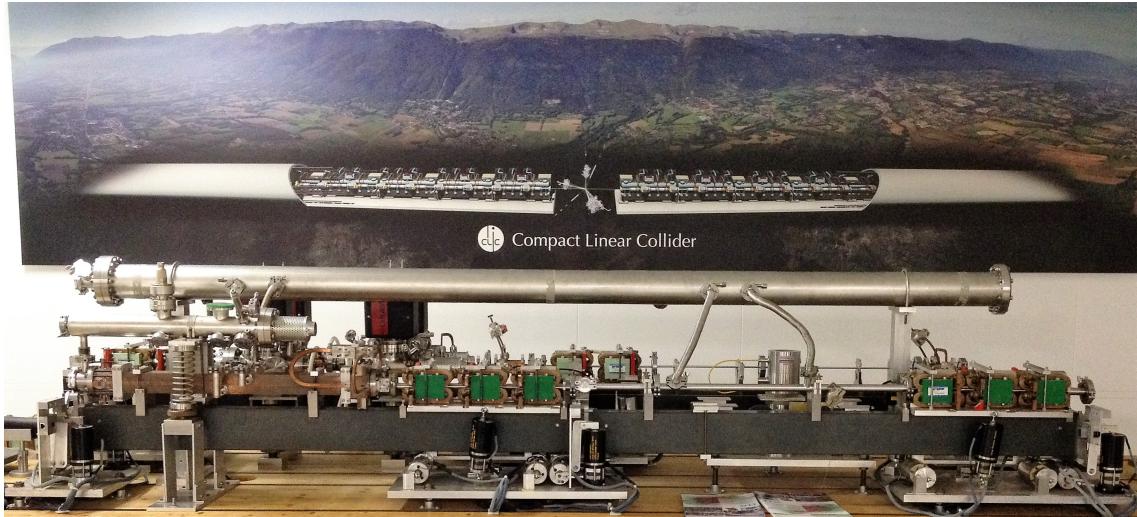
Σχήμα 2.4: Το σχεδιάγραμμα του CLIC

Ο CLIC είναι μία από τις επιλογές για έναν μελλοντική επιταχυντή κατασκευασμένο στο CERN. Η τελική απόφαση κατασκευής θα εξαρτηθεί από τα μελλοντικά αποτελέσματα του LHC.

2.2 Ο Electron Beam Scanner

2.2.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρεται και προηγουμένως, ο CLIC αποσκοπεί σε επιτάχυνση των 100 MV/m και χρησιμοποιεί την καινοτομία των δύο δεσμών για να πετύχει αυτό το στόχο. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο η Δέσμη Οδηγός (Drive Beam) να έχει πολύ μεγάλη ένταση, το οποίο καθιστά πρόκληση τη μέτρηση της χωρικής έντασης (προφίλ) της δέσμης αυτής. Επεμβατικές



Σχήμα 2.5: Η μακέτα του CLIC που βρίσκεται στο κτήριο δοκιμών CLIC Test Facility 3 (CTF3) του CERN

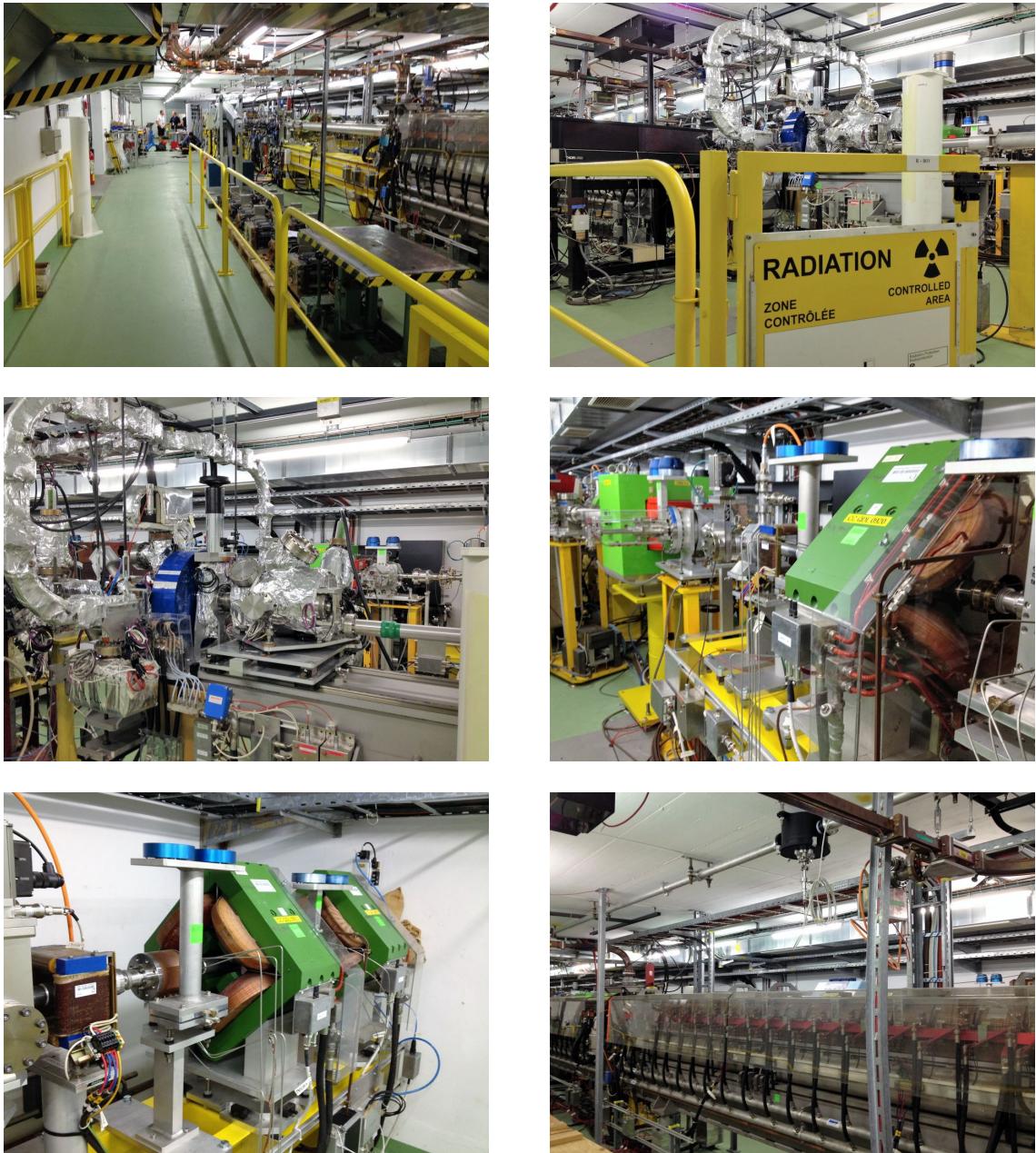
μέθοδοι, όπως για παράδειγμα το wire scanner, χρησιμοποιούνται ευρέως σε επιταχυντές. Όμως λόγω της έντασης της δέσμης θα καταστρέφονταν. Έτσι οδηγούμαστε στην αναζήτηση νέων μη επεμβατικών μεθόδων για την κάλυψη αυτού του κενού.

Μια μη επεμβατική μέθοδος που εξετάζεται είναι η μέθοδος του Electron Beam Scanner, όπου μια δέσμη ανίχνευσης (probe beam) στέλνεται κάθετα προς τη Δέσμη Οδηγό (Drive Beam). Ανιχνεύοντας τη δέσμη ανίχνευσης και μετρώντας την εκτροπή της σε σχέση με την αρχική της θέση, είναι εφικτός ο υπολογισμός του προφίλ της Δέσμης Οδηγού.

Ανιχνευτές Electron Beam Scanner έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σε άλλους επιταχυντές που έχουν συνεχείς και πολύ μακριές δέσμες, όπου η κατανομή του φορτίου θεωρείται σταθερή κατά τη μέτρηση. Η Δέσμη Οδηγός του CLIC θα έχει δέσμες μήκους μόλις 12 picoseconds. Αυτό δημιουργεί πρόσθετες προκλήσεις για τη λειτουργία του Electron Beam Scanner. Στην παρούσα εργασία θα εξετάσουμε τη λειτουργία ενός Electron Beam Scanner σε επιταχυντή μου το μήκος της δέσμης είναι σημαντικά μικρότερο από το χρόνο σάρωσης της δέσμης ανίχνευσης. Συγκεκριμένα, η περίπτωση όπου το μήκος της δέσμης είναι μικρότερο από το χρόνο που απαιτείται για ένα σωματίδιο της δέσμης ανίχνευσης να διασχίσει τη κύρια δέσμη είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί αναλυτικά. Δημιουργήθηκε για αυτό το σκοπό ένα περιβάλλον προσομοίωσης για να προσομοιωθεί αυτή η κατάσταση.

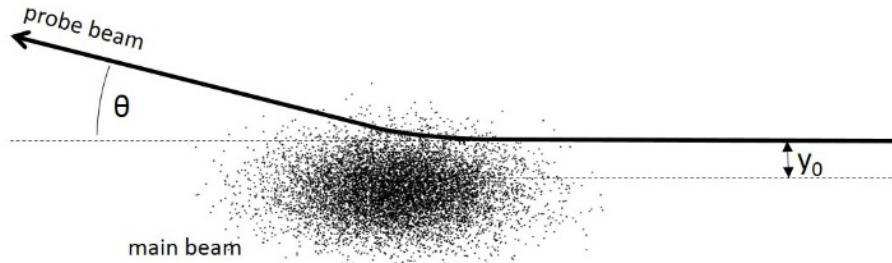
2.2.2 Σχετική βιβλιογραφία

Ακολουθώντας την αρχική έρευνα από τους Pasour και Ngo [12], ανιχνευτές Electron Beam Scanner έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την μέτρηση του εγκάρσιου προφίλ δέσμης σε διάφορους επιταχυντές, όπως τον δακτύλιο Spallation Neutron Source (SNS) στο Oak Ridge National Laboratory [2] [5] και τη δέσμη NTX στο Lawrence Berkeley National Laboratory [14]. Αυτοί οι επιταχυντές έχουν μεγάλο μήκος δέσμης εκατοντάδων nanoseconds. Έτσι, η εγκάρσια κατανομή φορτίου μπορεί να θεωρηθεί σταθερή κατά τη μέτρηση.



