

Υπολογιστικές μελέτες Ηλεκτρονικού Νέφους

«Διπλωματική εργασία»

Επιβλέπων:

Κωνσταντίνος Αναγνωστόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Λοΐζος Μπιτσικώκος

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

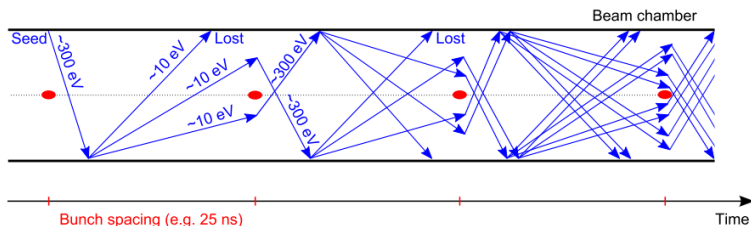
Αθήνα, 2018



Εισαγωγή

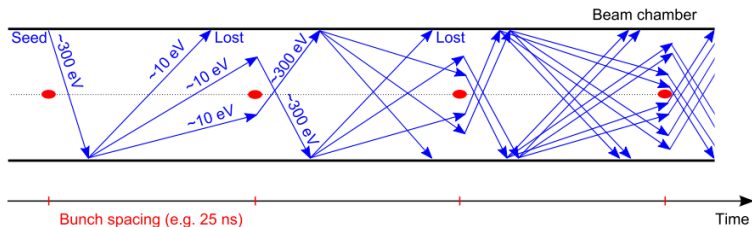
Σε έναν σωματιδιακό επιταχυντή, μπορούν να δημιουργηθούν ελεύθερα ηλεκτρόνια εξαιτίας:

- ▶ ιονισμού του residual gas
- ▶ φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (photoemission) λόγω της εκπομπής ακτινοβολίας σύγχροτρον



Εισαγωγή

- ▶ φαινόμενο «χιονοστιβάδας» πολλαπλασιασμού ηλεκτρονίων (avalanche multiplication)
- ▶ «Ηλεκτρονιακό Νέφος» (Electron Cloud, EC) εντός του θαλάμου της δέσμης
- ▶ ποικίλες αστάθειες στη δέσμη και τα τοιχώματα του θαλάμου



Δευτερογενής Εκπομπή Ηλεκτρονίων

Σημαντικότερο ρόλο στη διαδικασία δευτερογενούς εκπομπής παίζει η Απόδοση Δευτερεύοντων Ηλεκτρονίων (Secondary Electron Yield, SEY) της επιφάνειας της δέσμης :

$$\delta(E) = \frac{I_{emit}}{I_{imp}(E)}$$

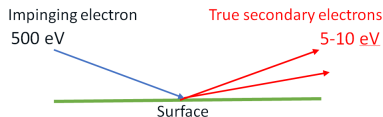
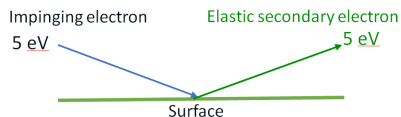
- ▶ I_{emit} : ρεύμα εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων
- ▶ I_{imp} : ρεύμα προσπίπτωντων ηλεκτρονίων



Δευτερογενής Εκπομπή Ηλεκτρονίων

Η ποσότητα αυτή μπορεί με τη σειρά της να αναλυθεί σε δύο επιμέρους συνιστώσες¹:

$$\delta(E) = \delta_{elas}(E) + \delta_{true}(E)$$



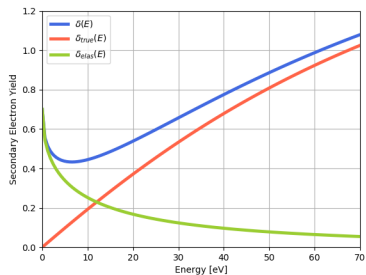
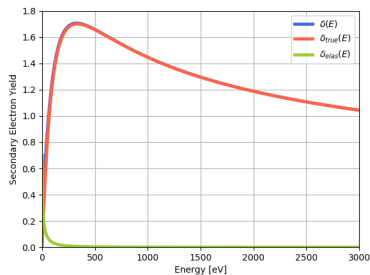
¹Cimino, R. et al. (2004). "Can low energy electrons affect high energy physics accelerators?", *Phys. Rev. Lett.* **93**(1): 014801.



Δευτερογενής Εκπομπή Ηλεκτρονίων

Η ποσότητα αυτή μπορεί με τη σειρά της να αναλυθεί σε δύο επιμέρους συνιστώσες:

$$\delta(E) = \delta_{elas}(E) + \delta_{true}(E)$$

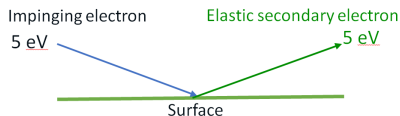
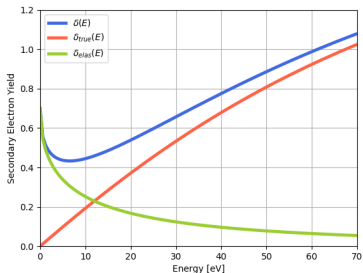


Δευτερογενής Εκπομπή Ηλεκτρονίων

Η ελαστική συνιστώσα έχει τη μορφή:

$$\delta_{elas}(E) = R_0 \left(\frac{\sqrt{E} - \sqrt{E + E_0}}{\sqrt{E} + \sqrt{E + E_0}} \right)^2$$

όπου $R_0 = 0.7$ και $E_0 = 150\text{eV}$ για τις δύο ελεύθερες παραμέτρους του μοντέλου

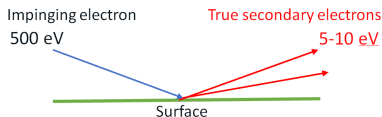
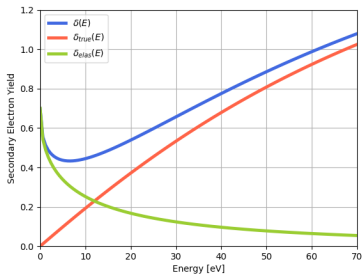


Δευτερογενής Εκπομπή Ηλεκτρονίων

Η πραγματική συνιστώσα έχει τη μορφή:

$$\delta_{true} = \delta_{max} \frac{s \frac{E}{E_{max}}}{s - 1 + \left(\frac{E}{E_{max}}\right)^s}$$

όπου $s = 1.35$ και $E_{max} = 332\text{eV}$.



