

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ,  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ,  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ,  
ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

---

Ταυτοποίηση φορτισμένων πιονίων μέσω των  
ασθενών τους διασπάσεων και εφαρμογή της  
μεθόδου στην παραγωγή συντονισμών από  
αλληλεπιδράσεις  $pp$  ( $\sqrt{s} = 7TeV$ ) στο πείραμα  
ALICE

---

Χειλαδάκης Ευτύχιος

*A.M.: 201118*

**Τριμελής εξεταστική επιτροπή:**

Μ. Βασιλείου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Εμ. Φλωράτος, Καθηγητής

Δ. Φασουλιώτης, Επίκουρος Καθηγητής

**Σύμβουλος Καθηγήτρια:**

Μ. Σπυροπούλου - Στασινάκη, Καθηγήτρια

Αθήνα, 2013

## Περίληψη

Αντικείμενο της εργασίας είναι η βέλτιστη δυνατή ταυτοποίηση φορτισμένων πιονίων μέσω της τοπολογίας των ασθενών τους διασπάσεων (kinks) στον ανιχνευτή TPC του πειράματος ALICE στον επιταχυντή LHC στο CERN και η χρήση της μεθόδου για την μελέτη συντονισμών. Στην εργασία χρησιμοποιούνται δεδομένα συγκρούσεων pp στα 7 TeV.

Οι ασθενείς αυτές διασπάσεις καταγράφονται ως δευτερογενείς αλληλεπιδράσεις και εμφανίζουν ένα χαρακτηριστικό σπάσιμο τροχιάς, όταν το φορτισμένο μητρικό σωματίο διασπάται σε ένα θυγατρικό ίδιου φορτίου και ένα ή περισσότερα ουδέτερα. Η ιδιότητα των φορτισμένων καονίων και πιονίων να διασπώνται σε ζεύγη όμοιων θυγατρικών σωματιδίων ( $\mu\nu$ ) προσφέρει τα κύρια εργαλεία διαχωρισμού και ταυτοποίησης τους. Οι κινηματικές μεταβλητές της συγκεκριμένης τοπολογίας, όπως η εγκάρσια ορμή του θυγατρικού σωματιδίου στο σύστημα ηρεμίας του μητρικού και η γωνία διάσπασης, επιτρέπουν τον πολύ καλό διαχωρισμό των δύο ειδών σωματιδίων. Η ταυτοποίηση γίνεται σε επίπεδο τροχιάς. Η μέθοδος συμπληρώνει και επεκτείνει τις δυνατότητες ταυτοποίησης πιονίων από απευθείας μετρήσεις σημάτων των ανιχνευτών του πειράματος.

Στην παρούσα εργασία γίνεται αναλυτικός υπολογισμός των φασμάτων της εγκάρσιας ορμής και της ψευδοωκύτητας ή της ωκύτητας των ταυτοποιημένων πιονίων, των διορθωτικών παραγόντων γεωμετρικής αποδοχής και απόδοσης ανακατασκευής, της καθαρότητας του ταυτοποιημένου δείγματος και των συστηματικών σφαλμάτων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται προσομοιωμένα και πραγματικά δεδομένα, τα οποία αναλύονται με τον ίδιο τρόπο.

Στην συνέχεια γίνεται μελέτη των συντονισμών  $K^*(892)^0$  και  $\phi(1020)$ , οι οποίοι διασπώνται σε σωματίδια που μπορούν να ταυτοποιηθούν με την μέθοδο αυτή ( $K^* \rightarrow K^\pm \pi^\mp$  και  $\phi \rightarrow K^+ K^-$ ). Συγκεκριμένα υπολογίζονται οι μάζες, τα πλάτη και τα διορθωμένα φάσματα της εγκάρσιας ορμής των συντονισμών.

## Abstract

The object of this thesis is the identification of charged pions via their weak decay kink topology in the TPC detector of the ALICE experiment at the LHC at CERN, and the application of the method in order to study resonances. The data used in this thesis were from pp collisions at 7 TeV.

Pion decays are recorded as secondary vertices, where a characteristic break of a track appears when a charged mother particle decays in a daughter particle of the same charge and one or more neutral particles. The property of charged kaons and pions to decay in the same pairs of daughter particles ( $\mu\nu$ ) offers a means for their separation and identification. The kinematic variables of the aforementioned topology, i.e. the transverse momentum of the daughter particle in its mother's frame and the kink angle allow sufficient separation of the two particle species. The identification is done in a track-by-track level in the whole transverse momentum range. The method completes and expands the detectors' particle identification capabilities.

In this thesis the spectra of the identified charged pions as function of transverse momentum, pseudorapidity and rapidity are explicitly calculated. The corresponding correction factors of geometrical acceptance, efficiency and purity and the systematic errors are studied as well. For these purposes, both simulated and real data are analyzed in the same way.

Then the resonances  $K^*(892)^0$  and  $\phi(1020)$  are studied, since they mainly decay in pions and kaons ( $K^* \rightarrow K^\pm \pi^\mp$  και  $\phi \rightarrow K^+ K^-$ ). Specifically their masses, widths and corrected spectra are calculated as a function of transverse momentum .

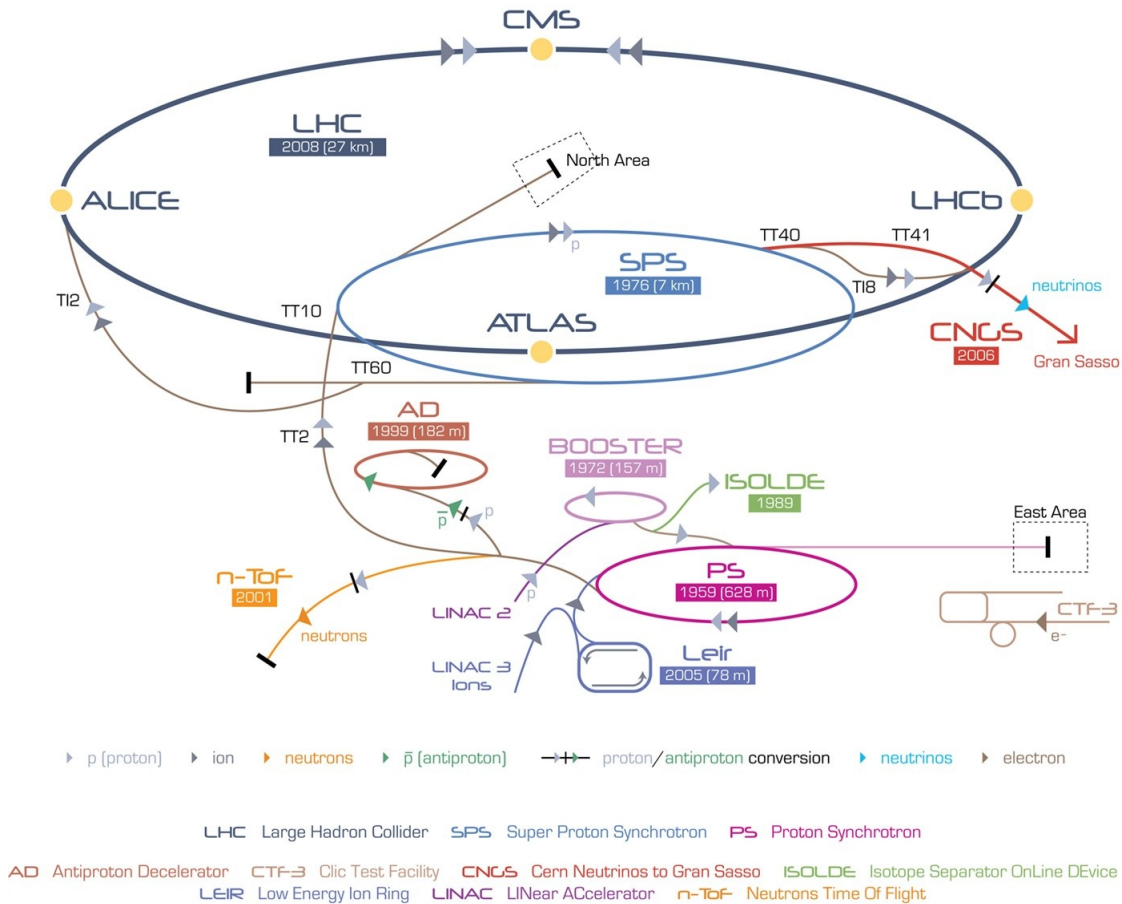
# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Ο μεγάλος συγκρουστής αδρονίων - LHC</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Το πείραμα ALICE</b>	<b>8</b>
2.1	Στόχοι του πειράματος	8
2.2	Η ανιχνευτική διάταξη	8
2.2.1	Οι μαγνήτες	9
2.2.2	ITS (Inner Tracking System) - Εσωτερικό σύστημα ανίχνευσης	9
2.2.2.1	Silicon Pixel Detectors - SPD	10
2.2.2.2	Silicon Drift Detectors - SDD	10
2.2.2.3	Silicon Strip Detectors - SSD	11
2.2.3	TPC (Time Projection Chamber) - Θάλαμος Χρονικής Προβολής	11
2.2.4	TRD (Transition Radiation Detector) - Ανιχνευτής ακτινοβολίας μετάβασης	14
2.2.5	TOF (Time Of Flight) - Ανιχνευτής χρόνου πτήσης	14
2.2.6	HMPID (High Momentum Particle Identification Detector) - Ανιχνευτής ταυτοποίησης σωματιδίων με μεγάλη ορμή	15
2.2.7	PHOS (PHOton Spectrometer) - Φασματόμετρο φωτονίων	15
2.2.8	FMS (Forward Muon Spectrometer) - Πρόσθιο φασματόμετρο μονίων	16
2.2.9	ZDC (Zero Degree Calorimeters) - Θερμιδόμετρα μηδενικής γωνίας	16
2.2.10	PMD (Photon Multiplicity Detector) - Ανιχνευτής πολλαπλότητας φωτονίων	16
2.2.11	FMD (Forward Multiplicity Detector) - Πρόσθιος ανιχνευτής πολλαπλότητας	16
2.2.12	V0	16
2.2.13	T0	16
2.2.14	ACORDE (A COsmic Ray DEtector) - Ανιχνευτής κοσμικής ακτινοβολίας	17
2.2.15	EMCAL (ElectroMagnetic CALorimeter) - Ηλεκτρομαγνητικό Καλορίμετρο	17
2.2.16	Trigger System - Σύστημα σκανδαλισμού	17
2.3	Σύστημα ανάλυσης δεδομένων	17
2.4	Ταυτοποίηση σωματιδίων στο ALICE	19
2.4.1	Ταυτοποίηση από τους ανιχνευτές	19
2.4.1.1	ITS	19
2.4.1.2	TPC	19
2.4.1.3	TOF	20
2.4.1.4	HMPID	21
2.4.2	Τοπολογική ταυτοποίηση	22
<b>3</b>	<b>Στόχοι της εργασίας</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>Ανάλυση δεδομένων</b>	<b>26</b>
4.1	Πλήθος τροχιών ανά γεγονός	26
4.2	Ανακατασκευή της θέσης του πρωτεύοντος κόμβου αλληλεπίδρασης (main vertex)	27
4.3	Επιλογή καλά ανακατασκευασμένων πρωτευσών τροχιών	28
4.4	Πρώτη επιλογή τροχιών που σχηματίζουν kink	30
4.5	Επιλογές γεωμετρίας	32
4.6	Τέλεια ταυτοποίηση (Perfect PID)	36
4.7	Ρεαλιστική ταυτοποίηση (Realistic PID)	36
4.8	Υπολογισμός διορθωτικών παραγόντων	43
4.8.1	Γεωμετρική αποδοχή	43
4.8.2	Απόδοση ανακατασκευής	44
4.8.3	Φυσική απόδοση ή Ολικός διορθωτικός παράγοντας	45
4.8.4	Απόδοση ταυτοποίησης	47
4.8.5	Προσμίξεις	47
4.8.6	Καθαρότητα	49
4.9	Συστηματικά σφάλματα	51

4.9.1	Σφάλμα επιλογής ακτινικής θέσης . . . . .	51
4.9.2	Σφάλμα επιλογής ελαχίστου αριθμού ιχνών (clusters) τροχιάς στον TPC . .	52
4.9.3	Σφάλμα επιλογής dE/dx . . . . .	54
4.9.4	Σημασία συστηματικών σφαλμάτων . . . . .	55
4.10	Διορθωμένες και κανονικοποιημένες κατανομές (συστηματικά και στατιστικά σφάλματα) . . . . .	55
4.11	Συντονισμοί . . . . .	58
4.11.1	Συντονισμός $K^*(892)$ . . . . .	61
4.11.2	Συντονισμός $\Phi(1020)$ . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>68</b>
<b>6</b>	<b>Παραρτήματα</b>	<b>70</b>
6.1	Κωδικοί σωματιδίων . . . . .	70
6.2	Χαρακτηριστικά των φορτισμένων πιονίων . . . . .	70
6.3	Χαρακτηριστικά των φορτισμένων καονίων . . . . .	71
6.4	Χαρακτηριστικά του συντονισμού $K^*(892)$ . . . . .	72
6.5	Χαρακτηριστικά του συντονισμού $\Phi(1020)$ . . . . .	72
6.6	Κινηματική . . . . .	73
6.6.1	Το σύστημα συντεταγμένων του ALICE . . . . .	73
6.6.2	Ωκύτητα . . . . .	74
6.6.3	Ψευδοωκύτητα . . . . .	74
6.6.4	Εξάρτηση του αριθμού των ανιχνεύσιμων σωματιδίων από την θέση και την ορμή . . . . .	74
6.6.5	Ορμή των θυγατρικών σωματιδίων στο σύστημα του κέντρου ορμής για τις διασπάσεις $K^+/\pi^+ \rightarrow \pi^+/\mu^+/e^+ + \pi^0/\nu_\mu/\nu_e$ . . . . .	74
6.6.6	Αναλλοίωτη μάζα του μπτρικού σωματιδίου για τις διασπάσεις $K^+/\pi^+ \rightarrow \pi^+/\mu^+/e^+ + \pi^0/\nu_\mu/\nu_e$ . . . . .	74
6.6.7	Μέγιστη γωνία του kink στο σύστημα του κέντρου ορμής . . . . .	75
6.6.8	Ελάχιστη απόσταση από κόμβο (Distance of Closest Approach - DCA) . . .	75
6.7	Ιστογράμματα σωματιδιακών κωδικών . . . . .	76

# 1 Ο μεγάλος συγκρουστής αδρονίων - LHC

Ο μεγάλος συγκρουστής (ή επιταχυντής) αδρονίων (LHC) [1, 2] είναι τοποθετημένος σε μια σήραγγα διαμέτρου 27 km η οποία είναι χτισμένη περίπου 50-175 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Βρίσκεται στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire – European Organization for Nuclear Research) κοντά στη Γενεύη και εκτείνεται στα σύνορα Ελβετίας και Γαλλίας. Είναι σχεδιασμένος για συγκρούσεις δύο αντίστροφα περιστρεφόμενων δεσμών πρωτονίων ή βαρέων ιόντων. Για συγκρούσεις πρωτονίων προβλέπεται ότι μπορεί να φτάσει σε ενέργεια 14 TeV στο κέντρο μάζας. Στο LHC [3] έχουν εγκατασταθεί τέσσερα μεγάλα (ATLAS, ALICE, CMS, LHCb) και δύο μικρότερα (TOTEM, LHCf) πειράματα, ενώ ετοιμάζεται κι ένα ακόμα μικρότερο εξειδικευμένο πείραμα (MoEDAL).



Σχήμα 1: Το συγκρότημα επιταχυντών του CERN [1].

Στο Σχήμα 1 δίνεται η συνολική εικόνα του συμπλέγματος των επιταχυντών που στηρίζουν τη λειτουργία του LHC και οι θέσεις των διαφόρων πειραμάτων. Όπως φαίνεται, στο CERN είναι εγκατεστημένοι διαδοχικά επιταχυντές αυξανόμενης ενέργειας. Κάθε ένας από αυτούς τροφοδοτεί με δέσμες τον επόμενο, ο οποίος αυξάνει την ενέργειά τους. Στον LHC, τον τελευταίο επιταχυντή της αλυσίδας η κάθε δέσμη πρωτονίων μπορεί να φτάσει σε ενέργεια 7 TeV. Στους περισσότερους από τους μικρότερους επιταχυντές είναι επίσης εγκατεστημένα διάφορα πειράματα.

Συνοπτικά, τα πρωτόνια επιταχύνονται μέχρι τον LHC ως εξής:

- Άτομα υδρογόνου ιονίζονται, ώστε να απομονωθούν τα πρωτόνια.
- Οι πυρηνές υδρογόνου ενέργειας 50 MeV εισάγονται από το Linac 2 στον προενισχυτή του συγκροτήρου πρωτονίων (PS Booster – PSB) που τα επιταχύνει μέχρι το 1.4 GeV.
- Στη συνέχεια, τα εισάγει στο σύγχροτρο πρωτονίων (Proton Synchrotron – PS), το οποίο με τη σειρά του τα επιταχύνει μέχρι τα 25 GeV.

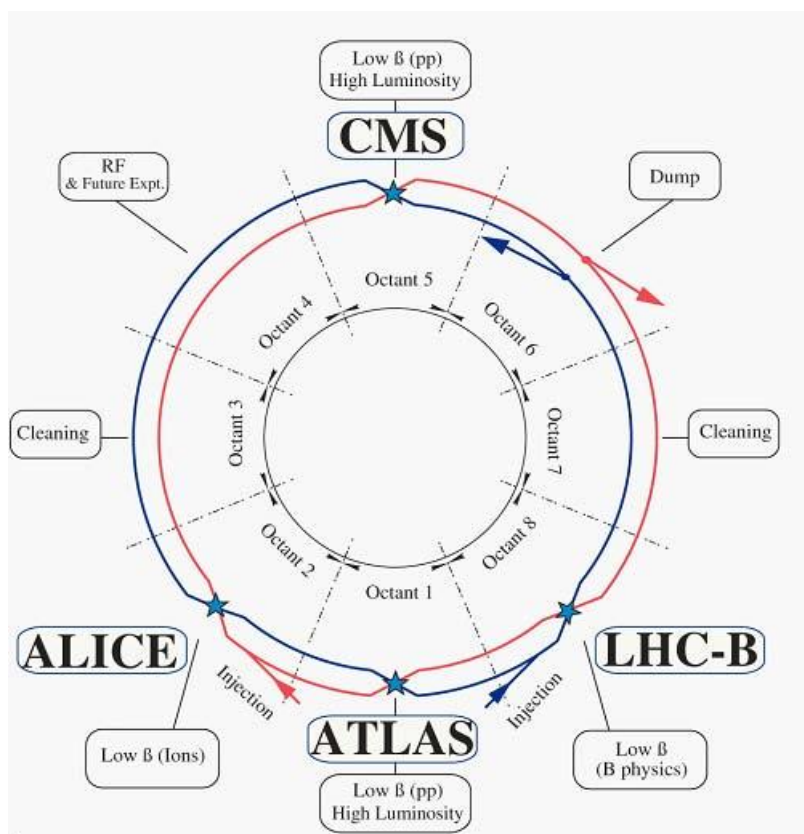
- Τα πρωτόνια εισάγονται μετά στο μεγάλο σύγχροτρο πρωτονίων (Super Proton Synchrotron – SPS) και φτάνουν σε ενέργεια 450 GeV.
- Τέλος, εισάγονται στον LHC σε δύο κατευθύνσεις (δεξιόστροφα και αριστερόστροφα – κάθε δακτύλιος χρειάζεται χρόνο 4 min 20 sec για να γεμίσει) και επιταχύνονται σε χρονικό διάστημα 20 min μέχρι και την ονομαστική ενέργεια των 7 TeV.

Τα πρωτόνια φτάνουν στον LHC σε μικρά σμήνη (bunches). Σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας, κάθε δέσμη περιέχει 2808 σμήνη και κάθε σμήνος περιέχει  $10^{11}$  πρωτόνια. Το μέγεθος κάθε σμήνους δεν είναι σταθερό καθώς αυτό περιστρέφεται – συμπιέζεται όσο το δυνατό περισσότερο στα σημεία αλληλεπίδρασης, ώστε να αυξηθεί η πιθανότητα αλληλεπίδρασης δύο πρωτονίων. Το μήκος κάθε σμήνους κατά την περιστροφή είναι μερικά εκατοστά και το πλάτος του είναι της τάξης του χιλιοστού. Όταν πλησιάζει στο σημείο αλληλεπίδρασης το μήκος του μειώνεται στα 16  $\mu\text{m}$  περίπου. Η απόσταση μεταξύ των σμηνών είναι 7 m που αντιστοιχούν σε 25 ns.

Αν και η φωτεινότητα (luminosity) στον LHC αναμένεται να φτάσει  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{c}^{-1}$  οι ανιχνευτές του ALICE θέτουν ένα χαμηλότερο όριο στα  $5 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{c}^{-1}$ . Ο πίνακας 1 δίνει συνοπτικά τις ονομαστικές παραμέτρους λειτουργίας του LHC στα 7 TeV για το πείραμα ALICE.

Πίνακας 1: Ονομαστικές παράμετροι λειτουργίας του LHC για το πείραμα ALICE [4].

Ενέργεια ανά σωματίο	7 TeV
Αριθμός σωματιδίων ανά σμήνος	$1.1 \cdot 10^{11}$
Αριθμός σμηνών ανά δέσμη	2808
Απόσταση μεταξύ σμηνών	24.95 ns
Μέσο τετραγωνικό μήκος σμήνους	7.7 cm
Μέση τετραγωνική ακτίνα δέσμης	71 $\mu\text{m}$
Φωτεινότητα	$5 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{c}^{-1}$



Σχήμα 2: Τομείς του LHC [2].

Ο LHC δεν είναι ένας τέλειος κύκλος (σχήμα 2). Αποτελείται από 8 τόξα, που περιέχουν 154 διπολικούς μαγνήτες το καθένα, και 8 σημεία εισαγωγής (insertions), τα οποία αποτελούνται από μια ευθύγραμμη περιοχή στα άκρα της οποίας υπάρχουν τα σημεία μετάβασης (transition regions). Τα σημεία εισαγωγής χρησιμοποιούνται για συγκρούσεις και εγκατάσταση πειραμάτων, εισαγωγή, εξαγωγή ή καθαρισμό των δεσμών. Μεταξύ των σημείων εισαγωγής ορίζονται 8 τομείς, οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι ως προς τη λειτουργία, την ψύξη και την συντήρησή τους.

Στον LHC υπάρχουν τρία συστήματα ανάπτυξης κενού: ένα για τους κρυομαγνήτες ένα για τη διανομή υγρού ηλίου και ένα στο εσωτερικό του επιταχυντή. Το τελευταίο είναι υψηλό κενό πίεσης  $10^{-13}$  atm. Επιπλέον, γύρω από τον σωλήνα του επιταχυντή είναι εγκατεστημένοι συνολικά 9600 μαγνήτες διαφόρων τύπων: διπολικοί, τετραπολικοί, εξαπολικοί, οκταπολικοί, δεκαπολικοί κλπ που συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της τροχιάς των συγκρουόμενων σωματιδίων. Για παράδειγμα, οι τετραπολικοί μαγνήτες χρησιμοποιούνται για την συγκέντρωση της δέσμης σε όσο το δυνατό μικρότερη διάμετρο.



## 2 Το πείραμα ALICE

Το πείραμα ALICE [5, 4, 6] είναι ένα από τα τέσσερα μεγάλα πειράματα που έχουν εγκατασταθεί στον LHC. Η συνεργασία για το πείραμα ALICE περιλαμβάνει πάνω από 1.200 φυσικούς, μηχανικούς και τεχνικούς από 132 πανεπιστημιακά ιδρύματα σε 36 χώρες.

### 2.1 Στόχοι του πειράματος

Το Καθιερωμένο Πρότυπο (ΚΠ, Standard Model) είναι η επικρατούσα θεωρία για τα στοιχειώδη σωματίδια και τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Το πείραμα ALICE σχεδιάστηκε για να συμβάλει στη μελέτη, κατανόηση και σύνδεση των μακροσκοπικών φαινομένων και ιδιοτήτων συστημάτων με πολλούς βαθμούς ελευθερίας με τους μικροσκοπικούς νόμους της φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων. Ειδικότερα, εστιάζει στη μελέτη της ισχυρά αλληλεπιδρούσας ύλης σε μεγάλες πυκνότητες και θερμοκρασίες.

Το ΚΠ προβλέπει την ύπαρξη αλλαγών φάσεων των κβαντικών πεδίων σε ορισμένες χαρακτηριστικές θερμοκρασίες. Σύμφωνα με την κοσμολογική θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης (Big-Bang Theory – BBT), το Σύμπαν εξελίχθηκε ταχέως διαστελλόμενο και ψυχόμενο από μια αρχική κατάσταση άπειρης πυκνότητας. Η ασυμμετρία ύλης και αντιύλης καθώς και άλλα χαρακτηριστικά του σύμπαντος πιστεύεται ότι συνδέονται με τις αλλαγές φάσεις που προβλέπει το ΚΠ και από τις οποίες πέρασε το σύμπαν από την αρχή της δημιουργίας του μέχρι σήμερα.

Στα πλαίσια του ΚΠ η ύπαρξη αλλαγών φάσης συνδέεται με το σπάσιμο θεμελιωδών συμμετριών, αλλά και με την ίδια την προέλευση της μάζας. Υπολογισμοί της Κβαντικής Χρωμοδυναμικής (ΚΧΔ, Quantum ChromoDynamics – QCD) πλέγματος (lattice) προβλέπουν ότι σε μια κρίσιμη θερμοκρασία περίπου  $\sim 170$  MeV που αντιστοιχεί σε ενεργειακή πυκνότητα  $\sim 1$  GeV  $\text{fm}^{-3}$  η πυρηνική ύλη υφίσταται μια αλλαγή φάσης που οδηγεί σε μια κατάσταση μη δεσμευμένων κουάρκ και γλουονίων, η οποία είναι γνωστή ως πλάσμα κουάρκ-γλουονίων (quark-gluon plasma – QGP). Επιπλέον, σε αυτές τις συνθήκες προβλέπεται η αποκατάσταση της χειραλικής συμμετρίας και η εξίσωση της ενεργού μάζας των κουάρκ με την αδρανειακή τους.

Βασικός στόχος του πειράματος ALICE είναι η μελέτη του πλάσματος κουάρκ-γλουονίων. Η ύπαρξη αυτής της μορφής της ύλης και οι ιδιότητές της είναι πολύ σημαντικά για την κατανόηση της δέσμευσης των παρτονίων και του σπασίματος της χειραλικής συμμετρίας.

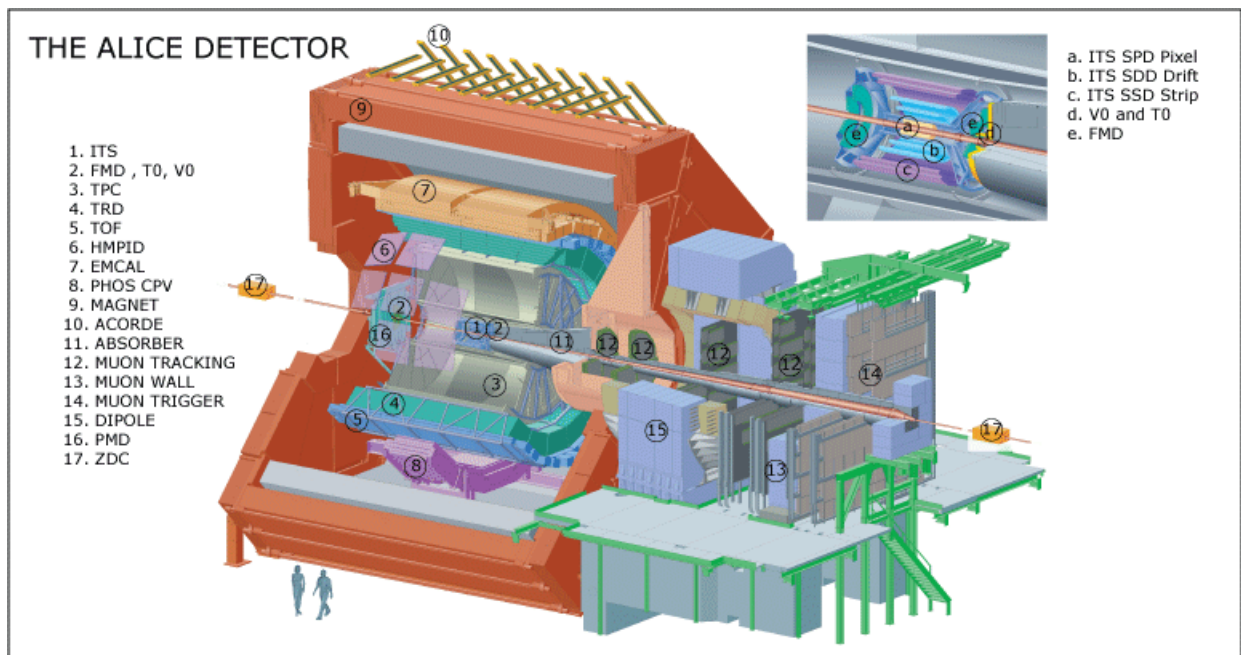
Για αυτόν τον σκοπό το πείραμα ALICE έχει σχεδιαστεί για τη μελέτη συγκρούσεων πρωτονίων αλλά και βαρέων ιόντων μολύβδου.

### 2.2 Η ανιχνευτική διάταξη

Το ALICE είναι τοποθετημένο στο σημείο 2 του LHC (σχήμα 1) σε βάθος 45 m από την επιφάνεια του εδάφους. Έχει συνολικό μήκος 26 m, ύψος 16 m και πλάτος 16 m και ζυγίζει 10000 τόνους.

Αποτελείται από τους κεντρικούς ανιχνευτές που καλύπτουν περιοχή μέσης ψευδοωκότητας  $|\eta| \leq 0.9$  σε όλο το αζιμούθιο και από μερικούς πρόσθιους ανιχνευτές (σχήμα 3). Οι κεντρικοί ανιχνευτές είναι τοποθετημένοι μέσα σε ένα σωληνοειδή μαγνήτη, στο εσωτερικό του οποίου δημιουργείται μαγνητικό πεδίο μέσης έντασης έως και 0.5 T. Ξεκινώντας από τη θέση του κόμβου της κύριας αλληλεπίδρασης και προχωρώντας προς τα έξω είναι τοποθετημένοι οι εξής ανιχνευτές: ITS, TPC, TRD και TOF. Δύο ακόμα ανιχνευτές καλύπτουν μικρότερες περιοχές: ο HMPID και το PHOS, ενώ υπάρχουν και οι ανιχνευτές μεγάλης ωκότητας που είναι οι εξής: FMS (στην περιοχή ψευδοωκότητας  $-4.0 \leq \eta \leq -2.4$ ), PMD (στην αντίθετη πλευρά από το FMS) και FMD (καλύπτει περιοχές μεγάλης ψευδοωκότητας μέχρι  $|\eta| = 5.1$ ). Επιπλέον υπάρχουν οι ανιχνευτές V0, T0 και ZDC που έχουν πιο περιορισμένους στόχους.

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι διάφοροι ανιχνευτές και οι βασικές λειτουργίες τους. Περισσότερα στοιχεία μπορούν να βρεθούν στις αναφορές [5, 4, 6]. Εδώ, δίνεται περισσότερη έμφαση στην περιγραφή του TPC, γιατί δεδομένα από αυτόν τον ανιχνευτή χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 3: Οι ανιχνευτές του ALICE.

### 2.2.1 Οι μαγνήτες

Το ALICE χρησιμοποιεί δύο μεγάλους μαγνήτες: ένα σωληνοειδή που είχε χρησιμοποιηθεί στο πείραμα L3 του LEP και ένα διπολικό. Η πολικότητα των πεδίων και των δύο μαγνητών μπορεί να αντιστραφεί σε πολύ μικρό χρόνο.

Ο σωληνοειδής μαγνήτης περικλείει το κεντρικό σύστημα των ανιχνευτών και έχει μήκος 12 m και ακτίνα 5 m. Η ονομαστική ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του είναι 0.5 T. Οι διακυμάνσεις του πεδίου στον όγκο των ανιχνευτών σε ακτίνα μέχρι 2.5 m και διαμήκη απόσταση  $\pm 2.5$  m από το κέντρο του κυλίνδρου είναι μικρότερες από 2%.

Ο διπολικός μαγνήτης είναι τοποθετημένος σε απόσταση 7 m από τον κόμβο της κύριας αλληλεπίδρασης και περίπου 10 cm από το σωληνοειδές. Το πεδίο του, βαθμίδας 3 T·m είναι οριζόντιο, κάθετο στον κύριο άξονα και χρησιμοποιείται για το φασματόμετρο μονίων.

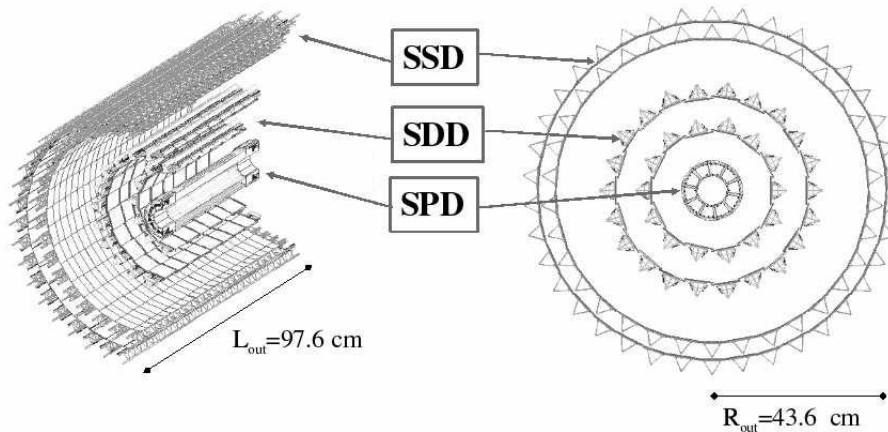
### 2.2.2 ITS (Inner Tracking System) - Εσωτερικό σύστημα ανίχνευσης

Οι κύριοι στόχοι του ITS είναι:

- η ανακατασκευή του κόμβου της κύριας αλληλεπίδρασης με ακρίβεια μεγαλύτερη από 100  $\mu\text{m}$ ,
- η ανακατασκευή δευτερευόντων κόμβων από διασπάσεις υπερονίων και βραχύβιων μεσονίων,
- η ανίχνευση και ταυτοποίηση σωματιδίων με ορμή μικρότερη από 200 MeV/c (είναι ο μόνος ανιχνευτής με αυτή τη δυνατότητα),
- η βελτίωση της διακριτικής ικανότητας του TPC στη μέτρηση της ορμής και της γωνίας τροχιών με μεγάλη εγκάρσια ορμή που διέρχονται κι από τους δύο ανιχνευτές,
- η ανακατασκευή τροχιών που διασχίζουν τις νεκρές περιοχές του TPC.

Σωματίδια με μικρή ορμή (γύρω στα 100 MeV/c) ανιχνεύονται μονό στο ITS. Αυτό δεν συμβάλει μονό στην ακρίβεια της μέτρησης της ορμής, αλλά και στον καλύτερο διαχωρισμό των τροχιών με παραπλήσιες ορμές. Οι απαιτήσεις στην ακρίβεια μέτρησης της γωνίας καθορίζονται από την ανάγκη της ακριβούς μέτρησης της θέσης του κύριου κόμβου και της αρχής κάθε τροχιάς. Η

ακρίβεια αυτών των μετρήσεων εξαρτάται από τη διακριτική ικανότητα, την τοποθέτηση και το πάχος του πρώτου στρώματος του ITS.



Σχήμα 4: Τομή του ITS του ALICE [5].

Το ITS αποτελείται από έξι κυλινδρικά στρώματα ανιχνευτών πυριτίου, τοποθετημένα σε ακτίνες περίπου 3.9 cm, 7.6 cm, 15.0 cm, 23.9 cm, 38 cm και 43.0 cm. (σχήμα 4 Καλύπτει την περιοχή ψευδοωκότητας  $|\eta| < 0.9$  τουλάχιστον για την περιοχή του κύριου κόμβου αλληλεπίδρασης που προσδιορίζεται με ακρίβεια 10.6 cm περίπου στη διεύθυνση των συγκρουόμενων δεσμών. Η εξωτερική ακτίνα συμπίπτει με την εσωτερική του TPC και η εσωτερική ακτίνα είναι η ελάχιστη που επιτρέπεται από την ακτίνα του σωλήνα του LHC (3 cm). Το εσωτερο στρώμα καλύπτει μεγαλύτερη περιοχή ψευδοωκότητας  $|\eta| < 1.98$ , ώστε μαζί με τον FMD να παρέχει πλήρη κάλυψη για τη μέτρηση του πλήθους των τροχιών φορτισμένων σωματιδίων.

Λόγω της υψηλής πυκνότητας σωματιδίων – μέχρι και 80σωματίδια/cm<sup>2</sup>, και για την επίτευξη της απαιτούμενης διακριτικής ικανότητας των παραμέτρων κρούσης, έχουν επιλεγεί οι ανιχνευτές SPD (Silicon Pixel Detectors) για τα δύο εσωτερικά στρώματα και οι ανιχνευτές SDD (Silicon Drift Detectors) για τα επόμενα δύο στρώματα, ενώ για τα δύο εξωτερικά στρώματα, όπου η πυκνότητα των σωματιδίων είναι μικρότερη του 1 σωματιδίου/cm<sup>2</sup>, έχουν επιλεγεί οι ανιχνευτές SSD (Silicon Strip Detectors).

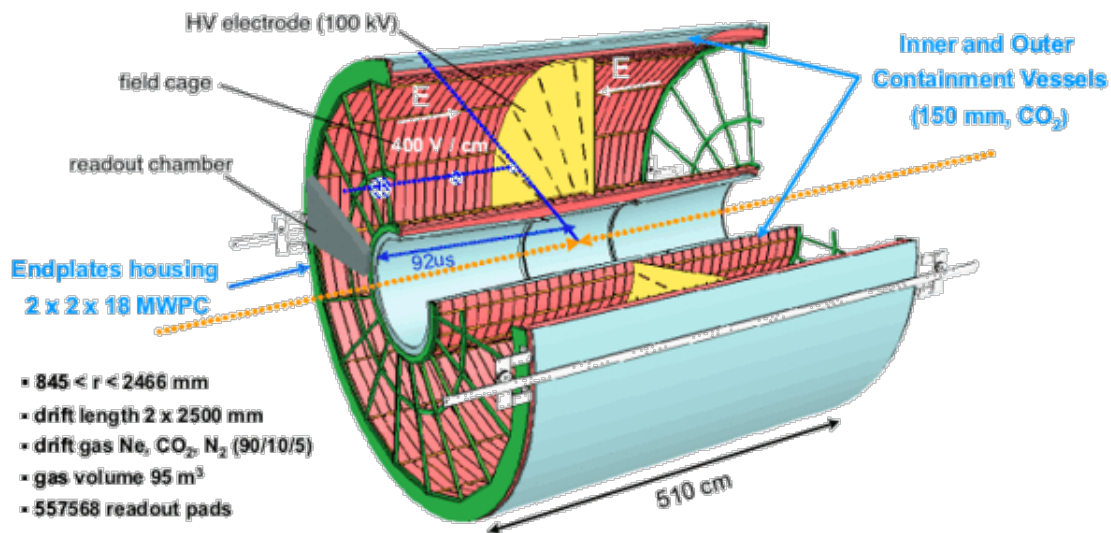
**2.2.2.1 Silicon Pixel Detectors - SPD** Τα δύο εσωτερικά στρώματα του ITS είναι πολύ σημαντικά για τον προσδιορισμό της θέσης του κόμβου της κύριας αλληλεπίδρασης, αλλά και για τη μέτρηση των παραμέτρων κρούσης δευτερευόντων τροχιών που προέρχονται από ασθενείς διασπάσεις παράξενων, γοπτευτικών και όμορφων σωματιδίων. Θα λειτουργούν σε μια περιοχή όπου η πυκνότητα τροχιών μπορεί να αγγίζει τις 80τροχιές/cm<sup>2</sup>. Επομένως αυτό το κομμάτι του ανιχνευτή πρέπει να έχει υψηλή ακρίβεια και διακριτική ικανότητα, αλλά και να λειτουργεί σε περιβάλλον σχετικά υψηλής ραδιενέργειας (σε 10 χρόνια λειτουργίας αναμένεται η συνολική δόση που θα απορροφήσει το εσωτερικό στρώμα να φτάσει τα 2.2 kGy).

Οι SPD χρησιμοποιούν υβριδικούς ανιχνευτές πυριτίου που αποτελούνται από δισδιάστατους αισθητήρες ανάστροφα πολωμένων διόδων πάχους 200 μm, ενσωματωμένων σε microchip. Οι SPD δεν παρέχουν πληροφορίες για την απώλεια ενέργειας των σωματιδίων και έτσι δεν συνεισφέρουν στην ταυτοποίησή τους.

**2.2.2.2 Silicon Drift Detectors - SDD** Οι ανιχνευτές SDD (Silicon Drift Detector) αποτελούν τα δυο ενδιάμεσα στρώματα του ITS, όπου η πυκνότητα των φορτισμένων σωματιδίων αναμένεται να φτάσει τα 7 σωματίδια/cm<sup>2</sup>. Είναι κατασκευασμένοι από στρώματα ομογενούς πυριτίου υψηλής αντίστασης, πάχους 300 μm. Έχουν πολύ καλή διακριτική ικανότητα ανίχνευσης πολλαπλών τροχιών και παρέχουν πληροφορίες για ενεργειακές απώλειες συνεισφέροντας στην ταυτοποίηση σωματιδίων από το ITS.

**2.2.2.3 Silicon Strip Detectors - SSD** Τα δυο εξωτερικά στρώματα του ITS είναι πολύ σημαντικά για τη σύνδεση των τροχιών μεταξύ του TPC και του ITS. Συμβάλλουν επίσης στη ταυτοποίηση σωματιδίων μικρής ορμής, παρέχοντας πληροφορίες για απώλειες ενέργειας. Τα στρώματα αυτά αποτελούνται από διπλής όψεως SSD (Silicon Strip Detectors) στερεωμένους σε στρώματα από ίνες άνθρακα. Το σύστημα είναι βελτιστοποιημένο για να έχει μικρή μάζα ώστε να αποφεύγονται οι πολλές σκεδάσεις.

### 2.2.3 TPC (Time Projection Chamber) - Θάλαμος Χρονικής Προβολής



Σχήμα 5: Ο ανιχνευτής TPC του ALICE.

Ο TPC είναι ο κύριος ανιχνευτής τροχιών του ALICE και σε συνδυασμό με τους υπόλοιπους ανιχνευτές του κεντρικού κυλίνδρου πρέπει να παρέχει ικανοποιητικά ακριβή μέτρηση των ορμών των φορτισμένων σωματιδίων, καλή διάκριση μεταξύ των γειτονικών τροχιών και ανακατασκευή των κόμβων. Καλύπτει την περιοχή ψευδοωκότητας  $|\eta| < 0.9$  και εγκάρσιες ορμές μέχρι περίπου  $100 \text{ GeV}/c$  με καλή ακρίβεια. Έχει σχεδιαστεί για ανίχνευση τροχιών με απόδοση μεγαλύτερη από 90%.

Αυτές οι απαιτήσεις πρέπει να πληρούνται σε συγκρούσεις Pb-Pb με ονομαστική φωτεινότητα (luminosity), που αντιστοιχεί σε ρυθμό αλληλεπίδρασης  $8 \text{ kHz}$  και από τις οποίες περίπου το 10% αναμένεται να είναι κεντρικές κρούσεις. Προκύπτει, δηλαδή, πολλαπλότητα φορτισμένων σωματιδίων  $dN_{ch}/d\eta = 8000$ , με αποτέλεσμα 20000 πρωτεύουσες και δευτερεύουσες τροχιές στα όρια της γεωμετρικής αποδοχής, δηλαδή μια πολύ μεγάλη πυκνότητα τροχιών για έναν TPC. Για συγκρούσεις πρωτονίου - πρωτονίου, ο νεκρός χρόνος του TPC είναι περιοριστικός παράγοντας.

Ο TPC είναι ο κύριος ανιχνευτής για τη μελέτη αδρονικών καταστάσεων. Οι αδρονικές μετρήσεις δίνουν πληροφορίες για τη γένση των σωματιδίων και τη χωροχρονική εξέλιξη του συστήματος. Ειδικότερες απαιτήσεις για αδρονικές μετρήσεις στο TPC είναι οι εξής:

- Διακριτική ικανότητα ορμής: Για την μελέτη μαλακών κρούσεων απαιτείται διακριτική ικανότητα 1% για ορμές μικρότερες από  $100 \text{ MeV}/c$ . Από την άλλη, οι σκληρές κρούσεις θέτουν τις απαιτήσεις για την περιοχή υψηλών εγκάρσιων ορμών. Η διακριτική ικανότητα ορμής για τροχιές μεταξύ  $100 \text{ MeV}/c$  και  $1 \text{ GeV}/c$  που ανακατασκευάζονται από το TPC είναι μεταξύ 1-2% και εξαρτάται από το μαγνητικό πεδίο. Για την μέτρηση μεγαλύτερων ορμών είναι απαραίτητη η χρήση του TPC σε συνδυασμό με το ITS και τον TRD. Με τη χρήση αυτών των ανιχνευτών μπορούμε να πετύχουμε διακριτική ικανότητα ορμής περίπου 10% για τροχιές με εγκάρσια ορμή  $100 \text{ GeV}/c$  σε μαγνητικό πεδίο  $0.5 \text{ T}$ .