Σχήμα 2.6: Εικόνες από το CLIC Testing Facility 3 (CTF3), όπου γίνονται δοκιμές για το CLIC. Λόγω της φύσης των δοκιμών, το CTF3 θεωρείται “radiation controlled zone” και για την είσοδο κάποιου στο χώρο απαιτείται να έχει περάσει 7-ωρη εκπαίδευση (radiation training) και να φέρει ειδικό δοσίμετρο κατά την επίσκεψη

Ο Electron Beam Scanner δουλεύει μετρώντας την εκτροπή της δέσμης ανίχνευσης που αποτελείται από χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια, καθώς αυτά διαπερνούν κάθετα την κύρια δέσμη (Σχήμα 2.7). Για την απεικόνιση επιλέξαμε σε αυτή την εργασία ότι μετράμε το εγκάρσιο προφίλ, και ότι η δέσμη οδηγός ταξιδεύει οριζοντίως. Φυσικά, το προφίλ μπορεί να μετρηθεί σε κάθε άξονα στρέφοντας τη διάταξη.



Σχήμα 2.7: Εκτροπή δέσμης ανίχνευσης από την μετρούμενη δέσμη

Η γωνία απόκλισης θ της δέσμης οδηγού μετράται για διαφορετικές τιμές ύψους y_0 , και το προφίλ της κύριας δέσμης $\delta(y)$ είναι ανάλογο του διαφορικού [5]

$$\frac{d|\theta|}{dy_0} \propto \delta(y) \quad (2.1)$$

Η σταθερά αναλογίας εξαρτάται από την ενέργεια της δέσμης ανίχνευσης. Εδώ έχουν γίνει οι εξής απλοποιητικές υποθέσεις:

1. Η απόκλιση είναι μικρή
2. Η μεταβολή ενέργειας της δέσμης ανίχνευσης είναι αμελητέα
3. Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου της κύριας δέσμης είναι πολύ μικρότερη από αυτή του ηλεκτρικού πεδίου

Για να μετρηθεί η γωνία απόκλισης για διαφορετικά y_0 σε μία εικόνα, σαρώνεται διαγώνια η αρχική θέση της δέσμης οδηγού.

Ένας Electron Beam Scanner έχει επίσης χρησιμοποιηθεί στο Budker Institute for Nuclear Physics για τη μέτρηση πολύ κοντύτερων δεσμών στον επιταχυντή VEPP-5 [11], με μήκος δέσμης της τάξης μεγέθους του 1 ns. Σε αυτή την περίπτωση η εγκάρσια κατανομή φορτίου μεταβάλλεται κατά τη μέτρηση. Έτσι, όχι μόνο η απόκλιση της δέσμης στην κάθετη διεύθυνση δεν είναι σταθερή, αλλά υπάρχει και πρόσθιτη απόκλιση κατά μήκος του άξονα της δέσμης του επιταχυντή, λόγω του κατά μήκος διαφορικού του φορτίου.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, μια (μη σαρωμένη) δέσμη ανίχνευσης αποκλίνει έτσι, ώστε να το ίχνος να αφήνει μια έλλειψη στην οιλόνη κάθε φορά που περνά μια δέσμη. Ο λόγος των αξόνων της έλλειψης καθορίζεται από το μήκος της δέσμης και το φορτίο. Ολόκληρο το διαμήκες προφίλ μπορεί να υπολογιστεί μετρώντας την ένταση της δέσμης ανίχνευσης γύρω από την έλλειψη [10]. Μετρώντας έναν αριθμό έλλειψεων με διαφορετικές αρχικές θέσεις

δίνεται το εγκάρσιο προφίλ, παίρνοντας τη μέγιστη απόκλιση κάθε έλλειψης και εφαρμόζοντας τη σχέση 2.1. Έτσι μπορούμε να μετρήσουμε το διαμήκες και το εγκάρσιο προφίλ με μία μόνο συσκευή.

Στην παρούσα εργασία όμως εξετάσουμε τη λειτουργία ενός Electron Beam Scanner σε επιταχυντή μου το μήκος της δέσμης είναι σημαντικά μικρότερο από το χρόνο σάρωσης της δέσμης ανίχνευσης. Συγκεκριμένα, η περίπτωση όπου το μήκος της δέσμης είναι μικρότερο από το χρόνο που απαιτείται για ένα σωματίδιο της δέσμης ανίχνευσης να διασχίσει τη κύρια δέσμη είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί αναλυτικά. Η πλήρωση αυτής της συνθήκης εξαρτάται από διάφορους παράγοντας, όπως την ενέργεια της δέσμης ανίχνευσης και το μέγεθος της μετρούμενης δέσμης, αλλά μπορεί να ειπωθεί κατά προσέγγιση ότι εφαρμόζεται σε δέσμες με μήκος μικρότερο των 100 ps.

Ένα παραδειγμα τέτοιας δέσμης είναι ο προτεινόμενος επιταχυντής Compact Linear Collider (CLIC). Η δέσμη οδηγός του CLIC όμως επιταχύνει μια δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής έντασης έως τα 2.4 GeV [1]. Ο επιταχυντής της δέσμης οδηγού όμως είναι γραμμικός επιταχυντής των 1 GHz. Θα εισάγεται σε εναλλασσόμενα δοχεία, δίνοντας κενό μεταξύ των δεσμών (bunch spacing) 2 ns. Στο τέλος του γραμμικού επιταχυντή, όμως χρησιμοποιείται ένα σύστημα πολλαπλασιασμού συχνότητας [4] για να μειώσει το κενό μεταξύ των δεσμών στα 0.083 ns, πολλαπλασιάζοντας έτσι το ρεύμα κατά 24 και μειώνοντας το μήκος του παλμού κατά τον ίδιο συντελεστή. Έπειτα, η ενέργεια της δέσμης οδηγού όμως μεταφέρεται στην κύρια δέσμη με τη χρήση ειδικά σχεδιασμένων συζευγμένων κοιλοτήτων που επιτρέπουν την επιτάχυνση με ρυθμό που φτάνει πάνω από 100 MV/m [7].

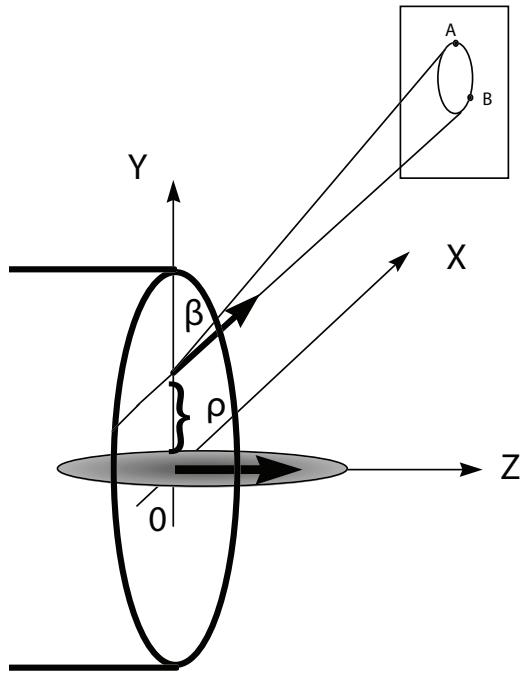
Bunch population	$5 \times 10^{10} e^-$
Transverse Emittance	100 nm rad
Bunch length / spacing	13 ps / 2 ns
Pulse length	140 μ s
Pulse Population	$3 \times 10^{15} e^-$
Repetition Frequency	50 Hz

Πίνακας 2.1: Σχετικές παράμετροι για την Δέσμη Οδηγό του επιταχυντή CLIC [1]

Το εγκάρσιο προφίλ της δέσμης όμως πρέπει να μετράται σε διάφορα σημεία κατά μήκος του γραμμικού επιταχυντή, και μη επεμβατικοί μετρητές προφίλ αναπτύσσονται για αυτό το σκοπό. Οι μετρητές πρέπει να έχουν ανάλυση 100 μ m ή καλύτερη, ώστε να μετράει το ελάχιστο μέγεθος ακτίνας κατά τη διάρκεια quad scans. Επεμβατικές μέθοδοι, όπως οι θόνες OTR (Optical Transition Radiation) μπορούν να εγκατασταθούν παράλληλα για βαθμονόμηση, αλλά για χρήση μόνο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας με μειωμένο μήκος παλμών.

2.2.3 Θεωρητική ανάλυση του Electron Beam Scanner

Η λεπτή δέσμη ανίχνευσης κινείται κατά τον άξονα X , είναι κάμπτη στην κίνηση της σχετικιστικής κίνησης της κύριας δέσμης (άξονας Z), με παράμετρο απόκλισης ρ (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8: Διαδικασία ανίχνευσης της χαρακτηριστικής έλλειψης της δέσμης

Τα αποτελέσματα της σάρωσης γίνονται monitor σε ουδόνη παράλληλη στο επίπεδο $Y - Z$ και σε απόσταση L από τον άξονα Z .

Έστω ότι το κέντρο της κύριας δέσμης βρίσκεται στην αρχή των αξόνων τη χρονική στιγμή $t = 0$, ενώ η δέσμη ανίχνευσης έχει ομοιόμορφη πυκνότητα κατά X και διάμετρο $d \ll \rho$. Εδώ υποθέτουμε ότι το ρ είναι μεγαλύτερο του τυπικού εγκάρσιου μεγέθους της κύριας δέσμης. Τη χρονική στιγμή $t = 0$ κάθε σωματίδιο της δέσμης ανίχνευσης αντιστοιχίζεται σε μια συγκεκριμένη θέση x . Η συνολική γωνία απόκλισης κατά Y για κάθε σωματίδιο υπό την επιρροή του ηλεκτρικού πεδίου της κύριας δέσμης μπορεί να εκφραστεί ως[10]:

$$\theta_y(x) = \frac{2\rho r_e}{\beta} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{n(z) dz}{\rho^2 + (x + \beta z)^2} \quad (2.2)$$

όπου:

- r_e : η κλασσική ακτίνα του ηλεκτρονίου,
- $\beta = \frac{v_t}{c}$: η σχετική ταχύτητα της δέσμης ανίχνευσης,
- c : η ταχύτητα του φωτός,
- x : η θέση σωματιδίου της δέσμης ανίχνευσης τη χρονική στιγμή $t = 0$,
- $n(z)$: η γραμμική πυκνότητα της κύριας δέσμης κατά τον άξονα Z .