Δευτερογενής Εκπομπή Ηλεκτρονίων

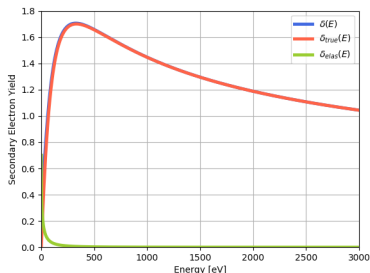
Η καμπύλη SEY παρουσιάζει μέγιστο στη θέση $E = E_{max}$ για το οποίο ισχύει:

$$\delta(E_{max}) \simeq \delta_{true}(E_{max}) = \delta_{max}$$

Η παράμετρος δ_{max} εξαρτάται από:

- ▶ ο υλικό της επιφάνειας
- ▶ τη σκληρότητα
- ▶ το «ιστορικό»

Παίζει ρόλο κλειδί στο σχηματισμό του EC

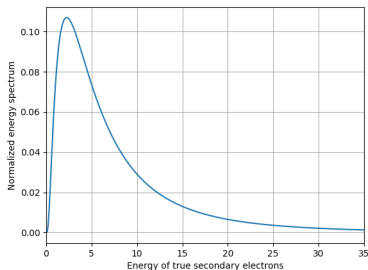


Δευτερογενής Εκπομπή Ηλεκτρονίων

Το ενεργειακό φάσμα των πραγματικά δευτερεύοντων ηλεκτρονίων προσεγγίζεται ικανοποιητικά από την λογαριθμική (lognormal) κατανομή²

$$\frac{dn_{true}}{dE} = \frac{1}{E\sigma_{true}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(E) - \mu_{true})^2}{2\sigma_{true}^2}\right)$$

όπου $\sigma_{true} = 1.0828$ και $\mu_{true} = 1.6636$.



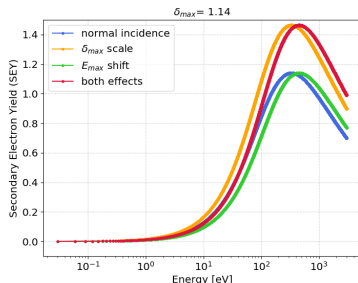
²Henrist, B. et al. (2002). Secondary electron emission data for the simulation of electron cloud.

Δευτερογενής Εκπομπή Ηλεκτρονίων

- ▶ Η παράμετρος SEY εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης των ηλεκτρονίων (θ , ορισμένη σε σχέση με την κάθετη στην επιφάνεια)
- ▶ Οι παράμετροι E_{max} και δ_{max} επαναπροσδιορίζονται ως συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες σχέσεις:

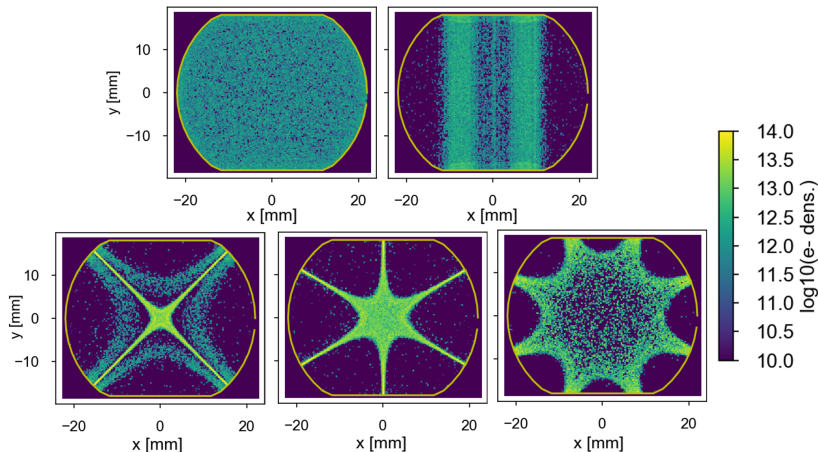
$$E_{max}(\theta) = E_{max}(\theta = 0) \cdot (1 + 0.7(1 - \cos \theta))$$

$$\delta_{max}(\theta) = \delta_{max}(\theta = 0) \cdot \exp\left(\frac{1 - \cos \theta}{2}\right)$$



Επίδραση εξωτερικών μαγνητικών πεδίων

Τα ηλεκτρόνια είναι δεσμευμένα σε κίνηση γύρω από τις γραμμές του πεδίου, δημιουργώντας χαρακτηριστικά μοτίβα ηλεκτρονιακής πυκνότητας.



Η παρουσία EC στους θαλάμους της δέσμης περιορίζει σημαντικά της λειτουργία ενός σωματιδιακού επιταχυντή μέσω διαφορετικών επιπτώσεων:

- ▶ Αστάθειες δέσμης
- ▶ Υποβάθμιση του κενού
- ▶ Θερμικό Φορτίο
- ▶ Διαγνωστικά δέσμης



Μοντελοποίηση και προσομοίωση σχηματισμού EC

- ▶ Η πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης σχηματισμού EC (EC build-up) στο CERN βασίζεται στον κώδικα ECLLOUD(1997-2012)
- ▶ ο ECLLOUD ήταν ακατάλληλος για να απαντήσει στις ολοένα και αυξανόμενες υπολογιστικές ανάγκες
- ▶ Ο νέος κώδικας, ονομάστηκε PyECLLOUD³
- ▶ Είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου γραμμένος σε Python ενώ χρησιμοποιεί τα ίδια φυσικά μοντέλα με τον κώδικα ECLLOUD
- ▶ Η ανάπτυξη του PyECLLOUD στηρίχθηκε επίσης σε εκτενή πειραματική δραστηριότητα