- Διαχωρισμός τροχιών: Για να διακριθούν αποτελεσματικά τροχιές σωματιδίων με πολύ μικρή διαφορά ορμών χρειάζεται πολύ καλή διακριτική ικανότητα ορμής. Η απαιτούμενη διακριτική ικανότητα εξαρτάται από το μέγεθος της πηγής και πρέπει να είναι περίπου 5 MeV/c ή καλύτερη για πηγή μεγέθους 20 fm. Η απαίτηση αυτή ικανοποιείται για όλες τις συνιστώσες της ορμής σε μαγνητικό πεδίο 0.5 T.
- Διακριτική ικανότητα απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους dE/dx: Η ταυτοποίηση σωματιδίων με μέτρηση της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους (dE/dx) επιτυγχάνεται σε μικρές ορμές όταν ο ιονισμός από διαφορετικούς τύπους σωματιδίων είναι καλά διαχωρίσιμος. Για να καλυφθεί όλη η περιοχή των ορμών μέχρι μερικά GeV/c χρειάζονται επιπλέον μετρήσεις από άλλους ανιχνευτές (πχ TOF). Για ακόμα μεγαλύτερες ορμές μέχρι μερικές δεκάδες GeV/c θα είναι δυνατόν τουλάχιστον σε στατιστική βάση να διαχωρίσουμε αδρονικά είδη εάν η διακριτική ικανότητα απώλειας ενέργειας (dE/dx) είναι μεγαλύτερη από 7%. Σύμφωνα με τις μέχρι τώρα προσομοιώσεις, η ανάλυση των μετρήσεων ιονισμού εξαρτάται από την πυκνότητα των σωματιδίων και αγγίζει το 6.9% για εξαιρετικά μεγάλες πυκνότητες.
- Αντιστοίχιση τροχιών με αυτές του ITS είναι απαραίτητη για να μετρηθεί η παράμετρος κρούσης τους ως προς τη θέση του κόμβου της κύριας αλληλεπίδρασης και για την ανακατασκευή δευτερευόντων κόμβων. Επιπλέον, η αντιστοίχιση και με τροχιές άλλων ανιχνευτών θα βελτιώσει την ανάλυση ορμής σημαντικά για τροχιές με ορμή πάνω από μερικά GeV/c (μια βελτίωση κατά παράγοντα 5 αναμένεται για τροχιές με ορμές της τάξεως των 10 GeV/c). Για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή αντιστοίχιση, το πάχος του υλικού μεταξύ των ανιχνευτών πρέπει να είναι ελάχιστο.
- Πλήρης αξιωματική κάλυψη απαιτείται για την ολόπλευρη ανάλυση του γεγονότος.

Οι αρχικοί στόχοι του κεντρικού κυλίνδρου του ALICE διευρύνθηκαν με την προσθήκη του TRD. Σαν συνέπεια, η απόδοση και τα κριτήρια για τον TPC και τους άλλους ανιχνευτές επαναπροσδιορίστηκαν, ώστε να ικανοποιούν και τις απαιτήσεις για μετρήσεις λεπτονικών καταστάσεων. Ειδικότερα, ο σχεδιασμός του TPC αναπροσαρμόστηκε ώστε να παρέχει την μέγιστη δυνατή αποδοχή για ανίχνευση, καθ' όλο το μήκος τους, τροχιών υψηλής εγκάρσιας ορμής, και να εξασφαλίσει σημαντική στατιστική και καλή διακριτική ικανότητα ορμής για ζεύγη ηλεκτρονίων. Έτσι λοιπόν η ανενεργές περιοχές μεταξύ των θαλάμων ευθυγραμμίστηκαν προς το κέντρο του TPC.

Τα ηλεκτρόνια που ταυτοποιούνται από τους ανιχνευτές του κεντρικού κυλίνδρου και των οποίων τα διάφορα μεγέθη προσδιορίζονται από το ITS, θα χρησιμοποιηθούν για να μετρηθεί η παραγωγή γοιτευτικών και όμορφων σωματιδίων. Επιπλέον μετρήσεις που αφορούν την παράμετρο κρούσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον διαχωρισμό των απευθείας παραγόμενων J/ψ μεσονίων από αυτά που παράγονται κατά την β-διάσπαση.

Ειδικότερες απαιτήσεις για λεπτονικές μετρήσεις στο TPC είναι οι εξής:

- Απόδοση ανίχνευσης: Η απόδοση ανίχνευσης τροχιών σωματιδίων με εγκάρσια ορμή μεγαλύτερη από 1 GeV/c, τα οποία εισέρχονται στον TRD, πρέπει να είναι η μέγιστη δυνατή. Η συνδυασμένη απόδοση ανίχνευσης των ανιχνευτών του κεντρικού κυλίνδρου (ITS, TPC, TRD) είναι πάνω από 90% για τις ορμές αυτές.
- Διακριτική ικανότητα ορμής: Η διακριτική ικανότητα ορμής για ηλεκτρόνια με εγκάρσια ορμή κοντά στα 5 GeV/c πρέπει να είναι καλύτερη από 1.5%, ώστε να επιτευχθεί διακριτική ικανότητα μάζας μικρότερη από 1% για ζεύγη ηλεκτρονίων και να είναι δυνατός ο διαχωρισμός των μελών της οικογένειας Y. Η διακριτική ικανότητα αυτή μπορεί να επιτευχθεί με χρήση και των τριών κεντρικών ανιχνευτών κατά τη λειτουργία τους σε μαγνητικό πεδίο 0.5 T.
- Διακριτική ικανότητα απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους (dE/dx): Η ταυτοποίηση ηλεκτρονίων από το TRD πρέπει να συμπληρωθεί από τις μετρήσεις απωλειών ενέργειας

στο TPC για ορμές πάνω από 1 GeV/c και κυρίως μέχρι 3 GeV/c, προκειμένου να επιτευχθεί ο απαιτούμενος παράγοντας απόρριψης πιονίων. Για να γίνει αυτό, πρέπει ο TPC να παρέχει διακριτική ικανότητα ενέργειας ανά μονάδα μήκους καλύτερη από 10% στο υψηλής πολλαπλότητας περιβάλλον που δημιουργείται από συγκρούσεις Pb-Pb. Η αναμενόμενη ακρίβεια των μετρήσεων ιονισμού προκύπτει τελικά πολύ καλύτερη από την επιθυμητή.

- Ανταπόκριση σε υψηλούς ρυθμούς κρούσεων: Για να ανιχνευθούν ηλεκτρόνια που εντοπίζονται και στον TRD, ο TPC πρέπει να ανταποκρίνεται σε ρυθμό κεντρικών κρούσεων 200 Hz. Δεν υπάρχει αρκετή εμπειρία με τέτοιους ρυθμούς σε μεγάλους TPC και η προσομοίωση δείχνει ότι η λειτουργία του είναι οριακή. Πιθανές απώλειες ακρίβειας αναμένεται να αποφευχθούν με κατάλληλες διορθώσεις και σκανδαλισμό.
- Υψηλό επίπεδο σκανδαλισμού: Δεδομένων των περιορισμών που προαναφέρθηκαν και την ανάγκη εντοπισμού σπάνιων διεργασιών, όπως παραγωγή του  $J/\psi$  και του  $Y$ , χρειάζεται σκανδαλισμός υψηλού επιπέδου για να επιτευχθεί ικανοποιητική στατιστική.

Ο TPC έχει κυλινδρικό σχήμα, εσωτερικής ακτίνας 84.5 cm και εξωτερικής 246.6 cm, και συνολικό μήκος (κατά μήκος της διεύθυνσης των δεσμών) 500 cm. Ο ανιχνευτής είναι φτιαγμένος από ένα κυλινδρικό δοχείο γεμάτο με 88 m<sup>3</sup> Ne/CO<sub>2</sub> (90%/10%), διαμέσου του οποίου μεταφέρονται τα πρωτογενή ηλεκτρόνια σε απόσταση μέχρι και 2.5 m από το κεντρικό ηλεκτρόδιο στις δύο βάσεις του κυλίνδρου. Πολυκαναλικοί αναλογικοί θάλαμοι με καθοδικές εξόδους είναι τοποθετημένοι σε 18 τραπεζοειδείς τομείς σε κάθε βάση. (Σχήμα 5)

Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Γεωμετρική αποδοχή: η συνολική περιοχή ψευδοωκότητας που καλύπτεται από τον TPC είναι  $|\eta| < 0.9$  για πλήρη ανίχνευση τροχιάς, όπως και από τους ITS, TRD και TOF. Για ανίχνευση τροχιών περιορισμένου μήκους και φτωχότερη διακριτική ικανότητα ορμής καλύπτεται και ψευδοωκότητα μέχρι  $|\eta| = 1.5$ .
- Υλικό: η πυκνότητα των υλικών του TPC είναι η μικρότερη δυνατή, ώστε να αποφεύγονται πολλαπλές σκεδάσεις και παράγωγη δευτερευόντων σωματιδίων.
- Κυλινδρικό δοχείο: το κυλινδρικό δοχείο περιέχει ένα κεντρικό ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης και δύο αντίθετους ακτινικούς διαιρέτες τάσης, που δημιουργούν ένα ομογενές ηλεκτροστατικό πεδίο στο κύριο όγκο του αερίου που περιέχεται. Το κεντρικό δοχείο θα πρέπει να λειτουργεί σε υψηλή τάση, περίπου 400V/cm, που θα φτάνει στα 100 kV στο κεντρικό ηλεκτρόδιο και έχει σαν αποτέλεσμα ένα μέγιστο χρόνο ολίσθησης 90  $\mu$ s. Ένα μονωτικό στρώμα αερίου CO<sub>2</sub> περιβάλλει το κυλινδρικό δοχείο. Το κυλινδρικό δοχείο στο σύνολό του είναι έτσι κατασκευασμένο ώστε η μηχανική σταθερότητα και ακρίβειά του να είναι περίπου 250  $\mu$ m.
- Αέριο ανιχνευτή: το αέριο που περιέχεται είναι Ne/CO<sub>2</sub> (90%/10%) και έχει επιλεγεί γιατί προσφέρει μεγάλη ταχύτητα ολίσθησης, μικρή διάχυση, μικρή εμβέλεια ακτινοβολίας και επομένως μικρή πιθανότητα πολλαπλής σκέδασης και γενικότερα τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Το μειονέκτημα του μίγματος αυτού είναι ότι είναι ένα ψυχρό αέριο με σημαντική εξάρτηση της ταχύτητας ολίσθησης από την θερμοκρασία. Για αυτό το λόγο, ο TPC πρέπει να βρίσκεται σε θερμοκή σταθερότητα με διακυμάνσεις θερμοκρασίας μικρότερες από 0.1 K στο όγκο του κατά την διάρκεια λειτουργίας του.
- Πλακίδια εξόδου: τα πλακίδια εξόδου βρίσκονται στις δύο βάσεις του κυλίνδρου του TPC και έχουν μία συνολική ενεργή περιοχή 32.5 cm<sup>2</sup>. Οι θάλαμοι είναι αναλογικοί πολυκαναλικοί με καθοδική έξοδο. Εξαιτίας της ακτινική εξάρτησης της πυκνότητας τροχιών η έξοδος είναι χωρισμένη ακτινικά σε δύο θαλάμους με ελαφρώς διαφορετική γεωμετρία τοποθέτησης ηλεκτροδίων. Η ακτινική απόσταση της ενεργού περιοχής είναι από 84.1 cm μέχρι 132.1 cm και από 134.6 cm μέχρι 246.6 cm για τον εσωτερικό και εξωτερικό θάλαμο αντίστοιχα. Οι ανενεργές περιοχές μεταξύ των εσωτερικών γειτονικών θαλάμων είναι ευθυγραμμισμένες με εκείνες των εξωτερικών γειτονικών θαλάμων. Μια τέτοια τοποθέτηση βελτιστοποιεί την

ακρίβεια μέτρησης της ορμής των τροχιών, αλλά έχει το μειονέκτημα να δημιουργεί κενά στην γεωμετρική αποδοχή – περίπου στο 10% της αζιμουθιακής γωνίας ο ανιχνευτής δεν ανταποκρίνεται. Οι έξοδοι αποτελούνται από ένα δίκτυο ανοδικών και καθοδικών απλών ηλεκτροδίων και ένα δίκτυο αποκλεισμού φορτίου.

- Αποκλεισμός φορτίου: τα κανάλια εξόδου διαθέτουν ένα δίκτυο αποκλεισμού των ηλεκτρονίων που προέρχονται από τον κύριο όγκο του TPC, το οποίο ανοίγει μέσω σκανδαλισμού,  $6.5 \mu\text{s}$  (L1 trigger) μετά την κρούση και παραμένει ανοιχτό περίπου  $90 \mu\text{s}$ , όσος δηλαδή είναι και ο χρόνος ολίσθησης. Αυτό βοηθά στην αποφυγή δημιουργίας τοπικής συγκέντρωσης φορτίου.
- Βαθμονόμηση με λέιζερ: ένα σύστημα μερικών εκατοντάδων ακτίνων λέιζερ σε όλες τις περιοχές του TPC επιτρέπει ακριβή αναβαθμονόμηση των καναλιών εξόδου, της παρακολούθησης της θερμοκρασίας και των αλλοιώσεων φορτίου.

#### 2.2.4 TRD (Transition Radiation Detector) - Ανιχνευτής ακτινοβολίας μετάβασης

Η ακτινοβολία μετάβασης (transition radiation) παράγεται από σχετικιστικά ( $\gamma > 1000$ ) σωματίδια καθώς αυτά διασχίζουν τις διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ υλικών με διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές. Στην περιοχή ορμών 1-10 GeV/c μονό τα ηλεκτρόνια παράγουν ακτινοβολία μετάβασης. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που παράγονται από ιονισμό και απορρόφηση της ακτινοβολίας μετάβασης κινούνται προς τα ηλεκτρόδια ανόδου, όπου και δημιουργούν «χιονοστιβάδες» νέων ηλεκτρονίων. Έτσι, δημιουργείται το ηλεκτρικό ρεύμα που διοχετεύεται στα κανάλια εξόδου. Απαιτείται ένας παράγοντας απόρριψης πιονίων της τάξης του 100 σε απόδοση ηλεκτρονίων 90%.

Ο κύριος σκοπός του TRD είναι να παρέχει ικανοποιητική ταυτοποίηση ηλεκτρονίων στον κεντρικό κύλινδρο για ορμές μεγαλύτερες από 1 GeV/c όπου η απόρριψη των πιονίων στον TPC έχει μικρή ακρίβεια. Ο TRD βρίσκεται μεταξύ του TPC και του TOF και αποτελείται από 540 μεγάλους θαλάμους ολίσθησης, Το μέγεθος των θαλάμων είναι περίπου  $1.2 \cdot 1.4 \text{m}^2$  και είναι ταξινομημένοι σε 18 ομάδες που περιέχουν 5 διαμήκη και 6 ακτινικά στρώματα η κάθε μία. Έτσι, συνολικά αποτελείται από 540 κομμάτια. Κάθε κομμάτι αποτελείται από ένα θερμοαντικό στοιχείο πάχους 4.8 cm, ένα πολυκαναλικό θάλαμο εξόδου και ηλεκτρονικά στοιχεία. Το μίγμα αερίου στους θαλάμους εξόδου είναι Xe/CO<sub>2</sub> (85%/15%) και η απόδοση ιονισμού του είναι 5000.

Ο TRD καλύπτει περιοχή ψευδοωκότητας  $|\eta| < 0.9$ , όπως και οι υπόλοιποι κυλινδρικοί ανιχνευτές του ALICE. Ο TRD πρέπει να έχει δυνατότητες ανίχνευσης ελαφρά καμπυλωμένων τροχιών, ενώ μια διακριτική ικανότητα ορμής 5% στην περιοχή εγκάρσιων ορμών 1–10 GeV/c είναι αρκετή. Επιπλέον, ο TRD πρέπει να συμπληρώνει τις ικανότητες ανίχνευσης των υπόλοιπων ανιχνευτών του ALICE. Έτσι, οι τροχιές που ανακατασκευάζονται από τα 6 στρώματα του TRD πρέπει να αντιστοιχίζονται στις τροχιές που ανακατασκευάζονται στο TPC. Όλα αυτά μεταφράζονται στις εξής απαιτήσεις: διακριτική ικανότητα θέσης με  $\sigma_y < 400 \mu\text{m}$  και γωνιακή διακριτική ικανότητα με  $\sigma_{\phi} < 1^\circ$ .

#### 2.2.5 TOF (Time Of Flight) - Ανιχνευτής χρόνου πτήσης

Ο TOF ειδικεύεται στην ανίχνευση φορτισμένων σωματιδίων σε μία πολύ μεγάλη περιοχή του φασικού χώρου. Οι βασικές απαιτήσεις από τον ανιχνευτή αυτόν είναι οι εξής:

- Πρέπει να καλύπτει περιοχή ψευδοωκότητας  $|\eta| < 0.9$  για περιοχή ορμών 0.2-2.5 GeV/c.
- Ο νεκρός χρόνος του TOF πρέπει να είναι μικρότερος από 100 ps (για ολική διακριτική ικανότητα χρόνου της τάξεως των 150 ps συμπεριλαμβανομένων όλων των σφαλμάτων εγγυάται αξιόπιστο διαχωρισμό πιονίων – καονίων μέχρι το 1.7 GeV/c).

Καθώς μια μεγάλη περιοχή πρέπει να καλυφθεί από τον TOF (περίπου  $160 \text{m}^2$ ) ένας ανιχνευτής αερίου είναι η μόνη επιλογή. Η καλύτερη λύση θεωρήθηκε ότι είναι ένας θάλαμος με

ανθεκτικές πλάκες μεταξύ των οποίων υπάρχουν δέκα κενά (Multigap Resistive Plate Chamber – MRPC).

Η βασική αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο γεγονός ότι το ηλεκτρικό πεδίο είναι ισχυρό και ομογενές σε όλο τον όγκο του ανιχνευτή. Κάθε ιονισμός που παράγεται από εισερχόμενα φορτισμένα σωματάρια ξεκινά αμέσως μια διαδικασία «χιονοστιβάδας», η οποία παράγει τα σήματα που παρατηρούνται στα ηλεκτρόδια εξόδου. Κατά τον ιονισμό παράγονται ηλεκτρόνια αλλά και κατιόντα. Τα βαριά κατιόντα, πολύ πιο αργά σε σχέση με τα ηλεκτρόνια, μειώνουν το αισθητό ηλεκτρικό πεδίο με αποτέλεσμα η χιονοστιβάδα να μεγαλώνει μέχρι ένα μέγεθος και να σταματάει. Σε συνδυασμό με το παραπάνω φαινόμενο, η απόσταση μεταξύ των πλακών και η σταθερά Townsend του αερίου που χρησιμοποιήθηκε ( $C_4H_2F_4$  (90%),  $C_4H_{10}$ (5%),  $SF_6$ (5%)) έχουν επιλεγεί έτσι ώστε μικρές μεταβολές στην απόσταση του διάκενου (και άρα στην τιμή του πεδίου) να μην επηρεάζουν το σήμα που παρατηρείται στην έξοδο. Η διαδικασία αυτή δεν παράγει μεγάλη αβεβαιότητα χρόνου.

Ο TOF καλύπτει μία κυλινδρική επιφάνεια με πολικές γωνίες  $45^\circ - 135^\circ$  και πλήρη αζιμουθιακή κάλυψη. Το σύστημα έχει εσωτερική ακτίνα 370 cm και εξωτερική 399 cm. Αποτελείται από 18 αζιμουθιακούς τομείς και 5 κομμάτια κατά μήκος των συγκρουόμενων δεσμών. Συνολικά αποτελείται από 90 κομμάτια και 1674 MRPC. Κάθε λωρίδα MRPC έχει μήκος 1220mm και πλάτος 130 mm με ενεργό περιοχή  $1200 \cdot 74mm^2$  και υποδιαιρείται σε 96 μικρότερα κομμάτια, τα οποία αντιστοιχούν σε συνολικά περίπου 160000 κανάλια εξόδου. Οι λωρίδες αυτές είναι τοποθετημένες σε διαφορετικές γωνίες και επίπεδα ώστε να αποφευχθούν «νεκρές» περιοχές και να βελτιστοποιηθούν τα αποτελέσματα.

## 2.2.6 HMPID (High Momentum Particle Identification Detector) - Ανιχνευτής ταυτοποίησης σωματιδίων με μεγάλη ορμή

Ο HMPID αποτελείται από 7 ανιχνευτές Cherenkov κοντινής δακτυλιοειδούς εστίασης (Ring Imaging Cherenkov RICH) περίπου  $1.5 \cdot 1.5m^2$  ο καθένας και είναι στερεωμένος στην πάνω δεξιά πλευρά της διάταξης του ALICE σε γωνία περίπου  $30^\circ$  σε σχέση με τον κύριο άξονα του κεντρικού κυλίνδρου. Η συνολική επιφάνεια του είναι  $12m^2$ , έχει αποδοχή 5% στον φασικό χώρο του κεντρικού κυλίνδρου και θα ενισχύσει την ικανότητα ανακατασκευής του ALICE επιτρέποντας την ταυτοποίηση σωματιδίων με ορμή εκτός των διαστημάτων που ορίζονται από τις δυνατότητες μετρήσεων απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους από το ITS και τον TPC ή μετρήσεων χρόνου πτήσης από τον TOF.

Ακτινοβολία Cherenkov εκπέμπεται με μορφή κώνου γύρω από ταχέα σωματάρια, όταν αυτά διέρχονται από το στρώμα  $C_6F_{14}$  (perfluorohexane) πάχους 15 mm του ανιχνευτή. Αν τα σωματάρια προσπίπτουν κάθετα στη λεπτή φωτοευαίσθητη επιφάνεια από CsI του ανιχνευτή σχηματίζουν φωτεινά δαχτυλίδια, τα οποία ανιχνεύονται από ένα μετρητή φωτονίων.

## 2.2.7 PHOS (PHOton Spectrometer) - Φασματόμετρο φωτονίων

Ο ανιχνευτής PHOS είναι ένα υψηλής διακριτικής ικανότητας ηλεκτρομαγνητικό φασματόμετρο, το οποίο ανιχνεύει ηλεκτρομαγνητικά σωματάρια σε μια περιοχή περιορισμένης αποδοχής για κεντρικές ωκύτητες και παρέχει ταυτοποίηση φωτονίων αλλά και ταυτοποίηση μεσονίων μέσω της διάσπασης σε δύο φωτόνια. Αποτελείται από ένα ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο (Electromagnetic Calorimeter) και ένα ανιχνευτή φορτισμένων σωματιδίων (Charge – Particle Veto/CPV). Οι βασικές απαιτήσεις από τον ανιχνευτή αυτόν είναι η ικανότητα να αναγνωρίζει φωτόνια, να μπορεί να διακρίνει τα άμεσα φωτόνια από αυτά που προέρχονται από διάσπαση και να παρέχει μετρήσεις ορμής σε μία περιοχή μεγάλων ενεργειών.

Ο PHOS υποδιαιρείται σε 5 ανεξάρτητες μονάδες και είναι τοποθετημένος στο κάτω μέρος της διάταξης του ALICE σε μια απόσταση 460 cm από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης. Καλύπτει περιοχή ψευδοωκύτητας  $|\eta| < 0.12$  και  $100^\circ$  σε εύρος αζιμουθιακής γωνίας, ενώ έχει εμβαδό περίπου  $8m^2$ .



## 2.2.8 FMS (Forward Muon Spectrometer) - Πρόσθιο φασματόμετρο μονίων

Ο κύριος στόχος του μιονικού φασματόμετρου του ALICE είναι η μελέτη σωματιδίων και καταστάσεων βαριών κουάρκ μέσω της διάσπασής τους σε μόνια. Είναι ο μοναδικός ανιχνευτής στον LHC που μπορεί να ανιχνεύσει σωματάρια μηδενικής εγκάρσιας ορμής και καλύπτει περιοχή ψευδοωκότητας  $-4.0 < |\eta| < -2.5$ . Είναι τοποθετημένο στην μπροστινή πλευρά του ALICE σε γωνίες  $171^\circ - 178^\circ$  και αποτελείται από 3 απορροφητές, ένα διπολικό μαγνήτη, το σύστημα ανίχνευσης και σκανδαλισμού. Η διακριτική ικανότητα αναλλοίωτης μάζας που μπορεί να επιτύχει αγγίζει τα  $70 \text{ MeV}/c^2$  στην περιοχή των  $J/\Psi$  και τα  $100 \text{ MeV}/c^2$  στην περιοχή των  $\Lambda(1520)$  και επιτρέπει τον διαχωρισμό όλων των καταστάσεων.

## 2.2.9 ZDC (Zero Degree Calorimeters) - Θερμιδόμετρα μηδενικής γωνίας

Δύο πανομοιότυπα ζεύγη θερμιδόμετρων είναι τοποθετημένα σε κάθε πλευρά του σημείου της κύριας αλληλεπίδρασης και σε μηδενική γωνία σε σχέση με τη διεύθυνση των συγκρουόμενων δεσμών. Κάθε ζεύγος αποτελείται από:

- Δύο αδρονικά θερμιδόμετρα, ένα για νετρόνια και ένα για πρωτόνια, τοποθετημένα σε γωνία  $0^\circ$  σε σχέση με την δέσμη και σε απόσταση 116 m από το σημείο κύριας αλληλεπίδρασης.
- Ένα πρόσθιο ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο τοποθετημένο περίπου 7 m από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης που καλύπτει την περιοχή ψευδοωκότητας  $4.8 < |\eta| < 5.7$ .

## 2.2.10 PMD (Photon Multiplicity Detector) - Ανιχνευτής πολλαπλότητας φωτονίων

Ο PMD είναι ένας ανιχνευτής που μετράει την πολλαπλότητα και την χωρική κατανομή των φωτονίων στην πρόσθια περιοχή του ALICE. Είναι εγκατεστημένος σε απόσταση 360cm από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης, στην αντίθετη πλευρά από το FMS, και καλύπτει την περιοχή ψευδοωκότητας  $2.3 < |\eta| < 3.5$ . Αποτελείται από τέσσερις μονάδες κάθε μία από τις οποίες είναι αεροστεγώς κλεισμένη. Σε κάθε μονάδα υπάρχουν έξι πανομοιότυπες υποομάδες που χωρίζονται μεταξύ τους από λεπτές μονωτικές λωρίδες πάχους  $100 \mu\text{m}$ , με αποτέλεσμα να είναι ηλεκτρικά απομονωμένες.

## 2.2.11 FMD (Forward Multiplicity Detector) - Πρόσθιος ανιχνευτής πολλαπλότητας

Ο FMD έχει σχεδιαστεί να μετρά τα φορτισμένα σωματάρια που παράγονται και εκπέμπονται σε μικρές γωνίες σε σχέση με την διεύθυνση των συγκρουόμενων δεσμών. Καλύπτει περιοχή ψευδοωκότητας  $1.7 < |\eta| < 5.1$ . Εκτός από τον καθορισμό του αριθμού των παραγόμενων σωματιδίων σε συγκρούσεις pp ή Pb-Pb παίζει σημαντικό ρόλο στην μέτρηση διακυμάνσεων πολλαπλότητας. Αποτελείται από πέντε δακτυλίους ημιαγωγικών ανιχνευτών πυριτίου δύο τύπων. Έχει τρεις ομάδες ανιχνευτών με διαφορετική δομή.

## 2.2.12 V0

Ο ανιχνευτής V0 αποτελείται από δύο συστοιχίες σπινθηριστών τοποθετημένες στις δύο πλευρές του σημείου της κύριας αλληλεπίδρασης. Η δεξιά συστοιχία ονομάζεται V0R και η αριστερή V0L και είναι τοποθετημένη σε απόσταση περίπου 3.5 m από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης. Ο V0 είναι σχεδιασμένος να παρέχει βελτιωμένο σκανδαλισμό για τους κεντρικούς ανιχνευτές, μετρήσεις πολλαπλότητας και φωτεινότητας.

## 2.2.13 T0

Ο T0 είναι ένας ανιχνευτής χρονισμού και σκανδαλισμού με δυνατότητα μέτρησης της θέσης της κύριας αλληλεπίδρασης κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος. Έχει νεκρό χρόνο μικρότερο από 25 ns, ρυθμό καταγραφής 0.2 MHz, χρονική ανάλυση μικρότερη από 50 ps και αντοχή σε ραδιενέργεια 500 krad για λειτουργία σε μαγνητικό πεδίο 0.5 T. Η λειτουργία του

είναι σημαντική για τον ακριβή προσδιορισμό της χρονικής στιγμής της κρούσης, για βελτιώσεις στον σκανδαλισμό άλλων ανιχνευτών, για την ακριβή μέτρηση της θέσης του κύριου κόμβου αλληλεπίδρασης και για εκτιμήσεις πολλαπλότητας. Καλύπτει περιοχές ψευδοωκότητας  $2.9 < |\eta| < 3.3$  και  $5 < |\eta| < -4.5$ .

#### 2.2.14 ACORDE (A COsmic Ray DEtector) - Ανιχνευτής κοσμικής ακτινοβολίας

Το σύστημα σκανδαλισμού κοσμικών ακτίνων για το ALICE παρέχει ακριβείς πληροφορίες για κοσμικές ακτίνες ενέργειας  $10^{15} - 10^{17} eV$ . Είναι τοποθετημένος στο πάνω μέρος της διάταξης του ALICE και οι πληροφορίες που θα συλλέγει είναι χρήσιμες για την βαθμονόμηση, την ευθυγράμμιση και την λειτουργία των άλλων ανιχνευτών και κυρίως του TPC και του ITS. Έχει την δυνατότητα να λειτουργεί πριν αλλά και κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος. Ο τυπικός ρυθμός διέλευσης ατμοσφαιρικών μιονίων από το σύστημα του ALICE θα είναι λιγότερο από  $3 - 4 Hz/m^2$ .

Το σύστημα σκανδαλισμού κοσμικών ακτίνων (Cosmic Ray Trigger – CRT) αποτελείται από μία συστοιχία πλαστικών σπινθηριστών τοποθετημένων στις πάνω πλευρές του κεντρικού μαγνήτη. Με αυτήν την τοποθέτηση επιτυγχάνεται μια ομογενής απόδοση μεγαλύτερη από 90%.

#### 2.2.15 EMCAL (ElectroMagnetic CALorimeter) - Ηλεκτρομαγνητικό Καλορίμετρο

Η προσθήκη ηλεκτρομαγνητικού καλορίμετρου στο ALICE άρχισε να σχεδιάζεται το 2008 με στόχο την μελέτη του φαινομένου jet quenching που παρατηρείται όταν πίδακες σωματιδίων που δημιουργούνται στο εσωτερικό του πλάσματος κουάρκ - γλουονίων αλληλεπιδρούν με αυτό και εξασθενούν.

Πρόκειται για δειγματοληπτικό καλορίμετρο, κυλινδρικής γεωμετρίας, τοποθετημένο σε ακτίνα περίπου 4.5 m από το σωλήνα του LHC. Καλύπτει περιοχή ψευδοωκότητας  $|\eta| \leq 0.7$  και αζιμουθιακής γωνίας  $\Delta\phi = 107\text{deg}$ . Αποτελείται από πλακίδια σπινθηριστών μολύβδου και το μέγεθος του καθορίστηκε από το χώρο που είχε απομείνει ελεύθερος όταν ξεκίνησε ο σχεδιασμός του και από το βάρος που μπορούσε να συγκρατηθεί από τον κύριο μαγνήτη L3 του ALICE.

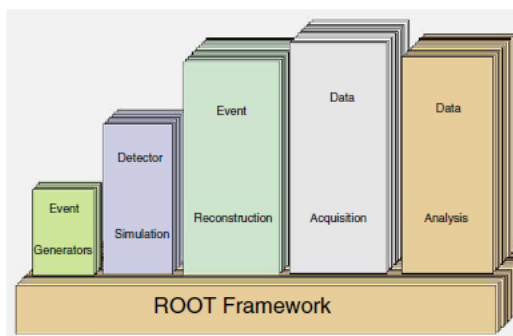
#### 2.2.16 Trigger System - Σύστημα σκανδαλισμού

Το σύστημα σκανδαλισμού του ALICE έχει σχεδιαστεί για την επιλογή γεγονότων με μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών σε ρυθμούς που ανταποκρίνονται στις φυσικές απαιτήσεις του πειράματος και στους περιορισμούς που θέτει το σύστημα συλλογής δεδομένων. Το σύστημα σκανδαλισμού καλείται να πετύχει την βέλτιστη απόδοση για τους ανιχνευτές του ALICE και είναι σχεδιασμένο για συγκρούσεις p – p αλλά και Pb – Pb. Το σύστημα έχει τρία επίπεδα σκανδαλισμού. Το πρώτο (L0) ενεργοποιείται στα  $1.2\mu s$  μετά την κύρια αλληλεπίδραση. Η γρήγορη αυτή απόκριση έχει επιλεγεί ώστε οι ανιχνευτές να μπορούν να ανταπεξέλθουν σε συνθήκες πολύ μεγάλου πλήθους τροχιών που δημιουργούνται κατά τις κρούσεις Pb-Pb. Το πρώτο, όμως, επίπεδο σκανδαλισμού είναι πάρα πολύ γρήγορο για να δεχτεί όλα τα δεδομένα, γι αυτό απαιτείται και ένα δεύτερο, επίσης γρήγορο, επίπεδο σκανδαλισμού (L1) στα  $6.5\mu s$ . Τέλος, υπάρχει και ένα τρίτο αργό επίπεδο (L2) στα  $85\mu s$ .

### 2.3 Σύστημα ανάλυσης δεδομένων

Το σύστημα ανάλυσης δεδομένων του ALICE ονομάζεται AliRoot και βασίζεται στο σύστημα ROOT, η δομή του οποίου φαίνεται στο σχήμα 6. Παρέχει ένα περιβάλλον για ανάπτυξη πακέτων λογισμικού που περιλαμβάνουν γένεση γεγονότων, προσομοίωση ανιχνευτών, ανακατασκευή γεγονότων, συλλογή και πλήρη ανάλυση δεδομένων.

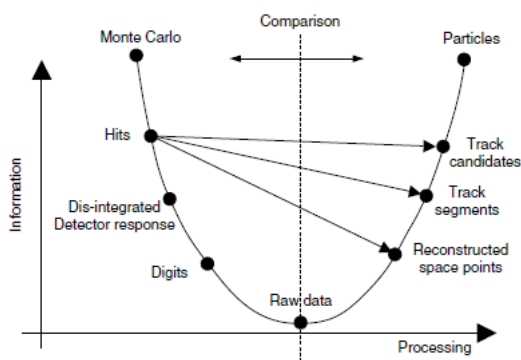
Το ROOT είναι γραμμένο σε C++ και παρέχει διεπαφή χρήστη μέσω γραμμής εντολών αλλά και γραφικού περιβάλλοντος. Παρέχει ένα πακέτο από εργαλείων αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού με όλες τις λειτουργίες που απαιτούνται για τον χειρισμό και την ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων. Ορίζοντας τα δεδομένα σαν ένα πακέτο αντικειμένων, ειδικευμένες μέθοδοι



Σχήμα 6: Δομή του συστήματος ανάλυσης δεδομένων ROOT.

αποθήκευσης χρησιμοποιούνται για την απευθείας πρόσβαση στα ξεχωριστά χαρακτηριστικά των αντικειμένων, χωρίς να χρειαστεί να αγγίξει το μεγαλύτερο μέρος των δεδομένων.

Το σύστημα σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να εξετάζει τις βάσεις δεδομένων παράλληλα σε δίκτυα υπολογιστών ή πολυπύρηνους επεξεργαστές. Το ROOT είναι ένα ανοιχτό σύστημα που μπορεί να διευρυνθεί δυναμικά μέσω της σύνδεσης σε εξωτερικές βιβλιοθήκες.



Σχήμα 7: Το σύστημα επεξεργασίας δεδομένων του ALICE.

Το AliRoot άρχισε να αναπτύσσεται το 1998, βασιζόμενο στο πακέτο ROOT, στις αρχές του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού και ανεπτυγμένο με τη γλώσσα C++.

Ο ρόλος του Aliroot φαίνεται στο σχήμα 7. Τα δεδομένα παράγονται μέσω προσομοίωσης (δηλαδή γεννητριών γεγονότων Monte Carlo και πακέτων προσομοίωσης της απόκρισης των ανιχνευτών) και μετατρέπονται σε δεδομένα που αναπαριστούν την απόκριση των ανιχνευτών. Τα δεδομένα που παράγονται από τις γεννήτριες γεγονότων περιέχουν όλες τις πληροφορίες για τα παραγόμενα σωματίδια (είδος σωματιδίου, ορμή, κτλ). Κατά την επεξεργασία αυτών οι πληροφορίες μειώνονται σε αυτές που παράγουν τα σωματίδια όταν διασχίζουν τους ανιχνευτές. Έτσι, παράγονται τα πρωτογενή δεδομένα προσομοίωσης. Σε αυτό το σημείο, αρχίζει η ανακατασκευή και ανάλυση των δεδομένων, με στόχο την πλήρη ανασύσταση των πληροφοριών για τις τροχιές και τις μάζες των σωματιδίων. Προκειμένου να αξιολογηθεί η διαδικασία ανακατασκευής και ανάλυσης τα ανακατασκευασμένα σωματίδια συγκρίνονται με τα παραγόμενα από τις γεννήτριες προσομοίωσης. Ο χρήστης επεμβαίνει σε αυτή την διαδικασία για να τη μελετήσει και να τη βελτιώσει.

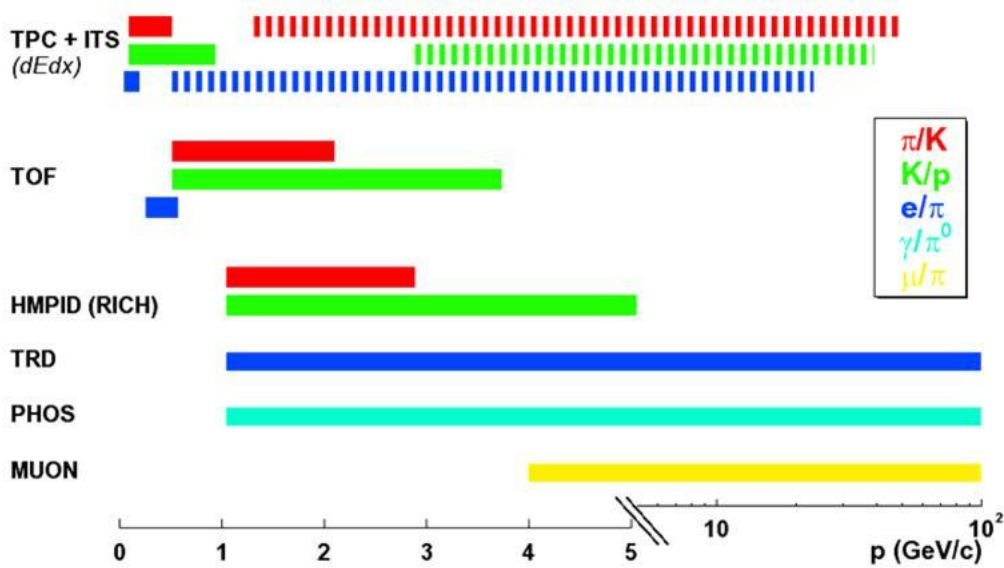
Για την προσομοίωση, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης πολλών εξωτερικών γεννητριών γεγονότων και συνδυασμών τους. Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες είναι οι PYTHIA και HIJING. Ως κύριος προσομοιωτής απόκρισης ανιχνευτών έχει χρησιμοποιηθεί το GEANT 3 που έχει βελτιωθεί και μετατραπεί στο GEANT 4 και το FLUKA.

Ο κώδικας της ανακατασκευής έχει ενσωματωθεί στις κλάσεις του AliRoot και αναπτύσσεται συνεχώς, χωρίς αυτό να είναι εμφανές στον τελικό χρήστη.

## 2.4 Ταυτοποίηση σωματιδίων στο ALICE

Για το ALICE είναι πολύ σημαντική η βέλτιστη δυνατή ταυτοποίηση σωματιδίων, δεδομένου ότι απαιτείται για τον έλεγχο πολλών υπογραφών του πλάσματος κουαρκ - γλουονίων. Γι αυτό το λόγο έχει γίνει προσπάθεια να αξιοποιηθούν όλες οι γνωστές μέθοδοι με την κατασκευή όλων των ειδών των ανιχνευτών. Αναλυτική παρουσίαση αυτών των μεθόδων γίνεται στις αναφορές [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Στο σχήμα 8 φαίνονται οι δυνατότητες ταυτοποίησης φορτισμένων σωματιδίων με τους ανιχνευτές του ALICE. Για παράδειγμα, ο διαχωρισμός  $K/\pi$  σε επίπεδο τροχιάς προς τροχιά μπορεί να γίνει με ακρίβεια  $3\sigma$  με συνδυασμό των μετρήσεων TPC και ITS στο διάστημα ορμής 0.1 - 0.5 GeV/c, με τον TOF στο διάστημα 0.5 - 2 GeV/c και με το HMPID στο 1 - 3 GeV/c.

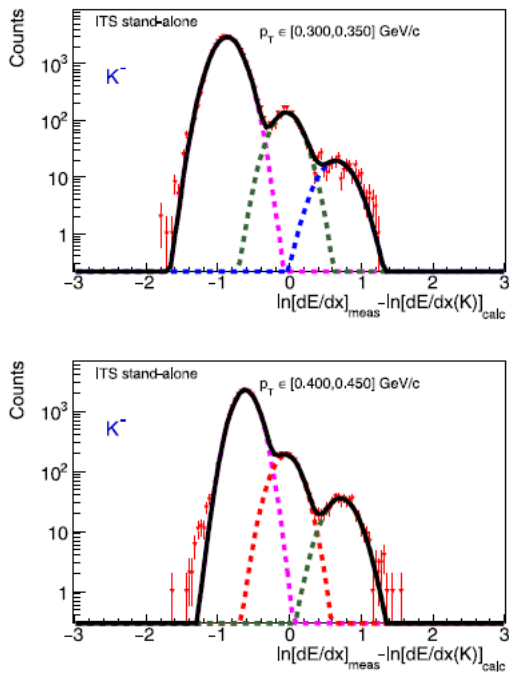
### 2.4.1 Ταυτοποίηση από τους ανιχνευτές



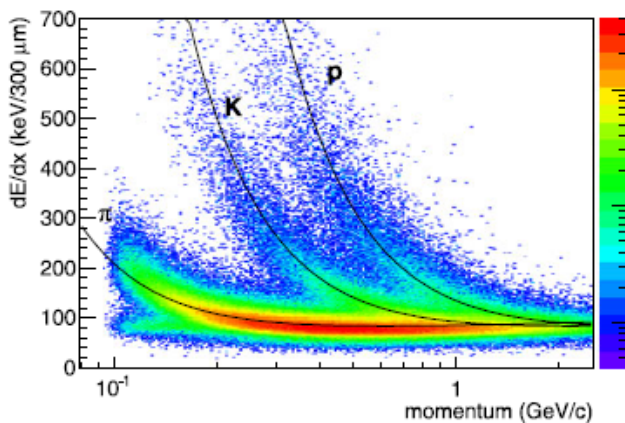
Σχήμα 8: Δυνατότητες ταυτοποίησης των ανιχνευτών του ALICE (γεμάτες γραμμές: διαχωρισμός με ακρίβεια  $3\sigma$ , διακεκομμένες γραμμές: διαχωρισμός με ακρίβεια  $2\sigma$ ). [6]

**2.4.1.1 ITS** Η ταυτοποίηση σωματιδίων από το ITS βασίζεται στη μέτρηση της απώλειας της ενέργειας τους ανά μονάδα μήκους διαδρομής μέσα στον ανιχνευτή (σχήμα 9). Η ποσότητα αυτή ( $dE/dx$ ) εξαρτάται για δεδομένη ορμή από το φορτίο και τη μάζα ηρεμίας των σωματιδίων σύμφωνα με τη σχέση Bethe-Bloch. Τα δύο εξωτερικά στρώματα SDD και SSD του ITS παρέχουν 4 μετρήσεις της ενέργειας ανά από τις οποίες υπολογίζεται η σταθμισμένη μέση τιμή των ενεργειακών απωλειών ανά μονάδα μήκους αγνοώντας τις δύο μεγαλύτερες σε τιμή μετρήσεις. Η ταυτοποίηση γίνεται σε στατιστικό επίπεδο με προσαρμογή μιας καμπύλης Gauss (και αγνοώντας την ουρά Landau) στις μετρήσεις απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους ενός δείγματος τροχιών των οποίων η εγκάρσια ορμή βρίσκεται σε συγκεκριμένο διάστημα (σχήμα 11). Επιτυγχάνεται, έτσι ταυτοποίηση πιονίων στην περιοχή χαμηλής εγκάρσιας ορμής (μεγαλύτερη από 100 MeV/c) που δεν είναι προσβάσιμη από άλλον ανιχνευτή, ενώ παράλληλα βελτιώνεται η ακρίβεια ταυτοποίησης από τον TPC.