Η έκφραση για τη γωνία απόκλισης του σωματιδίου κατά Z , λόγω του μαγνητικού πεδίου, μπορεί να γραφεί[10]:

$$\theta_z(x) = 2r_e \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x + \beta z)n(z) \ dz}{\rho^2 + (x + \beta z)^2} \quad (2.3)$$

Κεφάλαιο 3

Μέθοδοι προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η υλοποίηση του συστήματος, με βάση τη μελέτη που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά παρουσιάζεται η πλατφόρμα και τα προγραμματιστικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν.

3.1 Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν

Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα CST Particle Studio, της σουίτας προγραμμάτων προσομοίωσης CST Studio Suite. Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MATLAB. Τα προγράμματα παρουσιάζονται πιο αναλυτικά παρακάτω.

3.1.1 To CST Particle Studio



Σχήμα 3.1: Το λογότυπο του CST

Το CST PARTICLE STUDIO® (CST® PS) είναι ένα εξειδικευμένο εργαλείο για την γρήγορη και ακριβή ανάλυση δυναμικών φορτισμένων σωματιδίων σε τρισδιάστατα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Είναι ένα ισχυρό εργαλείο, κατάλληλο για μεγάλο φάσμα εργασιών, από σχεδιασμό magnetrons και ρύθμιση σωλήνων ηλεκτρονίων έως μοντελοποίηση πηγών σωματιδίων και εξαρτημάτων για επιταχυντές.

Ο particle-in-cell (PIC) solver, ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει στο πεδίο του χρόνου, μπορεί να εκτελέσει μια πλήρη προσομοίωση σωματιδίων και ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Για σχετικιστικές εφαρμογής, ο wakefield solver μπορεί να υπολογίσει πώς τα πεδία που δημιουργούνται από σωματίδια που κινούνται στην (ή κοντά στην) ταχύτητα του φωτός, αλληλεπιδρούν με τη δομή γύρω τους.

Το CST PS έχει ενσωματωμένα τα 3D EM modules του CST STUDIO SUITE[®], όπως τα CST EM STUDIO[®] electro- and magnetostatic solvers και το CST MICROWAVE STUDIO[®] eigenmode solver.

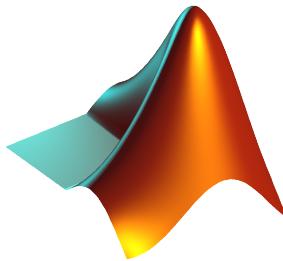
Είναι πλήρως ενσωματωμένα στο περιβάλλον σχεδίασης CST STUDIO SUITE, χρησιμοποιώντας έτσι τις δυνατότητες μοντελοποίησης και τα import interfaces.

Το CST PS βασίζεται στη γνώση, την έρευνα και την ανάπτυξη των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν στο πακέτο προσομοίωσης MAFIA-4. Ο PIC solver μπορεί επίσης να εκμεταλλευτεί δυνατότητες GPU computing, προσφέροντας σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση, σε συμβατό υλικό.

3.1.2 To MATLAB

Το MATLAB (matrix laboratory) είναι ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς. A proprietary programming language developed by MathWorks, MATLAB allows matrix manipulations, plotting of functions and data, implementation of algorithms, creation of user interfaces, and interfacing with programs written in other languages, including C, C++, C#, Java, Fortran and Python.

Although MATLAB is intended primarily for numerical computing, an optional toolbox uses the MuPAD symbolic engine, allowing access to symbolic computing abilities. An additional package, Simulink, adds graphical multi-domain simulation and model-based design for dynamic and embedded systems.



Σχήμα 3.2: Το λογότυπο του MATLAB

3.2 Επιρροή μεταβλητών σε έναν Electron Beam Scanner

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το πώς διάφορες μεταβλητές επηρεάζουν τα στοιχεία της χαρακτηριστικής έλλειψης που παρουσιάστηκαν. Συγκεκριμένα, θα διερευνήσουμε πώς επηρεάζουν τη χαρακτηριστική έλλειψη οι:

1. Ένταση της δέσμης ανίχνευσης
2. Μήκος της δέσμης ανίχνευσης
3. Αρχική θέση ριπής κατά Y (ρ)
4. Τάση της δέσμης ανίχνευσης

3.2.1 Μελέτη θεωρητικού μοντέλου με το MATLAB

Για τη διερεύνηση αυτή δημιουργήθηκε ένα script στο MATLAB, όπου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που παρουσιάστηκε στην υπο-ενότητα 2.2.3 και έγιναν οι μελέτες για το πώς επηρεάζει η κάθιση παράμετρος ξεχωριστά.

Για το σκοπό της ανάλυσης δημιουργήθηκε η συνάρτηση staticBeamDeflection.m, η οποία δέχεται ως ορίσματα τα μεγέθη της θέση x του σωματιδίου την $t = 0$, την αρχική θέση ρίψης ρ , τη σχετική ταχύτητα β της δέσμης ανίχνευσης, τη συνάρτηση γραμμικής πυκνότητας (z) και το μήκος σ της δέσμης, και δίνει ως έξοδο τις γωνίες απόκλισης θ_y και θ_z , σύμφωνα με τις εξισώσεις της υπο-ενότητας 2.2.3.

Η συνάρτηση αυτή παρουσιάζεται παρακάτω.

3.2.2 Αποτελέσματα ανάλυσης με το CST

Στη συνέχεια έγινε η ίδια ανάλυση στο περιβάλλον προσομοίωσης του CST για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Για να γίνει αυτό αρχικά δημιουργήθηκε το περιβάλλον προσομοίωσης, και σε αυτό μπήκαν οι δύο κύλινδροι, μέσα στους οποίους βρίσκονται οι 2 δέσμες, η κύρια δέσμη και η δέσμη ανίχνευσης (Σχήμα 3.3). Στη συνέχεια προστέθηκαν οι πηγές σωματιδίων ως κυκλικές πηγές, με την κύρια πηγή να έχει Gaussian προφίλ, ενώ η πηγή της δέσμης ανίχνευσης σταυθερό. Η πηγή σωματιδίων της κύριας δέσμης φαίνεται στο Σχήμα 3.4.

3.3 Εκτίμηση του προφίλ δέσμης στο CST

Στη συνέχεια ξεκίνησε το χτίσμα του CST model που θα υπολογίζει το ακριβές προφίλ της δέσμης, δηλαδή η πλήρης προσομοίωση ενός Electron Beam Scanner.

Όπως είδαμε και στην Εξίσωση 2.1, το προφίλ της δέσμης προκύπτει από την παραγώγιση της απόκλισης θ_y .

Στην περίπτωσή μας, ο υπολογισμός τους προφίλ γίνεται μέσα στο CST, στο στάδιο του post-processing.

Για την αναλυτική περιγραφή όλων των μεθόδων post processing στο CST μπορεί κανείς να ανατρέξει στην ενότητα B'.2 Template Based Post Processing του Παραρτήματος B'.