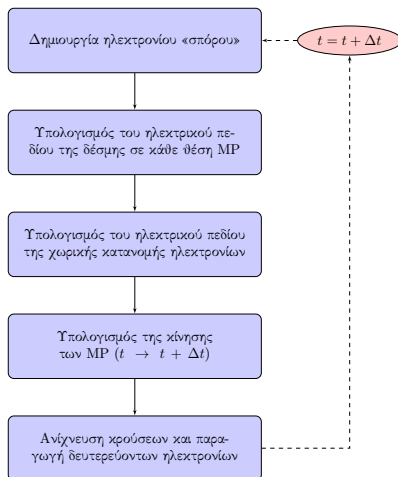
³<https://github.com/PyCOMPLETE/PyECLLOUD>



Κώδικας PyECLOUD

- ▶ 2D κώδικας
- ▶ προσομοιώνει το σχηματισμό του EC σε μία λεπτή εγκάρσια διατομή γύρω από συγκεκριμένο τομέα ενός σωματιδιακού επιταχυντή
- ▶ ηλεκτρόνια ομαδοποιούνται σε Macro Particles (MPs)



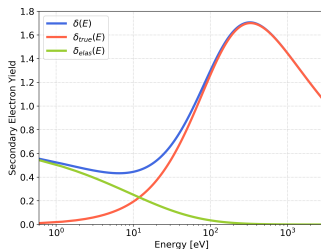


Iadarola, G. (2014). *Electron cloud studies for CERN particle accelerators and simulation code development*. CERN, Geneva, Switzerland.



Προσομοιώσεις EC με χρήση μοντέλων για την καμπύλη Δευτερογενούς εκπομπής

- ▶ Η υπολογιστική δύναμη των σύγχρονων υπολογιστών καθιστά δυνατή τη χρήση πινάκων μετρήσεων για καμπύλες SEY αντί αναλυτικών μοντέλων
- ▶ Στόχος μας είναι η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του κώδικα με χρήση πινάκων δεδομένων καθώς και η σύγκριση μεταξύ του μοντέλου Cimino et al. και νέων μετρήσεων για το SEY



Προσομοιώσεις EC

Πραγματοποιούμε προσομοιώσεις για τις ίδιες παραμέτρους χρησιμοποιώντας το αναλυτικό μοντέλο Cimino et al. και τις μετρήσεις SEY

- ▶ Οι τιμές για το SEY αφορούν στο συνολικό δ
- ▶ Δεν μπορούν να διαχωριστούν σε ελαστική και πραγματική συνιστώσα σε αντίθεση με το μοντέλο του κώδικα.
- ▶ Οι πίνακες μετρήσεων αφορούν κάθετη πρόσπτωση, μη γνωρίζοντας τη γωνιακή εξάρτηση.

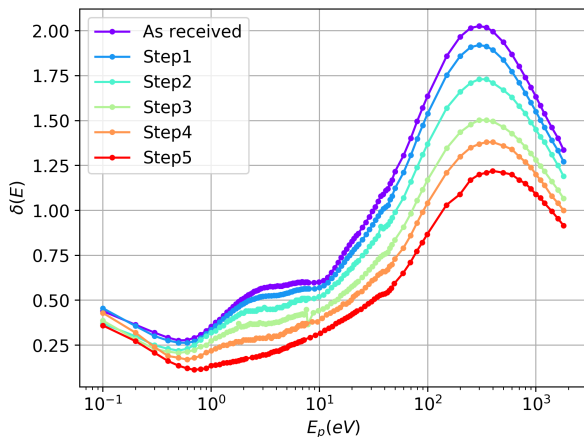
Προσομοιώνουμε χωρίς γωνιακή εξάρτηση και αντιμετωπίζοντας όλα τα ελαστικώς σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια ως παραγματικά δευτερεύοντα.

- ▶ Οι υποθέσεις αυτές μπορεί να φαντάζουν αυθαίρετες αλλά αποτελούν μια καλή προσέγγιση όπως θα αξιολογηθεί στη συνέχεια



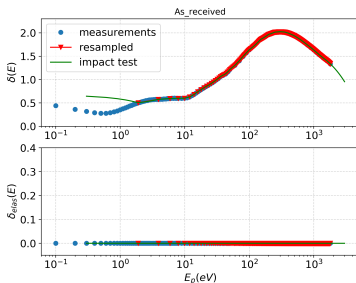
Επεξεργασία των δεδομένων input

- ▶ Τα δεδομένα για την καμπύλη SEY δίνονται σε αρχεία txt (Petit V., CERN, TE-VSC) σε δύο στήλες
- ▶ Μία στήλη για την ενέργεια και μία για την αντίστοιχη τιμή SEY



Resampling

- ▶ Είναι απαραίτητο τα δεδομένα να δωθούν ως inputs
- ▶ Ο κώδικας δέχεται μόνο ομοιόμορφα κατανεμημένους πίνακες
- ▶ Απαιτείται resampling των δεδομένων
- ▶ Δημιουργούμε ένα δοκιμαστικό τεστ με προσπτώσεις ηλεκτρονίων
- ▶ Παρατηρούμε συμφωνία των τριών καμπυλών (μετρήσεις, resampled, τεστ πρόσπτωσης)
- ▶ Συμπεραίνουμε ότι το resampling πραγματοποιήθηκε επιτυχώς



Παράμετροι προσομοίωσης

Πραγματοποιούμε προσομοιώσεις δημιουργίας EC με χρήση του μοντέλου των μετρήσεων SEY και με χρήση του μοντέλου Cimino et al. Χρησιμοποιούμε τις εξής παραμέτρους :