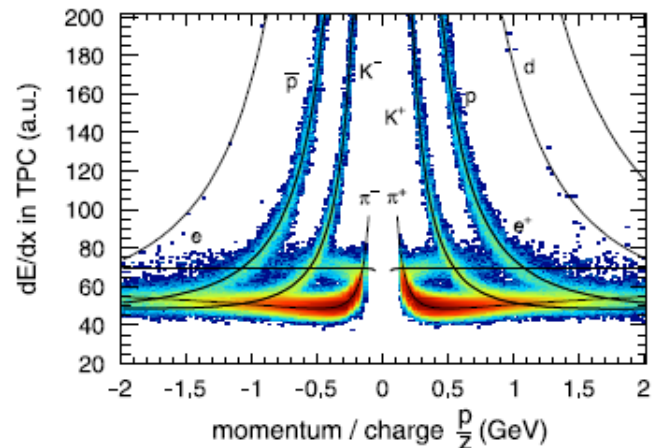
**2.4.1.2 TPC** Η ταυτοποίηση σωματιδίων από το TPC βασίζεται στη μέτρηση της απώλειας της ενέργειας τους ανά μονάδα μήκους διαδρομής μέσα στο αέριο του ανιχνευτή (σχήμα 10). Η ποσότητα αυτή ( $dE/dx$ ) εξαρτάται για δεδομένη ορμή από το φορτίο και τη μάζα ηρεμίας των σωματιδίων σύμφωνα με τη σχέση Bethe-Bloch. Για κάθε τροχιά που διέρχεται από τον TPC καταγράφονται έως και 159 μετρήσεις της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους από τις οποίες υπολογίζεται η μέση τιμή χρησιμοποιώντας το 60% περίπου των μετρήσεων. Αγνοείται, έτσι η ουρά Landau και η κατανομή πλησιάζει πολύ τη μορφή Gauss (σχήμα 15).



Σχήμα 11: Κατανομή της  $\ln(dE/dx)_{\text{measured}} - \ln(dE/dx)_K$  για διαφορετικά διαστήματα ορμής στο ITS. Οι γραμμές αντιστοιχούν σε Γκαουσιανές καμπύλες προσαρμοσμένες στα δεδομένα:  $p_T \in [0.300, 0.350]$  GeV/c: Η ροζ διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε πιόνια, η πράσινη σε καόνια και η μπλε σε πρωτόνια.  $p_T \in [0.400, 0.450]$  GeV/c: Η ροζ διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε πιόνια, η κόκκινη σε καόνια και η πράσινη σε πρωτόνια. (δεδομένα pp 900 GeV [10])

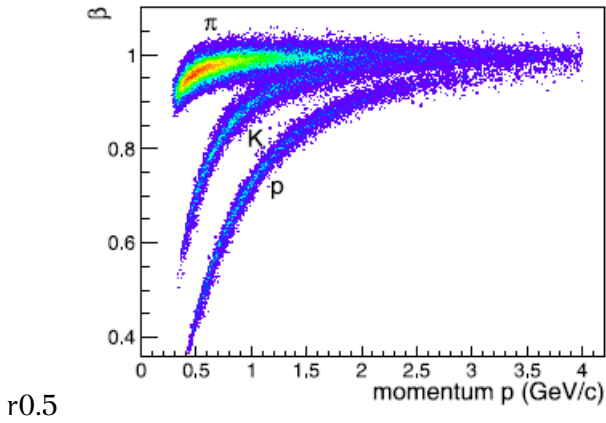


Σχήμα 9: Απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους ( $dE/dx$ ) συναρτήσει της ορμής όπως μετρώνται από το ITS. Οι καμπύλες για κάθε τύπο σωματιδίου προκύπτουν από προσαρμογή της σχέσης Bethe-Bloch στο συγκεκριμένο ανιχνευτή. (δεδομένα pp 900 GeV [10])

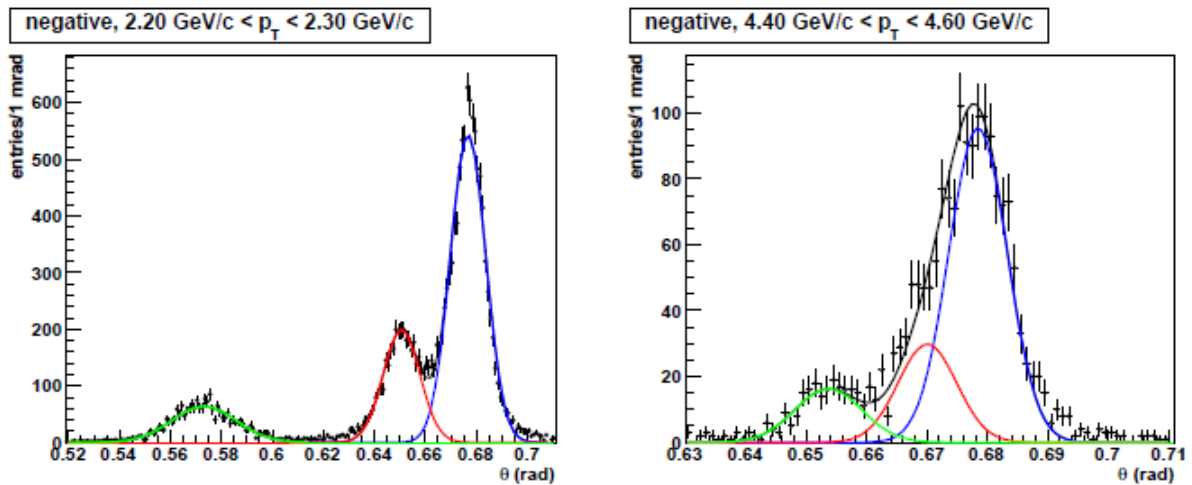


Σχήμα 10: Κατανομή της απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους ( $dE/dx$ ) συναρτήσει του λόγου ορμή/φορτίο όπως μετρώνται από το TPC. Οι καμπύλες για κάθε τύπο σωματιδίου προκύπτουν από προσαρμογή της σχέσης Bethe-Bloch στο συγκεκριμένο ανιχνευτή. (δεδομένα pp 900 GeV [10])

**2.4.1.3 TOF** Η ταυτοποίηση σωματιδίων από το TOF βασίζεται στη μέτρηση της ορμής και της ταχύτητάς τους. Η ταχύτητα υπολογίζεται ως ο λόγος του μήκους της ανακατασκευασμένης διαδρομής  $L$  ως προς το μετρούμενο χρόνο πτήσης των σωματιδίων. Στο σχήμα 12 φαίνεται η κατανομή της ταχύτητας των σωματιδίων συναρτήσει της ορμής τους. Κάθε λωρίδα αντιστοιχεί σε διαφορετικό είδος σωματιδίων και το εύρος της αντανακλά το σφάλμα στη μέτρηση του χρόνου πτήσης που είναι περίπου 180 ps. Με τον TOF επιτυγχάνεται διαχωρισμός καονίων/πιονίων με ακρίβεια  $2\sigma$  για ορμές μέχρι και 2 GeV/c.

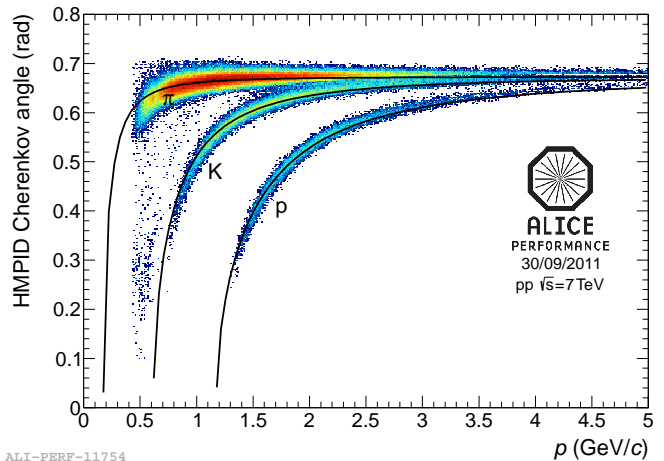


Σχήμα 12: Ταχύτητα σε μονάδες  $c$  συναρτήσει της ορμής των σωματιδίων, όπως μετράται από το TOF. (δεδομένα pp 900 GeV [10])



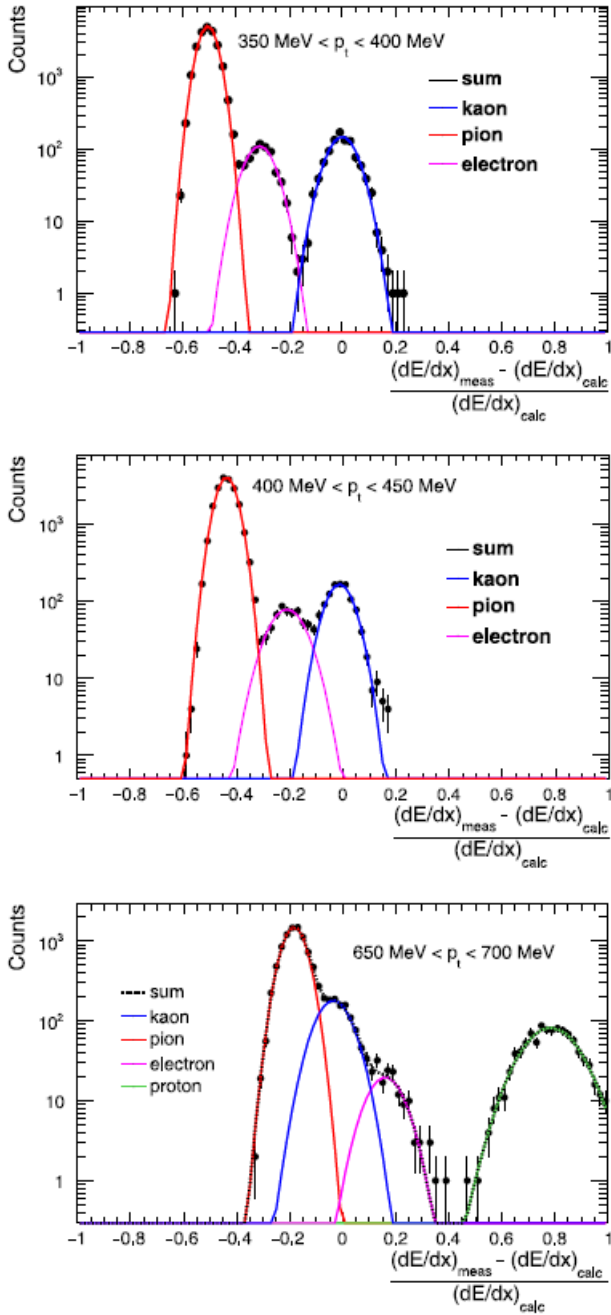
Σχήμα 13: Κατανομή της γωνίας Cherenkov όπως μετράται από το HMPID για διαφορετικά διαστήματα ορμής. Οι γραμμές αντιστοιχούν σε Γκαουσιανές καμπύλες προσαρμοσμένες στα δεδομένα: Οι πράσινες γραμμές αντιστοιχούν σε πρωτόνια, οι κόκκινες σε φορτισμένα καόνια και οι μπλε σε φορτισμένα πιόνια. (δεδομένα pp 7 TeV) [13]

**2.4.1.4 HMPID** Η ταυτοποίηση σωματιδίων από το HMPID βασίζεται στη μέτρηση της γωνίας Cherenkov, δηλαδή της γωνίας μεταξύ της διεύθυνσης της τροχιάς και της ακτινοβολίας Cherenkov, η οποία εκπέμπεται κωνικά γύρω από την τροχιά. Μετρώντας την ακτίνα των δαχτυλιδιών που σχηματίζονται όταν αυτή προσπίπτει σε ανιχνευτή φωτονίων υπολογίζεται η εν λόγω γωνία. Στο σχήμα 14 φαίνεται η κατανομή της γωνίας Cherenkov όπως μετράται από το HMPID συναρτήσει της ορμής των σωματιδίων. Κάθε λωρίδα αντιστοιχεί σε διαφορετικό είδος σωματιδίων και το εύρος της αντανακλά το σφάλμα στη μέτρηση της γωνίας Cherenkov. Με το HMPID επιτυγχάνεται διαχωρισμός καονίων/πιονίων με ακρίβεια  $2\sigma$  για ορμές μέχρι και 3 GeV/c.



ALI-PERF-11754

Σχήμα 14: Κατανομή της γωνίας Cherenkov όπως μετράται από το HMPID συναρτήσει της ορμής των σωματιδίων (δεδομένα pp 7 TeV) [13]

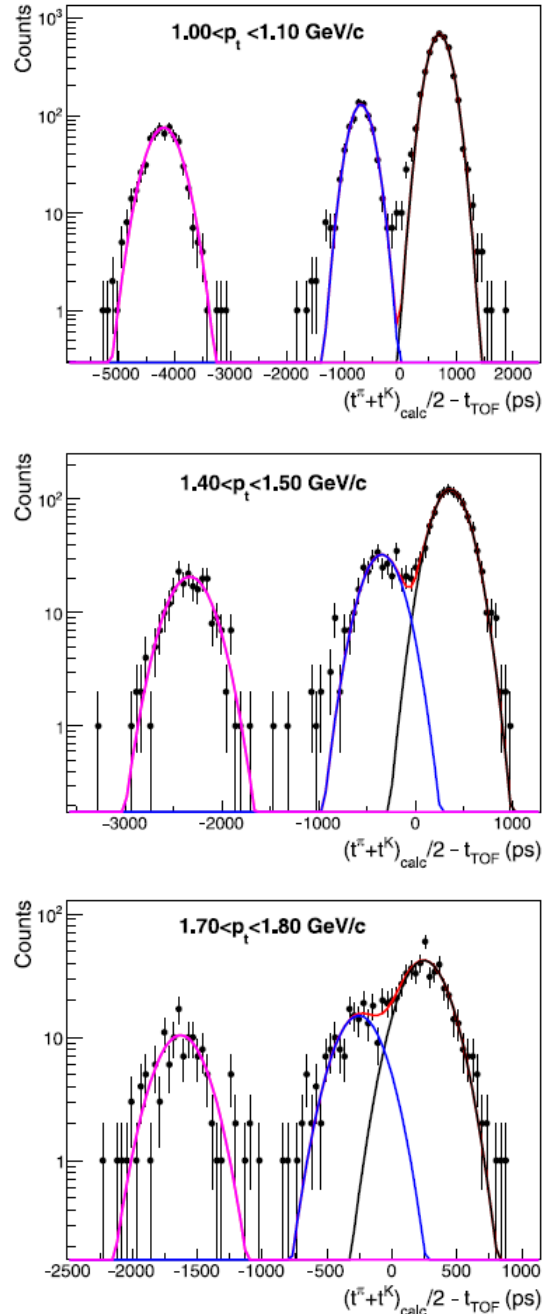


Σχήμα 15:  $(dE/dx)_{\text{measured}} - (dE/dx)_K / (dE/dx)_K$  για διαφορετικά διαστήματα ορμής στο TPC. Οι γραμμές αντιστοιχούν σε Γκαουσιανές καμπύλες προσαρμοσμένες στα δεδομένα. (δεδομένα pp 900 GeV [10])

## 2.4.2 Τοπολογική ταυτοποίηση

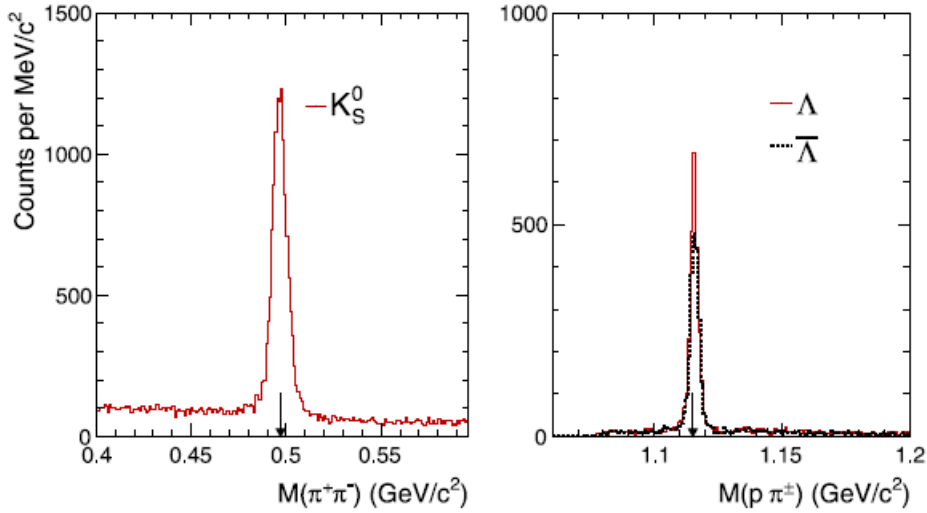
Παράξενα σωματίδια που διασπώνται ασθενώς με αρκετά μεγάλο χρόνο ζωής μπορούν να ταυτοποιηθούν μέσω της χαρακτηριστικής τοπολογίας των διασπάσεων τους.

Τα σωματίδια  $K_s^0$ ,  $\Lambda$  και  $\bar{\Lambda}$  ταυτοποιούνται μέσω της τοπολογίας V0 που περιγράφει τη γέννηση δύο φορτισμένων τροχιών σε κάποιο σημείο οι οποίες φαινομενικά δεν προέρχονται από κάποια



Σχήμα 16: Κατανομή της διαφοράς του μετρούμενου από τον TOF χρόνου πτήσης με το μέσο υπολογισθέντα για πόνια και καόνια για διάφορα διαστήματα εγκάρσιας ορμής. Οι γραμμές αντιστοιχούν σε Γκαουσιανές καμπύλες προσαρμοσμένες στα δεδομένα: Οι ροζ γραμμές αντιστοιχούν σε πρωτόνια, οι μπλε σε θετικά φορτισμένα καόνια και οι μαύρες σε θετικά φορτισμένα πόνια. (δεδομένα pp 900 GeV [10])

άλλη, γιατί η μπτρική τροχιά ανήκει σε ουδέτερο σωματίο που δεν ανιχνεύεται. Η ταυτοποίηση ξεκινά με την ανίχνευση των κόμβων διάσπασης τους, συνδυάζοντας δευτερεύουσες τροχιές που απέχουν λιγότερο από 0.5 cm μεταξύ τους. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η αναλλοίωτη μάζα των πιθανών συνδυασμών θυγατρικών σωματιδίων και τα προαναφερθέντα ουδέτερα σωματάρια εμφανίζονται ως συντονισμοί. Στο σχήμα 17 φαίνονται μερικά από τα αποτελέσματα της μεθόδου.



Σχήμα 17: Κατανομές της αναλλοίωτης μάζας των  $K_S^0$ ,  $\Lambda$  και  $\bar{\Lambda}$ ,  $\phi$  και του αθροίσματος  $\Xi^- + \Xi^+$ . Τα κάθετα βέλη προσδιορίζουν την ονομαστική μάζα των σωματιδίων, όπως αυτή έχει καταγραφεί από το PDG. (δεδομένα pp 900 GeV [11])

Αντίστοιχα, τα φορτισμένα καόνια και πιόνια ταυτοποιούνται μέσω της τοπολογίας kink που περιγράφει το φαινομενικό σπάσιμο μιας τροχιάς όταν ένα φορτισμένο σωματίο διασπάται σε ένα άλλο ίδιου φορτίου και ένα ουδέτερο. Η συγκεκριμένη μέθοδος ταυτοποίησης αποτελεί το αντικείμενο της εργασίας και γι αυτό περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.

### 3 Στόχοι της εργασίας

Ο κύριος στόχος του πειράματος ALICE είναι η μελέτη των ιδιοτήτων της ισχυρά αλληλεπιδρούσας ύλης και των καταστάσεων της και για τον λόγο αυτό είναι σημαντικός ο προσδιορισμός των λόγων των συναρτήσεων θρυμματισμού. Η ταυτοποίησή των πιονίων είναι σημαντική καθώς αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των παραγόμενων σωματιδίων. Η μελέτη των συντονισμών παρέχει αρκετές πληροφορίες τόσο για την μέτρηση της παραγωγής παραξενιάς στις συγκρούσεις pp όσο και για την μορφή της θερμής και πυκνής ύλης που παράγεται κατά τις συγκρούσεις βαρέων ιόντων. Έτσι απώτερος σκοπός είναι η σύγκριση των φασμάτων των πιονίων με υπάρχοντα πρότυπα για συγκρούσεις pp και στη συνέχεια με τα δεδομένα που θα προκύψουν από τις αλληλεπιδράσεις Pb-Pb.

Η ταυτοποίηση των πιονίων στο ALICE γίνεται μέσω των ανιχνευτών ITS, TPC, TOF και HMPID με χρήση διάφορων μεθόδων. Μέσω απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους από τους TPC και ITS, μέσω του χρόνου πτήσης από τον TOF και μέσω της ακτινοβολίας Cerenkov από τον HMPID. Οι ανιχνευτές αυτοί χρησιμοποιούνται επίσης για την ανίχνευση και τη μελέτη συντονισμών.

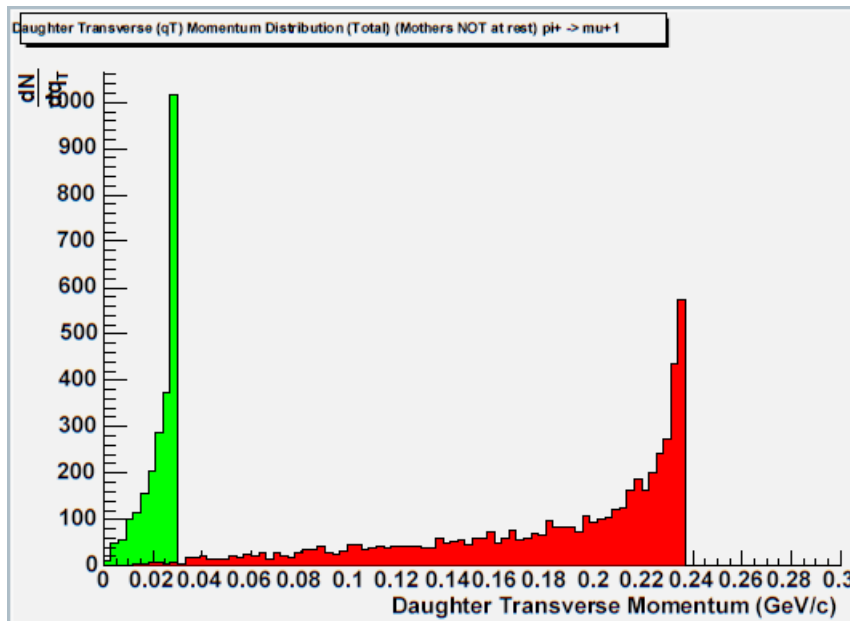


Πίνακας 2: Ανιχνευτική ικανότητα των διαφόρων ανιχνευτών ως προς την εγκάρσια ορμή (σε GeV/c).

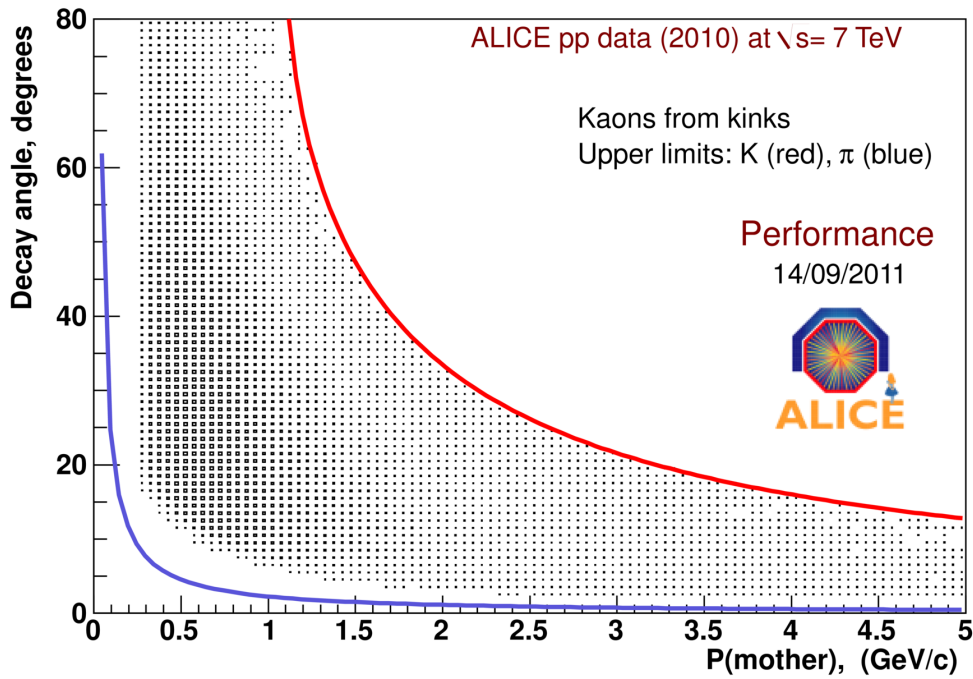
Analysis	$\pi$	K	$\rho$
ITSsa	0.1-0.6	0.2-0.5	0.3-0.6
ITC-TPC	0.2-0.55	0.25-0.5	0.4-0.85
TPC-TOF	0.25-1.2	0.3-1.2	0.45-2.0
TOF	0.5-2.5	0.5-2.5	0.8-4.0
HMPID	1.5-3.0	1.5-3.0	1.5-6.0
kinks		0.2-6.0	

Η χρήση τοπολογίας των ασθενών τους διασπάσεων («kinks») για ταυτοποίηση φορτισμένων καονίων και πιονίων [6, 12] αποτελεί μια ανεξάρτητη, εναλλακτική μέθοδο ταυτοποίησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί συγκριτικά για έλεγχο και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που προέρχονται από τους ανιχνευτές.

Οι κινηματικές μεταβλητές της διάσπασης φορτισμένων καονίων και πιονίων, όπως η εγκάρσια ορμή του θυγατρικού σωματιδίου στο σύστημα ηρεμίας του μητρικού ( $q_T$ ) και η γωνία διάσπασης είναι βασικά εργαλεία διαχωρισμού και ταυτοποίησης  $\pi/K$  (σχήματα 18 και 19). Συμπληρωματικές κινηματικές ιδιότητες και μεταβλητές της συγκεκριμένης τοπολογίας επιτρέπουν τον πολύ καλό διαχωρισμό των δύο ειδών σωματιδίων. Η ταυτοποίηση γίνεται σε επίπεδο τροχιάς με καθαρότητα μεγαλύτερη του 97%. Η ανάλυση εφαρμόζεται σε τροχιές που εντοπίζεται στις κεντρικότερες περιοχές του TPC ( $120 \text{ cm} < R < 210 \text{ cm}$ ), ώστε αυτές να είναι ικανοποιητικά ανακατασκευασμένες, δηλαδή το μήκος του να ξεπερνά τα 30 cm.



Σχήμα 18: Κατανομή της εγκάρσιας ορμής του θυγατρικού σωματιδίου στο σύστημα ηρεμίας του μητρικού για τις διασπάσεις  $K \rightarrow \mu\nu$  (κόκκινο) (μέγιστη τιμή: 236 GeV/c) και  $\pi \rightarrow \mu\nu$  (πράσινο) (μέγιστη τιμή: 30 GeV/c) (προσομοιωμένα δεδομένα [12])



Σχήμα 19: Γωνία του kink συναρτήσει της ορμής του μητρικού σωματιδίου. Η μπλε γραμμή ορίζει τη θεωρητικά υπολογιζόμενη μέγιστη γωνία διάσπασης για kinks πιονίων και η κόκκινη την αντίστοιχη μέγιστη γωνία για kinks καονίων. (δεδομένα pp 7 TeV)

Η χρήση της τοπολογίας kinks, λόγω της μεγάλης καθαρότητας που παρουσιάζει, ενδείκνυται και για την μελέτη συντονισμών. Οι συντονισμοί  $\phi(1020)$  και  $K^*(892)^0$  διασπώνται κατά κύριο λόγο σε καόνια και πιόνια, σωματάρια δηλαδή τα οποία μπορούμε να ανιχνεύσουμε χρησιμοποιώντας κινηματικές ιδιότητες και μεταβλητές της συγκεκριμένης τοπολογίας.

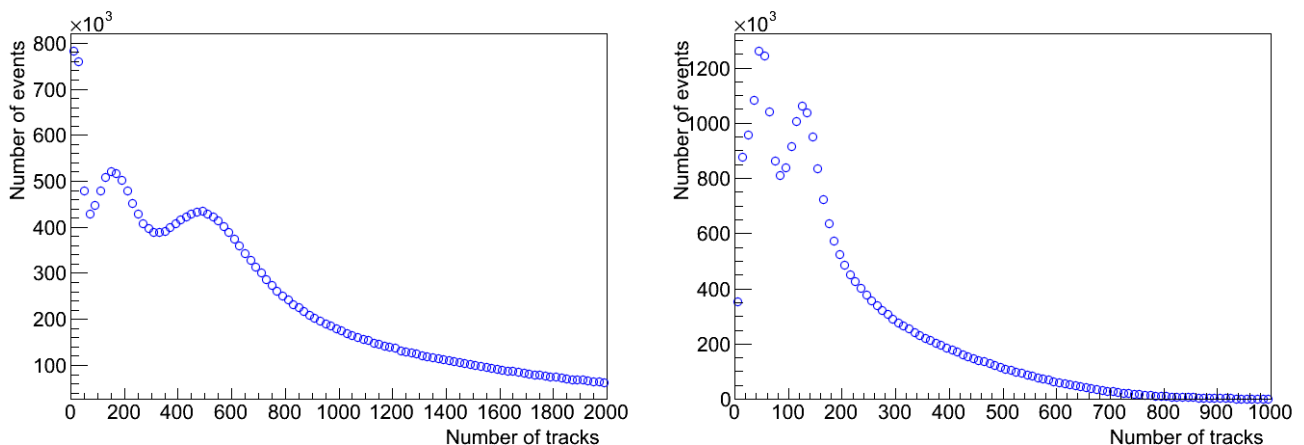
Στόχος της εργασίας είναι η αξιοποίηση της μεθόδου αυτής τόσο στην ταυτοποίηση φορτισμένων πιονίων όσο και στην μελέτη των παραπάνω συντονισμών.

## 4 Ανάλυση δεδομένων

Κατά την ανάλυση των δεδομένων έγινε επεξεργασία τόσο προσομοιωμένων όσο και πραγματικών δεδομένων. Έτσι γίνεται εκτίμηση της ακρίβειας των πραγματικών δεδομένων με τον υπολογισμό διορθωτικών παραγόντων και η διόρθωσή τους. Επίσης με την σύγκριση των δύο γίνεται και αξιολόγηση των μοντέλων προσομοίωσης. Για την εργασία χρησιμοποιήθηκαν προσομοιωμένα δεδομένα συγκρούσεων pp στα 7 TeV που παρήχθησαν μέσω των πακέτων προσομοίωσης Geant3 (προσομοίωση ανιχνευτών) και PYTHIA6 (προσομοίωση φυσικών διεργασιών) και ανακατασκευάστηκαν με τη βιβλιοθήκη AliRoot και το σύστημα Root. Αντίστοιχα τα πραγματικά δεδομένα προέρχονται από συγκρούσεις pp στα 7 TeV και αντιστοιχούν στις περιόδους λειτουργίας LHC10d(2010).

### 4.1 Πλήθος τροχιών ανά γεγονός

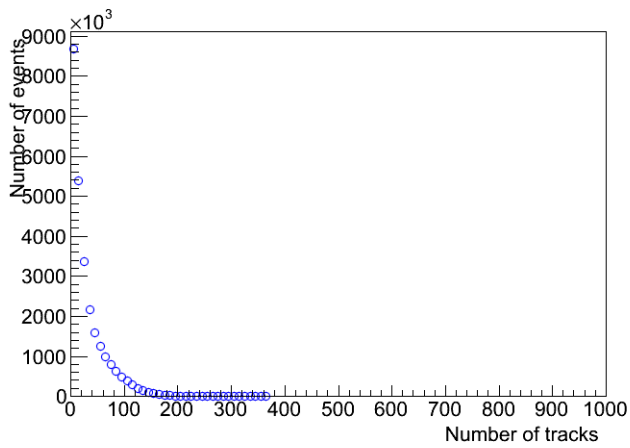
Σε κάθε γεγονός περιμένουμε την παραγωγή ενός πολύ μεγάλου αριθμού σωματιδίων, σημαντικό ποσοστό των οποίων θα αποτελείται από προϊόντα της κύριας αλληλεπίδρασης ([14, 15, 16]). Στη συνέχεια φαίνονται η κατανομή του πλήθους των σωματιδίων που παράγονται ανά προσομοιωμένο γεγονός (σχήμα 20). Οι περιορισμένες δυνατότητες των ανιχνευτών έχουν σαν αποτέλεσμα την ανακατασκευή μικρότερου αριθμού σωματιδίων από αυτόν που παράγονται (σχήμα 21).



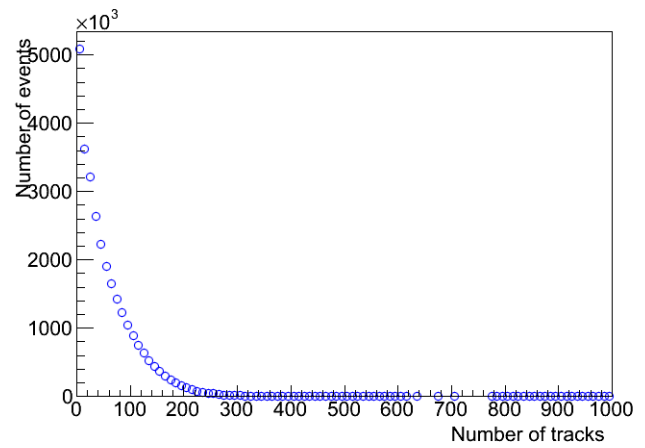
(α') Σωματίδια που παράγονται σε ένα προσομοιωμένο γεγονός.

(β') Σωματίδια που προέρχονται από την κύρια αλληλεπίδραση ανά προσομοιωμένο γεγονός.

Σχήμα 20: Κατανομές του πλήθους των σωματιδίων ανά προσομοιωμένο γεγονός.



(α') Ανακατασκευασμένες τροχιές ανά προσομοιωμένο γεγονός.

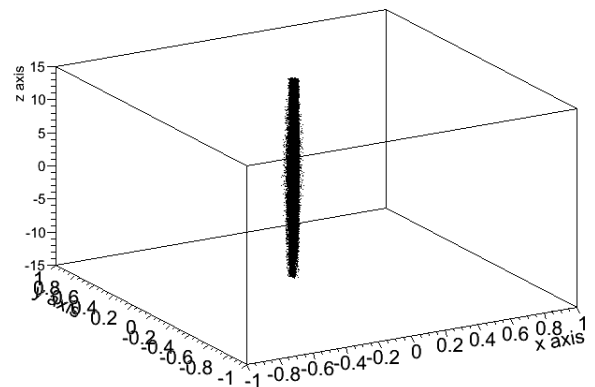
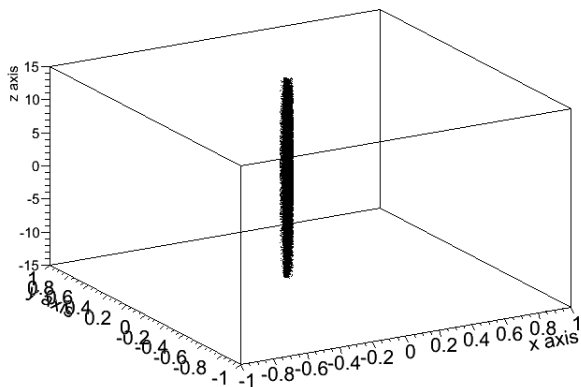


(β') Ανακατασκευασμένες τροχιές ανά πραγματικό γεγονός.

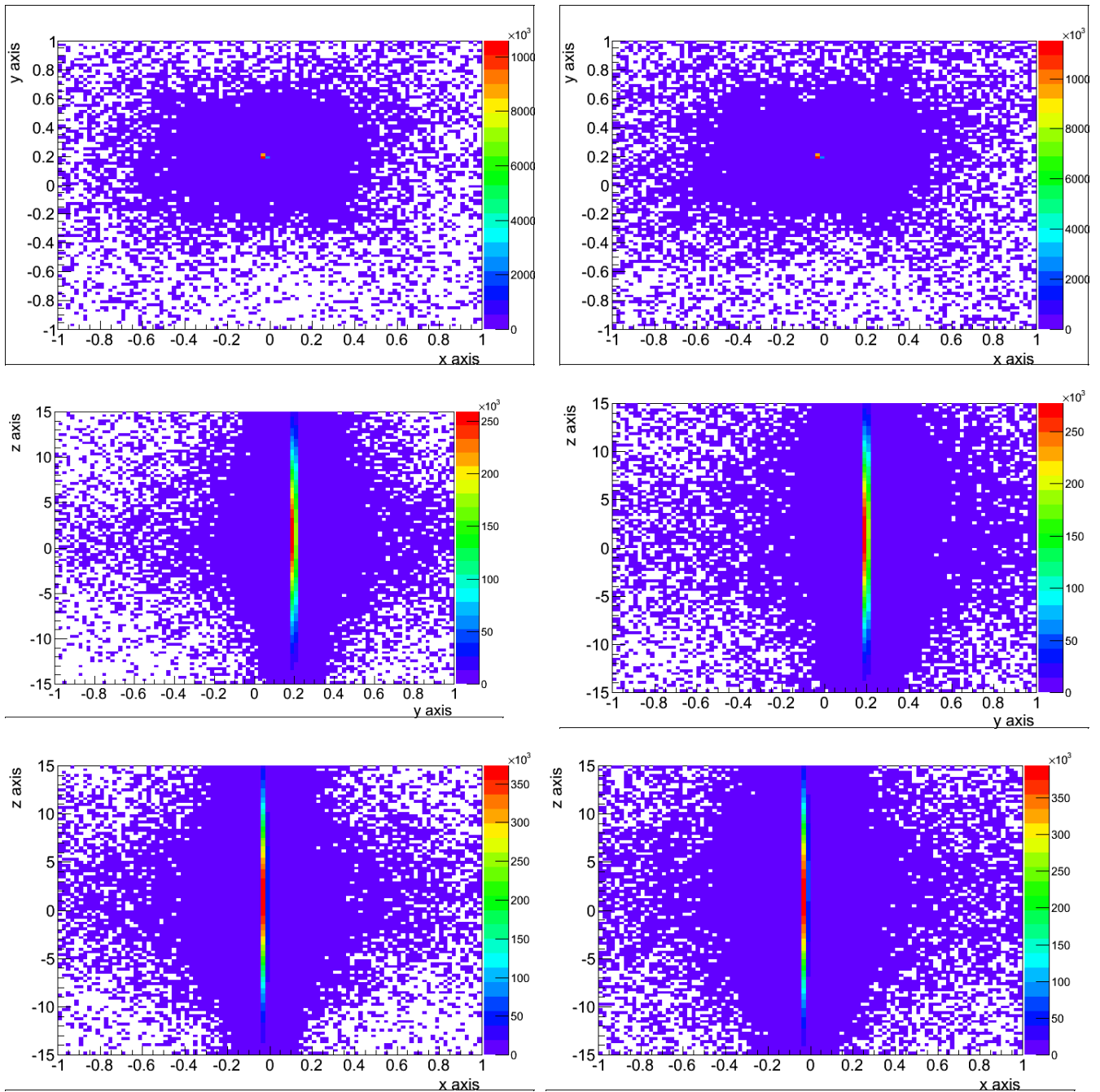
Σχήμα 21: Κατανομές του πλήθους των τροχιών που ανακατασκευάζονται ανά προσομοιωμένο και ανά πραγματικό γεγονός.

## 4.2 Ανακατασκευή της θέσης του πρωτεύοντος κόμβου αλληλεπίδρασης (main vertex)

Στην συνέχεια φαίνεται η ανακατασκευασμένη θέση του κόμβου της κύριας αλληλεπίδρασης για προσομοιωμένα και πραγματικά γεγονότα (σχήμα 23). Η ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης είναι μεγαλύτερη κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $y$ , από ότι στον άξονα  $z$ . Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς στον άξονα αυτό κινούνται οι δέσμες (παράρτημα 6.6.1). Επίσης παρατηρούμε πολύ καλή συμφωνία στην ανακατασκευή του κύριου κόμβου μεταξύ πραγματικών και προσομοιωμένων γεγονότων.



Σχήμα 22: Τρισδιάστατη κατανομή της θέσης του κόμβου της κύριας αλληλεπίδρασης σε προσομοιωμένα και πραγματικά δεδομένα.



(α') Προσομοιωμένα δεδομένα

(β') Πραγματικά δεδομένα

Σχήμα 23: Κατανομή της θέσης του κόμβου της κύριας αλληλεπίδρασης σε προσομοιωμένα και πραγματικά δεδομένα.

### 4.3 Επιλογή καλά ανακατασκευασμένων πρωτευσών τροχιών

Αρχικά εφαρμόζουμε μία πρώτη επιλογή που έχει ορισθεί από τη συνεργασία του ALICE, ονομάζεται Physics Selection και κρατά μόνο τις ανελαστικές κρούσεις όπως αυτές αναγνωρίζονται από το σύστημα σκανδαλισμού. Συγκεκριμένα το σύστημα σκανδαλισμού ελάχιστης προκατάλυσης (minimum bias trigger) απαιτεί μία μοναδική μέτρηση στον ανιχνευτή SPD ή σε ένα από τους δύο ανιχνευτές V0, δηλαδή τουλάχιστον ένα φορτισμένο σωματίο μέσα στις  $\sim 8$  μονάδες ψευδο-ωκύτητας που καλύπτουν οι ανιχνευτές αυτοί. Ακόμη απαιτείται η σύμπτωση δύο σημάτων από τους ανιχνευτές της δέσμης, ένας σε κάθε άκρη της αλληλεπιδρούσας περιοχής, που να υποδεικνύουν το πέρασμα της δέσμης πρωτονίων.

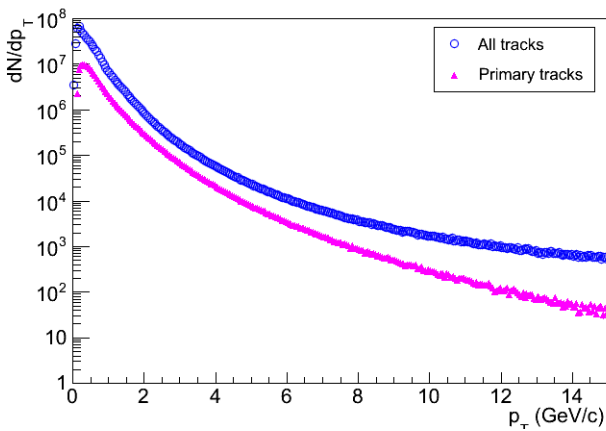
Στη συνέχεια, απομακρύνονται τα γεγονότα των οποίων ο κύριος κόμβος βρίσκεται εκτός των ορίων  $-10\text{cm} < z_{\text{vtx}} < 10\text{cm}$ . Εξετάζονται μόνο οι τροχιές που θεωρούνται καλά ανακατα-

σκευασμένες, δηλαδή όσες πληρούν τα παρακάτω κριτήρια:

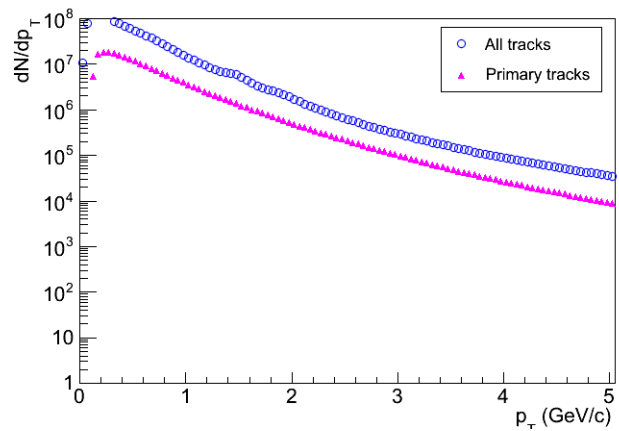
- να ανακατασκευάζονται από τον TPC και τον ITS προς το κύριο κόμβο. (TPC, ITS refit)
- ανακατασκευάζονται από τουλάχιστον 20 ίχνη (clusters) στον TPC. ( $N_{\text{TPC clusters}} > 20$ )
- προσαρμόζονται αρκετά καλά στα ίχνη από τα οποία ανακατασκευάστηκαν, δηλαδή ικανοποιούν τη συνθήκη:  $\chi^2_{\text{TPC}}/N_{\text{TPC clusters}} < 3.8$

Στόχος της ανάλυσης αυτής είναι η ταυτοποίηση πρωτεύοντων πιονίων και έτσι προσπαθούμε να διαχωρίσουμε τις τροχιές που προέρχονται από την κύρια αλληλεπίδραση. Για τον λόγο αυτό επιλέγουμε τις ανακατασκευασμένες τροχιές που ξεκινούν σε πολύ μικρή απόσταση από τον κύριο κόμβο (παράρτημα 6.6.8). Ο υπολογισμός της μέγιστης απόστασης DCA από τον κόμβο γίνεται συναρτήσει της εγκάρσιας ορμής του σωματιδίου.

Στα σχήματα 24 και 25 φαίνονται οι κατανομές της εγκάρσιας ορμής και της ψευδοωκότητας όλων των ανακατασκευασμένων τροχιών και όσων θεωρούνται πρωτεύουσες.