3.3.1 Δημιουργία Gaussian δέσμης στο CST

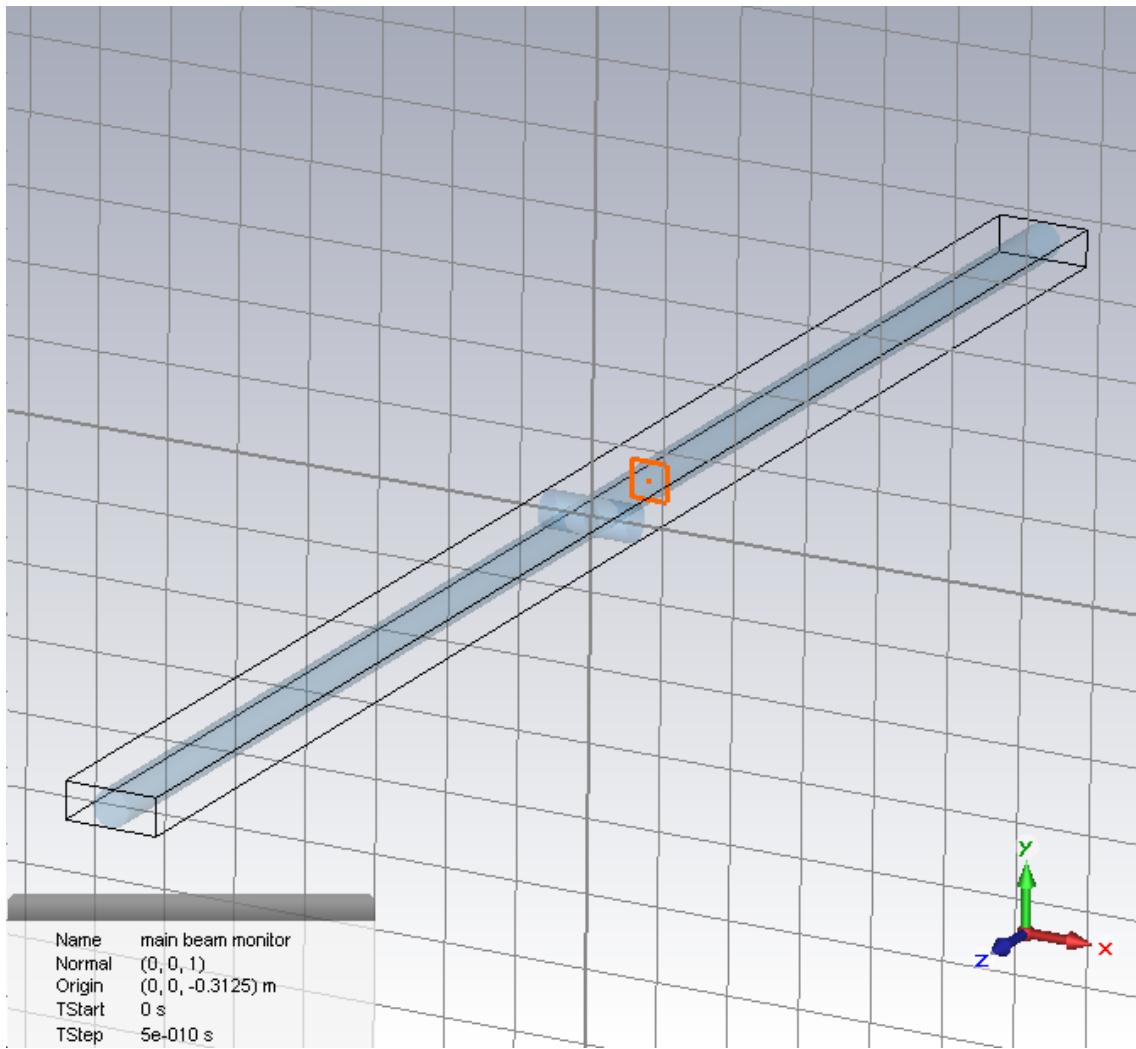
Για τον υπολογισμό του προφίλ μιας Gaussian δέσμης, συναντήσαμε το πρόβλημα ότι μετά τον υπολογισμό του προφίλ, το σχήμα δε φαινόταν να έχει αυτό που ήταν αναμενόμενο.

```

1 function [theta_y, theta_z] = staticBeamDeflection( ...
2     x, rho, beta, n, r_e, sigma)
3 %STATICBEAMDEFLECTION Calculates the deflection angle of the
4 % testing beam
5 % x:      position of the scanning beam, assuming the main beam is
6 %           centered at x = 0
7 % rho:    offset of the scanning beam in Y axis
8 % beta:   relative velocity of the testing beam, beta = v_t / c
9 % n(z):  function expressing the main beam linear density along
10 %        Z axis
11 % r_e:   electron radius
12 % sigma:bunch length
13
14     % compute theta Y
15     fun_y = @(z) n(z) ./ (rho .* rho + (x + beta .* z) .* ...
16                           (x + beta .* z));
17     %Integral_y = integral(fun_y, -Inf, Inf);
18     Integral_y = integral(fun_y, -3 * sigma, 3 * sigma);
19     theta_y = 2 * rho * r_e / beta * Integral_y;
20
21
22     % compute theta Z
23     fun_z = @(z) ((x + beta .* z) .* n(z)) ./ (... 
24                   rho .* rho + (x + beta .* z) .* (x + beta .* z));
25
26     %Integral_z = integral(fun_z, -Inf, Inf);
27     Integral_z = integral(fun_z, -3 * sigma, 3 * sigma);
28     theta_z = 2 * r_e * Integral_z;
29
30 end

```

Κώδικας 3.1: Η συνάρτηση υπολογισμού των γωνιών απόκλισης της δέσμης

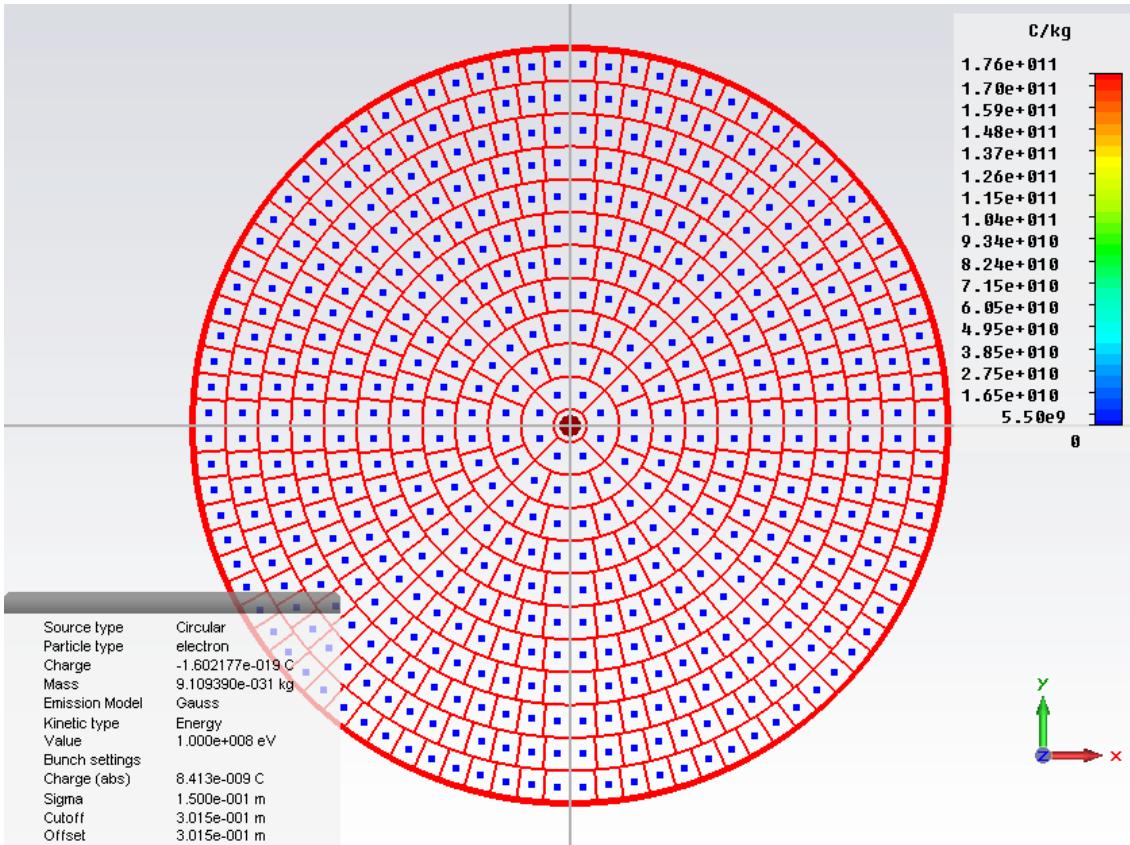


Σχήμα 3.3: Η διάταξη προσομοιωμένη στο CST. Στην κύρια δέσμη φαίνεται ανιχνευτής σωματιδίων λίγο πριν το σημείο που γίνεται η ανίχνευση

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, αρχικά ελέγχαμε αν το πρόβλημα βρίσκεται στον τρόπο δημιουργίας της δέσμης ή στον τρόπο ανίχνευσης. Έτσι:

1. Δημιουργήσαμε ένα νέο project και, αφού στήθηκε όλο το μοντέλο εκ νέου, μπήκε ένας particle monitor που ανιχνεύει τα σωματίδια της κύριας δέσμης
2. Έγινε εξαγωγή των δεδομένων αυτών της κύριας δέσμης
3. Τα δεδομένα αυτά εισήχθησαν στο MATLAB και δημιουργήθηκε το κατάλληλο script για την ανάλυσή τους

Από την παραπάνω διαδικασία έγινε σαφές ότι το πρόβλημα εντοπίζεται στον τρόπο που το CST δημιουργεί την κατανομή των σωματιδίων.



Σχήμα 3.4: Η πηγή της κύριας δέσμης στο CST

3.3.2 Τρόπος δημιουργίας Gaussian κατανομών σωματιδίων στο CST

Μετά από αναζήτηση και επικοινωνία με το ίδιο το support του CST, έγινε σαφής ο τρόπος που γίνεται η προσομοίωση των σωματιδίων για Gaussian χυκλικές πηγές σωματιδίων. Συγκεκριμένα, αρχικά, αφού το συνολικό ποσό φορτίου που εκπέμπεται δεν μεταβάλλεται ανάλογα με τη συνάρτηση κατανομής τίθεται ο περιορισμός ότι:

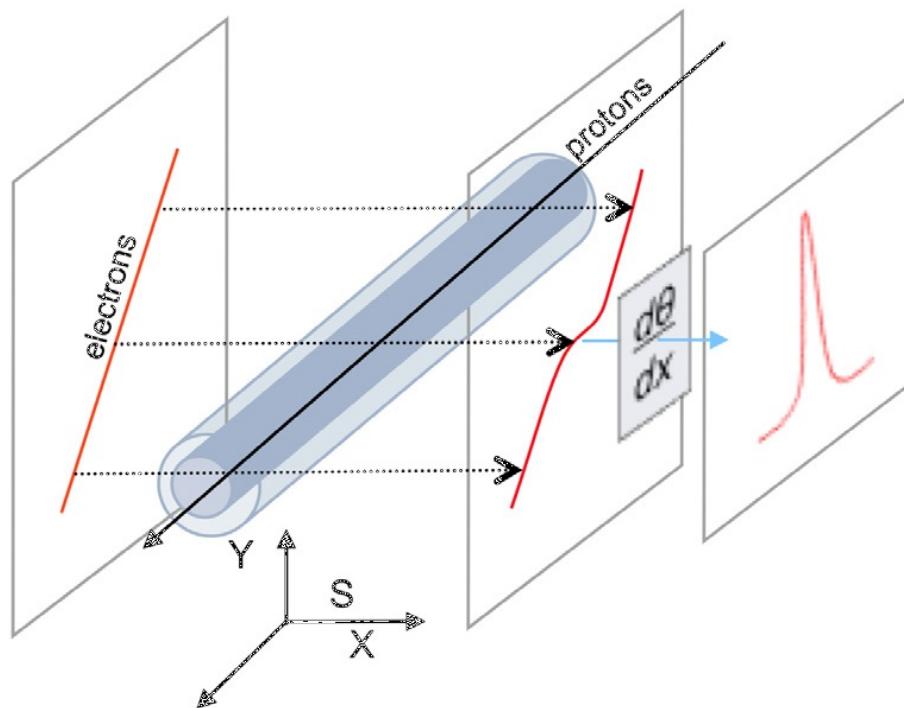
$$2\pi \int_{R_{in}}^{R_{out}} f(r) dr = \pi (R_{out}^2 - R_{in}^2) \quad (3.1)$$