- ▶ θάλαμο δέσμης του LHC
- ▶ δ_{max} : υπολογίζονται γραφικά από τις καμπύλες των μετρήσεων
- ▶ Διπολικό πεδίο έντασης $7.73495T$ και περιοχή κενή μαγνητικού πεδίου
- ▶ ένταση της δέσμης: $(0.0 \sim 2.5) \times 10^{11} ppb$ με βήμα $0.1 \times 10^{11} ppb$
- ▶ η γωνιακή εξάρτηση απενεργοποιείται
- ▶ τα ελαστικώς σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια αντιμετωπίζονται ως πραγματικώς δευτερεύοντα

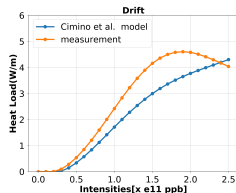
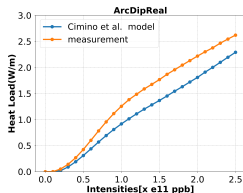
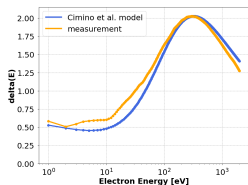


Σύγκριση παρατηρήσιμων ποσοτήτων

- ▶ Σημαντικότερη όλων των παρατηρήσιμων ποσοτήτων είναι το θερμικό φορτίο στα τοιχώματα του θαλάμου
- ▶ Γι αυτό παρουσιάζουμε διαγράμματα θερμικού φορτίου συναρτήσει της έντασης της δέσμης



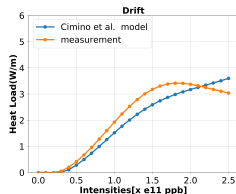
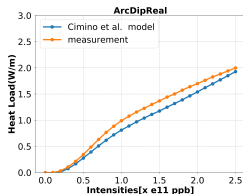
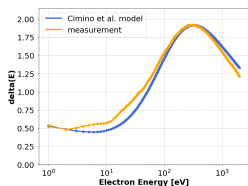
Θερμικά φορτία $As_received \delta_{max} = 2.02$



- ▶ Αισθητή διαφορά μεταξύ των καμπύλων δευτερογενούς εκπομπής τόσο στις χαμηλές όσο και στις υψηλές ενέργειες
- ▶ Ορατή διαφορά μεταξύ των θερμικών φορτίων τόσο σε περιοχή διπολικού μαγνήτη όσο και σε περιοχή χωρίς μαγνητικό πεδίο
- ▶ Το θερμικό φορτίο σε περιοχή χωρίς μαγνητικό πεδίο αλλάζει κλίση (άνω των 1.5×10^{11} ppb) για το μοντέλο των μετρήσεων
- ▶ Αλλαγή κλίσης δεν λαμβάνεται υπ' όψιν στο μοντέλο Cimino et al.



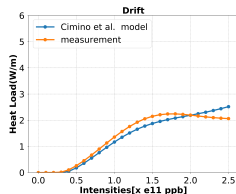
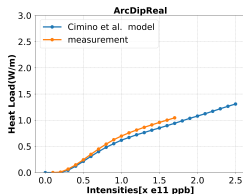
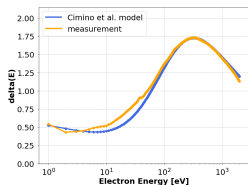
Θερμικά φορτία Step1 $\delta_{max} = 1.91$



- ▶ Όσο μικρότερο το δ_{max} τόσο μικρότερη η διαφορά στα θερμικά φορτία



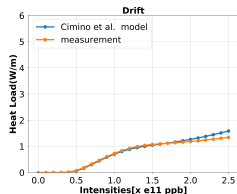
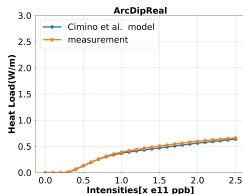
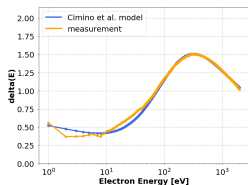
Θερμικά φορτία Step2 $\delta_{max} = 1.72$



- ▶ Όσο μικρότερο το δ_{max} τόσο μικρότερη η διαφορά στα θερμικά φορτία



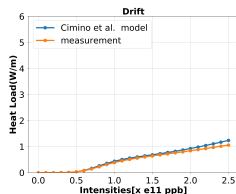
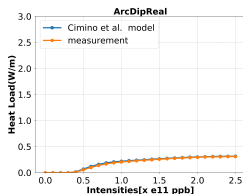
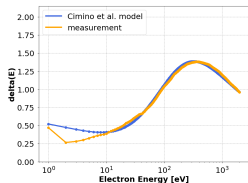
Θερμικά φορτία Step3 $\delta_{max} = 1.50$



- ▶ Για μικρά δ_{max} η εξάρτηση του θερμικού φορτίου από την ένταση της δέσμης σταθεροποιείται για εντάσεις άνω των 0.5×10^{11} ppb



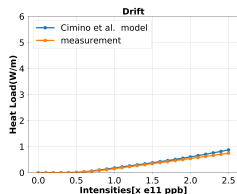
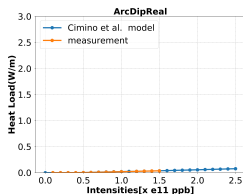
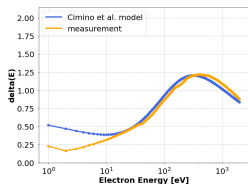
Θερμικά φορτία Step4 $\delta_{max} = 1.38$



- ▶ Σχεδόν μηδενικά θερμικά φορτία
- ▶ Δεν παρατηρείται διαφορά στις θερμότητες ανεξάρτητα από την ορατή διαφορά στις καμπύλες δευτερογενούς εκπομπής
- ▶ Συμπεραίνουμε πως στη διαδικασία εναπόθεσης θερμότητας επικρατούν τα φωτοηλεκτρόνια (ηλεκτρόνια από φωτοηλεκτρικό φαινόμενο)