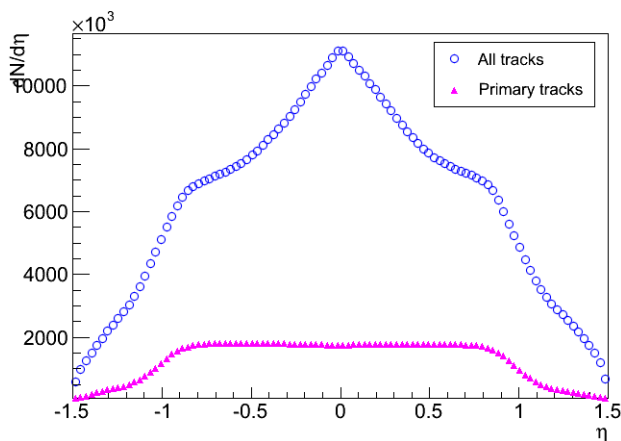


(α') Προσομοιωμένα δεδομένα

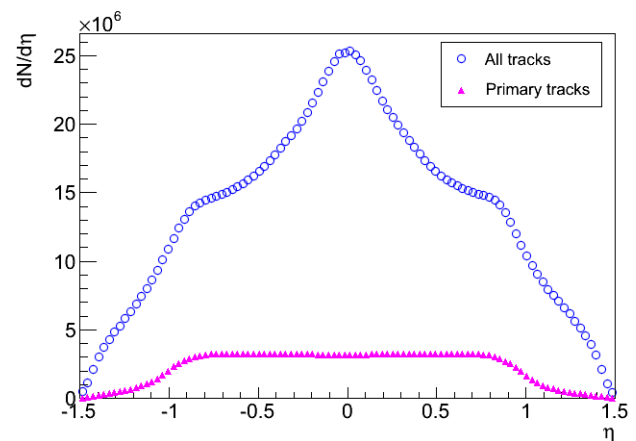


(β') Πραγματικά δεδομένα

Σχήμα 24: Κατανομή της εγκάρσιας ορμής όλων των ανακατασκευασμένων τροχιών (μπλε δείκτες) και όσων θεωρούνται πρωτεύουσες (ροζ δείκτες).



(α') Προσομοιωμένα δεδομένα



(β') Πραγματικά δεδομένα

Σχήμα 25: Κατανομή της ψευδοωκότητας όλων των ανακατασκευασμένων τροχιών (μπλε δείκτες) και όσων θεωρούνται πρωτεύουσες (ροζ δείκτες).

Στον πίνακα 3 φαίνεται ο αριθμός των γεγονότων και των τροχιών που απορρίπτονται από τις παραπάνω επιλογές.

Πίνακας 3: Επιλογή πρωτεύουσών τροχιών.

Προσομοιωμένα δεδομένα				Πραγματικά δεδομένα
Προσομοιωμένες τροχιές		Ανακατασκευασμένες τροχιές		
Αριθμός γεγονότων	24,298,630	Αριθμός ανακατασκευασμένων γεγονότων	24,298,630	29,320,220
		Αριθμός ανακατασκευασμένων γεγονότων μετά τη Physics Selection	22,610,610	27,646,390
		Αριθμός ανακατασκευασμένων γεγονότων μετά τη Physics Selection και την επιλογή $-10 \text{ cm} < z_{vtx} < 10 \text{ cm}$	17,941,75	21,979,320
Αριθμός παραγόμενων σωματιδίων	19,843,660,000	Αριθμός ανακατασκευασμένων τροχιών μετά τη Physics Selection και την επιλογή $-10 \text{ cm} < z_{vtx} < 10 \text{ cm}$	634,259,100	1,374,157,000
Αριθμός σωματιδίων - προϊόντων της κύριας αλληλεπίδρασης	2,380,853,000	Αριθμός καλά ανακατασκευασμένων τροχιών που θεωρούνται πρωτεύουσες	128,678,300	203,257,400

#### 4.4 Πρώτη επιλογή τροχιών που σχηματίζουν kink

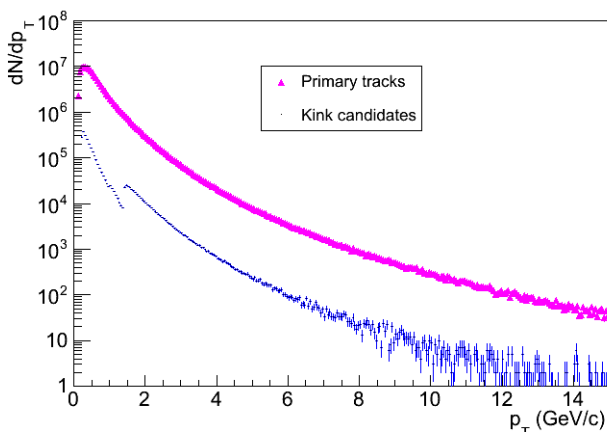
Το AliRoot χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο, κατά την ανακατασκευή, για να χαρακτηρίσει τις τροχιές ως πιθανά kink. Ο αλγόριθμος αυτός απαιτεί οι τροχιές να είναι δευτερεύουσες και να εμφανίζουν ένα σπάσιμο χρησιμοποιώντας πολύ χαλαρά κριτήρια, ενώ δίνει την χαρακτηριστική τιμή -1 για τα υποψήφια kink στον δείκτη kink index. Για τροχιές με εγκάρσια ορμή  $p_T \approx 1.4 \text{ GeV}/c$ , ο αλγόριθμος ανακατασκευής χαλαρώνει τα κριτήρια του με σκοπό την συλλογή όσων των δυνατών περισσότερων kink. Οι λανθασμένα χαρακτηρισμένες ως kink τροχιές θα πρέπει να απομακρυνθούν με βάση τις επιλογές της ανάλυσης. Οι ανακατασκευασμένες τροχιές που αναγνωρίζονται ως υποψήφια kinks από το AliRoot, αντιστοιχούν σε όλες τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Διάσπαση ενός φορτισμένου σωματιδίου σε δύο άλλα, ένα ίσου φορτίου και ένα ή περισσότερα ουδέτερα. Σε αυτή την περίπτωση η τροχιά του αρχικού σωματιδίου εμφανίζεται να "σπάει" και να συνεχίζεται από την τροχιά του φορτισμένου θυγατρικού σωματιδίου. Το "σπάσιμο" αυτό ονομάζεται kink και είναι χαρακτηριστικό της ασθενούς διάσπασης των φορτισμένων πιονίων. (πραγματικό kink)
- Μια τροχιά φαίνεται να "σπάει" λόγω κακής ανακατασκευής, ενώ στην πραγματικότητα πρόκειται για μία τροχιά που ανήκει σε ένα σωματίο.
- Δύο τροχιές φαινομενικά συγκλίνουν και σχηματίζουν kink, ενώ στην πραγματικότητα είναι άσχετες μεταξύ τους.

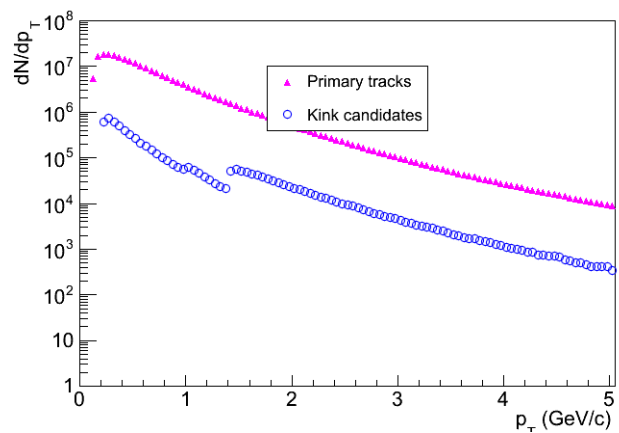
- Δύο τροχιές σωματιδίων που αλληλεπιδράσαν συγκλίνουν στο σημείο της αλληλεπίδρασης και φαινομενικά σχηματίζουν kink. Η περίπτωση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη λόγω αλληλεπιδράσεων των προϊόντων της κρούσης με τα υλικά των ανιχνευτών.

Εκτός από την πρώτη, όλες οι άλλες περιπτώσεις αποτελούν ψευδο - σπασίματα (fake kinks) και πρέπει να απομακρυνθούν από το δείγμα για το σκοπό της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον επιλέγουμε οι τροχιές-υποψήφια kinks να χαρακτηρίζονται από εγκάρσια ορμή μεγαλύτερη από 200 MeV/c - ώστε να απομακρυνθεί το έντονο υπόβαθρο δευτερευουσών τροχιών που εμφανίζεται στις περιοχές πολύ μικρής εγκάρσιας ορμής - και ωκύτητα στην περιοχή  $|y_\pi| < 0.7$  - η οποία καλύπτεται με το βέλτιστο τρόπο από τον TPC. Η ωκύτητα υπολογίζεται θεωρώντας ότι πρόκειται για τροχιές πονίων δεδομένου ότι αυτά τα σωματάρια ενδιαφέρει να ταυτοποιηθούν. Στα σχήματα 26, 27 φαίνονται οι κατανομές της εγκάρσιας ορμής και της ψευδοωκύτητας των τροχιών αυτών σε σχέση με τις αντίστοιχες κατανομές των όλων των πρωτευουσών τροχιών,

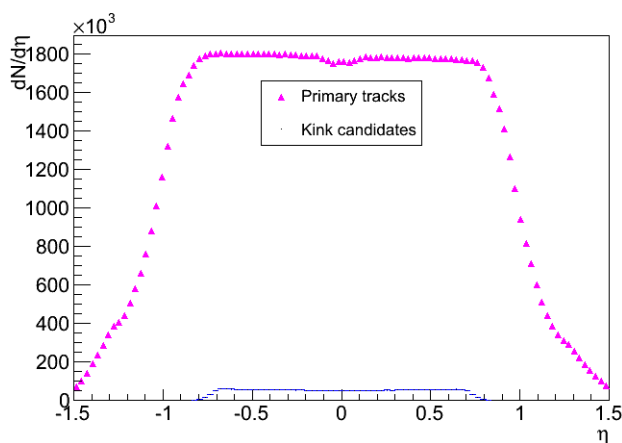


(α') Προσομοιωμένα δεδομένα

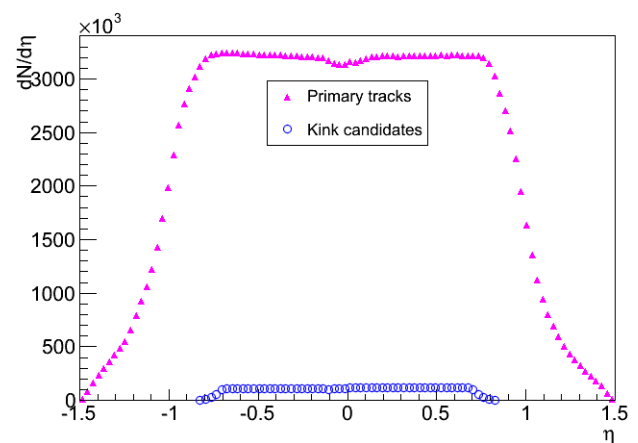


(β') Πραγματικά δεδομένα

Σχήμα 26: Κατανομή της εγκάρσιας ορμής των πρωτευουσών τροχιών (ροζ δείκτες) και όλων των υποψήφιων kink (μπλε δείκτες) με  $p_T > 200$  GeV/c και  $|y_\pi| < 0.7$ .



(α') Προσομοιωμένα δεδομένα



(β') Πραγματικά δεδομένα

Σχήμα 27: Κατανομή της ψευδοωκύτητας των πρωτευουσών τροχιών (ροζ δείκτες) και όλων των υποψήφιων kink (μπλε δείκτες) με  $p_T > 200$  GeV/c και  $|y_\pi| < 0.7$ .

Στον πίνακα 4 φαίνεται ο αριθμός των τροχιών που απορρίπτονται από κάθε επιλογή.

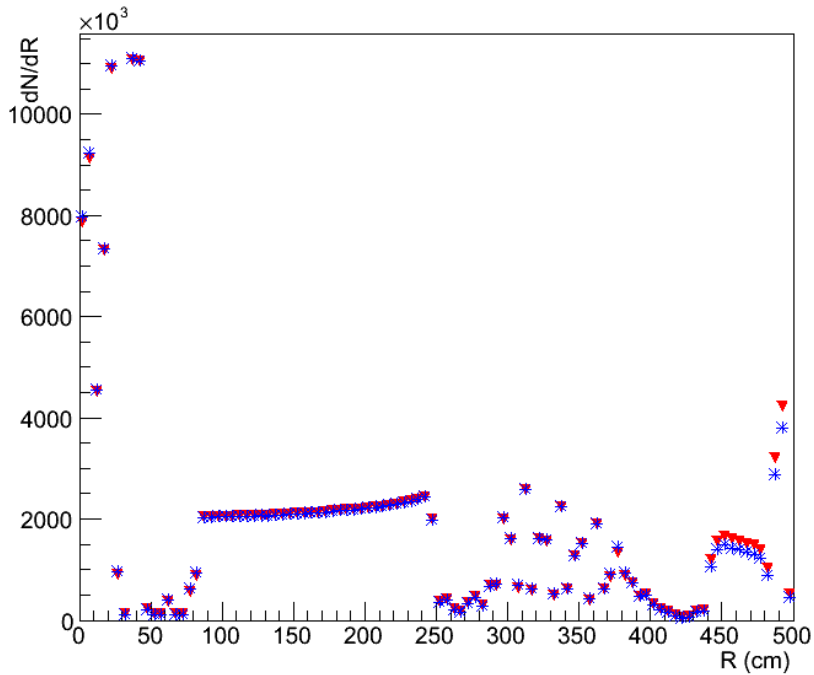


Πίνακας 4: Πρώτη επιλογή kinks.

Προσομοιωμένα δεδομένα			Πραγματικά δεδομένα	
Προσομοιωμένες τροχιές		Ανακατασκευασμένες τροχιές		
Σωματία - προϊόντα της κύριας αλληλεπίδρασης	2,380,853,000	Καλά ανακατασκευασμένες τροχιές που θεωρούνται πρωτεύουσες	128,678,300	203,257,400
Σωματία - προϊόντα της κύριας αλληλεπίδρασης με $p_T > 200 \text{ MeV}/c$	1,450,075,000	Καλά ανακατασκευασμένες τροχιές που θεωρούνται πρωτεύουσες με $p_T > 200 \text{ MeV}/c$	118,856,800	184,276,200
Πιόνια - προϊόντα της κύριας αλληλεπίδρασης με $p_T > 200 \text{ MeV}/c$ και $ y_\pi  < 0.7$	94,477,560	Υποψήφια kinks με $p_T > 200 \text{ MeV}/c$ και $ y_\pi  < 0.7$	2,693,761	4,906,910

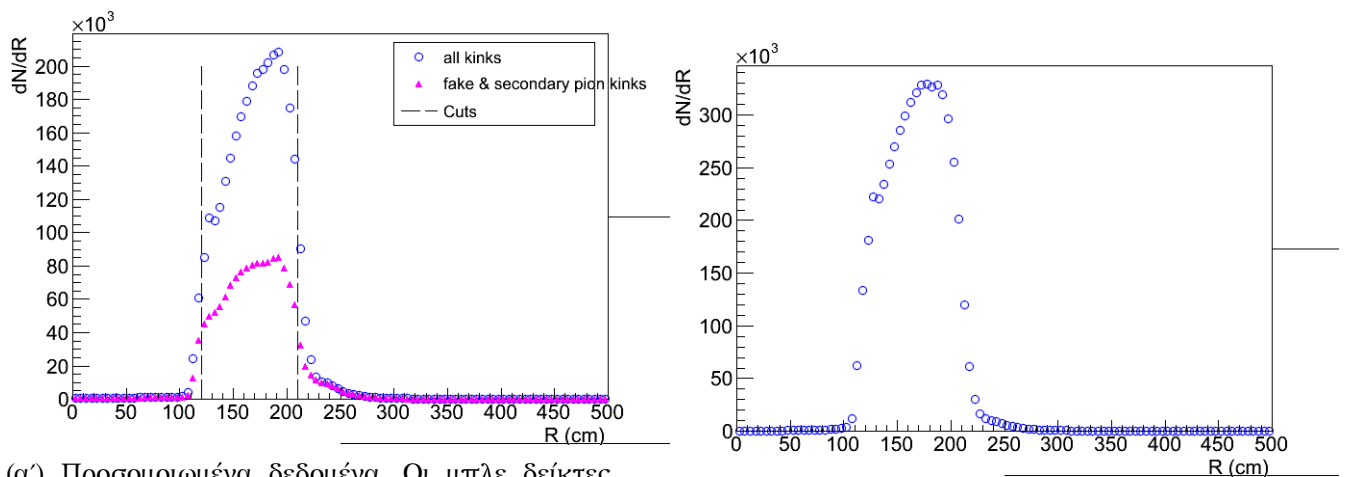
#### 4.5 Επιλογές γεωμετρίας

Η διάσπαση των πιονίων ακολουθεί τον εκθετικό νόμο (παράρτημα 6.6.4) κι έτσι, τα περισσότερα kinks τους αναμένονται στο ITS και στον TPC. Επειδή το ITS αποτελείται από στρώματα βαριών υλικών μεταξύ των οποίων υπάρχει κενό, οι αλληλεπιδράσεις είναι πολύ έντονες και για αυτό ο ανιχνευτής αυτός δεν είναι καταρχήν κατάλληλος για την τοπολογική μελέτη διασπάσεων. Αντίθετα, ο TPC περιέχει ελαφριά και αραιά υλικά και παρέχει έως και 159 μετρήσεις σημείων μιας τροχιάς με αποτέλεσμα την καλή ανακατασκευή της και για αυτό το λόγο, προς το παρόν ο αλγόριθμος που έχει κατασκευαστεί για τον εντοπισμό των kinks περιορίζεται στα δεδομένα αυτού του ανιχνευτή. Στο σχήμα 28 φαίνεται η κατανομή της ακτίνας διάσπασης ή αλληλεπίδρασης των πιονίων, όπως προβλέπεται από την προσομοίωση. Στην περιοχή του TPC ( $90 < R < 240$ ) βλέπουμε μια μικρή αύξηση των διασπάσεων των πιονίων, που είναι αντίθετη με τον εκθετικό νόμο. Η μικρή μάζα του πιονίου συνεπάγεται ότι η μέση εγκάρσια ορμή του είναι  $\sim 400 \text{ MeV}$  και άρα η ακτίνα καμπυλότητας του στο μαγνητικό πεδίο είναι αρκετά μικρή. Αυτό σημαίνει ότι αρκετά από τα πιόνια με χαμηλή εγκάρσια ορμή δεν καταφέρνουν να εισέλθουν στον όγκο του TPC, δεν ανιχνεύονται και έτσι πέρνουμε την παραμορφωμένη κατανομή του σχήματος 28.



Σχήμα 28: Κατανομή της ακτινικής θέσης των kinks, όπως προβλέπεται από την προσομοίωση.

Όμως λόγω του σχετικά μεγάλου χρόνου ζωής τους πιονίου, οι τροχιές με μεγάλη εγκάρσια ορμή δεν θα προλάβουν να διασπαστούν μέσα στον όγκο του TPC. Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, στην εργασία αυτή η μελέτη θα περιοριστεί στην κεντρική περιοχή του TPC ( $120 \text{ cm} < R < 210 \text{ cm}$ ), όπου υπάρχουν αρκετά ίχνη για τη βέλτιστη ανακατασκευή των τροχιών (ελαχίστου μήκους 30 cm) και εντοπίζονται τα περισσότερα πραγματικά kinks (σχήμα 29).

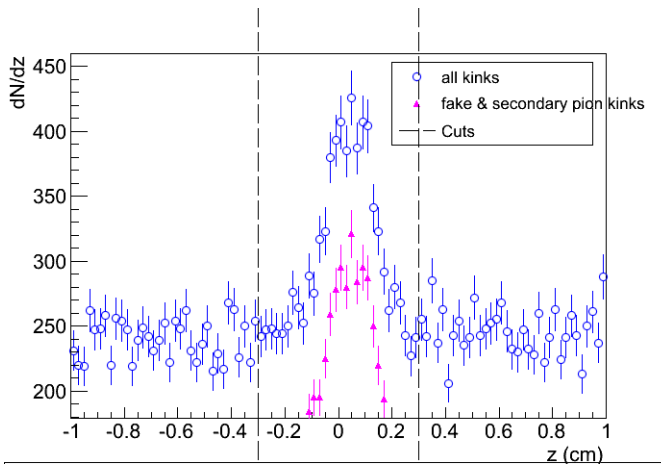


(α') Προσομοιωμένα δεδομένα. Οι μπλε δείκτες αντιστοιχούν σε όλα τα υποψήφια kinks και οι ροζ σε όσα δεν αφορούν πρωτεύοντα πιόνια.

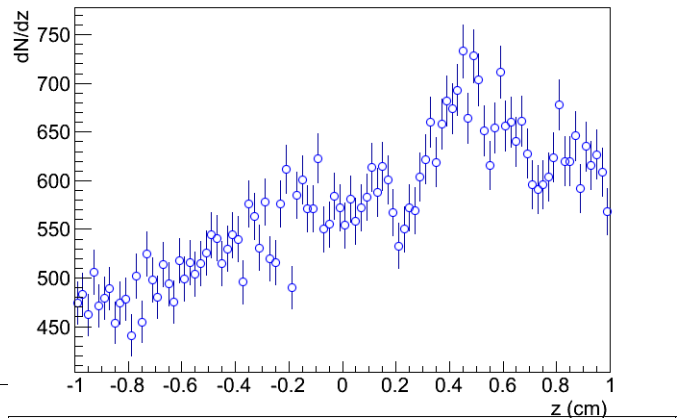
(β') Πραγματικά δεδομένα

Σχήμα 29: Κατανομή της ακτινικής θέσης των kinks που ανιχνεύονται.

Κατά την μελέτη των προσομοιωμένων δεδομένων παρατηρήθηκε ότι υποψήφια kink σε πολύ μικρές και πολύ μεγάλες διαμήκειες συνιστώσες αποτελούν κυρίως ψευδή kink (όπως φαίνεται στο σχήμα 91 στο παράρτημα 6.7) και δε συναντώνται στα πραγματικά δεδομένα (σχήμα 30β). Έτσι, οι περιοχές  $|z| < 0.3 \text{ cm}$  (σχήμα 30α) και  $|z| > 225 \text{ cm}$  απορρίπτονται για να μπορούν να υπολογιστούν σωστά οι διορθωτικοί παράγοντες.



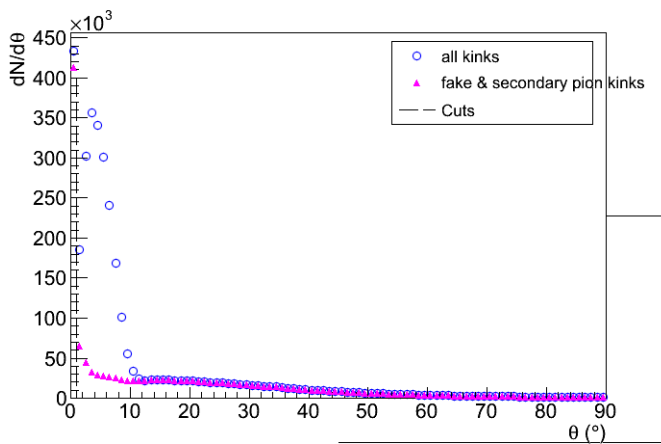
(α') Προσομοιωμένα δεδομένα. Οι μπλε δείκτες αντιστοιχούν σε όλα τα υποψήφια kinks και οι ροζ σε όσα δεν αφορούν πρωτεύοντα πιόνια.



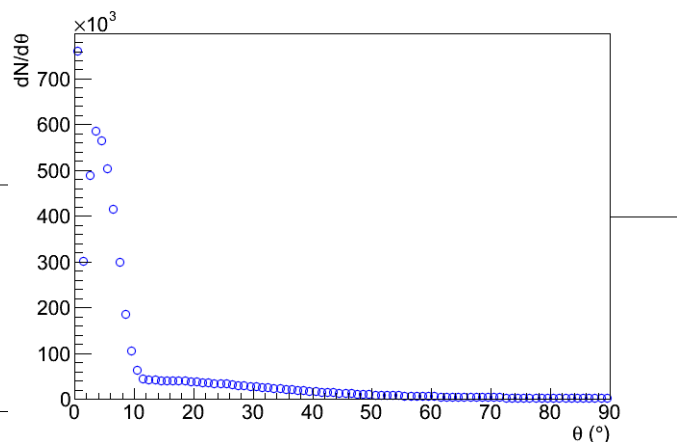
(β') Πραγματικά δεδομένα

Σχήμα 30: Κατανομή της θέσης των kinks κατά μήκος του άξονα z.

Ένα πολύ βασικό μέγεθος της συγκεκριμένης τοπολογίας είναι η γωνία διάσπασης, δηλαδή η γωνία μεταξύ της μητρικής και θυγατρικής τροχιάς. Πολύ μικρές γωνίες σχηματίζονται κυρίως από ψευδή kinks ή kinks που δεν αφορούν πιόνια (σχήματα 31 και 92 - παράρτημα 6.7). Το μεγαλύτερο μέρος των περιπτώσεων που απορρίπτονται είναι στην ουσία μία τροχιά εσφαλμένα ανακατασκευασμένη ως kink. Επιλέγονται, λοιπόν, μόνο τα kinks που σχηματίζουν εσωτερική γωνία μεγαλύτερη από  $1^\circ$ .



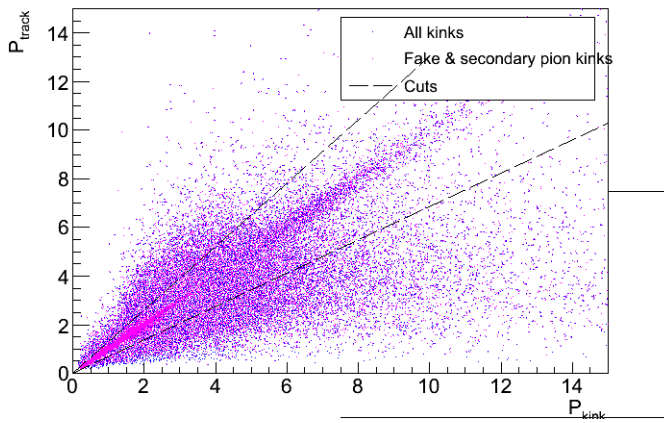
(α') Προσομοιωμένα δεδομένα. Οι μπλε δείκτες αντιστοιχούν σε όλα τα υποψήφια kinks και οι ροζ σε όσα δεν αφορούν πρωτεύοντα πιόνια.



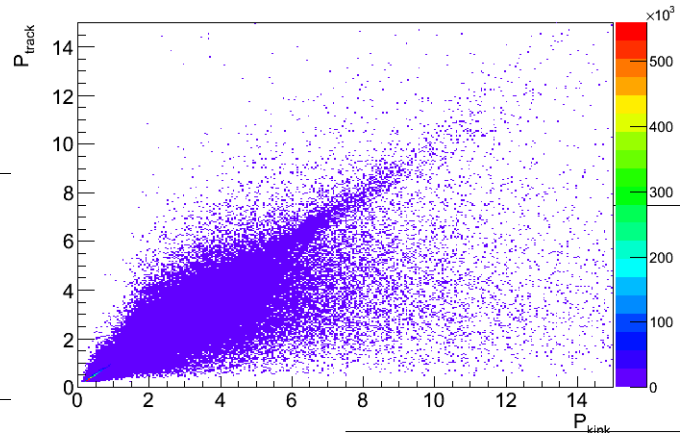
(β') Πραγματικά δεδομένα

Σχήμα 31: Κατανομή της εσωτερικής γωνίας των kinks.

Απαιτείται, επίσης, η μητρική τροχιά του kink να είναι αρκετά καλά ανακατασκευασμένη, ώστε η εγκάρσια ορμή της όπως υπολογίζεται από αναπροσαρμογή σε όλα τα ίχνη της τροχιάς (μετρημένα από το ITS και το TPC) ή από αναπροσαρμογή στα ίχνη του kink (μετρημένα μόνο στον TPC) να μη διαφέρει πολύ:  $0.7 < p_{\text{mother}}/p_{\text{track}} < 1.3$ .



(α') Προσομοιωμένα δεδομένα. Οι μπλε δείκτες αντιστοιχούν σε όλα τα υποψήφια kinks και οι ροζ σε όσα δεν αφορούν πρωτεύοντα πιόνια.



(β') Πραγματικά δεδομένα

Σχήμα 32: Σχέση μεταξύ των τιμών του μέτρου της ορμής όπως αυτό υπολογίζεται από την προσαρμογή στη μητρική τροχιά (άξονας x) και στο kink (άξονας y).

Πίνακας 5: Γεωμετρικές επιλογές.

Προσομοιωμένα δεδομένα	Πραγματικά δεδομένα		
	Πιόνια	Υποψήφια kinks	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>p_T &gt; 200 \text{ MeV}/c</math></li> <li>• <math> y_\pi  &lt; 0.7</math></li> </ul>	94,477,560	2,693,761 (100%)	4,906,910 (100%)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>p_T &gt; 200 \text{ MeV}/c</math></li> <li>• <math> y_\pi  &lt; 0.7</math></li> <li>• <math>120 \text{ cm} &lt; R &lt; 210 \text{ cm}</math></li> </ul>		2,418,928 (88.9%)	4,461,591 (90.9%)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>p_T &gt; 200 \text{ MeV}/c</math></li> <li>• <math> y_\pi  &lt; 0.7</math></li> <li>• <math>120 \text{ cm} &lt; R &lt; 210 \text{ cm}</math></li> <li>• <math>0.3 \text{ cm} &lt;  z  &lt; 225 \text{ cm}</math></li> </ul>	3,919,688	2,408,527 (89.4%)	4,438,291 (90.4%)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>p_T &gt; 200 \text{ MeV}/c</math></li> <li>• <math> y_\pi  &lt; 0.7</math></li> <li>• <math>120 \text{ cm} &lt; R &lt; 210 \text{ cm}</math></li> <li>• <math>0.3 \text{ cm} &lt;  z  &lt; 225 \text{ cm}</math></li> <li>• <math>\theta &gt; 1^\circ</math></li> </ul>	3,669,794	2,046,794 (76%)	3,912,981 (79.7%)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>p_T &gt; 200 \text{ MeV}/c</math></li> <li>• <math> y_\pi  &lt; 0.7</math></li> <li>• <math>120 \text{ cm} &lt; R &lt; 210 \text{ cm}</math></li> <li>• <math>0.3 \text{ cm} &lt;  z  &lt; 225 \text{ cm}</math></li> <li>• <math>\theta &gt; 1^\circ</math></li> <li>• <math>0.7 &lt; p_{\text{mother}}/p_{\text{track}} &lt; 1.3</math></li> </ul>		2,041,483 (7.8%)	3,903,322 (79.5%)

#### 4.6 Τέλεια ταυτοποίηση (Perfect PID)

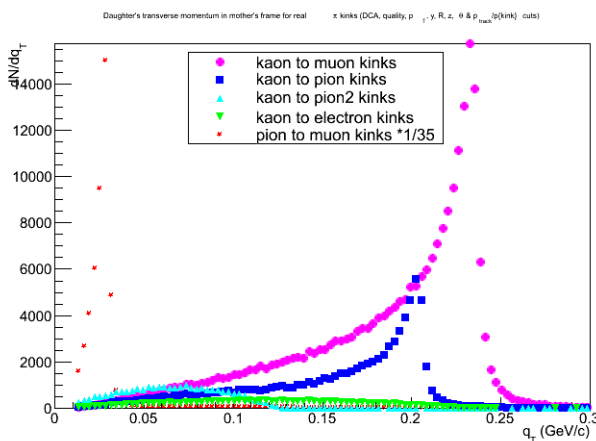
Στο σημείο αυτό, όπου έχουν γίνει οι επιλογές της γεωμετρίας, γίνεται η τέλεια ταυτοποίηση (perfect PID) μέσω του σωματιδιακού κωδικού (pdg code) που έχει αντιστοιχηθεί σε κάθε τροχιά κατά την προσομοίωση. Κάτι τέτοιο δεν μπορεί να γίνει στα πραγματικά δεδομένα όμως αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη, την επεξεργασία και τον έλεγχο των πραγματικών ανακατασκευασμένων δεδομένων. Μέσω της τέλει ταυτοποίησης προσδιορίζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, οι διορθωτικοί παράγοντες και το ποσοστό των προσμίξεων (contamination) στο δείγμα. Στο παράρτημα 6.7 μπορούμε να δούμε τα ιστογράμματα σωματιδιακών κωδικών της μητρικής και θυγατρικής τροχιάς και να αξιολογήσουμε την αποτελεσματικότητα κάθε επιλογής ταυτοποίησης.

#### 4.7 Ρεαλιστική ταυτοποίηση (Realistic PID)

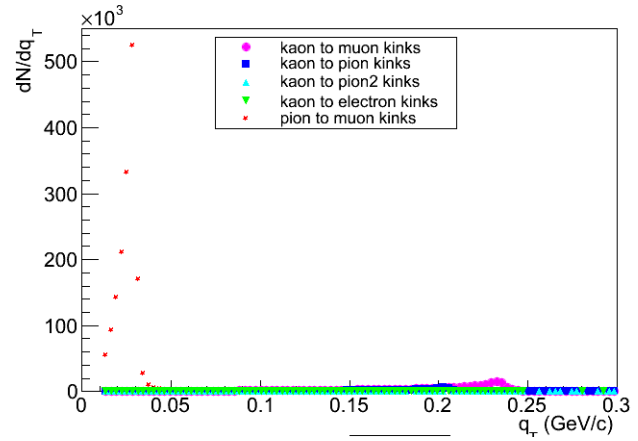
Κατά την ρεαλιστική ταυτοποίηση (realistic PID) επιλέγουμε τα σωματίδια με φυσικά κριτήρια και όχι με τον σωματιδιακό κωδικό. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται τόσο στα πραγματικά όσο και στα προσομοιωμένα δεδομένα για τον υπολογισμό των διορθωτικών παραγόντων.

Όπως υπολογίζεται στο παράρτημα 6.6.5 για διάσπαση φορτισμένου καονίου ή πιονίου σε δύο σωματίδια, υπάρχει μια μέγιστη τιμή της εγκάρσιας ορμής  $q_T$  κάθε θυγατρικού σωματιδίου στο σύστημα ηρεμίας του μητρικού. Το άνω αυτό όριο είναι διαφορετικό για κάθε κανάλι διάσπασης και όπως φαίνεται στο σχήμα 33 αποτελεί χρήσιμο εργαλείο διαχωρισμού πιονίων-καονίων, αφού για πραγματικά kinks καονίων η  $q_T$  εμφανίζεται κυρίως στην περιοχή πάνω από  $q_T > 120$  MeV/c, ενώ για πραγματικά kinks πιονίων εμφανίζεται στην περιοχή  $q_T < 50$  MeV/c.

Έτσι, με στόχο την απομάκρυνση των καονίων, απορρίπτονται kinks με  $q_T > 40$  MeV/c. Από τα σχήματα 34 και 94 - παράρτημα 6.7 φαίνεται ότι με αυτή την επιλογή, απομακρύνονται από το δείγμα κυρίως τροχιές που δεν αφορούν kink πιονίων.

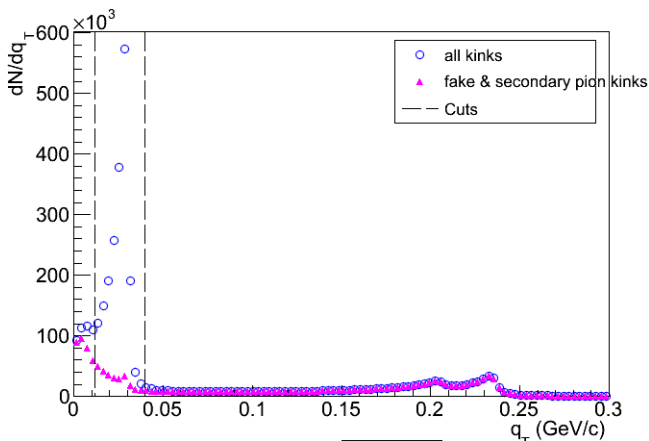


(α') Η κορυφή του  $\pi \rightarrow \mu\nu\mu$  είναι σε σμίκρυνση.

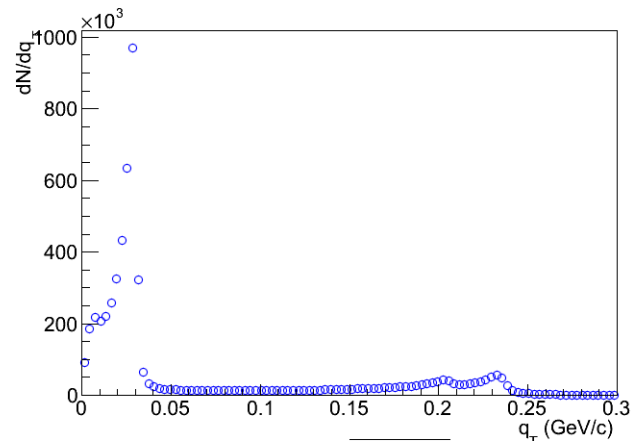


(β') Όλες οι κορυφές είναι στο πραγματικό τους μέγεθος.

Σχήμα 33: Κατανομή της εγκάρσιας ορμής του θυγατρικού σωματιδίου στο σύστημα ηρεμίας του μητρικού για όλα τα πιθανά kink του καονίου και του πιονίου.



(α') Προσομοιωμένα δεδομένα. Οι μπλε δείκτες αντιστοιχούν σε όλα τα υποψήφια kinks και οι ροζ σε όσα δεν αφορούν πρωτεύοντα πιόνια.

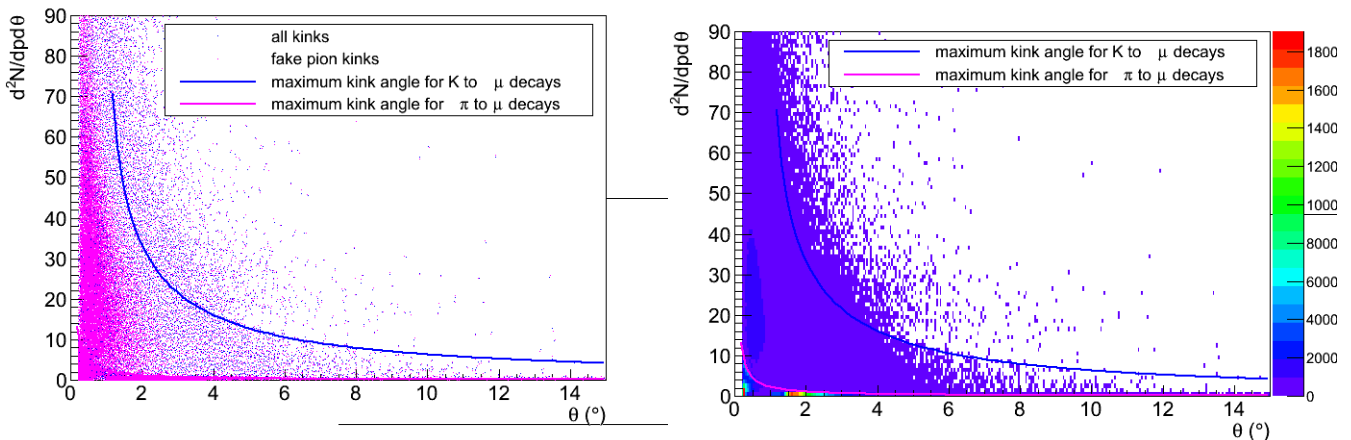


(β') Πραγματικά δεδομένα

Σχήμα 34: Κατανομή της εγκάρσιας ορμής του θυγατρικού σωματιδίου στο σύστημα ηρεμίας του μητρικού.

Στο παράρτημα 6.6.7 υπολογίζεται η μέγιστη γωνία που μπορεί να έχει το kink συναρτήσει του μέτρου της ορμής του μητρικού σωματιδίου και της μάζας του θυγατρικού. Με βάση αυτό το κριτήριο ένα πιόνιο και ένα καόνιο κατά την διάσπασή τους σε μόνιο και νετρίνο θα έχουν διαφορετική γωνία kink λόγω της διαφορετικής μάζας τους. Έτσι απαιτώντας η γωνία του kink να είναι μικρότερη (με ένα σφάλμα της τάξεως του 10%) από τη μέγιστη δυνατή γωνία για διάσπαση φορτισμένου πιονίου σε μόνιο και νετρίνο, απομακρύνονται ακόμα περισσότερα

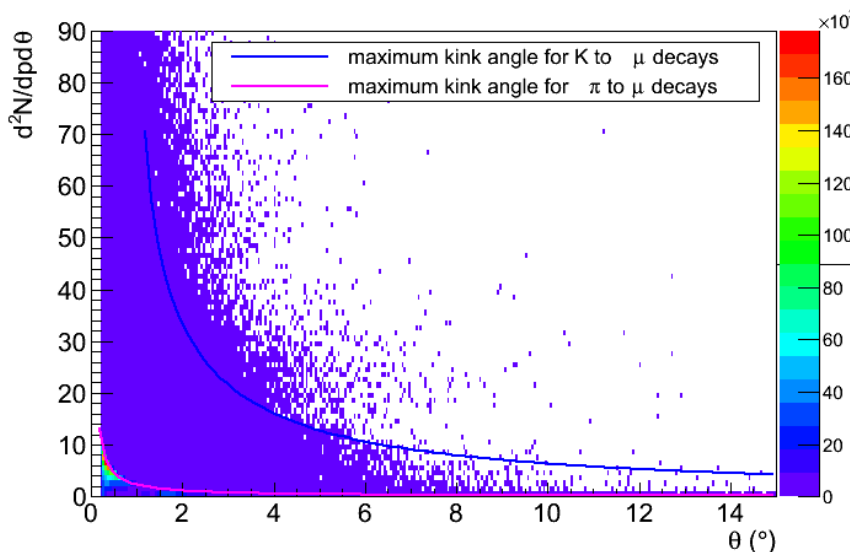
καόνια και ψευδή kinks από το δείγμα (σχήμα 95- παράρτημα 6.7). Όπως φαίνεται στο σχήμα 35 υπάρχουν αρκετές τροχιές που αποτελούν ψευδή kink και βρίσκονται στην περιοχή κάτω από την μέγιστη γωνία του πιονίου. Αυτές οι τροχιές αποτελούνται κυρίως από καόνια και θα απομακρυνθούν παρακάτω με βάση άλλα φυσικά κριτήρια.



(α') Προσομοιωμένα δεδομένα - πριν τις επιλογές της ρεαλιστικής ταυτοποίησης. Οι μπλε δείκτες αντιστοιχούν σε όλα τα υποψήφια kinks και οι ροζ σε όσα δεν αφορούν πρωτεύοντα πιόνια.

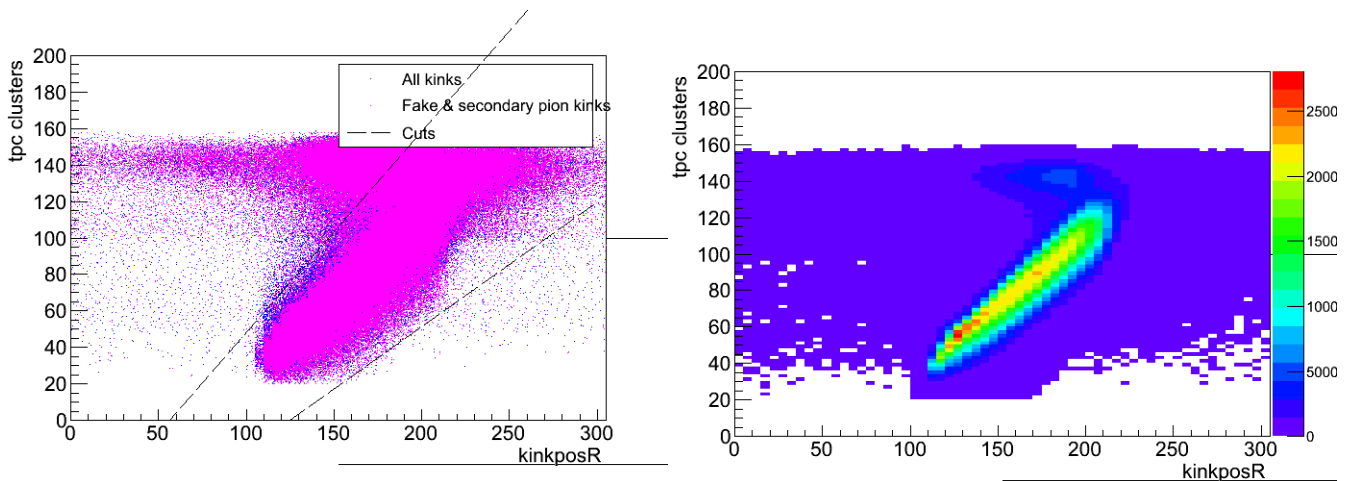
(β') Προσομοιωμένα δεδομένα - πριν τις επιλογές της ρεαλιστικής ταυτοποίησης. Κατανομή των λανθασμένα επιλεγμένων πιονίων.

Σχήμα 35: Κατανομή της γωνίας του kink συναρτήσει του μέτρου της ορμής της μπτρικής τροχιάς.