όπου:

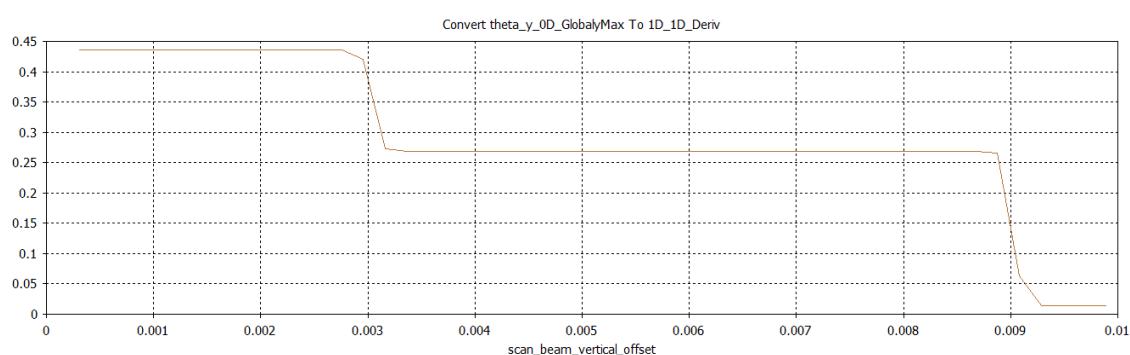
- R_{out} : η εξωτερική ακτίνα της χυκλικής πηγής σωματιδίων
- R_{in} : η εσωτερική ακτίνα της χυκλικής πηγής σωματιδίων (στην περίπτωσή μας $R_{in} = 0$)
- $f(r)$: η συνάρτηση ακτινικής κατανομής

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται για να κλιμακοποιήσει τη συνάρτηση κατανομής. Η λογική του τρόπου υπολογισμού αυτού είναι ότι η συνάρτηση κατανομής θα πρέπει να υπολογίζεται με τρόπο, ώστε ο συνολικός αριθμός του φορτίου που εκπέμπεται να είναι ανεξάρτητος από την ορισμένη κατανομή.

Αυτό σημαίνει ότι ο συντελεστής κατανομής c_{scale} υπολογίζεται αυτόματα.



Σχήμα 3.5: Υπολογισμός του προφίλ δέσμης με Electron Beam Scanner



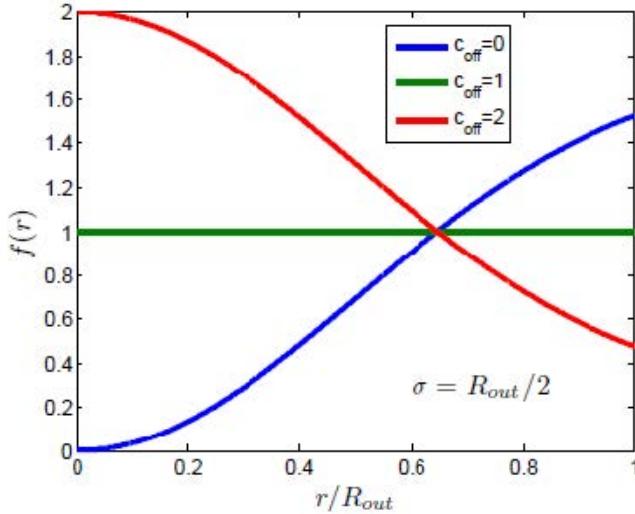
Σχήμα 3.6: Το αποτέλεσμα του υπολογισμού του προφίλ στο CST δε μοιάζει Gaussian

Στη συνέχεια, η Gaussian κατανομή δίνεται από τη σχέση:

$$f(r) = c_{off} + c_{scale} \left(\exp \left(-\frac{r^2}{2\sigma^2} \right) - 1 \right) \quad (3.2)$$

όπου:

- c_{off} : η τιμή της συνάρτησης για $r = 0$
- σ : η τυπική απόκλιση



Σχήμα 3.7: Παράδειγμα Gaussian συνάρτησης για διάφορες τιμές του συντελεστή c_{off}

Για να έχουμε μια πραγματικά Gaussian δέσμη, θέλουμε να ισχύει

$$c_{off} = 0$$

Αφού οι υπόλοιπες μεταβλητές είναι καθορισμένες από τις απαιτήσεις του επιταχυντή, απομένει να βρεθεί η τιμή του c_{scale} που θα μας δίνει τη ζητούμενη συνθήκη.

3.3.3 Υπολογισμός του κατάλληλου συντελεστή κλιμακοποίησης για Gaussian δέσμη

Ο τρόπος που υπολογίζει το CST την Gaussian κατανομή, όπως είδαμε παραπάνω είναι

$$\begin{aligned} f(r) &= c_{off} + c_{scale} \left(\exp \left(-\frac{r^2}{2\sigma^2} \right) - 1 \right) \\ &= (c_{off} - c_{scale}) + c_{scale} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Η πραγματική κατανομή της δέσμης στον επιταχυντή που μελετούμε όμως, έχει γενική μορφή κατανομής:

$$f(r) = ae^{-\frac{(r-b)^2}{2c^2}} \quad (3.4)$$

Επομένως, εξισώνοντας τις παραπάνω σχέσεις 3.3 και 3.4 και δεδομένου ότι πρέπει να ισχύουν $\forall r$ προκύπτουν τα συμπεράσματα ότι:

$$\begin{aligned} a &\equiv c_{scale} \\ b &\equiv 0 \\ c &\equiv \sigma \\ c_{off} &= c_{scale} \end{aligned} \tag{3.5}$$

Επομένως, πρέπει να βρεθεί ο κατάλληλος συνδιασμός τιμών (c_{off}, c_{scale}) που να πληροί τον περιορισμό της εξίσωσης 3.1, δεδομένων των τιμών των μεταβλητών σ, R_{out} και R_{in} του επιταχυντή μας.

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος δημιουργήθηκε κατάλληλο script στο MATLAB.

Αρχικά δημιουργήθηκε η συνάρτηση `cscale = calculateCscale(sigma, coff, Rout, Rin)` η οποία δέχεται ως ορίσματα τις μεταβλητές σ, c_{off}, R_{out} και R_{in} και δίνει στην έξοδό του την τιμή του c_{scale} που πληροί την εξίσωση 3.1.

Στη συνέχεια, τρέχοντας το script `findOptimumCoff.m` δίνουμε τις τιμές των παραμέτρων του προβλήματος μας στα $\sigma, c_{off}, R_{out}, R_{in}$ και βρίσκουμε την τιμή του c_{off} που επαληθεύει τη σχέση $c_{off} = c_{scale}(\sigma, c_{off}, R_{out}, R_{in})$.

Εν τέλει, για τις τιμές του δικού μας προβλήματος, δίνουμε ως είσοδο $(\sigma, R_{out}, R_{in}) = (0.01/4, 0.01, 0)$ και προκύπτει ότι:

$$c_{off} \approx 8.002684 \tag{3.6}$$

3.4 Ανάλυση δεσμών στο MATLAB

Με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ταχύτητας προσομοίωσης, ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση παλμών (pulses, πολλαπλών δεσμών) και τρένων (trains, πολλαπλών παλμών) σωματιδίων, η διαδικασία προσομοίωσης επεκτάθηκε και στην ενεργή χρήση του MATLAB. Η διαδικασία προσομοίωσης σε αυτή την περίπτωση παίρνει τη μορφή:

1. Ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση του κύριου σωλήνα του επιταχυντή στο CST, που περιλαμβάνει την κύρια δέσμη, όσες φορές είναι επιθυμητό
2. Εξαγωγή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από το CST σε μορφή αρχείου ASCII
3. Μετατροπή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε μορφή αρχείου MATLAB formatted data (.mat) για βελτιστοποίηση στο χώρο αποθήκευσης και χρόνο προσπέλασης
4. Εισαγωγή των δεδομένων στο MATLAB
5. Υπολογισμός των τροχιών σωματιδίων της δέσμης ανίχνευσης μέσα από το MATLAB στο προσομοιωμένο μαγνητικό πεδίο εισήχθη

```

1 function cscale = calculateCscale( sigma, coff, Rout, Rin)
2 %CALCULATECSCALE Calculates the scaling factor cscale for a CST
3 %circular particle source with gaussian radial pendency
4     % create symbolic variables
5     syms r;
6     syms cscales;
7
8     % define radial function
9     f = @(r) coff + cscales * ( exp( (-r .^ 2) / ...
10                                ( 2 * sigma ^ 2 ) ) - 1 );
11
12     % calculate indefinite integral
13     I = @(r) int( f(r) * r, r );
14
15     % calculate definite integral
16     Idef = subs(I, r, Rout) - subs(I, r, Rin);
17
18     % solve equation
19     % FSOLVE requires all values returned by functions to be
20     % of data type double.
21     cscale = double( solve( Idef - 0.5 * ...
22                           ( Rout ^ 2 - Rin ^ 2 ), cscales ) );
23 end

```

Κώδικας 3.2: Η συνάρτηση υπολογισμού του c_{scale}

```

1 sigma = 0.01 / 4;
2 Rout = 0.01;
3 Rin = 0;
4
5 syms coff;
6
7 % find coff such as coff = cscale(coff)
8 fsolve(@(coff) calculateCscale(sigma, coff, Rout, Rin) - coff);