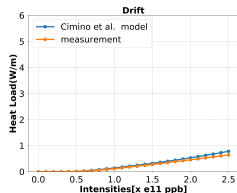
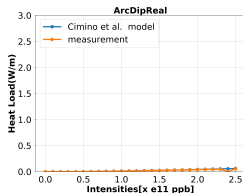
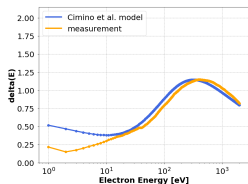
Θερμικά φορτία Step5 $\delta_{max} = 1.20$



- ▶ Σχεδόν μηδενικά θερμικά φορτία
- ▶ Επικρατούν τα φωτοηλεκτρόνια



Θερμικά φορτία Step6 $\delta_{max} = 1.14$



- ▶ Σχεδόν μηδενικά θερμικά φορτία
- ▶ Επικρατούν τα φωτοηλεκτρόνια



Αποτελέσματα προσομοιώσεων

- ▶ Το μοντέλο Cimino et al. αποτελεί ένα αρκετά καλό αναλυτικό μοντέλο της διαδικασίας δευτερογενούς εκπομπής
- ▶ Η υπολογιστική ισχύς των σύγχρονων υπολογιστών επιτρέπει τη χρήση αρχείων μετρήσεων για τις καμπύλες δευτερογενούς εκπομπής

Αναλύοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων από τη σύγκριση των δύο μοντέλων:

- ▶ παρατηρούμε σημαντικές διαφορές στις καμπύλες δευτερογενούς εκπομπής και στα παραγόμενα θερμικά φορτία
- ▶ αλλαγή της κλίσης του θερμικού φορτίου για ένταση δέσμης $\leq 1.5 \times 10^{11} \text{ ppb}$
- ▶ Οι διαφορές μειώνονται για μικρότερα δ_{max}
- ▶ Οι διαφορές τείνουν σε μηδενικά θερμικά φορτία για $\delta_{max} \leq 1.2$



Απαραίτητες προσεγγίσεις

Πραγματοποιούμε προσομοιώσεις δημιουργίας EC χρησιμοποιώντας το μοντέλο SEY Cimino et al. μετατρέποντας σε αρχεία δεδομένων input τις καμπύλες.

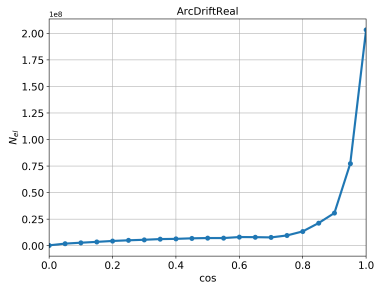
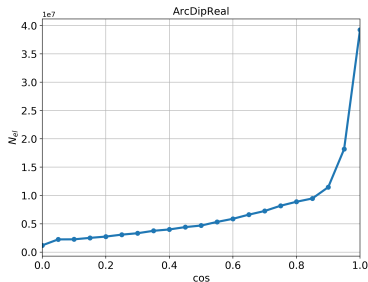
Οι παράμετροι που σκανάρουμε είναι οι εξής:

- ▶ $\delta_{max} = 1.0 \sim 1.5$
- ▶ ένταση δέσμης: $0.0 - 2.5 \times 10^{11} \text{ ppb}$
- ▶ ελαστική συνιστώσα ως έχει και ελαστική συνιστώσα ως πραγματικώς δευτερεύουσα (μηδενική ελαστική συνιστώσα και χρήση του συνολικού $\delta(E)$)
- ▶ περιοχές διπολικού μαγνήτη (7.73495T) και κενές πεδίων
- ▶ γωνιακή εξάρτηση ενεργοποιημένη και απενεργοποιημένη (για Emax shift και dmax scale)



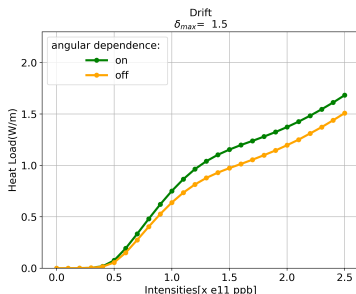
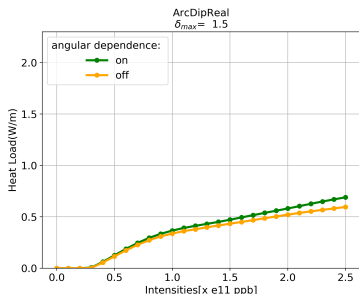
Γωνιακή εξάρτηση

- ▶ Παρατηρούμε την κατανομή των ηλεκτρονίων ως προς τη γωνία πρόσπτωσης για περιοχή διπόλου και περιοχή χωρίς μαγνητικό πεδίο αντίστοιχα
- ▶ Ο μεγαλύτερος αριθμός ηλεκτρονίων συγκεντρώνεται γύρω από την περιοχή $\cos \theta = 1.0$
- ▶ Τα περισσότερα ηλεκτρόνια προσπίπτουν με διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια και επομένως η γωνιακή εξάρτηση μπορεί να αγνοηθεί



Γωνιακή εξάρτηση

- ▶ Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζεται σε εξαιρετική συμφωνία μεταξύ των παραθθέντων θερμικών φορτίων

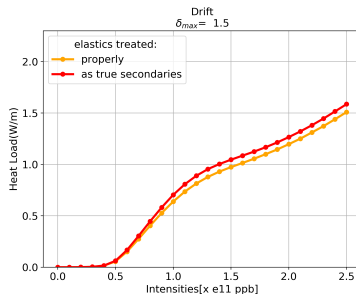
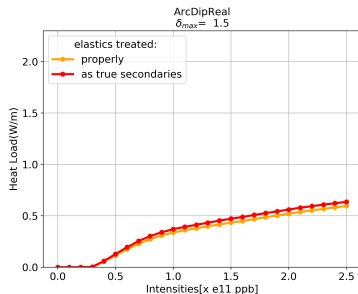
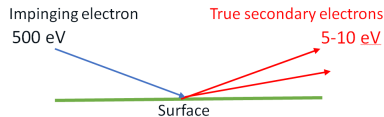
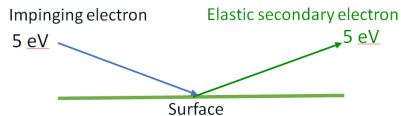