Σχήμα 36: Κατανομή της γωνίας του kink συναρτήσει του μέτρου της ορμής της μπτρικής τροχιάς. Πραγματικά δεδομένα - πριν τις επιλογές της ρεαλιστικής ταυτοποίησης

Στο σχήμα 37 φαίνεται ότι υπάρχει σχέση μεταξύ του αριθμού των σημείων ανακατασκευής της μπτρικής τροχιάς στον TPC (TPC clusters) από την ακτινική θέση του kink, η οποία διαπιστώνεται ότι σχετίζεται με ψευδή kinks. Για παράδειγμα δεν μπορεί μία τροχιά η οποία διασπάτε σε ακτίνα 130cm να έχει 140 σημεία ανακατασκευής μίας και δεν έχει διανύσει αρκετό διάστημα μέσα στον TPC και άρα πρόκειται για την ίδια τροχιά που εσφαλμένα ανακατασκευάστηκε ως kink. Για να καθαρίσουμε ακόμα περισσότερο το δείγμα μας περιορίζουμε το αριθμό των σημείων ανακατασκευής συναρτήσει της ακτινικής θέσης του kink ανάμεσα στις ευθείες  $-85.5 + (65/95) \cdot R < N_{TPCclusters} < -51.67 + (11/12) \cdot R$ , ενώ στο σχήμα 96- παράρτημα 6.7 βλέπουμε τις τροχιές που απορρίπτουμε.

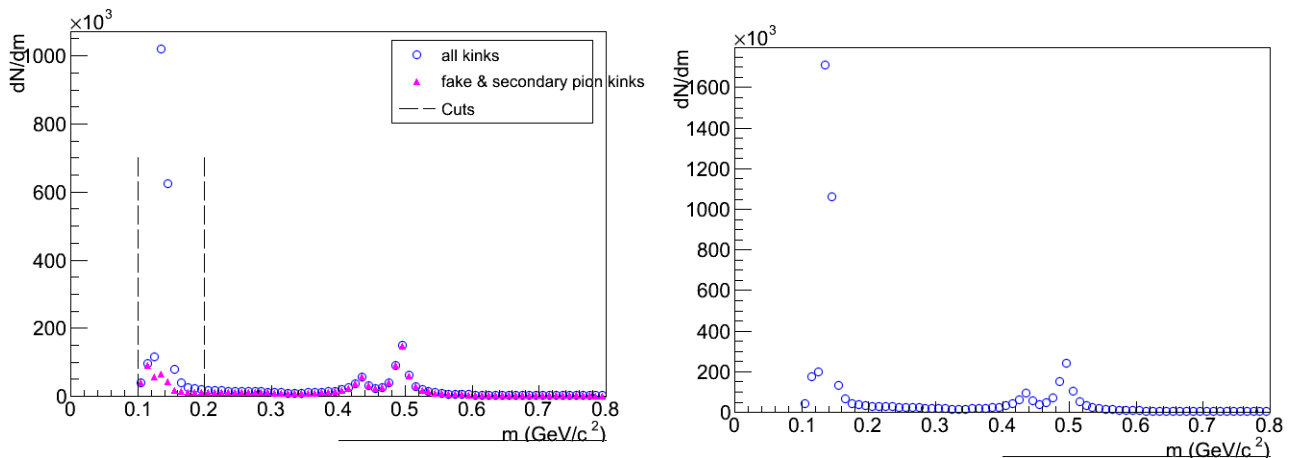


(α') Προσομοιωμένα δεδομένα. Οι μπλε δείκτες αντιστοιχούν σε όλα τα υποψήφια kinks και οι ροζ σε όσα δεν αφορούν πρωτεύοντα πιόνια.

(β') Πραγματικά δεδομένα - πριν τις επιλογές της ρεαλιστικής ταυτοποίησης

Σχήμα 37: Κατανομή του αριθμού των ιχνών της μπρικής τροχιάς στον TPC συναρτήσει της ακτινικής θέσης του kink.

Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε το κριτήριο της αναλλοίωτης μάζας των θυγατρικών σωματιδίων, η οποία δεν μπορεί να υπερβαίνει την αναλλοίωτη μάζα του μπρικού. Δεδομένου ότι η μάζα των φορτισμένων πιονίων είναι περίπου ίση με  $0.139 \text{ GeV}/c^2$  και λαμβάνοντας υπόψη τα περιθώρια σφάλματος επιλέγουμε την αναλλοίωτη μάζα μέσα στα όρια  $0.1 \text{ GeV}/c^2 < \text{Mother invariant mass} < 0.2 \text{ GeV}/c^2$ , ενώ στο σχήμα 97 - παράρτημα 6.7 βλέπουμε τις τροχιές που απορρίπτουμε.



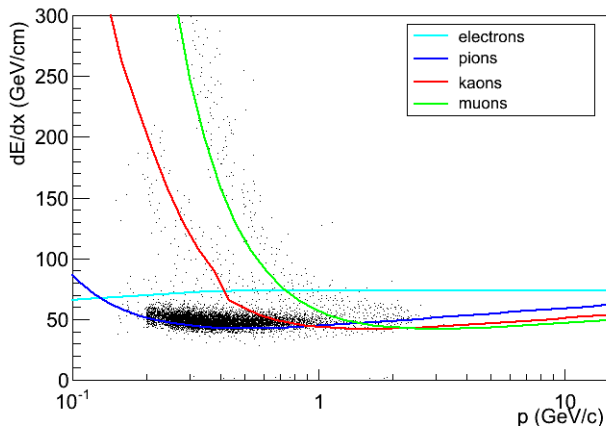
(α') Προσομοιωμένα δεδομένα. Οι μπλε δείκτες αντιστοιχούν σε όλα τα υποψήφια kinks και οι ροζ σε όσα δεν αφορούν πρωτεύοντα πιόνια.

(β') Πραγματικά δεδομένα - πριν τις επιλογές της ρεαλιστικής ταυτοποίησης

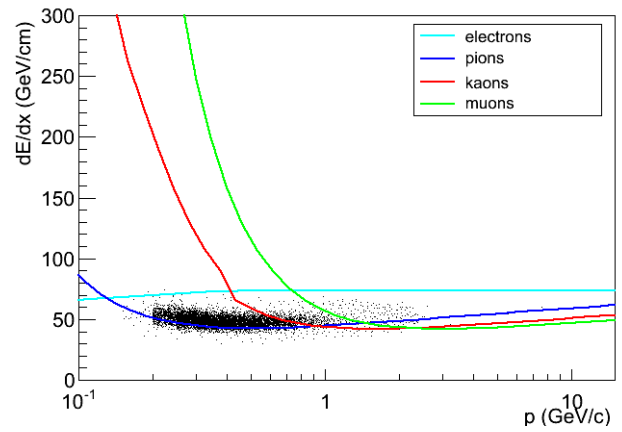
Σχήμα 38: Κατανομή της αναλλοίωτης μάζας  $\mu\pi$ .

Τέλος, εφαρμόζεται η επιλογή τροχιών με βάση την απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους που εμφανίζουν μέσα στον TPC. Είναι ανεκτί απόκλιση μέχρι και  $3\sigma$  από τη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή όπως αυτή προβλέπεται από τη σχέση Bethe-Bloch παραμετροποιημένη για τον συγκεκριμένο ανιχνευτή. Στα σχήματα 40, 39 και 98 - παράρτημα 6.7 φαίνεται ότι ήδη με τις προηγούμενες επιλογές μας έχουμε καθαρίσει το μεγαλύτερο μέρος των kink που δεν αφορούν πιόνια καθώς η επιλογή αυτή απορρίπτει μόλις το 2% των τροχιών.



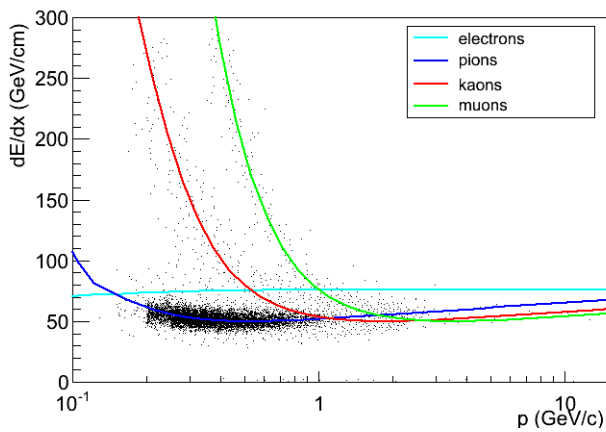


(α') Προσομοιωμένα δεδομένα - πριν τον περιορισμό dE/dx

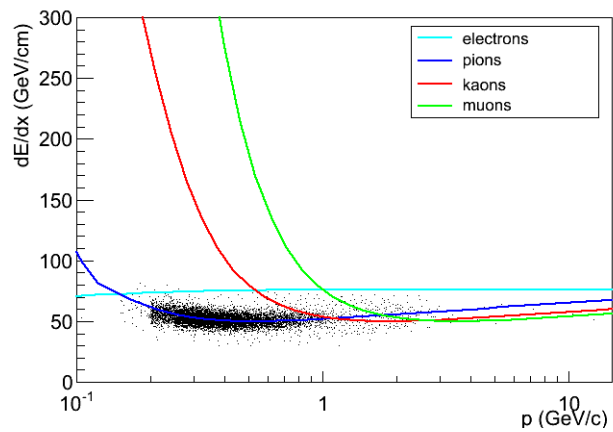


(β') Προσομοιωμένα δεδομένα - μετά τον περιορισμό dE/dx

Σχήμα 39: Απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής συναρτήσει του μέτρου της ορμής όπως μετρώνται στον TPC. Οι καμπύλες αντιστοιχούν στις τιμές που προβλέπονται από τη σχέση Bethe - Bloch παραμετροποιημένη για τον συγκεκριμένο ανιχνευτή (προσομοιωμένα δεδομένα).



(α'') Πραγματικά δεδομένα - πριν τον περιορισμό dE/dx



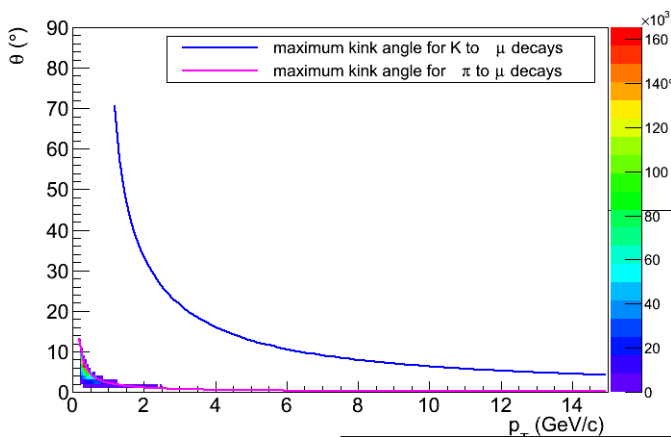
(β'') Πραγματικά δεδομένα - μετά τον περιορισμό dE/dx

Σχήμα 40: Απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής συναρτήσει του μέτρου της ορμής όπως μετρώνται στον TPC. Οι καμπύλες αντιστοιχούν στις τιμές που προβλέπονται από τη σχέση Bethe - Bloch παραμετροποιημένη για τον συγκεκριμένο ανιχνευτή (προσομοιωμένα δεδομένα).

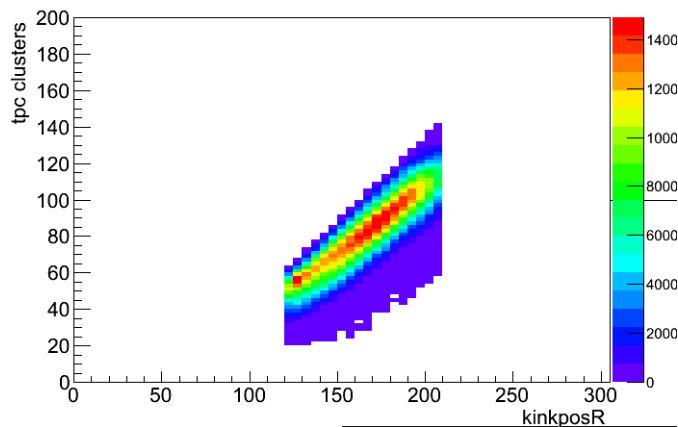
Πίνακας 6: Ρεαλιστική και τέλεια ταυτοποίηση.

	Προσομοιωμένα δεδομένα		Πραγματικά δεδομένα
	πραγματικά kinks πιονίων (τέλεια ταυτοποίηση)	επιλεγμένα kinks (ρεαλιστική ταυτοποίηση)	πραγματικά kinks πιονίων (ρεαλιστική ταυτοποίηση)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• επιλογές γεωμετρίας</li> </ul>	1,312,690 (100%)	2,041,483 (100%)	3,903,322 (100%)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• επιλογές γεωμετρίας</li> <li>• <math>q_T &lt; 40 \text{ MeV}/c</math></li> </ul>		1,365,629 (66.9%)	2,483,570 (63.6%)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• επιλογές γεωμετρίας</li> <li>• <math>q_T &lt; 40 \text{ MeV}/c</math></li> <li>• <math>\theta &lt; 110\% \theta_{\pi_{max}}</math></li> </ul>		1,330,220 (65.2%)	2,420,663 (62.0%)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• επιλογές γεωμετρίας</li> <li>• <math>q_T &lt; 40 \text{ MeV}/c</math></li> <li>• <math>\theta &lt; 110\% \theta_{\pi_{max}}</math></li> <li>• <math>-85.5 + \frac{65}{95} R &lt; NTPC_{clusters} &lt; -51.67 + \frac{11}{12} R</math></li> </ul>		1,301,338 (63.7%)	2,352,296 (60.3%)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• επιλογές γεωμετρίας</li> <li>• <math>q_T &lt; 40 \text{ MeV}/c</math></li> <li>• <math>\theta &lt; 110\% \theta_{\pi_{max}}</math></li> <li>• <math>-85.5 + \frac{65}{95} R &lt; NTPC_{clusters} &lt; -51.67 + \frac{11}{12} R</math></li> <li>• <math>0.1 \text{ GeV}/c^2 &lt; m_{inv} &lt; 0.2 \text{ GeV}/c^2</math></li> </ul>		1,262,206 (61.8%)	2,284,537 (58.5%)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• επιλογές γεωμετρίας</li> <li>• <math>q_T &lt; 40 \text{ MeV}/c</math></li> <li>• <math>\theta &lt; 110\% \theta_{\pi_{max}}</math></li> <li>• <math>-85.5 + \frac{65}{95} R &lt; NTPC_{clusters} &lt; -51.67 + \frac{11}{12} R</math></li> <li>• <math>0.1 \text{ GeV}/c^2 &lt; m_{inv} &lt; 0.2 \text{ GeV}/c^2</math></li> <li>• <math> dE/dx  \leq \langle dE/dx \rangle \pm 3\sigma</math></li> </ul>	1,231,362 (93.8%)	1,257,351 (61.6%)	2,264,478 (58.0%)

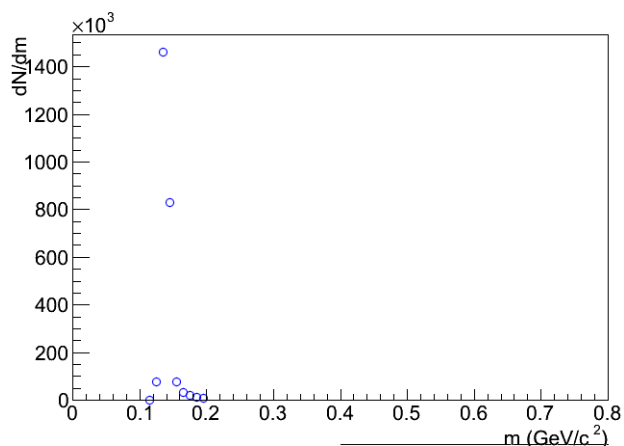
Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι παραπάνω μεταβλητές μετά τις επιλογές της ρεαλιστικής ταυτοποίησης, για πραγματικά δεδομένα και κωδικοί σωματιδίων της μητρικής και θυγατρικής τροχιάς των τελικά επιλεγμένων σωματιδίων.



(α') Κατανομή της γωνίας του kink συναρτήσει του μέτρου της ορμής της μητρικής τροχιάς

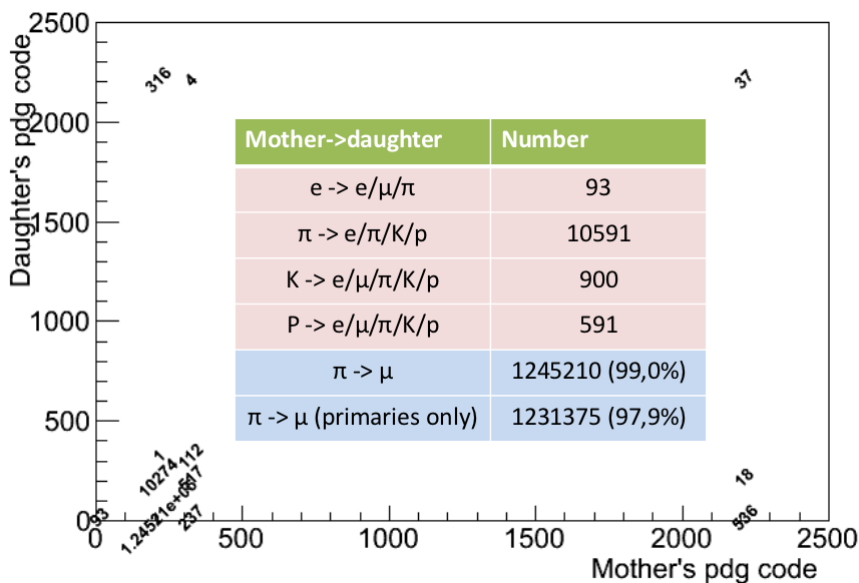


(β') Κατανομή του αριθμού των ιχνών της μητρικής τροχιάς στον TPC συναρτήσει της ακτινικής θέσης του kink



(γ') Κατανομή της αναλλοίωτης μάζας  $\mu\nu$ .

Σχήμα 41: Πραγματικά δεδομένα - μετά τις επιλογές της ρεαλιστικής ταυτοποίησης



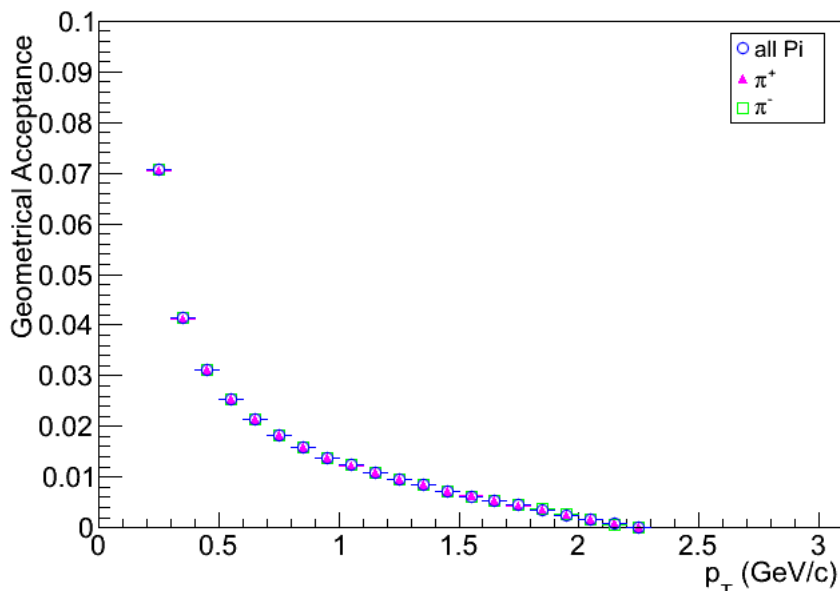
Σχήμα 42: Κωδικοί σωματιδίων της μητρικής και θυγατρικής τροχιάς μετά τις επιλογές της ρεαλιστικής ταυτοποίησης

## 4.8 Υπολογισμός διορθωτικών παραγόντων

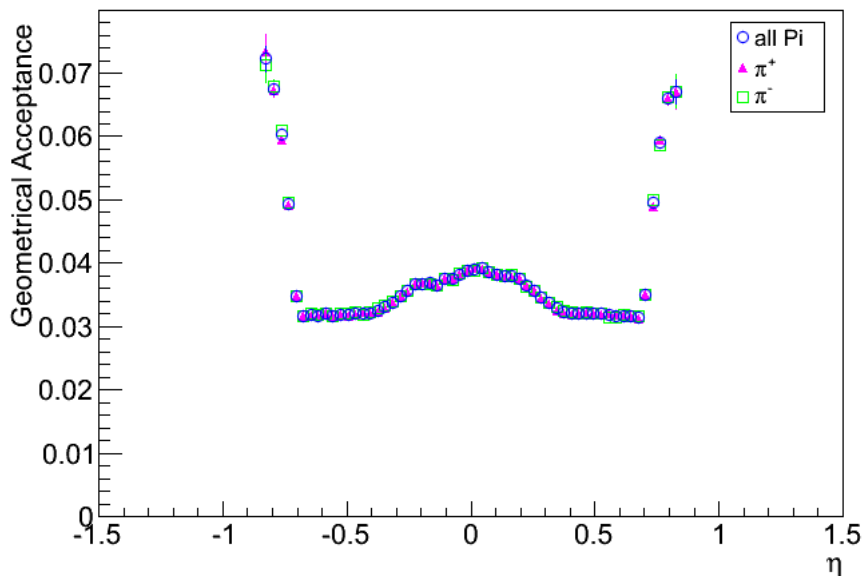
### 4.8.1 Γεωμετρική αποδοχή

Γεωμετρική αποδοχή ή geometrical acceptance (GA) ορίζεται ο λόγος του αριθμού των σωματιδίων που διασπώνται – και άρα μπορούν να εντοπιστούν – σε δεδομένο όγκο προς τον αριθμό των παραγόμενων σωματιδίων στον όγκο αυτό. Για να θεωρηθεί ότι ένα σωματίο διασπάται σε δεδομένο όγκο πρέπει όλα τα προϊόντα της διάσπασης του να εντοπίζονται στον όγκο αυτό.

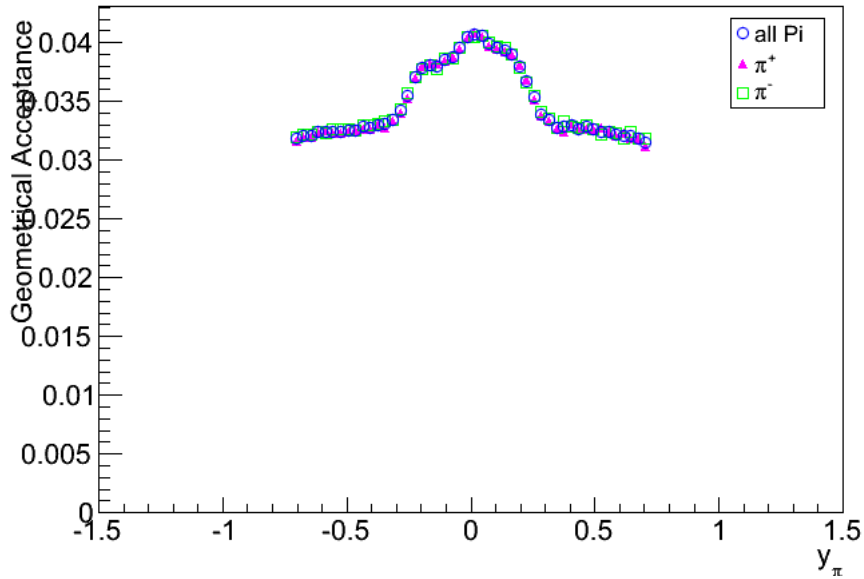
$$GA = \frac{\text{αριθμός σωματιδίων που μπορούν να εντοπιστούν}}{\text{αριθμός σωματιδίων που παράγονται}} \quad (1)$$



Σχήμα 43: Γεωμετρική αποδοχή πιονίων στον κύριο όγκο του TPC συναρτήσει της εγκάρσιας ορμής.



Σχήμα 44: Γεωμετρική αποδοχή πιονίων στον κύριο όγκο του TPC συναρτήσει της ψευδοωκότητας.

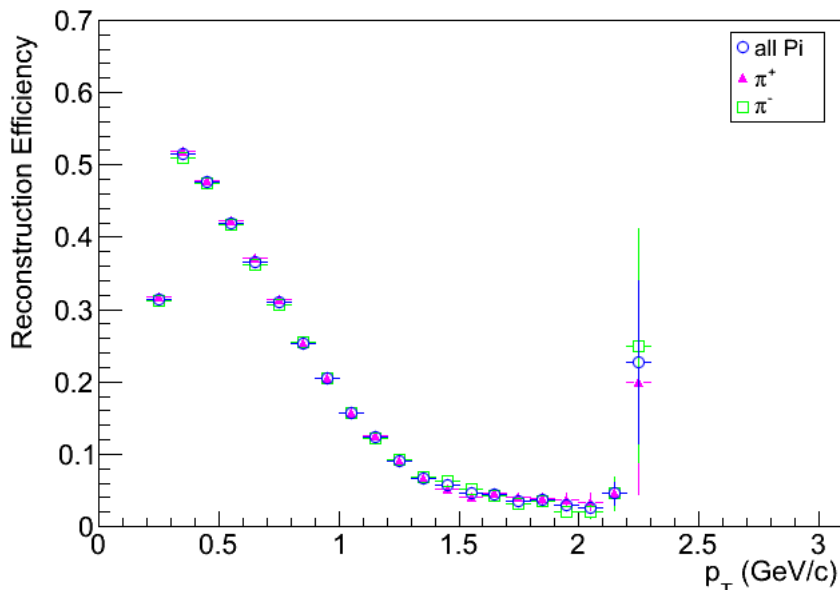


Σχήμα 45: Γεωμετρική αποδοχή πιονίων στον κύριο όγκο του TPC συναρτήσει της ωκότητας.

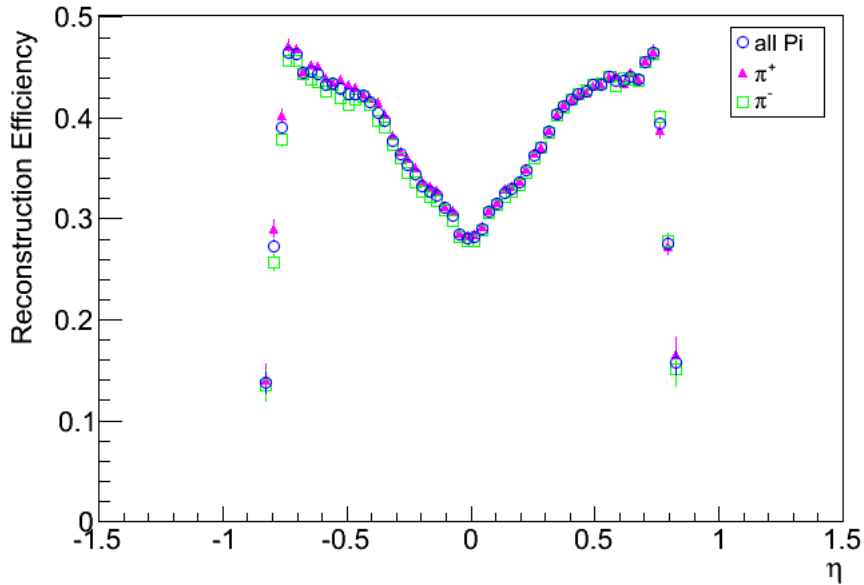
#### 4.8.2 Απόδοση ανακατασκευής

Απόδοση ανακατασκευής ή reconstruction efficiency (RE) ορίζεται ο λόγος του αριθμού των ανακατασκευασμένων σωματιδίων που επιλέγονται με ρεαλιστική ταυτοποίηση και επιβεβαιώνονται με τέλεια σε δεδομένο όγκο προς τον αριθμό των παραγόμενων σωματιδίων που μπορούν να εντοπιστούν στον όγκο αυτό. Ο παρονομαστής συμπίπτει με τον αριθμητή της γεωμετρικής αποδοχής.

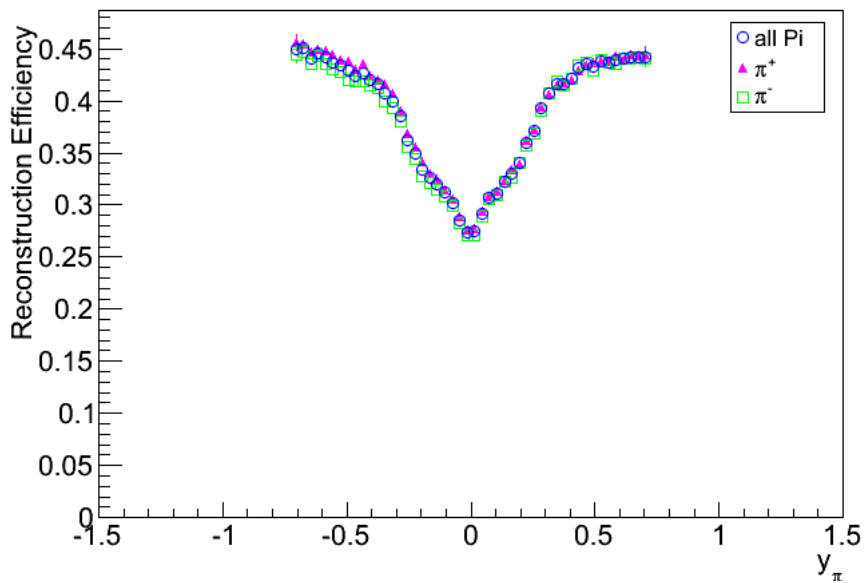
$$RE = \frac{\text{αριθμός σωματιδίων που επιλέγονται και επιβεβαιώνονται}}{\text{αριθμός σωματιδίων που μπορούν να εντοπιστούν}} \quad (2)$$



Σχήμα 46: Απόδοση ανακατασκευής πιονίων στον κύριο όγκο του TPC συναρτήσει της εγκάρσιας ορμής.



Σχήμα 47: Απόδοση ανακατασκευής πιονίων στον κύριο όγκο του TPC συναρτήσει της ψευδο-ωκύτητας.

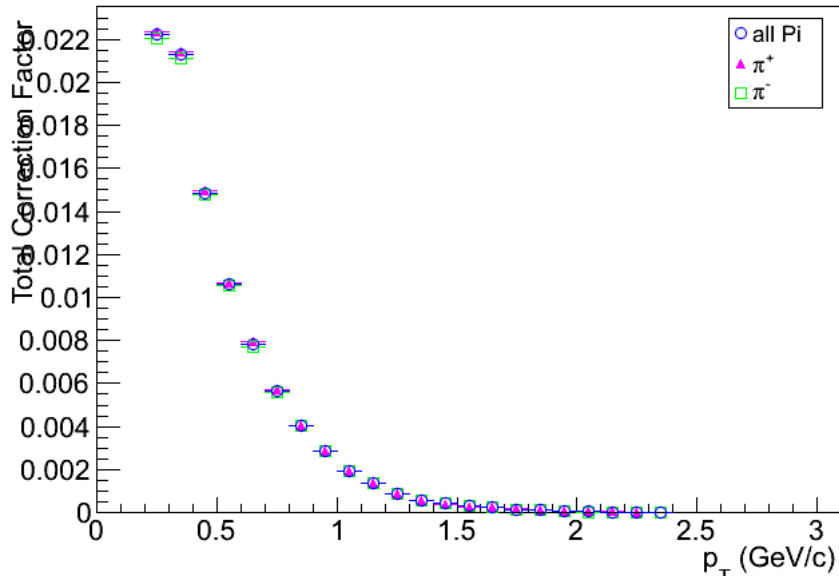


Σχήμα 48: Απόδοση ανακατασκευής πιονίων στον κύριο όγκο του TPC συναρτήσει της ωκύτητας.

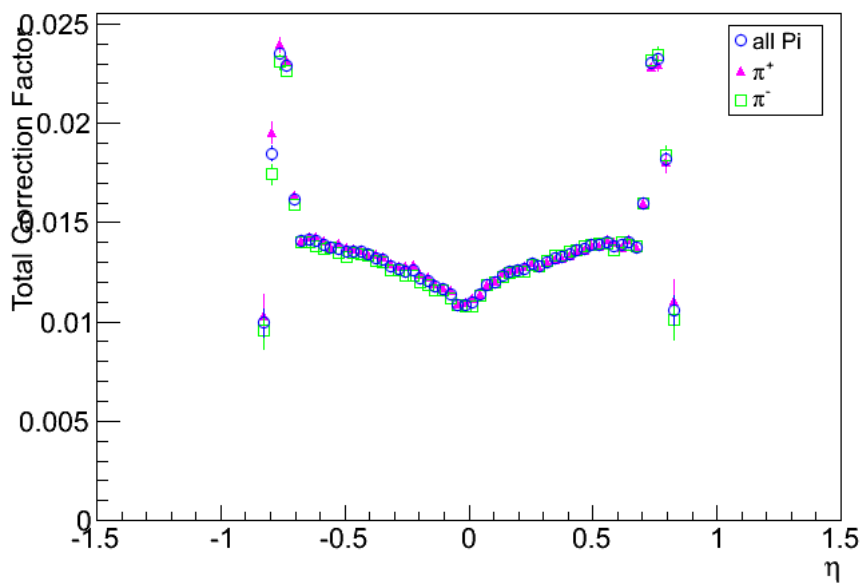
### 4.8.3 Φυσική απόδοση ή Ολικός διορθωτικός παράγοντας

Φυσική απόδοση ή physical efficiency (PE) ή Ολικός διορθωτικός παράγοντας ή Total Correction Factor (TCF) ορίζεται το γινόμενο γεωμετρικής αποδοχής και απόδοσης ανακατασκευής, δηλαδή ο λόγος του αριθμού των ανακατασκευασμένων σωματιδίων που επιλέγονται με ρεαλιστική ταυτοποίηση προς τον αριθμό των σωματιδίων που παρήχθησαν σε ένα δεδομένο όγκο. Πρόκειται για τον παράγοντα με τον οποίο πρέπει να διαιρεθούν τα επιλεγμένα σωματάρια για να αναχθούν στα παραγόμενα.

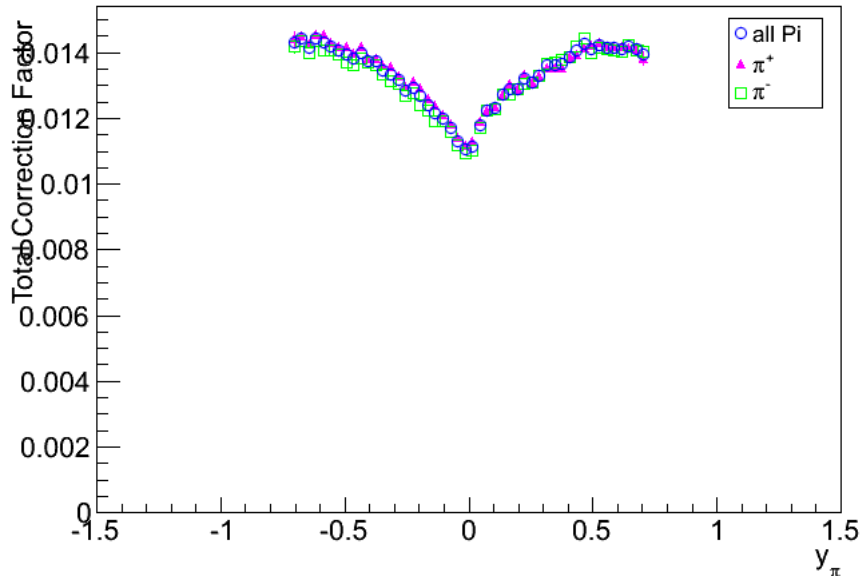
$$TCF = GA \cdot RE = \frac{\text{αριθμός σωματιδίων που επιλέγονται με ρεαλιστική ταυτοποίηση}}{\text{αριθμός παραχθέντων σωματιδίων}} \quad (3)$$



Σχήμα 49: Ολικός διορθωτικός παράγοντας επιλεγμένων πιονίων συναρτήσει της εγκάρσιας ορμής.



Σχήμα 50: Ολικός διορθωτικός παράγοντας επιλεγμένων πιονίων συναρτήσει της ψευδοωκότητας.



Σχήμα 51: Ολικός διορθωτικός παράγοντας επιλεγμένων πιονίων συναρτήσει της ωκύτητας.

#### 4.8.4 Απόδοση ταυτοποίησης

Απόδοση ταυτοποίησης ή Particle IDentification Efficiency (PIDE) ορίζεται ο λόγος του αριθμού των ανακατασκευασμένων σωματιδίων που επιλέγονται με ρεαλιστική ταυτοποίηση και επιβεβαιώνονται με τέλεια σε δεδομένο όγκο προς τον αριθμό των ανακατασκευασμένων σωματιδίων που εντοπίζονται με τέλεια ταυτοποίηση στον όγκο αυτό. Ο αριθμητής συμπίπτει με τον αριθμητή της απόδοσης ανακατασκευής.

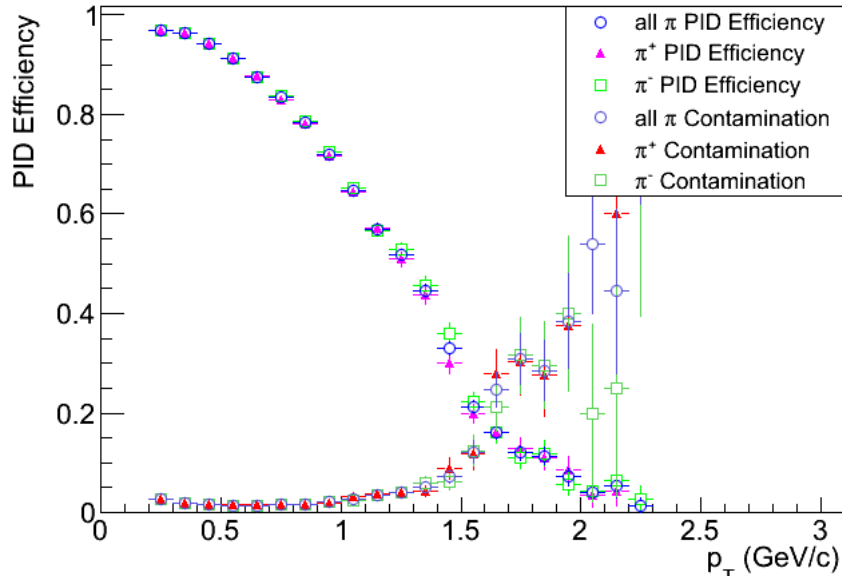
$$PIDE = \frac{\text{αριθμός σωματιδίων που επιλέγονται και επιβεβαιώνονται}}{\text{αριθμός σωματιδίων που εντοπίζονται}} \quad (4)$$

#### 4.8.5 Προσμίξεις

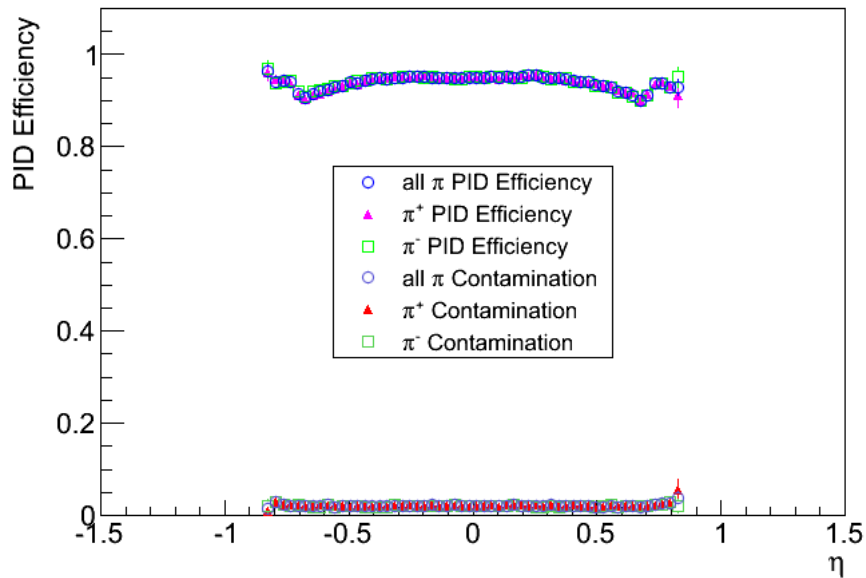
Προσμίξεις ή Contamination (C) ορίζεται ο λόγος του αριθμού των ανακατασκευασμένων σωματιδίων που επιλέγονται με ρεαλιστική ταυτοποίηση και δεν επιβεβαιώνονται με τέλεια σε δεδομένο όγκο προς τον αριθμό των ανακατασκευασμένων σωματιδίων που επιλέγονται με ρεαλιστική ταυτοποίηση στον όγκο αυτό.

$$C = \frac{\text{αριθμός σωματιδίων που επιλέγονται και δεν επιβεβαιώνονται}}{\text{αριθμός σωματιδίων που επιλέγονται}} \quad (5)$$

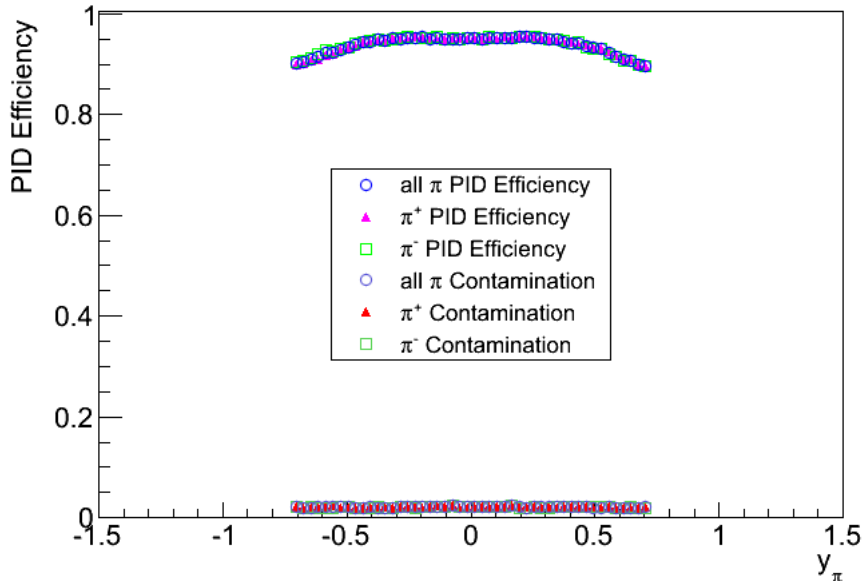




Σχήμα 52: Απόδοση ταυτοποίησης πιονίων και προσμίξεις στον κύριο όγκο του TPC συναρτήσει της εγκάρσιας ορμής.



Σχήμα 53: Απόδοση ταυτοποίησης πιονίων και προσμίξεις στον κύριο όγκο του TPC συναρτήσει της ψευδοωκύτητας.

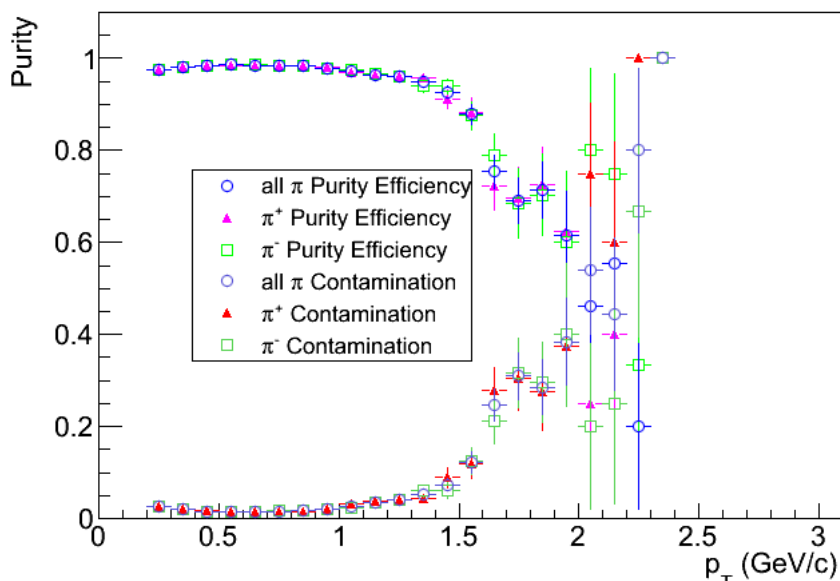


Σχήμα 54: Απόδοση ταυτοποίησης πιονίων και προσμίξεις στον κύριο όγκο του TPC συναρτήσει της ωκύτητας.