```

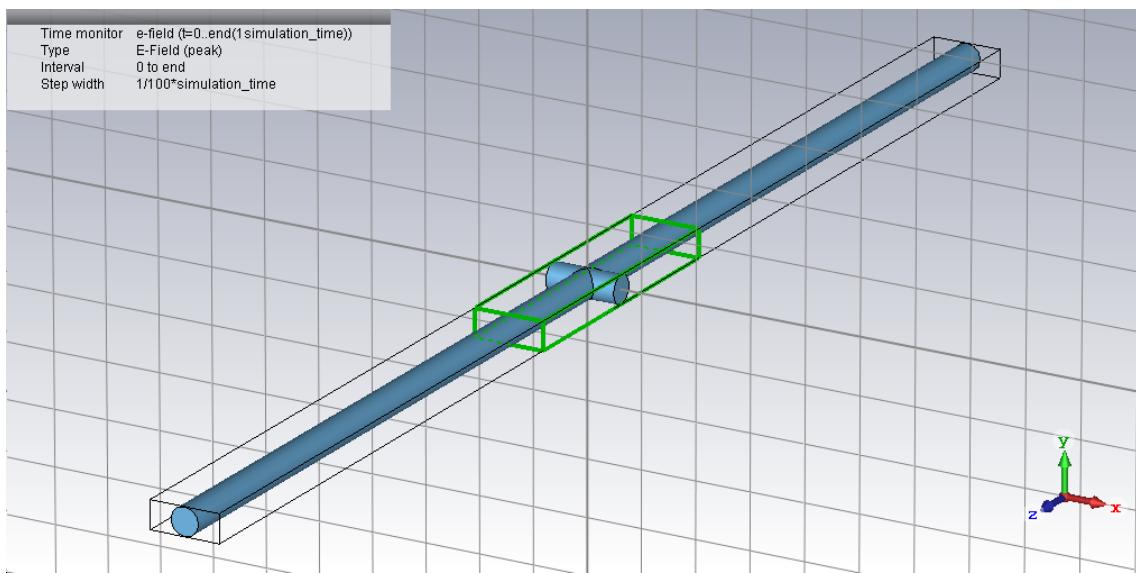
Κώδικας 3.3: To script υπολογισμού του κατάλληλου για τα δεδομένα μας c_{off}

3.4.1 Προσομοίωση του κύριου σωλήνα του επιταχυντή στο CST

Για την προσομοίωση του κύριου σωλήνα δημιουργήθηκε ένα project στο CST. Το project αυτό περιέχει τη γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε και στο project με τις δύο δέσμες, δηλαδή δύο κάθετοι σωλήνες ίδιας διαμέτρου που περιλαμβάνουν κενό, μέσα σε χώρο τέλειου αγωγού (PEC). Αυτή τη φορά έχουμε μόνο ένα Particle Source, την κύρια δέσμη, που εκπέμπει σωματίδια με Gaussian emission model.

Γύρω από το χώρο διαστάσης των σωλήνων της κύριας δέσμης και της δέσμης ανίχνευσης έχει τοποθετηθεί ένας E-field monitor, που αποθηκεύει τις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης. Οι τιμές αυτές είναι αυτές που θα εξαχθούν για να χρησιμοποιηθούν στα επόμενα βήματα.

Η διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: Η διάταξη προσομοίωσης του κύριου σωλήνα στο CST. Με πράσινο χρώμα φαίνεται ο E-field monitor

3.4.2 Εξαγωγή των αποτελεσμάτων του CST

Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης, τα αποτελέσματα εξάγονται από το πρόγραμμα, επιλέγοντας τα αποτελέσματα στο φάκελο e-field, μέσα στα 2D/3D Results και κάνοντας export από την καρτέλα Post Processing στη μορφή ASCII.

Έτσι, τα αποτελέσματα εξάγονται σε μορφή .txt, που έχει 9 στήλες: 3 στήλες για τη θέση κάθε σωματιδίου (συντεταγμένες x , y και z) και 6 για τις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου στη θέση αυτή ($\text{Re}(E_x)$, $\text{Re}(E_y)$, $\text{Re}(E_z)$, $\text{Im}(E_x)$, $\text{Im}(E_y)$, $\text{Im}(E_z)$). Τα αποτελέσματα απεικονίζουν όλες τις παραπάνω τιμές ξεκινώντας από το πρώτο sample και συνεχίζοντας μέχρι το τελευταίο.

```

1 function Field = importField(filename)
2 %IMPORTFIELD Imports data created by ASCII export of the field
3 % in CST to a .mat file
4
5 % preprocess file for preallocation
6
7 % open file
8 fid = fopen(filename,'r');
9 while(~feof(fid))
10     % read line and convert it to array
11     line = fgetl(fid);
12     lineArray = str2num(line);
13
14     if (length(lineArray) > 1)
15         % if we have data save it
16         Field(currentSample, currentDataPoint, :) = ...
17             lineArray(1:6);
18         currentDataPoint = currentDataPoint + 1;
19     else
20         % if not prepare for the next sample
21         currentSample = currentSample + 1;
22         currentDataPoint = 1;
23     end
24 end
25
26 fclose(fid);
27 end

```

Κώδικας 3.4: Μέρος της συνάρτησης importField.m

```

1 function FieldCell = convertFieldDataToCell(Field)
2 %CONVERTFIELDATAOCCELL Converts the input file which is in
3 % the CST format into a cell array with mesh format.
4 % The format of the input file is timeslotsXpositionsXvalues.
5 % This is not usable to do any interpolation. This function
6 % converts it to a cell array where each cell contains the
7 % data for each timestep in mesh format.
8 % Output format: FieldCell{timestep, coordinate},
9 % where coordinate is 1: x, 2:y, 3:z, 4:Ex, 5:Ey, 6:Ez
10
11
12
13
14
15
16
17     for currTime = 1:timeslots
18         % take values from input
19         xs = Field(currTime, :, 1);
20         ys = Field(currTime, :, 2);
21         zs = Field(currTime, :, 3);
22         exs = Field(currTime, :, 4);
23         eys = Field(currTime, :, 5);
24         ezs = Field(currTime, :, 6);
25
26         % calculate number of x, y and z points
27         dim1 = length(unique(xs));
28         dim2 = length(unique(ys));
29         dim3 = length(unique(zs));
30
31         % from 1d array to 3d mesh-like matrix
32         Xtemp = reshape(xs, [dim1, dim2, dim3]);
33         Ytemp = reshape(ys, [dim1, dim2, dim3]);
34         Ztemp = reshape(zs, [dim1, dim2, dim3]);
35         ExTemp = reshape(exs, [dim1, dim2, dim3]);
36         EyTemp = reshape(eys, [dim1, dim2, dim3]);
37         EzTemp = reshape(ezs, [dim1, dim2, dim3]);
38
39         % store data to the cell
40         FieldCell{currTime, 1} = X;
41         FieldCell{currTime, 2} = Y;
42         FieldCell{currTime, 3} = Z;
43         FieldCell{currTime, 4} = Ex;
44         FieldCell{currTime, 5} = Ey;
45         FieldCell{currTime, 6} = Ez;
46
47     end
48
49
50 end

```

Κώδικας 3.5: Μέρος της συνάρτησης convertFieldDataToCell.m

3.4.3 Μετατροπή των αποτελεσμάτων**3.4.4 Εισαγωγή των δεδομένων στο MATLAB****3.4.5 Υπολογισμός των τροχιών της δέσμης ανίχνευσης**

To script που εκτελεί τον υπολογισμό της τροχιάς

```

1 function [pos_new, v_new, t_new] = calcNextPosition(...
2     pos_old, v_old, t_old, E_field, timeUnit, finalTime)
3 %CALCNEXTPOSITION Calculates the position and velocity of a
4 %particle moving inside a magnetic field
5
6     % update position:  $x_1 = x_0 + v_{x0}t$ 
7     pos_new = pos_old + v_old .* timeUnit;
8
9     % constants
10    m_e = 9.1093829140e-31; % kilograms
11    q_e = -1.60217656535e-19; % coulomb
12    const1 = q_e * timeUnit / m_e;
13
14    % update field
15    % TODO make it work for different time (interpolate
16    % linearly between the two calculated timesteps)
17    t_new = t_old + timeUnit;
18
19    if (t_new <= finalTime)
20        E_new = calcField(pos_new, E_field, t_new, ...
21                           timeUnit);
22
23        % update velocity  $v_1 = v_0 + E_1 \cdot const1$ 
24        v_new = v_old + E_new .* const1;
25    else
26        %we are out of data
27        v_new = NaN(1,3);
28    end
29 end

```

Κώδικας 3.6: Η συνάρτηση calcNextPosition.m

```

1 function E_new = calcField(pos, Field, t, timeUnit)
2 %CALCFIELD Calculates the field in the position pos from the
3 % data in Field. If the position is not in the datapoints
4 % it uses cubic interpolation to calculate the field
5 %TEST: calcField([0.0250, 0.0250, 0.2200], Field, 50, 1) =
6 % [-7.3163e+03, -7.2088e+03, 0.1743e+03]
7
8     sampleNo = round(t/timeUnit);
9     % round because it sometimes gives result as double
10
11    Xq = pos(1);
12    Yq = pos(2);
13    Zq = pos(3);
14
15    X = Field{sampleNo, 1};
16    Y = Field{sampleNo, 2};
17    Z = Field{sampleNo, 3};
18    Ex = Field{sampleNo, 4};
19    Ey = Field{sampleNo, 5};
20    Ez = Field{sampleNo, 6};
21
22    Exq = interp3(X, Y, Z, Ex, Xq, Yq, Zq, 'linear');
23    Eyq = interp3(X, Y, Z, Ey, Xq, Yq, Zq, 'linear');
24    Ezq = interp3(X, Y, Z, Ez, Xq, Yq, Zq, 'linear');
25
26    E_new = [Exq, Eyq, Ezq];
27 end

```

Κώδικας 3.7: Η συνάρτηση calcField.m

```

1 function yq = lininterp1(x0, x1, y0, y1, xq)
2 %LININTERP1 Interpolates linearly between two points
3 % Interpolates linearly between y0 and y1 according to the
4 % position of xq in the range x0-xq
5
6     yq = (y1 - y0) / (x1 - x0) * xq;
7
8 end