Ελαστική συνιστώσα

- ▶ Οι πίνακες δεδομένων μετρήσεων για την καμπύλη SEY δε διακρίνουν τα πραγματικά δευτερεύοντα από τα ελαστικά σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια
- ▶ Τόσο τα ελαστικώς σκεδαζόμενα όσο και τα πραγματικά δευτερεύοντα ηλεκτρόνια είναι κυρίως χαμηλοενεργειακά
- ▶ Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων επαληθεύει την υπόθεση αυτή



Ελαστική συνιστώσα

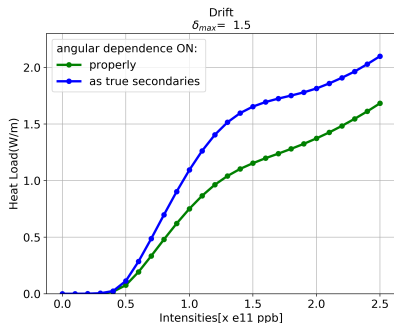
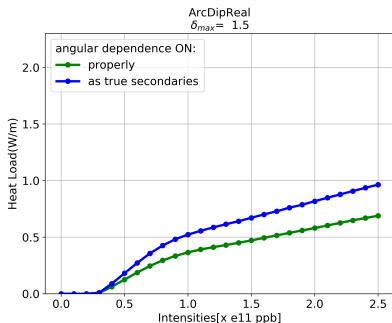


Ελαστικώς σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια και γωνιακή εξάρτηση

- ▶ Για ποιο λόγο δεν ενεργοποιούμε τη γωνιακή εξάρτηση και ταυτόχρονα να αντιμετωπίσουμε τα ελαστικώς σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια ως πραγματικά δευτερεύοντα;
- ▶ Δηλαδή να χρησιμοποιήσουμε τους πίνακες δεδομένων για τις καμπύλες SEY με γωνιακή εξάρτηση
- ▶ Το θερμικό φορτίο αυξάνεται σημαντικά
- ▶ Η (εσφαλμένη) αντιμετώπιση των ελαστικών ηλεκτρονίων ως πραγματικών δευτερεύοντων δίδοντας τους, επιπλέον, γωνιακή εξάρτηση δίνει ένα εσφαλμένα υψηλό θερμικό φορτίο
- ▶ Μπορούμε να εφαρμόσουμε τις απαραίτητες προσεγγίσεις στις προσομοιώσεις που προηγήθηκαν



Ελαστικώς σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια και γωνιακή εξάρτηση



Επιφανειακές ιδιότητες

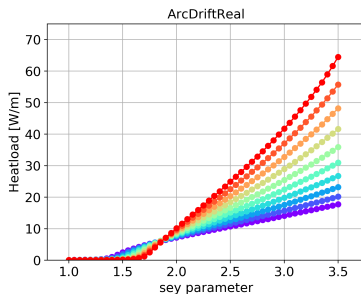
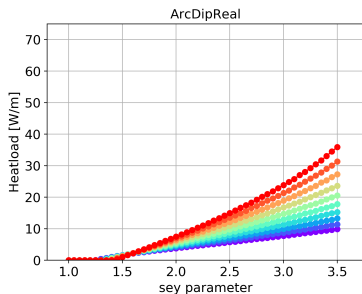
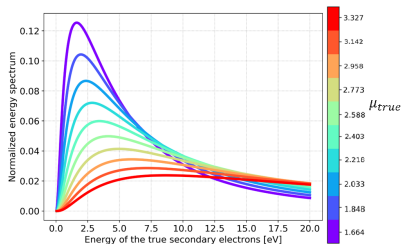
- ▶ Η καμπύλη δευτερογενούς εκπομπής είναι μόνο ένα μέρος της συνολικής εικόνας
- ▶ Η ενέργεια των δευτερεύοντων ηλεκτρονίων καθορίζει, επίσης, την πιθανότητα να απορροφηθούν στο επόμενο πέρασμα της σωματιδιακής δέσμης του επιταχυντή
- ▶ Το μοντέλο του ενεργειακού φάσματος που χρησιμοποιείται στον κώδικα PyECLOUD είναι το εξής:

$$\frac{dn_{true}}{dE} = \frac{1}{E\sigma_{true}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln E - \mu_{true})^2}{2\sigma_{true}^2}\right)$$

- ▶ Χρησιμοποιούνται οι παράμετροι: $\sigma_{true} = 1.0828$, $\mu_{true} = 1.6636$
- ▶ Προσομοιώνουμε δημιουργία EC χρησιμοποιώντας τις εξής παραμέτρους:
 - ▶ $\delta_{max} = 1.0 \sim 3.5$
 - ▶ περιοχή διπολικού μαγνήτη (7.73495T) και κενή πεδίων
 - ▶ μ_{true} με τιμές από 1.6636 (πρότυπη τιμή του μοντέλου) έως 3.3274 (διπλάσιο της πρότυπης τιμής)



Επιφανειακές Ιδιότητες



Επιφανειακές ιδιότητες

- ▶ Παρατηρούμε σημαντική απόκλιση για διαφορετικές τιμές μ_{true}
- ▶ Αναδεικνύει ένα σημαντικό περιορισμό στις προσομοιώσεις με πειραματικά δεδομένα
- ▶ Ιδανικά, χρειαζόμαστε μία βάση δεδομένων για μοντέλα δευτερογενούς εκπομπής
- ▶ Είναι απαραίτητο να περιλαμβάνει τόσο τις καμπύλες SEY όσο και το ενεργειακό φάσμα δευτερευόντων ηλεκτρονίων
- ▶ Χρήσιμο θα ήταν να περιλαμβάνει στοιχεία για διαφορετικά υλικά, διαδικασίες βομβαρδισμού με ηλεκτρόνια (scrubbing) καθώς και άλλες σχετικές παραμέτρους (π.χ. θερμοκρασία, αέρια υπό πίεση)
- ▶ Έτσι, αναλόγως της περίπτωσης προς προσομοίωση, θα μπορούσε να επιλεγεί το κατάλληλο μοντέλο με ισχυρότερες δυνατότητες πρόβλεψης και καλύτερα αποτελέσματα