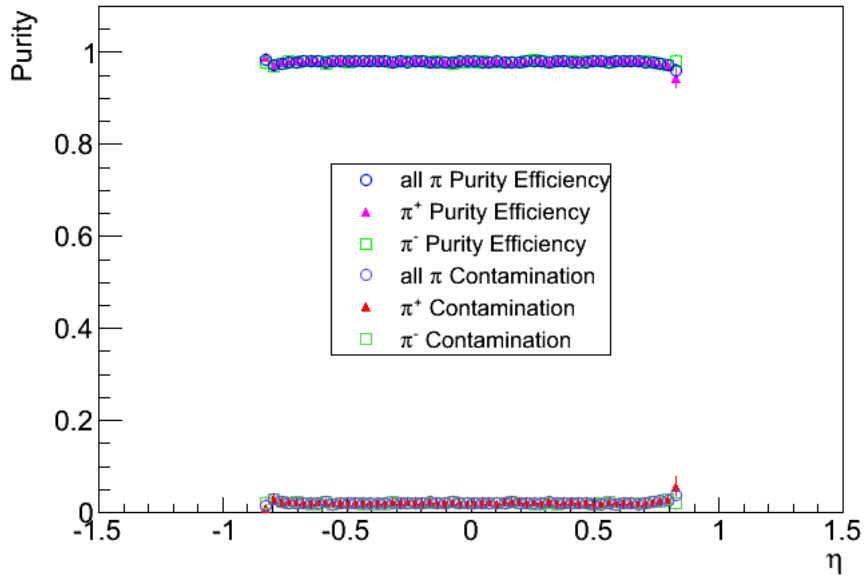
#### 4.8.6 Καθαρότητα

Καθαρότητα ή Purity (P) ορίζεται ο λόγος του αριθμού των ανακατασκευασμένων σωματιδίων που επιλέγονται με ρεαλιστική ταυτοποίηση και επιβεβαιώνονται με τέλεια σε δεδομένο όγκο προς τον αριθμό των ανακατασκευασμένων σωματιδίων που επιλέγονται με ρεαλιστική ταυτοποίηση στον όγκο αυτό. Ο αριθμητής συμπίπτει με τον αριθμητή της απόδοσης ταυτοποίησης και ο παρονομαστής συμπίπτει με τον παρονομαστή των προσμίξεων.

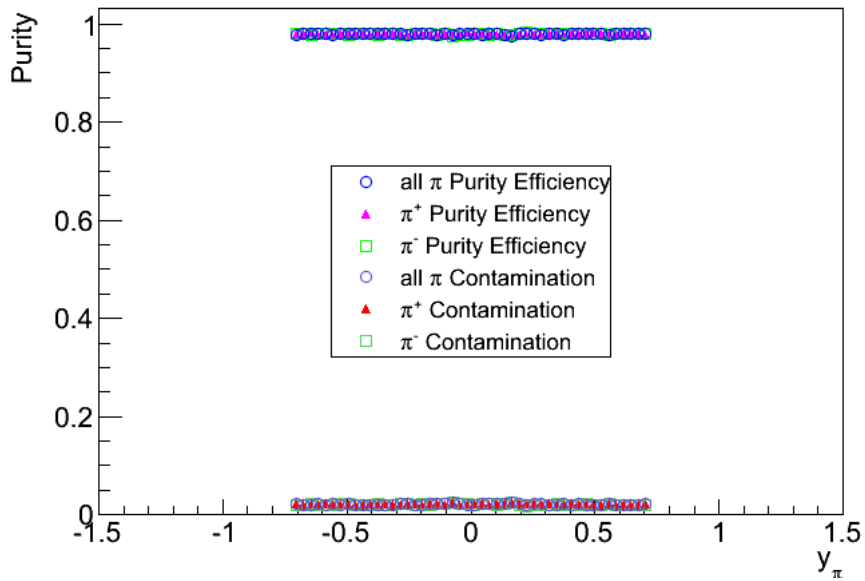
$$P = \frac{\text{αριθμός σωματιδίων που επιλέγονται και επιβεβαιώνονται}}{\text{αριθμός σωματιδίων που επιλέγονται}} \quad (6)$$



Σχήμα 55: Καθαρότητα και προσμίξεις επιλεγμένων πιονίων συναρτήσει της εγκάρσιας ορμής.



Σχήμα 56: Καθαρότητα και προσμίξεις επιλεγμένων πιονίων συναρτήσει της ψευδοωκύτητας.



Σχήμα 57: Καθαρότητα και προσμίξεις επιλεγμένων πιονίων συναρτήσει της ωκύτητας.

## 4.9 Συστηματικά σφάλματα

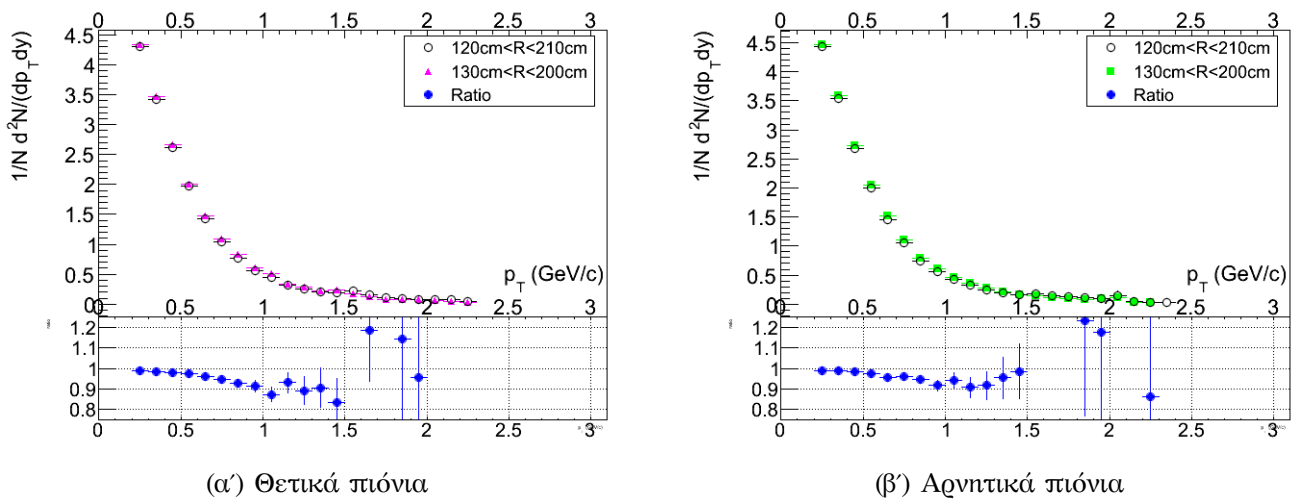
Ο υπολογισμός των συστηματικών σφαλμάτων γίνεται ως εξής:

- Υπολογίζονται οι διορθωτικοί παράγοντες με αλλαγμένη μόνο μια επιλογή (πχ επιλογή ακτίνας).
- Σχεδιάζονται τα ιστογράμματα των πραγματικών δεδομένων με την ίδια αλλαγή.
- Διορθώνονται τα ιστογράμματα των πραγματικών δεδομένων με τους νέους διορθωτικούς παράγοντες και κανονικοποιούνται.
- Συγκρίνονται τα κανονικοποιημένα και διορθωμένα ιστογράμματα πριν και μετά την αλλαγή και εκτιμάται το αντίστοιχο συστηματικό σφάλμα.

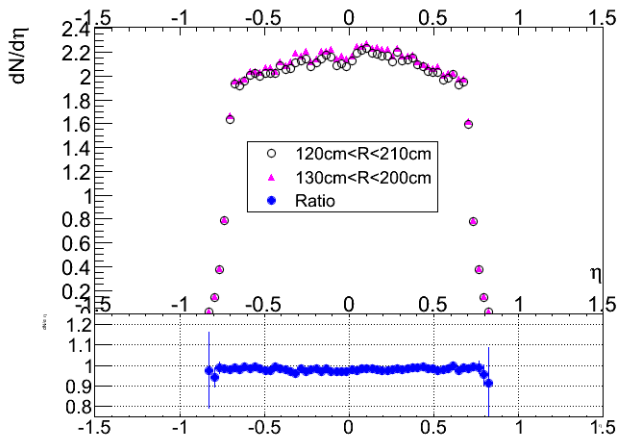
Για παράδειγμα στην περίπτωση της επίλογής της ακτινικής θέσης του kink, αρχικά υπολογίζουμε τους διορθωτικούς παράγοντες (γεωμετρική αποδοχή, απόδοση ανακατασκευής, καθαρότητα) από τα προσομοιωμένα δεδομένα, όπως και στην κανονική μας ανάλυση, αλλάζοντας τα όρια της ακτινικής θέσης του kink. Στην συνέχεια σχεδιάζουμε τα φάσματα των πραγματικών δεδομένων κάνοντας και πάλι την αλλαγή στο εύρος της ακτινικής θέσης. Διορθώνουμε τα φάσματα αυτά με βάση τους διορθωτικούς παράγοντες που υπολογίστηκαν και τα κανονικοποιούμε στον αριθμό των πραγματικών γεγονότων. Τέλος συγκρίνουμε τα φάσματα που παρήχθησαν με και χωρίς την αλλαγή στην ακτινική θέση του kink, συναρτήσσει της εγκάρσιας ορμής, της ψευδο-ωκύτητας και της ωκύτητας. Με βάση τον λόγο των δύο φασμάτων υπολογίζουμε το αντίστοιχο συστηματικό σφάλμα.

### 4.9.1 Σφάλμα επιλογής ακτινικής θέσης

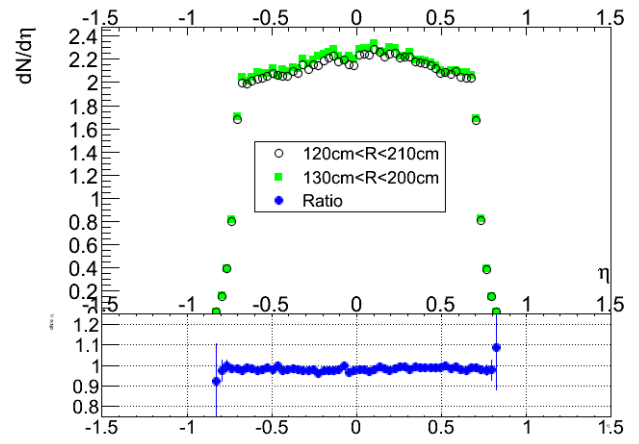
Αλλάζοντας την επιλογή ακτίνας από  $120\text{ cm} < R < 210\text{ cm}$  σε  $130\text{ cm} < R < 200\text{ cm}$ , το αντίστοιχο συστηματικό σφάλμα  $\delta\sigma_R$  εκτιμάται από τα παρακάτω ιστογράμματα:



Σχήμα 58: Διορθωμένες και κανονικοποιημένες κατανομές εγκάρσιας ορμής με διαφορετικές επιλογές για την ακτίνα και ο μεταξύ τους λόγος.

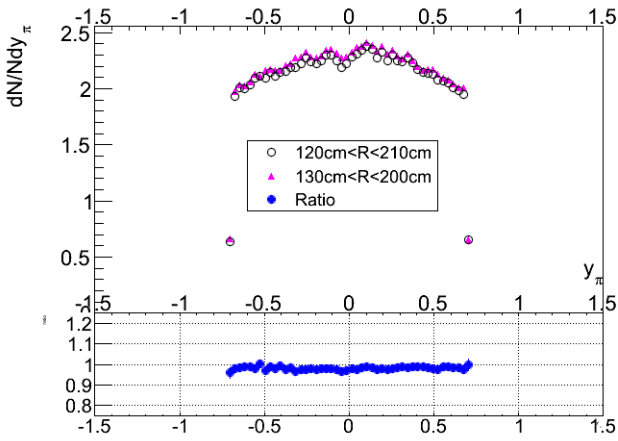


(α') Θετικά πόνια

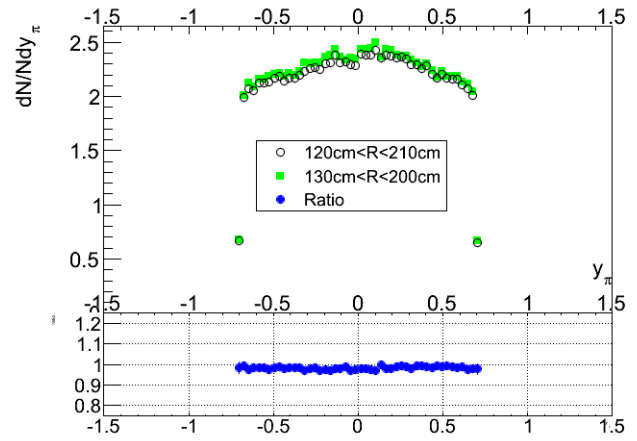


(β') Αρνητικά πόνια

Σχήμα 59: Διορθωμένες και κανονικοποιημένες κατανομές ψευδοωκύτητας με διαφορετικές επιλογές για την ακτίνα και ο μεταξύ τους λόγος.



(α') Θετικά πόνια

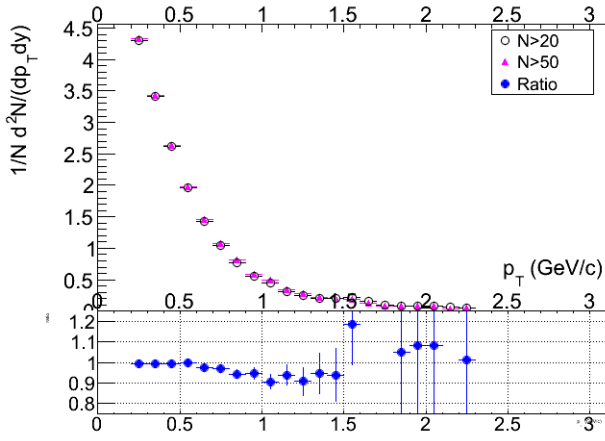


(β') Αρνητικά πόνια

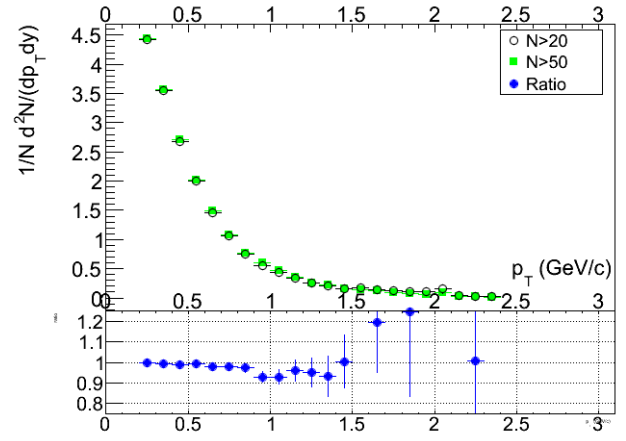
Σχήμα 60: Διορθωμένες και κανονικοποιημένες κατανομές ωκύτητας με διαφορετικές επιλογές για την ακτίνα και ο μεταξύ τους λόγος.

#### 4.9.2 Σφάλμα επιλογής ελαχίστου αριθμού ιχνών (clusters) τροχιάς στον TPC

Αλλάζοντας την επιλογή από  $N_{\text{TPC clusters}} > 20$  σε  $N_{\text{TPC clusters}} > 30$ , το αντίστοιχο συστηματικό σφάλμα  $\delta\sigma_{\text{TPC}}$  εκτιμάται από τα παρακάτω ιστογράμματα:

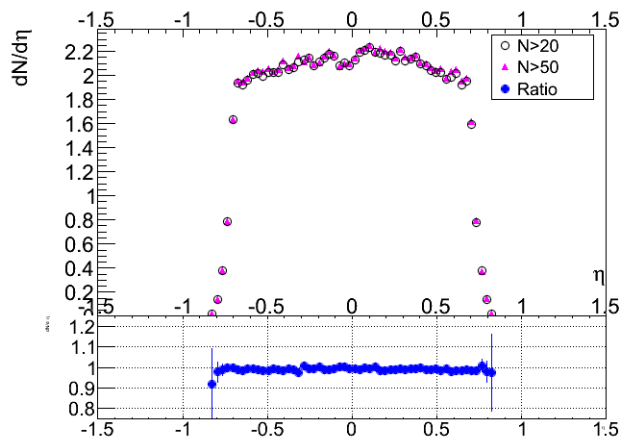


(α) Θετικά πόνια

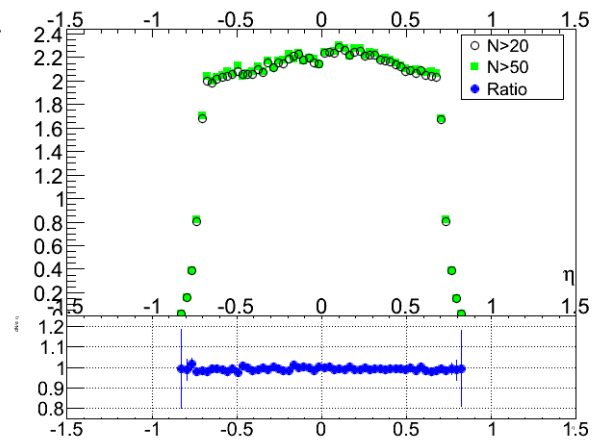


(β) Αρνητικά πόνια

Σχήμα 61: Διορθωμένες και κανονικοποιημένες κατανομές εγκάρσιας ορμής με διαφορετικές επιλογές για τον ελάχιστο αριθμό ιχνών στον TPC και ο μεταξύ τους λόγος.

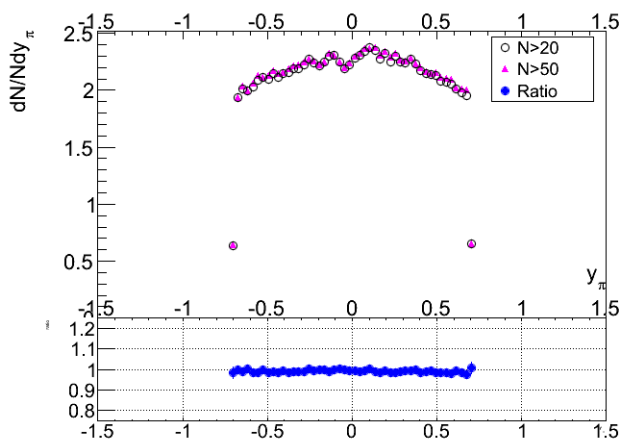


(α) Θετικά πόνια

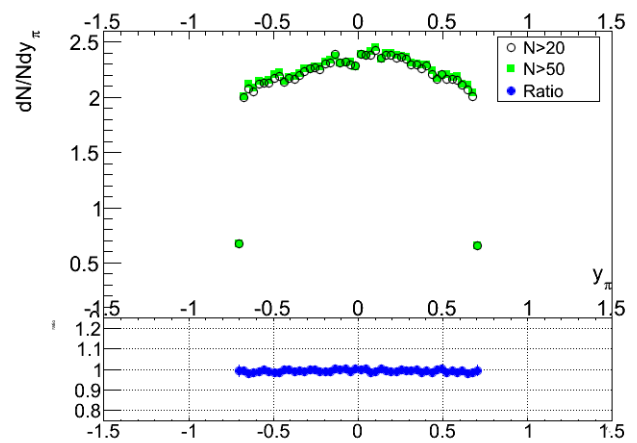


(β) Αρνητικά πόνια

Σχήμα 62: Διορθωμένες και κανονικοποιημένες κατανομές ψευδοωκότητας με διαφορετικές επιλογές για τον ελάχιστο αριθμό ιχνών στον TPC και ο μεταξύ τους λόγος.



(α) Θετικά πόνια

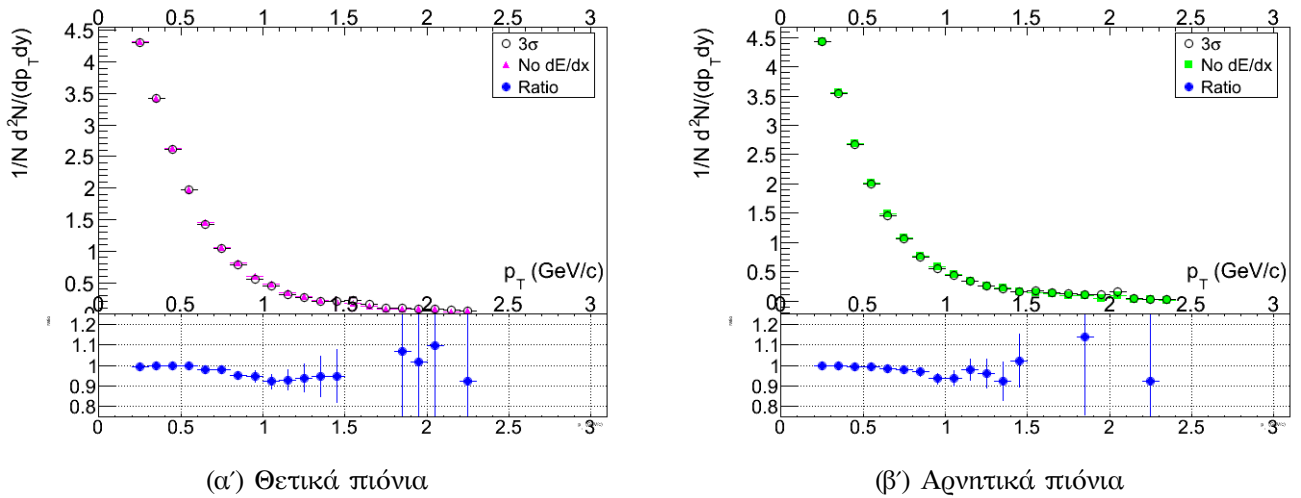


(β) Αρνητικά πόνια

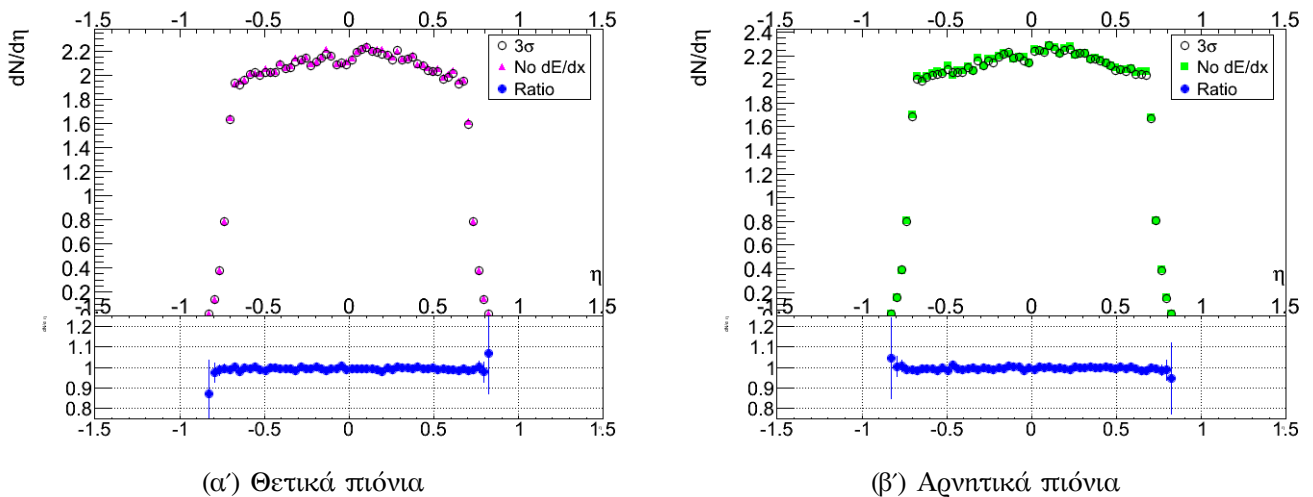
Σχήμα 63: Διορθωμένες και κανονικοποιημένες κατανομές ωκότητας με διαφορετικές επιλογές για τον ελάχιστο αριθμό ιχνών στον TPC και ο μεταξύ τους λόγος.

### 4.9.3 Σφάλμα επιλογής dE/dx

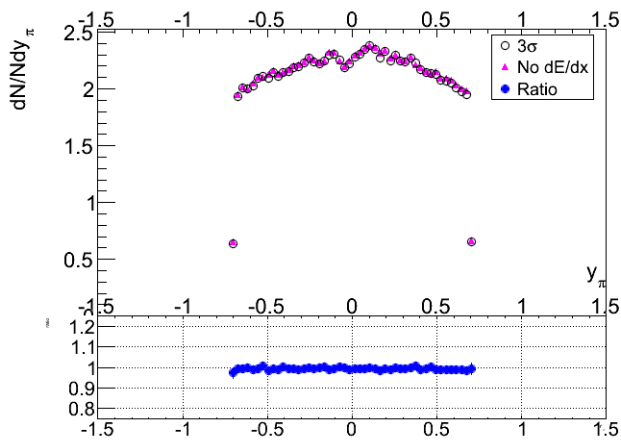
Αλλάζοντας την επιλογή από  $|dE/dx| \leq \langle dE/dx \rangle \pm 4\sigma$  σε  $|dE/dx| \leq \langle dE/dx \rangle \pm 3\sigma$ , το αντίστοιχο συστηματικό σφάλμα  $\delta\sigma_{dE/dx}$  εκτιμάται από τα παρακάτω ιστογράμματα:



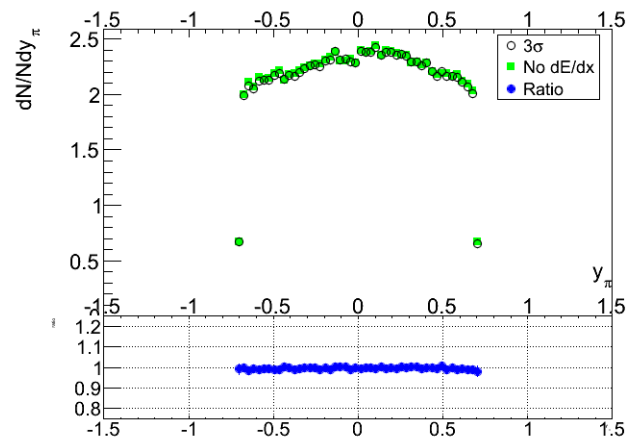
Σχήμα 64: Διορθωμένες και κανονικοποιημένες κατανομές εγκάρσιας ορμής με διαφορετικές επιλογές dE/dx και ο μεταξύ τους λόγος.



Σχήμα 65: Διορθωμένες και κανονικοποιημένες κατανομές ψευδοωκότητας με διαφορετικές επιλογές dE/dx και ο μεταξύ τους λόγος.



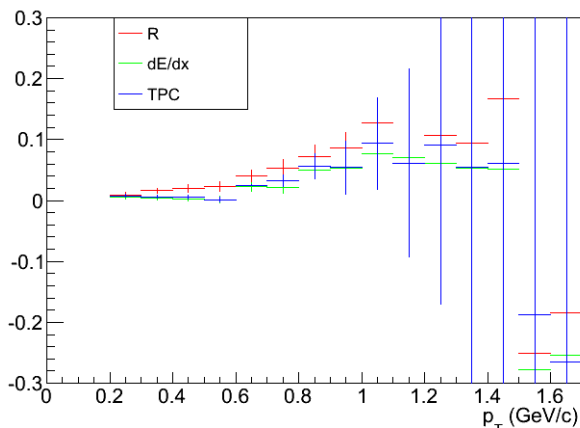
(α') Θετικά πιόνια



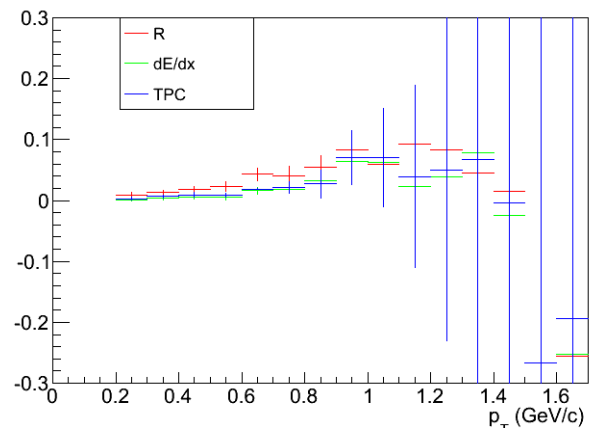
(β') Αρνητικά πιόνια

Σχήμα 66: Διορθωμένες και κανονικοποιημένες κατανομές ωκύτητας με διαφορετικές επιλογές dE/dx και ο μεταξύ τους λόγος.

#### 4.9.4 Σημασία συστηματικών σφαλμάτων



(α') Θετικά πιόνια



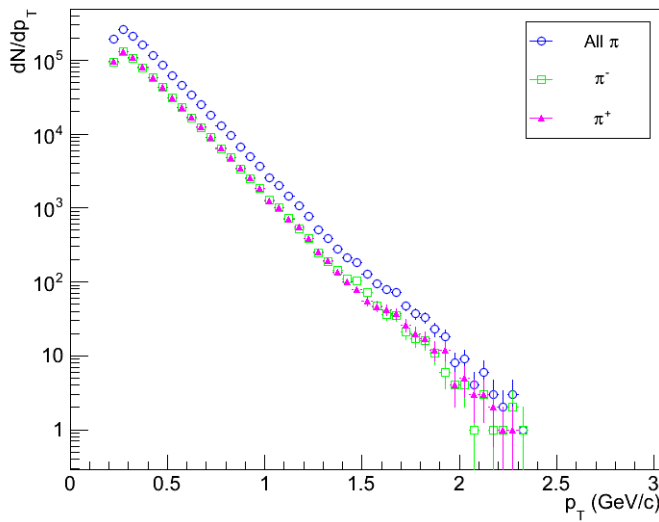
(β') Αρνητικά πιόνια

Σχήμα 67: Ποσοστό συστηματικού σφάλματος συναρτήσει της εγκάρσιας ορμής. Τα σφάλματα υπολογίστηκαν με βάση τον τύπο  $\frac{\sqrt{stat_{nominal}^2 - stat_{syst}^2}}{nominal}$  και δείχνουν την σημασία του στατιστικού σφάλματος. Στο σημείο που το σφάλμα ξεπερνάει την απόκλιση από το μηδέν τα στατιστικά σφάλματα ξεπερνάνε κατά πολύ τα συστηματικά.

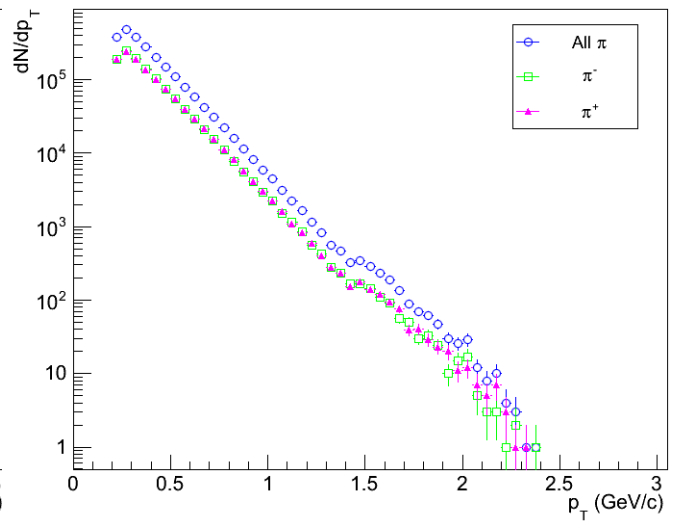
#### 4.10 Διορθωμένες και κανονικοποιημένες κατανομές (συστηματικά και στατιστικά σφάλματα)

Οι κατανομές της εγκάρσιας ορμής, της ωκύτητας και της ψευδοωκύτητας διορθώνονται με βάσης τους διορθωτικούς παράγοντες που υπολογίστηκαν παραπάνω και στην συνέχεια κανονικοποιούνται. Το ολικό συστηματικό σφάλμα υπολογίζεται από τη σχέση πρόσθεσης σφαλμάτων  $\delta\sigma_{tot} = \sqrt{\delta\sigma_{stat}^2 + \delta\sigma_R^2 + \delta\sigma_{TPCclusters}^2 + \delta\sigma_{dE/dx}^2}$  εφαρμόζεται στις κανονικοποιημένες κατανομές προκειμένου να προκύψουν οι τελικές. Στην συνέχεια φαίνονται οι κατανομές εγκάρσιας ορμής πριν τις διορθώσεις για πραγματικά και προσομοιωμένα δεδομένα, αλλά και οι διορθωμένες και κανονικοποιημένες κατανομές.



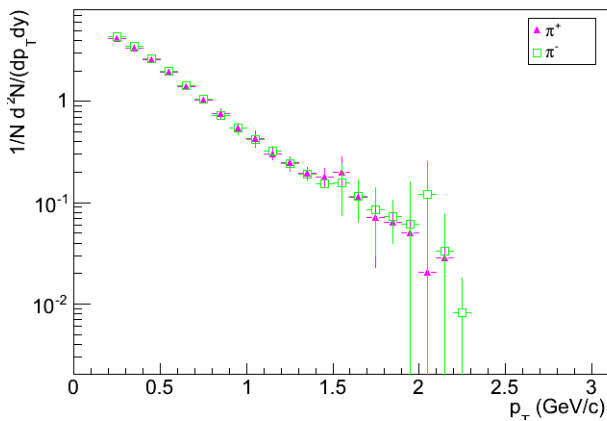


(α') Προσομοιωμένα δεδομένα

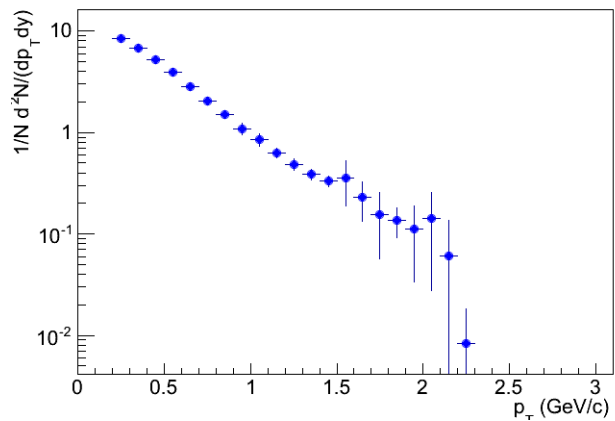


(β') Πραγματικά δεδομένα

Σχήμα 68: Κατανομή εγκάρσιας ορμής φορτισμένων πιονίων πριν τις διορθώσεις.

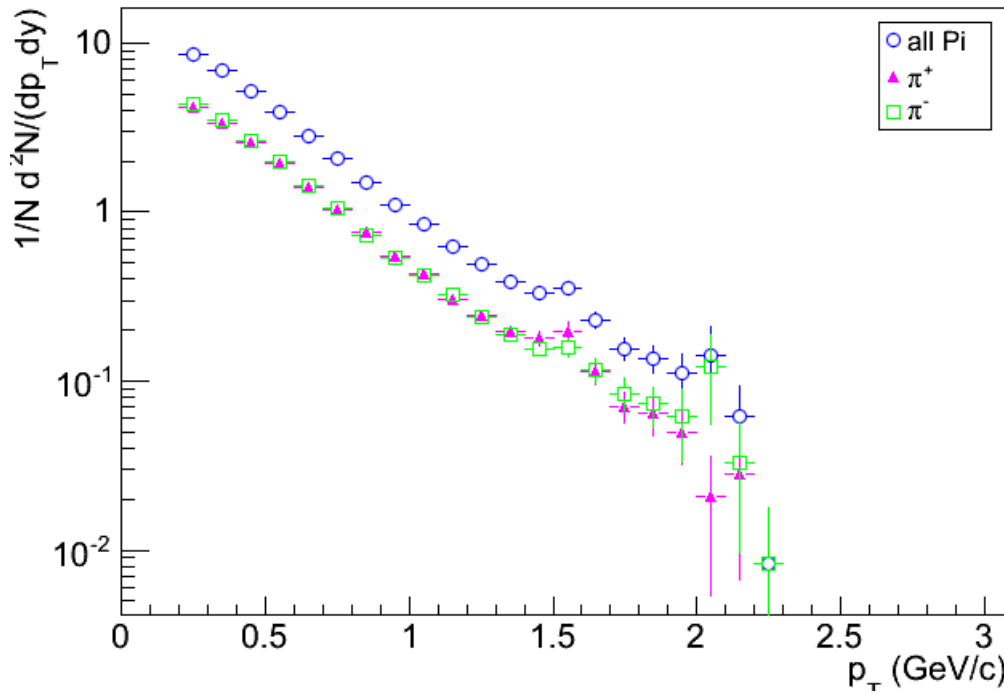


(α'') Θετικά και αρνητικά πιόνια

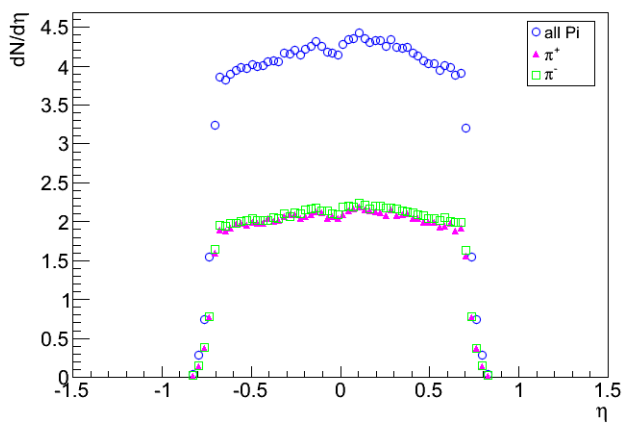


(β'') Όλα τα πιόνια

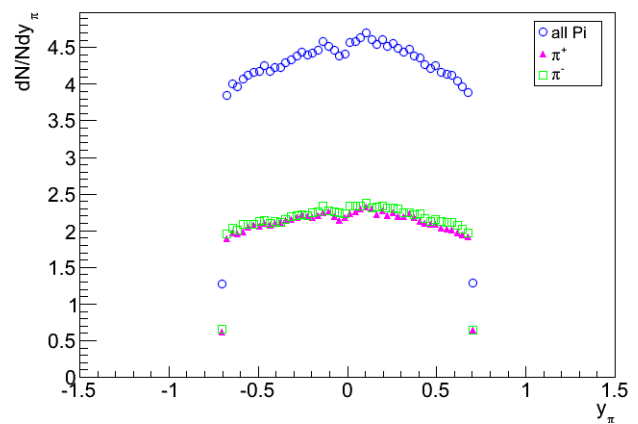
Σχήμα 69: Πλήρως διορθωμένη κατανομή εγκάρσιας ορμής φορτισμένων πιονίων (συμπεριλαμβάνονται συστηματικά και στατιστικά σφάλματα).



Σχήμα 70: Πλήρως διορθωμένη κατανομή εγκάρσιας ορμής φορτισμένων πιονίων (συμπεριλαμβάνονται συστηματικά και στατιστικά σφάλματα).



(α') Κατανομή ψευδοωκύτητας



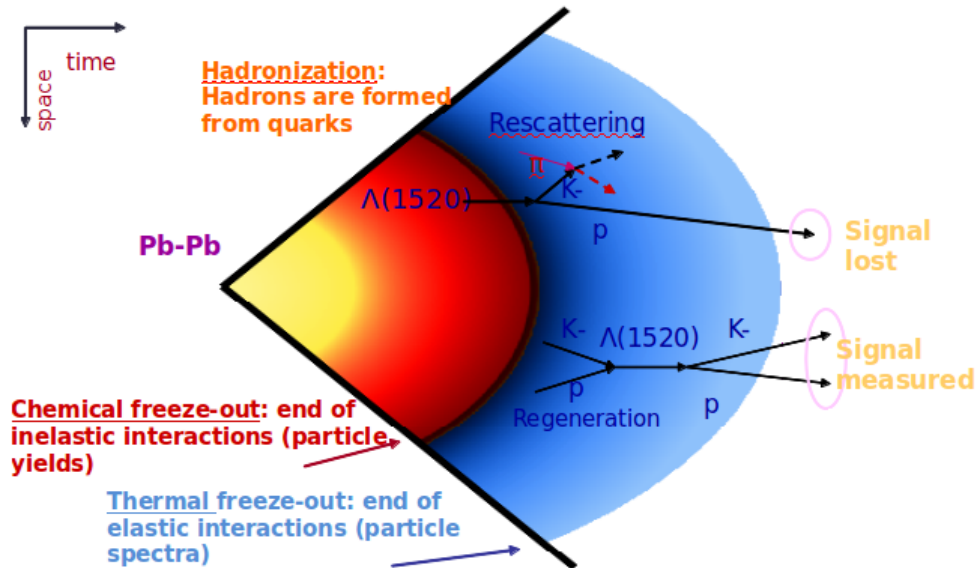
(β') Κατανομή ωκύτητας

Σχήμα 71: Πλήρως διορθωμένες κατανομές ωκύτητας και ψευδοωκύτητας όλων των φορτισμένων πιονίων (συμπεριλαμβάνονται συστηματικά και στατιστικά σφάλματα).

#### 4.11 Συντονισμοί

Η μελέτη των συντονισμών κατέχει σημαντικό ρόλο στην ανάλυση δεδομένων τόσο στις συγκρούσεις p-p όσο και στις συγκρούσεις Pb-Pb. Στις πρώτες συνεισφέρει στην κατανόηση των αδρονικών παραγώγων, αφού τα προϊόντα των διασπάσεων τους αποτελούν μεγάλο ποσοστό των τελικών σωματιδίων. Ακόμα προσφέρει μία βάση σύγκρισης με τα δεδομένα από συγκρούσεις Pb-Pb. Στην περίπτωση των βαρέων ιόντων, οι συντονισμοί αποτελούν έναν τρόπο παρακολούθησης της δυναμικής εξέλιξης του μέσου που δημιουργείται κατά την σύγκρουση των ιόντων.

Υπολογισμοί της Κβαντικής Χρωμοδυναμικής πλέγματος (Lattice QCD) προβλέπουν, σε μεγάλες θερμοκρασίες και/ή σε μεγάλες πυκνότητες, μία αλλαγή φάσης από την αδρονική ύλη σε πλάσμα κουάρκ-γλουονίων. Για να μελετήσουμε την ύλη σε τέτοιες ακραίες συνθήκες χρειαζόμαστε συγκρούσεις βαρέων ιόντων σε υψηλές ενέργειες. Στο αρχικό στάδιο αυτών των συγκρούσεων οι αλληλεπιδράσεις των παρτονίων στο σύστημα, μπορεί να επιτύχουν χημική και τοπικά θερμική ισορροπία στο σύστημα και να δημιουργηθεί πλάσμα κουάρκ-γλουονίων. Καθώς το σύστημα επεκτείνεται και κρυώνει, δημιουργούνται αδρόνια και σταματούν οι ανελαστικές αλληλεπιδράσεις (chemical freeze-out). Μετά και από μια περίοδο αδρονικών αλληλεπιδράσεων, το σύστημα φτάνει σε μια κατάσταση τα αδρόνια σταματούν να αλληλεπιδρούν (kinetic/thermal freeze-out) [17, 18, 19]. Στην συνέχεια τα σωματίδια κινούνται προς τους ανιχνευτές, όπου και μετρούνται.



Σχήμα 72: Συντονισμοί ως υπογραφές αλλαγών φάσης

Ο μέσος χρόνος ζωής ενός συντονισμού είναι μερικά fm/c και είναι συγκρίσιμος με τον αναμενόμενο χρόνο ζωής της θερμής και πυκνής ύλης που παράγεται κατά τις συγκρούσεις βαρέων ιόντων [20]. Σε ένα τέτοιο σύστημα οι συντονισμοί βρίσκονται πολύ κοντά με άλλα ισχυρά αλληλεπιδρώντα αδρόνια και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την τροποποίηση των διάφορων ιδιοτήτων τους όπως η μάζα και το πλάτος [21, 22]. Έτσι η μέτρηση των ιδιοτήτων των συντονισμών παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες για την δυναμική των αλληλεπιδράσεων σε τέτοιες συγκρούσεις [23, 24].

Οι αδρονικοί συντονισμοί είναι ευαίσθητοι στις ιδιότητες του θερμού και πυκνού μέσου που δημιουργείται σε συγκρούσεις βαρέων ιόντων. Κατά την αδρονική φάση, δηλαδή μετά την παραγωγή των αδρονίων από κουάρκ και γλουόνια, οι συντονισμοί είναι χρήσιμοι για τον προσδιορισμό του χρόνου μεταξύ chemical και kinetic freeze-out, με την προϋπόθεση ότι η επανασκέδαση των διασπόμενων σωματιδίων και οι πιθανότητες αναγέννησης των συντονισμών από τα αδρόνια εξαρτώνται από τις ιδιότητες τους συστήματος και τον χρόνο ζωής των συντονισμών.

Ο χρόνος ζωής των συντονισμών συνδέεται με το εύρος με τη σχέση:  $\Gamma = \hbar/\tau$  και είναι της τάξης των  $10^{-23}$  sec. Λόγω του εξαιρετικά μικρού χρόνου ζωής τους, τα σωματίδια αυτά θα

διανύσουν απόσταση ίση με  $l = c \cdot \tau$  της τάξης των fm/c. Επομένως δεν έχουμε τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε τα ίδια τα σωματίδια, καθώς πρακτικά διασπώνται στο σημείο σύγκρουσης των δεσμών του LHC. Μπορούμε όμως να τα ανακατασκευάσουμε έμμεσα, μέσω του υπολογισμού της αναλλοίωτης μάζας των θυγατρικών τους, τα οποία μπορούν να καταγραφούν από τους ανιχνευτές του ALICE.

Το  $\phi(1020)$  είναι το ελαφρύτερο διανυσματικό μεσόνιο το οποίο αποτελείται αποκλειστικά από strange quarks, και παρέχει ένα μέσο για την μέτρηση της παραγωγής παραξενιάς. Η μάζα του σωματιδίου έχει την τιμή  $M_\phi = 1019.455 \pm 0.020 \text{ MeV}/c^2$  και εύρος  $\Gamma_\phi = 4.26 \pm 0.04 \text{ MeV}/c^2$  [25]. Ομοίως και το  $K^*(892)^0$ , το οποίο είναι ένα διανυσματικό μεσόνιο με μάζα παρόμοια με το  $\phi$  αλλά διαφέρει κατά ένα στον κβαντικό αριθμό της παραξενιάς. Η μάζα και το εύρος του είναι αντίστοιχα  $M_{K^*} = 895.94 \pm 0.22 \text{ MeV}/c^2$  και  $\Gamma_{K^*} = 48.7 \pm 0.8 \text{ MeV}/c^2$  [25]. Και οι δύο συντονισμοί διασπώνται κατά κύριο λόγο σε φορτισμένα καόνια και πιόνια ( $K^* \rightarrow K^\pm \pi^\mp$  και  $\phi \rightarrow K^+ K^-$ ), τα οποία μπορούν να ανιχνευθούν με βάση την τοπολογία kink, περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα κανάλια διάσπασης τους βρίσκονται στα παραρτήματα 6.4 και 6.5.