```

Κώδικας 3.8: Η συνάρτηση lininterp1.m

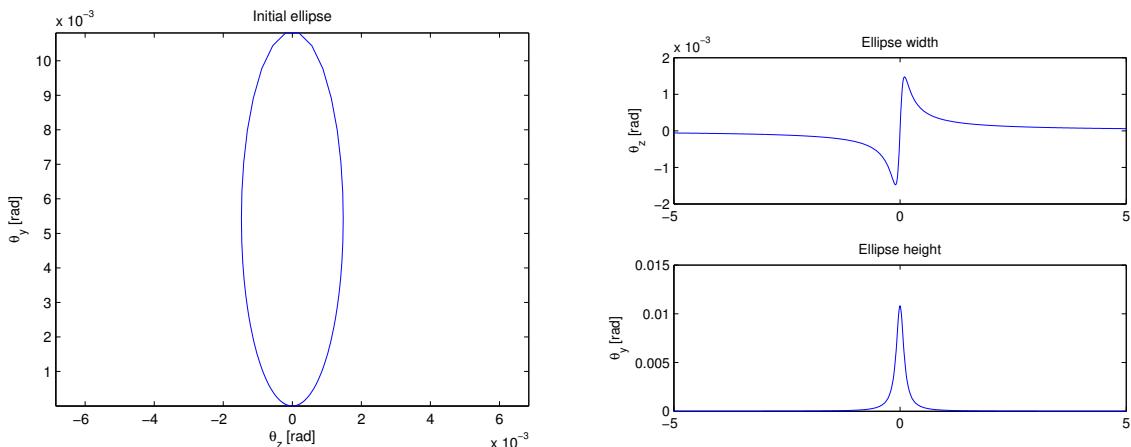
Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα

4.1 Επίδραση παραμέτρων του επιταχυντή στην ανίχνευση της δέσμης

4.1.1 Αποτελέσματα θεωρητικού μοντέλου

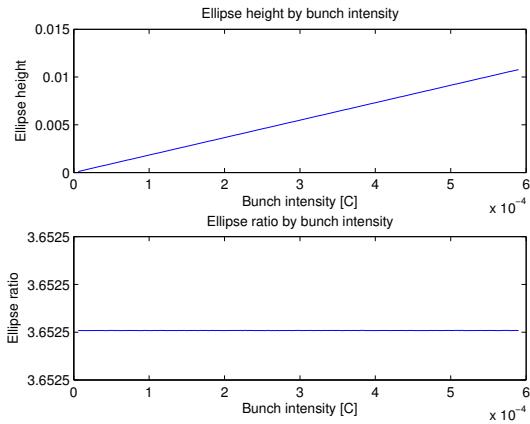
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης που παρουσιάστηκε στην υπο-ενότητα 3.2.1 φαίνονται παρακάτω.



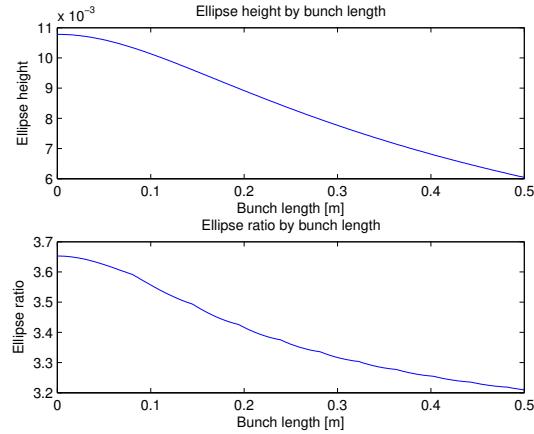
(α') Η χαρακτηριστική έλλειψη στην αρχική κατάσταση

(β') Το πλάτος και ύψος της έλλειψης στην αρχική κατάσταση

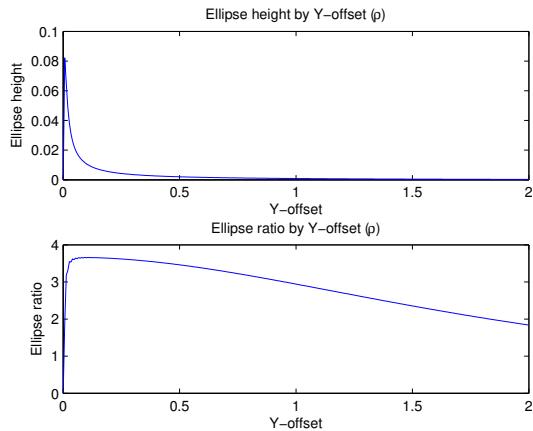
Σχήμα 4.1: Απεικόνιση και στοιχεία της χαρακτηριστικής έλλειψης στην αρχική κατάσταση



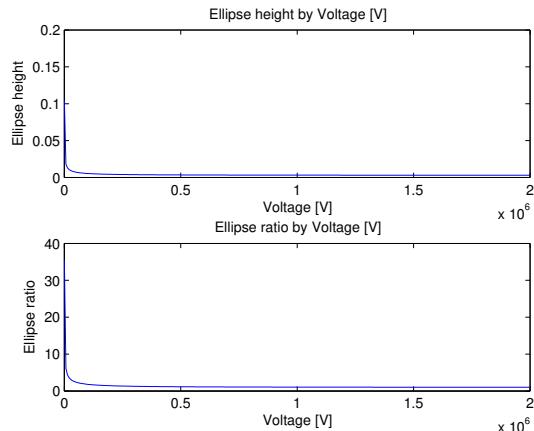
(α') Επιρροή της έντασης της δέσμης ανίχνευσης στην ύψος και το λόγο της έλλειψης



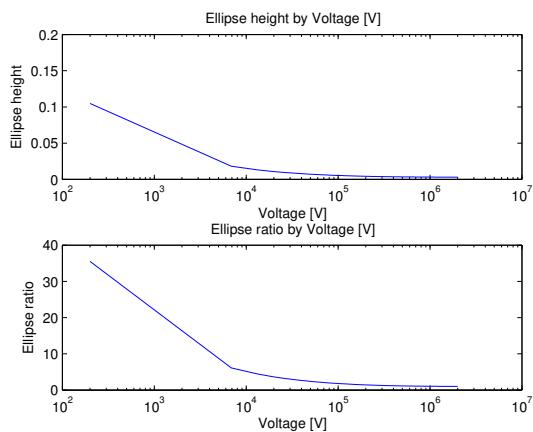
(β') Επιρροή του μήκους της δέσμης ανίχνευσης στην ύψος και το λόγο της έλλειψης



(γ') Επιρροή της αρχικής ύψης ριπής (Y-offset) της δέσμης ανίχνευσης στην ύψος και το λόγο της έλλειψης



(δ') Επιρροή της γραμμικής μεταβολής τάσης της δέσμης ανίχνευσης στην ύψος και το λόγο της έλλειψης



(ε') Επιρροή της εκθετικής μεταβολής τάσης της δέσμης ανίχνευσης στην ύψος και το λόγο της έλλειψης

Σχήμα 4.2: Επιρροή διαφόρων μεγεθών στη χαρακτηριστική έλλειψη

4.1.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

4.1.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης της μεθόδου στο CST

4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης με χρήση CST και MATLAB

Κεφάλαιο 5

Επίλογος

5.1 Συμπεράσματα

Συμπεράσματα κλπ

5.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω, τουλάχιστον ως προς τρεις κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Ένα
- Δύο
- Τρία

Βιβλιογραφία

- [1] M Aicheler, P Burrows, M Draper, T Garvey, P Lebrun, K Peach, N Phinney, H Schmickler, D Schulte και N Toge, επιμελητές. *A Multi-TeV linear collider based on CLIC technology: CLIC Conceptual Design Report*. CERN, Geneva, 2012.
- [2] A Aleksandrov, S Assadi, S Cousineau, V Danilov, S Henderson, M Plum, P Logatchov και A Starostenko. Feasibility study of using an electron beam for profile measurements in the SNS accumulator ring. Στο *Proc. PAC*, σελίδες 2586–2588, Knoxville, 2005.
- [3] S Baird. *Accelerators for Pedestrians*. CERN, Geneva, 2007.
- [4] C Biscari, D Alesini, A Ghigo, F Marcellini και B Jeanneret. CLIC drive beam frequency multiplication system design. Στο *Proc. PAC*, σελίδες 2673–2675, Vancouver, 2009.
- [5] W Blokland, S Aleksandrov, S Cousineau, D Malyutin και S Starostenko. Electron scanner for SNS ring profile measurements. Στο *Proc. DIPAC*, σελίδες 155–157, Basel, 2009.
- [6] J Bosser, C Dimopoulou, A Feschenko και R Maccaferri. Transverse profile monitor using ion probe beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A484(1-3):1–16, 2002.
- [7] A Degiovanni, S Doeberl, W Farabolini, A Grudiev, J Kovermann, E Montesinos, G Riddone, I Syratchev, R Wegner, W Wuensch, A Solodko και B Woolley. High-gradient test results from a CLIC prototype accelerating structure: TD26CC. Στο *Proc. IPAC*, σελίδες 2285–2287, Dresden, 2014.
- [8] V Dudnikov και A Aleksandrov. Ribbon electron beam profile monitor for bunched beam tomography. Στο *Proc. IPAC*, σελίδες 472–474, New Orleans, 2012.
- [9] P Gross, R Dölling, T Weis, H Klein, J Pozimski και J Wiegand. An electron beam probe for ion beam diagnosis. Στο *Proc. EPAC*, σελίδες 806–808, Nice, 1990.
- [10] P V Logatchov, P A Bak, A A Starostenko, N S Dikansky, V S Tupikov, K V Gubin, V M Mishnev, M B Korabelnikov και M G Fedotov. Non-destructive singlepass monitor