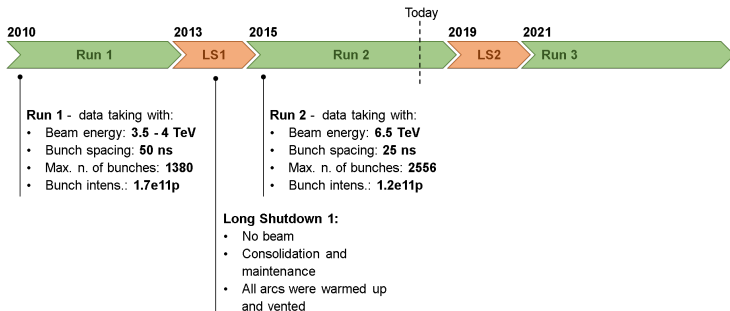


Εισαγωγή εξαπολικών σφαλμάτων σε περιοχή διπολικού μαγνήτη

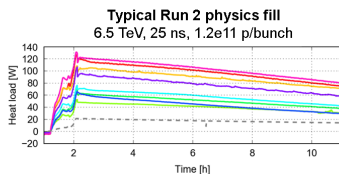
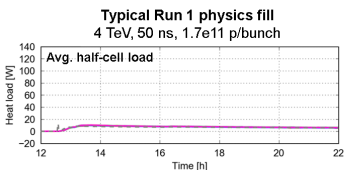
- ▶ Ένας υπεραγώγιμος διπολικός μαγνήτης αποτελεί σημαντική σχεδιαστική πρόκληση
- ▶ Οι διπολικοί μαγνήτες στρέψης του LHC δεν παράγουν τέλειο διπολικό πεδίο, αλλά περιέχουν σφάλματα και παραμορφώσεις
- ▶ Οι ατέλειες του παραγόμενου πεδίου είναι το τίμημα που έχει κανείς να πληρώσει για τα μεγάλα ηλεκτρικά ρεύματα ενός υπεραγώγιμου μαγνήτη



Εισαγωγή εξαπολικών σφαλμάτων σε περιοχή διπολικού μαγνήτη



Εισαγωγή εξαπολικών σφαλμάτων σε περιοχή διπολικού μαγνήτη



- ▶ Κατά το Run 2 του LHC παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά ως προς το παραχθέν θερμικό φορτίο μεταξύ διαφορετικών μαγνητικών στοιχείων του επιταχυντή
- ▶ Η διαφορά αφορά ακόμα και ταυτόσημα (κατασκευαστικά πανομοιότυπα) στοιχεία σε διαφορετικά μέρη του επιταχυντή
- ▶ Δεν παρουσιάζονταν πριν το Run 2



Εισαγωγή εξαπολικών σφαλμάτων σε περιοχή διπολικού μαγνήτη

- ▶ Μια σημαντική πρόταση για το αίτιο αυτών των διαφορών είναι ο σχηματισμός EC στα συγκεκριμένα τμήματα
- ▶ Στα πλαίσια αυτής της υπόθεσης, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η προσομοίωση σχηματισμού EC για διπολική περιοχή με εισαγωγή εξαπολικών παραμορφώσεων
- ▶ Όστε να διερευνηθεί η επίπτωση στα παραχθέντα θερμικά φορτία και να εξεταστεί η πιθανότητα το επιπλέον θερμικό φορτίο να οφείλεται σε κατασκευαστικές ατέλειες των διπόλων



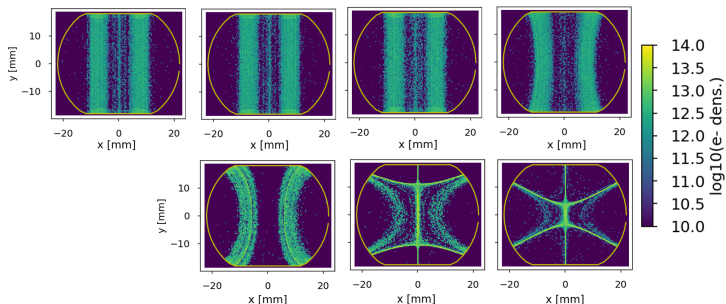
Προσομοιώσεις σχηματισμού EC με εξαπολικά σφάλματα

Προσομοιώνουμε σχηματισμό EC χρησιμοποιώντας τις εξής παραμέτρους:

- ▶ Θάλαμο δέσμης του LHC
- ▶ Ενέργεια 6500GeV
- ▶ Διπολικό πεδίο 7.74T
- ▶ Εξαπολική συνιστώσα $1.0 \sim 10^6\text{T}/\text{m}^2$
- ▶ $\delta_{max} = 0.0 \sim 2.0$
- ▶ ένταση δέσμης $1.1 \times 10^{11}\text{ppb}$



Προσομοιώσεις σχηματισμού EC με εξαπολικά σφάλματα

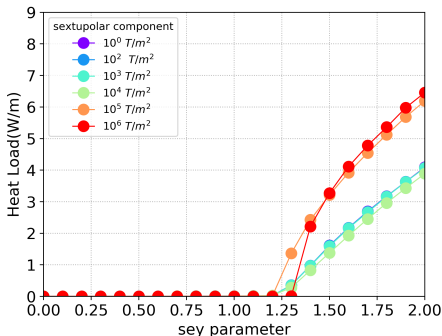


- ▶ Από $1.0T/m^2$ έως $10^4T/m^2$ η επίδραση της εξαπολικής συνιστώσας είναι μικρή
- ▶ Το διπολικό μαγνητικό πεδίο παραμορφώνεται ελάχιστα
- ▶ Η εξαπολική συνιστώσα κυριαρχεί επί της διπολικής συνιστώσας για $> 10^6T/m^2$