Όπως και στην ανάλυση των πιονίων γίνεται επιλογή των τροχιών με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

#### Πίνακας 7: Κριτήρια επιλογής τροχιών

- Physics Selection
- vertex cut  $-10\text{cm} < z_{\text{vtx}} < 10\text{cm}$
- TPC, ITS refit
- τροχιές που ανακατασκευάζονται από τουλάχιστον 20 ίχνη (clusters) στον TPC. ( $N_{\text{TPC clusters}} > 20$ )
- τροχιές που προσαρμόζονται αρκετά καλά στα ίχνη από τα οποία ανακατασκευάστηκαν, δηλαδή ικανοποιούν τη συνθήκη:  $\chi^2_{\text{TPC}}/N_{\text{TPC clusters}} < 3.8$
- τροχιές που ξεκινούν σε πολύ μικρή απόσταση από τον κύριο κόμβο (DCA cut)

Στην συνέχεια ακολουθεί μία προσπάθεια να εφαρμόσουμε την μέθοδο που παρουσιάστηκε παραπάνω στην μελέτη των συντονισμών  $K^*(892)^0$  και  $\phi(1020)$ . Όπως φάνηκε αρκετά από τα πιόνια που παράγονται δεν διασπώνται στον χώρο του TPC και για τον λόγο αυτό έχουμε αρκετά μικρή Γεωμετρική αποδοχή. Σχετικά μικρή γεωμετρική αποδοχή έχουμε και στην περίπτωση των καονίων [32, 33]. Για να πετύχουμε το μεγαλύτερο δυνατό δείγμα χωρίς να αλλοιώσουμε σημαντικά την απόδοση, η επιλογή των πιονίων και των καονίων γίνεται με πιο χαλαρά κριτήρια, τα οποία φαίνονται στον πίνακα 8.

Πίνακας 8: Κριτήρια επιλογών Καονίων και πιονίων

Επιλογές Καονίων	Επιλογές Πιονίων
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>p_T &gt; 200 \text{ MeV}/c</math></li> <li>• <math> y  &lt; 0.7</math></li> <li>• <math>120 \text{ cm} &lt; R &lt; 210 \text{ cm}</math></li> <li>• <math>0.5 \text{ cm} &lt;  z  &lt; 225 \text{ cm}</math></li> <li>• <math>\theta &gt; 2^\circ</math></li> <li>• <math>q_T &gt; 40 \text{ MeV}/c</math></li> <li>• <math>90\% \theta_{\pi_{max}} &lt; \theta &lt; 110\% \theta_{K_{max}}</math></li> <li>• <math>-85.5 + \frac{65}{95}R &lt; NTPC_{clusters} &lt; -51.67 + \frac{11}{12}R</math></li> <li>• <math>m_{inv} &lt; 0.6 \text{ GeV}/c^2</math></li> <li>• <math> dE/dx  \leq \langle dE/dx \rangle \pm 4\sigma</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>p_T &gt; 200 \text{ MeV}/c</math></li> <li>• <math> y_\pi  &lt; 0.7</math></li> <li>• <math>120 \text{ cm} &lt; R &lt; 210 \text{ cm}</math></li> <li>• <math>0.5 \text{ cm} &lt;  z  &lt; 225 \text{ cm}</math></li> <li>• <math>\theta &gt; 1^\circ</math></li> <li>• <math>q_T &lt; 40 \text{ MeV}/c</math></li> <li>• <math>\theta &lt; 110\% \theta_{\pi_{max}}</math></li> <li>• <math>-85.5 + \frac{65}{95}R &lt; NTPC_{clusters} &lt; -51.67 + \frac{11}{12}R</math></li> <li>• <math> dE/dx  \leq \langle dE/dx \rangle \pm 4\sigma</math></li> </ul>

Με βάση την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε παραπάνω ταυτοποιούμε τα φορτισμένα πιόνια και καόνια, για  $K^*(892)^0$  και  $\phi(1020)$  αντίστοιχα. Στην συνέχεια υπολογίζουμε την αναλλοίωτη μάζα του ταυτοποιημένου σωματιδίου μαζί με όλα τα καόνια που επιλέγονται μέσω του ελέγχου  $|dE/dx| \leq \langle dE/dx \rangle \pm 4\sigma$  και των οποίων οι τροχιές που ικανοποιούν τα κριτήρια του πίνακα 7

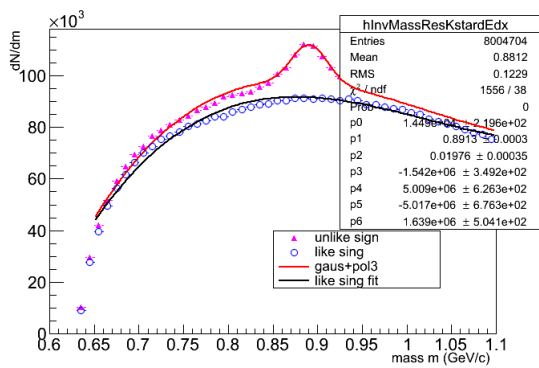
Στην εργασία αυτή απαιτούμε ένα από τα δύο σωματίδια να ταυτοποιείται μέσω της τοπολογίας kink και το δεύτερο, με αρκετά χαλαρά κριτήρια, μέσω της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους ( $dE/dx$ ). Γίνεται μία προσπάθεια να μελετηθούν οι συντονισμοί όταν και τα δύο θυγατρικά σωματίδια ανιχνεύονται ως kink. Κάτι τέτοιο όμως έχει πολύ μικρή πιθανότητα να συμβεί καθώς πρέπει και τα δύο σωματίδια να δώσουν kink μέσα στον όγκο του ανιχνευτή που να μπορεί να πιστοποιηθεί με βάση τα παραπάνω κριτήρια.

Το υπόβαθρο υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την μέθοδο του "όμοιου φορτίου" (like-sign), δηλαδή κατασκευάζονται οι κατανομές αναλλοίωτης μάζας των συνδυασμών Kπ και KK με ίδιο πρόσημο.

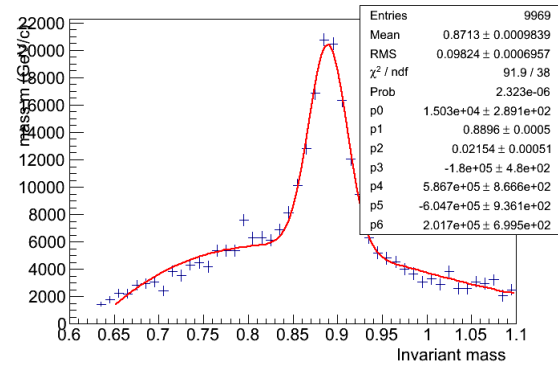
Για τον υπολογισμό της μάζας και του πλάτους του συντονισμού γίνεται προσαρμογή μιας γκαουσιανής καμπύλης και ενός πολυονυμικού υποβάθρου στην κατανομή της αναλλοίωτης μάζας μετά την αφαίρεση του υποβάθρου, για τις διάφορες περιοχές της εγκάρσιας ορμής. Ο υπολογισμός του ολικού διορθωτικού παράγοντα γίνεται με βάση τα προσομοιωμένα δεδομένα και όπως ορίστηκε στην παράγραφο 4.8.3.

Στην συνέχεια φαίνονται για κάθε συντονισμό και περιοχή ορμής οι κατανομές αναλλοίωτης μάζας, η μάζα και το πλάτος όπως υπολογίζονται με βάση τις προσαρμοσμένες καμπύλες, ο ολικός διορθωτικός παράγοντας και το διορθωμένο φάσμα.

### 4.11.1 Συντονισμός $K^*$ (892)

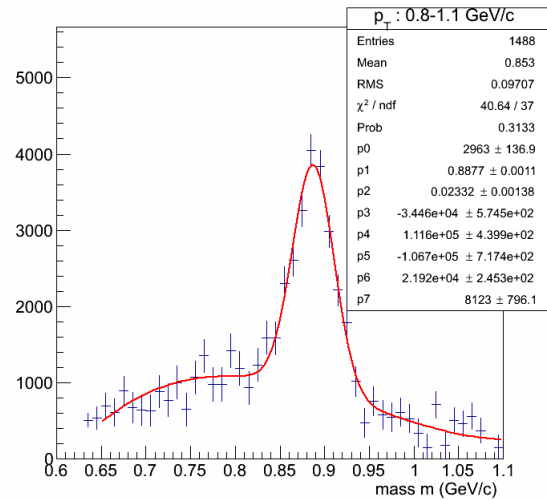
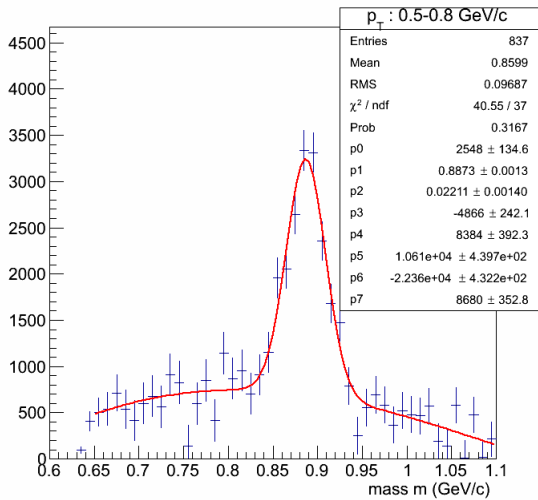


(α) Αναλλοίωτη μάζα  $K^\pm\pi^\mp$  και υπόβαθρο.



(β') Αναλλοίωτη μάζα  $K^\pm\pi^\mp$ , μετά την αφαίρεση του υποβάθρου λόγω όμοιου φορτίου.

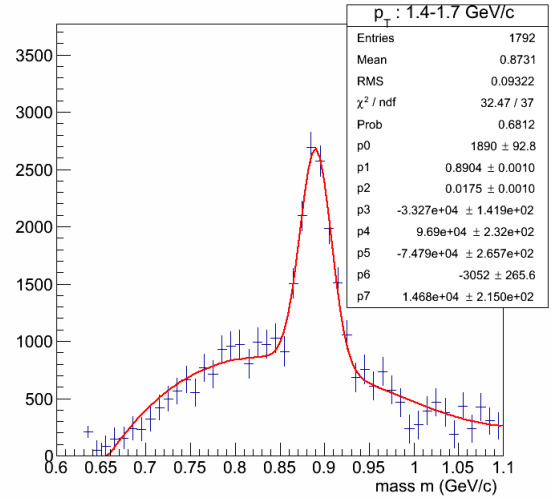
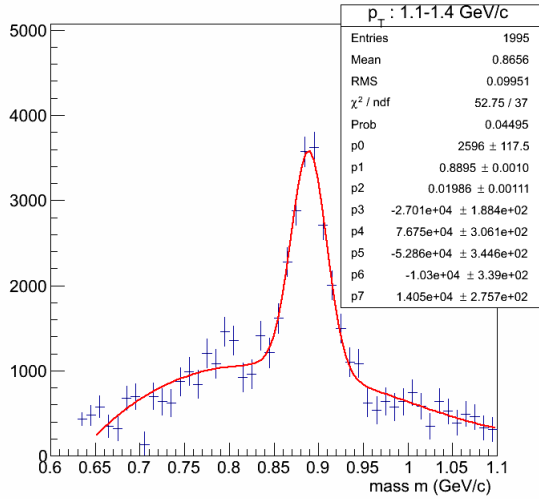
Σχήμα 73: Κατανομές της αναλλοίωτης μάζας  $K^\pm\pi^\mp$ , ένα εκ των οποίων ανιχνεύεται ως kink και το άλλο εμφανίζει  $|dE/dx| \leq \langle dE/dx \rangle \pm 4\sigma$ .



(α) Αναλλοίωτη μάζα  $K^\pm\pi^\mp$ , για  $0.5 \leq p_T \leq 0.8(\text{GeV}/c)$

(β') Αναλλοίωτη μάζα  $K^\pm\pi^\mp$ , για  $0.8 \leq p_T \leq 1.1(\text{GeV}/c)$

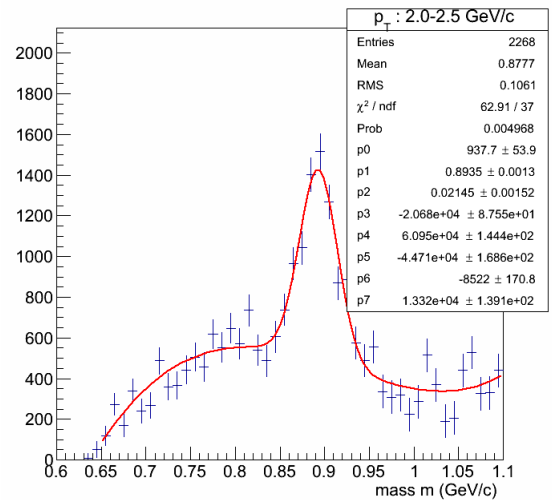
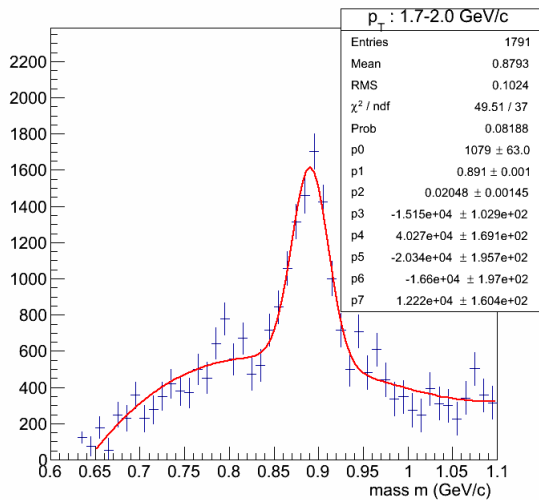
Σχήμα 74: Κατανομές της αναλλοίωτης μάζας  $K^\pm\pi^\mp$ , ένα εκ των οποίων ανιχνεύεται ως kink και το άλλο εμφανίζει  $|dE/dx| \leq \langle dE/dx \rangle \pm 4\sigma$ .



(α) Αναλλοίωτη μάζα  $K^\pm\pi^\mp$ , για  $1.1 \leq p_T \leq 1.4(GeV/c)$

(β') Αναλλοίωτη μάζα  $K^\pm\pi^\mp$ , για  $1.4 \leq p_T \leq 1.7(GeV/c)$

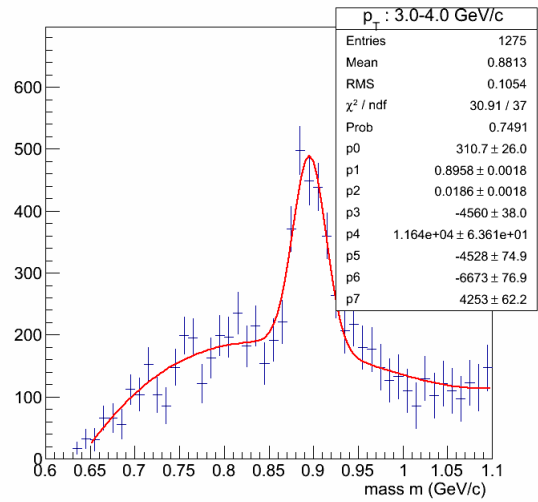
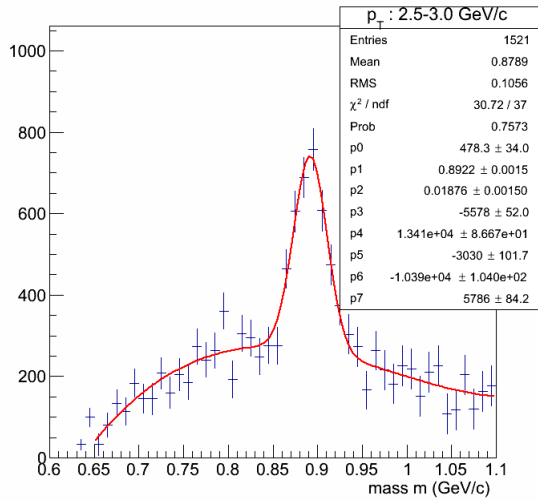
Σχήμα 75: Κατανομές της αναλλοίωτης μάζας  $K^\pm\pi^\mp$ , ένα εκ των οποίων ανιχνεύεται ως kink και το άλλο εμφανίζει  $|dE/dx| \leq \langle dE/dx \rangle \pm 4\sigma$ .



(α) Αναλλοίωτη μάζα  $K^\pm\pi^\mp$ , για  $1.7 \leq p_T \leq 2(GeV/c)$

(β') Αναλλοίωτη μάζα  $K^\pm\pi^\mp$ , για  $2 \leq p_T \leq 2.5(GeV/c)$

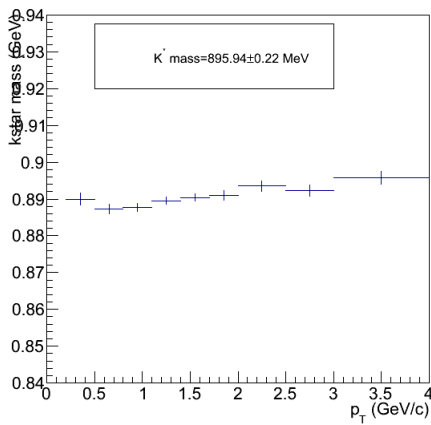
Σχήμα 76: Κατανομές της αναλλοίωτης μάζας  $K^\pm\pi^\mp$ , ένα εκ των οποίων ανιχνεύεται ως kink και το άλλο εμφανίζει  $|dE/dx| \leq \langle dE/dx \rangle \pm 4\sigma$ .



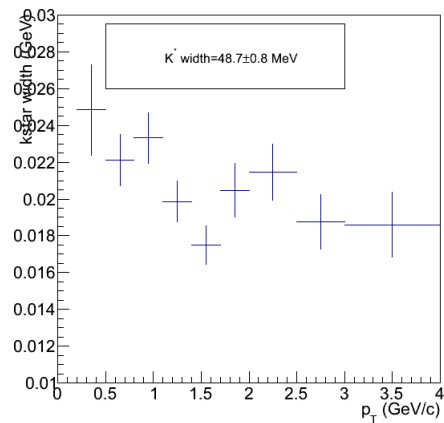
(α) Αναλλοίωτη μάζα  $K^\pm\pi^\mp$ , για  $2.5 \leq p_T \leq 3(GeV/c)$

(β') Αναλλοίωτη μάζα  $K^\pm\pi^\mp$ , για  $3 \leq p_T \leq 4(GeV/c)$

Σχήμα 77: Κατανομές της αναλλοίωτης μάζας  $K^\pm\pi^\mp$ , ένα εκ των οποίων ανιχνεύεται ως kink και το άλλο εμφανίζει  $|dE/dx| \leq \langle dE/dx \rangle \pm 4\sigma$ .



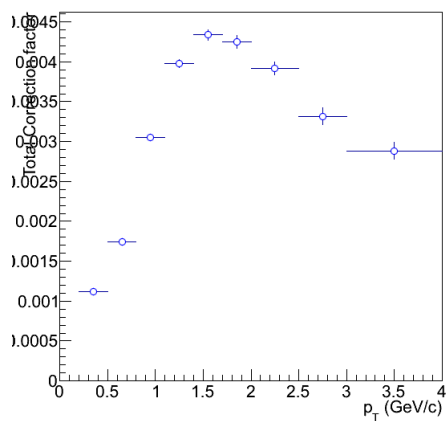
(α') Αναλλοίωτη μάζα  $K^\pm\pi^\mp$  συναρτήσει της εγκάρσιας ορμής.



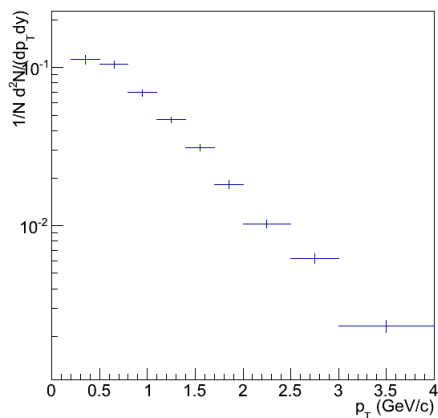
(β') Πλάτος συναρτήσει της εγκάρσιας ορμής

Σχήμα 78





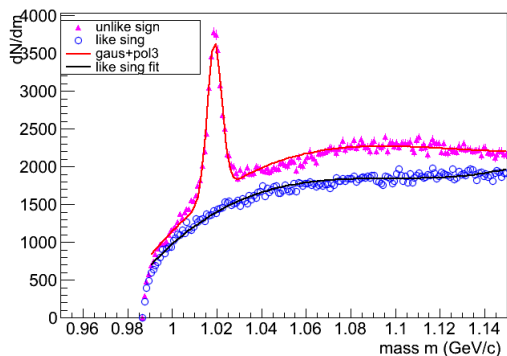
(α') Ολικός διορθωτικός παράγοντας



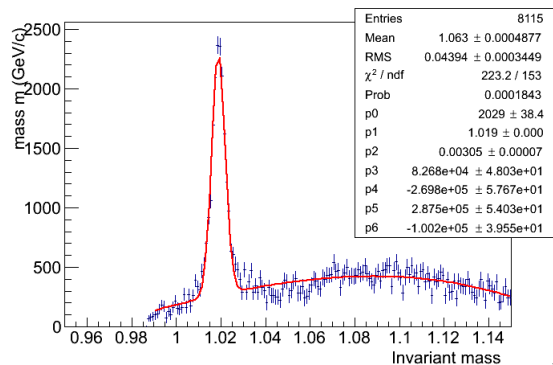
(β') Διορθωμένο και κανονικοποιημένο φάσμα  $K^*(892)^0$

Σχήμα 79

#### 4.11.2 Συντονισμός $\Phi(1020)$

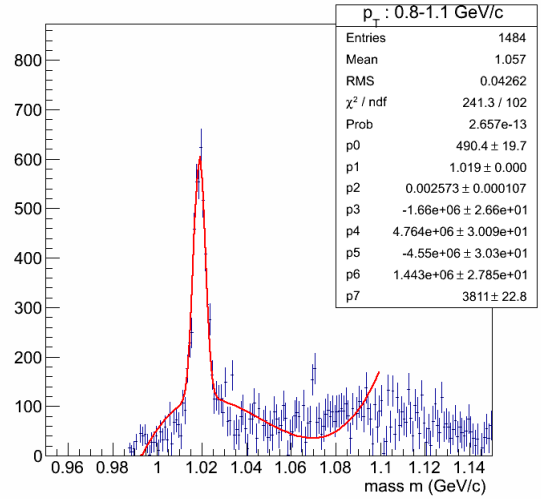
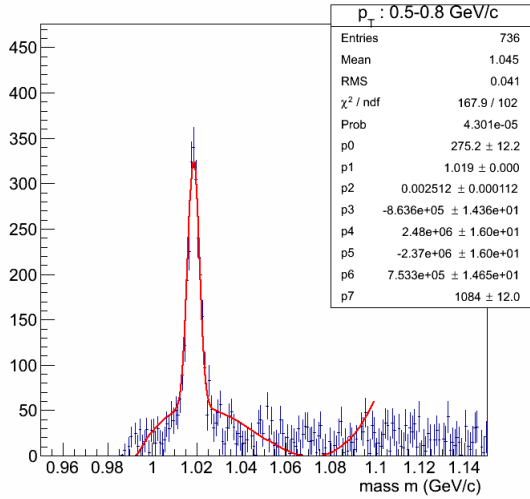


(α') Αναλλοίωτη μάζα  $K^+K^-$  και υπόβαθρο.



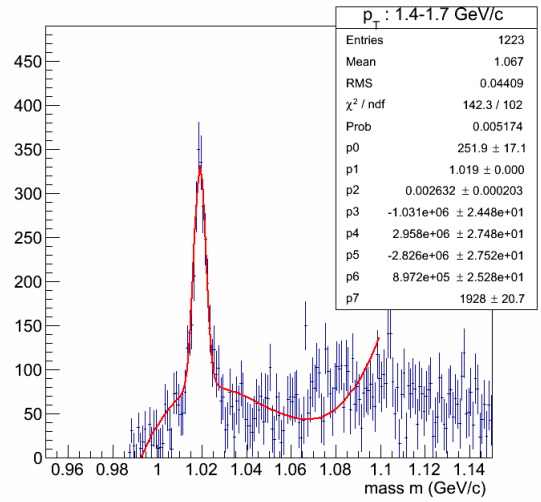
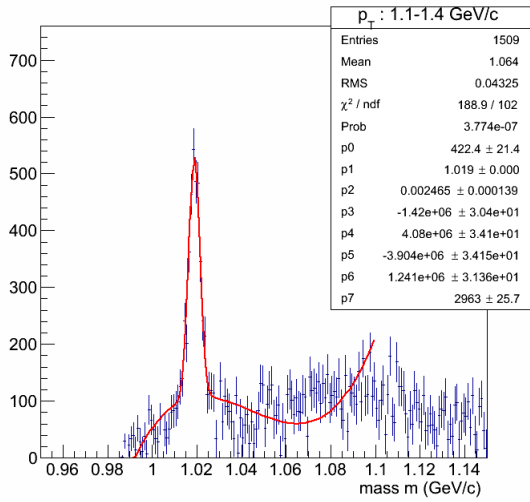
(β') Αναλλοίωτη μάζα  $K^+K^-$ , μετά την αφαίρεση του υποβάθρου λόγω όμοιου φορτίου.

Σχήμα 80: Κατανομές της αναλλοίωτης μάζας  $K^+K^-$ , ένα εκ των οποίων ανιχνεύεται ως  $kink$  και το άλλο εμφανίζει  $|dE/dx| \leq \langle dE/dx \rangle \pm 4\sigma$ .



(α) Αναλλοίωτη μάζα  $K^+K^-$ , για  $0.5 \leq p_T \leq 0.8(\text{GeV}/c)$

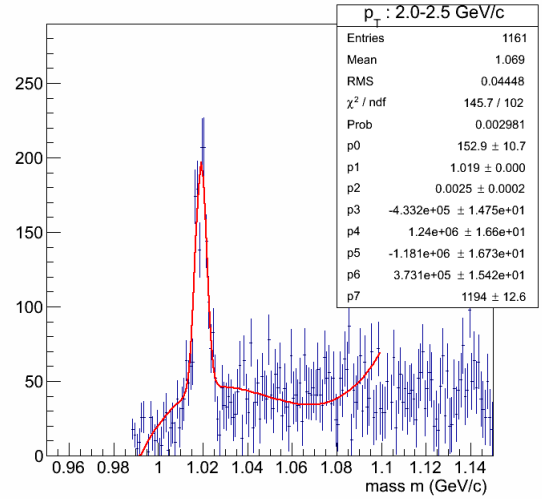
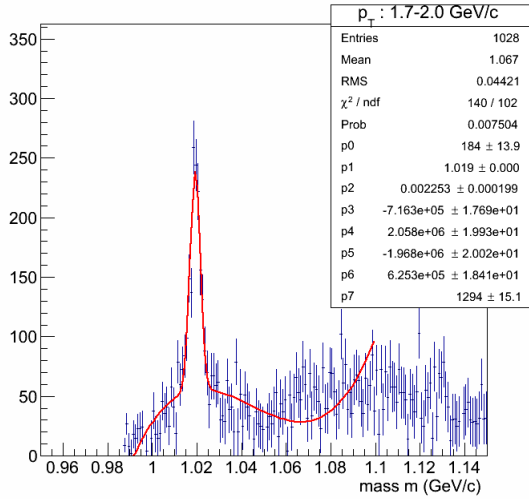
(β) Αναλλοίωτη μάζα  $K^+K^-$ , για  $0.8 \leq p_T \leq 1.1(\text{GeV}/c)$



(γ) Αναλλοίωτη μάζα  $K^+K^-$ , για  $1.1 \leq p_T \leq 1.4(\text{GeV}/c)$

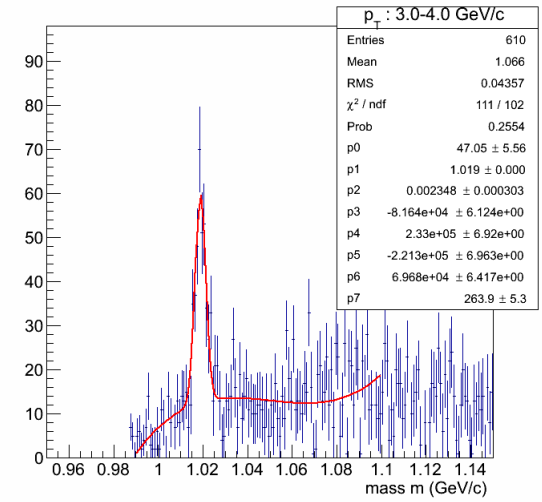
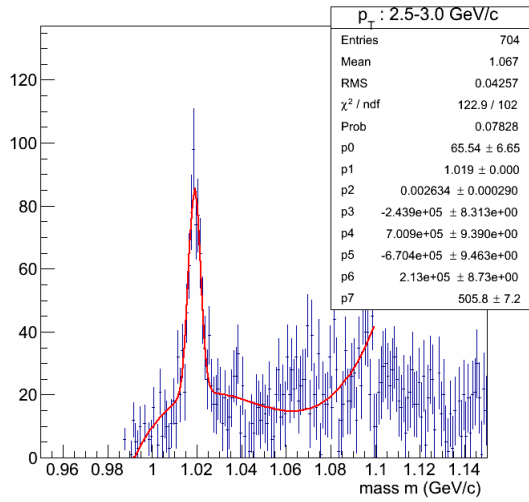
(δ) Αναλλοίωτη μάζα  $K^+K^-$ , για  $1.4 \leq p_T \leq 1.7(\text{GeV}/c)$

Σχήμα 81: Κατανομές της αναλλοίωτης μάζας  $K^+K^-$ , ένα εκ των οποίων ανιχνεύεται ως  $kink$  και το άλλο εμφανίζει  $|dE/dx| \leq \langle dE/dx \rangle \pm 4\sigma$ .



(α) Αναλλοίωτη μάζα  $K^+K^-$ , για  $1.7 \leq p_T \leq 2(GeV/c)$

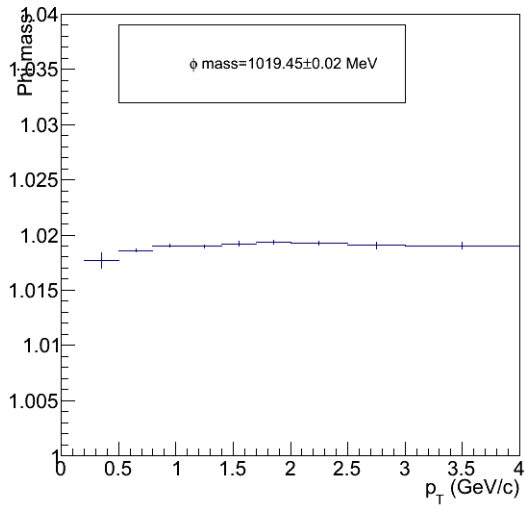
(β) Αναλλοίωτη μάζα  $K^+K^-$ , για  $2 \leq p_T \leq 2.5(GeV/c)$



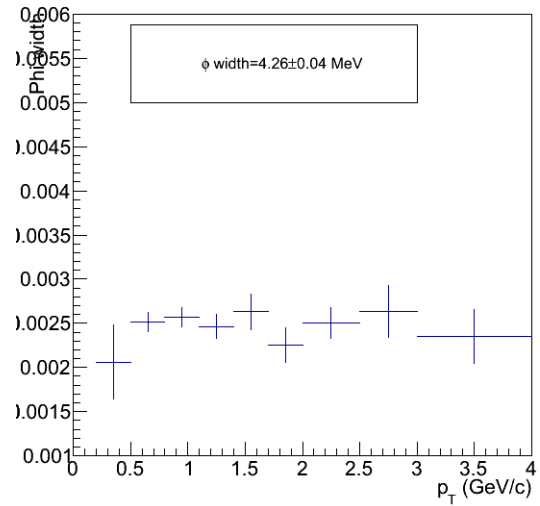
(γ) Αναλλοίωτη μάζα  $K^+K^-$ , για  $2.5 \leq p_T \leq 3(GeV/c)$

(δ) Αναλλοίωτη μάζα  $K^+K^-$ , για  $3 \leq p_T \leq 4(GeV/c)$

Σχήμα 82: Κατανομές της αναλλοίωτης μάζας  $K^+K^-$ , ένα εκ των οποίων ανιχνεύεται ως  $kink$  και το άλλο εμφανίζει  $|dE/dx| \leq \langle dE/dx \rangle \pm 4\sigma$ .

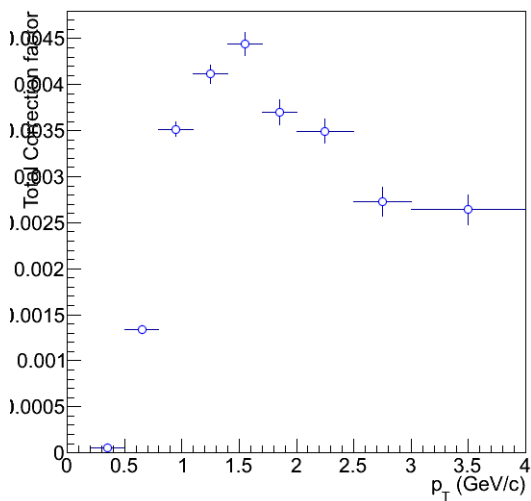


(α) Αναλλοίωτη μάζα  $K^+K^-$  συναρτήσει της εγκάρσιας ορμής.

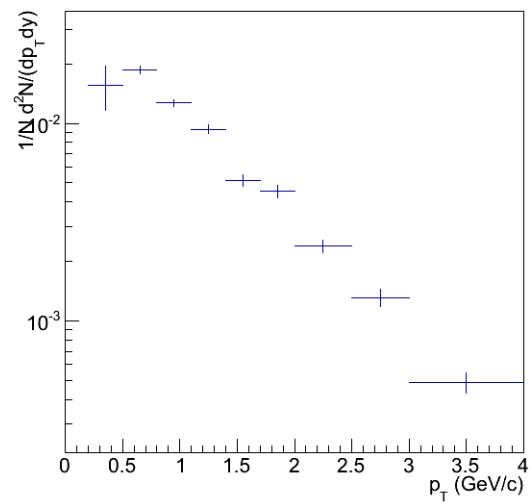


(β) Πλάτος συναρτήσει της εγκάρσιας ορμής

Σχήμα 83



(α) Ολικός διορθωτικός παράγοντας



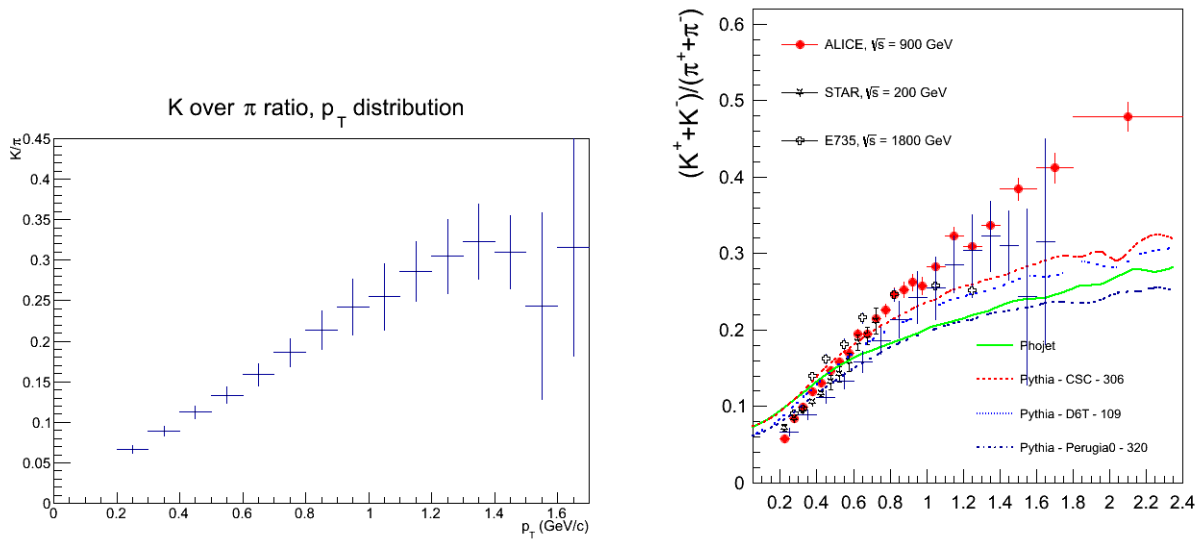
(β) Διορθωμένο και κανονικοποιημένο φάσμα  $\phi(1020)$

Σχήμα 84

## 5 Συμπεράσματα

Έγινε χρήση της τοπολογίας των ασθενών τους διασπάσεων («kinks») για ταυτοποίηση φορτισμένων πιονίων και την απόκτηση των διορθωμένων και κανονικοποιημένων φασμάτων. Η μέθοδος αποδεικνύεται χρήσιμη καθώς προσφέρει αποτελέσματα σε ένα εύρος εγκάρσιας ορμής ( $0.2 - 1.5 \text{ GeV}/c$ ) στο οποίο κανονικά ο TPC δεν μπορεί, από μόνος του, να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μάλιστα στην περιοχή αυτή, η μέθοδος, παρουσιάζει καθαρότητα της τάξης του 98%. Τα φάσματα που παρουσιάζονται συμφωνούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των υπόλοιπων ανιχνευτών. Η χρησιμότητα της μεθόδου αναμένεται να γίνει ακόμα εμφανέστερη στην ανάλυση δεδομένων συγκρούσεων Pb-Pb, όπου παράγεται μεγαλύτερος αριθμός σωματιδίων.

Καθώς η μέθοδος αυτή επιτρέπει και την ταυτοποίηση καονίων με μεγάλη ακρίβεια [32, 33] είναι δυνατών να υπολογιστούν σωματιδιακοί λόγοι αποκλειστικά με αυτή, ώστε να συγκριθούν με άλλες μεθόδους. Στο σχήμα 84 φαίνεται ο λόγος  $(K^+ + K^-)/(\pi^+ + \pi^-)$  όπως υπολογίζεται αποκλειστικά με την μέθοδο αυτή αλλά και σε σύγκριση με τα  $900 \text{ GeV}$  και τα διάφορα μοντέλα.

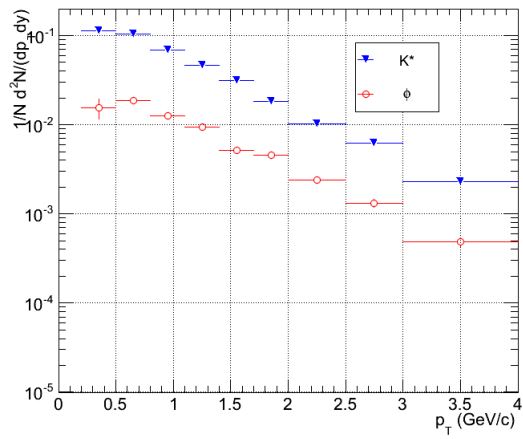


(α') Λόγος  $(K^+ + K^-)/(\pi^+ + \pi^-)$  συναρτήσει της ορμής, όπως υπολογίζεται αποκλειστικά με βάση την τοπολογία kink.

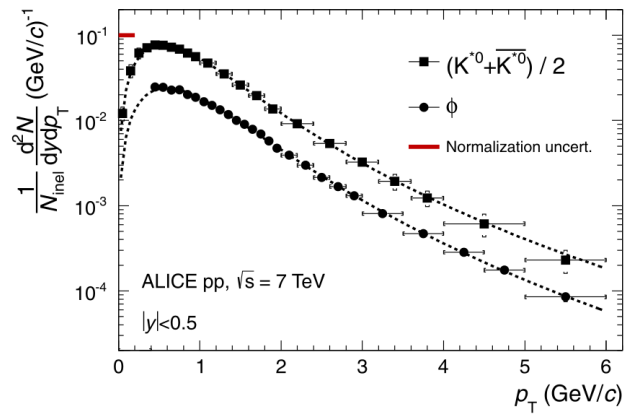
(β') Λόγος  $(K^+ + K^-)/(\pi^+ + \pi^-)$  συναρτήσει της ορμής. Φαίνονται οι προβλέψεις διαφόρων μοντέλων και οι πειραματικές μετρήσεις σε διάφορες ενέργειες. Τα μαύρα σημεία που δεν αναφέρονται στο υπόμνημα αντιστοιχούν σε μετρήσεις αποκλειστικά με kinks σε δεδομένα pp 7 TeV

Σχήμα 85

Έγινε χρήση της μεθόδου στην μελέτη των συντονισμών  $K^*(892)^0$  και  $\phi(1020)$  που διασπώνται σε φορτισμένα καόνια και πιόνια και συγκεκριμένα στα κανάλια  $K^* \rightarrow K^\pm \pi^\mp$  και  $\phi \rightarrow K^+ K^-$ . Συγκεκριμένα απαιτούμε ένα από τα δύο σωματάρια να ταυτοποιείται μέσω της τοπολογίας kink και το δεύτερο, με αρκετά χαλαρά κριτήρια, μέσω της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους ( $dE/dx$ ). Η μέθοδος πετυχαίνει να προσδιορίσει με μεγάλη ακρίβεια την μάζα των συντονισμών αυτών, ενώ τα φάσματα που υπολογίζει είναι συγκρίσιμα με αυτά από άλλες μεθόδους. Μάλιστα με την κατάλληλη χρήση στατιστικής, θα μπορούσε να γίνει δυνατή η μελέτη των συντονισμών όταν και τα δύο θυγατρικά εντοπίζονται με την μέθοδο αυτή, ώστε να εκμεταλλευτούμε την μεγάλη καθαρότητα που παρουσιάζει.



(α) Διορθωμένα και κανονικοποιημένα φάσματα  $\phi(1020)$  και  $K^*(892)^0$



(β) Διορθωμένα και κανονικοποιημένα φάσματα  $\phi(1020)$  και  $K^*(892)^0$  από τους ανιχνευτές του ALICE [26]

Σχήμα 86

## 6 Παραρτήματα

### 6.1 Κωδικοί σωματιδίων

Το σύστημα αρίθμησης σωματιδίων προτάθηκε για πρώτη φορά το 1988 από το Particle Data Group (PDG) και μια ανανεωμένη έκδοσή του υιοθετήθηκε το 1998 για να συμπεριλάβει συστηματικά καταστάσεις που προβλέπονται από το μοντέλο των κουάρκ και δεν έχουν ακόμα παρατηρηθεί αλλά και υποθετικά (πχ υπερσυμμετρικά) σωματάρια. Το συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιείται και από το πακέτο προσομοίωσης PYTHIA. Η γενική μορφή του κωδικού κάθε σωματιδίου είναι ένας 7-ψήφιος αριθμός. Τα σωματάρια έχουν θετικούς κωδικούς, ενώ τα αντισωματάρια αρνητικούς. Για τα μεσόνια η σύμβαση είναι ότι τα  $K^+$  και  $B^+$  έχουν θετικούς κωδικούς. Οι κωδικοί μερικών σωματιδίων που συναντώνται σε αυτή την εργασία δίνονται στο παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 9: Κωδικοί σωματιδίων.