- of longitudinal charge distribution in an ultrarelativistic electron bunch. Στο *Proc. PAC*, σελίδες 2167–2169, New York, 1999.
- [11] P V Logatchov, D A Malyutin και A A Starostenko. Low energy electron beam as a nondestructive diagnostic tool for high power beams. Στο *Proc. RuPAC*, σελίδες 40–42, Novosibirsk, 2006.
- [12] J A Pasour και M T Ngo. Nonperturbing electron beam probe to diagnose charged-particle beams. *Review of Scientific Instruments*, 63(5):3027–3039, 1992.
- [13] J A Pasour και M T Ngo. Ion probe for beam position and profile measurement. Στο *Proc. AIP*, τόμος 333, σελίδες 377–383, 1995.
- [14] P K Roy, S S Yu, E Henestroza, S Eylon, D B Shuman, J Ludvig, F M Bieniosek, W L Waldron, W G Greenway, D L Vanecek, R Hannink και M Amezcuia. Electron-beam diagnostic for space-charge measurement of an ion beam. *Review of Scientific Instruments*, 76, 2005.
- [15] V Shestak, C J Kost, R Burge, D B Steski και S Kornak. Electron beam probe for ion beam diagnostics. Τεχνική Αναφορά υπ. αρίθμ., TRIUMF TRI-DN-87-36, Vancouver, 1987.
- [16] A A Starostenko, P A Bak, Y A Gusev, N S Dikansky, P V Logatchov και A R Frolov. Non-destructive singlepass bunch length monitor: experiments at VEPP-5 preinjector electron linac. Στο *Proc. EPAC*, σελίδες 1720–1722, Vienna, 2000.
- [17] R Thurman-Keup, JCT Thangaraj, W Blokland, AH Lumpkin, AS Johnson και D Zhang. Initial characterization of a commerical electron gun for profiling high intensity proton beams in project X. Στο *Proc. PAC*, σελίδες 525–527, 2011.
- [18] S Tsujino και H H Braun. Electron fork: noninvasive beam size monitor based on field emitter array. Τεχνική Αναφορά υπ. αρίθμ., PSI, Villigen, 2012.
- [19] E Tsyganov, R Meinke, W Nexsen, S Kauffmann, A Zinchenko και A Taratin. Electron beam emittance monitor for the SSC. Στο *Proc. PAC*, σελίδες 2489–2491, Washington D.C., 1993.

Παράρτημα Α'

Μεταφράσεις Ξένων όρων

Μετάφραση

δέσμη – οδηγός
επιταχυντής
μεγάλος επιταχυντής αδρονίων
δέσμη ανίχνευσης
προφίλ (χωρική ένταση) δέσμης
κύρια δέσμη
εγκάρσιο προφίλ δέσμης
διαμήκες προφίλ δέσμης

Αγγλικός όρος

drive beam
accelerator
Large Hadron Collider (LHC)
probe beam
beam profile
Main Beam
transverse beam profile
longitudinal beam profile

Παράρτημα Β'

To μοντέλο στο CST Particle Studio

B'.1 Λίστα παραμέτρων

Όνομα παραμέτρου	Τιμή	Περιγραφή
simulation_time	2e-8	Simulation Time
scan_pipe_length	0.25	Scan pipe length
scan_pipe_diameter	main_pipe_diameter	Scan pipe diameter
scan_monitor_step	1e-10	Scan beam monitor step width
scan_monitor_start_time	0	Scan beam monitor start time
scan_beam_vertical_offset	0.01	Scan Beam vertical offset
scan_beam_rise_time	1e-9	Scan beam rise time
scan_beam_pulse_charge	1	Scan beam charge per pulse
scan_beam_offset	0	Scan beam offset
scan_beam_length	4e-3	Scan beam length (sigma)
scan_beam_energy	2e4	Scan beam energy

Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα

Όνομα παραμέτρου	Τιμή	Περιγραφή
scan_beam_emission_lines	5	Scan beam emission lines (density)
scan_beam_diameter	1e-4	Scan beam diameter
scan_beam_cutoff	1e-3	Scan beam cut-off length
scan_beam_current	1e-6	Scan beam current
scan_beam_bunches	1	Scan beam number of bunches
scan_beam_bunch_distances	1e-3	Scan beam distance between bunches
pic_monitor_xcut	3/4*scan_pipe_length/2	X coordinate of PIC 2D monitor position
monitor_step_width	5e-10	monitor step width
main_pipe_length	5	Main pipe length
main_pipe_diameter	0.1	Main pipe diameter
main_beam_rise_time	1e-9	Main beam rise time
main_beam_offset	main_beam_length * 2.01	Main beam offset
main_beam_number_of_bunches	10	Main beam number of bunches
main_beam_lines	7	Main beam emission lines (density)
main_beam_length	0.15	Main beam bunch length (sigma)
main_beam_energy	1e8	Main beam energy
main_beam_diameter	1e-2	Main Beam diameter
main_beam_cutoff	main_beam_length * 2.01	Main beam cut-off length

Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα

Όνομα παραμέτρου	Τιμή	Περιγραφή
main_beam_current	4.2	Main beam current
main_beam_charge_per_bunch	main_beam_charge / 70128	Main beam charge per bunch
main_beam_charge	590e-6	Main beam charge per pulse
main_beam_bunch_distances	main_beam_length * 10	Main beam distance between bunches

B'.2 Template Based Post Processing

#	Result name	Type	Expression	Template name
1	x-average Position	1D	x-average position	Evaluate PIC 2D monitor with average
2	y-average Position	1D	y-average position	Evaluate PIC 2D monitor with average
3	z-average Position	1D	z-average position	Evaluate PIC 2D monitor with average
4	theta_y	1D	Atn((y-average Position - scan_beam_vertical_offset) / pic_monitor_xcut)	Mix template results
5	theta_z	1D	Atn((z-average position - 0) / pic_monitor_xcut)	Mix template results
6	theta_y_1D_xSub	1D	Extract data in subrange, theta_y for $x \in [5e-9, 1]$	0D or 1D Result from 1D Result
7	1st bunch theta_y_1D_xSub	1D	Extract data in subrange, theta_y for $x \in [0.8e-8, 1.3e-8]$	0D or 1D Result from 1D Result
8	10th bunch theta_y_1D_xSub	1D	Extract data in subrange, theta_y for $x \in [5.3e-8, 5.8e-8]$	0D or 1D Result from 1D Result
9	theta_z_1D_xSub	1D	Extract data in subrange, theta_z for $x \in [5e-9, 1]$	0D or 1D Result from 1D Result
10	theta_y_0D_GlobalyMax	0D	Global y-Maximum, theta_y	0D or 1D Result from 1D Result
11	1st bunch	0D	Global y-Maximum, 1st bunch	0D or 1D Result from 1D Result
12	theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax 10th bunch	0D	theta_y_1D_xSub Global y-Maximum, 10th bunch	0D or 1D Result from 1D Result
13	theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMin	0D	theta_y_1D_xSub Global y-Minimum, 1st bunch theta_y_1D_xSub	0D or 1D Result from 1D Result

#	Result name	Type	Expression	Template name
14	theta_z_0D_GlobalyMax	0D	Global y-Maximum, theta_z	0D or 1D Result from 1D Result
15	theta_z_0D_GlobalyMin	0D	Global y-Minimum, theta_z	0D or 1D Result from 1D Result
16	Ellipse height	0D	theta_y_0D_GlobalyMax - 0	Mix template results
17	Ellipse width	0D	theta_z_0D_GlobalyMax - theta_z_0D_GlobalyMin	Mix template results
18	Ellipse ratio	0D	Ellipse height / Ellipse width	Mix template results
19	Ellipse	1DC	Parametric X-Y plot, X: theta_z, Y: theta_y	0D or 1D Result from 1D Result
20	Ellipse_1	1DC	Parametric X-Y plot, X: theta_z_1D_xSub, Y: theta_y_1D_xSub	0D or 1D Result from 1D Result
21	Convert theta_y_0D_GlobalyMax To 1D	1D	Table Values in Dependence on Param- eter scan_beam_vertical_offset	Convert Template Type
22	Convert 1st bunch theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax To 1D	1D	Table Values in Dependence on Param- eter scan_beam_vertical_offset	Convert Template Type
23	Convert 10th bunch theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax To 1D	1D	Table Values in Dependence on Param- eter scan_beam_vertical_offset	Convert Template Type
24	Convert theta_y_0D_GlobalyMax To 1D_1D_Deriv	1D	Derivative, theta_y_0D_GlobalyMax	0D or 1D Result from 1D Result
25	Convert 1st bunch theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax To 1D_1D_Deriv	1D	Derivative, 1st bunch theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax	0D or 1D Result from 1D Result

Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα

#	Result name	Type	Expression	Template name
26	Convert 10th bunch theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax To 1D_1D_Deriv	1D	Derivative, 10th bunch theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax	0D or 1D Result from 1D Result

B'.3 Μονάδες Μέτρησης (Units)

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης
Dimensions	m
Temperature	Kelvin
Frequency	Hz
Time	s
Voltage	V
Current	A
Resistance	Ohm
Conductance	S
Inductance	nH
Capacitance	pF

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Το λογότυπο του CERN	11
2.2	Το λογότυπο του CLIC	12
2.3	Το σύστημα δύο δεσμών του CLIC	13
2.4	Το σχεδιάγραμμα του CLIC	13
2.5	Η μακέτα του CLIC	14
2.6	Εικόνες από το CLIC Testing Facility 3	15
2.7	Εκτροπή δέσμης ανίχνευσης από την μετρούμενη δέσμη	16
2.8	Διαδικασία ανίχνευσης της χαρακτηριστικής έλλειψης της δέσμης	18
3.1	Το λογότυπο του CST	21
3.2	Το λογότυπο του MATLAB	22
3.3	Η διάταξη προσομοιωμένη στο CST	25
3.4	Η πηγή της κύριας δέσμης στο CST	26
3.5	Υπολογισμός του προφίλ δέσμης με Electron Beam Scanner	27
3.6	Το αποτέλεσμα του υπολογισμού του προφίλ στο CST δε μοιάζει Gaussian . .	27
3.7	Παράδειγμα Gaussian συνάρτησης για διάφορες τιμές του συντελεστή c_{off} . .	28
3.8	Η διάταξη προσομοίωσης του κύριου σωλήνα στο CST	31
4.1	Απεικόνιση και στοιχεία της χαρακτηριστικής έλλειψης στην αρχική κατάσταση	37
4.2	Επιφροή διαφόρων μεγεθών στη χαρακτηριστική έλλειψη	38

Κατάλογος Πινάκων

2.1 Σχετικές παράμετροι για την Δέσμη Οδηγό του επιταχυντή CLIC 17