Προσομοιώσεις σχηματισμού EC με εξαπολικά σφάλματα

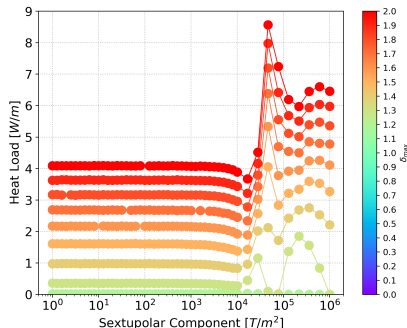
- ▶ Εξετάζουμε ορισμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις εξαπολικών συνιστωσών για να αξιολογήσουμε την επίδραση στα παραχθέντα θερμικά φορτία
- ▶ Για εξαπολικές συνιστώσες έως $\leq 10^4 T/m^2$ τα παραχθέντα θερμικά φορτία είναι σε συμφωνία, ενώ για $> 10^4 T/m^2$ επικρατεί το εξαπολικό πεδίο



Προσομοιώσεις σχηματισμού EC με εξαπολικά σφάλματα

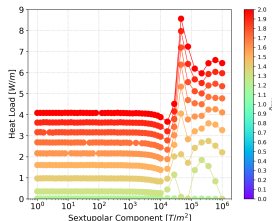
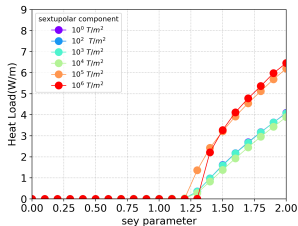
Για εξαπολικές συνιστώσες:

- ▶ $10^0 - 10^4 T/m^2$ τα θερμικά φορτία παραμένουν σταθερά
- ▶ $10^4 - 10^5 T/m^2$ παρατηρούμε περίεργη συμπεριφορά με απότομη αύξηση που ακολουθείται από απότομη μείωση (παραμορφωμένα διπολικά πεδία)
- ▶ $> 10^6 T/m^2$ τα θερμικά φορτία συγκλίνουν σε τιμές για περιοχή εξαπόλου



Προσομοιώσεις σχηματισμού EC με εξαπολικά σφάλματα

- ▶ Η τιμή για το εξαπολικό σφάλμα των διπόλων του LHC είναι $10^1 - 10^2 T/m^2$ (σταθερή περιοχή)
- ▶ Διαφορά δύο τάξεων μεγέθους μεταξύ του ορίου των $10^4 T/m^2$ και της τιμής για τα δίπολα του επιταχυντή ($10^1 - 10^2 T/m^2$)
- ▶ Σφάλματα ανώτερης τάξης δε μπορούν να είναι υπεύθυνα για παρατηρήσιμη διαφορά στα παραχθέντα θερμικά φορτία



Συμπεράσματα

- ▶ Η προσομοίωση είναι ένα δυνατό εργαλείο για γρήγορη μελέτη περίπλοκων φαινομένων
- ▶ Το EC αποτελεί ένα πολύπλοκο φαινόμενο με άμεσες συνέπειες στη λειτουργία των αδρονικών επιταχυντών
- ▶ Η πληθώρα και ο συνδυασμός των παραμέτρων καθιστά τη μελέτη του μοναδική υπολογιστική πρόκληση
- ▶ Στον κώδικα PyECLOUD γίνεται χρήση του αναλυτικού μοντέλου Cimino et al.
- ▶ Η υπολογιστική δύναμη των σύγχρονων υπολογιστών επιτρέπει τη χρήση πινάκων μετρήσεων για το SEY



Συμπεράσματα

- ▶ Προσομοιώνοντας τη δημιουργία EC είδαμε σημαντικές διαφορές για χρήση πινάκων μετρήσεων και χρήση του αναλυτικού μοντέλου
- ▶ Η παρατηρούμενη απόκλιση αντικατοπτρίζεται τόσο στις καμπύλες δευτερογενούς εκπομπής όσο και στα διαγράμματα θερμικού φορτίου συναρτήσει της έντασης δέσμης
- ▶ Η απόκλιση είναι ιδιαίτερα αισθητή για υψηλά δ_{max}
- ▶ Τα διαθέσιμα δεδομένα από τις μετρήσεις επιβάλλουν την απενεργοποίηση της γωνιακής εξάρτησης
- ▶ Επίσης, τα ελαστικώς σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια αντιμετωπίζονται ως πραγματικά δευτερεύοντα
- ▶ Οι προσεγγίσεις αυτές είναι αρκετά καλές για διπολικούς μαγνήτες και περιοχές κενές μαγνητικών πεδίων
- ▶ Δύναται να παραλειφθούν εάν υπάρξουν πιο ολοκληρωμένα δεδομένα.
- ▶ Θα ήταν χρήσιμο να υπάρξουν δεδομένα για το ενεργειακό φάσμα των δευτερεύοντων ηλεκτρονίων για διαφορετικά υλικά και διαδικασίες επεξεργασίας τους, με απώτερο σκοπό τη δημιουργία μίας βάσης δεδομένων αρχείων δευτερογενούς εκπομπής



- ▶ Τέλος, η μελέτη προσομοιώσεων σχηματισμού EC για περιοχές διπολικών μαγνητών με εισαγωγή εξαπολικών σφαλμάτων υποδεικνύει ότι οι διαφορές σε μετρήσεις θερμικών φορτίων για διαφορετικά μαγνητικά στοιχεία δε μπορεί να οφείλονται σε ατέλειες των μαγνητών.
- ▶ Ωστόσο, ως πιθανότερη αιτία, που χρήζει περαιτέρω διερεύνηση, παραμένει ο επηρεασμός του σχηματισμού EC από τις επιφανειακές ιδιότητες του υλικού του θαλάμου



Ευχαριστώ πολύ!