σωμάτιο	κωδικός
$e^-$	11
$\mu^-$	13
$\pi^+$	211
$K^+$	321
$p^+$	2212
$n$	2112

### 6.2 Χαρακτηριστικά των φορτισμένων πιονίων

$$\begin{aligned}
 S &= C = B = 0 \\
 I(J)^P &= 1(0)^- \\
 m &= (139.57018 \pm 0.00035) MeV/c^2 \\
 \tau &= (2.6033 \pm 0.0005) s \\
 c\tau &= 7.8045 m
 \end{aligned}$$

$\Gamma_i$	διάσπαση	λόγος διάσπασης ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	$P(MeV/c)$	kink
1	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	$(99.98770 \pm 0.00004) \times 10^{-2}$	30	*
2	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$	$(2.00 \pm 0.25) \times 10^{-4}$	30	*
3	$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$	$(1.230 \pm 0.004) \times 10^{-4}$	70	*
4	$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$	$(1.61 \pm 0.23) \times 10^{-7}$	70	*
5	$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \pi^0$	$(1.036 \pm 0.006) \times 10^{-8}$	4	*
6	$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$	$(3.2 \pm 0.5) \times 10^{-9}$	70	
7	$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \nu$	$< 5 \times 10^{-6}$	70	*
8	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_e$	$< 1.5 \times 10^{-3}$	30	*
9	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_e$	$< 8.0 \times 10^{-3}$	30	*
10	$\pi^+ \rightarrow \mu^- e^+ e^+ \nu$	$< 1.6 \times 10^{-6}$	30	

Σχήμα 87: Χαρακτηριστικά των φορτισμένων πιονίων

### 6.3 Χαρακτηριστικά των φορτισμένων καονίων

$$\begin{aligned}
 S &= \pm 1 \\
 C &= B = 0 \\
 I(J)^P &= 1/2(0)^- \\
 m &= (493.677 \pm 0.016) \text{MeV}/c^2 \\
 \tau &= (1.2380 \pm 0.0021) \text{s} \\
 c\tau &= 3.712 \text{m}
 \end{aligned}$$

$\Gamma_i$	διάσπαση	λόγος διάσπασης ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	$P(\text{MeV}/c)$	kink
1	$K^+ \rightarrow e^+ \nu_e$	$(1.55 \pm 0.07) \times 10^{-5}$	247	*
2	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	$(63.55 \pm 0.11) \times 10^{-2}$	236	*
3	$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$	$(5.07 \pm 0.04) \times 10^{-2}$	228	*
4	$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$	$(3.353 \pm 0.034) \times 10^{-2}$	215	*
5	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 e^+ \nu_e$	$(2.2 \pm 0.4) \times 10^{-5}$	206	*
6	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu_e$	$(4.09 \pm 0.10) \times 10^{-5}$	203	
7	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \nu_\mu$	$(1.4 \pm 0.9) \times 10^{-5}$	151	
8	$K^+ \rightarrow \pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e$	$< 3.5 \times 10^{-6}$	135	*
9	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	$(20.66 \pm 0.08) \times 10^{-2}$	205	*
10	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$	$(1.761 \pm 0.022) \times 10^{-2}$	133	*
11	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$(5.59 \pm 0.04) \times 10^{-2}$	125	
12	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$	$(6.2 \pm 0.8) \times 10^{-3}$	236	*
13	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$	$< 3.0 \times 10^{-5}$	—	*
14	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$	$< 2.7 \times 10^{-5}$	—	*
15	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$	$< 2.6 \times 10^{-4}$	—	*
16	$K^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$	$(1.53 \pm 0.23) \times 10^{-5}$	—	*
17	$K^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$	$< 1.6 \times 10^{-4}$	—	*
18	$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e \gamma$	$(2.56 \pm 0.16) \times 10^{-4}$	228	*
19	$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e \gamma$	$< 5.3 \times 10^{-5}$	228	*
20	$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$	$(1.5 \pm 0.4) \times 10^{-5}$	215	*
21	$K^+ \rightarrow \pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e \gamma$	$< 5 \times 10^{-6}$	206	*
22	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$	$(2.75 \pm 0.15) \times 10^{-4}$	205	*
23	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$ (DE)	$(4.3 \pm 0.7) \times 10^{-6}$	205	*
24	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0 \gamma$	$(7.6_{-3.0}^{+6.0}) \times 10^{-6}$	133	*
25	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \gamma$	$(1.04 \pm 0.31) \times 10^{-4}$	125	
26	$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$	$(1.10 \pm 0.32) \times 10^{-6}$	227	*
27	$K^+ \rightarrow \pi^+ 3\gamma$	$< 1.0 \times 10^{-4}$	227	*
28	$K^\pm \rightarrow \pi^\pm e^+ e^- \gamma$	$(1.19 \pm 0.13) \times 10^{-8}$	227	
29	$K^+ \rightarrow e^+ \nu_e \nu \nu$	$< 6 \times 10^{-5}$	247	*
30	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \nu \nu$	$< 6.0 \times 10^{-6}$	236	*
31	$K^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$	$(2.48 \pm 0.20) \times 10^{-8}$	247	
32	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu e^+ e^-$	$(7.06 \pm 0.31) \times 10^{-8}$	236	
33	$K^+ \rightarrow e^+ \nu_e \mu^+ \mu^-$	$(1.7 \pm 0.5) \times 10^{-8}$	223	
34	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \mu^+ \mu^-$	$< 4.1 \times 10^{-7}$	185	
35	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ e^- \nu_e$	$< 1.2 \times 10^{-8}$	203	
36	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \mu^- \nu_\mu$	$< 3.0 \times 10^{-6}$	151	
37	$K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$	$(2.88 \pm 0.13) \times 10^{-7}$	227	
38	$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$	$(8.1 \pm 1.4) \times 10^{-8}$	172	
39	$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$	$(1.7 \pm 1.1) \times 10^{-10}$	227	*
40	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \nu \nu$	$< 4.3 \times 10^{-5}$	205	*
41	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_e e^+ e^+$	$< 2.0 \times 10^{-8}$	236	
42	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_e$	$< 4 \times 10^{-3}$	236	*
43	$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ e^-$	$< 1.3 \times 10^{-11}$	214	
44	$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ e^+$	$< 5.2 \times 10^{-10}$	214	
45	$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ e^+$	$< 5.0 \times 10^{-10}$	214	
46	$K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^+$	$< 6.4 \times 10^{-10}$	227	
47	$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^+$	$< 3.0 \times 10^{-9}$	172	
48	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_e$	$< 3.3 \times 10^{-3}$	236	*
49	$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$	$< 3 \times 10^{-3}$	228	*
50	$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma$	$< 2.3 \times 10^{-9}$	227	*

Σχήμα 88: Χαρακτηριστικά των φορτισμένων καονίων



#### 6.4 Χαρακτηριστικά του συντονισμού $K^*(892)$

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(1^-)$$

$$K^*(892)^0 \text{ mass } m = 895.94 \pm 0.22 \text{ MeV} \quad (S = 1.4)$$

$$K^*(892)^0 \text{ full width } \Gamma = 48.7 \pm 0.8 \text{ MeV} \quad (S = 1.7)$$

<b><math>K^*(892)</math> DECAY MODES</b>	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Confidence level	$\rho$ (MeV/c)
$K\pi$	$\sim 100$	%	289
$K^0\gamma$	$(2.39 \pm 0.21) \times 10^{-3}$		307
$K^\pm\gamma$	$(9.9 \pm 0.9) \times 10^{-4}$		309
$K\pi\pi$	$< 7$	$\times 10^{-4}$ 95%	223

Σχήμα 89: Χαρακτηριστικά του συντονισμού  $K^*(892)$

#### 6.5 Χαρακτηριστικά του συντονισμού $\Phi(1020)$

$$I^G(J^{PC}) = 0^-(1^{--})$$

$$\text{Mass } m = 1019.455 \pm 0.020 \text{ MeV} \quad (S = 1.1)$$

$$\text{Full width } \Gamma = 4.26 \pm 0.04 \text{ MeV} \quad (S = 1.4)$$

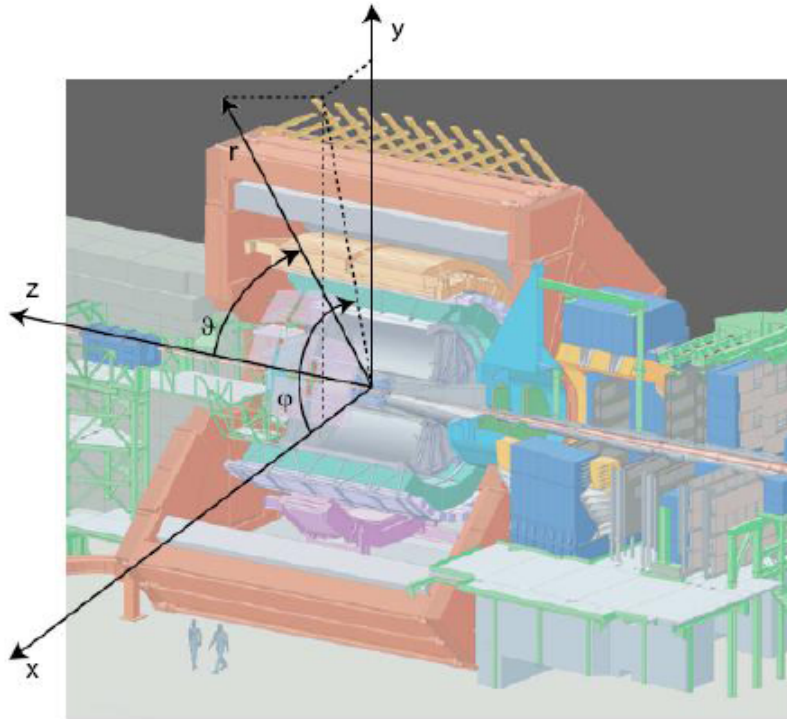
<b><math>\phi(1020)</math> DECAY MODES</b>	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Scale factor/ Confidence level	$\rho$ (MeV/c)
$K^+K^-$	$(48.9 \pm 0.5) \%$	S=1.1	127
$K_L^0 K_S^0$	$(34.2 \pm 0.4) \%$	S=1.1	110
$\rho\pi + \pi^+\pi^-\pi^0$	$(15.32 \pm 0.32) \%$	S=1.1	-
$\eta\gamma$	$(1.309 \pm 0.024) \%$	S=1.2	363
$\pi^0\gamma$	$(1.27 \pm 0.06) \times 10^{-3}$		501
$\ell^+\ell^-$	-		510
$e^+e^-$	$(2.954 \pm 0.030) \times 10^{-4}$	S=1.1	510
$\mu^+\mu^-$	$(2.87 \pm 0.19) \times 10^{-4}$		499
$\eta e^+e^-$	$(1.15 \pm 0.10) \times 10^{-4}$		363
$\pi^+\pi^-$	$(7.4 \pm 1.3) \times 10^{-5}$		490
$\omega\pi^0$	$(4.7 \pm 0.5) \times 10^{-5}$		171
$\omega\gamma$	$< 5$	% CL=84%	209
$\rho\gamma$	$< 1.2$	$\times 10^{-5}$ CL=90%	215
$\pi^+\pi^-\gamma$	$(4.1 \pm 1.3) \times 10^{-5}$		490
$f_0(980)\gamma$	$(3.22 \pm 0.19) \times 10^{-4}$	S=1.1	29
$\pi^0\pi^0\gamma$	$(1.13 \pm 0.06) \times 10^{-4}$		492
$\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$	$(4.0 \pm_{-2.2}^{+2.8}) \times 10^{-6}$		410
$\pi^+\pi^+\pi^-\pi^-\pi^0$	$< 4.6$	$\times 10^{-6}$ CL=90%	342
$\pi^0 e^+ e^-$	$(1.12 \pm 0.28) \times 10^{-5}$		501
$\pi^0 \eta \gamma$	$(7.27 \pm 0.30) \times 10^{-5}$	S=1.5	346
$a_0(980)\gamma$	$(7.6 \pm 0.6) \times 10^{-5}$		39
$K^0 K^0 \gamma$	$< 1.9$	$\times 10^{-8}$ CL=90%	110
$\eta'(958)\gamma$	$(6.25 \pm 0.21) \times 10^{-5}$		60
$\eta\pi^0\pi^0\gamma$	$< 2$	$\times 10^{-5}$ CL=90%	293
$\mu^+\mu^-\gamma$	$(1.4 \pm 0.5) \times 10^{-5}$		499
$\rho\gamma\gamma$	$< 1.2$	$\times 10^{-4}$ CL=90%	215
$\eta\pi^+\pi^-$	$< 1.8$	$\times 10^{-5}$ CL=90%	288
$\eta\mu^+\mu^-$	$< 9.4$	$\times 10^{-6}$ CL=90%	321

Σχήμα 90: Χαρακτηριστικά του συντονισμού  $\Phi(1020)$

## 6.6 Κινηματική

### 6.6.1 Το σύστημα συντεταγμένων του ALICE

Το σύστημα συντεταγμένων του ALICE φαίνεται στο σχήμα 90 και ορίζεται ως εξής:



Σχήμα 91: Το σύστημα συντεταγμένων του ALICE

- Η αρχή των αξόνων  $x = y = z = 0$  ορίζεται από το κεντρικό σημείο των κυλινδρικών ανιχνευτών του ALICE το οποίο συμπίπτει με την αναμενόμενη θέση του κύριου κόμβου της αλληλεπίδρασης των δύο συγκρουόμενων δεσμών πρωτονίων.
- Ο άξονας  $x$  είναι τοπικά κάθετος στην διεύθυνση της δέσμης και παράλληλος στο οριζόντιο επίπεδο του LHC με κατεύθυνση προς το κέντρο του επιταχυντή.
- Ο άξονας  $y$  είναι κάθετος στον  $x$  και τοπικά κάθετος στην δέσμη με κατεύθυνση προς τα επάνω.
- Ο άξονας  $z$  είναι τοπικά παράλληλος στη δέσμη και με κατεύθυνση τέτοια ώστε ένας παρατηρητής που κοιτάει προς αυτή να έχει το κέντρο του επιταχυντή στα αριστερά του.
- Η πολική γωνία  $\theta$  ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του θετικού άξονα  $z$  και του διανύσματος θέσης  $r$  με φορά από τον θετικό  $\theta = 0$  προς τον αρνητικό άξονα  $\theta = \pi$ .
- Η αζιμουθιακή γωνία  $\phi$  ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του θετικού άξονα  $x$  και της προβολής του διανύσματος θέσης στο επίπεδο  $x - y$  με δεξιόστροφη φορά ( $0 \leq \phi < 2\pi$ ).

Το AliRoot χαρακτηρίζει τις τροχιές με πέντε παραμέτρους:  $y$ ,  $z$ ,  $\sin \phi$ ,  $\tan \lambda$  (όπου  $\lambda = \pi/2 - \theta$ ) και  $1/p_T$  και τα αντίστοιχα σφάλματα  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_{\sin \phi}$ ,  $\sigma_{\tan \lambda}$  και  $\sigma_{1/p_T}$ . Οι παράμετροι αυτές ορίζονται σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων στραμμένο κατά γωνία  $\alpha$  (στο επίπεδο  $x - y$ ) σε σχέση με το καθολικό και προσδιορίζουν πλήρως την θέση μιας τροχιάς. Η στροφή κατά  $\alpha$  χρησιμοποιείται κατά την ανακατασκευή των τροχιών και επιτρέπει τον ίδιο χειρισμό των διαφορετικών τομέων των ανιχνευτών.

### 6.6.2 Ωκύτητα

Ωκύτητα ή rapidity  $y$  ορίζεται το μισό του λογαρίθμου του λόγου του αθροίσματος της ενέργειας και της ορμής του σωματιδίου κατά τη διεύθυνση των συγκρουόμενων δεσμών προς την διαφορά τους:

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z c}{E - p_z c} \quad (7)$$

### 6.6.3 Ψευδοωκύτητα

Ψευδοωκύτητα ή pseudorapidity  $n$  ορίζεται το αντίθετο του λογαρίθμου της εφαπτομένης του μισού της γωνίας  $\theta$  που σχηματίζει η ορμή ενός σωματιδίου με τη διεύθυνση των συγκρουόμενων δεσμών:

$$n = -\ln \left( \tan \frac{\theta}{2} \right) \quad (8)$$

### 6.6.4 Εξάρτηση του αριθμού των ανιχνεύσιμων σωματιδίων από την θέση και την ορμή

Έστω ότι στο σημείο  $x_0$  παράγονται  $N_0$  σωματάρια και έστω  $L = v\gamma\tau = \frac{p\tau}{m}$  το μέσο μήκος διαδρομής που διανύει κάθε σωματάρια πριν διασπαστεί,  $\tau$  ο μέσος χρόνος ζωής του,  $v$  η ταχύτητα,  $p$  η ορμή και  $m$  η μάζα του. Σύμφωνα με τον εκθετικό νόμο διάσπασης, σε απόσταση  $x$  ο αριθμός των σωματιδίων που επιβιώνουν είναι:

$$N = N_0 e^{-x/L} = N_0 e^{-\frac{xm}{p\tau}} \quad (9)$$

### 6.6.5 Ορμή των θυγατρικών σωματιδίων στο σύστημα του κέντρου ορμής για τις διασπάσεις $K^+/\pi^+ \rightarrow \pi^+/\mu^+/e^+ + \pi^0/\nu_\mu/\nu_e$

Έστω  $\vec{p}_m, \vec{p}_d, \vec{p}_\nu$  οι ορμές,  $E_m, E_d, E_\nu$  οι ενέργειες και  $m_m, m_d, m_\nu$  οι μάζες του μητρικού σωματιδίου, του θυγατρικού σωματιδίου και του νετρίνου αντίστοιχα στο σύστημα του κέντρου ορμής - δηλαδή στο σύστημα ηρεμίας του μητρικού σωματιδίου. Ισχύουν:

$$\vec{p}_m = \vec{p}_d + \vec{p}_\nu \xrightarrow{\vec{p}_m=0} \vec{p}_d = -\vec{p}_\nu \quad (10)$$

$$m_m = \sqrt{E_m^2 - p_m^2} \xrightarrow{\vec{p}_m=0} m_m = E_m \quad (11)$$

Θεωρώντας μηδενική τη μάζα του νετρίνου προκύπτει:

$$E_\nu = \sqrt{p_\nu^2 + m_\nu^2} \xrightarrow{m_\nu=0} E_\nu \approx p_\nu \quad (12)$$

Και λόγω διατήρησης της ενέργειας:

$$\begin{aligned} E_m &= E_d + E_\nu \xrightarrow{(11),(12)} m_m = \sqrt{p_d^2 + m_d^2} + p_\nu \Rightarrow (m_m - p_\nu)^2 = p_d^2 + m_d^2 \Rightarrow \\ m_m^2 + p_\nu^2 - 2m_m p_\nu &= p_d^2 + m_d^2 \xrightarrow{10} 2m_m p_\nu = m_m^2 - m_d^2 \Rightarrow p_d = p_\nu = \frac{m_m^2 - m_d^2}{2m_m} \end{aligned} \quad (13)$$

Άρα το μέτρο της ορμής των προϊόντων της διάσπασης  $K^+ \rightarrow \pi^+/\mu^+/e^+ + \pi^0/\nu_\mu/\nu_e$  είναι:  $p_d \approx 236 \text{ MeV}/c$  και της διάσπασης  $\pi^+ \rightarrow \pi^+/\mu^+/e^+ + \nu_\mu/\nu_e$  είναι:  $p_d \approx 30 \text{ MeV}/c$ .

### 6.6.6 Αναλλοίωτη μάζα του μητρικού σωματιδίου για τις διασπάσεις $K^+/\pi^+ \rightarrow \pi^+/\mu^+/e^+ + \pi^0/\nu_\mu/\nu_e$

Έστω  $\vec{p}_m, \vec{p}_d, \vec{p}_\nu$  οι ορμές,  $E_m, E_d, E_\nu$  οι ενέργειες και  $m_m, m_d, m_\nu$  οι μάζες του μητρικού σωματιδίου, του θυγατρικού σωματιδίου και του νετρίνου αντίστοιχα. Η ορμή και η ενέργεια διατηρούνται άρα:

$$\vec{p}_m = \vec{p}_d + \vec{p}_\nu \Rightarrow \vec{p}_\nu = \vec{p}_m - \vec{p}_d = \Delta\vec{p} \quad (14)$$

$$E_m = E_d + E_\nu \quad (15)$$

Θεωρώντας μηδενική τη μάζα του νετρίνου προκύπτει:

$$E_\nu = \sqrt{p_\nu^2 + m_\nu^2} \stackrel{m_\nu=0}{\Rightarrow} E_\nu \approx p_\nu = \Delta\vec{p} \quad (16)$$

Έτσι, η αναλλοίωτη μάζα του μητρικού σωματιδίου θα είναι:

$$\begin{aligned} m_m &= \sqrt{E_m^2 - p_m^2} \stackrel{(15)}{\Rightarrow} m_m = \sqrt{(E_d + E_\nu)^2 - p_m^2} \Rightarrow m_m = \sqrt{(E_d + p_\nu)^2 - p_m^2} \Rightarrow \\ m_m &= \sqrt{(\sqrt{p_d^2 + m_d^2} + \Delta\vec{p})^2 - p_m^2} \end{aligned} \quad (17)$$

### 6.6.7 Μέγιστη γωνία του kink στο σύστημα του κέντρου ορμής

Έστω  $p_L$ ,  $p_T$  και  $\theta$  η διαμήκης, η εγκάρσια ορμή και η γωνία μεταξύ του διανύσματος της ορμής και του άξονα  $z$  στο σύστημα του εργαστηρίου και του κέντρου μάζας αντίστοιχα. Ο μετασχηματισμός Lorentz των ορμών είναι:

$$p_{TCM} = p_{TLAB} \quad (18)$$

$$p_{LCM} = \gamma(p_{LAB} - \beta E_{LAB}) \quad (19)$$

όπου

$$\vec{\beta} = \frac{\vec{p}_m}{E_m} \quad (20)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (21)$$

Άρα:

$$\tan \theta_{CM} = \frac{p_{TCM}}{p_{LCM}} = \frac{p_{TLAB}}{\gamma(p_{LAB} - \beta E_{LAB})} = \frac{p_{LAB} \sin \theta_{LAB}}{\gamma p_{LAB} \cos \theta_{LAB} - \gamma \beta E_{LAB}} \quad (22)$$

Το μέγιστο της γωνίας μπορεί να υπολογιστεί από το μηδενισμό της παραγώγου της:

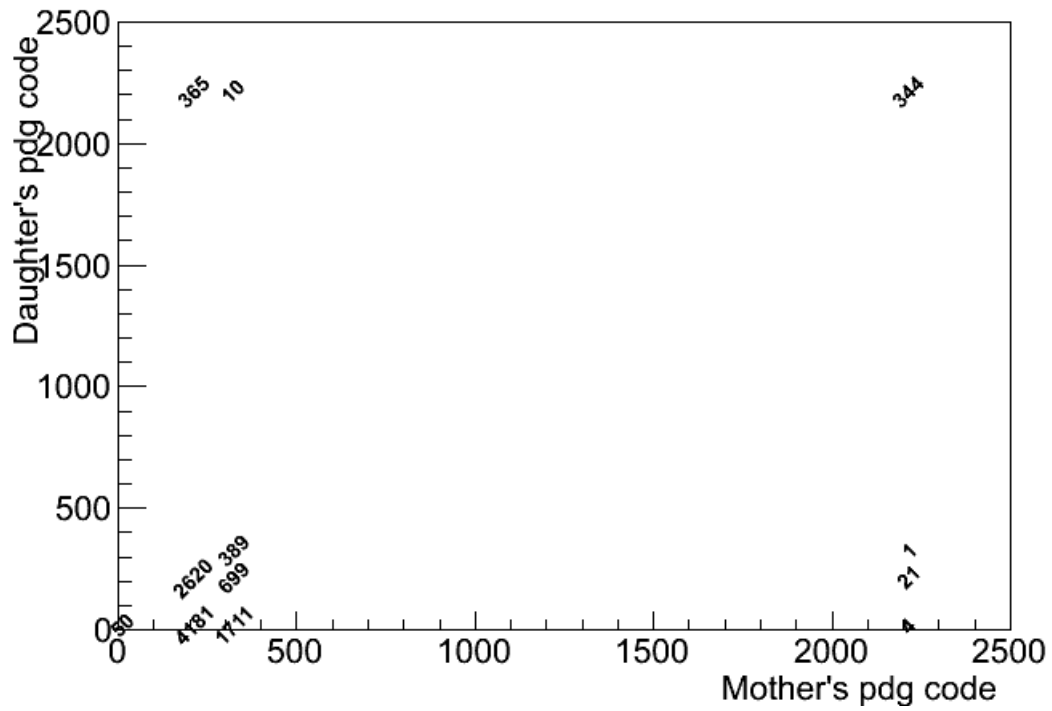
$$\begin{aligned} \frac{d(\tan \theta_{CM})}{d\theta_{LAB}} &= 0 \\ \Rightarrow \frac{\gamma p_{LAB}^2 \cos^2 \theta_{LAB} - \beta \gamma p_{LAB} E_{LAB} \cos \theta_{LAB} + \gamma p_{LAB}^2 \sin^2 \theta_{LAB}}{(\gamma p_{LAB} \cos \theta_{LAB} - \gamma \beta E_{LAB})^2} &= 0 \\ \Rightarrow \frac{\gamma p_{LAB} (p_{LAB} - \beta \gamma E_{LAB} \cos \theta_{LAB})}{(\gamma^2 (p_{LAB} \cos \theta_{LAB} - \gamma \beta E_{LAB})^2)} &= 0 \Rightarrow \begin{cases} p_{LAB} (p_{LAB} - \beta \gamma E_{LAB} \cos \theta_{LAB}) = 0 \\ (\gamma (p_{LAB} \cos \theta_{LAB} - \gamma \beta E_{LAB})) \neq 0 \end{cases} \\ \Rightarrow \cos \theta_{CM} &= \frac{p_{LAB}}{\beta E_{LAB}} \end{aligned} \quad (23)$$

$$(22) \stackrel{(23)}{\Rightarrow} \tan \theta_{CM}^{MAX} = \frac{p_{LAB} \sqrt{1 - \cos^2 \theta_{LAB}}}{(\gamma (p_{LAB} \cos \theta_{LAB} - \gamma \beta E_{LAB}))} \quad (24)$$

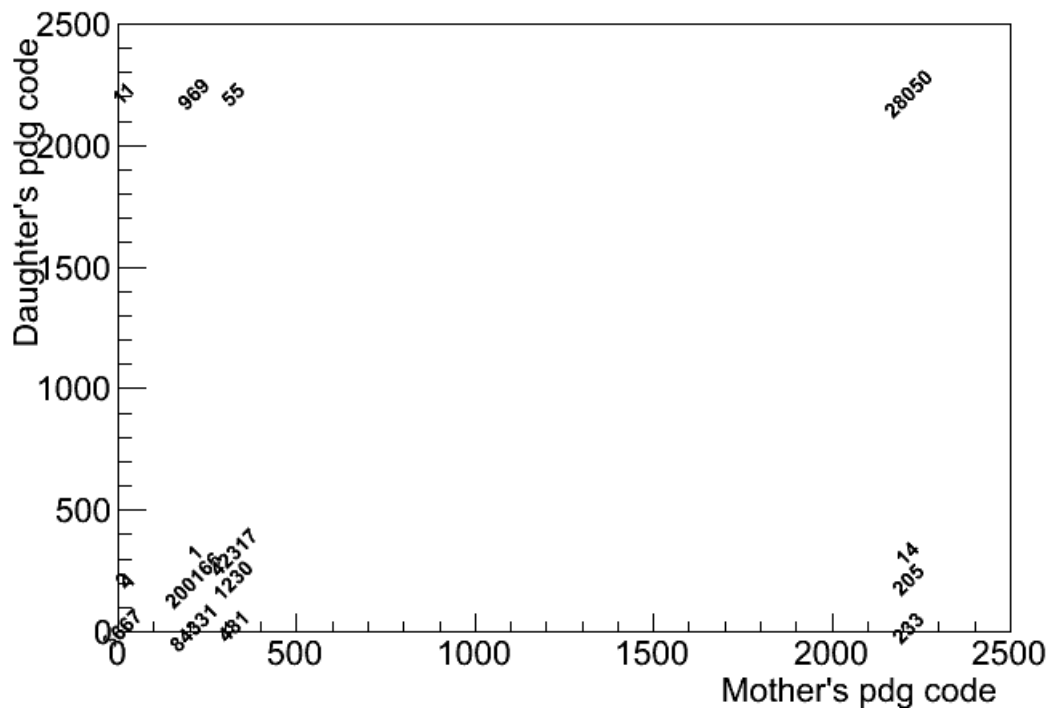
### 6.6.8 Ελάχιστη απόσταση από κόμβο (Distance of Closest Approach - DCA)

Ελάχιστη απόσταση τροχιάς από κόμβο (Distance of Closest Approach - DCA) ορίζεται η απόσταση του πλησιέστερου σε αυτόν σημείου της. Στην εργασία αυτή, η επιλογή των πρωτεύουσών τροχιών από τις ανακατασκευασμένες γίνεται με βάση την απόστασή τους από τον κύριο κόμβο αλληλεπίδρασης.

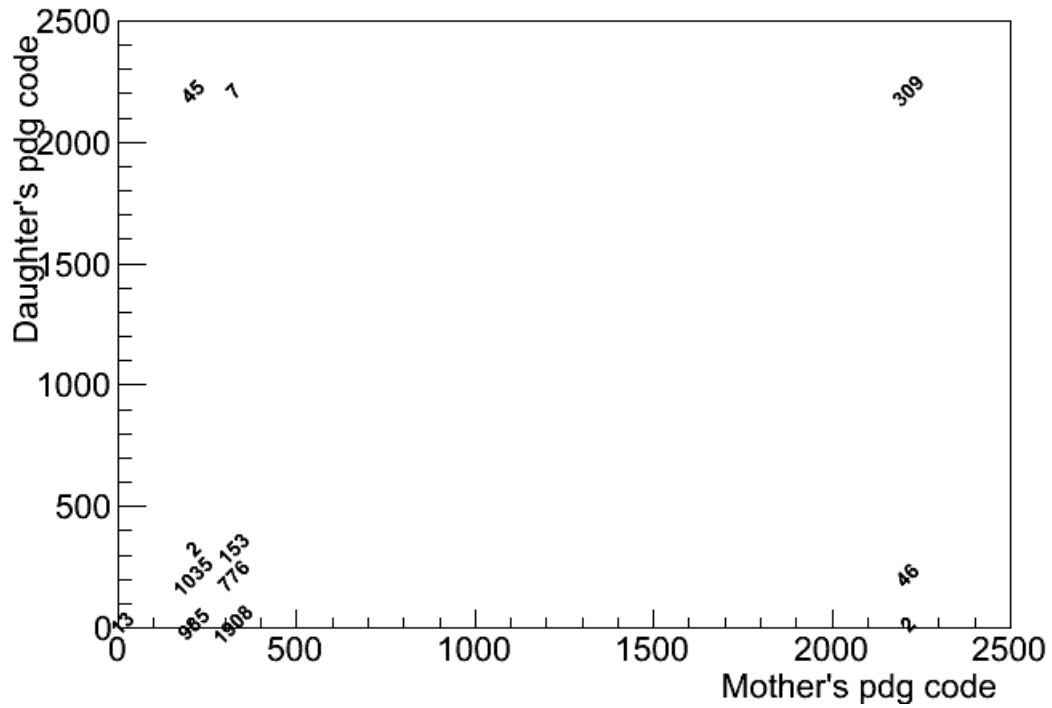
### 6.7 Ιστογράμματα σωματιδιακών κωδικών



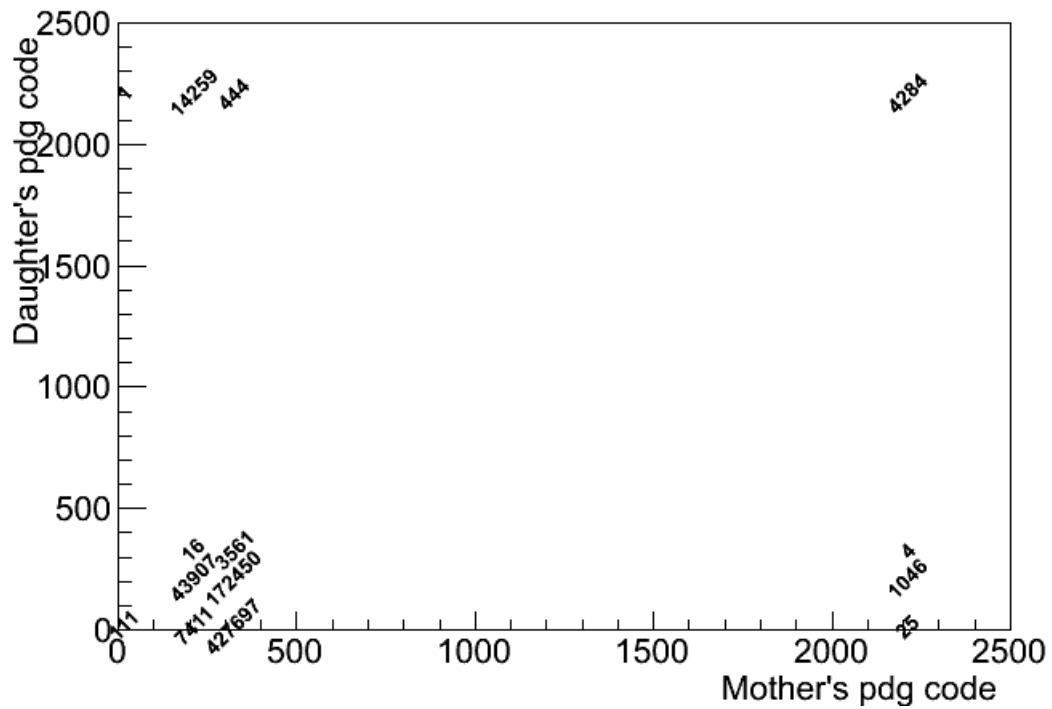
Σχήμα 92: Κωδικοί σωματιδίων που απορρίπτονται από την επιλογή  $0.3\text{cm} < |Z| < 225\text{cm}$



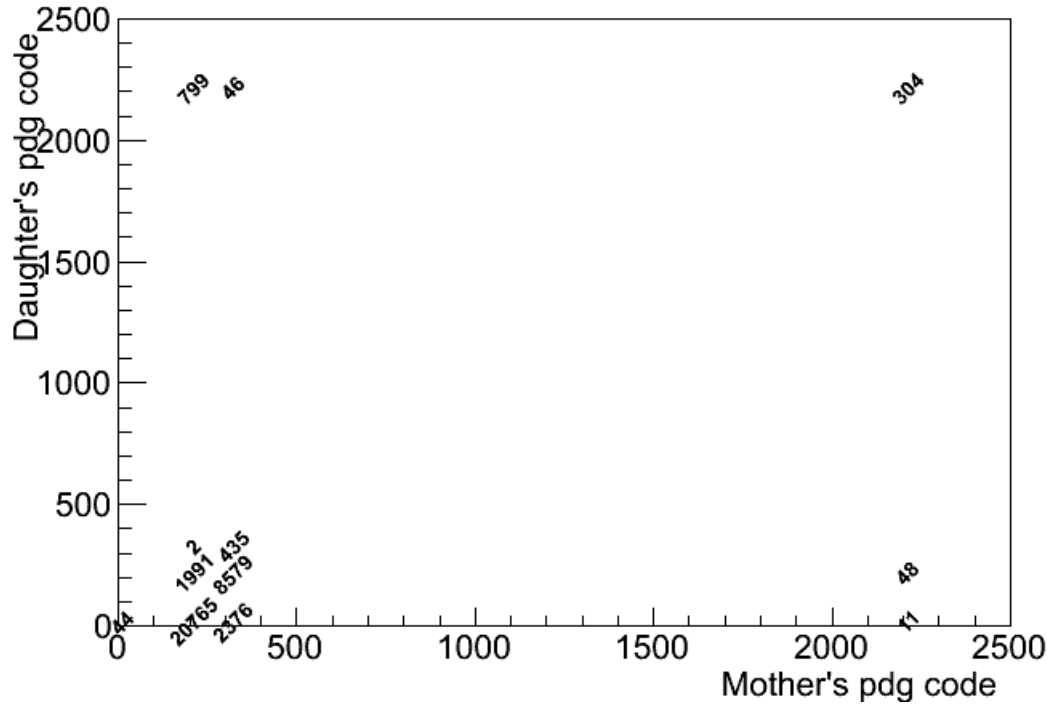
Σχήμα 93: Κωδικοί σωματιδίων που απορρίπτονται από την επιλογή  $0.7 < p_{\text{mother}}/p_{\text{track}} < 1.3$



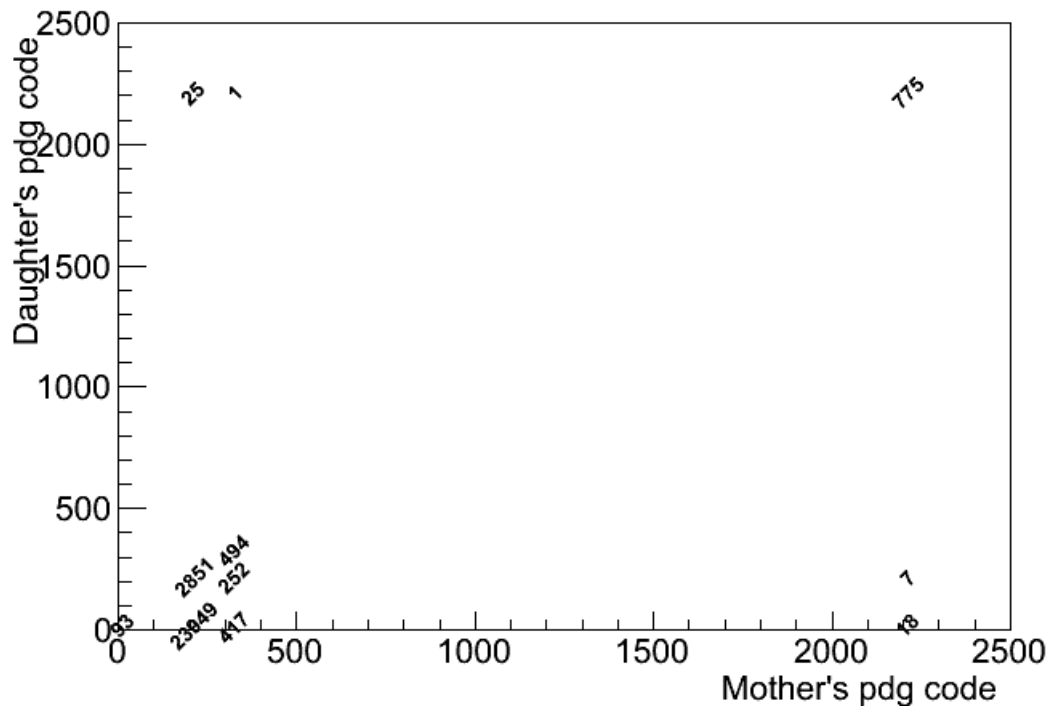
Σχήμα 94: Κωδικοί σωματιδίων που απορρίπτονται από την επιλογή Kink Angle  $> 1^\circ$



Σχήμα 95: Κωδικοί σωματιδίων που απορρίπτονται από την επιλογή  $0.012 < q_T < 0.04 \text{ GeV}/c$



Σχήμα 96: Κωδικοί σωματιδίων που απορρίπτονται από την επιλογή  $\theta_{\pi_{max}} < \theta < \theta_{K_{max}}$



Σχήμα 97: Κωδικοί σωματιδίων που απορρίπτονται από την επιλογή της σχέσης μεταξύ  $N_{TPC\ clusters}$  και ακτίνας  $R$





## Αναφορές

- [1] CERN Communication Group. CERN faq - LHC: the guide, February 2009. CERN-Brochure-2009-003-Eng.
- [2] L. R. Evans and Ph. Bryant. LHC Machine. *J. Instrum.*, 3, 2008. This report is an abridged version of the LHC Design Report (CERN-2004-003).
- [3] A. Breskin and R. Voss. *The CERN Large Hadron Collider: Accelerator and Experiments*. CERN, Geneva, 2009.
- [4] F. Carminati and al. (ALICE Collaboration). ALICE: Physics performance report, volume I. *J. Phys. G*, 30:1517–1763, 2004.
- [5] K. Aamodt and al. (ALICE Collaboration). The ALICE experiment at the CERN LHC. A Large Ion Collider Experiment. *J. Instrum.*, 3:S08002. 259 p, 2008. Also published by CERN Geneva in 2010.
- [6] B. Alessandro and al. (ALICE Collaboration). ALICE: Physics performance report, volume II. *J. Phys. G*, 32:1295–2040, 2006.
- [7] Al. Kalweit (for the ALICE Collaboration). Particle Identification in the ALICE Experiment. *J. Phys. G*, 38(arXiv:1107.1514), Jul 2011. Quark Matter 2011 Proceedings, 22 - 28 May 2011, Annecy, France.
- [8] M. Floris (for the ALICE Collaboration). Identified particles in pp and Pb-Pb collisions at LHC energies with the ALICE detector. *J. Phys. G*, 38(arXiv:1108.3257), Aug 2011. Quark Matter 2011 Proceedings, 22 - 28 May 2011, Annecy, France.
- [9] M. Chojnacki (for the ALICE Collaboration). Measurement of  $\pi$ , K, p transverse momentum spectra with ALICE in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 0.9$  and 7 TeV. *J. Phys. G*, 38(arXiv:1109.6744), Oct 2011. Quark Matter 2011 Proceedings, 22 - 28 May 2011, Annecy, France.
- [10] K. Aamodt and al. (ALICE Collaboration). Production of pions, kaons and protons in pp collisions at  $\sqrt{s} = 900$  GeV with ALICE at the LHC. oai:cds.cern.ch:1314539. *Eur. Phys. J. C*, 71(arXiv:1101.4110. CERN-PH-EP-2010-085):1655–1685, Dec 2010.
- [11] K Aamodt and al. (ALICE Collaboration). Strange particle production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 0.9$  TeV with ALICE at the LHC. oai:cds.cern.ch:1310328. *Eur. Phys. J. C*, 71(arXiv:1012.3257. CERN-PH-EP-2010-065):1594–1628, Dec 2010.
- [12] A. Belogianni, P. Ganoti, F. Roukoutakis, and M. Spyropoulou-Stassinaki. Estimation of kaon and pion yields from the decay kaon/pion to muon + muon neutrino kink topology, in one year of Pb-Pb for ALICE. Technical Report ALICE-INT-2006-012. CERN-ALICE-INT-2006-012, CERN, Geneva, Jul 2006.
- [13] F. Barile1, D. Di Bari1, and G. Volpe. Charged hadrons spectra in p-p collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV measured with the ALICE-HMPID detector. Technical Report ALICE-INT-2012-xxx, CERN, Geneva, Aug 2012.
- [14] K Aamodt and al. (ALICE Collaboration). First proton-proton collisions at the LHC as observed with the ALICE detector: measurement of the charged-particle pseudorapidity density at  $\sqrt{s}=900$  GeV. *Eur. Phys. J. C*, 65(1-2):111–125, 2010.
- [15] K. Aamodt and al. (ALICE Collaboration). Charged-particle multiplicity measurement in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 0.9$  and 2.36 TeV with ALICE at LHC. *Eur. Phys. J. C*, 68(arXiv:1004.3034):89–108, Apr 2010.

- [16] K Aamodt and al. (ALICE Collaboration). Charged-particle multiplicity measurement in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with ALICE at LHC. *Eur. Phys. J. C*, 68(arXiv:1004.3514. 3-4):345–354, Apr 2010.
- [17] Ralf Rapp. Hadro chemistry and evolution of (anti-) baryon densities at RHIC. *Phys.Rev.*, C66:017901, 2002.
- [18] Ralf Rapp and Edward V. Shuryak. Resolving the anti-baryon production puzzle in high-energy heavy ion collisions. *Phys.Rev.Lett.*, 86:2980–2983, 2001.
- [19] Chungsik Song and Volker Koch. Chemical relaxation time of pions in hot hadronic matter. *Phys.Rev.*, C55:3026–3037, 1997.
- [20] Johann Rafelski, Jean Letessier, and Giorgio Torrieri. Strange hadrons and their resonances: A Diagnostic tool of QGP freezeout dynamics. *Phys.Rev.*, C64:054907, 2001.
- [21] Ralf Rapp.  $\pi^+\pi^-$  emission in high-energy nuclear collisions. *Nucl.Phys.*, A725:254–268, 2003.
- [22] E.V. Shuryak and G.E. Brown. Matter induced modification of resonances at RHIC freezeout. *Nucl.Phys.*, A717:322–335, 2003.
- [23] Jurgen Schaffner-Bielich, Raffaele Mattiello, and Heinz Sorge. Dibaryons with strangeness: Their weak nonleptonic decay using SU(3) symmetry and how to find them in relativistic heavy ion collisions. *Phys.Rev.Lett.*, 84:4305–4308, 2000.
- [24] R. Rapp and J. Wambach. Chiral symmetry restoration and dileptons in relativistic heavy ion collisions. *Adv.Nucl.Phys.*, 25:1, 2000.
- [25] J. Beringer and al. (Particle Data Group). The Review of Particle Physics. *Phys. Rev. D*, 86, 2012.
- [26] A. Badalá and al. (ALICE Collaboration). Production of  $K^*(892)$  and  $\phi(1020)$  in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV . *Eur. Phys J.*, 72, 2012.
- [27] K Aamodt and al. (ALICE Collaboration). Transverse momentum spectra of charged particles in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 900$  GeV with ALICE at the LHC. *Phys. Lett. B*, 693(arXiv:1007.0719):53–68, Jul 2010.
- [28] R. Preghenella (for the ALICE Collaboration). Spectra of identified hadrons with the ALICE detector in pp and Pb-Pb collisions at the LHC. (arXiv:1203.5904), Mar 2012.
- [29] L. S. Barnby (for the ALICE Collaboration). Strange and identified hadron production at the LHC with ALICE. Oct 2011.
- [30] R. Preghenella (for the ALICE Collaboration). Transverse momentum spectra of identified charged hadrons with the ALICE detector in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV. 2011.
- [31] L. Milano (for the ALICE Collaboration). Measurement of identified charged hadron spectra with the ALICE experiment at the LHC. *J.Phys.Conf.Ser.*, 316, 2011.
- [32] Τσουμάκη Παρασκευή. Ταυτοποίηση φορτισμένων καονίων μέσω της τοπολογίας των ασθενών τους διασπάσεων στα δεδομένα αλληλεπιδράσεων pp ( $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ ) του πειράματος ALICE. Master's thesis, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής, Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων, 2012.
- [33] M. Spyropoulou-Stassinaki (for the ALICE Collaboration). Identified hadrons in pp and Pb-Pb collisions with the ALICE experiment at the LHC. In *International Conference on New Frontiers in Physics, 28 Jun 2012 - 04 Jul 2012, Kolybari, Crete, Greece, Jun 2012.*